

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศตามข้อมูลความหนาแน่นของบุคคลในอาคาร  
สำนักงานเพื่อป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคโควิด-19



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of varying ventilation rates based on occupancy density in office building for  
preventing COVID-19 transmission



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตรากระบายอากาศตาม  
ข้อมูลความหนาแน่นของบุคคลในอาคารสำนักงานเพื่อ  
ป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคโควิด-19  
โดย น.ส.พิชชาพร ประพัฒน์ศรี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)  
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ)  
..... กรรมการ  
(ดร.นภัสสร วงษ์เสาวศุภ)  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ)

พิชชาพร ประพินศรี : ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศตามข้อมูลความหนาแน่นของบุคคลในอาคารสำนักงานเพื่อป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคโควิด-19. ( Effects of varying ventilation rates based on occupancy density in office building for preventing COVID-19 transmission) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สรลล ศาลากิจ

การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศผ่านระบบทางเดินหายใจเป็นสิ่งที่มนุษย์เผชิญมาตั้งแต่อดีต การควบคุมสภาพแวดล้อมสามารถลดปริมาณเชื้อโรค และความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้ใช้งานพื้นที่ได้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อร่วมกับดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม และประสิทธิภาพอุปกรณ์ป้องกันซึ่งแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 10.78 เปอร์เซ็นต์จากตัวอย่างสถานการณ์จริงทั้งหมด 11 สถานการณ์ แบบจำลองใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นคนกับอัตราการระบายอากาศในพื้นที่ได้ เพื่อใช้กำหนดมาตรการป้องกันโรคติดต่อ เช่น การกำหนดความหนาแน่นคนในพื้นที่ การกำหนดระยะเวลาเข้าใช้ และการสวมใส่หน้ากากอนามัย ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์จำนวนคนที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่เมื่อมีการระบายอากาศที่จำกัด กำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 และวิเคราะห์หาอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมกับจำนวนคนที่เข้าออกโดยพื้นที่ที่มีการรักษาความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ พื้นที่ตัวอย่าง คือ พื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อกำหนดระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่เป็นเวลา 1 – 3 ชั่วโมงและค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.01 – 0.05 ในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศจำกัด การใส่หน้ากากอนามัยจะรับความหนาแน่นได้สูงกว่าการไม่ใส่หน้ากากอนามัย โดยเพิ่มขึ้นได้ 51.52 – 800.00 เปอร์เซ็นต์เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 0.02 หากยอมรับค่าที่มากขึ้นได้จะทำให้พื้นที่สามารถรับคนได้มากขึ้น ในขณะที่การปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนคนที่เข้าออกพื้นที่เพื่อรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้ไม่เกิน 0.02 ในช่วงเวลาที่อยู่ในพื้นที่ 3 ชั่วโมง การใส่หน้ากากอนามัยจะทำให้สามารถลดอัตราการระบายอากาศลง แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าค่าการระบายอากาศมาตรฐาน จึงกล่าวได้ว่า การระบายอากาศตามมาตรฐานมีค่าไม่เพียงพอในการรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้ไม่เกิน 0.02 ในช่วงเวลาที่อยู่ในพื้นที่ 3 ชั่วโมง การปรับค่าดังกล่าวส่งผลให้ค่าพลังงานและค่าไฟฟ้าสูง ซึ่งในกรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัย และใส่หน้ากากอนามัยสูงกว่าถึง 1,351 – 1,802 และ 169 – 269 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6370197021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Airborne transmission; Occupancy density; Probability of infection; Ventilation rates;

Pitchaporn Prapinsri : Effects of varying ventilation rates based on occupancy density in office building for preventing COVID-19 transmission. Advisor: Asst. Prof. Dr. Saran Salakij

The airborne transmission of pathogens through the respiratory system has been a challenge that humans have faced since the past. Controlling the environment can reduce the quantity of disease-causing agents and the probability of infection for individual. A risk assessment model in conjunction with a social distancing index and the effectiveness of protective devices is developed. The model has an average deviation of only 10.78 percent from actual airborne transmission data in a total of 11 situations. The model analyzes the relationship between occupancy density and ventilation rates to determine preventive measures against contagious diseases. These measures include setting appropriate occupancy density, time limits, and mandating face mask usage. This study analyzes the appropriate occupancy density and air ventilation rates in areas with limited ventilation rates, following ASHRAE 62.1 standards. Sample areas such as office spaces, restaurants, and bars are considered. The results show that wearing face masks increases occupancy density by 51.52-800 percent compared to not wearing masks. Allowing for higher probability of infection values would enable higher occupancy rates. Adjusting ventilation rates based on occupancy density helps maintain infection probability below 0.02 for a 3-hour stay. Wearing masks reduces ventilation rates but they remain higher than standards. Standard rates may not be enough to keep infection probability low. The predicted ventilation rates lead to higher energy consumption and electricity costs, exceeding the standards for both the case of not wearing a mask and wearing a mask, with percentages of 1,351 – 1,802 and 169 – 269, respectively.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ เสนอแนวคิด รวมถึงให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และเอาใจใส่รายละเอียดในทุกขั้นตอนงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาดังกล่าว และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.นภัสสร วงษ์เสาวสุภุกร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ประภอบ สุรวุฒินาวรรณ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำที่ดีให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งยังสละเวลาร่วมเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา เป็นกำลังใจ คอยให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย รวมถึงขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

และในท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี รวมไปถึงรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยคอยสนับสนุนการทำงานอย่างดีเสมอมา ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี สำหรับคุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัย หากมีสิ่งใดบกพร่อง ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พิชชาพร ประพิณศรี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับการจัดการระบบระบายอากาศ.....	6
2.1.1 ลักษณะการแพร่กระจายของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019.....	6
2.1.2 การป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัสโคโรนา 2019.....	8
2.1.3 มาตรฐานการจัดการระบบปรับอากาศในสถานการณ์โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ...	9
2.1.4 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีอัตราระบายอากาศ.....	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ.....	13
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศ.....	14

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจนับจำนวนและระยะห่างระหว่างบุคคลโดยใช้กล้องวงจรปิด	14
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	16
3.1 การประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ .....	16
3.1.1 แบบจำลอง Wells-Riley [25].....	17
3.1.2 แบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci [30].....	18
3.1.3 แบบจำลอง Sun และ Zhai [27].....	19
3.2 มาตรฐานการระบายอากาศในพื้นที่.....	20
3.3 สมการคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศ.....	21
บทที่ 4 แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ.....	23
4.1 การสร้างสมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่มีความแม่นยำ.....	23
4.2 การพัฒนาแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ.....	24
4.3 การสอบเทียบผลแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ .....	25
บทที่ 5 การวิเคราะห์จำนวนคนที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่สำหรับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้เมื่อมีการระบายอากาศตามมาตรฐานของ ASHRAE .....	28
5.1 กระบวนการหาจำนวนคนในพื้นที่ที่มากที่สุดที่เหมาะสมกับอัตราการระบายอากาศที่กำหนด	28
5.2 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสม .....	30
บทที่ 6 ผลกระทบของการปรับอัตราการระบายอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของคนในพื้นที่เพื่อให้ได้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ .....	35
6.1 กระบวนการปรับอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ .....	35
6.2 ผลการทำนายอัตราการระบายอากาศ .....	37
6.2.1 การปรับอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่.....	37
6.2.2 การปรับอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่เปลี่ยนแปลง ..	40
6.3 การเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ระหว่างกรณีอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลคงที่และความหนาแน่นของบุคคลที่เปลี่ยนแปลงไป.....	50
6.3.1 ผลการสอบเทียบแบบจำลองคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า .....	50



6.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้า .....	51
6.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้กับค่าจำนวนคนจากพื้นที่จริง .....	54
บทที่ 7      สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	57
บรรณานุกรม.....	61
ภาคผนวก.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	74



## สารบัญรูป

รูปที่ 2- 1 การแพร่กระจายของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 .....	6
รูปที่ 2- 2 การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศระยะสั้นและระยะไกล.....	7
รูปที่ 4- 1 การเปรียบเทียบเส้นโค้งของดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมกับข้อมูลการทดลอง .....	24
รูปที่ 4- 2 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากแบบจำลองต่าง ๆ จากทั้งหมด 11 สถานการณ์ .....	26
รูปที่ 5- 1 แผนภาพการหาจำนวนคนที่เหมาะสมในพื้นที่ .....	29
รูปที่ 5- 2 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมใน (ก) พื้นที่สำนักงาน (ข) พื้นที่ร้านอาหาร และ (ค) พื้นที่บาร์ เมื่อมีค่าความเสี่ยงที่ยอมรับมีค่า 0.01 ถึง 0.05 และระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่มีค่า 1 ถึง 3 ชั่วโมง.....	32
รูปที่ 5- 3 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของจำนวนคนในพื้นที่เมื่อทุกคนใส่หน้ากากอนามัยเทียบกับไม่ใส่ หน้ากากอนามัยใน (ก) พื้นที่สำนักงาน (ข) พื้นที่ร้านอาหาร และ (ค) พื้นที่บาร์ โดยไม่กำหนดค่า จำนวนคนสูงสุดที่พื้นที่สามารถรับได้ .....	34
รูปที่ 6- 1 แผนภาพการหาอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของคนในพื้นที่ .....	36
รูปที่ 6- 2 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่ที่ยอมรับได้ของพื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ใน กรณีความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่เมื่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที.....	38
รูปที่ 6- 3 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่เปลี่ยนแปลงตามเวลากรณีความหนาแน่นของคนในพื้นที่คงที่ เมื่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที โดย (ก) กรณีไม่ใส่ หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ข) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ค) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัย ในร้านอาหาร (ง) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (จ) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ และ (ฉ) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในบาร์.....	40
รูปที่ 6- 4 การกำหนดจำนวนคนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์ .....	42
รูปที่ 6- 5 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่เมื่อความ หนาแน่นของคนเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ใน เวลา 180 นาทีของพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์ .....	44

## สารบัญรูป

รูปที่ 6- 6 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่เมื่อความหนาแน่นของคนเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที เมื่อ (ก) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ข) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ค) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (ง) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (จ) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ และ (ฉ) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ .....	45
รูปที่ 6- 7 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์ .....	47
รูปที่ 6- 8 อัตราการระบายอากาศกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที ของพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์ .....	48
รูปที่ 6- 9 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที โดย (ก) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ข) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ค) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (ง) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (จ) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ และ (ฉ) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ .....	49
รูปที่ 6- 10 การสอบเทียบค่าไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า .....	51
รูปที่ 6- 11 สภาพอากาศภายนอกจากฐานข้อมูล IWEK ของประเทศไทย .....	52
รูปที่ 6- 12 ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อปีจากการทำนายอัตราการระบายอากาศทั้งกรณีไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัยเพื่อให้ได้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที โดย (ก) ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีของกรณีระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 กรณีความหนาแน่นของคนคงที่และเปลี่ยนแปลงตามเวลา และ (ข) เพอร์เซ็นต์ค่าไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกรณีระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 .....	53
รูปที่ 6- 13 จำนวนคนที่มีการเข้าออกพื้นที่สำนักงานในมหาวิทยาลัยเทียนจิน.....	54
รูปที่ 6- 14 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของสำนักงานใน	

## สารบัญรูป

มหาวิทยาลัยเที่ยงคืน.....	55
รูปที่ 6- 15 อัตราการระบายอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของสำนักงานในมหาวิทยาลัยเที่ยงคืน ....	55
รูปที่ 6- 16 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของสำนักงานในมหาวิทยาลัยเที่ยงคืน โดย (ก) กรณีทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัย และ (ข) กรณีทุกในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัย.....	56



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 อัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ในแต่ละพื้นที่.....	21
ตารางที่ 2 ค่าจากการคำนวณอัตราการระบายอากาศรวม.....	21
ตารางที่ 3 ตัวแปรจากสถานการณ์จริงทั้งหมด 11 สถานการณ์.....	26
ตารางที่ 4 การกำหนดค่าความหนาแน่นของคนต่อพื้นที่ในแต่ละพื้นที่ตัวอย่าง.....	37
ตารางที่ 5 ตัวแปรเบื้องต้นที่ใช้ในการกำหนดมาตรการควบคุมการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศ	59
ตารางที่ 6 ผลการทำนายค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเทียบกับสถานการณ์จริง.....	68
ตารางที่ 7 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่สำนักงาน.....	69
ตารางที่ 8 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่ร้านอาหาร.....	70
ตารางที่ 9 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่บาร์.....	71
ตารางที่ 10 ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีที่ได้จากการทำนาย.....	72
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าระหว่างกรณีอัตราการระบายอากาศ เป็นไปตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 กรณีปรับเปลี่ยนอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นคน ในพื้นที่ และกรณีปรับเปลี่ยนอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นคนในพื้นที่.....	73

## ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

$C$	คือ จำนวนผู้ติดเชื้อใหม่ซึ่งยังไม่เป็นคนแพร่เชื้อ (Infection cases, people)
$C_{pa}$	คือ ความร้อนจำเพาะอากาศแห้ง (Specific heat of dry air, kJ/(kg.K))
$C_{pw}$	คือ ความร้อนจำเพาะไอน้ำ (Specific heat of water vapor, kJ/(kg.K))
$C(t)$	คือ จำนวนผู้สามารถรับเชื้อได้ที่แสดงอาการออกมาหรือผู้ติดเชื้อใหม่แต่ยังไม่เป็นผู้แพร่เชื้อ ณ เวลา $t$
$E_Z$	คือ ประสิทธิภาพการระบายอากาศ
$h_{fg}$	คือ เอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการกลายเป็นไอของน้ำ (Enthalpy change due to water vaporization, kJ/kg water)
$I$	คือ จำนวนผู้ติดเชื้อ (Infectors, people)
$P$	คือ ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure, Pa)
$P_d$	คือ ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม
$P'_d$	คือ ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่ได้รับการปรับเส้นโค้ง
$P_I$	คือ ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ (Probability of infection, %)
$P_w$	คือ ความดันไอน้ำ (Water vapor pressure, Pa)
$p$	คือ อัตราการหายใจเข้าออกปกติ (Pulmonary ventilation rate, m <sup>3</sup> /hr)
$Q$	คือ อัตราการระบายอากาศในห้องด้วยอากาศบริสุทธิ์ (Room ventilation rate with clean air, m <sup>3</sup> /hr)
$\dot{Q}$	คือ อัตราการไหลของอากาศ (Airflow rate, m <sup>3</sup> /s)
$Q(t)$	คือ จำนวนควอนตาของเชื้อโรคที่กระจายในอากาศภายในห้อง ณ เวลา $t$
$q$	คือ อัตราการสร้างควอนตาต่อชั่วโมงโดยผู้ติดเชื้อ (Quanta generation rate, Amount/hr)
$R$	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Universal gas constant, J/(mol.K))
$RH$	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, %)
$r$	คือ อัตราการฆ่าเชื้อในอากาศโดยรวมค่าอัตราการระบายอากาศ และอัตราการแผ่รังสียูวี
$S$	คือ จำนวนผู้สามารถรับเชื้อ (Susceptible, people)
$S(t)$	คือ จำนวนผู้สามารถรับเชื้อได้ ณ เวลา $t$
$T$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature, °C)
$T_a$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature, K) = $T + 273.15$

- $\Delta T$  คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอก (Indoor-Outdoor temperature difference, K)
- $t$  คือ ระยะเวลาในการแพร่เชื้อรวม (Exposure time, hr)
- $\Delta t$  คือ ระยะเวลาที่พิจารณา (Duration of analysis period, s)
- $V$  คือ ขนาดของห้องที่สามารถรับเชื้อและผู้แสดงอาการอยู่ภายใน
- $\Delta W$  คือ ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศภายในและภายนอก (Indoor-Outdoor humidity ratio difference,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{d_a}$ )
- $A$  คือ อัตราการระบายอากาศ (ACH)



## บทที่ 1 บทนำ

ในบทนำนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่จะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้

### 1.1 ความเป็นมา

การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อระบบทางเดินหายใจเป็นสิ่งที่มนุษย์เผชิญมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน นับเป็นวิกฤตการณ์ครั้งยิ่งใหญ่ของโลก ไม่เพียงแต่โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ที่ซึ่งเป็นโรคที่เกิดขึ้นใหม่และส่งผลกระทบต่อผู้ติดเชื้อและผู้เสียชีวิตสูงขึ้นทั่วโลก [1] แต่ยังมีโรคติดเชื้ออื่น ๆ ที่เคยเกิดขึ้นในอดีตด้วยเช่นกัน เช่น วัณโรค ซาร์ส เมอร์ส และโรคไข้หวัดใหญ่ เป็นต้น ถึงแม้ว่า ทางองค์การอนามัยโลกจะมีการประกาศให้โรคติดเชื้อบางชนิดสิ้นสุดการระบาดลง แต่จะเห็นได้ว่า มีโอกาสเกิดโรคอุบัติใหม่ที่เกิดการแพร่ระบาดในระบบทางเดินหายใจได้เสมอ

ประเทศต่าง ๆ มีการกำหนดมาตรการการป้องกันเมื่อเกิดสถานการณ์การแพร่ระบาด ตัวอย่างเช่น ในสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ทางรัฐและองค์กรชั้นนำต่าง ๆ ทั้งการล็อกดาวน์ การกำหนดมาตรการรักษาระยะห่างทางสังคมเพื่อลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อโรคจากคนสู่คนผ่านทางฝอยละออง การจัดหาวัคซีนเพื่อสร้างภูมิคุ้มกันหมู่ หรือแม้กระทั่งการปฏิบัติตัวเพื่อป้องกันตัวเองและคนรอบตัวโดยปฏิบัติทั่วไป ได้แก่ การล้างมือเป็นประจำ การใช้เจลล้างมือแอลกอฮอล์ การใส่หน้ากากอนามัย และการกักตัวเมื่อมีอาการเพื่อป้องกันการแพร่ระบาด [2, 3]

วิกฤตการณ์โรคระบาดที่เกิดขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถแพร่กระจายได้หลากหลายทาง [4] ได้แก่ การสัมผัสเชือบนพื้นผิวสัมผัสโดยตรง การแพร่เชื้อผ่านละอองน้ำมูกหรือน้ำลาย และการแพร่เชื้อทางอากาศ ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นละอองฝอยที่มีเชื้อโรคอยู่ในและสามารถลอยอยู่ในอากาศได้นานและไกลกว่าหยดน้ำลาย สามารถแพร่กระจายและติดเชื้อได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภายในอาคารที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ หรือพื้นที่แคบ และพื้นที่ที่มีประชากรแออัด ทำให้มีอัตราเสี่ยงในการติดเชื้อสูง [5, 6]

ในช่วงโรคระบาดอื่นที่เคยเกิดขึ้นในอดีตได้มีการศึกษาและปรับปรุงระบบปรับอากาศเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ [7] ซึ่งมีทั้งการจัดการเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ความสะอาด และการกระจายอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการ [8] และเนื่องจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เป็นโรคติดต่อที่มีความคล้ายคลึงกับโรคทางเดินหายใจอื่น ๆ ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการ



ควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เพื่อลดปริมาณเชื้อโรค และลดความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้ใช้งานอาคารในช่วงวิกฤตการณ์โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 โดยการออกแบบหรือการปรับปรุงระบบระบายอากาศในอาคารเป็นส่วนสำคัญในระบบปรับอากาศ ซึ่งการเพิ่มอัตราการระบายอากาศในอาคารนั้นสามารถลดอัตราเสี่ยงในการติดเชื้อได้ แต่ก็ทำให้การใช้พลังงานในอาคารมีค่าที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน [8] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาจุดที่เหมาะสมระหว่างอัตราการระบายอากาศและความเสี่ยงในการติดเชื้อ

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้การศึกษาความเป็นไปได้ในการรับค่าความหนาแน่นของคนในพื้นที่และระยะห่างของคนจากกล้องวงจรปิดในพื้นที่อาคารสำนักงาน และวิเคราะห์หาอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของคนในพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการใช้แบบจำลองประยุกต์แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของ Gammaitoni และ Nucci รวมถึงการวิเคราะห์ความหนาแน่นของคนในพื้นที่ที่เป็นไปได้สูงสุด เมื่อพื้นที่อาคารสำนักงานเป็นอาคารเก่าไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าการระบายอากาศได้ โดยกำหนดให้มีค่าตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 เพื่อเป็นเครื่องมือในการกำหนดมาตรการป้องกันและควบคุมความเสี่ยงในการติดเชื้อ และสามารถลดการแพร่กระจายเชื้อ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบค่าพลังงานระหว่างค่าการระบายอากาศซึ่งได้จากแบบจำลองประยุกต์แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อและค่าการระบายอากาศตามมาตรฐานของประเภทอาคาร

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมในอาคารในช่วงสถานการณ์โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ที่เหมาะสมกับความหนาแน่นของคนในพื้นที่
- 2) เพื่อวิเคราะห์หาจำนวนคนในพื้นที่อาคารที่มากที่สุดที่เหมาะสมกับอัตราการระบายอากาศในระบบที่จำกัด
- 3) เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศ ความเสี่ยงในการติดเชื้อ และต้นทุนการใช้พลังงานในอาคาร

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อทางอากาศจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เท่านั้น ไม่คำนึงถึงการติดเชื้อจากโรคติดเชื้อชนิดอื่น
- 2) ประเภทพื้นที่ที่ใช้ในการพิจารณาคือ สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์เท่านั้น
- 3) ต้นทุนการใช้พลังงานคิดตามสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยเท่านั้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) เป็นเครื่องมือในการประเมินความหนาแน่นของคนมากที่สุดที่เป็นไปได้ในพื้นที่อาคารเก่าที่มีข้อจำกัดของอัตราการระบายอากาศ เพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อในอาคาร
- 2) สามารถออกแบบอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมกับจำนวนคนและระยะห่างของคนในช่วงสถานการณ์โรคระบาดที่ซึ่งแพร่กระจายเชื้อทางอากาศได้
- 3) สามารถประเมินและแสดงค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อตามจำนวนคนที่เปลี่ยนแปลงไปของคนในอาคารตามระยะเวลาที่กำหนด
- 4) เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจในการดำเนินการกำหนดมาตรการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศ เพื่อให้มีปริมาณที่เหมาะสมในช่วงสถานการณ์โรคระบาดที่แพร่กระจายเชื้อทางอากาศ

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) รวบรวมข้อมูลลักษณะการแพร่กระจายของโรคที่แพร่กระจายทางอากาศ และอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจจากการติดเชื้อต่าง ๆ รวมถึงค่ามาตรฐานในการระบายอากาศเพื่อนำไปกำหนดตัวแปรในการสร้างแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ
- 2) กำหนดสมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่ใช้ในแบบจำลอง
- 3) สร้างแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยประยุกต์จากแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci ที่เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของคนในพื้นที่ตามเวลา และที่ระยะเวลาในการแพร่เชื้อต่าง ๆ
- 4) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการนำอัตราการติดเชื้อจากเหตุการณ์การแพร่ระบาดจริง เปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อจากแบบจำลอง และเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ
- 5) คำนวณค่าความหนาแน่นของบุคคลที่เหมาะสมกับอัตราการระบายอากาศในพื้นที่ที่จำกัด โดยกำหนดให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1
- 6) คำนวณค่าอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมกับจำนวนคนที่เปลี่ยนแปลงเข้าและออกพื้นที่ที่ระยะเวลาการแพร่เชื้อที่ต่างกัน
- 7) สร้างแบบจำลองทำนายการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำนายค่าไฟฟ้าจากอัตราการระบายอากาศที่ได้จากแบบจำลองคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ
- 8) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการใช้พลังงานไฟฟ้า

9) สรุปผลการศึกษา และเปรียบเทียบต้นทุนการใช้พลังงานภายในอาคารระหว่างกรณีอัตรา  
การระบายอากาศเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลจำนวนและระยะห่างของคนและอัตราการระบายอากาศ  
มีค่าตามค่ามาตรฐาน



## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือโรค COVID-19 เป็นสถานการณ์โรคที่แพร่ระบาดอย่างรุนแรงทั่วโลก มีผู้ติดเชื้อและผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมาก โรคนี้เป็นเชื้อโรคกลุ่มที่มีผลต่อระบบทางเดินหายใจอย่างเฉียบพลัน มีชื่ออย่างเป็นทางการว่า SARS-CoV-2 จากการศึกษาถึงที่มาของโรคนี้โดยการศึกษารหัสทางพันธุกรรมพบว่าสัตว์ที่เป็นต้นตอในการแพร่เชื่อดังกล่าว ได้แก่ ค้างคาว เชื้อไวรัสโคโรนายังมีสายพันธุ์อื่นซึ่งก่อให้เกิดโรคซาร์โดยมีชะมดเป็นพาหะนำพาเชื้อโรค และเกิดการกลายพันธุ์แพร่สู่มนุษย์เช่นเดียวกันกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 [9] สำหรับการแพร่กระจายโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 สามารถแพร่ได้จากคนสู่คนทางหยดละอองน้ำหรือสารคัดหลั่งที่ออกจากปากผู้ติดเชื้อ และการสัมผัสกับพื้นผิวต่าง ๆ ที่มีเชื้อโรคกระจายอยู่บนพื้นผิวนั้น อีกทั้งองค์การอนามัยโลก [10] ได้ประกาศให้เป็นโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เป็นเชื้อที่สามารถแพร่กระจายผ่านทางอากาศได้อีกด้วย

การป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคเป็นสิ่งที่ผู้คนทั่วโลกให้ความสำคัญและมีการกำหนดนโยบายต่าง ๆ เพื่อลดการแพร่กระจายเชื้อโรคจากองค์ชั้นนำ เช่น การลดการสัมผัส การลดระยะห่างระหว่างบุคคล และการใส่หน้ากากอนามัย [2, 3, 11] จากการศึกษาขององค์การอนามัยโลกซึ่งกล่าวว่า เชื้อโรคชนิดนี้สามารถแพร่กระจายอากาศเกิดขึ้นได้ภายในอาคารที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ [6] การออกแบบและวางแผนการจัดการระบบเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อจากโรคดังกล่าวจึงนับเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญอย่างยิ่ง โดยหนึ่งในวิธีการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศคือ การปรับระบบระบายอากาศให้เหมาะสมเพื่อให้ค่าความเสี่ยงในอาคารลดลง

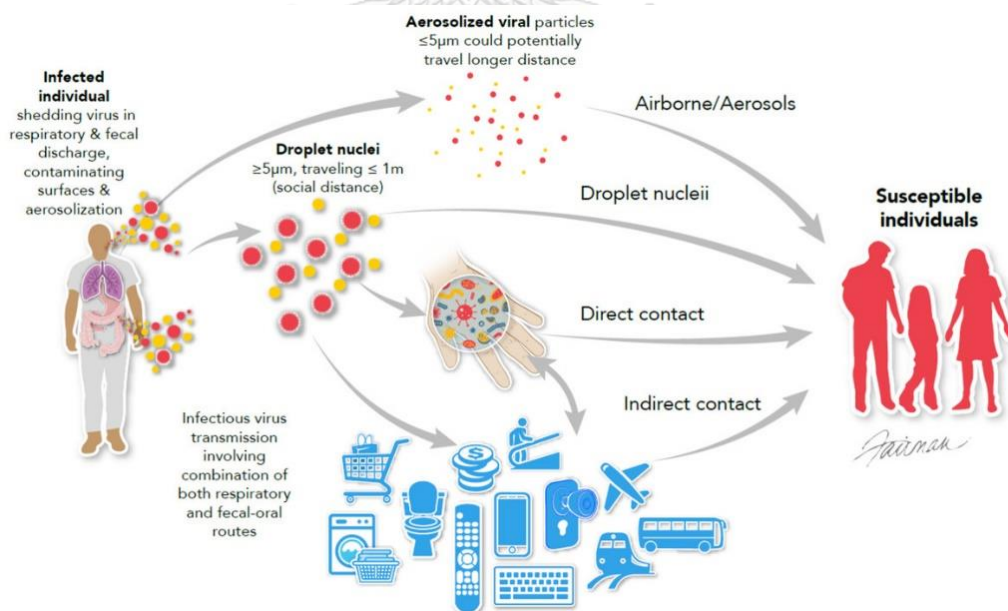
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาความหนาแน่นของคนในพื้นที่ที่เหมาะสมในพื้นที่ที่มีอัตราการระบายอากาศที่จำกัด และการวิเคราะห์หาอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของคนในพื้นที่ในวิกฤติการณ์โรคติดเชื้อทางอากาศ โดยใช้กรณีศึกษาเป็นโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ดังนั้นในบทที่ 2 จึงเป็นการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 การจัดการระบบระบายอากาศ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ รวมไปถึงการจำลองค่าพลังงานจากการระบายอากาศ และการตรวจจับจำนวนและระยะห่างระหว่างบุคคลโดยใช้กล้องวงจรปิด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับการจัดการระบบระบายอากาศ

เนื่องจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 สามารถแพร่ได้จากคนสู่คน ดังนั้นการใช้งานอาคารต่าง ๆ เมื่อกลับเข้าสู่สภาวะปกตินั้นต้องเล็งเห็นถึงความสำคัญในการจัดการกับโรคติดเชื้อเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อระหว่างบุคคล เมื่อมีคนเข้าใช้งานภายในอาคารอาจเกิดความแออัดของพื้นที่ หรืออาจมีการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอทำให้มีความเสี่ยงในการติดเชื้อสูงขึ้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาลักษณะการแพร่กระจาย และการป้องกันโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับการระบายอากาศ เพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อในพื้นที่อับอากาศหรือพื้นที่แออัด

