

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

Airborne transmission of COVID-19 and mitigation using box fan air cleaners in a poorly ventilated classroom

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8142835/>

**การแพร่กระจายของ COVID-19 ทางอากาศและการบรรเทาผลกระทบโดยใช้เครื่องกรองอากาศแบบกล่องพัดลมในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศไม่ดี**

### บทคัดย่อ

สถานที่ในร่มหลายแห่ง รวมทั้งห้องเรียนและสำนักงานที่มีอยู่มาก เรือนจำ ที่พักพิงสำหรับคนไร้บ้าน ฯลฯ มีการระบายอากาศไม่ดี แต่มีทรัพยากรจำกัด เพื่อให้สามารถอัปเดตการระบายอากาศราคาแพงหรือระบบฟอกอากาศเชิงพาณิชย์ ทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยของการเปิดกิจกรรมในสถานที่เหล่านี้ในยุคที่ไวรัสโควิด-19 ระบาด เพื่อจัดการกับความปัญหานี้ โดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิง เราได้ทำการตรวจสอบอย่างเป็นระบบของการการแพร่กระจายในอากาศในห้องเรียนที่ติดตั้งเครื่องระบายอากาศแบบ horizontal unit ventilator (HUV) เครื่องเดียว และประเมินประสิทธิภาพของกล่องกรองอากาศแบบพัดลมราคาประหยัดเพื่อลดความเสี่ยง การศึกษาของเราแสดงให้เห็นว่าการวางกล่องใส่เครื่องกรองอากาศแบบพัดลมในห้องเรียนช่วยลดความเสี่ยงในการส่งผ่านอากาศทั่วทั้งพื้นที่ได้อย่างมาก เครื่องฟอกอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อวางไว้ใกล้กับผู้ป่วยที่ไม่มีอาการ อย่างไรก็ตามหากไม่ทราบตำแหน่งของผู้ป่วย ประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดจะเหมาะสมที่สุดเมื่ออยู่ใกล้ HUV โดยที่อากาศจะไหลลงด้านล่าง นอกจากนี้เราพบว่าประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของละอองลอยและการแพร่กระจายในห้องเรียนมีมากกว่าการเพิ่มเครื่องฟอกอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับ的增加อัตราการไหลของ HUV เพียงอย่างเดียว จำเป็นต้องปรับจำนวนและตำแหน่งของเครื่องฟอกอากาศเพื่อรักษาประสิทธิภาพสำหรับห้องเรียนขนาดใหญ่ และคำนึงถึงการไต่ระดับความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มความร้อนของมนุษย์และอากาศถ่ายเทที่ร้อนในฤดูหนาว โดยรวมแล้วการศึกษาของเราแสดงให้เห็นว่าเครื่องกรองอากาศแบบกล่องกรองอากาศมีพัดลม สามารถทำหน้าที่เป็นทางเลือกราคาประหยัดและมีประสิทธิภาพสำหรับการลดความเสี่ยงในการส่งผ่านอากาศในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดี

## I. บทนำ

หลักฐานที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าการแพร่ผ่านทางอากาศเป็นเส้นทางสำคัญที่นำไปสู่การแพร่กระจายของ COVID-19 เมื่อเทียบกับภายนอกอาคาร ความเสี่ยงของการแพร่กระจายทางอากาศนั้นสูงขึ้นอย่างมากสำหรับกิจกรรมในร่มที่รวมตัวกันจำนวนมาก การระบายอากาศที่ดีขึ้นได้รับการแนะนำเป็นมาตรการป้องกันที่สำคัญเพื่อลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายของอากาศภายในอาคาร การแทนที่อากาศที่ปนเปื้อนด้วยอากาศบริสุทธิ์ โดยการระบายอากาศสามารถช่วยลดความเข้มข้นของอนุภาคและลดความน่าจะเป็นที่จะสัมผัสกับละอองลอยที่มีไวรัส โดยมีการศึกษาหนึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการติดเชื้อต่ำที่น้อยกว่า 1% สามารถทำได้ด้วยอัตราการระบายอากาศที่สูงกว่าเกณฑ์ที่แนะนำ อย่างไรก็ตามพบว่าพื้นที่ภายในอาคารหลายแห่งมีการระบายอากาศไม่ดี รวมถึงห้องเรียนโรงเรียนรัฐบาลที่เก่าจำนวนมาก รวมถึงสำนักงานต่างๆ ห้องเรียนเหล่านี้มีความเสี่ยงสูงมากในการส่งผ่านทางอากาศ เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของอาคารมีอายุมาก ความหนาแน่นของประชากรสูง และชั่วโมงการทำงานที่ยาวนาน ซึ่งอาจนำไปสู่การสะสมของละอองลอยในปริมาณที่สูงขึ้น จากการศึกษาพบว่า การเปิดหน้าต่างเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดการสะสมของละอองลอย แต่ยากต่อการใช้งานความเป็นจริงในช่วงฤดูหนาว/ฤดูร้อน และห้องเรียนจำนวนมากไม่มีหน้าต่างที่ใช้ทำงานได้ แนวทางการบรรเทาผลกระทบอีกแนวทางหนึ่งคือการอัปเดตระบบทำความร้อนส่วนกลาง การระบายอากาศ และการปรับอากาศ (HVAC) ที่มีอยู่ แต่ค่าใช้จ่ายที่สูงจะตามมาจากพื้นที่ภายในอาคารที่มีทรัพยากรจำกัดอยู่ก่อน

อีกทางเลือกหนึ่งคือ การใช้เครื่องฟอกอากาศแบบพกพา ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อลดความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดีเหล่านี้ เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการแสดงให้เห็นว่าในห้องเรียนที่ไม่มีการระบายอากาศ หากมีการใช้เครื่องกรองระดับอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA) สามารถลดระดับความเข้มข้นของละอองลอยลงอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์ที่ใช้สำหรับพื้นที่สาธารณะ เช่น ห้องเรียนและสำนักงานที่ใช้ร่วมกัน มักต้องการอัตราการส่งอากาศบริสุทธิ์ (CADR) ที่มากกว่า 400 cfm<sup>18</sup> โดยมีราคาตั้งแต่ 400 ดอลลาร์ ถึงมากกว่า 4000 ดอลลาร์ การนำวิธีการบรรเทาผลกระทบนี้ไปใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานที่ในร่มที่ทรัพยากรมีอย่างจำกัด รวมถึงโรงเรียนของรัฐ เรือนจำ สำนักงานต่างๆ ที่พักอาศัย ศูนย์ดูแลชีวิต ฯลฯ เพื่อรับมือกับความท้าทายนี้ เครื่องฟอกอากาศราคาประหยัดที่สร้างขึ้นโดยใช้มีการใช้แผงกรองอากาศและพัดลมแบบกล่อง ซึ่งแตกต่างจากรุ่นทั่วไปที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แต่ประสิทธิภาพของระบบต้นทุนต่ำนี้ไม่เคยได้รับการประเมินอย่างเป็นทางการเป็นระบบมาก่อน

ดังนั้น เมื่อใช้แนวทางการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล (CFD) การศึกษาในปัจจุบันของเราจึงมุ่งที่จะจัดให้มีการประเมินอย่างเป็นทางการของเครื่องฟอกอากาศต้นทุนต่ำเหล่านี้เป็นแนวทางทางเลือกสำหรับการลดความเสี่ยงในพื้นที่ในร่มที่มีการระบายอากาศไม่ดี นับตั้งแต่มีการระบาดของโรคระบบทางเดินหายใจ

เฉียบพลันรุนแรง (SARS) ในปี ค.ศ. 2002 CFD ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในลดความเสี่ยงในการแพร่เชื้อในอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมในร่มและกลางแจ้งต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Lin et al. ได้ทำการจำลองการแพร่เชื้อทางอากาศครั้งแรกเนื่องจาก การไอในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศด้วยการแลกเปลี่ยนอากาศ 12 ครั้งต่อชั่วโมง (ACH) ภายใต้การออกแบบการระบายอากาศที่แตกต่างกัน และพบว่าการระบายอากาศแบบผสมทำให้เกิดความเข้มข้นของละอองลอยสูงสุดเมื่อเทียบกับการออกแบบการกระจายและการระบายอากาศแบบสตราตัม และ Zhang et al. ใช้ห้องเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (ต่ำกว่า 7.5 ACH) ทดสอบการแพร่กระจายที่เกิดจากการพูดคุยอย่างต่อเนื่องและแสดงให้เห็นถึงความเหนือกว่าของการกระจายมากกว่าการระบายอากาศแบบผสมในการลดความเข้มข้นและการแพร่กระจายของละอองลอย Abuhegazy et al ประเมินผลกระทบของตำแหน่งของบุคคลที่ไม่มีอาการอย่างเป็นระบบ (เรียกว่าติดเชื้อมาในที่นี้) และขนาดของอนุภาคที่เกิดจากการติดเชื้อในอากาศในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศ (8.6 ACH) ที่มีการระบายอากาศแบบกระจาย พวกเขาแสดงให้เห็นถึงอัตราที่สำคัญ (24%–50%) ของอนุภาคที่สามารถถูกกำจัดได้โดยการระบายอากาศ และการเปิดหน้าต่างสามารถเพิ่มอัตราของการกำจัดเป็น 69% ในทางตรงกันข้าม ในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศเพียงจุดเดียว Shao et al.<sup>29</sup> แสดงให้เห็นว่าการระบายอากาศสามารถถึงละอองละอองเล็ก ๆ ออกมาได้เท่านั้น ( 3%) แม้จะอยู่ภายใต้การระบายอากาศที่สูงมาก (เช่น 30 ACH) โดยส่วนใหญ่ ละอองลอยที่สะสมบนพื้นผิวเนื่องจากบริเวณที่มีการหมุนเวียนของการไหลลงที่ในอากาศ

แม้จะมีความพยายามในอดีตเหล่านี้ แต่มีการศึกษาน้อยมากที่เน้นการแพร่ทางอากาศในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศไม่ดี ห้องเรียนเหล่านี้มีอยู่ทั่วไปในโรงเรียนของรัฐ และห้องเรียนเหล่านี้มักติดตั้งเครื่องระบายอากาศแบบแนวนอนเครื่องเดียว (HUV เครื่องระบายอากาศแบบยูนิตเป็นระบบ HVAC ที่ใช้กันทั่วไปในโรงเรียนของรัฐ) ที่ทำงานที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศประมาณ 2 ACH ซึ่งต่ำกว่ามาก กว่าเครื่องระบายอากาศที่ใช้ในการศึกษาดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้ตามที่ได้อ้างไว้ก่อนหน้านี้ ไม่มีการศึกษาใดที่ประเมินอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับเครื่องฟอกอากาศราคาประหยัดเหล่านี้ รวมถึงอิทธิพลของการจัดวางและการออกแบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพ แม้ว่าบางการศึกษาจะศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของเครื่องฟอกอากาศภายใต้การตั้งค่าอื่นๆ

เพื่อเพิ่มเติมความรู้ การศึกษาของเรามุ่งเน้นไปที่การทดสอบการแพร่กระจายทางอากาศในค่าห้องเรียนที่มีการระบายอากาศไม่ดีและทดสอบประสิทธิภาพของการใช้เครื่องกรองอากาศแบบพัดลมราคาประหยัด การศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้ CFD กับรุ่นเครื่องฟอกอากาศที่มีลักษณะเฉพาะสำหรับการทดลอง การศึกษานี้มีโครงสร้างดังนี้ ตอนที่. II อธิบายการออกแบบการจำลองของเรา รวมถึงการออกแบบและการกำหนดลักษณะเฉพาะของรุ่นเครื่องฟอกอากาศราคาประหยัดและการตั้งค่าแบบจำลองต่างๆ ตามลำดับใน ตอนที่ III เรานำเสนอผลการจำลองของเราเพื่อประเมินอิทธิพลของตำแหน่งและทิศทางของเครื่องฟอกอากาศ ขนาดห้อง รวมถึงการไล่ระดับความร้อนในอากาศบนประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศ ผลการศึกษา

ยังถูกเปรียบเทียบกับผลจากกรณีจำลองโดยใช้การระบายอากาศที่ปรับปรุงแล้วเท่านั้น (ไม่มีเครื่องฟอกอากาศไว้ในห้อง) สรุปท้าย ข้อเสนอแนะและการอภิปรายในตอน IV.

## II วิธีการศึกษา

### A. รูปแบบของพัฒนกรองอากาศแบบกล่อง

พัฒนกรองอากาศแบบกล่องราคาประหยัดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับการออกแบบและสร้างโดย Ford ดังแสดงในรูปที่ 1(a) และ 1(b) เครื่องฟอกอากาศประกอบด้วยพอร์ตรองรับกระดาษแข็งไคท์ที่ประกอบอย่างง่าย พัฒมกล่องขนาด  $0.5 \times 0.5$  ตร.ม. ตามพื้นที่ส่วนตัดขวาง และตัวกรองอากาศ  $0.5 \times 0.5 \times 0.1$  ลบ.ม. พร้อม ค่าการรายงานประสิทธิภาพขั้นต่ำมาตรฐาน (MERV) เท่ากับ 13 แผงตัวกรองวางอยู่ภายในฐานพับโดยวางพัฒมไว้ด้านบน พัฒมทำงานที่ระดับสูงเพื่อการกรองสูงสุด โดยปล่อยอากาศบริสุทธิ์ลงด้านล่างเมื่อดึงอากาศที่ยังไม่ได้กรองจากด้านบน

ในการจำแนกลักษณะอัตราการไหลและโปรไฟล์ความเร็วขาเข้าของกล่องกรองอากาศแบบพัฒม ใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (OMEGA) เพื่อวัดความเร็วที่ตำแหน่ง 35 ตำแหน่งที่กระจายอยู่ที่พื้นผิวทางเข้าของเครื่องฟอกอากาศแบบกล่อง [รูปที่ 2(ก)] โปรไฟล์ความเร็วขาเข้าพบว่ามีค่าสม่ำเสมอเกือบมากกว่า 80% ของพื้นที่ทั้งหมดในจุดศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 2(b) ด้วยความเร็วเฉลี่ย 1.5 ม./วินาที โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.2 ม./วินาที ตามการวัดเหล่านี้และพื้นที่ของตำแหน่งการวัด (รูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $35 \times 7$  ซม.) อัตราการไหลทั้งหมดจะถูกคำนวณเป็นประมาณ  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  ดังนั้น สำหรับการลดความซับซ้อนเราจึงใช้อัตราการไหล  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  และโปรไฟล์ความเร็วขาเข้าที่สม่ำเสมอสำหรับรุ่นเครื่องฟอกอากาศในการจำลองเพื่อให้เห็นภาพประสิทธิภาพของเครื่องกรองอากาศแบบกล่องในการแยกอนุภาคนาโนขนาดเล็ก (1 นาโนเมตร) วิกิโอสโตริม (วิกิโอสโตริม 1) จะถูกบันทึกโดยใช้กล้อง CCD แบบทวิคูณอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถจับสัญญาณที่อ่อนของอนุภาคนาโนไมโครเมตร ในพื้นที่ขนาดใหญ่ประมาณ 1 เมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพการกรองของแผงตัวกรองที่ใช้ในเครื่องฟอกอากาศแบบพัฒม กล่องกรองอากาศที่มีจำหน่ายทั่วไป (Tri-Pleat Green 20204SP, Tri-Dim Mann & Hummel) จะถูกวัดโดยใช้การทดสอบมาตรฐาน ASHRAE 52.2-2017 ในห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระโดยใช้ KCI เป็นละอองทดสอบ ซึ่งรายงานประสิทธิภาพการทำงานที่เกินมาตรฐานประสิทธิภาพของ MERV 13 ดังนั้นในการจำลอง เราจึงตั้งค่าประสิทธิภาพการกรองของเครื่องฟอกอากาศเป็น 100% เพื่อให้เข้าใจง่าย ในการประเมิน CADR ของเครื่องฟอกอากาศ มีการทดลอง 2 ครั้งในห้องปฏิบัติการที่เป็นอิสระต่อกัน 2 ห้องตามมาตรฐานการทดสอบ ANSI/ AHAM AC-135 โดยใช้ควันบุหรี่เป็นอนุภาคนำมาใช้ รายงาน CADR ของควันบุหรี่เป็น  $213 \text{ cfm}$  ( $362 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ในห้องปฏิบัติการแรก และ  $231 \text{ cfm}$  ( $392 \text{ m}^3/\text{h}$ ) จากห้องปฏิบัติการที่สอง ความแตกต่างของประสิทธิภาพน่าจะเกิดจากการตั้งค่าและความแตกต่างในการวัด

