

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของพัดลม

นายปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของพัดลม

นายปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2569
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงร่างวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของพัดลม

โดย นายปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

..... รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติกะ บุนนาค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชัยยศ ดำรงกิจโกศล)

..... กรรมการภายนอก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

ชื่อ : นายปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

ชื่อวิทยานิพนธ์ : แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของพัดลม

สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์

ปีการศึกษา : 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ควบคุมด้วยความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อประเมินความสามารถในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารและการลดการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยอาศัยสมการสมดุลมวลของ CO_2 ภายใต้สมมติฐานห้องแบบโซนเดียวและอากาศผสมกันอย่างสม่ำเสมอ ห้องกรณีศึกษามีขนาด 4 × 5 × 3 เมตร หรือมีปริมาตร 60 ลูกบาศก์เมตร โดยกำหนดความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคารเท่ากับ 400 ppm และใช้อัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานเท่ากับ 0.31 L/min-person

การศึกษาเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ S0: Passive/Natural Infiltration, S1: Fixed Mechanical Ventilation และ S2: CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ภายใต้รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 ซึ่งมีจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดแตกต่างกัน ผลการตรวจสอบแบบจำลองพบว่า ความเข้มข้น CO_2 เพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งาน และลดลงเมื่ออัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับหลักสมดุลมวลของ CO_2

ผลการจำลองพบว่า กรณี S0 มีความเข้มข้น CO_2 สูงสุด 3362.5 ppm และมีช่วงเวลาที่ CO_2 เกิน 1000 ppm เท่ากับ 26.683 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการพึ่งพาการรั่วซึมอากาศพื้นฐานเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก ส่วนกรณี S1 สามารถควบคุม CO_2 ได้ดีที่สุด แต่ใช้พลังงานพัดลม 0.9300 kWh ในช่วงเวลาจำลอง 3 วัน ขณะที่ S2 มีค่า CO_2 สูงสุด 1025.4 ppm มีช่วงเวลาเกินเกณฑ์ 0.4167 ชั่วโมง และใช้พลังงานพัดลม 0.6855 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงาน 26.29% เมื่อเทียบกับ S1 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ระบบ CO_2-Based DCV

สามารถสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในห้องสำนักงานขนาดเล็กที่มีจำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตามเวลา

(มีจำนวนทั้งสิ้น 227 หน้า)

คำสำคัญ : การระบายอากาศตามความต้องการ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คุณภาพอากาศภายในอาคาร MATLAB/Simulink ห้องสำนักงานขนาดเล็ก

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Poravit Bunnasitrat

Thesis Title : A Simulation-Based Performance Assessment of CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation for Indoor Air Quality and Fan Energy Reduction in a Small Office

Major Field : Energy Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Thesis Advisor : Associate Professor Dr. Preeda Chantawong

Academic Year : 2026

ABSTRACT

This research aims to develop a CO_2-based demand-controlled ventilation model for a small office room to evaluate indoor air quality control and fan energy reduction. The model was developed in MATLAB/Simulink using a CO_2 mass balance equation under a single-zone and well-mixed air assumption. The case-study room was 4 × 5 × 3 m, with a total volume of 60 m^3. The outdoor CO_2 concentration was set at 400 ppm, and the occupant CO_2 generation rate was defined as 0.31 L/min-person.

Three ventilation strategies were compared: S0, passive/natural infiltration; S1, fixed mechanical ventilation; and S2, CO_2-based demand-controlled ventilation. The simulations were conducted under three occupancy scenarios, D1–D3, representing different levels of room usage and peak occupancy. Model validation showed that indoor CO_2 concentration increased with the number of occupants and decreased as the air change rate increased, which is consistent with the CO_2 mass balance principle.

The simulation results showed that S0 produced the highest CO_2 concentration, with a peak value of 3362.5 ppm and 26.683 hours above the 1000 ppm reference level, indicating that background infiltration alone was insufficient for maintaining acceptable indoor air quality in the small office room. S1 provided the best CO_2 control but consumed 0.9300 kWh of fan energy during the 3-day simulation period. In comparison, S2 achieved a peak CO_2 concentration of 1025.4

ppm, with only 0.4167 hours above the reference level, while reducing fan energy consumption to 0.6855 kWh. This represents a 26.29% fan energy saving compared with S1. The results indicate that the CO_2-based DCV strategy can provide a practical balance between indoor air quality and fan energy consumption, especially for small office spaces with time-varying occupancy.

(Total 227 Pages)

Keywords: Demand-Controlled Ventilation, Carbon Dioxide, Indoor Air Quality, MATLAB/Simulink, Small Office



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และถ่ายทอดองค์ความรู้ทางวิชาการตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว เพื่อน และผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาของการศึกษาและการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นส่วนหนึ่งแห่งความกตัญญูกตเวทีแด่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

ปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูปภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1
1.2 ปัญหาและที่มาของปัญหาวิจัย 3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 4
1.5 ขอบเขตตัวแปรในการวิจัย 5
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ 7
บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 10
2.2 ระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก 24
2.3 สมการและตัวชี้วัดที่ใช้ในแบบจำลอง 33
2.4 การประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ 46
2.5 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 56
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย 61
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย 61
3.2 ขอบเขตและสมมติฐานของแบบจำลอง 63
3.3 การพัฒนาแบบจำลอง CO_2ภายในห้อง 70
3.4 การออกแบบระบบระบายอากาศ 74
3.5 การพัฒนาแบบจำลองใน MATLAB/Simulink 77
3.6 แนวทางการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง 94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ 97

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย 107

4.1 การตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Validation) 107

4.2 ผลของรูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 ต่อความเข้มข้น CO_2 115

4.3 ผลเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 119

4.4 ผลการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ 122

4.5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ 125

4.6 การบูรณาการ KPI และการวิเคราะห์ Tornado Plot 135

4.7 ผลกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ 138

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 150

5.1 สรุปผลการวิจัย 150

5.2 อภิปรายผล 157

5.3 ข้อเสนอแนะ 160

บรรณานุกรม **162**

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจำเพาะของพัดลมระบายอากาศที่ใช้ในงานวิจัย 166

ภาคผนวก ข

โค้ด MATLAB และโครงสร้างแบบจำลอง MATLAB/Simulink ที่ใช้ในงานวิจัย 173

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยระดับชาติ ณ มหาวิทยาลัยปทุมธานี แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงาน แสงอาทิตย์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน 192

ประวัติผู้เขียน **227**

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ค่าอัตราการเกิด CO_2 ที่ใช้ในแบบจำลอง 15
ตารางที่ 2-2 ค่า ACH ที่ใช้ในแบบจำลอง 18
ตารางที่ 2-3 ประเภทของพัดลมระบายอากาศและความเหมาะสมในการใช้งาน 30
ตารางที่ 2-4 การกำหนดค่า ACH_min และ ACH_max จากอัตราการไหลของพัดลม 33
ตารางที่ 2-5 ตัวแปรสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER ที่ใช้ในงานวิจัย 51
ตารางที่ 2-6 ข้อมูลคุณภาพอากาศจาก Air4Thai ที่ใช้ในงานวิจัย 52
ตารางที่ 2-7 การเชื่อมโยงข้อมูลในแบบจำลองกรณีศึกษาเพิ่มเติม 54
ตารางที่ 3-1 จำนวนผู้ใช้งานตามรูปแบบ Representative Occupancy Scenarios 65
ตารางที่ 3-2 สรุปขอบเขตของระบบและตัวแปรในการจำลอง 68
ตารางที่ 3-3 สรุปพารามิเตอร์และข้อจำกัดของแบบจำลอง 69
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง CO_2 72
ตารางที่ 3-5 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในแบบจำลอง 80
ตารางที่ 3-6 ข้อมูลภายนอกที่ใช้ในการจำลอง 99
ตารางที่ 3-7 รูปแบบการจำลองของกรณีศึกษาเพิ่มเติม 100
ตารางที่ 3-8 พารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง 101
ตารางที่ 3-9 องค์ประกอบของพลังงานที่ใช้ในการประเมิน 102
ตารางที่ 3-10 ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินกรณีศึกษาเพิ่มเติม 103
ตารางที่ 4-1 แสดงผล Peak CO_2 และ Average CO_2 ภายใต้จำนวนผู้ใช้งานที่แตกต่างกัน 108
ตารางที่ 4-2 ผลของค่า ACH ต่อความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง 111
ตารางที่ 4-3 สรุปผลการตอบสนองของระบบ DCV ในกรณี S2 115
ตารางที่ 4-4 ภาระการใช้งานของห้องในกรณี D1–D3 116
ตารางที่ 4-5 สรุปผล CO_2 ของรูปแบบการใช้งาน D1–D3 ภายใต้กลยุทธ์ S0, S1 และ S2 117
ตารางที่ 4-6 ผลเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของกลยุทธ์ S0, S1 และ S2 121
ตารางที่ 4-7 ผลการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าของระบบระบายอากาศ S1 และ S2 125
ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า ACH_min ต่อสมรรถนะของระบบ S2 127
ตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า ACH_max ต่อสมรรถนะของระบบ S2 129
ตารางที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า CO_2 setpoint ต่อสมรรถนะของระบบ S2 131

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดต่อสมรรถนะของระบบ S2 133
ตารางที่ 4-12 ค่า KPI ฐานของระบบ S2 สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหว 135
ตารางที่ 4-13 สรุปผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อ KPI ของระบบ S2 136
ตารางที่ 4-14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบภายใต้ Mode A และ Mode B 147
ตารางที่ 5-1 สรุปผลเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานห้องเดียวกัน 152
ตารางที่ 5-2 สรุปผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์หลักของระบบ S2 153
ตารางที่ 5-3 สรุปข้อค้นพบสำคัญจากกรณีศึกษาเพิ่มเติม 156

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคาร ความสบายเชิงความร้อน และการระบายอากาศ 1
ภาพที่ 1-2 แนวคิดการควบคุมระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยความเข้มข้น CO_2 2
ภาพที่ 1-3 แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework) 6
ภาพที่ 2-1 แนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน การเกิด CO_2 และการระบายอากาศในห้อง 11
ภาพที่ 2-2 องค์ประกอบของคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) 12
ภาพที่ 2-3 แนวคิดการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคารและการสะสมภายในห้องแบบโซนเดียว 14
ภาพที่ 2-4 แนวคิดการระบายอากาศและค่า Air Changes per Hour (ACH) ในห้องแบบโซนเดียว 17
ภาพที่ 2-5 แนวคิดของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (DCV) 20
ภาพที่ 2-6 แนวคิดการควบคุมระบบระบายอากาศด้วยความเข้มข้น CO_2 22
ภาพที่ 2-7 แนวคิดระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว 24
ภาพที่ 2-8 แนวคิดห้องสำนักงานแบบโซนเดียวสำหรับการจำลอง CO_2 26
ภาพที่ 2-9 เปรียบเทียบแนวคิดกลยุทธ์การระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก 27
ภาพที่ 2-10 แนวทางการเลือกพัดลมระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก 29
ภาพที่ 2-11 ประเภทพัดลมระบายอากาศ 30
ภาพที่ 2-12 การกำหนดค่า ACH_min และ ACH_max จากสมรรถนะพัดลมสองระดับความเร็ว. 32
ภาพที่ 2-13 กรอบสมการและตัวชี้วัดสำหรับแบบจำลอง CO_2-Based Ventilation 34
ภาพที่ 2-14 หลักการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ใช้กับระบบระบายอากาศ.. 48
ภาพที่ 2-15 โครงสร้างการใช้ข้อมูลสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER 50
ภาพที่ 2-16 การนำข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจาก Air4Thai เข้าสู่แบบจำลอง 52
ภาพที่ 2-17 การประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ 54
ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของแบบจำลองระบบระบายอากาศแบบ DCV 61
ภาพที่ 3-2 ลักษณะห้องสำนักงานขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษา 63
ภาพที่ 3-3 สมมติฐานของแบบจำลองห้องแบบ Single-Zone และ Well-Mixed Air 67
ภาพที่ 3-4 ขอบเขตกรณีศึกษาระบบระบายอากาศ S0, S1 และ S2 69

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3-5 หลักการสมดุลมวลของ CO_2 ภายในห้อง 74
ภาพที่ 3-6 แสดง (a) พัดลมระบายอากาศ Kruger MTD100/1 (b) Performance Data Kruger MTD100/1 76
ภาพที่ 3-7 แสดง ขั้นตอนการคำนวณค่า ACH จากพัดลมอ้างอิง 77
ภาพที่ 3-8 แสดง Technical Data ของพัดลมระบายอากาศ Kruger MTD100/1 77
ภาพที่ 3-9 โครงสร้างแบบจำลองระบบ DCV ใน MATLAB/Simulink 79
ภาพที่ 3-10 Input & Parameter Initialization 81
ภาพที่ 3-11 การเชื่อมต่อสัญญาณ Occupancy เข้าสู่ Simulink 83
ภาพที่ 3-12 โครงสร้าง Scenario Manager ใน Simulink 85
ภาพที่ 3-13 Flowchart แสดงขั้นตอนการทำงานของ Scenario Manager 86
ภาพที่ 3-14 โครงสร้าง CO_2 Plant Model ใน Simulink 89
ภาพที่ 3-15 Input และ Output ของ Room_ CO_2_Plant 89
ภาพที่ 3-16 ขั้นตอนการทำงานของ CO_2 Plant Model 90
ภาพที่ 3-17 โครงสร้าง KPI Monitor ใน Simulink 92
ภาพที่ 3-18 โครงสร้าง Fan Energy Model ใน Simulink 93
ภาพที่ 3-19 แนวทางการตรวจสอบผลกระทบของจำนวนผู้ใช้งานต่อความเข้มข้น CO_2 95
ภาพที่ 3-20 แนวทางการตรวจสอบผลกระทบของอัตราการระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2 ... 95
ภาพที่ 3-21 แนวทางการตรวจสอบการตอบสนองของระบบระบายอากาศตามความต้องการ 96
ภาพที่ 3-22 ภาพรวมสรุปของ Additional Case Study ในโครงสร้างงานวิจัย 98
ภาพที่ 3-23 โครงสร้างการใช้ข้อมูลภายนอกและการเชื่อมโยงเข้าสู่แบบจำลองสำหรับกรณีศึกษา 99
ภาพที่ 3-24 โครงสร้างแบบจำลองกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับกรณี S2 101
ภาพที่ 3-25 แผนผังการไหลของพลังงานและการคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับกรณีศึกษา S2 103
ภาพที่ 3-26 ขั้นตอนการจำลองและการประมวลผลผลลัพธ์ของกรณีศึกษาเพิ่มเติม 105
ภาพที่ 4-1 ผลของจำนวนผู้ใช้งานต่อความเข้มข้น CO_2 108
ภาพที่ 4-2 Bar Chart Peak CO_2 ต่อจำนวนคน 109
ภาพที่ 4-3 ผลของอัตราการระบายอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง 110
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ACH กับค่า Peak CO_2 และ Average CO_2 111

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-5 การตอบสนองของระบบ DCV ต่อจำนวนผู้ใช้งานและความเข้มข้น CO_2 ตลอดช่วงเวลาจำลอง 3 วัน 113
ภาพที่ 4-6 ภาพขยายการตอบสนองของระบบ DCV ในช่วงวันที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด 114
ภาพที่ 4-7 ผลการตอบสนองของความเข้มข้น CO_2 ภายใต้รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 สำหรับกรณี S0, S1 และ S2 116
ภาพที่ 4-8 ค่า Peak CO_2 ภายใต้รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 สำหรับ S0, S1 และ S2 117
ภาพที่ 4-9 ชั่วโมงที่ CO_2 เกิน 1000 ppm ในเวลาที่มีผู้ใช้งานภายใต้รูปแบบการใช้งาน D1–D3 118
ภาพที่ 4-10 ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้น CO_2 ภายใต้กลยุทธ์ S0, S1 และ S2 120
ภาพที่ 4-11 ผลการเปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศภายใต้กลยุทธ์ S0, S1 และ S2 121
ภาพที่ 4-12 กำลังไฟฟ้าของพัดลมภายใต้กลยุทธ์ S1 และ S2 123
ภาพที่ 4-13 พลังงานสะสมของพัดลมภายใต้กลยุทธ์ S1 และ S2 124
ภาพที่ 4-14 ผลเปรียบเทียบพลังงานค่าไฟฟ้า และสัดส่วนการประหยัดพลังงานของ S2 เทียบกับ S1 124
ภาพที่ 4-15 ผลของค่า ACH_min ต่อสมรรถนะของระบบ S2 127
ภาพที่ 4-16 ผลของค่า ACH_max ต่อสมรรถนะของระบบ S2 129
ภาพที่ 4-17 ผลของค่า CO_2 setpoint ต่อสมรรถนะของระบบ S2 132
ภาพที่ 4-18 ผลของ Peak Occupancy ต่อสมรรถนะของระบบ S2 134
ภาพที่ 4-19 Tornado Plot ของผลกระทบต่อ KPI 137
ภาพที่ 4-20 ข้อมูล Time Series 91 วัน จาก NASA POWER (2025) และ Air4Thai (2025) ... 140
ภาพที่ 4-21 การใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายวันของระบบระบายอากาศภายใต้ Mode A . 140
ภาพที่ 4-22 แสดงผลรายเดือนของระบบระบายอากาศภายใต้ Mode A และ Mode B (ก) การใช้พลังงาน Energy (ข) ค่าใช้จ่าย Cost 141
ภาพที่ 4-23 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์รายเดือนภายใต้ Mode A และ Mode B 142
ภาพที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจำนวนผู้ใช้งาน . 143
ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศ (ACH) และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 7 วันแรกและตลอดระยะเวลา 91 วัน 144

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-26 สรุปผลการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารจากการกระจายตัวของ CO_2 ความถี่สะสม ระยะเวลาที่เกินเกณฑ์ และความเข้มข้น CO_2 ในช่วง 7 วันแรก 144
ภาพที่ 4-27 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในอาคารในช่วง 7 วันแรกและตลอดระยะเวลา 91 วัน 145
ภาพที่ 4-28 ผลการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายรายเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐาน S0 ภายใต้ Mode A และ Mode B 146
ภาพที่ 4-29 Trade-off แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 148

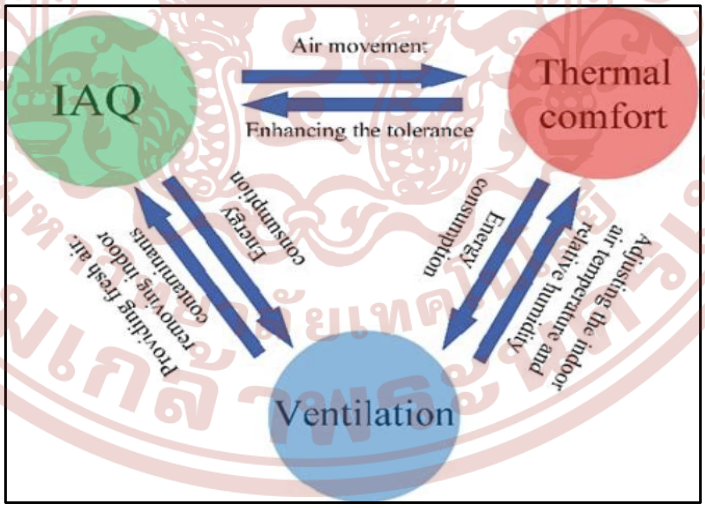
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน อาคารสำนักงานขนาดเล็ก (Small Office) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศและระบบระบายอากาศ ซึ่งเป็นระบบสำคัญที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) และความสบายของผู้ใช้งานภายใต้สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูง ระบบปรับอากาศจึงต้องทำงานต่อเนื่องในช่วงเวลาทำงาน ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง

การระบายอากาศ (Ventilation) เป็นองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยเฉพาะการลดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดจากการหายใจของผู้ใช้งานภายในห้อง ค่า CO_2 จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความเพียงพอของการระบายอากาศ (Ventilation Adequacy Indicator) ตามแนวทางของ ASHRAE Standard 62.1 ซึ่งระบุว่าหากความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารสูงเกินประมาณ 1000 ppm อาจเริ่มส่งผลต่อความสบายและประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้งาน

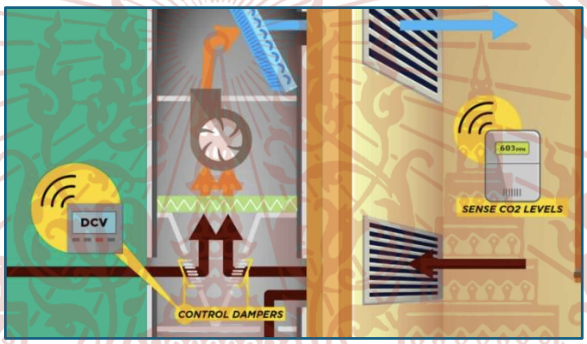


ภาพที่ 1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคาร ความสบายเชิงความร้อน และการระบายอากาศ

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ห้องสำนักงานขนาดเล็กมักมีจำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น บางช่วงมีผู้ใช้งานเพียง 1–2 คน ขณะที่บางช่วงอาจมีผู้มาติดต่อหรือมีการประชุมย่อย ส่งผลให้ความต้องการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามจำนวนคน หากใช้ระบบระบายอากาศแบบคงที่

ตลอดเวลา (Fixed Ventilation) อาจทำให้เกิดการระบายอากาศมากเกินความจำเป็น (Over-Ventilation) และทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงโดยไม่จำเป็น

ด้วยเหตุนี้ แนวคิดการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการจริง (Demand-Controlled Ventilation: DCV) จึงได้รับความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะระบบที่ใช้ความเข้มข้น CO_2 เป็นตัวแปรควบคุมอัตราการระบายอากาศ (CO_2-Based DCV) ซึ่งสามารถปรับอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องได้ ช่วยลดการสะสมของ CO_2 และลดการใช้พลังงานจากการระบายอากาศเกินความจำเป็น



ภาพที่ 1-2 แนวคิดการควบคุมระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยความเข้มข้น CO_2

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศแบบ CO_2-Based DCV สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยใช้แนวคิดสมดุลมวล (Mass Balance Theory) ร่วมกับแบบจำลองห้องแบบ Single-Zone เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสะสม CO_2 ภายในห้องภายใต้รูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกัน รวมถึงเปรียบเทียบผลของกลยุทธ์การระบายอากาศแบบต่าง ๆ ต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้า เช่น Persily & de Jonge (2017) จะมุ่งเน้นการศึกษาการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผู้ใช้งานอาคาร และ Ahn et al. (2022) จะนำเสนอแบบจำลองสมดุลมวลสำหรับการพยากรณ์ความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคาร แต่ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเฉพาะพฤติกรรม CO_2 หรือการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎี ในขณะที่งานวิจัยนี้ได้บูรณาการ

- แบบจำลองการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน
- แบบจำลองสมดุลมวล CO_2
- กลยุทธ์ CO_2-Based DCV
- การประเมินพลังงานของพัดลมระบายอากาศ

เข้าไว้ในกรอบการวิเคราะห์เดียวกันสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบ Single-Zone เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานภายใต้รูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกัน

1.2 ปัญหาและที่มาของปัญหาวิจัย

จากการใช้งานจริง ห้องสำนักงานขนาดเล็กมักมีรูปแบบการใช้งานที่ไม่แน่นอน จำนวนผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดช่วงเวลาทำงาน ส่งผลให้การกำหนดอัตราการระบายอากาศแบบคงที่ไม่สามารถตอบสนองต่อสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถแบ่งปัญหาหลักออกเป็น 2 ประการ ได้แก่

1.2.1 การระบายอากาศเกินความจำเป็น (Over-Ventilation) เมื่อมีผู้ใช้งานจำนวนน้อย แต่ระบบยังคงระบายอากาศในอัตราสูงเท่าเดิม จะทำให้พัดลมระบายอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าเกินความจำเป็น และอาจเพิ่มภาระของระบบปรับอากาศจากการนำอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องมากเกินไป

1.2.2 ความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality Risk) ในกรณีที่มีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น หรือมีผู้มาติดต่อภายในห้องในช่วงเวลาสั้น ๆ ระบบระบายอากาศแบบคงที่อาจไม่สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ทันต่อความต้องการ ส่งผลให้ CO_2 สะสมภายในห้องและคุณภาพอากาศลดลง

ดังนั้น การพัฒนาระบบ CO_2-Based DCV ที่สามารถปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานจริง จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจทั้งในเชิงคุณภาพอากาศภายในอาคารและเชิงวิศวกรรมพลังงาน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศแบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กใน MATLAB/Simulink

1.3.2 เพื่อศึกษาผลของจำนวนผู้ใช้งานและรูปแบบการใช้งานห้องต่อการสะสม CO_2 ภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก

1.3.3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศแบบต่าง ๆ ได้แก่

• S0 : Passive/Natural Infiltration ใช้เป็นกรณีอ้างอิงพื้นฐาน (Baseline Case) เพื่อศึกษาการสะสม CO_2 ภายในห้องเมื่อไม่มีระบบระบายอากาศเชิงกล

• S1 : Fixed Mechanical Ventilation ใช้เป็นกรณีอ้างอิงของระบบระบายอากาศแบบคงที่ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้าน IAQ และการใช้พลังงานกับระบบ DCV

• S2 : CO_2 – Based Demand-Controlled Ventilation (DCV) ใช้ศึกษาความสามารถของระบบ DCV ในการปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานจริงและระดับ CO_2 ภายในห้อง

1.3.4 เพื่อประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายพลังงานของพัดลมระบายอากาศภายใต้กลยุทธ์การระบายอากาศที่แตกต่างกัน

1.3.5 เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองกับทฤษฎีสมดุลมวลและงานวิจัยอ้างอิงด้าน CO_2-Based Ventilation และ Indoor Air Quality

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อให้การศึกษามีความชัดเจน งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตดังนี้

1.4.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา

- CO_2 ห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบ Single-Zone
- ขนาดห้องประมาณ 4 × 5 × 3 เมตร
- ปริมาตรห้องประมาณ 60 m^3
- สมมติให้ภายในห้องมีการผสมอากาศอย่างสม่ำเสมอ (Well-Mixed Assumption)
- สมมติให้ห้องสำนักงานเป็นระบบปิดแบบ Single-Zone โดยไม่พิจารณาการเปิด–ปิดประตู หน้าต่าง หรือการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานระหว่างพื้นที่อื่น
- พิจารณาเฉพาะการรั่วซึมของอากาศพื้นฐาน (Background Infiltration) ที่กำหนดเป็นค่า ACH คงที่ เพื่อแทนการแลกเปลี่ยนอากาศตามธรรมชาติของอาคาร
- ไม่พิจารณาผลกระทบจากลมภายนอก ความดันอากาศ หรือสภาวะอากาศแปรผันตามเวลา
- ช่วงเวลาการใช้งานกำหนดเป็นเวลา 08:00–18:00 น.

1.4.2 ขอบเขตด้านระบบระบายอากาศ

- พิจารณาระบบระบายอากาศแบบพัดลมระบายอากาศชนิด Mixed-Flow Inline Duct Fan
- ใช้พัดลมอ้างอิงรุ่น Kruger MTD 100/1 ขนาด 100 mm
- กำหนดการทำงานแบบ 2 ระดับ ได้แก่
- Low Speed : 21 Watt (85 m^3/h)
- High Speed : 31 Watt (145 m^3/h)

1.4.3 ขอบเขตด้านรูปแบบการใช้งานห้อง (Occupancy Scenarios)

โดยกำหนดวันตัวแทนทั้ง 3 รูปแบบเพื่อให้ครอบคลุมระดับการใช้งานห้องสำนักงานตั้งแต่ระดับต่ำ ปานกลาง และสูงสุด เพื่อใช้ประเมินความสามารถของระบบ DCV ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานและภาระการเกิด CO_2 ภายในห้อง ได้แก่

- D1 : กรณีใช้งานพื้นฐาน (Baseline Occupancy) แทนการใช้งานสำนักงานทั่วไปโดยผู้ใช้งานประจำจำนวน 2 คน ตลอดช่วงเวลาทำงาน

• D2 : กรณีมีผู้มาติดต่อ (Visitor Occupancy) แทนกรณีมีผู้มาติดต่อหรือมีการประชุมย่อยเป็นระยะ โดยผู้ใช้งานประจำ 2 คน และมีผู้มาติดต่อเพิ่มเติม 2 คน ในช่วง 10:00–11:00 และ 15:00–16:00 น.

• D3 : กรณีใช้งานสูงสุด (Peak Occupancy) เพื่อทดสอบขีดความสามารถสูงสุดของระบบ DCV โดยผู้ใช้งานประจำ 2 คน ผู้มาติดต่อ 2 คน ในช่วง 10:00–11:00 และ 15:00–16:00 น. และผู้รอเพิ่มเติม 1 คน ในช่วง 14:00–17:00 น.

1.4.4 ขอบเขตด้านแบบจำลองคุณภาพอากาศ

• ใช้แบบจำลองสมดุลมวลของ CO_2 (CO_2 Mass Balance Model)

• พิจารณาเฉพาะ CO_2 ที่เกิดจากผู้ใช้งานภายในห้อง

• ใช้ CO_2 เป็นตัวชี้วัดความเพียงพอของการระบายอากาศ

• ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจน (CO_2)

• ไม่พิจารณาการปล่อยมลพิษอื่น เช่น VOCs หรือ Formaldehyde จากเฟอร์นิเจอร์และวัสดุภายในห้อง

• ไม่พิจารณาการกระจายตัวของอากาศแบบ CFD หรือ Multi-Zone Airflow

• กำหนดค่าความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคารคงที่ที่ 400 ppm เพื่อใช้เป็น boundary condition ของแบบจำลอง ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับระดับ CO_2 ในบรรยากาศภายนอกทั่วไปตามเอกสารอ้างอิงด้าน IAQ และมาตรฐาน ASHRAE

• ใช้ค่า CO_2 ประมาณ 1000 ppm เป็นเกณฑ์อ้างอิงด้านความเพียงพอของการระบายอากาศตามแนวทาง ASHRAE Standard 62.1

• ตรวจสอบความสอดคล้องของพฤติกรรมแบบจำลองกับผลลัพธ์จากงานวิจัยอ้างอิงด้าน CO_2-based ventilation และ indoor air quality

1.5 ขอบเขตตัวแปรในการวิจัย

1.5.1 ตัวแปรต้น (Independent Variables)

• รูปแบบการใช้งานห้อง (D1–D3)

• กลยุทธ์การระบายอากาศ (S0/S1/S2)

1.5.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variables)

• ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง (ppm)

• อัตราการระบายอากาศ (ACH)

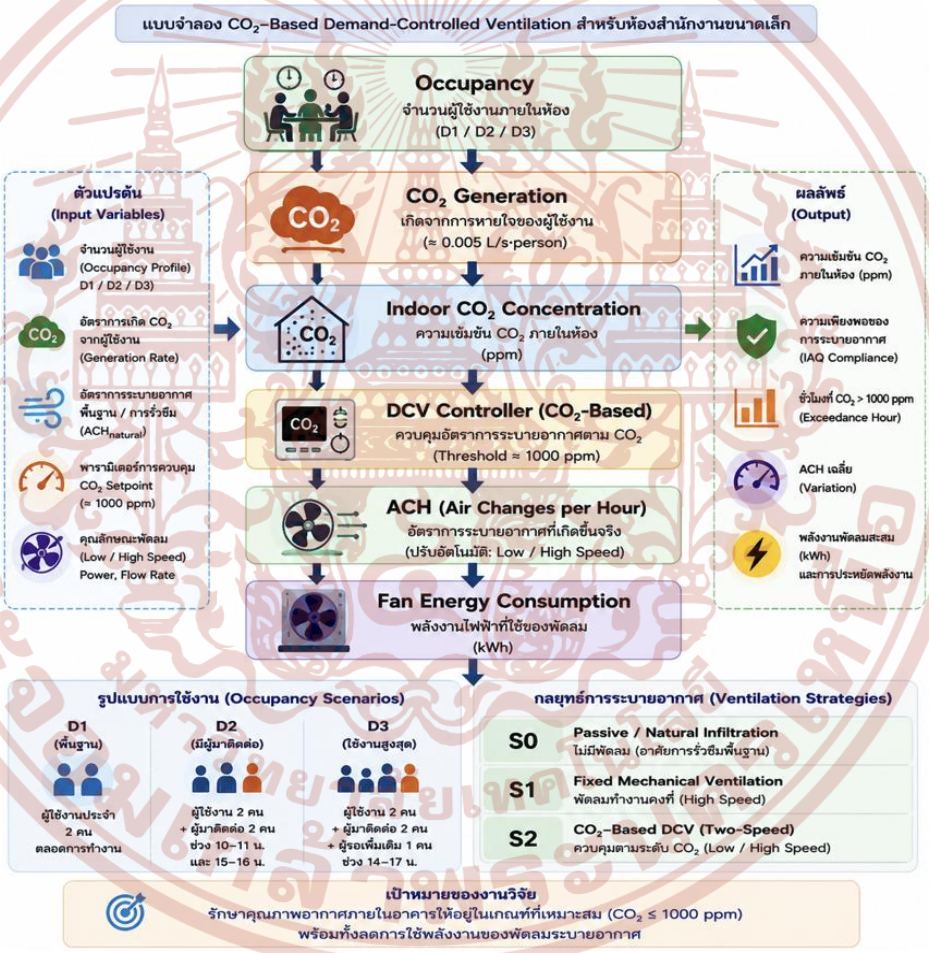
• พฤติกรรมการตอบสนองของระบบ DCV

• พลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศในช่วงเวลาจำลอง (kWh)

- ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าของพัดลมในช่วงเวลาจำลอง (THB)

1.5.3 ตัวแปรควบคุม (Control Variables)

- ขนาดและปริมาตรห้อง
- ช่วงเวลาการใช้งาน
- ค่า CO_2 ภายนอกอาคาร
- ค่า CO_2 generation rate ต่อคน
- ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWh)



ภาพที่ 1-3 แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แนวทางในการออกแบบและกำหนดอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยอ้างอิงจากจำนวนผู้ใช้งานจริงและพฤติกรรมการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในห้อง

1.6.2 ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบระหว่างระบบระบายอากาศแบบคงที่ (Fixed Ventilation) และระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) ทั้งด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ

1.6.3 ช่วยสนับสนุนแนวทางการลดการระบายอากาศเกินความจำเป็น (Over-Ventilation) ในอาคารสำนักงานขนาดเล็ก ซึ่งสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบระบายอากาศและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้

1.6.4 ได้ข้อมูลพฤติกรรมการตอบสนองของระบบ DCV ต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบ Smart Ventilation หรือระบบควบคุมอาคารอัจฉริยะในอนาคต

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.7.1 คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) หมายถึง สภาวะคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ส่งผลต่อสุขภาพ ความสบาย และประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้งานอาคาร โดยในงานวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นตัวชี้วัดความเพียงพอของการระบายอากาศภายในห้อง ตามแนวทางของ ASHRAE Standard 62.1 และงานวิจัยด้าน Indoor Air Quality (ASHRAE, 2022)

1.7.2 ระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) หมายถึง ระบบระบายอากาศที่สามารถปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานจริงของอาคาร เช่น จำนวนผู้ใช้งาน หรือค่าความเข้มข้นของ CO_2 ภายในห้อง เพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น (Lu et al., 2022)

1.7.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคาร (Indoor CO_2 Concentration) หมายถึง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง ซึ่งเกิดขึ้นจากการหายใจของผู้ใช้งานภายในอาคาร โดยในงานวิจัยนี้ใช้หน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน (ppm) และใช้เป็นตัวชี้วัดความเพียงพอของการระบายอากาศตามหลักการของ ASHRAE และ Persily & de Jonge (2017)

1.7.4 อัตราการระบายอากาศ (Air Change per Hour: ACH) หมายถึง จำนวนครั้งที่อากาศภายในห้องถูกแทนที่ด้วยอากาศใหม่ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยคำนวณจากอัตราการไหลของอากาศเทียบกับปริมาตรของห้อง ใช้เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของระบบระบายอากาศ (ASHRAE, 2022)

1.7.5 แบบจำลองสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Mass Balance Model) หมายถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO_2 ภายในห้อง

โดยพิจารณาสมดุลระหว่างการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานและการระบายอากาศออกจากห้อง ตามแนวคิด Mass Balance Theory (Ahn et al., 2022)

บทที่ 2
แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอแนวคิด ทฤษฎี สมการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการโดยใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแปรควบคุมสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว โดยเนื้อหาในบทนี้ใช้เป็นพื้นฐานทางทฤษฎีสำหรับการกำหนดสมมติฐาน การออกแบบแบบจำลอง และการวิเคราะห์ผลการจำลองในบทถัดไป

การศึกษาคุณภาพอากาศภายในอาคารมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบระบายอากาศ เนื่องจากอาคารสำนักงานเป็นพื้นที่ปิดที่มีผู้ใช้งานอยู่ภายในเป็นระยะเวลานาน การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องสามารถสะท้อนพฤติกรรมการระบายอากาศและภาระจากผู้ใช้งานภายในพื้นที่ได้ งานวิจัยจำนวนมากจึงนำค่า CO_2 มาใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร รวมถึงใช้เป็นสัญญาณควบคุมสำหรับระบบระบายอากาศตามความต้องการ

ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการสมดุลมวลของ CO_2 ภายในห้องแบบโซนเดียว ซึ่งพิจารณาการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานและการระบาย CO_2 ออกจากห้องผ่านอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ หรือ Air Changes per Hour (ACH) แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการจำลองความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารที่ใช้สมการสมดุลมวลเป็นพื้นฐานในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน อัตราการระบายอากาศ และความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

นอกจากนี้ บทนี้ยังกล่าวถึงแนวคิดของระบบ Demand-Controlled Ventilation (DCV) ซึ่งเป็นระบบระบายอากาศที่ปรับอัตราการระบายอากาศตามความต้องการใช้งานจริงแทนการระบายอากาศในอัตราคงที่ตลอดเวลา การใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุมทำให้ระบบสามารถเพิ่มการระบายอากาศเมื่อมีภาระจากผู้ใช้งานสูง และลดการทำงานของพัดลมเมื่อความต้องการระบายอากาศลดลง ซึ่งเป็นแนวทางที่ช่วยสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน

เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่ แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก สมการและตัวชี้วัดที่ใช้ในแบบจำลอง การประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ และทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเนื้อหาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบแบบจำลอง MATLAB/Simulink ในบทที่ 3 และใช้ประกอบการอภิปรายผลการจำลองในบทที่ 4

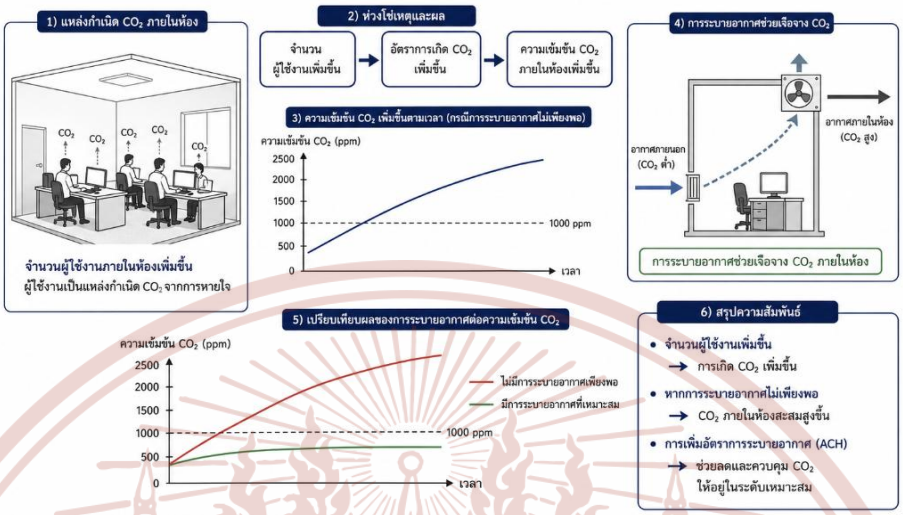
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาระบบระบายอากาศตามความต้องการโดยใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแปรควบคุม จำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับคุณภาพอากาศภายในอาคาร การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผู้ใช้งาน การระบายอากาศภายในพื้นที่ปิด และหลักการควบคุมระบบระบายอากาศตามภาระการใช้งานจริง เนื่องจากตัวแปรนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการสะสมของ CO_2 ภายในห้องและการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ

ในงานวิจัยนี้ ห้องสำนักงานขนาดเล็กถูกพิจารณาเป็นพื้นที่แบบโซนเดียว โดยสมมติให้อากาศภายในห้องผสมกันอย่างสม่ำเสมอ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจึงขึ้นอยู่กับอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน อัตราการระบายอากาศ และความเข้มข้น CO_2 ของอากาศภายนอก แนวคิดดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญของแบบจำลองสมดุลมวล CO_2 ดังแสดงในภาพที่ 2-1 โดยนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MATLAB/Simulink ในบทที่ 3

นอกจากนี้ ระบบระบายอากาศตามความต้องการ หรือ Demand-Controlled Ventilation (DCV) เป็นแนวทางที่ปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานจริงภายในห้อง โดยเฉพาะการใช้ CO_2 เป็นตัวแปรแทนภาระจากผู้ใช้งาน เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ความเข้มข้น CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ระบบจึงสามารถใช้สัญญาณดังกล่าวเพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และเมื่อลดจำนวนผู้ใช้งานลง ระบบสามารถลดการระบายอากาศเพื่อลดการใช้พลังงานของพัดลมได้

ดังนั้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ คุณภาพอากาศภายในอาคารและ CO_2 การเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน ค่าอัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศหรือ ACH ระบบระบายอากาศตามความต้องการ และการควบคุมระบบระบายอากาศด้วย CO_2 ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการกำหนดสมมติฐานและการวิเคราะห์ผลการจำลองในบทถัดไป

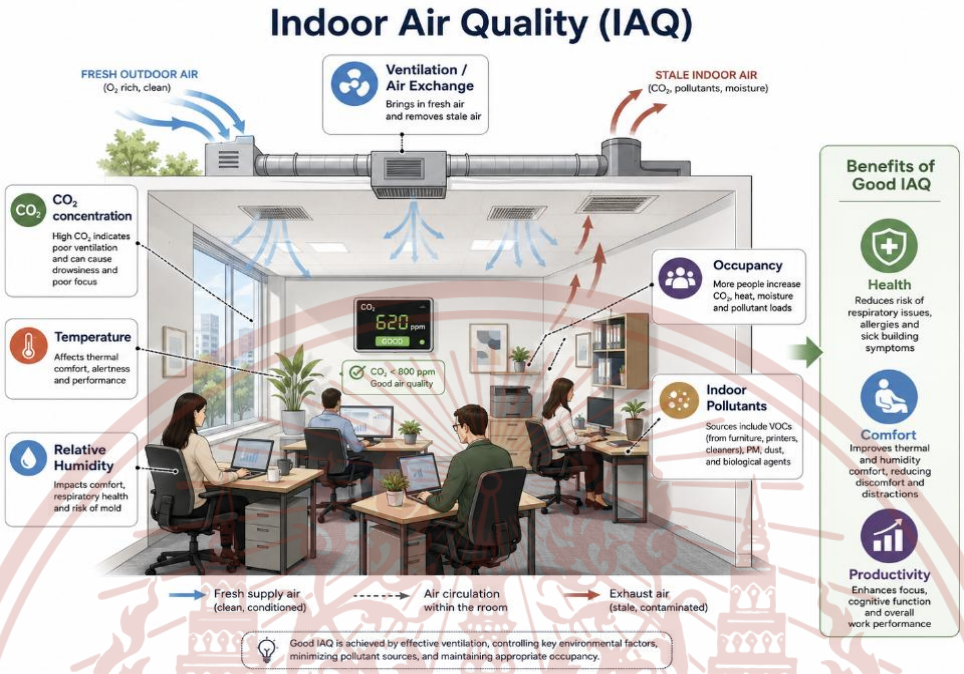


ภาพที่ 2-1 แนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน การเกิด CO_2 และการระบายอากาศในห้อง
ที่มา : จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก Persily and de Jonge (2017), Ahn et al. (2022) และ NIST TN 2213

ภาพที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์เชิงแนวคิดของการเกิดและการควบคุม CO_2 ภายในห้องสำนักงาน โดยจำนวนผู้ใช้งานเป็นแหล่งกำเนิดหลักของ CO_2 จากการหายใจ เมื่อ CO_2 ถูกปล่อยเข้าสู่พื้นที่ปิด ความเข้มข้นภายในห้องจะเพิ่มขึ้นตามภาระจากผู้ใช้งานและระยะเวลาการใช้งานห้อง ในขณะเดียวกัน การระบายอากาศจากภายนอกเข้าสู่ห้องและการระบายอากาศภายในออกไปจะช่วยเจือจางและลดความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นพื้นฐานของแบบจำลองสมดุลมวล CO_2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.1.1 คุณภาพอากาศภายในอาคารและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คุณภาพอากาศภายในอาคาร หรือ Indoor Air Quality (IAQ) หมายถึงสภาวะของอากาศภายในพื้นที่ใช้งานที่มีผลต่อสุขภาพ ความสบาย และประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้อาคาร ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศภายในอาคารประกอบด้วยสารมลพิษภายในอาคาร อัตราการระบายอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และพฤติกรรมการใช้งานพื้นที่ ในงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวชี้วัดหลัก เนื่องจาก CO_2 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องและสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเพียงพอของการระบายอากาศได้



ภาพที่ 2-2 องค์ประกอบของคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ)
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก ASHRAE Standard 62.1 และ NIST TN 2213

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องสำนักงานเกิดขึ้นหลักจากการหายใจของผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในพื้นที่ปิดเป็นเวลานานและอัตราการระบายอากาศไม่เพียงพอ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มขึ้นของ CO_2 จึงสามารถใช้เป็นสัญญาณบ่งชี้ว่ามีการสะสมของอากาศที่ผ่านการหายใจแล้ว และอาจบ่งชี้ว่าปริมาณอากาศภายนอกที่นำเข้าสู่พื้นที่ไม่เพียงพอกับจำนวนผู้ใช้งาน

มาตรฐาน ASHRAE Standard 62.1 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำและแนวทางการจัดการคุณภาพอากาศภายในอาคารสำหรับอาคารที่ไม่ใช่ที่พักอาศัย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดคุณภาพอากาศที่ยอมรับได้สำหรับผู้ใช้อาคาร อย่างไรก็ตาม ค่า CO_2 ไม่ควรถูกตีความว่าเป็นค่าขีดจำกัดด้านสุขภาพโดยตรงเพียงค่าเดียว แต่ในงานด้านการระบายอากาศมักใช้ CO_2 เป็นตัวบ่งชี้ความเพียงพอของอากาศภายนอกและการระบายอากาศภายในอาคาร

ในงานวิจัยนี้กำหนดค่า CO_2 ภายนอกอาคารเท่ากับ 400 ppm เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง และใช้ค่า 1000 ppm เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการประเมินความเพียงพอของการระบายอากาศภายในห้อง ทั้งนี้ ค่า 1000 ppm ถูกใช้เป็นเกณฑ์เชิงปฏิบัติตามแนวทางที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมอาคาร ในการประเมินสถานะการระบายอากาศและการสะสม CO_2 ในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งาน ไม่ใช่ค่าขีดจำกัดความปลอดภัยทางสุขภาพโดยตรง

การใช้ CO_2 เป็นตัวแปรหลักในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ซึ่งใช้ความเข้มข้น CO_2 เพื่อประเมินภาระการใช้งานห้องและปรับอัตราการระบายอากาศตามความต้องการจริง ดังนั้น CO_2 จึงทำหน้าที่ทั้งเป็นตัวชี้วัดคุณภาพอากาศภายในอาคารและเป็นสัญญาณควบคุมระบบระบายอากาศในแบบจำลอง

2.1.2 การเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคาร

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคารเกิดขึ้นได้จากหลายแหล่ง เช่น การเผาไหม้ อุปกรณ์บางประเภท หรือกระบวนการใช้งานภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม สำหรับห้องสำนักงานทั่วไปที่ไม่มีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้ภายในพื้นที่ แหล่งกำเนิด CO_2 หลักคือการหายใจของผู้ใช้งานอาคาร โดยร่างกายมนุษย์ใช้ออกซิเจนในกระบวนการเผาผลาญพลังงานและปล่อย CO_2 ออกมากับลมหายใจออก ดังนั้น เมื่อมีผู้ใช้งานอยู่ภายในห้องปิดเป็นระยะเวลาหนึ่ง ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งาน ระยะเวลาการใช้งาน และระดับกิจกรรมของผู้ใช้งาน

ในทางวิศวกรรมอาคาร ค่าอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคารเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง เนื่องจากเป็นพจน์แหล่งกำเนิดในสมการสมดุลมวลของ CO_2 ภายในพื้นที่ปิด รายงาน NIST Technical Note 2213 ระบุว่า ความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก ได้แก่ อัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน อัตราการระบายอากาศ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มมีผู้ใช้งาน และความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคาร นอกจากนี้ รายงานดังกล่าวยังอธิบายว่าแบบจำลอง single-zone mass balance เป็นพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปในการวิเคราะห์สารปนเปื้อนภายในอาคาร รวมถึง CO_2 โดยพิจารณาค่าปริมาตรห้อง ความเข้มข้น CO_2 ภายในและภายนอก อัตราการระบายอากาศ และอัตราการเกิด CO_2 ภายในพื้นที่

ในงานวิจัยของ Persily และ de Jonge (2017) ได้อธิบายการคำนวณอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคารโดยเชื่อมโยงกับหลักการเผาผลาญพลังงานของร่างกาย ระดับกิจกรรมทางกายภาพ ค่า metabolic rate และลักษณะทางกายภาพของผู้ใช้งาน เช่น อายุ เพศ และมวลร่างกาย แนวคิดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนไม่ใช่ค่าคงที่สากลสำหรับทุกสถานการณ์ แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะของผู้ใช้งานและกิจกรรมที่ทำภายในพื้นที่ สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ผู้ใช้งานเป็นลักษณะการทำงานสำนักงานแบบนั่งทำงานเป็นหลัก จึงเลือกใช้อัตราการเกิด CO_2 ต่อคนในระดับ sedentary office occupant เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทของห้องสำนักงานขนาดเล็ก

ในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ กำหนดอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนเท่ากับ 0.31 L/min-person หรือเท่ากับ 5.17×10^{-6} m^3/s-person ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แทนการปล่อย CO_2 ของผู้ใช้งานสำนักงานแบบนั่งทำงาน โดยค่าอัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องสามารถคำนวณได้จากจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องคูณกับอัตราการเกิด CO_2 ต่อคน ดังสมการที่ (2-1)

$$G_{total} = N \times G_{person} \quad (2\text{-}1)$$

โดยที่

G_{total} คือ อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้อง (m^3/s)

N คือ จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง (person)

G_{person} คือ อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน ($m^3/s \bullet person$)

จากค่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถแปลงหน่วยอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนได้ดังนี้

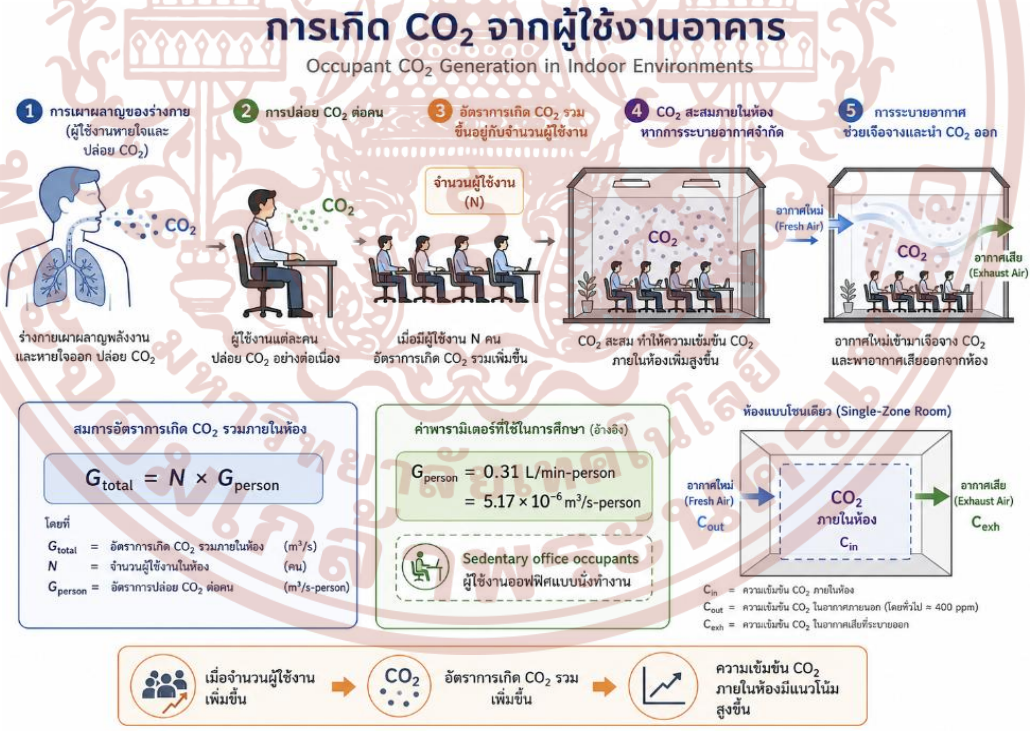
$$0.31 L/\min \cdot person = \frac{0.31 \times 10^{-3}}{60} m^3/s \cdot person$$

$$= 5.17 \times 10^{-6} m^3/s \cdot person$$

ดังนั้น ในแบบจำลอง MATLAB/Simulink ของงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่า

$$G_{person} = 5.17 \times 10^{-6} m^3/s \cdot person$$

เพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์ของอัตราการเกิด CO_2 ต่อคน โดยอัตราการเกิด CO_2 รวมจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนผู้ใช้งานที่กำหนดในตารางเวลาการใช้งานห้อง หรือ occupancy schedule



ภาพที่ 2-3 แนวคิดการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคารและการสะสมภายในห้องแบบโซนเดียว
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก Persily and de Jonge (2017) & Ahn et al. (2022)

จากภาพที่ 2-3 แสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้งานภายในอาคารเป็นแหล่งกำเนิดหลักของ CO_2 ในห้องสำนักงาน เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องจะเพิ่มขึ้นตามสมการ

$G_{total} = N \times G_{person}$ หากอัตราการระบายอากาศไม่เพียงพอ CO_2 จะสะสมภายในห้องและทำให้ความเข้มข้น CO_2 เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากมีการนำอากาศภายนอกเข้ามาและระบายอากาศภายในออกไปอย่างเหมาะสม ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจะลดลงหรือถูกควบคุมให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

สำหรับงานวิจัยนี้ จำนวนผู้ใช้งานภายในห้องถูกกำหนดเป็นตัวแปรสำคัญในแบบจำลอง เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิด CO_2 รวมโดยตรง เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ค่า G_{total} จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหากอัตราการระบายอากาศไม่เพิ่มตาม ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกใช้เป็นพื้นฐานความสมเหตุสมผลของแบบจำลองในบทที่ 4 โดยทดสอบว่าความเข้มข้น CO_2 เพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานหรือไม่

การกำหนดค่าอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนในแบบจำลองจึงมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของผลการจำลอง หากกำหนดค่า G_{person} สูงเกินไป แบบจำลองจะประเมินความเข้มข้น CO_2 สูงเกินจริง ในทางกลับกัน หากกำหนดค่าต่ำเกินไป แบบจำลองอาจประเมินความเสี่ยงด้านการสะสม CO_2 ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้น การเลือกค่า G_{person} ที่เหมาะสมกับลักษณะกิจกรรมของผู้ใช้งานจึงเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า G_{person} เท่ากับ 5.17×10^{-6} $m^3 / s \cdot person$ เนื่องจากสอดคล้องกับลักษณะผู้ใช้งานห้องสำนักงานแบบนั่งทำงาน และสามารถนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองสมดุลมวลของ CO_2 ได้โดยตรง โดยค่าดังกล่าวถูกกำหนดในไฟล์พารามิเตอร์ของ MATLAB/Simulink เพื่อใช้คำนวณอัตราการเกิด CO_2 รวมตามจำนวนผู้ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้น หัวข้อนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญที่เชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานกับการพัฒนาแบบจำลอง CO_2 ภายในห้องในบทที่ 3

ตารางที่ 2-1 ค่าอัตราการเกิด CO_2 ที่ใช้ในแบบจำลอง

รายการ	**ค่า**	**หน่วย**	**คำอธิบาย**
G_{person}	0.31	$L/min \cdot person$	อัตราการเกิด CO_2 ต่อคนสำหรับผู้ใช้งานสำนักงานแบบนั่งทำงาน
G_{person}	5.17×10^{-6}	$m^3/ s \cdot person$	ค่าที่ใช้ใน MATLAB/Simulink หลังแปลงหน่วย
G_{total}	$N \times G_{person}$	m^3/ s	อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้อง

จากแนวคิดดังกล่าว อัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานจะถูกนำไปใช้เป็นพจน์แหล่งกำเนิดในสมการสมดุลมวลของ CO_2 ภายในห้อง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิด CO_2 เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราการระบายอากาศและปริมาตรของห้องด้วย

ดังนั้น หัวข้อถัดไปจึงกล่าวถึงการระบายอากาศและค่า Air Changes per Hour ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ควบคุมการสะสมของ CO_2 ภายในห้อง

2.1.3 การระบายอากาศและค่า Air Changes per Hour

การระบายอากาศเป็นกระบวนการนำอากาศภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคารและระบายอากาศภายในออกจากพื้นที่ เพื่อช่วยเจือจางและกำจัดสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลิ่น หรือสารมลพิษอื่น ๆ ในบริบทของห้องสำนักงาน การระบายอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร เนื่องจากผู้ใช้งานภายในห้องเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 อย่างต่อเนื่อง หากไม่มีการระบายอากาศที่เพียงพอ CO_2 จะสะสมภายในห้องและทำให้ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นตามเวลา

ในงานด้านวิศวกรรมอาคาร การระบายอากาศสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การรั่วซึมของอากาศผ่านช่องว่างของอาคาร การเปิดประตูหรือหน้าต่าง และการใช้ระบบระบายอากาศเชิงกล เช่น พัดลมหรือระบบปรับอากาศที่นำอากาศภายนอกเข้ามา ในงานวิจัยนี้พิจารณาการระบายอากาศในเชิงแบบจำลอง โดยแบ่งเป็นการรั่วซึมพื้นฐานของอาคารและการระบายอากาศเชิงกลจากพัดลม เพื่อใช้เปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2

ตัวแปรที่นิยมใช้แสดงระดับการระบายอากาศของพื้นที่คือ Air Changes per Hour หรือ ACH ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งโดยเทียบเท่าที่ปริมาตรอากาศของห้องถูกเปลี่ยนถ่ายหรือระบายออกภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ค่า ACH มีหน่วยเป็น h^{-1} และเป็นตัวชี้วัดที่ช่วยเชื่อมโยงระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับขนาดของห้อง หากค่า ACH สูง แสดงว่ามีการนำอากาศใหม่เข้ามาและระบายอากาศออกจากห้องในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้สามารถเจือจาง CO_2 ภายในห้องได้รวดเร็วขึ้น

สำหรับห้องที่สมมติให้อากาศผสมกันอย่างสม่ำเสมอ ค่า ACH สามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของอากาศหารด้วยปริมาตรห้อง ดังสมการที่ (2-2)

$$ACH = \frac{Q}{V} \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่

ACH คือ อัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศต่อชั่วโมง มีหน่วยเป็น h^{-1}

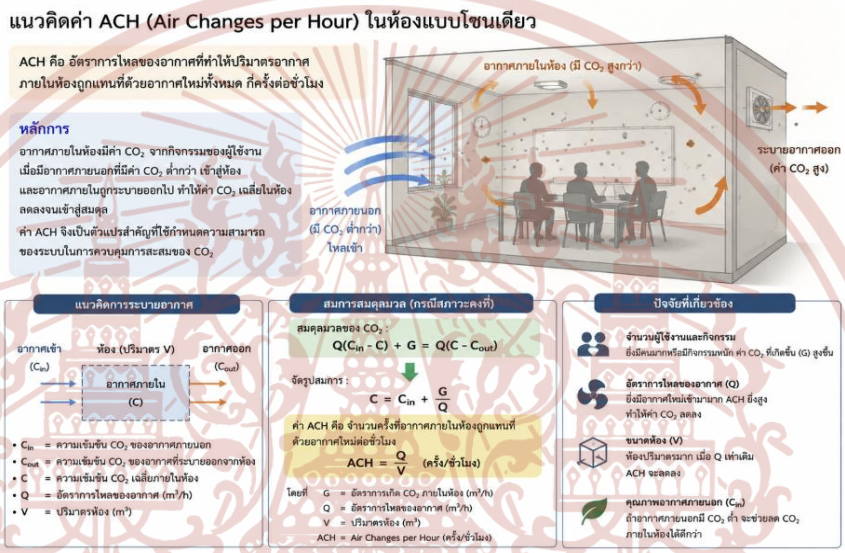
Q คือ อัตราการไหลของอากาศ มีหน่วยเป็น m^3/h

V คือ ปริมาตรห้อง มีหน่วยเป็น m^3

หมายเหตุ : สูตร (2-2) ใช้งานได้กรณี Q มีหน่วยเป็น m^3/h แต่ถ้า Q ในงานวิจัยกำหนดเป็น m^3/s ต้องใช้สูตร (2-3)

$$ACH = \frac{3600Q}{V} \qquad (2\text{-}3)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่า ค่า ACH ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศและปริมาตรของห้อง โดยตรง หากห้องมีปริมาตรเท่ากัน การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้ค่า ACH เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากใช้อัตราการไหลของอากาศเท่าเดิมกับห้องที่มีปริมาตรมากขึ้น ค่า ACH จะลดลง ดังนั้น การกำหนดค่า ACH จึงต้องพิจารณาร่วมกับขนาดห้องและสมรรถนะของอุปกรณ์ระบายอากาศ แสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 แนวคิดการระบายอากาศและค่า Air Changes per Hour (ACH) ในห้องแบบโซนเดียว
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก ASHRAE Standard 62.1 & Ahn et al. (2022)

ภาพที่ 2-4 แสดงแนวคิดของการระบายอากาศในห้องแบบโซนเดียว โดยอากาศภายนอกถูกนำเข้าสู่ห้องในอัตราการไหล (Q) และอากาศภายในถูกระบายออกในอัตราเดียวกัน ภายในห้องมีผู้ใช้งานเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 ทำให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเพิ่มขึ้น ในขณะที่การระบายอากาศทำหน้าที่เจือจางและนำ CO_2 ออกจากห้อง ค่า ACH จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้กำหนดความสามารถของระบบในการควบคุมการสะสมของ CO_2

ในสมการสมดุลมวลของ CO_2 ค่า ACH มีบทบาทเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับการระบายหรือเจือจาง CO_2 ภายในห้อง เมื่อค่า ACH เพิ่มขึ้น อัตราการนำ CO_2 ออกจากห้องจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ลดลงหรือเข้าสู่สมดุลที่ต่ำกว่าเดิม ในทางตรงกันข้าม หากค่า ACH ต่ำ การระบาย CO_2 จะเกิดขึ้นช้ากว่า ทำให้ CO_2 สะสมภายในห้องได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะในช่วงที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูง

ในงานวิจัยนี้ ค่า ACH ถูกใช้เป็นตัวแปรหลักในการกำหนดกลยุทธ์การระบายอากาศทั้ง 3 กรณี ได้แก่ S0, S1 และ S2 โดย S0 ใช้ค่า ACH ต่ำเพื่อแทนการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร S1 ใช้ค่า ACH คงที่เพื่อแทนระบบระบายอากาศเชิงกลแบบเปิดคงที่ และ S2 ใช้ค่า ACH ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างระดับต่ำและระดับสูงตามเงื่อนไขของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation

สำหรับห้องกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้มีปริมาตรห้องเท่ากับ 60 m³ และเลือกใช้พัดลมอ้างอิงที่มีอัตราการไหล 2 ระดับ ได้แก่ 85 m³/h ที่ระดับ Low speed และ 145 m³/h ที่ระดับ High speed ดังนั้นสามารถคำนวณค่า ACH ที่ได้จากพัดลมจากสมการ (2-2) ได้ดังนี้

$$ACH_{low} = \frac{85}{60} = 1.42h^{-1}$$

$$ACH_{high} = \frac{145}{60} = 2.42h^{-1}$$

ค่า ACH_{low} ถูกใช้เป็นค่าอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำของระบบ S2 หรือ ACH_min ส่วนค่า ACH_{high} ถูกใช้เป็นค่าอัตราการระบายอากาศสูงสุดของระบบ S2 หรือ ACH_max และใช้เป็นค่าอัตราการระบายอากาศคงที่ของระบบ S1 ในช่วงที่มีผู้ใช้งาน

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้กำหนดค่า ACH_{nat} เท่ากับ 0.31 h^{-1} เพื่อแทนการรั่วซึมอากาศตามธรรมชาติพื้นฐานของห้องในกรณี S0 และในช่วงที่ไม่มีผู้ใช้งานของระบบอื่น ค่า ACH ดังกล่าวไม่ได้หมายถึงการเปิดระบบระบายอากาศเชิงกล แต่เป็นค่าพื้นฐานที่ใช้แทนการแลกเปลี่ยนอากาศตามธรรมชาติหรือการรั่วซึมของอาคารในแบบจำลอง

ตารางที่ 2-2 ค่า ACH ที่ใช้ในแบบจำลอง

รายการ	**อัตราการไหลของอากาศ (m^3/h)**	**ปริมาตรห้อง (m^3)**	**ค่า ACH (h^{-1})**	**การนำไปใช้ในแบบจำลอง**
ACH_{nat}	-	60	0.31	S0 และช่วงไม่มีผู้ใช้งาน
ACH_{low}	85	60	1.42	Low speed / ACH_min ของ S2
ACH_{high}	145	60	2.42	High speed / ACH_max ของ S2 และ S1

จากตารางที่ 2-2 จะเห็นว่า ค่า ACH ที่ใช้ในงานวิจัยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรห้องและอัตราการไหลของพัดลม ค่าเหล่านี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองใน MATLAB/Simulink และใช้ในการเปรียบเทียบผลของกลยุทธ์การระบายอากาศในบทที่ 4

โดยสรุป การระบายอากาศและค่า ACH เป็นองค์ประกอบสำคัญของแบบจำลอง CO_2 ภายในห้อง เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ควบคุมอัตราการเจือจางและการนำ CO_2 ออกจากพื้นที่ ค่า ACH ที่สูงขึ้นช่วยลดการสะสม CO_2 ได้ดีขึ้น แต่ในกรณีของระบบระบายอากาศเชิงกล การเพิ่มอัตราการระบายอากาศอาจส่งผลต่อการใช้พลังงานของพัดลม ดังนั้น การออกแบบระบบระบายอากาศจึงต้อง

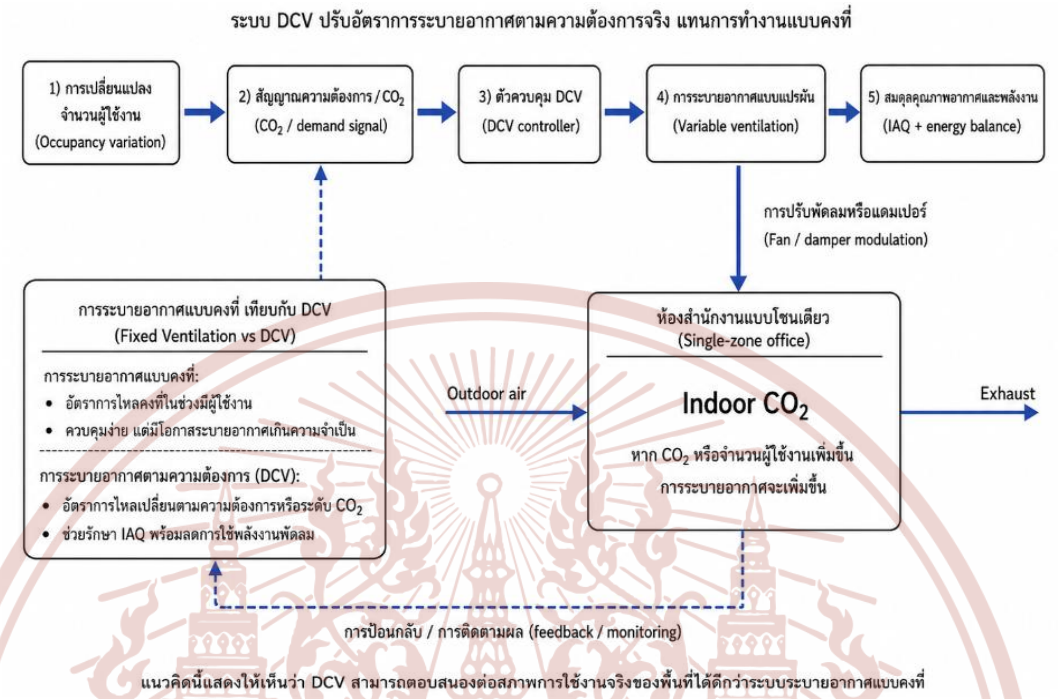
พิจารณาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นแนวคิดหลักของระบบ Demand-Controlled Ventilation ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.1.4 ระบบระบายอากาศตามความต้องการ

ระบบระบายอากาศตามความต้องการ หรือ Demand-Controlled Ventilation (DCV) เป็นแนวคิดการควบคุมระบบระบายอากาศที่ปรับอัตราการนำอากาศภายนอกเข้าสู่อาคารตามความต้องการใช้งานจริงของพื้นที่ แทนการระบายอากาศด้วยอัตราคงที่ตลอดเวลา แนวคิดนี้มีเป้าหมายเพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ขณะเดียวกันลดการระบายอากาศที่เกินความจำเป็น ซึ่งอาจนำไปสู่การลดการใช้พลังงานของระบบพัดลมหรือระบบปรับอากาศที่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศ

ในระบบระบายอากาศแบบคงที่ อัตราการระบายอากาศมักถูกกำหนดตามภาระการใช้งานสูงสุดหรือค่าการออกแบบที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ส่งผลให้ระบบอาจนำอากาศภายนอกเข้ามามากเกินความจำเป็นในช่วงที่มีผู้ใช้งานน้อย หรือช่วงที่ไม่มีผู้ใช้งานอยู่ภายในพื้นที่ ในทางตรงกันข้าม ระบบ DCV ใช้ข้อมูลจากตัวแปรที่สะท้อนสภาวะการใช้งานจริง เช่น จำนวนผู้ใช้งาน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับการใช้งานพื้นที่ เพื่อปรับอัตราการระบายอากาศให้สอดคล้องกับภาระที่เกิดขึ้นจริง

หลักการพื้นฐานของ DCV คือ เมื่อความต้องการระบายอากาศเพิ่มขึ้น ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร และเมื่อความต้องการระบายอากาศลดลง ระบบจะลดอัตราการระบายอากาศเพื่อลดการทำงานของอุปกรณ์ระบายอากาศ ตัวอย่างเช่น ในห้องสำนักงานที่มีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ระบบ DCV จึงสามารถใช้สัญญาณ CO_2 เป็นตัวบ่งชี้ภาระจากผู้ใช้งานและสั่งเพิ่มการระบายอากาศได้ ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนผู้ใช้งานลดลงหรือ CO_2 ลดลง ระบบสามารถลดอัตราการระบายอากาศลงได้



ภาพที่ 2-5 แนวคิดของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (DCV)

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก Emmerich and Persily (2001) & Lu et al. (2022)

จากภาพที่ 2-5 แสดงให้เห็นว่า ระบบ DCV ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ สภาวะการใช้งานพื้นที่หรือจำนวนผู้ใช้งาน ตัวแปรตรวจวัดหรือสัญญาณความต้องการ ระบบควบคุม และอุปกรณ์ระบายอากาศ เมื่อสัญญาณความต้องการเพิ่มขึ้น ระบบควบคุมจะปรับการทำงานของพัดลมหรืออุปกรณ์ควบคุมการไหลของอากาศเพื่อเพิ่มการระบายอากาศ ในทางกลับกัน เมื่อสัญญาณความต้องการลดลง ระบบจะลดระดับการทำงานของอุปกรณ์ระบายอากาศ แนวคิดดังกล่าวทำให้ DCV สามารถตอบสนองต่อสภาพการใช้งานจริงของพื้นที่ได้ดีกว่าระบบระบายอากาศแบบคงที่

ในเชิงทฤษฎี ระบบ DCV สามารถแบ่งได้หลายรูปแบบตามตัวแปรที่ใช้เป็นสัญญาณควบคุม เช่น ระบบที่ใช้สัญญาณจากจำนวนผู้ใช้งาน ระบบที่ใช้ตารางเวลาการใช้งานพื้นที่ ระบบที่ใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว และระบบที่ใช้ความเข้มข้น CO_2 เป็นตัวแปรควบคุม สำหรับงานวิจัยด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร ระบบ CO_2-Based DCV เป็นรูปแบบที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจาก CO_2 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการมีอยู่ของผู้ใช้งานในพื้นที่ และสามารถสะท้อนการสะสมของอากาศที่ผ่านการหายใจแล้วภายในห้องได้

ข้อได้เปรียบสำคัญของระบบ DCV คือความสามารถในการสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน กล่าวคือ ระบบสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศเมื่อมีภาระจากผู้ใช้งานสูง เพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคาร และลดอัตราการระบายอากาศเมื่อภาระลดลง

เพื่อลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น โดยเฉพาะในอาคารหรือพื้นที่ที่จำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น ห้องเรียน ห้องประชุม ห้องสำนักงาน หรือพื้นที่บริการสาธารณะ

อย่างไรก็ตาม การออกแบบและการใช้งานระบบ DCV จำเป็นต้องพิจารณาข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเหมาะสมของตัวแปรที่ใช้ควบคุม ความแม่นยำของเซนเซอร์ ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ การตอบสนองของระบบควบคุม และค่าอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำที่ต้องรักษาไว้ แม้ในช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานน้อย ระบบไม่ควรลดอัตราการระบายอากาศต่ำเกินไปจนกระทบต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารหรือการระบายสารปนเปื้อนอื่นที่ไม่ได้เกิดจากผู้ใช้งาน

สำหรับงานวิจัยนี้ แนวคิด DCV ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนากลยุทธ์การระบายอากาศแบบ S2 ซึ่งเป็นระบบระบายอากาศตามความต้องการโดยใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุม ระบบ S2 ถูกออกแบบให้ปรับอัตราการระบายอากาศระหว่างระดับต่ำและระดับสูงตามสภาวะการใช้งานและความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง โดยมีเป้าหมายเพื่อควบคุม CO_2 ให้อยู่ใกล้เกณฑ์อ้างอิง และลดการทำงานของพัดลมในระดับสูงเมื่อไม่มีความจำเป็น

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ S1 ซึ่งเป็นการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ ระบบ S2 มีแนวคิดที่ยืดหยุ่นกว่า เนื่องจากไม่ได้ใช้ค่าอัตราการระบายอากาศสูงสุดตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน แต่ปรับการทำงานตามสภาวะจริงของห้อง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับ S0 ซึ่งพิจารณาเฉพาะการรั่วซึมอากาศพื้นฐาน ระบบ S2 มีความสามารถในการเพิ่มการระบายอากาศเมื่อ CO_2 สะสมสูงขึ้น จึงมีศักยภาพในการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้ดีกว่า

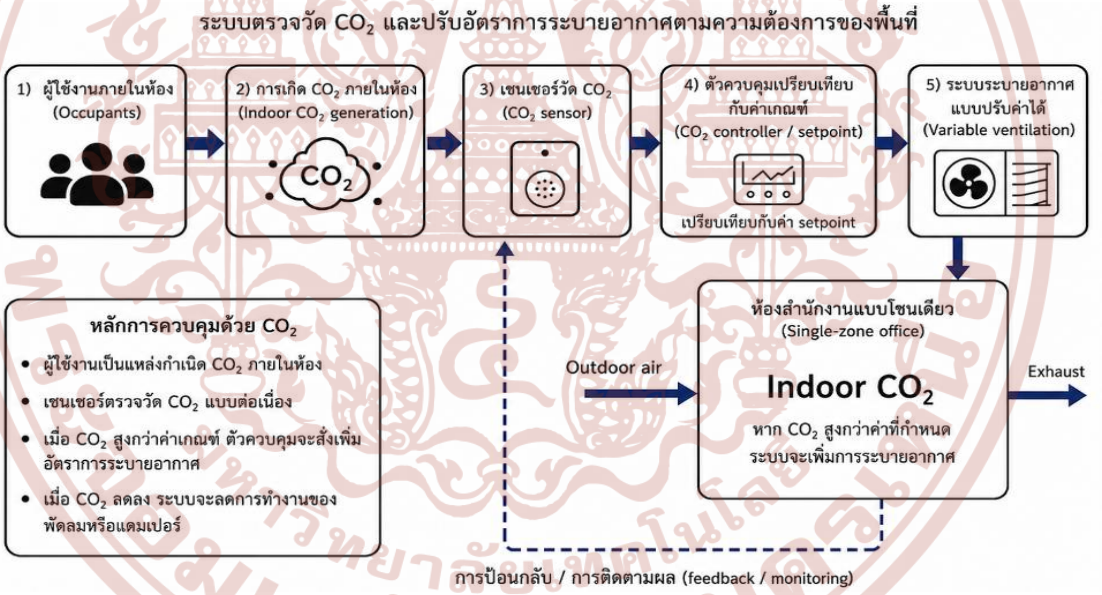
โดยสรุป ระบบระบายอากาศตามความต้องการเป็นแนวทางสำคัญในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่จำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตามเวลา แนวคิด DCV ช่วยลดข้อจำกัดของระบบระบายอากาศแบบคงที่ที่อาจเกิดการระบายอากาศมากเกินความจำเป็น และเป็นพื้นฐานสำคัญของการพัฒนาแบบจำลอง CO_2-Based DCV ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะถูกนำไปอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไปเกี่ยวกับการควบคุมระบบระบายอากาศด้วย CO_2