### 2.1.1 ลักษณะการแพร่กระจายของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

การแพร่กระจายของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 จากคนสู่คนแพร่ได้หลากหลายทาง โดยไวรัสจะแพร่จากปากหรือจมูกของผู้ติดเชื้อในลักษณะของอนุภาคของเหลวขนาดเล็กเมื่อมีการไอ จาม พูด ร้องเพลง หรือหายใจ [4] รูปแบบการแพร่กระจายเชื้อที่พบมีทั้งการสัมผัสกับสารคัดหลั่งของผู้ติดเชื้อทั้งทางตรงและทางอ้อมผ่านพื้นผิวที่มีเชื้อโรค รวมไปถึงการสูดดมละอองฝอยขนาดเล็กในอากาศ [12] ดังแสดงในรูปที่ 2- 1 โดยทั่วไปแบ่งรูปแบบการแพร่กระจายออกได้ตามขนาดของอนุภาค และระยะทางการแพร่กระจาย

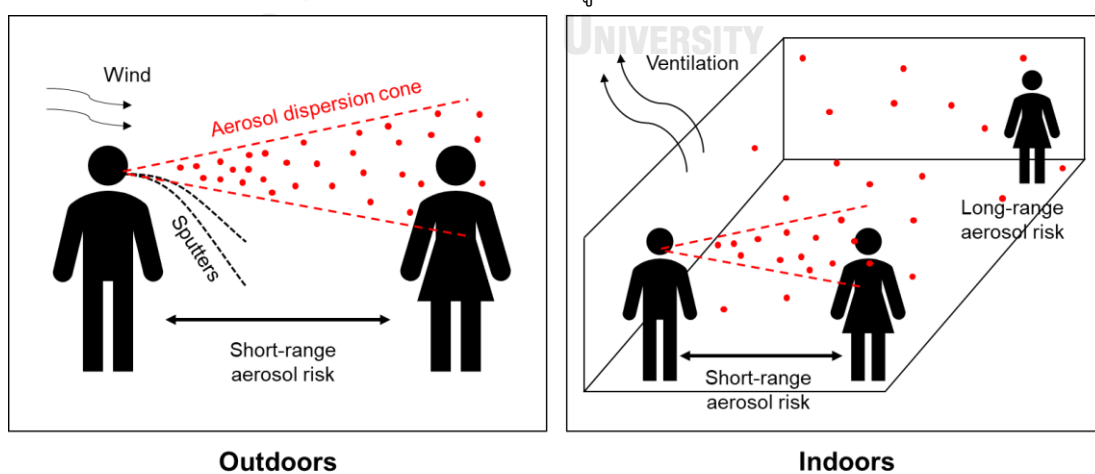


รูปที่ 2- 1 การแพร่กระจายของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

(คัดลอกจาก M. K. Ijaz และคณะ [12])

สำหรับการแบ่งรูปแบบการแพร่กระจายเชื้อโรคตามขนาดอนุภาคนั้น องค์การอนามัยโลก [13] ได้แบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดละอองที่มาจากการพูดคุย การจาม หรือการไอ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็น ละอองหยดน้ำจากระบบทางเดินหายใจ โดยการแพร่กระจายผ่านหยดละอองน้ำทาง น้ำลายและสารคัดหลั่ง (Droplets) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 – 10 ไมครอน ติดเชื้อได้ทางเยื่อปูดตา จมูกและปาก ซึ่งเกิดการแพร่ได้ในระยะ 1 เมตร ในขณะที่การแพร่กระจายผ่านนิวเคลียสในฝอยละออง (Droplet nuclei) มาจากการระเหยของหยดละอองน้ำขนาดใหญ่จนเหลือเพียงไวรัสขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมครอน สามารถลอยและแพร่เชื้อได้ทางอากาศในระยะไกลมากกว่า 1 เมตร

การแพร่กระจายเชื้อโรดยังสามารถแบ่งได้ตามระยะทางการแพร่กระจาย Chen และคณะ [6, 14] ได้ใช้เกณฑ์ 2 เมตรเป็นตัวแบ่งเป็นการแพร่เชื้อระยะสั้น (Short-range transmission) และการแพร่เชื้อระยะไกล (Long-range transmission) ซึ่งสอดคล้องกับการแบ่งตามขนาดอนุภาค สำหรับการแพร่เชื้อระยะสั้นนั้นมีขนาดอนุภาคมากกว่า 5 ไมครอนมีลักษณะการแพร่กระจายแบบหยดละอองน้ำ (Droplets) การสัมผัสทั้งทางตรงและทางอ้อม (Contact) และการแพร่เชื้อทางอากาศระยะสั้น (Short range airborne) ซึ่งการแพร่เชื้อทางอากาศระยะสั้นมีปริมาตรรวมของหยดน้ำมากกว่าแบบหยดละอองน้ำมากถึง 2 เท่า แตกต่างจากหยดละอองน้ำหรือ Droplets คือ สามารถติดเชื้อได้โดยการสูดดมผ่านทางระบบทางเดินหายใจ ส่วนการแพร่เชื้อระยะไกลเป็นการแพร่เชื้อทางอากาศที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 5 ไมครอน และสามารถแพร่ได้ไกลมากกว่า 2 เมตรในรูปแบบของละอองนิวเคลียส (Droplet nuclei) เป็นการระเหยของหยดน้ำเหลือเพียงนิวเคลียสของเชื้อโรค โดยการแพร่เชื้อระยะไกลเป็นฟังก์ชันกับอัตราการระบายอากาศ หากพื้นที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการแพร่กระจายเชื้อระยะไกลได้แสดงดังรูปที่ 2- 2



รูปที่ 2- 2 การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศระยะสั้นและระยะไกล

(ดัดแปลงจาก R. Dwivedi [15])

การศึกษาลักษณะการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศมีหลากหลายวิธี Z. Liu และคณะ [8] ได้สรุปวิธีการศึกษาทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ การทดลอง การทำแบบจำลองลัมพ์ และการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือ CFD แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การทดลองให้ผลการวิจัยที่น่าเชื่อถือ แต่ใช้ทุนในการวิจัยสูง การทำแบบจำลองลัมพ์ง่ายต่อการวิเคราะห์ปัจจัยของความเข้มข้นของเชื้อโรค แต่มีข้อจำกัดจากสมมติฐานว่าความเข้มข้นของอนุภาคเชื้อโรคมีค่าเดียว และผสมกันในห้องอย่างสมบูรณ์ และการทำแบบจำลอง CFD จะทำให้เห็นรายละเอียดการกระจายของเชื้อโรคได้ชัดเจน แต่ไม่เหมาะกับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุภาคระยะยาว

### 2.1.2 การป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

วิธีการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ทำได้โดยการรักษาความสะอาด ล้างมือเป็นประจำ และใส่หน้ากากอนามัย [2, 3] ซึ่งวิธีป้องกันดังกล่าวเป็นวิธีการป้องกันการแพร่กระจายโรคที่เกิดจากการสัมผัส นอกจากนี้ยังมีวิธีการป้องกันโรคที่เกิดจากการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศอีกด้วย Liu และคณะ [8] กล่าวว่า วัสดุที่ใช้ทำท่อและพื้นผิวของท่อเป็นหนึ่งในปัจจัยสะสมของเชื้อโรค และได้เสนอว่า การจัดการระบบระบายอากาศ การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ และการกรองอากาศ สามารถลดการสะสมของเชื้อโรคได้

สำหรับการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศระยะสั้นและระยะไกลต้องทำการพิจารณาร่วมกันเพื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของการเกิดการแพร่กระจายเชื้อระยะไกลภายใต้สภาวะที่แน่นอน โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของอนุภาคที่มาจากปากผู้ติดเชื้อ การแพร่เชื้อทางอากาศระยะสั้นเกิดจากการระเหยของหยดน้ำเหลือเพียงนิวเคลียสของเชื้อโรค และสามารถลอยไปในอากาศได้ ซึ่งหากมีการระบายอากาศไม่เพียงพอ เส้นทางการแพร่กระจายของเชื้อโรคจะเพิ่มขึ้นกลายเป็นการแพร่เชื้อทางอากาศระยะไกลสู่ผู้คนที่อยู่นอกบริเวณได้ [6, 16]

การกำหนดระยะห่างระหว่างบุคคลเป็นหนึ่งในวิธีการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ทางอากาศระยะสั้น ระยะห่างนี้เรียกว่า ระยะปลอดภัย ซึ่งแต่ละประเทศมีการกำหนดนโยบายที่แตกต่างกัน Xie และคณะ [17] ได้สรุปว่า การกำหนดนโยบายระยะปลอดภัยของแต่ละประเทศขึ้นกับวัฒนธรรม ขนบธรรมเนียม และจำนวนประชากรที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น จีน ญี่ปุ่น และประเทศอื่น ๆ ในเอเชีย เลือกใช้การล็อกดาวน์และการจำกัดการออกนอกบ้านอย่างเข้มงวด ส่วนอีกหลายประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศอังกฤษให้รักษาระยะห่างอย่างน้อย 2 เมตร ประเทศออสเตรเลียให้รักษาระยะห่างอย่างน้อย 1.5 เมตร และประเทศจีนและแอฟริกาใต้ให้เว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 เมตร ซึ่งจากการศึกษานี้ยังพบว่า มีงานวิจัยหลายชิ้นได้สนับสนุนกฎการเว้นระยะห่างทางสังคมประมาณ 1-2 เมตรจากการสังเกตและการทำแบบจำลองสอดคล้องกับองค์การ

อนามัยโลก [13] ที่เสนอแนะให้มีการเว้นระยะห่างมากกว่า 1 เมตร ในพื้นที่สาธารณะเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อ

จากที่ได้กล่าวข้างต้นว่าการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอจะทำให้การแพร่กระจายเชื้อไวรัสเปลี่ยนแปลงจากระยะสั้นเป็นระยะไกลได้ ดังนั้นการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศระยะไกลจึงต้องกำหนดค่าการระบายอากาศที่เหมาะสมและเพียงพอกับพื้นที่ Dwivedi [15] พบว่า การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศระยะไกลสามารถควบคุมได้โดยนำอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกเข้า รวมไปถึงการใช้หน้ากากอนามัยที่มีคุณภาพ Shah และคณะ [18] ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของหน้ากากอนามัยและการระบายอากาศหรือฟอกอากาศ โดยสรุปว่า ประสิทธิภาพการกรองส่งผลต่อการลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ รวมถึงความสามารถในการระบายอากาศที่สูงขึ้นจะลดการสะสมและการแพร่กระจายของละอองฝอยได้ โดย Lipinski และคณะ [19] ได้แบ่งการระบายอากาศออกเป็น การใช้การระบายอากาศแบบธรรมชาติ การใช้การระบายอากาศเชิงกล และการผสมระบบระบายอากาศ รูปแบบของการระบายอากาศส่งผลต่อความเสี่ยงในการติดเชื้อ ผลการศึกษาโดยใช้แบบจำลอง CFD เปรียบเทียบการไหลของการระบายอากาศแบบธรรมชาติในสำนักงานของ Abbas และ Gursel Dino [20] พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของหน้าต่างต่อผนังทำให้ลดความเสี่ยงในการติดเชื้อได้มากขึ้น โดยหน้าต่างฝั่งเดียวกันมีข้อได้เปรียบมากกว่าหน้าต่างที่อยู่ฝั่งตรงข้ามกัน

### 2.1.3 มาตรฐานการจัดการระบบปรับอากาศในสถานการณ์โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

องค์กรต่าง ๆ ทั่วโลกได้ออกแนวทางปฏิบัติเพื่อรับมือกับโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 โดย M. Guo และคณะ [21] ได้ทำการเปรียบเทียบแนวทางสำหรับระบบปรับอากาศในช่วงโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ได้แก่ มาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) มาตรฐาน REHVA (the Federation of European of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning Associations) มาตรฐาน SHASE (the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineering in Japan) และมาตรฐาน Related Society of China ข้อกำหนดและข้อเสนอแนะมีความสอดคล้องกัน และมีรายละเอียดบางส่วนที่ขัดแย้งกันอยู่บ้าง แสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของกลไกในการแพร่เชื้อและลักษณะของโคโรนาไวรัสในอาคารจากการเปรียบเทียบดังกล่าว เน้นย้ำถึงความสำคัญของการระบายอากาศเพื่อลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายของเชื้อ กล่าวโดยสรุปได้ว่า การระบายอากาศด้วยอากาศภายนอกที่เหมาะสมและรูปแบบการไหลของอากาศเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญที่สุด ตัวอย่างเช่น ข้อเสนอแนะสำหรับอากาศภายนอกของแต่ละมาตรฐาน คือ การนำอากาศภายนอกเข้าอาคารให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือเปิดประตูกันอากาศ 100 เปอร์เซ็นต์หากเป็นไปได้ ข้อเสนอแนะการดำเนินการระบบปรับอากาศเสนอให้เพิ่มเวลาในการดำเนินการระบบ แต่ REHVA และ ASHRAE แนะนำให้เปิดระบบปรับอากาศก่อนและหลัง



ผู้ใช้งาน 2 ชั่วโมง ข้อเสนอแนะสำหรับการทำความสะอาดอากาศ สามารถใช้แผ่นกรองอากาศได้ ควรปิดการหมุนเวียนอากาศภายในอาคาร ทั้งนี้ควรกำหนดให้ความดันภายในห้องน้ำเป็นความดันลบด้วยเช่นกัน ในขณะที่อุณหภูมิและความชื้นในแต่ละมาตรฐานไม่ได้กำหนดไว้ เนื่องจากต้องพิจารณาเป็นกรณีไป [21, 22]

องค์การอนามัยโลก [5] ได้แนะนำค่าการระบายอากาศขั้นต่ำที่ควรใช้ในแต่ละสถานที่ ได้แก่ สถานพยาบาลควรมีค่าการระบายอากาศมากกว่าหรือเท่ากับ 160 ลิตรต่อวินาทีต่อผู้ป่วยหนึ่งคนในกรณีมีการทำหัตถการ หรือ 60 ลิตรต่อวินาทีต่อผู้ป่วยหนึ่งคน ส่วนที่พักอาศัยหรือสำนักงานควรมีค่าการระบายอากาศมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ลิตรต่อวินาทีต่อคน ซึ่งการเพิ่มค่าการระบายอากาศนั้นต้องพิจารณาถึงค่ามลพิษในอากาศด้วย พื้นที่ที่อากาศภายนอกมีค่ามลพิษสูง ต้องพิจารณาถึงการกรองอากาศภายนอกมากกว่าการเพิ่มการระบายอากาศสอดคล้องกับข้อมูลโดยสรุปของศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคสหรัฐฯ CDC [22] ที่สรุปว่าการเพิ่มค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศต่อชั่วโมงด้วยวิธีการทางธรรมชาติและวิธีการเชิงกล จะช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อในพื้นที่ปิด

ข้อเสนอแนะเบื้องต้นของ REHVA และ ASHRAE สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน [23] คือ การใส่หน้ากากอนามัย N95 แต่สำหรับมาตรการการจัดการระบบปรับอากาศ คือแนะนำให้ใช้แผ่นกรองอากาศที่เหมาะสม รวมไปถึงการใช้หลอดไฟยูวีชนิดซีในการฆ่าเชื้อที่ท่อ ในขณะที่อนุภาคใหญ่กว่า 10 ไมครอน เป้าหมายแรกจะเป็นพื้นผิวที่ใกล้ที่สุด ข้อเสนอแนะคือให้ทำความสะอาดพื้นผิวและระบายอากาศออกผ่านช่องที่ติดกับพื้น

#### 2.1.4 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกับอัตราการระบายอากาศ

วิธีการในการหาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคทางเดินหายใจ มักใช้แบบจำลอง Wells-Riley [7, 24] ซึ่ง Wells มีการใช้ค่าอัตราการสร้างอนุภาคติดเชื้อในอากาศหรือควอนตา (Quanta) ในการคำนวณโดยระบุว่า จำนวนคนที่ติดเชื้อมีความสัมพันธ์แบบปัวส์ซองกับจำนวนอนุภาคเชื้อโรคที่คนสุดตมเข้าไป และใช้สมมติฐานว่าอากาศในห้องผสมกันแบบสมบูรณ์ที่สภาวะคงที่ หลังจากนั้น Riley [25] จึงได้พัฒนาแบบจำลองของ Wells ให้สามารถคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อโดยทำการศึกษาระบาดวิทยาในโรคหัด

อัตราการสร้างอนุภาคติดเชื้อในอากาศหรือควอนตา (Quanta) ที่นิยามโดย Wells คือจำนวนของนิวเคลียสในหยดละอองที่ทำให้ติดเชื้อมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของโรค Stephens [7] ได้สรุปค่าควอนตาของโรคต่าง ๆ ไว้ดังนี้ โรคไข้หวัดใหญ่มีค่า 15 ถึง 500 อนุภาคต่อชั่วโมง โดยปกติทั่วไปมักใช้ที่ 67 และ 100 ในการคำนวณ โรคไข้หวัดธรรมดา มีค่า 1 ถึง 10 อนุภาคต่อชั่วโมง วัณโรคมีค่า 1 ถึง 50 อนุภาคต่อชั่วโมง โรคซาร์มีค่า 10 ถึง 300 อนุภาคต่อชั่วโมง และโรคหัดมีค่า 570 ถึง 5,600 อนุภาคต่อชั่วโมง ในขณะที่ค่าควอนตาของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ยังมีงานวิจัยที่ศึกษา

หาค่าควอนตาเนื่องจากเป็นโรคอุบัติใหม่จึงยังมีการใช้ค่าที่ค่อนข้างหลากหลาย Buonanno และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าควอนตาของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 โดยตั้งสมมติฐานว่าละอองน้ำลายจากคนที่ติดเชื้อมีปริมาณไวรัสเท่ากับในเสมหะ ดังนั้นหากทราบความเข้มข้นในเสมหะ จะทราบค่าควอนตาในละอองน้ำลายด้วยเช่นกัน พบว่า สำหรับผู้ติดเชื้อที่ไม่แสดงอาการ เมื่อมีการเปล่งเสียงออกมาขณะเดินจะมีค่าควอนตามากกว่า 100 อนุภาคต่อชั่วโมง ในขณะที่ผู้ป่วยที่แสดงอาการแต่อยู่ในสภาวะพักผ่อนจะมีอัตราการปล่อยควอนตาน้อยกว่า 1 อนุภาคต่อชั่วโมง และยังมีบางงานวิจัยใช้การอ้างอิงจากสถานการณ์จริงในการสอบเทียบเพื่อหาค่าควอนตาของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เช่น Sun และ Zhai [27] ได้ใช้การสอบเทียบจากรถประจำทางในเมืองหนานานโดยแทนค่าลงในแบบจำลอง Wells-Riley ซึ่งได้ค่าควอนตา 0.238 อนุภาคต่อวินาที ค่าควอนตาที่ได้จากงานวิจัยทั้งสอง สามารถนำไปใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศและค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อได้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีอัตราการระบายอากาศสามารถหาได้โดยใช้แบบจำลอง Wells-Riley ซึ่งมีหลากหลายงานวิจัยได้ทำการจำลองหาค่าการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สภาพแวดล้อมต่าง ๆ Stephens [7] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่า เมื่อค่าควอนตามากขึ้น ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อจะมากขึ้นเช่นกัน ต้องทำการเพิ่มอัตราการระบายอากาศจึงสามารถลดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อได้ แต่หากค่าควอนตามีค่าสูงเกินไปจะไม่มีอัตราการระบายอากาศใดที่สามารถหยุดการแพร่กระจายของโรคได้อีก และมีงานวิจัยที่หาค่าอัตราการระบายอากาศในพื้นที่อับอากาศเมื่อค่าความเสี่ยงไม่เกินที่กำหนด ตัวอย่างเช่น Dai และ Zhao [28] ได้ศึกษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อในกรณีทั่วไปทั้งสำนักงาน ห้องเรียน รถประจำทาง และเครื่องบินโดยใช้ค่าควอนตาประมาณ 14-48 ต่อชั่วโมง เพื่อหาอัตราการระบายอากาศเมื่อมีค่าความเสี่ยงน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อมีผู้ติดเชื้อหนึ่งคนเข้ามาในพื้นที่จะต้องใช้อัตราการระบายอากาศ 100 – 350 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อผู้ติดเชื้อที่เวลาการแพร่เชื้อ 0.25 ชั่วโมง ในขณะที่เวลาการแพร่เชื้อ 3 ชั่วโมง ต้องใช้อัตราการระบายอากาศ 1,200 – 4,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อผู้ติดเชื้อ แต่หากผู้แพร่เชื้อและผู้รับเชื้อใส่หน้ากาก จะสามารถลดอัตราการระบายอากาศลงได้ถึงหนึ่งในสี่

เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลอง Wells-Riley ซึ่งใช้สำหรับกรณีอากาศในห้องผสมอย่างสมบูรณ์ในสภาวะความเข้มข้นของอนุภาคเชื้อโรคคงที่ จึงมีผู้วิจัยสร้างแบบจำลองประยุกต์ที่สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ โดย Sze To และ Chao [25] ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง Wells-Riley และแบบจำลองประยุกต์ต่าง ๆ สรุปได้ว่า นอกจากแบบจำลอง Wells-Riley ยังมีการพัฒนาแบบจำลองของ Fisk และ Nazaroff [29] มีการคำนึงถึงการติดตั้งแผ่นกรองอากาศแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci [30] สามารถใช้กับการเปลี่ยนแปลงของค่าควอนตาในห้องตามเวลาได้ เป็นเงื่อนไขภายใต้สภาวะไม่คงที่ แต่ยังคงสมมติฐานว่าอากาศในห้องผสมกันอย่าง

สมบูรณ์ และแบบจำลองของ Rudnick และ Milton [31] ที่ปรับปรุงแบบจำลอง Wells-Riley โดยใช้อัตราส่วนของปริมาณอากาศที่หายใจออกเพื่อประมาณค่าควอนตาที่ผู้รับเชื่อได้รับ

การทำนายค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของแต่ละแบบจำลองมีค่าแตกต่างกัน Beggs และคณะ [24] ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองโดยคำนวณจำนวนคนติดเชื้อไวรัสโรคในพื้นที่อับอากาศด้วยแบบจำลอง Mass action (MA) [32] ซึ่งเป็นแบบจำลองหาจำนวนผู้ติดเชื้อใหม่ที่ใช้ก่อนที่ Wells จะระบุความสัมพันธ์เป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล แบบจำลอง Murphy และ Riley หรือแบบจำลอง Wells-Riley [33] และแบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci [30] แบบจำลองเหล่านี้ถูกตั้งสมมติฐานว่า ผู้รับเชื่อทุกคนมีอัตราการหายใจเท่ากัน อากาศในห้องผสมกันอย่างสมบูรณ์และผู้รับเชื่อทุกคนมีความเสี่ยงในการติดเชื้อเท่ากัน โดยเปรียบเทียบแบบจำลอง MA และ Wells-Riley ที่สถานะควอนตาคงที่ และเปรียบเทียบแบบจำลอง Wells-Riley และ Gammaitoni-Nucci ที่สถานะควอนตาไม่คงที่ พบว่า ที่สถานะควอนตาคงที่ ทั้ง MA และ Wells-Riley สามารถทำนายการเพิ่มขึ้นของผู้ติดเชื้อใหม่ที่เกิดขึ้นได้ โดย MA มีค่าการทำนายสูงกว่าเมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมงและทำนายเกินค่าจริง ในขณะที่แบบจำลอง Wells-Riley มีการเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลทำให้มีการทำนายที่สูงขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ และที่สถานะควอนตาไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อค่าควอนตาเริ่มต้นต่ำกว่าที่สถานะคงที่ แบบจำลอง Wells-Riley จะทำนายอัตราการติดเชื้อที่สูงกว่า Gammaitoni-Nucci แต่หากค่าควอนตาเริ่มต้นมีค่าสูงกว่าที่สถานะคงที่ที่จะพบค่า แบบจำลอง Wells-Riley จะทำนายจำนวนผู้ติดเชื้อได้ต่ำกว่า Gammaitoni-Nucci ซึ่งมักพบได้ในกรณีมีการระบายอากาศไม่เพียงพอ ดังนั้นแบบจำลอง Gammaitoni-Nucci มีความเหมาะสมที่สุดในการจำลองการแพร่เชื้อทางอากาศ

นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ใช้สมการของ Gammaitoni-Nucci เพื่อศึกษาความเสี่ยงในการติดเชื้อของพื้นที่มหาวิทยาลัยซึ่งมีอัตราการระบายอากาศจำกัด [34] และเสนอแนะมาตรการในการป้องกันตนเองสำหรับนักศึกษา โดยพื้นที่ที่สนใจ ได้แก่ พื้นที่หอพักนักศึกษา ห้องเรียน ห้องสมุด โรงยิม และศูนย์อาหาร โดยได้ปรับปรุงวิธีการประมาณค่าควอนตัมด้วยการวิเคราะห์สถิติของปริมาณไวรัสจากผู้แพร่เชื้อจากงานวิจัยอื่น และปรับค่าแนวโน้มความเข้มข้นของขนาดละอองอนุภาคต่าง ๆ ทำให้ได้ค่าควอนตัมของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาอยู่ในช่วง 20.49 – 454.87 ควอนตัมต่อชั่วโมงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า ความเสี่ยงในการติดเชื้อในหอพักและห้องเรียนเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ (เวลาสัมผัสคือ 8 ชั่วโมง) และ 5 เปอร์เซ็นต์ (เวลาสัมผัสคือ 1.5 ชั่วโมง) ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการแพร่เชื้อเบื้องต้น (Basic reproduction numbers) มีค่าเท่ากันทั้งสองพื้นที่เท่ากับ 2.8

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ

อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคติดต่อ โดยอุปกรณ์ที่ใช้โดยทั่วไป คือ หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ (Surgical mask) ซึ่งเป็นหน้ากากแบบที่ค่อนข้างหลวม ทำจากวัสดุกรองและมีสายรัดยึดหน้ากากกับศีรษะของผู้สวมใส่ ทางศูนย์ควบคุมโรคติดต่อสหรัฐอเมริกา (CDC) ได้มีการแนะนำให้ใช้หน้ากากที่ใช้ครั้งเดียว (Disposable dust/mist particulate respirator) เพื่อป้องกันโรคติดต่อ ซึ่งเป็นหน้ากากที่มีลักษณะเป็นถ้วยรับพอดีกับใบหน้า มีสายรัดยึดสองเส้น ทำจากวัสดุที่ละเอียดกว่าหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ทำให้สามารถกรองอนุภาคเชื้อโรคได้มากกว่า นอกจากนี้สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (NIOSH) ยังได้แนะนำให้ใช้หน้ากากป้องกันเชื้อโรคแบบคลุมศีรษะชนิดมีพัดลมพร้อมชุดกรองอากาศ (Powered air-purifying respirator: PAPR) และหน้ากากกรองชนิด HEPA (HEPA Filter) เพื่อประสิทธิภาพการกรองที่สูงขึ้น [30, 35, 36]

สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเชื้อโรคของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจมีด้วยกันหลากหลายงานวิจัย เช่น Nicas [35] ได้ทำการหาค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเชื้อโรค โดยพิจารณาจากสองปัจจัย ได้แก่ ความสามารถของแผ่นกรองในการนำเอาอนุภาคเชื้อโรคออก และความสมบูรณ์ของหน้ากากในการป้องกันการรั่วไหลของอากาศปนเปื้อนจากภายนอก ซึ่งค่าอนุภาคเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณอ้างอิงค่าจากอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจหลากหลายยี่ห้อที่ทำการทดลองในงานวิจัยอื่น ประสิทธิภาพการกรองที่ Nicas นำเสนอแบ่งเป็นหน้ากาก 4 ประเภท คือ หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ (Surgical mask) หน้ากากที่ใช้ครั้งเดียว (Disposable dust/mist particulate respirator) หน้ากากครึ่งหน้าแบบยางยึดพร้อมแผ่นกรอง HEPA (Elastomeric half mask respirator) และหน้ากากป้องกันเชื้อโรคแบบครึ่งหน้าชนิดมีพัดลมพร้อมชุดกรองอากาศ HEPA (PAPR with HEPA filter) โดยมีผลประสิทธิภาพการกรอง 0.58, 0.94, 0.98 และ 0.996 ตามลำดับ ในขณะที่ Gammaitoni และ Nucci [30] ได้ใช้ค่าประสิทธิภาพการกรองของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดสามประเภทข้างต้นเช่นเดียวกับ Nicas ยกเว้นหน้ากากป้องกันเชื้อโรคแบบครึ่งหน้าชนิดมีพัดลมพร้อมชุดกรองอากาศ HEPA (PAPR with HEPA filter) เพื่อคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อโดยมีค่า 0.40, 0.855 และ 0.9997 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเสนอประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเชื้อโรคของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจที่ใช้วิธีการทำการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองโดยการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ PM1 ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำภายในหน้ากาก และใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) ช่วยในการแสดงผลให้เห็นภาพการแลกเปลี่ยนอากาศภายในหน้ากาก โดยได้ทำการทดลองค่าประสิทธิภาพการ