## B. การจำลองเชิงตัวเลข

การจำลอง CFD ดำเนินการโดยใช้แพลตฟอร์ม OpenFOAM-2012 โดย Eulerian–Lagrangian framework สำหรับการจำลองเฟสของอนุภาคก๊าซ ในการจำลองจะมีใช้ Reynolds-averaged Navier–Stokes (URANS) ที่ไม่เสถียร แบบจำลองแรงเฉือนที่ไม่คงที่โดยปริยาย kx turbulence model ใช้กับการปรับเปลี่ยนตัวเลข Reynolds ต่ำ เพื่อจำลองกระแสความปั่นป่วน ซึ่งเคยใช้ในการศึกษาก่อนหน้านี้เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของละอองลอยจากกิจกรรมระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ การไหลของอากาศคำนวณโดยใช้ตัวแก้ไขแบบบีบอัดเพื่อ จำลองแรงลอยตัวตามสมการต่อไปนี้:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U}) &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) &= -\nabla p_{\text{rgh}} - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \nabla \left( \frac{\rho_f}{\rho_0} \right) + \nabla \cdot (2\nu_{\text{eff}} D(\mathbf{U})), \\ \frac{\partial \rho_f h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} h) &= \nabla \alpha_{\text{eff}} \nabla h \rho_f + \frac{\partial p}{\partial t}.\end{aligned}$$

ในสมการ  $\rho_f$  คือความหนาแน่นของของเหลว

$\mathbf{U}$  แทนความเร็วการไหล

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  คือ ความเร่งแรงโน้มถ่วง

$\mathbf{x}$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง

$\nu_{\text{eff}}$  คือ ความหนืดไคน์เมตริก

$\rho_0$  คือ ความหนาแน่นอ้างอิงของของไหลที่อุณหภูมิอ้างอิง  $T_0$

$T_0, \alpha_{\text{eff}}$  เป็นตัวแทนของการกระจายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ

$D(\mathbf{U}) = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)$  คืออัตราของเทนเซอร์ความเครียด

$p$  คือสนามความดัน ความดันภายใต้ assumption ของการประมาณ Boussinesq,  $p_{\text{rgh}}$  กำหนดเป็น

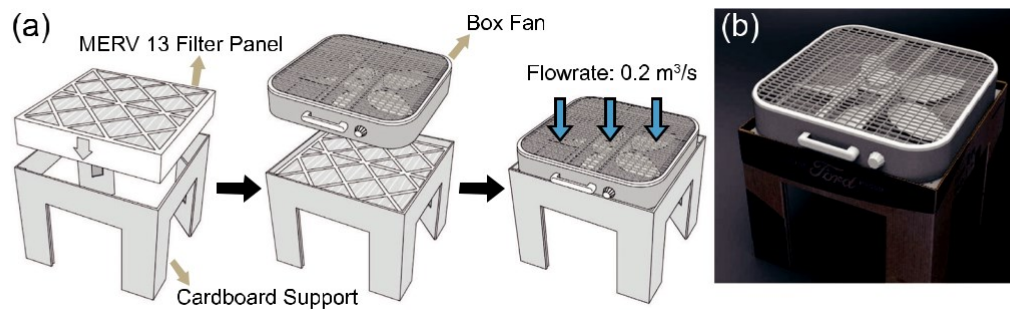
$$p_{\text{rgh}} = (p - \rho_f \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) / \rho_0.$$

ในสมการข้างต้น ความหนาแน่นของของเหลว  $\rho_f$  คำนวณจากสมการต่อไปนี้:

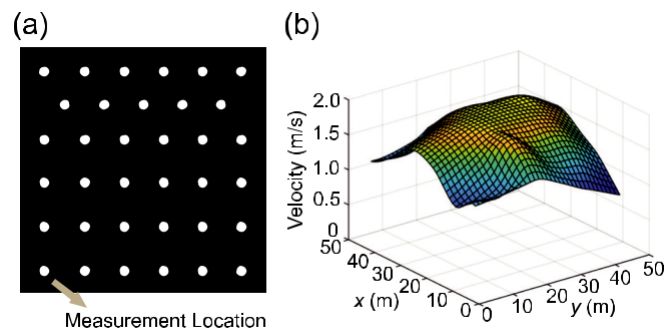
$$\rho_f = \rho_0 [1 - \beta \cdot (T_f - T_0)].$$

ในสมการ  $\beta$  คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงปริมาตร และ  $T_f$  คืออุณหภูมิของไหล

เพื่อจัดการกับเงื่อนไขการพาความร้อน มีการใช้รูปแบบเงื่อนไขลำดับที่สอง สำหรับเงื่อนไขการแพร่กระจาย ใช้แนวทางลำดับที่สองแบบเกาส์เชิงเส้น สำหรับข้อต่อของแรงดันและความเร็ว ใช้ความดันโดยปริยายกับการแยกตัวดำเนินการ (PISO) algo-rithm ค่าตกค้างต่ำสุดสำหรับการบรรจบกันของแรงดันและความเร็วคือ  $10^{-8}$  และ  $10^{-12}$  ตามลำดับ วิธีความแตกต่างแบบจำกัดของ Crank–Nicolson อันดับสองใช้สำหรับโดเมนเวลา ใช้ขั้นตอนเวลาที่ปรับได้กับจำนวน courant สูงสุด 0.7



รูปที่. 1. (a) แผนผังแสดงองค์ประกอบและขั้นตอนการประกอบกล่องพัฒนกรองอากาศที่ออกแบบโดยฟอร์ด (b) รูปถ่ายของกล่องพัฒนเครื่องฟอกอากาศ



รูปที่. 2. (a) แผนผังแสดงตำแหน่งของการวัดความเร็วลมที่ใช้เพื่อกำหนดลักษณะสภาวะการไหลเข้าของกล่องกรองอากาศแบบพัฒน (b) โปรไฟล์ความเร็วขาเข้าของเครื่องฟอกอากาศที่ได้จากการวัดความเร็วลม

สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค จะใช้แนวทาง one-way coupled Eulerian–Lagrangian เพื่อทำนายการสะสมและการกระจายตัวของแต่ละอนุภาค อนุภาคจะถือว่าเป็นทรงกลม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคกับอนุภาคจะถูกละเว้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกติดตามโดยใช้การรวมเวลาของกฎข้อที่สองของนิวตัน การเคลื่อนที่เชิงการแปลของแต่ละอนุภาคควบคุมโดยสมการ Maxey–Riley ในการกำหนดความเร็วของอนุภาค  $u_iP$  และตำแหน่ง  $x_iP$  สมการดังกล่าวจะได้รับการแก้ไขสำหรับแต่ละอนุภาค ซึ่งกำหนดโดย

$$\frac{d\mathbf{x}_{i,p}}{dt} = \mathbf{u}_{i,p},$$

$$m_{i,p} \frac{d\mathbf{u}_{i,p}}{dt} = F_i^D + F_i^L + F_i^{BM} + F_i^G.$$

ในสมการ  $i$  คือรหัสอนุภาค  $\mathbf{x}$  คือความเร็วอนุภาค

$m_p$  คือ มวลอนุภาค

$F^D$  คือ แตนแรงลาก

$F^L$  คือ แรงยก

$F^G$  คือ แรงโน้มถ่วง

$F^{BM}$  คือ แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน แรงลากใช้รูปแบบต่อไปนี้:

$$F^D = \frac{1}{8} C_D \pi d_p^2 |\vec{u}_f - \vec{u}_p| (\vec{u}_f - \vec{u}_p).$$

ในสมการ  $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$u_f$  คือ ความเร็วของของไหล ค่าสัมประสิทธิ์การลาก  $C_D$  ถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้:

$$C_D = \begin{cases} 0.424 Re, & Re > 1000, \\ \frac{24.0}{Re} \left( 1 + \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}} \right), & Re \leq 1000. \end{cases}$$

แรงยกมีรูปแบบ

$$F^L = \frac{2K\nu^{\frac{1}{2}}d_{ij}}{\frac{\rho_p}{\rho_f}d_p(d_{lk}d_{kl})^{\frac{1}{4}}} (\vec{u}_p - \vec{u}_f).$$

ในสมการ  $K = 2:594$  คือสัมประสิทธิ์คงที่ของแรงยกของ Saffman,  $\nu$  คือความหนืดจลนศาสตร์

$\rho_p$  คือความหนาแน่นของอนุภาค ความหนาแน่นของน้ำใช้สำหรับ  $\rho_p$  เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่เป็นน้ำ

อัตราการเปลี่ยนรูป rate tensor  $d_{ij}$  ถูกกำหนดเป็น

$$d_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}).$$

แรงเหนี่ยวนำการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนมีรูปแบบดังต่อไปนี้:

$$F^{BM} = m_p G_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}},$$

โดยที่  $G_i$  เป็นค่าศูนย์ ค่าความแปรปรวนของหน่วยอิสระ Gaussian ran-dom number

$\Delta t$  คือขั้นตอนเวลาที่ใช้ในการจำลอง และ

$$S_0 = \frac{216 \nu k T}{\pi^2 \rho_f d_p^5 \left( \frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^2}.$$

ในสมการ  $k = 1.38 \cdot 10^{23}$  J=K คือค่าคงที่ Boltzmann

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของของไหล ในที่สุด แรงโน้มถ่วง รวมทั้งผลของการลอยตัวคือ

$$F^G = m_p g \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right).$$

ในการจำลอง จะพิจารณาผลกระทบของความปั่นป่วนโดยการสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้แบบจำลองสุ่ม โมเดลการเดินสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (DRW) ใช้สำหรับการคำนวณสุ่มของ Lagrangian อนุภาคถูกสร้างขึ้นเพื่อโต้ตอบกับสนามความเร็วชั่วขณะ สนามความเร็วผลลัพธ์จะใช้สำหรับการจำลองการกระจายตัวของอนุภาค ด้วยวิธีนี้ จะพิจารณาผลกระทบของความปั่นป่วนของการไหลในการจำลอง ในการใช้งานฟังก์ชันนี้ จะใช้โมเดล StochasticDispersionRAS ที่มีอยู่ใน OpenFOAM library ของการกระจายอนุภาค Lagrangian

ปฏิกิริยาของอนุภาคมีหลายรูปแบบ เฉพาะปฏิกิริยาระหว่างผนังอนุภาค เช่น การสะสมและการย้อนกลับเท่านั้นที่จะถูกพิจารณาในการจำลอง ฟังก์ชันการโต้ตอบกับผนังมาตรฐานที่ OpenFOAM จัดเตรียมไว้ให้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและแผ่นแปะผนัง ซึ่งได้รับการตรวจสอบ



ในการศึกษาก่อนหน้านี้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง และได้ใช้สำหรับการศึกษาการจำลองประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 1 สรุปกรณีการจำลองทั้งหมดที่นำเสนอในการศึกษาปัจจุบัน รวมถึง (i) กรณีพื้นฐาน (กรณี A และ B) (ii) กรณีเพื่อประเมินผลกระทบของการวางตำแหน่งของเครื่องฟอกอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงาน (กรณี A1–A4 กรณี B1 –B4 และกรณี A12 และ B12) (iii) กรณีสำหรับประเมินทิศทางการไหลของเครื่องฟอกอากาศเกี่ยวกับประสิทธิภาพ (กรณี FA2 และ FB2) (iv) กรณีที่มีการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นสำหรับเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้เครื่องฟอกอากาศ (กรณี VA และ VB), (v) กรณีเพื่อประเมินผลกระทบของขนาดห้องต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศ (กรณี LB, LB2, LB12 และ LB22) และ (vi) กรณีที่มีผลกระทบด้านความร้อน (กรณี TA2, TB2, TA2H และ TB2H) โดยเฉพาะสำหรับกรณีพื้นฐาน โดเมนการคำนวณจะถูกเลือกเพื่อจำลองห้องเรียนขนาด 10.5 x 3.0 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3(a) ห้องเรียนมีเครื่องระบายอากาศแนวนอน (HUV) ที่ลดความซับซ้อนของรูปทรงลูกบาศก์ 1.5 x 0.8 x 0.3 m<sup>3</sup> วางไว้ข้างผนัง [รูปที่ 3(ข)]. ขนาดทางเข้า [พื้นที่สีเขียวในรูปที่ 3 (b)] และทางออก [พื้นที่สีแดงในรูปที่ 3 (b)] ของ HUV คือ 1.2 x 0.05 m<sup>2</sup> และ 1.2 x 0.1 m<sup>2</sup> ตามลำดับ เงื่อนไขขอบเขตแรงดันทางออกถูกนำไปใช้ที่แผ่นแปะทางเข้า HUV ในขณะที่เงื่อนไขขอบเขตของอัตราการไหลของมวลคงที่ถูกใช้สำหรับช่องทางออก อัตราการไหลของ HUV ตั้งไว้ที่ 325 cfm (0.15 m<sup>3</sup>/s เท่ากับ 2 ACH สำหรับขนาดห้องเรียนจำลอง) พร้อมประสิทธิภาพการกรอง 50% ซึ่งใช้เพื่อลดความซับซ้อนในการเติมอากาศบริสุทธิ์ภายนอกในปริมาณที่เท่ากับอากาศที่ปนเปื้อนแล้วถูกทำความสะอาด อุณหภูมิอากาศในห้องถูกตั้งไว้ที่ 24 °C อุณหภูมิการไล่ระดับเป็นศูนย์และสภาวะขอบผนังกันลื่นถูกนำไปใช้กับผนังทั้งหมดในโดเมน ผู้สอนที่ไม่มีอาการซึ่งเรียกว่าผู้แพร่เชื้อต่อจากนี้ จะอยู่ด้านหน้า (ตำแหน่ง A) หรือตรงกลาง (ตำแหน่ง B) ของห้องเรียน การจำลองดำเนินการในระยะเวลา 50 นาทีด้วยการติดตามอนุภาคอย่างต่อเนื่องที่ 110 อนุภาคต่อวินาที โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 ไมครอน ซึ่งแสดงถึงผู้สอนที่ไม่มีอาการซึ่งบรรยาย 50 นาที ขนาดอนุภาคเริ่มต้นด้วยการกระจาย Rosin-Rammler โดยมีขนาดอนุภาคต่ำสุด สูงสุด และอายุเฉลี่ยซึ่งพิจารณาจากการศึกษาก่อนหน้านี้ อนุภาคนาโนใหญ่ทั้งหมดจะถือว่าระเหยกลายเป็นสารตกค้างที่มีขนาดจำกัด และค่าจากการทดลองจะถือว่าเป็นขนาดของอนุภาคที่เหลือ