2.1.5 การควบคุมระบบระบายอากาศด้วย CO_2

การควบคุมระบบระบายอากาศด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ CO_2-Based Ventilation Control เป็นแนวทางหนึ่งของระบบระบายอากาศตามความต้องการ โดยใช้ค่าความเข้มข้น CO_2 ภายในพื้นที่เป็นสัญญาณสะท้อนภาระการใช้งานจริงของห้อง เนื่องจาก CO_2 ภายในห้องสำนักงานส่วนใหญ่เกิดจากการหายใจของผู้ใช้งาน เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรืออยู่ภายในห้องเป็นระยะเวลานาน ความเข้มข้น CO_2 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หากอัตราการระบายอากาศไม่เพียงพอ ดังนั้นค่า CO_2 จึงสามารถใช้เป็นตัวแปรป้อนกลับสำหรับปรับอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานจริงได้

หลักการของการควบคุมแบบ CO_2-Based Ventilation คือ การตรวจวัดความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องด้วยเซนเซอร์ แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์หรือ setpoint ที่กำหนดไว้ หากค่า CO_2 สูงขึ้นจนเข้าใกล้หรือเกินค่าเกณฑ์ ระบบควบคุมจะสั่งเพิ่มอัตราการระบายอากาศ เช่น เพิ่มความเร็วพัดลม เปิด damper มากขึ้น หรือเพิ่มปริมาณอากาศภายนอกที่นำเข้าสู่พื้นที่ ในทางกลับกัน หากค่า CO_2 ลดลงต่ำกว่าระดับที่กำหนด ระบบจะลดอัตราการระบายอากาศลงเพื่อลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น

แนวคิดดังกล่าวทำให้การควบคุมด้วย CO_2 แตกต่างจากระบบระบายอากาศแบบคงที่ เนื่องจากระบบไม่ได้ทำงานที่อัตราการระบายอากาศสูงตลอดเวลา แต่ปรับระดับการทำงานตามค่าที่ตรวจวัดได้จริงภายในห้อง หากห้องมีผู้ใช้งานน้อย ความเข้มข้น CO_2 จะเพิ่มขึ้นช้าหรืออยู่ในระดับต่ำ ระบบจึงสามารถทำงานที่ระดับการระบายอากาศต่ำได้ แต่เมื่อมีผู้ใช้งานมากขึ้นหรือเกิดการสะสมของ CO_2 ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคาร



ภาพที่ 2-6 แนวคิดการควบคุมระบบระบายอากาศด้วยความเข้มข้น CO_2

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก Emmerich and Persily (2001), Lu et al. (2022) & Fisk and de Almeida (1998)

ภาพที่ 2-6 แสดงแนวคิดของระบบควบคุมการระบายอากาศด้วย CO_2 โดยเริ่มจากผู้ใช้งานภายในห้องเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 จากนั้นเซนเซอร์ CO_2 ตรวจวัดความเข้มข้นภายในพื้นที่และส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุม ระบบควบคุมจะประมวลผลค่าที่วัดได้เทียบกับค่าเกณฑ์ที่กำหนด แล้วสั่งปรับการทำงานของพัดลมหรืออุปกรณ์ควบคุมการไหลของอากาศ เพื่อเพิ่มหรือลดอัตราการระบายอากาศตามความต้องการจริงของพื้นที่

การควบคุมด้วย CO_2 สามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ เช่น การควบคุมแบบเปิด–ปิด การควบคุมแบบสองระดับ การควบคุมแบบสัดส่วน และการควบคุมร่วมกับข้อมูลจำนวนผู้ใช้งาน ในระบบแบบเปิด–ปิด ระบบจะเปลี่ยนสถานะการทำงานเมื่อ CO_2 สูงหรือต่ำกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนระบบแบบสองระดับจะปรับการทำงานระหว่างระดับต่ำและระดับสูง เช่น Low speed และ High speed ของพัดลม ขณะที่ระบบแบบสัดส่วนจะปรับอัตราการระบายอากาศแบบต่อเนื่องตามระดับ CO_2 ที่เปลี่ยนแปลงไป

ในการออกแบบระบบควบคุมด้วย CO_2 มักใช้แนวคิด hysteresis หรือช่วงหน่วงการสั่งงาน เพื่อป้องกันไม่ให้ระบบเปลี่ยนสถานะบ่อยเกินไปเมื่อค่า CO_2 แกว่งอยู่ใกล้จุดสั่งงาน ตัวอย่างเช่น ระบบอาจกำหนดค่า CO_2 high-on เป็นระดับที่สั่งให้พัดลมเปลี่ยนเป็นการทำงานระดับสูง และกำหนดค่า CO_2 high-off เป็นระดับที่ยอมให้ระบบกลับสู่การทำงานระดับต่ำ เมื่อ CO_2 ลดลงต่ำพอ การกำหนดค่า high-on และ high-off ที่ต่างกันช่วยลดการสั่งงานถี่เกินไปและทำให้ระบบทำงานมีเสถียรภาพมากขึ้น

การใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุมมีข้อดีคือ สามารถสะท้อนภาระจากผู้ใช้งานภายในห้องได้โดยตรง เหมาะกับพื้นที่ที่จำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น ห้องสำนักงาน ห้องเรียน หรือห้องประชุม นอกจากนี้ ยังช่วยลดการระบายอากาศเกินความจำเป็นในช่วงที่ผู้ใช้งานน้อย ทำให้มีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของพัดลมและระบบที่เกี่ยวข้องกับการปรับอากาศ

อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมด้วย CO_2 มีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา เช่น ความแม่นยำและการสอบเทียบของเซนเซอร์ ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ ความล่าช้าในการตอบสนองของระบบ และสมมติฐานเกี่ยวกับการผสมอากาศภายในห้อง หากเซนเซอร์ติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม ค่าที่วัดได้อาจไม่เป็นตัวแทนของความเข้มข้น CO_2 เฉลี่ยภายในห้อง นอกจากนี้ CO_2 เป็นตัวแทนของภาระจากผู้ใช้งานเป็นหลัก แต่อาจไม่สามารถสะท้อนสารปนเปื้อนอื่นที่ไม่ได้มาจากผู้ใช้งานได้ครบถ้วน

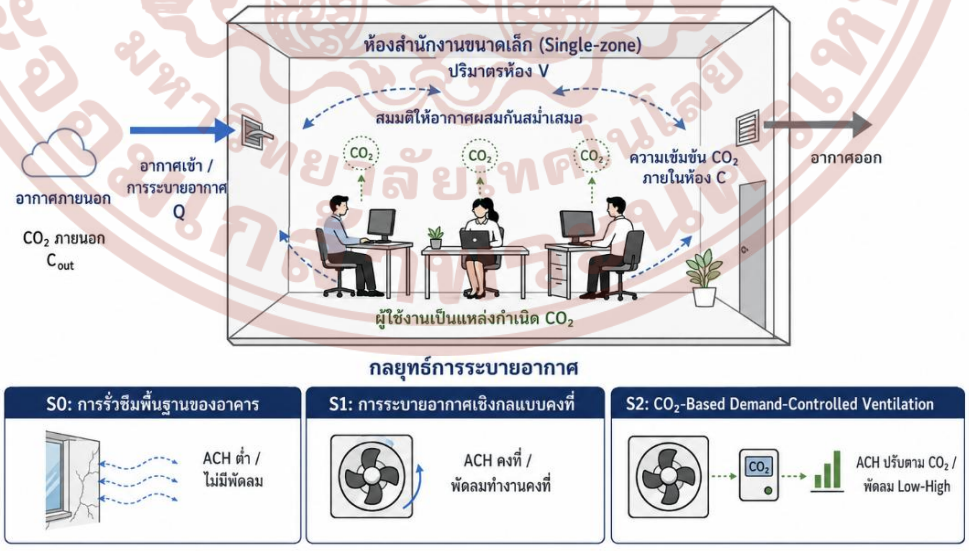
ในงานวิจัยนี้ การควบคุมระบบระบายอากาศด้วย CO_2 ถูกนำมาใช้ในกลยุทธ์ S2 ซึ่งเป็นระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว ระบบ S2 ใช้ค่าความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องร่วมกับสถานะการมีผู้ใช้งาน เพื่อสั่งปรับอัตราการระบายอากาศระหว่างระดับต่ำและระดับสูง โดยมีเป้าหมายเพื่อรักษาค่า CO_2 ให้อยู่ใกล้เกณฑ์อ้างอิง และลดการทำงานของพัดลมในระดับสูงเมื่อไม่มีความจำเป็น การเลือกใช้แนวคิดการควบคุมแบบสองระดับในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับลักษณะของพัดลมอ้างอิงที่มีการทำงานแบบ Low speed และ High speed โดยในช่วงที่มีผู้ใช้งานและค่า CO_2 ยังไม่สูง ระบบสามารถทำงานที่ระดับต่ำเพื่อประหยัดพลังงาน แต่เมื่อค่า CO_2 เพิ่มสูงขึ้นหรือมีจำนวนผู้ใช้งานมาก ระบบจะเปลี่ยนเป็นระดับสูงเพื่อเพิ่มการระบายอากาศและลดการสะสมของ CO_2 ภายในห้อง

โดยสรุป การควบคุมระบบระบายอากาศด้วย CO_2 เป็นแนวทางที่ช่วยให้ระบบระบายอากาศตอบสนองต่อภาระการใช้งานจริงของพื้นที่ได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศแบบคงที่ การใช้ CO_2 เป็นสัญญาณป้อนกลับช่วยให้ระบบสามารถปรับการทำงานตามระดับการสะสมของ CO_2 ภายในห้อง และสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารกับการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ ซึ่งเป็นแนวคิดหลักของแบบจำลอง S2 ในงานวิจัยนี้

2.2 ระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก

ระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร เนื่องจากผู้ใช้งานภายในห้องเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 อย่างต่อเนื่อง หากอัตราการระบายอากาศไม่เพียงพอ CO_2 จะสะสมภายในห้องและทำให้คุณภาพอากาศลดลงในทางกลับกัน หากระบายอากาศมากเกินความจำเป็น อาจทำให้เกิดการใช้พลังงานของพัดลมสูงขึ้น ดังนั้น การเลือกกลยุทธ์การระบายอากาศที่เหมาะสมจึงมีผลโดยตรงต่อทั้งคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ

ในงานวิจัยนี้ ห้องสำนักงานขนาดเล็กถูกพิจารณาเป็นพื้นที่แบบโซนเดียว โดยสมมติให้อากาศภายในห้องผสมกันอย่างสม่ำเสมอ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจึงพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมด แนวคิดนี้เหมาะสำหรับการจำลองเชิงระบบด้วยสมการสมดุลมวล เนื่องจากสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน อัตราการเกิด CO_2 อัตราการระบายอากาศ และความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2-7 แนวคิดระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย เพื่อประกอบคำอธิบายขอบเขตของระบบระบายอากาศในงานวิจัย

ภาพที่ 2-7 แสดงขอบเขตเชิงแนวคิดของระบบระบายอากาศที่ใช้ในงานวิจัย โดยพิจารณาห้องสำนักงานขนาดเล็กเป็นพื้นที่ปิดแบบโซนเดียว มีผู้ใช้งานเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 และมีการแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างภายในและภายนอกห้องผ่านการระบายอากาศ ระบบระบายอากาศถูกแบ่งเป็น 3 กลยุทธ์ ได้แก่ S0, S1 และ S2 เพื่อใช้เปรียบเทียบผลด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลม

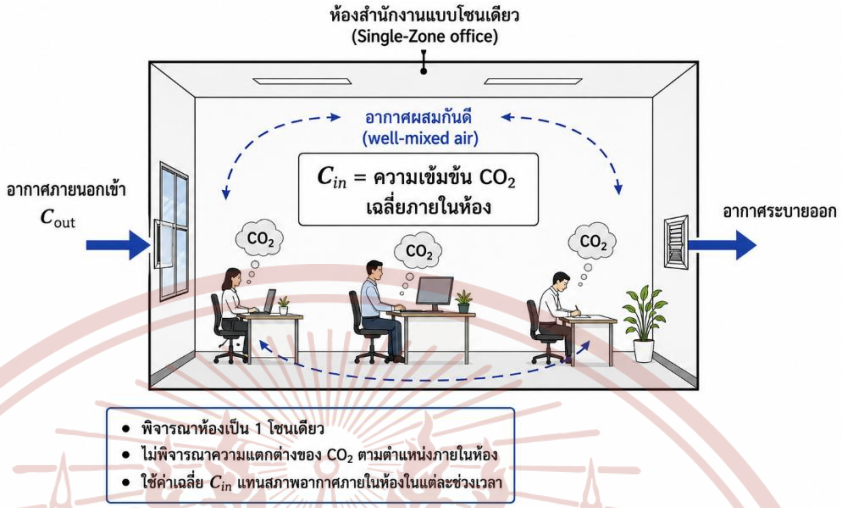
กลยุทธ์ S0 แทนกรณีการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานหรือการรั่วซึมของอาคารโดยไม่มีพัดลมระบายอากาศเชิงกล กลยุทธ์ S1 แทนระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ ซึ่งพัดลมทำงานที่อัตราการระบายอากาศคงที่ในช่วงที่มีผู้ใช้งาน ส่วนกลยุทธ์ S2 แทนระบบระบายอากาศตามความต้องการโดยใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุม ซึ่งสามารถปรับระดับการระบายอากาศระหว่างระดับต่ำและระดับสูงตามสภาวะการใช้งานจริงของห้อง

โดยสรุป ระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลของการระบายอากาศแต่ละรูปแบบอย่างเป็นระบบ โดยใช้ค่า CO_2 เป็นตัวชี้วัดหลักด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร และใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมเป็นตัวชี้วัดด้านพลังงาน แนวทางดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองและการวิเคราะห์ผลของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ในบทถัดไป

2.2.1 ห้องสำนักงานแบบ Single-Zone

ห้องสำนักงานแบบ Single-Zone หมายถึงพื้นที่ภายในอาคารที่ถูกพิจารณาเป็นโซนอากาศเดียว โดยสมมติให้อากาศภายในห้องผสมกันอย่างสม่ำเสมอ และมีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นค่าเฉลี่ยเดียวสำหรับทั้งพื้นที่ แนวคิดนี้มักใช้ในการวิเคราะห์เชิงระบบของคุณภาพอากาศภายในอาคาร เนื่องจากสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน อัตราการเกิด CO_2 อัตราการระบายอากาศ และปริมาตรห้องได้อย่างชัดเจน

ในงานวิจัยนี้ ห้องสำนักงานขนาดเล็กถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่แบบ Single-Zone เพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้สมการสมดุลมวลของ CO_2 ในการพัฒนาแบบจำลอง โดยพิจารณาว่าผู้ใช้งานภายในห้องเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 หลัก และการระบายอากาศทำหน้าที่เจือจางและนำ CO_2 ออกจากห้อง ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจึงถูกแทนด้วยค่าเฉลี่ย $C_{in(t)}$ เพียงค่าเดียวในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงทิศทางการไหลของอากาศในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แนวคิดห้องสำนักงานแบบโซนเดียวสำหรับการจำลอง CO_2

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย อ้างอิงจากแบบจำลอง single-zone mass balance จาก Ahn et al. (2022)

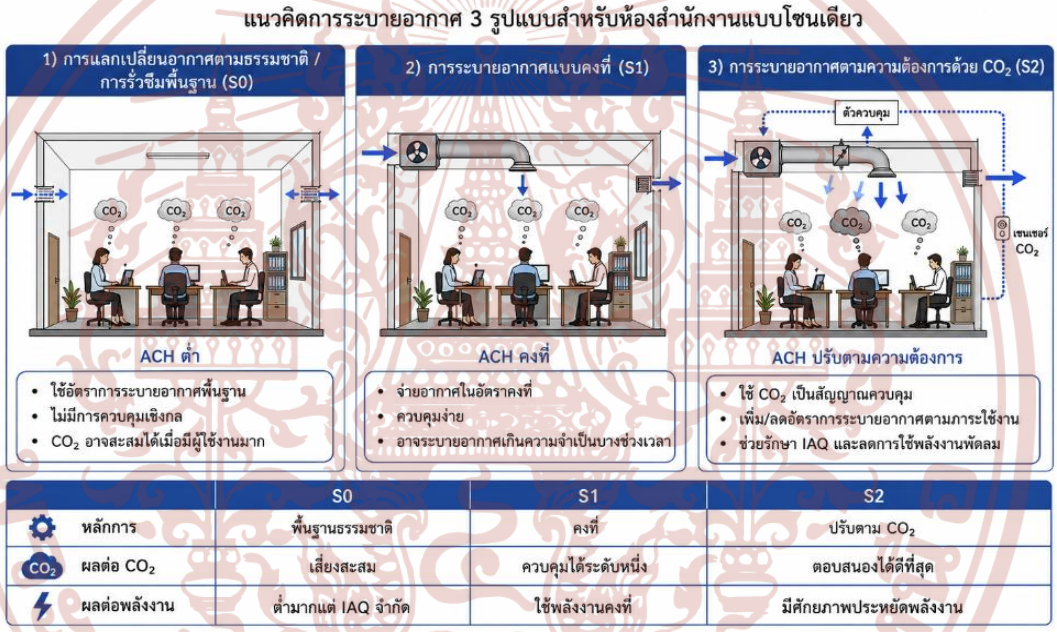
ภาพที่ 2-8 แสดงแนวคิดของห้องสำนักงานแบบ Single-Zone โดยกำหนดขอบเขตของห้องเป็นปริมาตรอากาศเดียว มีอากาศภายนอกไหลเข้าสู่ห้อง และมีอากาศภายในถูกระบายออกจากห้องในขณะเดียวกัน ผู้ใช้งานภายในห้องเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 จากการหายใจภายใต้สมมติฐาน well-mixed air ค่า CO_2 ภายในห้องจึงถูกพิจารณาเป็นค่าตัวแทนของทั้งห้อง ไม่ได้พิจารณาความแตกต่างของความเข้มข้น CO_2 ในแต่ละตำแหน่งภายในห้อง

ข้อดีของการพิจารณาห้องแบบ Single-Zone คือทำให้สามารถสร้างแบบจำลองได้ไม่ซับซ้อนเกินไป และเหมาะกับการศึกษาเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศในระดับระบบ เช่น S0, S1 และ S2 อย่างไรก็ตาม สมมติฐานนี้มีข้อจำกัด เนื่องจากไม่ได้พิจารณาการกระจายตัวของ CO_2 ในแต่ละตำแหน่ง การไหลเวียนอากาศเฉพาะจุด หรือผลของการเปิดประตูและหน้าต่าง ดังนั้น ผลการจำลองจึงควรถูกตีความในฐานะผลเชิงระบบของห้องสำนักงานขนาดเล็ก ไม่ใช่ผลเชิงรายละเอียดของการไหลอากาศภายในห้องแบบ (Computational Fluid Dynamics : CFD)

โดยสรุป การกำหนดห้องสำนักงานเป็นแบบ Single-Zone เป็นสมมติฐานที่เหมาะสมกับขอบเขตของงานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน การสะสม CO_2 การระบายอากาศ และการใช้พลังงานของพัดลมในระดับระบบ สมมติฐานดังกล่าวจึงช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลอง CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ได้อย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.2.2 กลยุทธ์การระบายอากาศ

การระบายอากาศภายในห้องสำนักงานสามารถดำเนินการได้หลายแนวทาง ทั้งแบบอาศัยการแลกเปลี่ยนอากาศตามธรรมชาติและแบบใช้ระบบระบายอากาศเชิงกล ทั้งนี้แต่ละแนวทางมีผลต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานแตกต่างกัน ในงานวิจัยด้านการจำลองระบบระบายอากาศ การเปรียบเทียบกลยุทธ์หลายรูปแบบช่วยให้สามารถประเมินข้อดีและข้อจำกัดของระบบแต่ละประเภทได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของ CO_2 และพลังงานที่ใช้ในการระบายอากาศ



ภาพที่ 2-9 เปรียบเทียบแนวคิดกลยุทธ์การระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย เพื่อประกอบการเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2

ภาพที่ 2-9 แสดงกลยุทธ์การระบายอากาศ 3 รูปแบบที่ใช้เป็นแนวคิดหลักของงานวิจัย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนอากาศแบบธรรมชาติหรือการรั่วซึมพื้นฐาน การระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ และการระบายอากาศตามความต้องการโดยใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุม ทั้งสามรูปแบบมีลักษณะการทำงานและผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและการใช้พลังงานแตกต่างกัน

2.2.2.1 Passive หรือ Natural Infiltration หมายถึงการแลกเปลี่ยนอากาศที่เกิดขึ้นจากการรั่วซึมของอากาศผ่านช่องว่างของอาคาร รอยต่อของประตู หน้าต่าง หรือองค์ประกอบอื่นของเปลือกอาคาร โดยไม่มีการใช้พัดลมหรือระบบระบายอากาศเชิงกลช่วยขับเคลื่อนอากาศโดยตรง การแลกเปลี่ยนอากาศลักษณะนี้มักมีอัตราต่ำและไม่สามารถควบคุมได้แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพอาคาร ความแตกต่างของความดัน อุณหภูมิภายในและภายนอก รวมถึงสภาพลมภายนอกอาคาร

ในบริบทของห้องสำนักงานขนาดเล็ก การพึ่งพา Passive/Natural Infiltration เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการควบคุม CO_2 เมื่อมีผู้ใช้งานอยู่ภายในห้องเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานอาจต่ำกว่าภาระการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน จึงมักใช้เป็นกรณีฐาน (Baseline Case) ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบระบายอากาศอย่างไรก็ตาม แนวคิดนี้มีความสำคัญในเชิงแบบจำลอง เนื่องจากสามารถใช้เป็นกรณีพื้นฐานเพื่อเปรียบเทียบผลของการไม่มีระบบระบายอากาศเชิงกลต่อการสะสมของ CO_2 ภายในห้อง

2.2.2.2 Fixed Mechanical Ventilation หมายถึงระบบระบายอากาศเชิงกลที่ใช้อุปกรณ์ เช่น พัดลม หรือระบบส่งลม เพื่อระบายอากาศในอัตราคงที่ตามค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ระบบลักษณะนี้มีข้อดีคือออกแบบและควบคุมได้ง่าย สามารถกำหนดอัตราการระบายอากาศให้เพียงพอกับภาระการใช้งานที่ต้องการ และสามารถลดการสะสมของ CO_2 ได้ดีกว่าการพึ่งพาการรั่วซึมอากาศพื้นฐานเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของ Fixed Mechanical Ventilation คือระบบทำงานที่อัตราการระบายอากาศคงที่ แม้ในช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานลดลงหรือภาระการเกิด CO_2 ต่ำ ส่งผลให้เกิดการระบายอากาศมากเกินความจำเป็น (Over-ventilation) ในบางช่วงเวลา และอาจทำให้เกิดการใช้พลังงานของพัดลมสูงกว่าที่จำเป็น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่จำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น ห้องสำนักงาน ห้องเรียน หรือห้องประชุม

2.2.2.3 CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation หรือ CO_2-Based DCV เป็นแนวทางการระบายอากาศที่ใช้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเป็นตัวแปรสะท้อนภาระการใช้งานจริงของพื้นที่ เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรือมีการสะสมของ CO_2 สูงขึ้น ระบบสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อเจือจาง CO_2 ภายในห้อง ในทางกลับกัน เมื่อ CO_2 ลดลงหรือจำนวนผู้ใช้งานน้อยลง ระบบสามารถลดระดับการระบายอากาศเพื่อลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น

แนวคิด CO_2-Based DCV มีจุดเด่นในการสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ เนื่องจากระบบไม่ได้ระบายอากาศระดับสูงตลอดเวลา แต่ปรับการทำงานตามสภาวะการใช้งานจริงและระดับ CO_2 ภายในห้อง อย่างไรก็ตาม ระบบประเภทนี้ต้องอาศัยการตรวจวัด CO_2 ที่เหมาะสม การกำหนดค่าเกณฑ์ควบคุมที่เหมาะสม และการออกแบบการตอบสนองของระบบเพื่อหลีกเลี่ยงการสั่งงานถี่เกินไปหรือการตอบสนองล่าช้า

ในงานวิจัยนี้ แนวคิดทั้งสามรูปแบบถูกนำมาใช้ในการกำหนดกลยุทธ์การระบายอากาศสำหรับแบบจำลอง โดย Passive/Natural Infiltration ถูกกำหนดเป็นกรณี S0 เพื่อแทนการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานโดยไม่มีระบบระบายอากาศเชิงกล Fixed Mechanical Ventilation ถูกกำหนดเป็นกรณี S1 เพื่อแทนการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ และ CO_2-Based Demand-Controlled

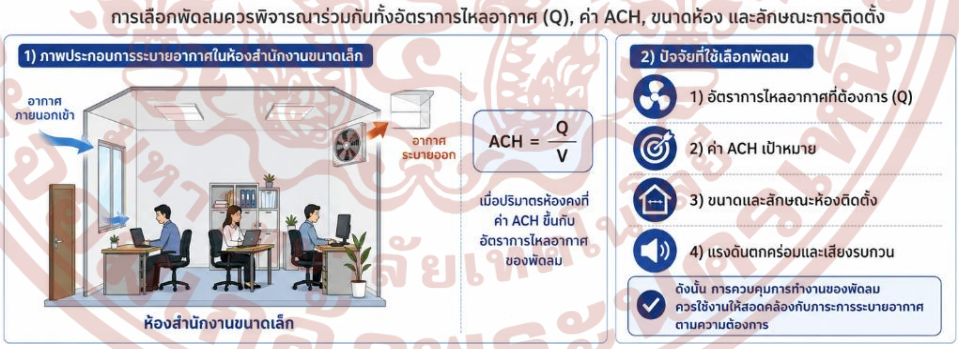
Ventilation ถูกกำหนดเป็นกรณี S2 เพื่อศึกษาความสามารถของระบบ DCV ในการปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานจริงและระดับ CO_2 ภายในห้อง

โดยสรุป การแบ่งกลยุทธ์การระบายอากาศเป็น S0, S1 และ S2 ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลของระบบระบายอากาศแต่ละรูปแบบได้อย่างเป็นระบบ โดย S0 ใช้เป็นกรณีฐานของการระบายอากาศต่ำ S1 ใช้เป็นกรณีของการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ และ S2 ใช้เป็นกรณีของระบบระบายอากาศตามความต้องการ การเปรียบเทียบดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการประเมินผลด้าน CO_2 ภายในห้องและพลังงานของพัดลมในบทที่ 3

2.2.3 การเลือกพัดลมระบายอากาศ

พัดลมระบายอากาศเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ขับเคลื่อนการแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างภายในและภายนอกห้อง โดยทำหน้าที่นำอากาศภายนอกเข้าสู่พื้นที่ หรือระบายอากาศภายในออกจากพื้นที่ เพื่อช่วยเจือจางความเข้มข้นของ CO_2 และสารปนเปื้อนภายในอาคาร การเลือกพัดลมระบายอากาศจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับขนาดห้อง ลักษณะการติดตั้ง อัตราการไหลของอากาศ ระดับเสียง กำลังไฟฟ้า และความสามารถในการควบคุมการทำงาน

โดยทั่วไป พัดลมระบายอากาศสำหรับอาคารสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่พัดลมแบบ Axial fan, Centrifugal fan และ Mixed-flow fan โดยพัดลมแต่ละประเภทมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันตามทิศทางการไหลของอากาศและความสามารถในการเอาชนะแรงต้านในระบบท่อ แสดงลักษณะของพัดลมแต่ละประเภทในภาพที่ 2-11



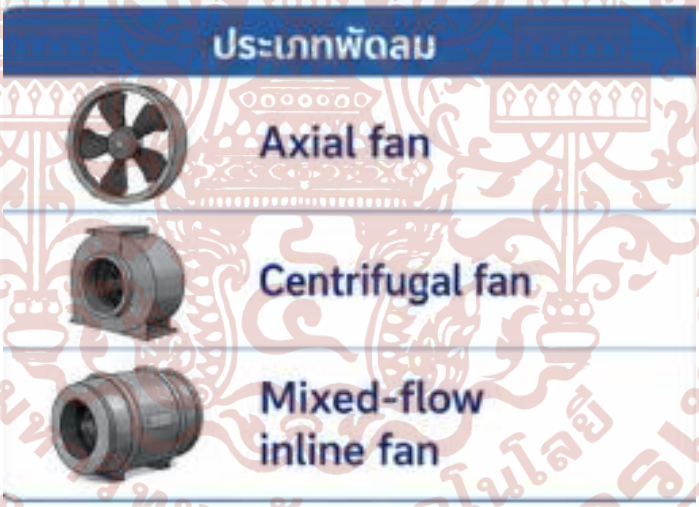
ภาพที่ 2-10 แนวทางการเลือกพัดลมระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดการเลือกพัดลมจาก AMCA และข้อมูลพัดลม Mixed-flow inline fan

ภาพที่ 2-10 แสดงแนวทางการเลือกพัดลมระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยพิจารณาประเภทของพัดลมร่วมกับเงื่อนไขด้านอัตราการไหลของอากาศ ค่า ACH กำลังไฟฟ้า ระดับเสียง และความสามารถในการควบคุมระดับการทำงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำพัดลมไปใช้ร่วมกับระบบระบายอากาศตามความต้องการ

ตารางที่ 2-3 ประเภทของพัดลมระบายอากาศและความเหมาะสมในการใช้งาน

ประเภทพัดลม	ลักษณะทั่วไป	ความเหมาะสม
Axial fan	อากาศไหลตามแนวแกนของใบพัด ให้ปริมาณลมสูง แต่เหมาะกับระบบที่มีแรงต้านต่ำ	เหมาะกับการระบายอากาศแบบตรงผ่านผนังหรือช่องเปิดสั้น ๆ
Centrifugal fan	อากาศถูกเหวี่ยงออกในแนวรัศมี สามารถสร้างแรงดันได้สูงกว่า	เหมาะกับระบบท่อที่มีแรงต้านสูงหรือระบบระบายอากาศขนาดใหญ่
Mixed-flow inline fan	รวมลักษณะของ axial และ centrifugal fan สามารถให้ปริมาณลมและแรงดันในระดับสมดุล	เหมาะกับระบบท่อขนาดเล็กถึงปานกลาง เช่น ห้องสำนักงานขนาดเล็ก



ภาพที่ 2-11 ประเภทพัดลมระบายอากาศ

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงลักษณะพัดลมจาก AMCA และเอกสารผู้ผลิตพัดลมระบายอากาศ

สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก พัดลมที่เหมาะสมควรมีขนาดกะทัดรัด ติดตั้งร่วมกับท่อระบายอากาศได้ง่าย ให้ปริมาณลมเพียงพอกับปริมาตรห้อง มีระดับเสียงไม่รบกวนผู้ใช้งาน และมีกำลังไฟฟ้าไม่สูงเกินไป นอกจากนี้ หากต้องการนำไปใช้กับระบบระบายอากาศตามความต้องการ พัดลมควรสามารถควบคุมระดับการทำงานได้อย่างน้อย 2 ระดับ เช่น ระดับต่ำและระดับสูง เพื่อให้ระบบสามารถปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะ CO_2 ภายในห้องได้

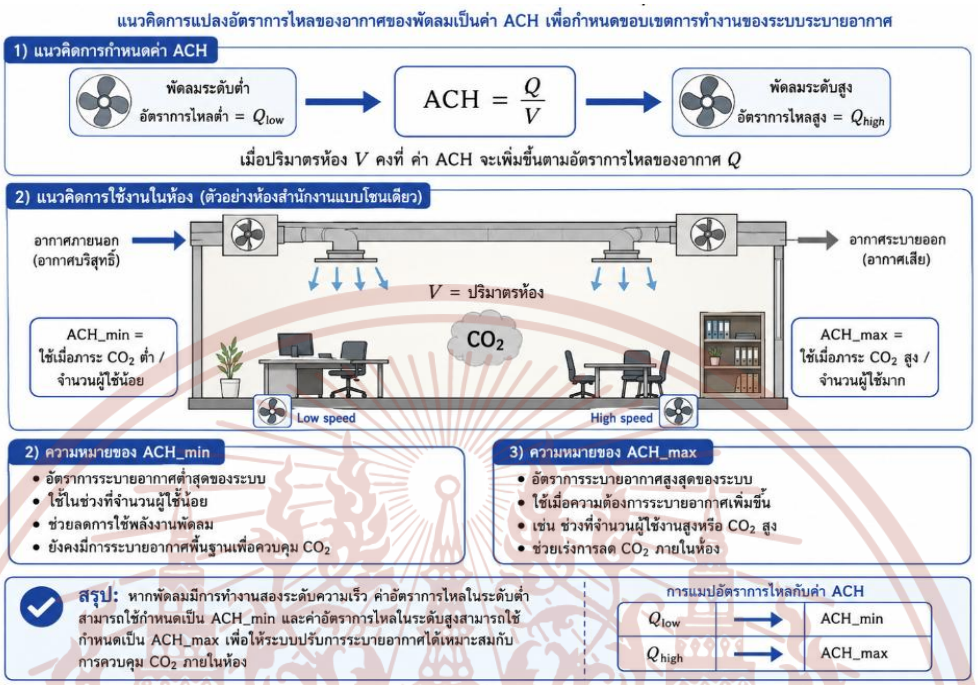
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แนวคิดพัดลมแบบ Mixed-flow inline fan เป็นพัดลมอ้างอิงของแบบจำลอง เนื่องจากมีความเหมาะสมกับห้องสำนักงานขนาดเล็กที่ต้องการการระบายอากาศผ่านท่อมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป และสามารถใช้แทนการทำงานแบบ Low speed และ High speed ในระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ได้ แนวคิดนี้ช่วยให้สามารถจำลองการเปลี่ยนระดับการระบายอากาศตามภาระการใช้งานจริงของห้องได้อย่างชัดเจน

โดยสรุป การเลือกพัดลมระบายอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาเพียงอัตราการไหลของอากาศเท่านั้น แต่ยังพิจารณาความเหมาะสมกับพื้นที่สำนักงานขนาดเล็ก ความสามารถในการติดตั้งร่วมกับท่อ ระดับกำลังไฟฟ้า และความสามารถในการควบคุมระดับการทำงาน จากแนวคิดดังกล่าวพัดลมแบบ Mixed-flow inline fan จึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์อ้างอิงในแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วย CO_2

2.2.4 ค่าอัตราการไหลของอากาศจากสมรรถนะพัดลม

สมรรถนะของพัดลมระบายอากาศมักแสดงในรูปของอัตราการไหลของอากาศ หรือ (Q) ซึ่งมีหน่วยเป็น (m^3/h) ค่า (Q) แสดงปริมาณอากาศที่พัดลมสามารถเคลื่อนย้ายได้ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำค่าอัตราการไหลของอากาศมาเปรียบเทียบกับปริมาตรห้อง จะสามารถแปลงเป็นค่า Air Changes per Hour หรือ ACH ได้ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้บอกระดับการเปลี่ยนถ่ายอากาศของห้องต่อหนึ่งชั่วโมง

ในงานวิจัยนี้ ค่า ACH_min และ ACH_max ถูกใช้เพื่อแทนขอบเขตการทำงานของระบบระบายอากาศ โดย ACH_min หมายถึงอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำที่ใช้รักษาการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานในช่วงที่ภาระ CO_2 ยังไม่สูง ส่วน ACH_max หมายถึงอัตราการระบายอากาศสูงสุดที่ระบบสามารถใช้เมื่อมีความต้องการระบายอากาศเพิ่มขึ้น เช่น ในช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานสูงหรือความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2-12 การกำหนดค่า ACH_min และ ACH_max จากสมรรถนะพัดลมสองระดับความเร็ว
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงข้อมูลสมรรถนะพัดลมจากแคตตาล็อก Kruger MTD Series

ภาพที่ 2-12 แสดงแนวคิดการแปลงค่าอัตราการไหลของพัดลมเป็นค่า ACH โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศและปริมาตรห้อง หากพัดลมมีการทำงานสองระดับความเร็ว ค่าอัตราการไหลในระดับต่ำสามารถใช้แทน ACH_min และค่าอัตราการไหลในระดับสูงสามารถใช้แทน ACH_max ได้ แนวคิดนี้ช่วยให้ระบบสามารถกำหนดช่วงการระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการควบคุม CO_2 ภายในห้อง

สำหรับพัดลมแบบสองระดับความเร็ว ข้อดีสำคัญคือสามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมกับภาระการใช้งานของห้องได้ดีกว่าพัดลมที่ทำงานระดับเดียว ในช่วงที่มีผู้ใช้งานน้อยหรือ CO_2 ยังอยู่ในระดับต่ำ พัดลมสามารถทำงานที่ระดับต่ำเพื่อลดการใช้พลังงานและลดเสียงรบกวน แต่เมื่อมีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรือ CO_2 ภายในห้องสูงขึ้น ระบบสามารถเปลี่ยนเป็นระดับสูงเพื่อเพิ่มการระบายอากาศและลดการสะสมของ CO_2 ได้

ในงานวิจัยนี้ พัดลมอ้างอิงมีอัตราการไหลสองระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ 85 (m^3/h) และระดับสูง 145 (m^3/h) เมื่อนำมาใช้กับห้องสำนักงานขนาดเล็กที่มีปริมาตร 60 (m^3) จะสามารถกำหนดค่า ACH_min และ ACH_max ได้จากอัตราการไหลระดับต่ำและระดับสูงของพัดลมตามลำดับ โดยค่า ACH_min ใช้แทนการระบายอากาศพื้นฐานของระบบ S2 และค่า ACH_max ใช้แทนการระบายอากาศสูงสุดเมื่อระบบต้องตอบสนองต่อภาระ CO_2ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2-4 การกำหนดค่า ACH_min และ ACH_max จากอัตราการไหลของพัดลม

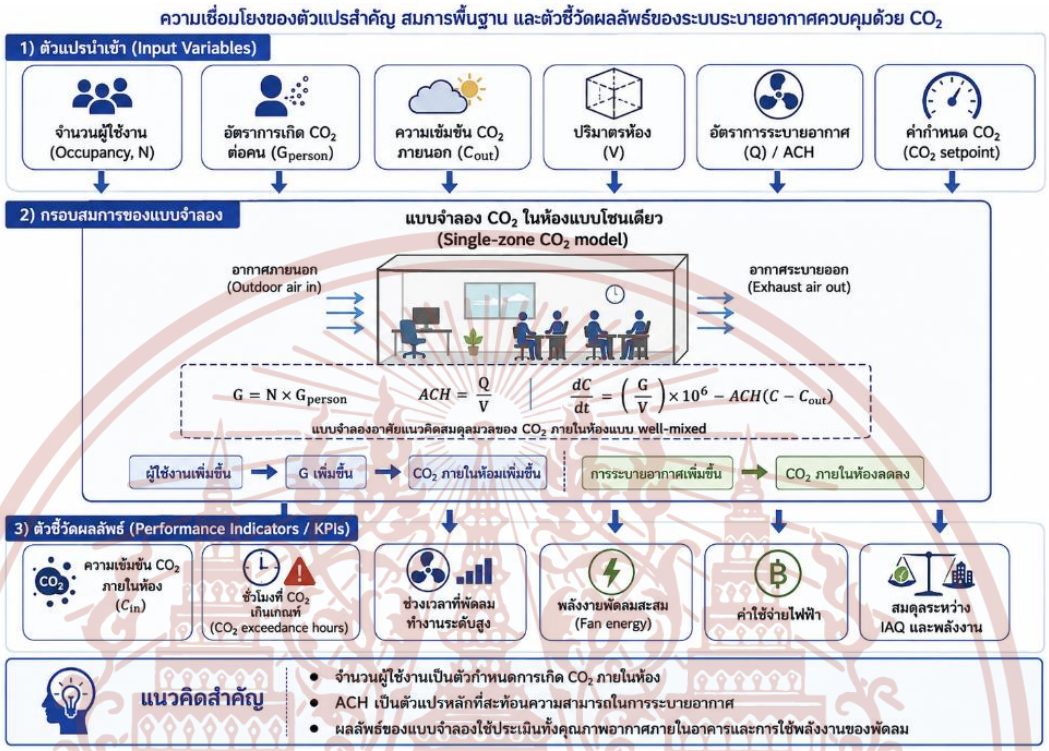
ระดับการทำงานของพัดลม	อัตราการไหลของอากาศ (Q)	ความหมายในแบบจำลอง	ค่า ACH ที่ใช้
Low speed	85 (m^3/h)	ใช้แทน ACH_min ของระบบ DCV	1.42 (h^{-1})
High speed	145 (m^3/h)	ใช้แทน ACH_max ของระบบ DCV	2.42 (h^{-1})

การกำหนดช่วง ACH_min และ ACH_max จากสมรรถนะพัดลมมีความสำคัญต่อแบบจำลอง CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation เนื่องจากเป็นการกำหนดขอบเขตการตอบสนองของระบบ หาก ACH_min ต่ำเกินไป อาจทำให้ CO_2 สะสมเร็วในช่วงเริ่มต้นหรือช่วงที่มีผู้ใช้งานต่อเนื่อง แต่หากสูงเกินไป อาจทำให้ระบบใช้พลังงานมากเกินความจำเป็น ในทำนองเดียวกัน หาก ACH_max ต่ำเกินไป ระบบอาจไม่สามารถลด CO_2 ได้เพียงพอในช่วงที่มีผู้ใช้งานสูง แต่หากสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการระบายอากาศเกินความจำเป็น

โดยสรุป ค่า ACH_min และ ACH_max เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่เชื่อมโยงสมรรถนะของพัดลมกับพฤติกรรมการควบคุมระบบระบายอากาศในแบบจำลอง พัดลมแบบสองระดับความเร็วมีความเหมาะสมกับระบบ CO_2-Based DCV เนื่องจากสามารถทำงานที่ระดับต่ำในช่วงภาระต่ำ และเพิ่มเป็นระดับสูงเมื่อ CO_2 หรือจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น แนวคิดนี้ช่วยให้ระบบสามารถรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมได้ดีกว่าการระบายอากาศที่ระดับคงที่ตลอดเวลา

2.3 สมการและตัวชี้วัดที่ใช้ในแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศด้วยการควบคุม CO_2 จำเป็นต้องอาศัยสมการพื้นฐานที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน การเกิด CO_2 ภายในห้อง การระบายอากาศ และความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารได้อย่างเป็นระบบ ในงานวิจัยนี้ สมการที่ใช้เป็นพื้นฐานประกอบด้วยสมการสมดุลมวลของ CO_2 สมการการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน สมการการคำนวณค่า Air Changes per Hour และสมการด้านพลังงานของพัดลม



ภาพที่ 2-13 กรอบสมการและตัวชี้วัดสำหรับแบบจำลอง CO_2-Based Ventilation

ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย เพื่อสรุปกรอบสมการและตัวชี้วัดที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 2-13 แสดงความเชื่อมโยงของตัวแปรสำคัญในแบบจำลอง โดยจำนวนผู้ใช้งานส่งผลต่ออัตราการเกิด CO_2 ภายในห้อง ขณะที่อัตราการระบายอากาศหรือ ACH ทำหน้าที่ควบคุมการเจือจางและการนำ CO_2 ออกจากพื้นที่ ผลลัพธ์ของแบบจำลองถูกนำไปประเมินผ่านตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร เช่น ค่าสูงสุดของ CO_2 ค่าเฉลี่ย CO_2 และชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ รวมถึงตัวชี้วัดด้านการทำงานของระบบและพลังงาน เช่น ระยะเวลาการทำงานที่ระดับสูง พลังงานพัดลม และค่าใช้จ่ายไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอสมการและตัวชี้วัดในเชิงทฤษฎีเท่านั้น โดยยังไม่ลงรายละเอียดการแทนค่าตัวเลขหรือการคำนวณเชิงออกแบบ เนื่องจากรายละเอียดดังกล่าวจะถูกนำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งเป็นส่วนของวิธีดำเนินการวิจัยและการพัฒนาแบบจำลอง MATLAB/Simulink ส่วนผลลัพธ์จากการใช้สมการและตัวชี้วัดเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์และอภิปรายในบทที่ 4

สมการและตัวชี้วัดในหัวข้อนี้จึงทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างแนวคิดทฤษฎีในบทที่ 2 กับการออกแบบแบบจำลองในบทที่ 3 โดยช่วยกำหนดว่าตัวแปรใดเป็นอินพุตของแบบจำลอง ตัวแปรใดเป็นผลลัพธ์ และผลลัพธ์ใดถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2

2.3.1 สมการสมดุลมวล CO_2

สมการสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสมการพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง โดยพิจารณาว่า CO_2 ภายในห้องเปลี่ยนแปลงจาก 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ การเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานภายในห้อง และการระบายอากาศที่นำอากาศภายนอกเข้ามาเจือจางพร้อมระบายอากาศภายในออกไป แนวคิดนี้เหมาะสำหรับการจำลองห้องแบบโซนเดียวภายใต้สมมติฐานว่าอากาศภายในห้องผสมกันอย่างสม่ำเสมอ

สำหรับห้องแบบ Single-Zone สามารถเขียนสมการสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องแบบโซนเดียวสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-4)

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{G_{total}}{V} \times 10^6 + \frac{Q}{V}(C_{out} - C_{in}) \qquad (2\text{-}4)$$

โดยที่

C_{in} คือ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง (ppm)

C_{out} คือ ความเข้มข้น CO_2 ของอากาศภายนอก (ppm)

G_{total} คือ อัตราการเกิด CO_2 รวมจากผู้ใช้งานภายในห้อง (m^3/s)

V คือ ปริมาตรห้อง (m^3)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศระบายอากาศ (m^3/s)

t คือ เวลา (s)

พจน์แรกของสมการ $(\frac{G_{total}}{V} \times 10^6)$ แสดงผลของการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานภายในห้องต่อความเข้มข้น CO_2 โดยอัตราการเกิด CO_2 รวมจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานในห้อง ค่า (10^6) ใช้สำหรับแปลงสัดส่วนปริมาตรของ CO_2 ให้อยู่ในหน่วย ppm ดังนั้น หากจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ค่า G_{total} จะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา

พจน์ที่สองของสมการ $(\frac{Q}{V}(C_{out} - C_{in}))$ แสดงผลของการระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง โดยพจน์นี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ Q ปริมาตรห้อง V และความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น CO_2 ภายนอกและภายในห้อง หาก C_{in} สูงกว่า C_{out} พจน์นี้จะมีค่าเป็นลบ แสดงว่าการระบายอากาศช่วยลดความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ในทางกลับกัน หาก C_{in} ใกล้เคียงกับ C_{out} ผลของการเจือจางจากการระบายอากาศจะลดลง

เมื่อใช้อัตราการระบายอากาศในรูปของ Air Changes per Hour หรือ ACH สมการสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-5)

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{G_{total}}{V} \times 10^6 + \frac{ACH}{3600}(C_{out} - C_{in}) \qquad (2\text{-}5)$$

โดยที่ (ACH) มีหน่วยเป็น (h^{-1}) และค่า 3600 ใช้สำหรับแปลงหน่วยจากชั่วโมงเป็นวินาที เพื่อให้พจน์การระบายอากาศอยู่ในหน่วย (s^{-1}) สมการรูปนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองเชิงเวลา เนื่องจากสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 ภายในห้องตามเวลาเมื่อจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงไป

จากสมการที่ (2-5) สามารถอธิบายพฤติกรรมของ CO_2 ภายในห้องได้ว่า ความเข้มข้น CO_2 จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานสูงกว่าอัตราการระบายออกของระบบ และจะลดลงหรือเข้าสู่ระดับสมดุลเมื่อการระบายอากาศเพียงพอ เมื่อค่า ACH เพิ่มขึ้น ผลของพจน์การระบายอากาศจะมากขึ้น ทำให้ CO_2 ถูกเจือจางและระบายออกจากห้องได้เร็วขึ้น ในทางกลับกันหากค่า ACH ต่ำ CO_2 จะสะสมภายในห้องได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะในช่วงที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูง

ในกรณีที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว หรือ steady-state ซึ่งความเข้มข้น CO_2 ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไข $(\frac{dC_{in}}{dt} = 0)$ และเขียนความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีได้ดังสมการที่ (2-6)

$$C_{ss} = C_{out} + \frac{G_{total} \times 10^6}{V(ACH/3600)} \quad (2\text{-}6)$$

โดยที่ C_{ss} คือ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องที่สภาวะคงตัว (ppm) สมการนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น CO_2 ที่สภาวะคงตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเกิด CO_2 รวมเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อค่า ACH เพิ่มขึ้น แนวคิดนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการอธิบายว่าทำไมจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศจึงเป็นตัวแปรหลักของแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ สมการสมดุลมวล CO_2 ถูกใช้เป็นสมการหลักสำหรับจำลองความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยรับข้อมูลจำนวนผู้ใช้งาน อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน ปริมาตรห้อง ความเข้มข้น CO_2 ภายนอก และค่า ACH ของแต่ละกลยุทธ์การระบายอากาศ เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของ (C_{in}) ตามเวลา สมการดังกล่าวจึงเป็นพื้นฐานสำคัญที่เชื่อมโยงทฤษฎีในบทนี้กับการพัฒนาแบบจำลอง MATLAB/Simulink ในบทที่ 3

2.3.2 การคำนวณอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งาน

อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผู้ใช้งานเป็นตัวแปรสำคัญในแบบจำลอง CO_2 ภายในห้อง เนื่องจากผู้ใช้งานเป็นแหล่งกำเนิดหลักของ CO_2 ในห้องสำนักงานทั่วไป โดยอัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการเกิด CO_2 ต่อคน ดังนั้น เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้อัตราการเกิด CO_2 ต่อคนเป็นค่าคงที่สำหรับผู้ใช้งานลักษณะนั่งทำงานในสำนักงาน โดยใช้อัตราการเกิด CO_2 ต่อคนเท่ากับ 0.31 L/min-person หรือเท่ากับ $(5.17\times10^{-6}\,m^3/s\text{-person})$ ซึ่งใช้เป็นค่าพารามิเตอร์หลักในแบบจำลอง MATLAB/Simulink

อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-7)

$$G_{total}(t) = N(t)\times G_{person} \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่

$G_{total}(t)$ คือ อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้อง ณ เวลา (t) (m^3/s)

$N(t)$ คือ จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง ณ เวลา (t) (person)

G_{person} คือ อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน $(m^3/s\text{-person})$

จากสมการที่ (2-7) จะเห็นว่า จำนวนผู้ใช้งานเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้อง หากจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ค่า G_{total} จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน ในทางกลับกัน หากไม่มีผู้ใช้งานภายในห้อง ค่า $N(t)$ จะเท่ากับศูนย์ และอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานจะเท่ากับศูนย์เช่นกัน

ค่าที่ใช้ในแบบจำลองสามารถแปลงหน่วยจาก L/min-person เป็น $(m^3/s\text{-person})$ ได้ดังสมการที่ (2-8)

$$G_{person} = 0.31\frac{L}{min\cdot person} = 5.17\times10^{-6}\,\frac{m^3}{s\cdot person} \qquad (2\text{-}8)$$

ค่า G_{person} ดังกล่าวถูกใช้เป็นค่าคงที่ในแบบจำลอง เพื่อคำนวณอัตราการเกิด CO_2 รวมจากจำนวนผู้ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา โดยข้อมูลจำนวนผู้ใช้งาน (N(t)) มาจากตารางเวลาการใช้งานห้องหรือ occupancy schedule ซึ่งกำหนดให้เปลี่ยนแปลงตามรูปแบบการใช้งานของห้องสำนักงาน

เมื่อได้ค่า $G_{total}(t)$ แล้ว ค่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นพจน์แหล่งกำเนิดในสมการสมดุลมวล CO_2 โดยสามารถเขียนในรูปของอัตราการเพิ่มความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องได้ดังสมการที่ (2-9)

$$S_{CO_2}(t) = \frac{G_{total}(t)}{V}\times10^6 \qquad (2\text{-}9)$$

โดยที่

$S_{CO_2}(t)$ คือ อัตราการเพิ่มความเข้มข้น CO_2 จากผู้ใช้งาน (ppm/s)

V คือ ปริมาตรห้อง (m^3)

สมการที่ (2-13) แสดงให้เห็นว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของ CO_2 ภายในห้องไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้งานเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาตรของห้องด้วย หากห้องมีปริมาตรน้อยเมื่อมีผู้ใช้งานจำนวนเท่ากัน ความเข้มข้น CO_2 จะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าเมื่อเทียบกับห้องที่มีปริมาตรมากกว่า

โดยสรุป การคำนวณอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานเป็นขั้นตอนสำคัญในการกำหนดพจน์แหล่งกำเนิดของแบบจำลอง CO_2 ภายในห้อง งานวิจัยนี้ใช้ค่า $(G_{person} = 5.17 \times 10^{-6} m^3 / s\text{-person})$ และคำนวณค่า $G_{total}(t)$ ตามจำนวนผู้ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำไปใช้ร่วมกับสมการสมดุลมวล CO_2 ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก

2.3.3 การคำนวณ ACH

Air Changes per Hour หรือ ACH เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศของห้องภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีหน่วยเป็น (h^{-1}) ค่า ACH แสดงจำนวนครั้งโดยเทียบเท่าที่ปริมาตรอากาศภายในห้องถูกแทนที่หรือระบายออกในหนึ่งชั่วโมง ตัวแปรนี้มีความสำคัญต่อแบบจำลอง CO_2 เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราการเจือจางและการนำ CO_2 ออกจากห้อง

ค่า ACH สามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของอากาศระบายอากาศหารด้วยปริมาตรห้อง ดังสมการที่ (2-10)

$$ACH = \frac{Q}{V} \tag{2-10}$$

โดยที่

ACH คือ อัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศต่อชั่วโมง (h^{-1})

Q คือ อัตราการไหลของอากาศระบายอากาศ (m^3/h)

V คือ ปริมาตรห้อง (m^3)

จากสมการที่ (2-10) จะเห็นว่า หากอัตราการไหลของอากาศ (Q) เพิ่มขึ้น ค่า ACH จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายถึงระบบมีความสามารถในการระบายอากาศและเจือจาง CO_2 ได้มากขึ้น ในทางกลับกัน หากปริมาตรห้อง (V) เพิ่มขึ้น แต่ใช้อัตราการไหลของอากาศเท่าเดิม ค่า ACH จะลดลง แสดงว่าการระบายอากาศต่อปริมาตรห้องลดลง

ในกรณีที่อัตราการไหลของอากาศอยู่ในหน่วย (m^3/s) สามารถแปลงเป็นค่า ACH ได้โดยคูณด้วย 3600 เพื่อแปลงหน่วยเวลาจากวินาทีเป็นชั่วโมง ดังสมการที่ (2-11)

$$ACH = \frac{3600Q}{V} \tag{2-11}$$

โดยที่ (Q) ในสมการที่ (2-11) มีหน่วยเป็น (m^3/s) ส่วนค่า (ACH) ที่ได้ยังคงมีหน่วยเป็น (h^{-1}) ความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญในการพัฒนาแบบจำลอง เนื่องจากข้อมูลสมรรถนะพัดลมมักอยู่ในหน่วย (m^3/h) ขณะที่สมการสมดุลมวล CO_2 ในแบบจำลองเชิงเวลามักใช้หน่วยวินาที

นอกจากนี้ หากทราบค่า ACH ที่ต้องการและปริมาตรห้อง สามารถคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ต้องใช้ได้จากสมการที่ (2-12)

$$Q = ACH \times V \tag{2-12}$$

สมการที่ (2-12) แสดงความสัมพันธ์ย้อนกลับระหว่างค่า ACH และอัตราการไหลของอากาศ โดยสามารถใช้พิจารณาอัตราการไหลของพัดลมที่เหมาะสมกับขนาดห้องและระดับการระบายอากาศที่ต้องการได้

ในงานวิจัยนี้ ค่า ACH ถูกใช้เป็นตัวแปรหลักในการกำหนดระดับการระบายอากาศของแต่ละกลยุทธ์ ได้แก่ ค่า ACH_{nat} สำหรับการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานหรือการรั่วซึมของอาคาร ค่า ACH_min สำหรับการทำงานระดับต่ำของระบบระบายอากาศตามความต้องการ และค่า ACH_max สำหรับการทำงานระดับสูงของระบบระบายอากาศ โดยค่า ACH เหล่านี้ถูกนำไปใช้ในสมการสมดุลมวล CO_2 เพื่อประเมินผลของการระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

เมื่อใช้ค่า ACH ในสมการสมดุลมวล CO_2 จำเป็นต้องแปลงหน่วยจาก (h^{-1}) เป็น (s^{-1}) โดยหารด้วย 3600 ดังนั้นพจน์การระบายอากาศในสมการ CO_2 จึงอยู่ในรูป $(\frac{ACH}{3600}(C_{out} - C_{in}))$ เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 ตามเวลาในหน่วยวินาที

โดยสรุป ค่า ACH เป็นตัวแปรสำคัญที่เชื่อมโยงสมรรถนะของระบบระบายอากาศกับขนาดของห้อง ค่า ACH ที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถในการเจือจาง CO_2 ภายในห้อง แต่ในระบบระบายอากาศเชิงกล การเพิ่มค่า ACH อาจสัมพันธ์กับการใช้พลังงานของพัดลมที่สูงขึ้น ดังนั้น การกำหนดค่า ACH ที่เหมาะสมจึงเป็นพื้นฐานสำคัญของการเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศและการออกแบบระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ในงานวิจัยนี้

2.3.4 การคำนวณ CO_2 Risk Hour

CO_2 Risk Hour เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินระยะเวลาสะสมที่ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิงที่กำหนด โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่า 1000 ppm เป็นเกณฑ์อ้างอิงสำหรับประเมินความเพียงพอของการระบายอากาศภายในห้องสำนักงาน ตัวชี้วัดนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศได้ชัดเจนกว่าการพิจารณาค่าสูงสุดของ CO_2 เพียงค่าเดียว เนื่องจากสามารถสะท้อนทั้งระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่เกิดการสะสม CO_2 เกินเกณฑ์

การคำนวณ CO_2 Risk Hour สามารถพิจารณาจากเงื่อนไขของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ดังสมการที่ (2-13)

$$I_{risk}(t) = \begin{cases} 1, & C_{in}(t) > C_{limit} \\ 0, & C_{in}(t) \le C_{limit} \end{cases} \tag{2-13}$$

โดยที่

$I_{risk}(t)$ คือ ตัวแปรบ่งชี้สถานะความเสี่ยงของ CO_2 ณ เวลา (t)

$C_{in}(t)$ คือ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ณ เวลา (t) (ppm)

C_{limit} คือ ค่าเกณฑ์อ้างอิงของ CO_2 (ppm)

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ (C_{limit} =1000 ppm) หากค่า ($C_{in}(t)$) สูงกว่า (C_{limit}) ตัวแปร ($I_{risk}(t)$) จะมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าในช่วงเวลานั้น CO_2 เกินเกณฑ์อ้างอิง แต่หากค่า ($C_{in}(t)$) ไม่เกินเกณฑ์ ตัวแปรดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 0

ระยะเวลาสะสมที่ CO_2 เกินเกณฑ์สามารถคำนวณได้จากผลรวมของช่วงเวลาที่ ($I_{risk}(t)$) มีค่าเท่ากับ 1 ดังสมการที่ (2-14)

$$CO_{2,risk} = \sum_{k=1}^{n} I_{risk}(k)\Delta t \qquad (2\text{-}14)$$

โดยที่

$CO_{2,risk}$ คือ ระยะเวลาสะสมที่ CO_2 เกินเกณฑ์ (hr)

$I_{risk}(k)$ คือ ตัวแปรบ่งชี้สถานะความเสี่ยงของ CO_2 ที่ช่วงเวลาที่ (k)

Δt คือ ช่วงเวลาการคำนวณ (hr)

n คือ จำนวนช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับกรณีห้องสำนักงาน อาจพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานอยู่ภายในห้อง เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่คุณภาพอากาศมีผลโดยตรงต่อผู้ใช้งานอาคาร ดังนั้นสามารถเขียนตัวชี้วัด CO_2 Risk Hour เฉพาะช่วงมีผู้ใช้งานได้ดังสมการที่ (2-15)

$$CO_{2,risk,occ} = \sum_{k=1}^{n} I_{risk}(k) I_{occ}(k)\Delta t \qquad (2\text{-}15)$$

โดยที่

$I_{occ}(k)$ คือ ตัวแปรบ่งชี้สถานะการมีผู้ใช้งานในห้อง โดยมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีผู้ใช้งาน และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีผู้ใช้งาน

สมการที่ (2-15) ช่วยให้การประเมิน CO_2 Risk Hour สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของห้องสำนักงานมากขึ้น เนื่องจากนับเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานอยู่ภายในห้อง หาก CO_2 สูงในช่วงที่ไม่มีผู้ใช้งาน ผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้งานจะน้อยกว่าช่วงที่มีคนอยู่ภายในพื้นที่

ตัวชี้วัด CO_2 Risk Hour มีประโยชน์ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศแต่ละรูปแบบ โดยระบบที่มีค่า CO_2 Risk Hour ต่ำกว่าแสดงว่าระบบสามารถควบคุม CO_2 ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์อ้างอิงได้ดีกว่า ในทางกลับกัน หากระบบมีค่า CO_2 Risk Hour สูง แสดงว่ามีช่วงเวลาที่ CO_2 เกินเกณฑ์สะสมมากกว่า ซึ่งสะท้อนถึงความไม่เพียงพอของการระบายอากาศหรือการตอบสนองของระบบต่อภาระผู้ใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ CO_2 Risk Hour ถูกใช้ร่วมกับตัวชี้วัดอื่น เช่น ค่าสูงสุดของ CO_2 ค่าเฉลี่ย CO_2 และพลังงานของพัดลม เพื่อประเมินสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ การใช้ตัวชี้วัดนี้ทำให้สามารถเปรียบเทียบระบบ S0, S1 และ S2 ได้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการประเมินว่าระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation สามารถลดช่วงเวลาที่ CO_2 เกินเกณฑ์ได้มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับการระบายอากาศรูปแบบอื่น

2.3.5 การคำนวณพลังงานพัดลม

พลังงานไฟฟ้าของพัดลมเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ประเมินผลด้านพลังงานของระบบระบายอากาศเชิงกล ในงานวิจัยนี้พิจารณาพลังงานเฉพาะของพัดลมระบายอากาศ ไม่รวมพลังงานของระบบปรับอากาศหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น โดยพลังงานพัดลมขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของพัดลมและระยะเวลาการทำงานของพัดลมในแต่ละระดับความเร็ว

ในกรณีทั่วไป พลังงานไฟฟ้าของพัดลมสามารถคำนวณได้จากผลคูณระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลา ดังสมการที่ (2-16)

$$E_{fan} = \frac{P_{fan} \times t}{1000} \qquad (2\text{-}16)$$

โดยที่

E_{fan} คือ พลังงานไฟฟ้าของพัดลม (kWh)

P_{fan} คือ กำลังไฟฟ้าของพัดลม (W)

t คือ ระยะเวลาการทำงานของพัดลม (hr)

ค่า 1000 ในสมการใช้สำหรับแปลงหน่วยจาก Wh เป็น kWh เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของพัดลมมักระบุในหน่วยวัตต์ (W) ขณะที่การประเมินพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายนิยมใช้หน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

สำหรับแบบจำลองเชิงเวลา ซึ่งกำลังไฟฟ้าของพัดลมอาจเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา สามารถคำนวณพลังงานสะสมของพัดลมได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังสมการที่ (2-17)

$$E_{fan} = \sum_{k=1}^{n} \frac{P_{fan}(k)\Delta t}{1000} \qquad (2\text{-}17)$$

โดยที่

$P_{fan}(k)$ คือ กำลังไฟฟ้าของพัดลมที่ช่วงเวลาที่ (k) (W)

Δt คือ ช่วงเวลาการคำนวณ (hr)

n คือ จำนวนช่วงเวลาทั้งหมดของการจำลอง

สมการที่ (2-17) เหมาะสำหรับระบบระบายอากาศที่พัดลมมีการเปลี่ยนระดับการทำงานตามเวลา เช่น ระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation เนื่องจากในบางช่วงเวลาพัดลมอาจทำงานที่ระดับต่ำ บางช่วงเวลาอาจทำงานที่ระดับสูง และบางช่วงเวลาอาจหยุดทำงาน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการควบคุมของระบบ

สำหรับพัดลมแบบสองระดับความเร็ว กำลังไฟฟ้าของพัดลมสามารถกำหนดตามสถานะการทำงานได้ดังสมการที่ (2-18)

$$P_{fan}(t) = \begin{cases} 0, & \text{Fan off} \\ P_{low}, & \text{Low speed} \\ P_{high}, & \text{High speed} \end{cases} \qquad (2\text{-}18)$$

โดยที่

P_{low} คือ กำลังไฟฟ้าของพัดลมเมื่อทำงานที่ระดับต่ำ (W)

P_{high} คือ กำลังไฟฟ้าของพัดลมเมื่อทำงานที่ระดับสูง (w)

สมการที่ (2-18) แสดงให้เห็นว่า พลังงานพัดลมไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่พัดลมทำงานในแต่ละระดับด้วย หากพัดลมทำงานที่ระดับสูงเป็นเวลานาน พลังงานสะสมจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากระบบสามารถทำงานที่ระดับต่ำได้เป็นส่วนใหญ่ และใช้ระดับสูงเฉพาะช่วงที่จำเป็น พลังงานสะสมของพัดลมจะลดลง

ในงานวิจัยนี้ กลยุทธ์ S0 ถือว่าไม่มีการใช้พัดลมระบายอากาศเชิงกล จึงไม่พิจารณาพลังงานพัดลมสำหรับกรณีดังกล่าว ส่วนกลยุทธ์ S1 เป็นระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ จึงใช้กำลังไฟฟ้าของพัดลมในระดับที่กำหนดตลอดช่วงเวลาที่มีการใช้งานระบบ ขณะที่กลยุทธ์ S2 เป็นระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ซึ่งพลังงานพัดลมจะเปลี่ยนแปลงตามสถานะการทำงานระดับต่ำหรือระดับสูงของพัดลม

พลังงานพัดลมสะสมของแต่ละกลยุทธ์สามารถใช้เปรียบเทียบสมรรถนะด้านพลังงานของระบบระบายอากาศได้ โดยระบบที่มีค่า (E_{fan}) ต่ำกว่าแสดงว่ามีการใช้พลังงานพัดลมน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม การประเมินพลังงานควรพิจารณาร่วมกับตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศ เช่น ความเข้มข้น CO_2 และ CO_2 Risk Hour เพื่อให้สามารถประเมินสมดุลระหว่างการประหยัดพลังงานและความสามารถในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม

โดยสรุป การคำนวณพลังงานพัดลมในงานวิจัยนี้ใช้หลักการผลรวมของกำลังไฟฟ้าตามช่วงเวลาการทำงานของพัดลม โดยพิจารณาสถานะการทำงานของระบบระบายอากาศแต่ละกลยุทธ์ สมการดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำหรับการประเมินผลด้านพลังงาน และใช้เชื่อมโยงไปสู่การคำนวณค่าใช้จ่ายไฟฟ้าและการประหยัดพลังงานในหัวข้อถัดไป

2.3.6 การคำนวณค่าไฟฟ้าและการประหยัดพลังงาน

การประเมินค่าไฟฟ้าของระบบระบายอากาศเป็นการนำค่าพลังงานไฟฟ้าของพัดลมที่ได้จากการจำลองมาคูณกับอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบผลด้านค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์การระบายอากาศแต่ละรูปแบบ ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะค่าไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศ ไม่รวมพลังงานของระบบปรับอากาศหรือโหลดไฟฟ้าอื่นภายในอาคาร

ค่าไฟฟ้าของพัดลมสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-19)

$$Cost_{fan} = E_{fan} \times R_{elec} \quad (2\text{-}19)$$

โดยที่

$Cost_{fan}$ คือ ค่าไฟฟ้าของพัดลม (THB)

E_{fan} คือ พลังงานไฟฟ้าของพัดลม (kWh)

R_{elec} คือ อัตราค่าไฟฟ้า (THB/kWh)

สมการที่ (2-19) แสดงให้เห็นว่า ค่าไฟฟ้าของพัดลมแปรผันโดยตรงกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ หากระบบระบายอากาศใช้พลังงานพัดลมมาก ค่าไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน หากสามารถลดระยะเวลาการทำงานของพัดลมหรือทำให้พัดลมทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่ำลง ค่าไฟฟ้าจะลดลง

การประเมินการประหยัดพลังงาน หรือ Energy Saving สามารถคำนวณจากผลต่างของพลังงานระหว่างกรณีอ้างอิงและกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบ ดังสมการที่ (2-20)

$$E_{saving} = E_{ref} - E_{case} \quad (2\text{-}20)$$

โดยที่

E_{saving} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kWh)

E_{ref} คือ พลังงานไฟฟ้าของกรณีอ้างอิง (kWh)

E_{case} คือ พลังงานไฟฟ้าของกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบ (kWh)

ในงานวิจัยนี้ใช้กลยุทธ์การระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่เป็นกรณีอ้างอิงด้านพลังงาน เนื่องจากเป็นระบบที่พัดลมทำงานด้วยระดับการระบายอากาศคงที่ ส่วนระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation เป็นกรณีที่ต้องการประเมินความสามารถในการลดการใช้พลังงานพัดลม ดังนั้น สามารถเขียนการประหยัดพลังงานของระบบ DCV เมื่อเทียบกับระบบระบายอากาศคงที่ได้ดังสมการที่ (2-21)

$$E_{saving,S2} = E_{S1} - E_{S2} \quad (2\text{-}21)$$

โดยที่ E_{S1} คือ พลังงานพัดลมของระบบระบายอากาศแบบคงที่ และ E_{S2} คือ พลังงานพัดลมของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation

นอกจากนี้ การประหยัดพลังงานสามารถแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ได้ดังสมการที่ (2-22)

$$Saving_{energy} = \frac{E_{S1} - E_{S2}}{E_{S1}} \times 100 \qquad (2\text{-}22)$$

โดยที่ $Saving_{energy}$ คือ ร้อยละการประหยัดพลังงานของระบบ S2 เมื่อเทียบกับระบบ S1 (%)

สมการที่ (2-22) ใช้แสดงสัดส่วนการลดพลังงานของระบบ DCV เมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิง หากค่า ($Saving_{energy}$) มีค่ามาก แสดงว่าระบบ S2 สามารถลดการใช้พลังงานพัดลมได้มากเมื่อเทียบกับระบบ S1 แต่หากค่าดังกล่าวต่ำ แสดงว่าระบบ DCV มีผลในการลดพลังงานน้อย หรือมีการทำงานที่ระดับสูงเป็นเวลานาน

การประหยัดค่าไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากผลต่างของค่าไฟฟ้าระหว่างกรณีอ้างอิงและกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบ ดังสมการที่ (2-23)

$$Cost_{saving} = Cost_{S1} - Cost_{S2} \qquad (2\text{-}23)$$

โดยที่

$Cost_{saving}$ คือ ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (THB)

$Cost_{S1}$ คือ ค่าไฟฟ้าของระบบระบายอากาศแบบคงที่ (THB)

$Cost_{S2}$ คือ ค่าไฟฟ้าของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation (THB)

ในงานวิจัยนี้ การประเมินค่าไฟฟ้าและการประหยัดพลังงานถูกใช้เป็นตัวชี้วัดด้านพลังงานของระบบระบายอากาศ โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบ S1 และ S2 เป็นหลัก เนื่องจากทั้งสองกรณีมีการใช้พัดลมระบายอากาศเชิงกล ขณะที่ S0 เป็นกรณีอ้างอิงของการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานโดยไม่มีพัดลมระบายอากาศเชิงกล จึงไม่ถูกใช้เป็นกรณีเปรียบเทียบด้านการประหยัดพลังงานพัดลมโดยตรง

โดยสรุป การคำนวณค่าไฟฟ้าและ Saving ช่วยให้สามารถประเมินผลด้านเศรษฐศาสตร์พลังงานของระบบระบายอากาศได้อย่างชัดเจน เมื่อใช้ร่วมกับตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศ เช่น ความเข้มข้น CO_2 และ CO_2 Risk Hour จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์สมดุลระหว่างการลดการใช้พลังงานและความสามารถในการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ได้อย่างเหมาะสม

2.3.7 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ หรือ Sensitivity Analysis เป็นวิธีการที่ใช้ศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ภายในแบบจำลองส่งผลต่อผลลัพธ์มากน้อยเพียงใด แนวทางนี้มีความสำคัญต่อแบบจำลองทางวิศวกรรม เนื่องจากช่วยระบุว่าพารามิเตอร์ใดมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์หลักของระบบ และช่วยเพิ่มความเข้าใจต่อพฤติกรรมของแบบจำลองเมื่อค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไป

ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวถูกใช้เพื่อประเมินผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ต่อผลลัพธ์ด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและพลังงานของพัดลม โดยพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ เช่น ค่า ACH_min, ACH_max, ค่าเกณฑ์ควบคุม CO_2 และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด ส่งผลต่อค่าความเข้มข้น CO_2, CO_2 Risk Hour, ระยะเวลาการทำงานระดับสูงของพัดลม และพลังงานพัดลมอย่างไร

แนวคิดพื้นฐานของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-24)

$$S_x = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \qquad (2\text{-}24)$$

โดยที่

S_x คือ ค่าความไวของผลลัพธ์ต่อพารามิเตอร์ (X)

ΔY คือ การเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่สนใจ

ΔX คือ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่พิจารณา

สมการที่ (2-28) แสดงให้เห็นว่า หากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อย ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าผลลัพธ์มีความอ่อนไหวต่อพารามิเตอร์นั้นสูง ในทางกลับกัน หากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ส่งผลต่อผลลัพธ์เพียงเล็กน้อย แสดงว่าพารามิเตอร์นั้นมีอิทธิพลต่อแบบจำลองน้อยกว่า

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ที่มีหน่วยแตกต่างกันได้ อาจพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงในรูปเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ (2-25)

$$\%\Delta Y = \frac{Y_{case} - Y_{base}}{Y_{base}} \times 100 \qquad (2\text{-}25)$$

โดยที่

Y_{base} คือ ผลลัพธ์ของกรณีฐาน

Y_{case} คือ ผลลัพธ์เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

$\%\Delta Y$ คือ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์เมื่อเทียบกับกรณีฐาน

ในงานวิจัยนี้ใช้แนวทางการเปลี่ยนพารามิเตอร์ทีละตัว หรือ One-at-a-Time Sensitivity Analysis โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ แล้วเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาเพื่อพิจารณาผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง วิธีนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมที่ต้องการอธิบายผลของพารามิเตอร์แต่ละตัวอย่างชัดเจน และช่วยให้สามารถตีความความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับผลลัพธ์ได้โดยตรง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย $ACH_{\min}$, $ACH_{\max}$, ค่าเกณฑ์ควบคุม CO_2 และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด โดยแต่ละพารามิเตอร์ถูกเลือกเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการทำงานของระบบ DCV และสมการสมดุลมวล CO_2 ค่า $ACH_{\min}$ และ $ACH_{\max}$ ส่งผลต่อความสามารถในการเจือจาง CO_2 ค่าเกณฑ์ควบคุม CO_2 ส่งผลต่อจังหวะการเปลี่ยนระดับการทำงานของพัดลม และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดส่งผลต่ออัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้อง

ผลลัพธ์ที่ใช้ประเมินในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวประกอบด้วยค่าสูงสุดของ CO_2 ค่าเฉลี่ย CO_2, CO_2 Risk Hour, ระยะเวลาการทำงานระดับสูงของพัดลม พลังงานพัดลม และร้อยละการประหยัดพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์เหล่านี้ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน จะสามารถระบุได้ว่าพารามิเตอร์ใดมีผลต่อคุณภาพอากาศและการใช้พลังงานของระบบมากที่สุด

โดยสรุป การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยตรวจสอบพฤติกรรมของแบบจำลองและอธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะของระบบระบายอากาศ ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยสนับสนุนการประเมินระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ว่าพารามิเตอร์ใดมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุม CO_2 และการลดการใช้พลังงานของพัดลม

2.4 การประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

แม้ว่าการควบคุมระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) จะสามารถช่วยรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของพัดลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การทำงานของระบบระบายอากาศยังคงต้องพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้า (Grid) เป็นหลัก ดังนั้นการประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับระบบระบายอากาศจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถช่วยลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าและส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดภายในอาคาร

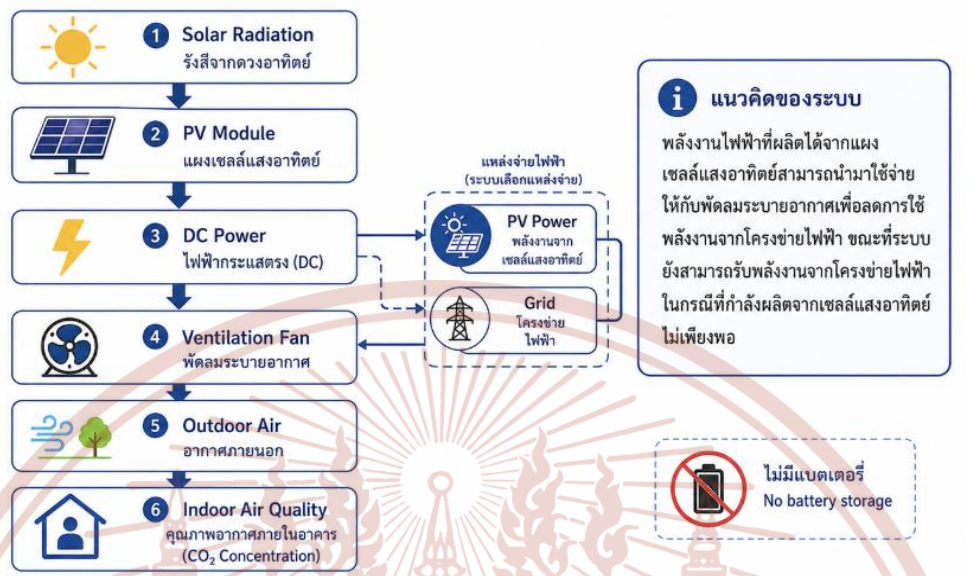
ในการประยุกต์ใช้ดังกล่าว การประเมินสมรรถนะของระบบจำเป็นต้องพิจารณาทั้งด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) และด้านพลังงานควบคู่กัน เนื่องจากการเพิ่มอัตราการระบายอากาศสามารถช่วยลดความเข้มข้นของ CO_2 ภายในอาคารได้ แต่ในขณะเดียวกันอาจส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบระบายอากาศและภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การผสมผสานระบบ DCV เข้ากับพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการสร้างสมดุลระหว่างการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารและการลดการใช้พลังงาน

เพื่อแสดงศักยภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกรณีศึกษาเพิ่มเติมในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลสภาพอากาศจริง โดยใช้ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากฐานข้อมูล NASA POWER ร่วมกับข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจากระบบ Air4Thai เพื่อประเมินการทำงานของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ที่ทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงตลอดช่วงเวลาการจำลอง ทั้งนี้ กรณีศึกษาดังกล่าวเป็นส่วนต่อยอดจากแบบจำลองหลักของงานวิจัย และมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองในสถานการณ์จริง

2.4.1 หลักการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในภาคอาคาร เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด สามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยไม่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างการใช้งาน และช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า (Grid) การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยหลักการ Photovoltaic Effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ได้โดยตรง เมื่อโฟตอนจากแสงอาทิตย์ตกกระทบบนรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n จะทำให้เกิดการแยกตัวของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron–Hole Pair) ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าและสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดภายนอกได้

โดยทั่วไป ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) ซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นสามารถนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยตรง หรือผ่านอุปกรณ์แปลงกำลังไฟฟ้า (Inverter) เพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสสลับสำหรับใช้งานร่วมกับระบบไฟฟ้าภายในอาคาร ทั้งนี้ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่ได้คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พื้นที่ติดตั้ง ประสิทธิภาพของแผง รวมถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ประกอบระบบ เช่น สายไฟและอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามสภาพภูมิอากาศและช่วงเวลาของวันดังแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 หลักการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ใช้กับระบบระบายอากาศ
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ร่วมกับพัดลมระบายอากาศในงานวิจัยนี้

ในทางทฤษฎี กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถประมาณจากสมการพื้นฐานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

$$P_{PV} = G \times A \times \eta \qquad (2\text{-}26)$$

โดยที่

P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)

G คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) (W/m²)

A คือ พื้นที่รับรังสีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

η คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และพื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะที่ประสิทธิภาพของระบบเป็นปัจจัยที่สะท้อนการสูญเสียจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ เช่น การสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สายไฟ และอุปกรณ์แปลงกำลังไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวเป็นสมการพื้นฐานสำหรับอธิบายหลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองของงานวิจัยนี้ได้พิจารณาพารามิเตอร์ของระบบและข้อมูลสภาพอากาศจริง ซึ่งจะอธิบายในบทที่ 3

ในปัจจุบัน ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบระบายอากาศของอาคารมากขึ้น โดยเฉพาะระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled

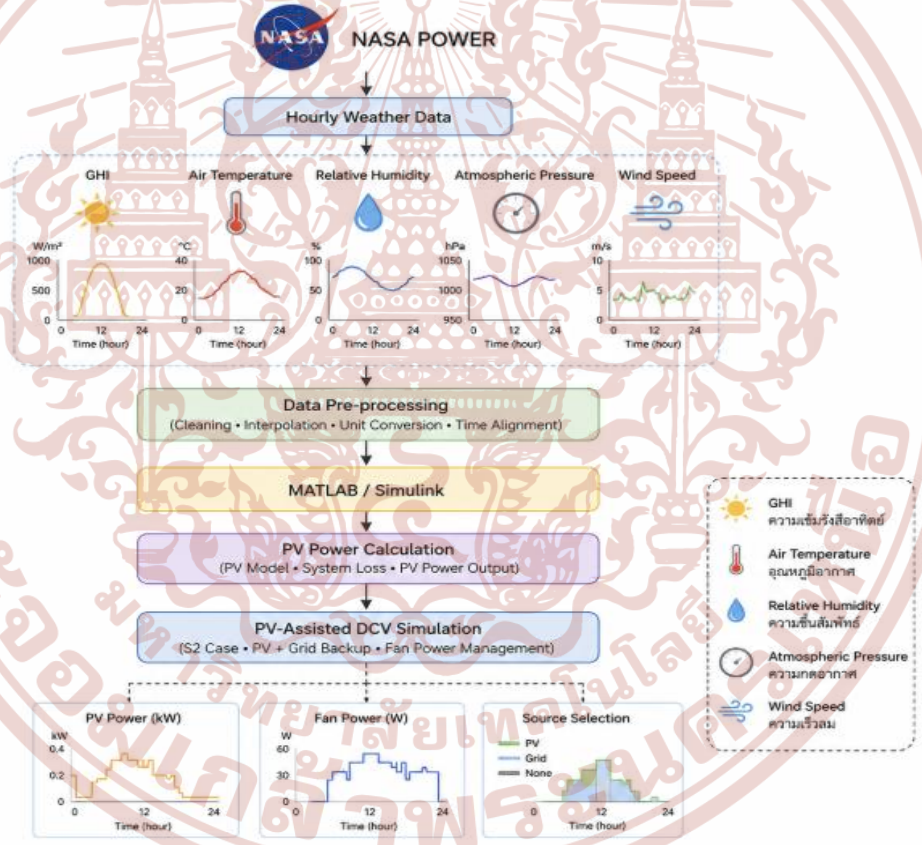
Ventilation: DCV) ซึ่งมีลักษณะการใช้พลังงานแปรผันตามภาระการระบายอากาศในแต่ละช่วงเวลา การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศสามารถลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนภายในอาคารได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารอาจทำให้ภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้น การประเมินสมรรถนะของระบบจึงควรพิจารณาทั้งด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานควบคู่กัน เพื่อหาสมดุลที่เหมาะสมระหว่างคุณภาพอากาศและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

สำหรับกรณีศึกษาเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้ ได้ประยุกต์ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าภายใต้สภาพอากาศจริง โดยใช้ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์จากฐานข้อมูล NASA POWER เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.2 การใช้ข้อมูลสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER

การประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลสภาพอากาศที่มีความถูกต้องและมีความละเอียดตามช่วงเวลา เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ รวมทั้งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา เช่น อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความดันบรรยากาศ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ฐานข้อมูล NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) ซึ่งพัฒนาโดย NASA Langley Research Center และได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลสภาพอากาศและข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ได้ครอบคลุมทั่วโลก ทั้งในรูปแบบรายวันและรายชั่วโมง โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกช่วงเวลาและพิกัดพื้นที่ศึกษาที่ต้องการได้ ทำให้เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองเชิงวิศวกรรมและการประเมินสมรรถนะของระบบพลังงานในระดับอาคาร

สำหรับกรณีศึกษาเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ข้อมูล รายชั่วโมง (Hourly Data) เพื่อให้สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้สอดคล้องกับสภาพอากาศจริงในแต่ละช่วงเวลา ตัวแปรที่นำมาใช้ประกอบด้วย รังสีดวงอาทิตย์รวมบนพื้นราบ (Global Horizontal Irradiance: GHI) อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure) และความเร็วลม (Wind Speed) โดยข้อมูลดังกล่าวถูกนำเข้าสู่แบบจำลองใน MATLAB/Simulink เพื่อใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และกำหนดสภาวะแวดล้อมของแบบจำลอง ทั้งนี้ รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2-5 และกระบวนการนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองแสดงในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 โครงสร้างการใช้ข้อมูลสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER
ที่มา: จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจาก NASA POWER และแนวทางการประมวลผลข้อมูลเพื่อการจำลองระบบพลังงานแสงอาทิตย์ใน MATLAB/Simulink

ตารางที่ 2-5 ตัวแปรสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER ที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ตัวแปร	สัญลักษณ์	หน่วย	การนำไปใช้
1	รังสีดวงอาทิตย์รวมบนพื้นราบ	GHI	W/m²	คำนวณกำลังไฟฟ้าของ PV
2	อุณหภูมิอากาศ	Ta	°C	ข้อมูลสภาพแวดล้อม
3	ความชื้นสัมพัทธ์	RH	%	ประเมินสภาพอากาศ
4	ความดันบรรยากาศ	P	kPa	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา
5	ความเร็วลม	WS	m/s	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

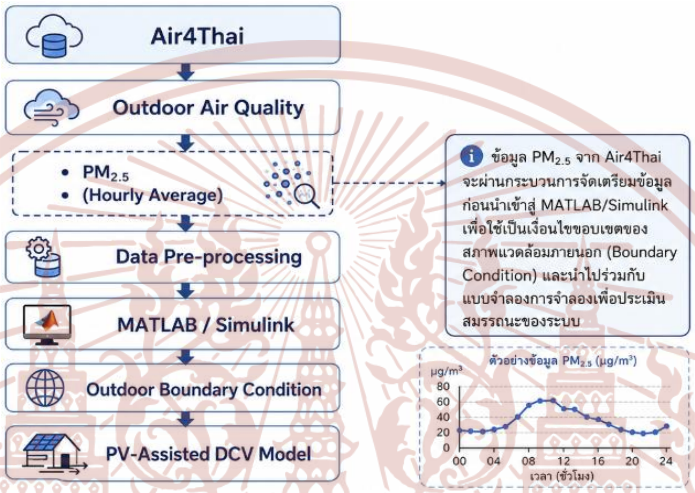
ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลอง ข้อมูลทั้งหมดได้รับการตรวจสอบความถูกต้องและจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง โดยประกอบด้วยการตรวจสอบข้อมูลที่ขาดหาย (Missing Data) การจัดรูปแบบข้อมูลตามช่วงเวลาของการจำลอง และการสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้า (Input Data File) สำหรับใช้งานใน MATLAB/Simulink ขั้นตอนดังกล่าวช่วยให้ข้อมูลสภาพอากาศสามารถเชื่อมโยงกับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบระบายอากาศได้อย่างถูกต้อง ส่งผลให้การประเมินสมรรถนะของระบบมีความสมจริงและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ วิธีการประมวลผลข้อมูลและการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3

2.4.3 การใช้ข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจาก Air4Thai

การประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) นอกจากจะพิจารณาปัจจัยที่เกิดขึ้นภายในอาคารแล้ว ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณภาพอากาศภายนอกอาคาร (Outdoor Air Quality: OAQ) เนื่องจากอากาศที่ถูกนำเข้าสู่ระบบระบายอากาศสามารถส่งผลต่อสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้โดยตรง โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้อาคารและมักมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศ ฤดูกาล และกิจกรรมในพื้นที่ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ข้อมูลคุณภาพอากาศจากระบบ Air4Thai ซึ่งเป็นฐานข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department: PCD) เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารในกรณีศึกษาเพิ่มเติม

Air4Thai เป็นระบบเผยแพร่ข้อมูลคุณภาพอากาศแบบใกล้เคียงเวลาจริง (Near Real-Time) ที่รวบรวมข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศทั่วประเทศ โดยสามารถแสดงค่าฝุ่นละออง $PM_{2.5}$, PM_{10} รวมถึงมลพิษทางอากาศชนิดอื่น เช่น โอโซน (O_3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เลือกใช้เฉพาะข้อมูล $PM_{2.5}$ เนื่องจากเป็นตัวแทนของคุณภาพอากาศภายนอกที่มีผลต่อการตัดสินใจในการระบายอากาศ และเป็นข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการนำอากาศภายนอกเข้าสู่อาคาร

ทั้งนี้ ข้อมูล $PM_{2.5}$ ถูกจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบเดียวกับข้อมูลสภาพอากาศจาก NASA POWER เพื่อให้สามารถนำเข้าสู่แบบจำลอง MATLAB/Simulink ได้อย่างต่อเนื่อง รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้แสดงในตารางที่ 2-6 และขั้นตอนการเชื่อมโยงข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองแสดงในภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 การนำข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจาก Air4Thai เข้าสู่แบบจำลอง

ที่มา : จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจากระบบ Air4Thai และแนวทางการเตรียมข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง MATLAB/Simulink

ตารางที่ 2-6 ข้อมูลคุณภาพอากาศจาก Air4Thai ที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ตัวแปร	สัญลักษณ์	หน่วย	การนำไปใช้
1	ฝุ่นละออง $PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$	$\mu g/m^3$	ใช้เป็นข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอก (Boundary Condition)

หมายเหตุ : แม้ Air4Thai จะให้บริการข้อมูลมลพิษทางอากาศหลายชนิด แต่กรณีศึกษาเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้เลือกใช้เฉพาะข้อมูล $PM_{2.5}$ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกในการวิเคราะห์ผลของกรณีศึกษาเพิ่มเติม โดยไม่ได้ใช้เป็นตัวแปรควบคุมของระบบระบายอากาศ

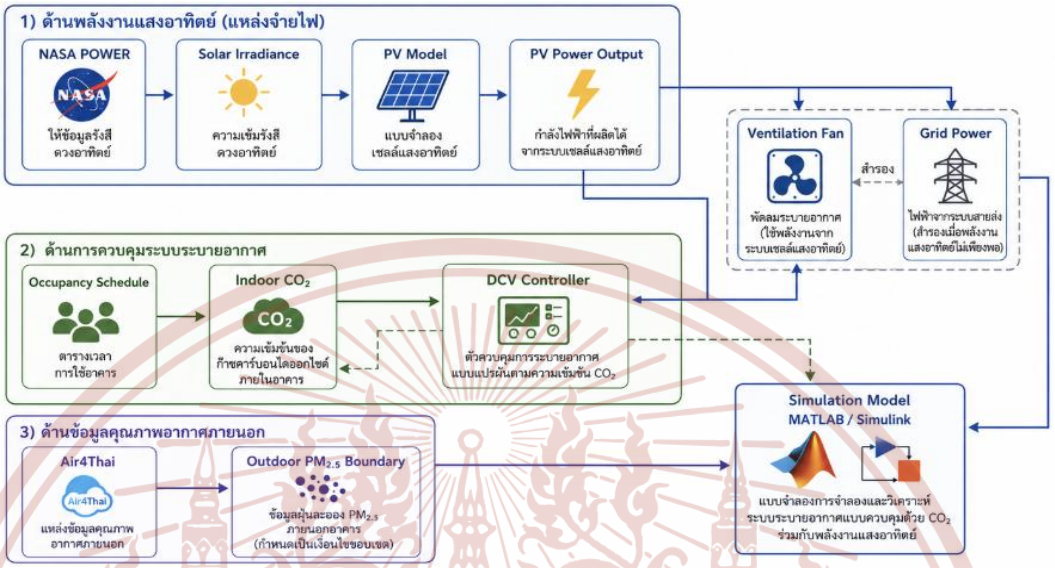
ข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจาก Air4Thai ทำหน้าที่เป็น เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของกรณีศึกษาเพิ่มเติม ไม่ถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณควบคุมของระบบ DCV โดยใช้ประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบของการระบายอากาศต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารร่วมกับข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER การใช้ฐานข้อมูลทั้งสองร่วมกันช่วยให้แบบจำลองสามารถสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงได้มากยิ่งขึ้น และสนับสนุนการประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.4 การประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) เป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ โดยอาศัยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคารเป็นตัวบ่งชี้จำนวนผู้ใช้งานและความต้องการระบายอากาศ เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 สูงกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาคุณภาพอากาศให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและเมื่อความเข้มข้นของ CO_2 ลดลงระบบจะลดอัตราการระบายอากาศลงเพื่อลดการใช้พลังงานของพัดลม แนวทางดังกล่าวช่วยให้ระบบระบายอากาศสามารถตอบสนองต่อการใช้งานจริงของอาคารได้ดีกว่าการทำงานแบบอัตราคงที่ (Constant Air Volume: CAV)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าระบบ DCV จะสามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมได้ แต่พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมยังคงมาจากโครงข่ายไฟฟ้าเป็นหลัก การประยุกต์ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ DCV จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาใช้จ่ายให้กับพัดลมระบายอากาศเป็นลำดับแรก หากกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ระบบจะรับพลังงานส่วนที่เหลือจากโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อให้ระบบระบายอากาศสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้โดยไม่กระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบ ทั้งนี้ แนวคิดดังกล่าวเป็นการประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อสนับสนุนการทำงานของระบบระบายอากาศ

สำหรับกรณีศึกษาเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้ ได้บูรณาการแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับแบบจำลองระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ที่พัฒนาขึ้นใน MATLAB/Simulink โดยใช้ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์จากฐานข้อมูล NASA POWER เพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้ข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจาก Air4Thai เป็นข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอก (Boundary Condition) สำหรับการจำลอง การบูรณาการข้อมูลทั้งสองส่วนทำให้สามารถประเมินศักยภาพของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ DCV ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงได้อย่างเป็นระบบ ทั้งในด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร การใช้พลังงานของพัดลม และการลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า โดยรายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองและขั้นตอนการจำลองจะกล่าวในบทที่ 3



ภาพที่ 2-17 การประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา : จัดทำโดยผู้วิจัย โดยอ้างอิงแนวคิดจากข้อมูล NASA POWER ข้อมูลคุณภาพอากาศจาก Air4Thai และแนวคิดการประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ในแบบจำลอง MATLAB/Simulink

ตารางที่ 2-7 การเชื่อมโยงข้อมูลในแบบจำลองกรณีศึกษาเพิ่มเติม

แหล่งข้อมูล	**ตัวแปร**	**บทบาทในแบบจำลอง**
NASA POWER	GHI, Temperature, RH, Wind Speed	คำนวณกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์
Air4Thai	$PM_{2.5}$	กำหนดสภาพแวดล้อมภายนอก (Boundary Condition)
Occupancy Schedule	จำนวนผู้ใช้งาน	คำนวณอัตราการเกิด CO_2 ภายในห้อง
DCV Model	Indoor CO_2	ควบคุมอัตราการระบายอากาศ
PV Model	PV Power	จ่ายพลังงานให้พัดลมและลดการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่าย

2.4.5 ความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน

การออกแบบและควบคุมระบบระบายอากาศในอาคารจำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานควบคู่กัน เนื่องจากการเพิ่มอัตราการระบาย

อากาศสามารถช่วยเจือจางก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ ทำให้ความเข้มข้นของ CO_2 ลดลงและช่วยรักษาคุณภาพอากาศให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณอากาศภายนอกที่นำเข้าสู่อาคารทำให้พัดลมระบายอากาศต้องทำงานมากขึ้นและอาจเพิ่มภาระของระบบปรับอากาศในการลดอุณหภูมิและควบคุมความชื้นของอากาศภายนอก โดยเฉพาะในภูมิอากาศร้อนชื้น ดังนั้น การเพิ่มอัตราการระบายอากาศโดยไม่พิจารณาความต้องการใช้งานจริงอาจทำให้เกิดการใช้พลังงานที่สูงเกินความจำเป็น

ระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการสามารถลดข้อจำกัดดังกล่าวได้โดยปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานหรือความเข้มข้นของ CO_2 ภายในห้อง เมื่อมีผู้ใช้งานจำนวนมากหรือความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มสูงขึ้น ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาคุณภาพอากาศ และเมื่อจำนวนผู้ใช้งานลดลงหรือไม่มีผู้ใช้งาน ระบบจะลดอัตราการระบายอากาศเพื่อลดการใช้พลังงานของพัดลม แนวคิดนี้สะท้อนความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน (Trade-off) ระหว่างคุณภาพอากาศและพลังงาน กล่าวคือ การกำหนดอัตราการระบายอากาศต่ำเกินไปอาจทำให้ CO_2 สะสมภายในห้อง ขณะที่การกำหนดอัตราการระบายอากาศสูงเกินความจำเป็นจะเพิ่มการใช้พลังงาน ดังนั้น จุดทำงานที่เหมาะสมจึงควรสามารถรักษาความเข้มข้นของ CO_2 ให้อยู่ภายในเกณฑ์ที่กำหนด โดยใช้พลังงานให้น้อยที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ DCV เป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวันที่มีรังสีดวงอาทิตย์และมีการใช้งานอาคารพร้อมกัน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้สนับสนุนการทำงานของพัดลมระบายอากาศและอุปกรณ์ประกอบของระบบ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศและช่วงเวลา จึงยังจำเป็นต้องมีพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าเป็นแหล่งสำรองเพื่อรักษาความต่อเนื่องของการระบายอากาศ กรณีศึกษาเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินสมรรถนะของระบบในหลายด้านร่วมกัน ได้แก่ ความสามารถในการควบคุมความเข้มข้นของ CO_2 การใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตและนำมาใช้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณพลังงานที่ยังต้องรับจากโครงข่ายไฟฟ้า โดยรายละเอียดของตัวชี้วัด วิธีการคำนวณ และเงื่อนไขการจำลองจะกล่าวในบทที่ 3

ความสัมพันธ์เชิงแนวคิดระหว่างอัตราการระบายอากาศ ความเข้มข้นของ CO_2 และการใช้พลังงาน สามารถแสดงในรูปเชิงแนวคิดได้ดังนี้

$$Q_{vent}\uparrow \Rightarrow C_{CO2}\downarrow \text{ และ } E_{fan}\uparrow \qquad (2\text{-}27)$$

โดยที่

Q_{vent} คือ อัตราการระบายอากาศ

C_{CO2} คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง

E_{fan} คือ พลังงานไฟฟ้าที่พัดลมใช้

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศ ความเข้มข้นของ CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มลดลง แต่พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นการควบคุมระบบจึงต้องพิจารณาทั้งคุณภาพอากาศและการใช้พลังงานพร้อมกัน

สำหรับระบบที่ประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าสามารถอธิบายในเชิงสมดุลพลังงานได้ดังสมการ โดยกำหนดให้ค่า E_{grid} ไม่น้อยกว่าศูนย์

$$E_{grid} = E_{load} - E_{PV,used} \quad (2\text{-}28)$$

โดยที่

E_{grid} คือ พลังงานไฟฟ้าที่รับจากโครงข่ายไฟฟ้า

E_{load} คือ พลังงานรวมที่อุปกรณ์ในระบบต้องการ

$E_{PV,used}$ คือ พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาใช้จริง

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มสัดส่วนพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาใช้จริงจะช่วยลดพลังงานที่ต้องรับจากโครงข่ายไฟฟ้า แต่ไม่ควรลดกำลังการทำงานของระบบระบายอากาศจนส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร และในกรณีที่พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าความต้องการของระบบ ส่วนที่เหลือจะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาระบบกักเก็บพลังงาน

การประยุกต์ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาเพิ่มเติม (Additional Case Study) เพื่อแสดงศักยภาพของแบบจำลอง และไม่ได้เปลี่ยนแปลงวัตถุประสงค์หรือขอบเขตหลักของงานวิจัยซึ่งมุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2

2.5 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Persily, A., & de Jonge, L. (2017) ได้ศึกษาเรื่อง **อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผู้ใช้งานอาคาร** โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนและปรับปรุงแนวทางการประเมินอัตราการเกิด CO_2 จากมนุษย์ภายในอาคาร งานวิจัยนี้อธิบายว่าอัตราการเกิด CO_2 ของผู้ใช้งานอาคารมีความสัมพันธ์กับหลักการเผาผลาญพลังงานของร่างกาย ขนาดร่างกาย อายุ เพศ และระดับกิจกรรมของผู้ใช้งาน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอัตราการเกิด CO_2 ไม่ควรถูกพิจารณาเป็นค่าคงที่เดียวสำหรับทุกสถานการณ์ แต่ควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะกิจกรรมและประเภทพื้นที่ งานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อการศึกษานี้ เนื่องจากใช้เป็นพื้นฐานในการกำหนดค่าอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนสำหรับผู้ใช้งานสำนักงานแบบนั่งทำงาน ซึ่งเป็นพจน์แหล่งกำเนิดหลักในสมการสมดุลมวล CO_2 ของแบบจำลอง

Ahn, K. U., Kim, D. W., Cho, K., Cho, D., Cho, H. M., & Chae, C. U. (2022) ได้ศึกษาเรื่อง **แบบจำลองการพยากรณ์ความเข้มข้น** CO_2 **ภายในอาคาร** โดยนำเสนอแบบจำลองแบบผสมที่ประกอบด้วยสมการสมดุลมวลในฐานะแบบจำลอง white-box และแบบจำลอง Bayesian Neural Network ในฐานะแบบจำลอง black-box งานวิจัยนี้ใช้สมการสมดุลมวลเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CO_2 ภายในพื้นที่ จำนวนผู้ใช้งาน และการระบายอากาศของห้องแบบโซนเดียว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสมการสมดุลมวลสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายพฤติกรรมของ CO_2 ภายในอาคารได้ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองลักษณะนี้มีข้อจำกัดจากสมมติฐานเรื่องอากาศผสมกันอย่างสม่ำเสมอ การละเลยการไหลระหว่างหลายโซน และความไม่แน่นอนของอัตราการระบายอากาศ งานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการศึกษานี้โดยตรง เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดห้องแบบ single-zone และสมการสมดุลมวล CO_2 เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลอง MATLAB/Simulink

Emmerich, S. J., & Persily, A. K. (2001) ได้จัดทำรายงานของ National Institute of Standards and Technology เรื่อง**การทบทวนเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้ระบบ** CO_2 **Demand-Controlled Ventilation** รายงานนี้กล่าวถึงหลักการของระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุม โดยใช้ CO_2 เป็นตัวแทนของจำนวนผู้ใช้งานหรือภาระมลพิษที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้งานภายในพื้นที่ แนวคิดสำคัญของระบบดังกล่าวคือการลดการระบายอากาศที่มากเกินความจำเป็นในช่วงที่มีผู้ใช้งานน้อย และเพิ่มการระบายอากาศเมื่อมีความต้องการจริง เพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคาร รายงานนี้มีความสำคัญต่อการศึกษานี้ เนื่องจากเป็นพื้นฐานทางทฤษฎีของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นกลยุทธ์ S2 ในแบบจำลอง

Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., & O'Neill, Z. (2022) ได้ศึกษาและทบทวนความก้าวหน้าของงานวิจัยและ**การประยุกต์ใช้ระบบ** CO_2**-Based Demand-Controlled Ventilation ในอาคารพาณิชย์** โดยเน้นประเด็นด้านกลยุทธ์การควบคุม ความซับซ้อนของระบบ และการประเมินสมรรถนะของระบบ งานวิจัยนี้อธิบายว่า CO_2-Based DCV เป็นกลยุทธ์การควบคุมระบบ HVAC ที่ปรับอัตราการนำอากาศภายนอกเข้าสู่อาคารตามระดับ CO_2 ภายในพื้นที่ผลการทบทวนชี้ให้เห็นว่าระบบ DCV มีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานจากการระบายอากาศเกินความจำเป็น ขณะเดียวกันต้องพิจารณาความเหมาะสมของเซนเซอร์ ตำแหน่งติดตั้ง ค่าเกณฑ์ควบคุม และการประเมินผลด้านคุณภาพอากาศ งานวิจัยนี้สนับสนุนแนวคิดของการศึกษานี้ในการใช้ CO_2 เป็นสัญญาณควบคุมเพื่อปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานจริงของห้องสำนักงานขนาดเล็ก

Goyal, S., Barooah, P., & Middelkoop, T. (2015) ได้ศึกษาเรื่อง**การควบคุมระบบ HVAC ตามจำนวนผู้ใช้งานอาคาร** โดยทำการประเมินกลยุทธ์การควบคุมแบบ occupancy-based

ในพื้นที่ทดสอบของอาคารพาณิชย์ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของระบบ HVAC ในขณะที่ยังคงรักษาความสบายและคุณภาพอากาศภายในอาคาร ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าข้อมูลการมีอยู่ของผู้ใช้งานสามารถนำมาใช้ปรับการทำงานของระบบอาคารให้เหมาะสมกับภาระการใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่จำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตามเวลา งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้ในด้านการกำหนดรูปแบบการใช้งานห้องและการพิจารณาจำนวนผู้ใช้งานเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิด CO_2 และการควบคุมการระบายอากาศ

Persily, A., & Polidoro, B. J. (2022) ได้จัดทำรายงานเรื่อง **Indoor Carbon Dioxide Metric Analysis Tool ภายใต้ National Institute of Standards and Technology** โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารในฐานะตัวชี้วัดด้านการระบายอากาศ รายงานนี้อธิบายว่าค่า CO_2 ภายในอาคารควรถูกพิจารณาร่วมกับจำนวนผู้ใช้งาน อัตราการเกิด CO_2 ของผู้ใช้งาน อัตราการระบายอากาศ และระยะเวลาการใช้งานพื้นที่ ไม่ควรตีความจากค่า CO_2 เพียงค่าเดียวโดยไม่พิจารณาบริบทของพื้นที่ งานนี้มีความสำคัญต่อการศึกษานี้ เนื่องจากช่วยสนับสนุนการใช้ CO_2 เป็นตัวชี้วัดด้านการระบายอากาศและเป็นพื้นฐานในการประเมินความเพียงพอของระบบระบายอากาศในห้องสำนักงานขนาดเล็ก

ASHRAE (2022) ได้จัดทำมาตรฐาน **ANSI/ASHRAE Standard 62.1** เรื่อง **Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality** ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำและแนวทางการจัดการคุณภาพอากาศภายในอาคารสำหรับอาคารที่ไม่ใช่ที่พักอาศัย มาตรฐานดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อให้เกิดคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้สำหรับผู้ใช้อาคาร และเป็นกรอบสำคัญในการออกแบบระบบระบายอากาศในอาคารพาณิชย์และอาคารสำนักงาน ในงานวิจัยนี้ มาตรฐานดังกล่าวถูกใช้เป็นแนวทางอ้างอิงด้านการระบายอากาศและคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยเฉพาะการกำหนดกรอบการประเมินความเหมาะสมของการระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก

Fisk, W. J., & de Almeida, A. T. (1998) ได้ศึกษาเรื่อง **Sensor-Based Demand-Controlled Ventilation: A Review** โดยทบทวนแนวคิดของระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ใช้สัญญาณจากเซนเซอร์เป็นข้อมูลควบคุมอัตราการระบายอากาศ งานวิจัยนี้อธิบายว่าระบบระบายอากาศแบบ sensor-based DCV สามารถปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะภายในพื้นที่ เช่น ภาระมลพิษหรือการใช้งานของผู้ใช้อาคาร แทนการระบายอากาศในอัตราคงที่ตลอดเวลา แนวคิดดังกล่าวมีศักยภาพในการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานจากการระบายอากาศที่เกินความจำเป็น งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้โดยตรง เนื่องจากระบบ S2 ในงานวิจัยนี้ใช้ CO_2 เป็นสัญญาณควบคุมเพื่อปรับระดับการระบายอากาศตามความต้องการจริงของห้องสำนักงาน

Lai, C. M. (2006) ได้ศึกษาและพัฒนา**ต้นแบบเครื่องระบายอากาศแบบกังหันบนหลังคาที่ใช้พลังงานร่วมจากลมและเซลล์แสงอาทิตย์** โดยติดตั้งพัดลมภายในเครื่องระบายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในช่วงที่ความเร็วลมภายนอกอยู่ในระดับต่ำ และใช้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สนับสนุนการทำงานของพัดลม ผลการทดลองในอุโมงค์ลมแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งพัดลมภายในสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการระบายอากาศได้ในสภาวะที่ไม่มีลมหรือมีความเร็วลมต่ำ แต่ให้ผลเพิ่มขึ้นไม่ชัดเจนเมื่อความเร็วลมภายนอกสูง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้พลังงานหมุนเวียนสนับสนุนพัดลมระบายอากาศ และเกี่ยวข้องกับกรณีศึกษาเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้ในด้านการนำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายสำหรับการทำงานของพัดลม

Klimeš, L., Charvát, P., & Hejčík, J. (2018) ได้ศึกษาเปรียบเทียบ**ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของปล่องแสงอาทิตย์และพัดลมที่ใช้กำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับงานระบายอากาศ** โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขและกำหนดให้พื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ของทั้งสองระบบมีขนาดเท่ากัน ผลการศึกษาพบว่าระบบพัดลมที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานการเคลื่อนที่ของอากาศได้มีประสิทธิภาพกว่าระบบปล่องแสงอาทิตย์ และมีความยืดหยุ่นในการจัดวางและควบคุมอัตราการไหลของอากาศมากกว่า อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของระบบยังขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และการมีหรือไม่มีระบบกักเก็บพลังงาน งานวิจัยนี้สนับสนุนแนวคิดของกรณีศึกษาเพิ่มเติมในการใช้กำลังไฟฟ้าจากระบบ PV จ่ายให้กับพัดลมระบายอากาศ และการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับความต้องการพลังงานของพัดลมตามช่วงเวลา

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยเดิมให้พื้นฐานสำคัญทั้งในด้านการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคาร แบบจำลองสมดุลมวล CO_2 การใช้ CO_2 เป็นตัวชี้วัดด้านการระบายอากาศ การควบคุมระบบระบายอากาศตามความต้องการ และการใช้ข้อมูลจำนวนผู้ใช้งานเพื่อปรับการทำงานของระบบอาคาร อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นการศึกษาในระดับอาคารพาณิชย์ ระบบ HVAC โดยรวม หรือการทบทวนเชิงทฤษฎี ขณะที่การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว โดยพิจารณากลยุทธ์การระบายอากาศพื้นฐาน การระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ และระบบ CO_2-Based DCV ร่วมกับการประเมินพลังงานพัดลมและการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ ยังเป็นประเด็นที่สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ นอกจากนี้ งานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์กับระบบระบายอากาศยังแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำกำลังไฟฟ้าจากระบบ PV มาใช้สนับสนุนพัดลมและอุปกรณ์ระบบอาคาร เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า โดยสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ช่วงเวลาการผลิตพลังงาน ลักษณะของโหลด และวิธีการจัดการพลังงานภายในระบบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาแบบจำลอง MATLAB/Simulink สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบ Single-zone เพื่อเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ S0 Passive/Natural Infiltration, S1 Fixed Mechanical Ventilation และ S2 CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation โดยใช้ความเข้มข้น CO_2 เป็นตัวชี้วัดหลักด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร และใช้พลังงานพัดลมเป็นตัวชี้วัดด้านพลังงาน นอกจากนี้ ยังเพิ่มกรณีศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สนับสนุนการทำงานของพัดลมในกลยุทธ์ S2 โดยใช้ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ตามช่วงเวลาเพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และประเมินพลังงานจากระบบ PV ที่ถูกนำมาใช้จริง พลังงานส่วนเกินที่ไม่ได้ใช้ และพลังงานที่ยังต้องรับจากโครงข่ายไฟฟ้า การศึกษานี้จึงเป็นการเชื่อมโยงองค์ความรู้ด้านคุณภาพอากาศ การควบคุมการระบายอากาศ และพลังงานหมุนเวียนเข้ากับการประเมินระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กอย่างเป็นระบบ

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาและประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) ที่ใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นตัวแปรควบคุม สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว (Single-Zone Small Office) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของระบบในการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารควบคู่กับการลดการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ

การพัฒนาแบบจำลองดำเนินการบนโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยอาศัยหลักการสมดุลมวล (Mass Balance Theory) สำหรับการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง ซึ่งอ้างอิงแนวทางการสร้างแบบจำลองจาก Persily and de Jonge (2017) และ Ahn et al. (2022) ขณะที่หลักการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการอ้างอิงจาก NISTIR 7042 และ Lu et al. (2022)

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การกำหนดขอบเขตและสมมติฐานของแบบจำลอง การพัฒนาแบบจำลอง CO_2 ภายในห้อง การออกแบบระบบควบคุม DCV การกำหนดกรณีศึกษาและพารามิเตอร์การจำลอง การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์สำคัญ และการประเมินผลลัพธ์ด้วยตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศและพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของแบบจำลองระบบระบายอากาศแบบ DCV

รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

(1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารการเกิดและการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคาร หลักการสมดุลมวลของสารมลพิษภายในอาคาร และหลักการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัย

(2) กำหนดขอบเขตและสมมติฐานของแบบจำลอง โดยกำหนดให้พื้นที่ศึกษาเป็นห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว มีปริมาตรห้อง 60 ลูกบาศก์เมตร กำหนดให้ความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคารมีค่าคงที่เท่ากับ 400 ppm และพิจารณาเฉพาะผลกระทบจากจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศ โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากสภาพอากาศภายนอก เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่ศึกษาได้อย่างชัดเจน

(3) พัฒนาแบบจำลอง CO_2 ภายในห้องแบบ Single-Zone โดยจำลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องโดยใช้หลักการสมดุลมวล (Mass Balance) ภายใต้สมมติฐานว่าอากาศภายในห้องผสมตัวอย่างสมบูรณ์ (Well-Mixed Condition) เพื่อคำนวณความเข้มข้น CO_2 ตามจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศ

(4) พัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศ จำนวน 3 กรณีศึกษา ได้แก่ S0 การรั่วซึมตามธรรมชาติ (Background Infiltration) S1 การระบายอากาศแบบคงที่ (Fixed Ventilation) และ S2 ระบบระบายอากาศตามความต้องการโดยใช้ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุม

(5) กำหนดพารามิเตอร์ซึ่งใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง ข้อมูลปริมาตรห้อง อัตราการเกิด CO_2 ของผู้ใช้งาน ข้อมูลพัดลมอ้างอิง รุ่น Kruger MTD100/1 และรูปแบบการใช้งานห้องตัวแทนจำนวน 3 กรณี ได้แก่ D1, D2 และ D3 เพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบ

(6) ตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง ทั้งพฤติกรรมการตอบสนองของแบบจำลองว่ามีความสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีและงานวิจัยอ้างอิง เช่น ความเข้มข้น CO_2 เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่ออัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น

(7) วิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์สำคัญ ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ค่า ACH_min ค่า ACH_max ค่า CO_2 Setpoint และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด เพื่อประเมินความแข็งแรงและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

(8) ประเมินผลด้วยตัวชี้วัดด้าน IAQ และพลังงาน สมรรถนะของระบบโดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ ค่า Peak CO_2 ค่า Average CO_2 ค่า P95 CO_2 ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ ชั่วโมงการทำงานที่ความเร็วสูงของพัดลม การใช้พลังงานไฟฟ้า และร้อยละการประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศแบบคงที่

(9) สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย ที่ได้จากการจำลอง เปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละกรณีศึกษา และอภิปรายผลกระทบของพารามิเตอร์สำคัญที่มีต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ

3.2 ขอบเขตและสมมติฐานของแบบจำลอง

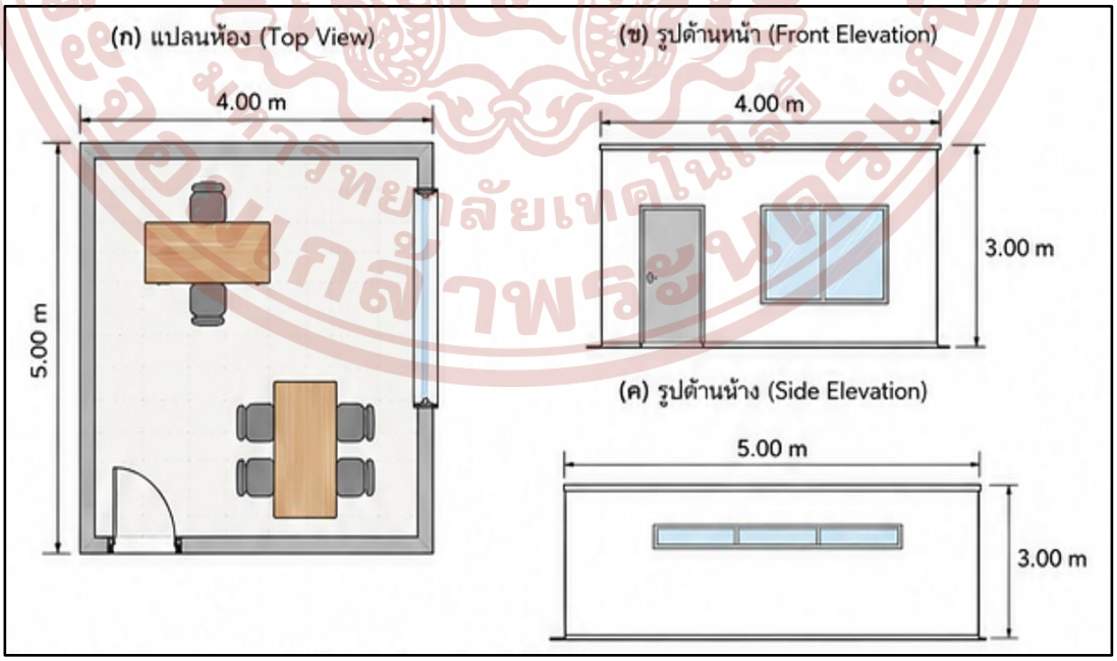
งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยใช้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นตัวแปรหลักในการควบคุมอัตราการระบายอากาศ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน คุณภาพอากาศภายในอาคาร และการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ

แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ในลักษณะ Dynamic Simulation โดยอาศัยหลักการสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Mass Balance) เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องตามจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศ

ผลการจำลองถูกนำมาใช้เปรียบเทียบสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและด้านพลังงาน เพื่อประเมินศักยภาพของระบบ DCV สำหรับการประยุกต์ใช้ในห้องสำนักงานขนาดเล็ก

3.2.1 ลักษณะห้องกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้กำหนดให้ห้องกรณีศึกษาเป็นห้องสำนักงานขนาดเล็ก (Small Office) ซึ่งเป็นลักษณะห้องที่พบได้ทั่วไปในอาคารสำนักงาน หน่วยงานราชการ และอาคารพาณิชย์ โดยมีขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 5 เมตร และสูง 3 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ลักษณะห้องสำนักงานขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษา

พื้นที่ใช้สอยของห้องสามารถคำนวณได้จาก

$$A = L \times W$$
$$A = 4 \times 5 = 20 \text{ ตารางเมตร}$$

และปริมาตรอากาศภายในห้องสามารถคำนวณได้จาก

$$V = L \times W \times H$$
$$V = 4 \times 5 \times 3 = 60 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

โดยที่

- A คือ พื้นที่ใช้สอยภายในห้อง (m^2)
- V คือ ปริมาตรอากาศภายในห้อง (m^3)
- L คือ ความยาวห้อง (m)
- W คือ ความกว้างห้อง (m)
- H คือ ความสูงห้อง (m)

ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงมีพื้นที่ใช้สอย 20 m^2 และปริมาตรอากาศ 60 m^3 ซึ่งใช้เป็นค่าคงที่ในการคำนวณตลอดการจำลอง

การกำหนดขนาดห้องดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นตัวแทนของห้องสำนักงานขนาดเล็กที่มีผู้ใช้งานประจำจำนวนไม่มาก และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานระหว่างวัน ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV)

ในการศึกษานี้ ห้องกรณีศึกษาถูกพิจารณาเป็นแบบจำลองห้องเดี่ยว (Single-Zone Model) โดยสมมติให้อากาศภายในห้องมีการผสมตัวอย่างสม่ำเสมอ (Well-Mixed Air Assumption) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในห้อง และประเมินผลกระทบของกลยุทธ์การระบายอากาศภายใต้สถานการณ์การใช้งานที่แตกต่างกัน

3.2.2 จำนวนผู้ใช้งานห้อง

งานวิจัยนี้กำหนดให้ห้องกรณีศึกษามีพื้นที่ใช้สอย 20 ตารางเมตร (4 × 5 เมตร) และมีปริมาตรห้อง 60 ลูกบาศก์เมตร (4 × 5 × 3 เมตร) ซึ่งเป็นขนาดที่พบได้ทั่วไปในห้องสำนักงานขนาดเล็ก (Small Office) โดยอ้างอิงเกณฑ์พื้นที่ต่อผู้ใช้งานของสำนักงานทั่วไปประมาณ 4–10 m^2/คน ห้องขนาด 20 m^2 จึงสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ประมาณ 2–5 คน

การกำหนดจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องอ้างอิงจากลักษณะการใช้งานสำนักงานขนาดเล็กที่มักมีผู้ปฏิบัติงานประจำจำนวน 1–3 คน และอาจมีผู้มาติดต่อหรือผู้เข้าร่วมประชุมเพิ่มเติมในบางช่วงเวลา ดังนั้นเพื่อให้สามารถประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) ภายใต้ระดับภาระการใช้งานที่แตกต่างกัน จึงกำหนดรูปแบบการใช้งานห้องตัวแทน (Representative Occupancy Scenarios) จำนวน 3 กรณี ได้แก่ D1, D2 และ D3 โดยครอบคลุมตั้งแต่ภาระการใช้งานต่ำ ปานกลาง และสูง

ช่วงเวลาทำงานของห้องกำหนดเป็นเวลา 08:00–18:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาปฏิบัติงานของสำนักงานทั่วไป และใช้เป็นช่วงเวลาหลักในการประเมินการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในห้อง

D1 (Baseline Occupancy) เป็นกรณีการใช้งานพื้นฐานของสำนักงานขนาดเล็ก โดยมีผู้ใช้งานประจำจำนวน 2 คน ตลอดช่วงเวลาทำงาน ใช้เป็นกรณีอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ DCV ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติที่มีภาระการเกิด CO_2 ระดับต่ำ

D2 (Visitor Occupancy) เป็นกรณีที่มีผู้มาติดต่อเป็นระยะโดยมีผู้ใช้งานประจำจำนวน 2 คน และมีผู้มาติดต่อเพิ่มเติมจำนวน 2 คน ในช่วงเวลา 10:00–11:00 น. และ 15:00–16:00 น. กรณีนี้ใช้แทนสถานการณ์ที่จำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงชั่วคราวระหว่างวัน เพื่อประเมินความสามารถของระบบ DCV ในการตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของภาระ CO_2 ในระยะสั้น

D3 (Peak Occupancy) เป็นกรณีการใช้งานสูงสุดที่กำหนดขึ้นเพื่อทดสอบขีดความสามารถของระบบ DCV ภายใต้สภาวะที่มีการใช้งานหนาแน่น โดยมีผู้ใช้งานประจำจำนวน 2 คน ผู้มาติดต่อจำนวน 2 คน ในช่วงเวลา 10:00–11:00 น. และ 15:00–16:00 น. รวมถึงผู้รอเพิ่มเติมจำนวน 1 คน ในช่วงเวลา 14:00–17:00 น. ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานสูงสุดภายในห้องเท่ากับ 5 คน กรณีนี้ใช้ประเมินความสามารถของระบบในการควบคุมความเข้มข้น CO_2 ไม่ให้เกินเกณฑ์ที่กำหนดภายใต้ภาระการใช้งานสูงสุดของห้องสำนักงานขนาดเล็ก

การกำหนดกรณีศึกษา D1–D3 ดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบ DCV ได้ครอบคลุมทั้งสภาวะการใช้งานปกติ การเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานระหว่างวัน และสภาวะการใช้งานสูงสุด ซึ่งสะท้อนลักษณะการใช้งานจริงของห้องสำนักงานขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3-1 จำนวนผู้ใช้งานตามรูปแบบ Representative Occupancy Scenarios

เวลา	D1 (คน)	D2 (คน)	D3 (คน)	จำนวนคนสูงสุด
08.00 – 10.00 น.	2	2	2	2
10.00 – 11.00 น.	2	4	4	4
11.00 – 14.00 น.	2	2	2	2
14.00 – 15.00 น.	2	2	3	3
15.00 – 16.00 น.	2	4	5	5
16.00 – 17.00 น.	2	2	3	3
17.00 – 18.00 น.	2	2	2	2

3.2.3 สมมติฐานของแบบจำลองห้อง

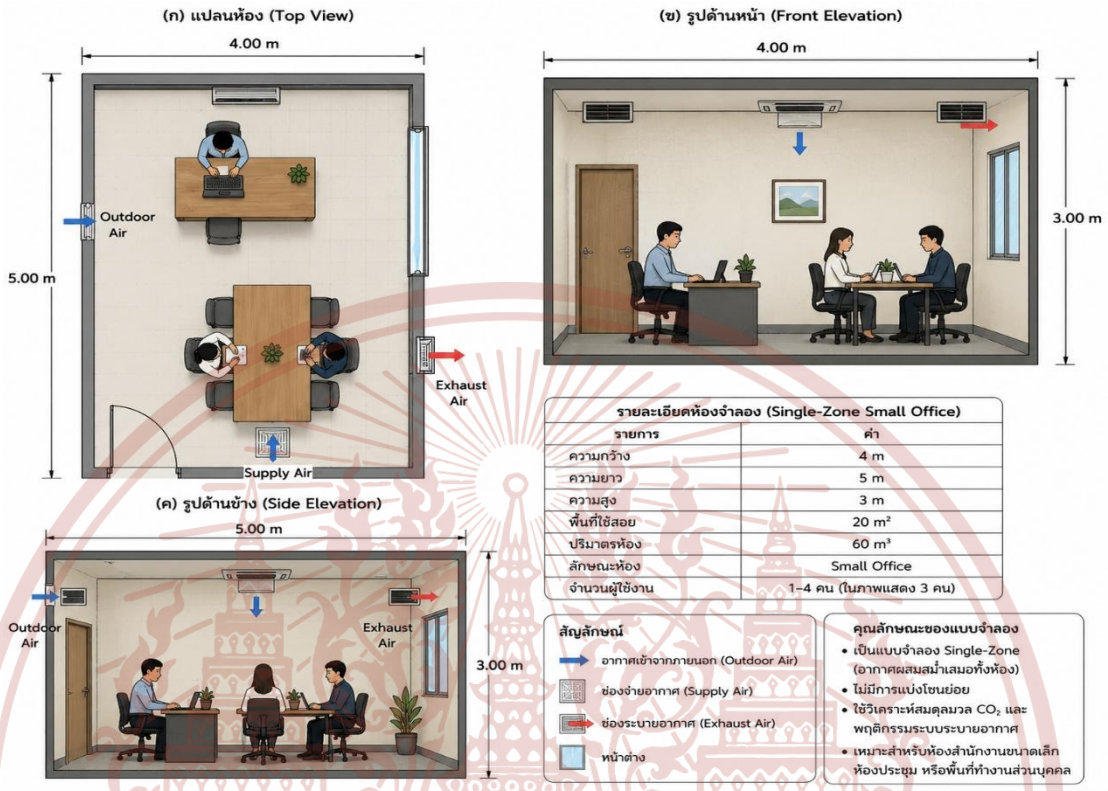
ในการศึกษานี้ ห้องกรณีศึกษาถูกพิจารณาเป็นแบบจำลองห้องเดี่ยว (Single-Zone Model) โดยสมมติให้อากาศภายในห้องมีการผสมตัวอย่างสม่ำเสมอ (Well-Mixed Air Assumption) กล่าวคือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในห้องมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง ณ เวลาเดียวกัน สมมติฐานนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการสะสมและการลดลงของ CO_2 ภายในห้องได้ด้วยสมการสมดุลมวลของอากาศและก๊าซ CO_2

ห้องกรณีศึกษาถูกกำหนดให้เป็นห้องปิดในช่วงเวลาการจำลอง โดยไม่พิจารณาการเปิดหน้าต่าง และไม่พิจารณาเหตุการณ์เปิด–ปิดประตูแบบชั่วขณะ ทั้งนี้ เพื่อควบคุมขอบเขตของแบบจำลองให้สามารถประเมินผลของกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 ได้อย่างชัดเจน การไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องจึงถูกพิจารณาผ่านค่าการรั่วซึมพื้นฐานของอาคารหรือการแทรกซึมของอากาศภายนอก (Background Infiltration) และการระบายอากาศเชิงกลตามกรณีศึกษาที่กำหนดเท่านั้น

ในกรณี S0 ห้องถูกกำหนดให้ไม่มีการทำงานของพัดลมระบายอากาศเชิงกล และพิจารณาเฉพาะการรั่วซึมพื้นฐานของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้อง ซึ่งใช้เป็นกรณีอ้างอิงของสภาวะที่ไม่มีระบบควบคุมการระบายอากาศ ส่วนกรณี S1 เป็นการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ โดยกำหนดให้อัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการใช้งานห้อง และกรณี S2 เป็นระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ควบคุมด้วยความเข้มข้น CO_2 โดยปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานและระดับ CO_2 ภายในห้อง

อากาศภายนอกที่เข้าสู่ห้องถูกกำหนดให้มีความเข้มข้น CO_2 คงที่เท่ากับ 400 ppm ซึ่งใช้แทนค่าความเข้มข้น CO_2 ของอากาศภายนอกทั่วไป ส่วนแหล่งกำเนิด CO_2 ภายในห้องพิจารณาจากการหายใจของผู้ใช้งานเท่านั้น โดยจำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบการใช้งานห้องตัวแทน D1, D2 และ D3 ที่กำหนดไว้ในหัวข้อก่อนหน้า

สมมติฐานแบบ Single-Zone และ Well-Mixed Air มีความเหมาะสมสำหรับการประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง CO_2 ภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก เนื่องจากปริมาตรห้องไม่มากและมีการพิจารณาในระดับภาพรวมของห้อง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ไม่พิจารณาการกระจายตัวของ CO_2 เฉพาะตำแหน่งภายในห้อง เช่น บริเวณใกล้ผู้ใช้งาน บริเวณใกล้ช่องลม หรือบริเวณมุมอับอากาศ รวมถึงไม่พิจารณาการไหลเวียนอากาศแบบสามมิติ ผลของการเปิดประตูชั่วขณะ การเปิดหน้าต่าง และผลของการลัดวงจรของลมระหว่างช่องจ่ายและช่องระบายอากาศ



ภาพที่ 3-3 สมมติฐานของแบบจำลองห้องแบบ Single-Zone และ Well-Mixed Air

ดังนั้น ผลลัพธ์จากแบบจำลองนี้จึงใช้สำหรับประเมินพฤติกรรมเฉลี่ยของ CO_2 ภายในห้อง และเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศแต่ละกรณีภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน มากกว่าการทำนายการกระจายตัวของ CO_2 ในแต่ละตำแหน่งอย่างละเอียด

3.2.4 ขอบเขตของระบบระบายอากาศที่ศึกษา

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) งานวิจัยนี้กำหนดกรณีศึกษาระบบระบายอากาศจำนวน 3 กรณี ได้แก่ S0, S1 และ S2 โดยใช้ห้องกรณีศึกษาและรูปแบบการใช้งานห้องเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของกลยุทธ์การระบายอากาศต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และการใช้พลังงานของพัดลมได้อย่างเป็นธรรม

(1) กรณี S0 : Background Infiltration เป็นกรณีอ้างอิง (Reference Case) ที่ไม่มีการทำงานของระบบระบายอากาศเชิงกล โดยพิจารณาเฉพาะการรั่วซึมของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องผ่านช่องว่างของอาคาร (Background Infiltration) เท่านั้น กรณีนี้ใช้แทนสภาวะห้องปิดที่ไม่มีการควบคุมการระบายอากาศ และมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงพฤติกรรมการสะสมของ CO_2 ภายในห้องเมื่อไม่มีระบบช่วยระบายอากาศ โดยผลลัพธ์ของ S0 จะถูกใช้เป็นกรณีฐานสำหรับเปรียบเทียบกับกรณี S1 และ S2

(2) กรณี S1 : Fixed Ventilation เป็นระบบระบายอากาศเชิงกลแบบอัตราคงที่ (Fixed Ventilation) โดยกำหนดให้พัดลมระบายอากาศทำงานด้วยอัตราการไหลคงที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการใช้งานห้อง กรณีนี้ใช้แทนแนวทางการระบายอากาศแบบดั้งเดิมที่พบได้ทั่วไปในอาคาร ซึ่งไม่มีการปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานหรือระดับ CO_2 ภายในห้อง

วัตถุประสงค์ของ S1 คือใช้เป็นกรณีอ้างอิงด้านพลังงานและคุณภาพอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับระบบ DCV ในกรณี S2

(3) กรณี S2 : CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation เป็นระบบปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานและความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องแบบอัตโนมัติที่ใช้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศ

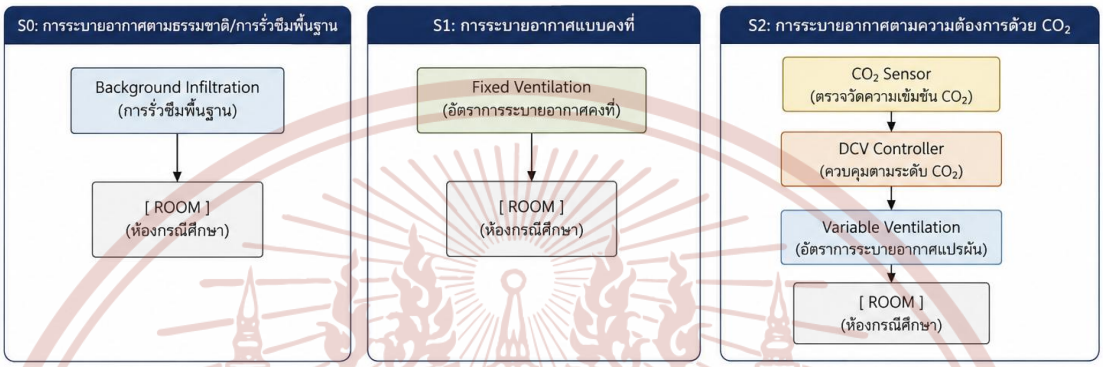
เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นและความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องสูงขึ้น ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อควบคุมระดับ CO_2 ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนผู้ใช้งานลดลงหรือระดับ CO_2 อยู่ในระดับต่ำ ระบบจะลดอัตราการระบายอากาศลงเพื่อลดการใช้พลังงานของพัดลม

กรณี S2 เป็นกรณีหลักของงานวิจัย และถูกนำมาใช้เพื่อประเมินศักยภาพของระบบ DCV ในการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารควบคู่ไปกับการลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับการระบายอากาศแบบคงที่ จากการกำหนดกรณีศึกษา S0, S1 และ S2 ดังกล่าว ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของการไม่ระบายอากาศ การระบายอากาศแบบคงที่ และการระบายอากาศตามความต้องการ ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานห้องเดียวกันได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 3-2 สรุปขอบเขตของระบบและตัวแปรในการจำลอง

หัวข้อ	**รายละเอียดของระบบ/ตัวแปร**	**วัตถุประสงค์**
S0	การระบายอากาศตามธรรมชาติ / การรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร	แทนสภาวะการใช้งานโดยไม่มีระบบระบายอากาศเชิงกล
S1	การระบายอากาศแบบคงที่	ใช้เป็นกรณีอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบกับระบบ DCV
S2	การระบายอากาศตามความต้องการ CO_2	ประเมินสมรรถนะของระบบ DCV ในการควบคุมคุณภาพอากาศและการใช้พลังงาน

ภาพที่ 3-4 กรณีศึกษาระบบระบายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัย ประกอบด้วย กรณีฐาน (S0) การระบายอากาศแบบคงที่ (S1) และการระบายอากาศตามความต้องการด้วย CO_2 (S2)



ภาพที่ 3-4 ขอบเขตกรณีศึกษาระบบระบายอากาศ S0, S1 และ S2

3.2.5 ตัวแปร พารามิเตอร์ และข้อจำกัดของแบบจำลอง

เพื่อให้การจำลองมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จึงกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และการควบคุมระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 สรุปพารามิเตอร์และข้อจำกัดของแบบจำลอง

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย	รายละเอียด
V	60	m^3	ปริมาตรห้องกรณีศึกษา
CO_2 out	400	ppm	ความเข้มข้น CO_2 ภายนอก
CO_2 sp	1000	ppm	ค่าอ้างอิงสำหรับการควบคุม DCV
Gpp	0.31	L/min-person	อัตราการปล่อย CO_2 ต่อคน Persily & de Jonge (2017)
ACH_S0	0.31	h^{-1}	Background Infiltration
ACH_S1	2.42	h^{-1}	Fixed Ventilation
ACH_min	1.42	h^{-1}	ระดับการระบายอากาศต่ำสุดของ DCV
ACH_max	2.42	h^{-1}	ระดับการระบายอากาศสูงสุดของ DCV

ค่าความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคาร (CO_2out) กำหนดเท่ากับ 400 ppm เพื่อใช้แทนสภาวะอากาศภายนอกทั่วไป ส่วนค่า CO_2sp กำหนดเท่ากับ 1000 ppm ซึ่งอ้างอิงจาก ASHRAE และงานวิจัย DCV นำมาเป็นเกณฑ์ประเมินความเพียงพอของการระบายอากาศ

อัตราการเกิด CO_2 ของผู้ใช้งาน (CO_2 Generation Rate per Person : Gpp) กำหนดเท่ากับ 0.31 ลิตรต่อนาทีต่อคน อ้างอิงจากกิจกรรมสำนักงานทั่วไปในสภาวะนั่งทำงาน (Sedentary Office Activity)

ค่าการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร (Background Infiltration) กำหนดเท่ากับ 0.3 h^{-1} ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่รายงานสำหรับอาคารสำนักงานที่ปิดหน้าต่างและไม่มีระบบระบายอากาศเชิงกล

สำหรับระบบระบายอากาศเชิงกล เลือกใช้พัดลมอ้างอิงที่มีอัตราการไหลอากาศ 85 m^3/h และ 145 m^3/h ซึ่งเทียบเท่ากับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 1.42 h^{-1} และ 2.42 h^{-1} ตามลำดับ สำหรับห้องที่มีปริมาตร 60 m^3

นอกจากนี้ งานวิจัยยังมีข้อจำกัดของแบบจำลองเพื่อควบคุมขอบเขตการศึกษา ดังนี้

(1) พิจารณาห้องกรณีศึกษาเป็นแบบจำลองห้องเดี่ยว (Single-Zone Model)

(2) สมมติให้อากาศภายในห้องมีการผสมตัวอย่างสมบูรณ์ (Well-Mixed Air Assumption)

(3) ไม่พิจารณาการกระจายตัวของ CO_2 แบบสามมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD)

(4) ไม่พิจารณาการเกิด Stratification หรือการแยกชั้นของอากาศภายในห้อง

(5) ไม่พิจารณาเหตุการณ์เปิด–ปิดประตูระหว่างการจำลอง

(6) ไม่พิจารณาการเปิดหน้าต่างหรือการระบายอากาศตามธรรมชาติจากผู้ใช้งาน

(7) พิจารณาก๊าซ CO_2 เป็นตัวชี้วัดคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality Indicator) หลัก โดยไม่พิจารณามลพิษประเภทอื่น เช่น $PM_{2.5}$ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) หรือจุลชีพในอากาศ

(8) ผลการจำลองใช้เพื่อประเมินค่าเฉลี่ยของ CO_2 ภายในห้องและเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศแต่ละกรณี ไม่ได้ใช้เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของ CO_2 ในแต่ละตำแหน่งภายในห้องพิจารณาห้องกรณีศึกษาเป็นแบบจำลองห้องเดี่ยว (Single-Zone Model)

3.3 การพัฒนาแบบจำลอง CO_2ภายในห้อง

หัวข้อนี้อธิบายการพัฒนาแบบจำลองความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยใช้หลักการสมดุลมวล (Mass Balance) ภายใต้สมมติฐานแบบห้องเดี่ยว (Single-Zone Model) และการผสมตัวของอากาศอย่างสม่ำเสมอ (Well-Mixed Air Assumption) แบบจำลองนี้เป็นพื้นฐานสำหรับประเมินผลของระบบระบายอากาศทั้ง 3 กรณี คือ S0, S1 และ S2

3.3.1 หลักการสมดุลมวลของ CO_2

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO_2ภายในห้องเกิดจากสมดุลระหว่างอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานภายในห้อง และอัตราการเจือจางหรือระบาย CO_2 ออกจากห้องด้วยอากาศ

ภายนอก หลักการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการสมดุลมวล ซึ่งเป็นแนวทางที่นิยมใช้ในการจำลองความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคาร ในงานวิจัยนี้ แหล่งกำเนิด CO_2 ภายในห้องพิจารณาจากการหายใจของผู้ใช้งานเท่านั้น โดยอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนอ้างอิงจาก Persily and de Jonge (2017) ซึ่งรายงานค่าอัตราการเกิด CO_2 ของมนุษย์ตามระดับกิจกรรมและลักษณะทางกายภาพของผู้ใช้งาน สำหรับบริบทของสำนักงานขนาดเล็ก งานวิจัยนี้กำหนดให้กิจกรรมของผู้ใช้งานเป็นลักษณะนั่งทำงานทั่วไป จึงใช้ค่าอัตราการเกิด CO_2 เท่ากับ 0.31 L/min-person

นอกจากนี้ แนวคิดการจำลอง CO_2 ด้วยสมการสมดุลมวลยังสอดคล้องกับ Ahn et al. (2022) ซึ่งใช้แบบจำลองเชิงฟิสิกส์หรือ White-box Model เพื่ออธิบายพฤติกรรมความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคาร โดยแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งาน และลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ

ดังนั้น แบบจำลอง CO_2 ในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาขึ้นจากหลักการว่า CO_2 ภายในห้องจะเพิ่มขึ้นจากการหายใจของผู้ใช้งาน และจะลดลงจากการแลกเปลี่ยนอากาศกับภายนอกผ่านการรั่วซึมพื้นฐานหรือการระบายอากาศเชิงกลตามกรณีศึกษา S0, S1 และ S2

3.3.2 สมการแบบจำลอง CO_2 ภายในห้อง

จากหลักการสมดุลมวล ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องสามารถเขียนในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{Gtot}{V}\right) \times 10^6 - ACH\left(C - Cout\right) \qquad (3\text{-}1)$$

โดยที่

$$Gtot = N \times Gpp$$

ดังนั้น

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{\left(N \times Gpp\right)}{V}\right) \times 10^6 - ACH\left(C - Cout\right) \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ

C คือ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ณ เวลาใด ๆ (ppm)

Cout คือ ความเข้มข้น CO_2 ของอากาศภายนอก (ppm)

N คือ จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง (person)

Gpp คือ อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน (m^3/s-person)

Gtot คือ อัตราการเกิด CO_2 รวมของผู้ใช้งานภายในห้อง (m^3/s)

V คือ ปริมาตรห้อง (m^3)

ACH คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้อง (h^{-1})

เพื่อให้หน่วยของ ACH สอดคล้องกับการคำนวณเชิงเวลา สมการสามารถเขียนในรูปที่พิจารณาเวลาเป็นวินาทีได้ดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{(N \times Gpp)}{V}\right) \times 10^6 - \left(\frac{ACH}{3600}\right)(C - Cout) \qquad (3\text{-}3)$$

ในการจำลองด้วย MATLAB/Simulink สมการดังกล่าวถูกคำนวณแบบไม่ต่อเนื่องตามช่วงเวลา โดยใช้รูปแบบ

$$C(k+1) = C(k) + \Delta t\left[\left(\frac{(N(k) \times Gp\,p)}{V}\right) \times 10^6 - \left(\frac{ACH(k)}{3600}\right)(C(k) - Cout)\right] \qquad (3\text{-}4)$$

โดยที่ Δt คือ ช่วงเวลาการคำนวณของแบบจำลอง และ k คือ ลำดับเวลาของการจำลอง

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า หากจำนวนผู้ใช้งาน N เพิ่มขึ้น การเกิด CO_2 จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องสูงขึ้น ในทางกลับกัน หากค่า ACH เพิ่มขึ้น การระบายอากาศจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CO_2 ภายในห้องลดลงเร็วขึ้น ดังนั้นสมการนี้จึงเหมาะสมสำหรับใช้ประเมินผลของระบบระบายอากาศแบบคงที่และระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ควบคุมด้วย CO_2

3.3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง CO_2 ภายในห้อง

ตัวแปรและพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในแบบจำลอง CO_2 แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง CO_2

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่า	หน่วย	ที่มา/เหตุผล
C	ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง	ตัวแปรตามเวลา	ppm	ผลลัพธ์จากแบบจำลอง
Cout	ความเข้มข้น CO_2 ภายนอก	400	ppm	กำหนดเป็นค่าตัวแทนอากาศภายนอกทั่วไป
Csp	ค่าอ้างอิง CO_2 สำหรับการควบคุม	1000	ppm	ใช้เป็นเกณฑ์ควบคุมระบบ DCV
N	จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง	2–5	person	กำหนดตามกรณี D1–D3
Gpp	อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน	0.31	L/min-person	อ้างอิง Persily and de Jonge (2017) สำหรับกิจกรรมนั่งทำงาน
Gpp	อัตราการเกิด CO_2 ต่อคนหลังแปลงหน่วย	5.17×10^{-6}	m^3/s-person	แปลงจาก 0.31 L/min-person
Gtot	อัตราการเกิด CO_2 รวม	N × Gpp	2	คำนวณตามจำนวนผู้ใช้งาน
V	ปริมาตรห้อง	60	m^3/s	คำนวณจาก 4 × 5 × 3 m

ตารางที่ 3-4 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่า	หน่วย	ที่มา/เหตุผล
ACH_S0	อัตราแลกเปลี่ยนอากาศกรณี S0	0.31	h^{-1}	Background infiltration
ACH_S1	อัตราแลกเปลี่ยนอากาศกรณี S1	2.42	h^{-1}	Fixed mechanical ventilation
ACH_min	อัตราระบายอากาศต่ำสุดของ S2	1.42	h^{-1}	จากพัดลม Low speed 85 $m^3/h \div 60\ m^3$
ACH_max	อัตราระบายอากาศสูงสุดของ S2	2.42	h^{-1}	จากพัดลม High speed 145 $m^3/h \div 60\ m^3$
Δt	ช่วงเวลาการคำนวณ	60	s	กำหนดตาม Time Step

การแปลงหน่วยอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนสามารถคำนวณได้ดังนี้

Gpp = 0.31 L/min-person

$Gpp = 0.31 \times 10^{-3} / 60$

$Gpp = 5.17 \times 10^{-6}$ m^3/s-person

การแปลงหน่วยอัตราการเกิด CO_2 ต่อคนสามารถคำนวณได้ดังนี้

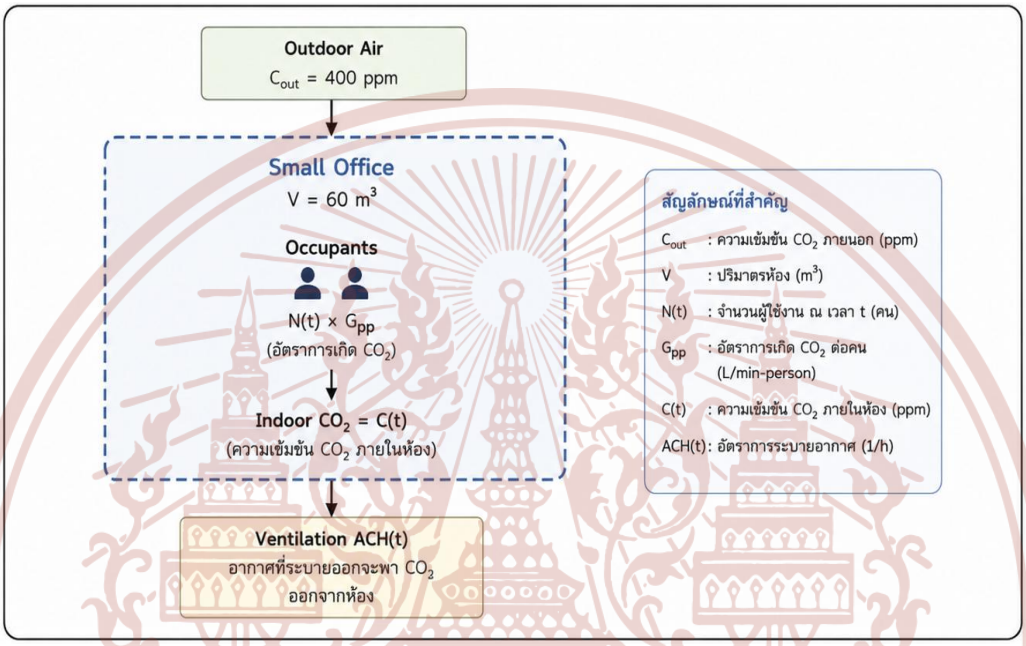
ACH = Q / V

โดยพัดลม Low speed มีอัตราการไหล 85 m^3/h และพัดลม High speed มีอัตราการไหล 145 m^3/h ดังนั้น

$ACH_{low} = 85/60 = 1.42\ h^{-1}$

$ACH_{high} = 145/60 = 2.42\ h^{-1}$

ค่าดังกล่าวถูกนำไปใช้กำหนดขอบเขตการทำงานของระบบระบายอากาศ โดย S1 ใช้ค่า ACH คงที่เท่ากับ 2.42 h^{-1} ส่วน S2 ใช้ช่วงการควบคุมระหว่าง 1.42–2.42 h^{-1} เพื่อปรับอัตราการระบายอากาศตามระดับ CO_2 และจำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง



ภาพที่ 3-5 หลักการสมดุลมวลของ CO_2 ภายในห้อง

3.4 การออกแบบระบบระบายอากาศ

สภาพการใช้งานจริง งานวิจัยนี้เลือกใช้พัดลมระบายอากาศอ้างอิงจากผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ที่มีข้อมูลทางวิศวกรรมและข้อมูลสมรรถนะจากผู้ผลิตอย่างชัดเจน โดยข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการกำหนดอัตราการไหลของอากาศ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) และการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศในแบบจำลอง

3.4.1 การเลือกพัดลมอ้างอิง

งานวิจัยนี้เลือกใช้พัดลมระบายอากาศรุ่น Kruger MTD100/1 เป็นพัดลมอ้างอิงสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง เนื่องจากเป็นพัดลมระบายอากาศขนาด 100 มิลลิเมตร ที่มีข้อมูลสมรรถนะจากผู้ผลิตครบถ้วน และมีอัตราการไหลอากาศเหมาะสมกับห้องสำนักงานขนาดเล็กที่มีปริมาตร 60 ลูกบาศก์เมตร

จากข้อมูลทางเทคนิคของผู้ผลิต พัดลมสามารถทำงานได้ 2 ระดับความเร็ว ได้แก่

- ความเร็วต่ำ (Low Speed) : 21 Watt (85 m^3/h)
- ความเร็วสูง (High Speed) : 31 Watt (145 m^3/h)

คุณลักษณะดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) เนื่องจากสามารถใช้เป็นระดับการระบายอากาศต่ำสุดและสูงสุดของระบบได้อย่างชัดเจน

ข้อมูลสมรรถนะของพัดลมถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการกำหนดค่า ACH สำหรับกรณี S1 และ S2 ภายในแบบจำลอง MATLAB/Simulink

3.4.2 การคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate)

อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ หรือ Air Changes per Hour (ACH) เป็นตัวชี้วัดปริมาณอากาศที่ถูกแทนที่ภายในห้องในหนึ่งชั่วโมง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$ACH = \frac{Q}{V} \tag{3-5}$$

เมื่อ

ACH คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (h^{-1})

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/h)

V คือ ปริมาตรห้อง (m^3)

สำหรับห้องกรณีศึกษาที่มีปริมาตร Room Volume = 60 m^3 สามารถคำนวณค่า ACH ของพัดลมอ้างอิงได้ดังนี้

กรณีความเร็วต่ำ

$$ACHlow = \frac{85}{60} \tag{3-6}$$

$$ACHlow = 1.42h^{-1}$$

กรณีความเร็วสูง

$$ACHhigh = \frac{145}{60} \tag{3-7}$$

$$ACHhigh = 2.42h^{-1}$$

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้

- S1 ใช้การระบายอากาศคงที่ที่ ACH = 2.42 h^{-1}
- S2 ใช้การควบคุมแบบ DCV ในช่วง ACH = 1.42–2.42 h^{-1}

ค่าดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์หลักในการจำลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

3.4.3 การประเมินความสามารถในการทำซ้ำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

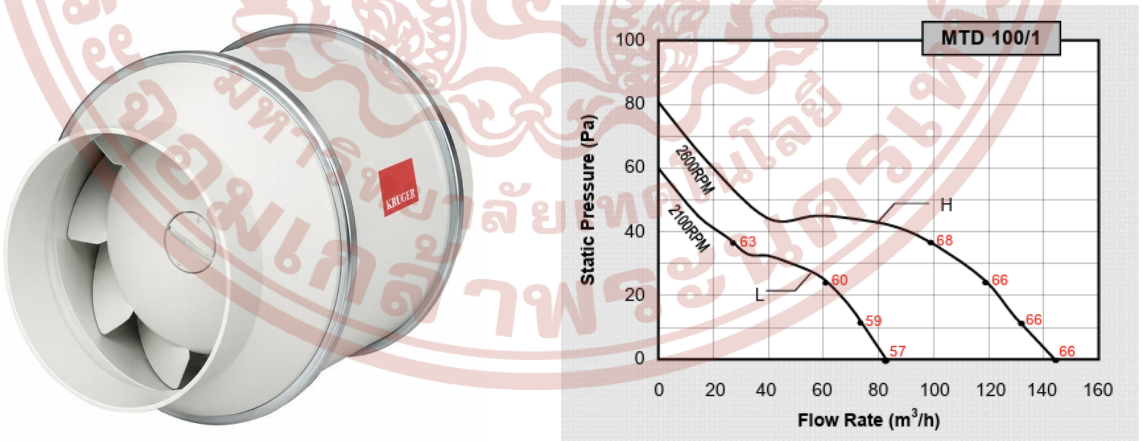
เพื่อให้ผลการจำลองมีความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) งานวิจัยนี้กำหนดให้ทุกกรณีศึกษาถูกจำลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยเปลี่ยนเฉพาะกลยุทธ์การระบายอากาศที่ต้องการศึกษา

พารามิเตอร์หลักที่ถูกกำหนดให้คงที่ในการจำลองทุกครั้ง ได้แก่

- ปริมาตรห้อง 60 m^3
- ความเข้มข้น CO_2 ภายนอก 400 ppm
- อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน 0.31 L/min-person
- รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3
- ช่วงเวลาจำลอง
- ช่วงเวลาการคำนวณ (Time Step)
- ค่าเริ่มต้นความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

นอกจากนี้ แบบจำลอง MATLAB/Simulink ถูกกำหนดให้ใช้ Time Step คงที่ตลอดการจำลอง และใช้สมการทางคณิตศาสตร์ชุดเดียวกันในทุกกรณีศึกษา ส่งผลให้ความแตกต่างของผลลัพธ์เกิดจากผลของกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 เท่านั้น

วิธีดังกล่าวช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการตั้งค่าการจำลอง และเพิ่มความสามารถในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกรณีศึกษาได้อย่างเป็นธรรมและตรวจสอบย้อนกลับได้

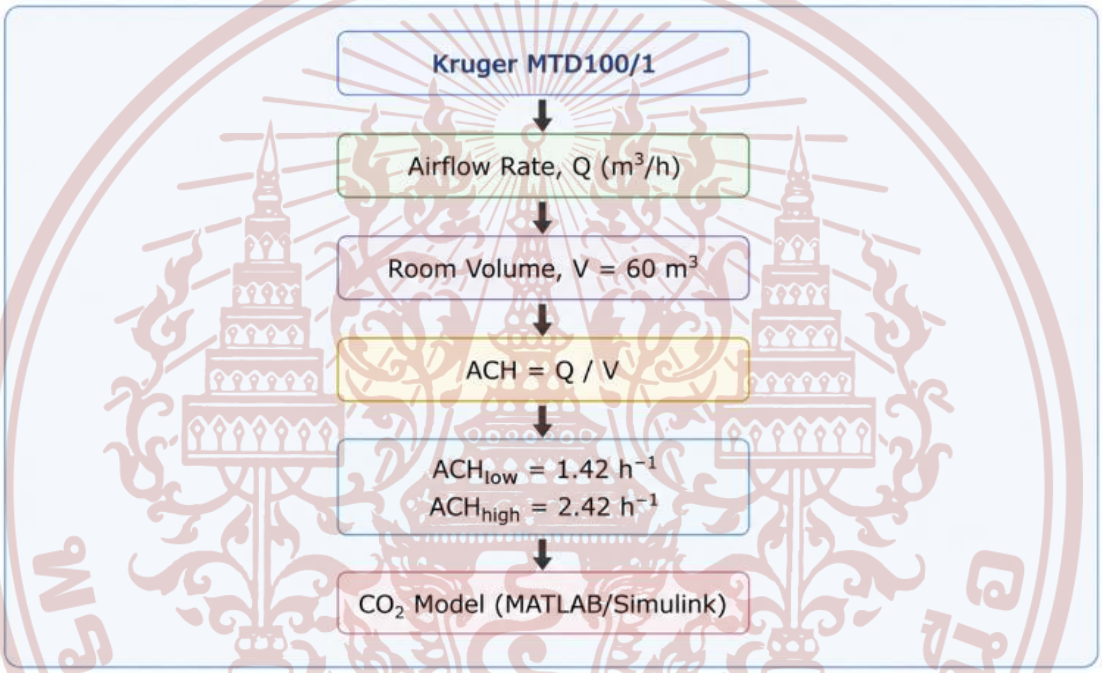


(a) (b)

ภาพที่ 3-6 แสดง (a) พัดลมระบายอากาศ Kruger MTD100/1
(b) Performance Data Kruger MTD100/1

Technical Data											
Model	Max Q m3/h	Power W	Motor Protection	Phase	N° Pole	Voltage V	Hz	Max Amp	Insulation Class	dB (A) at 3m	RPM
MTD 100/1	148 / 125	33 / 20	IP44	1	2	230	60	0.25 / 0.15	B	58 / 56	2400 / 2150
	145 / 85	31 / 21	IP44	1	2	230	50	0.18 / 0.13	B	45 / 37	2600 / 2100

ภาพที่ 3-7 แสดง Technical Data ของพัดลมระบายอากาศ Kruger MTD100/1



ภาพที่ 3-8 แสดง ขั้นตอนการคำนวณค่า ACH จากพัดลมอ้างอิง

3.5 การพัฒนาแบบจำลองใน MATLAB/Simulink

ภายหลังจากกำหนดขอบเขต พารามิเตอร์ และสมมติฐานของแบบจำลองแล้ว งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กบนโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในอาคาร และประเมินผลกระทบของกลยุทธ์การระบายอากาศที่แตกต่างกัน

โครงสร้างของแบบจำลองประกอบด้วยโมดูลหลัก ได้แก่ การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบ การสร้างรูปแบบจำนวนผู้ใช้งาน (Occupancy Schedule) การพัฒนาตัวจัดการสถานการณ์การระบายอากาศ (Scenario Manager) การพัฒนาแบบจำลองสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Mass Balance Model) และการพัฒนาโมดูลประเมินผลการดำเนินงาน

(KPI Monitor) สำหรับคำนวณตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ รายละเอียดการพัฒนาแบบจำลองในแต่ละส่วนแสดงดังหัวข้อ 3.5.1 ถึง 3.5.6

3.5.1 โครงสร้างแบบจำลองโดยรวม

แบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation : DCV) ถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้แนวคิดการจำลองเชิงพลวัต (Dynamic Simulation) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในห้องสำนักงานขนาดเล็กภายใต้สภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน

โครงสร้างแบบจำลองประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่

(1) ส่วนกำหนดข้อมูลนำเข้าและพารามิเตอร์ (Input and Parameter Initialization)

(2) ส่วนจัดการสถานการณ์การระบายอากาศ (Scenario Manager)

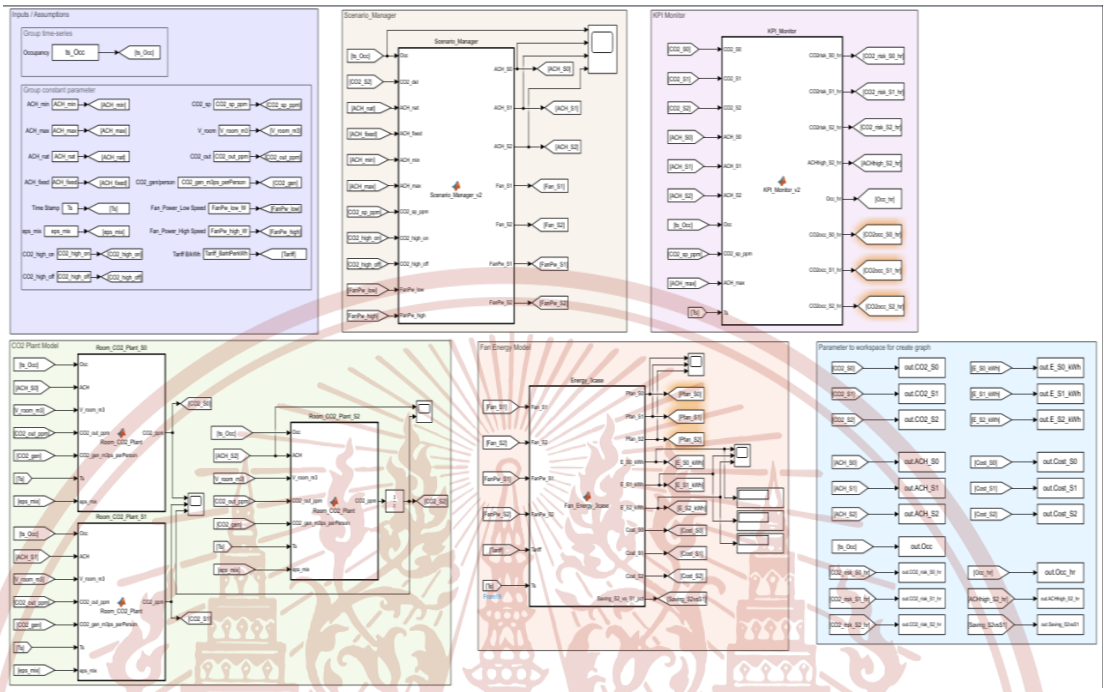
(3) ส่วนแบบจำลองความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง (CO_2 Plant Model)

(4) ส่วนประเมินตัวชี้วัดสมรรถนะ (KPI Monitor)

(5) ส่วนคำนวณพลังงานและต้นทุนของพัดลมระบายอากาศ (Fan Energy Model)

การทำงานของแบบจำลองเริ่มจากการกำหนดข้อมูลเริ่มต้นของห้องกรณีศึกษา พารามิเตอร์การระบายอากาศ และรูปแบบการใช้งานห้อง จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งเข้าสู่โมดูล Scenario Manager เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับกรณีศึกษา S0, S1 และ S2

สำหรับกรณี S0, S1 และ S2 จะถูกส่งเข้าสู่แบบจำลอง CO_2 เพื่อคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องตามหลักการสมดุลมวล โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกส่งไปยังโมดูล KPI Monitor เพื่อคำนวณตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร และส่งไปยังโมดูล Fan Energy เพื่อคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า ต้นทุนการดำเนินงาน และร้อยละการประหยัดพลังงานของระบบ ผลลัพธ์ทั้งหมดจะถูกบันทึกเข้าสู่ MATLAB Workspace เพื่อใช้ในการสร้างกราฟ วิเคราะห์ผล และเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบระบายอากาศแต่ละกรณีศึกษาในบทถัดไป



ภาพที่ 3-9 โครงสร้างแบบจำลองระบบ DCV ใน MATLAB/Simulink

3.5.2 การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

เพื่อให้การจำลองมีความเป็นระบบและสามารถกำหนดเงื่อนไขการจำลองได้อย่างสะดวก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาไฟล์กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น (Parameter Initialization Script) ในรูปแบบ MATLAB Script โดยรวบรวมค่าพารามิเตอร์หลักทั้งหมดของแบบจำลองไว้ในไฟล์เดียวก่อนเริ่มการจำลอง

แนวทางดังกล่าวช่วยให้สามารถแก้ไข ปรับปรุง และตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ได้อย่างเป็นระบบ รวมทั้งลดความผิดพลาดจากการกำหนดค่าซ้ำในหลายตำแหน่งของแบบจำลอง Simulink

พารามิเตอร์ที่กำหนดภายในไฟล์ประกอบด้วย 5 กลุ่มหลัก ได้แก่

(1) พารามิเตอร์การจำลอง (Simulation Parameters) งานวิจัยกำหนดให้การจำลองใช้ช่วงเวลาคำนวณคงที่ (Fixed Time Step) เท่ากับ 60 วินาที เพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องได้อย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดระยะเวลาการจำลองครอบคลุมกรณีศึกษา D1, D2 และ D3 รวมเป็นระยะเวลา 3 วัน

(2) พารามิเตอร์ห้องกรณีศึกษา (Room Parameters) ห้องกรณีศึกษาถูกกำหนดให้มีปริมาตรเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เมตร และกำหนดให้ความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคารมีค่าเท่ากับ 400 ppm ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแบบจำลอง

นอกจากนี้ยังกำหนดค่าอ้างอิง CO_2 สำหรับระบบ DCV เท่ากับ 1000 ppm เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารและการตอบสนองของระบบระบายอากาศ

(3) พารามิเตอร์การเกิด CO_2 (CO_2 Generation Parameters) อัตราการเกิด CO_2 ของผู้ใช้งานกำหนดเท่ากับ 5×10^{-6} m^3/s-person ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการปล่อย CO_2 ประมาณ 0.31 L/min-person สำหรับกิจกรรมสำนักงานทั่วไปในสภาวะนั่งทำงาน

พารามิเตอร์ดังกล่าวถูกใช้ในการคำนวณอัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องตามจำนวนผู้ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา

(4) พารามิเตอร์ระบบระบายอากาศ (Ventilation Parameters) ระบบระบายอากาศอ้างอิงพัดลม Kruger MTD100/1 ซึ่งสามารถทำงานได้ 2 ระดับความเร็ว

- Low Speed : 85 m^3/h
- High Speed : 145 m^3/h

เมื่อคำนวณเทียบกับปริมาตรห้อง 60 m^3 จะได้

- ACH_{low} = 1.42 h^{-1}
- ACH_{high} = 2.42 h^{-1}

สำหรับกรณี S0 กำหนดให้มีการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร (Background Infiltration) เท่ากับ 0.30 h^{-1}

ส่วนกรณี S1 กำหนดให้ทำงานที่อัตราการระบายอากาศคงที่เท่ากับ 2.42 h^{-1}

ขณะที่กรณี S2 ใช้การควบคุมระหว่าง 1.42 – 2.42 h^{-1} ตามเงื่อนไขของระบบ DCV

(5) พารามิเตอร์ด้านพลังงานและต้นทุน (Energy Parameters) กำหนดกำลังไฟฟ้าของพัดลมอ้างอิงเท่ากับ 21 วัตต์ สำหรับความเร็วต่ำ และ 31 วัตต์ สำหรับความเร็วสูง

ต้นทุนค่าไฟฟ้ากำหนดเท่ากับ 4.15 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง เพื่อใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายและร้อยละการประหยัดพลังงานของระบบระบายอากาศแต่ละกรณีศึกษา

ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจะถูกโหลดเข้าสู่ MATLAB Workspace ก่อนเริ่มการจำลอง และถูกเรียกใช้งานผ่านบล็อก From Workspace ภายในแบบจำลอง Simulink เพื่อให้ทุกกรณีศึกษาถูกจำลองภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นเดียวกัน

ตารางที่ 3-5 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในแบบจำลอง

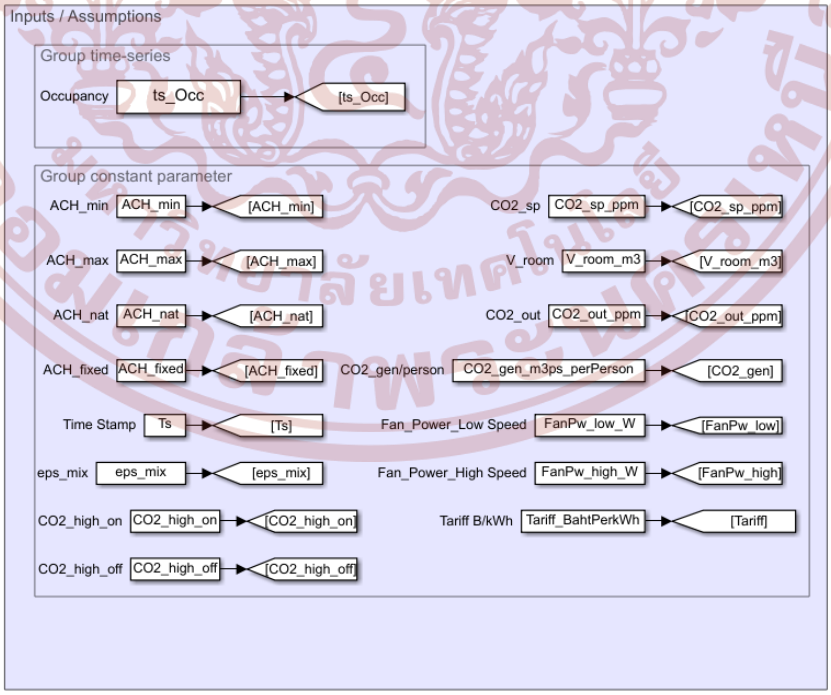
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
Ts	60	sec
Stop Time	3 วัน	day
Vroom	60	m^3
CO_2out	400	ppm
CO_2sp	1000	ppm

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

CO_2gen	5.17×10^{-6}	m^3/s-person
ACH_{nat}	0.31	h^{-1}
ACH_{low}	1.42	h^{-1}
ACH_{high}	2.42	h^{-1}
Fan Power Low	21	W
Fan Power High	31	W
Tariff	4.15	THB/kWh

ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจะถูกกำหนดผ่านไฟล์ MATLAB Script สำหรับเตรียมข้อมูลก่อนเริ่มการจำลอง และถูกโหลดเข้าสู่ MATLAB Workspace เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับแบบจำลอง Simulink ผ่านบล็อก From Workspace การกำหนดพารามิเตอร์ในลักษณะนี้ช่วยให้การปรับแก้ค่าต่าง ๆ เช่น ปริมาตรห้อง อัตราการเกิด CO_2 ค่า ACH ของแต่ละกรณี กำลังไฟฟ้าของพัดลม และอัตราค่าไฟฟ้า สามารถทำได้อย่างเป็นระบบและตรวจสอบย้อนกลับได้

รายละเอียดชุดคำสั่ง MATLAB สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบบจำลองแสดงไว้ในภาคผนวก ข.2



ภาพที่ 3-10 Input & Parameter Initialization

ภาพที่ 3-10 กลุ่มพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ถูกโหลดเข้าสู่ MATLAB Workspace และเชื่อมต่อเข้าสู่แบบจำลอง Simulink ผ่านบล็อกกำหนดค่าพารามิเตอร์

3.5.3 การสร้างสัญญาณจำนวนผู้ใช้งาน (Occupancy Schedule)

หลังจากกำหนดรูปแบบการใช้งานห้องตัวแทน D1, D2 และ D3 ในหัวข้อ 3.2.2 แล้ว งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลจำนวนผู้ใช้งานดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณตามเวลา (Time-Series Signal) ใน MATLAB เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง CO_2 ภายในห้องและระบบควบคุมการระบายอากาศใน Simulink

การสร้าง Occupancy Schedule เริ่มจากการกำหนดเวกเตอร์เวลาในการจำลอง จากนั้นคำนวณลำดับวันของการจำลองและชั่วโมงของแต่ละวัน เพื่อใช้ตรวจสอบว่าช่วงเวลานั้นอยู่ในเวลาทำงานหรือไม่ งานวิจัยนี้กำหนดเวลาทำงานของสำนักงานเป็น 08:00–18:00 น. หากเวลาอยู่นอกช่วงดังกล่าว จำนวนผู้ใช้งานภายในห้องจะถูกกำหนดให้เท่ากับศูนย์

สำหรับช่วงเวลาทำงาน จำนวนผู้ใช้งานจะถูกกำหนดตามลำดับวันของการจำลอง โดยวันที่ 1 แทนกรณี D1 วันที่ 2 แทนกรณี D2 และวันที่ 3 แทนกรณี D3 การกำหนดลักษณะนี้ช่วยให้สามารถจำลองรูปแบบการใช้งานห้องทั้ง 3 กรณีภายใน Simulation Run เดียวกัน และทำให้สามารถเปรียบเทียบการตอบสนองของแบบจำลองต่อระดับภาระ CO_2 ที่แตกต่างกันได้อย่างต่อเนื่อง

ในส่วนของโค้ด MATLAB ได้กำหนดพารามิเตอร์จำนวนผู้ใช้งานออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ใช้งานประจำ (regular_occ) ผู้มาติดต่อ (visitor_occ) และผู้รอเพิ่มเติม (waiting_occ) โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของกรณีฐานให้มีผู้ใช้งานประจำ 2 คน ผู้มาติดต่อ 2 คน และผู้รอเพิ่มเติม 1 คน ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการใช้งานห้องที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-1

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดตัวแปร Occ_case เพื่อรองรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของจำนวนผู้ใช้งานในขั้นตอนถัดไป โดย Occ_case = 1 แทนกรณีจำนวนผู้ใช้งานต่ำ Occ_case = 2 แทนกรณีฐาน และ Occ_case = 3 แทนกรณีจำนวนผู้ใช้งานสูง การกำหนดในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถปรับจำนวนผู้ใช้งานประจำได้โดยไม่ต้องแก้ไขโครงสร้างหลักของแบบจำลอง

ลำดับการสร้างสัญญาณ Occupancy สามารถสรุปได้ดังนี้ เริ่มจากกำหนดจำนวนผู้ใช้งานประจำ ผู้มาติดต่อ และผู้รอเพิ่มเติม จากนั้นตรวจสอบช่วงเวลาทำงาน หากอยู่นอกเวลาทำงานจะกำหนดจำนวนผู้ใช้งานเป็นศูนย์ แต่หากอยู่ในเวลาทำงานจะกำหนดจำนวนผู้ใช้งานตามกรณี D1, D2 หรือ D3 โดยเพิ่มจำนวนผู้มาติดต่อในช่วงเวลา 10:00–11:00 น. และ 15:00–16:00 น. และเพิ่มผู้รอเพิ่มเติมในกรณี D3 ช่วงเวลา 14:00–17:00 น.

หลังจากคำนวณจำนวนผู้ใช้งานในทุก Time Step แล้ว ข้อมูลดังกล่าวจะถูกจัดเก็บในตัวแปร Occ และแปลงเป็น Time-Series Signal ชื่อ ts_Occ เพื่อส่งเข้าสู่แบบจำลอง Simulink ผ่านบล็อก

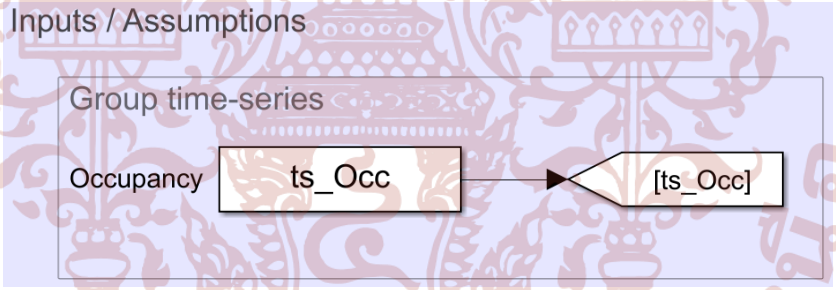
From Workspace สัญญาณ Occupancy นี้มีบทบาทสำคัญต่อแบบจำลอง เนื่องจากถูกนำไปใช้คำนวณอัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องตามสมการ

$$Gtot = N \times Gpp$$

โดยที่ N คือ จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง ณ เวลาใด ๆ และ Gpp คือ อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานใน Occupancy Schedule จึงเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเปลี่ยนแปลงตามเวลา และเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการประเมินการตอบสนองของระบบ DCV

การกำหนดกรณีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งาน และการสร้างสัญญาณ Occupancy Schedule สำหรับกรณี D1, D2 และ D3 ถูกดำเนินการในไฟล์กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบบจำลอง โดยสัญญาณจำนวนผู้ใช้งานถูกจัดเก็บในรูปแบบ Time-Series Signal ชื่อ ts_Occ เพื่อส่งเข้าสู่แบบจำลอง Simulink ผ่านบล็อก From Workspace

รายละเอียดชุดคำสั่ง MATLAB สำหรับการกำหนดกรณีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานและการสร้าง Occupancy Schedule แสดงไว้ในภาคผนวก ข.2



ภาพที่ 3-11 การเชื่อมต่อสัญญาณ Occupancy เข้าสู่ Simulink

ภาพที่ 3-11 การเชื่อมต่อสัญญาณจำนวนผู้ใช้งาน ts_Occ จาก MATLAB Workspace เข้าสู่แบบจำลอง Simulink เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง CO_2 และระบบควบคุมการระบายอากาศ

3.5.4 การพัฒนาและสร้าง Scenario Manager

Scenario Manager เป็นส่วนควบคุมหลักของแบบจำลองระบบระบายอากาศ ทำหน้าที่กำหนดกลยุทธ์การระบายอากาศสำหรับกรณีศึกษา S0, S1 และ S2 โดยรับข้อมูลจำนวนผู้ใช้งาน ความเข้มข้น CO_2 และพารามิเตอร์การระบายอากาศจาก MATLAB Workspace แล้วประมวลผลเพื่อสร้างค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศและสถานะการทำงานของพัดลมในแต่ละกรณีศึกษา

ในแบบจำลองนี้ Scenario Manager ถูกพัฒนาในรูปแบบ MATLAB Function Block ภายใน Simulink เพื่อให้สามารถกำหนดเงื่อนไขเชิงตรรกะของระบบระบายอากาศได้อย่างยืดหยุ่น โดยมี

ข้อมูลนำเข้าหลัก ได้แก่ จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง (Occ) ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องของกรณี S2 ค่าการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร ค่า ACH ของระบบระบายอากาศแบบคงที่ ค่า ACH ต่ำสุดและสูงสุดของระบบ DCV ค่า CO_2 Setpoint ค่าขอบเขตการสั่งพัดลมความเร็วสูง และกำลังไฟฟ้าของพัดลมแต่ละระดับความเร็ว

ผลลัพธ์จาก Scenario Manager ประกอบด้วยค่า ACH ของแต่ละกรณีศึกษา ได้แก่ ACH_S0, ACH_S1 และ ACH_S2 รวมถึงสถานะการทำงานของพัดลม Fan_S1 และ Fan_S2 และกำลังไฟฟ้าของพัดลม FanPw_S1 และ FanPw_S2 ซึ่งถูกส่งต่อไปยังแบบจำลอง CO_2 และแบบจำลองพลังงานของพัดลม

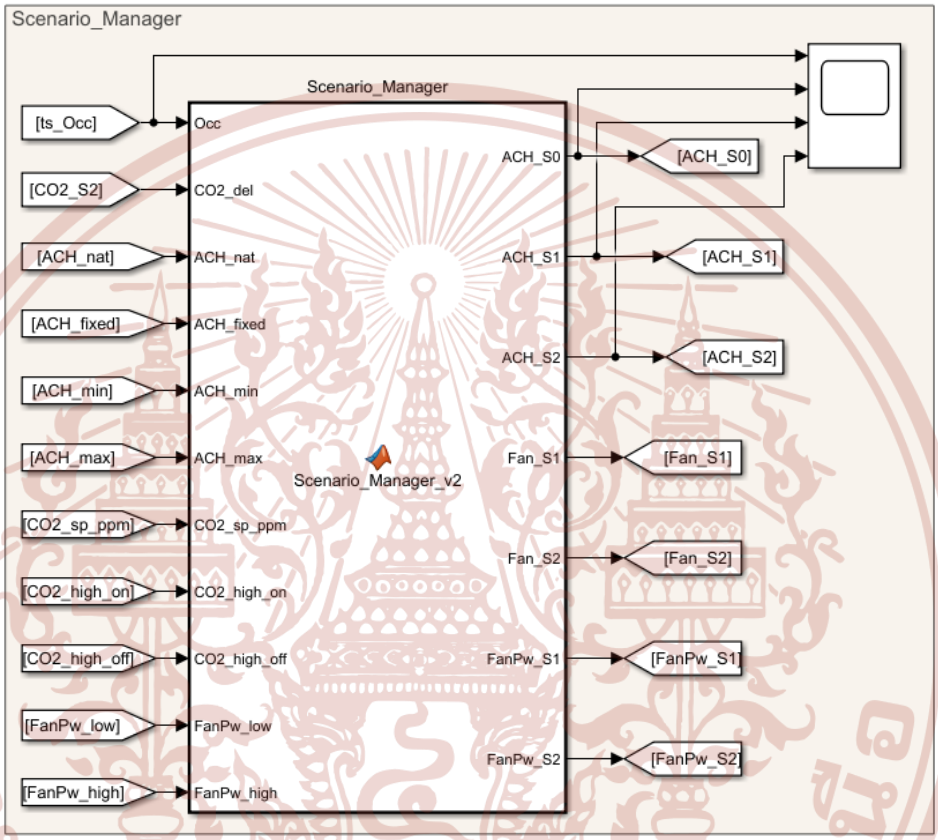
(1) สำหรับกรณี S0 ระบบถูกกำหนดให้ไม่มีการทำงานของพัดลมระบายอากาศเชิงกล โดยพิจารณาเฉพาะการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร ดังนั้นค่า ACH_S0 จึงถูกกำหนดเท่ากับ ACH_nat ตลอดช่วงเวลาจำลอง

(2) สำหรับกรณี S1 ระบบถูกกำหนดให้เป็นการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ เมื่อมีผู้ใช้งานภายในห้อง พัดลมจะทำงานที่ความเร็วสูงอย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดค่า ACH_S1 เท่ากับ ACH_fixed และใช้กำลังไฟฟ้า FanPw_high แต่เมื่อไม่มีผู้ใช้งานภายในห้อง ระบบจะหยุดการทำงานของพัดลมและพิจารณาเฉพาะค่า ACH_nat เช่นเดียวกับสภาวะการรั่วซึมพื้นฐาน

(3) สำหรับกรณี S2 ระบบถูกกำหนดให้เป็นระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ควบคุมด้วย CO_2 โดยใช้พัดลมสองระดับความเร็ว เมื่อไม่มีผู้ใช้งานภายในห้อง พัดลมจะหยุดทำงานและพิจารณาเฉพาะค่า ACH_nat แต่เมื่อมีผู้ใช้งานภายในห้อง ระบบจะเริ่มทำงานที่ความเร็วต่ำหรือความเร็วสูงตามเงื่อนไขของ CO_2 และจำนวนผู้ใช้งาน

การควบคุมพัดลมความเร็วสูงของ S2 ใช้หลักการ Hysteresis Control เพื่อลดการสั่งเปิด–ปิดพัดลมสลับไปมาเมื่อค่า CO_2 อยู่ใกล้ขอบเขตการควบคุม โดยกำหนดให้พัดลมเปลี่ยนเป็นความเร็วสูงเมื่อค่า CO_2 สูงกว่าหรือเท่ากับค่า CO2_high_on หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้งานมากกว่าหรือเท่ากับ 4 คน และจะกลับสู่ความเร็วต่ำเมื่อค่า CO_2 ต่ำกว่าหรือเท่ากับค่า CO2_high_off และจำนวนผู้ใช้งานน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 คน การใช้เงื่อนไขร่วมระหว่าง CO_2 และจำนวนผู้ใช้งานทำให้ระบบ S2 สามารถตอบสนองได้ทั้งจากสภาวะคุณภาพอากาศที่เริ่มแย่ลง และจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้งานก่อนที่ CO_2 จะสะสมสูงเกินไป ส่งผลให้ระบบ DCV สามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในห้องควบคู่กับการลดการใช้พลังงานของพัดลมได้

ดังนั้น Scenario Manager จึงเป็นส่วนสำคัญที่เชื่อมโยงระหว่าง Occupancy Schedule แบบจำลอง CO_2 และระบบระบายอากาศ โดยทำหน้าที่สร้างเงื่อนไขการทำงานของระบบ S0, S1 และ S2 ให้เป็นไปตามขอบเขตการศึกษาที่กำหนดไว้ในงานวิจัย

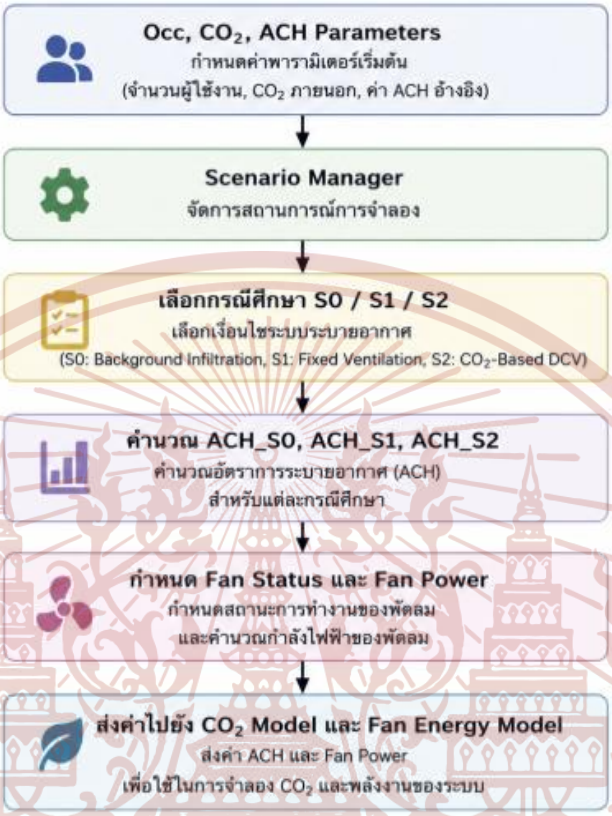


ภาพที่ 3-12 โครงสร้าง Scenario Manager ใน Simulink

ภาพที่ 3-12 โครงสร้าง Scenario Manager ใน Simulink สำหรับกำหนดค่า ACH สถานะพัดลม และกำลังไฟฟ้าของพัดลมในกรณี S0, S1 และ S2

การกำหนดเงื่อนไขการทำงานของ Scenario Manager ถูกพัฒนาในรูปแบบ MATLAB Function Block ภายใน Simulink เพื่อใช้กำหนดตรรกะการทำงานของระบบระบายอากาศในแต่ละกรณีศึกษา ได้แก่ S0, S1 และ S2 โดยกรณี S0 พิจารณาเฉพาะการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร กรณี S1 กำหนดให้พัดลมทำงานด้วยอัตราการระบายอากาศคงที่ในช่วงที่มีผู้ใช้งาน และกรณี S2 กำหนดให้พัดลมทำงานแบบสองระดับความเร็ว โดยอาศัยเงื่อนไขจากจำนวนผู้ใช้งานและความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเป็นตัวกำหนดการปรับระดับการระบายอากาศ

รายละเอียดชุดคำสั่งของ MATLAB Function Block สำหรับ Scenario Manager แสดงไว้ในภาคผนวก ข.3



ภาพที่ 3-13 Flowchart แสดงขั้นตอนการทำงานของ Scenario Manager

ภาพที่ 3-13 Flowchart แสดงขั้นตอนการทำงานของ Scenario Manager สำหรับเลือกกลยุทธการระบายอากาศและกำหนดสถานการณ์ทำงานของพัดลมตามเงื่อนไขของแบบจำลอง

3.5.5 การพัฒนา CO_2 Plant Model ใน Simulink

หลังจากกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องในหัวข้อ 3.3 แล้ว งานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาพัฒนาเป็น MATLAB Function Block ภายในโปรแกรม Simulink เพื่อใช้คำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องแบบพลวัต (Dynamic Simulation) ตลอดช่วงเวลาการจำลอง

แบบจำลองดังกล่าวถูกจัดเก็บอยู่ในบล็อก Room_ CO_2_Plant ซึ่งถูกนำไปใช้งานร่วมกันในกรณีศึกษา S0, S1 และ S2 โดยใช้โครงสร้างการคำนวณเดียวกันทั้งหมด แต่รับค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ที่แตกต่างกันจาก Scenario Manager

โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลของกลยุทธ์การระบายอากาศแต่ละกรณีได้อย่างเป็นธรรม เนื่องจากใช้สมการและพารามิเตอร์ชุดเดียวกัน โดยเปลี่ยนเฉพาะค่า ACH ที่เป็นตัวแทนของแต่ละระบบระบายอากาศเท่านั้น

(1) โครงสร้าง Input และ Output ของ CO_2 Plant Model

CO_2 Plant Model ถูกออกแบบให้รับข้อมูลนำเข้าหลักจำนวน 7 ตัวแปร ได้แก่

• Occ : จำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง (person)

• ACH : อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (h^{-1})

• V_room_m3 : ปริมาตรห้อง (m^3)

• CO_2_out_ppm : ความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคาร (ppm)

• CO_2_gen_m3ps_perPerson : อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน (m^3/s-person)

• Ts : ช่วงเวลาการคำนวณ (s)

• eps_mix : ค่าปัจจัยการผสมอากาศ

ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งเข้าสู่ MATLAB Function Block เพื่อคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ณ แต่ละ Time Step ผลลัพธ์ของบล็อกคือ

• CO_2_ppm : ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง (ppm)

ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยัง KPI Monitor สำหรับการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร และส่งกลับไปยัง Scenario Manager เพื่อใช้ในการควบคุมระบบ DCV ของกรณี S2

(2) การจัดเก็บสถานะของระบบด้วย Persistent Variable

เนื่องจากความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีลักษณะเป็นตัวแปรสะสมตามเวลา การคำนวณในแต่ละ Time Step จึงจำเป็นต้องอ้างอิงค่าความเข้มข้น CO_2 จากช่วงเวลาก่อนหน้า ภายใน MATLAB Function Block จึงมีการใช้ตัวแปรชนิด Persistent Variable เพื่อเก็บสถานะของระบบ โดยกำหนดตัวแปร C เป็นตัวแทนของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ณ Time Step ปัจจุบัน

เมื่อเริ่มต้นการจำลอง หากยังไม่มีค่าความเข้มข้น CO_2 ถูกจัดเก็บไว้ ระบบจะกำหนดค่าเริ่มต้นให้เท่ากับความเข้มข้น CO_2 ภายนอกอาคาร เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการคำนวณ

แนวทางดังกล่าวช่วยให้แบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการสะสมและการลดลงของ CO_2 ภายในห้องได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการจำลอง และสะท้อนลักษณะพลวัตของระบบจริงได้อย่างเหมาะสม

(3) การประมวลผลเชิงตัวเลข (Numerical Implementation)

ภายใน MATLAB Function Block ข้อมูลนำเข้าทั้งหมดจะถูกนำมาคำนวณตามลำดับขั้นตอนที่กำหนดไว้ในโค้ด โดยเริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า จากนั้นคำนวณอัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้อง และคำนวณผลของการระบายอากาศตามค่า ACH ที่ได้รับจาก Scenario Manager

ค่าที่คำนวณได้จะถูกนำมาอัปเดตค่าความเข้มข้น CO_2 ของระบบในแต่ละ Time Step ตามลำดับ ทำให้แบบจำลองสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 ได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการจำลอง

การประมวลผลในลักษณะนี้ทำให้ MATLAB Function Block สามารถทำงานเป็นแบบจำลองเชิงพลวัตที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศได้แบบ Real-Time ภายในสภาพแวดล้อมของ Simulink

(4) การพิจารณาผลของการผสมอากาศ

ภายในแบบจำลองมีการกำหนดตัวแปร eps_mix เพื่อใช้เป็นตัวแทนประสิทธิภาพการผสมอากาศภายในห้อง

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่า eps_mix มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐาน Well-Mixed Air ที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2 กล่าวคือ อากาศภายในห้องสามารถผสมตัวได้อย่างสม่ำเสมอ และความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันทุกตำแหน่ง

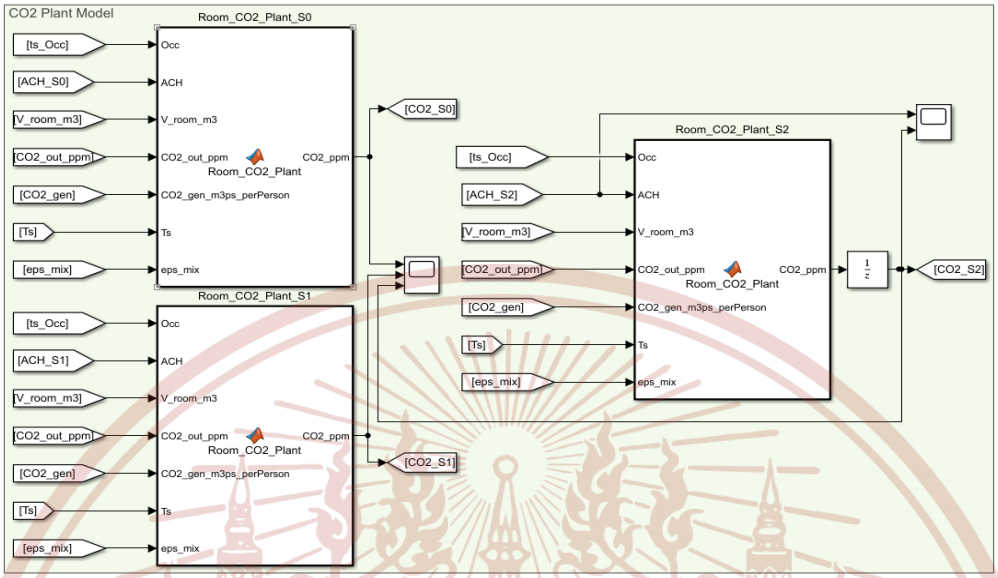
การกำหนดตัวแปรดังกล่าวช่วยให้สามารถปรับปรุงแบบจำลองในอนาคตได้หากต้องการพิจารณาผลของการผสมอากาศที่ไม่สมบูรณ์หรือความแตกต่างของความเข้มข้น CO_2 ในแต่ละบริเวณของห้อง

(5) การป้องกันค่าผิดปกติของแบบจำลอง (Saturation Protection)

เพื่อป้องกันปัญหาทางคณิตศาสตร์และเพิ่มเสถียรภาพของการจำลองภายใน MATLAB Function Block ได้มีการกำหนดเงื่อนไขตรวจสอบและจำกัดค่าตัวแปรสำคัญก่อนส่งผลลัพธ์ออกจากแบบจำลอง จำนวนผู้ใช้งานและค่า ACH ถูกจำกัดไม่ให้มีค่าติดลบ ขณะที่ค่าปัจจัยการผสมอากาศถูกกำหนดให้มีค่าขั้นต่ำเพื่อป้องกันการหารด้วยศูนย์

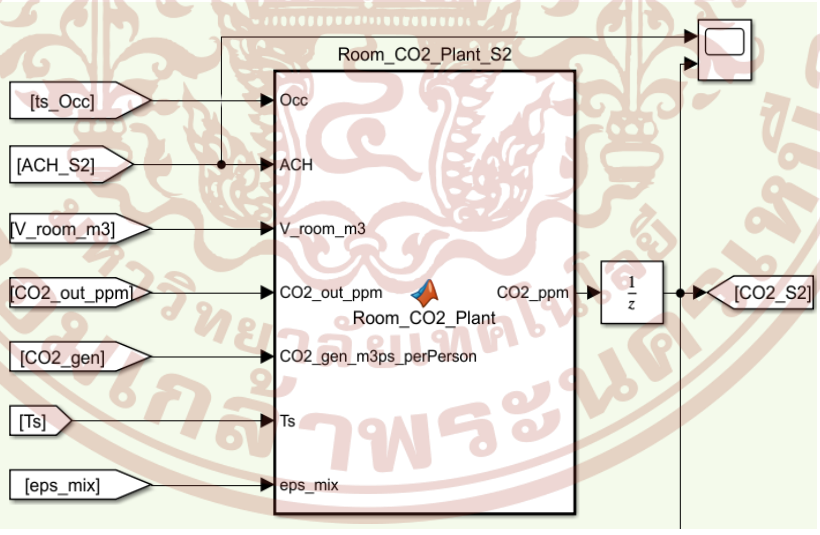
นอกจากนี้ ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องยังถูกจำกัดให้อยู่ในช่วง 300–5000 ppm เพื่อป้องกันค่าที่ไม่สมเหตุสมผลทางกายภาพ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดเชิงตัวเลขระหว่างการจำลอง แนวทางดังกล่าวช่วยให้แบบจำลองมีเสถียรภาพ สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการจำลอง และลดโอกาสเกิด Numerical Instability ภายใน Simulink

จากกระบวนการดังกล่าว CO_2 Plant Model จึงทำหน้าที่เป็นแกนหลักของการคำนวณคุณภาพอากาศภายในห้อง โดยรับข้อมูลจาก Occupancy Schedule และ Scenario Manager แล้วคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องแบบต่อเนื่องตามเวลา ก่อนส่งผลลัพธ์ไปยังระบบประเมิน KPI และระบบควบคุมการระบายอากาศของแบบจำลอง



ภาพที่ 3-14 โครงสร้าง CO_2 Plant Model ใน Simulink

ภาพที่ 3-14 โครงสร้าง CO_2 Plant Model สำหรับกรณีศึกษา S0, S1 และ S2 ภายใน MATLAB/Simulink โดยใช้ MATLAB Function Block เดียวกันในการคำนวณความเข้มข้น CO_2 และรับค่า ACH จาก Scenario Manager



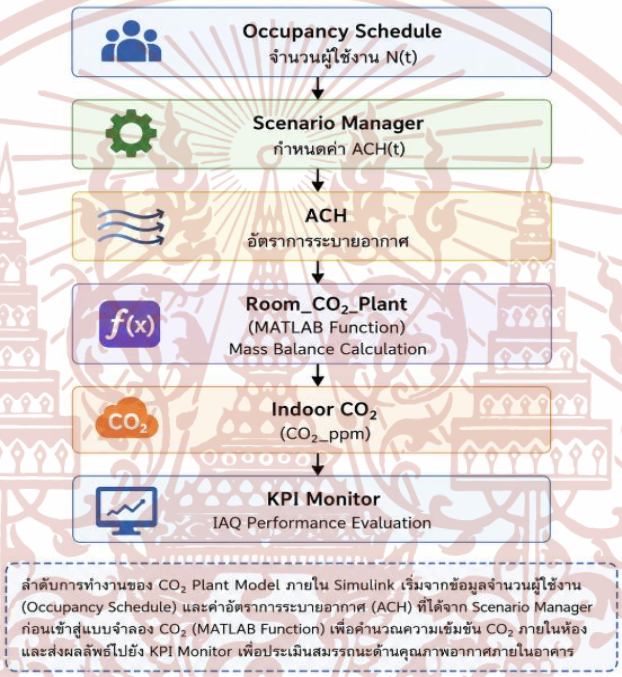
ภาพที่ 3-15 Input และ Output ของ Room_ CO_2_Plant

ภาพที่ 3-15 ตัวอย่าง Input และ Output ของ MATLAB Function Block สำหรับคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

การคำนวณภายใน CO_2 Plant Model ถูกพัฒนาในรูปแบบ MATLAB Function Block ภายใน Simulink โดยอาศัยหลักสมดุลมวลของ CO_2 ตามสมการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3 บล็อกนี้ทำหน้าที่รับค่าตัวแปรนำเข้า ได้แก่ จำนวนผู้ใช้งาน อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ ปริมาตรห้อง

ความเข้มข้น CO_2 ภายนอก และอัตราการเกิด CO_2 ต่อคน จากนั้นจึงคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องในแต่ละช่วงเวลา เพื่อใช้เป็นผลลัพธ์ของแบบจำลองและเป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับการควบคุมระบบระบายอากาศในกรณี S2

รายละเอียดชุดคำสั่งของ MATLAB Function Block สำหรับ Room_ CO_2_Plant แสดงไว้ในภาคผนวก ข.4



ภาพที่ 3-16 ขั้นตอนการทำงานของ CO_2 Plant Model

ภาพที่ 3-16 ขั้นตอนการทำงานของ CO_2 Plant Model ตั้งแต่การรับสัญญาณ Occupancy และ ACH จนถึงการคำนวณความเขมขน CO_2 และส่งผลลัพธ์ไปยัง KPI Monitor

3.5.6 การพัฒนา KPI Monitor และ Fan Energy Model

หลังจากแบบจำลอง CO_2 และ Scenario Manager คำนวณค่าความเข้มข้น CO_2 ค่า ACH และสถานะการทำงานของพัดลมในแต่ละกรณีศึกษาแล้ว งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโมดูลสำหรับประเมินผลลัพธ์ของแบบจำลองจำนวน 2 ส่วน ได้แก่ KPI Monitor และ Fan Energy Model

KPI Monitor ทำหน้าที่ประเมินตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร ส่วน Fan Energy Model ทำหน้าที่คำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า ต้นทุนค่าไฟฟ้า และร้อยละการประหยัดพลังงานของระบบ DCV เมื่อเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศแบบคงที่

(1) การพัฒนา KPI Monitor

KPI Monitor ถูกพัฒนาเป็น MATLAB Function Block ภายใน Simulink เพื่อสะสมค่าตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้น CO_2 และการทำงานของระบบระบายอากาศตลอดช่วงเวลาการจำลอง

ข้อมูลนำเข้าของ KPI Monitor ประกอบด้วยค่าความเข้มข้น CO_2 ของกรณี S0, S1 และ S2 ค่า ACH ของแต่ละกรณี จำนวนผู้ใช้งาน ค่า CO_2 Setpoint ค่า ACH สูงสุดของระบบ และช่วงเวลาการคำนวณ Ts

ภายในบล็อกมีการใช้ Persistent Variable เพื่อสะสมค่าตัวชี้วัดตามเวลา เช่น ชั่วโมงที่ CO_2 สูงเกินเกณฑ์ ชั่วโมงที่ CO_2 สูงเกินเกณฑ์เฉพาะช่วงที่มีผู้ใช้งาน ชั่วโมงที่มีผู้ใช้งานภายในห้อง และชั่วโมงที่ระบบ S2 ทำงานที่ค่า ACH สูงสุด

การคำนวณเวลาสะสมใช้การแปลง Time Step จากวินาทีเป็นชั่วโมง โดยกำหนด

$$dt_hr = \frac{Ts}{3600} \tag{3-8}$$

จากนั้นในแต่ละ Time Step ระบบจะตรวจสอบเงื่อนไขของตัวชี้วัด หากเงื่อนไขเป็นจริงจะสะสมค่า dt_hr เพิ่มเข้าไปในตัวแปรของตัวชี้วัดนั้น ๆ

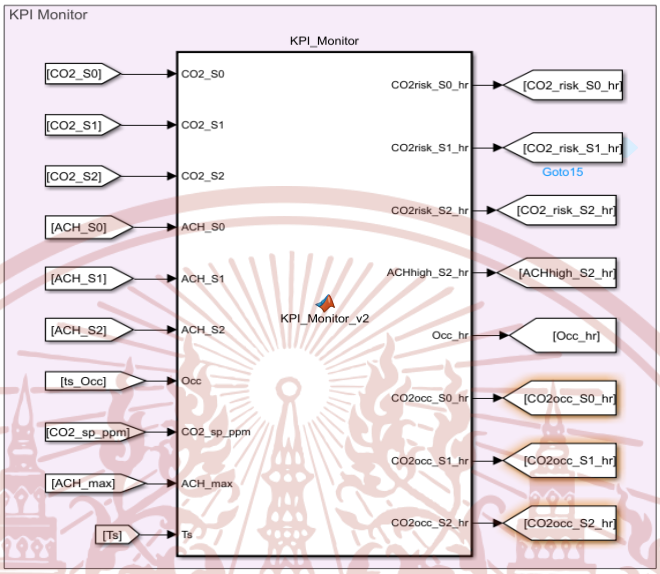
ตัวอย่างเช่น หากค่า CO_2 ของกรณีใดมีค่าสูงกว่า CO_2 Setpoint ระบบจะสะสมชั่วโมง CO_2 Risk ของกรณีนั้น และหากเงื่อนไขดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงที่มีผู้ใช้งาน ระบบจะสะสมเป็นชั่วโมง CO_2 Exceedance During Occupied Hours เพิ่มเติม

สำหรับกรณี S2 มีการตรวจสอบช่วงเวลาที่ระบบทำงานที่อัตราการระบายอากาศสูงสุด โดยเปรียบเทียบค่า ACH_S2 กับ ACH_max เพื่อประเมินจำนวนชั่วโมงที่พัดลมทำงานในระดับ High Speed หรือ Maximum Ventilation

ผลลัพธ์จาก KPI Monitor ประกอบด้วยตัวชี้วัดหลัก ได้แก่

- ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ของ S0, S1 และ S2
- ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์เฉพาะช่วงมีผู้ใช้งานของ S0, S1 และ S2
- ชั่วโมงที่มีผู้ใช้งานภายในห้อง
- ชั่วโมงที่ S2 ทำงานที่ ACH สูงสุด

ตัวชี้วัดเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารในบทที่ 4



ภาพที่ 3-17 โครงสร้าง KPI Monitor ใน Simulink

ภาพที่ 3-17 โครงสร้าง KPI Monitor ใน Simulink สำหรับประเมินตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศและการทำงานของระบบ S2 ซึ่ง KPI ที่ได้จากแบบจำลองถูกนำไปใช้เปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละกรณีศึกษาในบทที่ 4

(2) การพัฒนา Fan Energy Model

Fan Energy Model ถูกพัฒนาเป็น MATLAB Function Block เพื่อคำนวณการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศในแต่ละกรณีศึกษา โดยพิจารณาเฉพาะพลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ ไม่รวมพลังงานของระบบปรับอากาศ พลังงานแสงอาทิตย์ หรือแบบจำลองความร้อนของห้อง ข้อมูลนำเข้าของ Fan Energy Model ประกอบด้วยสถานะการทำงานของพัดลมในกรณี S1 และ S2 กำลังไฟฟ้าของพัดลมในแต่ละกรณี อัตราค่าไฟฟ้า และช่วงเวลาการคำนวณ Ts

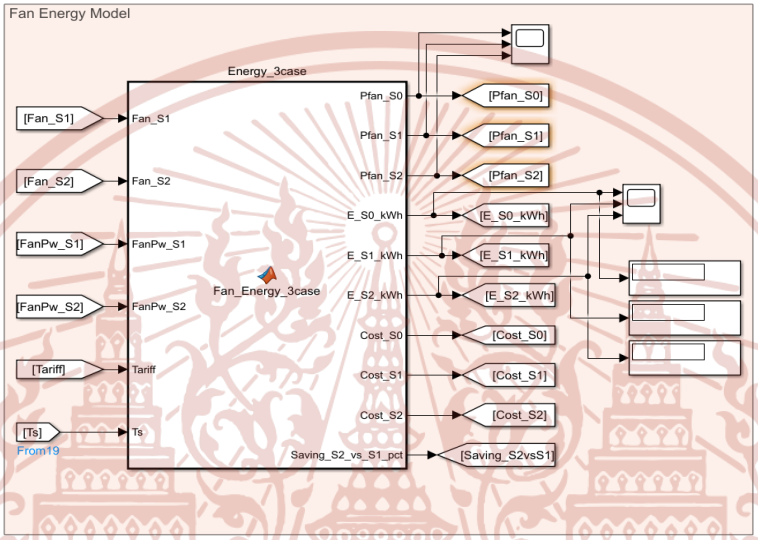
ในแบบจำลองนี้ กรณี S0 ถูกกำหนดให้ไม่ใช้พลังงานพัดลมเชิงกล เนื่องจากเป็นกรณีที่พิจารณาเฉพาะการรั่วซึมพื้นฐานของอาคาร ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของพัดลมในกรณี S0 จึงเท่ากับศูนย์

กำลังไฟฟ้าขณะทำงานของพัดลมคำนวณจากสถานะการทำงานของพัดลมและกำลังไฟฟ้าที่กำหนดไว้ โดยหากพัดลมทำงาน สถานะ Fan จะมีค่าเท่ากับ 1 และหากพัดลมหยุดทำงาน สถานะ Fan จะมีค่าเท่ากับ 0

พลังงานไฟฟ้าสะสมถูกคำนวณจากกำลังไฟฟ้าและช่วงเวลาการจำลอง โดยแปลงหน่วยจากวัตต์และวินาทีให้อยู่ในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง จากนั้นสะสมค่าพลังงานในแต่ละ Time Step ด้วย Persistent Variable

ต้นทุนค่าไฟฟ้าคำนวณจากพลังงานไฟฟ้าสะสมคูณกับอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในหน่วยบาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

นอกจากนี้ แบบจำลองยังคำนวณร้อยละการประหยัดพลังงานของกรณี S2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี S1 เพื่อใช้ประเมินศักยภาพของระบบ DCV ในการลดการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ



ภาพที่ 3-18 โครงสร้าง Fan Energy Model ใน Simulink

ภาพที่ 3-18 โครงสร้าง Fan Energy Model ใน Simulink สำหรับคำนวณพลังงาน ค่าไฟฟ้า และการประหยัดพลังงานของพัดลม

KPI Monitor และ Fan Energy Model ถูกพัฒนาในรูปแบบ MATLAB Function Block ภายใน Simulink โดย KPI Monitor ทำหน้าที่สะสมตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศ เช่น ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์เฉพาะช่วงที่มีผู้ใช้งาน และชั่วโมงการทำงานที่ระดับสูงของระบบ S2 ส่วน Fan Energy Model ทำหน้าที่คำนวณกำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม ค่าไฟฟ้า และร้อยละการประหยัดพลังงานของพัดลมในแต่ละกรณีศึกษา KPI ทั้งหมดถูกคำนวณโดยอัตโนมัติภายหลังการจำลองแต่ละครั้ง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละกรณีศึกษาได้ภายใต้เกณฑ์เดียวกัน

รายละเอียดชุดคำสั่งของ KPI_Monitor_v2 และ Fan_Energy_3case แสดงไว้ในภาคผนวก ข.5 และภาคผนวก ข.6 ตามลำดับ

จากการพัฒนา KPI Monitor และ Fan Energy Model ดังกล่าว แบบจำลองจึงสามารถประเมินผลลัพธ์ได้ทั้งด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและด้านพลังงานภายใต้กรอบการจำลองเดียวกัน ทำให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของ S0, S1 และ S2 ได้อย่างเป็นระบบ และตรวจสอบย้อนกลับได้เพื่อยืนยันว่าผลการจำลองมีพฤติกรรมสอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรม

ทั้งนี้ ในบทที่ 3 ได้นำเสนอเฉพาะโครงสร้างของแบบจำลอง หลักการทำงานของแต่ละโมดูล และแนวทางการคำนวณที่สำคัญ เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและเน้นกระบวนการดำเนินงานวิจัยเป็นหลัก ส่วนรายละเอียดชุดคำสั่ง MATLAB และ MATLAB Function Block ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง แสดงไว้ในภาคผนวก ข. เพื่อให้สามารถตรวจสอบขั้นตอนการคำนวณและทำซ้ำผลการศึกษาได้อย่างชัดเจน

3.6 แนวทางการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง

ก่อนนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของระบบระบายอากาศ งานวิจัยนี้ได้กำหนดแนวทางการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง (Model Verification) เพื่อประเมินว่าแบบจำลองสามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมทางกายภาพ ที่คาดหมายได้อย่างถูกต้อง การตรวจสอบในงานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดจริง แต่เป็นการตรวจสอบว่าผลลัพธ์ของแบบจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรมและพฤติกรรมที่รายงานในงานวิจัยอ้างอิงหรือไม่

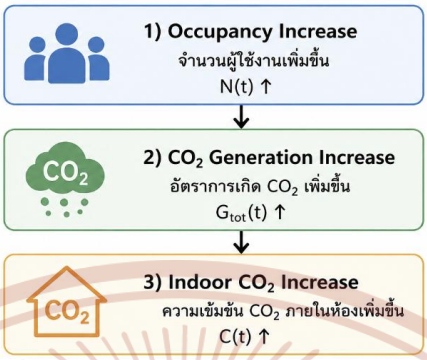
การตรวจสอบถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การตรวจสอบผลกระทบของจำนวนผู้ใช้งาน การตรวจสอบผลกระทบของอัตราการระบายอากาศ และการตรวจสอบการตอบสนองของระบบระบายอากาศตามความต้องการ

3.6.1 การตรวจสอบผลกระทบของจำนวนผู้ใช้งานต่อความเข้มข้น CO_2

การตรวจสอบกรณีแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าแบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมการสะสมของ CO_2 ตามจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องได้อย่างสมเหตุสมผลหรือไม่

แนวคิดพื้นฐานของแบบจำลองกำหนดให้ผู้ใช้งานเป็นแหล่งกำเนิด CO_2 หลักภายในห้อง ดังนั้นเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อัตราการเกิด CO_2 รวมภายในห้องจะเพิ่มขึ้นตาม และส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเพิ่มสูงขึ้น

การตรวจสอบในกรณีนี้ดำเนินการโดยกำหนดจำนวนผู้ใช้งานหลายระดับภายใต้เงื่อนไขการระบายอากาศเดียวกัน จากนั้นพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง แบบจำลองจะถือว่าผ่านการตรวจสอบ หากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นไปตามหลักการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานอาคาร (อ้างอิง Persily & de Jonge)



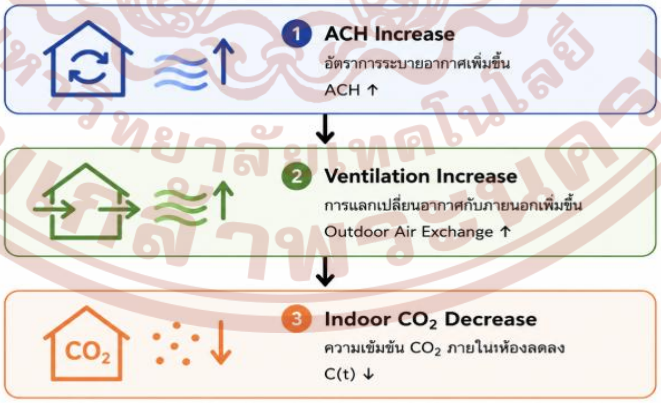
ภาพที่ 3-19 แนวทางการตรวจสอบผลกระทบของจำนวนผู้ใช้งานต่อความเข้มข้น CO_2

3.6.2 การตรวจสอบผลกระทบของอัตราการระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2

การตรวจสอบกรณีที่สองมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าแบบจำลองสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการระบายอากาศได้อย่างถูกต้อง ภายใต้หลักการสมดุลมวล การเพิ่มอัตราการระบายอากาศจะช่วยเพิ่มอัตราการเจือจางของ CO_2 ภายในห้อง ส่งผลให้ความเข้มข้น CO_2 ลดลงหรือสะสมช้าลงเมื่อเทียบกับกรณีที่มีอัตราการระบายอากาศต่ำกว่า

การตรวจสอบดำเนินการโดยกำหนดจำนวนผู้ใช้งานคงที่ และเปลี่ยนแปลงค่า ACH ในหลายระดับ จากนั้นพิจารณาแนวโน้มของความเข้มข้น CO_2 ที่เกิดขึ้นภายในห้อง

แบบจำลองจะถือว่าผ่านการตรวจสอบ หากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า ACH ส่งผลให้ระดับ CO_2 ภายในห้องลดลง และมีแนวโน้มสอดคล้องกับพฤติกรรมทางกายภาพของระบบระบายอากาศ (อ้างอิง Ahn et al.)



ภาพที่ 3-20แนวทางการตรวจสอบผลกระทบของอัตราการระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2

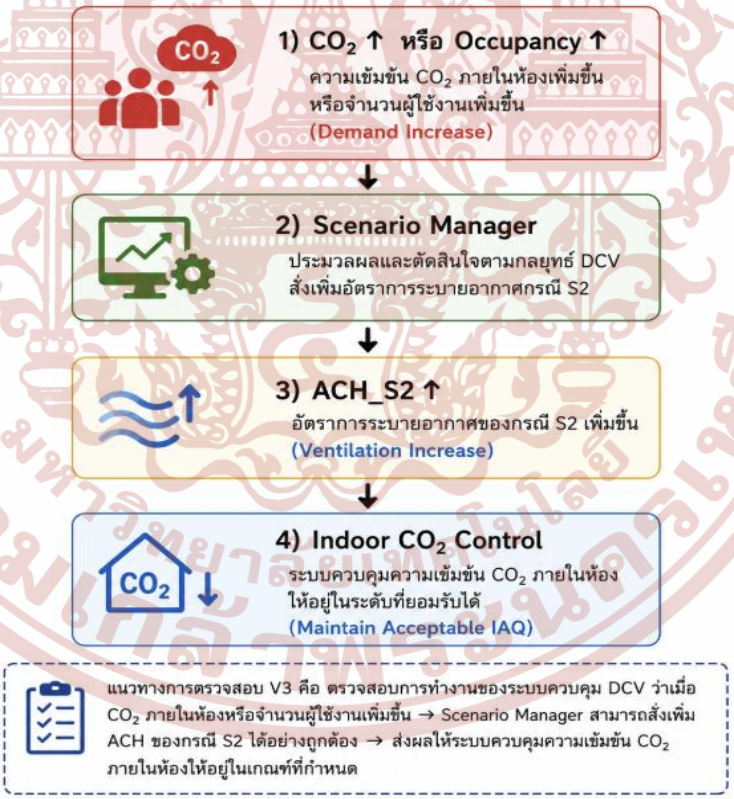
3.6.3 การตรวจสอบการตอบสนองของระบบระบายอากาศตามความต้องการ

การตรวจสอบกรณีที่สามมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินตรรกะการควบคุมของระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV)

ในงานวิจัยนี้ ระบบ DCV ถูกออกแบบให้ปรับอัตราการระบายอากาศตามระดับ CO_2 ภายในห้องและจำนวนผู้ใช้งาน โดยใช้กลไก Hysteresis Control ภายใน Scenario Manager เพื่อป้องกันการสลับสถานะของพัดลมบ่อยครั้งเกินไป

การตรวจสอบดำเนินการโดยกำหนดสถานการณ์ที่ทำให้จำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นและทำให้ความเข้มข้น CO_2 สูงขึ้น จากนั้นตรวจสอบการตอบสนองของระบบว่ามีการเพิ่มอัตราการระบายอากาศจากระดับต่ำไปสู่ระดับสูงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ แบบจำลองจะถือว่าผ่านการตรวจสอบ หากระบบสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศเมื่อ CO_2 หรือจำนวนผู้ใช้งานสูงขึ้น และสามารถลดอัตราการระบายอากาศกลับสู่ระดับปกติเมื่อภาระการใช้งานลดลง

แนวทางการตรวจสอบทั้งสามกรณีดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง ก่อนนำไปวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของระบบระบายอากาศ S0, S1 และ S2 ในบทที่ 4 ต่อไป



ภาพที่ 3-21 แนวทางการตรวจสอบการตอบสนองของระบบระบายอากาศตามความต้องการ

3.7 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

ภายหลังจากการพัฒนาแบบจำลองหลัก การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลองและการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์แล้ว งานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในกรณีศึกษาเพิ่มเติม โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศและคุณภาพอากาศภายนอกจริงเพื่อประเมินศักยภาพของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 เมื่อทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้สภาวะการใช้งานในช่วงเวลาต่อเนื่อง ทั้งนี้กรณีศึกษาดังกล่าวเป็นการประยุกต์ใช้เพิ่มเติมจากแบบจำลองหลัก และมีรายละเอียดของวัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการและตัวชี้วัดการประเมินผล ดังอธิบายในหัวข้อต่อไป

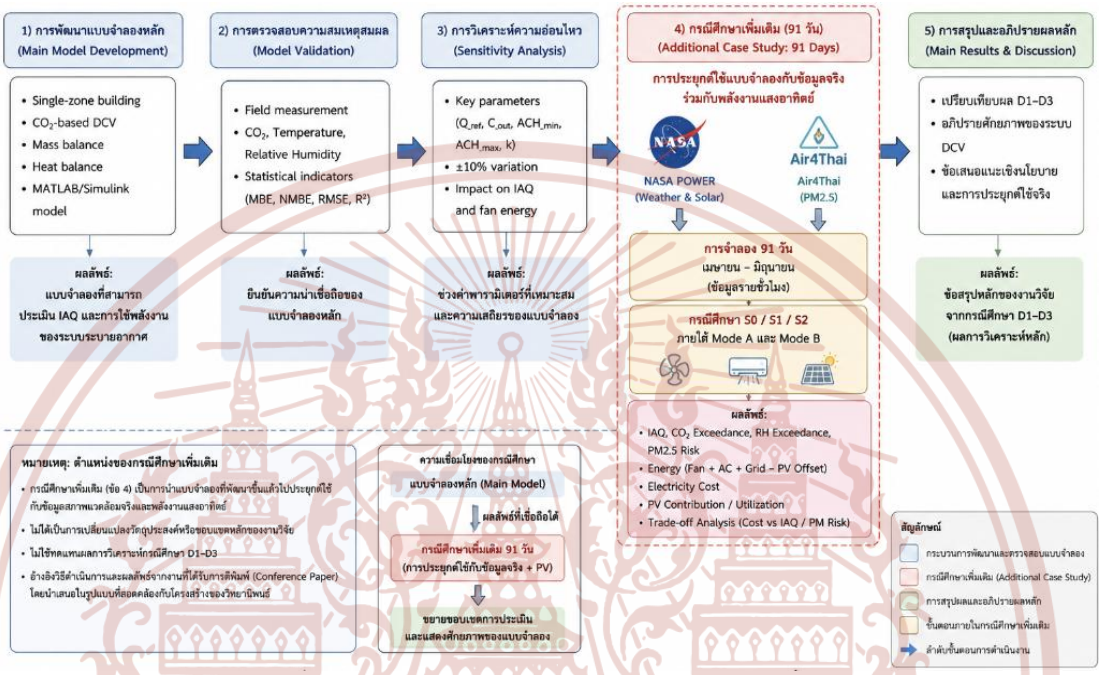
3.7.1 วัตถุประสงค์ของกรณีศึกษาเพิ่มเติม

ภายหลังจากการพัฒนาแบบจำลองหลัก การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้า งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการกรณีศึกษาเพิ่มเติม (Additional Case Study) เพื่อแสดงศักยภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงภายใต้ช่วงเวลาต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและรังสีดวงอาทิตย์จากฐานข้อมูล NASA POWER ร่วมกับข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอกจาก Air4Thai สำหรับช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน รวมระยะเวลา 91 วัน และประเมินการทำงานร่วมกันระหว่างระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีศึกษาดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของแบบจำลองในการรองรับข้อมูลภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-Series Data) รวมถึงประเมินผลกระทบของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบระบายอากาศ ต้นทุนการใช้พลังงาน และคุณภาพอากาศภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้น ทั้งนี้กรณีศึกษาเพิ่มเติมดังกล่าว ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงวัตถุประสงค์หรือขอบเขตหลักของงานวิจัย และไม่ได้ใช้ทดแทนผลการวิเคราะห์กรณีศึกษา D1–D3 ที่นำเสนอในบทที่ 4 ซึ่งยังคงเป็นผลการประเมินหลักของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยกรณีศึกษา 91 วันนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองกับข้อมูลภายนอกจริงและการวิเคราะห์ด้านพลังงานในมิติที่กว้างขึ้นเท่านั้น

นอกจากนี้ วิธีดำเนินการ พารามิเตอร์ และเงื่อนไขการจำลองของกรณีศึกษาเพิ่มเติมนี้ อ้างอิงจากผลการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์ในบทความวิชาการของผู้วิจัย ซึ่งใช้แบบจำลองระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในการประเมินสมรรถนะ

ด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน ภายใต้ข้อมูลสภาพอากาศจริงเป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 91 วัน



ภาพที่ 3-22 ภาพรวมสรุปของ Additional Case Study ในโครงสร้างงานวิจัย

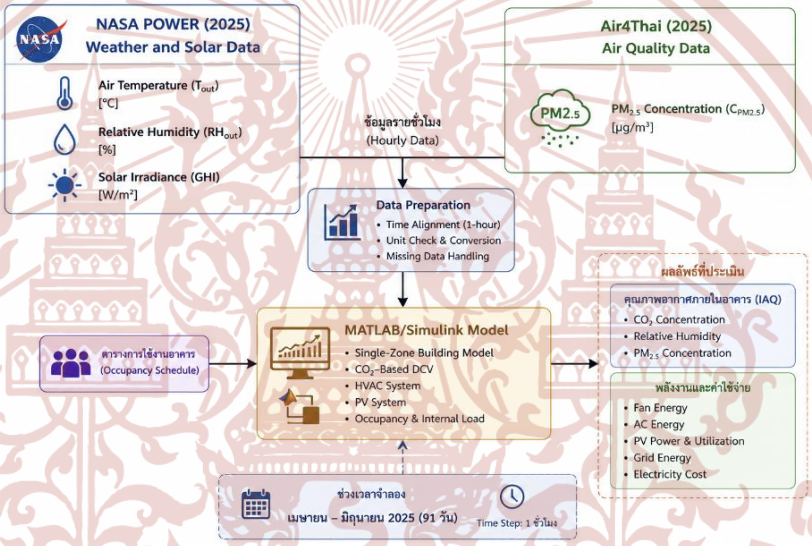
3.7.2 ข้อมูลภายนอกและช่วงเวลาจำลอง

กรณีศึกษาเพิ่มเติมนี้ใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกจริงในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน (3 เดือน) รวมระยะเวลา 91 วัน โดยจัดเตรียมข้อมูลในรูปแบบอนุกรมเวลา (Time-Series Data) เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองใน MATLAB/Simulink ข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและรังสีดวงอาทิตย์จากฐานข้อมูล NASA POWER และข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($PM_{2.5}$) จากระบบ Air4Thai ซึ่งใช้แทนข้อมูลจากเซนเซอร์ภายนอกในการจำลองสภาวะการทำงานของระบบ

ข้อมูลจาก NASA POWER ประกอบด้วยอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และรังสีดวงอาทิตย์ ส่วนข้อมูลจาก Air4Thai ประกอบด้วยค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ โดยข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บในรูปแบบรายชั่วโมงและแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำเข้าสู่แบบจำลองเพื่อใช้ในการจำลองตลอดช่วงเวลา 91 วันได้อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 3-6 ข้อมูลภายนอกที่ใช้ในการจำลอง

แหล่งข้อมูล	ตัวแปร	หน่วย	วัตถุประสงค์
NASA POWER	Air Temperature	°C	ข้อมูลสภาพอากาศภายนอก
NASA POWER	Relative Humidity	%	ใช้คำนวณความชื้นภายใน
NASA POWER	Solar Irradiance	W/m^2	คำนวณกำลังผลิตไฟฟ้าจาก PV
Air4Thai	$PM_{2.5}$	$\mu g/m^3$	ข้อมูลคุณภาพอากาศภายนอก



ภาพที่ 3-23 โครงสร้างการใช้ข้อมูลภายนอกและการเชื่อมโยงเข้าสู่แบบจำลองสำหรับกรณีศึกษา

3.7.3 รูปแบบการจำลอง S0/S1/S2 ภายใต้ Mode A และ Mode B

เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน กรณีศึกษาเพิ่มเติมนี้ได้กำหนดรูปแบบการจำลองทั้งหมด 6 กรณี โดยพิจารณาจาก 3 กลยุทธ์การระบายอากาศ ได้แก่ S0 (Natural Ventilation), S1 (Fixed Mechanical Ventilation) และ S2 (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์) ภายใต้เงื่อนไขการเดินระบบปรับอากาศ 2 รูปแบบ คือ Mode A และ Mode B

Mode A และ Mode B มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของรูปแบบการเดินระบบปรับอากาศต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน โดย Mode A กำหนดให้ระบบปรับอากาศทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ส่วน Mode B กำหนดให้ระบบปรับอากาศและระบบระบายอากาศทำงานเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานอาคาร ทั้งนี้ Mode A และ Mode B เป็นเพียงเงื่อนไขการเดินระบบที่ใช้ในการประเมินแบบจำลอง และ ไม่ได้เป็นกลยุทธ์การระบายอากาศรูปแบบใหม่

ตารางที่ 3-7 รูปแบบการจำลองของกรณีศึกษาเพิ่มเติม

กรณี	Mode A	Mode B
S0	ระบบปรับอากาศทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ร่วมกับการระบายอากาศตามธรรมชาติ	ระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน ร่วมกับการระบายอากาศตามธรรมชาติ
S1	ระบบปรับอากาศทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ร่วมกับพัดลมระบายอากาศอัตราคงที่	ระบบปรับอากาศและพัดลมระบายอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน
S2	ระบบปรับอากาศทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ร่วมกับระบบ DCV และพลังงานแสงอาทิตย์	ระบบปรับอากาศและระบบ DCV ทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่าย

จากรูปแบบการจำลองดังกล่าว หัวข้อต่อไปจะอธิบายแบบจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ในการประเมินการสนับสนุนพลังงานของกรณีศึกษา S2 ตลอดช่วงเวลาจำลอง 91 วัน

3.7.4 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีศึกษาเพิ่มเติมถูกนำมาใช้เพื่อประเมินศักยภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับสนับสนุนการทำงานของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (DCV) โดยใช้ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์รายชั่วโมงจากฐานข้อมูล NASA POWER เป็นข้อมูลนำเข้าในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาคำนวณจากค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ กำลังติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพรวมของระบบ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่

$$P_{PV}(t) = P_{rated} \times \frac{G(t)}{1000} \times \eta_{sys} \qquad (3\text{-}9)$$

โดยที่

$P_{PV}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลา t(W)

P_{rated} คือ กำลังติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)

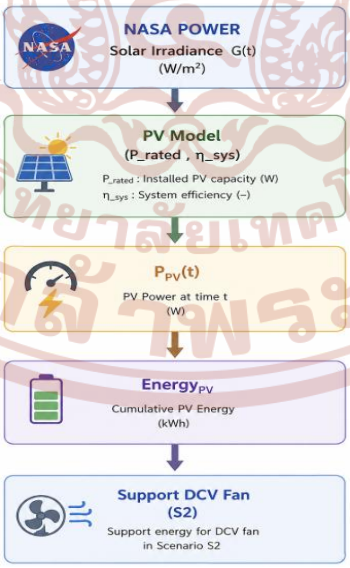
$G(t)$ คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ณ เวลา t(W/m²)

η_{sys} คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

กำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้ในแต่ละชั่วโมงถูกนำไปใช้ในการประเมินพลังงานไฟฟ้าที่สามารถสนับสนุนการทำงานของระบบระบายอากาศในกรณีศึกษา S2 ตลอดช่วงเวลาจำลอง 91 วัน

ตารางที่ 3-8 พารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ประเภทแผง	Monocrystalline PV	-
กำลังติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{rated})	150	W
ประสิทธิภาพรวมของระบบ (η_{sys})	75	%
Temperature coefficient	-0.35	%/°C
NOCT	45	°C
Time step	1	h
แหล่งข้อมูล Solar Irradiance	NASA POWER	-



ภาพที่ 3-24 โครงสร้างแบบจำลองกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับกรณี S2

3.7.5 แบบจำลองพลังงานรวมและค่าใช้จ่าย

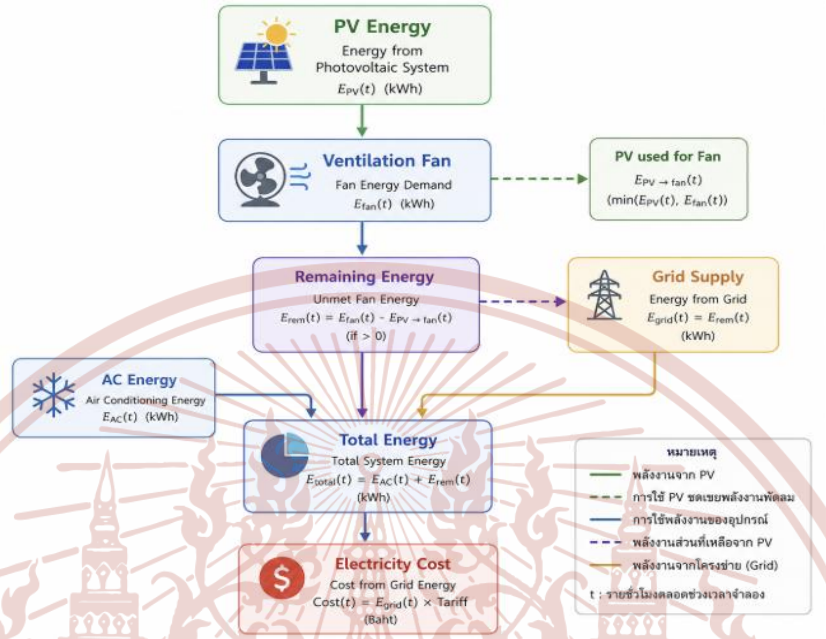
การประเมินด้านพลังงานของกรณีศึกษาเพิ่มเติมพิจารณาพลังงานรวมของระบบที่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศและการปรับอากาศ ประกอบด้วยการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ ระบบปรับอากาศ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่รับจากโครงข่าย (Grid) โดยคำนวณแบบรายชั่วโมงตลอดช่วงเวลาจำลอง 91 วัน หรือ 3 เดือน

สำหรับกรณีศึกษา S2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ชดเชยการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศก่อน หากกำลังผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ระบบจะรับพลังงานส่วนที่เหลือจากโครงข่ายไฟฟ้า ทั้งนี้ พลังงานส่วนเกินจากเซลล์แสงอาทิตย์นำไปกักเก็บหรือส่งกลับเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบคำนวณจากผลรวมของการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศและระบบปรับอากาศ ภายหลังหักพลังงานที่ได้รับจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยต้นทุนค่าไฟฟ้าคำนวณจากพลังงานไฟฟ้าที่รับจากโครงข่ายคูณด้วยอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนดในการศึกษา

ตารางที่ 3-9 องค์ประกอบของพลังงานที่ใช้ในการประเมิน

องค์ประกอบ	รายละเอียด
Fan Energy	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยพัดลมระบายอากาศ
AC Energy	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยระบบปรับอากาศ
PV Energy	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์
Grid Energy	พลังงานไฟฟ้าที่รับจากโครงข่ายหลังหัก PV
Total Energy	พลังงานรวมของระบบ
Electricity Cost	ค่าใช้จ่ายจากการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่าย



ภาพที่ 3-25 แผนผังการไหลของพลังงานและการคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับกรณีศึกษา S2

3.7.6 ตัวชี้วัดของกรณีศึกษาเพิ่มเติม

เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบในกรณีศึกษาเพิ่มเติม ได้กำหนดตัวชี้วัด (Key Performance Indicators: KPIs) ครอบคลุมทั้งด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร การใช้พลังงาน การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ และต้นทุนการใช้พลังงาน โดยตัวชี้วัดทั้งหมดคำนวณจากผลการจำลองรายชั่วโมงตลอดช่วงเวลา 91 วัน และนำมาวิเคราะห์ในระดับรายวัน รายเดือน และตลอดช่วงเวลาการศึกษา

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) การใช้พลังงานของระบบ (Energy Performance) การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Performance) และต้นทุนการใช้พลังงาน (Economic Performance)

ตารางที่ 3-10 ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินกรณีศึกษาเพิ่มเติม

หมวดการประเมิน	รายละเอียด
Indoor Air Quality (IAQ)	ความเข้มข้น CO_2, ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์, ความชื้นสัมพัทธ์, ชั่วโมงที่ RH เกินเกณฑ์, ความเข้มข้น $PM_{2.5}$, ค่าเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่มีผู้ใช้งาน
Energy Performance	พลังงานพัดลม, พลังงานระบบปรับอากาศ, พลังงานจากโครงข่าย, พลังงานรวมของระบบ, พลังงานรายวันและรายเดือน
PV Performance	พลังงานที่ผลิตได้จาก PV, พลังงานที่นำไปใช้, สัดส่วนการใช้ประโยชน์จาก PV (PV Utilization)

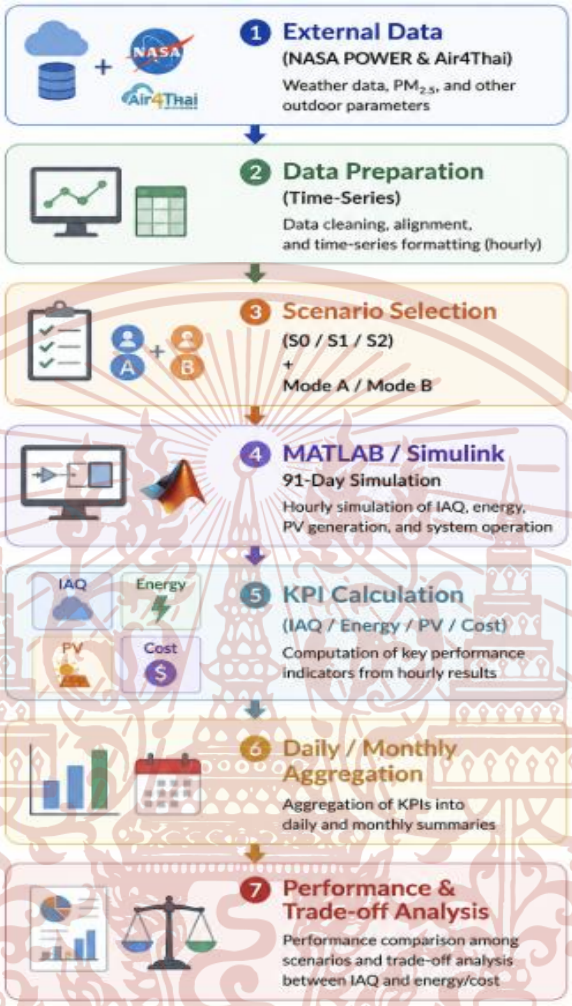
ตารางที่ 3-10 (ต่อ)

หมวดการประเมิน	รายละเอียด
Economic Performance	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน, การลดค่าใช้จ่ายจากการใช้ PV และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับคุณภาพอากาศ

3.7.7 ขั้นตอนการจำลองและการประมวลผลผลลัพธ์

การจำลองกรณีศึกษาเพิ่มเติมดำเนินการโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศและคุณภาพอากาศภายนอกในรูปแบบข้อมูลอนุกรมเวลา (Time-Series Data) เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง MATLAB/Simulink ตลอดช่วงเวลาจำลอง 91 วัน โดยเริ่มจากการเตรียมข้อมูลภายนอก การกำหนดกรณีศึกษาและเงื่อนไขการเดินระบบ จากนั้นจึงดำเนินการจำลองเพื่อคำนวณตัวแปรด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร การใช้พลังงานของระบบ และพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา

ผลลัพธ์จากการจำลองรายชั่วโมงถูกนำมาประมวลผลเพื่อคำนวณตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศ การใช้พลังงาน การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ และค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ก่อนสรุปผลในรูปแบบรายวัน รายเดือน และตลอดช่วงเวลาการศึกษา เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละกรณีศึกษา รวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารกับการใช้พลังงานของระบบ ลำดับขั้นตอนของการจำลองและการประมวลผลผลลัพธ์ของกรณีศึกษาเพิ่มเติมแสดงดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-26 ขั้นตอนการจำลองและการประมวลผลผลลัพธ์ของกรณีศึกษาเพิ่มเติม

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

บทนี้นำเสนอผลการพัฒนาและการประเมินสมรรถนะของแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กแบบโซนเดียว ซึ่งได้พัฒนาขึ้นตามระเบียบวิธีวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยผลการศึกษาประกอบด้วยการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองกับหลักการทางทฤษฎีและงานวิจัยอ้างอิง การวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบภายใต้กรณีศึกษาต่าง ๆ รวมถึงการประเมินสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน

การนำเสนอผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Validation) เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องได้อย่างสมเหตุสมผล (2) การประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศในกรณีศึกษา S0, S1 และ S2 ภายใต้รูปแบบการใช้งานห้องที่แตกต่างกัน (3) การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ และ (4) กรณีศึกษาเพิ่มเติม เพื่อสนับสนุนความน่าเชื่อถือของผลการศึกษาและการประยุกต์ใช้แบบจำลองในงานออกแบบระบบระบายอากาศตามความต้องการ

4.1 การตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Validation)

ก่อนนำแบบจำลองไปใช้ประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศ จำเป็นต้องตรวจสอบความสอดคล้องของพฤติกรรมแบบจำลองกับหลักการทางทฤษฎีและผลการศึกษาที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองสามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องได้อย่างสมเหตุสมผล

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการจำลองกับหลักสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Mass Balance Theory) รวมถึงแนวโน้มที่รายงานในงานวิจัยของ Persily and de Jonge (2017) และ Ahn et al. (2022)

การตรวจสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

(1) ผลของจำนวนผู้ใช้งานต่อการสะสม CO_2 ภายในห้อง

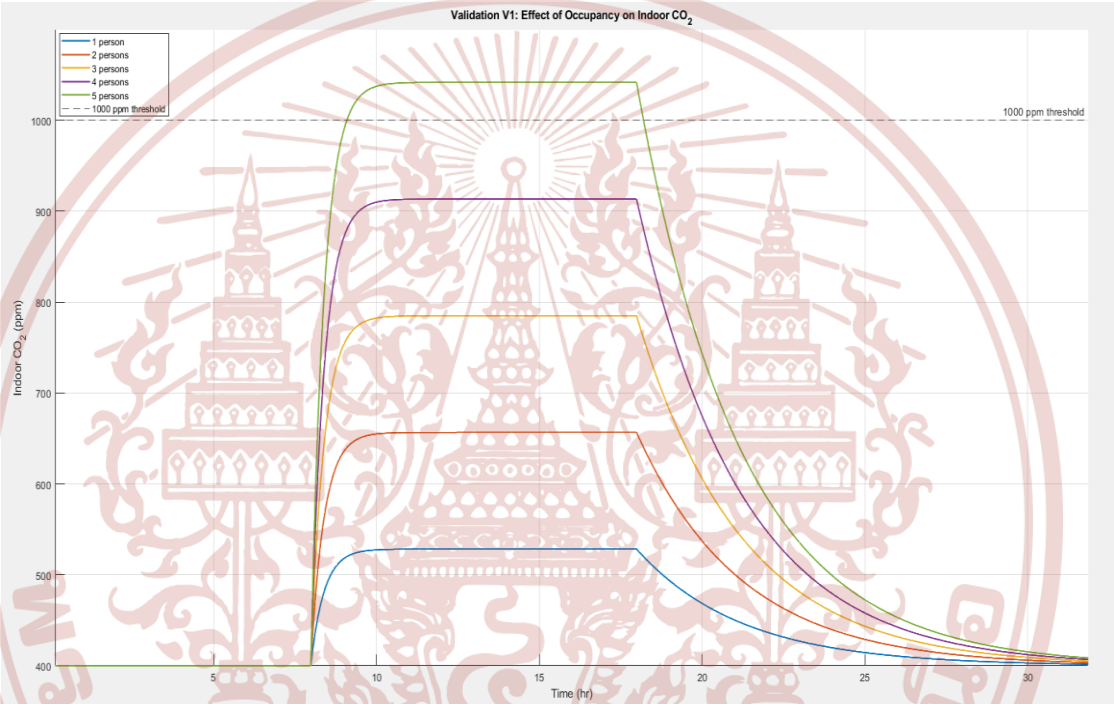
(2) ผลของอัตราการระบายอากาศต่อการลดความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

(3) การตอบสนองของระบบ DCV ต่อความเข้มข้น CO_2

โดยผลการตรวจสอบดังกล่าวจะช่วยยืนยันว่าแบบจำลองสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศได้อย่างถูกต้องก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบ DCV ต่อไป

4.1.1 ผลของจำนวนผู้ใช้งานต่อการสะสม CO_2

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนแรกดำเนินการโดยศึกษาผลของจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องต่อการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกำหนดจำนวนผู้ใช้งานตั้งแต่ 1–5 คน ภายใต้เงื่อนไขการระบายอากาศคงที่ เพื่อพิจารณาว่าแบบจำลองสามารถตอบสนองต่ออัตราการเกิด CO_2จากผู้ใช้งานได้สอดคล้องกับหลักสมดุลมวลหรือไม่

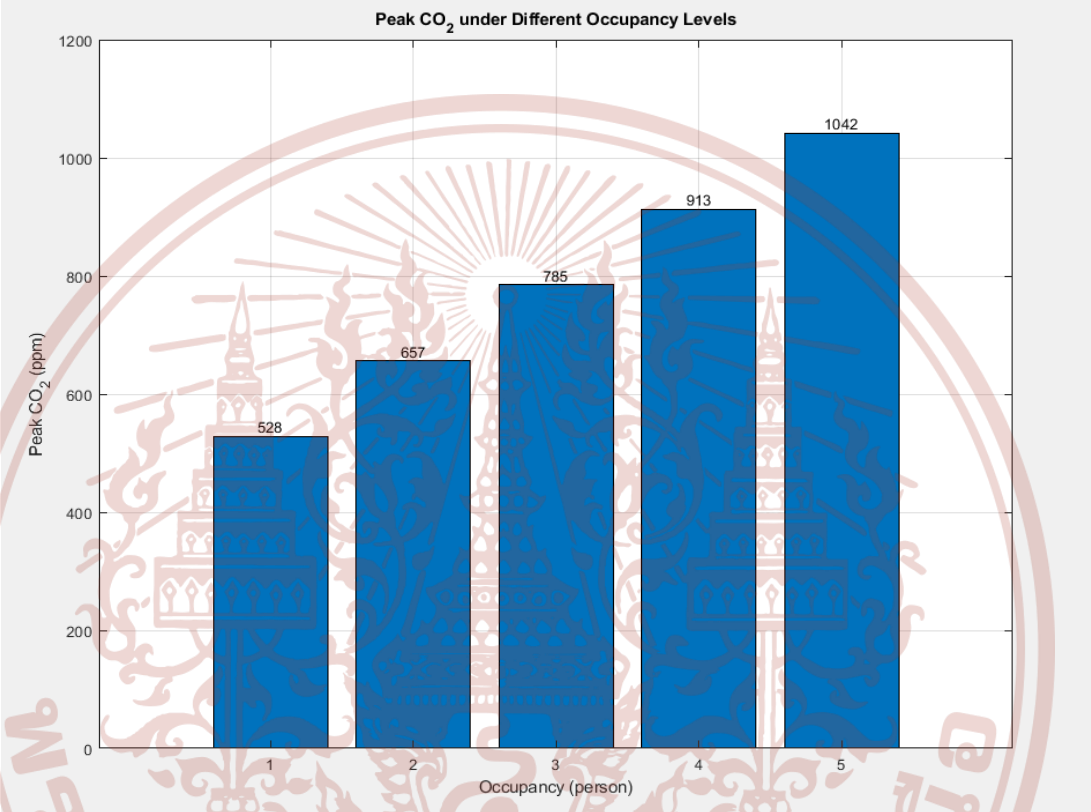


ภาพที่ 4-1 ผลของจำนวนผู้ใช้งานต่อความเข้มข้น CO_2

ตารางที่ 4-1 แสดงผล Peak CO_2 และ Average CO_2 ภายใต้จำนวนผู้ใช้งานที่แตกต่างกัน

Occupancy (person)	Peak CO_2 (ppm)	Average CO_2 (ppm)
1	528.36	467.50
2	656.72	534.99
3	785.08	602.49
4	913.43	669.98
5	1041.79	737.47

ผลการจำลองดังแสดงในภาพที่ 4-1 พบว่า ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น โดยกรณีผู้ใช้งาน 1 คน ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 528 ppm ขณะที่กรณีผู้ใช้งาน 5 คน ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 1042 ppm



ภาพที่ 4-2 Bar Chart Peak CO_2 ต่อจำนวนคน

จากภาพที่ 4-2 และตารางที่ 4-1 พบว่า ค่า Peak CO_2 เพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานอย่างชัดเจน โดยมีค่าเพิ่มจาก 528 ppm เป็น 1042 ppm หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 97.3% เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มจาก 1 คนเป็น 5 คน

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของสมดุลมวล CO_2 ซึ่งระบุว่าอัตราการสะสมของ CO_2 ภายในห้องขึ้นอยู่กับอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศของห้อง เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อัตราการเกิด CO_2 จะเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องเพิ่มสูงขึ้นหากอัตราการระบายอากาศคงที่

แนวโน้มที่ได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Persily and de Jonge (2017) ซึ่งรายงานว่าปริมาณการปล่อย CO_2 จากผู้ใช้งานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ahn et al. (2022) ที่แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานภายใต้หลักสมดุลมวล

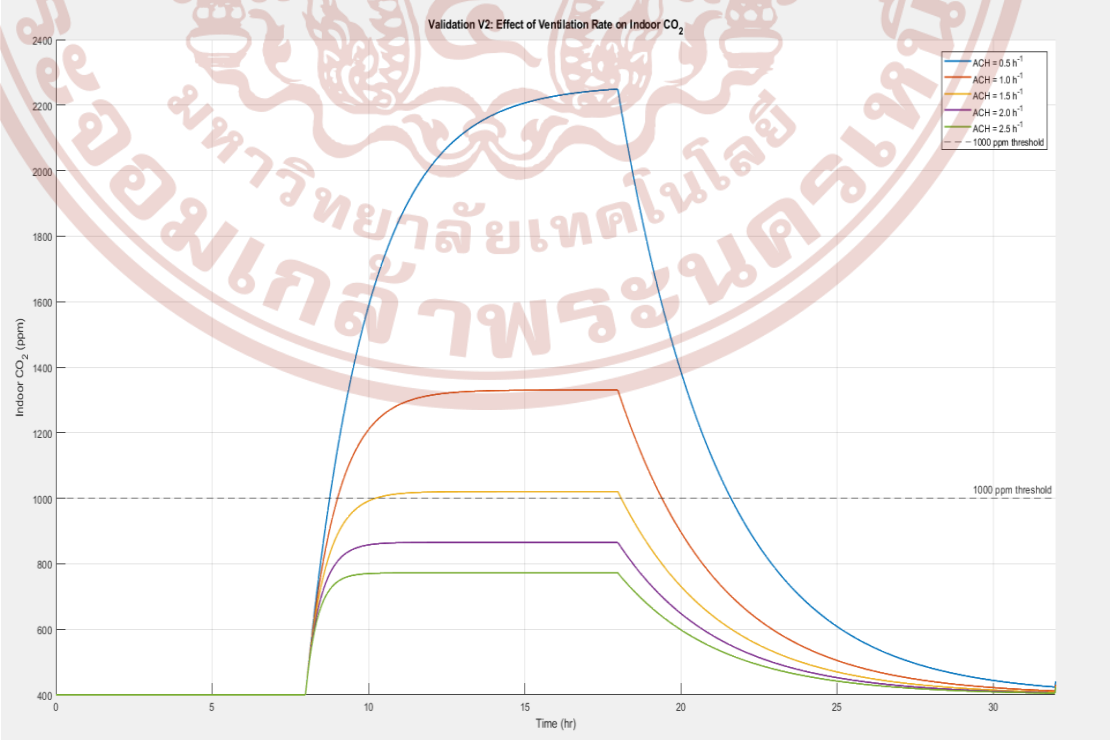
ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานได้อย่างสมเหตุสมผล และมีความสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยอ้างอิง จึงมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการในขั้นตอนต่อไป

4.1.2 ผลของอัตราการระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนที่สองดำเนินการโดยศึกษาผลของอัตราการระบายอากาศต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง โดยกำหนดจำนวนผู้ใช้งานให้คงที่เท่ากับ 3 คน และเปลี่ยนค่าอัตราการระบายอากาศในรูปของ Air Change per Hour (ACH) จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 h^{-1}

การกำหนดจำนวนผู้ใช้งานคงที่เท่ากับ 3 คน มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานให้คงที่ และแยกพิจารณาผลกระทบของอัตราการระบายอากาศเพียงตัวแปรเดียว วิธีดังกล่าวช่วยให้สามารถตรวจสอบพฤติกรรมของแบบจำลองได้อย่างชัดเจนว่า เมื่ออัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มลดลงตามหลักสมดุลมวลหรือไม่

ผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 4-3 พบว่า กรณีที่มีค่า ACH ต่ำ ความเข้มข้น CO_2ภายในห้องสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm อย่างชัดเจน โดยเฉพาะกรณี ACH เท่ากับ 0.5 h^{-1} มีค่า Peak CO_2 สูงถึง 2249.08 ppm ในขณะที่เมื่อเพิ่มค่า ACH เป็น 2.5 h^{-1} ค่า Peak CO_2 ลดลงเหลือ 772.24 ppm



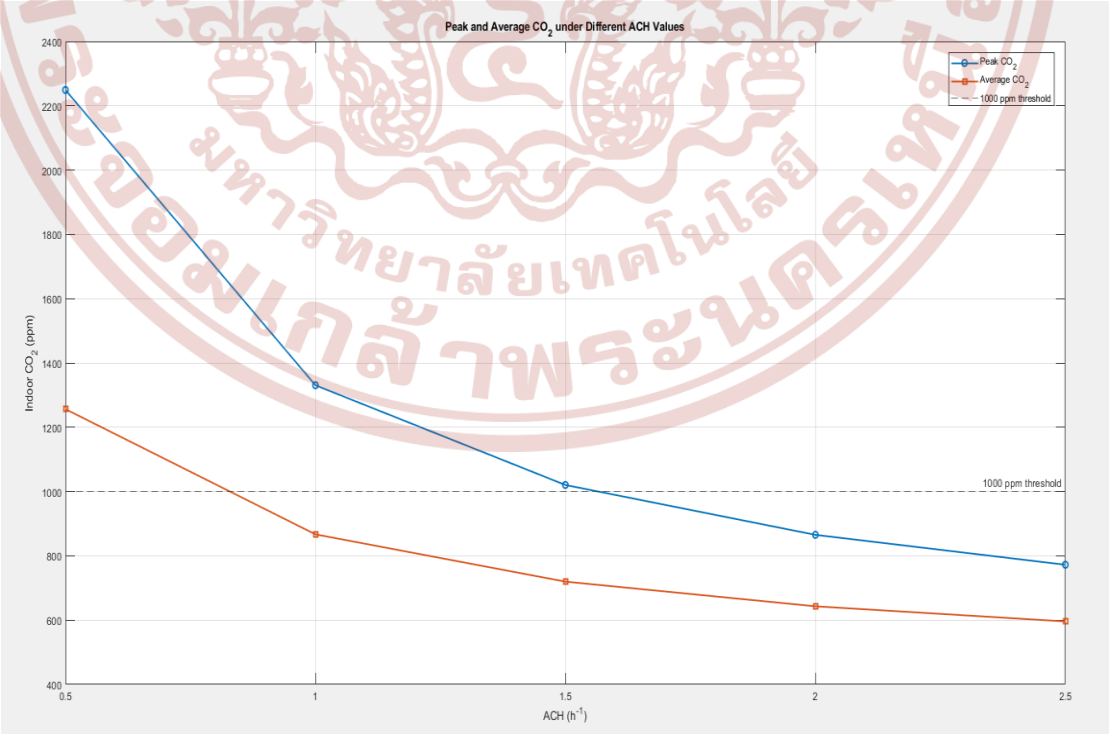
ภาพที่ 4-3 ผลของอัตราการระบายอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าความเข้มข้น CO_2 สูงสุดและค่าเฉลี่ย CO_2 ภายใต้ค่า ACH ที่แตกต่างกัน ผลการจำลองพบว่า เมื่อค่า ACH เพิ่มจาก 0.5 เป็น 2.5 h^{-1} ค่า Peak CO_2 ลดลงจาก 2249.08 ppm เหลือ 772.24 ppm หรือคิดเป็นการลดลงประมาณ 65.7% ขณะที่ค่า Average CO_2 ลดลงจาก 1256.23 ppm เหลือ 595.95 ppm หรือคิดเป็นการลดลงประมาณ 52.6%

ตารางที่ 4-2 ผลของค่า ACH ต่อความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

ACH (h^{-1})	Peak CO_2 (ppm)	Average CO_2 (ppm)
0.5	2249.08	1256.23
1.0	1330.56	866.81
1.5	1020.40	719.75
2.0	865.30	643.01
2.5	772.24	595.95

จากภาพที่ 4-4 จะเห็นได้ว่า ค่า Peak CO_2 และ Average CO_2 ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อค่า ACH เพิ่มขึ้น โดยกรณี ACH เท่ากับ 1.5 h^{-1} ค่า Peak CO_2 ยังสูงกว่าเกณฑ์ 1000 ppm เล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มค่า ACH เป็น 2.0 h^{-1} และ 2.5 h^{-1} ค่า Peak CO_2 สามารถลดลงต่ำกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm ได้



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ACH กับค่า Peak CO_2 และ Average CO_2

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับหลักการของแบบจำลองสมดุลมวล CO_2 ซึ่งระบุว่า อัตราการระบายอากาศเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลดความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง เมื่อค่า ACH เพิ่มขึ้น อัตราการนำอากาศภายนอกเข้ามาแทนที่อากาศภายในห้องเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CO_2 ที่สะสมภายในห้องถูกเจือจางและระบายออกได้มากขึ้น

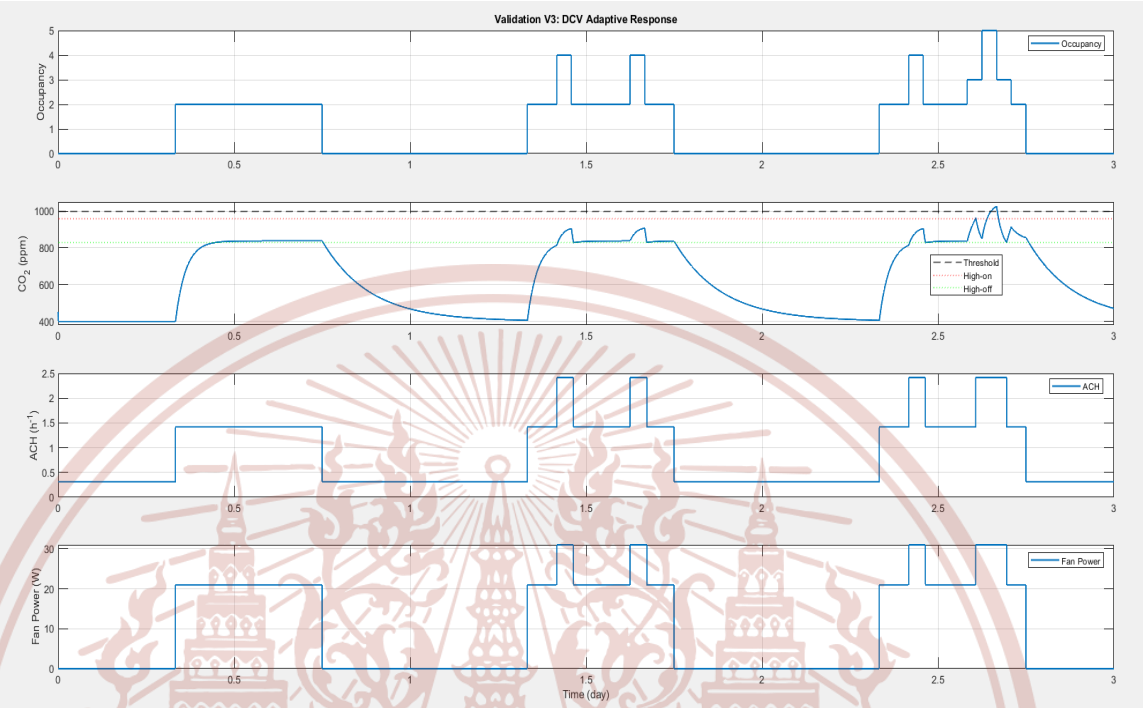
แนวโน้มดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahn et al. (2022) ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องด้วยหลักสมดุลมวล โดยแสดงให้เห็นว่าอัตราการระบายอากาศที่สูงขึ้นช่วยลดการสะสมของ CO_2 ภายในพื้นที่ปิดได้อย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการระบายอากาศได้อย่างสมเหตุสมผล และสามารถแสดงพฤติกรรมพื้นฐานของระบบระบายอากาศต่อความเข้มข้น CO_2 ได้ถูกต้องตามหลักทางวิศวกรรม

4.1.3 การตอบสนองของระบบ DCV ต่อความเข้มข้น CO_2

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนที่สามเป็นการตรวจสอบพฤติกรรมการตอบสนองของระบบระบายอากาศตามความต้องการ หรือ Demand-Controlled Ventilation (DCV) ที่ควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองสามารถปรับอัตราการระบายอากาศให้สอดคล้องกับจำนวนผู้ใช้งานและระดับ CO_2 ภายในห้องได้อย่างสมเหตุสมผลหรือไม่

การจำลองในหัวข้อนี้ใช้เงื่อนไขการใช้งานห้องตามกรณี D1, D2 และ D3 ที่กำหนดไว้ในขอบเขตงานวิจัย โดยใช้ระบบระบายอากาศแบบ S2 ซึ่งเป็นระบบ CO_2-Based DCV แบบพัดลมสองระดับความเร็ว ได้แก่ Low speed และ High speed ระบบจะทำงานที่ Low speed เมื่อมีผู้ใช้งานภายในห้อง และจะเปลี่ยนเป็น High speed เมื่อความเข้มข้น CO_2 เข้าใกล้ค่ากำหนด หรือเมื่อมีจำนวนผู้ใช้งานสูงตามเงื่อนไขที่กำหนดในแบบจำลอง

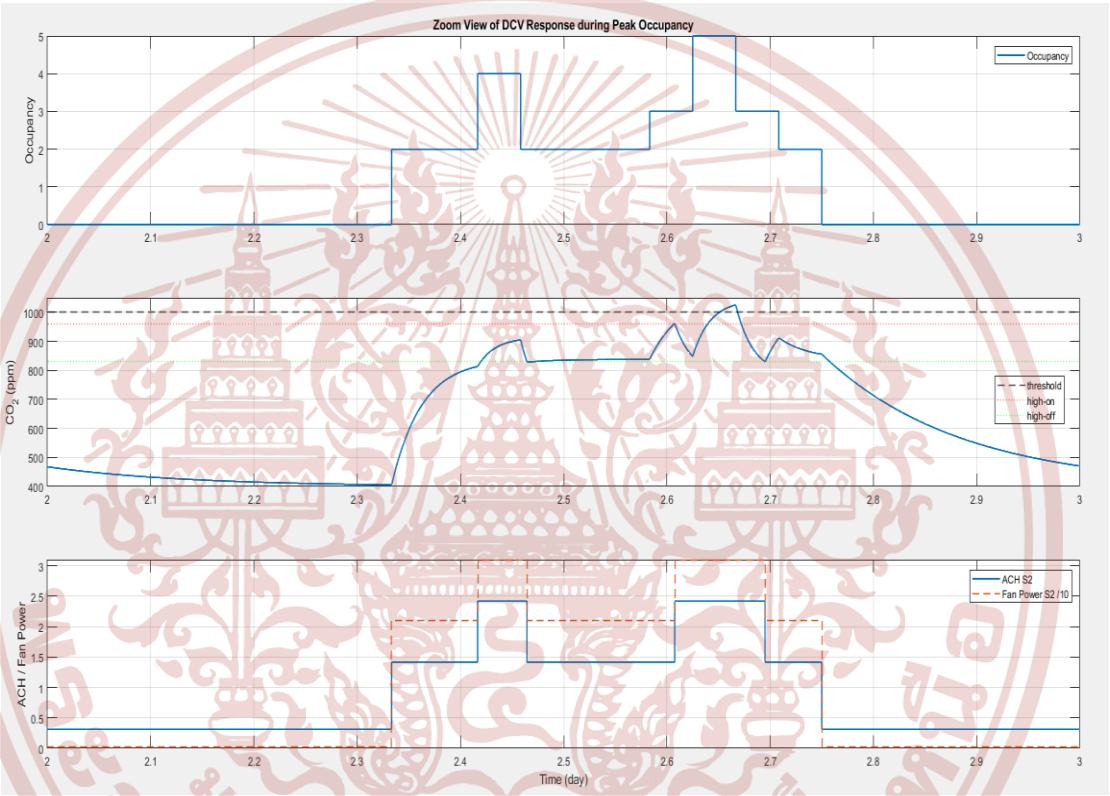


ภาพที่ 4-5 การตอบสนองของระบบ DCV ต่อจำนวนผู้ใช้งานและความเข้มข้น CO_2 ตลอดช่วงเวลาจำลอง 3 วัน

ภาพที่ 4-5 แสดงผลการตอบสนองของระบบ DCV ตลอดช่วงเวลาจำลอง 3 วัน โดยแสดงจำนวนผู้ใช้งาน ความเข้มข้น CO_2 อัตราการระบายอากาศ และกำลังไฟฟ้าของพัดลมในระบบ S2 จากผลการจำลองพบว่า ในช่วงที่ไม่มีผู้ใช้งานภายในห้อง ระบบจะหยุดการทำงานของพัดลม และคงเหลือเฉพาะอัตราการรั่วซึมหรือการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานของห้องเท่านั้น ทำให้ค่า ACH อยู่ที่ประมาณ 0.31 h^{-1}

เมื่อเริ่มมีผู้ใช้งานภายในห้อง ระบบ DCV จะเปิดพัดลมที่ Low speed ส่งผลให้ค่า ACH เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 1.42 h^{-1} และใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 21 W ในช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรือ CO_2 เข้าใกล้ระดับควบคุม ระบบจะเปลี่ยนเป็น High speed โดยค่า ACH เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2.42 h^{-1} และใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 31 W พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถปรับอัตราการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานห้องได้ตามหลักการของระบบ DCV

ภาพที่ 4-6 แสดงภาพขยายของการตอบสนองของระบบ DCV ในวันที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด หรือกรณี D3 ซึ่งเป็นช่วงที่มีผู้ใช้งานสูงสุด 5 คน จากผลการจำลองพบว่า เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อระบบตรวจพบเงื่อนไขที่กำหนด ระบบจะปรับอัตราการระบายอากาศจาก Low speed เป็น High speed เพื่อลดการสะสมของ CO_2 ภายในห้อง



ภาพที่ 4-6 ภาพขยายการตอบสนองของระบบ DCV ในช่วงวันที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด

อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่มีผู้ใช้งานสูงสุด ความเข้มข้น CO_2 มีค่าสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm เล็กน้อย โดยมีค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1025.38 ppm การเกิดค่าเกินดังกล่าวเป็นลักษณะของการตอบสนองแบบชั่วคราว เนื่องจากในช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อัตราการเกิด CO_2 ภายในห้องเพิ่มขึ้นทันที ขณะที่ระบบระบายอากาศต้องใช้ระยะเวลาในการลดความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องลงตามข้อจำกัดของอัตราการไหลของพัดลมและปริมาตรห้อง

ตารางที่ 4-3 แสดงสรุปค่าดัชนีสำคัญของระบบ S2 จากผลการจำลอง พบว่าค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1025.38 ppm ค่า Average CO_2 เท่ากับ 631.79 ppm ชั่วโมงที่ CO_2 สูงกว่า 1000 ppm เท่ากับ 0.4167 ชั่วโมง หรือประมาณ 25 นาที ขณะที่ระยะเวลาที่ระบบทำงานในระดับ High speed เท่ากับ 5.55 ชั่วโมง และการใช้พลังงานของพัดลมในระบบ S2 เท่ากับ 0.6855 kWh

ตารางที่ 4-3 สรุปผลการตอบสนองของระบบ DCV ในกรณี S2

รายการ	ค่า
Peak CO_2 S2	1025.38 ppm
Average CO_2 S2	631.79 ppm
CO_2 Risk Hour S2	0.4167 hr
ACH High Hour S2	5.55 hr
Fan Energy S2	0.6855 kWh

ผลการจำลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า ระบบ DCV ที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานและระดับ CO_2 ภายในห้องได้อย่างสมเหตุสมผล โดยระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเมื่อภาระการเกิด CO_2 เพิ่มขึ้น และลดระดับการทำงานของพัดลมเมื่อความต้องการระบายอากาศลดลง

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของระบบ Demand-Controlled Ventilation ที่ใช้ CO_2 เป็นตัวแทนของภาระการใช้งานภายในอาคาร โดยระบบจะปรับปริมาณการระบายอากาศตามความต้องการจริง แทนการเปิดระบบระบายอากาศในระดับคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง S2 สามารถแสดงพฤติกรรมการควบคุมระบบระบายอากาศแบบ CO_2-Based DCV ได้ถูกต้องตามแนวคิดทางวิศวกรรม และสามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานในหัวข้อถัดไปได้

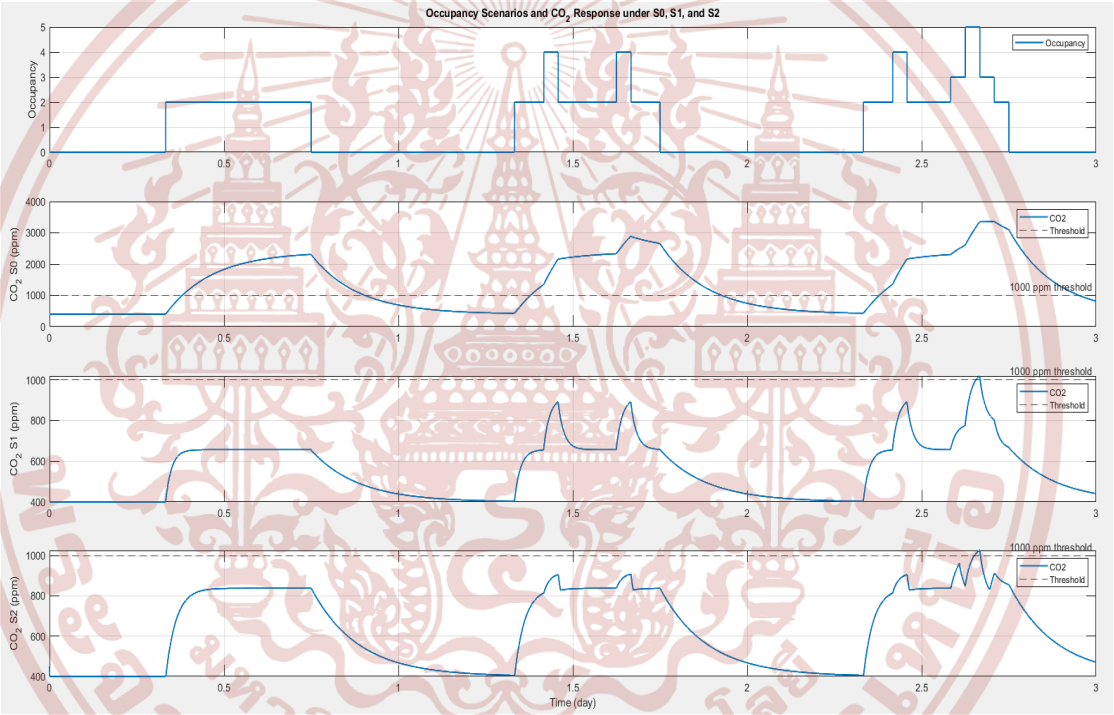
4.2 ผลของรูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 ต่อความเข้มข้น CO_2

หัวข้อนี้เป็นการประเมินผลของรูปแบบการใช้งานห้องที่แตกต่างกัน 3 กรณี ได้แก่ D1, D2 และ D3 ต่อการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง โดยพิจารณาเปรียบเทียบภายใต้ 3 กลยุทธ์การระบายอากาศ คือ S0 : Passive/Natural Infiltration, S1 : Fixed Mechanical Ventilation และ S2 : CO_2 – Based Demand-Controlled Ventilation (DCV) เพื่อแสดงให้เห็นว่าระดับการใช้งานห้องและความหนาแน่นของผู้ใช้งานส่งผลต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารอย่างไร

กรณี D1 แทนรูปแบบการใช้งานพื้นฐานของห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยมีผู้ใช้งานประจำ 2 คนตลอดช่วงเวลาทำงาน คิดเป็นภาระการใช้งานสะสม 20 person-hour กรณี D2 แทนสถานการณ์ที่มีผู้มาติดต่อเพิ่มเติมในบางช่วงเวลา ทำให้จำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเพิ่มเป็น 4 คน และมีภาระการใช้งานสะสม 24 person-hour ส่วนกรณี D3 เป็นกรณีที่มีภาระการใช้งานสูงสุด โดยมีผู้ใช้งานสูงสุด 5 คน และมีภาระการใช้งานสะสม 27 person-hour ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ภาระการใช้งานของห้องในกรณี D1–D3

Day	Peak Occupancy	Person-hour
D1	2	20
D2	4	24
D3	5	27



ภาพที่ 4-7 ผลการตอบสนองของความเข้มข้น CO_2 ภายใต้รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 สำหรับกรณี S0, S1 และ S2

จากภาพที่ 4-7 พบว่า เมื่อรูปแบบการใช้งานห้องเปลี่ยนจาก D1 ไปสู่ D2 และ D3 ซึ่งมีภาระการใช้งานสูงขึ้น ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกกลยุทธ์การระบายอากาศ แสดงให้เห็นว่าจำนวนผู้ใช้งานและระยะเวลาการใช้งานห้องเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสม CO_2 ภายในห้อง

จากผลการจำลองพบว่า ในกรณี S0 ซึ่งพึ่งพาเฉพาะการรั่วซึมอากาศพื้นฐาน ค่า CO_2 สูงกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm อย่างชัดเจนในทุกกรณีศึกษา โดยค่า Peak CO_2 เพิ่มจาก 2311.9 ppm ใน D1 เป็น 2884.5 ppm ใน D2 และสูงสุด 3362.5 ppm ใน D3 ขณะที่ค่า CO_2 risk hour อยู่ในระดับสูงเกือบตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน ได้แก่ 8.8667, 8.9000 และ 8.9167 ชั่วโมง ตามลำดับ ผล

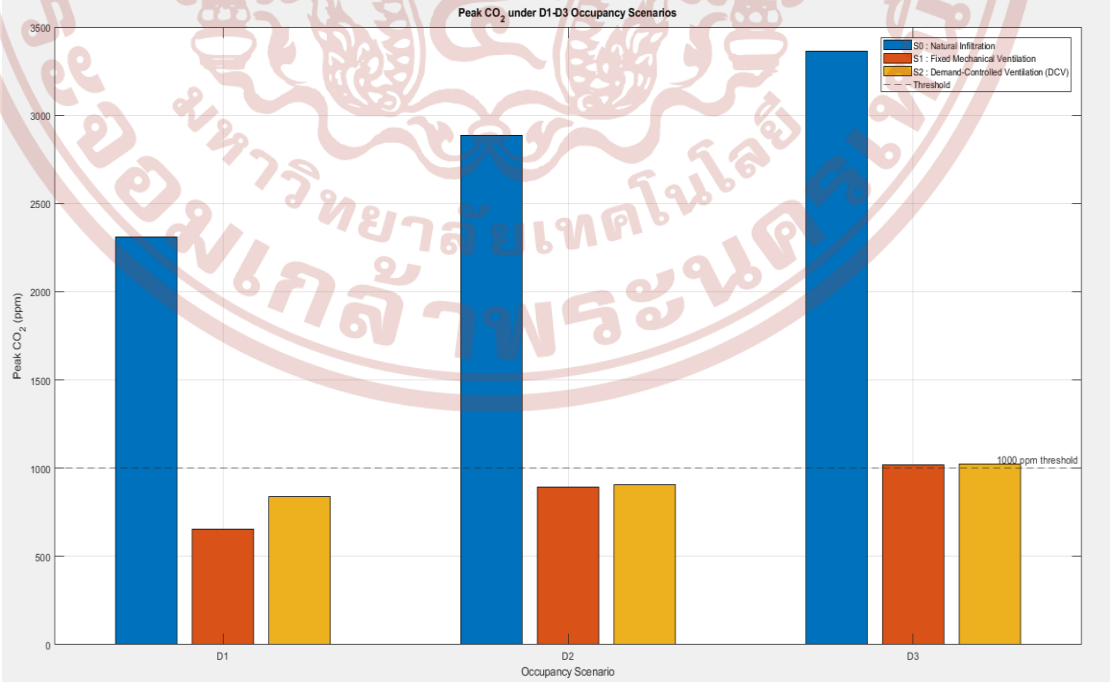
ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการระบายอากาศแบบ passive หรือตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับการควบคุมคุณภาพอากาศภายในห้องสำนักงานขนาดเล็กนี้

ในกรณี S1 ซึ่งเป็นการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ ค่า Peak CO_2 อยู่ที่ 656.72 ppm ใน D1, 891.65 ppm ใน D2 และ 1019.1 ppm ใน D3 โดย D1 และ D2 สามารถควบคุม CO_2 ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ 1000 ppm ได้ตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน ส่วน D3 มีค่า CO_2 เกินเกณฑ์เล็กน้อยเป็นเวลา 0.2833 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นกรณีที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด

สำหรับกรณี S2 ซึ่งเป็นระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ค่า Peak CO_2 เท่ากับ 837.93 ppm ใน D1, 907.02 ppm ใน D2 และ 1025.4 ppm ใน D3 โดยใน D1 และ D2 ระบบสามารถรักษาค่า CO_2 ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ 1000 ppm ได้ ส่วนใน D3 มีค่า CO_2 risk hour เท่ากับ 0.4167 ชั่วโมง หรือประมาณ 25 นาที ซึ่งเป็นผลจากการตอบสนองแบบปรับตามความต้องการของระบบ DCV ที่ไม่ได้เปิดพัดลมความเร็วสูงตลอดเวลาเหมือนกรณี S1

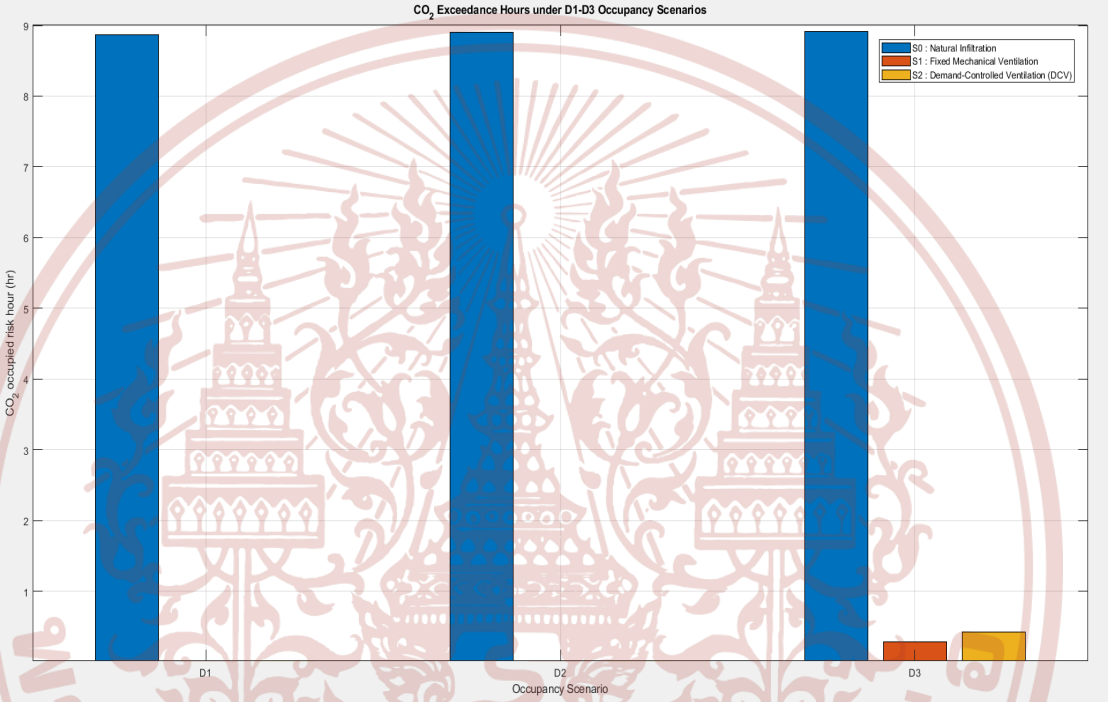
ตารางที่ 4-5 สรุปผล CO_2 ของรูปแบบการใช้งาน D1–D3 ภายใต้กลยุทธ์ S0, S1 และ S2

Day	Peak CO_2 S0	Peak CO_2 S1	Peak CO_2 S2	AVG CO_2 S0	AVG CO_2 S1	AVG CO_2 S2	Risk hr S0	Risk hr S1	Risk hr S2
D1	2311.9	656.72	837.93	1787.7	646.52	807.02	8.8667	0	0
D2	2884.5	891.65	907.02	2083.9	697.93	817.31	8.9000	0	0
D3	3362.5	1019.1	1025.4	2242.8	736.01	841.84	8.9167	0.2833	0.4167



ภาพที่ 4-8 ค่า Peak CO_2 ภายใต้รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 สำหรับ S0, S1 และ S2

จากภาพที่ 4-8 ค่า Peak CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับภาระการใช้งานห้อง โดย D3 ให้ค่าสูงสุดในทุกกลยุทธ์การระบายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลยุทธ์ พบว่า S0 ให้ค่า CO_2 สูงที่สุดอย่างชัดเจน ขณะที่ S1 และ S2 สามารถลดระดับ CO_2 ได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะใน D1 และ D2 ซึ่งสามารถควบคุม CO_2 ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ 1000 ppm ได้



ภาพที่ 4-9 ชั่วโมงที่ CO_2 เกิน 1000 ppm ในเวลาที่มีผู้ใช้งานภายใต้รูปแบบการใช้งาน D1–D3

จากภาพที่ 4-9 พบว่า S0 มีค่า CO_2 occupied risk hour สูงในทุกกรณี โดยมีค่าใกล้เคียงกับช่วงเวลาการใช้งานห้องทั้งหมดในแต่ละวัน แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานจะอยู่ในสภาวะที่ CO_2 สูงเกินเกณฑ์เป็นเวลานาน หากไม่มีระบบระบายอากาศเชิงกลช่วยควบคุม ในทางตรงกันข้าม S1 และ S2 มีค่า CO_2 risk hour เป็นศูนย์ใน D1 และ D2 และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใน D3 เท่านั้น

โดยสรุป ผลการจำลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการใช้งานห้องมีผลโดยตรงต่อความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง เมื่อภาระการใช้งานเพิ่มขึ้นจาก D1 ไปสู่ D3 ค่า Peak CO_2 ค่าเฉลี่ย CO_2 และ CO_2 risk hour มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะในกรณี S0 ซึ่งมีความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศสูงที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลยุทธ์การระบายอากาศ พบว่า S1 และ S2 สามารถลดการสะสม CO_2 ได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับ S0 โดย S1 ให้ค่า CO_2 ต่ำกว่า S2 เล็กน้อย เนื่องจากเปิดพัดลมที่อัตราการระบายอากาศสูงคงที่ตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน ขณะที่ S2 ทำงานแบบปรับตามความ

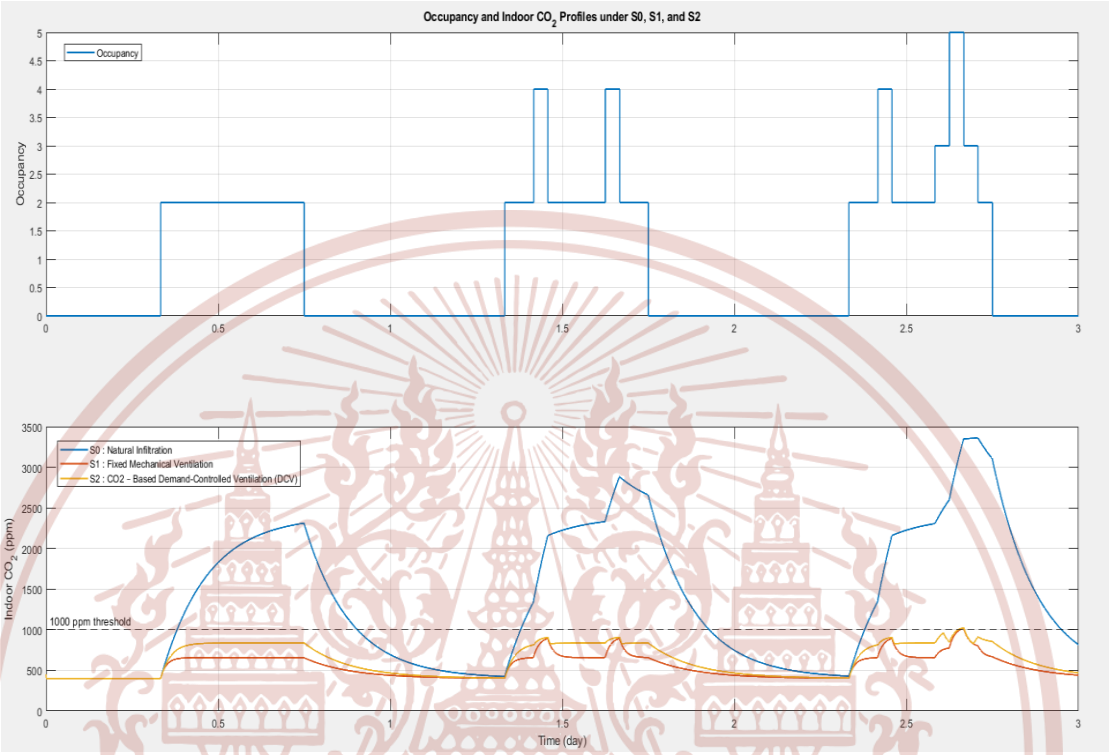
ต้องการจริง ทำให้ค่า CO_2 สูงกว่า S1 เล็กน้อยในบางช่วง แต่ยังสามารถควบคุม CO_2 ให้อยู่ใกล้เคียงเกณฑ์อ้างอิงได้ และมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ต่อในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลเปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2

หัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ S0, S1 และ S2 ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานห้องเดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของแต่ละกลยุทธ์ในการควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง และพิจารณาพฤติกรรมของอัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน

กลยุทธ์ S0 แทนกรณีอ้างอิงที่ไม่มีการระบายอากาศเชิงกล (Passive/Natural Infiltration) โดยพิจารณาเฉพาะการรั่วซึมอากาศพื้นฐานของห้อง กลยุทธ์ S1 แทนระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ (Fixed Mechanical Ventilation) ซึ่งเปิดพัดลมที่อัตราการระบายอากาศสูงตลอดช่วงที่มีผู้ใช้งาน ส่วนกลยุทธ์ S2 แทนระบบระบายอากาศตามความต้องการแบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation (DCV) ซึ่งปรับระดับการทำงานของพัดลมตามจำนวนผู้ใช้งานและระดับ CO_2 ภายในห้อง

จากภาพที่ 4-10 พบว่า ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละกลยุทธ์การระบายอากาศ กรณี S0 มีการสะสมของ CO_2 สูงที่สุดตลอดช่วงเวลาจำลอง โดยค่า CO_2 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่มีผู้ใช้งาน และสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm เป็นเวลานาน แสดงให้เห็นว่าการพึ่งพาการรั่วซึมอากาศพื้นฐานเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการควบคุมคุณภาพอากาศภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก

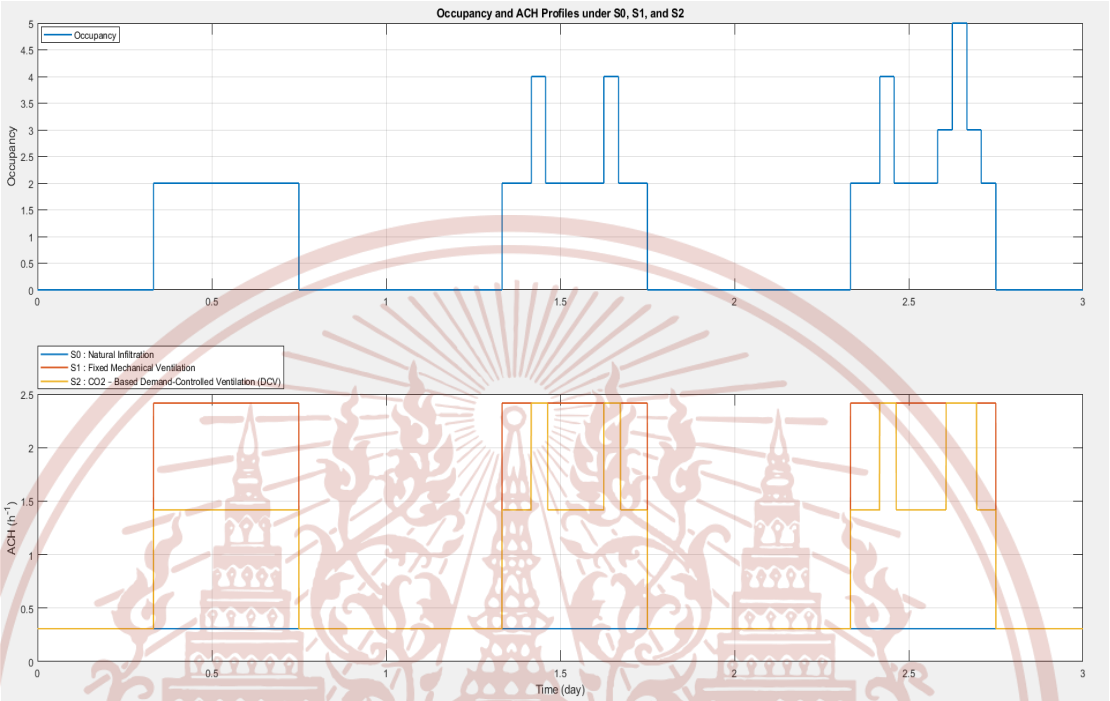


ภาพที่ 4-10 ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้น CO_2 ภายใต้กลยุทธ์ S0, S1 และ S2

ในกรณี S1 ความเข้มข้น CO_2 ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ S0 เนื่องจากมีการระบายอากาศเชิงกลที่อัตราการระบายอากาศสูงคงที่ตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน ส่งผลให้ค่า CO_2 ส่วนใหญ่อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ 1000 ppm และมีการเกินเกณฑ์เพียงช่วงสั้นในกรณีที่มีผู้ใช้งานสูงสุด

สำหรับกรณี S2 ซึ่งเป็นระบบ CO_2-Based DCV พบว่าค่า CO_2 มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ S1 แม้ว่าระบบไม่ได้เปิดพัดลมในระดับสูงตลอดเวลา โดย S2 จะปรับระดับการระบายอากาศตามสภาวะการใช้งานจริง เมื่อจำนวนผู้ใช้งานหรือระดับ CO_2 เพิ่มสูงขึ้น ระบบจะเพิ่มค่า ACH เพื่อช่วยลดการสะสมของ CO_2 และเมื่อความต้องการระบายอากาศลดลง ระบบจะกลับไปทำงานที่ระดับต่ำกว่า

จากภาพที่ 4-11 พบว่า กลยุทธ์ทั้งสามมีพฤติกรรมของอัตราการระบายอากาศแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดย S0 มีค่า ACH คงที่ต่ำสุดที่ประมาณ 0.31 h^{-1} ตลอดช่วงเวลาจำลอง ขณะที่ S1 มีค่า ACH สูงคงที่ประมาณ 2.42 h^{-1} ในช่วงที่มีผู้ใช้งาน ส่วน S2 มีค่า ACH เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการใช้งาน โดยส่วนใหญ่ทำงานที่ระดับ Low speed และเพิ่มเป็น High speed เฉพาะช่วงที่มีผู้ใช้งานมากหรือ CO_2 เข้าใกล้ค่าควบคุม



ภาพที่ 4-11 ผลการเปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศภายใต้กลยุทธ์ S0, S1 และ S2

ตารางที่ 4-6 แสดงผลสรุปตัวชี้วัดสมรรถนะของกลยุทธ์ S0, S1 และ S2 โดยพิจารณาค่า Peak CO_2 ค่าเฉลี่ย CO_2 ในช่วงที่มีผู้ใช้งาน ชั่วโมงที่ CO_2 เกิน 1000 ppm ในช่วงมีผู้ใช้งาน และค่า ACH เฉลี่ย

ตารางที่ 4-6 ผลเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของกลยุทธ์ S0, S1 และ S2

KPI	S0	S1	S2
Peak CO_2 (ppm)	3362.5	1019.1	1025.4
Average CO_2 during occupied period (ppm)	2038.2	693.49	822.06
CO_2 >1000 ppm during occupied period (hr)	26.683	0.2833	0.4167
Average ACH during occupied period (h^{-1})	0.31	2.4167	1.6017

จากตารางที่ 4-6 พบว่า S0 มีค่า Peak CO_2 สูงถึง 3362.5 ppm และมีค่าเฉลี่ย CO_2 ในช่วงที่มีผู้ใช้งานเท่ากับ 2038.2 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm อย่างมาก นอกจากนี้ยังมีช่วงเวลาที่ CO_2 สูงกว่า 1000 ppm เท่ากับ 26.683 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า S0 เป็นกรณีที่มีความเสี่ยงต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารสูงที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกับ S0 พบว่า S1 สามารถลดค่า Peak CO_2 ลงเหลือ 1019.1 ppm และลดค่าเฉลี่ย CO_2 ลงเหลือ 693.49 ppm ขณะที่ช่วงเวลาที่ CO_2 เกิน 1000 ppm ลดลงเหลือเพียง 0.2833 ชั่วโมง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่สามารถควบคุม CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการพึ่งพาการรั่วซึมอากาศพื้นฐานเพียงอย่างเดียว

สำหรับ S2 พบว่า ค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1025.4 ppm ซึ่งใกล้เคียงกับ S1 และมีค่าเฉลี่ย CO_2 เท่ากับ 822.06 ppm โดยมีช่วงเวลาที่ CO_2 เกิน 1000 ppm เท่ากับ 0.4167 ชั่วโมง แม้ค่า CO_2 ของ S2 จะสูงกว่า S1 เล็กน้อย แต่ยังต่ำกว่า S0 อย่างชัดเจน โดย S2 สามารถลดค่า Peak CO_2 ได้ประมาณ 69.5% และลดช่วงเวลาที่ CO_2 เกินเกณฑ์ได้ประมาณ 98.4% เมื่อเทียบกับ S0

จุดเด่นของ S2 คือการลดอัตราการระบายอากาศเฉลี่ยในช่วงที่มีผู้ใช้งาน โดยค่า ACH เฉลี่ยของ S2 เท่ากับ 1.6017 h^{-1} ขณะที่ S1 มีค่า ACH เฉลี่ยเท่ากับ 2.4167 h^{-1} ดังนั้น S2 ใช้อัตราการระบายอากาศเฉลี่ยต่ำกว่า S1 ประมาณ 33.7% แต่ยังสามารถรักษาค่า CO_2 ให้อยู่ใกล้เคียงกับ S1 ได้ ผลดังกล่าวสะท้อนหลักการของระบบ Demand-Controlled Ventilation ที่ปรับอัตราการระบายอากาศตามความต้องการจริง แทนการเปิดระบบที่อัตราสูงคงที่ตลอดเวลา

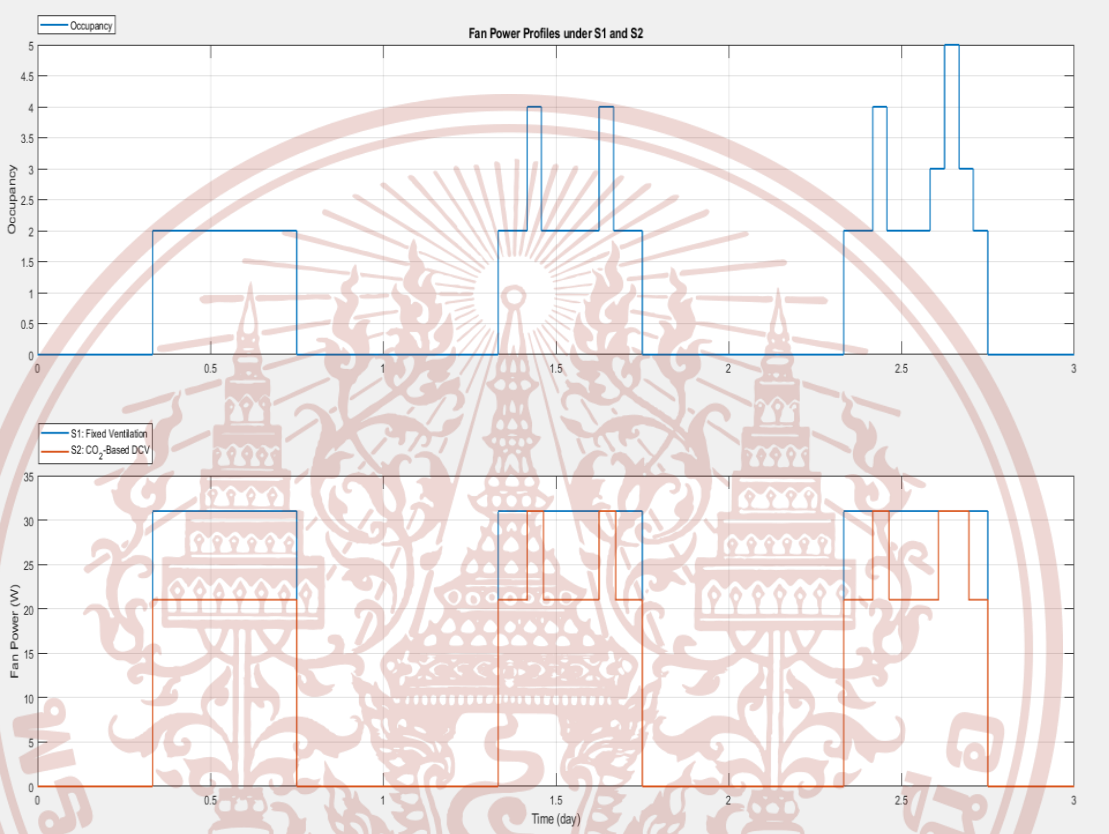
โดยสรุป ผลการเปรียบเทียบในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า S0 ไม่เพียงพอต่อการควบคุมคุณภาพอากาศภายในห้องสำนักงานขนาดเล็ก ขณะที่ S1 ให้สมรรถนะด้านการควบคุม CO_2 ได้ดีที่สุด แต่ต้องใช้อัตราการระบายอากาศสูงคงที่ ส่วน S2 ให้สมรรถนะด้านคุณภาพอากาศใกล้เคียงกับ S1 แต่มีค่า ACH เฉลี่ยต่ำกว่าอย่างชัดเจน จึงมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของพัดลม ซึ่งจะนำไปประเมินในหัวข้อถัดไป

4.4 ผลการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ

หัวข้อนี้เป็นการประเมินผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศภายใต้กลยุทธ์การระบายอากาศ 2 รูปแบบ ได้แก่ S1 และ S2 โดยไม่พิจารณากรณี S0 เนื่องจาก S0 เป็นกรณีอ้างอิงที่ไม่มีการใช้พัดลมระบายอากาศเชิงกล และพิจารณาเฉพาะการรั่วซึมอากาศพื้นฐานของห้องเท่านั้น

กลยุทธ์ S1 เป็นระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ โดยพัดลมทำงานที่ระดับ High speed ตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานภายในห้อง ขณะที่กลยุทธ์ S2 เป็นระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation ซึ่งพัดลมจะทำงานที่ระดับ Low speed เป็นหลัก และเปลี่ยนเป็น High speed เฉพาะช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานสูงหรือความเข้มข้น CO_2 เข้าใกล้ค่าควบคุมที่กำหนดไว้

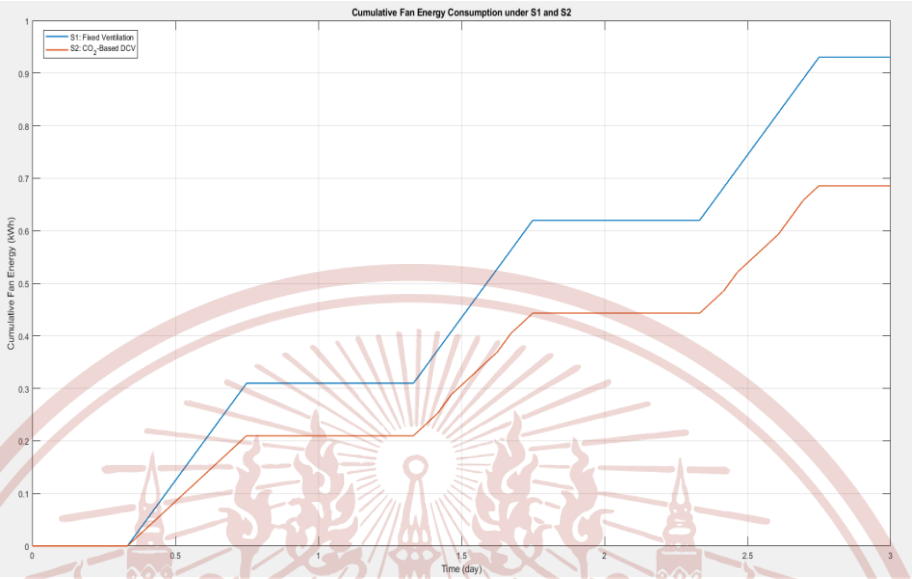
การประเมินพลังงานในหัวข้อนี้พิจารณาเฉพาะพลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ โดยคำนวณจากกำลังไฟฟ้าของพัดลมและระยะเวลาการทำงานของระบบในช่วงเวลาจำลอง 3 วัน อัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 4.15 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง



ภาพที่ 4-12 กำลังไฟฟ้าของพัดลมภายใต้กลยุทธ์ S1 และ S2

จากภาพที่ 4-12 พบว่า S1 ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 31 W ตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน เนื่องจากระบบทำงานที่ระดับ High speed แบบคงที่ ในทางตรงกันข้าม S2 ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 21 W เป็นส่วนใหญ่ในช่วงที่มีผู้ใช้งาน และเพิ่มเป็นประมาณ 31 W เฉพาะช่วงที่ระบบต้องการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ เช่น ช่วงที่มีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรือ CO_2 เข้าใกล้ระดับควบคุม

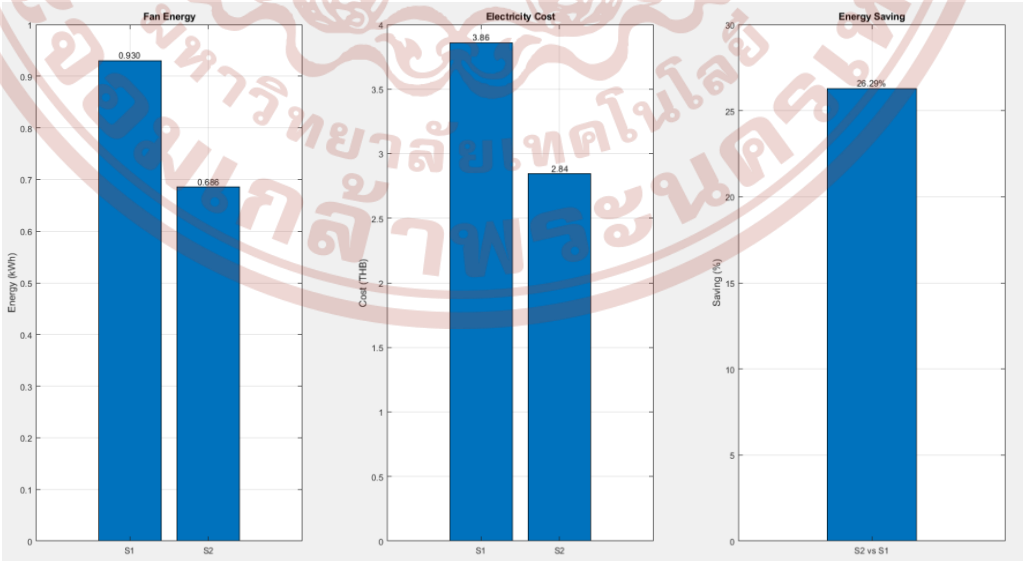
ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า S2 สามารถลดการทำงานของพัดลมในระดับสูงที่ไม่จำเป็นได้ โดยยังคงเปิดระบบระบายอากาศในระดับต่ำเพื่อรักษาคุณภาพอากาศภายในห้อง และเพิ่มการระบายอากาศเฉพาะช่วงที่จำเป็นเท่านั้น



ภาพที่ 4-13 พลังงานสะสมของพัดลมภายใต้กลยุทธ์ S1 และ S2

จากภาพที่ 4-13 พบว่า พลังงานสะสมของ S1 เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่สูงกว่า S2 ในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน เนื่องจาก S1 ใช้พัดลมที่ระดับ High speed ตลอดเวลา ขณะที่ S2 มีความชันของพลังงานสะสมต่ำกว่าในช่วงที่ทำงานที่ Low speed และจะเพิ่มขึ้นมากขึ้นเฉพาะช่วงที่เปลี่ยนเป็น High speed

เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาจำลอง 3 วัน พลังงานสะสมของ S1 เท่ากับ 0.9300 kWh ขณะที่พลังงานสะสมของ S2 เท่ากับ 0.6855 kWh แสดงให้เห็นว่า S2 ใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมน้อยกว่า S1 อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-14 ผลเปรียบเทียบพลังงานค่าไฟฟ้า และสัดส่วนการประหยัดพลังงานของ S2 เทียบกับ S1

ตารางที่ 4-7 แสดงผลสรุปการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าของระบบ S1 และ S2 จากผลการจำลองพบว่า S1 ใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมเท่ากับ 0.9300 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 3.8595 บาท ขณะที่ S2 ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.6855 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 2.8448 บาท

ตารางที่ 4-7 ผลการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าของระบบระบายอากาศ S1 และ S2

Strategy	Fan Energy (kWh)	Electricity Cost (THB)	Saving vs S1 (%)
S1: Fixed Ventilation	0.9300	3.8595	0
S2: CO_2-Based DCV	0.6855	2.8448	26.29

จากตารางที่ 4-7 พบว่า S2 สามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมได้ 0.2445 kWh เมื่อเทียบกับ S1 หรือคิดเป็นการประหยัดพลังงานประมาณ 26.29% ในช่วงเวลาจำลอง 3 วัน ในด้านค่าไฟฟ้า S2 สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 1.0147 บาท เมื่อเทียบกับ S1 ภายใต้เงื่อนไขอัตราค่าไฟฟ้าเดียวกัน

ผลดังกล่าวเกิดจากหลักการทำงานของระบบ DCV ซึ่งไม่เปิดพัดลมที่ระดับสูงตลอดช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน แต่ปรับระดับการทำงานตามความต้องการระบายอากาศจริง โดยในช่วงที่จำนวนผู้ใช้งานไม่สูงมากหรือ CO_2 ยังอยู่ต่ำกว่าระดับควบคุม ระบบจะทำงานที่ Low speed และเมื่อมีภาระ CO_2 เพิ่มขึ้น ระบบจึงเปลี่ยนเป็น High speed ชั่วคราว

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลในหัวข้อ 4.3 จะเห็นว่า S2 มีค่า CO_2 สูงกว่า S1 เล็กน้อย แต่ยังสามารถควบคุมความเข้มข้น CO_2 ให้อยู่ใกล้เคียงเกณฑ์อ้างอิงได้ ขณะเดียวกันสามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมลงได้อย่างชัดเจน ดังนั้น S2 จึงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ

โดยสรุป ผลการจำลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า ระบบ CO_2-Based DCV หรือ S2 สามารถลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายของพัดลมระบายอากาศได้เมื่อเทียบกับระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ S1 โดยยังคงรักษาระดับคุณภาพอากาศภายในห้องให้อยู่ใกล้เคียงกับระบบ S1 ได้ ผลดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดของระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ปรับการทำงานตามสภาวะการใช้งานจริง แทนการระบายอากาศในอัตราสูงคงที่ตลอดเวลา

4.5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์

หลังจากเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 ในด้านคุณภาพอากาศและการใช้พลังงานแล้ว หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของระบบ CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation หรือ S2 เพื่อประเมินว่า

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หลัก แบบจำลองสามารถตอบสนองได้อย่างสมเหตุสมผลตามหลักทางวิศวกรรมหรือไม่

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวมีความสำคัญต่อการประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง เนื่องจากระบบ DCV มีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์หลายตัว เช่น อัตราการระบายอากาศขั้นต่ำ อัตราการระบายอากาศสูงสุด ค่าควบคุม CO_2 และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดภายในห้อง หากแบบจำลองมีความถูกต้องเชิงพฤติกรรม เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ผลลัพธ์ด้านความเข้มข้น CO_2 ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ และการใช้พลังงานของพัดลมควรเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่สามารถอธิบายได้ด้วยหลักสมดุลมวลและหลักการควบคุมระบบระบายอากาศ

ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวดำเนินการกับระบบ S2 เป็นหลัก เนื่องจาก S2 เป็นกลยุทธ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับอัตราการระบายอากาศตามความต้องการใช้งานจริง โดยพิจารณาพารามิเตอร์สำคัญ 4 กลุ่ม ได้แก่ ค่า ACH_min ค่า ACH_max ค่า CO_2 high-on setpoint และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด โดยแต่ละกรณีจะเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทีละตัว ขณะที่กำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นให้คงที่ เพื่อให้สามารถแยกผลกระทบของตัวแปรที่ต้องการศึกษาได้อย่างชัดเจน

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วย ค่า Peak CO_2, Average CO_2, P95 CO_2, CO_2 risk hour, ACH high hour, พลังงานไฟฟ้าของพัดลม S2 และสัดส่วนการประหยัดพลังงานของ S2 เมื่อเทียบกับ S1 โดยตัวชี้วัดเหล่านี้สะท้อนทั้งด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร พฤติกรรมการควบคุมของระบบ DCV และผลด้านการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ผลของค่า ACH_min การวิเคราะห์ผลของค่า ACH_max การวิเคราะห์ผลของค่า CO_2 high-on setpoint และการวิเคราะห์ผลของจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด จากนั้นจึงสรุปผลรวมของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเพื่อระบุว่าพารามิเตอร์ใดมีผลต่อคุณภาพอากาศและการใช้พลังงานมากที่สุด

4.5.1 ผลของค่า ACH_min ต่อสมรรถนะของระบบ S2

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำของระบบ S2 หรือ ACH_min ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดระดับการระบายอากาศพื้นฐานในช่วงที่มีผู้ใช้งานภายในห้อง แต่ยังไม่ถึงเงื่อนไขที่ระบบต้องเปลี่ยนไปทำงานที่ระดับ High speed การวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าเมื่อปรับค่า ACH_min แล้ว จะส่งผลต่อความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ และการใช้พลังงานของพัดลมอย่างไร

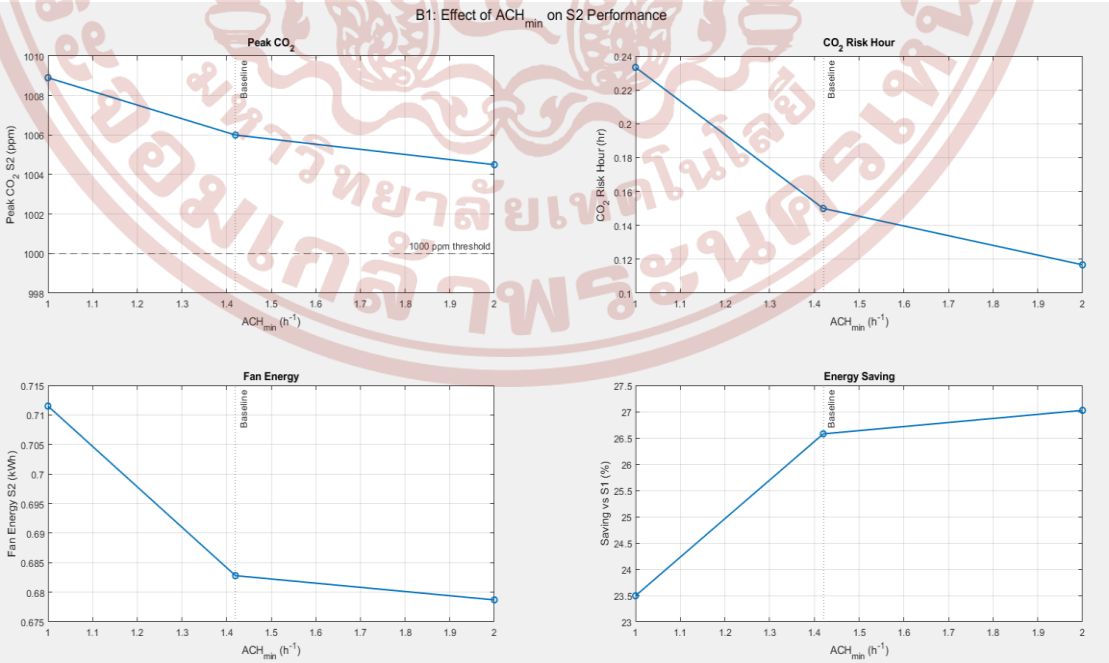
ในการทดลองนี้ กำหนดค่า ACH_min จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1.00, 1.42 และ 2.00 h^{-1} โดยค่า 1.42 h^{-1} เป็นค่าพื้นฐานของแบบจำลอง ซึ่งคำนวณจากอัตราการไหลของพัดลมระดับ Low speed เท่ากับ 85 m^3/h และปริมาตรห้อง 60 m^3 การปรับค่า ACH_min ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบเชิงพารามิเตอร์เพื่อประเมินความไวของแบบจำลอง โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่

ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า ACH_min ต่อสมรรถนะของระบบ S2

ACH_min (h^{-1})	Peak CO_2 S2 (ppm)	Average CO_2 S2 (ppm)	P95 CO_2 S2 (ppm)	CO_2 Risk S2 (hr)	ACH High S2 (hr)	E_S2 (kWh)	Saving vs S1 (%)
1.00	1008.9	657.3277	938.3952	0.2333	8.1500	0.7115	23.4946
1.42	1006.0	626.5714	878.7853	0.1500	5.2833	0.6828	26.5771
2.00	1004.5	574.9159	836.2623	0.1167	4.8667	0.6787	27.0251

จากตารางที่ 4-8 พบว่า เมื่อเพิ่มค่า ACH_min จาก 1.00 เป็น 2.00 h^{-1} ค่า Peak CO_2 ของระบบ S2 ลดลงเล็กน้อยจาก 1008.9 ppm เป็น 1004.5 ppm ขณะที่ค่า Average CO_2 ลดลงอย่างชัดเจนจาก 657.33 ppm เป็น 574.92 ppm และค่า P95 CO_2 ลดลงจาก 938.40 ppm เป็น 836.26 ppm แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำช่วยลดการสะสมของ CO_2 ในช่วงเวลาทั่วไปของการใช้งานห้องได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า CO_2 Risk hour พบว่า ค่าเวลาที่ CO_2 เกิน 1000 ppm ลดลงจาก 0.2333 ชั่วโมง เหลือ 0.1167 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มค่า ACH_min จาก 1.00 เป็น 2.00 h^{-1} ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักสมดุลมวลของ CO_2 เนื่องจากการเพิ่มอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำทำให้มีการเจือจางและระบาย CO_2 ออกจากห้องมากขึ้นตั้งแต่ช่วงต้นของการใช้งาน ส่งผลให้ระดับ CO_2 เข้าใกล้เกณฑ์ควบคุมน้อยลง



ภาพที่ 4-15 ผลของค่า ACH_min ต่อสมรรถนะของระบบ S2

จากภาพที่ 4-15 พบว่า ค่า ACH_min ที่สูงขึ้นช่วยลดค่า CO_2 risk hour และลดการใช้พลังงานของระบบ S2 ได้เล็กน้อย โดยพลังงานของพัดลมลดลงจาก 0.7115 kWh ที่ ACH_min เท่ากับ 1.00 h^{-1} เหลือ 0.6787 kWh ที่ ACH_min เท่ากับ 2.00 h^{-1} ขณะเดียวกันสัดส่วนการประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับ S1 เพิ่มขึ้นจาก 23.49% เป็น 27.03%

สาเหตุที่การเพิ่มค่า ACH_min ทำให้พลังงานรวมของ S2 ลดลงในแบบจำลองนี้ เนื่องจากค่า ACH_min ที่สูงขึ้นช่วยควบคุม CO_2 ได้ตั้งแต่ช่วง Low speed ทำให้ระบบมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนไปทำงานที่ High speed น้อยลง โดยค่า ACH High hour ลดลงจาก 8.1500 ชั่วโมง เหลือ 4.8667 ชั่วโมง ดังนั้นแม้ค่า ACH_min จะสูงขึ้น แต่ระยะเวลาการทำงานที่ High speed ลดลง จึงทำให้พลังงานรวมของพัดลมลดลงเล็กน้อยภายใต้สมมติฐานของแบบจำลองนี้

อย่างไรก็ตาม ควรตีความผลของ ACH_min sensitivity ในเชิงพฤติกรรมของแบบจำลองและแนวโน้มการควบคุมระบบ เนื่องจากในกรณีศึกษานี้ยังคงใช้ค่ากำลังไฟฟ้าของพัดลม Low speed และ High speed ตามพัดลมอ้างอิงเดิม การเพิ่มค่า ACH_min จึงเป็นการทดสอบเชิงพารามิเตอร์เพื่อพิจารณาผลของอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำต่อ CO_2 และพฤติกรรมการสลับความเร็วของระบบมากกว่าการเปลี่ยนอุปกรณ์พัดลมจริง

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า ACH_min แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่า ACH_min ช่วยลดค่า Average CO_2, P95 CO_2 และ CO_2 risk hour ได้อย่างชัดเจน ขณะเดียวกันยังช่วยลดระยะเวลาการทำงานที่ High speed ของระบบ S2 ได้ ทำให้พลังงานรวมของพัดลมลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี ACH_min ต่ำกว่า ค่าพื้นฐาน ACH_min เท่ากับ 1.42 h^{-1} จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นกรณีอ้างอิงของแบบจำลอง เนื่องจากมีพื้นฐานจากอัตราการไหลจริงของพัดลม Low speed และให้ผลด้าน CO_2 และพลังงานอยู่ในช่วงที่สมเหตุสมผลทางวิศวกรรม

4.5.2 ผลของค่า ACH_max ต่อสมรรถนะของระบบ S2

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าอัตราการระบายอากาศสูงสุดของระบบ S2 หรือ ACH_max ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดความสามารถสูงสุดของระบบระบายอากาศเมื่อระบบ DCV เปลี่ยนไปทำงานที่ระดับ High speed การวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่า เมื่อเปลี่ยนค่า ACH_max แล้ว จะส่งผลต่อความสามารถในการควบคุม CO_2 ระยะเวลาที่ CO_2 เกินเกณฑ์ และการใช้พลังงานของพัดลมอย่างไร

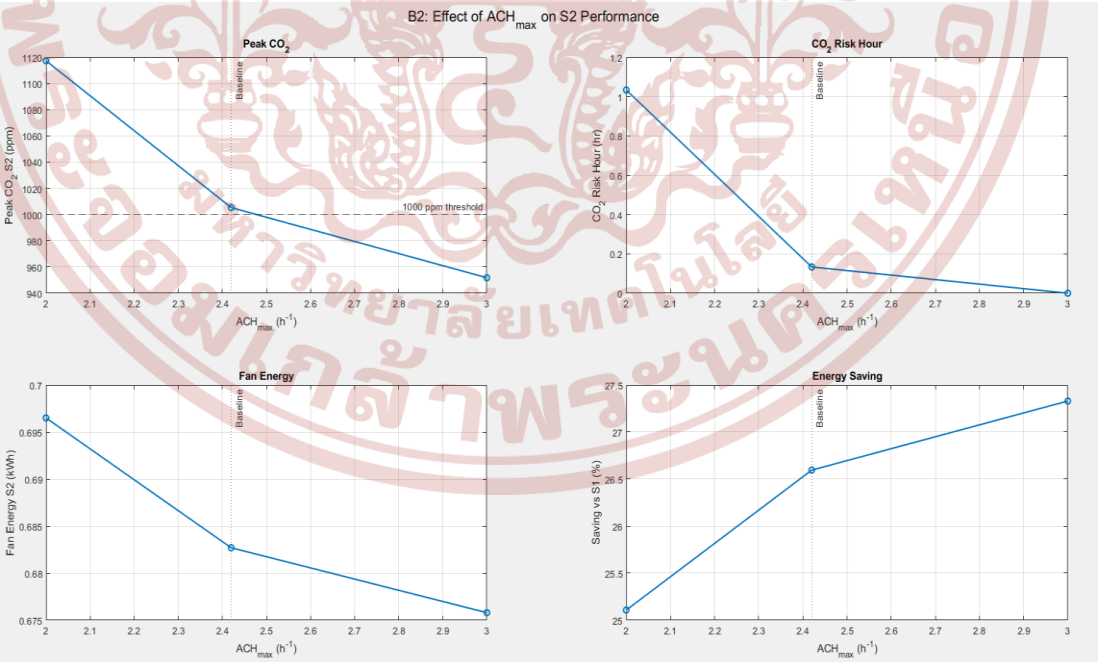
ในการทดลองนี้กำหนดค่า ACH_max จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2.00, 2.42 และ 3.00 h^{-1} โดยค่า 2.42 h^{-1} เป็นค่าพื้นฐานของแบบจำลอง ซึ่งคำนวณจากอัตราการไหลของพัดลมระดับ High speed เท่ากับ 145 m^3/h และปริมาตรห้อง 60 m^3 การปรับค่า ACH_max ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบเชิงพารามิเตอร์ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นคงที่ เพื่อแยกผลของค่าอัตราการระบายอากาศสูงสุดต่อสมรรถนะของระบบ S2

ตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า ACH_max ต่อสมรรถนะของระบบ S2

ACH_max (h^{-1})	Peak CO_2 S2 (ppm)	Average CO_2 S2 (ppm)	P95 CO_2 S2 (ppm)	CO_2 Risk S2 (hr)	ACH High S2 (hr)	E_S2 (kWh)	Saving vs S1 (%)
2.00	1117.3	631.0637	930.0119	1.0333	6.6500	0.6965	25.1075
2.42	1005.3	627.0064	878.8228	0.1333	5.2667	0.6827	26.5950
3.00	951.7727	620.7794	825.5914	0	4.5833	0.6758	27.3297

จากตารางที่ 4-9 พบว่า เมื่อเพิ่มค่า ACH_max จาก 2.00 เป็น 3.00 h^{-1} ค่า Peak CO_2 ของระบบ S2 ลดลงจาก 1117.3 ppm เป็น 951.77 ppm ขณะที่ค่า P95 CO_2 ลดลงจาก 930.01 ppm เป็น 825.59 ppm แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการระบายอากาศสูงสุดช่วยให้ระบบสามารถลดความเข้มข้น CO_2 ในช่วงที่มีภาระการใช้งานสูงได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า CO_2 Risk hour พบว่า กรณี ACH_max เท่ากับ 2.00 h^{-1} มีช่วงเวลาที่ CO_2 เกิน 1000 ppm เท่ากับ 1.0333 ชั่วโมง ขณะที่กรณี ACH_max เท่ากับ 2.42 h^{-1} มีค่า CO_2 Risk hour ลดลงเหลือ 0.1333 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มค่า ACH_max เป็น 3.00 h^{-1} ไม่พบช่วงเวลาที่ CO_2 เกิน 1000 ppm ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ACH_max เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อความสามารถของระบบ S2 ในการควบคุม CO_2 ช่วงภาระสูงหรือช่วงผู้ใช้งานหนาแน่น



ภาพที่ 4-16 ผลของค่า ACH_max ต่อสมรรถนะของระบบ S2

จากภาพที่ 4-16 จะเห็นว่า ค่า ACH_max ที่สูงขึ้นช่วยลดค่า Peak CO_2 และ CO_2 Risk hour ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มจาก 2.00 เป็น 2.42 h^{-1} ซึ่งทำให้ค่า Peak CO_2 ลดลงเข้าใกล้เกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm มากขึ้น และเมื่อเพิ่มเป็น 3.00 h^{-1} ค่า Peak CO_2 ต่ำกว่าเกณฑ์ 1000 ppm

ในด้านพลังงาน พบว่าพลังงานของพัดลม S2 ลดลงเล็กน้อยจาก 0.6965 kWh ที่ ACH_max เท่ากับ 2.00 h^{-1} เหลือ 0.6758 kWh ที่ ACH_max เท่ากับ 3.00 h^{-1} ขณะเดียวกันสัดส่วนการประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับ S1 เพิ่มขึ้นจาก 25.11% เป็น 27.33% พฤติกรรมนี้เกิดจากการที่ค่า ACH_max สูงขึ้นช่วยลด CO_2 ได้เร็วขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่ High speed ทำให้ระยะเวลาที่ต้องทำงานในระดับ High speed ลดลงจาก 6.6500 ชั่วโมง เหลือ 4.5833 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตาม ผลด้านพลังงานในหัวข้อนี้ควรตีความภายใต้สมมติฐานของแบบจำลอง เนื่องจากการเปลี่ยนค่า ACH_max เป็นการทดสอบเชิงพารามิเตอร์ของอัตราการระบายอากาศสูงสุด โดยยังคงใช้ค่ากำลังไฟฟ้าของพัดลม High speed ตามพัดลมอ้างอิงเดิม ดังนั้นผลนี้สะท้อนความไวของแบบจำลองต่อความสามารถในการระบายอากาศสูงสุด มากกว่าการเปรียบเทียบการเปลี่ยนอุปกรณ์พัดลมจริงโดยตรง

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า ACH_max แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่า ACH_max ส่งผลดีต่อสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศอย่างชัดเจน โดยช่วยลดค่า Peak CO_2, P95 CO_2 และ CO_2 Risk hour โดยเฉพาะในช่วงที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูง ค่า ACH_max จึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการออกแบบขนาดพัดลมและความสามารถสูงสุดของระบบ DCV อย่างไรก็ตาม การเลือกค่า ACH_max ควรพิจารณาร่วมกับข้อจำกัดของพัดลมจริง พลังงานไฟฟ้า เสียง และความเหมาะสมในการติดตั้ง

4.5.3 ผลของค่า CO_2 Setpoint ต่อสมรรถนะของระบบ S2

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า CO_2 setpoint ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการสั่งให้ระบบ S2 เปลี่ยนการทำงานเข้าสู่ระดับ High speed โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่า การกำหนดค่าเกณฑ์การตอบสนองของระบบ DCV ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความสามารถในการควบคุมความเข้มข้น CO_2 และการใช้พลังงานของพัดลมอย่างไร ในการทดลองนี้กำหนดค่า CO_2 high-on จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 900, 960 และ 1000 ppm โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นคงที่ และใช้ค่า 960 ppm เป็นค่าพื้นฐานของแบบจำลอง

ตารางที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่า CO_2 setpoint ต่อสมรรถนะของระบบ S2

CO_2 high-on (ppm)	Peak CO_2 S2 (ppm)	Average CO_2 S2 (ppm)	P95 CO_2 S2 (ppm)	CO_2 Risk S2 (hr)	ACH High S2 (hr)	E_S2 (kWh)	Saving vs S1 (%)
900	1009.3	625.2033	871.5532	0.2500	5.5167	0.6852	26.3262
960	1007.9	627.2418	880.1847	0.2000	5.2000	0.6820	26.6667
1000	1017.6	628.0398	880.6490	0.8000	4.9500	0.6795	26.9355

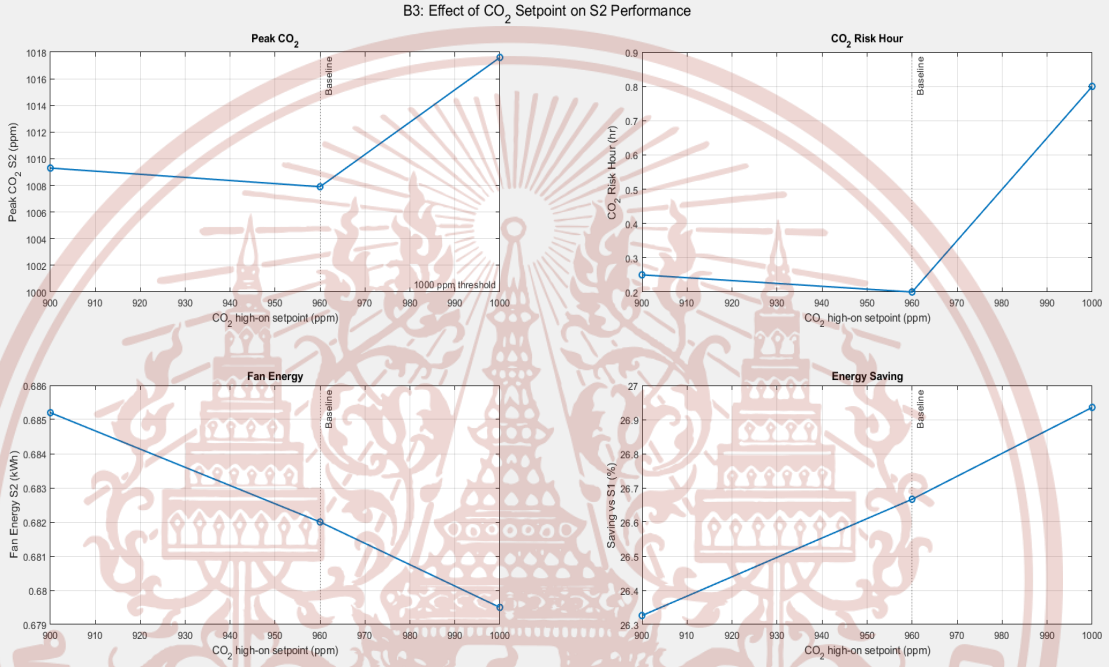
ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-10 พบว่า การเปลี่ยนค่า CO_2 high-on ในช่วงที่ศึกษาส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ S2 ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะด้านระยะเวลาเสี่ยงที่ CO_2 เกินเกณฑ์และการใช้พลังงาน ขณะที่ค่า Peak CO_2 และ Average CO_2 เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

จากตารางที่ 4-10 พบว่า เมื่อกำหนดค่า CO_2 high-on เท่ากับ 900 ppm ระบบจะเริ่มเข้าสู่การทำงานแบบ High speed เร็วกว่ากรณีอื่น ทำให้สามารถควบคุม CO_2 ได้ค่อนข้างเร็ว ส่งผลให้ค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1009.3 ppm และ CO_2 Risk hour เท่ากับ 0.2500 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม การที่ระบบตอบสนองเร็วขึ้นทำให้ระยะเวลาการทำงานที่ระดับ High speed เพิ่มขึ้นเป็น 5.5167 ชั่วโมง ส่งผลให้การใช้พลังงานของพัดลม S2 เพิ่มขึ้นเป็น 0.6852 kWh และทำให้ Saving vs S1 ลดลงเล็กน้อยเหลือ 26.33%

กรณีค่าพื้นฐานที่ 960 ppm พบว่าเป็นช่วงที่สมดุลระหว่างการควบคุม CO_2 และการใช้พลังงาน โดยค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1007.9 ppm ซึ่งใกล้เคียงกับกรณี 900 ppm แต่มีค่า CO_2 Risk hour ต่ำสุดใน 2 กรณีแรก คือ 0.2000 ชั่วโมง ขณะที่การทำงานในระดับ High speed ลดลงเป็น 5.2000 ชั่วโมง และการใช้พลังงานลดลงเป็น 0.6820 kWh ส่งผลให้ Saving vs S1 เพิ่มขึ้นเป็น 26.67%

เมื่อเพิ่มค่า CO_2 high-on เป็น 1000 ppm ระบบจะยอมให้ CO_2 เพิ่มสูงขึ้นก่อนที่จะสั่งเปลี่ยนเป็น High speed ทำให้ระยะเวลาการทำงานในระดับ High speed ลดลงเหลือ 4.9500 ชั่วโมง และการใช้พลังงานของพัดลมลดลงต่ำสุดเป็น 0.6795 kWh ส่งผลให้ Saving vs S1 เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 26.94% อย่างไรก็ตาม การตอบสนองที่ช้าลงทำให้ค่า Peak CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 1017.6 ppm และ CO_2 Risk hour เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 0.8000 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่ากรณี 900 และ 960 ppm

ภาพที่ 4-17 แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่า CO_2 setpoint กับตัวชี้วัดสำคัญของระบบ S2 โดยจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มค่า CO_2 high-on ระบบมีแนวโน้มใช้พลังงานลดลงเล็กน้อย และสัดส่วนการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศกลับเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะค่า CO_2 Risk hour ที่เพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อใช้ค่า 1000 ppm



ภาพที่ 4-17 ผลของค่า CO_2 setpoint ต่อสมรรถนะของระบบ S2

เมื่อพิจารณาในเชิงวิศวกรรม พบว่า ค่า CO_2 setpoint เป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนการประนีประนอมระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน หากกำหนดค่า setpoint ต่ำเกินไป ระบบจะตอบสนองเร็วและรักษาคุณภาพอากาศได้ดีขึ้น แต่ต้องแลกกับการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากกำหนดค่า setpoint สูงเกินไป แม้จะช่วยลดการใช้พลังงานได้เล็กน้อย แต่จะเพิ่มโอกาสที่ CO_2 จะเกินเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm เป็นเวลานานขึ้น

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์นี้ ค่า CO_2 high-on เท่ากับ 960 ppm จึงถือเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองนี้ เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างการควบคุม CO_2 และการใช้พลังงานได้ดีกว่าค่าที่ต่ำหรือสูงกว่านี้ โดยยังคงรักษาระดับการประหยัดพลังงานได้ในระดับที่ดี ขณะเดียวกันก็จำกัดช่วงเวลาที่ CO_2 เกินเกณฑ์อ้างอิงให้อยู่ในระดับต่ำ

4.5.4 ผลของจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดต่อสมรรถนะของระบบ S2

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด (Peak Occupancy) ต่อสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความเข้มข้น CO_2 หรือระบบ S2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่า เมื่อภาระการปล่อย CO_2 จากผู้ใช้งานเพิ่มสูงขึ้น ระบบ S2

จะยังสามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้มากน้อยเพียงใด การวิเคราะห์นี้กำหนดกรณีศึกษา 3 ระดับ ได้แก่ กรณีที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด 4 คน, 5 คน และ 6 คน ตามลำดับ โดยใช้กรณี 5 คนเป็นค่าพื้นฐานของแบบจำลอง

ตารางที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดต่อสมรรถนะของระบบ S2

Occ case	Peak Occ (person)	Peak CO_2 S2 (ppm)	Average CO_2 S2 (ppm)	P95 CO_2 S2 (ppm)	CO_2 Risk S2 (hr)	ACH High S2 (hr)	E_S2 (kWh)	Saving vs S1 (%)
1	4	934.5563	539.1034	825.3616	0.0000	1.1167	0.6412	31.0573
2	5	1007.9	627.2418	880.1847	0.2000	5.2000	0.6820	26.6667
3	6	1123.4	671.1696	960.0261	1.5333	15.3167	0.7832	15.7885

ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-11 พบว่า เมื่อจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเพิ่มขึ้นค่าตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศและพลังงานของระบบ S2 เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะค่า Peak CO_2, CO_2 Risk hour, ระยะเวลาการทำงานในระดับ High speed และการใช้พลังงานของพัดลม

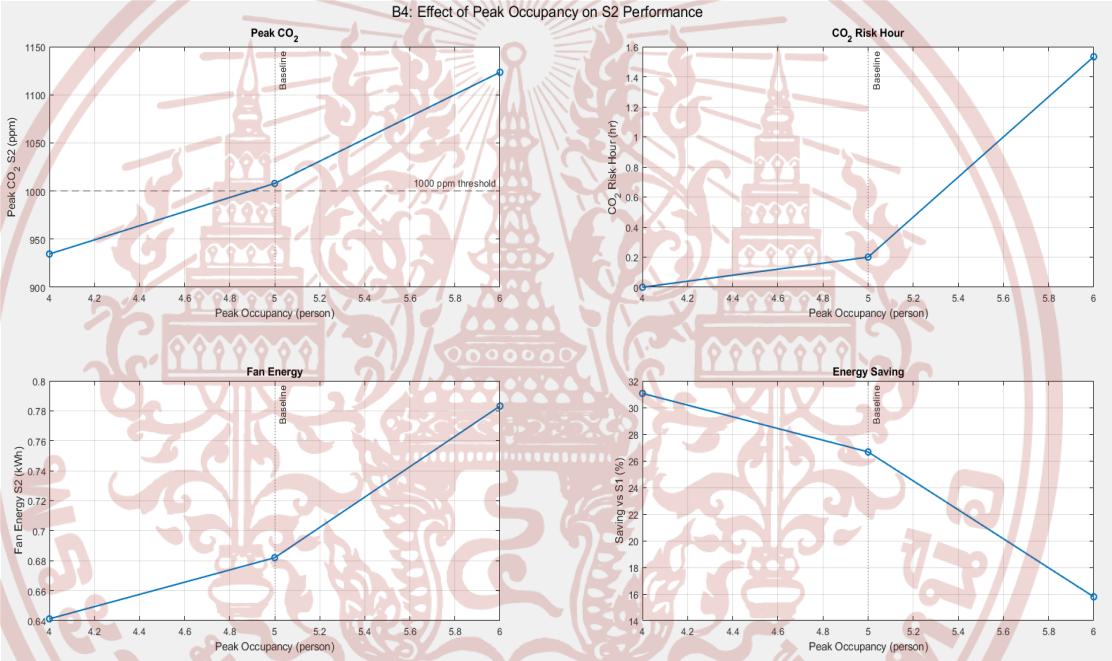
จากตารางที่ 4-11 พบว่า ในกรณีผู้ใช้งานสูงสุด 4 คน ระบบ S2 สามารถควบคุม CO_2 ได้ดีที่สุดในสามกรณี โดยมีค่า Peak CO_2 เท่ากับ 934.56 ppm ซึ่งยังต่ำกว่าเกณฑ์อ้างอิง 1000 ppm และมีค่า CO_2 Risk hour เท่ากับ 0 ชั่วโมง แสดงว่าในกรณีนี้ระบบสามารถรักษาคุณภาพอากาศให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตลอดช่วงเวลาการใช้งาน นอกจากนี้ ระยะเวลาการทำงานที่ระดับ High speed มีค่าเพียง 1.1167 ชั่วโมง ส่งผลให้การใช้พลังงานของพัดลมต่ำสุด คือ 0.6412 kWh และให้ค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับ S1 สูงสุดเท่ากับ 31.06%

ในกรณีค่าพื้นฐานที่มีผู้ใช้งานสูงสุด 5 คน พบว่าค่า Peak CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 1007.9 ppm ซึ่งเริ่มสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิงเล็กน้อย ขณะที่ CO_2 Risk hour เพิ่มเป็น 0.2000 ชั่วโมง แสดงว่าระบบ S2 ยังสามารถควบคุม CO_2 ได้ในระดับที่ค่อนข้างดี แต่เริ่มมีบางช่วงเวลาที่ความเข้มข้น CO_2 เกินเกณฑ์อ้างอิง นอกจากนี้ การทำงานในระดับ High speed เพิ่มขึ้นเป็น 5.2000 ชั่วโมง ส่งผลให้พลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นเป็น 0.6820 kWh และค่าการประหยัดพลังงานลดลงเหลือ 26.67%

เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเป็น 6 คน ซึ่งเป็นกรณีที่มีภาระการปล่อย CO_2 สูงที่สุด พบว่าค่า Peak CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 1123.4 ppm และ CO_2 Risk hour เพิ่มขึ้นเป็น 1.5333 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าสองกรณีแรกอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าระบบ S2 เริ่มมีข้อจำกัดในการรองรับภาระการปล่อย CO_2 ที่สูงมาก แม้ว่าระบบจะตอบสนองด้วยการทำงานที่ระดับ High speed มากขึ้น โดยมีค่า ACH High S2 hr สูงถึง 15.3167 ชั่วโมง แต่ก็ยังไม่สามารถจำกัด CO_2 ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์อ้างอิงได้ตลอดเวลา

นอกจากนี้ การใช้พลังงานของพัดลมเพิ่มขึ้นเป็น 0.7832 kWh และค่าการประหยัดพลังงานลดลงเหลือ 15.79%

ภาพที่ 4-18 แสดงแนวโน้มของตัวชี้วัดสำคัญเมื่อจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า Peak CO_2, CO_2 Risk hour และพลังงานที่ใช้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งาน ขณะที่ Saving vs S1 มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นว่า เมื่อภาระการปล่อย CO_2 เพิ่มสูงขึ้น ระบบ S2 จำเป็นต้องเพิ่มการทำงานที่ระดับ High speed มากขึ้นเพื่อรักษาคุณภาพอากาศ ส่งผลให้ข้อได้เปรียบด้านการประหยัดพลังงานลดลง



ภาพที่ 4-18 ผลของ Peak Occupancy ต่อสมรรถนะของระบบ S2

เมื่อพิจารณาในเชิงวิศวกรรม ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า จำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบ S2 อย่างมาก เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิด CO_2 ภายในห้องโดยตรง หากจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ระบบจะต้องระบายอากาศมากขึ้นเพื่อรักษาระดับ CO_2 ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในกรณีที่จำนวนผู้ใช้งานไม่สูงมาก ระบบ S2 สามารถให้สมดุลที่ดีระหว่างคุณภาพอากาศและการประหยัดพลังงาน แต่เมื่อจำนวนผู้ใช้งานสูงขึ้นมาก ระบบจะต้องแลกการประหยัดพลังงานกับการเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อควบคุม CO_2

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า ระบบ S2 เหมาะสมอย่างยิ่งกับห้องสำนักงานขนาดเล็กที่มีจำนวนผู้ใช้งานในระดับต่ำถึงปานกลาง เนื่องจากสามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้ดีและยังคงประหยัดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด

เพิ่มขึ้นจนถึงระดับ 6 คน ระบบยังคงทำงานได้ แต่ประสิทธิภาพด้านการควบคุม CO_2 และการประหยัดพลังงานจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

4.6 การบูรณาการ KPI และการวิเคราะห์ Tornado Plot

ภายหลังจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์หลักทั้ง 4 กรณี ได้แก่ ค่าอัตราการระบายอากาศต่ำสุดของระบบ (ACH_min), ค่าอัตราการระบายอากาศสูงสุดของระบบ (ACH_max), ค่า CO_2 high-on setpoint และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด (Peak Occupancy) ในหัวข้อ 4.5 แล้ว หัวข้อนี้จึงทำการบูรณาการผลลัพธ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อประเมินว่าพารามิเตอร์ใดมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความเข้มข้น CO_2 (S2) มากที่สุด ทั้งในด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน

ตารางที่ 4-12 ค่า KPI ฐานของระบบ S2 สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

KPI	ค่า Baseline S2
Peak CO_2 (ppm)	1007.9
Average CO_2 (ppm)	627.2418
CO_2 Risk Hour (hr)	0.2000
ACH High S2 (hr)	5.2000
Fan Energy S2 (kWh)	0.6820
Saving vs S1 (%)	26.6667

หมายเหตุ : “ทั้งนี้ ค่า KPI ในตารางที่ 4-12 เป็นกรณีฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในหัวข้อ 4.5–4.6 โดยใช้เป็นจุดอ้างอิงในการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4-12 แสดงค่า KPI พื้นฐานของระบบ S2 ภายใต้กรณีฐานของแบบจำลอง ซึ่งกำหนดให้ ACH_min เท่ากับ 1.42 h^{-1}, ACH_max เท่ากับ 2.42 h^{-1}, ค่า CO_2 high-on เท่ากับ 960 ppm และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเท่ากับ 5 คน พบว่า ระบบ S2 มีค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1007.9 ppm ค่า Average CO_2 เท่ากับ 627.24 ppm ค่า CO_2 Risk Hour เท่ากับ 0.20 ชั่วโมง ค่าเวลาการทำงานในระดับ High speed เท่ากับ 5.20 ชั่วโมง ใช้พลังงานพัดลมรวม 0.6820 kWh และมีค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับระบบ S1 เท่ากับ 26.67%

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะของระบบได้อย่างเป็นระบบ จึงได้จัดทำตารางที่ 4-13 โดยสรุปผลในรูปของค่าการเปลี่ยนแปลงสัมบูรณ์สูงสุดจากกรณีฐาน (Maximum Absolute Deviation from Baseline) สำหรับ 4 ตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ Peak CO_2, CO_2 Risk Hour, Fan Energy และ Saving vs S1 วิธีการนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบความรุนแรงของผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้โดยตรง แม้แต่ละพารามิเตอร์จะมีหน่วยและช่วงการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-13 สรุปผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อ KPI ของระบบ S2

Parameter	Low level	Baseline	High level	Max | **Δ**Peak CO_2| (ppm)	Max | **Δ**Risk Hr| (hr)	Max | **Δ**Energy | (kWh)	Max | **Δ**Saving| (%)
ACH_min	1.00	1.42	2.00	3.4	0.0833	0.0295	3.1721
ACH_max	2.00	2.42	3.00	109.4	0.8333	0.0145	1.5592
CO_2 high-on	900	960	1000	9.7	0.6000	0.0032	0.3405
Peak Occupancy	4	5	6	115.5	1.3333	0.1012	10.8782

Δ หมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกรณีฐานของการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

จากตารางที่ 4-13 และภาพ Tornado Plot พบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบ S2 มากที่สุดโดยรวมคือ จำนวนผู้ใช้งานสูงสุด (Peak Occupancy) รองลงมาคือค่า ACH_max ขณะที่ค่า CO_2 high-on setpoint มีอิทธิพลในระดับต่ำที่สุดในภาพรวม โดยเฉพาะในด้านพลังงาน

เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพอากาศ พบว่า Peak Occupancy เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่า Peak CO_2 มากที่สุด โดยทำให้ค่า Peak CO_2 เปลี่ยนแปลงจากกรณีฐานได้สูงสุดถึง 115.5 ppm รองลงมาคือค่า ACH_max ที่ทำให้ค่า Peak CO_2 เปลี่ยนแปลงได้สูงสุด 109.4 ppm ขณะที่ค่า CO_2 high-on setpoint และ ACH_min มีผลน้อยกว่ามาก สะท้อนให้เห็นว่า ภาระการปล่อย CO_2 จากจำนวนผู้ใช้งานและขีดความสามารถสูงสุดของระบบระบายอากาศเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดระดับความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

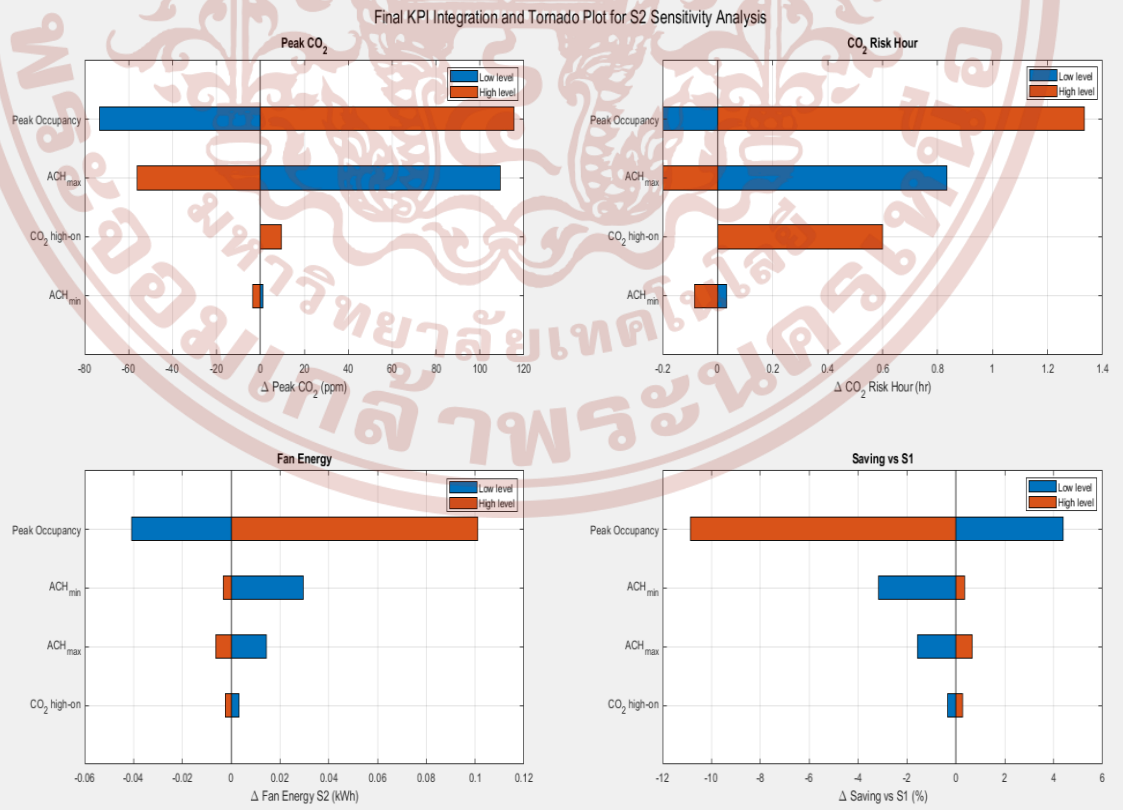
สำหรับตัวชี้วัด CO_2 Risk Hour ซึ่งสะท้อนจำนวนชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์อ้างอิง พบว่า Peak Occupancy มีผลกระทบสูงสุดเช่นกัน โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงสัมบูรณ์สูงสุดเท่ากับ 1.3333 ชั่วโมง รองลงมาคือ ACH_max เท่ากับ 0.8333 ชั่วโมง และ CO_2 high-on setpoint เท่ากับ 0.6000 ชั่วโมง ส่วน ACH_min มีผลกระทบน้อยที่สุดที่ 0.0833 ชั่วโมง ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า หากจำนวนผู้ใช้งานสูงกว่าที่ออกแบบไว้ หรือหากระบบมีขีดความสามารถในการระบายอากาศสูงสุดไม่เพียงพอ ความเสี่ยงที่ CO_2 จะเกินเกณฑ์ยอมรับได้จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านการใช้พลังงานของพัดลม พบว่า Peak Occupancy เป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุด โดยทำให้การใช้พลังงานเปลี่ยนแปลงได้สูงสุด 0.1012 kWh รองลงมาคือ ACH_min ที่ 0.0295 kWh ขณะที่ ACH_max และ CO_2 high-on setpoint มีผลต่อการใช้พลังงานค่อนข้างน้อย ผลนี้สะท้อนว่า

ภาระการใช้งานจริงของห้องเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบในระดับ High speed ได้อย่างเด่นชัดที่สุด

เมื่อพิจารณาผลด้านการประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับ S1 พบว่า Peak Occupancy เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลเด่นที่สุดอีกเช่นกัน โดยทำให้ค่าการประหยัดพลังงานเปลี่ยนแปลงได้สูงสุด 10.8782% รองลงมาคือ ACH_min ที่ 3.1721% ส่วน ACH_max และ CO_2 high-on setpoint มีผลค่อนข้างจำกัด ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า หากจำนวนผู้ใช้งานสูงขึ้นมาก ระบบ S2 จำเป็นต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อตอบสนองต่อภาระ CO_2 ส่งผลให้ข้อได้เปรียบด้านการประหยัดพลังงานลดลง

โดยสรุป หัวข้อ 4.6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า จำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดต่อสมรรถนะของระบบ S2 ทั้งในด้านคุณภาพอากาศและการใช้พลังงาน ขณะที่ค่า ACH_max เป็นพารามิเตอร์สำคัญอันดับถัดมาสำหรับการควบคุม CO_2 ส่วนค่า ACH_min มีบทบาทต่อผลด้านพลังงานมากกว่าด้านคุณภาพอากาศ และค่า CO_2 high-on setpoint แม้จะมีผลต่อการสั่งงานของระบบ แต่มีอิทธิพลโดยรวมต่ำกว่าพารามิเตอร์อื่น ดังนั้น ในการออกแบบหรือปรับตั้งระบบ CO_2-Based DCV สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก ควรให้ความสำคัญกับการประเมินจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดและการกำหนดค่า ACH_max ที่เหมาะสมเป็นลำดับแรก เพื่อให้ระบบสามารถรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการประหยัดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4-19 Tornado Plot ของผลกระทบต่อ KPI

หมายเหตุ : ค่าแกน x ของ Tornado Plot แสดงการเปลี่ยนแปลงของ KPI เมื่อเทียบกับกรณีฐาน โดยค่าบวกหมายถึง KPI เพิ่มขึ้นจากกรณีฐาน และค่าลบหมายถึง KPI ลดลงจากกรณีฐาน

จากผลการบูรณาการ KPI และ Tornado Plot สามารถสรุปได้ว่า จำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบ S2 มากที่สุด เนื่องจากเป็นตัวกำหนดภาระการเกิด CO_2 ภายในห้องโดยตรง เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ระบบจำเป็นต้องเพิ่มการระบายอากาศและใช้พลังงานมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับ S1 ลดลงอย่างชัดเจน

ค่า ACH_max เป็นพารามิเตอร์สำคัญรองลงมา โดยมีผลต่อความสามารถของระบบในการลดค่า Peak CO_2 และลดชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ โดยเฉพาะในช่วงที่มีผู้ใช้งานหนาแน่น ส่วนค่า ACH_min มีผลต่อพลังงานและการประหยัดพลังงานมากกว่าผลด้าน Peak CO_2 ขณะที่ค่า CO_2 high-on setpoint มีผลต่อระบบในระดับจำกัดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่น

ดังนั้น ในการออกแบบระบบ CO_2-Based DCV สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก ควรให้ความสำคัญกับการกำหนดจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดที่เหมาะสมและการเลือกค่า ACH_max หรือขนาดพัดลมที่สามารถรองรับภาระ CO_2 สูงสุดได้อย่างเพียงพอ เพื่อให้ระบบสามารถรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.7 ผลกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วย CO_2 ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากได้พัฒนาและประเมินสมรรถนะของแบบจำลองระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) ภายใต้กรณีศึกษาหลัก D1–D3 แล้ว ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอ กรณีศึกษาเพิ่มเติม (Additional Case Study) เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้แบบจำลองกับข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกจริงร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีศึกษานี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากฐานข้อมูล NASA POWER ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และรังสีดวงอาทิตย์ ร่วมกับข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ จากระบบ Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน รวมระยะเวลา 91 วัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองการทำงานของระบบระบายอากาศ

นอกจากนี้ ยังได้นำแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ DCV เพื่อประเมินศักยภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากโครงข่าย ตลอดจนศึกษาผลกระทบต่อการใช้พลังงาน ค่าใช้จ่าย และคุณภาพอากาศภายในอาคาร ภายใต้รูปแบบการทำงานของระบบปรับอากาศทั้งแบบต่อเนื่อง (Mode A) และแบบเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน (Mode B)

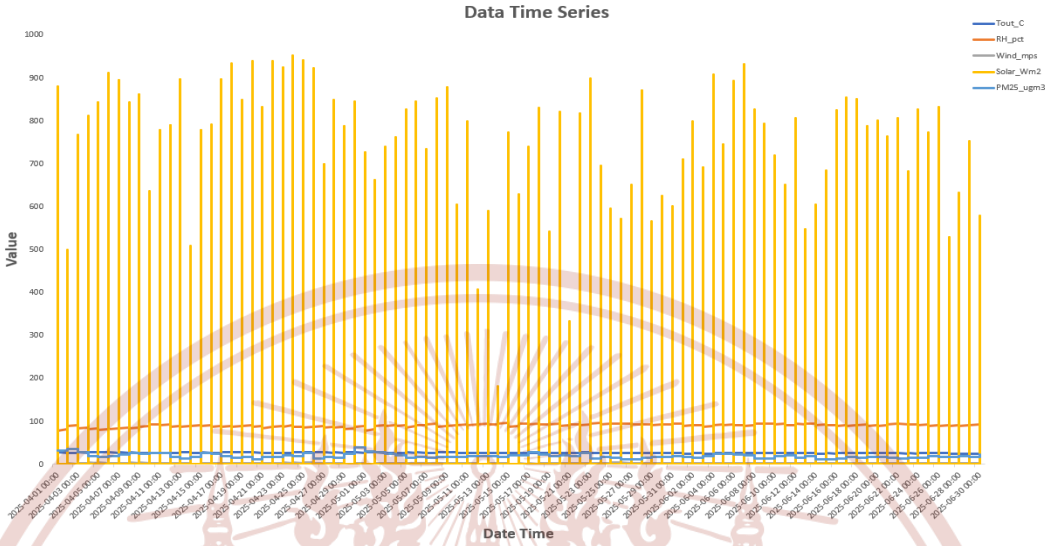
ผลการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงศักยภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลภายนอกระยะยาว และเพื่อสนับสนุนการอภิปรายผลด้านการประหยัดพลังงานและคุณภาพอากาศภายในอาคารเพิ่มเติมจากกรณีศึกษาหลักของงานวิจัย โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเป็น กรณีศึกษาเพิ่มเติม และมิได้ใช้เป็นผลหลักในการตอบวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

4.7.1 ลักษณะข้อมูลภายนอกตลอดระยะเวลา 91 วัน

การประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีศึกษาเพิ่มเติมนี้ ใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกจริงตลอดระยะเวลา 91 วัน ตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และรังสีดวงอาทิตย์จากฐานข้อมูล NASA POWER รวมถึงข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ จากระบบ Air4Thai โดยข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองเพื่อให้การจำลองมีความสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมภายนอกที่เกิดขึ้นจริง

ภาพที่ 4-20 แสดงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา พบว่าอุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามรอบวัน โดยมีค่าสูงในช่วงเวลากลางวันและลดลงในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยช่วงฤดูร้อนและต้นฤดูฝน ขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มแปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยมีค่าสูงในช่วงเวลากลางคืนและช่วงเช้าตรู่ และลดลงในช่วงเวลากลางวัน สำหรับรังสีดวงอาทิตย์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวันอย่างชัดเจน โดยมีค่าสูงสุดในช่วงใกล้เที่ยงวัน และมีค่าใกล้ศูนย์ในช่วงเวลากลางคืน

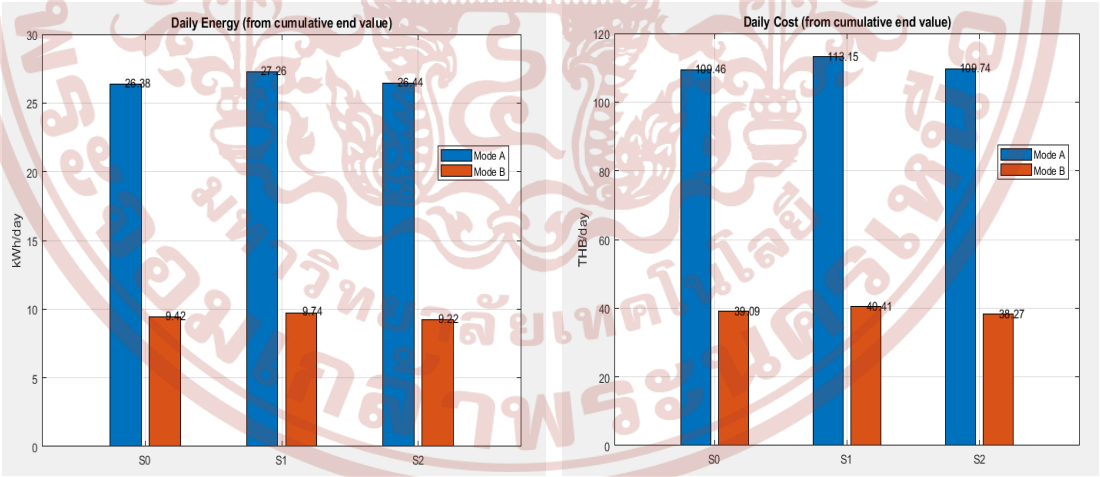
โดยภาพรวม ข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกที่นำมาใช้ในการจำลองมีความต่อเนื่อง ครอบคลุมสภาวะการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศตลอดระยะเวลา 91 วัน และสามารถใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 4-20 ข้อมูล Time Series 91 วัน จาก NASA POWER (2025) และ Air4Thai (2025)

4.7.2 ผลการใช้พลังงานและค่าใช้จ่าย

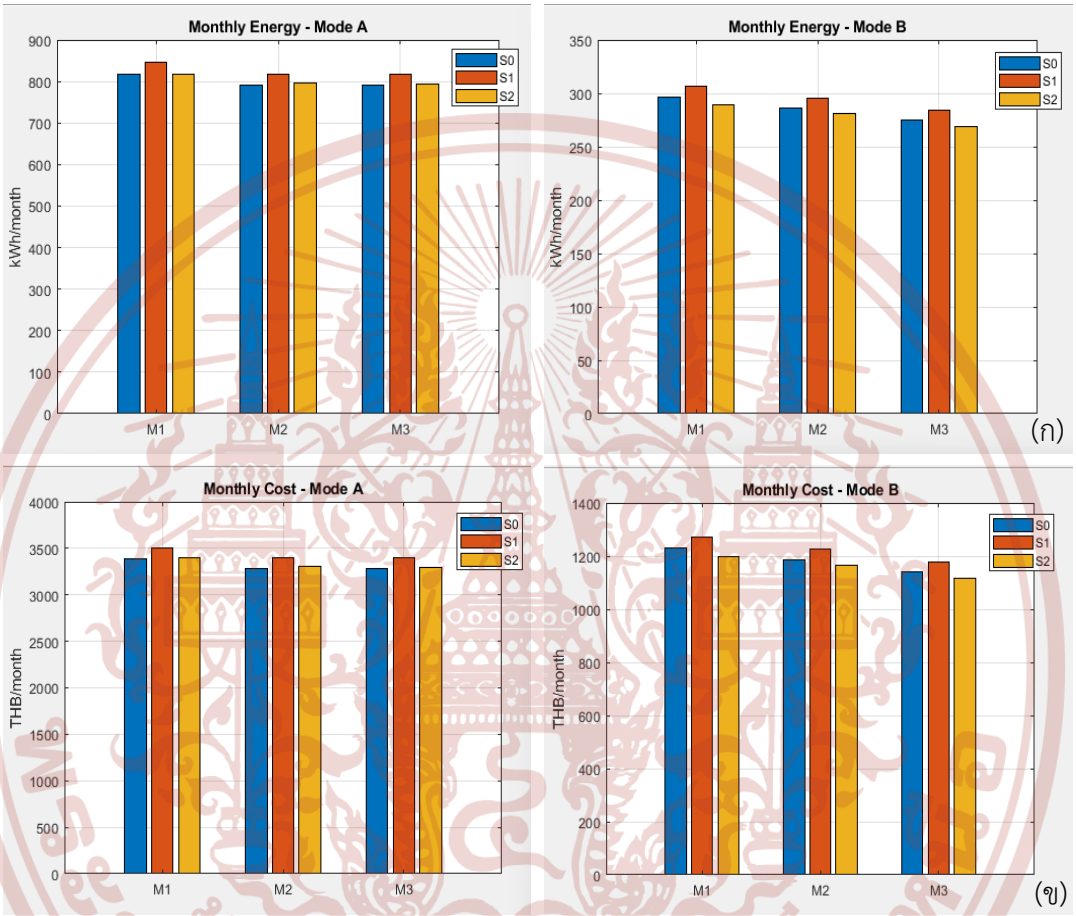
ผลการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายของระบบระบายอากาศภายใต้กรณีศึกษาเพิ่มเติมแสดงดังภาพที่ 4-21 และภาพที่ 4-22 โดยใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกจริงตลอดระยะเวลา 91 วัน เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้การทำงานแบบ Mode A และ Mode B



ภาพที่ 4-21 การใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายวันของระบบระบายอากาศภายใต้ Mode A และ Mode B

ภาพที่ 4-21 แสดงค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายรายวันของแต่ละกรณีศึกษา พบว่า Mode B ซึ่งกำหนดให้ระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน มีการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำกว่า Mode A อย่างชัดเจน เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาการทำงานของระบบในช่วงที่ไม่มีผู้ใช้งานได้ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลยุทธ์การระบายอากาศ พบว่าระบบ S2 มีการ

ใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบ S1 ทั้งใน Mode A และ Mode B สะท้อนถึงประสิทธิภาพของการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการ (DCV) ในการลดการใช้พลังงานของพัดลม



ภาพที่ 4-22 แสดงผลรายเดือนของระบบระบายอากาศภายใต้ Mode A และ Mode B
(ก) การใช้พลังงาน Energy
(ข) ค่าใช้จ่าย Cost

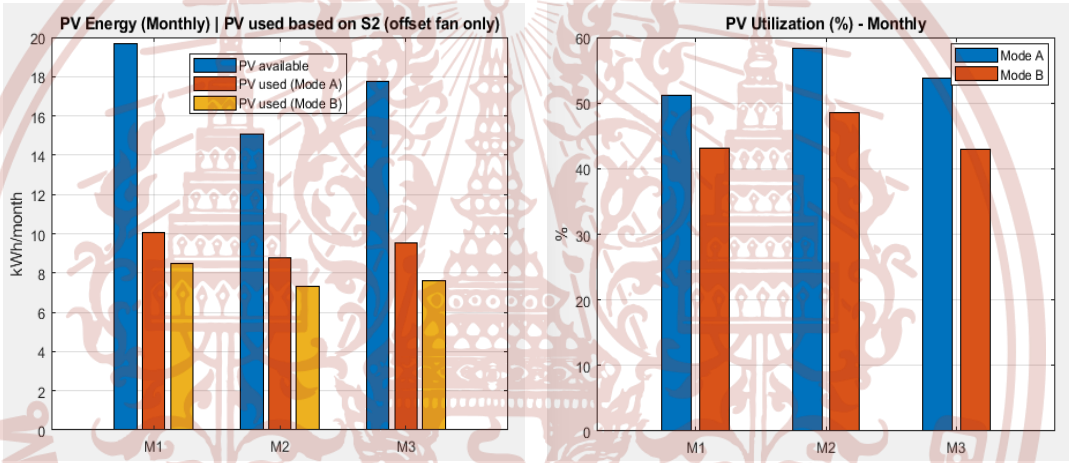
ภาพที่ 4-22 แสดงผลการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายรายเดือนตลอดช่วงเวลาศึกษา ซึ่งให้แนวโน้มสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์รายวัน โดยระบบ S2 มีการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบ S1 ในทุกเดือนของการศึกษา ขณะที่ Mode B ยังคงมีการใช้พลังงานต่ำกว่า Mode A อย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถรักษาศักยภาพในการประหยัดพลังงานได้เมื่อประยุกต์ใช้กับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงในระยะยาว

4.7.3 ผลการผลิตไฟฟ้าและการใช้ประโยชน์พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ภาพที่ 4-23 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ พลังงานที่ถูกนำไปใช้กับพัดลมของระบบ S2 และสัดส่วนการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือนตลอดช่วงเวลา

ศึกษา 91 วัน โดยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความแตกต่างกันตามระดับรังสีดวงอาทิตย์ของแต่ละเดือน โดยเดือนที่มีพลังงานแสงอาทิตย์สูงกว่าจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ที่นำเสนอในหัวข้อ 4.7.1

เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานที่ถูกนำไปใช้กับพัดลม พบว่าค่าดังกล่าวต่ำกว่าพลังงานที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ในทุกเดือน เนื่องจากระบบไม่มีอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปใช้เฉพาะในช่วงเวลาที่พัดลม S2 มีความต้องการพลังงานเท่านั้น ดังนั้น พลังงานส่วนที่ผลิตได้เกินกว่าความต้องการของพัดลมในช่วงเวลาเดียวกันจึงไม่ได้ถูกนำไปใช้ภายในกรณีศึกษานี้



ภาพที่ 4-23 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์รายเดือนภายใต้ Mode A และ Mode B

ผลการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า Mode A มีปริมาณและสัดส่วนการใช้ประโยชน์พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่า Mode B ในทุกเดือน เนื่องจาก Mode A กำหนดให้ระบบทำงานต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการพลังงานของพัดลมมีช่วงเวลาซ้อนทับกับช่วงการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่า ขณะที่ Mode B ทำงานเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน จึงมีระยะเวลาการทำงานและความต้องการพลังงานรวมต่ำกว่า ส่งผลให้สามารถนำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า Mode A

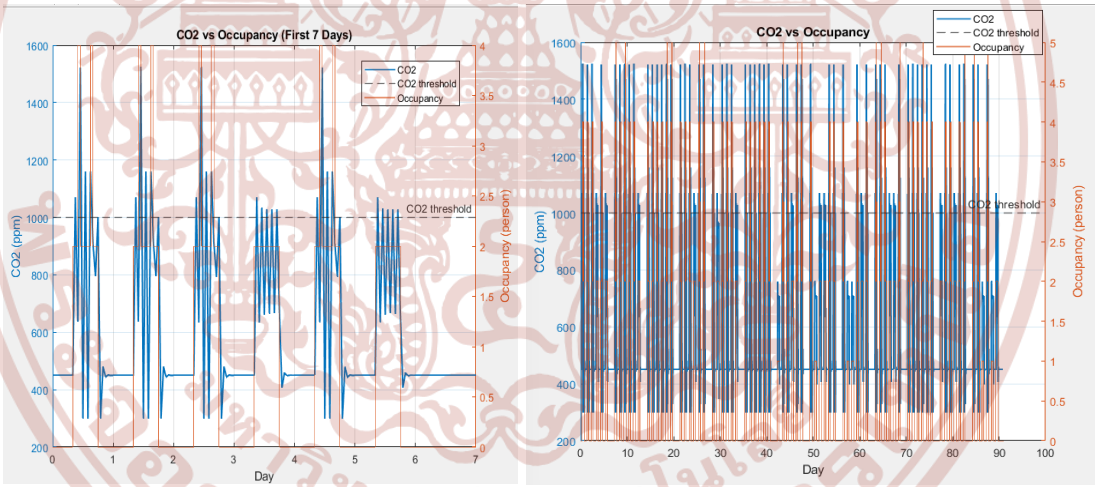
อย่างไรก็ตาม การที่ Mode A มีสัดส่วนการใช้ประโยชน์พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าไม่ได้หมายความว่า Mode A มีประสิทธิภาพด้านพลังงานโดยรวมดีกว่า Mode B เนื่องจาก Mode A มีความต้องการใช้พลังงานของระบบสูงกว่า ดังที่แสดงในหัวข้อ 4.7.2 ในขณะที่ Mode B สามารถลดพลังงานและค่าใช้จ่ายรวมได้มากกว่า แม้ว่าสัดส่วนการใช้ประโยชน์พลังงาน

จากเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำกว่า ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการพิจารณาสมรรถนะของระบบควรประเมินร่วมกันทั้งด้านพลังงานที่ใช้ทั้งหมดและสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาใช้ได้

โดยภาพรวม ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยชดเชยพลังงานที่ใช้โดยพัดลมของระบบ S2 ได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้ง 3 เดือน อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดจากการไม่มีระบบกักเก็บพลังงานทำให้ไม่สามารถนำพลังงานส่วนเกินไปใช้ในช่วงเวลาอื่นได้ ซึ่งเป็นประเด็นที่สามารถนำไปศึกษาต่อยอดเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต

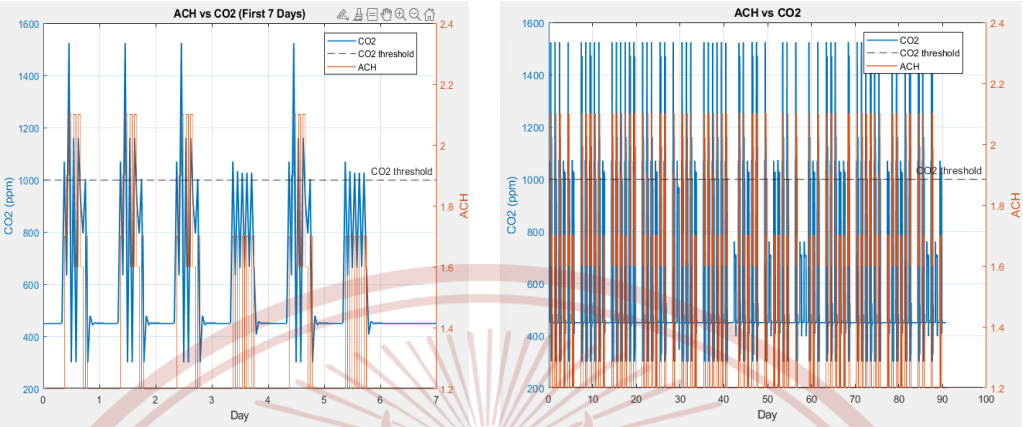
4.7.4 ผลด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร

ผลการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารภายใต้กรณีศึกษาเพิ่มเติมแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการตอบสนองของระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการ (Demand-Controlled Ventilation: DCV) เมื่อประยุกต์ใช้กับข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกจริงตลอดระยะเวลา 91 วัน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้งาน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการระบายอากาศ และตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร



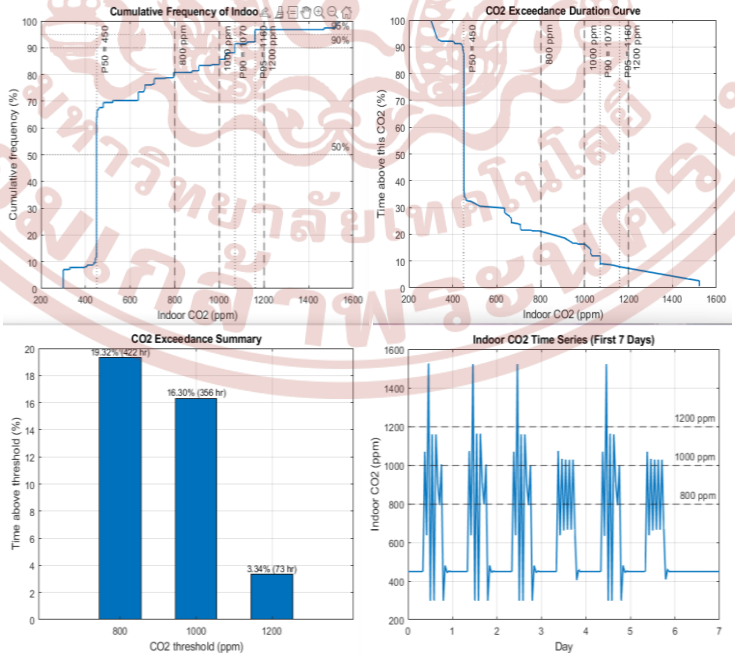
ภาพที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคารในช่วง 7 วันแรกและตลอดระยะเวลา 91 วัน

จากภาพที่ 4-24 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนผู้ใช้งาน กล่าวคือ เมื่อมีผู้ใช้งานภายในห้องเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของ CO_2 จะเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการสะสมของก๊าซจากการหายใจของผู้ใช้งาน ขณะที่ในช่วงไม่มีผู้ใช้งาน ค่า CO_2 จะค่อย ๆ ลดลงจนเข้าใกล้ระดับความเข้มข้นของอากาศภายนอก การแสดงผลทั้งในช่วง 7 วันแรกและตลอดระยะเวลา 91 วันยืนยันว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 ภายในอาคารได้อย่างต่อเนื่องภายใต้รูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกัน



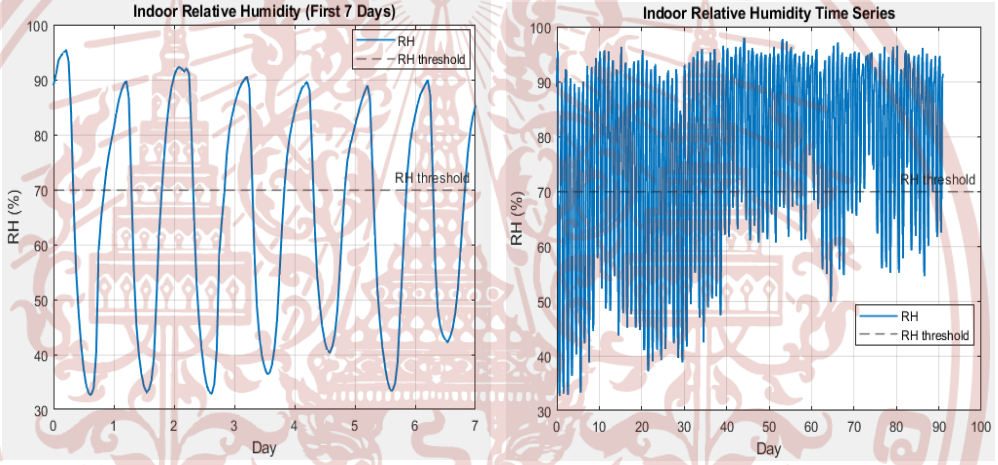
ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศ (ACH) และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 7 วันแรกและตลอดระยะเวลา 91 วัน

จากภาพที่ 4-25 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุม DCV ต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 พบว่าอัตราการระบายอากาศ (ACH) ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามจำนวนผู้ใช้งานเพียงอย่างเดียว แต่ยังพิจารณาร่วมกับระดับ CO_2 ภายในอาคารและเงื่อนไขคุณภาพอากาศภายนอกจากค่า $PM_{2.5}$ ตามตรรกะการควบคุมของระบบ เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มสูงเข้าใกล้ค่าที่กำหนด ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อเจือจางความเข้มข้นของก๊าซภายในห้อง และเมื่อระดับ CO_2 ลดลง ระบบจะปรับลดอัตราการระบายอากาศกลับสู่ระดับที่เหมาะสมส่งผลให้สามารถควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างต่อเนื่องพร้อมลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น



ภาพที่ 4-26 สรุปผลการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารจากการกระจายตัวของ CO_2 ความถี่สะสม ระยะเวลาที่เกินเกณฑ์ และความเข้มข้น CO_2 ในช่วง 7 วันแรก

เพื่อประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารในภาพรวม รูปที่ 4-26 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของความเข้มข้น CO_2 ประกอบด้วยการกระจายตัวของข้อมูล ความถี่สะสม ระยะเวลาที่ความเข้มข้นเกินเกณฑ์ และตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 ในช่วง 7 วันแรก ผลการวิเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของ CO_2 ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่าต่ำถึงระดับที่ยอมรับได้ ขณะที่ช่วงเวลาที่ค่า CO_2 สูงเกินเกณฑ์เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่มีผู้ใช้งานหนาแน่นหรือมีการสะสมของ CO_2 ภายในห้องก่อนที่ระบบจะเพิ่มอัตราการระบายอากาศ การกระจายตัวของข้อมูลและกราฟความถี่สะสมแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้ตลอดช่วงเวลาการศึกษา แม้ว่าจะมีเหตุการณ์ที่เกิดค่าพีคในบางช่วงเวลาของการใช้งานก็ตาม



ภาพที่ 4-27 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในอาคารในช่วง 7 วันแรกและตลอดระยะเวลา 91 วัน

สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในอาคาร ดังแสดงในภาพที่ 4-27 พบว่าค่าความชื้นมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศภายนอกและฤดูกาล โดยในบางช่วงเวลามีค่าความชื้นสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรในการควบคุมระบบระบายอากาศในงานวิจัยนี้ แต่ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดเพิ่มเติมเพื่อประเมินสภาพแวดล้อมภายในอาคารซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านความชื้นยังคงเป็นข้อจำกัดของการระบายอากาศในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น และอาจเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาระบบควบคุมในอนาคต

โดยสรุป ผลการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารยืนยันว่าแบบจำลอง DCV สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานและระดับความเข้มข้นของ CO_2 ได้อย่างเหมาะสม พร้อมทั้งรักษาคุณภาพอากาศให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตลอดระยะเวลาการจำลอง 91 วัน แม้ว่าจะมีการนำเงื่อนไขข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกจริงและระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกันก็ตาม

4.7.5 การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานระหว่าง Mode A และ Mode B

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบระบายอากาศแบบควบคุมตามความต้องการร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ทำการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานภายใต้ Mode A ซึ่งระบบปรับอากาศทำงานต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการจำลอง และ Mode B ซึ่งระบบทำงานเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานภายในอาคาร โดยเปรียบเทียบผลด้านการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับกรณีฐาน S0 ตลอดระยะเวลาการศึกษา 3 เดือน



ภาพที่ 4-28 ผลการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายรายเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐาน S0 ภายใต้ Mode A และ Mode B

จากภาพที่ 4-28 พบว่า Mode A ให้ผลการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายแตกต่างกันในแต่ละกรณีศึกษา โดยเฉพาะกรณี S1 และ S2 ซึ่งบางเดือนมีค่าการประหยัดติดลบเมื่อเทียบกับ S0 แสดงให้เห็นว่าการเปิดระบบปรับอากาศและระบบระบายอากาศอย่างต่อเนื่องตลอดวัน แม้ว่าจะมีการประยุกต์ใช้ระบบ DCV และพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมด้วย แต่ยังคงมีการใช้พลังงานรวมสูงกว่ากรณีฐานในบางช่วงเวลา

ในทางตรงกันข้าม ผลการวิเคราะห์ภายใต้ Mode B แสดงให้เห็นว่ากรณี S2 ให้ค่าการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายเป็นบวกอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งสามเดือน สะท้อนให้เห็นว่าการควบคุมการทำงานของระบบตามช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานร่วมกับการควบคุมการระบายอากาศแบบ DCV สามารถลดการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการระบายอากาศแบบอัตราคงที่ (S1) และการระบายอากาศตามธรรมชาติ (S0)

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย พบว่าทั้งสองตัวชี้วัดมีพฤติกรรมสอดคล้องกัน กล่าวคือ กรณีที่สามารถลดการใช้พลังงานได้มาก จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดลงในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดภาระการทำงานของระบบปรับอากาศและพัดลมระบายอากาศส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบ

ตารางที่ 4-14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบภายใต้ Mode A และ Mode B

ประเด็น	Mode A	Mode B
การทำงานของระบบปรับอากาศ	ทำงานต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการจำลอง	ทำงานเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน
การใช้พลังงานรวม	สูงกว่า	ต่ำกว่า
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	สูงกว่า	ต่ำกว่า
การใช้ประโยชน์พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Utilization)	สูงกว่า	ต่ำกว่า
การควบคุมความเข้มข้นของ CO_2	สามารถควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	สามารถควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
ผลการประหยัดพลังงานโดยรวม	จำกัดในบางกรณี	มีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยเฉพาะกรณี S2
ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน	อาคารที่มีการใช้งานต่อเนื่องตลอดวัน	อาคารสำนักงานที่มีช่วงเวลาการใช้งานชัดเจน

จากผลการเปรียบเทียบโดยรวม สามารถสรุปได้ว่า Mode A มีข้อได้เปรียบด้านการใช้ประโยชน์พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากระบบมีความต้องการพลังงานอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ อย่างไรก็ตามการทำงานต่อเนื่องของระบบส่งผลให้มีการใช้พลังงานรวมและค่าใช้จ่ายสูงกว่า

ในขณะที่ Mode B แม้จะมีสัดส่วนการใช้ประโยชน์พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่า แต่สามารถลดการใช้พลังงานรวมของระบบได้มากกว่า เนื่องจากระบบทำงานเฉพาะในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานจริง และระบบ DCV สามารถปรับอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งาน ระดับความเข้มข้นของ CO_2 และเงื่อนไขคุณภาพอากาศภายนอก ส่งผลให้กรณี S2 ภายใต้ Mode B ให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุดทั้งด้านการใช้พลังงาน ค่าใช้จ่าย และการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคาร

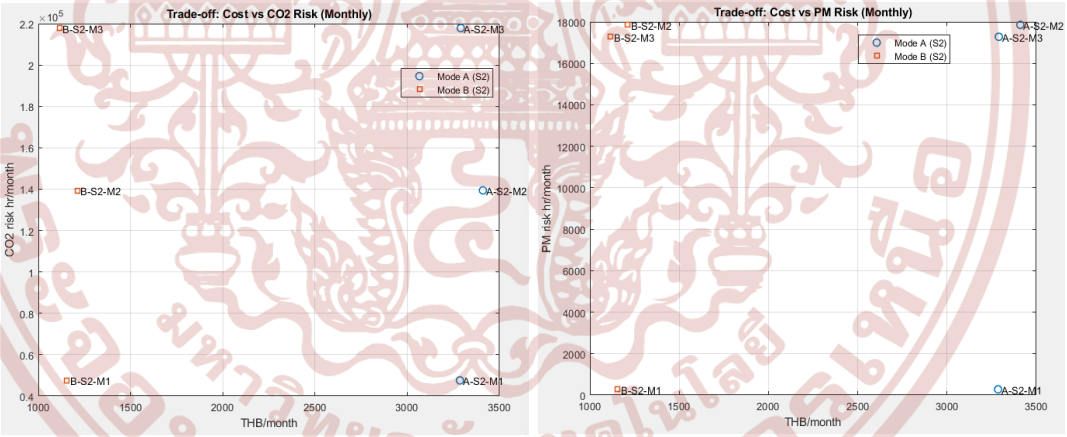
ดังนั้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การกำหนดรูปแบบการทำงานของระบบให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานอาคารมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไม่น้อยไปกว่าการเลือกใช้กลยุทธ์การควบคุมการระบายอากาศ และเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ระบบ DCV ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแสดงศักยภาพได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

4.7.6 การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานระหว่าง Mode A และ Mode B

การประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศไม่ควรพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานหรือค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเท่านั้น เนื่องจากการลดการทำงานของระบบระบายอากาศอาจเพิ่มความเสี่ยงจากการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคาร ขณะเดียวกัน การนำอากาศภายนอกเข้ามาระบายอากาศในช่วงที่มีความเข้มข้น $PM_{2.5}$ สูงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายด้านพลังงานกับตัวชี้วัดความเสี่ยงด้าน CO_2 และ $PM_{2.5}$ เพื่อประเมินความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพด้านพลังงานและคุณภาพอากาศภายในอาคาร

ในการวิเคราะห์นี้ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรายเดือนถูกใช้เป็นตัวแทนของสมรรถนะด้านพลังงาน ส่วนความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศพิจารณาจากระยะเวลาที่ค่า CO_2 และ $PM_{2.5}$ สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยกรณีศึกษาที่เหมาะสมควรมีทั้งค่าใช้จ่ายและระยะเวลาความเสี่ยงอยู่ในระดับต่ำ อย่างไรก็ตาม จุดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดอาจไม่ใช่กรณีที่ให้คุณภาพอากาศดีที่สุดเสมอไป จึงต้องพิจารณาผลทั้งสองด้านร่วมกัน

(ก) (ข)



ภาพที่ 4-29 Trade-off แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน
(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายกับความเสี่ยงจาก CO_2
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายกับความเสี่ยงจาก $PM_{2.5}$

จากภาพที่ 4-29 (ก) พบว่าแต่ละกรณีศึกษามีตำแหน่งแตกต่างกันตามค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่ความเข้มข้น CO_2 สูงกว่าเกณฑ์ กรณีที่ระบบทำงานต่อเนื่องภายใต้ Mode A มีแนวโน้มรักษาความเสี่ยงด้าน CO_2 ให้อยู่ในระดับต่ำกว่า เนื่องจากระบบปรับอากาศและการระบายอากาศทำงานเป็นระยะเวลานานกว่า แต่ต้องแลกกับค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม

Mode B สามารถลดค่าใช้จ่ายได้จากการจำกัดการทำงานของระบบเฉพาะช่วงที่มีผู้ใช้งาน แต่บางกรณีอาจมีความเสี่ยงด้าน CO_2 เพิ่มขึ้นจากระยะเวลาการระบายอากาศที่ลดลง

อย่างไรก็ตาม ระบบ S2 ภายใต้ Mode B สามารถลดข้อจำกัดดังกล่าวได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากระบบ DCV ปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนผู้ใช้งานและความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง จึงสามารถลดการใช้พลังงานในช่วงที่ไม่มีความต้องการ พร้อมเพิ่มการระบายอากาศเมื่อระดับ CO_2 สูงขึ้น ผลดังกล่าวทำให้ S2 ภายใต้ Mode B มีแนวโน้มให้ความสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายและการควบคุม CO_2 ที่เหมาะสมกว่าการระบายอากาศแบบอัตราคงที่

สำหรับภาพที่ 4-29 (ข) ความเสี่ยงด้าน $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขคุณภาพอากาศภายนอกและตรรกะการควบคุมการระบายอากาศของระบบ ในกรณีที่ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ภายนอกสูงกว่าเกณฑ์ ระบบจะจำกัดหรือหยุดการนำอากาศภายนอกเข้าสู่ห้อง เพื่อลดโอกาสนำฝุ่นละอองจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม การลดการระบายอากาศในช่วงดังกล่าวอาจทำให้ CO_2 สะสมเพิ่มขึ้น จึงเกิดข้อแลกเปลี่ยนระหว่างการลดความเสี่ยงจาก $PM_{2.5}$ และการควบคุม CO_2 ภายในห้อง

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การควบคุมระบบโดยใช้ตัวแปรเพียงชนิดเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการรักษาคุณภาพอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมจริง การควบคุมด้วย CO_2 ช่วยให้ระบบตอบสนองต่อจำนวนผู้ใช้งาน ขณะที่เงื่อนไข $PM_{2.5}$ ช่วยป้องกันการนำอากาศภายนอกที่มีคุณภาพต่ำเข้าสู่อาคาร แต่การให้ความสำคัญกับเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งมากเกินไปอาจเพิ่มความเสี่ยงอีกด้านหนึ่งได้

โดยสรุป กรณีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดไม่จำเป็นต้องเป็นกรณีที่ให้คุณภาพอากาศดีที่สุด และกรณีที่ควบคุมความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศได้ต่ำที่สุดอาจต้องใช้พลังงานมากขึ้น ภายใต้เงื่อนไขของกรณีศึกษานี้ ระบบ S2 ภายใต้ Mode B แสดงแนวโน้มเป็นทางเลือกที่ให้สมดุลระหว่างการลดค่าใช้จ่าย การควบคุม CO_2 และการหลีกเลี่ยงการนำ $PM_{2.5}$ จากภายนอกเข้าสู่อาคารได้เหมาะสมกว่ากรณีอื่น ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นผลภายใต้ข้อมูลสภาพแวดล้อม ตารางผู้ใช้งาน และค่าเกณฑ์ควบคุมที่กำหนดในการจำลองเท่านั้น

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นเครื่องมือในการจำลองและประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้รูปแบบการใช้งานห้องที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความสามารถในการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารควบคู่กับการลดการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ

งานวิจัยได้เปรียบเทียบกลยุทธ์การระบายอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ การระบายอากาศตามธรรมชาติ (S0) การระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ (S1) และระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 (S2) พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ประเมินผลภายใต้รูปแบบการใช้งานห้อง D1–D3 วิเคราะห์ผลด้านคุณภาพอากาศและการใช้พลังงาน รวมถึงศึกษาความอ่อนไหวของพารามิเตอร์สำคัญ นอกจากนี้ ยังได้ดำเนินการกรณีศึกษาเพิ่มเติมโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองร่วมกับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลองภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

ผลการวิจัยสามารถสรุป อภิปราย และนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยในอนาคตได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) ที่พัฒนาขึ้นสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก ทั้งในด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศ โดยการศึกษาครอบคลุมการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศภายใต้รูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่สำคัญ ตลอดจนการศึกษากรณีเพิ่มเติมโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองร่วมกับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการพัฒนาและการตรวจสอบแบบจำลอง

งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กได้สำเร็จ โดยประยุกต์ใช้หลักสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Mass Balance Theory) ร่วมกับการจำลองแบบพลวัตในโปรแกรม MATLAB/Simulink ภายใต้สมมติฐานของห้องแบบ Single-zone และการผสมของอากาศภายในห้องแบบสม่ำเสมอ (Well-mixed Assumption) แบบจำลองสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารตามจำนวนผู้ใช้งาน อัตราการระบายอากาศ และสภาวะการทำงานของระบบระบายอากาศได้อย่างต่อเนื่อง

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคาร การตอบสนองของอัตราการระบายอากาศ และลักษณะการทำงานของระบบ DCV มีความสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยความเข้มข้น CO_2 เพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งาน ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และสามารถรักษาระดับ CO_2 ให้อยู่ใกล้ค่าที่กำหนดได้ภายใต้การควบคุมของระบบ DCV ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบระบายอากาศตามความต้องการที่รายงานไว้ในงานวิจัยอ้างอิง

นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบแบบจำลองในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การตอบสนองของสมการสมดุลมวล การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายใต้สถานการณ์การใช้งานที่แตกต่างกัน และการตอบสนองของตรรกะการควบคุมระบบ DCV แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมของระบบได้อย่างสมเหตุสมผล และสามารถนำไปใช้ประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมได้อย่างน่าเชื่อถือ

ดังนั้น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาสมรรถนะของระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 ในห้องสำนักงานขนาดเล็ก และสามารถประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาการควบคุมระบบระบายอากาศหรือการพัฒนาต้นแบบในงานวิจัยต่อไป

5.1.2 ผลการประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศ

ผลการประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ การระบายอากาศตามธรรมชาติ (S0) การระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ (S1) และระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (S2) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานอย่างชัดเจน โดยสรุปผลการประเมินตัวชี้วัดสำคัญ (Key Performance Indicators: KPIs) แสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สรุปผลเปรียบเทียบสมรรถนะของกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานห้องเดียวกัน

ตัวชี้วัด	**S0 Passive/Natural Infiltration**	**S1 Fixed Mechanical Ventilation**	**S2 CO_2 - Based DCV**
Peak CO_2 (ppm)	3362.5	1019.1	1025.4
Average CO_2 during occupied period (ppm)	2038.2	693.49	822.06
CO_2 >1000 ppm during occupied period (hr)	26.683	0.2833	0.4167
Average ACH during occupied period (h^{-1})	0.31	2.4167	1.6017
Fan Energy (kWh)	-	0.9300	0.6855
Electricity Cost (THB)	-	3.8595	2.8448
Energy Saving compared with S1 (%)	-	0	26.29

จากตารางที่ 5-1 พบว่า การระบายอากาศตามธรรมชาติ (S0) แม้ไม่มีการใช้พลังงานของพัดลม แต่มีสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศต่ำที่สุด โดยมีค่า Peak CO_2 สูงถึง 3,362.5 ppm และมีค่าเฉลี่ย CO_2 ระหว่างช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานเท่ากับ 2,038.2 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์คุณภาพอากาศที่แนะนำอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีค่า CO_2 Risk Hour เท่ากับ 26.683 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการระบายอากาศตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องสำนักงานได้อย่างเพียงพอ

สำหรับระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ (S1) สามารถควบคุมคุณภาพอากาศได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย CO_2 ระหว่างช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานลดลงเหลือ 693.49 ppm และมีค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1,019.1 ppm ขณะที่ค่า CO_2 Risk Hour ลดลงเหลือเพียง 0.2833 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวต้องเดินเครื่องพัดลมตลอดช่วงเวลาการใช้งาน ส่งผลให้มีการใช้พลังงานของพัดลม 0.9300 kWh และมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 3.8595 บาท ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้พัดลม

ในกรณีของระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 (S2) พบว่าสามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับ S1 โดยมีค่าเฉลี่ย CO_2 ระหว่างช่วงเวลา

ที่มีผู้ใช้งานเท่ากับ 822.06 ppm และมีค่า Peak CO_2 เท่ากับ 1,025.4 ppm ขณะที่ค่า CO_2 Risk Hour มีค่าเพียง 0.4167 ชั่วโมง ซึ่งยังคงอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับกรณี S0 แม้ว่าค่า Peak CO_2 ของ S2 จะสูงกว่า S1 เพียง 6.3 ppm แต่ระบบ S2 สามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมลงเหลือ 0.6855 kWh และลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเหลือ 2.8448 บาท คิดเป็นการประหยัดพลังงาน 26.29% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมตามความต้องการสามารถรักษาคุณภาพอากาศในระดับใกล้เคียงกับการระบายอากาศแบบคงที่ โดยใช้พลังงานน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ (Sensitivity Analysis) ถูกดำเนินการเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการควบคุมระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (S2) ต่อสมรรถนะของระบบ ทั้งในด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลม โดยพิจารณาพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ อัตราการระบายอากาศขั้นต่ำ (ACH_min) อัตราการระบายอากาศสูงสุด (ACH_max) ค่า CO_2 High-on Setpoint และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด (Peak Occupancy)

ตารางที่ 5-2 สรุปผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์หลักของระบบ S2

พารามิเตอร์	**ผลกระทบหลักต่อระบบ**	**แนวโน้มที่พบจากการจำลอง**	**ความสำคัญเชิงวิศวกรรม**
ACH_min	ค่าเฉลี่ย CO_2, P95 CO_2, CO_2 Risk Hour และพลังงานพัดลม	เมื่อ ACH_min เพิ่มขึ้น ค่า Average CO_2 และ CO_2 Risk Hour ลดลง และระยะเวลาทำงาน High speed ลดลง	มีผลต่อการควบคุม CO_2 ในช่วงการใช้งานทั่วไป และส่งผลต่อพลังงานของระบบ
ACH_max	Peak CO_2 และ CO_2 Risk Hour	เมื่อ ACH_max เพิ่มขึ้น ค่า Peak CO_2 และ CO_2 Risk Hour ลดลงอย่างชัดเจน	เป็นพารามิเตอร์สำคัญต่อความสามารถสูงสุดของระบบในการรองรับช่วงภาระสูง
CO_2 high-on setpoint	จังหวะการเปลี่ยนเป็น High speed และ CO_2 Risk Hour	เมื่อ setpoint สูงขึ้น พลังงานลดลงเล็กน้อย แต่ความเสี่ยงที่ CO_2 เกินเกณฑ์เพิ่มขึ้น	ใช้ปรับสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศและการประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ผลกระทบหลักต่อระบบ	แนวโน้มที่พบจากการจำลอง	ความสำคัญเชิงวิศวกรรม
Peak Occupancy	Peak CO_2, CO_2 Risk Hour, พลังงาน และ Saving	เมื่อจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเพิ่มขึ้น ค่า CO_2 และพลังงานเพิ่มขึ้น ขณะที่ Saving ลดลง	เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อสมรรถนะของระบบ S2

จากตารางที่ 5-2 พบว่า พารามิเตอร์แต่ละตัวมีผลต่อสมรรถนะของระบบในลักษณะที่แตกต่างกัน โดย ACH_min ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความเข้มข้น CO_2 ค่า CO_2 Risk Hour และการใช้พลังงานของพัดลม เนื่องจากเป็นอัตราการระบายอากาศพื้นฐานของระบบ การเพิ่มค่า ACH_min ช่วยลดการสะสมของ CO_2 ภายในอาคาร แต่ในขณะเดียวกันอาจส่งผลให้การใช้พลังงานของพัดลมเพิ่มขึ้น

ในส่วนของ ACH_max พบว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อการควบคุมค่า Peak CO_2 และ CO_2 Risk Hour โดยการเพิ่มค่า ACH_max ทำให้ระบบสามารถระบายอากาศได้มากขึ้นในช่วงที่มีผู้ใช้งานหนาแน่น ส่งผลให้ค่า Peak CO_2 ลดลงอย่างชัดเจน และช่วยรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารในช่วงที่เกิดภาระการใช้งานสูง

สำหรับ CO_2 High-on Setpoint เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนระดับการทำงานของพัดลม การเลือกค่า Setpoint ที่เหมาะสมมีผลต่อการสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศและการใช้พลังงาน โดยหากกำหนดค่า Setpoint สูงเกินไป แม้ว่าจะช่วยลดการใช้พลังงานของพัดลมได้เล็กน้อย แต่มีแนวโน้มทำให้ค่า CO_2 ภายในอาคารสูงขึ้นและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิด CO_2 Risk Hour

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า จำนวนผู้ใช้งานสูงสุด (Peak Occupancy) เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อสมรรถนะของระบบ เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิด CO_2 ภายในอาคาร เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ค่า Peak CO_2 ค่า CO_2 Risk Hour และการใช้พลังงานของพัดลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่สัดส่วนการประหยัดพลังงานของระบบลดลง เนื่องจากระบบต้องเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาคุณภาพอากาศให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงให้เห็นว่า ACH_min, ACH_max, CO_2 High-on Setpoint และ Peak Occupancy ล้วนเป็นพารามิเตอร์ที่มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ DCV ดังนั้นผลการศึกษาดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับ

การออกแบบและปรับแต่งระบบ DCV ในห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อให้เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งานและลักษณะการใช้งานของอาคารแต่ละประเภท

5.1.4 ผลจากกรณีศึกษาเพิ่มเติม

เพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลองภายใต้สภาวะการใช้งานจริง งานวิจัยได้ดำเนินกรณีศึกษาเพิ่มเติมโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองร่วมกับข้อมูลสภาพแวดล้อมตลอดระยะเวลา 91 วัน ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลสภาพอากาศจากข้อมูล NASA POWER และข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ จากระบบ Air4Thai โดยกำหนดให้ระบบระบายอากาศทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) ภายใต้รูปแบบการทำงานของระบบปรับอากาศ 2 รูปแบบ ได้แก่ Mode A (เปิดระบบปรับอากาศต่อเนื่อง) และ Mode B (เปิดระบบปรับอากาศเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองกับสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

ผลการศึกษาด้านพลังงานและค่าใช้จ่ายพบว่า รูปแบบการทำงานของระบบปรับอากาศมีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบระบายอากาศ โดย Mode B มีการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วงประมาณ 9–10 kWh/day ขณะที่ Mode A มีการใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 26–27 kWh/day ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อวันของ Mode B ต่ำกว่า Mode A ในทุกกรณีศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเปิดใช้งานระบบปรับอากาศเฉพาะช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานสามารถลดการใช้พลังงานและต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยยังคงรักษาระดับคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละเดือน และสามารถนำมาใช้ชดเชยการใช้พลังงานของพัดลมระบายอากาศได้บางส่วน โดยอัตราการใช้ประโยชน์พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Utilization) อยู่ในช่วงประมาณ 43–59% ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งานอาคารและสภาพอากาศในแต่ละเดือน ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า และเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบระบายอากาศได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมความเข้มข้นของ CO_2 ภายในอาคาร

นอกจากนี้ กรณีศึกษาเพิ่มเติมยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงาน (Indoor Air Quality–Energy Trade-off) โดยการลดการใช้พลังงานไม่ควรพิจารณาเพียงด้านต้นทุนเท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงการรักษาระดับความเข้มข้นของ CO_2 ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ รวมถึงข้อจำกัดจากสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ซึ่งมีผลต่อการตัดสินใจนำอากาศภายนอกเข้าสู่อาคาร ดังนั้นผลการศึกษาจึงยืนยันว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารการใช้พลังงานและการประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียนได้อย่างเหมาะสมภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

ตารางที่ 5-3 สรุปข้อค้นพบสำคัญจากกรณีศึกษาเพิ่มเติม

ประเด็นการศึกษา	ข้อค้นพบสำคัญ	นัยสำคัญเชิงวิศวกรรม
การประยุกต์ใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมจริง	แบบจำลองสามารถประเมินผลโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศและ $PM_{2.5}$ ต่อเนื่องตลอด 91 วัน	แสดงศักยภาพของแบบจำลองสำหรับการประยุกต์ใช้กับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริง
ผลด้านพลังงานและค่าใช้จ่าย	Mode B มีการใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 9–10 kWh/day ต่ำกว่า Mode A ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 26–27 kWh/day ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อวันลดลงในทุกกรณีศึกษา	การกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและลดต้นทุนการดำเนินงาน
ผลการใช้พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถชดเชยการใช้พลังงานของพัดลมได้บางส่วน โดยมีค่า PV Utilization อยู่ในช่วงประมาณ 43–59%	การใช้พลังงานหมุนเวียนช่วยลดการพึ่งพาโครงข่ายไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและรูปแบบการใช้งานอาคาร
ความสัมพันธ์ระหว่าง IAQ และพลังงาน	การลดการใช้พลังงานยังสามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อกำหนดกลยุทธ์การควบคุมที่เหมาะสมและพิจารณาข้อจำกัดด้าน $PM_{2.5}$ ร่วมด้วย	สนับสนุนการออกแบบระบบ DCV ที่คำนึงถึงคุณภาพอากาศ การใช้พลังงาน และสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารร่วมกัน

จากตารางที่ 5-3 จะเห็นได้ว่ากรณีศึกษาเพิ่มเติมช่วยยืนยันศักยภาพของแบบจำลองในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริง โดยสามารถรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคาร การใช้พลังงาน และการใช้พลังงานหมุนเวียนได้อย่างเหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบและประเมินระบบระบายอากาศของอาคารจริงในอนาคต

โดยสรุป ผลการศึกษาทั้งจากการประเมินสมรรถนะของระบบ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ และกรณีศึกษาเพิ่มเติม แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของแบบจำลองในการนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบและประเมินระบบระบายอากาศของอาคารในอนาคต

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 การอภิปรายผลด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) สามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีสมรรถนะใกล้เคียงกับระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ (S1) แม้ว่าจะใช้พลังงานของพัดลมน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากระบบ DCV สามารถปรับอัตราการระบายอากาศให้สอดคล้องกับจำนวนผู้ใช้งานและระดับความเข้มข้นของ CO_2 ภายในอาคาร ทำให้การระบายอากาศเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อมีความจำเป็นส่งผลให้สามารถลดการสะสมของ CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดการระบายอากาศเกินความจำเป็นในช่วงที่ภาระการใช้งานต่ำ

ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับหลักสมดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Mass Balance Theory) ซึ่งอธิบายว่าความเข้มข้นของ CO_2 ภายในอาคารขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานและอัตราการระบายอากาศ เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น อัตราการเกิด CO_2 จะเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ระบบ DCV เพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อลดการสะสมของ CO_2 ภายในอาคาร ในทางกลับกัน เมื่อจำนวนผู้ใช้งานลดลง ระบบจะลดอัตราการระบายอากาศลงโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้สามารถรักษาคุณภาพอากาศพร้อมลดการใช้พลังงานของพัดลมได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Persily and de Jonge (2017) ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด CO_2 ของผู้ใช้งานกับการออกแบบระบบระบายอากาศ และสอดคล้องกับ Ahn et al. (2022) ที่แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสมดุลมวลสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น CO_2 ภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบกับการระบายอากาศตามธรรมชาติ (S0) พบว่าการระบายอากาศตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไม่สามารถรองรับภาระการใช้งานของห้องสำนักงานได้ ส่งผลให้เกิดการสะสมของ CO_2 ภายในอาคารเป็นเวลานาน และมีค่า CO_2 Risk Hour สูงกว่าระบบที่ใช้การระบายอากาศเชิงกลอย่างชัดเจน ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่าการอาศัยการรั่วไหลของอากาศหรือการระบายอากาศตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับอาคารสำนักงานที่มีจำนวนผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาทำงาน และจำเป็นต้องมีระบบควบคุมการระบายอากาศที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้งานจริง

นอกจากนี้ แม้ว่าระบบ S1 จะสามารถควบคุมความเข้มข้นของ CO_2 ได้ดีกว่า S2 เล็กน้อย แต่ความแตกต่างของค่า Peak CO_2 ระหว่างทั้งสองระบบมีเพียงประมาณ 6 ppm ขณะที่ระบบ S2 สามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมได้มากกว่า 26% เมื่อเปรียบเทียบกับ S1 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการสามารถรักษาคุณภาพอากาศให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับ

ระบบระบายอากาศแบบคงที่ โดยใช้พลังงานน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของระบบ Demand-Controlled Ventilation ที่มุ่งสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและประสิทธิภาพด้านพลังงาน

ดังนั้น ผลการศึกษาจึงยืนยันว่าการใช้ความเข้มข้นของ CO_2 เป็นตัวแปรควบคุมอัตราการระบายอากาศเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยไม่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานเกินความจำเป็น

5.2.2 การอภิปรายผลด้านการใช้พลังงาน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุมความเข้มข้นของ CO_2 (S2) สามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ (S1) เนื่องจากระบบจะปรับอัตราการระบายอากาศให้สอดคล้องกับภาระการใช้งานจริงของอาคาร ทำให้พัดลมทำงานที่อัตราการไหลสูงเฉพาะในช่วงที่มีจำนวนผู้ใช้งานมาก หรือเมื่อระดับ CO_2 สูงกว่าค่าที่กำหนด ขณะที่ช่วงเวลาที่ภาระการใช้งานต่ำ ระบบสามารถลดอัตราการระบายอากาศลงได้ ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานโดยไม่กระทบต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Lu et al. (2022) และ Goyal et al. (2015) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการปรับอัตราการระบายอากาศตามความเข้มข้นของ CO_2 หรือรูปแบบการใช้งานพื้นที่สามารถลดการระบายอากาศเกินความจำเป็น และช่วยลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับการระบายอากาศในอัตราคงที่โดยอาศัยข้อมูลการใช้งานจริงเป็นตัวกำหนดการทำงานของระบบแทนการจ่ายอากาศในอัตราคงที่ตลอดเวลา ดังนั้น การควบคุมอัตราการระบายอากาศตามความต้องการจึงเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร พร้อมทั้งยังสามารถรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้

5.2.3 การอภิปรายผลด้านความอ่อนไหวของพารามิเตอร์

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบ DCV ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำ อัตราการระบายอากาศสูงสุด ค่า CO_2 High-on Setpoint และจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดร่วมกัน โดยค่าอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำมีบทบาทในการควบคุมการสะสมของ CO_2 ในช่วงภาระต่ำ ขณะที่อัตราการระบายอากาศสูงสุดกำหนดความสามารถของระบบในการรองรับช่วงที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก ส่วนการกำหนดค่า CO_2 High-on Setpoint ที่ต่ำเกินไปอาจทำให้พัดลมเปลี่ยนไปทำงานที่ความเร็วสูงบ่อยและใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหากกำหนดค่าสูงเกินไป ระบบอาจตอบสนองล่าช้าและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกินเกณฑ์ CO_2

จำนวนผู้ใช้งานสูงสุดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อภาระการเกิด CO_2 ภายในห้อง เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ระบบจำเป็นต้องเพิ่มอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาคุณภาพอากาศ จึงสะท้อนว่าการออกแบบระบบ DCV ไม่ควรพิจารณาเฉพาะสภาวะการใช้งานเฉลี่ย แต่ต้องรองรับจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นด้วย ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของ Persily and de Jonge (2017) ซึ่งระบุว่าอัตราการเกิด CO_2 ภายในอาคารสัมพันธ์กับจำนวนผู้ใช้งานและลักษณะกิจกรรม และสอดคล้องกับแนวทางของ Goyal et al. (2015) ที่ให้ความสำคัญกับรูปแบบการใช้งานพื้นที่ในการกำหนดกลยุทธ์ควบคุมการระบายอากาศ

ดังนั้น การเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบ DCV จึงต้องพิจารณาเป็นชุดร่วมกัน เพื่อสร้างสมดุลระหว่างความสามารถในการควบคุม CO_2 ความไวในการตอบสนองและการใช้พลังงานของพัดลม โดยผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับตั้งระบบให้เหมาะสมกับขนาดห้อง จำนวนผู้ใช้งาน และรูปแบบการใช้งานจริงของอาคารได้

5.2.4 การอภิปรายผลจากกรณีศึกษาเพิ่มเติม

ผลจากกรณีศึกษาเพิ่มเติมที่ใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมจริงตลอดช่วงเวลา 91 วัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศภายใต้ความแปรผันของสภาพอากาศภายนอกและระดับ $PM_{2.5}$ ได้ โดยการใช้ข้อมูลจาก NASA POWER และ Air4Thai ช่วยให้การประเมินมีความใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานจริงมากกว่าการใช้เงื่อนไขคงที่ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ $PM_{2.5}$ ทำหน้าที่เป็นเงื่อนไขขอบเขตภายนอกไม่ได้ใช้เป็นตัวแปรควบคุมหลักของระบบ ซึ่งยังคงใช้ความเข้มข้นของ CO_2 เป็นตัวกำหนดการระบายอากาศ

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการทำงานของระบบปรับอากาศ พบว่า Mode B ซึ่งทำงานตามช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานสามารถลดการใช้พลังงานได้มากกว่า Mode A ที่ทำงานต่อเนื่อง เนื่องจากช่วยลดการใช้พลังงานในช่วงที่ไม่มีภาระการใช้งาน ผลดังกล่าวสะท้อนว่าการกำหนดตารางการทำงานให้สอดคล้องกับรูปแบบการใช้งานจริงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน และสนับสนุนแนวคิดการควบคุมระบบอาคารตามการใช้งานพื้นที่

นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยทดแทนพลังงานไฟฟ้าบางส่วนที่พัดลมต้องการและลดการพึ่งพาพลังงานจากระบบสายส่งได้ แต่เนื่องจากไม่มีระบบกักเก็บพลังงาน ความสามารถในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงขึ้นอยู่กับความสอดคล้องระหว่างช่วงเวลาการผลิตไฟฟ้ากับช่วงเวลาการทำงานของพัดลม ดังนั้น การประเมินระบบจึงควรพิจารณาร่วมกันทั้งด้านคุณภาพอากาศ รูปแบบการใช้งานอาคาร และความพร้อมของพลังงานหมุนเวียน เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศและการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ควบคุมด้วยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2-Based Demand-Controlled Ventilation: DCV) สามารถประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานของพัดลมสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็กได้อย่างสมเหตุสมผล อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งานจริงและการพัฒนางานวิจัยในอนาคตมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

(1) ควรพัฒนาและทดสอบระบบต้นแบบในห้องสำนักงานจริง โดยติดตั้งเซนเซอร์ CO_2 ระบบควบคุม และพัดลมระบายอากาศจริง เพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับผลการจำลองจาก MATLAB/Simulink การทดสอบภาคสนามจะช่วยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและสามารถประเมินผลกระทบจากปัจจัยที่เกิดขึ้นจริง เช่น ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ ความล่าช้าในการตอบสนองของระบบ และพฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้อาคาร

(2) ควรขยายแบบจำลองให้สามารถพิจารณาการเปิด–ปิดประตู หน้าต่างหรือการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศตามเวลา เนื่องจากสภาพการใช้งานจริงมีความผันแปรมากกว่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง การเพิ่มปัจจัยดังกล่าวจะช่วยให้ผลการจำลองสะท้อนพฤติกรรมของอาคารได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

(3) ควรพัฒนาแบบจำลองไปสู่การวิเคราะห์แบบหลายโซน (Multi-zone) หรือใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของ CO_2 ภายในพื้นที่แต่ละตำแหน่ง เนื่องจากแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ใช้สมมติฐานแบบ Single-zone และ Well-mixed Air จึงไม่สามารถแสดงความแตกต่างของความเข้มข้น CO_2 ในแต่ละบริเวณของห้องได้

(4) สำหรับกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ควรศึกษาการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Energy Storage System: BESS) รวมถึงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และระบบบริหารจัดการพลังงาน เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้พลังงานหมุนเวียนให้เกิดประโยชน์สูงสุด และลดการพึ่งพาพลังงานจากระบบสายส่งในช่วงที่พลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ

(5) ควรศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมอัจฉริยะร่วมกับระบบ DCV เช่น การควบคุมแบบคาดการณ์ (Model Predictive Control: MPC) หรือการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) เพื่อคาดการณ์จำนวนผู้ใช้งาน สภาพอากาศ หรือแนวโน้มความเข้มข้นของ CO_2 ล่วงหน้า ซึ่งอาจช่วยให้ระบบสามารถปรับอัตราการระบายอากาศได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารควบคู่กับการลดการใช้พลังงาน

(6) ควรประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และผลตอบแทนจากการลงทุน ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบ DCV ไปใช้งานจริงในด้านเศรษฐศาสตร์ โดยวิเคราะห์ต้นทุนการติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) หรืออัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) รวมถึงเปรียบเทียบกับระบบระบายอากาศแบบคงที่ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจลงทุนและการประยุกต์ใช้ระบบในอาคารสำนักงานหรืออาคารประเภทอื่นในอนาคต

โดยสรุป ข้อเสนอแนะดังกล่าวเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาแบบจำลองและการประยุกต์ใช้ระบบ CO_2-Based DCV ในอนาคต เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการประเมินสมรรถนะภายใต้สภาพการใช้งานจริง และสนับสนุนการพัฒนาระบบระบายอากาศที่สามารถรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคาร การใช้พลังงาน และการใช้พลังงานหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. (2025*). Air4Thai.* https://air4thai.pcd.go.th

ภาษาอังกฤษ

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation and acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2025). *Indoor carbon dioxide. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*

Ahn, K. U., Kim, D.-W., Cho, K., Cho, D., Cho, H. M., & Chae, C.-U. (2022). *Hybrid model for forecasting indoor CO_2 concentration. Buildings, 12(10),1540.* https://doi.org/10.3390/buildings12101540

Alalawi, M., & Krarti, M. (2002). *Experimental evaluation of CO_2-based demand-controlled ventilation strategies. ASHRAE Transactions, 108, 307–317.*

ASHRAE. (2016). *Applying demand-controlled ventilation. ASHRAE Journal.*

Charlesworth, P. S. (1988). *Air exchange rate and airtightness measurement techniques - An application guide. Air Infiltration and Ventilation Centre.*

Chenari, B., Carrilho, J. D., & Gameiro da Silva, M. (2016). *Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1426–1447* https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074

Chenari, B., Lamas, F. B., Gaspar, A. R., & Gameiro da Silva, M. (2017). *Simulation of occupancy and CO_2-based demand-controlled mechanical ventilation strategies in an office room using EnergyPlus. Energy Procedia, 113, 51–57.* https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.049

Chenari, B., Saadatian, S., & Gameiro da Silva, M. (2025). Experimental assessment of demand-controlled ventilation strategies for energy efficiency and indoor air quality in office spaces. *Air, 3*(2), 17. https://doi.org/10.3390/air3020017

Coley, D. A., & Beisteiner, A. (2002). *Carbon dioxide levels and ventilation rates in schools. International Journal of Ventilation, 1(1), 45–52.* https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683622

Emmerich, S. J., & Persily, A. K. (2001). *State-of-the-art review of CO_2 demand controlled ventilation technology and application (NISTIR 6729). National Institute of Standards and Technology.* https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6729

Fisk, W. J., & De Almeida, A. T. (1998). *Sensor-based demand-controlled ventilation: A review. Energy and Buildings, 29(1), 35–45.* https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00029-2

Goyal, S., Barooah, P., & Middelkoop, T. (2015). *Experimental study of occupancy-based control of HVAC zones. Applied Energy, 140, 75–84.* https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.064

Jin, M., Bekiaris-Liberis, N., Weekly, K., Spanos, C. J., & Bayen, A. M. (2018). *Occupancy detection via environmental sensing. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15(2), 443–455.* https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2619720

Klimeš, L., Charvát, P., & Hejčík, J. (2018). Comparison of the Energy Conversion Efficiency of a Solar Chimney and a Solar PV-Powered Fan for Ventilation Applications. Energies, 11(4), 912. https://doi.org/10.3390/en11040912

Lai, C. M. (2006). Prototype development of the rooftop turbine ventilator powered by hybrid wind and photovoltaic energy. Energy and Buildings, 38(3), 174–180. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.004

Lu, T., Lü, X., & Viljanen, M. (2011). *A novel and dynamic demand-controlled ventilation strategy for CO_2 control and energy saving in buildings. Energy and Buildings, 43(9), 2499–2508.* https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.005

Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., & O'Neill, Z. (2022). *The nexus of the indoor CO_2 concentration and ventilation demands underlying CO_2-based demand-controlled ventilation in commercial buildings: A critical review. Building and Environment, 218, 109116.* https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109116

Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., & O'Neill, Z. (2022). *Advances in research and applications of CO_2-based demand-controlled ventilation in commercial buildings: A critical review of control strategies and performance evaluation. Building and Environment, 223, 109455.* https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109455

Mysen, M., Berntsen, S., Nafstad, P., & Schild, P. G. (2005). *Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools. Energyand Buildings, 37(12), 1234–1240.* https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.01.003

National Institute of Standards and Technology. (2022). QICO$_2$ indoor carbon dioxide metric analysis tool. National Institute of Standards and Technology.

National Aeronautics and Space Administration. (2025). NASA POWER Hourly API. https://power.larc.nasa.gov

National Institute of Standards and Technology. (2022). QICO$_2$ indoor carbon dioxide metric analysis tool. National Institute of Standards and Technology.

O'Neill, Z. D., Li, Y., Cheng, H.-C., Zhou, X., & Taylor, S. T. (2020). *Energy savings and ventilation performance from CO_2-based demand controlled ventilation: Simulation results from ASHRAE RP-1747. Science and Technology for the Built Environment, 26(3), 257–281.*

Persily, A. K. (2017). Indoor carbon dioxide as a metric of ventilation and IAQ: Yes or no or maybe? *NIST/AIVC Workshop.*

Persily, A. K. (2021). *Indoor Carbon Dioxide Metric Analysis Tool (NIST Technical Note 2213)*. National Institute of Standards and Technology.

Persily, A. K. (2022). *Development and application of an indoor carbon dioxide metric. Indoor Air, 32(7), e13059. https://doi.org/10.1111/ina.13059*

Persily, A. K., & de Jonge, L. (2017). *Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air, 27(5), 868–879. https://doi.org/10.1111/ina.12383*

Persily, A. K., & Polidoro, B. J. (2022). *Indoor carbon dioxide metric analysis tool (NIST Technical Note 2213). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2213*

Pistochini, T., Ellis, M., Meyers, F., Frasier, A., Cappa, C., & Bennett, D. (2023). *Method of test for CO_2-based demand control ventilation systems: Benchmarking the state-of-the-art and the undervalued potential of proportional-integral control. Energy and Buildings, 301, 113717. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113717*

Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2003). *Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. Indoor Air, 13(3), 237–245. https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x*

World Health Organization. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. World Health Organization.*

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจำเพาะของพัดลมระบายอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

KRUGER

MTD Series

MIXED FLOW IN-LINE DUCT FAN



พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

Mixed Flow In-Line Duct Fan – **MTD Series**

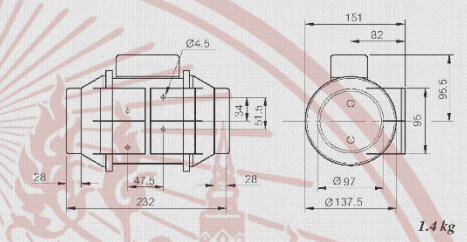
KRUGER

- *Specifically designed for direct connection with industrial circular ducting of standard diameter.*
- *Incorporate a powerful motor which is factory matched to a mixed flow impeller.*
- *Delivers high airflow performance with minimum noise generation and high static pressure typically found in ducted ventilation systems.*
- *Model 200 and below are manufactured in tough reinforced plastic, while models 250 & 315 in steel casing. All models are finished in tough epoxy-polyester paint coating.*
- *Impeller blades of model 200 & below are moulded in tough ABS plastic, models 250 & 315 are constructed from pressed galvanised sheet steel.*
- *Easy installation and maintenance - support brackets allow the motor and impeller assembly to be fitted or removed without dismantling the adjacent ducting.*
- *Fitted with direct connection two speed motors as standard with thermal overload protection. All motors are suitable for speed control regulation using electronic or auto-transformer.*
- *Max. operating temperature 140 °C.*

Kruger Ventilation Industries Asia Co., Ltd certifies that the **MTD series** shown herein is licensed to bear the AMCA Seal. The ratings shown are based on tests and procedures performed in accordance with AMCA publication 211 and AMCA publication 311 and comply with the requirements of the AMCA Certified Ratings Program. Models MTD 100/2-6 and MTD 125-6 are not licensed by AMCA International

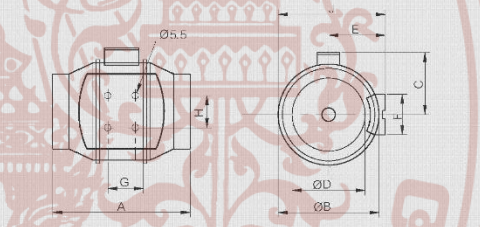
Dimension

MTD 100/1



1.4 kg

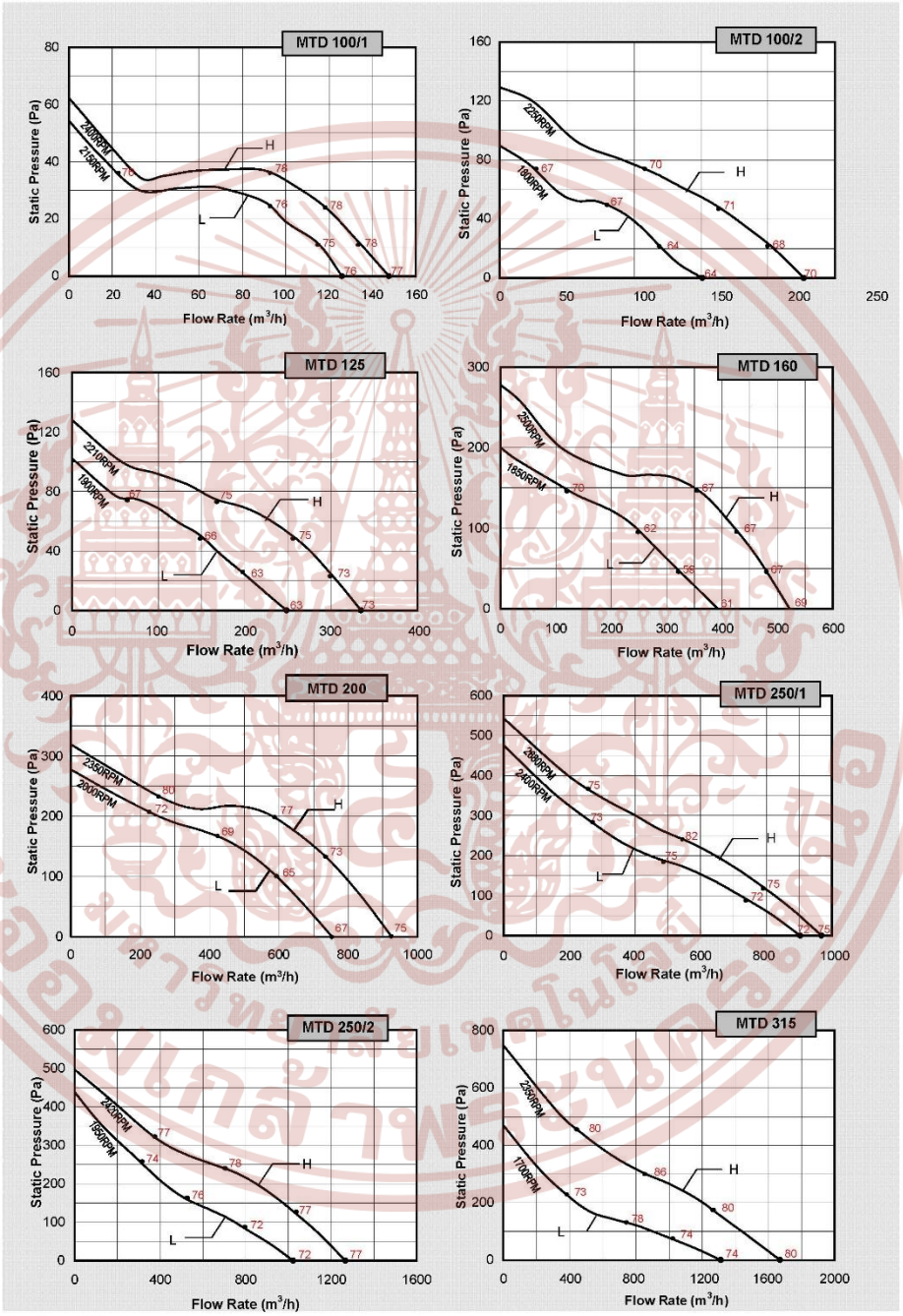
MTD 100/2 -315



Model	A	ØB	C	ØD	E	F	G	H	J	kg
MTD 100/2	303	176	115	97	100	90	80	60	188	2.0
MTD 100/2-6	303	176	115	97	100	90	80	60	188	2.0
MTD 125	258	176	115	123	100	90	80	60	188	2.0
MTD 125-6	258	176	115	123	100	90	80	60	188	2.0
MTD 160	295	200	127	157	112	130	80	60	212	4.9
MTD 200	302	217	141	198	124	140	100	94	232.5	4.9
MTD 250	386	272	192	248	155	168	145	140	291	9.4
MTD 315	450	336	224	312	188	210	182	178	356	14.0

All dimensions in mm.

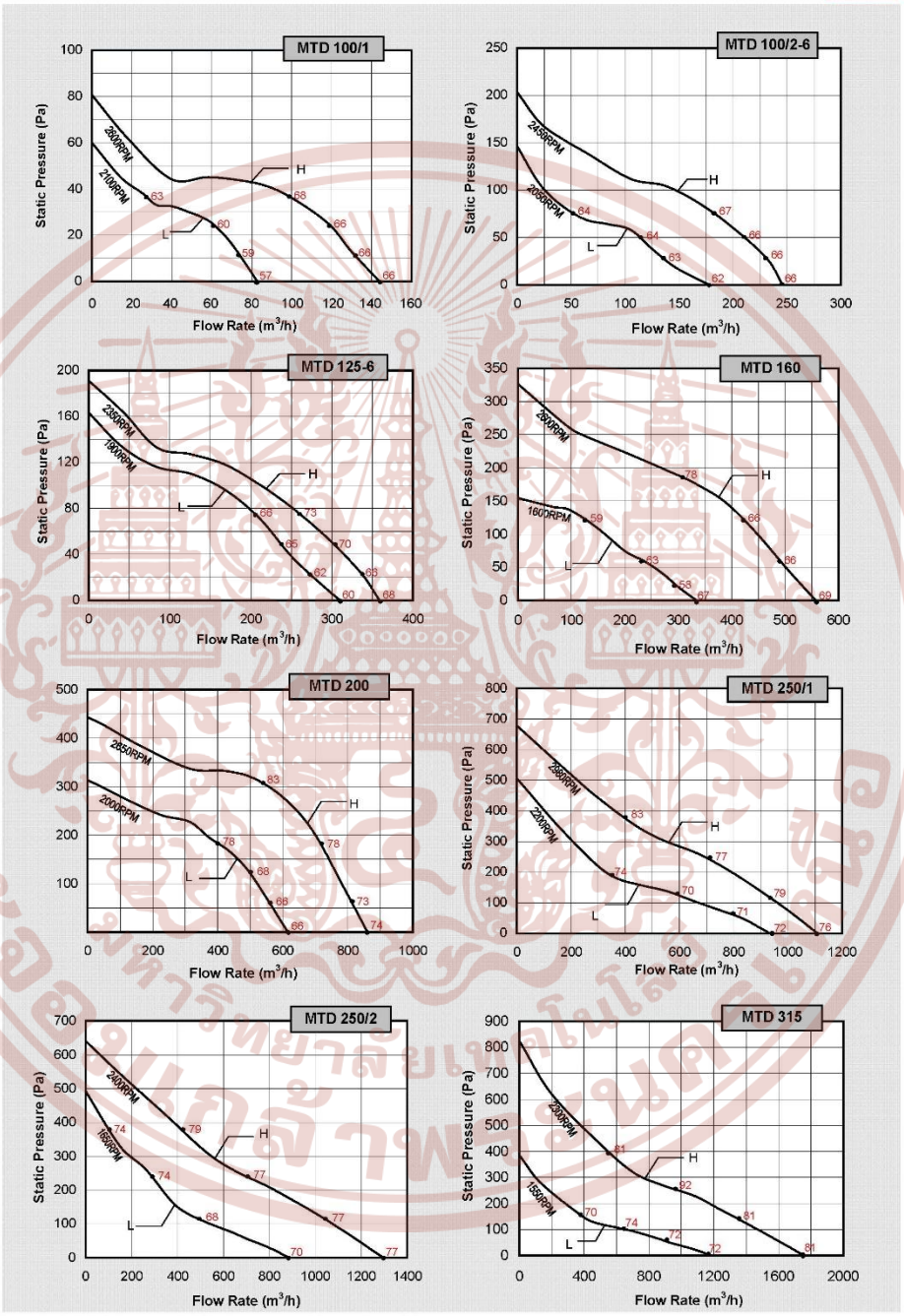
Performance Data - 50Hz



- *Speed (RPM) shown is nominal. Performance is based on actual speed of test.*
- *Performance ratings do not include the effects of appurtenances (accessories).*
- *Values shown are fan inlet Lw(A) sound power level for installation type D: ducted inlet, ducted outlet. Ratings include the effect of duct and correction.*
- *The A-weighted sound ratings shown have been calculated per AMCA International Standard 301.*

Performance Data - 60Hz

KRUGER



- *Speed (RPM) shown is nominal. Performance is based on actual speed of test.*
- *Performance ratings do not include the effects of appurtenances (accessories).*
- *Values shown are fan inlet LW(A) sound power level for installation type D: ducted inlet, ducted outlet. Ratings include the effect of duct and correction.*
- *The A-weighted sound ratings shown have been calculated per AMCA International Standard 301.*
- *MTD 100/2-6 and MTD 125-6 are not licensed by AMCA.*

Technical Data

Model	Max Q m3/h	Power W	Motor Protection	Phase	N° Pole	Voltage V	Hz	Max Amp	Insulation Class	dB (A) at 3m	RPM
MTD 100/1	148 / 125	33 / 20	IP44	1	2	230	60	0.25 / 0.15	B	58 / 56	2400 / 2150
	145 / 85	31 / 21	IP44	1	2	230	50	0.18 / 0.13	B	45 / 37	2600 / 2100
MTD 100/2	225 / 150	44 / 27	IP44	1	2	230	60	0.26 / 0.18	B	50 / 44	2250 / 1800
MTD 100/2-6	250 / 185	55 / 37	IP44	1	2	230	50	0.26 / 0.18	B	46 / 42	2450 / 2050
MTD 125	335 / 250	49 / 33	IP44	1	2	230	60	0.37 / 0.26	B	52 / 42	2210 / 1900
MTD 125-6	360 / 300	55 / 39	IP44	1	2	230	50	0.37 / 0.26	B	51 / 40	2350 / 1900
MTD 160	520 / 390	55 / 48	IP44	1	2	230	60	0.30 / 0.22	B	48 / 41	2500 / 1850
	558 / 335	68 / 52	IP44	1	2	230	50	0.31 / 0.23	B	49 / 38	2600 / 1600
MTD 200	920 / 750	116 / 107	IP44	1	2	230	60	0.55 / 0.41	B	55 / 48	2350 / 2000
	860 / 615	170 / 109	IP44	1	2	230	50	0.68 / 0.51	B	54 / 46	2650 / 2000
MTD 250/1	970 / 905	130 / 101	IP44	1	2	230	60	0.65 / 0.39	B	54 / 51	2680 / 2400
	1110/ 932	180 / 135	IP44	1	2	230	50	0.65 / 0.39	B	56 / 52	2980 / 2200
MTD 250/2	1270/1020	192 / 141	IP44	1	2	230	60	0.72 / 0.48	B	57 / 52	2420 / 1950
	1295/ 885	257 / 162	IP44	1	2	230	50	1.00 / 0.67	B	57 / 50	2400 / 1650
MTD 315	1670/1315	283 / 175	IP44	1	2	230	60	1.30 / 0.90	B	59 / 53	2350 / 1700
	1757/1188	352 / 186	IP44	1	2	230	50	1.50 / 1.00	B	60 / 52	2300 / 1550

- *Speed (RPM) shown is nominal. Performance is based on actual speed of test.*
- *Performance ratings do not include the effects of appurtenances (accessories).*
- *dB(A) at 3m with ducted inlet and outlet at free field conditions. dB(A) is not licensed by AMCA International.*
- *MTD 100/2-6 and MTD 125-6 are not licensed by AMCA.*

Accessories



Grilles

Mounted at the inlet or outlet of the fan, the grille prevents the entry of any foreign objects.



Rectangular Duct Adapters

The adapter enables the MTD fan to be connected to rectangular ducting



Back-Draft Shutter

Mounted at the outlet of the MTD fan, the shutter prevents the air re-circulating when the fan is not in use.

THE KRUGER GROUP

KRUGER

THAILAND (Regional Head Quarter)
KRUGER VENTILATION INDUSTRIES ASIA CO., LTD.
30/159 Moo 1, Sinsakorn Industrial Estate, Chetsadawithi Road,
Khok Kham Mueng, Samuthsakorn 74000, Thailand
Tel: +662 1054298 Fax: +662 0248256-9
Email: mktg@krugerventasia.co.th
Website: www.krugerfan.com

INDIA
KRUGER VENTILATION INDUSTRIES (INDIA) PVT. LTD.
Kruger Centre, Mumbai-Nasik Highway, Kalamgaon,
Shahapur, Thane 421601, Maharashtra, India
Tel: +91 9960558899, +91 97663 23739 Fax: -
Email: sales@krugerindia.com

KOREA
NEOMATE CO., LTD.
80, Seogeunnae-gil, Paltan-myeon, Hwaseong-si,
Gyeonggi-do 18575, Korea
Tel: +82-2-2679-2052 Fax: +82-2-2679-2174
Email: y7890@neomate.co.kr

SINGAPORE
KRUGER ENGINEERING PTE. LTD.
2 Venture Drive #20-23, Vision Exchange,
Singapore 608526.
Tel: +65 68631191
Fax: +65 68631151
Email: mktg@krugerfan.com

AUSTRALIA
S&P-KRUGER AUSTRALIA PTY. LTD.
2 Cunningham St, Moorebank N.S.W. 2170
Tel: +612-98227747
Fax: +612-98227757
Email: info@sandpkruger.com.au

INDONESIA
P.T. KRUGER VENTILATION INDONESIA.
Jl. Teuku Umar No. 20, Karawaci,
Tangerang 15115, Indonesia
Tel: +62 21-5512288
Fax: +62 21-5513502
Email: mktg@krugerindo.co.id

MALAYSIA
KRUVENT INDUSTRIES (M) SDN. BHD.
Lot 850, Jalan Subang 7, Taman Perindustrian Subang,
47500, Subang Jaya, Selangor D.E., Malaysia
Tel: +603 80743399
Fax: +603 80743388
Email: mktg@kruger.com.my

VIETNAM
KRUGER VENTILATION INDUSTRIES (VIETNAM) CO., LTD.
Lot A7, 2–4, C2 Road, Thanh Thanh Cong IZ,
Trang Bang District, Tay Ninh Province, Vietnam
Tel: +84-276 3585200/01/02 Fax: +84-276 3585199
Email: mktg@krugervn.com

CHINA (Shanghai)
SHANGHAI KRUGER VENTILATION CO., LTD.
No. 500 Yuanguo Road, Anting, Jiading District,
Shanghai 201814, P.R. China
Tel: +86 21-69573266 Fax: +86 21-69573296
Email: ksh@krugerfan.com.cn
Website: www.krugerfan.com.cn

CHINA (Tianjin)
TIANJIN KRUGER VENTILATION CO., LTD.
Jingjin Science and Technology Park,
Wuqing District, Tianjin 301700, P.R. China
Tel: +86 22-22143480 Fax: +86 22-22143482
Email: ktj@krugerfan.com.cn

CHINA (Guangzhou)
GUANGZHOU KRUGER VENTILATION CO., LTD.
No. 9 Huahui Road, Huashan Town,
Huadu District Guangzhou 510880, P.R. China
Tel: +86 20-66356635 Fax: +86 20-86786001/86786500
Email: kgv@krugerfan.com.cn

CHINA (Wuhan)
WUHAN KRUGER VENTILATION CO., LTD.
No. 805 Huian Avenue, Dongxihu District Wuhan,
Hubei 430040, P.R. China
Tel: +86 27- 83248840
Fax: +86 27- 83261886
Email: kwv@krugerfan.com.cn

HONG KONG
KRUGER VENTILATION (HONG KONG) LIMITED.
Flat E, 8/F, Yeung Yiu Chung (No.8) Industrial Building,
20 Wang Hoi Road, Kowloon Bay, Kowloon, Hong Kong
Tel: +852 22469182 Fax: +852 22469187
Email: info@kruger.com.hk

TAIPEI
KRUGER VENTILATION (TAIWAN) CO., LTD.
No. 157, Ping-an Rd, Hengfeng Village,
Dayuan Shiang Taoyuan County 337, Taiwan
Tel: +886 3-3859119
Fax: +886 3-3859118
Email: sales@krugertwn.com.tw

PHILIPPINES
KRUGER M & E INDUSTRIES CORP.
B3 Welborne Industrial Park, Bancal, Carmona,
Cavite, Philippines 4116
Tel: +63-917-561-9088, +63-917-596-7288,
+63-917-712-8438, +63-917-306-8288 Fax: -
Email: mktg.ph@krugerfan.com

LEA045. E4 January 2018
Edition 3
Printed on April 2026

A member of
Soler&Palau Ventilation Group



ภาคผนวก ข

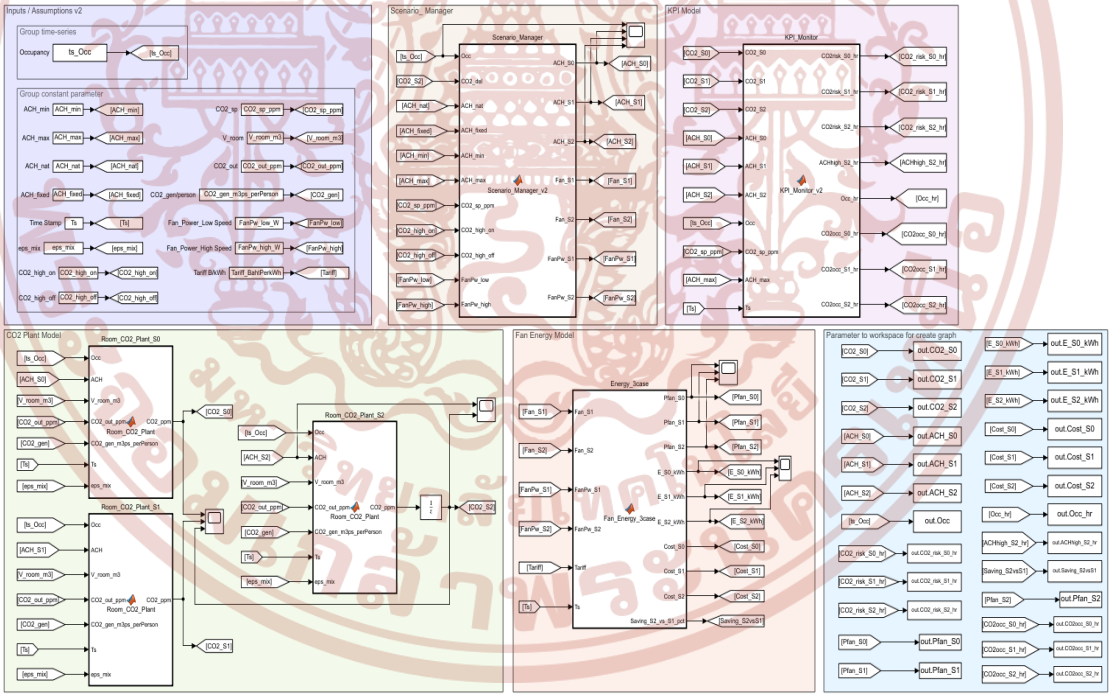
โค้ด MATLAB และโครงสร้างแบบจำลอง MATLAB/Simulink ที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ข โค้ด MATLAB และ MATLAB Function Block ที่ใช้ในแบบจำลอง

ภาคผนวก ข แสดงโค้ด MATLAB และ MATLAB Function Block ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการที่ควบคุมด้วยความเข้มข้น CO_2 สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยโค้ดดังกล่าวประกอบด้วยส่วนกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบบจำลอง ส่วนสร้างรูปแบบจำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง ส่วนควบคุมกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2 ส่วนคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องตามสมการสมดุลมวล ส่วนประเมินตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศ และส่วนคำนวณพลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ

โค้ดที่แสดงในภาคผนวกนี้เป็นส่วนสำคัญของแบบจำลอง MATLAB/Simulink ที่ใช้ในการจำลองผลการวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถตรวจสอบขั้นตอนการคำนวณและทำซ้ำผลการศึกษาได้อย่างชัดเจน

ข.1 โครงสร้างแบบจำลอง MATLAB/Simulink โดยรวม



ภาพที่ ข-1 โครงสร้างแบบจำลอง MATLAB/Simulink โดยรวมของระบบ CO_2-Based DCV

ข.2 โค้ดกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบบจำลอง

โค้ด setup_params_v2.m ใช้สำหรับกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบบจำลอง เช่น ช่วงเวลาจำลอง ปริมาตรห้อง ความเข้มข้น CO_2 ภายนอก ค่า CO_2 setpoint อัตราการเกิด CO_2 ต่อคน

ข้อมูลพัดลมระบายอากาศ ค่า ACH ของแต่ละกลยุทธ์ ค่าไฟฟ้า และรูปแบบจำนวนผู้ใช้งาน D1–D3 นอกจากนี้ยังมีโหมดสำหรับตรวจสอบผลของจำนวนผู้ใช้งานและผลของค่า ACH ต่อความเข้มข้น CO_2

```
%% setup_params_v2.m
% Core thesis model:
% Occupancy-driven CO2-based DCV for small office IAQ
% No PV, no weather time-series, no PM/RH, no Mode A/B
clear; clc;
%% ------------------------------------------------------
% 1) Simulation setting
% ------------------------------------------------------
Ts = 60; % sample time [s] = 1 min
StopTime = 3*24*3600; % 3 design days [s]
t = (0:Ts:StopTime)'; % time vector [s]
time_hr = t/3600;
day_index = floor(time_hr/24) + 1;
hour_of_day = mod(time_hr,24);
%% ------------------------------------------------------
% 2) Room and CO2 assumptions
% ------------------------------------------------------
V_room_m3 = 60; % room volume [m3] = 4 x 5 x 3 m
CO2_out_ppm = 400; % outdoor CO2 boundary condition [ppm]
CO2_sp_ppm = 1000; % IAQ reference threshold [ppm]
% CO2 generation rate per person
% Use your previous value unless later refined by Persily & de Jonge.
CO2_gen_m3ps_perPerson = 5.17e-6; % [m3/s/person]
% Mixing correction factor
% 1.0 = ideal well-mixed room
eps_mix = 1.0;
%% ------------------------------------------------------
```

```
% 3) Reference ventilation fan: Kruger MTD 100/1
% Datasheet:
% Low speed: 85 m3/h, 21 W
% High speed: 145 m3/h, 31 W
% ------------------------------------------------------------
FanQ_low_m3h = 85;
FanQ_high_m3h = 145;
FanPw_low_W = 21;
FanPw_high_W = 31;
ACH_low = FanQ_low_m3h / V_room_m3; % 1.42 h^-1
ACH_high = FanQ_high_m3h / V_room_m3; % 2.42 h^-1
%% ------------------------------------------------------------
% 4) Ventilation strategies
% ------------------------------------------------------------
ACH_nat = 0.31; % S0: background infiltration [h^-1]
ACH_fixed = ACH_high; % S1: fixed mechanical ventilation at high speed
% --- Step B1: ACH_min Sensitivity ---
% Baseline ACH_min is obtained from low-speed fan:
% ACH_low = 85/60 = 1.42 h^-1
% --- Step B2: ACH_max Sensitivity ---
% Baseline ACH_max is obtained from high-speed fan:
% ACH_high = 145/60 = 2.42 h^-1
ACH_min_case = ACH_low; % change to 1.00, 1.42, 2.00 for B1
ACH_high_case = ACH_high; % change for ACH_max sensitivity if required
ACH_min = ACH_min_case; % S2 minimum active ventilation
ACH_max = ACH_high_case; % S2 maximum ventilation fixed at high-speed fan
%% ------------------------------------------------------------
% 4.1) DCV Control Parameter
% ------------------------------------------------------------
CO2_high_on_case = 960; % switch to high speed [ppm]
CO2_high_off_case = 830; % return to low speed [ppm]
```

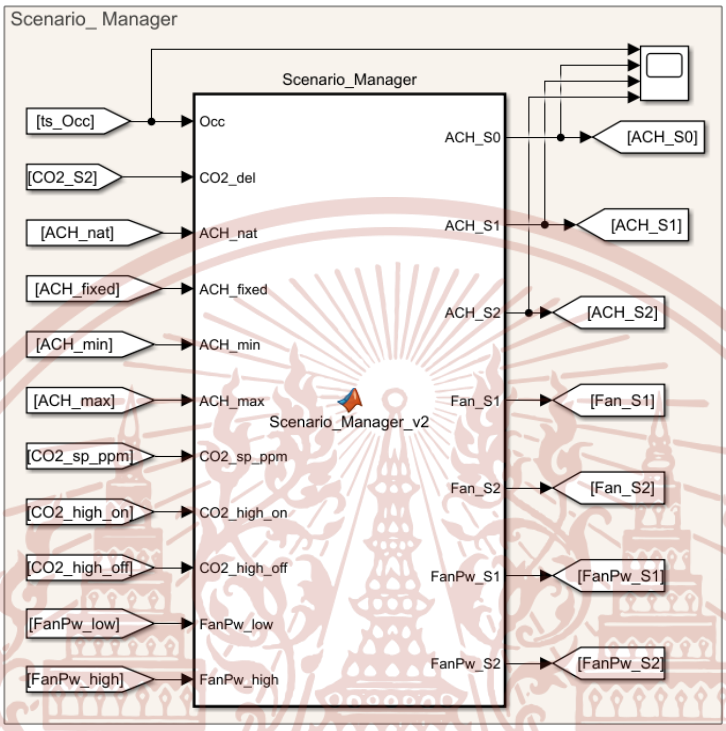
```
CO2_high_on = CO2_high_on_case;
CO2_high_off = CO2_high_off_case;
%% ------------------------------------------------------------
% 5) Electricity tariff
% ------------------------------------------------------------
Tariff_BahtPerkWh = 4.15; % [THB/kWh]
%% ------------------------------------------------------------
% 5.1) B4 Occupancy sensitivity case
% ------------------------------------------------------------
% Occ_case = 1 : Low occupancy
% Occ_case = 2 : Baseline occupancy
% Occ_case = 3 : High occupancy Occ_case = 2; % change to 1, 2, 3 for B4
%% ------------------------------------------------------------
% 5.2) Validation V1: Occupancy effect
% ------------------------------------------------------------
Validation_V1_mode = false; % true = V1 test, false = normal D1-D3
V1_occ_person = 5; % change to 1, 2, 3, 4, 5 when running V1
switch Occ_case
case 1
regular_occ = 1;
visitor_occ = 2;
waiting_occ = 1;
case 2
regular_occ = 2;
visitor_occ = 2;
waiting_occ = 1;
case 3
regular_occ = 3;
visitor_occ = 2;
waiting_occ = 1;
end
```

```
%% ------------------------------------------------------------
% 5.3) Validation V2: Ventilation / ACH effect
% ------------------------------------------------------------
Validation_V2_mode = false; % true = V2 test
V2_occ_person = 3; % fixed occupancy = 3 persons
V2_ACH_case = 2.50; % change to 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50
if Validation_V2_mode
ACH_fixed = V2_ACH_case; % use S1 as fixed ventilation validation
 end
%% ------------------------------------------------------------
% 6) Occupancy schedule: D1, D2, D3
% ------------------------------------------------------------
Occ = zeros(size(t));
 for k = 1:length(t)
d = day_index(k);
h = hour_of_day(k);
% office hours: 08:00-18:00
in_work = (h >= 8) && (h < 18);
if ~in_work
Occ(k) = 0;
 continue;
 end
% ------------------------------------------------------------
% Validation V1 mode: fixed occupancy level
% Used for Chapter 4.1.1 Occupancy Effect Validation
% ------------------------------------------------------------
if Validation_V1_mode
Occ(k) = V1_occ_person;
continue;
end
% ------------------------------------------------------------
```

```
% Validation V2 mode: fixed occupancy + varied ACH
% Used for Chapter 4.1.2 Ventilation Effect Validation
% ---------------------------------------------------------
if Validation_V2_mode
Occ(k) = V2_occ_person;
 continue;
 end
switch d
 case 1
% D1: Regular office occupancy
% regular occupants only
Occ(k) = regular_occ;
case 2
% D2: Visitor occupancy
% regular occupants + visitors at 10:00-11:00 and 15:00-16:00
Occ(k) = regular_occ;
 if ((h >= 10) && (h < 11)) || ((h >= 15) && (h < 16)) Occ(k) =
Occ(k) + visitor_occ;
end
case 3
% D3: Peak occupancy / waiting condition
% regular occupants + visitors + waiting occupant
Occ(k) = regular_occ;
if ((h >= 10) && (h < 11)) || ((h >= 15) && (h < 16)) Occ(k) = Occ(k) + visitor_occ;
end
if (h >= 14) && (h < 17)
Occ(k) = Occ(k) + waiting_occ;
End
otherwise Occ(k) = 0;
end
end
```

```
%% ------------------------------------------------------------
% 7) Time-series inputs to Simulink
% ------------------------------------------------------------
ts_Occ = timeseries(Occ, t);
% Constant time-series for parameters used by From Workspace blocks
ts_CO2_out_ppm = timeseries(CO2_out_ppm*ones(size(t)), t);
%% ------------------------------------------------------------
% 8) Optional display check
% ------------------------------------------------------------
fprintf('--- setup_params_v2 loaded ---\n');
fprintf('Simulation length = %.1f days\n', StopTime/86400);
fprintf('Ts = %.0f s\n', Ts);
fprintf('Room volume = %.1f m3\n', V_room_m3);
fprintf('Outdoor CO2 = %.0f ppm\n', CO2_out_ppm);
fprintf('CO2 threshold = %.0f ppm\n', CO2_sp_ppm);
fprintf('Fan low = %.0f m3/h, %.0f W, ACH = %.2f h^-1\n', ... FanQ_low_m3h,
FanPw_low_W, ACH_low);
fprintf('Fan high = %.0f m3/h, %.0f W, ACH = %.2f h^-1\n', ... FanQ_high_m3h,
FanPw_high_W, ACH_high);
fprintf('ACH S0 = %.2f h^-1\n', ACH_nat);
fprintf('ACH S1 = %.2f h^-1\n', ACH_fixed);
```

ข.3 โครงสร้างและโค้ด Scenario Manager



ภาพที่ ข-2 โครงสร้างบล็อก Scenario Manager สำหรับกำหนดกลยุทธ์การระบายอากาศ S0, S1 และ S2

โค้ด Scenario_Manager_v2 ใช้สำหรับกำหนดกลยุทธ์การระบายอากาศทั้ง 3 กรณี ได้แก่ S0 เป็นการรั่วซึมอากาศพื้นฐาน S1 เป็นการระบายอากาศเชิงกลแบบคงที่ และ S2 เป็นระบบ CO_2-Based DCV แบบพัดลมสองระดับความเร็ว โดยใช้เงื่อนไข hysteresis จากค่า CO_2 high-on และ high-off

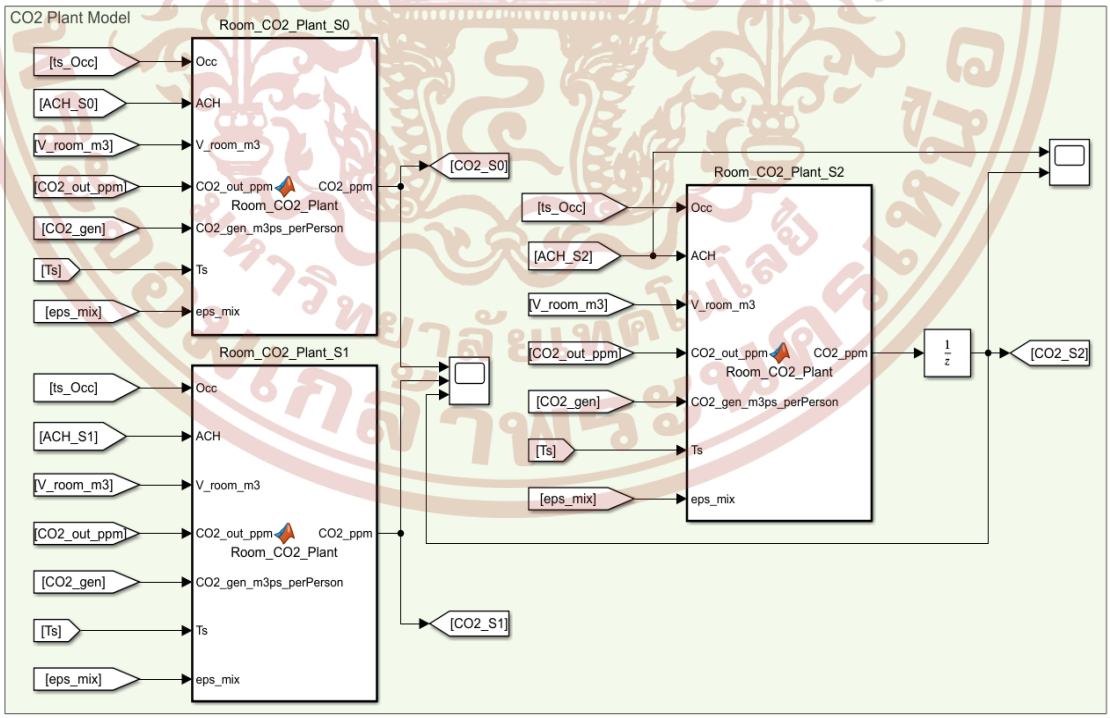
```
function [ACH_S0, ACH_S1, ACH_S2, ...
Fan_S1, Fan_S2, FanPw_S1, FanPw_S2] = ...
Scenario_Manager_v2(Occ, CO2_del, ...
ACH_nat, ACH_fixed, ACH_min, ACH_max, ...
CO2_sp_ppm, CO2_high_on, CO2_high_off, ...
FanPw_low, FanPw_high)
% Scenario_Manager_v2
% Core thesis model:
```

```
% S0 = Background infiltration / passive leakage
% S1 = Fixed mechanical ventilation
% S2 = CO2-based demand-controlled ventilation (two-speed fan)
% % This block removes PV, weather, PM2.5, RH, AC Mode A/B.
% It focuses only on occupancy-driven CO2-based ventilation control.
%% ------------------------------------------------------
% 1) Protect input values
% ------------------------------------------------------
Occ = max(0, Occ);
CO2_del = max(300, CO2_del);
ACH_nat = max(0, ACH_nat);
ACH_fixed = max(0, ACH_fixed);
ACH_min = max(0, ACH_min);
ACH_max = max(ACH_min, ACH_max);
%% ------------------------------------------------------
% 2) S0: Background infiltration
% ------------------------------------------------------
% S0 represents no active mechanical ventilation.
% Only background infiltration/leakage is considered.
ACH_S0 = ACH_nat;
%% ------------------------------------------------------
% 3) S1: Fixed mechanical ventilation
% ------------------------------------------------------
% S1 represents fixed ventilation at the selected high fan capacity.
% When the room is occupied, fixed ventilation operates continuously.
if Occ > 0
ACH_S1 = ACH_fixed;
Fan_S1 = 1;
FanPw_S1 = FanPw_high;
else
ACH_S1 = ACH_nat;
```

```
Fan_S1 = 0;
FanPw_S1 = 0;
end
%% ------------------------------------------------------------
% 4) S2: CO2-based DCV with two-speed fan + hysteresis
% ------------------------------------------------------------
persistent S2_high_state
if isempty(S2_high_state)
S2_high_state = 0;
end
% Hysteresis control band from setup_params_v2
CO2_high_on = max(300, CO2_high_on);
CO2_high_off = max(300, CO2_high_off);
if Occ <= 0
% No occupancy: fan OFF, only background infiltration
ACH_S2 = ACH_nat;
Fan_S2 = 0;
FanPw_S2 = 0;
S2_high_state = 0;
else
% Occupied: fan ON
Fan_S2 = 1;
% High-speed ON condition
if (CO2_del >= CO2_high_on) || (Occ >= 4)
S2_high_state = 1;
% High-speed OFF condition
elseif (CO2_del <= CO2_high_off) && (Occ <= 3)
S2_high_state = 0;
end
% Apply fan state
if S2_high_state == 1
```

```
ACH_S2 = ACH_max;
FanPw_S2 = FanPw_high;
else
ACH_S2 = ACH_min;
FanPw_S2 = FanPw_low;
end
end
%% ------------------------------------------------------------
% 5) Final clamp
% ------------------------------------------------------------
ACH_S0 = max(0, ACH_S0);
ACH_S1 = max(0, ACH_S1);
ACH_S2 = max(0, min(ACH_S2, ACH_max));
End
```

ข.4 โครงสร้างและโค้ด Room CO_2 Plant

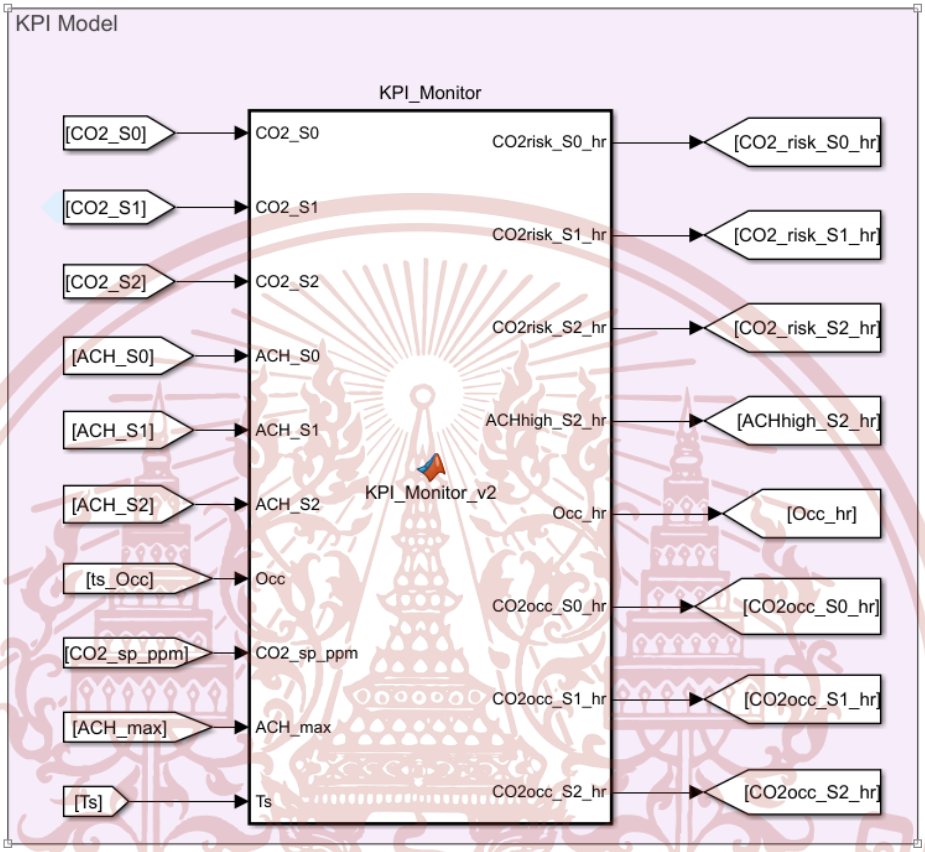


ภาพที่ ข-3 โครงสร้างบล็อก Room_CO_2_Plant สำหรับคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง

โค้ด Room_CO2_Plant ใช้สำหรับคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องตามหลักสมดุลมวล โดยพิจารณาอัตราการเกิด CO_2 จากจำนวนผู้ใช้งาน และอัตราการระบาย CO_2 ออกจากห้องผ่านค่า ACH

```
function CO2_ppm = Room_CO2_Plant(Occ, ACH, V_room_m3, CO2_out_ppm, ...
CO2_gen_m3ps_perPerson, Ts, eps_mix)
persistent C
V = V_room_m3;
Cout = CO2_out_ppm;
Gpp = CO2_gen_m3ps_perPerson;
if isempty(C)
C = Cout;
end
Occ = max(0, Occ);
ACH = max(0, ACH);
eps_mix = max(eps_mix, 1e-6);
Gtot = Occ * Gpp; % m3/s
gen_ppmps = (Gtot / V) * 1e6; % ppm/s
ACH_ps = ACH / 3600; % 1/s
vent_ppmps = ACH_ps * (Cout - C); % ppm/s
C = C + (gen_ppmps + vent_ppmps) * Ts;
C = max(300, min(C, 5000));
CO2_ppm = C / eps_mix;
CO2_ppm = max(300, min(CO2_ppm, 5000));
end
```

ข.5 โครงสร้างและโค้ด KPI Monitor



ภาพที่ ข-4 โครงสร้างบล็อก KPI_Monitor สำหรับประเมินตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศและการทำงานของระบบ S2

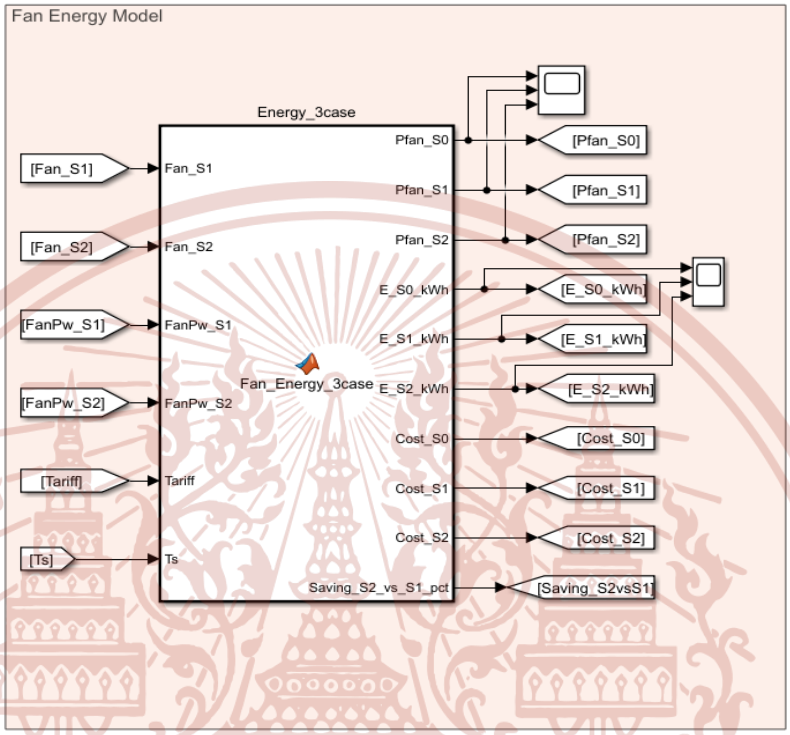
โค้ด KPI_Monitor_V2 ใช้สำหรับสะสมค่าตัวชี้วัดสำคัญของงานวิจัย ได้แก่ CO_2 exceedance hour, CO_2 exceedance during occupied period, occupied hour และ S2 high-speed operating hour

```
function [CO2risk_S0_hr, CO2risk_S1_hr, CO2risk_S2_hr, ...
ACHhigh_S2_hr, Occ_hr, ...
CO2occ_S0_hr, CO2occ_S1_hr, CO2occ_S2_hr] = ...
KPI_Monitor_v2(CO2_S0, CO2_S1, CO2_S2, ...
ACH_S0, ACH_S1, ACH_S2, ...
Occ, CO2_sp_ppm, ACH_max, Ts)
```

```
% KPI_Monitor_v2
% One block monitors S0, S1, S2 together.
% % Outputs:
% - CO2 exceedance hours for S0/S1/S2
% - CO2 exceedance during occupied hours for S0/S1/S2
% - occupied hours
% - S2 high-speed / max ACH operating hours
persistent co2risk0 co2risk1 co2risk2
persistent co2occ0 co2occ1 co2occ2
persistent achhigh2 occsum
if isempty(co2risk0)
co2risk0 = 0;
co2risk1 = 0;
co2risk2 = 0;
co2occ0 = 0;
co2occ1 = 0;
co2occ2 = 0;
achhigh2 = 0;
occsum = 0;
end
dt_hr = Ts/3600;
%% Occupied hour
isOcc = Occ > 0;
if isOcc
occsum = occsum + dt_hr;
end
%% CO2 exceedance hours
if CO2_S0 > CO2_sp_ppm
co2risk0 = co2risk0 + dt_hr;
end
if CO2_S1 > CO2_sp_ppm
```

```
co2risk1 = co2risk1 + dt_hr;
end
if CO2_S2 > CO2_sp_ppm
co2risk2 = co2risk2 + dt_hr;
end
%% CO2 exceedance during occupied hours
if isOcc && (CO2_S0 > CO2_sp_ppm)
co2occ0 = co2occ0 + dt_hr;
end
if isOcc && (CO2_S1 > CO2_sp_ppm)
co2occ1 = co2occ1 + dt_hr;
end
if isOcc && (CO2_S2 > CO2_sp_ppm)
co2occ2 = co2occ2 + dt_hr;
end
%% S2 high-speed / maximum ACH operating hours
if abs(ACH_S2 - ACH_max) < 1e-6
achhigh2 = achhigh2 + dt_hr;
end
%% Outputs
CO2risk_S0_hr = co2risk0;
CO2risk_S1_hr = co2risk1;
CO2risk_S2_hr = co2risk2;
CO2occ_S0_hr = co2occ0;
CO2occ_S1_hr = co2occ1;
CO2occ_S2_hr = co2occ2;
ACHhigh_S2_hr = achhigh2;
Occ_hr = occsum;
end
```

ข.6 โครงสร้างและโค้ด Fan Energy Model



ภาพที่ ข-5 โครงสร้างบล็อก Fan_Energy_3case สำหรับคำนวณพลังงาน ค่าไฟฟ้า และการประหยัดพลังงานของพัดลม

โค้ด Fan_Energy_3case ใช้สำหรับคำนวณพลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศในกรณี S0, S1 และ S2 โดยกำหนดให้ S0 ไม่มีพัดลมระบายอากาศเชิงกล ส่วน S1 และ S2 คำนวณพลังงานจากสถานะพัดลม กำลังไฟฟ้า และช่วงเวลาการจำลอง

```
function [Pfan_S0, Pfan_S1, Pfan_S2, ...
E_S0_kWh, E_S1_kWh, E_S2_kWh, ...
Cost_S0, Cost_S1, Cost_S2, ...
Saving_S2_vs_S1_pct] = ...
Fan_Energy_3case(Fan_S1, Fan_S2, ...
FanPw_S1, FanPw_S2, ...
Tariff, Ts)
% Fan_Energy_3case
```

```
% Core thesis energy model:
% S0 = no mechanical fan
% S1 = fixed mechanical ventilation
% S2 = CO2-based DCV two-speed fan
% % Energy is calculated only for ventilation fan.
% No AC, no PV, no solar, no thermal model.
persistent E0 E1 E2
if isempty(E0)
E0 = 0;
E1 = 0;
E2 = 0;
end
%% Instantaneous fan power [W]
Pfan_S0 = 0;
Pfan_S1 = double(Fan_S1) * FanPw_S1;
Pfan_S2 = double(Fan_S2) * FanPw_S2;
%% Incremental energy [kWh]
dE0 = Pfan_S0 * Ts / 3600 / 1000;
dE1 = Pfan_S1 * Ts / 3600 / 1000;
dE2 = Pfan_S2 * Ts / 3600 / 1000;
%% Cumulative energy [kWh]
E0 = E0 + dE0;
E1 = E1 + dE1;
E2 = E2 + dE2;
E_S0_kWh = E0;
E_S1_kWh = E1;
E_S2_kWh = E2;
%% Cost [THB]
Cost_S0 = E_S0_kWh * Tariff;
Cost_S1 = E_S1_kWh * Tariff;
Cost_S2 = E_S2_kWh * Tariff;
```

```
%% Energy saving of S2 compared with S1 [%]
if E_S1_kWh > 0
Saving_S2_vs_S1_pct = (E_S1_kWh - E_S2_kWh) / E_S1_kWh * 100;
else
Saving_S2_vs_S1_pct = 0;
end
end
```



ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยระดับชาติ ณ มหาวิทยาลัยปทุมธานี

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน

PROCEEDING 10th Conference 2026

โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ

ครั้งที่ 10

ประจำปี 2569

ณ มหาวิทยาลัยปทุมธานี



การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ
ครั้งที่ 10 ประจำปี 2569

กลุ่มสาขาบริหารธุรกิจ
กลุ่มสาขาศึกษาศาสตร์
กลุ่มสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์การแพทย์
กลุ่มสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
กลุ่มสาขาพยาบาลศาสตร์และการสาธารณสุข

Session 1: วันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2569

Session 2: วันที่ 25 เมษายน 2569

จัดทำโดย
มหาวิทยาลัยปทุมธานี และเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ

ปีที่พิมพ์
2569

คณะกรรมการจัดโครงการประชุมวิชาการ
อาจารย์ ดร.ขนากานต์ ยืนยง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไตรรัตน์ ยืนยง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาส ทองสุทธิ์
อาจารย์อาคม บุญปัญญา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิมา ยืนยง
รองศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ขันทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤนาท ยืนยง
อาจารย์ ดร.สุกัญญา หมู่เย็น
รองศาสตราจารย์ ดร.คุณาพร โฉมจิตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประทินร์ ขันทอง
อาจารย์ ดร.จิราพร สตางาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ เมืองแสน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สังเวียน เทพผา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิพงษ์ เพชรสุทธิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกฤต โพธิ์เงิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา ดุรงค์ฤทธิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ. นริศา คำแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ธันย์พัทธ์ ใคร้วานิช
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญยาศิริ งามสอาด
อาจารย์ ดร.วราภรณ์ โพธิ์งาม
คณะกรรมการดำเนินงาน

คณะกรรมการกลั่นกรองผลงาน และประเมินผลงาน

ศาสตราจารย์ ดร.พรรณี บุตรเทพ (ประธาน)	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

กลุ่มสาขาบริหารธุรกิจ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนงกรณ์ กุณฑลบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวลลักษณ์ แสงเพิ่ม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สามารถ ดีพิจารณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต ตรีศิริโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงพร พุทธวงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ เมืองแสน	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิมา ยืนยง	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประทินร์ ขันทอง	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

กลุ่มสาขาศึกษาศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.พิมลพรรณ เพชรสมบัติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ์ เศรษฐชจร	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤตพล วังภูสิต	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรา เดชโฮม	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิพงษ์ เพชรสุทธิ์	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉลอง ทับศรี	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ วิวัฒนานนท์	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี วาจาสัตย์	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ บูรณศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

กลุ่มสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์เทพ วิทิตอนันต์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ โชคเหมาะ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ มูลศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.โกเมศ ขวัญเมือง	มหาวิทยาลัยมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภธัช ศรีวิพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี อยู่สถาพร	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกฤต โพธิ์เงิน	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สังเวียน เทพผา	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย เลื่อนฉวี	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเวศน์ มหารัตน์สกุล	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์การแพทย์

รองศาสตราจารย์ ดร.พ.ท.ประกานต์ ฤดีกุลธำรง	วิทยาลัยแพทยศาสตร์พระมงกุฎเกล้า
รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ อดิศักดิ์วัฒนา	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทศจีภรณ์ ขันทอง	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ น้อยผา	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พ.อ.ธนิต บุญศิริ	วิทยาลัยแพทยศาสตร์พระมงกุฎเกล้า
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ร.อ.ดลภาค อภิพงศ์รัตน์	วิทยาลัยแพทยศาสตร์พระมงกุฎเกล้า
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภญ.สุชาดา จงรุ่งเรืองโชค	มหาวิทยาลัยรังสิต
รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนา ชัยธวัช	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

กลุ่มสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา เสือเอี่ยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.คทา จารุวงศ์รังสี	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วงศ์ประดับไชย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา คงจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เอื้อไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรพจน์ เพชรเกตุ	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

กลุ่มสาขาพยาบาลศาสตร์และการสาธารณสุข

ศาสตราจารย์ ดร.บุญทิพย์ สิริธรังศรี	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภก.หญิง กิตติยา จันทรธานีวัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณี เดียวอิศเรศ	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณี สร้อยสงค์	วิทยาลัยนอร์ทเทิร์น
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี รอดจากภัย	มหาวิทยาลัยบูรพา
อาจารย์ ดร.กนกพร สมพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
อาจารย์ ดร.วิชุดา จันทะศิลป์	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
อาจารย์ ดร.สุจิตตา ฤทธิ์มนตรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา ดุรงค์ฤทธิชัย	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศรี หงส์พานิช	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผุสดี ชูชีพ	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน กระสังข์	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

คณะกรรมการกลั่นกรองบทความวิจัยจากสถาบันต่างชาติ

Prof. (Dr.) R P Banerjee	Eastern Institute for Integrated Learning in Management, India
Manjinder Singh Dhaliwal	Chitkara University, India
Dr. Ashok Daryani	Sharda University, India
Dr. Li minghai	Chongqing College of International
Dr. Achmad Fathoni Rodli	ADRI, Indonesia
Dr. Stephen Rainer	Australian International College

คณะผู้จัดทำรูปเล่มผลงาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิมา ยืนยง
รองศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ขันทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤนาท ยืนยง
อาจารย์ ดร.สุกัญญา หมู่เย็น
อาจารย์ อาคม บุญปัญญา
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกฤต โพธิ์เงิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สังเวียน เทพผา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิพงษ์ เพชรสุทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา ดุรงค์ฤทธิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ เมืองแสน
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ. นริศา คำแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ธันย์พัทธ์ ใคร้วานิช
อาจารย์ ดร.อรุณยุพา บัวทรัพย์

นางสาวขวัญจรุง พุทธกาล
นางสาวสุชาวดี น้อยหุ่น
นางสาวสินีนารถ คำแหง
นางสาวอัมพรรัตน์ สุขสำราญ
นางสาวนริศรา ชาเจริญ

ออกแบบรูปเล่ม ดร.ศักดิ์นรินทร์ เสือสิทธิ์

ผลงานฉบับเต็ม https://conf.ptu.ac.th/

สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติที่จัดขึ้นในครั้งนี้ มหาวิทยาลัยปทุมธานีและเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการตระหนักถึงความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของโลก ดังนั้น สถาบันอุดมศึกษาซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการสร้าง "ทรัพยากรมนุษย์ที่มีคุณภาพ" และ "นวัตกรรม" เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนสังคมและเศรษฐกิจในยุคปัจจุบันให้ยั่งยืน

การนี้ ในการสร้างคนให้เป็นทรัพยากรมนุษย์ที่มีคุณภาพ มีทักษะในศตวรรษที่ 21 (21st Century Skills) สถาบันอุดมศึกษาต้องมุ่งเน้นพัฒนาผู้เรียนและบุคลากรในทุกระดับ ให้มีชุดทักษะที่จำเป็นต่อการประสบความสำเร็จในชีวิตการทำงาน และการเป็นพลเมืองโลกที่มีคุณภาพ อันได้แก่กลุ่มทักษะ 4C's และต้องส่งเสริมการวิจัยและเผยแพร่ผลงานที่เชื่อมโยงความรู้ทางวิชาการเข้ากับการประยุกต์ใช้ทักษะแห่งอนาคต รวมถึงการใช้เทคโนโลยีและสารสนเทศ นอกจากนี้ต้องสร้างเครือข่ายและเวทีระดับนานาชาติ เพื่อสร้างพื้นที่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ และแนวปฏิบัติที่ดีที่สุด ในระดับชาติและนานาชาติ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาสังคมและเศรษฐกิจของประเทศและโลก

ในนามของมหาวิทยาลัยปทุมธานี มีความยินดีและขอขอบคุณ คณะผู้จัดงานและเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการทุกหน่วยงาน ที่จัดการประชุมได้อย่างเรียบร้อยและสมบูรณ์ อันแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและอัตลักษณ์ที่โดดเด่นของโครงการประชุมวิชาการในครั้งนี้ รวมถึงการมีผลงานวิจัยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในเชิงประจักษ์

ท้ายนี้ขออวยพรให้คณะผู้จัดงานและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ประสบแต่ความสุข เจริญก้าวหน้า หวังอย่างยิ่งว่า ผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่าน จะได้รับความรู้และประโยชน์ที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาตนเอง ประเทศชาติ และสังคมโลกต่อไป

ดร.ชนากานต์ ยืนยง
อธิการบดี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

คำนำ

มหาวิทยาลัยปทุมธานี ร่วมกับเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ จำนวน 16 หน่วยงาน ประกอบด้วย (1) London Metropolitan University, UK (2) Eastern Institute for Integrated Learning in Management, India (3) Chitkara University, India (4) Chongqing College of International Business and Economics, PRC (5) Guangxi Minzu Normal University, PRC (6) Yunnan Light and Textile Industry Vocational College, PRC (7) Chongqing Vocational Institute of Tourism, PRC (8) Jiangmen Polytechnic , PRC (9) ESU, Sri Lanka (10) Kadiri University, Indonesia (11) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (12) สถาบันการลงทุน CSI (13) สมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.) (14) วิทยาลัยนอร์ทเทิร์น (15) วิทยาลัยนครราชสีมา และ (16) คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ได้จัดการประชุมวิชาการและการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2569 ขึ้น เพื่อเป็นเวทีวิชาการ อันนำไปสู่การบูรณาการองค์ความรู้ การแลกเปลี่ยนประสบการณ์ และการสร้างเครือข่ายความร่วมมือทั้งในระดับชาติและนานาชาติ โดยมีรายละเอียดผลงานดังปรากฏในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติฉบับนี้

ท้ายนี้ คณะกรรมการดำเนินงาน ขอขอบคุณเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ คณะที่ปรึกษา ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาผลงาน และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งภายในและภายนอก ที่ได้ให้เกียรติและเสียสละเวลาอันมีค่า เพื่อร่วมโครงการในครั้งนี้ ขอขอบคุณประธาน วิทยากร ผู้ดำเนินรายการ และผู้มีส่วนสนับสนุนทุกท่าน ที่ทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี หวังอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้จากการประชุมวิชาการในครั้งนี้ จะเป็นอีกหนึ่งแรงขับเคลื่อนที่สำคัญในสร้างทรัพยากรมนุษย์ที่มีคุณภาพ นำสู่การสร้างนวัตกรรม เพื่อพัฒนาสังคมของประเทศไทยและสังคมโลกต่อไป

คณะกรรมการดำเนินงาน

PTU | โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ
ครั้งที่ 10 ประจำปี 2569

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน

A Simulation-Based Performance Assessment of PV-Fan Assisted Demand-Controlled Ventilation for Indoor Air Quality Enhancement and Energy Savings

ปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์[1] , ดร.ปรีดา จันทวงษ์[2] , ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์[3]

นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800[1]

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800[2]

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800[3]

*Corresponding author's e-mail : poravit.bun@gmail.com**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก โดยมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคารและการใช้พลังงานภายใต้สภาวะการใช้งานจริง แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นในMATLAB/Simulink โดยใช้ข้อมูลจริงรายชั่วโมงจากแหล่งข้อมูลภายนอก ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER และข้อมูล PM2.5 จาก Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน เพื่อใช้แทนข้อมูลจากเซนเซอร์ภายนอกอาคาร ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นอินพุตของแบบจำลองร่วมกับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ความชื้นสัมพัทธ์ และภาระพลังงานของระบบระบายอากาศและระบบปรับอากาศ

การศึกษาได้เปรียบเทียบ 3 กรณีหลัก ได้แก่ กรณีฐานแบบระบายอากาศธรรมชาติ (S0) กรณีระบายอากาศคงที่ (S1) และกรณีควบคุมอัตราการระบายอากาศตามความต้องการแบบ DCV ร่วมกับ PV-Fan (S2) โดยพิจารณาทั้งในโหมดการทำงานของระบบปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง และโหมดทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน ผลการจำลองพบว่า S2 สามารถลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายได้ดีกว่า S1 โดยเฉพาะในโหมดใช้งานตาม

ผู้ครอบครอง ขณะเดียวกันยังสามารถรักษาความเข้มข้น CO_2 ให้อยู่ใกล้ค่าควบคุมได้ดีกว่ากรณีฐาน ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงแสดงให้เห็นศักยภาพในการสร้างสมดุลระหว่างการประหยัดพลังงานและการรักษาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระบบ DCV สามารถควบคุมค่า CO_2 ให้อยู่ใกล้ค่ากำหนด (1000 ppm) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งลดการเกิด overshoot และลดช่วงเวลาที่เกินมาตรฐาน IAQ ขณะเดียวกันยังสามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมผ่านการใช้พลังงานจาก PV ส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนที่เหมาะสมระหว่างคุณภาพอากาศและการใช้พลังงาน

คำสำคัญ: การระบายอากาศตามความต้องการ, PV-Fan, คุณภาพอากาศภายในอาคาร, MATLAB/Simulink, คาร์บอนไดออกไซด์

Abstract

This study evaluates the performance of a PV-fan assisted Demand-Controlled Ventilation (DCV) system for a small office, focusing on the trade-off between indoor air quality and energy consumption under realistic operating conditions. A MATLAB/Simulink model was developed using hourly external data from NASA POWER for meteorological and solar radiation variables, and from Air4Thai for ambient PM2.5 concentration, during April to June. These datasets were used as substitutes for outdoor sensors and combined with indoor occupancy profiles to simulate carbon dioxide (CO_2) concentration, relative humidity, ventilation control response, and energy use of both ventilation and air-conditioning systems.

Three ventilation scenarios were compared: natural ventilation baseline (S0), fixed ventilation (S1), and DCV with PV-fan assistance (S2), under two operating modes: continuous air-conditioning and occupancy-based air-conditioning. The simulation results show that S2 achieves lower energy consumption and operating cost than S1, especially in the occupancy-based mode, while maintaining CO_2 closer to the control threshold than the baseline case. The proposed system therefore demonstrates the capability to balance indoor air quality improvement and energy saving more effectively than conventional ventilation strategies.

Results indicate that the DCV system effectively maintains CO_2 concentration near the setpoint (1000 ppm) while minimizing overshoot and reducing IAQ exceedance duration. Additionally, PV-assisted fan operation reduces grid energy consumption. The proposed system demonstrates a balanced trade-off between energy consumption and indoor air quality.

Keywords: Demand-controlled ventilation, PV-fan, indoor air quality, MATLAB/Simulink, carbon dioxide

บทนำ

คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality : IAQ) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพ ความสบาย และประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้อาคาร โดยเฉพาะในอาคารที่มีการใช้งานต่อเนื่องและมีความหนาแน่นของผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Persily,2017) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในอาคารมักถูกใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงตัวแทนของประสิทธิภาพการระบายอากาศ เนื่องจาก CO_2 มีความสัมพันธ์กับอัตราการระบายอากาศและจำนวนผู้ใช้งานในพื้นที่ แม้ ASHRAE จะระบุว่าค่า CO_2 ไม่ใช่ตัวชี้วัดคุณภาพอากาศทั้งหมด แต่เป็นตัวชี้วัดที่มีประโยชน์ในการประเมินความเพียงพอของการระบายอากาศ (ASHRAE, 2025)

ในทางปฏิบัติ การเพิ่มอัตราการระบายอากาศช่วยลดการสะสม CO_2 และลดโอกาสเกิดภาวะอากาศอับ แต่การระบายอากาศที่มากเกินความจำเป็นย่อมเพิ่มภาระพลังงานของระบบปรับอากาศและพัดลม (Chenari et al., 2025) ดังนั้นแนวคิด Demand-Controlled Ventilation (DCV) จึงได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับอัตราการระบายอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการจริงของอาคาร เช่น จำนวนผู้ใช้งานหรือระดับ CO_2 แบบเวลาจริง ซึ่งช่วยสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพอากาศภายใน (IAQ) และการใช้พลังงานได้ดีกว่าระบบระบายอากาศแบบคงที่ fixed ventilation (Goyal et al., 2015; Chenari et al., 2025)

นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบระบายอากาศเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า โดยระบบ photovoltaic (PV) สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง (NREL, 2016) ในด้านข้อมูลภายนอก NASA POWER เป็นแหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและรังสีดวงอาทิตย์แบบรายชั่วโมงที่สามารถนำมาใช้ในงานจำลองพลังงานอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (NASA, n.d.) ขณะที่ Air4Thai ให้ข้อมูล PM2.5 รายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดในประเทศไทย ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นอินพุตในงานจำลอง IAQ (กรมควบคุมมลพิษ, n.d.)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินแบบจำลองระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาพฤติกรรมการควบคุม CO_2 พลังงาน

และผลกระทบเชิงความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่าง IAQ และพลังงาน โดยอาศัยข้อมูลจริงภายนอกของประเทศไทยในช่วงเวลา 3 เดือน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมระบบที่ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากที่สุด

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาระบบต้นแบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก (Small office) ขนาด 4x5x3 m ปริมาตร V ≈ 60m^3 และพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาทำงานคือ 08:00 – 18:00 และนอกเวลาทำงานกำหนดจำนวนผู้ใช้งาน = 0 ที่มีปริมาตรอากาศคงที่ โดยใช้แบบจำลอง single-zone ใน MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของ CO_2 ภายในห้อง พลังงานของพัดลม ภาระการใช้พลังงานรวม และตัวชี้วัดด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร ข้อมูลอินพุตภายนอกประกอบด้วยอุณหภูมิภายนอก รังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ และ PM2.5 รายชั่วโมง ซึ่งใช้ข้อมูลจริงจาก NASA POWER และ Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายนรวมระยะเวลา 3 เดือนของประเทศไทย และนำมาใช้แทนการติดตั้งเซนเซอร์ภายนอกในต้นแบบจำลอง

การศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะ 3 กรณีหลัก ได้แก่ กรณีฐานแบบระบายอากาศธรรมชาติ (S0) กรณีระบายอากาศคงที่ (S1) และกรณีควบคุมอัตราการระบายอากาศตามความต้องการแบบ DCV ร่วมกับ PV-Fan (S2) ภายใต้ 2 โหมดการเดินระบบปรับอากาศคือโหมด A และโหมด B โดยยังไม่ได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนอย่างละเอียดหลายโซน การรั่วไหลอากาศเชิงซับซ้อน หรือแบบจำลองไดนามิกของอุปกรณ์จริงในระดับฮาร์ดแวร์ ทั้งนี้ จุดมุ่งหมายหลักของงานคือประเมินแนวโน้มเชิงระบบและผลของกลยุทธ์ควบคุม ไม่ใช่การสร้าง digital twin ที่ละเอียดระดับอาคารจริงทั้งหมด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ในห้องสำนักงานขนาดเล็ก
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนผู้ใช้งาน, ACH และความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง
3. เพื่อเปรียบเทียบผลของกลยุทธ์ S0, S1 และ S2 ต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร พร้อมประเมินผลกระทบด้านพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายของแต่ละกรณี
4. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน ระหว่าง IAQ (Indoor Air Quality) และพลังงาน สำหรับใช้เป็นแนวทางพัฒนาต้นแบบจริงในอนาคต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

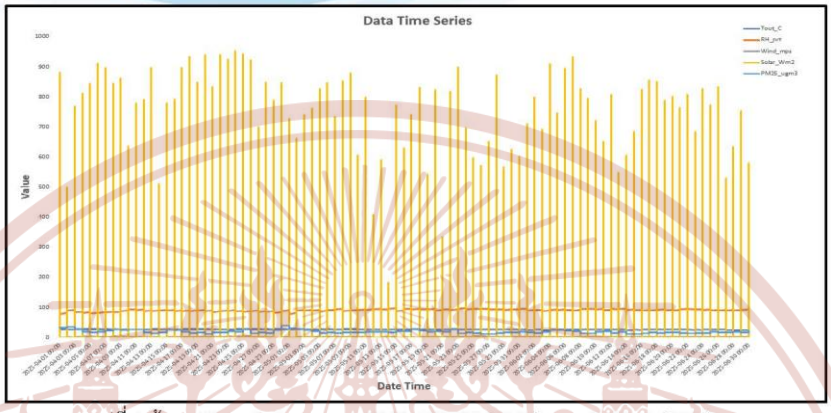
งานวิจัยนี้ช่วยให้ได้กรอบวิธีการจำลองและประเมินระบบระบายอากาศแบบ DCV ที่สามารถนำไปใช้ต่อยอดกับต้นแบบจริงได้ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทยซึ่งมีข้อมูลสิ่งแวดล้อมภายนอกที่เข้าถึงได้จากแหล่งข้อมูลสาธารณะ ผลการศึกษาสามารถใช้สนับสนุนการออกแบบระบบควบคุมการระบายอากาศที่เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งาน ลดการใช้พลังงานโดยไม่ลดทอนคุณภาพอากาศ และใช้เป็นข้อมูลประกอบการนำเสนอแนวคิดระบบ PV-Fan + DCV ต่ออาจารย์ ที่ปรึกษา หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ แบบจำลองยังสามารถเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาตัวควบคุม ขั้นสูงในอนาคต เช่น adaptive control หรือ predictive control

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงแบบจำลองโดยพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบระบายอากาศสำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก ปริมาตรประมาณ 60 ลูกบาศก์เมตร แบบจำลองใช้ข้อมูลภายนอกรายชั่วโมง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และรังสีดวงอาทิตย์จาก NASA POWER ร่วมกับข้อมูล PM2.5 จาก Air4Thai ในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน โดยกำหนดจำนวนผู้ใช้งานภายในห้องตามรูปแบบการใช้งานรายชั่วโมง

การศึกษานี้เปรียบเทียบ 3 กรณี ได้แก่ กรณีฐานแบบระบายอากาศธรรมชาติ (S0) กรณีระบายอากาศคงที่ (S1) และกรณีระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ (S2) ภายใต้ 2 รูปแบบการทำงานของระบบปรับอากาศ คือ ทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา และทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน

ตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินประกอบด้วย ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง ชั่วโมงที่ค่า CO_2 เกินเกณฑ์ ชั่วโมงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เกินเกณฑ์ ชั่วโมงเสี่ยงจาก PM2.5 รวมถึงพลังงานไฟฟ้า ค่าใช้จ่าย และสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์



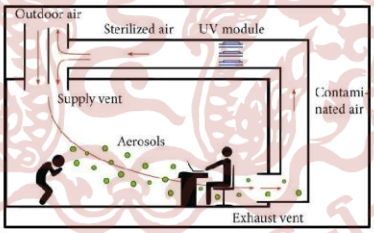
รูปที่ 1 ข้อมูล Time Series มาจาก NASA POWER (2025) และ Air4Thai (2025)

รูปที่ 1 แสดงข้อมูลภายนอกรายชั่วโมงที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจาก NASA POWER และข้อมูล PM2.5 จาก Air4Thai โดยข้อมูลดังกล่าวใช้แทนการวัดจากเซนเซอร์ภายนอกอาคาร เพื่อให้แบบจำลองสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงของประเทศไทยในช่วงเวลาศึกษา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวคิด Indoor Air Quality (IAQ) - CO_2 Balance

Indoor Air Quality (IAQ) คือคุณภาพของอากาศภายในอาคาร ซึ่งส่งผลต่อ สุขภาพ (Health) , ความสบาย (Comfort) , ประสิทธิภาพการทำงาน (Productivity)



รูปที่ 2 ภาพประกอบอธิบายการระบายภายในอาคารเพื่อปรับปรุง IAQ

รูปที่ 2 เป็นภาพประกอบแนวคิดการระบายอากาศภายในอาคาร เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการนำอากาศใหม่เข้าสู่ห้องกับการลดการสะสมของมลสารภายในอาคาร ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารในงานวิจัยนี้

โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้เป็นตัวชี้วัด IAQ คือ ความเข้มข้นของ CO_2 (Carbon Dioxide Concentration) เพราะ CO_2 เป็นตัวแทน (Proxy) ของ “จำนวนคน + การระบายอากาศ”

หลักการสมดุลมวลของ CO_2 ในห้อง

แบบจำลอง CO_2 ภายในห้องอาศัยหลักสมดุลมวลของสารใน single-zone enclosure ซึ่ง NIST อธิบายว่า single-zone mass balance ของ CO_2 สามารถเขียนได้ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในห้อง ปริมาตรห้อง อัตราการระบายอากาศ ความเข้มข้นภายนอก และอัตราการเกิด CO_2 ภายในพื้นที่

สมการทั่วไปคือ

$$V\frac{d(C(t))}{dt} = G(t) + Q(t)(C_{out}(t) - C(t))$$

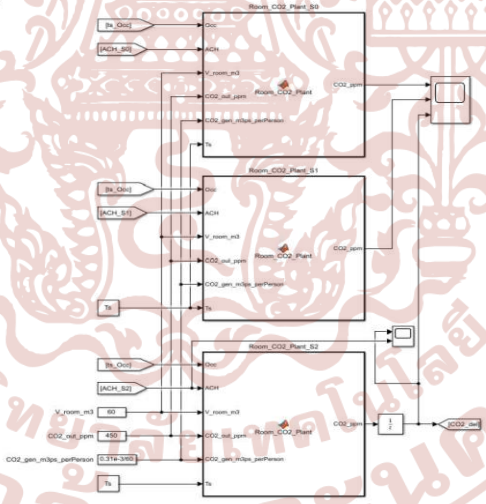
โดยที่

V = ปริมาตรห้อง (m^3) | C(t) = ความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง (ppm)

$C_{out}(t)$ = ความเข้มข้น CO_2 ภายนอกห้อง (ppm) | G(t) = อัตราการเกิด CO_2 จากผู้ใช้งานภายในห้อง

Q(t) = อัตราการไหลของอากาศใหม่เข้าสู่ห้อง (m^3/s)

สำหรับการจำลองแบบรายชั่วโมงใน Simulink งานวิจัยนี้ใช้สมการดังกล่าวเป็นแกนหลักของ Room_CO2_Plant block ในแต่ละ scenario



รูปที่ 3 Prototype Room_CO2_Plant block แต่ละ Scenario ภายใน Simulink

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองย่อยสำหรับคำนวณความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องในแต่ละกรณีศึกษา โดยใช้หลักสมดุลมวลแบบโซนเดียว เพื่อประเมินผลของกลยุทธ์การระบายอากาศที่แตกต่างกันต่อความเข้มข้น CO_2

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ และการแลกเปลี่ยนอากาศต่อเวลาชั่วโมง

Airflow (Q) = ปริมาณลมที่ไหลเข้า/ออกห้อง หน่วย (m^3/s หรือ m^3/h)



Air Change per Hour (ACH) = จำนวนครั้งที่ "อากาศในห้องถูกเปลี่ยนทั้งหมด" ต่อ 1 ชั่วโมง (h^{-1})

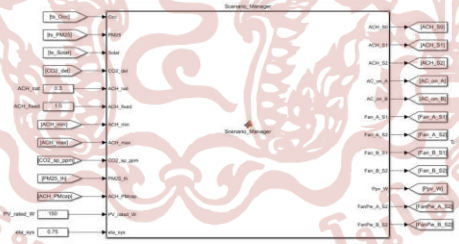
รูปที่ 4 หลักการทำงานของ ACH

รูปที่ 4 แสดงแนวคิดของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง ซึ่งใช้เชื่อมโยงระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับปริมาตรห้อง เพื่อใช้กำหนดสมรรถนะการระบายอากาศในแบบจำลอง

อัตราการระบายอากาศแบบ ACH นิยามได้จาก

$$ACH = \frac{Q}{V}$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลของอากาศใหม่เข้าสู่ห้องต่อชั่วโมง (m^3/h) และ V คือปริมาตรห้อง (m^3) เป็นสมการใช้เชื่อมระหว่างสมรรถนะของพัดลมจริงกับแบบจำลอง CO_2 ในห้อง หากทราบ air flow ของพัดลมและขนาดห้อง ก็สามารถประมาณค่า ACH ได้โดยตรงในเชิงวิศวกรรมเบื้องต้น ก่อนนำไปปรับแก้ด้วย logic การ



ควบคุมจริงใน Scenario_Manager

รูปที่ 5 Prototype Scenario_Manager ภายใน Simulink

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างส่วนจัดการกรณีศึกษาและตรรกะการควบคุมของแบบจำลอง ซึ่งทำหน้าที่กำหนดค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ การเปิดทำงานของพัดลม และเงื่อนไขการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละกรณีศึกษา

หลักการของ Demand-Controlled Ventilation

แนวคิด DCV คือการทำให้อัตราการระบายอากาศไม่คงที่ แต่เปลี่ยนตามภาระการใช้งานจริง เช่น จำนวนผู้ใช้งาน ระดับ CO_2 หรือข้อจำกัดด้าน PM2.5 หากภายในห้องมีผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นหรือ CO_2 มีแนวโน้มสูง ค่า ACH จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อขับอากาศเสียออกจากห้อง ในทางกลับกัน เมื่อภาระลดลง ค่า ACH ควรลดลงเพื่อลดการใช้พลังงาน หลักคิดนี้สอดคล้องกับบทบาทของ CO_2 ในฐานะตัวชี้วัดด้านความเพียงพอของการระบายอากาศที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานประเมินระบบระบายอากาศ

ในโมเดลที่สร้างขึ้น ค่า ACH_S2 ไม่ได้ขึ้นกับจำนวนผู้ใช้งาน เพียงตัวเดียว แต่ขึ้นกับตรรกะควบคุมร่วมของจำนวนผู้ใช้งาน , CO_2 ภายในห้อง และ PM2.5 ภายนอก จึงอธิบายได้ว่าบางช่วงจำนวนผู้ใช้งาน ไม่เปลี่ยนแต่ ACH ยังเปลี่ยน เพราะตัวควบคุม พยายามตอบสนองต่อค่า CO_2 ที่เปลี่ยนแปลงอยู่

หลักการผลิตไฟฟ้าจาก PV

NASA POWER (2024) ให้ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์แบบรายชั่วโมงที่เหมาะกับงานด้านพลังงานอาคาร ส่วนเทคโนโลยี PV เปลี่ยนพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่ง NREL อธิบายหลักการทำงานของระบบ photovoltaic ว่าเป็นการแปลงพลังงานจากโฟตอนของแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าในเซลล์ PV

ในการจำลองนี้ กำลังไฟจาก PV ถูกประมาณในรูป

$$Ppv\ (t) = \eta_{sys} \cdot P_{rated} \cdot \frac{G(t)}{G_{ref}}$$

โดยที่

P_{rated} = กำลังติดตั้งของแผง | G(t) = รังสีดวงอาทิตย์ ณ เวลา t

η_{sys} = ประสิทธิภาพรวมของระบบ | G_{ref} = ค่ารังสีอ้างอิง

สมการนี้ถูกใช้ใน Scenario_Manager เพื่อสร้างสัญญาณ P_{pv} แล้วส่งไปยัง Energy_6case

การคำนวณพลังงานและค่าใช้จ่าย

พลังงานไฟฟ้าสุทธิของระบบระบายอากาศและระบบปรับอากาศสามารถเขียนอย่างง่ายได้เป็น

$$P_{net}(t) = P_{AC}(t) + P_{fan}(t) - P_{PV}(t)$$

และในแบบจำลองของคุณใช้การหน่วงค่าไม่ให้ติดลบในรูป

$$P_{grid}(t) = \max(0, P_{fan}(t) - P_{PV}(t))$$

ส่วนพลังงานสะสมคำนวณจากผลรวมของกำลังไฟในแต่ละช่วงเวลา

$$E = \sum P(t)\Delta t$$

และค่าใช้จ่ายคำนวณจาก

$$Cost = E \times Tariff$$

ตัวชี้วัดด้าน IAQ (Indoor Air Quality)

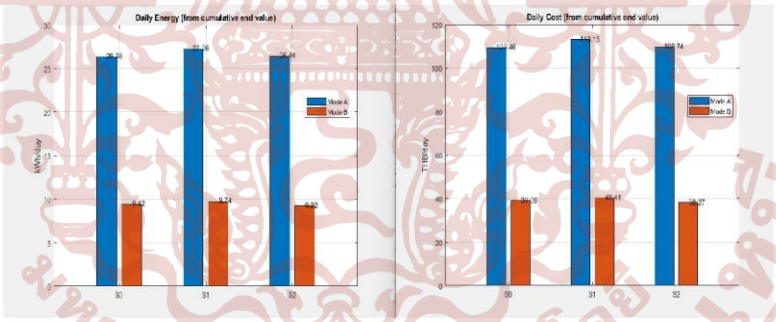
ตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ในงานนี้ประกอบด้วย

- จำนวนชั่วโมงที่ CO_2 เกินเกณฑ์ | - จำนวนชั่วโมงเสี่ยงด้าน *PM2.5* | - จำนวนชั่วโมงที่มีผู้ใช้งาน
- จำนวนชั่วโมงที่ *RH* เกินเกณฑ์ | - กราฟ *cumulative frequency* และ *exceedance duration* ของ CO_2

ตัวชี้วัดเหล่านี้ช่วยให้การประเมิน *IAQ* ไม่ได้ดูเพียงค่าเฉลี่ย แต่เห็นพฤติกรรมการกระจายตัวและความเสี่ยงเชิงเวลาได้ชัดเจนขึ้น

ผลการวิจัย

1. ผลด้านพลังงานและค่าใช้จ่าย



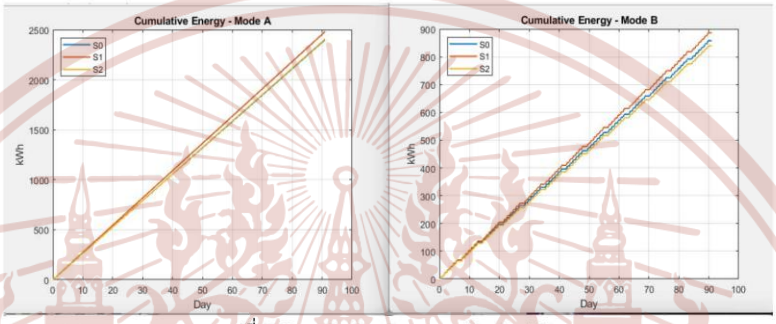
- Daily Energy (avg) | Daily Cost (avg)

รูปที่ 6 Daily Energy (avg) และ Daily Cost (avg)

รูปที่ *6* แสดงค่าพลังงานเฉลี่ยรายวันและค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายวันของทั้ง *3* กรณีศึกษา ภายใต้โหมดการทำงาน *A* และ *B* โดยพบว่าในโหมด *A* กรณี *S1* ใช้พลังงานสูงที่สุด ขณะที่ *S2* มีค่าต่ำกว่า *S1* อย่างต่อเนื่อง

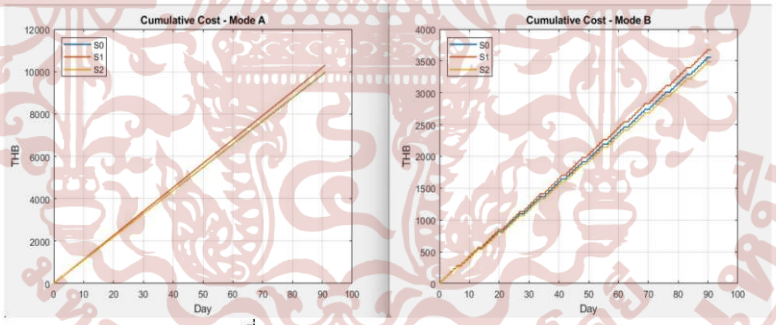
ส่วนในโหมด *B* กรณี *S2* ให้ค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด สะท้อนว่าการควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการช่วยลดการใช้พลังงานได้ชัดเจนเมื่อระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน

- Cumulative Energy – Mode A/B | Cumulative Cost – Mode A/B



รูปที่ 7 Cumulative Energy – Mode A/B

รูปที่ *7* แสดงพลังงานสะสมตลอดช่วงเวลาจำลองของแต่ละกรณีศึกษา โดยเส้นที่มีความชันมากกว่าสะท้อนการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า *S2* มีแนวโน้มสะสมต่ำกว่า *S1* โดยเฉพาะในโหมด *B*



รูปที่ *8* Cumulative Energy – Mode A/B

รูปที่ *8* แสดงค่าใช้จ่ายสะสมตลอดช่วงเวลาจำลองของแต่ละกรณีศึกษา โดยเส้นที่มีความชันมากกว่าสะท้อนค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเร็วกว่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า *S2* มีแนวโน้มสะสมต่ำกว่า *S1* โดยเฉพาะในโหมด *B*

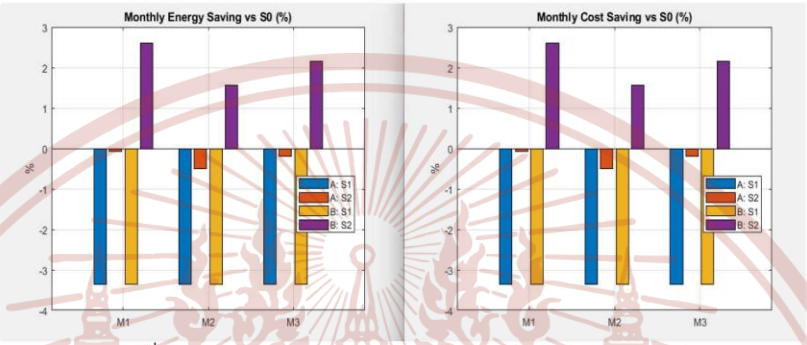


- Monthly Energy – Mode A/B | Monthly Cost – Mode A/B

รูปที่ 9 Monthly Energy – Mode A/B | Monthly Cost – Mode A/B

รูปที่ 9 แสดงพลังงานและค่าใช้จ่ายรายเดือนของแต่ละกรณีศึกษา เพื่อเปรียบเทียบผลในแต่ละเดือน พบว่า *S2* ให้ค่าต่ำกว่า *S1* อย่างสม่ำเสมอ และให้ผลชัดเจนมากขึ้นในโหมด *B*

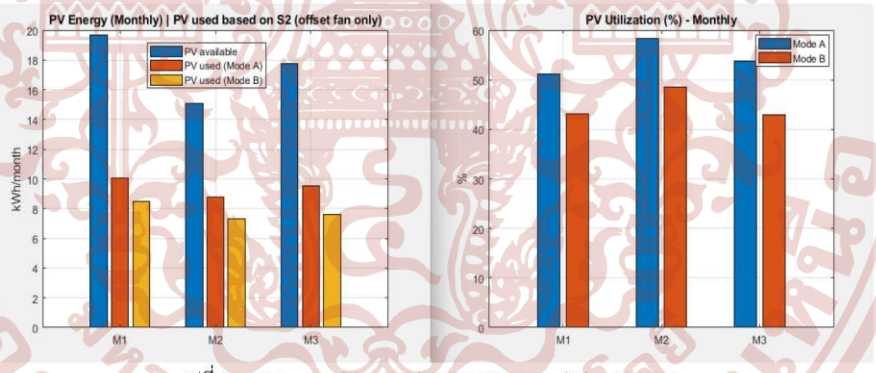
- Monthly Energy Saving vs S0 | Monthly Cost Saving vs S0



รูปที่ 10 Monthly Energy Saving vs S0 | Monthly Cost Saving vs S0

รูปที่ 10 แสดงผลการประหยัดพลังงานและการประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับกรณีฐาน *S0* โดยค่าบวกหมายถึงสามารถประหยัดได้เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ส่วนค่าลบหมายถึงมีการใช้พลังงานหรือค่าใช้จ่ายสูงกว่ากรณีฐาน ผลการจำลองชี้ว่า *S2* ภายใต้โหมด *B* ให้ผลการประหยัดเป็นบวกต่อเนื่องทั้ง *3* เดือน

- PV Energy (Monthly) | PV Utilization (%) – Monthly



รูปที่ 11 PV Energy (Monthly) | PV Utilization (%) – Monthly

รูปที่ *11* แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายเดือนและสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากพลังงานดังกล่าว โดยพบว่าระบบสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาศึกษา และช่วยลดภาระไฟฟ้าจากโครงข่ายได้บางส่วน

ผลการจำลองด้านพลังงานแสดงให้เห็นว่า ในโหมด *A* ซึ่งระบบปรับอากาศทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา กรณี *S1* มีการใช้พลังงานเฉลี่ยรายวันสูงสุด ขณะที่ *S0* มีค่าต่ำกว่า และ *S2* ให้ค่าการใช้พลังงานต่ำกว่า *S1* อย่างสม่ำเสมอ สะท้อนว่าการใช้ *DCV* ร่วมกับ *PV-fan* สามารถลดภาระพลังงานของระบบได้ แม้ผลต่างเชิงพลังงานจะไม่สูงมากในเชิงเปอร์เซ็นต์ แต่มีแนวโน้มคงที่ตลอดช่วงการจำลอง

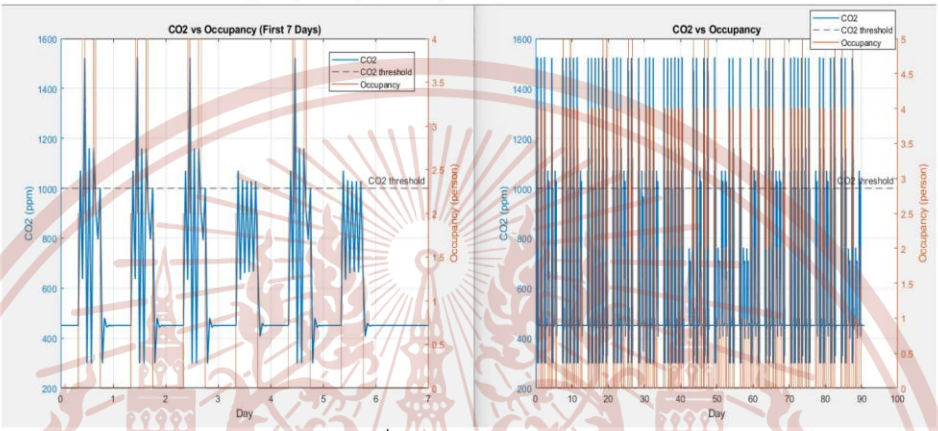
ในโหมด *B* ซึ่งระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน ความแตกต่างระหว่างกรณีศึกษาชัดเจนขึ้น โดย *S2* ให้ค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำสุดเมื่อเทียบกับ *S0* และ *S1* ในทุกเดือนที่ศึกษา แสดงว่าการควบคุมตาม จำนวนผู้ใช้งาน มีส่วนสำคัญต่อการลดพลังงานมากกว่าการใช้การระบายอากาศคงที่ เพียงอย่างเดียว และเมื่อรวมกับพลังงานจาก *PV* ยิ่งทำให้ผลด้านต้นทุนดีขึ้น

ผลการประเมินรายเดือนยังชี้ว่า กรณี *S2* ภายใต้โหมด B ให้ผลการประหยัดพลังงานและการประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นค่าบวกเมื่อเทียบกับกรณีฐาน *S0* ขณะที่ *S1* และบางกรณีในโหมด A มีค่าการประหยัดติดลบ ซึ่งหมายถึงใช้พลังงานมากกว่ากรณีฐาน ทั้งนี้ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการว่า การระบายอากาศที่ไม่ปรับตามภาระจริงอาจเพิ่มภาระระบบโดยไม่จำเป็น ในขณะที่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ช่วยลดพลังงานพัดลมได้บางส่วน โดยจากกราฟ *PV utilization* พบว่ามีการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ในระดับหนึ่งต่อเนื่องตลอด *3* เดือน

2. ผลด้าน IAQ และพฤติกรรม CO_2

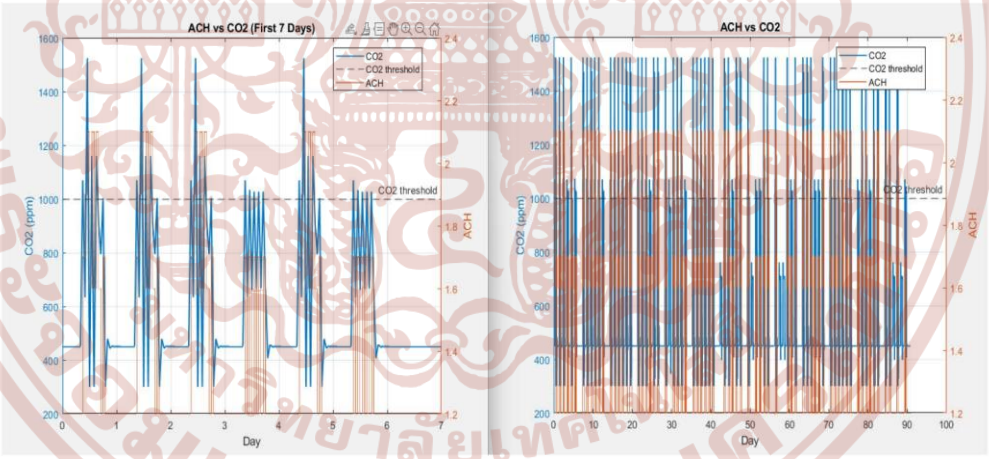
ผลด้าน *IAQ* แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น CO_2 ภายในห้องมีความสัมพันธ์ชัดเจนกับช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งาน โดยจากกราฟ CO_2 *vs Occupancy* ทั้งในช่วง *7* วันแรกและตลอด *91* วัน พบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น ค่า CO_2 จะมีแนวโน้มเพิ่มตามอย่างเด่นชัด เนื่องจากอัตราการเกิด CO_2 ภายในห้องสูงขึ้นจากการหายใจของผู้ใช้งาน ขณะที่ในช่วงไม่มีผู้ใช้งาน ค่า CO_2 จะค่อย ๆ ลดลงกลับเข้าใกล้ค่าภายนอกหรือค่าพื้นฐานของระบบ

- CO_2 vs Occupancy (7 Days , 91 Days)



รูปที่ 12 CO_2 vs Occupancy

รูปที่ *12* แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CO_2 กับจำนวนผู้ใช้งานภายในห้อง ทั้งในช่วง *7* วันแรก และตลอด *91* วัน โดยพบว่าค่า CO_2 เพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานอย่างชัดเจน และค่อย ๆ ลดลงเมื่อไม่มีผู้ใช้งาน



- ACH vs CO_2 (7 Days , 91 Days)

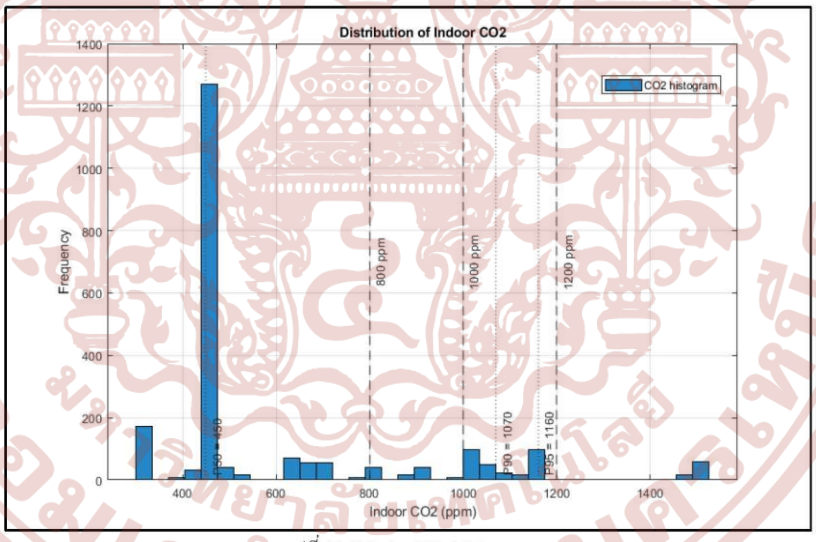
รูปที่ 13 ACH vs CO2

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงกับความเข้มข้น CO_2 ในกรณี S2 โดยพบว่าเมื่อค่า CO_2 สูงเข้าใกล้เกณฑ์ ระบบจะเพิ่มค่า ACH เพื่อเร่งการระบายอากาศ และจะลดลงเมื่อค่า CO_2 กลับเข้าสู่ระดับที่ยอมรับได้

สำหรับกรณี *S2* ซึ่งใช้ DCV พบว่า ACH ไม่ได้เปลี่ยนตามจำนวนผู้ใช้งาน เพียงอย่างเดียว แต่เปลี่ยนตามจำนวนผู้ใช้งานร่วมกับระดับ CO_2 และเงื่อนไขของ PM2.5 ภายนอก ทำให้บางช่วงแม้จำนวนผู้ใช้งานไม่เพิ่ม แต่ ACH ยังเพิ่มขึ้นได้ เพื่อเร่งระบายอากาศและควบคุม CO_2 ไม่ให้เกินค่าที่กำหนด พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนการทำงานของตัวควบคุม ที่ตอบสนองต่อสภาพจริงของระบบ ไม่ใช่เพียงการติดตามคนแบบตรงตัว

จากกราฟ *ACH vs* CO_2 พบว่า *ACH_S2* มีพฤติกรรมปรับขึ้นลงสอดคล้องกับความเข้มข้น CO_2 ในระดับหนึ่ง กล่าวคือ เมื่อ CO_2 สูงเข้าใกล้หรือเกินเกณฑ์ ค่า *ACH* จะถูกดันขึ้นเพื่อระบายอากาศมากขึ้น และเมื่อ CO_2 ลดลง ค่า *ACH* จะค่อย ๆ กลับลงมาใกล้ค่าต่ำสุด ระบบจึงมีลักษณะเป็น *control tracking* แบบ *rule-based* ไม่ใช่ *tracking* แบบ *ideal reference smooth* ตลอดเวลา แต่ยังสะท้อนการควบคุมเชิงเหตุผลตามวัตถุประสงค์ของ *DCV* ได้ชัดเจน

- IAQ Summary (Figure 1-5)

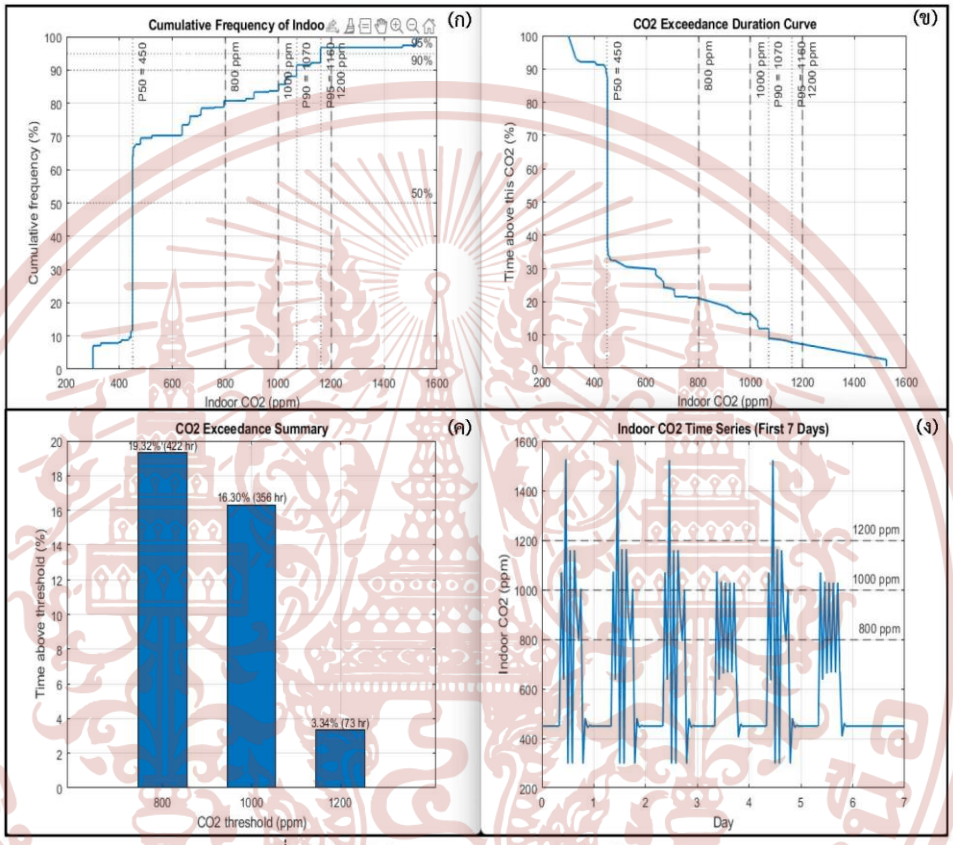


รูปที่ 14 IAQ 1 : CO_2 Histogram

รูปที่ 14 แสดงการกระจายความถี่ของความเข้มข้น CO_2 ภายในห้อง โดยข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่าต่ำถึงปานกลาง แต่ยังมีบางช่วงเวลาที่ค่า CO_2 สูงเกินเกณฑ์ ซึ่งสะท้อนว่ายังมีความเสี่ยงในบางสถานการณ์ที่ภาระผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของ CO_2 จาก *IAQ summary* พบว่า *distribution* ของ CO_2 กระจุกตัวมากในช่วงค่าต่ำใกล้พื้นฐานของระบบ แต่ยังมีส่วนหางด้านขวาที่ลากไปถึงช่วงความเข้มข้นสูงในบางเหตุการณ์ แสดงว่าระบบส่วนใหญ่อยู่ในสภาพปลอดภัยหรือยอมรับได้ แต่ยังมีบางช่วงที่เกิด *peak* จากภาระผู้ใช้งานหรือการตอบสนองของการระบายอากาศ ที่ไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

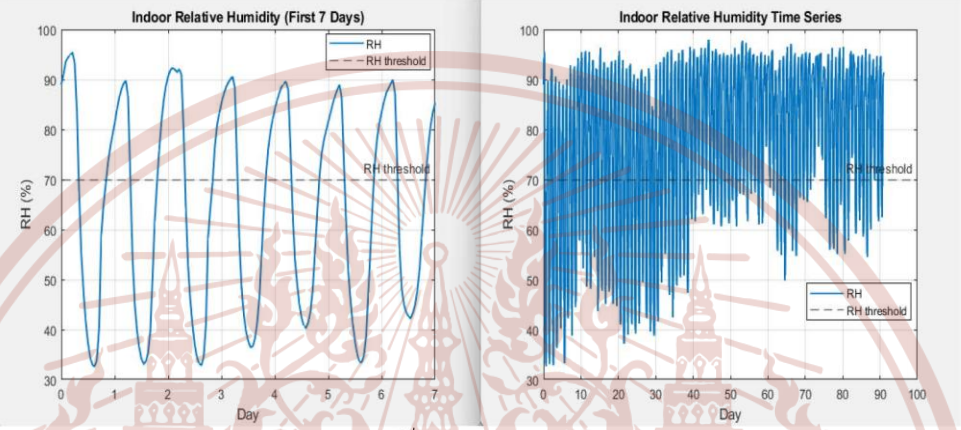
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รูปที่ 15 (ก) IAQ Summary 2 – Cumulative Frequency
(ข) IAQ Summary 3 – Exceedance Duration Curve
(ค) IAQ Summary 4 – CO2 Exceedance Summary
(ง) IAQ Summary 5 – First 7 Days CO2

รูปที่ 15 แสดงผลสรุปเชิงสถิติของ CO_2 ประกอบด้วยกราฟความถี่สะสม กราฟระยะเวลาที่ค่าเกินเกณฑ์ สรุปสัดส่วนช่วงเวลาที่ค่า CO_2 เกินเกณฑ์ และกราฟค่า CO_2 ในช่วง 7 วันแรก ซึ่งช่วยให้เห็นทั้งภาพรวมของการกระจายตัวและความเสี่ยงเชิงเวลา

- RH Time Series (7 Days , 91 Days)



รูปที่ 16 RH Time Series

รูปที่ 16 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทั้งในช่วง 7 วันแรกและตลอด 91 วัน โดยพบว่าหลายช่วงเวลามีค่าความชื้นสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ สะท้อนว่าความชื้นยังเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบระบบ

ในด้านความชื้นสัมพัทธ์ กราฟ RH time series แสดงให้เห็นว่าระบบมีค่าความชื้นสูงกว่าระดับเกณฑ์ที่ 70% ในหลายช่วงเวลา โดยเฉพาะบางเดือนที่มีแนวโน้มความชื้นสัมพัทธ์สูงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า RH high percent และ RH high hours ที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ผลดังกล่าวชี้ว่าประเด็นความชื้นเป็นอีกมิติหนึ่งของ IAQ ที่ยังต้องได้รับการพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบหรือปรับกลยุทธ์ควบคุมในอนาคต

3. ผลด้าน Trade-off ระหว่าง IAQ และ Energy

Trade-off คือความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่าง IAQ (Indoor Air Quality) วัดจาก

- CO_2 risk hours
- PM risk hours

Energy / Cost -> THB/month

เป้าหมายคือ ลด risk โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด

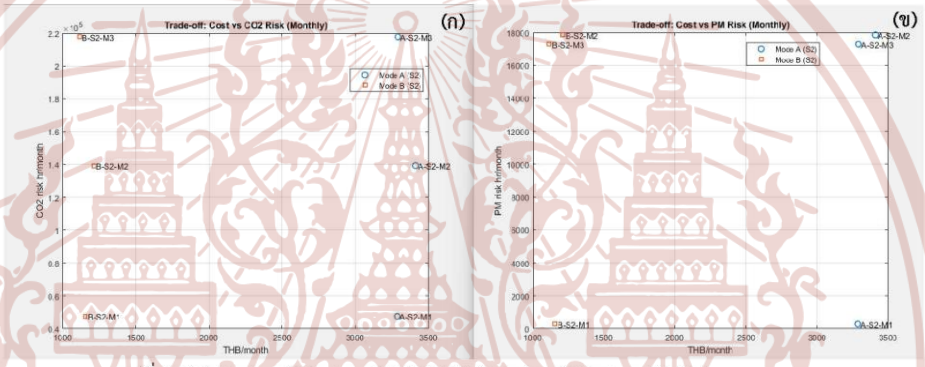
ผลความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน ระหว่างต้นทุนกับความเสี่ยงด้าน IAQ เป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้ โดยจากกราฟ *Cost vs CO_2 Risk* และ *Cost vs PM Risk* พบว่าแต่ละกรณีศึกษาให้ตำแหน่งบนกราฟแตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ กรณีที่ลดพลังงานมากที่สุดไม่จำเป็นต้องให้ IAQ ที่ดีที่สุดเสมอไป ขณะที่กรณีที่ควบคุม IAQ ได้ดีมากอาจต้องแลกกับต้นทุนที่สูงขึ้น

จากกราฟ

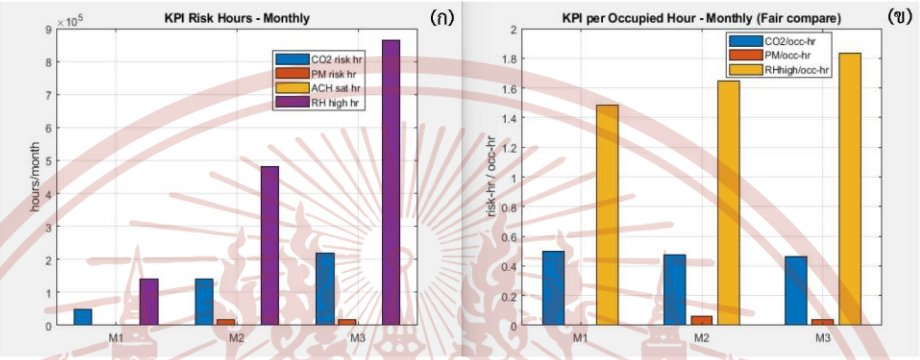
- Mode A เปิดแอร์ตลอดและ *PV Fan* แบบ *Fix* ค่า *Cost* สูง แต่ CO_2 *Risk* ต่ำ
- *Mode B* เปิดแอร์และ *PV Fan DCV* เฉพาะตอนมีคน ค่า *Cost* ต่ำ แต่ CO_2 *Risk* สูงขึ้น

- Trade-off Cost vs CO2 Risk | Trade-off Cost vs PM Risk



รูปที่ 17 (ก) Trade-off Cost vs CO2 Risk | (ข) Trade-off Cost vs PM Risk

รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายกับชั่วโมงเสี่ยงด้าน CO_2 และ *PM2.5* เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่างการใช้พลังงานกับคุณภาพอากาศภายในอาคาร ตำแหน่งที่มีค่าใช้จ่ายต่ำและความเสี่ยงต่ำถือว่าเหมาะสมกว่าในเชิงสมรรถนะของระบบ



- KPI Risk Hour – Monthly | KPI per Occupied Hour – Monthly

รูปที่ 18 (ก) KPI Risk Hour – Monthly | (ข) KPI per Occupied Hour – Monthly

รูปที่ 18 แสดงจำนวนชั่วโมงเสี่ยงรายเดือนและจำนวนชั่วโมงเสี่ยงต่อชั่วโมงการใช้งานจริง ซึ่งช่วยให้เปรียบเทียบความเสี่ยงของแต่ละกรณีศึกษาได้อย่างเป็นธรรมมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม กรณี *S2* โดยเฉพาะเมื่อทำงานร่วมกับ logic occupancy-based mode มีแนวโน้มวางตัวอยู่ในตำแหน่งที่สมดุลกว่าระหว่างพลังงาน และ IAQ (Indoor Air Quality) กล่าวคือ ลดค่าใช้จ่ายได้ โดยไม่ทำให้ความเสี่ยงด้าน CO_2 และ PM สูงเกินไปเมื่อเทียบกับกรณีการระบายอากาศคงที่ ผลลัพธ์นี้สะท้อนว่าการใช้ *DCV* ร่วมกับ *PV-fan* มีศักยภาพในการเป็นกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับอาคารต้นแบบที่ต้องการทั้งประหยัดพลังงานและรักษาคุณภาพอากาศภายใน

เกณฑ์การประเมินผลและการพิจารณาผ่านเกณฑ์

เพื่อให้การแปลผลการจำลองมีความชัดเจน งานวิจัยนี้กำหนดเกณฑ์การประเมินดังนี้

1. ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องไม่ควรเกิน *1,000* ส่วนในล้านส่วน โดยหากค่า CO_2 สูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าวจะนับเป็นช่วงเวลาไม่ผ่านเกณฑ์ด้านคุณภาพอากาศ
2. ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไม่ควรเกินร้อยละ *70* โดยหากค่าสูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าวจะนับเป็นช่วงเวลาไม่ผ่านเกณฑ์ด้านความสบายและคุณภาพอากาศ
3. ค่า *PM2.5* ภายนอกอาคารที่สูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขจำกัดการระบายอากาศของระบบเพื่อหลีกเลี่ยงการนำอากาศภายนอกที่มีมลพิษสูงเข้าสู่ภายในอาคาร

4. ในด้านพลังงาน หากกรณีศึกษามีค่าพลังงานไฟฟ้ารวมและค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากรณีฐานคือ (S0) กรณีระบายอากาศธรรมชาติ และ (S1) กรณีระบายอากาศคงที่ จะถือว่ามีผลด้านการประหยัดพลังงานและการประหยัดค่าใช้จ่ายที่ดีกว่า
5. ในด้านภาพรวม ระบบจะถือว่ามีสมรรถนะดีกว่าเมื่อสามารถลดจำนวนชั่วโมงที่ค่า CO_2 หรือความชื้นสัมพัทธ์เกินเกณฑ์ได้ โดยไม่เพิ่มการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินผลและการพิจารณาผ่านเกณฑ์ของระบบระบายอากาศ

ตัวแปรการประเมิน	เกณฑ์ที่กำหนด	เงื่อนไขการผ่านเกณฑ์
CO_2 ภายในห้อง	ไม่เกิน 1,000 ppm	ค่า CO_2 ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	ไม่เกิน 70%	ค่า RH ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
PM2.5 ภายนอกอาคาร	ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด	ไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อคุณภาพอากาศภายใน
พลังงานไฟฟ้ารวม	ต่ำกว่ากรณีฐาน (S0) , (S1)	แสดงถึงการประหยัดพลังงาน
ค่าใช้จ่ายรวม	ต่ำกว่ากรณีฐาน (S0) , (S1)	แสดงถึงการประหยัดค่าใช้จ่าย

อภิปรายผลและสรุปผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานโดยไม่ทำให้คุณภาพอากาศภายในอาคารลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีระบายอากาศคงที่ กรณี S2 ให้ผลที่สมดุลกว่า ทั้งในด้านความเข้มข้น CO_2 ค่าใช้จ่ายและพลังงานไฟฟ้ารวม โดยเฉพาะภายใต้โหมดที่ระบบปรับอากาศทำงานเฉพาะช่วงมีผู้ใช้งาน

ประเด็นสำคัญที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การระบายอากาศที่ปรับตามความต้องการจริงของห้องมีผลต่อการลดพลังงานมากกว่าการกำหนดอัตราการระบายอากาศแบบคงที่ เนื่องจากระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ใช้งานและระดับ CO_2 ได้โดยตรง ขณะเดียวกันการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังช่วยชดเชยการใช้พลังงานของพัดลม ทำให้ผลรวมด้านพลังงานดีขึ้น

ในเชิงองค์ความรู้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การประเมินระบบระบายอากาศไม่ควรพิจารณาเฉพาะความเข้มข้น CO_2 หรือพลังงานเพียงด้านใดด้านหนึ่ง แต่ควรพิจารณาร่วมกันในลักษณะของความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนระหว่างคุณภาพอากาศภายในอาคาร ความชื้นสัมพัทธ์ ภาระมลพิษภายนอก และพลังงานที่ใช้จริง ผลดังกล่าวช่วยขยายมุมมองจากการประเมินแบบตัวแปรเดียว ไปสู่การประเมินเชิงระบบที่ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากขึ้น

ในเชิงประยุกต์ใช้ งานวิจัยนี้ให้กรอบแนวทางสำหรับการออกแบบและประเมินระบบระบายอากาศสำหรับอาคารขนาดเล็กในบริบทประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจริงจากแหล่งข้อมูลสาธารณะ ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดด้านการติดตั้งเครื่องมือวัดภายนอกอาคาร และสามารถนำไปใช้เป็นฐานสำหรับพัฒนาต้นแบบจริง หรือระบบควบคุมขั้นสูงในอนาคต

อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองยังสะท้อนว่าความชื้นสัมพัทธ์ยังเป็นข้อจำกัดสำคัญของระบบ และตรรกะควบคุมแบบอาศัยกฎยังทำให้การตอบสนองของค่า ACH และ CO_2 มีลักษณะเป็นขั้นในบางช่วงเวลา ดังนั้นงานในอนาคตควรพัฒนาวิธีควบคุมที่มีความต่อเนื่องมากขึ้น และควรตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากต้นแบบจริง

ข้อเสนอแนะงานต่อยอดจากงานวิจัยนี้

1. ควรทดลองปรับปรุงกฎการควบคุมของ *DCV* ให้มีความนุ่มนวลขึ้น เพื่อลดการแกว่งของ CO_2 และ *ACH*
2. ควรขยายแบบจำลองให้รวมผลของความร้อนแฝงและผลของค่าความชื้นสัมพัทธ์ ต่อความสบายเชิงความร้อนอย่างละเอียด
3. ควรเก็บข้อมูลจากต้นแบบจริงจากสถานที่จริง โดย *Sensor* เพื่อใช้ *validate* แบบจำลอง *Simulink*
4. ควรทดลองเพิ่มกรณีศึกษาที่เปลี่ยน *setpoint* ของระบบปรับอากาศ หรือเปลี่ยนขนาด *PV* และพัดลม เพื่อศึกษาความไวของระบบ
5. ควรประเมินเพิ่มเติมในระดับห้องจริงหลายขนาด หรือหลายรูปแบบ จำนวนผู้ใช้งาน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้คำแนะนำด้านแนวคิด การออกแบบแบบจำลอง และการวิเคราะห์ผล ตลอดจนขอบคุณแหล่งข้อมูลสาธารณะ ได้แก่ NASA POWER (2025) และ Air4Thai (2025) กรมควบคุมมลพิษ ที่ทำให้สามารถนำข้อมูลจริงมาใช้ในการจำลองและประเมินระบบในงานวิจัยนี้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2025). *Air4Thai.* https://air4thai.pcd.go.th

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2025). Indoor carbon dioxide. ASHRAE.

ASHRAE. (2019). ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Chenari, B., Dias Carrilho, J., & Gameiro da Silva, M. (2025). Experimental assessment of demand-controlled ventilation strategies for energy efficiency and indoor air quality in office spaces. MDPI Air.

Goyal, S., Barooah, P., & Middelkoop, T. (2015). Experimental study of occupancy-based control of HVAC zones. Applied Energy.

National Aeronautics and Space Administration. (2025). NASA POWER Hourly API. https://power.larc.nasa.gov

National Renewable Energy Laboratory. (2016). Facility-scale solar photovoltaic guidebook. NREL.

National Renewable Energy Laboratory. (1997). Photovoltaics: Basic design principles and components. NREL.

Persily, A. K. (2017). Indoor carbon dioxide as a metric of ventilation and IAQ: Yes or no or maybe? NIST/AIVC Workshop.

Persily, A. K. (2021). Indoor Carbon Dioxide Metric Analysis Tool (NIST Technical Note 2213). National Institute of Standards and Technology.


PATHUMTHANI
UNIVERSITY
www.ptu.ac.th
มหาวิทยาลัยปทุมธานี
PATHUMTHANI UNIVERSITY
140 ม.4 ต.บ้านกลาง อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000 โทรศัพท์ 0-2975-6999 โทรสาร 0-2979-6728



มหาวิทยาลัยปทุมธานีและภาคีเครือข่ายทางวิชาการ

ขอมอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

ปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

ได้รับรางวัล ดีเด่น ในการนำเสนอแบบบรรยาย

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน

โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2569
หัวข้อ " สร้างทรัพยากรมนุษย์คุณภาพและนวัตกรรมที่มีคุณค่าเพื่อพัฒนา สังคม ธุรกิจ และ สุขภาพ ที่ยั่งยืน
ในวันเสาร์ที่ 25 เมษายน 2569

ดร.ชนากานต์ ยินยง
อธิการบดีมหาวิทยาลัย



มหาวิทยาลัยปทุมธานีและภาคีเครือข่ายทางวิชาการ

ขอมอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

ปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์ , ปรีดา จันทวงษ์ และดุสิต งามรุ่งโรจน์

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานเรื่อง

แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศแบบ PV-Fan Assisted Demand-Controlled Ventilation เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงาน

โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2569
หัวข้อ " สร้างทรัพยากรมนุษย์คุณภาพและนวัตกรรมที่มีคุณค่าเพื่อพัฒนา สังคม ธุรกิจ และ สุขภาพ ที่ยั่งยืน
ในวันเสาร์ที่ 25 เมษายน 2569

ดร.ชนากานต์ ยินยง
อธิการบดีมหาวิทยาลัยปทุมธานี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายปรวิทย์ บัณณสิทธิ์รัตน์

ชื่อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองการประเมินสมรรถนะระบบระบายอากาศตามความต้องการด้วยการควบคุม CO_2 สำหรับห้องสำนักงานขนาดเล็ก เพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารและลดการใช้พลังงานของพัดลม

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

ประวัติ

วัน เดือน ปีเกิด : 17 เมษายน 2539

ที่อยู่ปัจจุบัน : 159/646 พระรามหกแมนชั่น ตึก B ซอยจรัญฯ 96/1 ถนน จรัญสนิทวงศ์ แขวงบางอ้อ เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร 10700

ที่ทำงานปัจจุบัน : (กฟผ. สำนักงานไทรน้อย) เลขที่ 81 หมู่ 11 อาคาร ท.0019 ถนน บางกรวย-ไทรน้อย ต.ไทรน้อย อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี 11150

อาชีพ : พนักงานรัฐวิสาหกิจ

การศึกษา : อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต เทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