กรองอนุภาคเชื้อโรคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากากที่ใช้ครั้งเดียว ซึ่งมีค่า 0.5645 และ 0.996 ตามลำดับ [36]

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศ

อัตราการระบายอากาศถูกควบคุมด้วยระบบปรับสภาวะอากาศซึ่งเป็นส่วนหลักของการใช้พลังงานในอาคาร จากการศึกษาของ Pérez-Lombard และคณะ [37] พบว่า การใช้พลังงานของระบบปรับสภาวะอากาศ (HVAC) ในอาคารสำนักงานของประเทศสหรัฐอเมริกาคิดเป็นร้อยละ 48 ประเทศอังกฤษคิดเป็นร้อยละ 55 และประเทศสเปนคิดเป็นร้อยละ 52 ของการใช้พลังงานในอาคารโดยรวม

สภาวะอากาศร้อนขึ้นส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคารเพื่อทำความเย็นและลดความชื้นของอากาศ Rim และคณะ [38] ได้ทำการหาค่าพลังงานจากการระบายอากาศในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น โดยใช้ค่าสภาพอากาศภายนอกจริงของประเทศสิงคโปร์อ้างอิงจากองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (WMO) โดยกำหนดให้อัตราการระบายอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 40 ลิตรต่อวินาทีต่อคน และกำหนดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นในอากาศภายในให้อยู่ในช่วง 22 ถึง 28 องศาเซลเซียส และ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษพบว่า เมื่ออัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้นสูงถึง 25 ลิตรต่อวินาทีต่อคน จะทำให้มีค่าไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 1 ของค่าจ้างบุคลากร 1 คนของประเทศสิงคโปร์ และเมื่อมีการปรับอุณหภูมิภายในให้ต่ำจะมีค่าไฟฟ้าจากการเพิ่มอัตราการระบายอากาศสูง ในขณะที่เดียวกัน การปรับค่าอุณหภูมิภายในให้มีค่าสูงกว่า 26 องศาเซลเซียสจะทำให้สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้สูง

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับจำนวนและระยะห่างระหว่างบุคคลโดยใช้กล้องวงจรปิด

การประยุกต์ใช้ประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดในการตรวจจับจำนวนและระยะห่างระหว่างบุคคลเป็นสิ่งที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในยุคหลังการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ใช้ในการตรวจสอบและป้องกันการแพร่ระบาด ซึ่ง Khemasuwan และคณะ [39] ได้ใช้การเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ประยุกต์ใช้การตรวจจับทั้งตัวบุคคล ใบหน้า และการใส่หน้ากากอนามัย โดยเก็บค่าจากกล้องวงจรปิด CCTV ซึ่งงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับความปลอดภัยในโรงงานป้องกันการติดเชื้อหลังจากการแพร่ระบาด เริ่มต้นจากการเก็บค่าข้อมูล และประมวลผลข้อมูล ใช้การถ่ายโอนข้อมูลการเรียนรู้ โดยใช้ TensorFlow framework และนำชุดข้อมูลที่ได้ไปสอนให้กับ

คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถหาค่าระยะห่างระหว่างบุคคลได้โดยการคำนวณระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance) ระหว่างขอบเขตของสี่เหลี่ยมที่จับได้ในกล้องวงจรปิด

นอกจากนี้ยังมีการผสมผสานระหว่างคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) และแบบจำลอง Deep Neural Network (DNN) ที่ใช้ YOLOv4 สำหรับตรวจจับบุคคลอัตโนมัติในพื้นที่ที่มีคนหนาแน่นโดยใช้กล้องวงจรปิด CCTV ทั่วไป เพื่อใช้ทำแผนประเมินความเสี่ยงในการติดเชืด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดย Rezaei และ Azarmi [40] ซึ่งระบบที่มีความเสี่ยงสูงมีความเป็นไปได้สูงที่สุดในการแพร่กระจายของไวรัส ทำให้เจ้าหน้าที่สามารถดำเนินการ กำหนดมาตรการป้องกันลดพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงได้ล่วงหน้า แบบจำลองจะมีอัลกอริธึมที่สามารถตรวจหาบุคคลและตรวจสอบระยะห่างทางสังคมได้ตามมาตรการที่ออกโดยองค์การอนามัยโลก มีความแม่นยำสูงถึง 99.8 เปอร์เซ็นต์

การประยุกต์ใช้การตรวจจับบุคคลอัตโนมัติถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชืของ Sun และ Zhai โดย Wang และคณะ [41] ได้ทำอัลกอริธึมร่วมกับการประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิด เพื่อหาค่าอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมกับจำนวนคนในพื้นที่ในช่วงเวลา 30 นาที และเปรียบเทียบค่าอัตราการระบายอากาศที่ได้จากการทำนายกับอัตราการระบายอากาศจากการคำนวณการทำความเย็นในพื้นที่ และอัตราการระบายอากาศตามมาตรฐาน GB-50736 โดยพบว่า อัตราการระบายอากาศโดยปกติทำให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชืที่ยอมรับได้มีค่าเกิน 0.02 เมื่อความหนาแน่นของคนในพื้นที่มีค่ามากกว่า 0.16 คนต่อตารางเมตร ในขณะที่อัตราการระบายอากาศที่ทำนายได้จากการประมวลผลภาพนั้น ยังคงรักษาให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชืในพื้นที่มีค่าต่ำกว่า 0.02 ได้เมื่อความหนาแน่นของคนในพื้นที่มีค่ามากกว่า 0.26 คนต่อตารางเมตร

### บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อและการระบายอากาศที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในอาคารตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้มาจากแบบจำลองคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อสามารถกำหนดเงื่อนไขเพื่อคำนวณหาการระบายอากาศที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของอาคารแต่ละประเภท การระบายอากาศที่ได้ส่งผลต่อค่าพลังงานในอาคารจึงจำเป็นต้องศึกษาทั้งแบบจำลองคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อและแบบจำลองคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศด้วยเช่นกัน

แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีหลากหลายแบบจำลอง โดยมีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขหรือสมมติฐานที่กำหนด ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาแบบจำลองคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อทั้งแบบจำลองพื้นฐานและแบบจำลองประยุกต์ ได้แก่ แบบจำลอง Wells และ Riley [25] แบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci [30] และแบบจำลอง Sun และ Zhai [27] โดยจะกล่าวในหัวข้อ 3.1

แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อสามารถนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าการระบายอากาศที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ผู้วิจัยได้ศึกษามาตรฐานการระบายอากาศของ ASHRAE 62.1 ซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.2 และได้ศึกษาแบบจำลองคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศภายในอาคารแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.3 เพื่อคำนวณค่าความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นจากการระบายอากาศเปรียบเทียบระหว่างค่าการระบายอากาศมาตรฐานและค่าที่ปรับตามสภาพแวดล้อม ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ มาตรฐานการระบายอากาศของ ASHRAE 62.1 และแบบจำลองคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศ มีดังต่อไปนี้

#### 3.1 การประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ

การประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อเชิงปริมาณเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองการแพร่ระบาดของโรคติดต่อและเป็นการศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมการติดเชื้อ โดยกล่าวถึงความเสี่ยงในการติดเชื้อของบุคคลหรือกลุ่มประชากรต่อปริมาณเชื้อโรค แสดงเป็นความน่าจะเป็นของการติดเชื้อมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

วิธีการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อสามารถใช้แบบจำลอง Wells-Riley ซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานมาจากข้อเสนอของ Wells [7, 24] และถูกพัฒนาโดย Riley และคณะ [25] จะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 3.1.1 นอกจากนี้แบบจำลอง Wells และ Riley ยังมีการพัฒนาแบบจำลองประยุกต์ต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ประยุกต์จากแบบจำลองของ

Gammaitoni และ Nucci [30] เนื่องจากตั้งสมมติฐานโดยวิเคราะห์ความเสี่ยงในการติดเชื้อแบบเงื่อนไขสภาวะเชื้อโรคไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา รายละเอียดแบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci กล่าวในหัวข้อ 3.1.2 และนอกจากแบบจำลองข้างต้นทั้งสองแล้วยังได้ทำการศึกษาแบบจำลองของ Sun และ Zhai ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3

### 3.1.1 แบบจำลอง Wells-Riley [25]

Wells ได้เสนอหน่วยปริมาณการติดเชื้อโดยสมมติขึ้น ซึ่งเรียกว่า ค่าควอนตัมของการติดเชื้อ (Quantum of infection) ค่าควอนตัมนี้ หมายถึง จำนวนของอนุภาคที่ติดเชื้อในอากาศที่ใช้ในการแพร่เชื้อไปยังบุคคลในพื้นที่ปิดโดยทำให้ผู้สามารถรับเชื้อติดเชื้อจำนวน  $1 - e^{-1}$  หรือ 63.2 เปอร์เซ็นต์ และมีการตั้งสมมติฐานว่า อนุภาคเหล่านี้มีการสุมกระจายในอากาศไปทั่วในพื้นที่ที่จำกัด จากนั้น Riley และคณะ ได้พิจารณาปริมาณเชื้อโรคในอากาศที่เข้าสู่ร่างกายในรูปแบบของการสร้างควอนตาเพื่อใช้ในการประเมินค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยแบบจำลอง Wells-Riley คือ

$$P_I = \frac{C}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดย  $P_I$  คือ ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ (Probability of infection, %),  $C$  คือ จำนวนผู้ติดเชื้อใหม่ซึ่งยังไม่เป็นคนแพร่เชื้อ (Infection cases, people),  $S$  คือ จำนวนผู้สามารถรับเชื้อ (Susceptible, people),  $I$  คือ จำนวนผู้ติดเชื้อ (Infectors, people),  $p$  คือ อัตราการหายใจเข้าออกปกติ (Pulmonary ventilation rate,  $\text{m}^3/\text{hr}$ ),  $q$  คือ อัตราการสร้างควอนตาต่อชั่วโมงโดยผู้ติดเชื้อ (Quanta generation rate, Amount/hr),  $t$  คือ ระยะเวลาในการแพร่เชื้อรวม (Exposure time, hr) และ  $Q$  คือ อัตราการระบายอากาศในห้องด้วยอากาศบริสุทธิ์ (Room ventilation rate with clean air,  $\text{m}^3/\text{hr}$ ) หรือเท่ากับ  $\Lambda \times V$  โดย  $\Lambda$  คืออัตราการระบายอากาศในหน่วย ACH และ  $V$  คือ ปริมาตรห้องที่มีผู้ใช้งานในหน่วย  $\text{m}^3$

สำหรับอัตราการสร้างควอนตา ( $q$ ) เป็นหน่วยแสดงปริมาณการติดเชื้อตามสมมติฐานของ Wells ซึ่งไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง แต่สามารถประมาณได้จากการใช้อัตราการติดเชื้อจากการศึกษาทางระบาดวิทยาซึ่งนำไปแทนเป็นค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ ( $P_I$ ) และแทนค่าระยะเวลาในการแพร่เชื้อ ( $t$ ) และอัตราการระบายอากาศภายในห้อง ( $Q$ ) เพื่อคำนวณกลับหาค่าควอนตาในสมการที่ 1 โดยค่าควอนต้ามักใช้ในสถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อระยะไกลเป็นปัจจัยหลัก

สมมติฐานของแบบจำลอง Wells-Riley ถือว่า อากาศภายในห้องผสมกันอย่างดีและความเข้มข้นของอนุภาคติดเชื้อมีสภาวะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ ไม่มีการพิจารณาการสลายตัวของเชื้อโรคในอากาศ และมีจำนวนผู้ติดเชื้อภายในห้องคงที่ ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงใช้ได้เฉพาะกับการ



แพร่กระจายเชื้อทางอากาศโดยตรงเท่านั้น ไม่มีการคำนึงถึงการรับเชื้อผ่านละอองหยดน้ำจากสารคัดหลั่งของผู้ติดเชื้อโดยตรงและการสัมผัสพื้นผิวที่มีเชื้อโรค

### 3.1.2 แบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci [30]

เนื่องจากเงื่อนไขแบบจำลองของ Wells-Riley ที่สามารถใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ความเข้มข้นของเชื้อโรคมีค่าคงที่และผสมกันภายในห้องอย่างสมบูรณ์ เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว Gammaitoni และ Nucci จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองความเสี่ยงโดยประยุกต์จากแบบจำลอง Wells-Riley ด้วยการเพิ่มกลยุทธ์ต่าง ๆ เช่น การระบายอากาศ การกรองด้วยแผ่นกรอง HEPA และการทำการฆ่าเชื้อในอากาศด้วย UVGI รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของควอนตาคอนตามเวลาโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) ในการประเมินมาตรการควบคุมการติดเชื้อไวรัสจากสถานการณ์สมมติในห้องของโรงพยาบาล และตั้งสมมติฐานว่า อัตราการสร้างควอนตาคอนตามีค่าคงที่ และมีจำนวนผู้ติดเชื้อ (Infectors) ที่แน่นอนในเวลาเริ่มต้น  $t = 0$

Gammaitoni และ Nucci ได้กำหนดสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองไว้ดังนี้

- 1) ผู้สามารถรับเชื้อทุกคนไม่มีความแตกต่างกัน
- 2) จำนวนผู้ติดเชื้อในห้องและอัตราการเพิ่มของเชื้อในอากาศจากผู้ติดเชื้อมีค่าคงที่
- 3) ระยะเวลาแฝงของโรคมียาวนานกว่าเวลาที่ใช้ในแบบจำลอง
- 4) นิวเคลียสของหยดละอองฝอยกระจายอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอในอากาศและสามารถกำจัดได้ทั้งหมดโดยการระบายด้วยอากาศบริสุทธิ์ และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในอัตราคงที่
- 5) กำหนดให้อากาศบริสุทธิ์มีอุณหภูมิและความดันคงที่

ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อจะแสดงเป็นฟังก์ชันของเวลา ( $t$ ), อัตราการสร้างควอนตาคอน ( $q$ ), ปริมาตรห้อง ( $V$ ), และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอากาศ ( $A$ ) โดย Gammaitoni และ Nucci ได้สร้างสมการเชิงอนุพันธ์ปริมาณเชื้อโรคที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ได้แก่

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{p}{V}Q(t)S(t) \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{p}{V}Q(t)S(t) \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{r}{V}Q + q \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดย  $S(t)$  คือ จำนวนผู้สามารถรับเชื้อได้ ณ เวลา  $t$ ,  $C(t)$  คือ จำนวนผู้สามารถรับเชื้อได้ที่แสดงอาการออกมาหรือผู้ติดเชื้อใหม่แต่ยังไม่เป็นผู้แพร่เชื้อ ณ เวลา  $t$ ,  $Q(t)$  คือ จำนวนควอนตาคอนของเชื้อโรคที่กระจายในอากาศภายในห้อง ณ เวลา  $t$ ,  $r$  คือ อัตราการฆ่าเชื้อในอากาศโดยรวมค่าอัตราการ

ระบายนอก และอัตราการแผ่รังสียูวี,  $\Lambda$  คือ อัตราส่วนระหว่างการฆ่าเชื้อในอากาศและอัตราการสร้างควอนตา ( $r/q$ ) เช่น ประสิทธิภาพการระบายนอก ประสิทธิภาพแผ่นกรองอากาศ และ  $V$  คือ ขนาดของห้องที่สามารถรับเชื้อและผู้แสดงอาการอยู่ภายใน

เงื่อนไขเริ่มต้นมีดังต่อไปนี้

$$S(0) = S_0 > 0, C(0) = 0, Q(0) = Q_0 > 0 \quad \text{สมการที่ 5}$$

จากสมการที่ 2 – 5 Gammaitoni และ Nucci ได้ใช้โปรแกรม Maple ในการแก้สมการ เพื่อหาจำนวนผู้สามารถรับเชื้อได้ ( $S$ ) และจำนวนควอนตาของเชื้อโรค ( $Q$ ) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

$$S(t, q, \Lambda) = S_0 \exp\left(-\frac{pq \Lambda t + e^{-\Lambda t} - 1}{\Lambda^2}\right) \quad \text{สมการที่ 6}$$

$$Q(t, q, \Lambda) = \left(Q_0 - \frac{q}{\Lambda}\right) e^{-\Lambda t} + \frac{q}{\Lambda} \quad \text{สมการที่ 7}$$

ความน่าจะเป็นในการติดเชื้อโดย Gammaitoni และ Nucci เป็นไปตามสมการที่ 8

$$P_i(t, q, \Lambda) = \left(1 - \frac{S(t, q, \Lambda)}{S_0}\right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 8}$$

แบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci สามารถใช้ได้กับโรคที่แพร่กระจายเชื้อทางอากาศหลายโรค เช่น ไข้หวัดใหญ่ วัณโรค ไรโนไวรัส และโรคหัด และยังเป็นสมการที่คำนึงถึงความสำคัญของระยะเวลาของทั้งผู้ติดเชื้อและผู้สามารถรับเชื้ออีกด้วย ทำให้แบบจำลอง Gammaitoni และ Nucci ให้ค่าการประมาณที่แม่นยำกว่าการคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อด้วยสมการที่ 1 ของ Wells-Riley ในกรณีที่ระยะเวลาการแพร่เชื้อพร้อมกัน [25]

### 3.1.3 แบบจำลอง Sun และ Zhai [27]

เนื่องจากหยดละอองฝอยที่แพร่กระจายอนุภาคเชื้อโรคจากผู้ติดเชื้อ มีความสัมพันธ์กับระยะทางการแพร่และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละอองฝอย Sun และ Zhai [27] ได้ทำการประยุกต์สมการจากแบบจำลอง Wells-Riley เพื่อให้แบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการแพร่กระจายเชื้อโรคในระยะไกลตามระยะห่างระหว่างบุคคล ดังนั้นจึงมีการตั้งสมมติฐานเดียวกันกับแบบจำลองของ Wells และ Riley โดย Sun และ Zhai ได้นำเสนอตัวแปรเพิ่มเติม 2 ตัว ได้แก่ ค่าดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม ( $P_d$ ) และค่าประสิทธิผลการระบายนอก ( $E_z$ ) ที่มีค่าแตกต่างกันไป

ตามรูปแบบของการกระจายอากาศและการเลือกใช้ระบบระบายอากาศ และสอบเทียบสมการจากสถานการณ์การแพร่กระจายเชื้อจริงในรถประจำทางเพื่อหาค่าคอนตาของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เท่ากับ 0.238 อนุภาคต่อวินาที ซึ่งค่าคอนตาที่ได้สามารถนำไปใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศและค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อได้ โดยแบบจำลองมีสมการดังนี้

$$P_I = 1 - \exp\left(-P_d \frac{Iqpt}{\Lambda E_z}\right) \quad \text{สมการที่ 9}$$

โดยดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม ( $P_d$ ) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับระยะทางการแพร่กระจาย ( $d$ ) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่ง Sun และ Zhai ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของขนาดหยดน้ำลายที่แตกต่างกับระยะทางการแพร่กระจายจากการทดลองพ่นหยดน้ำ จากนั้นนำค่าไปคำนวณดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม ( $R^2 = 0.9189$ ) แสดงดังสมการที่ 10

$$P_d = (-18.19 \ln(d) + 43.276)/100 \quad \text{สมการที่ 10}$$

แบบจำลอง Sun และ Zhai สามารถใช้ในการทำนายค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของไวรัสที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศในพื้นที่อับอากาศได้ ซึ่งสามารถหาผลของความหนาแน่นของคน การระบายอากาศ และเวลาการสัมผัสรับเชื้อต่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยผลจากแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า การรักษาระยะห่างทางสังคมมีผลอย่างมากต่อความเสี่ยงในการติดเชื้อ และค่าการระบายอากาศขั้นต่ำ ซึ่งหากมีการกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพการระบายอากาศที่สูงขึ้นจะสามารถลดอัตราการระบายอากาศลงได้

ในงานวิจัยนี้อ้างอิงค่าคอนตาของ Sun และ Zhai ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.238 อนุภาคต่อวินาที และทำการปรับค่าเส้นโค้งของดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมใหม่ เพื่อให้ได้สมการที่มีค่า  $R^2$  ที่มีค่าที่ดียิ่งขึ้น

### 3.2 มาตรฐานการระบายอากาศในพื้นที่

ค่าการระบายอากาศตามมาตรฐานของแต่ละพื้นที่มีค่าที่แตกต่างกัน โดยมาตรฐานการระบายอากาศมีด้วยกันหลายมาตรฐาน ดังนั้นการศึกษามาตรฐานการระบายอากาศจึงมีความสำคัญเพื่อใช้อ้างอิงเป็นค่ามาตรฐานสำหรับคำนวณในแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ รวมถึงเป็นการศึกษาว่า ค่าการระบายอากาศตามมาตรฐานเพียงพอต่อการรักษาความเสี่ยงในการติดเชื้อให้ไม่เกินค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ โดยสำหรับค่าการระบายอากาศตามมาตรฐานในงานวิจัยนี้ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 [42] ค่าดังกล่าวสามารถใช้ในการคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศ

ตามมาตรฐานนี้เปรียบเทียบกับค่าการระบายอากาศที่ได้จากแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้ปรับปรุงขึ้นจากแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci โดยค่าการระบายอากาศมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงเป็นพื้นที่ศึกษา 3 พื้นที่ ได้แก่ สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์

ตารางที่ 1 อัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ในแต่ละพื้นที่

พื้นที่	ความหนาแน่นของ คนต่อพื้นที่ 100 m <sup>2</sup>	อัตราอากาศภายนอกต่อคน (R <sub>p</sub> ) (cfm/person)	อัตราอากาศภายนอกต่อ พื้นที่ (R <sub>a</sub> ) (cfm/ft <sup>2</sup> )
สำนักงาน	5	5	0.06
ร้านอาหาร	70	7.5	0.18
บาร์	100	7.5	0.18

ค่าอัตราอากาศภายนอกต่อคนในหน่วย cfm ต่อคน และอัตราอากาศภายนอกต่อพื้นที่ในหน่วย cfm ต่อตารางฟุตที่แสดงข้างต้นตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 สามารถนำมาคำนวณค่าอัตราการระบายอากาศรวม เพื่อใช้ในสมการแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ ซึ่งจำเป็นต้องเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในหน่วย Air Change per Hour หรือ ACH ก่อน จึงได้กำหนดให้ค่าความสูงของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 3 พื้นที่ที่มีค่าเท่ากับ 3 เมตรตามมาตรฐานในกฎหมายควบคุมอาคารของประเทศไทย จากนั้นจึงคำนวณเพื่อให้ได้อัตราการระบายอากาศรวมในหน่วย ACH ดังที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าจากการคำนวณอัตราการระบายอากาศรวม

พื้นที่	พื้นที่ (m <sup>2</sup> )	ความสูง พื้นที่ (m)	จำนวนรอบของการไหลเวียนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)		อัตราการระบาย อากาศรวม
			อัตราอากาศ ภายนอกต่อคน รวม	อัตราอากาศ ภายนอกต่อพื้นที่ รวม	
สำนักงาน	100	3	0.1	0.4	0.5
ร้านอาหาร	100	3	3.0	1.1	4.1
บาร์	100	3	4.2	1.1	5.3

### 3.3 สมการคำนวณค่าพลังงานจากการระบายอากาศ

การคำนวณค่าพลังงานที่เกิดจากการระบายอากาศใช้เพื่อหาค่าไฟฟ้านำไปสู่การประเมินความเหมาะสมของการปรับค่าการระบายอากาศ เมื่อมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ในแบบจำลองความ

เสียงในการติดเชื้อ Rim [38] ได้ทำการประเมินค่าพลังงานภายในอาคารอันเกิดจากการระบายอากาศในอาคารสำนักงานในพื้นที่ประเทศเขตร้อนชื้น ได้แก่ ประเทศสิงคโปร์ โดยใช้สมการที่ 11 จนถึงสมการที่ 17 ในการคำนวณหาค่าพลังงานดังกล่าว

$$P_{ws} = 1000 \times \exp \left( 16.7 - \frac{4060}{T_a - 37} \right) \quad \text{สมการที่ 11}$$

$$P_w = P_{ws} \cdot RH \quad \text{สมการที่ 12}$$

$$\rho_{da} = \frac{28.97(P - P_w)}{RT_a} \quad \text{สมการที่ 13}$$

$$W = \frac{0.622P_w}{P - P_w} \quad \text{สมการที่ 14}$$

$$h = C_{pa} \cdot T + W \cdot (h_{fg} + C_{pw} \cdot T) \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$E_{sensible} = \rho_{da} \cdot \dot{Q} \cdot (C_{pa} + W \cdot C_{pw}) \cdot \Delta T \cdot \Delta t \quad \text{สมการที่ 16}$$

$$E_{latent} = \rho_{da} \cdot \dot{Q} \cdot \Delta W \cdot h_{fg} \cdot \Delta t \quad \text{สมการที่ 17}$$

โดย  $T_a$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ  $T + 273.15$  (Absolute temperature, K),  $T$  คือ อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature, °C),  $RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, %),  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ  $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  (Universal gas constant),  $P$  คือ ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ  $101,325 \text{ Pa}$  (Atmospheric pressure),  $P_w$  คือ ความดันไอน้ำ (Water vapor pressure, Pa),  $C_{pa}$  คือ ความร้อนจำเพาะอากาศแห้ง มีค่าเท่ากับ  $1.006 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  (Specific heat of dry air),  $C_{pw}$  คือ ความร้อนจำเพาะไอน้ำ มีค่าเท่ากับ  $1.86 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  (Specific heat of water vapor),  $h_{fg}$  คือ เอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการกลายเป็นไอของน้ำ มีค่าเท่ากับ  $2,500 \text{ kJ}/\text{kg water}$  (Enthalpy change due to water vaporization),  $\dot{Q}$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (Airflow rate,  $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\Delta T$  คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอก (Indoor-Outdoor temperature difference, K),  $\Delta t$  คือ ระยะเวลาที่พิจารณา (Duration of analysis period, s) และ  $\Delta W$  คือ ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นในอากาศภายในและภายนอก (Indoor-Outdoor humidity ratio difference,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{d_a}$ )

## บทที่ 4 แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ

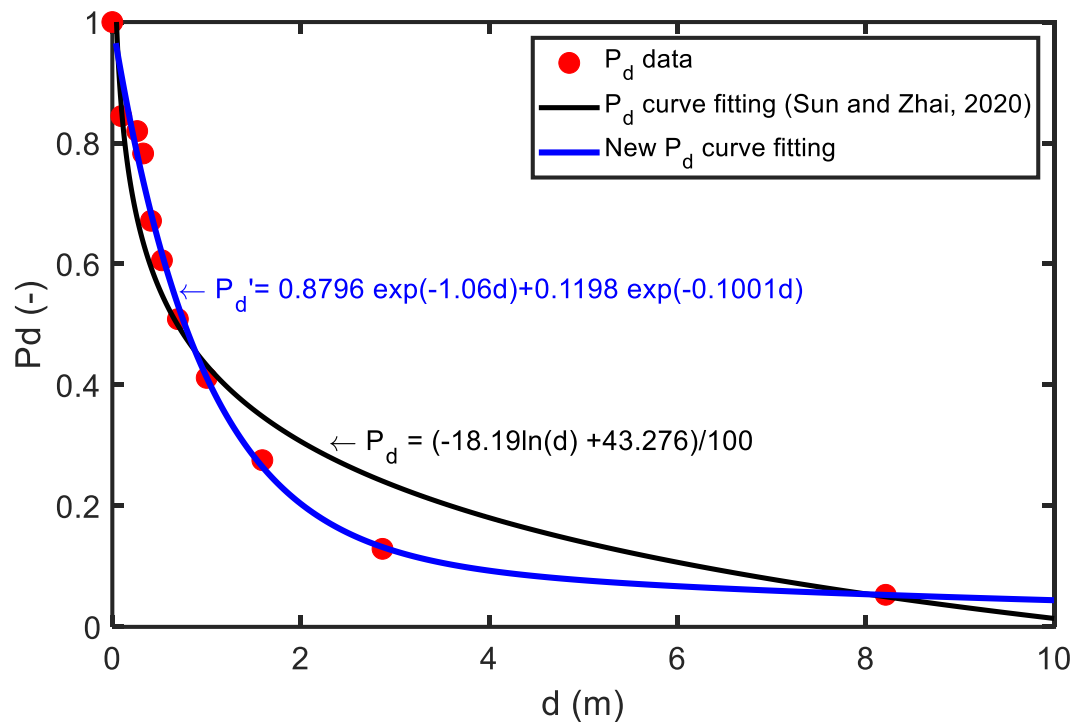
แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคที่แพร่กระจายทางอากาศเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมการแพร่กระจายเชื้อ โดยแสดงค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อนี้ได้ถูกพัฒนาในงานวิจัยที่หลากหลายด้วยสมมติฐานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมักใช้สมการแบบจำลองของ Wells และ Riley และนักวิจัยต่าง ๆ ได้พัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดของแบบจำลอง Wells และ Riley ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของเชื้อโรคมิค่าคงที่และผสมกันภายในห้องอย่างสมบูรณ์