ในการทดสอบผลกระทบของการวางตำแหน่งเครื่องฟอกอากาศ ใช้ลูกบาศก์ขนาด 0.5x0.5x0.2 m<sup>3</sup> ซึ่งอยู่เหนือพื้นดิน 0.3 เมตร เพื่อสร้างแบบจำลองกล่องพัสดเครื่องฟอกอากาศในการจำลอง [รูปที่ 3(ค)]. พื้นผิวด้านบนเป็นทางเข้าของเครื่องฟอกอากาศ โปรไฟล์ถูกตั้งค่าตามการวัดที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ ดังแสดงในรูปที่ 3(a) ตำแหน่งที่ติดเชื้อสองแห่ง (เช่น ตำแหน่ง A และ B) และตำแหน่งที่ฟอกอากาศสี่แห่ง ได้แก่ ที่มุมด้านหน้าของห้องเรียน (จุดที่ 1) กลางห้องเรียนใกล้ HUV (จุดที่ 2) และอยู่ห่างจาก HUV (จุดที่ 3) และที่ด้านหลังห้องเรียน (จุดที่ 4) มีการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดแปดกรณี ในการศึกษาผลกระทบของทิศทางการไหลของ

เครื่องฟอกอากาศ จะรวมกรณีเพิ่มเติมสองกรณีซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งการติดตั้งสองตำแหน่งและเครื่องฟอกอากาศที่วางอยู่กลางห้องเรียนใกล้เคียงกับ HUV พร้อมการออกแบบการไหลขึ้นด้านบน (ตรงกันข้ามกับกรณีก่อนหน้านี้) สำหรับการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้น อัตราการไหลของ HUV จะเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอากาศที่มีประสิทธิภาพจาก 2 ACH เป็น 5 ACH โดยไม่มีการเพิ่มเครื่องฟอกอากาศในการจำลอง เพื่อทดสอบผลของขนาดห้องเพิ่มเติม เราจำลองสถานการณ์โดยใช้โดเมนการคำนวณที่  $10 \times 10 \times 3$  เมตร<sup>3</sup> ซึ่งเพิ่มขนาดของสถานการณ์อื่นๆ เป็นสองเท่า ในการจำลองนี้ อัตราการไหลของ HUV ยังเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเพื่อรักษาอัตราแลกเปลี่ยนอากาศไว้ที่ 2 ACH เพื่อการเปรียบเทียบที่ดีขึ้น สุดท้าย ในกรณีศึกษาผลกระทบจากความร้อน ลูกบาศก์ขนาด  $1.75 \times 0.5 \times 0.25$  เมตร<sup>3</sup> ถูกใช้เพื่อแสดงเป็นตัวอย่างของระบายความร้อนแบบง่าย กำหนดอุณหภูมิพื้นผิวของหุ่นไว้ที่  $30^\circ\text{C}$  การไหลของทางเดินหายใจตั้งไว้ที่  $34\text{ C}, 43$  ในขณะที่อุณหภูมิของการไหลของ HUV อยู่ที่  $44^\circ\text{C}$  อัตราการไหลของเครื่องระบายอากาศอยู่ที่  $2 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$  ตามข้อมูลการทดลอง สำหรับทุกกรณีการจำลอง

เพื่อระบุลักษณะความเสี่ยงของการพบอนุภาคที่มีไวรัสในตำแหน่งที่กำหนด เราใช้ดัชนีความเสี่ยงที่แนะนำโดย Shao et al.,<sup>29</sup> หมายถึง Irisk คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่ผ่านตำแหน่งที่กำหนดตลอดระยะเวลาของการจำลองและสามารถกำหนดเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งเชิงพื้นที่  $x$  ด้านล่าง

$$I_{\text{risk}}(x) = \sum P_i(x),$$

โดยที่  $P_i$  ถูกกำหนดเป็น

$$P_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{the first time the } i\text{th particle appears in a volume} \\ & \Delta V_B \text{ centered at location } x, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

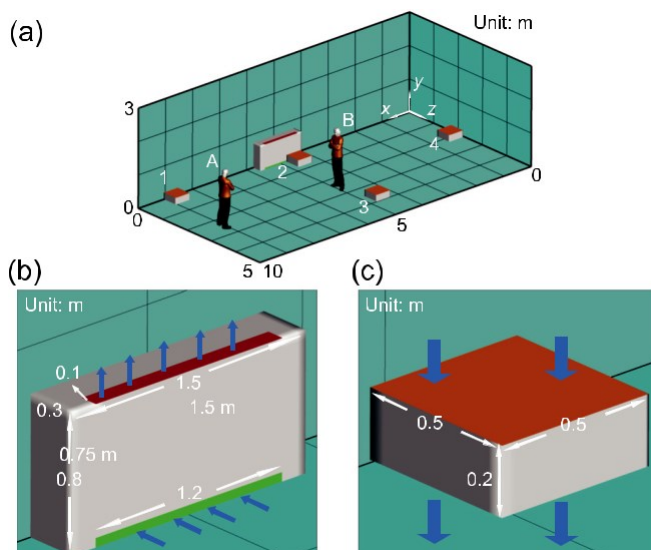
1 = เวลาที่อนุภาค  $i$ th ปรากฏในปริมาตร  $\Delta V_B$  ครั้งแรกที่มีศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่ง  $x$ ;

0 = กรณีอื่น

เห็นได้ชัดว่าการเลือก DVB มีอิทธิพลต่อค่าสัมบูรณ์ของ Irisk เราเลือก DVB ให้มีขนาด  $2 \times 2 \times 2\text{ cm}^3$  ซึ่งใกล้เคียงกับโซนการหายใจในการทดลองภาพ schlieren ที่ดำเนินการใน Shao et al.<sup>29</sup> เป็นที่น่าสังเกตว่าโซนการหายใจและ DVB ที่สอดคล้องกันอาจแตกต่างกันอย่างมากภายใต้สภาวะการหายใจที่แตกต่างกัน และในปัจเจกบุคคลต่างมีอิทธิพลต่อ Irisk ดังนั้นเราจึงอาศัยการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ใน Irisk เป็นหลักในการประเมินความผันแปรของความเสี่ยงในการแพร่เชื้อทางอากาศภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังทำการหา Irisk เฉลี่ยเชิงพื้นที่ (เช่น Irisk) ในแต่ละทิศทาง ( $x$ ,  $y$  หรือ  $z$ ) เพื่อแสดงถึงการกระจายแบบ 3 มิติ ของ Irisk ในอากาศ

เช่นเดียวกับการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า อนุภาคส่วนใหญ่ในการจำลองมีต่ำกว่า 5 ลูเมน อนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 5 ลูเมน โดยทั่วไปมีจำนวนสโตนน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นจึงให้ผลการตรวจสอบที่เพียงพอเพื่อติดตามความปั่นป่วนในระดับที่เล็กที่สุดที่แก้ไขได้ในการจำลอง นอกจากนี้งานจำลองที่นำเสนอยังเน้นที่ภารกิจการส่งผ่านทางอากาศที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคขนาดเล็ก (<5 ลูเมน) ดังนั้น การใช้ Irisk ในการหาระดับความเสี่ยงนั้นแม่นยำเนื่องจากค่า Irisk นั้นได้รับอิทธิพลจากการไหลของอากาศในอวกาศเป็นหลัก

สำหรับกรณีการจำลองทั้งหมด จะใช้ hex-core meshes ที่สร้างจาก ICEM 18.0 ในการกำหนดขนาดเมชที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง เราได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับกรณีจำลอง I โดยใช้ขนาดเมชสองขนาด ( $1.5 \times 10^6$  และ  $2.7 \times 10^6$  เซลล์) ทั้งแบบหยาบและแบบละเอียดให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงใช้  $1.5 \times 10^6$  เซลล์สำหรับกรณีการจำลองที่เหลือที่เกี่ยวข้องกับผลของการจัดวาง ผลของทิศทางการไหล ผลของการระบายอากาศ และพื้นฐานที่สอดคล้องกันกับการตั้งค่าที่คล้ายกัน สำหรับการจำลองที่ทดสอบผลกระทบของขนาดห้อง ผลรวมจำนวนเมชจะเพิ่มเป็นสองเท่าสำหรับโดเมนการคำนวณขนาดใหญ่ เพื่อรักษาความละเอียดของเมชไม่ให้เปลี่ยนแปลง สำหรับการศึกษาผลกระทบจากความร้อน จำนวนตาข่ายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเป็น  $3.2 \times 10^6$  เพื่อให้แน่ใจว่ามีความละเอียดเพียงพอในการแก้ปัญหาความร้อนจากตัวแปรเชื้อ ความละเอียดของกริดจะเท่ากับ 5 ซม. ในทิศทางสามมิติทั้งหมดในโดเมนการคำนวณ ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 1 ซม. ใกล้กับเครื่องระบายอากาศในแนวนอนและเครื่องกรองอากาศ ตลอดจนตำแหน่งของการติดตั้งอนุภาค สำหรับกรณีการจำลองที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากความร้อน ความละเอียดใกล้พื้นผิวจะเพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.5 ซม. ทางเลือกของการแก้ปัญหากริดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ การทดสอบความเป็นอิสระของกริดและการทดลองในการศึกษาที่ผ่านมาของเรา เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถดักจับพฤติกรรมกริดที่ต้องการได้สำเร็จ เวลาคำนวณโดยทั่วไปสำหรับการจำลอง 1 ชั่วโมงคือประมาณหนึ่งสัปดาห์โดยใช้ระบบประมวลผลประสิทธิภาพสูง (HPC) ที่มี 256 คอร์



รูปที่. 3. แผนผังแสดง (a) โดเมนการคำนวณและตำแหน่งของตัวแปรเชื้อและพัดลมระบายอากาศแบบกล่องในห้องเรียน (b) การติดตั้งเครื่องช่วยหายใจแบบแนวนอน (HUV) และ (c) แบบจำลองของพัดลมระบายอากาศแบบกล่อง น้ำยาทำความสะอาดที่ใช้ในการจำลอง

**ตารางที่ 1** สรุปการตั้งค่ากรณีจำลองทั้งหมดและการกระจายอนุภาค (ละอองลอย) ที่เกี่ยวข้องหลังจากช่วงเวลาการจำลอง 50 นาที โดยการกระจายอนุภาคจะรวมเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่สกัดโดยเครื่องฟอกอากาศ โดยเครื่องช่วยหายใจแบบแนวนอน (HUV) ที่ลอยอยู่ในอากาศ และเกาะที่ผนังหลังจากการจำลอง 50 นาที

		สถานที่ติดเชื้อ		สกัดโดยเครื่องฟอกอากาศ	สกัดโดยเครื่องระบายอากาศ	คงค้าง	สะสมที่ผนัง
			ตำแหน่งเครื่องฟอกอากาศ		(%)	(%)	(%)
เริ่มต้น	Case A	A	NA	NA	5	15	80
	Case B	B	NA	NA	8	13	79
ตำแหน่งจัดวาง	Case A1	A	1	43%	3	3	51
	Case A2	A	2	41%	4	7	48
	Case A3	A	3	19%	6	9	66
	Case A4	A	4	14%	5	12	69
	Case B1	B	1	24%	2	10	64
	Case B2	B	2	75%	2	1	22
	Case B3	B	3	27%	6	7	60
	Case B4	B	4	24%	6	7	63
	Case A12	A	1 and 2	53%	1	2	44
	Case B12	B	1 and 2	84%	2	1	13
ทิศทางการไหล	Case FA2	A	2 <sup>a</sup>	24%	4	6	66
	Case FB2	B	2 <sup>a</sup>	16%	3	8	73

สถานที่ติดตั้ง				สกัดโดยเครื่องฟอกอากาศ	สกัดโดยเครื่องระบายอากาศ	คงค้าง (%)	สะสมที่ผนัง (%)
ตำแหน่งเครื่องฟอกอากาศ					(%)		
ผลของการระบายอากาศ	Case VA	A	NA	NA	5	12	83
	Case VB	B	NA	NA	8	12	80
ผลของขนาดห้อง	Case LB	B	NA	NA	11	14	75
	Case LB2	B	2	20%	10	8	62
	Case LB22	B	2 and 2	35%	5	8	52
	Case LB12	B	1 and 2	28%	12	6	54
ผลของอุณหภูมิ	Case TA2	A	2	41%	3	9	41
	Case TB2	B	2	65%	1	4	30
	Case TA2H	A	2 <sup>b</sup>	26%	3	10	61
	Case TB2H	B	2 <sup>b</sup>	78%	1	1	20

A หมายถึงเครื่องฟอกอากาศที่มีการออกแบบการไหลขึ้น

b หมายถึงการวางเครื่องฟอกอากาศเหนือพื้น 1.3 ม.

### III ผลการศึกษา

ในส่วนนี้ เราจะนำเสนอผลของกรณีจำลองที่แสดงผลกระทบของการวางตำแหน่งและทิศทางการไหลของเครื่องกรองอากาศแบบพัดลมต่อการกำจัดอนุภาคและการกระจายความเสี่ยงในการติดเชื้อในอากาศภายใต้การตั้งค่าห้องเรียนจำลอง

นอกจากนี้ เราจะประเมินประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศของเราเพิ่มเติมสำหรับการลดความเสี่ยงในอากาศผ่านการเปรียบเทียบกับกรณีจำลองโดยใช้การระบายอากาศที่ปรับปรุงแล้วเท่านั้น (ไม่มีเครื่องฟอกอากาศไว้ในห้อง) สุดท้าย เราจะตรวจสอบอิทธิพลของขนาดห้องที่ใหญ่ขึ้นและการรวมผลของความร้อนเข้ากับผลการจำลองของเรา ผลลัพธ์ซึ่งรวมถึงเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่สกัดโดยเครื่องฟอกอากาศและ HUV อนุภาคแขวนลอยในอากาศ และการสะสมบนพื้นผิวหลังจากการจำลอง 50 นาที สรุปไว้ในตารางที่ 1

#### A. ผลของการจัดวางเครื่องฟอกอากาศ

ผลของการจัดวางเครื่องกรองอากาศแบบกล่องต่อการสกัดอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ที่สอดคล้องกันของความเสี่ยงในการแพร่กระจายของอากาศในห้องเรียนจะได้รับการทดสอบก่อนเพื่อกำหนดตำแหน่งการจัดวางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้การตั้งค่าปัจจุบัน เมื่อเชื้ออยู่หน้าห้องเรียน (รูปที่ 4) กรณีจำลองที่ไม่มีเครื่องฟอกอากาศ [รูปที่. 4(a) ทำหน้าที่เป็นค่าพื้นฐาน] พบว่าละอองลอยกระจายไปทั่วทั้งห้องเรียน ระบุโดยภูมิภาคของ I เสี่ยง 1 (เส้นชั้นความสูงสีเขียว หมายถึง บริเวณที่มีความเสี่ยงสูง) ขยายออกไปจนสุดทางด้านหลังห้องเรียน ตามลำดับ ที่ระดับการหายใจ พื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง (กำหนดเป็น Irisk 10 เส้นขอบสีเขียว) ครอบคลุมเกือบครึ่งหนึ่งของห้องเรียน โปรดทราบว่าบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงมีการกำหนดไว้ในความหมายที่สัมพันธ์กันและจำกัดความนี้ถูกใช้อย่างสม่ำเสมอสำหรับกรณีการจำลองทั้งหมดที่มีอยู่ในการศึกษาปัจจุบัน ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ค่าสัมบูรณ์ของ Irisk สามารถได้รับอิทธิพลจากจำกัดความของโซนการหายใจ และค่าของ Irisk จะใช้สำหรับการเปรียบเทียบในกรณีที่แตกต่างกันเท่านั้น

เมื่อวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้ตัวแพร่เชื้อ [รูปที่. 4(b)] การแพร่กระจายของละอองลอยถูกจำกัดไว้เกือบครึ่งหนึ่งของห้องเรียน (กล่าวคือ ตำแหน่งที่สอดคล้องกับ I Risk 1) ดังนั้นในระดับการหายใจ บริเวณที่มีความเสี่ยงสูงจะถูกจำกัดให้มีพื้นที่ 1 เมตรรอบ ๆ ผู้ติดเชื้อ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องฟอกอากาศที่เคลื่อนเข้าใกล้ HUV กลางห้องเรียน [รูปที่ 4(c)] แม้ว่าประสิทธิภาพในแง่ของการลดความเสี่ยง I และ Irisk ที่ระดับการหายใจลดลง แต่ความเสี่ยง I และ Irisk ยังคงลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐาน เมื่อเลื่อนเครื่องฟอกอากาศออกจาก HUV ตรงกลาง [รูปที่ 4(d)] ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศลดลงด้วยขยายพื้นที่ของภูมิภาคที่มีความเสี่ยงสูงทั้งในแผนที่ I Risk และ Irisk สุดท้าย วางเครื่องฟอกอากาศไว้ด้านหลังห้องเรียน [รูปที่. 4(e)] แสดง