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกพัฒนาแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci ในสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 4 เนื่องจากสามารถใช้ในกรณีที่ค่าควอนตัมในการติดเชื้อภายในห้องเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ นับเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้ในเงื่อนไขภายใต้สภาวะไม่คงที่ และพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวโดยคำนึงถึงระยะห่างทางสังคมและประสิทธิภาพการป้องกันเชื้อโรคของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ บทนี้จึงกล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ และการสอบเทียบแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกับข้อมูลการเกิดสถานการณ์โรคติดต่อที่แพร่กระจายทางอากาศจริงจากงานวิจัย

### 4.1 การสร้างสมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่มีความแม่นยำ

ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับระยะทางการแพร่กระจายเชื้อ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่ถูกนำเสนอในแบบจำลองของ Sun และ Zhai ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.3 การสมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมของ Sun และ Zhai นั้น ทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของขนาดหยดน้ำลายกับระยะทางการแพร่กระจายจากการทดลองพ่นหยดน้ำ จากนั้นนำค่าไปคำนวณดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง และทำการสร้างสมการเส้นโค้งของข้อมูลได้ดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม เมื่อระยะทางการแพร่กระจายมีขนาดลดลงหรืออาจกล่าวได้ว่า หยดน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ค่าดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เนื่องจากสมการเส้นโค้งของ Sun และ Zhai มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลการทดลองค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 4- 1 โดยมีค่า  $R^2 = 0.9189$  ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเส้นโค้งของดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมใหม่ให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองจริง ทำให้ได้สมการแสดงดังสมการที่ 18 ซึ่งมีค่า  $R^2 = 0.9966$



รูปที่ 4- 1 การเปรียบเทียบเส้นโค้งของดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมกับข้อมูลการทดลอง

$$Pd' = 0.8796 \exp(-1.06d) + 0.1198 \exp(-0.1001d) \quad \text{สมการที่ 18}$$

สมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่ได้รับการปรับเส้นโค้งจะถูกนำไปประยุกต์เข้ากับแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.2 การพัฒนาแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ

การพัฒนาแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเลือกใช้แบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci ซึ่งเป็นสมการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคอนตัมในการติดเชื้อตามเวลา เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่มีการเข้าออกของบุคคล โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเกินกว่าที่กำหนด และสามารถใช้คำนวณหาจำนวนบุคคลที่เหมาะสมเมื่ออัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่

สมมติฐานของแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้เป็นไปตามสมมติฐานของ Gammaitoni และ Nucci กล่าวคือ อากาศในห้องและอากาศที่เข้ามาใหม่ผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Well-mixed distribution) และไม่พิจารณาความแตกต่างของสภาพร่างกายของผู้รับ

เชื้อทุกคน และเมื่อผู้รับเชื้อติดโรคแล้วจะไม่สามารถแพร่เชื้อได้เอง โดยในแบบจำลองนี้กำหนดให้จำนวนผู้แพร่กระจายเชื้อมีจำนวนคงที่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนบุคคลในห้องทั้งหมด

แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีถูกประยุกต์เข้ากับสมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคมที่ได้รับการปรับเส้นโค้งและประสิทธิภาพการป้องกันเชื้อโรคของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

$$\frac{dQ}{dt} = -\Lambda Q + (1 - \eta_i)qI \quad \text{สมการที่ 19}$$

$$\frac{dPI}{dt} = \frac{P'_d p(1 - \eta_s)}{V} Q(1 - PI) \quad \text{สมการที่ 20}$$

ประสิทธิภาพอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจอ้างอิงจากงานวิจัยของ Nicas [35] โดยหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ หน้ากากที่ใช้ครั้งเดียว หน้ากากครึ่งหน้าแบบยางยืดพร้อมแผ่นกรอง HEPA และหน้ากากป้องกันเชื้อโรคแบบครึ่งหน้าชนิดมีพัดลมพร้อมชุดกรองอากาศ HEPA มีประสิทธิภาพการกรอง 0.58, 0.94, 0.98 และ 0.996 ตามลำดับ

#### 4.3 การสอบเทียบผลแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ

การสอบเทียบผลแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้ออ้างอิงข้อมูลโรคติดต่อที่แพร่กระจายทางอากาศจริงจากงานวิจัย โดยแบ่งออกได้เป็น 11 สถานการณ์ ได้แก่ การแพร่เชื้อวัณโรคจากการปลูกถ่ายฝี (Abscess irrigation) การชันสูตรพลิกศพ (Autopsy) การตรวจหลอดลม (Bronchoscopy) และการใส่ท่อช่วยหายใจ (Intubation) [30] การแพร่เชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในเครื่องบินประเทศอิหร่าน ในรถประจำทางของเมืองต่าง ๆ ในประเทศจีน [27] ในรถประจำทางประเทศญี่ปุ่น [43] และในพื้นที่หุบเขาสกาทในเมืองวอชิงตัน [44] โดยตัวแปรทั้งหมดจากงานวิจัยอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 3 ถูกลำมาคำนวณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเทียบกันทั้งหมด 4 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของ Wells และ Riley แบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci แบบจำลองของ Sun และ Zhai และแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น

ผลของค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 4 แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4- 2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแบบจำลองที่ได้กล่าวไว้ พบว่าแบบจำลองของ Wells และ Riley มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึง 54.19 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 45.66 เปอร์เซ็นต์ แบบจำลองของ Sun และ Zhai มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 16.01 เปอร์เซ็นต์ และแบบจำลองที่

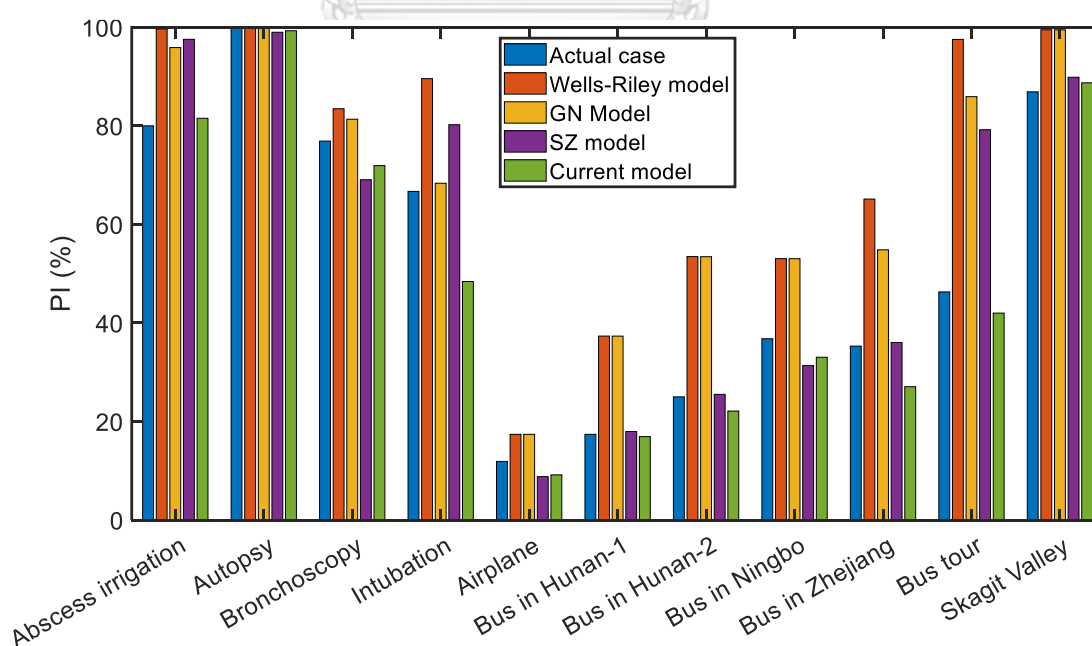


ได้ถูกพัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 10.78 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แบบจำลองดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมในการทำนายค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ

ตารางที่ 3 ตัวแปรจากสถานการณ์จริงทั้งหมด 11 สถานการณ์

Case	p	q	t	VR	$\Lambda$	$N_i$	$N_t$	l	d
Abscess irrigation, U.S.A. <sup>A</sup>	0.01	38	150	20	0.1	4	5	2	0.3
Autopsy, U.S.A.	0.01	94	150	20	0.1	4	4	1	0.3
Bronchoscopy, U.S.A.	0.01	6	150	20	0.1	10	13	4	0.3
Intubation, U.S.A. <sup>A</sup>	0.01	514	66	300	0.1	2	3	2	0.21
Airplane, Iran	0.005	14.28	390	145.7	0.04	37	311	1	0.76
Bus in Hunan-1, China	0.005	14.28	120	18.33	0.04	8	46	1	1.05
Bus in Hunan-2, China	0.005	14.28	60	5.6	0.04	3	12	1	1.3
Bus in Ningbo, China	0.005	14.28	240	22.7	0.04	25	68	1	0.7
Bus in Zhejiang, China	0.01	14.28	100	27.1	0.04	24	68	2	1.05
Bus tour1, Japan <sup>A</sup>	0.01	14.28	212	16.3	0.04	19	41	2	1.05
Skagit Valley, U.S.A.	0.02	14.28	150	32.4	0.04	53	61	4	1

A - Surgical masks were adapted.



รูปที่ 4- 2 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากแบบจำลองต่าง ๆ จากทั้งหมด 11 สถานการณ์

เนื่องจากแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนกับสถานการณ์จริงเพียงเล็กน้อย จึงสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการหาความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่เมื่อมีการระบายอากาศตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ ดังแสดงในบทที่ 5 และใช้ในการหาผลกระทบในกรณีปรับค่าการระบายอากาศตามความหนาแน่นของคนที่เข้าออกพื้นที่โดยมีค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ในเวลาที่อยู่ในพื้นที่ที่กำหนดไว้ ดังแสดงในบทที่ 6



## บทที่ 5 การวิเคราะห์จำนวนคนที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่สำหรับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้เมื่อมีการระบายอากาศตามมาตรฐานของ ASHRAE

โรคติดต่อทางระบบทางเดินหายใจสามารถแพร่กระจายได้ทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศจำกัดจะทำให้เชื้อโรคจากผู้แพร่เชื้อแพร่กระจายได้ไกลขึ้น เมื่อพื้นที่หนึ่งมีผู้ติดเชื้อเข้าสู่พื้นที่ จะทำให้ผู้คนในพื้นที่นั้นมีโอกาสติดเชื้อที่แพร่กระจายในอากาศได้ ดังนั้นการกำหนดมาตรการป้องกันการแพร่กระจายหรือการลดความเสี่ยงดังกล่าวจึงจำเป็นอย่างยิ่ง

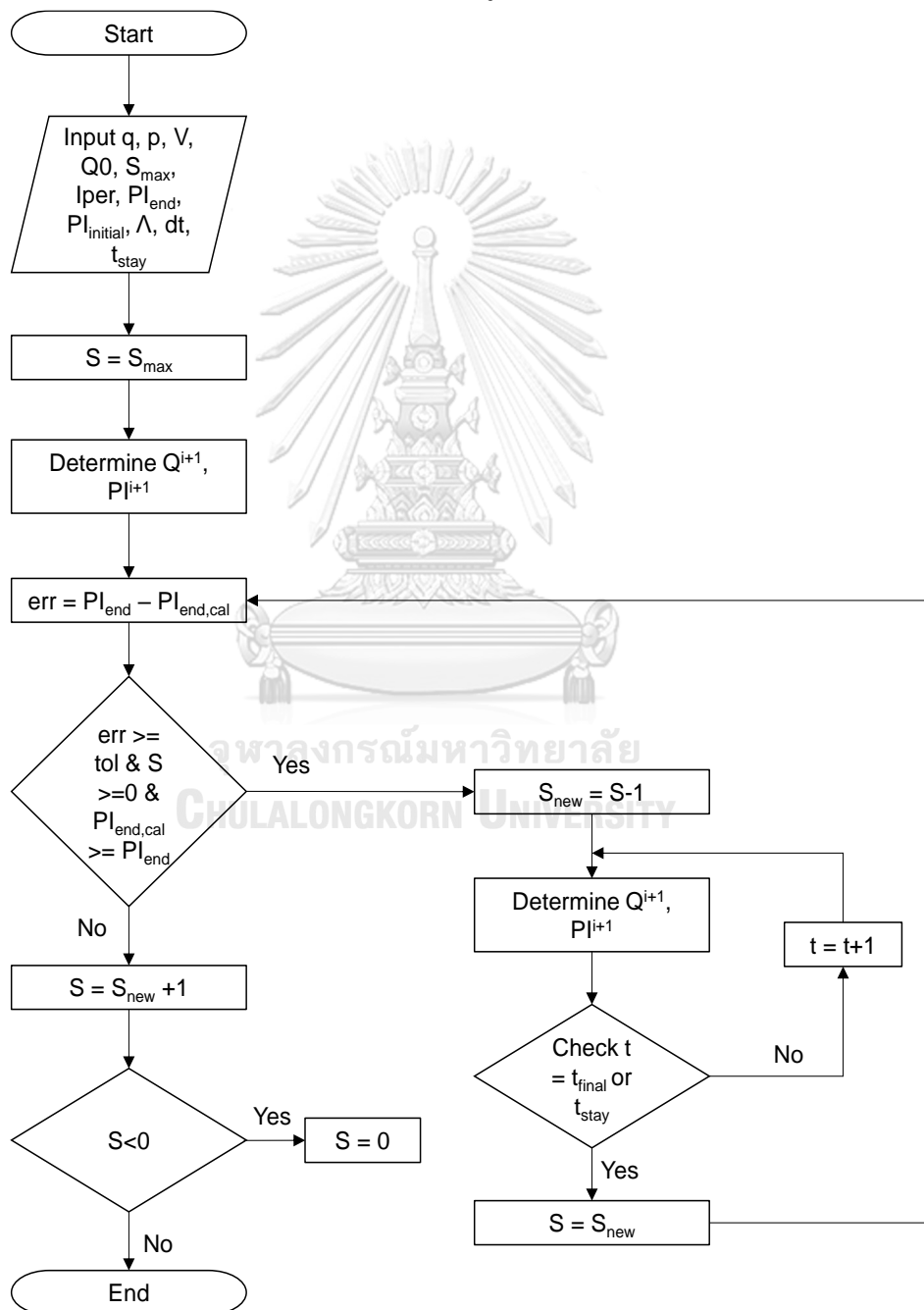
งานวิจัยนี้มีการประยุกต์แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อจากบทที่ 4 โดยการกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ในพื้นที่นั้น ๆ ให้มีค่าต่ำเพื่อแสดงถึงโอกาสในการติดเชื้อที่น้อยลงของคนในพื้นที่ ซึ่งการกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีค่าต่ำใช้สำหรับลดความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่สูง โดยมีวิธีในการลดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อลงได้ 2 วิธี ได้แก่ การลดจำนวนคนในพื้นที่สูง และการเพิ่มอัตราการระบายอากาศในพื้นที่

ปกติแล้วอาคารที่มีอยู่หรือได้ถูกสร้างขึ้นในอดีตมักมีอัตราการระบายอากาศที่คงที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งในบางครั้งอาจไม่เพียงพอจึงส่งผลให้คนที่อยู่ในพื้นที่นั้นมีความเสี่ยงในการติดเชื้อสูง ดังนั้นการกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ สามารถทำได้โดยวิธีการลดจำนวนคนในพื้นที่สูงเท่านั้น ในบทที่ 5 นี้จึงได้หาจำนวนคนที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพื้นที่เพื่อให้มีค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ไม่เกินกำหนด

### 5.1 กระบวนการหาจำนวนคนในพื้นที่ที่มากที่สุดที่เหมาะสมกับอัตราการระบายอากาศที่จำกัด

การพิจารณาจำนวนคนที่เหมาะสมในพื้นที่กำหนดให้ค่าการระบายอากาศมีค่าตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เจื่อนไขในการพิจารณาพื้นที่แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ พื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์ โดยกำหนดให้พื้นที่สำนักงานสามารถรับคนได้สูงสุด 50 คนในพื้นที่ 100 ตารางเมตร พื้นที่ร้านอาหารสามารถรับคนได้สูงสุด 35 คน ในพื้นที่ 50 ตารางเมตร และพื้นที่บาร์สามารถรับคนได้สูงสุด 100 คนใน 100 ตารางเมตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนตามค่ามาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ทำให้ปริมาตรคิดเป็น 3,000, 150 และ 300 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ กำหนดให้พื้นที่แต่ละประเภทมีพฤติกรรมการใส่หน้ากากอนามัยของคนที่แตกต่างกันซึ่งจะแบ่งออกเป็นกรณีที่ทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัย และกรณีที่ทุกคนในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัย ดังนั้นกรณีศึกษาจึงมีทั้งหมด 6 กรณี

กระบวนการในการหาจำนวนคนในพื้นที่ที่มากที่สุดที่เหมาะสมกับอัตราการระบายน้ำอากาศใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์กลับทาง (Backward Euler's method) ซึ่งเป็นการคำนวณแบบ Implicit methods ในการหาค่าจำนวนคน การกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ให้มีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 เวลาที่คนสามารถอยู่ในพื้นที่ได้มีค่า 60 ถึง 180 นาที และจำนวนผู้ติดเชื้อคิดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนในพื้นที่ทั้งหมด อัตราการสร้างควอนตาค่าต่อชั่วโมงโดยผู้ติดเชื้อเท่ากับ 856.8 ต่อชั่วโมง อัตราการหายใจเข้าออกปกติเท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 5- 1 แผนภาพการหาจำนวนคนที่เหมาะสมในพื้นที่

กระบวนการเริ่มต้นจากการกำหนดให้พื้นที่แต่ละประเภทมีจำนวนคนสูงสุดตามค่าการ ออกแบบ จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำ (Iteration) เพื่อหาค่าจำนวนคนที่ทำให้ค่าความเสี่ยงใน การติดเชื้อไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ที่เวลาการอยู่ในพื้นที่ต่าง ๆ กัน โดยการลดจำนวนคนลงทีละ 1 คน จนกระทั่งผลลัพธ์เข้าสู่ค่าจำนวนคนที่อยู่ในขอบเขตของค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ สำหรับทุกกรณี ดังแสดงในรูปที่ 5- 1

การนำเข้าสู่ข้อมูลรูปแบบจำลองดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอัตราการสร้างควอนตาต่อชั่วโมง โดยผู้ติดเชื้อ ( $q$ ) อัตราการหายใจเข้าออกปกติ ( $p$ ) ปริมาตรห้อง ( $V$ ) จำนวนควอนตาของเชื้อโรค เริ่มต้นที่กระจายในอากาศภายในห้อง ( $Q_0$ ) จำนวนคนที่สูงที่สุดที่รับได้ในพื้นที่ที่กำหนด ( $S_{max}$ ) อัตราส่วนของผู้ติดเชื้อต่อจำนวนคนในห้อง ( $I_{per}$ ) ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ ( $PI_{end}$ ) อัตราการระบายอากาศมาตรฐาน ( $\Lambda$ ) เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ( $dt$ ) และเวลาที่คนอยู่ภายในพื้นที่ ( $T_{stay}$ ) ซึ่งในแต่ละพื้นที่สามารถกำหนดพฤติกรรมคนใส่หน้ากากอนามัยของคนในพื้นที่ตาม แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่พัฒนาขึ้น ซึ่งหน้ากากอนามัยที่ใช้ในแบบจำลองนี้เป็น หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ มีค่าประสิทธิภาพการกรองเชื้อโรคเท่ากับ 0.58

## 5.2 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสม

แบบจำลองในการหาจำนวนคนในพื้นที่ที่มากที่สุดที่เหมาะสมกับอัตราการระบายอากาศที่ จำกัด สามารถใช้เปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาแน่นของคนในพื้นที่ที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 ในเวลาที่อยู่ในพื้นที่ 60 ถึง 180 นาที ระหว่างพื้นที่สำนักงานและร้านอาหารได้ โดยสำนักงานสามารถรับคนได้สูงสุด 50 คน ร้านอาหารสามารถรับคนได้สูงสุด 35 คน และบาร์ สามารถรับคนได้สูงสุด 100 คน

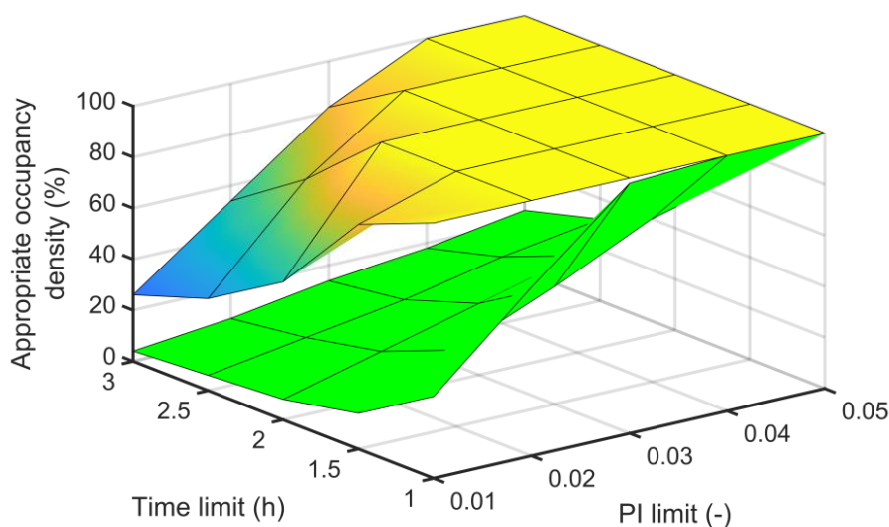
ผลลัพธ์การทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดที่ไม่เกินค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่กำหนด ของพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 3 พื้นที่ โดยเมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.02 จะพบว่า พื้นที่สำนักงานในกรณีที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที จะสามารถรับคนได้เพียง 66.00, 18.00 และ 8.00 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รับได้สูงสุดในพื้นที่ ตามลำดับ เพื่อไม่ให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ สำนักงานในกรณีที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัยซึ่งที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที คิดเป็น 100.00, 100.00 และ 54.00 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รับได้สูงสุดในพื้นที่ตามลำดับ

ในขณะที่พื้นที่ร้านอาหารที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.02 พบว่า ใน กรณีที่ทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัยที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที จะสามารถรับคนได้ 8.57, 2.86 และ 2.86 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รับได้สูงสุดในพื้นที่ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อทุกคน

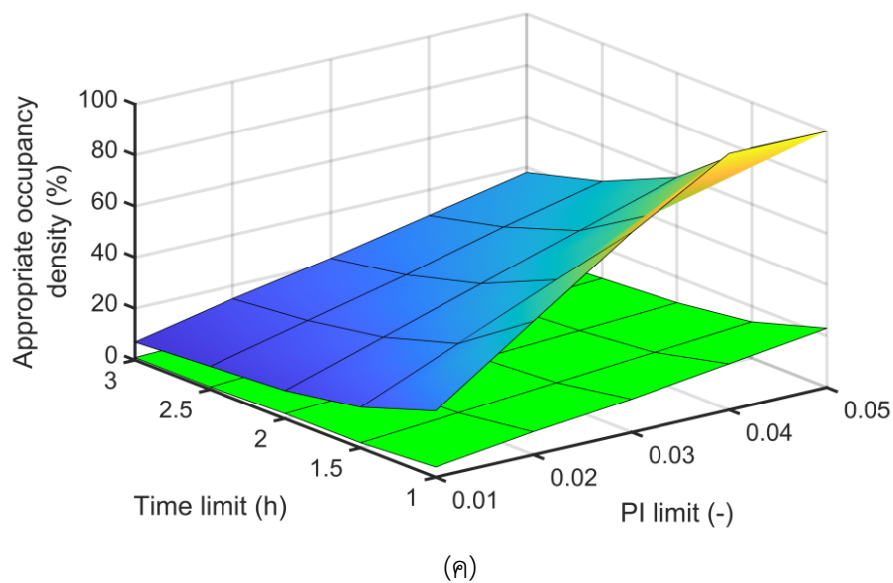
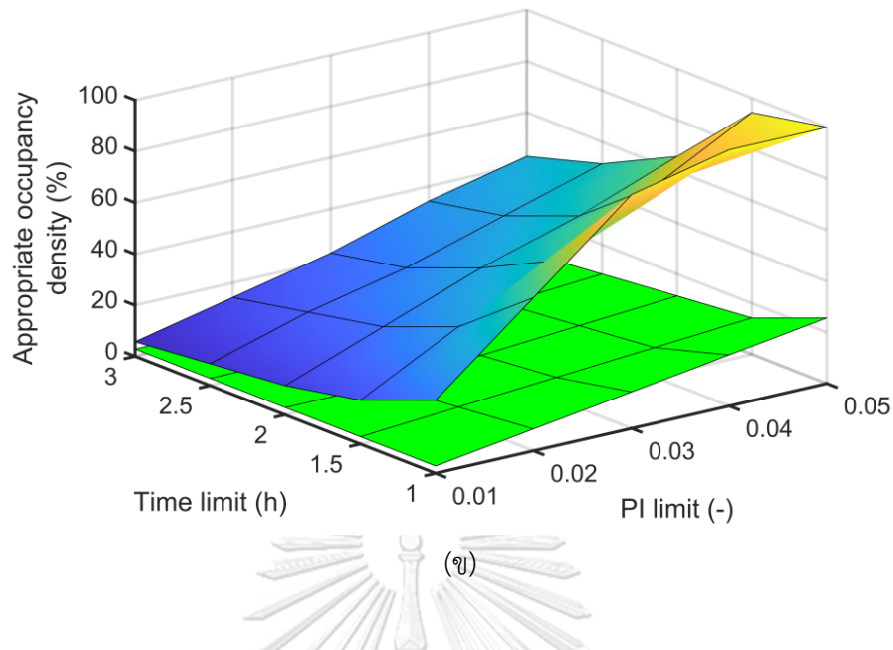
ในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัยในพื้นที่ร้านอาหาร และอยู่ในร้านอาหารเป็นเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง พื้นที่ร้านอาหารนี้จะรับคนได้มากที่สุดเพียง 1 คนเท่านั้น เพื่อรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ให้มีค่าไม่เกิน 0.02 ซึ่งยังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีใส่หน้ากากอนามัย โดยที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที จะสามารถรับคนได้ 60.00, 25.71 และ 14.29 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รับได้สูงสุดในพื้นที่ตามลำดับ

สำหรับพื้นที่บาร์ที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.02 พบว่า ในกรณีที่ทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัยที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที จะสามารถรับคนได้ 9.00, 4.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รับได้สูงสุดในพื้นที่ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทุกคนในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัยที่ระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที จะสามารถรับคนได้ 52.00, 23.00 และ 15.00 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รับได้สูงสุดในพื้นที่ตามลำดับ

แนวโน้มของจำนวนคนที่เหมาะสมของค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้อื่น ๆ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพื้นที่และเวลาเช่นเดียวกันกับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.02 โดยพื้นที่จะสามารถรับคนได้ลดลงเมื่อระยะเวลาการอยู่ในพื้นที่ของบุคคลที่เข้ามาในพื้นที่เพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยจะรับความหนาแน่นของคนได้ต่ำกว่าพื้นที่ที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัย และเมื่อกำหนดให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ให้มีค่ามากกว่า 0.02 จะทำให้พื้นที่ที่สามารถรับคนในพื้นที่เพิ่มขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 5- 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 ระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของคนในพื้นที่ที่เหมาะสม



(ก)



รูปที่ 5- 2 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของคนที่เหมาะสมใน (ก) พื้นที่สำนักงาน (ข) พื้นที่ร้านอาหาร และ (ค) พื้นที่บาร์ เมื่อมีค่าความเสี่ยงที่ยอมรับมีค่า 0.01 ถึง 0.05 และระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่มีค่า 1 ถึง 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5- 2 สำหรับพื้นที่สำนักงานเมื่อทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและเวลาที่คนอยู่ในพื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 60 นาที เป็น 120 นาที และจาก 120 นาที เป็น 180 นาที ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 66.63 และ 51.64 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทุกคนใส่หน้ากากอนามัย ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 9.20 และ 23.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ร้านอาหารเมื่อ

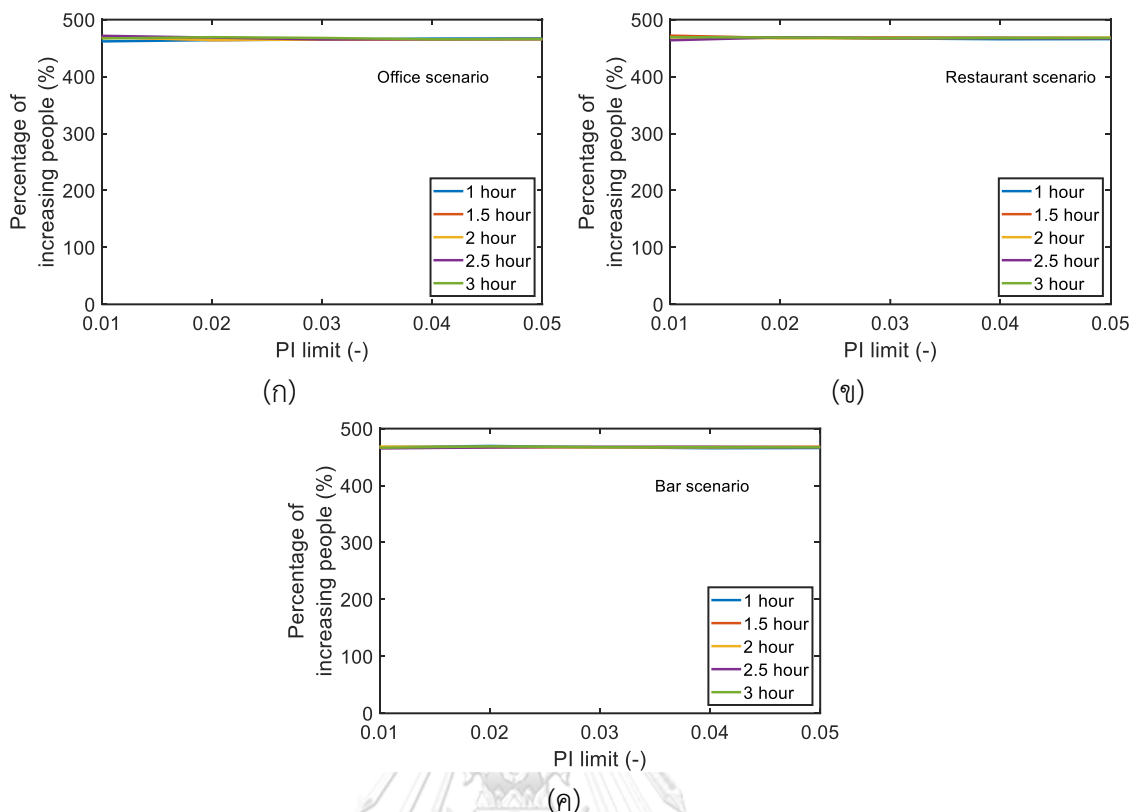
ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและเวลาที่คนอยู่ในพื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 60 นาที เป็น 120 นาที และจาก 120 นาที เป็น 180 นาที ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 47.87 และ 26.67 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทุกคนใส่หน้ากากอนามัย ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 51.25 และ 41.08 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสำหรับพื้นที่บาร์เมื่อทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและเวลาที่คนอยู่ในพื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 60 นาที เป็น 120 นาที และจาก 120 นาที เป็น 180 นาที ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 54.30 และ 36.01 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทุกคนใส่หน้ากากอนามัย ความหนาแน่นของคนจะลดลงเฉลี่ย 52.52 และ 36.01 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนความหนาแน่นของคนในพื้นที่ในกรณีต่าง ๆ ซึ่งคิดเป็นเพอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่เหมาะสมในพื้นที่ตามเงื่อนไขที่กำหนดต่อจำนวนคนที่สูงที่สุดที่พื้นที่สามารถรับได้ตามเงื่อนไขการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ โดยจะเห็นแนวโน้มของผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศจำกัดซึ่งใช้แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่า ระยะเวลาในการอยู่ในพื้นที่ของคนที่เพิ่มขึ้นมีค่าแปรผกผันกับจำนวนคนในพื้นที่ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาส่งผลให้จำนวนคนในพื้นที่มีจำนวนน้อยลง แต่เมื่อกำหนดให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้มีค่ามากขึ้น จะทำให้จำนวนคนในพื้นที่เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

การเปรียบเทียบพื้นที่ที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัยกับพื้นที่ที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัย จะเห็นได้ว่า การใส่หน้ากากอนามัยทำให้พื้นที่สามารถรับคนได้เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.02 เมื่ออยู่ในพื้นที่สำนักงานไม่เกิน 60, 120 และ 180 นาทีจะสามารถรับคนได้เพิ่มขึ้น 51.52, 455.56 และ 575.00 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ พื้นที่ร้านอาหารสามารถรับคนได้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสำนักงาน 600.00, 800.00 และ 400.00 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ และพื้นที่บาร์จะสามารถรับคนได้เพิ่มขึ้น 477.78, 475.00 และ 650.00 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ จึงแสดงให้เห็นว่า การใส่หน้ากากอนามัยเป็นอีกมาตรการหนึ่งที่จะช่วยให้พื้นที่สามารถรับคนได้เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ประเภทของพื้นที่ แม้ว่าประเภทพื้นที่จะมีผลที่แตกต่างกันเนื่องจากขนาดของพื้นที่และค่าการระบายอากาศมาตรฐานดังเช่นสำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์

เมื่อพิจารณาโดยไม่จำกัดจำนวนคนในพื้นที่ ทำให้แบบจำลองทำนายค่าความหนาแน่นของคนโดยแต่ละพื้นที่มีโอกาสที่คนจะหนาแน่นเกิน 100 เพอร์เซ็นต์ จะพบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคนในกรณีที่ใส่หน้ากากอนามัย และในกรณีที่ใส่หน้ากากอนามัย โดยพบว่า กรณีที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัยจะทำให้ทุก ๆ พื้นที่สามารถรับคนเพิ่มได้มากกว่ากรณีที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยได้ถึง 4.7 เท่า หรือ 470 เพอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 5- 3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า หากพื้นที่นั้นไม่จำเป็นต้องจำกัดจำนวนคนเข้าใช้พื้นที่ จะสามารถเพิ่มจำนวนคนได้มากถึง 4.7 เท่าเมื่อพื้นที่นั้นมีมาตรการการใส่หน้ากากอนามัยสำหรับทุกคนที่เข้าสู่พื้นที่นั้นโดยจะไม่ทำให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้





รูปที่ 5- 3 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของจำนวนคนในพื้นที่เมื่อทุกคนใส่หน้ากากอนามัยเทียบกับไม่ใส่หน้ากากอนามัยใน (ก) พื้นที่สำนักงาน (ข) พื้นที่ร้านอาหาร และ (ค) พื้นที่บาร์ โดยไม่กำหนดค่าจำนวนคนสูงสุดที่พื้นที่สามารถรับได้

ทั้งนี้ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมในพื้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับพื้นที่อาคารหรือสถานที่ที่ได้ถูกสร้างไว้และมีการระบายอากาศอย่างจำกัด ไม่สามารถปรับการระบายอากาศได้ เพื่อให้สามารถรองรับจำนวนคนได้สูงที่สุดตามประเภทของพื้นที่นั้น ๆ โดยสามารถประยุกต์ใช้กับระบบกล้องวงจรปิดหรือ CCTV ที่ซึ่งตรวจจับใบหน้าของบุคคลในพื้นที่ต่าง ๆ และสามารถเพิ่มระบบการตรวจนับจำนวนคนเพื่อเป็นมาตรการป้องกันไม่ให้อาคารในพื้นที่อยู่ในระยะเวลาเกินกว่ากำหนด หรือมีจำนวนคนในพื้นที่เกินกว่ากำหนด

นอกจากนี้ในพื้นที่อาคารสถานที่ที่สามารถปรับการระบายอากาศได้นั้นจะสามารถใช้แบบจำลองนี้ในการประยุกต์ใช้เพื่อปรับการระบายอากาศอัตโนมัติตามจำนวนคนที่เข้าและออกได้อย่างเหมาะสม โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 6

## บทที่ 6 ผลกระทบของการปรับอัตราการระบายอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของคนในพื้นที่เพื่อให้ได้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้

นอกเหนือจากการปรับจำนวนคนในพื้นที่ตามที่ได้อภิปรายไว้ในบทที่ 5 การปรับอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับจำนวนคนที่มีอยู่เป็นอีกวิธีหนึ่งในการลดความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนที่ใช้หรืออาศัยในพื้นที่ เนื่องจากการปรับอัตราการระบายอากาศส่งผลต่อค่าควอนตัมในการติดเชื้อในพื้นที่ และความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่โดยตรง ทางผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวคิดในการปรับค่าอัตราการระบายอากาศเพื่อรักษาความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับในเวลาที่กำหนด

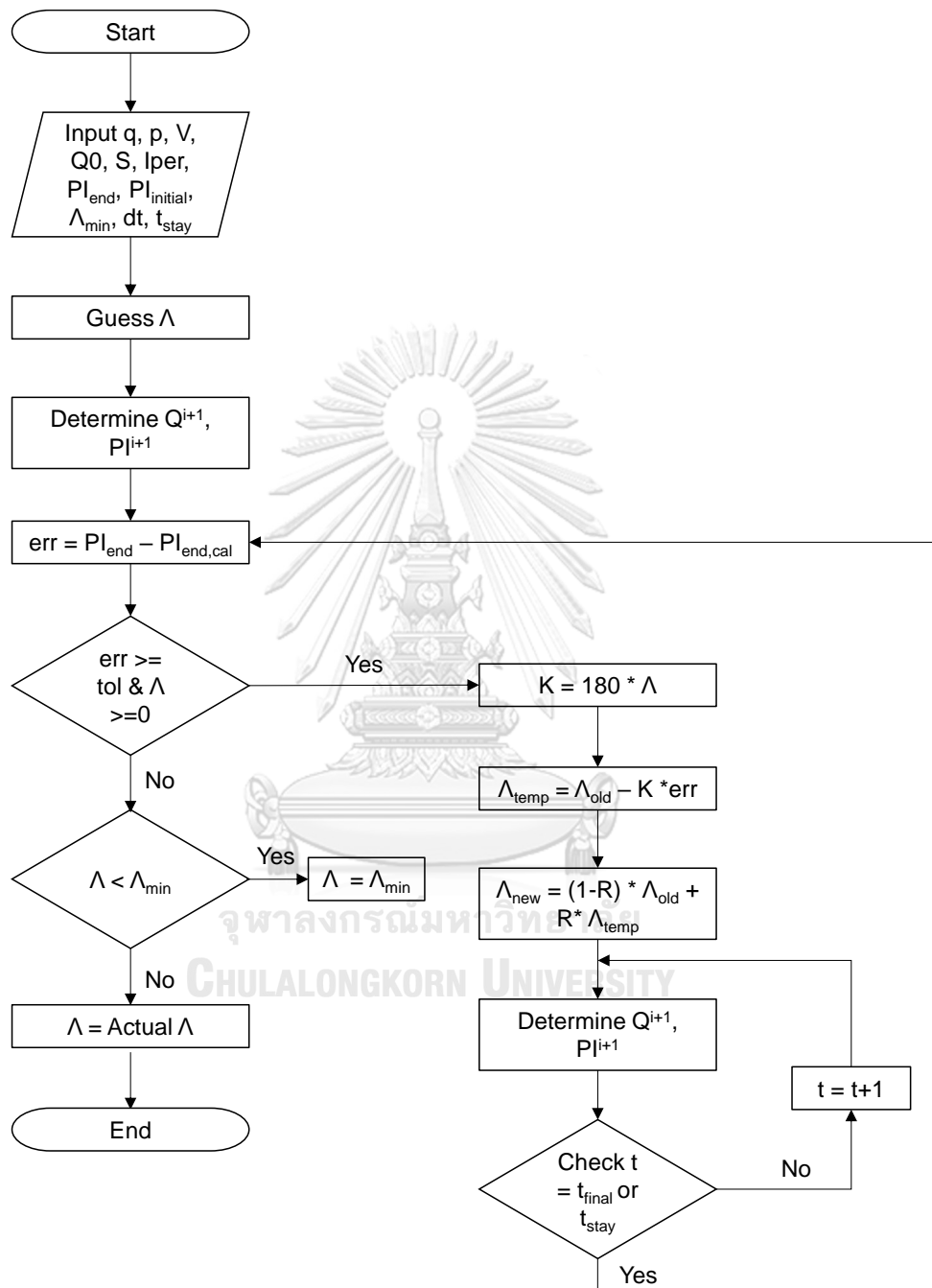
สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการปรับอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ หลังจากนั้นจึงอภิปรายผลของการปรับอัตราการระบายอากาศ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 สำหรับกรณีการทำนายอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่ และส่วนที่ 2 สำหรับกรณีการทำนายอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อทำนายค่าอัตราการระบายอากาศเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ระหว่าง 2 กรณีดังที่ได้กล่าวข้างต้น

### 6.1 กระบวนการปรับอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่

การปรับอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ทำได้โดยการใช้แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ ซึ่งสามารถกำหนดค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และกำหนดระยะเวลาการอยู่ในพื้นที่ของบุคคลได้ ทำให้ได้ค่าอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมกับพื้นที่ และค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของบุคคลที่เข้าออกพื้นที่ ณ เวลาต่าง ๆ

โปรแกรมเริ่มทำงานจากการรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น จำนวนคนในพื้นที่ ( $S$ ) อัตราการสร้างควอนตัมต่อชั่วโมงโดยผู้ติดเชื้อ ( $q$ ) อัตราการหายใจเข้าออกปกติ ( $p$ ) อัตราการระบายอากาศที่น้อยที่สุดตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ( $\Lambda_{\min}$ ) และค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ในแต่ละพื้นที่ ( $PI_{\text{end}}$ ) เมื่อทำการรับค่าตัวแปรเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะกำหนดค่าอัตราการระบายอากาศเริ่มต้นเพื่อใช้ในการหาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ ณ เวลาที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ว่ามีค่าเกินกว่ากำหนดหรือไม่ หากค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนด โปรแกรมจะเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำ (Iteration) ของการหาค่าอัตราการระบายอากาศ เพื่อหาค่าที่ไม่ทำให้ความเสี่ยงในการติดเชื้อเกินกว่าที่กำหนดไว้ ซึ่งอัตราการระบายอากาศที่ได้นั้นจะเป็นอัตราการระบายอากาศ ณ เวลานั้น ๆ ทำให้สามารถปรับอัตรา

การระบายอากาศในพื้นที่ต่าง ๆ ตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ได้ในสถานการณ์จริง ดังแสดง  
ในรูปที่ 6- 1



รูปที่ 6- 1 แผนภาพการหาอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของคนในพื้นที่

เงื่อนไขของโปรแกรมแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเพื่อหาอัตราการระบายอากาศ กำหนดให้จำนวนผู้ติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 2 ของจำนวนคนรวมในพื้นที่ ณ เวลานั้น ๆ ค่าความเสี่ยงใน

การติดเชื้อที่ยอมรับได้ให้มีค่าเท่ากับ 0.02 ระยะเวลาการอยู่ในพื้นที่ให้มีค่าเท่ากับ 180 นาที อัตราการสร้างควอนตาต่อชั่วโมงโดยผู้ติดเชื้อเท่ากับ 856.8 ต่อชั่วโมง อัตราการหายใจเข้าออกปกติเท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้กรณีศึกษาเดียวกันกับที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 ได้แก่ พื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์ และกรณีที่ทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัยและใส่หน้ากากอนามัย รวมทั้งหมด 6 กรณีศึกษา

การปรับค่าอัตราการระบายอากาศจะปรับค่าตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ โดยเปรียบเทียบระหว่างการปรับค่าอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่ และอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทั้งสองกรณีล้วนไม่ทำให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเกิน 0.02 ในเวลาที่อยู่ในพื้นที่ 180 นาที

## 6.2 ผลการทำนายอัตราการระบายอากาศ

โปรแกรมแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ สามารถคำนวณหาอัตราการระบายอากาศ โดยแบ่งออกได้เป็นกรณีความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่ และกรณีความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีผลการทำนายค่าอัตราการระบายอากาศดังนี้

### 6.2.1 การปรับอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่

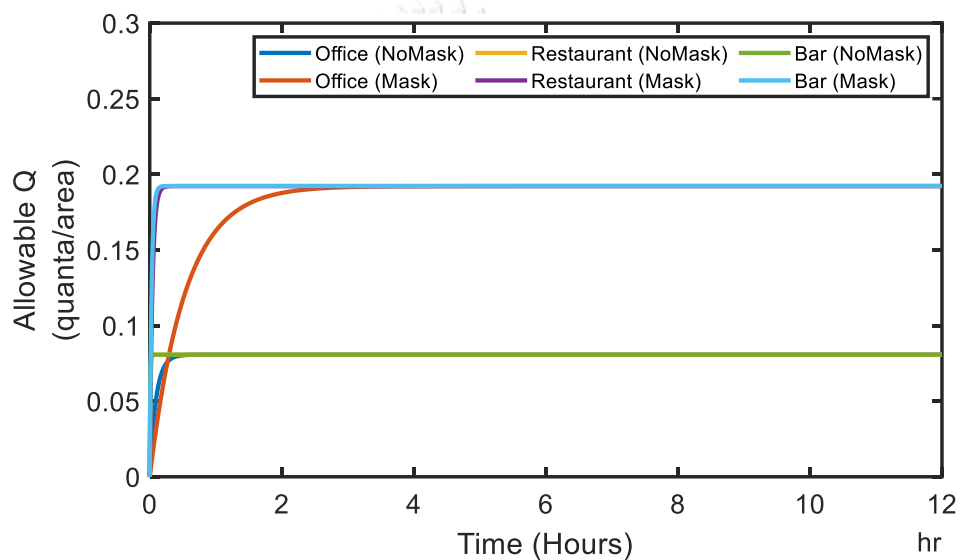
ในกรณีนี้กำหนดให้ค่าความหนาแน่นของคนในพื้นที่ตัวอย่างทั้งสามพื้นที่ ได้แก่ พื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ มีค่าคงที่เป็นไปตามตารางที่ 4 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 เพื่อทำนายอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีค่าไม่เกิน 0.02 ในเวลาที่อยู่ในพื้นที่เป็นเวลา 180 นาที

ตารางที่ 4 การกำหนดค่าความหนาแน่นของคนต่อพื้นที่ในแต่ละพื้นที่ตัวอย่าง

พื้นที่	ความหนาแน่นของคน (คน)	ขนาดพื้นที่ (ตารางเมตร)	ความหนาแน่นของคนต่อพื้นที่ (คน/ตารางเมตร)
สำนักงาน	50	1,000	0.05
ร้านอาหาร	35	50	0.70
บาร์	100	100	1.00

การกำหนดให้ทุกพื้นที่ที่มีค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีค่าไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีนั้น คือ การรักษาค่าควอนตัมในการติดเชื้อให้มีค่าที่เหมาะสมไม่เกินจากที่กำหนด ซึ่งค่าความเสี่ยงในการติดเชือนั้นเป็นฟังก์ชันของค่าควอนตัม ดังนั้นค่าควอนตัมในการติดเชื้อมีค่า

ของพื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ ทั้งในกรณีที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและใส่หน้ากากอนามัย จะส่งผลให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 6- 2 ในทุกกรณีค่าควอนตัมในพื้นที่ที่จะเริ่มต้นจาก 0 กล่าวคือ ไม่มีคนอยู่ในห้อง และเมื่อเวลาผ่านไปจะมีคนเข้าและออกตลอดเวลาในพื้นที่เป็นอัตราคงที่สูงสุด ซึ่งเมื่อพิจารณาเป็นค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่ พบว่า พื้นที่ที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยจะมีค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่ที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.081 ในขณะที่พื้นที่ที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัยจะมีค่าเท่ากับ 0.192 จะเห็นได้ว่า ค่าควอนตัมในการติดเชื้อที่ยอมรับได้เมื่อทุกคนในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัยจะมีแนวโน้มที่สูงกว่ากรณีทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัยสำหรับทุกกรณีศึกษา



รูปที่ 6- 2 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่ที่ยอมรับได้ของพื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ในกรณีความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่เมื่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที

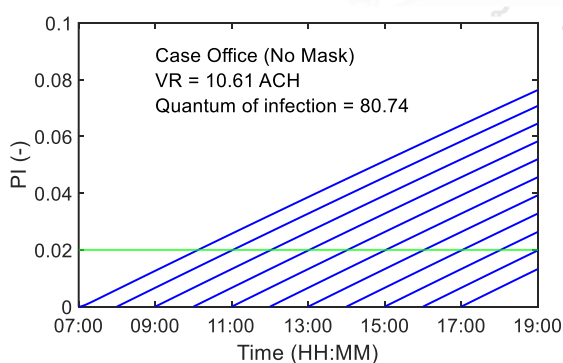
การใส่หน้ากากอนามัยทำให้ทุกคนในห้องสามารถรับค่าควอนตัมในการติดเชื้อได้เพิ่มขึ้นโดยที่ยังมีความเสี่ยงเท่าเดิม เนื่องจากอัตราการหายใจเข้าออกของผู้รับเชื้อ ( $p$ ) มีค่าน้อยลงจากค่าประสิทธิภาพการป้องกันเชื้อโรคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ และถึงแม้ว่าค่าควอนตัมในการติดเชื้อเพิ่มขึ้น แต่อัตราการสร้างควอนตาต่อชั่วโมงโดยผู้แพร่เชื้อ ( $q$ ) จะลดลงเนื่องมาจากการใส่หน้ากากอนามัยของผู้แพร่เชื้อเช่นกัน ดังนั้นอัตราการระบายอากาศเมื่อทุกคนในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัยทางการแพทย์จึงสามารถลดลงได้

ความหนาแน่นของบุคคลต่อพื้นที่ส่งผลต่อปริมาณการระบายอากาศโดยรวม ซึ่งเห็นได้ว่า บาร์เป็นพื้นที่ที่สามารถรองรับความหนาแน่นของคนได้สูงที่สุด ดังนั้นจึงต้องการอัตราการระบาย

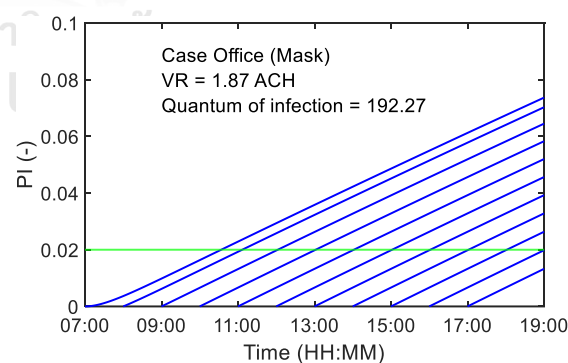
อากาศที่มากขึ้นตามเช่นกัน และเนื่องจากความหนาแน่นของบุคคลต่อพื้นที่ของร้านอาหารและบาร์มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่ทั้งในกรณีที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและทุกคนใส่หน้ากากอนามัยทั้งสองพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเข้าสู่พื้นที่ เนื่องจากมีความหนาแน่นของคนต่อพื้นที่ค่อนข้างสูงกว่าพื้นที่สำนักงานมาก

ค่าควอนตัมในการติดเชื้อที่ยอมรับได้เพื่อรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีนั้น ทำให้ได้อัตราการระบายอากาศจากแบบจำลองค่าความเสี่ยงซึ่งรักษาค่าต่าง ๆ ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ทุกคนไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัย พบว่า ในพื้นที่สำนักงานมีอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 10.61 และ 1.87 ACH ตามลำดับ พื้นที่ร้านอาหารจะมีอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 148.59 และ 26.21 ACH ตามลำดับ และพื้นที่บาร์จะมีอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 212.19 และ 37.43 ACH ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวเห็นได้ว่า อัตราการระบายตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ไม่เพียงพอต่อการรักษาความเสี่ยงในการติดเชื้อให้ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที

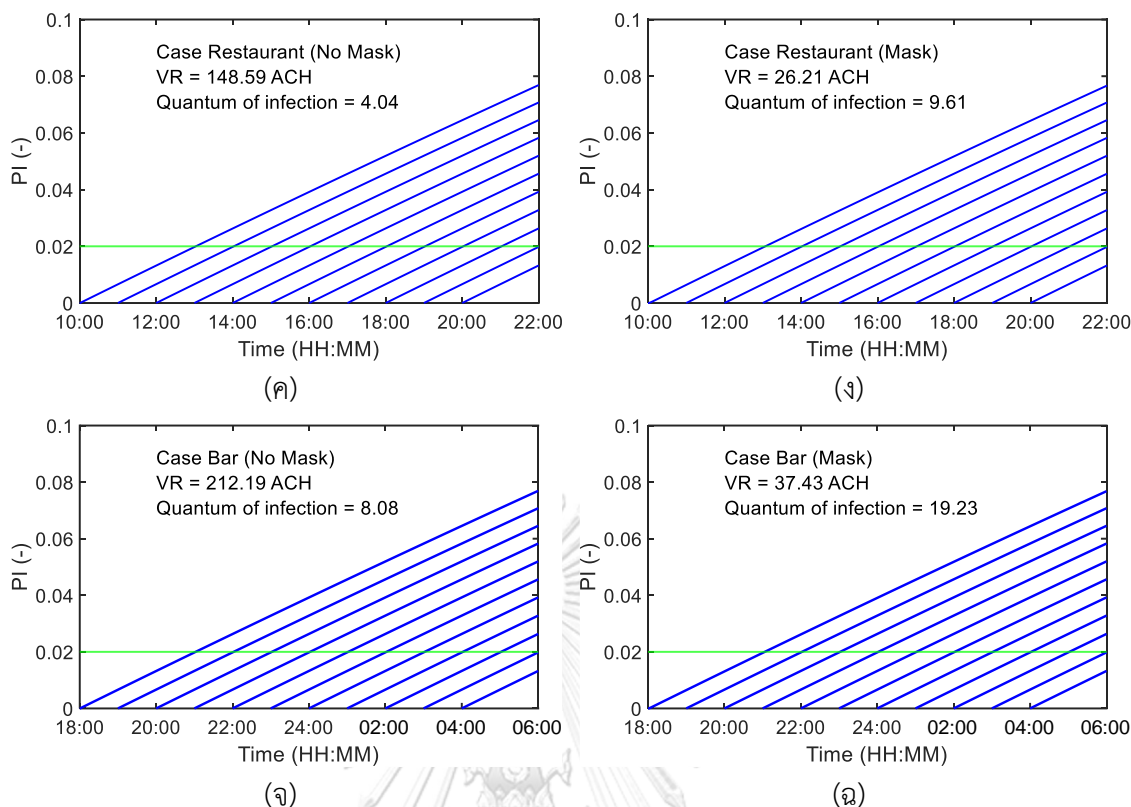
ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากโปรแกรมแบบจำลอง สามารถแสดงค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนที่เข้าสู่พื้นที่ได้ทุก ๆ 1 ชั่วโมงดังรูปที่ 6-3 ในช่วงเวลา 180 นาทีแรกจะมีค่าความเสี่ยงไม่เกิน 0.02 ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ หากคนในพื้นที่อยู่เกินกว่าเวลาที่กำหนด ความเสี่ยงในการติดเชื้อจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากแบบจำลองยังสามารถแสดงค่าความเสี่ยงของคนที่เข้าห้องในเวลาต่าง ๆ จะทราบค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของตนเองตามระยะเวลาที่เข้าสู่พื้นที่ ณ เวลาที่เข้ามาในพื้นที่ได้



(ก)



(ข)



รูปที่ 6- 3 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่เปลี่ยนแปลงตามเวลากรณีความหนาแน่นของคนในพื้นที่คงที่ เมื่อค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที โดย (ก) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ข) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ค) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (ง) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (จ) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ และ (ฉ) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในบาร์

#### 6.2.2 การปรับอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่เปลี่ยนแปลง

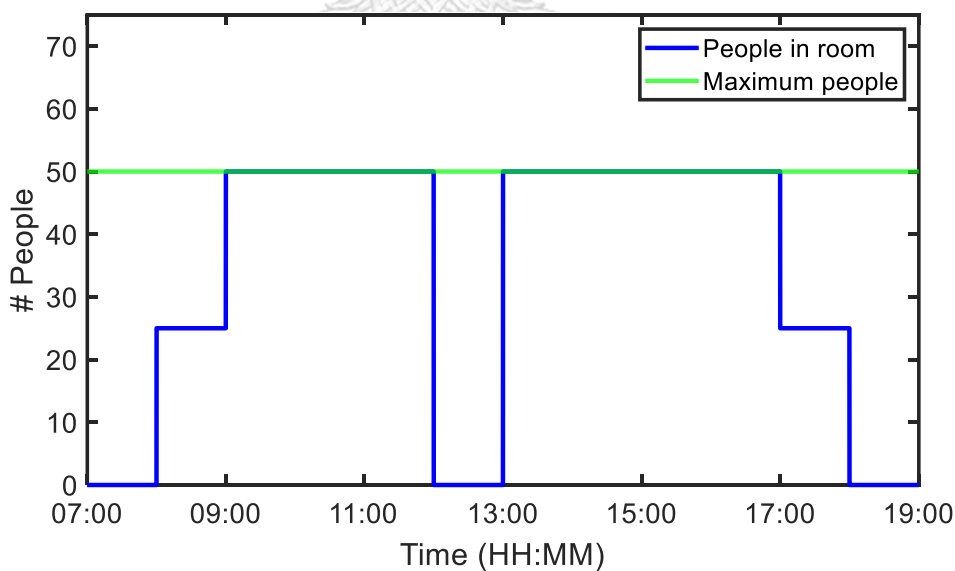
ในสถานการณ์จริงพื้นที่อาคารสำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ต่าง ๆ มักมีคนเข้าออกในพื้นที่ ทำให้ความหนาแน่นของคนมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อค่าควอนตัมในการติดเชื้อในพื้นที่ให้มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน อีกทั้งการเข้าออกของคนในพื้นที่ในเวลาที่แตกต่างกัน ทำให้บุคคลมีค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อแตกต่างกัน เนื่องมาจากระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่ และความเข้มข้นของเชื้อโรค ณ เวลานั้น ดังนั้นเมื่ออาศัยอยู่ในพื้นที่ต่าง ๆ เป็นระยะเวลานานอาจทำให้ความเสี่ยงในการติดเชื้อของบุคคลนั้นมีค่าสูงขึ้น และเสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคซึ่งแพร่กระจายทางอากาศมากยิ่งขึ้น