ประสิทธิภาพต่ำสุดในการกำจัด I Risk และ Irisk อาจเป็นเพราะเครื่องฟอกอากาศอยู่ห่างจากทั้งตัวปล่อยเชื้อ และ HUV เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีจำลองเครื่องฟอกอากาศอื่นๆ ทั้งหมด ในทำนองเดียวกันแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันจะสังเกตได้ในแง่ของเปอร์เซ็นต์ของละอองลอยที่สกัดโดยเครื่องฟอกอากาศและละอองลอยจากกรณีการจำลองทั้งหมดที่มีตำแหน่งเครื่องฟอกอากาศต่างกัน (ตารางที่ 1) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับตัวเชื้อ จะดึงละออง 43% ออกมาโดยมีเพียง 3% ที่ลอยอยู่ในอากาศหลังจากผ่านไป 50 นาที เมื่อเทียบกับละอองลอย 15% ที่แขวนอยู่ในกรณีพื้นฐาน การเคลื่อนย้ายเครื่องฟอกอากาศไปใกล้กับ HUV จะรักษาอัตราการฟอกอากาศในระดับเดียวกันกับที่ละอองลอย 7% แขวนอยู่ สำหรับตำแหน่งอีกสองตำแหน่ง อัตราการฟอกของเครื่องฟอกอากาศลดลงต่ำกว่า 20% แต่เปอร์เซ็นต์ของละอองลอยยังคงต่ำกว่ากรณีพื้นฐาน สำหรับกรณีการจำลองทั้งหมด พบว่ามีละอองลอยจำนวนมาก (Z50%) สะสมบนพื้นผิวหลังจาก 50 นาที

เมื่อวางตัวแพร่เชื้อไว้กลางห้องเรียน (รูปที่ 5) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีจำลองที่สอดคล้องกัน (กรณี A) ในรูปที่ 4 กรณีพื้นฐานแสดงการลดลงของการแพร่กระจายของละอองลอย [รูปที่ 5(a)] และเปอร์เซ็นต์ของละอองลอยลดลง (เช่น จาก 15% ในกรณี A เป็น 13% ในกรณี B) และการเพิ่มขึ้นของละอองลอยที่สกัดโดย HUV (เช่น จาก 5% ในกรณี A เป็น 8 % ในกรณี B) มีความเป็นไปได้ที่เชื้อจะอยู่ใกล้ HUV ในทำนองเดียวกัน เนื่องจากการย้ายตำแหน่งของตัวแพร่เชื้อ ตำแหน่งที่เครื่องฟอกอากาศมีประสิทธิภาพดีที่สุดจึงถูกเปลี่ยน (จากกรณี A1) ไปอยู่ตรงกลางใกล้กับ HUV (กรณี B2) ที่ตำแหน่งนี้ เนื่องจากอยู่ใกล้กับทั้งตัวแพร่เชื้อและ HUV เครื่องฟอกอากาศสามารถสกัดละอองลอยได้ 75% และปล่อยละอองลอยไว้เพียง 1% หลังจาก 50 นาที (ตารางที่ 1) และจำกัดพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงอย่างเหมาะสม 1 เมตร รอบ ๆ ตัวแพร่เชื้อ [รูปที่. 5(ค)]. เป็นที่น่าสนใจว่าการที่เครื่องฟอกอากาศถูกย้ายออกจาก HUV แต่ยังคงอยู่ในบริเวณใกล้เคียงของตัวแพร่เชื้อ (กรณี B3) ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องลดลงอย่างมากด้วยการฟอกของเครื่องฟอกอากาศเหลือ 25% และเปอร์เซ็นต์การแขวนลอยสูงถึง 7% ส่งผลให้ การแพร่กระจายที่กว้างขึ้นของละอองลอยตามที่แสดงในแผนที่ I risk และ Irisk ที่ระดับการหายใจ [รูปที่ 5(d)] ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศที่อยู่ด้านหน้า [กรณี B1, รูปที่ 5(b)] และด้านหลัง [กรณี B4, รูปที่ 5(e)] ของห้องเรียนมีความคล้ายคลึงกัน แต่ต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับตำแหน่งก่อนหน้านี้สองตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม ระดับความเสี่ยงสำหรับทั้งสองกรณีนี้ยังคงต่ำกว่าสำหรับกรณีพื้นฐานอย่างมาก [รูปที่ 5(a)] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้เคียงของผู้ติดเชื้อ

จากการทดสอบที่กล่าวถึงข้างต้นเกี่ยวกับผลกระทบของการวางตำแหน่งเครื่องฟอกอากาศ สามารถสรุปได้ว่าการวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับตัวแพร่เชื้อ (เช่น กรณี A1 และ B2) จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเสมอ การเปรียบเทียบสองกรณีนี้กับกรณีพื้นฐานที่สอดคล้องกัน [รูปที่ 6(a) และ 6(d)] การเพิ่มเครื่องฟอกอากาศสามารถลดระดับ Irisk ที่ระดับการหายใจทั่วทั้งห้องเรียนได้ ยกเว้นบริเวณใกล้ๆ (<1 ม.) ตัวแพร่เชื้อหรือเครื่องฟอกอากาศเนื่องจากทิศทางไหลของเครื่องฟอกอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อไม่ทราบตำแหน่งของผู้

แพร่เชื้อซึ่งเป็นสถานการณ์ทั่วไปในทางปฏิบัติ การวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับ HUV ที่มีอยู่จะเหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหาค่าเฉลี่ยการกระจายของละอองลอยสำหรับตำแหน่งที่ติดเชื้อทั้งสอง (รูปที่ 4 และ 5) ตำแหน่งใกล้กับ HUV ตรงกลางจะทำให้ได้การฟอกของเครื่องฟอกอากาศสูงสุด (58%) และเปอร์เซ็นต์ต่ำสุดของละอองลอย (4%) จากทั้งสี่ตำแหน่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อผู้แพร่เชื้ออยู่ด้านหน้า การวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับ HUV จะทำให้พื้นที่บริเวณที่มีความเสี่ยงสูงทั่วทั้งห้องในระดับการหายใจลดลง [รูปที่ 6(b)].

นอกจากนี้ เพื่อแสดงกลไกทางกายภาพที่อยู่ภายใต้ประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงอย่างมากของเครื่องฟอกอากาศเมื่อเคลื่อนจากใกล้ไปยังไกลจาก HUV (แต่ยังคงอยู่ในบริเวณใกล้เคียงของผู้ติดเชื้อ) เราจะทดสอบสนามการไหลและรูปแบบการสะสมของละอองลอยสำหรับกรณี B2 และ B3 เปรียบเทียบกับกรณี B (รูปที่ 7) หากไม่มีเครื่องฟอกอากาศรูปแบบการทำให้อากาศไหลเป็นเส้นตรงที่ระนาบตรงกลาง y-z (ตรงข้ามกับตัวแพร่เชื้อและตรงกลาง HUV) จะแสดงโหนดการหมุนเวียนขนาดใหญ่ที่อยู่ห่างจาก HUV และอยู่ติดกับผนังด้านขวา [รูปที่ 7(a) เน้นด้วยเหลี่ยมสีแดง] การหมุนเวียนในพื้นที่ดังกล่าวทำให้เส้นทางของละอองลอยเคลื่อนไปยัง HUV นานขึ้น [แสดงโดยเส้นประสีดำในรูปที่ 7(a)] และขัดขวางการสกัดละอองลอยโดยเครื่องระบายอากาศ แต่จะเพิ่มเวลาพักของละอองลอยใกล้กับเพดานและผนังด้านขวา ซึ่งนำไปสู่การสะสมของละอองลอยบนผนังทั้งสองนี้ในระดับสูง อย่างไรก็ตามการหมุนเวียนดังกล่าวจะลดลงเมื่อวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับ HUV [กรณี B2, รูปที่ 7(b) ที่เน้นด้วยสี่เหลี่ยมสีแดง] ในทางกลับกัน พื้นระนาบใหญ่ (ประมาณ 70%) กลับถูกรอบงำโดยการไหลลงสู่เครื่องฟอกอากาศและ HUV [รูปที่ 7(b) เน้นด้วยสี่เหลี่ยมสีแดง] ซึ่งทำให้ทางเดินของละอองลอยสั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ [เส้นประสีดำในรูปที่ 7(b)] และลดเวลาที่อยู่อาศัยใกล้กับผนัง ดังนั้น การสะสมของละอองลอยบนเพดานและผนังด้านขวาจึงลดลงอย่างมากเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม เมื่อเครื่องฟอกอากาศถูกย้ายออกจาก HUV (กรณี B3) เขตการหมุนเวียนในพื้นที่ขนาดใหญ่จะผสานรวมอีกครั้งโดยจุดศูนย์กลางจะเลื่อนเข้าใกล้เพดานมากขึ้น [รูปที่ 7(c) เน้นด้วยสี่เหลี่ยมสีแดง] เมื่อเทียบกับในกรณีพื้นฐาน [รูปที่ 7(a)]. นอกจากนี้ พื้นที่การหมุนเวียนขนาดเล็กจะปรากฏขึ้นที่มุมล่างขวา ซึ่งสัมพันธ์กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างช่องการไหลของอากาศที่เหนียวหนาโดยเครื่องฟอกอากาศและการหมุนเวียนขนาดใหญ่ที่เกิดจาก HUV การหมุนเวียนเหล่านี้ขัดขวางความสามารถของละอองลอยที่ถูกส่งโดยตรงจากตัวแพร่เชื้อไปยังเครื่องฟอกอากาศ [แสดงโดยเส้นประสีดำที่ยาวและบิดเป็นเกลียวในรูปที่ 7(c)] ซึ่งลดประสิทธิภาพการทำงานลงอย่างมาก การไหลเวียนเหล่านี้ยังช่วยเพิ่มการสะสมของละอองลอย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ผนังด้านขวาใกล้กับเครื่องฟอกอากาศ

การจำลองยังดำเนินการเพื่อตรวจสอบประสิทธิผลของการลดความเสี่ยงโดยใช้เครื่องกรองอากาศแบบพัดลมหลายกลอง เราวางเครื่องฟอกอากาศหนึ่งเครื่องไว้ในแต่ละตำแหน่งทั้งสอง (เช่น ที่ด้านหน้าและกลางห้องเรียนใกล้ HUV) ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในบรรดาตำแหน่งทั้ง 4 ที่ทดสอบด้านบน และจำลองการติดเชื้อที่



ด้านหน้า [รูปที่ 8(a)] และกลางห้องเรียน [รูปที่ 8(b)]. สำหรับทั้งสองกรณี ดังแสดงในรูปที่ 9 การเพิ่มจำนวนเครื่องฟอกอากาศสามารถนำไปสู่การลดพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงในทั้งห้องเรียน (I risk) และที่ระดับการหายใจ (I<sub>risk</sub>) ดังนั้นเมื่อผู้แพร่เชื้ออยู่ด้านหน้าเพื่อเครื่องฟอกอากาศที่ดีที่สุด การวางตำแหน่ง (เช่น กรณี A1) การเพิ่มเครื่องฟอกอากาศใกล้ HUV สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของละอองลอยที่สกัดโดยเครื่องฟอกอากาศจาก 43% เป็น 53% และลดละอองลอยจาก 3% เป็น 1% (เช่น กรณี A1 เทียบกับกรณี A12) เมื่อตัวแพร่เชื้ออยู่ตรงกลางพร้อมกับเครื่องฟอกอากาศใกล้กับ HUV (เช่น เคส B2) ให้เพิ่มเครื่องฟอกอากาศที่ด้านหน้า เพิ่มการฟอกของเครื่องฟอกอากาศจาก 75% เป็น 84% และไม่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนในเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคแขวนลอย (เช่น กรณี B2 เทียบกับกรณี B12)

## B. ผลของทิศทางการไหลของเครื่องฟอกอากาศ

การออกแบบเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์แตกต่างกันไปตามผู้ผลิตและรุ่นต่างๆ บางคนใช้การออกแบบ "การไหลขึ้น" เช่น Molekule Air, Dyson Pure Cool TP04 และ Honeywell HPA600B ซึ่งเครื่องฟอกอากาศจะดูดอากาศที่ปนเปื้อนที่ด้านล่างในขณะที่ปล่อยอากาศบริสุทธิ์ที่ด้านบน การศึกษาอื่นๆ รวมถึง Oransi ERIK650A ใช้ "การไหลลง" เพื่อรวบรวมอากาศเสียที่ด้านบน แล้วปล่อยอากาศบริสุทธิ์ออกจากด้านล่าง ในการเปรียบเทียบสำหรับพัดลมกรองอากาศแบบกล่องของเรา กรณีจำลองทั้งหมดที่นำเสนอข้างต้นใช้การออกแบบการไหลลง อย่างไรก็ตาม ในการประเมินทิศทางการไหลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องกรองอากาศแบบกล่อง การจำลองเพิ่มเติมจะดำเนินการโดยใช้การออกแบบการไหลขึ้นด้านบน โดยให้พื้นผิวทางเข้าของการไหลลงจากการศึกษาครั้งก่อนเกี่ยวกับผลกระทบของตำแหน่งเครื่องฟอกอากาศ เฉพาะตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เช่น ตำแหน่งใกล้กับ HUV เท่านั้นที่ถูกเลือกสำหรับการจำลองนี้

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการออกแบบการไหลลง [รูปที่ 4(b) และ 5(b)] การออกแบบการไหลขึ้นโดยทั่วไปทำให้ประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตัวแพร่เชื้ออยู่ตรงกลางใกล้กับเครื่องฟอกอากาศ ทิศทางการไหลกลับด้านจะทำให้มีการแพร่กระจายของละอองลอยเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งเห็นได้จากการขยายตัวของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงไปยังทั้งห้องเรียนที่ระดับการหายใจ [รูปที่ 9(b)] ในทำนองเดียวกัน เปอร์เซ็นต์ของละอองลอยที่แขวนลอยจะเพิ่มขึ้นจาก 1% เป็น 8% โดยมีละอองลอยสูงชันที่เครื่องฟอกอากาศสกัดออกมา (จาก 75% เป็น 16%) ประสิทธิภาพที่ลดลงดังกล่าวแสดงออกมาจากส่วนใหญ่ของพื้นที่สีแดงในแผนที่ DI<sub>risk</sub> ที่ระดับการหายใจ [รูปที่ 10(b)]. ในการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพที่ลดลงจะรุนแรงน้อยกว่าเมื่อผู้ติดเชื้ออยู่หน้าห้องเรียนห่างจากเครื่องฟอกอากาศและละอองลอยจะอยู่ใกล้กับระดับของการไหลลง อย่างไรก็ตามพบว่ามีลดลงอย่างมากของละอองลอยที่สกัดโดยตัวทำความสะอาด (จาก 41% เป็น 24%) โดยมีการแพร่กระจายของละอองลอยที่สูงขึ้น [รูปที่ 9(c)].

เพื่ออธิบายกลไกทางกายภาพที่อยู่เบื้องหลังการลดประสิทธิภาพที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการไหลเข้าเราทดสอบสนามการไหลและรูปแบบการตกสะสมของละอองลอยสำหรับกรณี FB2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี B2 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อการออกแบบการไหลขึ้นด้านบน ระบายส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยการไหลขึ้นจาก HUV และเครื่องฟอกอากาศ (รูปที่ 11 เน้นด้วยมุมสีเหลี่ยมสีแดง) แทนที่จะถูกรอบจําโดยการไหลไปยัง HUV และเครื่องฟอกอากาศในกล่องออกแบบด้านล่าง [รูปที่. 7(ข)] ลานพื้นที่การไหลดังกล่าวเปลี่ยนไปเนื่องจากการพลิกกลับของทิศทางการไหลทำให้มีการขยายเส้นทางของละอองลอยที่ถูกสกัดอย่างมีนัยสำคัญ (เส้นประสีดำในรูปที่ 11) และเพิ่มเวลาที่อยู่ใกล้กับผนังทำให้การสะสมของละอองลอยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (จาก 22 % ถึง 73%) ตามลำดับ การสะสมของละอองลอยบนเพดานและผนังด้านขวาก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน (รูปที่ 11)

### C. เพิ่มประสิทธิภาพการระบายอากาศ

คำแนะนำทั่วไปสำหรับการลดความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดีคือการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยปกติจะมีอย่างน้อย 5 ACH ดังนั้นการจำลองเพิ่มเติมจึงถูกดำเนินการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการวางกล่องพัดลมเครื่องฟอกอากาศ ที่นี้เราจำลองห้องเรียนที่มีการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นเป็น 5 ACH แต่ไม่มีเครื่องฟอกอากาศสำหรับผู้ติดเชื้อมีด้านหน้า [กรณี VA, รูปที่ 13(a)] และตรงกลาง [กรณี VB, รูปที่ 13(b)] เมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐานในการระบายอากาศที่ต่ำกว่า 2 ACH (รูปที่ 4) การเพิ่มประสิทธิภาพการระบายอากาศ สามารถนำไปสู่การลดลงในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง (รูปที่ 12) และเปอร์เซ็นต์ละอองลอย (จาก 15% เป็น 8% สำหรับผู้ติดเชื้อใน ด้านหน้าและจาก 12% ถึง 7% สำหรับผู้ติดเชื้อที่อยู่ตรงกลาง) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยาฟอกอากาศที่จัดวางอย่างเหมาะสม (กรณี A1 และ B2) ประสิทธิภาพการระบายอากาศที่ดีขึ้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเห็นได้จากพื้นที่สีแดงส่วนใหญ่ในแผนที่ DIrisk ที่ระดับการหายใจ (รูปที่ 13) ซึ่งบ่งชี้ถึงระดับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกล่องฟอกอากาศที่ปรับปรุงแล้ว ดังนั้นน้ำยาฟอกอากาศจึงให้ละอองลอยที่ต่ำกว่ามาก (3% สำหรับกรณี A1 และ 1% สำหรับกรณี B2) เทียบกับสำหรับการระบายอากาศแบบปรับปรุง (8% สำหรับกรณี VA และ 7% สำหรับกรณี VB) การเปรียบเทียบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการใช้เครื่องกรองอากาศในพื้นที่ใกล้กับแหล่งแพร่เชื้อหรือเครื่องกรองอากาศมีประสิทธิภาพมากกว่าในการลดความเสี่ยง และมากกว่าแค่การเพิ่มอัตราการไหลของเครื่องช่วยหายใจเพียงเครื่องเดียว

#### D. ผลของขนาดห้อง

ในส่วนนี้ เราจะทดสอบผลกระทบของขนาดห้องเรียนต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองอากาศแบบกล่องเพื่อลดความเสี่ยง เนื่องจากในทางปฏิบัติมีห้องเรียนขนาดต่างๆ เราจำลองห้องเรียนที่มีขนาดเป็นสองเท่าของที่ใช้ในการจำลองก่อนหน้านี้ เช่น 10 103 ตารางเมตร (เทียบกับ 10 5 3 ตารางเมตร ที่ใช้ก่อนหน้านี้) ซึ่งตรงกับขนาดห้องเรียนทั่วไปที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา ในการจำลองนี้ เครื่องฟอกอากาศจะวางในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด (ใกล้ HUV) สำหรับตัวแพร่เชื้อวางอยู่ตรงกลางห้อง แม้จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในห้องเรียนสองขนาด เครื่องฟอกอากาศก็ยังช่วยลดพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับการหายใจ [รูปที่ 14(b)] และเปอร์เซ็นต์ละอองลอย (8%) เมื่อเปรียบเทียบกับกล่องที่ไม่มีเครื่องฟอกอากาศ [รูปที่ 14(a) และ 14% ละอองลอย] อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีห้องเรียนขนาดเล็ก (กรณี B2) ที่ให้ละอองลอยเพียง 1% ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศจะลดลงตามขนาดห้องที่เพิ่มขึ้น

ต่อจากนั้น เพื่อลดการแพร่กระจายของละอองลอยเพิ่มเติมตามขนาดห้องที่เพิ่มขึ้น เราใช้การจำลองเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสองวิธี กล่าวคือ การเพิ่มอัตราการไหลของเครื่องฟอกอากาศและเพิ่มเครื่องฟอกอากาศให้มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีการทดสอบกรณีจำลองสองกรณีสำหรับผู้ติดเชื้อที่อยู่ตรงกลาง กล่าวคือ กรณีหนึ่งที่เพิ่มอัตราการไหลของเครื่องฟอกอากาศใกล้กับ HUV เป็นสองเท่า และอีกกรณีหนึ่งเพิ่มเครื่องฟอกอากาศที่ด้านหน้า ที่น่าสังเกตคือ การเพิ่มอัตราการไหลของเครื่องฟอกอากาศเป็นสองเท่าไม่ได้ทำให้เปอร์เซ็นต์ของละอองลอยลดลงอย่างเห็นได้ชัด (ยังคง 8%) แต่ในทางตรงกันข้าม (เมื่อเทียบกับอัตราที่ต่ำกว่า) ทำให้ละอองลอยที่ระดับการหายใจเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด [รูปที่ 15(a)] เปรียบเทียบกับกรณีอัตราการไหลที่ต่ำกว่าที่สอดคล้องกัน [รูปที่ 15(b)] ในทางตรงกันข้าม การวางเครื่องฟอกอากาศสองตัวที่อัตราการไหลที่ต่ำลงสามารถลดบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงในระดับการหายใจได้ [รูปที่ 15(b)] และลดระดับละอองลอย (จาก 8% เป็น 6%) ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการกระจายเครื่องฟอกอากาศไปยังหลายตำแหน่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มอัตราการไหลของเครื่องฟอกอากาศหรือหน่วยระบายอากาศเพียงตัวเดียวเพื่อลดความเสี่ยงในห้องขนาดใหญ่

## E. ผลกระทบจากความร้อน

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศที่ถ่ายเท อุณหภูมิผิวของมนุษย์ และอากาศภายในห้องสามารถส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายของละอองลอยในพื้นที่ในร่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ห้องเรียนที่มีระบบทำความร้อนในฤดูหนาวและห้องเรียนปรับอากาศในฤดูร้อนอาจให้ผลการไถ่ระดับของ อุณหภูมิได้มาก ซึ่งอาจนำไปสู่การไหลของความร้อนที่เทียบเคียงหรือโดดเด่นกว่าการระบายอากาศภายใน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดี ดังนั้นเราจึงทำการจำลองภายใต้สถานการณ์จำลองแบบง่าย ของห้องเรียนที่ร้อนระอุในฤดูหนาว เมื่อผลกระทบด้านความร้อนที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของมนุษย์และการ ระบายอากาศที่ร้อนรวมอยู่ในการจำลอง ประสิทธิภาพของเครื่องกรองอากาศแบบกล่องพัฒนาจะลดลงอย่าง ชัดเจนเพิ่มขึ้นในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงในแผนที่ I risk และ I risk map [รูปที่ 16(a) vs รูปที่ 4(c) และ รูปที่ 16(b) vs รูปที่ 5(c) สำหรับ infector ที่ด้านหน้าและในกลางห้องเรียนตามลำดับ] การเพิ่มขึ้นดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ ชัดเจนยิ่งขึ้นในแผนที่ DIrisk ที่ระดับการหายใจ ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่สีแดงที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ สีน้ำเงินในรูปที่ 17 ในทำนองเดียวกันเมื่อรวมผลกระทบจากความร้อน เปอร์เซ็นต์ของละอองลอยจะเพิ่มขึ้น จาก 7 % เป็น 9% และจาก 1% เป็น 4% สำหรับผู้ติดเชื้อที่อยู่ด้านหน้าและตรงกลางตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกต ว่าประสิทธิภาพการฟอกอากาศที่ลดลงนั้นสำคัญกว่าเมื่อเครื่องฟอกอากาศอยู่ห่างจากตัวแพร่เชื้อ เราถือว่าการ ลดลงดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากความร้อน โดยเฉพาะอย่าง ยิง การไหลที่เหนียวมาโดยการไถ่ระดับความร้อนทำให้เกิดการหมุนเวียนขนาดใหญ่ที่อยู่ติดกับเพดาน (รูปที่ 18 เน้นด้วยสีเหลืองสีแดง) ละอองลอยที่ผลิตโดยตัวแพร่เชื้อมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนขึ้นด้านบนเนื่องจากกลุ่มความ ร้อนและถูกขังอยู่ในการไหลเวียนนี้จึงมีโอกาสสูงที่จะสะสมบนผนังและกระจายตัวแทนที่จะส่งไปยังเครื่อง ฟอกอากาศโดยตรง (รูปที่ 18) วิดีโอตัวอย่างการจำลองการขนส่งอนุภาคสำหรับกรณี TB2 สามารถพบได้ใน เนื้อหาเพิ่มเติม วิดีโอ 2 โปรดทราบว่ารูปมนุษย์ในวิดีโอ นั้นใช้เพื่อจุดประสงค์ในการอธิบาย และมีเพียงผู้ติดเชื้อ เท่านั้นที่สร้างแบบจำลองเป็นทรงลูกบาศก์ในการจำลอง

เพื่อสำรวจว่าสามารถปรับตำแหน่งของเครื่องฟอกอากาศเพื่อให้ได้รับประสิทธิภาพที่ดีขึ้นภายใต้ อิทธิพลของการไถ่ระดับความร้อนได้หรือไม่ เราจำลองกรณีเพิ่มเติมที่เครื่องฟอกอากาศถูกยกขึ้นในแนวตั้ง 1 เมตรจากตำแหน่งเดิม กล่าวคือ สูงจากพื้น 1.3 เมตร (รูปที่ 19) ดังแสดงในรูปที่ 19(b) และ 20(b) พบว่ามีการ เพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการฟอกอากาศสำหรับกรณีที่มิเช่อยู่ตรงกลางและเครื่องฟอกอากาศตั้งอยู่ใกล้กับตัว แพร่เชื้อ การปรับปรุงนี้เป็นเพราะเครื่องฟอกอากาศแบบขระดับสามารถใช้ประโยชน์จากกลุ่มความร้อนของ มนุษย์เพื่อปรับปรุงการสกัดอนุภาค (เปลี่ยนจาก 65% เป็น 78%) และลดการแพร่กระจายของการส่งผ่านละออง ลอย [รูปที่ 20(ข)] อย่างไรก็ตามเมื่อเชื้ออยู่ห่างจากเครื่องฟอกอากาศ [รูปที่. 19(a)] ประสิทธิภาพการทำงานของ เครื่องฟอกอากาศลดลงด้วยตำแหน่งที่สูงขึ้น [ระบุโดยพื้นที่ขนาดใหญ่ของเส้นสีแดงมากกว่าสีน้ำเงินในรูป

ที่ 20(a)] ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวในประสิทธิภาพของเครื่องกรองอากาศแบบยกระดับระหว่างกรณี TA2H และ TB2H นั้นเกิดจากข้อเท็จจริงที่ว่าความร้อนของมนุษย์นั้นมีความโดดเด่นเฉพาะในบริเวณใกล้เคียงกับผู้ติดเชื้อ และเครื่องฟอกอากาศยกระดับที่อยู่ห่างไกลจากผู้แพร่เชื้อจะไม่ได้รับประโยชน์จากการขนส่งละอองลอยโดยกระแสลมหมุนเวียน

#### IV. บทสรุปและการอภิปราย

ด้วยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เราจัดให้มีการตรวจสอบอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการส่งผ่านอากาศในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศไม่ดี และประเมินประสิทธิภาพของพัดลมกรองอากาศแบบกล่องราคาประหยัดเพื่อลดความเสี่ยง ห้องเรียนจำลองโดยใช้เครื่องช่วยหายใจแบบแนวนอนเครื่องเดียว (HUV) ที่ทำงานที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ 2 ACH แทนการส่งการตั้งค่าการระบายอากาศในห้องเรียนทั่วไปที่สร้างขึ้นก่อนปี 1989 การศึกษาของเราแสดงให้เห็นว่าการวางกล่องพัดลมเครื่องฟอกอากาศในห้องเรียน ส่งผลให้ลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายของอากาศทั่วทั้งพื้นที่ ประสิทธิภาพของน้ำยาทำความสะอาดในแง่ของประสิทธิภาพในการสกัดละอองลอยและลดเปอร์เซ็นต์ของละอองลอยจากเชื้อที่มีโอกาสติดเชื้อนั้นได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการวางตำแหน่ง เราพบว่าเครื่องทำฟอกอากาศสามารถบรรลุประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อวางไว้ใกล้ตัวแพร่เชื้อ อย่างไรก็ตาม หากไม่ทราบตำแหน่งของผู้ป่วยประสิทธิภาพของเครื่องทำฟอกอากาศนั้นเหมาะสมที่สุดเมื่ออยู่ใกล้ HUV โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตำแหน่งที่เหมาะสม เครื่องฟอกอากาศสามารถดึงละอองลอยส่วนใหญ่ที่ปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องจากผู้สอนที่ไม่มีอาการ (ผู้ติดเชื้อ) และลดละอองลอยที่แขวนลอยลงเหลือ 1% หลังจากการจำลองการบรรยาย 50 นาที ซึ่งต่ำกว่าเงื่อนไขอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับไม่มีน้ำยาทำความสะอาด (13%) นอกจากนี้การจำลองยังแสดงให้เห็นว่าเครื่องกรองอากาศที่มีการออกแบบการไหลลง (กล่าวคือ ช่องลมเข้าของเครื่องกรองอากาศหันขึ้นด้านบน) ทำงานได้ดีกว่าเครื่องกรองอากาศแบบไหลขึ้นด้านบน ส่งผลให้บริเวณที่มีความเสี่ยงสูงจำกัดมากขึ้นและเปอร์เซ็นต์ของละอองลอยที่ลดลงเมื่อ ตั้งอยู่ใกล้กับเชื้อ โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของ HUV (เช่น จาก 2 ACH เป็น 5 ACH) น้ำยาฟอกอากาศอาจส่งผลให้ความเข้มข้นของละอองลอยลดลงและการแพร่กระจายในห้องเรียนสูงขึ้น เมื่อขนาดห้องเรียนใหญ่ขึ้น ด้วยการจัดวางน้ำยาทำความสะอาดเพิ่มเติมโดยแยกส่วนในโดเมน น้ำยาฟอกอากาศยังสามารถนำไปสู่การกระจายตัวของละอองลอยที่จำกัด และลดปริมาณละอองลอยที่แขวนลอยได้อย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มอัตราการไหลของเครื่องฟอกขึ้นเป็นสองเท่าเพื่อรองรับขนาดห้องที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ละอองลอยที่ระดับการหายใจเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการทำงานของเครื่องฟอกอากาศที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่า เมื่อคำนึงถึงการไล่ระดับความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มความร้อนของมนุษย์และอากาศถ่ายเทความร้อนในฤดูหนาว ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องฟอกอากาศลดลง แต่ประสิทธิภาพในการลดการแพร่กระจายของละอองลอยและบริเวณที่มี

การแพร่กระจายในอากาศที่มีความเสี่ยงสูงยังคงมีอยู่เมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐาน ด้วยการระบายอากาศเท่านั้น นอกจากนี้เรายังพบว่าการยกเครื่องฟอกอากาศขึ้นเมื่อวางไว้ใกล้ตัวแพร่เชื้อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใช้ประโยชน์จากกลุ่มความร้อนของมนุษย์ที่จับอนุภาคที่เคลื่อนขึ้นด้านบน

งานของเราได้แสดงให้เห็นผลกระทบต่างๆ ของการใช้เครื่องฟอกอากาศในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศไม่ดีซึ่งอาศัยเครื่องช่วยหายใจในแนวนอน (HUV) วิธีการและผลจากการศึกษาของเราโดยทั่วไปแล้วสามารถนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศสำหรับพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดีอื่น ๆ รวมถึงสำนักงานที่อายุของตึกมาก เรือนจำ ที่พักพิงสำหรับคนไร้บ้าน ฯลฯ ข้อมูลเชิงลึกอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์ CFD คืออากาศ เครื่องฟอกอากาศไม่เพียงแต่ลดความเข้มข้นโดยรวมของละอองลอยในพื้นที่ แต่ยังจำกัดการแพร่กระจายอีกด้วย ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำไปใช้กับระบบกรองอากาศแบบพกพาประเภทอื่นได้ แม้มุมมองใหม่ของการศึกษานี้ เมื่อเทียบกับการศึกษาระบบกรองอากาศแบบพกพาครั้งก่อนๆ คือ ไม่ได้พิจารณาถึงการกระจายที่ "ผสมกันดี" ที่สม่ำเสมอทั่วพื้นที่ แต่จะสำรวจผลของการวางเครื่องกรองอากาศแบบพกพาไว้ในพื้นที่ที่เป็นตัวแทนตามที่ควรจะเป็นในทางปฏิบัติ

จากผลลัพธ์ของเรา การวางเครื่องฟอกอากาศไว้ข้างๆ ตัวแพร่เชื้อจะมีประสิทธิภาพสูงสุด หากเป็นบุคคล (ถ้าเป็นผู้ติดเชื้อที่ไม่มีอาการ) ที่สามารถส่งต่อความเสี่ยงสูงสุดให้กับผู้อื่นสามารถระบุได้ในอากาศ ควรวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับบุคคลเหล่านี้เพื่อจำกัดการแพร่กระจายของละอองลอยที่ปล่อยออกมา ในทางปฏิบัติ (เช่น ห้องเรียน คอนเสิร์ต ฯลฯ) ควรใช้ความระมัดระวังในการวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้ครู นักเรียน และนักเป่าแตรที่ไม่สวมหน้ากาก เนื่องจากสามารถผลิตละอองลอยจำนวนมากได้ในระหว่างกิจกรรมหรือ คนใหม่เข้าสู่กลุ่มที่ถูกกักกัน อย่างไรก็ตามเมื่อไม่สามารถระบุบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงและตำแหน่งของพวกเขาได้ล่วงหน้า แนวปฏิบัติที่ดีที่สุดคือการวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับระบบระบายอากาศที่มีอยู่ ภายใต้ตำแหน่งดังกล่าว เครื่องฟอกอากาศทำหน้าที่เป็นตัวกรองคุณภาพสูงสำหรับการระบายอากาศ แสดงให้เห็นจากการจำลองว่ากระแสการพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับระบบระบายอากาศที่มีอยู่ ซึ่งจะช่วยลดไซนหมุนเวียนในพื้นที่และทำให้ละอองลอยเข้ามาในเส้นทางหมุนเวียนหลักได้มากขึ้นและกำจัดออกโดยเครื่องฟอกอากาศ เครื่องฟอกอากาศทำงานในการปรับอากาศและให้ออกซิเจนที่สดใหม่ไปยังห้อง อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่ไม่ได้ออกแบบมาให้ใช้ฟیلเตอร์คุณภาพสูง ด้วยการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศใกล้กับระบบระบายอากาศที่มีอยู่ อากาศผ่านเข้าเครื่องฟอกอากาศจะถูกกรองเพื่อเพิ่มความสามารถนี้ให้กับระบบ ซึ่งช่วยให้เครื่องฟอกอากาศสามารถฟอกอากาศและผสมอากาศต่อไปได้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพและขัดขวางการไหลเวียนอากาศของห้อง

เครื่องฟอกอากาศสองตัวในห้องสามารถดักจับละอองลอยส่วนใหญ่ที่ปล่อยออกมาจากตัวแพร่เชื้อเข้าสู่เครื่องฟอกอากาศได้โดยตรง มีบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงที่ใกล้กับผู้แพร่เชื้อ แต่พื้นที่ที่เหลือมีความเสี่ยงต่ำ ผลลัพธ์ของเราแนะนำว่าสามารถใช้เครื่องฟอกอากาศหลายตัวเพื่อกำหนดเป้าหมายและกำจัดละอองลอยในพื้นที่ และจำกัดการแพร่กระจายไปทั่วห้อง แม้ว่าการปรับใช้ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับทรัพยากรที่มีอยู่และประเภทของระบบ HVAC ที่กำลังใช้งานอยู่ แต่ก็ยังเป็นข้อได้เปรียบที่ชัดเจนของเครื่องฟอกอากาศแบบกล่องต้นทุนต่ำเนื่องจากอาจช่วยให้ติดตั้งได้หลายครั้งในพื้นที่เดียวกันหรือเพียงเศษเสี้ยวของราคา เป็นเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์ราคาแพงเมื่อชั่งน้ำหนักอย่างเหมาะสมกับปัจจัยอื่นๆ เช่น เสี่ยงรบกวน

เป็นที่น่าสังเกตว่าทุกกรณีจำลองด้วยอัตราการปล่อยละอองที่สอดคล้องกับบุคคลที่ไม่ได้สวมหน้ากาก การพิจารณาสวมหน้ากากในพื้นที่ปิด เช่น ในห้องเรียน เป็นวิธีที่แนะนำซึ่งอาจลดการปล่อยละอองลอยได้ จึงเป็นไปได้ว่าระดับความเสี่ยงภายใต้สภาวะที่สวมหน้ากากนั้นต่ำกว่ากรณีจำลองของเราอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เราคาดว่าผลกระทบเชิงพื้นที่ของพื้นที่เสี่ยงที่รายงานในการศึกษาของเราจะไม่ได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่จากการสวมใส่หน้ากาก เนื่องจากหน้ากากส่งผลกระทบเฉพาะกับสนามการไหลใกล้กับตัวแพร่เชื้อเท่านั้น และการขนส่งละอองลอยในอากาศถูกรอบงำโดยอิทธิพลของอัตราการระบายอากาศของเครื่องฟอกอากาศ นอกจากนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่าการสวมหน้ากากอาจขัดขวางการบังคับทิศทางของเสียงและความสามารถในการพูดได้ ส่งผลเสียต่อการเรียนรู้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในห้องเรียนขนาดใหญ่หรือสำหรับผู้เรียนที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน อีกทางเลือกหนึ่งคือการวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับผู้สอนสามารถลดความเสี่ยงในการแพร่เชื้อได้อย่างมากโดยไม่กระทบต่อคุณภาพการสอน

มีตัวแปรมากมายที่ส่งผลต่อรายละเอียดเฉพาะของกระแสการไหลของอากาศ การระบายอากาศ และพลวัตของละอองลอยในพื้นที่เฉพาะ ผลลัพธ์ของเราให้แนวโน้มทั่วไปเท่านั้น และไม่ควรถือเป็นเกณฑ์ที่แน่นอนสำหรับสภาพแวดล้อมเฉพาะ ตัวอย่างเช่น แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังอนุภาคกับผนังอนุภาคอาศัยสมมติฐานที่ใช้กันทั่วไป ยังไม่มีการตรวจสอบความถูกต้องของอนุภาคนาโนละอองที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของโรค ซึ่งอาจกำหนดความไม่แน่นอนเกี่ยวกับเปอร์เซ็นต์ของละอองลอยที่มีอยู่ในการศึกษาของเรา อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบการลดลงของร้อยละสัมพัทธ์ระหว่างกรณีต่างๆ ถือเป็นข้อมูลที่มีค่าผลกระทบจากความร้อนได้รับการทดสอบในสภาพแวดล้อมในห้องเรียนอย่างง่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลุ่มความร้อนไม่ได้เปลี่ยนประสิทธิภาพของระบบ อย่างไรก็ตามการจำลองของเราใช้สภาพแวดล้อมที่เรียบง่ายโดยมีสภาพผนังที่สม่ำเสมอและมีพื้นที่น้อยมาก (เช่น คนและอุปกรณ์) การทำให้เข้าใจง่ายเหล่านี้อาจทำให้เกิดความแตกต่างในรูปแบบการไหล (เช่น เขตการหมุนเวียนด้านบน) ระหว่างการจำลองและการตั้งค่าจริงของเรา อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของเรา (กรณีระบายความร้อน) กับกรณีที่ไม่ใช่อุณหภูมิบังคับ

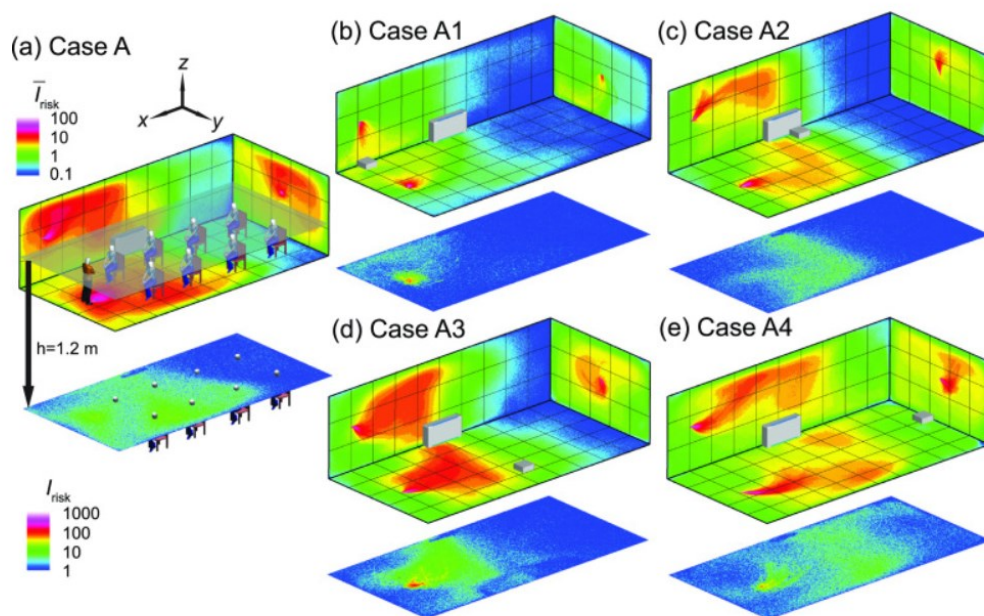
ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศของเราในการลดความเสี่ยงยังคงแข็งแกร่งพอสมควรเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการไหลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากความร้อน

การค้นพบของเรายังสามารถช่วยแนะนำการใช้เครื่องฟอกอากาศเพื่อลดความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดีในที่ร่มอื่นๆ เช่น เรือรบ สำนักงาน ที่พักอาศัยไร่บ้าน ศูนย์ดูแลชีวิต ฯลฯ โดยเฉพาะ เช่น ที่ที่พักไร่บ้านมักใช้ระบบ HVAC แบบส่วนกลาง ติดตั้งตัวกรองประสิทธิภาพต่ำ (เช่น MERV 8 หรือต่ำกว่า) ที่เพดานและมีการระบายอากาศภายนอกที่ต่ำกว่ามาตรฐานของ ASHRAE (เช่น 15 cfm ต่อคน) เพื่อลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายทางอากาศในสถานที่เหล่านี้ เราสามารถวางเครื่องฟอกอากาศของเราไว้ได้ตำแหน่งส่งกลับของอากาศในห้องเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มพลังให้กับระบบ HVAC ส่วนกลางในราคาประหยัด พร้อมอัตราการไหลที่ดีขึ้นและประสิทธิภาพการกรอง สำหรับที่พักขนาดใหญ่ เราเสนอให้ใช้เครื่องฟอกอากาศหลายตัว (เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ) ที่กระจายอยู่ในพื้นที่และวางไว้ใกล้กับแหล่งเชื้อโรคที่เป็นไปได้เพื่อลดความเสี่ยงได้อย่างเหมาะสม

การเชื่อมโยงความเข้มข้นของละอองลอยตามแบบจำลองและการกระจายในช่วงเวลาหนึ่งไปยังการวัดภาคสนามและในห้องปฏิบัติการจะมีความสำคัญต่อการตรวจสอบและสถานะขอบเขตที่ใช้ในการศึกษานี้ นอกจากนี้การศึกษาคิดตามผลที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบระหว่างการทดลองและ CFD สามารถช่วยให้มีความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นว่าเครื่องมือสร้างแบบจำลอง CFD สามารถประเมินความเข้มข้นและความเสี่ยงได้อย่างน่าเชื่อถือได้อย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสถานะขอบเขตที่ไม่ซ้ำกัน ผลกระทบจากความร้อนที่ซับซ้อน การนับละอองลอย และกรณีการใช้งานที่ไม่ได้กล่าวถึงโดยตรงในการศึกษานี้

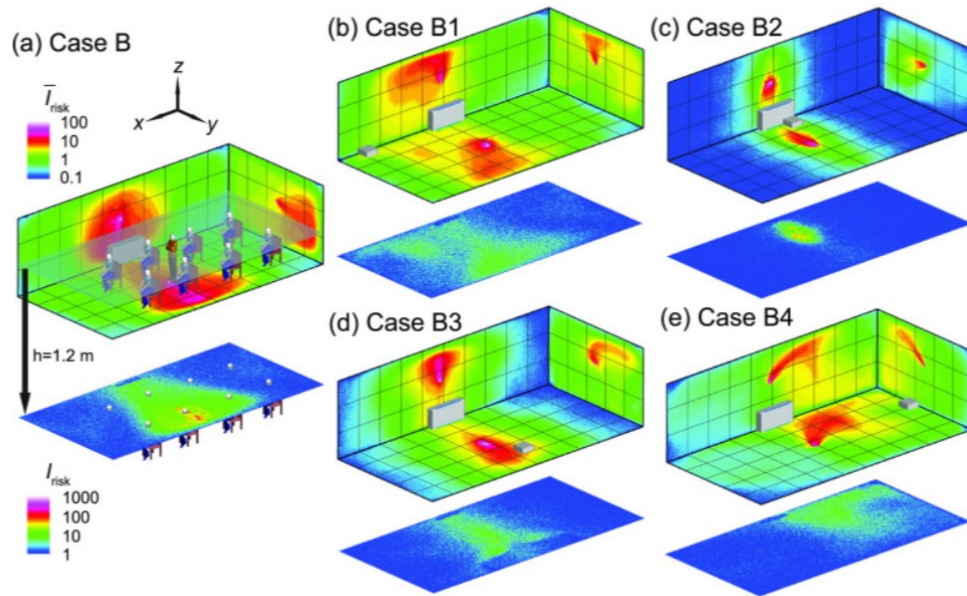


FIG. 4.



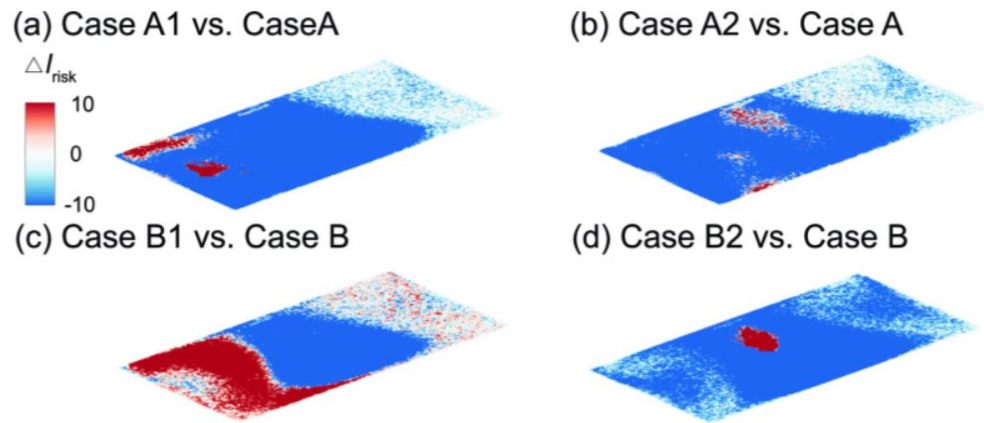
รูปที่. 4. ดัชนีความเสี่ยง (Irisk) แผนที่ห้องเรียนสำหรับผู้แพร่เชื้อบริเวณด้านหน้าห้องเรียน โดย (a) ไม่มีพัดลมระบายอากาศวางกล่อง (กรณี A) (b) วางเครื่องฟอกอากาศไว้ด้านหน้าห้องเรียน (กรณี A1), (c) อยู่กลางห้องเรียนใกล้กับเครื่องช่วยหายใจแนวนอน (HUV) (กรณี A2), (d) อยู่ตรงกลางแต่อยู่ห่างจาก HUV (กรณี A3) และ (e) ที่ด้านหลังห้องเรียน (กรณี A4) แผนที่เส้นขอบผนังแสดง Irisk ที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ ( $I_{riskp}$ ) ตามทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการกระจาย Irisk ที่ระนาบ xy ที่ระดับการหายใจของผู้นั่ง (1.2 ม.) ด้วยรูปร่างของ I เสี่ยง 1 และ Irisk 10 ทำเครื่องหมายบริเวณที่มีความเสี่ยงสูง (ค่อนข้าง) ในอากาศ ระดับ Irisk มีความสอดคล้องกันระหว่างประเภทรูปร่างที่แตกต่างกันแต่ไม่ระหว่างสองประเภท: ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (บน) และส่วนระดับการหายใจ (ด้านล่าง) โปรดทราบว่า ร่างมนุษย์ใน (a) ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการอธิบายและมีเพียงตัวติดเชืเท่านั้นที่ถูกจำลองเป็นทรงลูกบาศก์ในการจำลอง

FIG. 5.

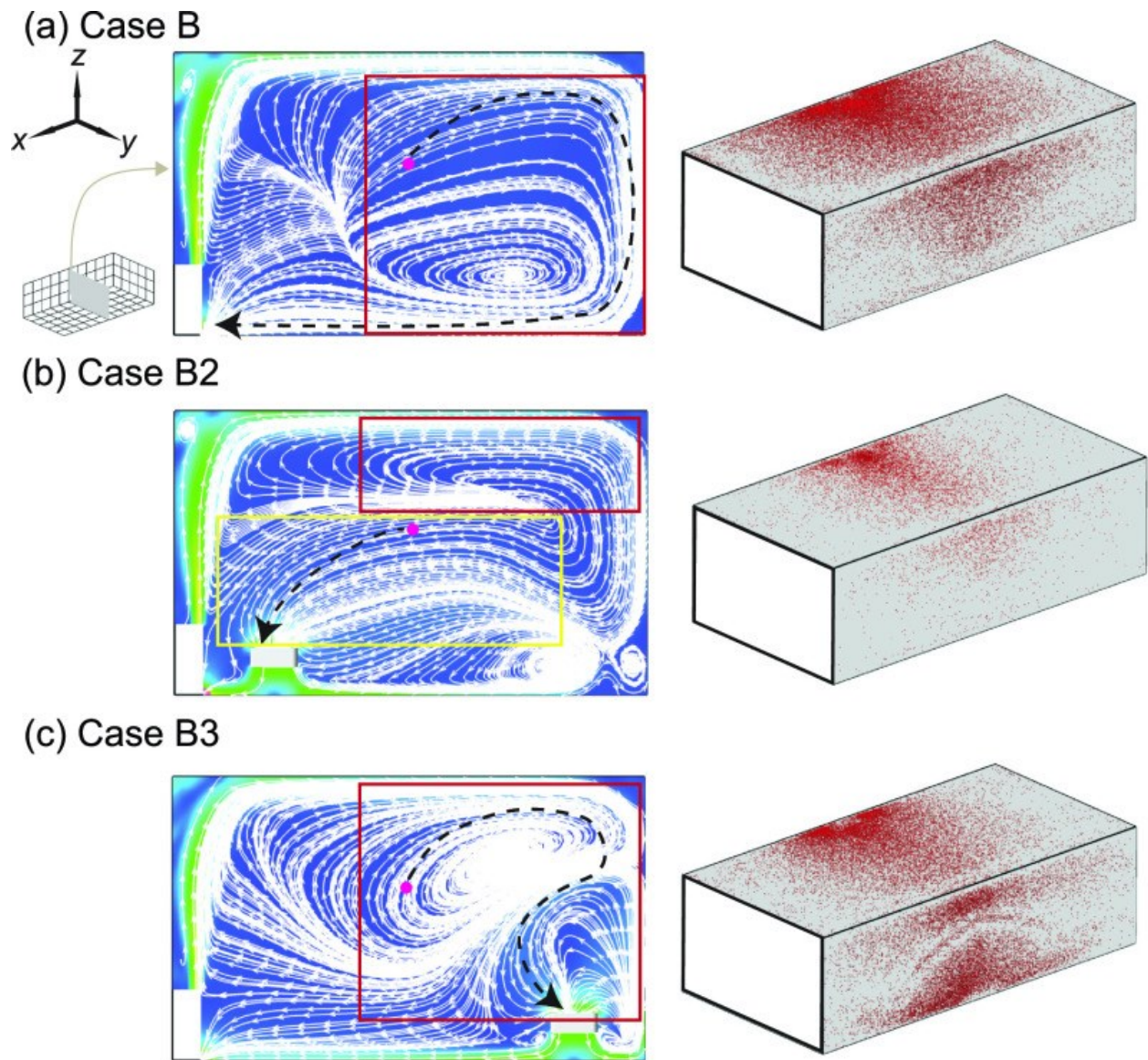


รูปที่. 5. แผนที่ Irisk ของห้องเรียนสำหรับผู้แพร่เชื้อที่อยู่ตรงกลางห้องเรียนโดย (a) ไม่มีกล่องพัดลมเครื่องฟอกอากาศ (กรณี B) (b) เครื่องฟอกอากาศที่วางอยู่ด้านหน้า (กรณี B1), (c) อยู่กลางห้องเรียนใกล้กับเครื่องช่วยหายใจในแนวนอน (HUV) (กรณี B2), (d) อยู่ตรงกลางแต่อยู่ห่างจาก HUV (กรณี B3) และ (e) ที่ด้านหลังเครื่องห้องเรียน (กรณี B4) โปรดทราบว่าร่างมนุษย์ใน (a) ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการอธิบาย และมีเพียงผู้คิดเชืเท่านั้นที่ถูกจำลองเป็นทรงลูกบาศก์ในการจำลอง

FIG. 6.



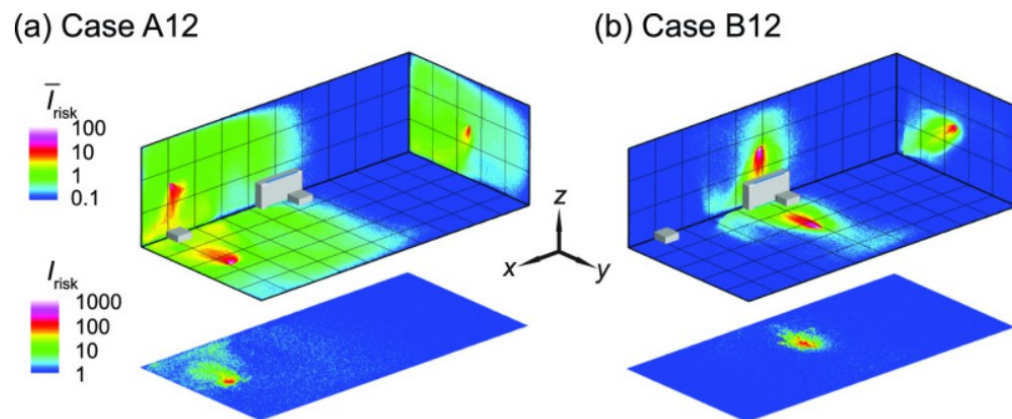
รูปที่. 6. การเปรียบเทียบแผนที่ Irisk (DIrisk) ที่ระดับการหายใจสำหรับกรณีจำลองโดยวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับผู้ติดเชื้อและใกล้ HUV และกรณีพื้นฐานที่สอดคล้องกันเมื่อผู้แพร่เชื้ออยู่ด้านหน้าโดยวางเครื่องฟอกอากาศ (a) ใกล้ตัวแพร่เชื้อ หรือ (b) ใกล้ HUV และตัวแพร่เชื้ออยู่ตรงกลาง (b) โดยวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้ตัวแพร่เชื้อ หรือ (d) ใกล้ HUV DIrisk ถูกกำหนดให้เป็น Irisk ของ case A1 ลบด้วย case A สำหรับ (a), case A2 หักด้วย case A สำหรับ (b), case B1 ลบด้วย case B สำหรับ (c) และ กรณี B2 ลบด้วยกรณี B สำหรับ (d)



รูปที่ 7. ปรับปรุงแผนผังการไหลที่ระนาบ  $y$ - $z$  ตรงกลาง (ซ้าย) และผนังละอองลอยบนเพดานและผนังด้านขวา (ขวา) สำหรับ (a) กรณี B (b) กรณี B2 และ (c) กรณี B3 ภาพแทรกใน (a) แสดงตำแหน่งของระนาบที่แสดงในรูป จุดสีม่วงแดงแสดงถึงตำแหน่งการฉีด และเส้นประสีดำในแผนที่ปรับปรุงใช้เพื่อแสดงให้เห็นเส้นทางที่เป็นไปได้ของละอองลอยที่ถูกสกัดโดย HUV หรือเครื่องฟอกอากาศ

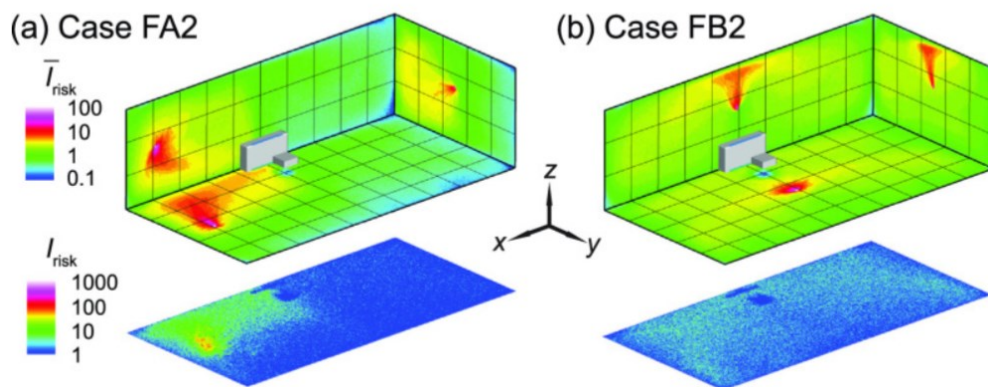


FIG. 8.



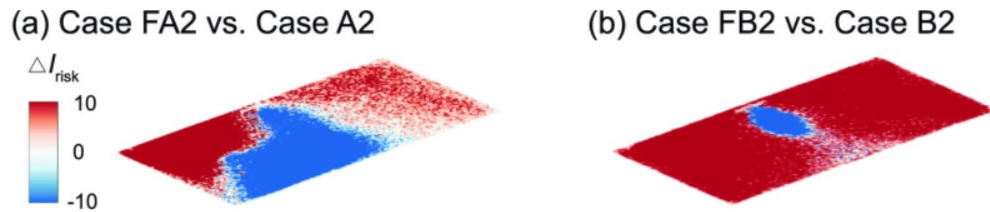
รูปที่ 8. แผนที่  $I_{risk}$  ของห้องเรียนพร้อมพัฒนาคูอากาศสองกล่องสำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ข้างหน้า (กรณี a12) และ (b) ตรงกลาง (กรณี b12) ของห้องเรียน เครื่องฟอกอากาศสองตัววางอยู่ด้านหน้า และตรงกลางใกล้กับ HUV ของห้องเรียนตามลำดับ

FIG. 9.



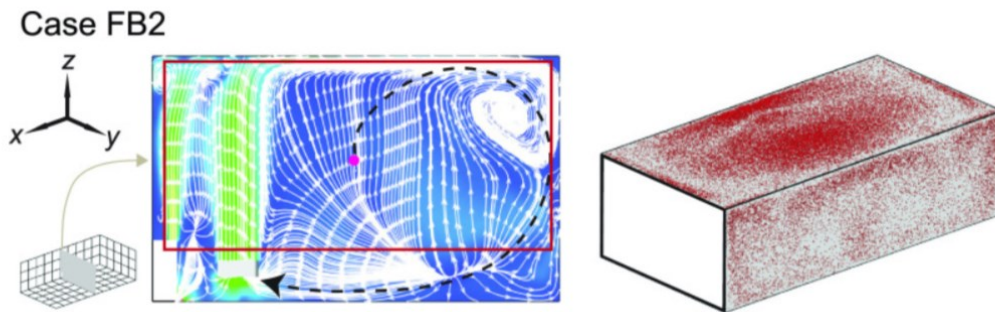
รูปที่ 9. แผนที่  $I_{risk}$  ของห้องเรียนพร้อมเครื่องกรองอากาศแบบพัฒนแบบพลิกกล่อง (เช่น การออกแบบการไหลขึ้นด้านบน) สำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ที่ด้านหน้า (กรณี FA2) และ (b) ตรงกลาง (กรณี FB2) ของห้องเรียน

FIG. 10.



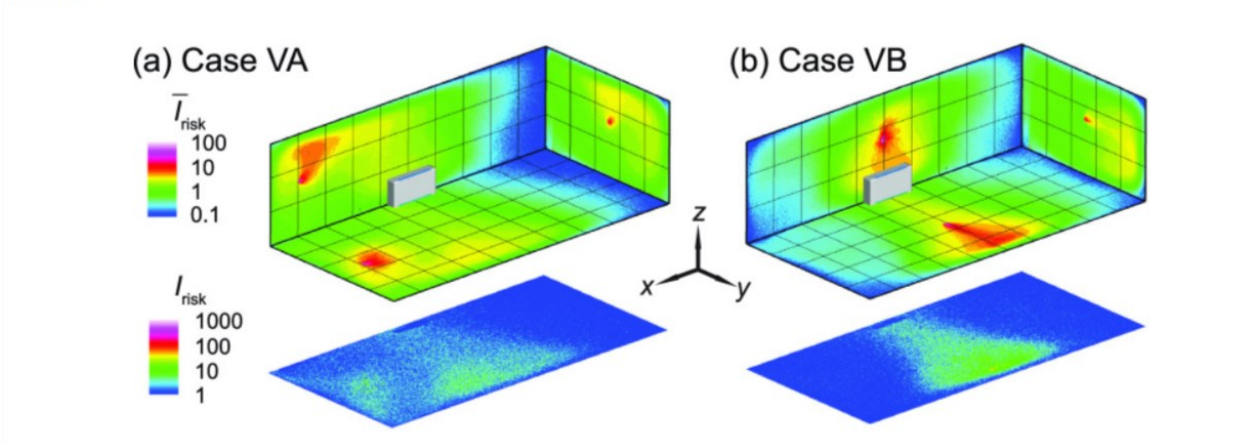
รูปที่ 10. การเปรียบเทียบแผนที่ Irisk (DIrisk) ที่ระดับการหายใจระหว่างกรณีการไหลลงและขึ้นด้านบนสำหรับผู้ติดเชื้อคือ (a) ด้านหน้าและ (b) กลางห้องเรียนที่มีเครื่องฟอกอากาศอยู่ใกล้ HUV DIrisk ถูกกำหนดให้เป็น Irisk ของ case FA2 ที่ลบด้วย case A2 สำหรับ (a) และ Irisk ของ case FB2 ที่ถูกลบด้วย case B2 สำหรับ (b)

FIG. 11.



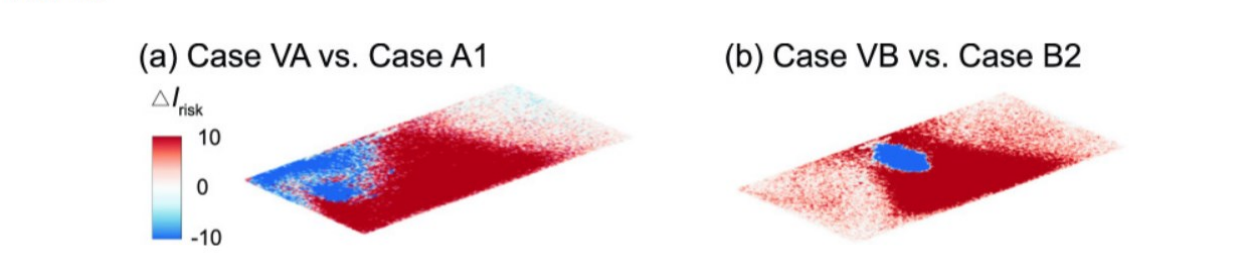
รูปที่ 11. ปรับปรุงผังการไหลที่ระนาบ y-z ตรงกลาง (ซ้าย) และผนังละอองลอยบนเพดานและผนังด้านขวา (ขวา) สำหรับเคส FB2 จุดสีม่วงแดงจะส่งสัญญาณตำแหน่งที่ฉีด และเส้นประสีดำในแผนที่ปรับปรุงใช้เพื่อแสดงให้เห็นเส้นทางที่เป็นไปได้ของละอองลอยที่ถูกสกัดโดย HUV หรือเครื่องฟอกอากาศ

FIG. 12.



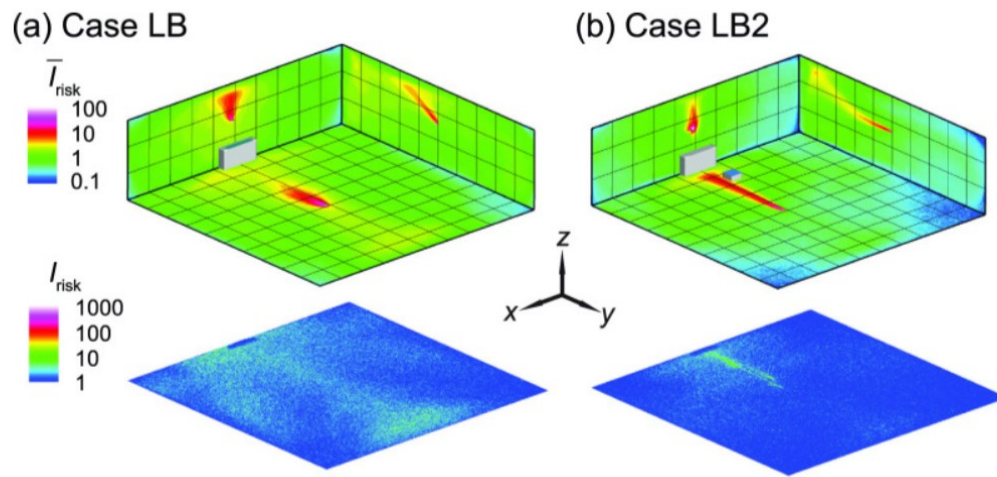
รูปที่ 12. แผนที่ Irisk ของห้องเรียนที่มีการระบายอากาศที่ดีขึ้น (5 ACH) สำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ที่ด้านหน้า (case VA) และ (b) ตรงกลาง (case VB) ของห้องเรียน

FIG. 13.



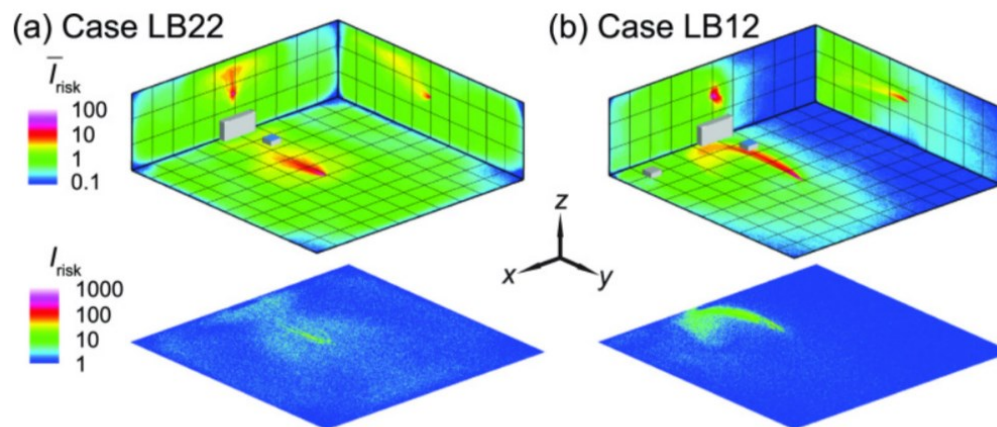
รูปที่ 13. การเปรียบเทียบแผนที่ Irisk (DIrisk) ที่ระดับการหายใจระหว่างการช่วยหายใจที่เพิ่มขึ้นและกรณีการจัดตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ที่ด้านหน้า และ (b) กลางห้องเรียน โดยมีเครื่องฟอกอากาศอยู่ใกล้ HUV DIrisk ถูกกำหนดให้เป็น Irisk ของ case VA ที่ลบด้วย case A1 สำหรับ (a) และ Irisk of Case VB ที่ลบโดย case B2 สำหรับ (b)

FIG. 14.



รูปที่ 14. แผนที่ Irisk ของห้องเรียนสำหรับผู้ติดเชื้อที่อยู่ตรงกลางห้องเรียน โดย (a) ไม่มีกล่องพัฒนาเครื่องฟอกอากาศวาง (กรณี LB ทำหน้าที่เป็นพื้นฐาน) และ (b) เครื่องฟอกอากาศที่วางอยู่ตรงกลางใกล้กับ HUV (เคส LB2)

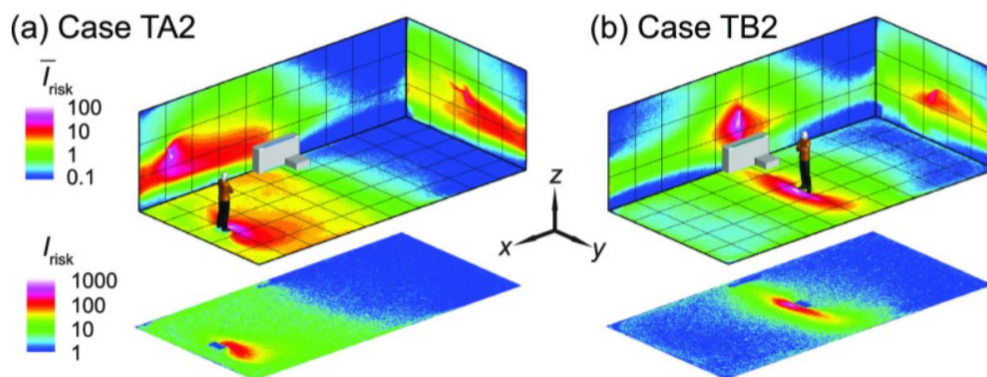
FIG. 15.



รูปที่ 15. แผนที่ Irisk ของห้องเรียนสำหรับผู้ติดเชื้อที่อยู่ตรงกลางห้องเรียนด้วย (a) เครื่องฟอกอากาศเครื่องเดียวที่วางอยู่ใกล้ HUV โดยมีอัตราการไหลเป็นสองเท่าของกรณีจำลองก่อนหน้านี้ (กรณี LB22) และ (b) เครื่องฟอกอากาศหนึ่งเครื่องใกล้กับ HUV และอีกเครื่องหนึ่งอยู่ด้านหน้า (กรณี LB12)

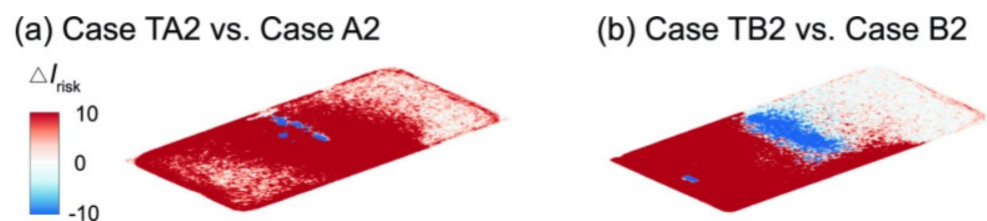


FIG. 16.



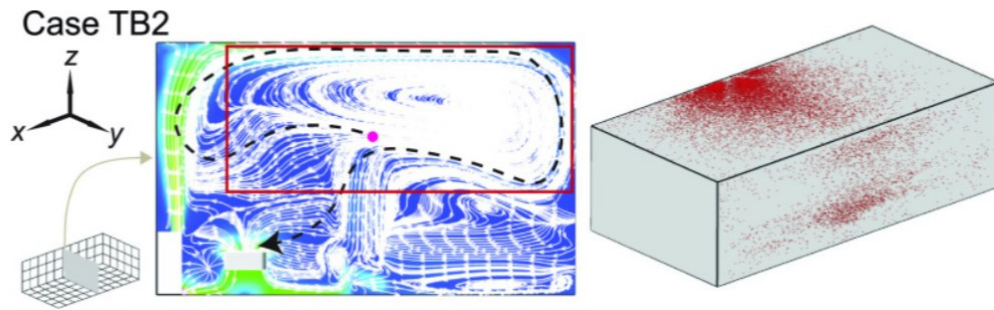
รูปที่ 16. แผนที่ Irisk ของห้องเรียนเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มความร้อนของมนุษย์และการระบายอากาศร้อนสำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ในด้านหน้า (กรณี TA2) และ (b) กลางห้องเรียนพร้อมเครื่องฟอกอากาศใกล้กับ HUV (กรณี TB2) โปรดทราบว่าตัวเลขมนุษย์ใน (a) และ (b) ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการอธิบาย เชื่อกันว่าถูกลบออกเป็นการจำลอง

FIG. 17.



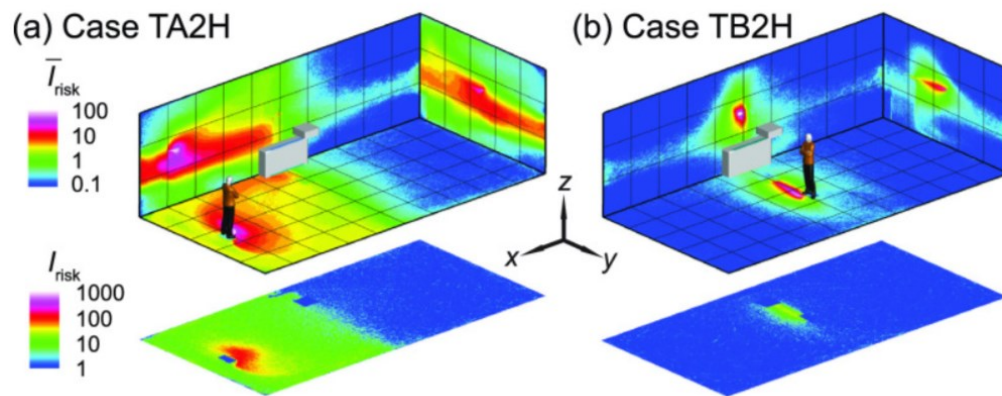
รูปที่ 17. การเปรียบเทียบแผนที่ Irisk ที่ระดับการหายใจระหว่างกรณีจำลองที่มีและไม่มีการพิจารณาผลกระทบจากความร้อนสำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ด้านหน้า และ (b) กลางห้องเรียนโดยมีเครื่องฟอกอากาศอยู่ใกล้ HUV DIrisk ถูกกำหนดให้เป็น Irisk ของ case TA2 ที่ลบด้วยของ case A2 สำหรับ (a) และ Irisk ของ case TB2 ที่ถูกลบด้วย case B2 สำหรับ (b)

FIG. 18.



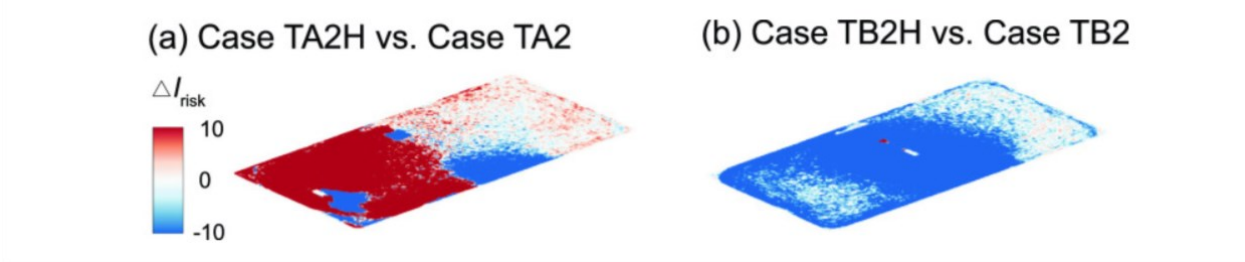
รูปที่ 18. ปรับปรุงแผนผังการไหลที่ระนาบ y-z ตรงกลาง (ซ้าย) และผนังละอองลอยบนเพดานและผนังด้านขวา (ขวา) สำหรับเคส TB2 จุดสีม่วงแดงทำหน้าที่ส่งตำแหน่งการฉีดและเส้นประสีดำในแผนที่ปรับปรุงจะใช้เพื่อแสดงเส้นทางที่เป็นไปได้ของละอองลอยที่ถูกสกัดโดย HUV หรือเครื่องฟอกอากาศ

FIG. 19.



รูปที่. 19. แผนที่ Irisk ของห้องเรียนเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความร้อนโดยวางเครื่องฟอกอากาศไว้ใกล้กับ HUV ที่ระดับความสูงที่สูงขึ้น (1.3 ม. เหนือพื้น) เปรียบเทียบกับกรณีจำลองก่อนหน้านี้ (0.3 ม. เหนือพื้น) สำหรับผู้ติดเชื้อ (a) ที่ด้านหน้า (กรณี TA2H) และ (b) ตรงกลาง (กรณี TB2H) ของห้องเรียน โปรดทราบว่าตัวเลขมนุษย์ใน (a) และ (b) ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการอธิบาย เชื่อถูกจำลองเป็นทรงลูกบาศก์ในการจำลอง

FIG. 20.



รูปที่ 20. เปรียบเทียบแผนที่ Irisk ที่ระดับการหายใจระหว่างกรณีจำลองโดยวางเครื่องฟอกอากาศไว้เหนือพื้น 1.3 ม. และ 0.3 ม. ใกล้กับ HUV สำหรับผู้แพร่เชื้อ (ก) อยู่ด้านหน้าและ (ข) อยู่กลางห้องเรียน DIrisk ถูกกำหนดให้เป็น Irisk ของ case TA2H ที่ลบด้วยของ case TA2 สำหรับ (a) และ Irisk ของ case TB2H ที่ลบด้วย case TB2 สำหรับ (b)