ในกรณีนี้จึงได้กำหนดให้คนในพื้นที่มีค่าไม่คงที่ สามารถเข้าออกพื้นที่ได้ และเปลี่ยนแปลงตามเวลาในพื้นที่ตัวอย่าง ได้แก่ สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ มีค่าจำนวนคนสูงสุดในพื้นที่แสดงในตารางที่ 4 การกำหนดค่าจำนวนคนที่เข้าและออกพื้นที่นี้สามารถใช้เป็นกรอบในการรับค่าจำนวนคนเข้าสู่โปรแกรมแบบจำลองโดยประยุกต์การรับค่าจากกล้องวงจรปิด ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ และเป็น

แนวทางในการวิเคราะห์อัตราภาระบายอากาศเพื่อรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่เหมาะสมพื้นที่สำนักงานมักมีการมีลักษณะการอยู่ในห้องเป็นช่วงเวลา โดยกำหนดให้มีคนเต็มพื้นที่ 50 คนใน 2 ช่วง คือ ช่วงเวลาเริ่มต้นทำงานจนถึงเวลาก่อนพักกลางวัน และช่วงเวลาหลังพักกลางวันจนถึงเวลาเลิกงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ช่วงเวลาดังกล่าวคือ ตั้งแต่ช่วง 9.00 – 12.00 น. และ 13.00 – 17.00 น. ตามลำดับ ส่วนช่วงพักกลางวันนั้นเป็นเวลา 12.00 – 13.00 น. เป็นช่วงที่ไม่มีคนอยู่ในพื้นที่ และในช่วงเวลา 8.00 – 9.00 น. และ 17.00 – 18.00 น. มีจำนวนคนเพียงครั้งเดียวของจำนวนคนสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 6- 4 (ก)

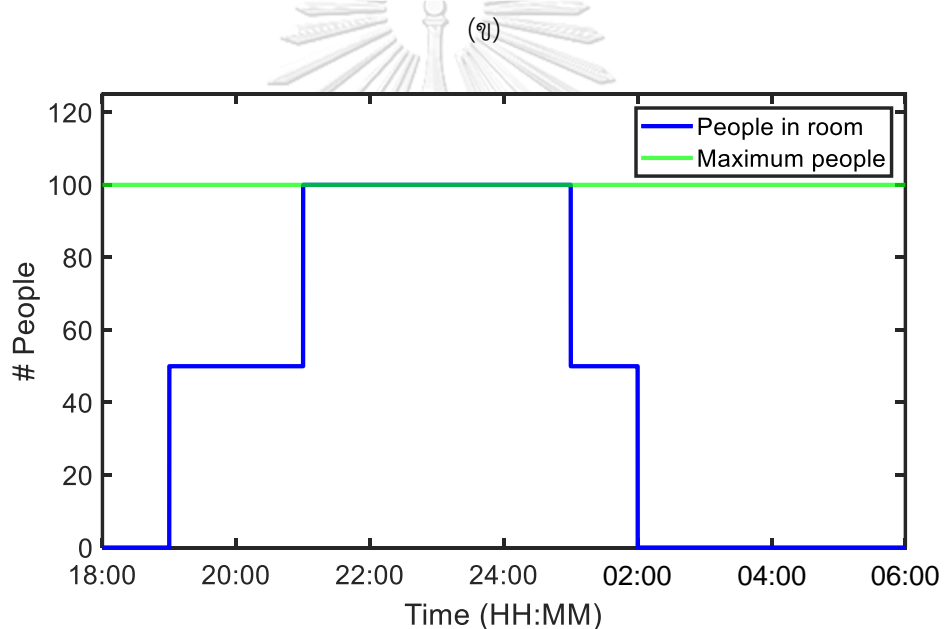
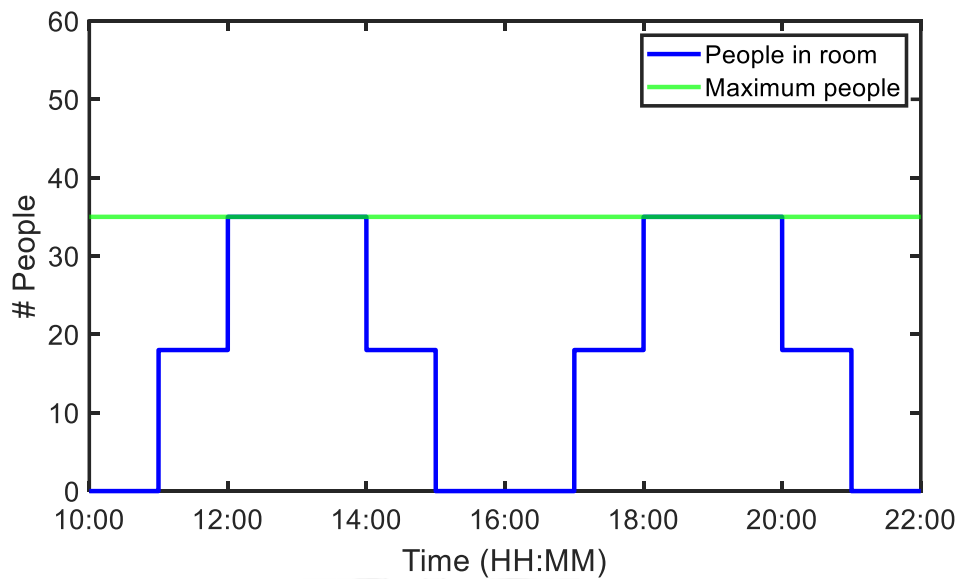
ในขณะที่พื้นที่ร้านอาหารให้เริ่มต้นเปิดร้านให้ช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ซึ่งพฤติกรรมกรเข้าใช้บริการของคนในพื้นที่ร้านอาหารจะมีความหนาแน่นเต็มพื้นที่ 35 คน ในช่วงมือกลางวันตั้งแต่เวลา 12.00 – 14.00 น. และเวลา 18.00 – 20.00 น. และจำนวนคน 18 คน ในช่วงเวลา 11.00 – 12.00 น., 14.00 – 15.00 น., 17.00 – 18.00 น. และ 20.00 – 21.00 น. นอกจากนี้ในช่วงเวลา 15.00 – 17.00 น. จะไม่มีคนอยู่ในห้องดังแสดงในรูปที่ 6- 4 (ข)

พื้นที่บาร์กำหนดให้เปิดบริการตั้งแต่ช่วงเวลา 18.00 – 02.00 น. ซึ่งเริ่มมีผู้มาใช้บริการเริ่มต้นในช่วง 19.00 น. เป็นต้นไป ความหนาแน่นของคนสูงสุดไม่เกิน 100 คนโดยมีคนเต็มพื้นที่ในช่วงเวลา 21.00 – 01.00 น. และจำนวนคนเป็นครึ่งหนึ่งในช่วงเวลา 19.00 – 21.00 น. และ 01.00 – 02.00 น. แสดงดังรูปที่ 6- 4 (ค)



(ก)

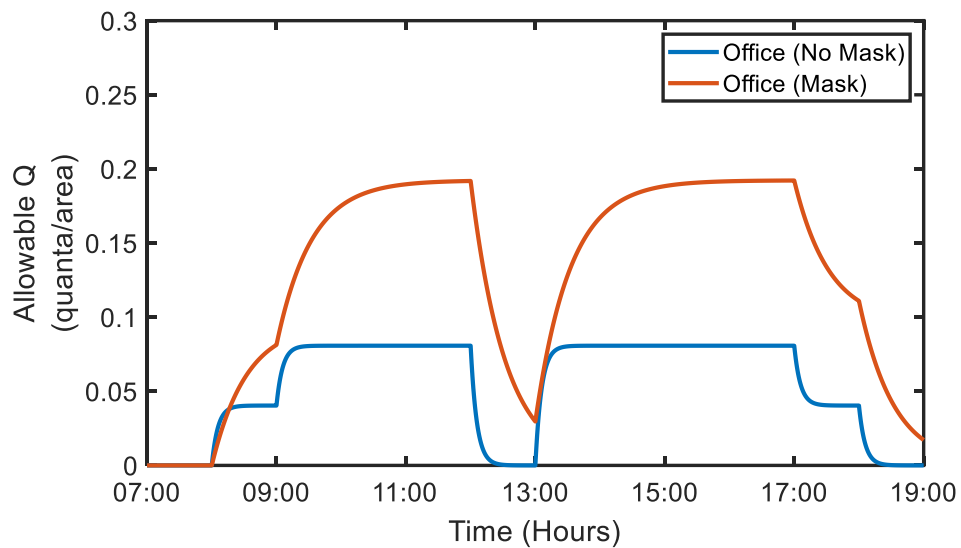




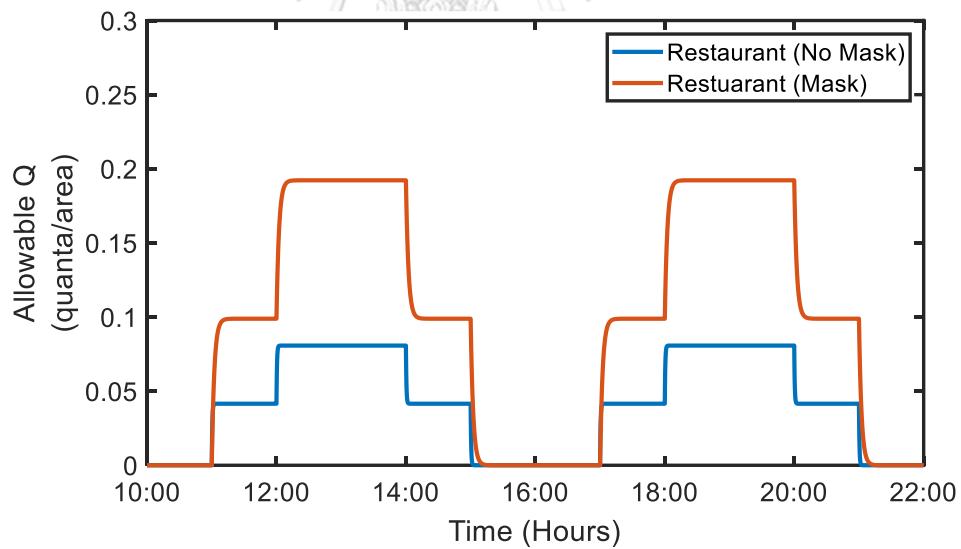
รูปที่ 6- 4 การกำหนดจำนวนคนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์

การที่ใช้อัตราการระบายอากาศซึ่งสามารถรักษาค่าความเสี่ยงในพื้นที่ให้มีค่าต่ำกว่า 0.02 สำหรับคนเต็มพื้นที่ กล่าวคือ ในกรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัย และใส่หน้ากากอนามัย พื้นที่สำนักงานมีค่าเท่ากับ 10.61 และ 1.87 ACH ตามลำดับ พื้นที่ร้านอาหารมีค่าเท่ากับ 148.59 และ 26.21 ACH ตามลำดับ และพื้นที่บาร์มีค่าเท่ากับ 212.19 และ 37.43 ACH ตามลำดับ ในพื้นที่ที่มีบุคคลเข้าออก ความหนาแน่นไม่คงที่นั้น จะส่งผลให้ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่มีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป

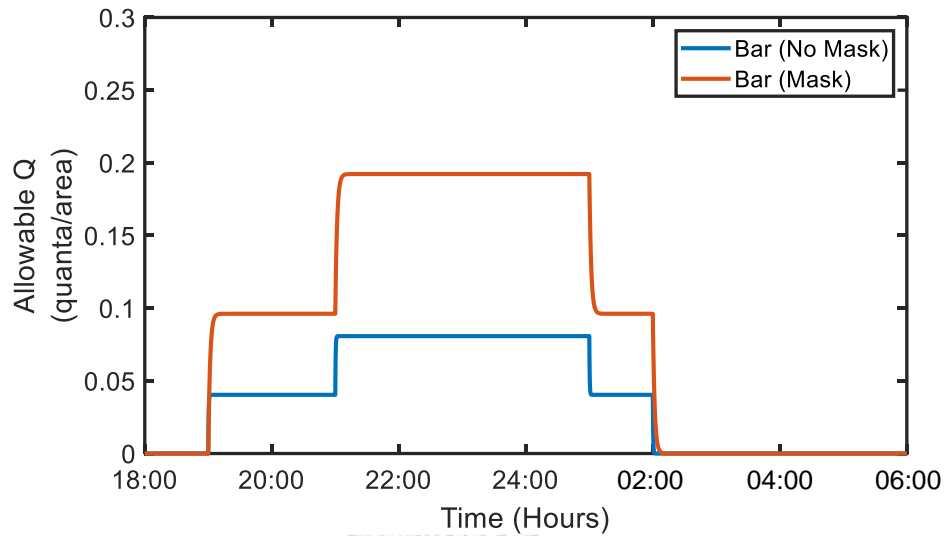
แสดงดังรูปที่ 6- 5 ซึ่งมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามพฤติกรรมการเข้าออกของบุคคล โดยเมื่อทุกคนในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัยจะมีค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อพื้นที่ที่ยอมรับได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.081 และกรณีที่ใส่หน้ากากอนามัยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.192 เช่นเดียวกันกับกรณีความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่คงที่



(ก)



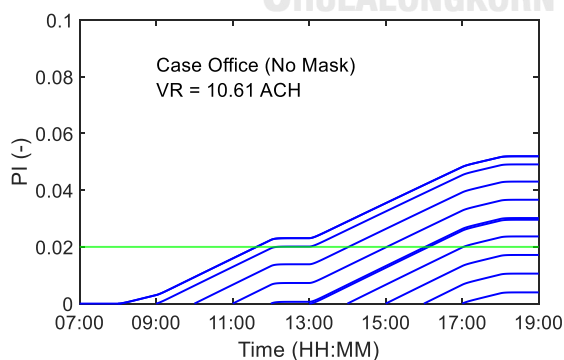
(ข)



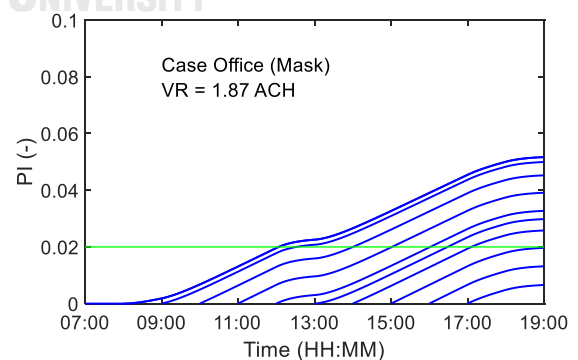
(ค)

รูปที่ 6- 5 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่เมื่อความหนาแน่นของคนเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์

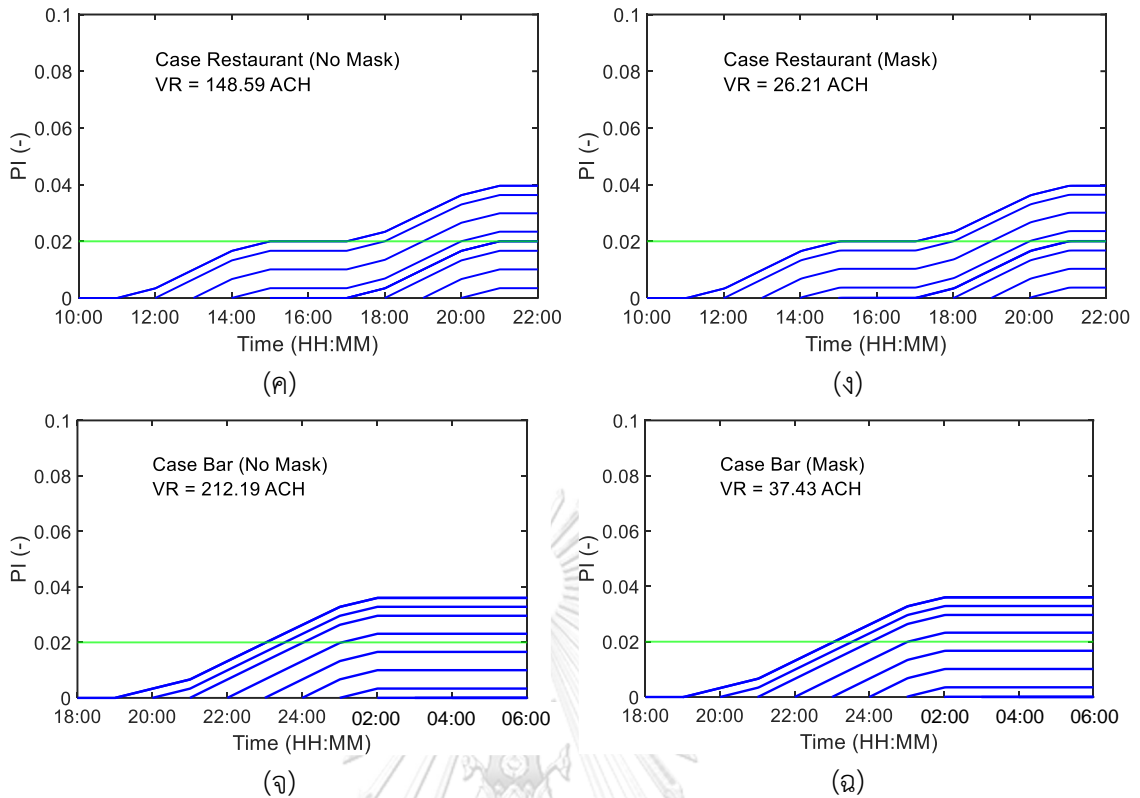
การนำอัตราการระบายอากาศซึ่งสามารถรักษาค่าความเสี่ยงในพื้นที่ให้มีค่าต่ำกว่า 0.02 สำหรับคนเต็มพื้นที่มาใช้ในกรณีความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ไม่คงที่นั้น ส่งผลให้คนอยู่ในพื้นที่ได้เป็นเวลานานกว่า 180 นาที โดยที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.02 ดังรูปที่ 6- 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อัตราการระบายอากาศสำหรับคนเต็มพื้นที่ตลอดเวลาอาจมีค่าสูงเกินความต้องการที่จะรักษาความเสี่ยงให้ต่ำกว่า 0.02 ในเวลา 180 นาที



(ก)



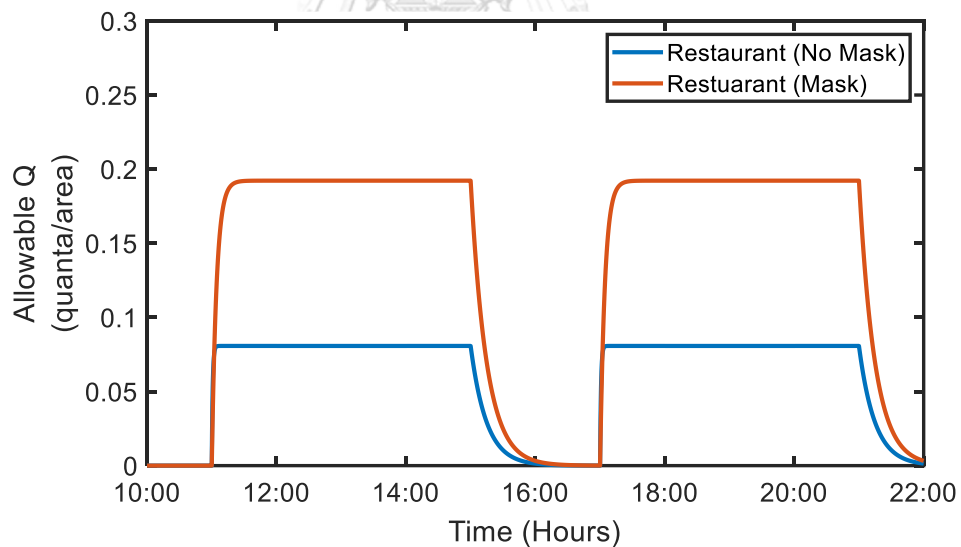
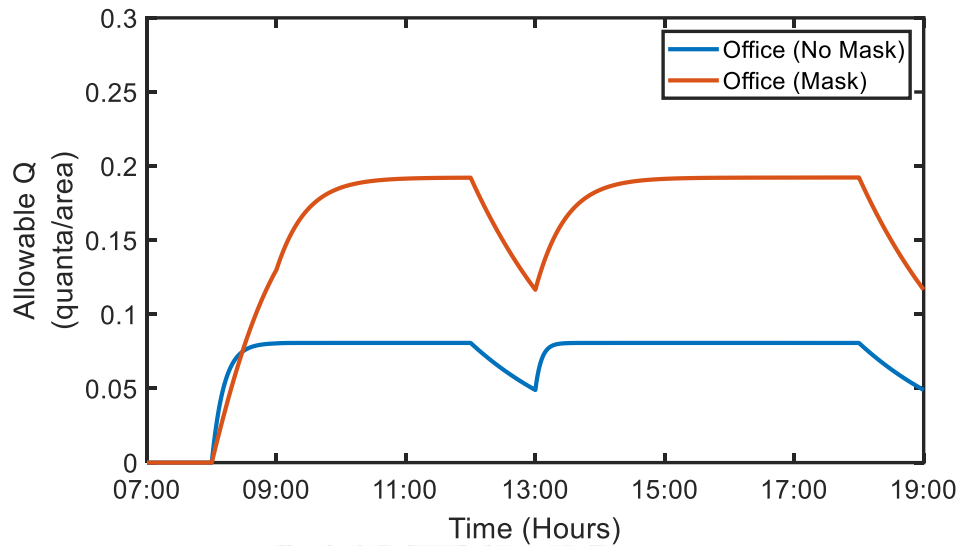
(ข)



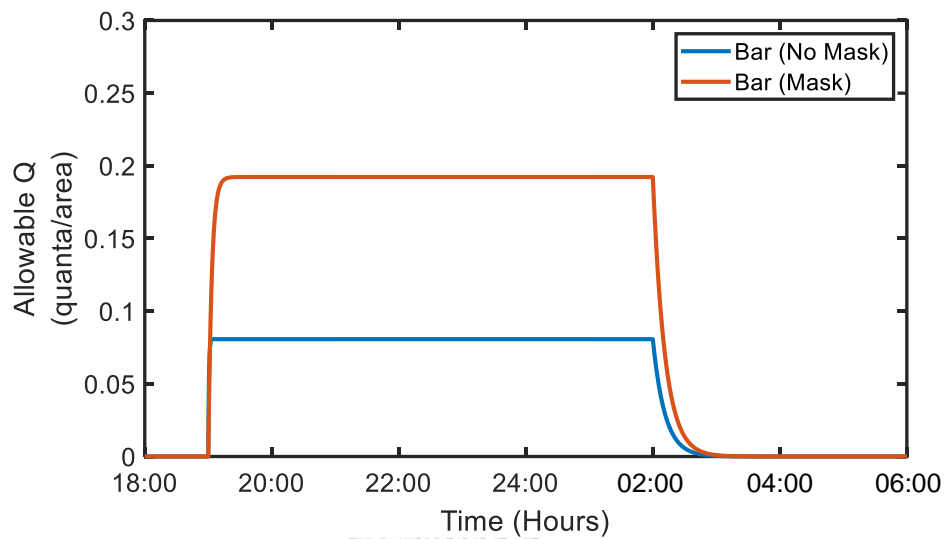
รูปที่ 6- 6 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่เมื่อความหนาแน่นของคนเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที เมื่อ (ก) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ข) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ค) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (ง) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (จ) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ และ (ฉ) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในบาร์

ดังนั้นการปรับอัตราการระบายอากาศให้มีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ จึงมีความสำคัญในการลดการใช้พลังงานที่เกิดจากการระบายอากาศซึ่งสิ้นเปลืองเกินความจำเป็นลง ดังนั้นจึงได้มีการใช้โปรแกรมแบบจำลองทำนายค่าอัตราการระบายอากาศ โดยให้มีความเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่โดยอยู่ในพื้นที่เป็นเวลา 180 นาที และค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 0.02 กำหนดให้ทุกพื้นที่ตัวอย่างมีค่าอัตราการระบายอากาศต่ำสุดตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 พื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์มีค่าเท่ากับ 0.50, 4.10 และ 5.30 ACH ตามลำดับ การกำหนดนี้ส่งผลต่อค่าควอนตัมในการติดเชื้อที่พื้นที่สามารถรับได้ ทำให้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าสูงสุด โดยค่าต่อตารางเมตรของทั้งสามพื้นที่ที่มีค่าสูงที่สุดสำหรับกรณีทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและไม่ใส่หน้ากากอนามัยเมื่อจำนวนคนเต็มพื้นที่ มีค่าเท่ากับ 0.081 และ 0.192 ตามลำดับ และค่าควอนตัมในการติดเชื้อจะลดลงในช่วงที่คนทั้งหมดออก

จากพื้นที่ โดยจะลดลงไม่เท่ากับ 0 เนื่องจากอัตราการระบายอากาศมีค่าที่จำกัดไว้ตามมาตรฐานของอาคารในช่วงเวลาที่ไม่มีคนในห้อง เป็นการรักษาควอนตัมในการติดเชื้อให้มีค่าน้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการทำให้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.02 ในช่วง 180 นาทีดังรูปที่ 6-7



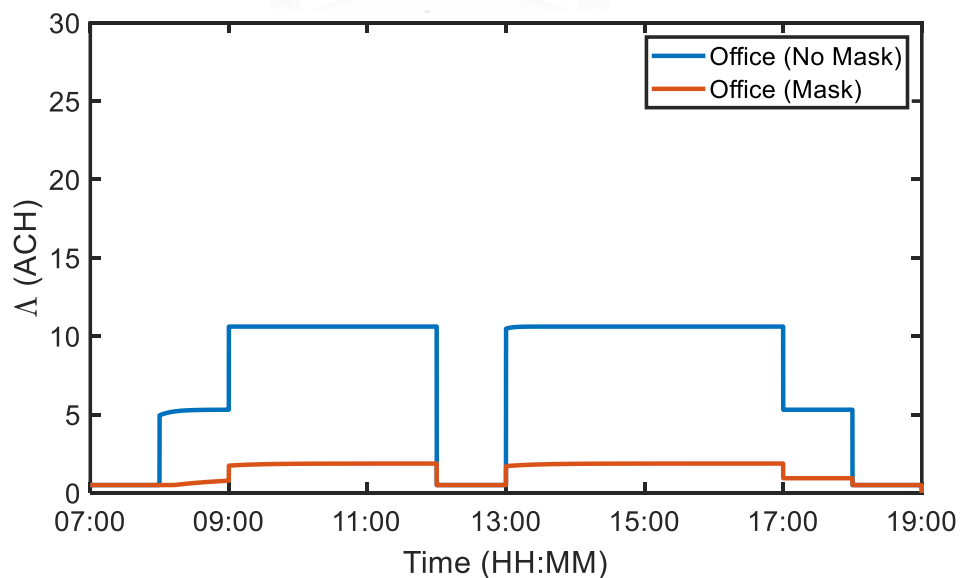
(ข)



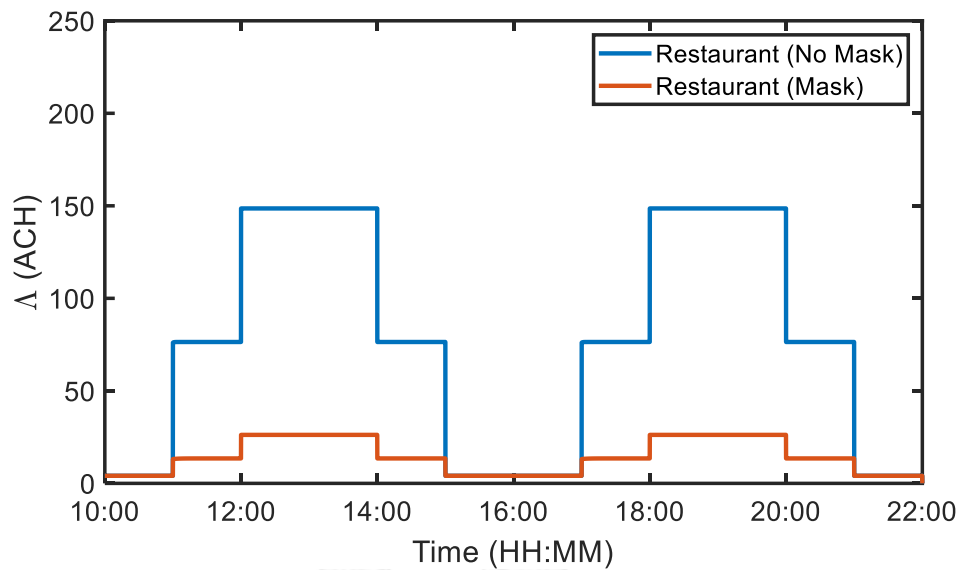
(ค)

รูปที่ 6- 7 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์

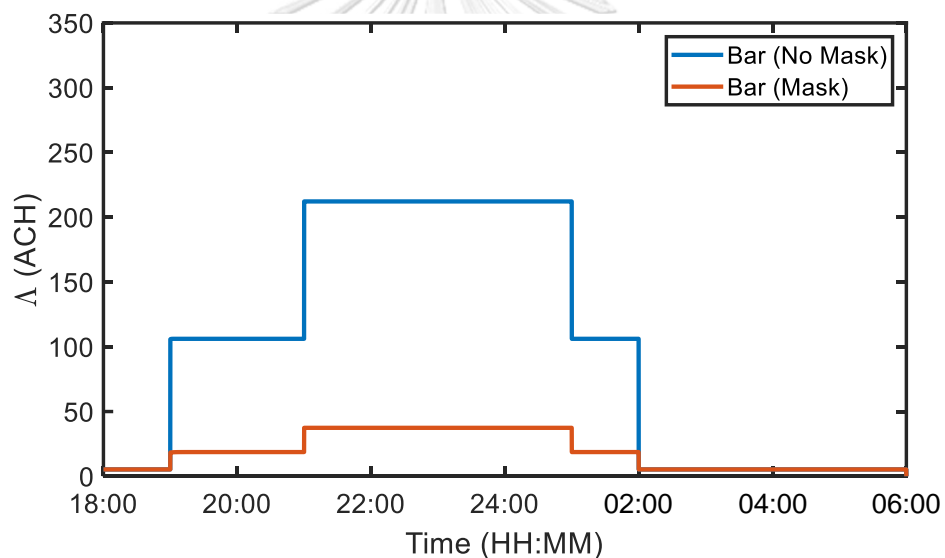
การกำหนดค่าอัตราการระบายอากาศต่ำสุดให้มีค่าเท่ากับค่ามาตรฐานของ ASHRAE 62.1 และปรับอัตราการระบายอากาศตามจำนวนคนที่เข้าและออกพื้นที่ดังรูปที่ 6- 4 อัตราการระบายอากาศที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมแบบจำลองจะมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามช่วงความหนาแน่นของบุคคลภายในพื้นที่แสดงดังรูปที่ 6- 8



(ก)



(ข)

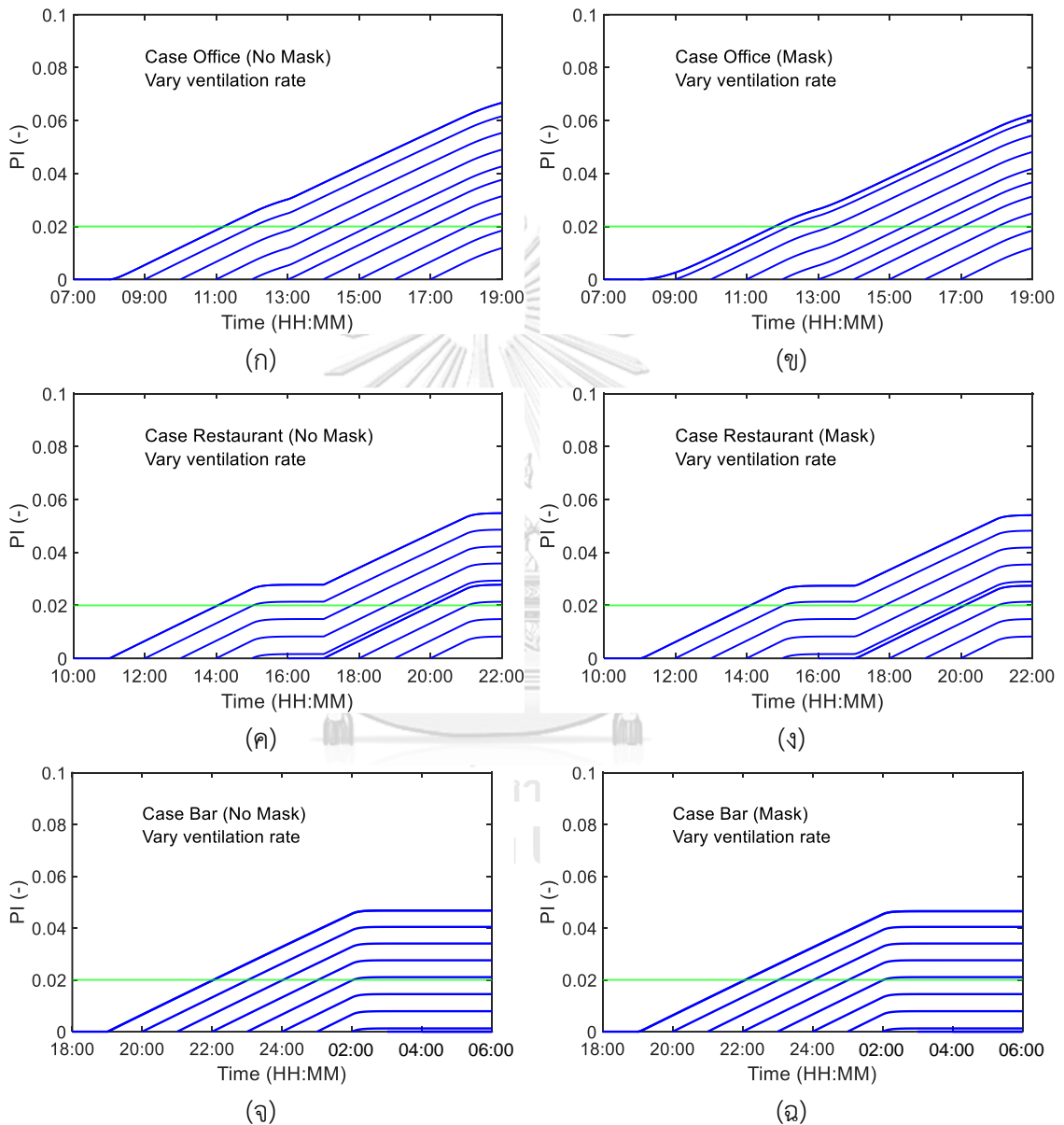


(ค)

รูปที่ 6- 8 อัตราการระบายอากาศกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที ของพื้นที่ (ก) สำนักงาน (ข) ร้านอาหาร และ (ค) บาร์

ผลการทำนายอัตราการระบายอากาศกรณีที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัยจะได้อัตราการระบายอากาศที่ต่ำกว่ากรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยทั้งในพื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ โดยอัตราการระบายอากาศสูงสุดในพื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์กรณีทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยเท่ากับ 10.61, 148.59 และ 212.19 ACH ตามลำดับ และในกรณีทุกคนใส่หน้ากากอนามัยเท่ากับ 1.87, 26.21

และ 37.43 ACH ตามลำดับ และจากการปรับค่าอัตราการระบายอากาศให้เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาแน่นของคนในพื้นที่ จะได้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อแสดงดังรูปที่ 6- 9 เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดให้คนที่เข้าสู่พื้นที่สามารถอยู่ในพื้นที่ได้ 180 นาทีโดยที่ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.02



รูปที่ 6- 9 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที โดย (ก) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ข) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในสำนักงาน (ค) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (ง) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในร้านอาหาร (จ) กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยในบาร์ และ (ฉ) กรณีใส่หน้ากากอนามัยในบาร์



อัตราการระบายอากาศที่ได้ในกรณีเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่นั้น เหมาะสมกับระบบในอาคารที่สามารถปรับอัตราการระบายอากาศได้ โดยมีแนวคิดเพื่อก่อให้เกิดผล ประหยัดทางด้านพลังงาน เนื่องจากไม่ต้องรักษาอัตราการระบายอากาศให้มีค่าสูงสุดตลอดเวลา ซึ่ง ค่าพลังงานไฟฟ้าจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 6.3 การเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ระหว่างกรณีอัตราการระบายอากาศเมื่อความ หนาแน่นของบุคคลคงที่และความหนาแน่นของบุคคลที่เปลี่ยนแปลงไป

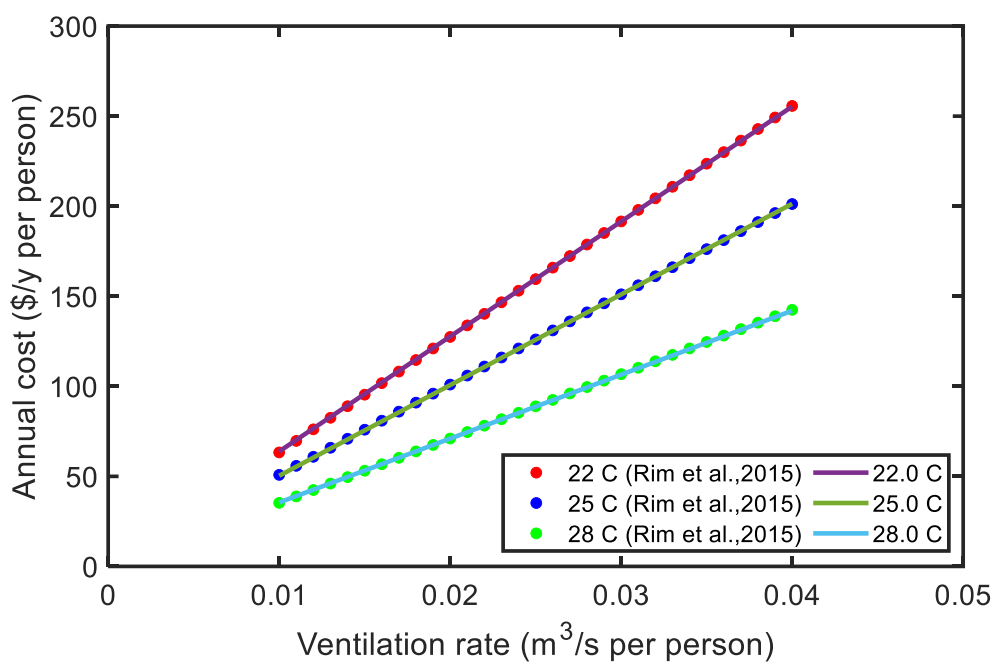
อัตราการระบายอากาศที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง ทั้งในกรณีอัตราการระบาย อากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลคงที่สูงสุด และกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตาม ความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ของสำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ซึ่งได้จากหัวข้อก่อนหน้านี้ สามารถนำมาเปรียบเทียบหาค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อประเมินค่าใช้จ่ายจากการ ปรับอัตราการระบายอากาศตามการทำนาย และเป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีการปรับอัตราการ ระบายอากาศ

กระบวนการหาค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าเริ่มต้นจากการกำหนดค่าตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอก อุณหภูมิภายในสำหรับระบบปรับอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง เวลาในการทำงานของระบบ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย และอัตราการระบาย อากาศที่ได้จากการทำนายในแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ จากนั้นใช้สมการที่ 11 ถึง สมการที่ 17 ในบทที่ 3 ในการคำนวณหาค่าพลังงานรวมซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Rim [38] ผู้วิจัย ได้ทำการสอบเทียบผลของโปรแกรมหาค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้ากับผลการวิจัยของ Rim และหา ความคลาดเคลื่อนของผล จากนั้นจึงทำการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้ โดยรายละเอียด ของผลการสอบเทียบ และผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้ามีดังนี้

#### 6.3.1 ผลการสอบเทียบแบบจำลองคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า

การสอบเทียบแบบจำลองคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า ทำได้โดยเทียบกับผลการทำนายค่าไฟฟ้า จากในงานวิจัยของ Rim [38] โดย Rim ได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศภายใน กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 22, 25 และ 28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (COP) มีค่าเท่ากับ 4 และค่าไฟฟ้าต่อหน่วยคิดเป็น 0.21 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สภาพอากาศภายนอกได้จากฐานข้อมูล IWEC ของประเทศสิงคโปร์ เพื่อ เป็นการจำลองสภาพของประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น จากนั้นทำการหาค่าพลังงานรวมโดยใช้สมการที่ 11 ถึงสมการที่ 17 ในบทที่ 3

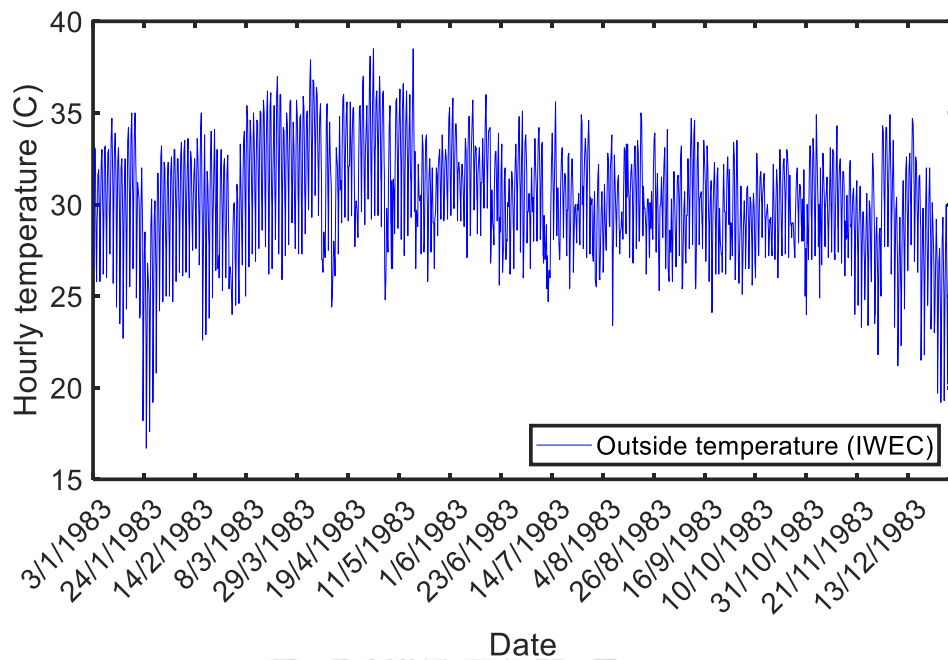
ผลการสอบเทียบค่าไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 6- 10 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดมีค่าคลาดเคลื่อนเพียง 0.97 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองนี้ในการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่สูงสุดและกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์



รูปที่ 6- 10 การสอบเทียบค่าไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า

### 6.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ตัวแปรต่าง ๆ มีค่าดังนี้ อุณหภูมิภายในพื้นที่มีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องมีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการทำงานของระบบเท่ากับ 12 ชั่วโมงต่อวัน และ 260 วันต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (COP) มีค่าเท่ากับ 4 และค่าไฟฟ้าต่อหน่วยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 4 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศภายนอกจากฐานข้อมูล IVEC ของประเทศไทยดังรูปที่ 6- 11 เพื่อเป็นการจำลองระบบปรับอากาศในประเทศไทย เมื่อมีอัตราการระบายอากาศที่ทำนายได้จากอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลคงที่สูงสุด และกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่

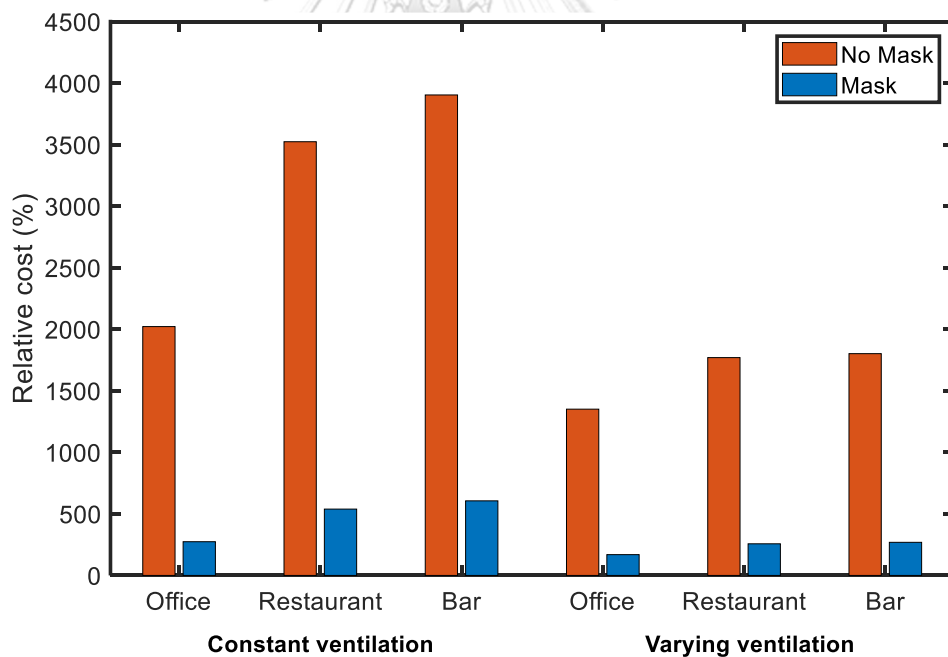
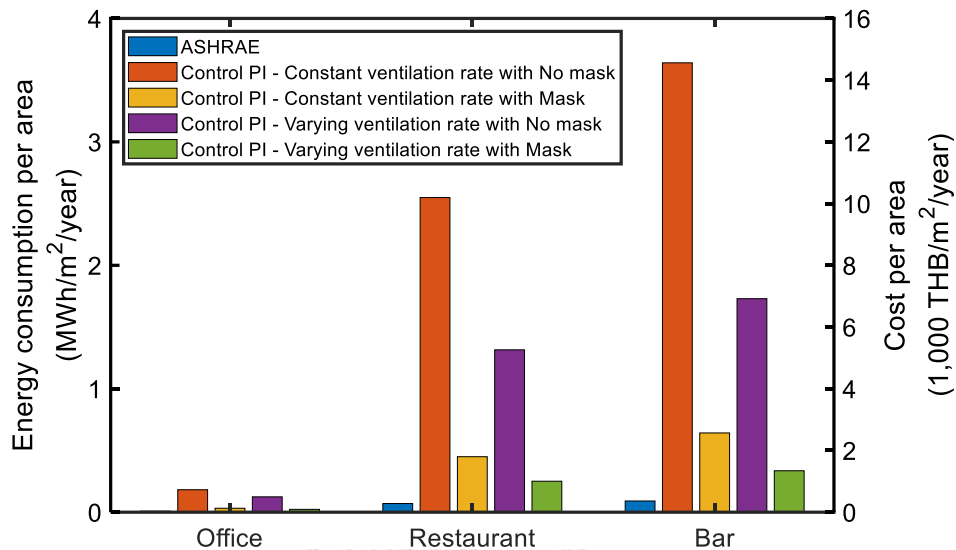


รูปที่ 6- 11 สภาพอากาศภายนอกจากฐานข้อมูล IWEC ของประเทศไทย

การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีและค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีของกรณีอัตราการระบายอากาศเป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 กรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่ตามจำนวนคนสูงสุด และและกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ เพื่อรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้มีค่าไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที เป็นไปดังรูปที่ 6-12 (ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีเนื่องมาจากอัตราการระบายอากาศที่ได้จากการทำนายนั้นมีค่าสูงกว่ากรณีอัตราการระบายอากาศเป็นไปตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 ในทุกกรณี โดยกรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่สูงสุดจะทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีมีค่าสูงที่สุดในทุก ๆ พื้นที่เมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ และการใส่หน้ากากอนามัยจะส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าน้อยลง อันเป็นผลมาจากค่าควอนตัมในการติดเชื้อที่ปล่อยออกจากบุคคลในพื้นที่เมื่อใส่หน้ากากอนามัยจะมีค่าน้อยกว่าการไม่ใส่หน้ากากอนามัย

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศที่ได้จากการทำนายทั้งสองกรณีกับกรณีอัตราการระบายอากาศซึ่งตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 แสดงดังรูปที่ 6- 12 (ข) พบว่า เปอร์เซนต์ค่าไฟฟ้าทุกกรณีมีค่าสูงกว่ากรณีเป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 มาก แต่เมื่อพิจารณาในกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่ จะพบว่า มีค่าน้อยกว่ากรณีอัตราการระบายอากาศมีค่าคงที่สูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใส่หน้ากากอนามัยจะทำให้ค่าเปอร์เซนต์เปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้าของกรณีเป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 มีค่าน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การที่พื้นที่สามารถปรับอัตราการระบายอากาศตามการเข้าออกพื้นที่ของบุคคลจะทำให้

เกิดผลประหยัดด้านพลังงานเกิดขึ้น และยังสามารถรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อในพื้นที่ให้มีค่าไม่เกินที่กำหนดได้อีกด้วย



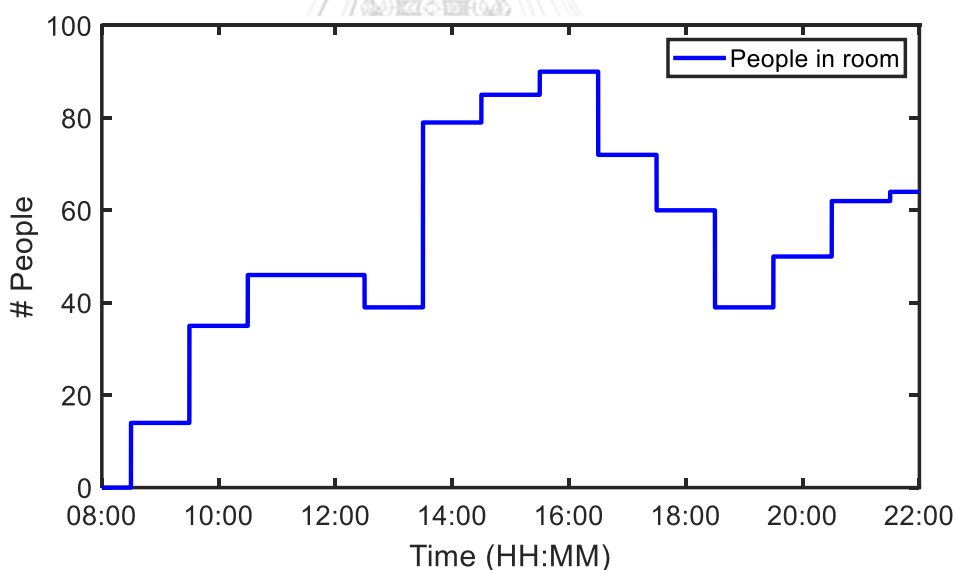
(ข)

รูปที่ 6- 12 ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อปีจากการทำนายอัตราการระบายอากาศทั้งกรณีไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัยเพื่อให้ได้ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที โดย (ก) ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีของกรณีระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 กรณีความหนาแน่นของคนคงที่และเปลี่ยนแปลงตามเวลา และ (ข) เปรอ์เซ็นต์ค่าไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกรณีระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1

## 6.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกับค่าจำนวนคนจากพื้นที่จริง

แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่พัฒนาขึ้นนี้ คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าควอนตัมในการติดเชื้อตามเวลา จึงสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับพื้นที่จริงนั้นอาจมีการเข้าออกของบุคคลในระหว่างช่วงเวลาค่อนข้างไวได้ ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อร่วมกับการรับค่าจำนวนคนจากการประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิด สำหรับทำนายอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสม ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้มีค่าไม่เกิน 0.02 ในช่วงเวลา 180 นาที

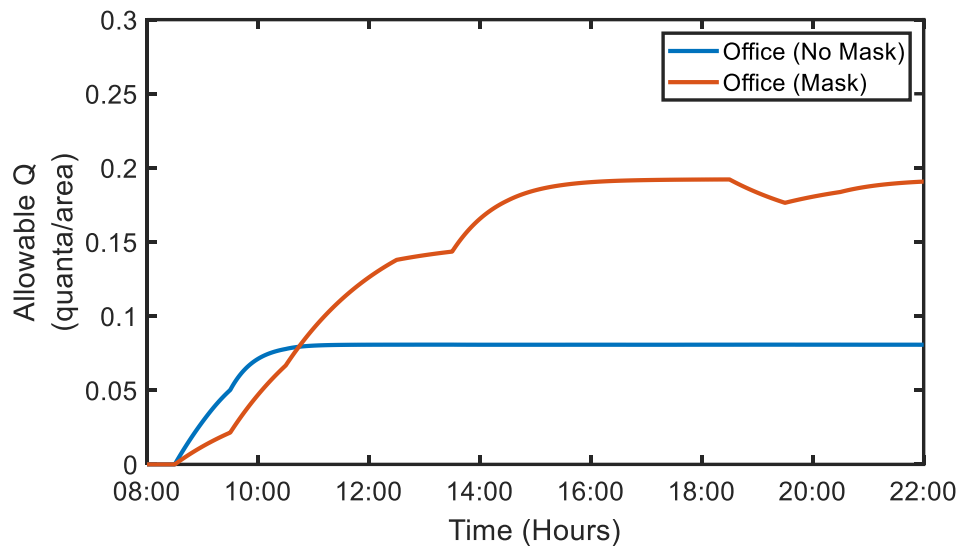
จำนวนคนจากพื้นที่จริงที่ใช้ในการจำลองนี้ อ้างอิงค่าจากงานวิจัยของ Wang และคณะ [45] ซึ่งได้ทำการลงสำรวจจำนวนคนที่เข้าใช้พื้นที่โดยตรง ร่วมกับการใช้อินฟราเรด (Infra-red counters) ในพื้นที่สำนักงานของมหาวิทยาลัยเทียนจิน ประเทศจีน เพื่อเสนอแนวทางในการคำนวณและปรับปรุงระบบความเย็นในการออกแบบอาคาร โดยจำนวนคนที่ได้จากการสำรวจพื้นที่แสดงดังรูปที่ 6- 13



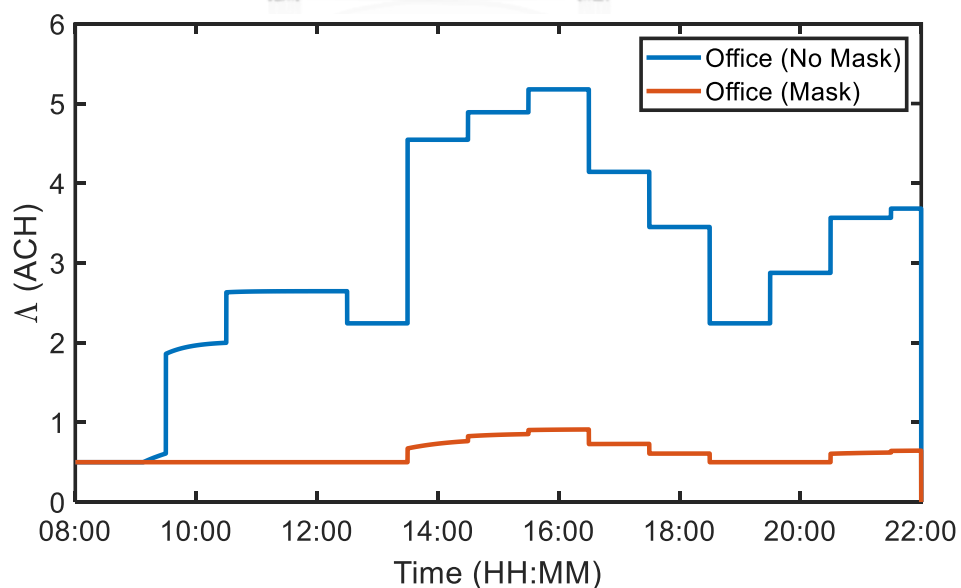
รูปที่ 6- 13 จำนวนคนที่มีการเข้าออกพื้นที่สำนักงานในมหาวิทยาลัยเทียนจิน

ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรสูงสุดของพื้นที่สำนักงานจริงที่ยอมรับได้ เพื่อใช้ในการรักษาความเสี่ยงในการติดเชื้อให้มีค่าไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที ในกรณีที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัย และกรณีที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัย มีค่าเท่ากับ 0.081 และ 0.192 ตามลำดับ โดยมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 6- 14 มีลักษณะเช่นเดียวกันกับความหนาแน่นของคน โดยค่าอัตราการ

ระบายอากาศต่ำสุดกำหนดให้มีค่าตาม ASHRAE 62.1 เท่ากับ 0.5 ACH จะเห็นได้ว่า การปรับค่าอัตราการระบายอากาศให้มีค่าต่ำสุดตามมาตรฐานนั้นไม่เพียงพอต่อการรักษาความปลอดภัยในบางช่วงเวลาเช่นกัน ซึ่งอัตราการระบายสูงสุดในกรณีทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยและใส่หน้ากากอนามัย จะมีค่าเท่ากับ 5.18 และ 0.91 ACH ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6- 15

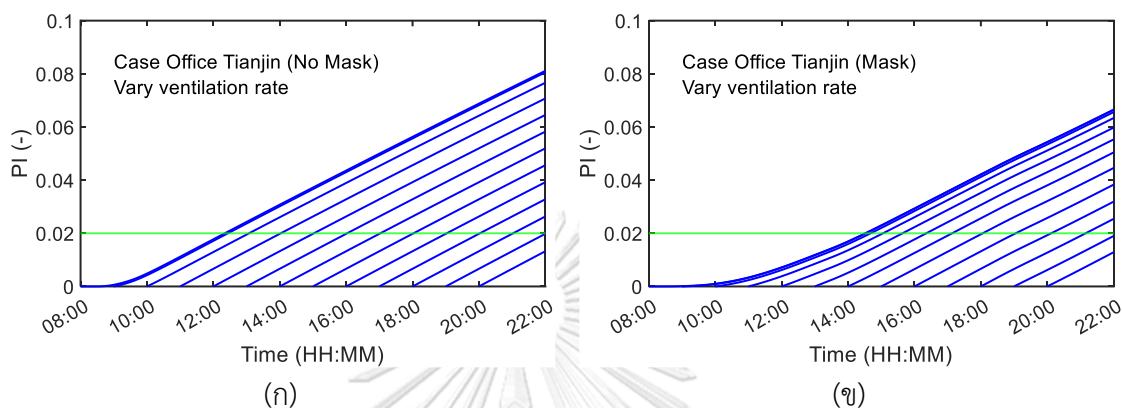


รูปที่ 6- 14 ค่าควอนตัมในการติดเชื้อต่อตารางเมตรที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของสำนักงานในมหาวิทยาลัยเที่ยงคืน



รูปที่ 6- 15 อัตราการระบายอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของสำนักงานในมหาวิทยาลัยเที่ยงคืน

ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ได้จากการปรับอัตราการระบายอากาศในช่วงเวลา 180 นาทีจะมีค่าไม่เกิน 0.02 ดังรูปที่ 6- 16 ซึ่งทำให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ทั้งในกรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัยและใส่หน้ากากอนามัย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อนี้ สามารถประยุกต์ใช้กับค่าจำนวนคนที่รับเข้าในแบบต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 6- 16 ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อกรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของบุคคล โดยค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อของคนในพื้นที่ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาทีของสำนักงานในมหาวิทยาลัยเทียนจิน โดย (ก) กรณีทุกคนในพื้นที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัย และ (ข) กรณีทุกในพื้นที่ใส่หน้ากากอนามัย

## บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคารเป็นหนึ่งในวิธีการลดปริมาณเชื้อโรคและลดความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้ใช้งานอาคารในช่วงวิกฤตการณ์โรคระบาดได้ ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นความสำคัญของการควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ จึงได้เสนอวิธีการในการลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การลดความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่อาคารเก่าที่มีอัตราการระบายจำกัด และการปรับอัตราการระบายอากาศในพื้นที่ตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่อาคาร โดยใช้แบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประยุกต์มาจากแบบจำลองของ Gammaitoni และ Nucci ร่วมกับระยะห่างทางสังคมจากแบบจำลองของ Sun และ Zhai ที่ได้ทำการปรับเส้นโค้งสมการดัชนีชี้วัดระยะห่างทางสังคม มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9966 และประสิทธิภาพการป้องกันเชื้อโรคของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจจากงานวิจัยของ Nicas โดยแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 10.78 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบจำลองค่าความเสี่ยงในการติดเชื้ออื่น ๆ แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ในเงื่อนไขภายใต้สภาวะค่าควอนตัมในการติดเชื้อภายในห้องเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในสถานการณ์ต่าง ๆ ทั้งในกรณีบุคคลในพื้นที่ไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัย ซึ่งค่าควอนตัมในการติดเชื้อมีความสัมพันธ์กับจำนวนคนในพื้นที่

สำหรับพื้นที่ที่มีอัตราการระบายอากาศที่จำกัดหรือพื้นที่ในอาคารเก่าสามารถใช้แบบจำลองประยุกต์หาจำนวนบุคคลที่เหมาะสมได้ กำหนดให้อัตราการระบายอากาศเป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 โดยใช้พื้นที่ตัวอย่าง คือ พื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร และบาร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5, 4.1 และ 5.3 ACH ตามลำดับ เมื่อกำหนดระยะเวลาที่อยู่ในพื้นที่เป็น 1-3 ชั่วโมง และค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อไม่เกิน 0.01 – 0.05 พบว่า พื้นที่ที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยจะรับความหนาแน่นได้ต่ำกว่าพื้นที่ที่ทุกคนใส่หน้ากากอนามัยโดยการใส่หน้ากากอนามัยจะทำให้พื้นที่รับคนได้เพิ่มขึ้น 4.7 เท่า และค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ที่มากขึ้นจะทำให้พื้นที่สามารถรับคนได้มากขึ้น และระยะเวลาการอยู่ในพื้นที่ของบุคคลเพิ่มขึ้น พื้นที่จะรับความหนาแน่นของบุคคลได้ลดลง โดยพื้นที่ที่ทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยในเวลาเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ชั่วโมง พื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์ จะรับคนได้ลดลง 66.63, 47.87 และ 54.30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเวลาเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 3 ชั่วโมง จะรับคนได้ลดลง 51.64, 26.67 และ 36.01 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในขณะที่การใส่หน้ากากอนามัยในเวลาเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ชั่วโมง พื้นที่จะรับคนได้ลดลง 9.20, 51.25 และ 52.52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเวลาเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 3 ชั่วโมง พื้นที่จะรับคนได้ลดลง 23.17, 41.08 และ 36.01 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



การปรับอัตราการระบายอากาศในพื้นที่ที่จำกัดเมื่อคนในพื้นที่มีความหนาแน่นสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 ไม่เพียงพอต่อการรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้มีค่าไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำนายค่าอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่มีจำนวนเต็มพื้นที่ได้ โดยเมื่อทุกคนไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัย พื้นที่สำนักงานจะมีค่าเท่ากับ 10.61 และ 1.87 ACH ตามลำดับ ร้านอาหารจะมีค่าเท่ากับ 148.59 และ 26.21 ACH ตามลำดับ และบาร์จะมีค่าเท่ากับ 212.19 และ 37.43 ACH ตามลำดับ ซึ่งในสถานการณ์จริงจะมีคนเข้าออกพื้นที่ ทำให้ความหนาแน่นของคนในพื้นที่เปลี่ยนแปลงไป การปรับอัตราการระบายอากาศให้มีค่าสำหรับความหนาแน่นสูงสุด แต่สถานการณ์จริงมีการเปลี่ยนความหนาแน่นจึงสามารถรักษาค่าความเสี่ยงได้มากกว่าความต้องการส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่สูงเกินไป

ดังนั้นการปรับอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของบุคคลที่เข้าสู่พื้นที่จึงมีความเหมาะสม โดยค่าอัตราการระบายอากาศจะอยู่ระหว่างค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ ASHRAE 62.1 และค่าสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับกรณีอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของคนในพื้นที่คงที่ ซึ่งแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนานี้ก็สามารถทำนายและปรับอัตราการระบายอากาศได้ โดยรักษาค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อให้มีค่าไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที เมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการระบายอากาศและภาระความเย็นที่เพิ่มขึ้นของการทำนายอัตราการระบายอากาศทุกกรณีกับกรณีอัตราการระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 พบว่าค่าจากการทำนายทุกกรณีมีค่าสูงกว่ากรณีมาตรฐาน ASHRAE 62.1 มาก ทั้งกรณีบุคคลทุกพื้นที่ไม่ใส่และใส่หน้ากากอนามัย โดยในกรณีอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของบุคคลคงที่เปรียบเทียบกับกรณีอัตราการระบายอากาศตามปกติตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 พื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์ในกรณีทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยสูงขึ้น 2,022, 3,524 และ 3,904 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในกรณีทุกคนใส่หน้ากากอนามัยสูงขึ้น 274, 539 และ 606 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ในกรณีปรับอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของบุคคลเปรียบเทียบกับกรณีอัตราการระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 พื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์ในกรณีทุกคนไม่ใส่หน้ากากอนามัยสูงขึ้น 1,351, 1,770 และ 1,802 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในกรณีทุกคนใส่หน้ากากอนามัยสูงขึ้น 169, 257 และ 269 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกรณีอัตราการระบายอากาศที่ได้จากค่าทำนาย จะพบว่า อัตราการระบายอากาศในกรณีปรับเปลี่ยนตามความหนาแน่นของบุคคลจะมีค่าน้อยกว่ากรณีอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นของคนคงที่ เนื่องจากทำให้เกิดการประหยัดพลังงานโดยไม่จำเป็นต้องใช้อัตราการระบายอากาศสูงสุดตลอดเวลา โดยเมื่อบุคคลไม่ใส่หน้ากากอนามัยในพื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์จะมีค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง 31.62, 48.40 และ 52.48 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่เมื่อบุคคลใส่หน้ากาก

อนามัยในพื้นที่สำนักงาน พื้นที่ร้านอาหาร และพื้นที่บาร์จะมีค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง 28.13, 44.15 และ 47.71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นของบุคคลในพื้นที่อาคารต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองประยุกต์นี้ สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจกำหนดมาตรการจัดการและควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อโรคทางอากาศ โดยอาจกำหนดให้มีการใส่หน้ากากอนามัยในพื้นที่ ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่นเฉลี่ยของคน และอัตราการระบายอากาศในพื้นที่ สามารถสรุปตัวแปรเบื้องต้นเพื่อใช้กำหนดมาตรการแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวแปรเบื้องต้นที่ใช้ในการกำหนดมาตรการควบคุมการแพร่กระจายเชื้อโรคทางอากาศ

<b>ผลจากการใส่หน้ากากอนามัยของทุกคนในพื้นที่เทียบกับไม่ใส่หน้ากากอนามัย (เปอร์เซ็นต์)</b>	
ความหนาแน่นเฉลี่ยของคนในพื้นที่เพิ่มขึ้น	470%
อัตราการระบายอากาศลดลงเฉลี่ย	567%
<b>ผลจากการเพิ่มเวลาการอยู่ในพื้นที่ทำให้ความหนาแน่นคนในพื้นที่ลดลง (เท่า)</b>	
การเพิ่มเวลาจาก 1 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง	
- สำนักงาน	3.5
- ร้านอาหาร	2.3
- บาร์	2.3
การเพิ่มเวลาจาก 2 ชั่วโมงเป็น 3 ชั่วโมง	
- สำนักงาน	2.0
- ร้านอาหาร	1.6
- บาร์	1.6
<b>ผลของการกำหนดค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.02 ในเวลา 180 นาที</b>	
อัตราการระบายอากาศสูงสุดที่รักษาความเสี่ยงดังกล่าวมีความสัมพันธ์	
กับความหนาแน่นของคนต่อพื้นที่โดยมีค่าสูงกว่าคิดเป็นจำนวนเท่า เท่ากับ	
- กรณีไม่ใส่หน้ากากอนามัย	212.2
- กรณีใส่หน้ากากอนามัย	37.4

แบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากการตั้งสมมติฐานให้อากาศในห้องผสมกันอย่างสมบูรณ์ ไม่พิจารณาถึงความแข็งแรงของผู้รับเชื้อกำหนดให้ผู้รับเชื้อทุกคนมีอัตราการหายใจเท่ากัน โดยให้ผู้แพร่กระจายเชื้อมีจำนวน 2 เปอร์เซ็นต์ของคนในห้องทั้งหมด และพฤติกรรมการใส่หน้ากากอนามัยของบุคคลในห้องมีพฤติกรรมเดียวกันทุกคน

แบบจำลองนี้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบกล้องวงจรปิดหรือ CCTV ที่ตรวจจับใบหน้าหรือมีระบบการตรวจนับจำนวนคนในพื้นที่ด้วยระบบการเรียนรู้เชิงลึกหรือ Deep learning เพื่อคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นบุคคลป้อนเข้าแบบจำลองประยุกต์ และปรับอัตราการระบายอากาศให้เหมาะสมกับความหนาแน่นบุคคลในพื้นที่ได้ โดยผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นกว่าสภาวะปกติ แต่หากยอมรับค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อได้มากขึ้นกว่า 0.02 จะสามารถปรับลดค่าอัตราการระบายอากาศลงได้เช่นกัน



## บรรณานุกรม

- [1] WHO. "WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard." World Health Organization. <https://covid19.who.int/> (accessed August 30, 2021).
- [2] A. Christie, J. Brooks, L. Hicks, E. Sauber-Schatz, J. Yoder, and M. Honein, "Guidance for Implementing COVID-19 Prevention Strategies in the Context of Varying Community Transmission Levels and Vaccination Coverage," in "Morbidity and Mortality Weekly Report," Centers for Disease Control and Prevention, 2021, vol. 30.
- [3] CDC. "SARS-CoV-2 Transmission." Centers of Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html> (accessed August 30, 2022).
- [4] WHO. "Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?" World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted> (accessed August 29, 2021).
- [5] WHO, *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [6] W. Chen, H. Qian, N. Zhang, F. Liu, L. Liu, and Y. Li, "Extended short-range airborne transmission of respiratory infections," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 422, p. 126837, 15 January 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126837.
- [7] B. Stephens, "HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases," in "Wells-Riley & HVAC Filtration for infectious airborne aerosols," Illinois Institute of Technology, The National Air Filtration Association (NAFA) Foundation, 2013. [Online]. Available: [https://www.built-envi.com/publications/nafa\\_iit\\_wellsriley%20-%20FINAL.pdf](https://www.built-envi.com/publications/nafa_iit_wellsriley%20-%20FINAL.pdf)
- [8] Z. Liu, S. Ma, G. Cao, C. Meng, and B.-J. He, "Distribution characteristics, growth, reproduction and transmission modes and control strategies for microbial contamination in HVAC systems: A literature review," *Energy and Buildings*, vol. 177, pp. 77-95, 15 October 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.07.050.
- [9] อ. ลีลาวัณย์. "เรื่อนำรู้เกี่ยวกับ COVID-19 จากโรคติดเชื้อไวรัส SARS-CoV-2." แพทยสภา.

- <https://tmc.or.th/pdf/Covid-19-MD-AmornUpdate.pdf> (accessed 06 August, 2021).
- [10] WHO. "Transmission of SARS-CoV-2 : implications for infection prevention precautions." World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions> (accessed 12 October, 2021).
- [11] WHO. "Considerations for public health and social measures in the workplace in the context of COVID-19 ." World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/considerations-for-public-health-and-social-measures-in-the-workplace-in-the-context-of-covid-19> (accessed August 29, 2021).
- [12] M. K. Ijaz, S. A. Sattar, J. R. Rubino, R. W. Nims, and C. P. Gerba, "Combating SARS-CoV-2 : leveraging microbicidal experiences with other emerging/re-emerging viruses," *PeerJ*, vol. 8, p. e9914, 2020, doi: 10.7717/peerj.9914.
- [13] WHO. "Modes of transmission of virus causing COVID-19 : implications for IPC precaution recommendations." World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations> (accessed July 20, 2021).
- [14] W. Chen, N. Zhang, J. Wei, H.-L. Yen, and Y. Li, "Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact," *Building and Environment*, vol. 176, p. 106859, 2020/06/01 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106859.
- [15] R. Dwivedi. "Long and short-range risk of airborne transmission of SARS-CoV-2." <https://www.news-medical.net/news/20210512/Long-and-short-range-risk-of-airborne-transmission-of-SARS-CoV-2.aspx> (accessed September 8, 2021).
- [16] L. Liu, Y. Li, P. V. Nielsen, J. Wei, and R. L. Jensen, "Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people," *Indoor Air*, vol. 27, no. 2, pp. 452-462, 2017, doi: 10.1111/ina.12314.
- [17] K. Xie, B. Liang, M. A. Dulebenets, and Y. Mei, "The Impact of Risk Perception on Social Distancing during the COVID-19 Pandemic in China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 17, p. 6256, 2020, doi:

- 10.3390/ijerph17176256.
- [18] Y. Shah, J. W. Kurelek, S. D. Peterson, and S. Yarusevych, "Experimental investigation of indoor aerosol dispersion and accumulation in the context of COVID-19: Effects of masks and ventilation," *Phys Fluids* (1994), vol. 33, no. 7, p. 073315, July 2021, doi: 10.1063/5.0057100.
- [19] T. Lipinski, D. Ahmad, N. Serey, and H. Jouhara, "Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings," *International Journal of Thermofluids*, vol. 7-8, p. 100045, 1 November 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2020.100045.
- [20] G. M. Abbas and I. Gursel Dino, "The impact of natural ventilation on airborne biocontaminants: a study on COVID-19 dispersion in an open office," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, 2021, doi: 10.1108/ECAM-12-2020-1047.
- [21] M. Guo, P. Xu, T. Xiao, R. He, M. Dai, and S. L. Miller, "Review and comparison of HVAC operation guidelines in different countries during the COVID-19 pandemic," *Building and Environment*, vol. 187, p. 107368, 1 January 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107368.
- [22] REHVA, "How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces," in "REHVA COVID-19 guidance document," 2020.
- [23] A. Santos, P. Gaspar, A. Hamandosh, E. Aguiar, A. Filho, and H. Souza, "Best Practices on HVAC Design to Minimize the Risk of COVID-19 Infection within Indoor Environments," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 63, pp. 1-12, 17 July 2020, doi: 10.1590/1678-4324-2020200335.
- [24] C. B. Beggs, P. A. Noakes, C. J. Fau - Sleight, L. A. Sleight, P. A. Fau - Fletcher, K. Fletcher, La Fau - Siddiqi, and K. Siddiqi, "The transmission of tuberculosis in confined spaces: an analytical review of alternative epidemiological models," (in eng), *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, vol. 7, no. 1027-3719 (Print), pp. 1015-1026, 2003.
- [25] G. N. Sze To and C. Y. H. Chao, "Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory

- diseases," *Indoor Air*, vol. 20, no. 1, pp. 2-16, 2010, doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x.
- [26] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environment International*, vol. 141, p. 105794, 1 August 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [27] C. Sun and Z. Zhai, "The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission," *Sustainable Cities and Society*, vol. 62, p. 102390, 1 November 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102390.
- [28] H. Dai and B. Zhao, "Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces," (in eng), *Build Simul*, pp. 1-7, 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0703-5.
- [29] W. Fisk, O. Seppanen, D. Faulkner, and J. Huang, "Economic benefits of an economizer system: Energy savings and reduced sick leave," *ASHRAE Transactions*, vol. 111, 2005.
- [30] L. Gammaitoni and M. C. Nucci, "Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures," (in eng), *Emerg Infect Dis*, vol. 3, no. 3, pp. 335-342, Jul-Sep 1997, doi: 10.3201/eid0303.970310.
- [31] S. N. Rudnick and D. K. Milton, "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration," *Indoor Air*, vol. 13, no. 3, pp. 237-245, 01 September 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
- [32] R. L. Riley, "Airborne infection," *The American Journal of Medicine*, vol. 57, no. 3, pp. 466-475, 01 September 1974, doi: 10.1016/0002-9343(74)90140-5.
- [33] E. C. Riley, G. Murphy, and R. L. Riley, "AIRBORNE SPREAD OF MEASLES IN A SUBURBAN ELEMENTARY SCHOOL," *American Journal of Epidemiology*, vol. 107, no. 5, pp. 421-432, 1978, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112560.
- [34] J. Li *et al.*, "Evaluation of infection risk for SARS-CoV-2 transmission on university campuses," *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 27, no. 9, pp. 1165-1180, 2021, doi: 10.1080/23744731.2021.1948762.
- [35] M. Nicas, "Respiratory protection and the risk of Mycobacterium tuberculosis infection," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 27, no. 3, pp. 317-333, 1995, doi: 10.1002/ajim.4700270302.

- [36] T. Zhang, T. Zhang, and S. Liu, "A Modified Surgical Face Mask to Improve Protection and Wearing Comfort," *Buildings*, vol. 12, no. 5, doi: 10.3390/buildings12050663.
- [37] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394-398, 2008/01/01/ 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [38] D. Rim and W. Nazaroff, "Energy and Cost Associated with Ventilating Office Buildings in a Tropical Climate," *PLoS ONE*, vol. 10, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0122310.
- [39] D. Khemasuwan, J. S. Sorensen, and H. G. Colt, "Artificial intelligence in pulmonary medicine: computer vision, predictive model and COVID-19," *European Respiratory Review*, vol. 29, no. 157, p. 200181, 2020, doi: 10.1183/16000617.0181-2020.
- [40] M. Rezaei and M. Azarmi, "DeepSOCIAL: Social Distancing Monitoring and Infection Risk Assessment in COVID-19 Pandemic," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, p. 7514, 2020, doi: 10.3390/app10217514.
- [41] J. Wang, J. Huang, Z. Feng, S.-J. Cao, and F. Haghigat, "Occupant-density-detection based energy efficient ventilation system: Prevention of infection transmission," *Energy and Buildings*, vol. 240, p. 110883, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110883.
- [42] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013 Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta, GA: American Society of Heating, 2013.
- [43] Y. Tsuchihashi *et al.*, "High attack rate of SARS-CoV-2 infections during a bus tour in Japan," *Journal of Travel Medicine*, vol. 28, no. 8, p. taab111, 2021, doi: 10.1093/jtm/taab111.
- [44] S. L. Miller *et al.*, "Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event," *Indoor Air*, vol. 31, no. 2, pp. 314-323, 2021, doi: 10.1111/ina.12751.
- [45] Z. Wang, Y. Ding, H. Deng, F. Yang, and N. Zhu, "An Occupant-Oriented Calculation Method of Building Interior Cooling Load Design," *Sustainability*, vol.



10, no. 6, doi: 10.3390/su10061821.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ตารางที่ 6 ผลการทำนายค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อเทียบกับสถานการณ์จริง

สถานการณ์	ค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ (%)				
	Actual case	Wells-Riley model	G-N model	S-Z model	Developed model
Abscess irrigation	80.00	99.67	95.88	97.56	81.53
Autopsy	100.00	99.91	99.86	98.99	99.30
Bronchoscopy	76.90	83.47	81.34	69.06	71.92
Intubation	66.70	89.58	68.35	80.23	48.41
Airplane	11.90	17.40	17.40	8.81	9.17
Bus in Hunan-1	17.40	37.34	37.33	17.97	16.93
Bus in Hunan-2	25.00	53.47	53.44	25.51	22.12
Bus in Ningbo	36.80	53.05	53.04	31.35	33.04
Bus in Zhejiang	35.30	65.14	54.84	36.03	27.06
Bus tour	46.30	97.54	85.92	79.21	42.00
Skagit Valley	86.90	99.50	99.49	89.86	88.73

ตารางที่ 7 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่สำนักงาน

พื้นที่	ค่าความ เสี่ยงในการ ติดเชื้อที่ ยอมรับได้	ระยะเวลาที่ อยู่ในพื้นที่ (นาทีก)	จำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุด (คน)		เปอร์เซ็นต์ของคนในพื้นที่ (%)	
			ไม่ใส่หน้ากาก	ใส่หน้ากาก	ไม่ใส่หน้ากาก	ใส่หน้ากาก
			อนามัย	อนามัย	อนามัย	อนามัย
สำนักงาน	0.01	60	16	50	32.00%	100.00%
		90	7	44	14.00%	88.00%
		120	4	27	8.00%	54.00%
		150	3	18	6.00%	36.00%
		180	2	13	4.00%	26.00%
	0.02	60	33	50	66.00%	100.00%
		90	15	50	30.00%	100.00%
		120	9	50	18.00%	100.00%
		150	6	37	12.00%	74.00%
		180	4	27	8.00%	54.00%
	0.03	60	49	50	98.00%	100.00%
		90	23	50	46.00%	100.00%
		120	14	50	28.00%	100.00%
		150	9	50	18.00%	100.00%
		180	7	41	14.00%	82.00%
	0.04	60	50	50	100.00%	100.00%
		90	32	50	64.00%	100.00%
		120	19	50	38.00%	100.00%
		150	13	50	26.00%	100.00%
		180	9	50	18.00%	100.00%
	0.05	60	50	50	100.00%	100.00%
		90	40	50	80.00%	100.00%
		120	24	50	48.00%	100.00%
		150	16	50	32.00%	100.00%
		180	12	50	24.00%	100.00%

ตารางที่ 8 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่ร้านอาหาร

พื้นที่	ค่าความเสี่ยงในการ ติดเชื้อที่ ยอมรับได้	ระยะเวลา ที่อยู่ใน พื้นที่ (นาที)	จำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุด (คน)		เปอร์เซ็นต์ของคนในพื้นที่ (%)	
			ไม่ใส่หน้ากาก	ใส่หน้ากาก	ไม่ใส่หน้ากาก	ใส่หน้ากาก
			อนามัย	อนามัย	อนามัย	อนามัย
ร้านอาหาร	0.01	60	1	10	2.86%	28.57%
		90	1	6	2.86%	17.14%
		120	1	4	2.86%	11.43%
		150	1	3	2.86%	8.57%
		180	1	2	2.86%	5.71%
	0.02	60	3	21	8.57%	60.00%
		90	2	13	5.71%	37.14%
		120	1	9	2.86%	25.71%
		150	1	7	2.86%	20.00%
		180	1	5	2.86%	14.29%
	0.03	60	5	32	14.29%	91.43%
		90	3	19	8.57%	54.29%
		120	2	14	5.71%	40.00%
		150	1	10	2.86%	28.57%
		180	1	8	2.86%	22.86%
	0.04	60	7	35	20.00%	100.00%
		90	4	26	11.43%	74.29%
		120	3	18	8.57%	51.43%
		150	2	14	5.71%	40.00%
		180	2	12	5.71%	34.29%
	0.05	60	9	35	25.71%	100.00%
		90	5	33	14.29%	94.29%
		120	4	23	11.43%	65.71%
		150	3	18	8.57%	51.43%
		180	2	15	5.71%	42.86%

ตารางที่ 9 ผลการทำนายจำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุดในพื้นที่บาร์

พื้นที่	ค่าความ เสี่ยงในการ ติดเชื้อที่ ยอมรับได้	ระยะเวลา ที่อยู่ใน พื้นที่ (นาที)	จำนวนคนที่เหมาะสมสูงสุด (คน)		เปอร์เซ็นต์ของคนในพื้นที่ (%)	
			ไม่ใส่หน้ากาก	ใส่หน้ากาก	ไม่ใส่หน้ากาก	ใส่หน้ากาก
			อนามัย	อนามัย	อนามัย	อนามัย
บาร์	0.01	60	4	26	4.00%	26.00%
		90	2	16	2.00%	16.00%
		120	2	11	2.00%	11.00%
		150	1	9	1.00%	9.00%
		180	1	7	1.00%	7.00%
	0.02	60	9	52	9.00%	52.00%
		90	5	32	5.00%	32.00%
		120	4	23	4.00%	23.00%
		150	3	18	3.00%	18.00%
		180	2	15	2.00%	15.00%
	0.03	60	13	78	13.00%	78.00%
		90	8	48	8.00%	48.00%
		120	6	35	6.00%	35.00%
		150	4	27	4.00%	27.00%
		180	4	22	4.00%	22.00%
	0.04	60	18	100	18.00%	100.00%
		90	11	65	11.00%	65.00%
		120	8	47	8.00%	47.00%
		150	6	37	6.00%	37.00%
		180	5	30	5.00%	30.00%
	0.05	60	23	100	23.00%	100.00%
		90	14	82	14.00%	82.00%
		120	10	59	10.00%	59.00%
		150	8	46	8.00%	46.00%
		180	6	38	6.00%	38.00%

ตารางที่ 10 ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อปีที่ได้จากการทำนาย

กรณีต่าง ๆ	กรณีอัตราการระบายอากาศ	กรณีอัตราการระบายอากาศเป็นไปตามมาตรฐาน ASHRAE	กรณีอัตราการระบายอากาศเมื่อความหนาแน่นคนมีค่าคงที่	กรณีอัตราการระบายอากาศเปลี่ยนตามความหนาแน่นคน	
					กรณีอัตราการระบายอากาศเป็นไปตามมาตรฐาน ASHRAE
พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อตารางเมตร ต่อปี)	สำนักงาน	ไม่ใส่หน้ากาก	8.58	182.06	124.48
		ใส่หน้ากาก		32.11	23.08
พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อตารางเมตร ต่อปี)	ร้านอาหาร	ไม่ใส่หน้ากาก	70.34	2,549.04	1,315.31
		ใส่หน้ากาก		449.63	251.10
พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อตารางเมตร ต่อปี)	บาร์	ไม่ใส่หน้ากาก	90.92	3,640.15	1,729.69
		ใส่หน้ากาก		642.08	335.74
ค่าไฟฟ้า (บาทต่อตารางเมตร ต่อปี)	สำนักงาน	ไม่ใส่หน้ากาก	34.31	728.24	497.94
		ใส่หน้ากาก		128.43	92.31
ค่าไฟฟ้า (บาทต่อตารางเมตร ต่อปี)	ร้านอาหาร	ไม่ใส่หน้ากาก	281.35	10,196.17	5,261.25
		ใส่หน้ากาก		1,798.50	1,004.40
ค่าไฟฟ้า (บาทต่อตารางเมตร ต่อปี)	บาร์	ไม่ใส่หน้ากาก	363.69	14,560.59	6,918.74
		ใส่หน้ากาก		2,568.33	1,342.96

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าระหว่างกรณีอัตราการระบายอากาศเป็นไปตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 กรณีปรับเปลี่ยนอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นคนในพื้นที่ และกรณีปรับเปลี่ยนอัตราการระบายอากาศตามความหนาแน่นคนในพื้นที่

พื้นที่	การใส่หน้ากาก อนามัยป้องกัน เชื้อโรคของบุคคล ในพื้นที่	พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าเปรียบเทียบ (%)		
		กรณีอัตราการระบาย อากาศเป็นไปตาม มาตรฐาน ASHRAE และกรณีอัตราการ ระบายอากาศเมื่อความ หนาแน่นคนมีค่าคงที่	กรณีอัตราการระบาย อากาศเป็นไปตาม มาตรฐาน ASHRAE และกรณีปรับเปลี่ยน อัตราการระบายอากาศ ตามความหนาแน่นคน ในพื้นที่	กรณีอัตราการระบาย อากาศเมื่อความ หนาแน่นคนมีค่าคงที่ และกรณีปรับเปลี่ยน อัตราการระบาย อากาศตามความ หนาแน่นคนในพื้นที่
สำนักงาน	ไม่ใส่หน้ากาก	2,022	1,351	-31.62
	ใส่หน้ากาก	274	169	-28.13
ร้านอาหาร	ไม่ใส่หน้ากาก	3,524	1,770	-48.40
	ใส่หน้ากาก	539	257	-44.15
บาร์	ไม่ใส่หน้ากาก	3,904	1,802	-52.48
	ใส่หน้ากาก	606	269	-47.71



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิชชาพร ประพัฒน์ศรี
วัน เดือน ปี เกิด	26 พฤษภาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใน ปี 2558
ที่อยู่ปัจจุบัน	เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY