

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

Strategies to minimize SARS-CoV-2 transmission in classroom settings:
combined impacts of ventilation and mask effective filtration efficiency

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23744731.2021.1944665>

กลยุทธ์ในการลดการแพร่กระจายเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2

ในห้องเรียนให้น้อยที่สุด:

**ผลกระทบจากการใช้ระบบการระบายอากาศรวมกับการใช้หน้ากากก
รองอากาศที่มีประสิทธิภาพ (Strategies to minimize SARS-CoV-2
transmission in classroom settings: combined impacts of
ventilation and mask effective filtration efficiency)**

[David A. Rothamer](#)

[Scott Sanders](#)

[Douglas Reindl](#)

[Timothy H. Bertram](#)

บทคัดย่อ (Abstract)

หลักฐานแน่นหนาที่มีอยู่บ่งชี้ว่าการแพร่กระจายของเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2 ชนิดใหม่ โดยผ่านทางละอองลอยเป็นวิธีการแพร่กระจายเชื้อที่มีความสำคัญ เราได้ทำการประเมินผลกระทบของการระบายอากาศที่มีต่อพลวัตและการกระจายตัวของ ละอองลอย ควบคู่ไปกับการประเมินประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (effective filtration efficiency) ของหน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน 4 ชนิด ทั้งชนิดที่มีตัวรั้งหน้ากาก (mask fitter) และชนิดที่ไม่มีตัวรั้งหน้ากากในบริบทของห้องเรียนโดยผ่านการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการประมาณการความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขผ่านทาง ละอองลอยโดยใช้แบบจำลอง Wells–Riley ในสถานการณ์จำลอง 3 รูปแบบซึ่งมีการระบายอากาศที่แตกต่างกันรวมทั้งการใช้หน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน การวัดขนาดของละอองลอยยืนยันว่าละอองลอยในห้องมีความเป็นแบบเดียวกัน (uniform) ภายในระยะห่างมากกว่า 2 เมตรจากแหล่งกำเนิด ผลที่ได้เกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก แสดงให้เห็นว่าหน้ากากส่วนใหญ่สวมใส่ไม่แนบสนิทดีพอ โดยมีอัตราการรั่วที่ได้รับการประมาณการว่ามีมากกว่า 50% โดยปกติ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกรองอากาศสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการใช้ตัวรั้ง หน้ากาก ค่าประมาณของความเป็นไปได้ในการติดเชื้อบ่งชี้ว่าลำพังการระบายอากาศเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถทำให้บรรลุถึงค่าความเป็นไปได้ที่ต่ำกว่า 0.01 (1%) ได้ การใช้หน้ากากที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศระดับปานกลางถึงระดับสูงช่วยลดความ เป็นไปได้ในการติดเชื้อให้ต่ำลงได้ ในบางกรณีอาจจะลดลงได้มากกว่าถึง 5 เท่า การลดลงของค่าความเป็นไปได้ในการติดเชื้อที่เกิดจากการระบายอากาศและจากการ สวมหน้ากากเป็นผลของการทำงานร่วมกัน มีการเสริมแรงซึ่งกันและกันและมีผลเป็นทวีคูณ ผลที่ได้นี้เป็นการสนับสนุนเสริมแรงให้มีการสวมใส่หน้ากากอย่างถูกวิธี เพื่อให้สามารถบรรลุถึงการลดลงของการแพร่กระจายเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2 และโรคติดเชื้ออื่น ๆ ผ่านทางละอองลอย

และกระตุ้นให้มีการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากากโดยผ่าน
การออกแบบหรือการใช้ตัวกรองหน้ากากที่ได้รับการพัฒนาปรับปรุง

1. บทนำ (Introduction)

พื้นฐานสำคัญในการควบคุมและป้องกันการติดเชื้อก็คือความเข้าใจที่ถ่องแท้ชัดเจนเกี่ยวกับ
วิธีการในการแพร่กระจายเชื้อ สำหรับซาร์สโคโรนาไวรัส 2 แล้วในช่วง

แรก ๆ ของการระบาดของโรคโควิด 19

มีการเน้นย้ำให้น้ำหนักความสำคัญกับรูปแบบการแพร่กระจายเชื้อจากการสัมผัสติดต่อโดยตรง
และโดยอ้อม พร้อม ๆ กับคำแนะนำที่มุ่งไปที่การล้างมือ (WHO [2020c](#))

และการเว้นระยะห่างทางกายภาพ (WHO [2020b](#))

อย่างไรก็ตามการยอมรับว่ามีการแพร่กระจายเชื้อผ่านทางอากาศจากระยะไกล

(Morawska และ Milton [2020](#); CDC, [2020b](#); Nardell และ Nathavitharana [2020](#);

Morawska และ Cao [2020](#); Morawska และคณะ [2021](#))

หมายถึงว่ามาตรการที่เหมาะสมในการควบคุมและป้องกันการติดเชื้อจากการแพร่กระจาย
เชื้อทางอากาศเป็นสิ่งสำคัญ (Shen และคณะ [2021](#); Zhang [2020](#))

วิธีการทั่วไปในการประเมินการแพร่กระจายเชื้อผ่านทางอากาศระยะไกล

ซึ่งในที่นี้เรียกว่าการแพร่กระจายเชื้อผ่านทางละอองลอยทำได้โดยใช้สมการ Wells–
Riley (Wells [1955](#); Riley, Murphy, และ Riley [1978](#))

ในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของละอองลอยกับความเป็นไปได้ในการ
ติดเชื้อโดยใช้แบบจำลองแบบ **exponential dose** (Noakes and Sleight [2009](#))

วิธีการนี้ได้ใช้กันมาอย่างกว้างขวางสำหรับซาร์สโคโรนาไวรัส 2 รวมทั้งกรณีโรคอื่น ๆ
ด้วย (Riley, Murphy, และ Riley [1978](#); Noakes และ Sleight [2009](#))

ทั้งสำหรับการศึกษาวิจัยแบบวิเคราะห์ไปข้างหน้า (prospective analysis) (Buonanno,
Morawska, และ Stabile [2020a](#)) และสำหรับการศึกษาวิจัยแบบวิเคราะห์ย้อนหลัง

(retrospective analysis) (Miller และคณะ [2020](#); Buonanno, Morawska, และ
Stabile [2020a](#)) โดยที่มุ่งเน้นไปที่กรณีเหตุการณ์ที่มีการแพร่กระจายเชื้อเป็นจำนวนมาก ๆ
(super-spreader event) เป็นการเฉพาะ (Miller และคณะ [2020](#); Lu และคณะ [2020](#))

1.1. แบบจำลอง Wells–Riley (Wells–Riley model)

การใช้สมการ Wells–Riley

กับแบบจำลองของห้องที่มีการควบคุมการผสมผสานที่ดีแบบเรียบง่าย (a simple well-mixed room control-volume model) (บ่อยครั้งเรียกว่าแบบจำลองแบบกล่อง (box model) มีประโยชน์สำหรับการประเมินความเสี่ยงและการวางแผนบริหารจัดการ การใช้วิธีนี้จำเป็นต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของสถานที่และสภาพแวดล้อมของงานหรือเหตุการณ์

คือข้อมูลเกี่ยวกับห้องและข้อมูลระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (heating ventilation and air conditioning - HVAC) ระยะเวลาของการจัดงานหรือเหตุการณ์ อัตราการปล่อยละอองลอยติดเชื้อที่เป็นไปได้และอัตราการหายใจของผู้ที่อ่อนแอหรือผู้ที่มีแนวโน้มที่จะติดเชื้อง่าย รวมทั้งข้อมูลเกี่ยวกับการดำเนินการต่าง ๆ (interventions) ที่กำลังพิจารณาใช้ (Riley, Murphy, และ Riley [1978](#); Gammaitoni และ Nucci [1997](#)) ในบรรดาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้

อัตราการปล่อยละอองลอยติดเชื้อมีแนวโน้มที่จะมีความไม่แน่นอนมากที่สุด ถึงแม้ว่างานศึกษาวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการกำหนดขอบเขตของช่วงค่าประมาณ (range of values) ที่ดีขึ้นในการพิจารณาสำหรับเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2 (Buonanno, Stabile, และ Morawska [2020a](#), [2020b](#))

พารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอนมากที่สุดตัวถัดไปเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการดำเนินการ (intervention) ที่มีความเป็นไปได้ เช่น

การเพิ่มอัตราการระบายอากาศในห้องและประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากากที่แต่ละคนสวมใส่ ประการสุดท้ายการประมาณ (approximation) ที่ผสมผสานกันดี (well-mixed) อาจจะเป็นการเพิ่มความไม่แน่นอนที่สำคัญ (significant uncertainty) สำหรับค่าประมาณใด ๆ ที่ใช้การจำลองแบบ Wells–Riley

ในอดีตมีการใช้แบบจำลอง Wells–Riley เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของการดำเนินการ (intervention) ต่าง ๆ ที่ต้องการลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อโรคผ่านละอองลอย (สำหรับโรคต่าง ๆ กัน) รวมทั้งความเสี่ยงสัมพัทธ์ (relative risk) ของสถานการณ์ต่าง ๆ กัน

ยกตัวอย่างเช่น

บรรดาผู้วิจัยได้ใช้วิธีการนี้ในการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการรับสัมผัสเชื้อ (exposure duration) อัตราการหายใจและอัตราการปล่อยควอนตัม อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่มีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC air change rate) และอัตราการกรองอนุภาค หน้ากากกรองอากาศและหน้ากากทั่วไป การเสื่อมสภาพจากรังสียูวี และการสะสมรวมตัวกันของอนุภาค (Azimi และ Stephens [2013](#); Gammaitoni และ Nucci [1997](#); Fennelly และ Nardell [1998](#); Nazaroff, Nicas, และ Miller [1998](#); Buonanno, Morawska, และ Stabile [2020a](#); Miller และคณะ [2020](#)) ตลอดจนปัจจัยอื่น ๆ ด้วย

เกี่ยวกับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่มีการระบายความร้อนและการปรับอากาศที่ เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งชั่วโมงและ/หรือการกรองอนุภาคในขณะที่มีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC particle filtration)

นี้มีการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่ลดลงในการแพร่กระจายเชื้อ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์เหล่านี้ (Fennelly และ Nardell [1998](#); Azimi และ Stephens [2013](#); Fisk และคณะ [2005](#); Miller และคณะ [2020](#))

อย่างไรก็ตามการพึ่งพาต่ออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)

มีน้อยสำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) ที่มากกว่า 2

ในทางกลับกันการใช้หน้ากากกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงได้แสดงให้เห็นว่าสามารถลด ความเป็นไปได้ในการติดเชื้อจากโรคที่ติดต่อกันได้ทางอากาศ เช่น

วัณโรคได้อย่างมีนัยสำคัญ (Fennelly และ Nardell [1998](#))

มีการใช้แบบจำลอง Wells–Riley ในการศึกษาการแพร่กระจายเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2

ในห้องเรียน สำหรับตัวอย่างดูได้จาก Foster และ Kinzel ([2021](#)), Pavilonis และคณะ

([2021](#)), Shen และคณะ ([2021](#)) และ Stabile และคณะ ([2021](#)) Foster และ Kinzel

ได้เปรียบเทียบค่าประมาณของความเป็นไปได้ในการติดเชื้อโดยอิงตามพลศาสตร์ของไหล เชิงคำนวณ (CFD) และแบบจำลอง Wells–Riley

สำหรับพื้นที่ในห้องเรียนที่มีการระบายอากาศผสมผสานกัน (mixing ventilation - MV)

ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่างกัน

2 ค่า และพบว่ามีความสอดคล้องกันดีระหว่างทั้งสองวิธีนี้ Pavilonis และคณะ ([2021](#))

ได้ใช้แบบจำลอง Wells–Riley

ในการประมาณความเสี่ยงของการแพร่กระจายของละอองลอยในโรงเรียนรัฐบาลในมหานครนิวยอร์ก สำหรับสถานการณ์การสัมผัสเชื้อต่าง ๆ

กันและพบว่าค่าเฉลี่ยของความเป็นไปได้ในการแพร่กระจายเชื้อ

(สำหรับห้องเรียนทั้งหมดที่พิจารณา) อยู่ระหว่าง 0.043 และ 0.37

โดยที่ค่าความเป็นไปได้สูงสุดมีความสอดคล้องกันกับการแพร่กระจายเชื้อจากอาจารย์ผู้สอนไปสู่นักเรียน (ทั้งอาจารย์ผู้สอนและนักเรียนไม่ได้สวมหน้ากาก)

สำหรับช่วงระยะเวลาในการสัมผัสเชื่อนาน 6.3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีการใช้แบบจำลอง Wells–Riley ในการศึกษาผลกระทบของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)

(Stabile และคณะ [2021](#); Shen และคณะ [2021](#)) และการดำเนินการ (intervention) อื่น ๆ

(Shen และคณะ [2021](#); Zhang [2020](#))

ต่อความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อในห้องเรียนสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ กันด้วย

1.2. พลวัตของละอองลอยในอาคาร (Aerosols dynamics in indoor spaces)

มีการศึกษาวิจัยที่สำคัญเกี่ยวกับพฤติกรรมของละอองลอยในพื้นที่ภายในอาคาร
เนื่องจากผลกระทบของอนุภาคละอองลอยต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์
(สำหรับตัวอย่างดูได้จากบทวิจารณ์โดย Wallace ([1996](#)), Nazaroff ([2004](#)), และ Tham
([2016](#))) และศักยภาพของละอองลอยชีวภาพในการก่อให้เกิดการแพร่กระจายโรค
(Morawska [2006](#); Zhu, Kato, และ Yang [2006](#)) งานศึกษาวิจัยเมื่อเร็ว ๆ
นี้ได้มุ่งประเด็นไปที่การแพร่กระจายเชื้อและพลวัตของอนุภาคละอองลอยในพื้นที่บริเวณ
ภายในอาคารซึ่งเกี่ยวกับการแพร่กระจายของเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2 (Kohanski, Lo,
และ Waring [2020](#); Nissen และคณะ [2020](#); Smith และคณะ [2020](#); Somsen และคณะ
[2020a](#), [2020b](#)) เป็นที่ทราบกันดีจากงานศึกษาวิจัยเหล่านี้และจากงานศึกษาวิจัยอื่น ๆ
ว่าการระบายอากาศและการไหลของอากาศภายในห้องมีผลต่อความเข้มข้นและการขนส่ง
เดินทางของละอองลอย (Nazaroff [2004](#); Zhu, Kato, และ Yang [2006](#); Lu และคณะ
[2020](#); Nissen และคณะ [2020](#); Van Der Steen และคณะ [2017](#))
อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศภายในห้องมีความแตกต่างกันอย่างมากตามประเภทของอาคาร
และทำเลที่ตั้งของอาคาร (Nazaroff [2004](#))
โดยที่ส่วนใหญ่ของผู้พักอาศัยและสำนักงานต่าง ๆ
ในสหรัฐอเมริกาอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) ต่ำกว่า 3
(Nazaroff [2004](#))
ถึงแม้ว่ามีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางแต่ก็ยังขาดแคลนข้อมูลเกี่ยวกับพลวัตของละออง
ลอยและการวัดการแพร่กระจายตัวของละอองลอยในช่วงขนาดที่สัมพันธ์กับการแพร่
กระจายโรคโควิด 19 ผ่านทางละอองลอยในบริเวณพื้นที่ที่มีผู้คนอยู่กันหนาแน่นทั่วไป

1.3. ประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากาก (Mask filtration efficiency)

นอกเหนือจากอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นแล้ว

ขณะนี้ก็มีการยอมรับกันว่าเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับประชาชนทั่วไปที่ยังไม่ได้รับการฉีดวัคซีนที่จะต้องสวมหน้ากากเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารและกลางแจ้งเมื่อการเว้นระยะห่างทางกายภาพอาจจะไม่สามารถกระทำได้ (CDC [2020a](#);

WHO [2020a](#)) หลักฐานจากงานศึกษาวิจัยโดย Ueki และคณะ ([2020](#)) และ Leung และคณะ ([2020](#))

ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของหน้ากากในการลดการปล่อยไวรัสและการแพร่กระจายผ่านทางละอองลอย

รวมทั้งตัวอย่างในสถานการณ์จริงของการที่หน้ากากสามารถป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อไวรัสเมื่อสวมหน้ากากเป็นประจำสม่ำเสมอ (Hendrix และคณะ [2020](#); Wang และคณะ [2020](#))

งานศึกษาวิจัยทั้งสองชิ้นนี้เป็นการสนับสนุนอย่างแข็งขันต่อความสำคัญของการสวมหน้ากาก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของหน้ากากขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration efficiency - MFE)

และการสวมใส่ที่ปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าของผู้สวมเป็นสำคัญ (van der Sande, Teunis, และ Sabel [2008](#); Hill, Hull, และ MacCuspie [2020](#); Mueller และคณะ [2020](#)) ซึ่งสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (effective filtration efficiency - EFE) ซึ่งต่ำกว่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration efficiency - MFE) เป็นอย่างมาก

มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกรองอากาศของวัสดุ

สำหรับทั้งในหน้ากากผ้าที่ทำขึ้นมาใช้เองและในหน้ากากที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ (หน้ากากผ้า หน้ากากชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งแต่ไม่ใช่หน้ากากทางการแพทย์ หน้ากากที่ใช้ทางการแพทย์ และหน้ากากกรองอากาศชนิด KN95 และชนิด N95) ทั้งในช่วงก่อนหน้าการระบาดของโรคโควิด 19 (Davies และคณะ [2013](#); Jang Ji และ

Kim Seung [2015](#); Jung และคณะ [2014](#); Rengasamy, Eimer, และ Shaffer [2010](#); van der Sande, Teunis, และ Sabel [2008](#)) และในช่วงระหว่างการระบาด (Bagheri และคณะ [2021](#); Crilley และคณะ [2021](#); Drewnick และคณะ [2021](#); Hill, Hull, และ MacCuspie [2020](#); Hao และคณะ [2020](#), Hao, Xu, และ Wang [2021](#); Joo และคณะ [2021](#); Kelly และคณะ [2020](#); Konda และคณะ [2020b](#); Lindsley และคณะ [2021a](#), [2021b](#); Long และคณะ [2020](#); Mueller และคณะ [2020](#); Pan และคณะ [2021](#); Teesing และคณะ [2020](#); Whiley และคณะ [2020](#); Zhao และคณะ [2020](#)) (ดูในบทวิจารณ์เมื่อเร็ว ๆ นี้โดย Clase และคณะ ([2020](#)) ประกอบ) อย่างไรก็ตามช่วงขนาดของอนุภาคที่วัดได้ สภาวะเงื่อนไขในการกรองอากาศ ตลอดจนเครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการในการตรวจวัดมีความแตกต่างกันอย่างมากในระหว่างการศึกษาวิจัยเหล่านี้ทำให้การเปรียบเทียบเป็นไปได้ยาก

การศึกษาวิจัยส่วนใหญ่มุ่งความสนใจไปที่การวัดขนาดอนุภาคขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 ไมครอน)

ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงขนาดของละอองลอยเกลือแกงที่ใช้ในการรับรองคุณภาพของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 (ค่ากลางมัธยฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 0.075 ± 0.02 ไมครอน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิตไม่เกิน 1.86 (42 CFR Part 84 [2021](#))) (Crilley และคณะ [2021](#); Hao และคณะ [2020](#), Hao, Xu, และ Wang [2021](#); Joo และคณะ [2021](#); Lindsley และคณะ [2021a](#); Long และคณะ [2020](#); Rengasamy, Eimer, และ Shaffer [2010](#)) หรือไม่มีการวัดชนิด **size – resolved measurement** (Davies และคณะ [2013](#); Long และคณะ [2020](#); Kelly และคณะ [2020](#); Lindsley และคณะ [2021a](#); Long และคณะ [2020](#); Mueller และคณะ [2020](#))

มีงานศึกษาวิจัยไม่กี่ชิ้นที่ศึกษาช่วงขนาดที่กว้างขึ้นของอนุภาคและมี size-resolved measurements สำหรับอนุภาคที่มีขนาดโตถึง 10 ไมครอน (Bagheri และคณะ [2021](#); Drewnick และคณะ [2021](#); Konda และคณะ [2020b](#); Pan และคณะ [2021](#))

ความเร็วหน้าในการกรองอากาศ (filtration face velocities) ที่ศึกษามีความแตกต่างกัน ตั้งแต่

0.78ซ.ม./วินาที (Hill, Hull, และ MacCuspie [2020](#)) จนถึง 16.5เมตร/วินาที (Kelly และคณะ [2020](#)) โดยที่ส่วนใหญ่ของการศึกษาวิจัยมีความเร็วหน้า (face velocities)

อยู่ในช่วง 2–25 ซม./วินาที (Bagheri และคณะ [2021](#); Crilley และคณะ [2021](#); Drewnick และคณะ [2021](#); Hao และคณะ [2020](#); Hao, Xu, และ Wang [2021](#); Joo และคณะ [2021](#); Lindsley และคณะ [2021a](#); Long และคณะ [2020](#); Pan และคณะ [2021](#); Rengasamy, Eimer, และ Shaffer [2010](#))

โดยทั่วไปการศึกษาวัดทั้งการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาค (กล่าวอีกนัยหนึ่งคือประสิทธิภาพของการกรอง) และวัดทั้งการลดลงของแรงดันถึงแม้ว่าเครื่องมือวัดและวิธีการของการก่อให้เกิดละอองลอย อาจจะสามารถแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาวัดส่วนใหญ่ใช้ละอองลอยเกลือแกง ถึงแม้ว่ามีการศึกษาวัดบางชิ้นที่ใช้อนุภาคละอองลอยที่มีอยู่โดยรอบ (ambient aerosol particles) (Bagheri และคณะ [2021](#); Drewnick และคณะ [2021](#); Teesing และคณะ [2020](#)) โดยทั่วไปแล้วละอองลอยเกลือแกงจะถูกทำให้แห้งและเจือจาง ในบางกรณีมีการทำให้ละอองลอยเกลือแกงมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นกลางต่อสภาวะสมดุลโบลต์ซมันน์ (Boltzmann equilibrium state) ซึ่งโดยปกติจะทำการร่วมกับการใช้ automated filter tester (เช่น TSI 8130A0) (Jung และคณะ [2014](#); Lindsley และคณะ [2021a](#); Rengasamy, Eimer, และ Shaffer [2010](#); Zhao และคณะ [2020](#)) ผลกระทบของการปิดแน่นแนบสนิระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (mask fit) และการรั่วซึม (mask leakage) ก็ได้รับการศึกษาด้วย โดยการใช้การทดสอบการปิดแน่นแนบสนิระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (fit testing) (Davies และคณะ [2013](#); Lindsley และคณะ [2021a](#), [2021b](#); Mueller และคณะ [2020](#); Teesing และคณะ [2020](#); van der Sande, Teunis, และ Sabel [2008](#)) และจำลองการรั่วซึม (Drewnick และคณะ [2021](#); Konda และคณะ [2020b](#)) การศึกษาวัดของ Pan และคณะ ([2021](#)) มีความโดดเด่นน่าสังเกตเพราะมีการวัดผลกระทบของการปิดแน่นแนบสนิระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (mask fit) ที่มีต่อการหายใจเข้าและต่อการหายใจออกโดยการใช้รูปศีรษะ (head form) 2 อันซึ่งหันหน้าเข้าหากันในระยะห่าง 33 ซม. (จากปากถึงปาก) พร้อม ๆ กับการวัดประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration efficiency - MFE)

(ถึงแม้ว่ามีความเร็วหน้า (face velocity) ต่างกัน) Hill, Hull, และ MacCuspie (2020) ก็ทำการวัดในขณะที่สวมหน้ากากเช่นเดียวกัน เพียงแต่สำหรับการหายใจเข้าเท่านั้น

ถึงแม้ว่ามีความแตกต่างกันในวิธีการและสถานะเงื่อนไขในการกรองอากาศ แต่ก็มีข้อค้นพบ (findings) หลายอย่างที่ตรงกันระหว่างการศึกษาวัยเหล่านี้

ประการแรกคือพบว่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration efficiency - MFE) ของวัสดุหน้ากากผ้า (ผ้าฝ้ายจากการถักทอและโพลีโพรไพลีนที่ไม่มีการทอ)

ในหน้ากากชั้นเดียวมีค่าค่อนข้างต่ำสำหรับอนุภาคขนาด 0.3 – 0.5 ไมครอน โดยที่มีค่า typical value อยู่ในช่วงระหว่าง 2 – 25% และ corresponding filter quality factors

($q_F = -\ln(1-\eta_f)/\Delta P$, $q_F = -\ln(1-\eta_f)/\Delta P$, โดยที่

η_f เป็นประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration efficiency – MFE)

และ ΔP เป็นการลดลงของแรงดัน (pressure drop) ซึ่งอยู่ในช่วง $q_F = 0.0002$ ถึง 0.007 Pa^{-1} (Crilley และคณะ 2021; Bagheri และคณะ 2021; Drewnick และคณะ 2021;

Hao และคณะ 2020; Joo และคณะ 2021; Pan และคณะ 2021; Rengasamy, Eimer, และ Shaffer 2010) ข้อยกเว้นสำหรับเรื่องนี้คือการศึกษาวัยของ Konda และคณะ

(2020b) ซึ่งพบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการทอที่มีความหนาแน่นของจำนวนเส้นใยต่าง ๆ

กันมีประสิทธิภาพการกรองอากาศที่สูงมากคือ 90–95%

ดูเหมือนว่าผลที่ได้นี้จะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการแก้ไขบทความนี้ในเวลาต่อมา ซึ่งระบุบ่งชี้ว่าไม่มีการควบคุมอัตราการไหลในการทดลอง

ด้วยเหตุนี้ผลที่ได้จึงไม่ควรเอามาคำนวณ (Konda และคณะ 2020a) Zhao และคณะ (2020) พบว่ามี filter quality factor

ที่สูงกว่าอย่างมากสำหรับวัสดุที่เกิดจากการขึ้นรูปจากเส้นใยโพลีโพรไพลีนโดยตรง

($q_F = q_F = 0.040 \text{ Pa}^{-1}$) เมื่อพิจารณาถึงอนุภาคทุกขนาดแต่ไม่มี size-resolved results (ไม่มีการเปรียบเทียบโดยตรงสำหรับช่วงขนาด 0.3 – 0.5 ไมครอน)

และความไม่แน่นอนที่ค่อนข้างสูงของการลดลงของแรงดันและประสิทธิภาพในการกรองอากาศที่ใช้ในการหา quality factor สิ่งนี้สามารถมองว่าเป็น potential outlier ได้

Lindsley และคณะ (2021a)

ได้ทำการศึกษาน้ำกากผ้าหลากหลายชนิดที่ผลิตในเชิงพาณิชย์โดยใช้ TSI 8130

automated filter tester และใช้เวอร์ชันที่ได้รับการแก้ไขปรับปรุงของ NIOSH standard test procedure (NIOSH [2019](#)) คณะผู้วิจัยพบว่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration efficiency - MFE) โดยรวมอยู่ในช่วง 10 – 20% สำหรับหน้ากากผ้า (Lindsley และคณะ [2021b](#))

งานศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการปิดแน่นแนบสนิทระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (mask fit) ต่อประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (effective filtration efficiency – EFE) ของหน้ากาก โดยที่หน้ากากที่มีประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) สูง ๆ บางครั้งก็แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ในระดับที่ไม่ดีนัก

อันเนื่องมาจากผลกระทบของการปิดแน่นแนบสนิทระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (mask fit) (Davies และคณะ [2013](#); Hill, Hull, และ MacCuspie [2020](#); Lawrence และคณะ [2006](#); Lindsley และคณะ [2021a](#); Mueller และคณะ [2020](#); Pan และคณะ [2021](#); van der Sande, Teunis, และ Sabel [2008](#)) โดยทั่วไป Pan และคณะ ([2021](#))

ได้พบว่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (effective filtration efficiency – EFE) ทั้งในระหว่างการหายใจเข้าและระหว่างการหายใจออกมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับหน้ากากส่วนใหญ่ที่ทำการทดสอบ

ถึงแม้ว่ามีหน้ากากจำนวนไม่กี่ชิ้นที่แสดงค่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (effective filtration efficiency – EFE)

ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างการหายใจเข้าและการหายใจออก

โดยที่ประสิทธิภาพในการกรองอากาศสำหรับการหายใจออกมีค่าสูงกว่าโดยปกติ Hill, Hull, และ MacCuspie ([2020](#))

ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อการสวมหน้ากากมีการปิดแน่นแนบสนิทอย่างดีกับรูปใบหน้าก็จะได้ประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ที่ใกล้เคียงกันอย่างมากกับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ของหน้ากาก มีการศึกษาวิจัยจำนวนหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่ามีการปรับปรุงในเรื่องการปิดแน่นแนบสนิทระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (mask fit) ให้ดีขึ้นได้

(หรืออีกนัยหนึ่งคือประสิทธิภาพในการกรองอากาศที่ได้รับการปรับปรุง)

เมื่อมีการใช้อุปกรณ์ภายนอก (external devices)

เพื่อช่วยให้การสวมหน้ากากมีการปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้า (Brooks และคณะ [2021](#); Clapp และคณะ [2021](#); Mueller และคณะ [2020](#); Hill, Hull, และ MacCuspie [2020](#))

โดยรวมแล้วยังมีการขาดแคลนข้อมูลสำหรับสภาวะเงื่อนไขการกรองที่เหมาะสม (ที่สอดคล้องกันกับอัตราการหายใจตามปกติ คือความเร็วหน้า (face velocities) ระหว่าง 0.5 – 3 ซ.ม./วินาที) **ที่เป็น size resolved**

และครอบคลุมละอองลอยชีวภาพทุกช่วงขนาดจากร่างกายมนุษย์ที่อยู่ในความสนใจ (จากประมาณ 200 นาโนเมตร ถึง 10 ไมครอน)

และที่เป็นการพิจารณาผลกระทบของการแนบสนิทระหว่างหน้ากากกับใบหน้า (mask fit) ในสภาพเหมือนจริงเฉพาะ (specific realistic settings)

การศึกษาวิจัยนี้พูดถึงประเด็นเหล่านี้ในห้องเรียนที่มีการเว้นระยะห่างทางกายภาพ

1.4. ละอองลอยจากการหายใจของมนุษย์ (Human respiratory aerosols)

ในการศึกษาวิจัยนี้เรากำหนดขอบเขตของขนาดอนุภาคละอองลอยที่มีเชื้อไวรัสซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านทางลมหายใจเข้า (ละอองลอยชีวภาพ) อยู่ที่ระหว่าง

100 นาโนเมตรถึง 5 ไมครอนด้วยเหตุผลหลายอย่าง

ประการแรกอนุภาคละอองลอยในช่วงขนาดนี้ได้รับการแสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถเป็นสื่อ นำพาเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2 ที่ยังมีชีวิต (Chia และคณะ [2020](#))

ประการที่สองอนุภาคละอองลอยในช่วงขนาดนี้สอดคล้องตรงกันกับขนาดของอนุภาคที่ ร่างกายมนุษย์ปล่อยออกมาในระหว่างทำกิจกรรมทั่ว ๆ ไปในห้องเรียน ซึ่งได้แก่

การหายใจ การพูดคุย การร้องเพลง การไอ และการจาม (Morawska และคณะ [2009](#); Johnson และคณะ [2011](#); Alsved และคณะ [2020](#))

ประการที่สามอนุภาคละอองลอยเหล่านี้สามารถฝ่าฝืนแนวทางปฏิบัติการเว้นระยะห่างทาง กายภาพที่ระยะ 2 เมตรในขณะนี้ได้อย่างง่ายดาย

เนื่องจากสามารถลอยตัวในอากาศได้เป็นเวลานานและถูกพัดพาโดยกระแสลมใน สภาพแวดล้อมภายในตัวอาคาร ละอองลอยจากการหายใจที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนสามารถทำให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางในสมดุล (equilibrium diameter)

ที่มีขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดั้งเดิมได้อย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 1 วินาที)

เนื่องจากการระเหยและการเข้าสู่สมดุลที่สภาวะเงื่อนไขรอบตัว (Nicas, Nazaroff, และ Hubbard [2005](#); Holmgren และคณะ [2011](#); Alsved และคณะ [2020](#); Kohanski, Lo, และ Waring [2020](#)) ด้วยเหตุนี้ช่วงขนาดที่มีการพิจารณาว่าสอดคล้องกันกับละอองฝอย ณ จุดที่มีการปล่อยออกมาจึงมีขนาดอยู่ในช่วงจาก 200 นาโนเมตรถึง 10 ไมครอน และช่วงขนาดของอนุภาคที่สมดุล (equilibrium particle size range) ระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 5 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องตรงกันกับช่วงขนาดที่อธิบายโดย Fennelly ([2020](#))

1.5. จุดสำคัญของการศึกษาวิจัย (Paper focus)

จุดสำคัญของการศึกษาวิจัยนี้คือการวัดค่าจากการทดลอง (experimental measurements) ที่ช่วยลดความไม่แน่นอนของ model input ต่าง ๆ และค่าประมาณต่าง ๆ (approximations) สำหรับแบบจำลอง Wells–Riley ที่ใช้กับห้องเรียน (classroom setting) และเพื่อศึกษาผลกระทบของการดำเนินการ (intervention) ที่จำเพาะ (อัตราการระบายอากาศและประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก) ต่อความเป็นไปได้ในการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขของละอองลอย (aerosol conditional infection probabilities) โดยการใช้แบบจำลองนี้

ในการศึกษาวิจัยนี้เราได้ตั้งสมมติฐานว่ามีการใช้มาตรการต่าง ๆ ในการลดความหนาแน่นแออัดของการรวมตัวกันของผู้คน และควบคุมการแพร่กระจายเชื้อในระยะใกล้ ๆ จากละอองฝอยและวัตถุปนเปื้อนเชื้อ พลวัตของละอองลอยและการวัดการแพร่กระจายตัวได้รับการดำเนินการเพื่อประเมินผลกระทบของอัตราการระบายอากาศซึ่งมีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC ventilation rates) ต่อความเข้มข้นของละอองลอยและวัดปริมาณ (quantify) อัตราการสูญเสีย (loss rates) ของอนุภาค มีการวัดประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (effective filtration efficiency – EFE) ของหน้ากากสำหรับหน้ากาก 4 ชนิดขณะที่ใช้ตัวกรองหน้ากาก 2 ชนิด และขณะที่ไม่ใช้ตัวกรองหน้ากาก และเพื่อเป็นการหาข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของการปิดแน่นแนบสนิทระหว่างหน้ากากกับ ใบหน้า (mask fit) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

มีการดำเนินการหาค่าประมาณของความเป็นไปได้ในการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข
 โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์การระบายอากาศที่วัดได้ (measured ventilation parameters)
 และค่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของหน้ากากเป็น inputs สำหรับแบบจำลอง
 Wells–Riley ในสถานการณ์ต่าง ๆ ระหว่างอาจารย์ผู้สอนกับผู้เรียนจำนวน 3
 สถานการณ์ด้วยกัน โดยมีการผสมผสานการดำเนินการ (intervention) ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน
 คือการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) และการสวมหน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน
 วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาวิจัยนี้คือเพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับ
 ประสิทธิภาพของหน้ากาก การระบายอากาศ และการผสมผสานสองอย่างนี้เข้าด้วยกัน
 ในการลดความเป็นไปได้ของการแพร่กระจายละอองลอยโควิด 19 (และโรคอื่น ๆ
 ที่ติดต่อผ่านทางอากาศ) ในบริเวณพื้นที่ที่มีการรวมตัวกันมากอย่างเช่นห้องเรียน

2. วิธีการและเครื่องมือ (Methods and materials)

2.1. การประมาณการความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข (Estimating conditional infection probability)

สมการ Wells–Riley (Riley, Murphy, และ Riley [1978](#))
 เป็นการทำนายความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข (P)
 โดยอิงตามการที่บุคคลที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อหายใจเข้ารับเอาปริมาณควอนตัมที่
 สามารถทำให้ติดเชื้อได้ (D_q) ในระหว่างช่วงระยะเวลาของการทำกิจกรรมหนึ่ง ๆ โดยที่

$$P=1-\exp(-D_q).P=1-\exp(-D_q).$$

(1)

ปริมาณควอนตัมที่สามารถทำให้ติดเชื้อได้มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับจำนวนอนุภาคละออง
 ลอยและจำนวนชุดของเชื้อไวรัสที่ยังมีชีวิต (number of viable virus copies)
 ที่หายใจเข้าไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข คือ

$$\text{ค่า } P=1-\exp(-1)P=1-\exp(-1) = 63.2\%$$

ประสิทธิภาพของสมการนี้ในการทำนายความเป็นไปได้ของการติดเชื้อขึ้นอยู่กับว่าสมมติฐานที่เป็นพื้นฐานนั้นตั้งไว้ดีเพียงใด สมมติฐานเหล่านี้ได้แก่ (Noakes และSleigh [2009](#)): ระยะฟักตัวของไวรัส >>> ช่วงเวลา (timescale) สำหรับเหตุการณ์ที่มี ปริมาณมาก ๆ เพียงครั้งเดียวเทียบเท่ากับปริมาณน้อย ๆ หลาย ๆ ครั้งที่ได้รับในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และวิธีการที่น่าจะเป็นไปได้ที่เหมาะสมที่สุดกับประชากรขนาดใหญ่ สองสมมติฐานแรกอาจจะเหมาะสมกับหลาย ๆ สถานการณ์สำหรับซาร์สโคโรนาไวรัส 2 ในสถานะที่มีความเสี่ยงสูง ที่มีช่วงระยะเวลาการสัมผัสเชื้อจำกัด (ประมาณไม่กี่ชั่วโมง) สมมติฐานที่สามมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับข้อจำกัดในการนำเอาแบบจำลองไปใช้ตามที่ได้กำหนดขึ้นกับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่มีจำนวนประชากรน้อย ๆ

การประมาณค่าความเป็นไปได้ในการติดเชื้อจากการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศจำเป็นจะต้องมีการคำนวณวิวัฒนาการของความเข้มข้นของละอองลอยชีวภาพในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ

เพื่อที่จะประมาณจำนวนของควอนตัมที่ทำให้เกิดการติดเชื้อได้ที่บุคคลที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อหายใจเข้าไป โดยปรกติมีการใช้สมการ Wells–Riley

โดยการใช้การประมาณการสำหรับห้องที่มีการผสมผสานกันดี (well-mixed room approximation) ซึ่งใช้แบบจำลองชนิด simple control-volume model (เรียกรวม ๆ กันว่าแบบจำลอง Wells–Riley) เพราะว่าคิดค้นโดย Riley, Murphy, และ Riley ([1978](#)) และขึ้นอยู่กับสมมติฐาน

อื่น ๆ (Noakes และ Sleigh [2009](#))

ในกรณีของผู้ที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ซึ่งอยู่ในห้อง ความเข้มข้นที่เราสนใจเป็นความเข้มข้นของละอองลอยที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ สำหรับการวัดที่น่าเสนอในการศึกษาวิจัยที่มุ่งความสนใจไปที่ประสิทธิภาพของการดำเนินการ (intervention) ต่าง ๆ มีการปล่อยละอองลอยเกลือแกงเข้าไปภายในห้อง เพื่อทำการคำนวณการกระจายตัวและพลวัตของละอองลอย รวมทั้งประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก สำหรับในกรณีเหล่านั้นเราให้ความสนใจในการอธิบายวิวัฒนาการของความเข้มข้นของ

อนุภาคเคลื่อนแกว่งภายในห้อง (ที่มาของสมการต่าง ๆ
สำหรับเรื่องนี้อยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information))

2.1.1. ความหนาแน่นและปริมาณของควอนตัมที่ทำให้ติดเชื้อ (Infectious quanta number density and dose)

ในกรณีของผู้ที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้สำหรับสมการ Wells–Riley ปริมาณ (dose) ใน [สมการที่1](#) เป็น function

ของอัตราการปล่อยควอนตัมสุทธิตั้งหมดที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้

\dot{Q} \dot{Q} ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของควอนตัมที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ซึ่งมีอยู่ในห้อง (n_q) ในฐานะที่เป็น function ของเวลา นั่นก็คือ

$$n_q = \dot{Q} \lambda_q V_R [1 - (1 - n_{q0} \lambda_q V_R \dot{Q}) \exp(-\lambda_q t)]$$

$$n_q = \dot{Q} \lambda_q V_R [1 - (1 - n_{q0} \lambda_q V_R \dot{Q}) \exp(-\lambda_q t)]$$

(2) โดยที่

λ_q เป็นอัตราการสูญเสียอันดับแรกทั้งหมดสำหรับควอนตัมภายในห้อง V_R เป็นปริมาตรห้อง และ n_{q0} n_{q0} เป็นความเข้มข้นของควอนตัมเริ่มแรกตอนเริ่มต้นของช่วงระยะเวลาการสัมผัสเชื้อ อัตราการปล่อยควอนตัมสุทธิตั้งหมด

\dot{Q} \dot{Q} ซึ่งมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับอัตราการปล่อยควอนตัมของแต่ละคน \dot{q} \dot{q} โดยที่

$$\dot{Q} = N \dot{q} (1 - \eta_{f, Mexh})$$

$$\dot{Q} = N \dot{q} (1 - \eta_{f, Mexh})$$

(3) โดยที่ N เป็นจำนวนของผู้ที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อที่อยู่ในห้อง

(โดยปกติกำหนดไว้ที่ “1”) และ

$\eta_{f, Mexh}$ $\eta_{f, Mexh}$ เป็นค่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ของหน้ากากที่แต่ละคนสวมใส่ในห้องในระหว่างการหายใจออก

อัตราการปล่อยควอนตัมสุทธิตั้งหมดที่กำหนดขอบเขตโดยวิธีนี้ทำให้สามารถรวมเอาการ

ใช้หน้ากากในการวิเคราะห์ได้ ปริมาณของควอนตัมที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ D_q ,

วัดได้จากการคูณค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของควอนตัมในห้อง (n^-_q n^-_q)

ในระหว่างเหตุการณ์กับอัตราการหายใจของผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อ ($\dot{V}_b \dot{V}_b$)
ในห้องด้วยช่วงระยะเวลาของเหตุการณ์ (t_b)

$$Dq = n^- q \dot{V}_b t_b (1 - \eta_{f, MInh}) Dq = n^- q \dot{V}_b t_b D(1 - \eta_{f, MInh})$$

(4)

โดยที่ปริมาณของควอนตัมที่หายใจเข้าไปได้ถูกเขียนไว้เพื่อพิจารณารวมถึงประสิทธิภาพ
ในการกรองอากาศ (EFE) ระหว่างการหายใจเข้า ($\eta_{f, MInh}$)

ของหน้ากากที่สวมโดยผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อที่อยู่ในห้อง

ในการศึกษาวิจัยนี้มีการตั้งสมมติฐานว่าควอนตัมที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้เป็นเชื้อ
ซาร์สโคโรนาไวรัส 2

ความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของควอนตัมในห้อง ($n^- q$) วัดจากการรวมกันของ [สมการที่ 2](#)
ตลอดช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา

สำหรับกรณีที่ยากซึ่งไม่มีควอนตัมที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้

ซึ่งมีอยู่ในห้องในตอนเริ่มต้นของช่วงระยะเวลาของเหตุการณ์ที่สนใจ การรวมกันของ
[สมการที่ 2](#) แสดงได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$n^- q = Q \lambda_q V_R (1 - 1 \lambda_{qtD} [1 - \exp(-\lambda_{qtD})]) . n^- q = Q \lambda_q V_R (1 - 1 \lambda_{qtD} [1 - \exp(-\lambda_{qtD})]) .$$

(5) อัตราการสูญเสีย λ_q รวมเอากลไกต่าง ๆ ที่มีการกำจัดอนุภาคและการ inactivation
สำหรับเชื้อไวรัส (k) ดังสมการข้างล่างนี้

$$\lambda_q = \lambda_{FA} + \lambda_f + \lambda_{TS} + k \lambda_q = \lambda_{FA} + \lambda_f + \lambda_{TS} + k$$

(6) โดยที่

λ_{FA} เป็นตัวแทนผลของการเจือจางจากอากาศบริสุทธิ์ λ_f เป็นการกำจัดควอนตัมเนื่องจากการกรองอากาศ

(จากระบบส่วนกลางและระบบในห้องเป็นการเฉพาะเพื่อเป็นส่วนเสริมตามความเหมาะสม)

λ_{TS} เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากการกองรวมกันอยู่ของควอนตัมในห้องหรือเนื่องมาจากการ
สะสมรวมตัวกันจากระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC)

กลไกการสูญเสียเพิ่มเติมซึ่งสามารถใช้ได้กับสถานการณ์นั้น ๆ สามารถเพิ่มลงใน [สมการที่ 6](#) ได้

การแสดงสูตรโดยประมาณสามารถทำได้สำหรับกรณีจำกัดโดยที่ D_q มีค่าน้อย ๆ

(คือ $D_q \leq 0.2$) และมีการตั้งสมมติฐานว่ามีค่าสถานะอยู่ตัวของควอนตัมในห้อง เมื่อแทนที่ D_q และ $n^- q n^- q$ โดยใช้ [สมการที่ 4](#) และ [สมการที่ 5](#) และ \dot{Q} \dot{Q} โดยใช้ 3 เราก็จะได้สมการดังข้างล่างนี้

$$P \approx N i \dot{q} \lambda V R \dot{V} b t D (1 - \eta_{f, MInh}) (1 - \eta_{f, MExh}). P \approx N i \dot{q} \lambda V R \dot{V} b t D (1 - \eta_{f, MInh}) (1 - \eta_{f, MExh}).$$

(7) ในขีดจำกัดนี้ความเป็นไปได้ในการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการปล่อยควอนตัม อัตราการหายใจของผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อ

ช่วงระยะเวลาของการสัมผัสเชื้อ

และผลผลิตที่ได้จากการแทรกซึมทะลุผ่านหน้ากากสำหรับการหายใจเข้าและการหายใจออก (ค่าการแทรกซึมทะลุผ่านหน้ากากเท่ากับ 1 ลบด้วยค่าประสิทธิภาพการกรองอากาศ (Hinds [1999](#))) และเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาตรของห้องและอัตราการสูญเสียอันดับแรก หากตั้งสมมติฐานว่าผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อและผู้ที่มีการติดเชื้อกำลังสวมหน้ากากที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) อย่างเดียวกัน

ถ้าอย่างนั้นก็หมายถึงว่ามีการฟุ้งพากันชนิดยกกำลังสองกับการแทรกซึมทะลุผ่านหน้ากากรากฏการณ์นี้มีความแข็งแกร่งกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียอันดับแรก

ซึ่งสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มการระบายอากาศภายในห้อง

ที่มาของสมการสำหรับเรื่องนี้อยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information))

2.2. พื้นที่ห้องเรียนที่ศึกษาวิจัย (Classroom space studied)

บริเวณพื้นที่ห้องเรียนที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้มีขนาด 126.4 ตารางเมตร

ความสูงของเพดานอยู่ที่ 2.870 เมตร ทำให้ห้องเรียนนี้มีปริมาตรรวมเท่ากับ

362.6 ลูกบาศก์เมตร

ห้องเรียนมีระบบจัดการปริมาณอากาศแบบผันแปรโดยควบคุมจากส่วนกลาง (central-station variable air volume (VAV) air handling unit)

ซึ่งได้รับการติดตั้งระบบการกรองอากาศชนิด MERV 15 ซึ่งให้บริการสำหรับหลาย ๆ

พื้นที่ภายในตัวอาคาร รวมทั้งบรรดาห้องเรียน สำนักงาน บริเวณพื้นที่ส่วนกลาง

ตลอดจนพื้นที่ห้องปฏิบัติการต่าง ๆ แต่ละพื้นที่ภายในตัวอาคารนี้มีการติดตั้งกล่อง VAV

อย่างน้อยหนึ่งกล่องขึ้นไปซึ่งทำหน้าที่ปรับปริมาณอากาศเข้าสู่ในห้องตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด (load changes)

เพราะว่าอัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดของระบบจัดการปริมาณอากาศแบบผันแปรที่ควบคุม

จากส่วนกลาง (88,900 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง และ 28,000 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

ตามลำดับ) มีค่าสูงกว่าอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่แต่ละห้องเป็นอย่างมาก

ดังนั้นจึงเกิดการเจือจางเป็นอย่างมากก่อนการหมุนเวียนกลับสู่ในห้อง

อัตราการไหลของอากาศภายนอกระบบแตกต่างกัน ตั้งแต่ต่ำสุด

20,261 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง จนถึง 88,900 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

พื้นที่ห้องเรียนที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นตัวแทนของห้องเรียนจำนวนมากภายในอาคารนี้

ซึ่งทุกห้องใช้ระบบ MV system ซึ่งมีกล่อง VAV

ทำหน้าที่จัดหาอากาศที่ได้รับการปรับสภาพแล้วกระจายผ่านตัวกระจายอากาศเหนือศีรษะ

แบบ 4 ทางซึ่งยึดอยู่กับที่จำนวน

4 ตัวด้วยกันที่ติดตั้งในเลย์เอาต์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

มีเครื่องดูดอากาศกลับคืนที่ติดตั้งเหนือศีรษะ (overhead return) อยู่ที่มุมด้านหลังห้อง

อากาศที่จัดหาให้สำหรับห้องเรียนโดยผ่านตัวกระจายอากาศเหนือศีรษะแบบ 4

ทางชนิดที่ยึดอยู่กับที่จะไหลออกจากตัวกระจายอากาศด้วยความเร็วที่เพียงพอ

โดยทำมุมเล็กน้อยกับเพดานห้องในลักษณะที่อากาศภายในห้องมีการผสมรวมกับอากาศที่

ไหลออกจากตัวกระจายอากาศโดยปรากฏการณ์ Coanda effect ซึ่งจะหักกลับ (temper)

กับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ก่อนที่จะไปถึงบริเวณพื้นที่ส่วนที่มีคนอยู่

กระบวนการผสมกันของอากาศที่ตัวกระจายอากาศแต่ละตัวและการจัดวางติดตั้งตัวกระจาย

อากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้รับการออกแบบให้มีการผสมผสานกันดีภายในห้อง

(ลักษณะเฉพาะตัวของการระบายอากาศเชิงกล (MV) (Zhang [2020](#)))

ซึ่งเป็นการรับประกันความสบายของผู้ที่อยู่ภายใน

ถึงแม้ว่ารูปแบบการจัดวางตำแหน่งของระบบการจัดการอากาศเข้าและออกภายในห้อง จะมุ่งไปที่การผสมผสานเพื่อให้เกิดความสบายแก่ผู้ที่อยู่ในห้อง แต่ก็ยังมีผลข้างเคียงในการที่จะผสมรวมเอาสิ่งปนเปื้อนใด ๆ ก็ตามทีอาจจะมีอยู่หรือเกิดขึ้นภายในบริเวณนั้นได้

อัตราการไหลต่ำสุดและสูงสุดของอากาศทั้งหมดสำหรับห้องเรียนในระหว่างที่ทำการ ทดสอบมีค่าตั้งแต่ 487.6 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ถึง 1832 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกันกับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ที่ 1.34 และ 5.05 อากาศภายนอกส่วนหนึ่งมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศแตกต่างกัน ตั้งแต่ประมาณ 72% ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ ๆ จนถึง 23% ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศสูง ๆ

โดยปกติแล้วห้องเรียนนี้รองรับผู้เรียนจำนวนทั้งสิ้น 48 คนและอาจารย์ผู้สอน 1 คน ทำให้ค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 2.58 ตารางเมตร/คน (รูปภาพพื้นที่ห้องเรียนในช่วงก่อนหน้าการจัดห้องเรียนใหม่จากการระบาดของโรคโควิด 19 แสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 1](#))

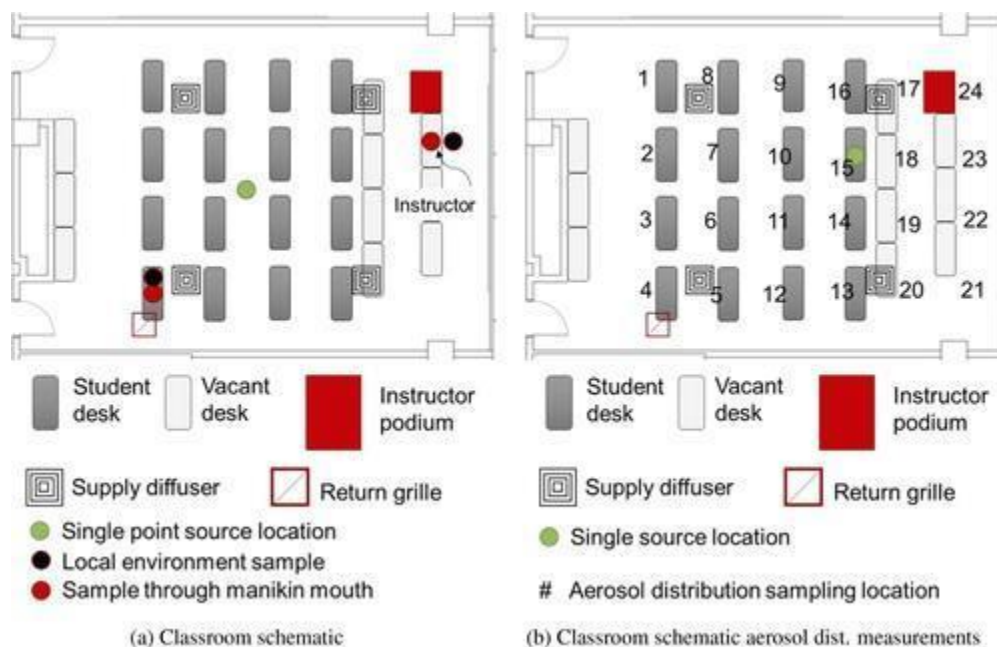
อย่างไรก็ตามการจัดห้องเรียนได้รับการแก้ไขดัดแปลงให้มีระยะห่าง 2.13 เมตรระหว่างผู้เรียนแต่ละคนและระยะห่าง

3.05 เมตรระหว่างอาจารย์ผู้สอนกับผู้เรียนเพื่อให้สอดคล้องขานรับกับสถานการณ์โควิด 19 การจัดห้องใหม่นี้ทำให้ห้องเรียนมีความจุลดลงเหลือเพียง 17 คน (ผู้เรียนจำนวนทั้งสิ้น 16 คนและอาจารย์ผู้สอน 1 คน) และค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 7.43 ตารางเมตร/คน [ภาพประกอบ 2a](#) แสดงให้เห็นแผนผังห้องเรียนที่มีความหนาแน่นลดลงและรูปแบบการจัดวางตำแหน่งของระบบการจัดการอากาศเข้าและออกซึ่งมีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) ภายในห้อง ในแผนผังนี้โต๊ะเรียนแต่ละตัวสำหรับผู้เรียนหนึ่งคน

ภาพประกอบ 1. แสดงบริเวณพื้นที่ห้องเรียนที่ใช้เป็นสนามทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้ (ภาพช่วงก่อนหน้าการจัดห้องเรียนเพราะการระบาดของโรคโควิด 19)



ภาพประกอบ 2 (a) แผนผังการจัดห้องเรียนที่ใช้เป็นสนามทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งแสดงตำแหน่งของโต๊ะเรียน โต๊ะว่าง โปเดียมของอาจารย์ผู้สอนหน้าห้องเรียน ตัวกระจายอากาศเข้าสู่ห้องและตัวดูดอากาศออกจากห้อง และ (b) แผนผังการจัดห้องเรียนซึ่งแสดงการกระจายและความหนาแน่นภายในห้องเรียน ตำแหน่งตัวเลขหมายถึงตำแหน่งที่มีการวัดความเข้มข้นของละอองลอย ตำแหน่งที่ตั้งของหุ่นผู้เรียนที่มีการปล่อยละอองลอยออกมาในระหว่างการตรวจวัดระบุเป็น จุดสีเขียว



มีการใช้หุ่นคนที่ใช้สำหรับการฝึกทำ CPR จำนวนทั้งสิ้น 17

ตัวซึ่งวางในตำแหน่งที่นั่งของผู้เรียนจำนวน 16 จุด และตัวที่ 17

วางบริเวณหน้าห้องตรงตำแหน่งอาจารย์ผู้สอน

เพื่อจำลองเหตุการณ์ในห้องเรียนระหว่างการตรวจวัด หุ่นคนที่ใช้สำหรับการฝึกทำ CPR นี้ได้รับการดัดแปลงให้สายยางที่ทำจากซิลิโคนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25.4 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19.05 มิลลิเมตร)

สามารถสอดผ่านด้านหลังของศีรษะของหุ่นให้ปลายทางออกของสายยางอยู่ในปากของหุ่น

สายยางนี้เชื่อมต่อกับเครื่องมือเก็บตัวอย่างละอองลอยหรือกับแหล่งต้นตอของละอองลอย

ตำแหน่งที่นั่งของผู้เรียนแต่ละคนยังมีหลอดไฟชนิดมิสไฟหลอด (ขนาด 75 วัตต์)

ติดตั้งอยู่ด้วยเพื่อจำลอง ความร้อนที่สมเหตุสมผลจากผู้ที่อยู่ในห้องเรียน

หลอดไฟเหล่านี้มีการเปิดในระหว่างทำการทดลอง

ภาพการติดตั้งเต็มรูปแบบในการทดลองแสดงไว้ใน[ภาพประกอบ 3](#)

รายละเอียดเพิ่มเติมในการจัดเตรียมห้องและเตรียมการทดลองอยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)

ภาพประกอบ 3. การจัดเตรียมห้องเรียนโดยใช้หุ่นคน (a)

ภาพจากด้านหน้าห้องมองไปทางข้างหลังห้อง และ (b)

ภาพจากด้านหลังห้องมองไปทางด้านหน้าห้อง



(a) View from front of room

(b) View from back of room

2.3. การเกิดขึ้นของละอองลอยและการวัด (Aerosol generation and measurement)

การตรวจวัดละอองลอยในห้องเรียนทำขึ้นเพื่อ (1) ประเมินความถูกต้องสมบูรณ์ (validity) ของสมมติฐานว่ามีการผสมผสานกันดี (well-mixed assumption) ในแบบจำลอง Wells–Riley (2) ประเมินอัตราการสะสมก่อดัชนี/อัตราการสลายตัวและอัตราการสูญเสีย (decay and loss rates) ของอนุภาค และ (3)

เก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของหน้ากากชนิดต่าง ๆ ที่สวมใส่ มีการสร้างละอองลอยเกล็ดแก๊สชนิด polydisperse

โดยการทำให้สารละลายเกล็ดแก๊สที่มีความเข้มข้น 20%

โดยนำหมอกในน้ำกลั่นกลายเป็นอะตอมโดยใช้เครื่องทำละอองลอย (aerosol generator) ชนิด TSI 3076 ที่มีอัตราการไหลอยู่ที่ 3 ± 0.5 ลิตรมาตรฐานต่อนาที (SLPM) ผลผลิตที่ได้จากเครื่องทำละอองลอยจะถูกทำให้แห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง (diffusion dryer) ชนิด TOPAS DDU 570/H

ตามมาด้วยการใช้เครื่องทำให้ละอองลอยมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นกลาง (aerosol neutralizer) 2 ครั้ง (ชนิด TSI 3077s ทั้ง 2 ครั้ง)

หลังจากผ่านการอบแห้งและการทำให้ละอองลอยมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นกลางแล้วก็มีการใช้เครื่องทำให้เจือจาง (axial diluter) เพื่อลดความหนาแน่นของอนุภาคลง และเพื่อให้ได้อัตราการไหลของละอองลอยทั้งหมดตามที่ต้องการ การใช้ละอองลอยที่มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางจะให้ค่าประมาณของประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของหน้ากากที่เป็นเชิงสงวนมากกว่า (more conservative)

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ละอองลอยที่ไม่มีการปรับประจุไฟฟ้าให้เป็นกลาง อัตราการไหลของละอองลอยทั้งหมดมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนหุ่นคน (หรือแหล่งกำเนิด) ที่ปล่อยละอองลอยเข้าสู่ภายในห้อง

ในการวัดละอองลอยมีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ กันจำนวน 3 ประเภท เพื่อวัดความเข้มข้น **ชนิด size-resolved (size-resolved concentration)** ที่จุดต่าง ๆ แยกกันภายในห้องเรียนและผ่านทางปากของหุ่นคน เครื่องมือ 3 ประเภทที่ว่านี้ได้แก่ เครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (electrical low-pressure impactor – ELPI) ยี่ห้อ Dekati และเครื่องคัดขนาดอนุภาคที่ใช้หลักอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic particle sizer) ชนิด APS และ TSI 3321

ซึ่งทั้งสองชนิดคัดแบ่งขนาดของอนุภาคตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic diameter) ของอนุภาค และเครื่องคัดขนาดอนุภาคชนิด optical particle sizer จำนวน 2 ชนิด (TSI 3330)

ซึ่งคัดขนาดอนุภาคเป็นรายแต่ละอนุภาคตามการกระจายของแสง สำหรับข้อมูลที่เป็น **size-resolved** ประกติจะใช้จากผลที่ได้จากเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) และเครื่องคัดขนาดอนุภาคที่ใช้หลักอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic particle sizer – APS) เส้นผ่าศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic diameter)

ได้รับการประมาณสำหรับเครื่องคัดขนาดอนุภาคชนิด optical particle sizer

โดยอิงตามการเปรียบเทียบกับการกระจายตัวของขนาด (size distribution)

ที่ได้จากเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) และการหา **single diameter scaling factor** ที่ทำให้เกิดความสอดคล้องเข้ากันได้อย่างดีที่สุดในระหว่างการกระจาย

รายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมืออยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเกล็ดแกงที่ใช้เป็นตัวแทน

ซึ่งสร้างขึ้นให้มีอัตราการไหลของ **อากาศเจือจาง (dilution airflow rate)** อยู่ที่ 120 ± 12

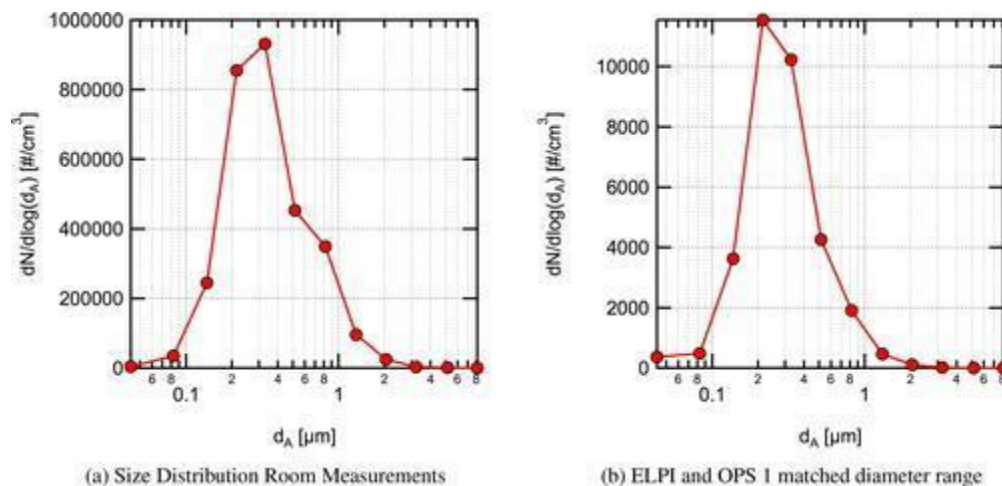
ลิตรมาตรฐานต่อนาที (SLPM) และวัดโดยใช้เครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

แสดงไว้ใน **ภาพประกอบ 4a** การกระจายตัวมีค่ากลางมัธยฐานของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (count median diameter - CMD) อยู่ที่ 0.25 ไมครอน

ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของเส้นผ่าศูนย์กลาง (geometric mean diameter - GMD) อยู่ที่ 0.34

ไมครอน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิต (geometric standard deviation - GSD) อยู่ที่ 1.86 อนุภาคที่มีความเข้มข้นมาก ๆ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic diameter) อยู่ในช่วงจาก 0.043 ไมครอนไปจนถึงประมาณ 3.2 ไมครอน การกระจายตัวของขนาดไม่ได้มีรูปแบบเป็น log-normal ที่สมบูรณ์แบบ และปรากฏว่ามีฐานนิยม (mode) 2 ค่า (ฐานนิยมที่อยู่ตรงกลางมีค่าราว ๆ 0.25 ไมครอน และฐานนิยมที่สองมีค่าราว ๆ 0.8 ไมครอน) ตามที่ระบุข้างต้นโดย bump ทางด้านขวามือของการกระจาย ช่วงขนาดของอนุภาคที่ตรวจวัดในการศึกษาวิจัยนี้เป็นตัวแทนของช่วงขนาดปกติของ อนุภาคละอองลอยที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างการหายใจ การพูดคุย และการไอ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของละอองลอยที่ใช้ในการทดลองนี้มากกว่าความเข้มข้นของ ละอองลอยที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างการหายใจ การพูดคุย หรือการไอหลายเท่าตัว ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะแยกแยะความเข้มข้นของละอองลอยเกลือแกงจากความเข้มข้นของ ละอองลอยพื้นหลัง (background aerosol concentration) ในห้อง

ภาพประกอบ 4. a. การกระจายตัวของขนาดละอองลอยเกลือแกงในฐานะที่เป็น function ของเส้นผ่าศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ (dA) ที่เกิดจากเครื่องผลิตละอองลอยซึ่งวัดโดยตรงหลังจากการเจือจาง b. การกระจายตัวของขนาดละอองลอยเกลือแกงที่วัดโดยใช้เครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) ในระหว่างการวัดประสิทธิภาพของการกรองอากาศซึ่งวัดที่ตำแหน่งที่ 4 ในภาพประกอบ 2b หลังจากเข้าสู่ภาวะคงที่ (steady-state) แถบความคลาดเคลื่อน (error band) ซึ่งหมายถึงความไม่แน่นอนเนื่องมาจากการผันแปรแบบสุ่ม (random variation) ระหว่าง averaging interval มีค่าน้อยกว่าสัญลักษณ์ที่ใช้และมองไม่เห็นในกราฟนี้



2.4. พลวัตและการกระจายของละอองลอย (Aerosol dynamics and distribution)

2.4.1. พลวัตของละอองลอย (Aerosol dynamics)

ละอองลอยมีการกระจายตัวจากแหล่งกำเนิดที่ตรงกลางห้องลอยขึ้นข้างบนและออกจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตรที่ระดับความสูง 0.97 เมตรโดยที่มีความเร็วอยู่ที่ 6.15 เซนติเมตร/วินาที (**jet Reynolds number = 576**) มีการวัดความเข้มข้นของละอองลอยที่เป็น **time-resolved** และที่เป็น **size-resolved** ที่บริเวณด้านหน้าและด้านหลังห้องเรียน

การวัดละอองลอยบริเวณหน้าห้องเรียนทำการวัดที่ใกล้กับตำแหน่งของอาจารย์ผู้สอน ([ดูภาพประกอบ 2a](#)) ที่ระดับความสูง 1.2 เมตร

มีการเก็บตัวอย่างกับเครื่องคัดขนาดอนุภาคที่ใช้หลักอากาศพลศาสตร์ (APS)

และเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

ผ่านทางช่องทางเข้าของเครื่องมือซึ่งอยู่ในแนวตั้ง

การเก็บตัวอย่างบริเวณด้านหลังห้องเรียนทำที่บริเวณใกล้กับตะแกรงตัวดูดอากาศเหนือศีรษะ มีการใช้เครื่องคัดขนาดอนุภาคชนิด optical particle sizer (OPS) จำนวน 2 เครื่องในการเก็บตัวอย่างที่บริเวณนี้ที่ระดับความสูง 1.2 เมตร

ผ่านทางช่องทางเข้าของเครื่องมือซึ่งอยู่ในแนวตั้ง การเก็บตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือ 2 เครื่องในแต่ละจุดนี้ทำให้สามารถตรวจสอบความสม่ำเสมอระหว่างเครื่องมือแต่ละเครื่อง

มีการใช้เครื่อง **balometer** (TSI Alnor)

ในการวัดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าและไหลออกในขณะเริ่มต้นและสิ้นสุดการตรวจวัดแต่ละครั้ง

การทดลองครั้งที่สองเป็นการประเมินความเข้มข้นของละอองลอยในห้องที่ภาวะคงที่ (steady-state) ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศในห้องต่ำลงและสูงขึ้น ละอองลอยจะถูกปล่อยเข้าไปในห้องอย่างสม่ำเสมอผ่านทางปากของหุ่นผู้เรียนจำนวน 15 ตัว ที่ไม่มีการเก็บตัวอย่าง

(เพื่อให้มีการกระจายตัวเป็นรูปแบบเดียวกันสม่ำเสมอภายในห้อง)

เป็นระยะเวลายาวนานกว่า 4 เท่าของค่าคงที่เวลา (time constant)

สำหรับอัตราการไหลต่ำ ๆ ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 1.34 ($T=1/\lambda T=1/\lambda$) ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของละอองลอยในห้องเข้าสู่ภาวะคงที่ (steady-state) ตามที่วัดโดยใช้เครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) ทันทีที่เข้าถึงภาวะคงที่ (steady-state)

การไหลของอากาศเข้าสู่ห้องโดยระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC system) จะเพิ่มสูงขึ้น อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) จะอยู่ที่ 5.05

โดยการให้น้ำหนักกับเครื่องควบคุมความร้อน (thermostat)

ในห้องที่ใช้แหล่งความร้อนในท้องถิ่น (local heat source)

และมีการวัดวิวัฒนาการของเวลา (time evolution)

ของการลดลงของความเข้มข้นของละอองลอย

2.4.2. การกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอย (Aerosol spatial distribution)

การวัดการกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอยในห้องก็เพื่อที่จะประเมินความถูกต้องแม่นยำของการประมาณการผสมผสานกันดีภายในห้อง (well-mixed room approximation)

ในการจำลอง Wells–Riley

สำหรับการวัดค่าเหล่านี้ละอองลอยจะถูกปล่อยเข้าไปในห้องอย่างสม่ำเสมอเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 4 เท่าของค่าคงที่เวลา (time constant)

สำหรับการสะสมความหนาแน่นของละอองลอยในห้อง

ซึ่งส่งผลให้มีการกระจายตัวของละอองลอยในภาวะคงที่โดยประมาณ
การวัดละอองลอยชนิด size-resolved ทำในจุดต่าง ๆ
ถัดจากตำแหน่งของผู้เรียนแต่ละคนและที่ตำแหน่งต่าง ๆ
ที่เป็นไปได้ว่าอาจารย์ผู้สอนอาจจะไปยืนอยู่ (จุดตำแหน่งต่าง ๆ ระบุโดยตัวเลขใน
[ภาพประกอบ 2b](#)) โดยการใช้เครื่องคัดขนาดอนุภาคชนิด optical particle sizer เครื่องที่ 1

2.5. ประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก (Effective filtration efficiency)

มีการประเมินหน้ากากทั้งหมด 4 ชนิดที่ได้รับการออกแบบให้สวมปิดจมูกและปาก
เพื่อป้องกันอนุภากระหว่างการหายใจ หน้ากากที่ได้รับการทดสอบได้แก่
หน้ากากเชิงพาณิชย์ที่ทำจากผ้าฝ้ายถัก 4 ชั้น หน้ากาก 3
ชั้นที่ขึ้นรูปโดยตรงจากเส้นใยโพลีโพรพิลีน (ผลิตภัณฑ์ ADO Pro Pac Insulation
Fabric) ซึ่งได้รับการออกแบบโดยคณะกรรมการ UW-Madison emergency operations
committee (EOC) และผลิตโดยผู้ผลิตในท้องถิ่นที่ตัดเย็บตามสั่งให้กับ UW-Madison
(คือบริษัท Laacke & Joys Design & Manufacturing) ซึ่งเรียกกันตลอดว่าหน้ากาก EOC
หน้ากากชนิดใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งซึ่งไม่ใช่หน้ากากทางการแพทย์ หน้ากากชนิดนี้มี 3 ชั้น ๆ
กลางทำมาจากโพลีโพรพิลีนชนิดเมลต์โบลน (หน้ากากชนิดใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งยี่ห้อ Hodo)
ซึ่งเรียกกันตลอดว่าหน้ากากหัตถการ (procedure mask)
และหน้ากากทางการแพทย์ระดับ 2 ตามมาตรฐาน ASTM F2100 (ASTM [2019](#))
(Medicom, SafeMask FreeFlow)
หน้ากากทั้งหมดนี้ยกเว้นหน้ากากเชิงพาณิชย์ที่ทำจากผ้าฝ้ายถัก 4 ชั้นล้วนมีแถบโลหะบาง
ๆ ตรงจมูกที่ดัดเข้ารูปกับดั้งจมูกได้ ถึงแม้ว่าหน้ากากทั้ง 4
ชนิดนี้ไม่ใช่รายการบัญชีหน้ากากที่ครบถ้วนทุกชนิดแต่ก็สามารถเป็นตัวแทนของหน้ากาก
ที่ผู้คนอาจจะเข้าถึงได้ พื้นผิวบริเวณใบหน้าของหุ่นคนสำหรับการฝึกทำ CPR
ซึ่งทำมาจากพลาสติกแข็งได้รับการดัดแปลงแก้ไขเพื่อให้สอดคล้องสามารถเป็นตัวแทน
ใบหน้าของมนุษย์ได้ดีขึ้น
รูปภาพหน้ากากตามที่ติดตั้งในหุ่นคนสำหรับการวัดประสิทธิภาพการกรองอากาศอยู่ในส่วน

ของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)

พร้อมกับข้อมูลเพิ่มเติมที่เกี่ยวกับการดัดแปลงแก้ไขใบหน้าของหุ่นคน

การวัดกระทำขึ้นในระหว่างที่มีการสวมใส่หน้ากากปิดแน่นแนบสนิทใบหน้า
ในลักษณะเดียวกันกับที่ผู้สวมใส่ต้องการให้การสวมหน้ากากมีประสิทธิภาพ
นั่นก็คือสวมปิดจมูกและปากอย่างสิ้นเชิงและมีการบีบแถบโลหะบาง ๆ บริเวณจมูก (ถ้ามี)
ให้เข้ากับโครงสร้างใบหน้าของหุ่น นอกจากนี้ยังมีการใช้อุปกรณ์ช่วยปรับสายหน้ากาก
(adjustable mask ear saver) (Seljan Company, <https://earsaver.net/>)

เพื่อปรับให้ตัวหน้ากากปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าของหุ่น

การปิดแน่นแนบสนิทของหน้ากากกับใบหน้าของหุ่นคนมีความใกล้เคียงกับการสวมที่ดีที่สุด
ในคนที่หน้ากากแต่ละชนิดจะสามารถทำได้

แต่ถึงแม้ว่าจะมีการสวมหน้ากากปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าของหุ่นดีขนาดนี้แล้วก็ตาม
ก็ยังสามารถมองเห็นช่องว่างบริเวณใกล้กับดั้งจมูก

รวมทั้งบริเวณด้านข้างและด้านล่างของหน้ากาก ซึ่งทำให้เกิดการรั่วรอบ ๆ หน้ากากได้
เรื่องนี้เกิดขึ้นเป็นการเฉพาะกับหน้ากากที่ทำมาจากผ้าฝ้ายถักซึ่งไม่มีแถบโลหะบาง ๆ

บริเวณจมูก และเกิดกับหน้ากากหัตถการซึ่งโลหะบาง ๆ

บริเวณจมูกเกิดการคลายตัวไม่คงรูป

เรายังได้ทำการประเมินการใช้ตัวรั้งหน้ากาก 2 ชนิด

ชนิดแรกได้รับการพัฒนาร่วมกับบริษัท Lennon Rodgers ที่ the UW-Madison
Makerspace (Badger Seal, <https://making.engr.wisc.edu/mask-fitter/>) และชนิดที่ 2

ซึ่งเป็นตัวรั้งหน้ากากเชิงพานิชย์ (Fix the Mask (FTM) mask

brace, <https://www.fixthemask.com/>)

ตัวรั้งหน้ากากเหล่านี้ได้รับการออกแบบเพื่อให้ปิดผนึกแน่นระหว่างหน้ากากกับใบหน้า
ผู้สวม เพื่อลดการรั่วซึมรอบหน้ากากให้มันน้อยที่สุด

ซึ่งอาจจะมีความเป็นไปได้ในการที่จะทำให้เกิดการกรองอากาศของหน้ากากได้อย่างเต็ม
ประสิทธิภาพ

ในการใช้ตัวรั้งหน้ากากนี้ตัวหน้ากากจำเป็นจะต้องมีการลดแรงดันให้ต่ำลงอย่างสมเหตุ
สมผลที่อัตราการไหลของการหายใจปกติ

วัสดุของหน้ากากทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นไปตามข้อกำหนด โดยที่มีการลดแรงดันลงต่ำกว่า 40 ปาสกาลสำหรับความเร็วหน้า (face velocity) ที่ 3.5 ± 0.5 เซนติเมตร/วินาที (ตามที่วัดในการทดลองอื่น ๆ กับพื้นที่ที่มีการไหล (flow area) ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 25.4 มิลลิเมตร) ซึ่งเทียบเท่ากับอัตราการไหลเต็มที่ในหน้ากาก (full mask flowrate) ที่ 28.3 ลิตร/นาที รูปภาพของตัวรีงหน้ากากที่ติดตั้งในหุ่นคนกับหน้ากากและข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ของหน้ากากที่ใช้อยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)

การเล็ดรอดของละอองลอยจากการรั่วของหน้ากากทำให้การประมาณการค่าความเป็นไปได้ของการติดเชื้อโดยใช้แบบจำลอง Wells–Riley มีความไม่แน่นอนเป็นอย่างมากเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของหน้ากาก เราได้ให้คำจำกัดความของค่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ว่าเป็นค่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากากที่ผู้ใช้หน้ากากสวมใส่ ซึ่งค่านี้จะต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ของหน้ากาก ซึ่งพิจารณาแค่เพียงการไหลผ่านวัสดุที่ใช้ทำหน้ากากเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วเนื่องจากการลดลงของแรงดันเกิดขึ้นทั่ววัสดุกรองของหน้ากาก จึงคาดได้ว่าในการสวมหน้ากากตามปกติ การไหลของอากาศส่วนใหญ่จะออกไปทางด้านข้างของหน้ากาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกรองอากาศมีการลดลงเป็นอย่างมากในขณะสวมใส่ ซึ่งนั่นก็คือประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก (effective mask filtration efficiency) ค่าประมาณการอย่างง่าย ๆ ของความเร็วในจุดที่มีการรั่ว (leakage velocity) สำหรับการลดลงของแรงดันต่ำในหน้ากากที่ 20 ปาสกาล

$$v = \sqrt{(2\Delta P)/\rho} \quad \text{จากสมการ Bernoulli}$$

ทำให้ได้ค่าความเร็วในจุดที่มีการรั่วที่เป็นไปได้ (potential leakage velocity) อยู่ที่ 5.9 เมตร/วินาที ซึ่งสำหรับในพื้นที่ที่มีการรั่วขนาด 1 ตารางเซนติเมตรจะส่งผลให้มีอัตราการไหลในบริเวณที่รั่วอยู่ที่ 35 ลิตร/นาที (โดยการอนุมานว่ามีการลดแรงดันอย่างคงที่)

อัตราการไหลขนาดนี้สูงกว่าอัตราการไหลในการหายใจตามปกติที่เกี่ยวข้องกับการทำกิจกรรมส่วนใหญ่ (Adams [1993](#)) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าถ้าหากมีการรั่วเช่นนั้น การไหลส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นผ่านทางจุดที่รั่วและไม่ผ่านทางหน้ากาก

การวัดประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ของหน้ากากกระทำโดยการปล่อยละอองลอยเกลือแกงที่ได้รับการปรับประจุไฟฟ้าให้เป็นกลางแล้วชนิด polydisperse

อย่างเดียวกันกับที่ใช้ในการวัดพลวัตและการกระจายตัวของละอองลอยเข้าสู่ภายในห้อง การปล่อยละอองลอยที่วุ่นนี้เข้าสู่ภายในห้องเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระหว่างการตรวจวัด การตรวจวัดจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าความเข้มข้นของละอองลอยภายในห้องจะถึงจุดภาวะคงที่โดยประมาณ (approximate steady state) ซึ่งมากกว่า 3

เท่าของค่าคงที่หลังจากเริ่มปล่อยซึ่งมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) อยู่ที่ 1.34

การกระจายของขนาดอนุภาคละอองลอยในห้องซึ่งวัดจากเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) หลังจากทีละอองลอยถึงภาวะคงที่ (steady) ภายในห้องแสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 4b](#) การกระจายที่แสดงนี้วัดที่บริเวณด้านหลังห้องใกล้กับตะแกรงเครื่องดูดอากาศออก (ตำแหน่งที่ 4 ใน [ภาพประกอบ 2b](#)) ในขณะที่การกระจายที่แสดงก่อนหน้านี้ใน [ภาพประกอบ 4a](#) เป็นการกระจายของขนาดอนุภาคละอองลอยที่ปล่อยเข้าไปในห้อง

การวัดประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

สำหรับการหายใจเข้ามีการตรวจวัดโดยการเก็บตัวอย่างอากาศจากในห้องโดยผ่านท่อสายยางซิลิโคนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 19.05 มิลลิเมตร

ซึ่งติดตั้งไว้ภายในปากของหุ่นซึ่งเชื่อมต่อโดยผ่านข้อต่อลดขนาดที่ทำจากทองเหลือง เข้ากับท่อสายยางซิลิโคนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6.35 มิลลิเมตร

ซึ่งเชื่อมต่อกับทางเข้าเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

ตัวอย่างทั้งหมดถูกส่งไปยังเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

ที่อัตราการไหลของตัวอย่างอยู่ที่ 9.7 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลขนาดนี้ใกล้เคียงกับอัตราการหายใจเข้าในระหว่างการนั่งและ/หรือการยืนสำหรับผู้ใหญ่ (Adams [1993](#)) พื้นที่ที่มีการไหลของหน้ากากโดยปกติ (typical mask flow

areas) สำหรับในส่วนนี้อยู่ที่ประมาณ

100–200 ตารางเซนติเมตร

โดยอนุมานว่าการไหลที่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วบริเวณนี้ทำให้ได้ความเร็วหน้าโดยประมาณ (estimated face velocities) อยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 1.6 เซนติเมตร/วินาที

ซึ่งต่ำกว่าที่ใช้ในการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE)

ของหน้ากากเกือบจะทั้งหมดที่แจกแจงในบทที่ 1.3 อย่างมีนัยสำคัญ

การตรวจวัดทั้งหมดกระทำโดยใช้เครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

และใช้ขั้นตอนวิธีการดังต่อไปนี้ (1) เก็บตัวอย่างอากาศในห้องเป็นเวลา 4

นาทิจโดยไม่สวมหน้ากากที่หุ่น

(2) สวมหน้ากากเข้าที่หุ่น (3)

เก็บตัวอย่างอากาศในห้องผ่านหน้ากากที่สวมอยู่กับหุ่นเป็นเวลา 4

นาทิจหลังจากการไหลเข้าสู่สมดุล (ประมาณ 1 นาที) (4) ถอดหน้ากากออกจากหุ่น และ (5)

เก็บตัวอย่างอากาศในห้องเป็นเวลา 4 นาทีโดยไม่สวมหน้ากากที่หุ่น

สำหรับการวัดที่เป็น size-resolved measurements

ประสิทธิภาพในการกรองอากาศสำหรับแต่ละขนาดของอนุภาคคำนวณจากสมการข้างล่างนี้

$$\eta_{f,Minh} = 1 - 2n^-M(d_A)n^-BR(d_A) + n^-AR(d_A) \quad \eta_{f,Minh} = 1 - 2n^-M(d_A)n^-RB(d_A) + n^-RA(d_A)$$

(8) โดยที่

$n^-M(d_A)n^-M(d_A)$ เป็นความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาคที่เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศ

พลศาสตร์ (d_A) ซึ่งวัดในขณะที่มีการสวมหน้ากากให้กับหุ่น และ n^-BRn^-RB กับ

n^-ARn^-RA เป็นความหนาแน่นเฉลี่ยที่วัดก่อนและหลังการถอดหน้ากากออกจากหุ่น

(ซึ่งเป็นตัวแทนความเข้มข้นภายในห้อง)

ความไม่แน่นอนในประสิทธิภาพการกรองอากาศซึ่งระบุจากการใช้ สมการที่

8 ได้รับการประมาณโดยการใช้ **first-order uncertainty propagation**

ค่าประมาณของความไม่แน่นอนรวมเอาการมีส่วนมาจากความผันแปรของการวัดแบบสุ่ม

(random measurement variation) ในระหว่างช่วงระยะเวลาที่ทำการวัดเพื่อหาค่าเฉลี่ย (averaging period) ความลำเอียง (bias)

เนื่องจากกระแสการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นภายในห้อง (drift in the room concentrations) และค่าประมาณของความลำเอียง (bias estimates) ที่อิงตาม **potential zero drift** สำหรับแต่ละช่องบนเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) โดยอนุมานว่า zero current drift สูงสุดอยู่ที่ $\pm 2.5 \text{ fA}$

(ดูจากหนังสือคู่มือของเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำยี่ห้อ Dekati

ในการเปลี่ยนค่านี้เป็นค่าความหนาแน่นสำหรับแต่ละขนาด (each size bin)

ประสิทธิภาพในการกรองอากาศทั้งหมดได้รับการคำนวณโดยใช้ สมการที่ 8

โดยที่ความหนาแน่นของละอองลอยชนิด size-resolved

ถูกแทนที่ด้วยความหนาแน่นทั้งหมด

ความไม่แน่นอนได้รับการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับการวัดชนิด size-resolved

โดยแตกต่างกันเพียงแค่ **แทนที่จะใช้ assumed current drift สำหรับ zero bias แต่ zero bias** ได้รับการอนุมานว่ามีค่าความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่

150 cm^{-3} โดยอ้างอิงตามข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในระหว่างการวัด (during the measurement campaign)

3. ผลที่ได้และการอภิปราย (Results and discussion)

3.1. พลวัตของละอองลอยและการกระจายตัว (Aerosol dynamics and distribution)

3.1.1. พลวัตของละอองลอย (Aerosol dynamics)

การตอบสนองชั่วคราว (transient response)

ของความเข้มข้นของละอองลอยในห้องเรียนในระหว่างการสะสมรวมตัวกันและการสลายตัวในเวลาต่อมาที่บริเวณจุดตรวจวัด 2 จุดแสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 5](#)

การเก็บข้อมูลเริ่มต้นขึ้น 5 นาทีก่อนที่จะเริ่มปล่อยละอองลอยตอน 10:20

นาฬิกาจากจุดตำแหน่งการปล่อยตรงกลางจุดเดียว (แสดงใน [ภาพประกอบ 2a](#))

ละอองลอยถูกปล่อยที่อัตราคงที่โดยประมาณเป็นเวลา

1 ชั่วโมงซึ่งหลังจากนี้การไหลของละอองลอยจะหยุดลง

ในช่วงระหว่างที่มีการเก็บข้อมูลการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องเรียนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่

488 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) อยู่ที่ 1.34)

หลังจากที่การไหลของละอองลอยหยุดลงเมื่อเวลา 11:20 นาฬิกา

การแลกเปลี่ยนอากาศในห้องและบริเวณแวดล้อมทำให้ความเข้มข้นของละอองลอยในห้องลดลง

ภาพประกอบ 5.

ความเข้มข้นของละอองลอยในห้องเรียนระหว่างการสะสมรวมตัวกันของละอองลอยจากจุดตำแหน่งการปล่อยตรงกลางห้องจุดเดียว

และระหว่างการสลายตัวของละอองลอยหลังจากหยุดการปล่อยที่แหล่งกำเนิด a.

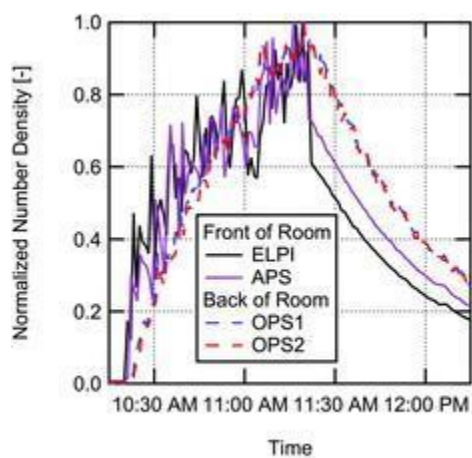
ความเข้มข้นของละอองลอยที่ทำให้เป็นปกติ (normalized) โดยค่าสูงสุด (peak value)

สำหรับเครื่องมือทั้ง 4 เครื่องที่ใช้ และ b. ความเข้มข้นของละอองลอยชนิด time-resolved

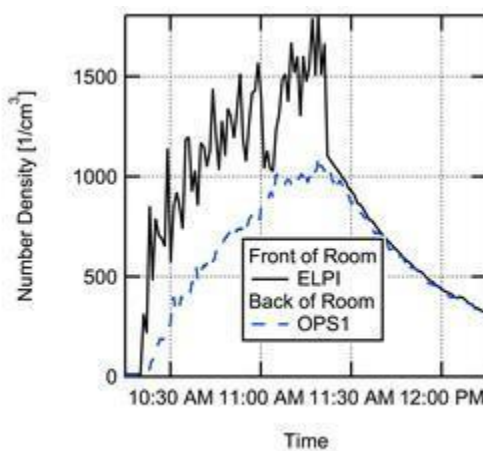
ที่วัดได้ในบริเวณหน้าห้องและบริเวณหลังห้องสำหรับช่วงเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกัน

การปล่อยละอองลอยเริ่มต้นเมื่อเวลา 10:20 นาฬิกาและสิ้นสุดลงเมื่อเวลา 11:20 นาฬิกา

การวัดนี้เป็นการวัดสำหรับช่วงขนาดที่เท่า ๆ กันโดยประมาณ (approximately matched size ranges) ระหว่างประมาณ 0.7 ไมครอนถึง 10 ไมครอน



(a) Normalized by peak



(b) ELPI and OPS 1 matched diameter range

ทันทีที่เริ่มปล่อยละอองลอยเมื่อเวลา 10:20

นาฬิกาก็พบว่าความเข้มข้นของละอองลอยที่บริเวณหน้าห้องมีการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ติดตามมาด้วยการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นประมาณทวีคูณ (กล่าวคือ

$\propto 1 - \exp(-\lambda t) \propto 1 - \exp(-\lambda t)$) เครื่องคัดขนาดอนุภาคชนิด optical particle sizer (OPS)

ที่บริเวณด้านหลังห้องใกล้เคียงกับจุดดูดอากาศออกแสดงการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของละอองลอยอย่างราบเรียบกว่ากันอย่างมาก

สิ่งนี้บ่งบอกว่าความไม่สม่ำเสมอของการกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอยในระดับหนึ่ง และละอองลอยมีการผสมผสานกันสม่ำเสมอมากกว่าในบริเวณหลังห้อง ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจจะเนื่องมาจากการที่จุดเก็บตัวอย่างที่ด้านหลังห้องอยู่ใกล้กับจุดดูดอากาศออก

ทันทีที่มีการปิดเครื่องหยุดปล่อยละอองลอยการสลายตัวของความเข้มข้นของละอองลอยที่ทั้งสองเครื่องที่บริเวณหน้าห้องก็ราบเรียบเกือบจะสิ้นเชิง

บางทีสิ่งที่น่าสนใจมากกว่าก็คือว่าความเข้มข้นทั้งหมดสิ้นเชิงที่แสดงใน ภาพประกอบ 5b สำหรับเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) และเครื่องคัดขนาดอนุภาคชนิด optical particle sizer เครื่องที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากสำหรับช่วงขนาดการตรวจวัด (measurement size range) ที่ใกล้เคียงกัน

ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายในห้องกลายมามีลักษณะเกือบจะราบเรียบค่อนข้างรวดเร็วเมื่อหยุดปล่อยละอองลอย

และการสลายตัวของละอองลอยทั้งที่บริเวณหน้าห้องและที่ด้านหลังห้องมีค่าคงที่เวลา (time constant) เกือบจะเท่ากันสำหรับช่วงขนาดของละอองลอยเดียวกัน

โดยรวมแล้วผลที่ได้จากการปล่อยละอองลอยจากจุดกึ่งกลางห้องเพียงจุดเดียวชวนให้เชื่อได้ว่าการสะสมรวมตัวกันของละอองลอยในห้องอย่างสม่ำเสมอโดยที่มีความไม่สม่ำเสมอในบางจุด (some local non-uniformity) ซึ่งเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับความผันผวนขึ้น ๆ ลง ๆ ที่ปั่นป่วนจากละอองลอยที่เป็นทางยาว ($Re_D = 576$)

ซึ่งกำลังถูกปล่อยออกมาที่จุดกึ่งกลางห้อง

ความจริงที่ว่าความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างด้านหน้าและด้านหลังห้องเรียนมีความ

ผันแปรแต่ความแตกต่างกันก็มีน้อยช่วยสนับสนุนสมมติฐานว่า**มีการผสมผสานกันดี (well-mixed assumption)** สำหรับแบบจำลอง Wells–Riley

ผลที่ได้นี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้กับห้องเรียนจำนวนมากที่พึ่งพาอาศัยการระบายอากาศเชิงกล (MV) ที่คล้ายคลึงกับในพื้นที่ที่เราศึกษาวิจัยครั้งนี้

อย่างไรก็ตามสำหรับพื้นที่ที่ใช้วิธีการกระจายอากาศวิธีอื่น ๆ เช่น การกระจัด

(displacement) หรือการระบายอากาศส่วนบุคคลแล้ว **การประมาณที่ผสมผสานกันดี (well-mixed approximation)**

มีความเป็นไปได้อย่างมากว่าจะไม่ถูกต้องแม่นยำสักเท่าใดนัก นอกจากนี้ข้อมูลที่เป็น size-resolved (ไม่ได้แสดงไว้)

บ่งชี้ว่าอัตราการสูญเสียสำหรับละอองลอยทุกขนาดที่วัดในระหว่างที่หยุดปล่อยละอองลอยมีความใกล้เคียงกันก็เฉพาะกับ **modest size dependence** ที่พบในอัตราการสูญเสียเท่านั้น

มีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อประเมินความเข้มข้นของละอองลอยภายในห้องที่ภาวะคงที่ (steady-state) ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศในห้องต่ำลงและสูงขึ้น

ละอองลอยถูกปล่อยอย่างสม่ำเสมอเข้าสู่ภายในห้องเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 4

เท่าของค่าคงที่เวลา (time constant) สำหรับอัตราการไหลต่ำ ๆ

ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 1.34

ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของละอองลอยภายในห้องเข้าสู่ภาวะคงที่ (steady-state)

ตามที่วัดจากเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

ทันทีที่เข้าถึงภาวะคงที่การไหลของอากาศเข้าสู่ภายในห้องเพิ่มขึ้นจนมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 5.05

ปัจจัยการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศภายในห้องถึง 3.8

นี้ส่งผลให้มีการลดลงของความเข้มข้นเฉลี่ยที่ภาวะคงที่จาก 5500 cm^{-3} เป็น

2100 cm^{-3} โดยอ้างอิงจากการวัดโดยเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI)

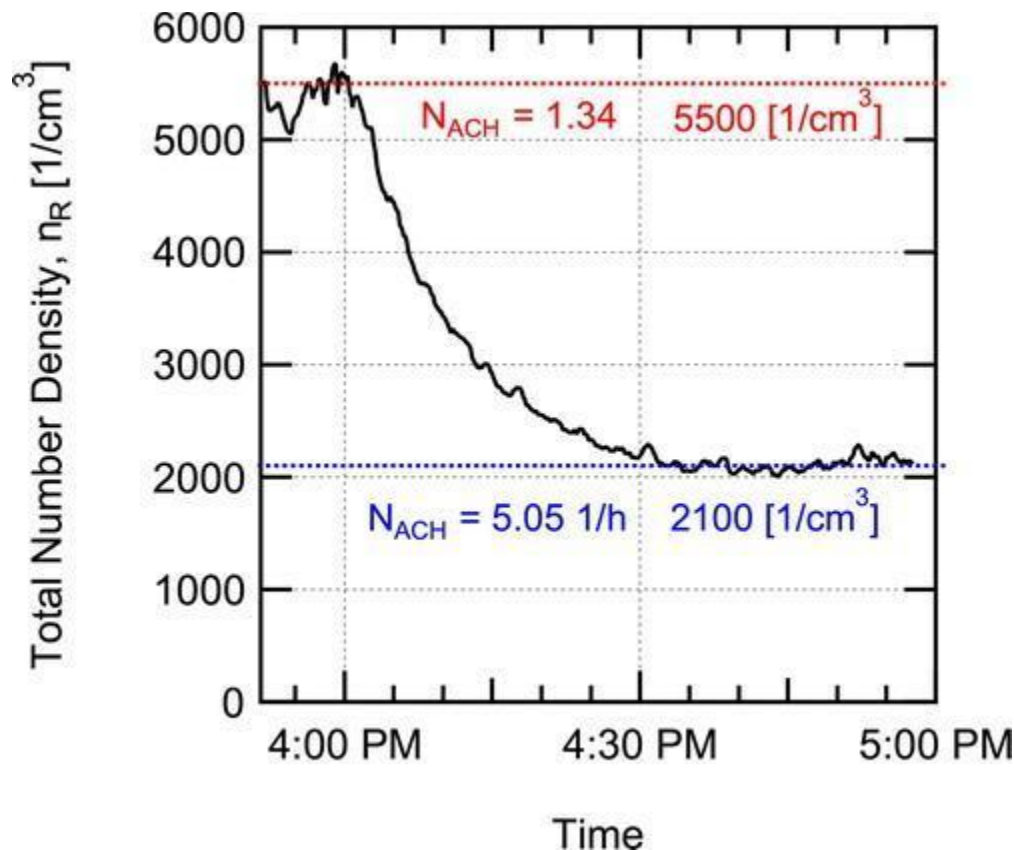
สำหรับทุกช่วงขนาดของอนุภาคที่วัดตรงตำแหน่งอาจารย์ผู้สอน

การลดลงของความเข้มข้นของละอองลอยนี้แสดงไว้ในภาพประกอบ 6

ภาพประกอบ 6.

การลดลงของความเข้มข้นของละอองลอยภายในห้องเมื่อมีการเปลี่ยนจากอัตราการไหลต่ำ

ๆ ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 1.34 เป็นอัตราการไหลสูง ๆ
 ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 5.05
 ในระหว่างที่มีการปล่อยละอองลอยเข้าสู่ภายในห้องอย่างคงที่สม่ำเสมอ
 การวัดทำโดยใช้เครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่
 0.043 ไมครอนจนถึง 10 ไมครอน



ทั้งการสะสมรวมตัวกันของละอองลอยเมื่อตอนที่เริ่มปล่อยละอองลอยครั้งแรกที่อัตรา
 การไหลของอากาศที่มีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC)
 และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 1.34
 และการลดลงของละอองลอยเมื่อตอนที่อัตราการไหลของอากาศที่มีการระบายความร้อน
 และการปรับอากาศ (HVAC) และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)
 ถูกปรับเปลี่ยนเป็น 5.05
 ล้วนมีการกระจายตัวเป็นเส้นโค้งที่เข้ากันได้กับสมการของความเข้มข้นที่อาศัยเวลา (time-

dependent concentration equation) สำหรับห้องที่มีการผสมผสานกันอย่างสมบูรณ์แบบ (perfectly mixed room) คล้ายคลึงกับ [สมการที่ 2](#) (ดูในส่วนของคุณข้อมูลเพิ่มเติม

(Supplemental Information)) การ fitting

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสำหรับข้อมูลที่ได้จากเครื่องกระแทกไฟฟ้าความดันต่ำ (ELPI) ทำให้ได้ค่าตัวเลขของอัตราการสูญเสียของอนุภาคละอองลอยในขั้นแรก (first-order particle loss

rate) $\lambda_{low}=1.69\pm0.07$ $\lambda_{low}=1.69\pm0.07$ h⁻¹ สำหรับอัตราการไหลของอากาศต่ำ ๆ ที่มีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC)

และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 1.34 การ fitting

การลดลงของความเข้มข้นเมื่อเปลี่ยนไปที่อัตราการไหลของอากาศสูง ๆ

ทำให้ได้ค่าตัวเลขของอัตราการสูญเสียของอนุภาคละอองลอยในขั้นแรก (first-order particle loss

rate) $\lambda_{high}=5.40\pm0.2$ $\lambda_{high}=5.40\pm0.2$ h⁻¹ สำหรับอัตราการไหลที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) เท่ากับ 5.05

ตัวเลขอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)

เท่ากับอัตราการสูญเสียของอนุภาคละอองลอยในขั้นแรก

เนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนกับอากาศบริสุทธิ์ภายในห้อง

สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีการสันนิษฐานว่าอากาศที่เข้ามาจากระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) เป็นอากาศบริสุทธิ์ 100%

เนื่องมาจากการทำให้เจือจางในระบบควบคุมอากาศจากส่วนกลางและการใช้การกรองอากาศตามมาตรฐาน MERV 15 ค่าสัมประสิทธิ์ **curve fit first-order loss coefficients** สูงขึ้นมากกว่านั้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนอากาศแค่เพียงอย่างเดียว (air exchange

alone) ($\lambda_{low}=1.69$ $\lambda_{low}=1.69$ h⁻¹ > 1.34 ACH และ

$\lambda_{high}=5.40$ $\lambda_{high}=5.40$ h⁻¹ > 5.05 ACH) ซึ่งบ่งชี้ว่ามีกลไกการสูญเสียเพิ่มเติม

เช่น การ settling ในห้องหรือในระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC)

ค่าตัวเลขของอัตราการสูญเสียทั้งหมดสำหรับกลไกอื่น ๆ

กำหนดโดยการหักลบอัตราการสูญเสียเนื่องจากการแลกเปลี่ยนอากาศออกจากอัตราการ

สูญเสียทั้งหมด คือ values of $\lambda_{other}=0.35 \pm 0.2 \text{ h}^{-1}$ อัตราการสูญเสีย **number weighted** เนื่องมาจากการ **settling** ของอนุภาคซึ่งอิงตามการกระจายของขนาดอนุภาคที่วัดได้ได้รับการประมาณว่าเท่ากับ 0.025 h^{-1} ซึ่งน้อยกว่าอัตราการสูญเสียที่สังเกตพบอย่างมีนัยสำคัญ เป็นการบ่งชี้ว่าการสูญเสียภายในเส้นท่อของระบบจัดการอากาศหรือกลไกการสูญเสียอื่น ๆ น่าจะมีความสำคัญ ค่าที่วัดได้ (λ_{other}) ใช้ในแบบจำลอง Wells–Riley เพื่อคิดคำนวณการสูญเสียจากการ **settling** ของอนุภาค

3.1.2. การกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอย (Aerosol spatial distribution)

ภาพประกอบ 7 แสดงถึงแผนผังการกระจายของละอองลอยที่สอดแทรก (interpolated distribution maps)

ซึ่งได้มาจากการวัดความเข้มข้นของละอองลอยที่จุดตำแหน่งแยกกันสำหรับหุ่นผู้เรียนหนึ่งตัวที่ปล่อยละอองลอย (ดูที่ตั้งของแหล่งกำเนิดใน ภาพประกอบ 2b)

เป็นการแสดงผลที่ได้สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ 2 ขนาด คือขนาด 0.728 ไมครอน และ 2.71 ไมครอน ผลที่ได้นี้ได้รับการทำให้เป็นปกติ (normalized) โดยความหนาแน่นต่ำสุดในห้องสำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์แต่ละขนาดและแต่ละกรณีที่แสดง ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่สม่ำเสมอ (non-uniformity) ภายในห้อง นั่นก็คือว่าแผนผังความเข้มข้นแสดงความเข้มข้นเฉพาะจุด (local concentration) มีค่าสูงกว่าก็เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วัดได้ในห้องสำหรับสถานการณ์ (scenario) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอากาศนั้น

การวัดกระทำโดยที่ไม่มีการสวมหน้ากากให้กับหุ่นที่เป็นแหล่งกำเนิดละอองลอย (ภาพประกอบ 7a และ b) และโดยที่มีการสวมหน้ากากผ้าถัก 4 ชั้นให้กับหุ่น

ภาพประกอบ 7. การกระจายของการวัดความเข้มข้นสัมพัทธ์เฉพาะจุด (markers)

และการกระจายของความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่สอดแทรกเชิงพื้นที่

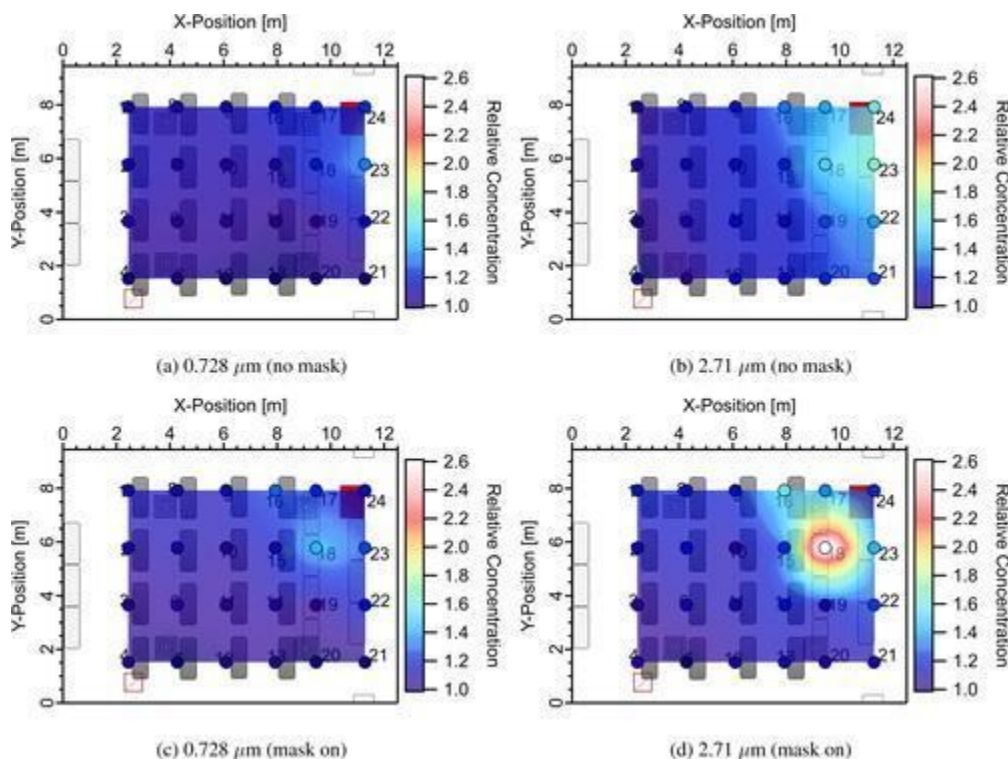
(ความเข้มข้นสัมพัทธ์คือความเข้มข้นเฉพาะจุดหารด้วยความเข้มข้นต่ำสุดที่วัดได้ในห้องสำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางแต่ละขนาดและแต่ละกรณี) สำหรับ (a)

ไม่มีการสวมหน้ากากและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองลอยเท่ากับ

0.728 ไมครอน และ (b) 2.71 ไมครอน (c)

มีการสวมหน้ากากและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของละอองลอยเท่ากับ 0.728 ไมครอน และ (d) 2.71 ไมครอน

สังเกตว่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นไม่ได้บ่งชี้ว่าความเข้มข้นสมบูรณ์จะสูงขึ้นตามไปด้วย



ผลที่ได้ทั้งหมดนี้บ่งชี้ว่ามีความไม่สม่ำเสมอเชิงพื้นที่บางอย่างในการกระจายตัวของละอองลอยแม้แต่ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีภาวะคงที่ สิ่งนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการคาดคิดเป็นที่ชัดเจนว่าความเข้มข้นของละอองลอยที่บริเวณทางออกที่ปากของหุ่นจะมีค่าสูงสุดในขณะที่ละอองลอยที่ปล่อยออกมาเป็นลำออกจากปากของหุ่นไหลไปตามกระแสอากาศและเกิดการผสมรวมตัวกับอากาศนั้นความเข้มข้นของละอองลอยจะลดลงระดับของความไม่สม่ำเสมอเป็นผลมาจากทั้งการสวมหน้ากากและขนาดของอนุภาคเห็นได้ชัดเจนว่าการสวมหน้ากากทำให้การแทรกซึมทะลุผ่านของละอองลอยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ละอองลอยที่ปล่อยออกมาเป็นลำออกจากปากของหุ่น (ไปยังบริเวณหน้าห้องเรียน → เพิ่มขึ้นบริเวณตำแหน่ง x) พบว่าเมื่อไม่มีการสวมหน้ากากความเข้มข้นจะเพิ่มสูงขึ้นจากตำแหน่งที่หุ่นอยู่ในทิศทาง x ใน [ภาพประกอบ 7](#) ปรากฏว่าการสวมหน้ากากจะช่วยจำกัดบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงให้อยู่ใกล้มากขึ้นกับหุ่นที่

ปล่อยละอองลอย

การกรองอากาศของหน้ากากก็มีส่วนช่วยลดความเข้มข้นโดยรวมของละอองลอยเช่นเดียวกัน ตามที่จะแสดงต่อไปในภายหลัง

การพึ่งพาอาศัย (dependence) ขนาดอนุภาคของการกระจายก็แสดงใน [ภาพประกอบ 7](#) ปรากฏว่าขนาด (magnitude)

ของความไม่สม่ำเสมอจะมีน้อยกว่าในขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า (0.728 ไมครอน)

เรื่องนี้อาจจะอธิบายได้จากอัตราการสูญเสียที่สูงกว่าเนื่องมาจากการ **settling**

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า (Riley และคณะ [2002](#))

ซึ่งส่งผลให้มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่าของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมากกว่า

อัตราการสูญเสียที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นเชิงสัมพัทธ์สูงสุดมีการเพิ่มสูงขึ้นสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่กว่า เพราะว่าการกระจายได้รับการทำให้เป็นปกติ (normalized)

โดยความเข้มข้นที่น้อยที่สุดในห้องสำหรับแต่ละกรณีและเส้นผ่าศูนย์กลางแต่ละขนาด

สิ่งนี้บอกเป็นนัยว่าขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่ามีการกระจายที่สม่ำเสมอมากกว่าในห้อง

และ**สมมติฐานว่ามีการผสมผสานกันดี (well-mixed assumption)**

มีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับอนุภาคเหล่านี้

จุดอ่อนอย่างหนึ่งของการวัดในขณะนี้ (current measurements) คือ **coarse x-y resolution และการที่ไม่มี vertical resolution**

ผลลัพธ์สุทธิของเรื่องนี้ก็คือมีความลำเอียงในการเก็บตัวอย่างเกิดขึ้นในข้อมูล

สิ่งนี้เห็นได้จากการวัดที่จุดเก็บตัวอย่างหมายเลข 18

ซึ่งเก็บตัวอย่างในจุดที่เกือบจะตรงหน้าหุ่นที่กำลังปล่อยละอองลอยโดยตรง

ในกรณีที่ไม่มี การสวมหน้ากาก การวัดโดยตรงที่กึ่งกลางกลุ่มละอองลอยที่ปล่อยออกมาเป็น

ลำจากปากของหุ่นควรจะมี ความเข้มข้นเชิงสัมพัทธ์สูงสุดในบรรดาการวัดใด ๆ ในห้อง

และควรจะมี ความเข้มข้นเชิงสัมพัทธ์สูงกว่าการวัดใด ๆ

ที่ตำแหน่งเดียวกันสำหรับในกรณีที่สวมหน้ากาก

สิ่งนี้ไม่มีการพบเห็นในการกระจายความเข้มข้นเชิงสัมพัทธ์ใน [ภาพประกอบ 7](#)

ซึ่งบ่งชี้ถึงความลำเอียงในการเก็บตัวอย่างใกล้กับตำแหน่งจุดกำเนิดละอองลอย

เรื่องนี้อาจจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการแบ่งชั้นในแนวตั้ง (vertical stratification) เพราะว่าการวัดเกิดขึ้นที่ความสูงระดับเดียวเท่านั้นสำหรับตำแหน่งการเก็บตัวอย่างแต่ละจุด ในขณะที่มีการเคลื่อนย้ายห่างออกไปจากจุดปล่อยละอองลอยการแบ่งชั้นในแนวตั้งก็จะยิ่งน้อยลง และความล่าช้าในการเก็บตัวอย่างก็ควรจะมียลน้อยลง ความไม่สม่ำเสมอเชิงสัมพัทธ์พอประมาณของความเข้มข้นที่วัดได้จากจุดที่เก็บตัวอย่างส่วนใหญ่ในห้องบ่งชี้ว่าสมมติฐานว่ามีการผสมผสานกันดี (well-mixed assumption)

ในแบบจำลอง Wells–Riley

ควรจะส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนเฉพาะพอประมาณเท่านั้นในความเป็นไปได้ของการติดเชื้อสำหรับความหนาแน่นของผู้คนที่ลดลงที่เราทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นนี้ควรมีขนาดใกล้เคียงหรือน้อยกว่าความไม่แน่นอนใน

พารามิเตอร์ model input อื่น ๆ เช่น อัตราการปล่อยควอนตัม

3.2. ประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก (Mask EFE)

ประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) สำหรับละอองลอยที่เป็น size-resolved ในระหว่างการหายใจเข้าสำหรับหน้ากากทั้ง 4 ชนิดที่เราทดสอบ (หน้ากากผ้าฝ้ายถัก หน้ากากที่ขึ้นรูปโดยตรงจากเส้นใยโพลีโพรพิลีน หน้ากากหัตถการ

และหน้ากากทางการแพทย์) แสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 8](#) สำหรับการทดสอบในกรณีต่าง ๆ

กัน 3 กรณี คือ กรณีที่ไม่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก กรณีที่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก Badger Seal

และกรณีที่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก FTM ประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ทั้งหมดแสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 9](#) และค่าตัวเลขแสดงไว้ในตาราง 1

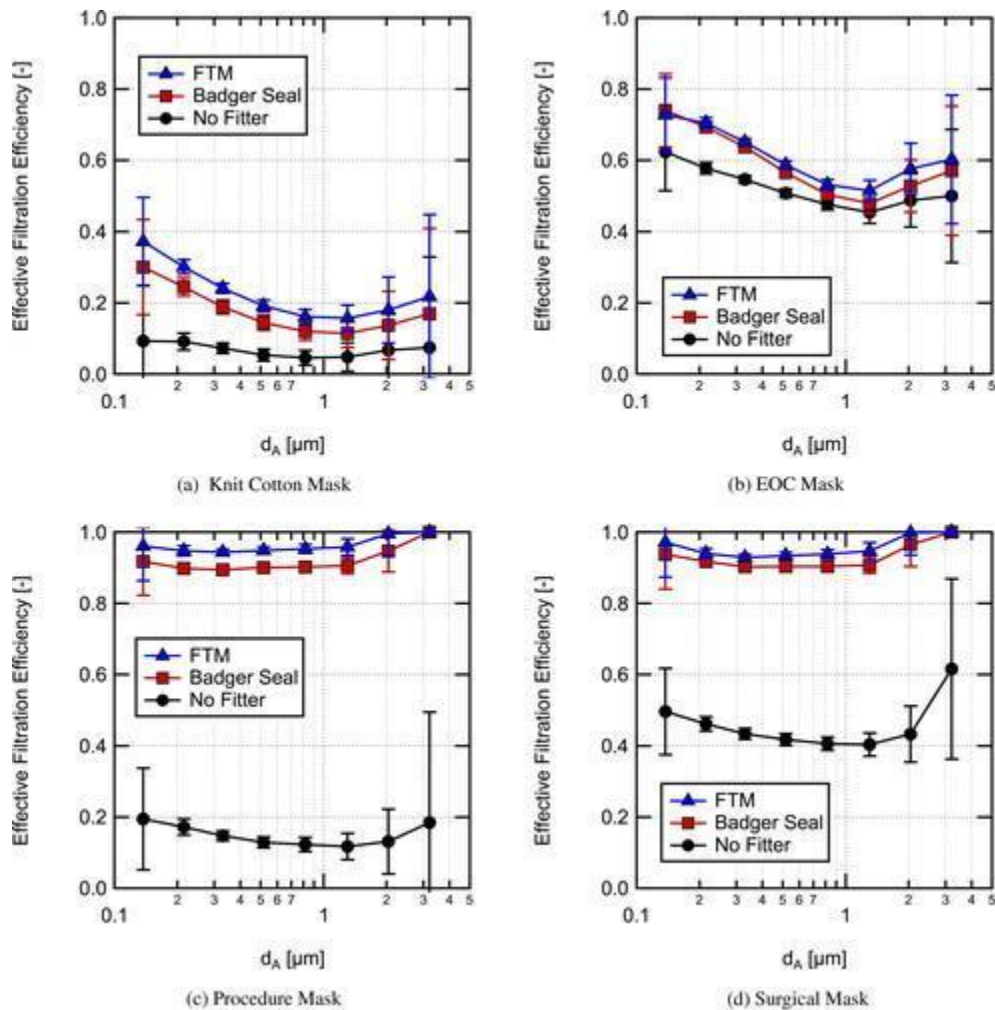
โดยรวมแล้วผลที่ได้บ่งชี้ว่าการใช้ตัวรั้งหน้ากากสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ให้ดีขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ เชื่อได้ว่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ที่สังเกตพบได้เมื่อใช้ตัวรั้งหน้ากากมีค่าใกล้เคียงกันกับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ของหน้ากาก

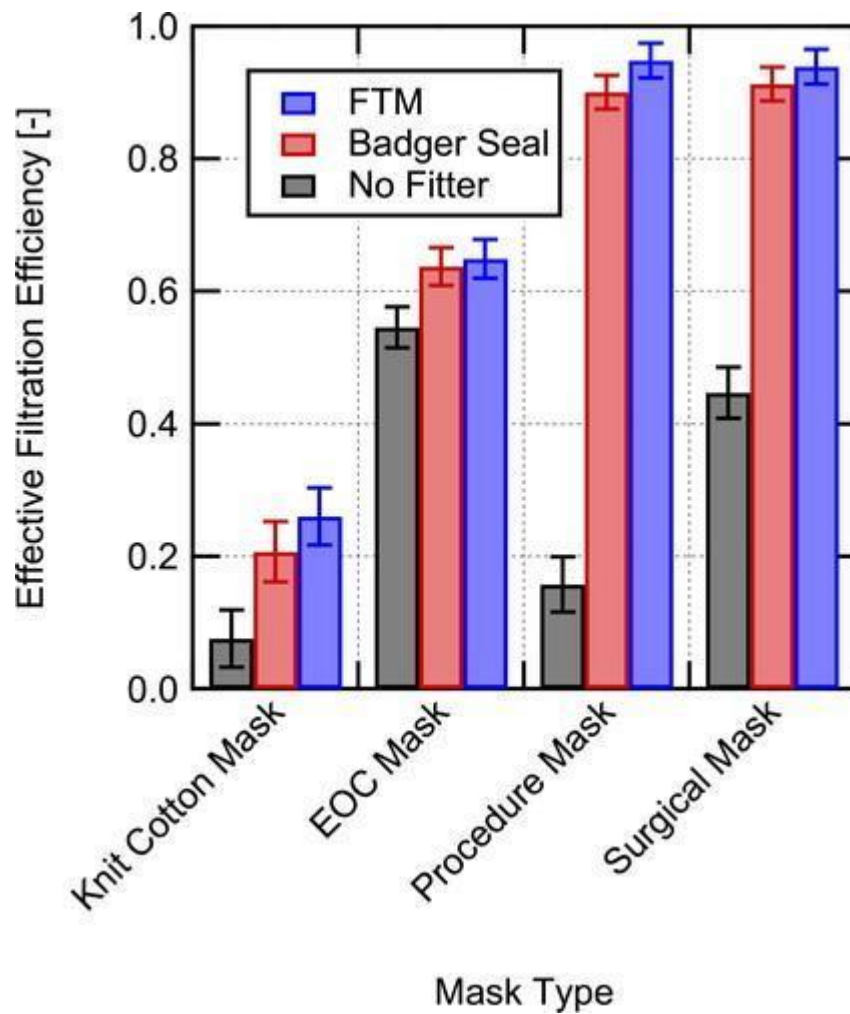
ทำให้สามารถเปรียบเทียบกับผลการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุที่ใช้ทำหน้ากากได้ ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองละอองลอยที่เป็น

size-resolved อยู่ในตารางของส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม ([Supplemental Information](#)) นอกจากนี้ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุของหน้ากากสำหรับช่วงขนาดของอนุภาคตั้งแต่ 20 จนถึง 500 นาโนเมตรที่ความเร็วในการกรอง (filtration velocity) เท่ากับ 3.4 เซนติเมตร/วินาทีก็อยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม ([Supplemental Information](#)) เช่นกัน

ภาพประกอบ 8. ประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) สำหรับละอองลอยที่เป็น size-resolved สำหรับการหายใจเข้าที่วัดได้ในห้องเรียน ในกรณีที่ผู้ใช้ตัวรั้งหน้ากาก กรณีที่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก Badger Seal mask fitter และกรณีที่ผู้ใช้ตัวรั้งหน้ากาก FTM mask brace ที่ติดตั้งสำหรับ (a) หน้ากากที่ทำจากผ้าฝ้ายถัก 4 ชั้น (b) หน้ากาก 3 ชั้นที่ขึ้นรูปโดยตรงจากเส้นใยโพลีโพรพิลีน (c) หน้ากากหัตถการซึ่งใช้ครั้งเดียวทิ้ง และ (d) หน้ากากทางการแพทย์ระดับ 2 ตามมาตรฐาน ASTM F2100



ภาพประกอบ 9 ประสิทธิภาพโดยรวมในการกรองอากาศ (EFE) ระหว่างการหายใจเข้าสำหรับหน้ากากทั้ง 4 ชนิดที่ทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งวัดขณะที่ไม่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก กรณีที่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก Badger Seal mask fitter และกรณีที่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก FTM mask brace



ตารางที่ 1. ประสิทธิภาพทั้งหมดในการกรองอากาศ (EFE)

ที่วัดได้และความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้อง

ในระหว่างการจำลองการหายใจเข้าผ่านหน้ากากที่ติดตั้งอยู่กับหุ่นในห้องเรียน

Table 1. Measured total effective filtration efficiencies and associated uncertainties during simulated inhalation for masks installed on a manikin in a classroom setting.

Abbrev.	Mask	Fitter	$\eta_{f,Minh}$	$\eta_{f,Minh}$ uncertainty	f_L	f_L uncertainty
KCM	Knit Cotton Mask	None	0.075	± 0.043	0.710	± 0.661
KCM-B	Knit Cotton Mask	Badger Seal	0.206	± 0.045	–	–
KCM-F	Knit Cotton Mask	FTM	0.260	± 0.043	–	–
EOCM	EOC Mask	None	0.545	± 0.031	0.160	± 0.084
EOCM-B	EOC Mask	Badger Seal	0.637	± 0.029	–	–
EOCM-F	EOC Mask	FTM	0.649	± 0.029	–	–
PM	Procedure Mask	None	0.158	± 0.042	0.834	± 0.053
PM-B	Procedure Mask	Badger Seal	0.900	± 0.025	–	–
PM-F	Procedure Mask	FTM	0.949	± 0.026	–	–
SM	Surgical Mask	None	0.447	± 0.038	0.524	± 0.050
SM-B	Surgical Mask	Badger Seal	0.913	± 0.025	–	–
SM-F	Surgical Mask	FTM	0.939	± 0.026	–	–

ค่าประมาณของอากาศจากการรั่ว (fL)

และความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับค่าประมาณของอากาศจากการรั่วอ้างอิงตาม [สมการที่ 9](#)

หน้ากากที่ทำจากผ้าฝ้ายถัก 4 ชั้น ([ภาพประกอบ 8a](#))

ที่ไม่มีตัวรั้งหน้ากากมีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ต่ำที่สุดคือ $7.5 \pm 4.3\%$

และเมื่อใช้ร่วมกับตัวรั้งหน้ากากประสิทธิภาพในการกรองอากาศก็ยังคงค่อนข้างต่ำ

($26.0 \pm 4.3\%$ เมื่อใช้ร่วมกับตัวรั้งหน้ากาก FTM)

แต่มีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงขนาดของอนุภาค
ประสิทธิภาพในการกรองอากาศที่ต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกันกับขนาดของอนุภาคที่แทรกซึม
ทะลุผ่านได้มากที่สุด (most penetrating particle size - MPPS)

เกิดขึ้นกับอนุภาคขนาดราว ๆ

1 ไมครอนทั้งในขณะที่ใช้ตัวร้งหน้ากากและไม่ใช้ตัวร้งหน้ากาก Lindsley และคณะ
(2021a) ได้ทำการทดสอบกับหน้ากากผ้าฝ้ายอีก 3 ชั้นที่มีลักษณะคล้าย ๆ กัน (หน้ากาก
Hanes) และพบว่าหน้ากากมีประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (material filtration
efficiency - MFE) อยู่ที่ 18.8%

ซึ่งสอดคล้องกันดีกับผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ที่มีการใช้ตัวร้งหน้ากาก FTM

เนื่องจากว่าหน้ากากที่ Lindsley

และคณะใช้ในการทดสอบมีจำนวนชั้นของหน้ากายน้อยกว่ากันอยู่ 1 ชั้นและความเร็วหน้า
(face velocity) ที่ใช้ในระหว่างการศึกษาวิจัย 2 ชั้นนี้มีความแตกต่างกัน

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า

3.2 ไมครอนประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากากได้รับการคาดว่าจะเพิ่มสูงขึ้น
เนื่องมาจากประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้นในกลไกการจับจากการสกัดกั้นและกลไกการจับจาก
การปะทะ (interception and impaction capture mechanisms) (Hinds 1999)

ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะทำให้เกิดการกรองที่มีประสิทธิภาพสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้น
ผ่าศูนย์กลางโตกว่า 10 ไมครอน

ประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) เป็น **function** ของความเร็วหน้า (face
velocity) ในการศึกษาวิจัยนี้เรามีการจำลองอัตราการหายใจต่ำ ๆ จนถึงปานกลาง
ที่ความเร็วหน้าเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE)

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นจะลดต่ำลงเนื่องจากการอาศัยความเร็วของกลไกการจับการ
ปะทะ (impaction capture mechanism)

ในขณะที่การกรองอนุภาคขนาดเล็กจะลดลงเนื่องจากการจับการแพร่กระจาย (diffusion
capture) ลดลง ดังนั้นสำหรับความเร็วสูง ๆ

ที่สัมพันธ์กับการไอและการจามประสิทธิภาพการกรองของวัสดุ (MFE)

สำหรับอนุภาคขนาดโตกว่า 2 ไมครอนจึงคาดว่าจะดีขึ้นตามที่พบในการศึกษาวิจัยของ
Drewnick และคณะ (2021)

ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกรองมีการเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วหน้าเพิ่มสูงขึ้นสำหรับอนุภาคขนาด 2.5 ไมครอน

หน้ากาก EOC ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ขึ้นรูปโดยตรง 3 ชั้น ([ภาพประกอบ 8b](#)) มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศสูงกว่าหน้ากากผ้าฝ้ายถึงเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้ตัวหน้ากากก็ยังปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าของหุ่นได้ดี

ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากการที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

เพิ่มขึ้นแค่เพียงเล็กน้อยไม่ว่าจะใช้ตัวร้งหน้ากากชนิดใดก็ตาม

ประสิทธิภาพโดยรวมในการกรองอากาศ (EFE) ในขณะที่ไม่ใช้ตัวร้งหน้ากากอยู่ที่ $54.5 \pm 3.1\%$ และในขณะที่ใช้ตัวร้งหน้ากาก FTM อยู่ที่ $64.9 \pm 2.9\%$

สำหรับการกระจายละอองลอยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้

ประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE)

ต่อหนึ่งชั้นของหน้ากากที่ปรากฏชัดจากการวัดขณะที่ใช้ตัวร้งหน้ากาก

(โดยสันนิษฐานว่าการแทรกซึมทะลุผ่านขึ้นอยู่ในลักษณะเลขยกกำลัง (typical exponential dependence) กับความหนา (Hinds [1999](#)))

มีความสอดคล้องอย่างสมเหตุสมผลกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยของ Joo และคณะ ([2021](#)) สำหรับวัสดุที่ขึ้นรูปโดยตรงที่ความเร็วหน้าและพารามิเตอร์อื่น ๆ แตกต่างกัน

และเช่นเดียวกันกับหน้ากากผ้าฝ้ายถึงประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ของหน้ากาก EOC ก็คาดว่าจะยังคงเพิ่มขึ้นสำหรับอนุภาคขนาดโต ๆ

เนื่องจากการจับจากการสกัดกันและการปะทะที่เพิ่มสูงขึ้น

ในจำนวนผลที่ได้ทั้งหมดเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ผลที่ได้จากหน้ากากหัตถการชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการสวมใส่ที่แนบสนิทกับใบหน้าได้ดีที่สุด เมื่อไม่ได้ใช้ตัวร้งหน้ากากประสิทธิภาพแบบ size-resolved มีค่าต่ำกว่า 20% สำหรับช่วงขนาดทั้งหมดของอนุภาคที่วัด

เมื่อใช้ตัวร้งหน้ากากประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) แบบ size-resolved

มีค่าสูงกว่า 90% โดยปกติไม่ว่าจะใช้กับตัวร้งหน้ากากแบบไหน และมีค่าประมาณ 95%

เมื่อใช้กับตัวร้งหน้ากาก FTM

เรายังได้ทำการทดสอบกับหน้ากากหัตถการขณะที่มีการใช้และไม่ใช้ตัวร้งหน้ากาก

Badger Seal โดยการใช้ตัวทดสอบการปิดแน่นแนบสนิทกับไบหน้า (fit tester) (ชนิด TSI PortaCount Pro + 8038) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน

(ผลที่ได้จากการทดสอบการปิดแน่นแนบสนิทกับไบหน้า (fit test)

แสดงไว้ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information))

ประสิทธิภาพโดยรวมในการกรองอากาศที่มีค่าต่ำ ๆ คือเท่ากับ $15.8 \pm 4.2\%$ ซึ่งแสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 9](#)

สำหรับหน้ากากหัตถการชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งเนื่องมาจากการปิดแน่นแนบสนิทกับไบหน้าที่ไม่ดีพอซึ่งเป็นลักษณะประจำตัวของหน้ากากชนิดนี้เมื่อไม่ได้ใช้ร่วมกับตัวรั้งหน้ากาก (แสดงเป็นภาพประกอบในส่วน of ข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information) การใช้ตัวรั้งหน้ากากทำให้หน้ากากชนิดนี้สามารถมีค่าประสิทธิภาพโดยรวมในการกรองอากาศ (EFE) ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ซึ่งเข้าใกล้ 100% สำหรับอนุภาคนาโตใหญ่ (มากกว่า 2 ไมครอน)

ที่ความเร็วหน้าความเร็วเดียวกันกับที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้

ประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE)

ของหน้ากากเมื่อใช้กับตัวรั้งหน้ากากอยู่ในระดับสูง แต่ในการศึกษาวิจัยชิ้นอื่น ๆ

พบว่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE)

อยู่ในระดับสูงใกล้เคียงกันสำหรับหน้ากากชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ตัวอย่างเช่น

การศึกษาวิจัยของ Crilley และคณะ ([2021](#)) วัดได้ค่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) เท่ากับ $95.4 \pm 1.9\%$ และ $84.3 \pm 6.1\%$ สำหรับหน้ากากชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง 2 ชนิดกับช่วงขนาดของอนุภาคเดียวกันที่ทดสอบที่ความเร็วหน้า 3 เซนติเมตร/วินาที

ผลที่ได้จากการทดสอบกับหน้ากากทางการแพทย์แสดงให้เห็นว่าหน้ากากทางการแพทย์ที่มีคุณภาพสูงกว่ามีการปิดแน่นแนบสนิทกับไบหน้าได้ดีกว่าหน้ากากหัตถการราคาถูกที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (ดูในส่วน of ข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)

สำหรับรูปภาพของหน้ากากที่สวมกับไบหน้าของหุ่น)

อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีการปิดแน่นแนบสนิทกับไบหน้าผู้สวมได้ดีกว่าก็ตาม

แต่หน้ากากทางการแพทย์ที่ไม่ได้ใช้ร่วมกับตัวรั้งหน้ากากก็มีประสิทธิภาพต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากอย่างเดียวกันที่สวมร่วมกับตัวรั้งหน้ากาก

เมื่อสวมโดยไม่ใช้ตัวรั้งหน้ากากค่าประสิทธิภาพโดยรวมในการกรองอากาศอยู่ที่

44.6±3.8% เปรียบเทียบกับ 91.3±2.5% เมื่อสวมร่วมกับตัวรี้งหน้ากาก Badger และอยู่ที่ 93.9±2.6% เมื่อสวมร่วมกับตัวรี้งหน้ากาก FTM

เนื่องจากว่าหน้ากากทางการแพทย์นี้เป็นหน้ากากทางการแพทย์ระดับ 2 ตามมาตรฐาน ASTM F2100 จึงควรมีค่าประสิทธิภาพการกรองของวัสดุ (MFE) สูงกว่า 98% สำหรับอนุภาคขนาด 0.1 ไมครอน (ASTM 2019)

ซึ่งสอดคล้องกันดีกับค่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ที่เป็น size-resolved ซึ่งอิงตามการวัดขณะที่ใช้สวมร่วมกับตัวรี้งหน้ากาก FTM ใน [ภาพประกอบ 8](#)

ประสิทธิภาพในการกรองอากาศที่วัดขณะที่มีการใช้และไม่มีการใช้ตัวรี้งหน้ากากสามารถใช้ในการประมาณส่วน (fraction) ของอากาศที่รั่วรอบ ๆ

หน้ากากโดยการตั้งข้อสมมติฐานต่อไปนี้ (1) ประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE)

ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างพอประเมินค่าได้เนื่องจากความแตกต่างของอัตราการไหลผ่านวัสดุที่ใช้ทำหน้ากาก และ (2) การใช้ตัวรี้งหน้ากากในกรณีของตัวรี้งหน้ากาก FTM มีการปิดแน่นแนบสนิทของหน้ากากกับใบหน้าอย่างสมบูรณ์แบบ นั่นคือไม่มีการรั่วใด ๆ เกิดขึ้นในกรณีนี้ สมมติฐานทั้ง

สองข้อนี้มีแนวโน้มในการที่จะประมาณอัตราการเกิดการรั่วต่ำกว่าความเป็นจริง การใช้ประสิทธิภาพในการกรองอากาศสำหรับในกรณีที่มีการรั่วและกรณีที่ไม่มีการรั่ว ส่วนหนึ่งของการไหลของอากาศที่รั่วออกมารอบ ๆ หน้ากาก (ไม่ได้ผ่านวัสดุการกรองอากาศของหน้ากาก) สามารถประมาณจากสมการข้างล่างนี้

$$f_L = \dot{V}_{b,L} / \dot{V}_b = (1 - \eta_{f,M,Inh}) - (1 - \eta_{f,M,fit}) (1 - (1 - \eta_{f,M,fit}) f_L) \quad \dot{V}_{b,L} / \dot{V}_b = (1 - \eta_{f,M,Inh}) - (1 - \eta_{f,M,fit}) (1 - (1 - \eta_{f,M,fit}) f_L)$$

(9) โดยที่ f_L เป็นส่วนหนึ่ง (fraction) ของการไหลของอากาศที่รั่วออกมารอบ ๆ

หน้ากาก $\dot{V}_{b,L} / \dot{V}_b$ เป็นอัตราของไหลเชิงปริมาตรจากการรั่ว (leakage volumetric flowrate) $\eta_{f,M,Inh}$ เป็นประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ในขณะที่มีการรั่ว และ $\eta_{f,M,fit}$ เป็นประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) ที่สันนิษฐานว่าเท่ากับประสิทธิภาพการกรองอากาศเมื่อใช้ตัวรี้งหน้ากาก FTM

ส่วนหนึ่ง (fraction)

ของการไหลของอากาศจากการรั่วที่ประมาณสำหรับในกรณีที่ไม่ใช่ตัวรั่วหน้ากากแสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 10](#)

สำหรับหน้ากากผ้าฝ้ายถักที่การปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าไม่ดีพอและหน้ากากหัตถการการรั่วรอบ ๆ หน้ากากได้รับการประมาณว่าอยู่ระหว่าง 70–85%

ถึงแม้ว่าค่าประมาณสำหรับหน้ากากผ้าฝ้ายถักมีความไม่แน่นอนอย่างมากเนื่องจากประสิทธิภาพการกรองอากาศที่ต่ำของหน้ากาก

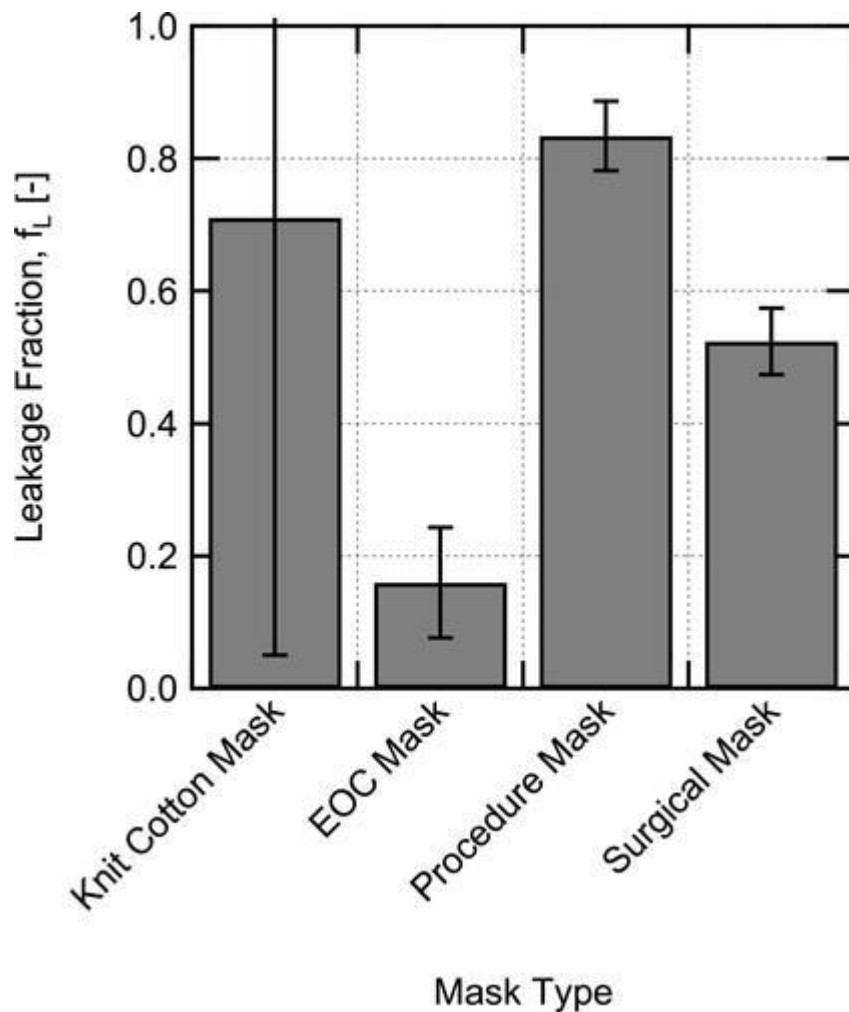
หน้ากากหัตถการซึ่งดูเหมือนว่าปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าได้ดีกว่ามากก็ยังคงมีการรั่วโดยประมาณอยู่ที่ 52% สุดท้ายคือหน้ากาก EOC

ซึ่งมีการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าได้ดีทีเดียวมีการรั่วที่น้อยกว่าอย่างมากคือราว ๆ 15%

ค่าประมาณเหล่านี้เน้นย้ำถึงความยากในการที่จะให้ได้มาซึ่งการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าที่ดีโดยที่ไม่มีรูปแบบลักษณะเฉพาะของหน้ากากหรือใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อให้หน้ากากมีการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าที่ดี

[ภาพประกอบ 10. การประมาณส่วน \(fraction\) ของการไหลของอากาศที่รั่วรอบ ๆ](#)

[หน้ากากในกรณีที่ไม่ได้ใช้ตัวรั่วหน้ากา](#) คำนวณจากการใช้ [สมการ 9](#)



การศึกษาวิจัยชิ้นอื่น ๆ เมื่อเร็ว ๆ

นี้ก็ได้นำมาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าที่มีต่อประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ที่ได้จากหน้ากาก Clapp และคณะ (2021)

พบว่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก

$38.5 \pm 22.4\%$ เป็น $78.2 \pm 6.6\%$

สำหรับหน้ากากที่ใช้ระหว่างการทำการหัตถการทางการแพทย์เมื่อมีการใช้ตัวรัดหน้ากากที่ดัดแปลงจากยางรัด และสูงถึง $80.2 \pm 6.2\%$ สำหรับการสวมหน้ากากโดยใช้ถุงน่องช่วยรัด (วัดโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าของหน้ากาก)

มีการพบว่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในการศึกษาวิจัยของ Mueller และคณะ (2020)

เมื่อใช้ถุงน่องช่วยรัด (nylon hosiery sleeve)

เพื่อปรับปรุงการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าของหน้ากาก
(วัดโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบการปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าของหน้ากาก)
การปิดสนิทแน่นแนบกับใบหน้าที่ดีขึ้นเมื่อใช้อุปกรณ์เสริมมีความคล้ายคลึงกันสำหรับ
หน้ากากทุกชนิดในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ถึงแม้ว่าวิธีการในการประเมินระหว่างการศึกษา
วิจัยเหล่านั้นกับการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะมีความแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) สำหรับหน้ากากแต่ละชนิดมีความไว (sensitive)
แค่ปานกลางต่อขนาดของอนุภาคในช่วงขนาดของอนุภาคที่เราทดสอบ
ดังนั้นการใช้ประสิทธิภาพโดยรวมในการกรองอากาศจึงมีความสมเหตุสมผลสำหรับแบบ
จำลอง Wells–Riley

สภาวะเงื่อนไขที่วัดเป็นตัวแทนของสภาวะเงื่อนไขในการหายใจเข้าที่อัตราการไหลคงที่
สม่ำเสมอ

ซึ่งไม่ใส่ใจต่อความไม่คงที่ไม่สม่ำเสมอของการหายใจในความเป็นจริงและไม่ได้วัด

ประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของการหายใจออกโดยตรง

อย่างไรก็ตามเราคาดว่าความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองอากาศที่เกิดมาจากสาเหตุ
นี้น่าจะอยู่ในระดับปานกลาง

มีการวัดความเข้มข้นของละอองลอยในห้องต่อเวลาสำหรับในกรณีของหุ่นขณะที่หายใจ
ออกและสวมใส่หน้ากากหัตถการรวมกับการใช้ตัวรั้งหน้ากาก Badger

และผลที่ได้บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ระหว่างการหายใจออกที่คล้ายคลึงกันกับในระหว่างการหายใจเข้าในกรณีเฉพาะนั้น
(สำหรับรายละเอียดดูในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)) นอกจากนี้
ผลการศึกษาวิจัยของ Pan และคณะ ([2021](#)) ก็บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการกรองอากาศ
(EFE)

ที่คล้ายคลึงกันอย่างสมเหตุสมผลในระหว่างการหายใจเข้าและหายใจออกสำหรับหน้ากาก
ชนิดต่าง ๆ

4. ผลของแบบจำลอง Wells–Riley และการอภิปราย (Wells–Riley model results and discussion)

จุดประสงค์ของการศึกษาเกี่ยวกับพลวัตและการกระจายของละอองลอยในห้องเรียนและประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากากก็คือเพื่อหาหรือวัดค่าความเที่ยงตรงแม่นยำของ **underlying model approximations** และหาค่า input values ที่เที่ยงตรงแม่นยำสำหรับแบบจำลอง Wells–Riley สิ่งนี้ช่วยให้มีความเชื่อมั่นมากขึ้น ซึ่งนั่นก็คือความไม่แน่นอนที่ลดลงต่อความสามารถของแบบจำลองในการประมาณการความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข

4.1. พารามิเตอร์ model input และสมมติฐาน (Model input parameters and assumptions)

ผลที่ได้เกี่ยวกับการกระจายละอองลอยได้พิสูจน์ยืนยันว่า **well-mixed approximation** มีความเที่ยงตรงแม่นยำอย่างสมเหตุสมผล (**to within better than a factor of 2**)

เมื่อมีการเว้นระยะห่างทางกายภาพมากกว่า 2 เมตร

ผลที่ได้เกี่ยวกับพลวัตของละอองลอยทำให้สามารถวัดอัตราการสูญเสียของอนุภาค ที่เนื่องมาจากการ **settling**

และการสูญเสียเนื่องมาจากระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศได้โดยตรง และสุดท้ายการวัดประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของหน้ากากทำให้ได้ inputs ที่มีความถูกต้องสำหรับประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ในขณะที่ใช้ตัวรั้งหน้ากากและในขณะที่ไม่ได้ใช้ตัวรั้งหน้ากากสำหรับหน้ากากทั้ง 4 ชนิดที่ทดสอบ

ด้วยพฤติกรรมของละอองลอยและประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว ผลที่ได้เหล่านี้จึงถูกใช้เป็น inputs สำหรับแบบจำลอง Wells–Riley เพื่อที่จะประเมินความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขในสถานการณ์ที่มีใครคนใดคนหนึ่งในห้องเรียนมีผลการตรวจโควิด 19

เป็นบวกและกำลังมีการปล่อยเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2

เราประเมินความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขใน 3 สถานการณ์ต่อไปนี้ (a)

อาจารย์ผู้สอนติดเชื้อ (การพูดดัง ๆ) ผู้เรียนอ่อนแอต่อการติดเชื้อ (อยู่กับที่) (b)

ผู้เรียนติดเชื้ (การพุดดง ๆ) ผู้เรียนอนแ่งายต่อการติดเชื้ และ (c) ผู้เรียนติดเชื้ (การพุด) อาจารย์ผู้สอนอนแ่งายต่อการติดเชื้ (**light exercise**)

เนื่องจากมีความแตกต่างในเรื่องกิจกรรมที่เกี่ยวกับการหายใจออกและระดับกิจกรรม จึงมีการใช้ค่าต่าง ๆ

ของอัตราการปล่อยควอนตัมและอัตราการหายใจสำหรับอาจารย์ผู้สอนและผู้เรียน ค่าต่าง ๆ ที่ใช้รวมอยู่ในตารางที่ 2

อัตราการหายใจสำหรับผู้เรียนได้รับการคัดเลือกให้สอดคล้องโดยประมาณกับอัตราการหายใจจากการศึกษาวิจัยของ Adams ([1993](#)) สำหรับผู้ใหญ่ที่กำลังนั่งหรือกำลังยืน ซึ่งเข้ากันได้อย่างใกล้ชิดกับอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ของหน้ากาก

ค่าที่ใช้สำหรับอาจารย์ผู้สอนสอดคล้องโดยประมาณกับอัตราการหายใจสำหรับผู้ใหญ่ที่กำลังเดินจากการศึกษาวิจัยของ Adams ([1993](#))

(ค่าที่ใกล้เคียงกันใช้ในการศึกษาวิจัยของ Buonanno, Morawska, และ Stabile [2020a](#)) อัตราการปล่อยควอนตัม

\dot{q} , \dot{Q} , มีค่าสูงกว่าสำหรับอาจารย์ผู้สอนซึ่งสันนิษฐานว่ากำลังพุดด้วยเสียงดังบ่อย ๆ

เปรียบเทียบกับผู้เรียนซึ่งสันนิษฐานว่ากำลังนั่งอยู่และมีการพุดน่อยครั้งกว่

การวัดหาค่าเหล่านี้ทำโดยใช้การกระจายอัตราการปล่อยควอนตัมจากการศึกษาวิจัยของ Buonanno, Morawska, และ Stabile ([2020a](#)) สำหรับกิจกรรมเบา ๆ

และพุดด้วยเสียงดังสำหรับอาจารย์ผู้สอน และสำหรับกิจกรรมเบา ๆ

และการพุดสำหรับผู้เรียน

และต่อจากนั้นวัดหาค่าประมาณของอัตราการปล่อยควอนตัมซึ่งมีความเป็นไปได้ของการติดเชื้ที่เท่ากับโอกาสความเสี่ยงที่หาค่าได้จากสมการข้างล่างนี้

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} P(\dot{q}) f(\dot{q}) d\dot{q} \quad R = \int_0^{\infty} P(\dot{q}) f(\dot{q}) d\dot{q}$$

(10) โดยที่

R เป็นความเสี่ยงในการติดเชื้ $P(\dot{q})$ $P(\dot{q})$ เป็นความเป็นไปได้ของการติดเชื้ที่ขึ้นอยู่ กับอัตราการปล่อยควอนตัม และ $f(\dot{q})$ $f(\dot{q})$ เป็น **probability density function** สำหรับอัตราการปล่อยควอนตัม (รายละเอียดเกี่ยวกับ

$f(q) dq$ อยู่ในส่วนรายละเอียดเพิ่มเติม (Supplemental Information))
 ความเสี่ยงในการติดเชื้อมีการพิจารณาถึงการกระจายของอัตราการปล่อยคอนตัมที่เป็นไปได้สำหรับผู้ที่ติดเชื้อ (Buonanno, Morawska, และ Stabile [2020a](#))
 ในขณะที่ไม่มีความจำเป็นสำหรับความเป็นไปได้ของการติดเชื้อ
 อัตราการปล่อยคอนตัมทั้งสองค่ามีความสอดคล้องโดยประมาณกับ **77 percentile**
 ของการกระจายอัตราการปล่อยคอนตัม
 ซึ่งทำให้สามารถเป็นตัวแทนของสถานการณ์ที่มีอัตราการปล่อยคอนตัมสูง ๆ

ตารางที่ 2. สถานการณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณความเป็นไปได้ของการติดเชื้อ

Table 2. Scenarios used for the infection probability calculations.

	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Setting	Classroom	Classroom	Classroom
Infected individual	Instructor	Student	Student
Emission rate, q	110 quanta/h	19.1 quanta/h	19.1 quanta/h
Susceptible individual(s)	Students	Instructor	Students
Susceptible breathing rate, \dot{V}_b	0.540 m ³ /h	1.38 m ³ /h	0.540 m ³ /h

จำนวนของการติดเชื้อรายใหม่ที่คาดไว้สำหรับสถานการณ์นั้น ๆ
 สามารถทำนายได้โดยการคูณค่าความเสี่ยงในการติดเชื้อ
 (ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข)
 เข้ากับจำนวนของผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อที่มีอยู่

$$N_{event} = R N_s N_{event} = R N S.$$

(11) จำนวนของผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อ (N_s) คำนวณจากสมการข้างล่างนี้

$$N_s = (N_{tot} - N_i)(1 - f_v \eta_v) N S = (N_{tot} - N_i)(1 - f V \eta V)$$

(12) โดยที่ N_{tot} เป็นจำนวนประชากรทั้งหมดที่มีอยู่ N_i เป็นจำนวนผู้ที่ติดเชื้อที่มีอยู่ f_v เป็นจำนวนผู้ที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (อัตราการได้รับวัคซีนในพื้นที่) และ η_v เป็นประสิทธิผลของวัคซีนในการป้องกันการติดเชื้อสำหรับผู้ที่ได้รับการฉีดวัคซีนแล้ว ข้อมูลนี้ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการได้รับวัคซีนและประสิทธิผลของวัคซีนได้โดยตรง

ห้องที่ใช้ในการคำนวณค่าความเป็นไปได้สำหรับทั้ง 3

สถานการณ์เป็นห้องเรียนเดียวกันกับที่ใช้ในการตรวจวัดพลวัตและการกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอย รายละเอียดของห้องอยู่ในตารางที่ 3 พร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ

ที่เหลือซึ่งจำเป็นต้องได้รับการคำนวณ

เพื่อให้ค่าประมาณมีความง่ายและเพราะเนื่องจากขาดข้อมูลที่ครบถ้วนสมบูรณ์เกี่ยวกับความสามารถในการกรองของระบบการจัดการอากาศ (ซึ่งมีระบบกรอง MERV 15)

เราจึงได้ตั้งสมมติฐานว่าอากาศทั้งหมดที่จ่ายให้ห้องเรียนนี้เป็นอากาศบริสุทธิ์

(คือไม่มีควอนตัม)

ซึ่งมีแนวโน้มที่จะประมาณความเป็นไปได้ของการติดเชื้อต่ำกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย

เพื่อให้มีความเรียบง่ายเรายังได้ตั้งสมมติฐานว่าช่วงระยะเวลาระหว่างคาบเรียนในห้องเรียนมีระยะยาวนานพอที่จะทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของควอนตัมในห้องเท่ากับศูนย์

และสุดท้ายเราได้ตั้งสมมติฐานว่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาะระหว่างการหายใจเข้าและหายใจออกมีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 3. ค่าพารามิเตอร์สำหรับค่าประมาณความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขในการจำลอง Wells–Riley

Table 3. Parameter values for Wells–Riley conditional infection probability estimates.

Parameter	Description	Value	Units	Fixed/variable	Source
V_R	Room volume	362.64	m^3	Fixed	Facility info.
N_{ACH}	Air changes per hour	1.34	h^{-1}	Variable	Current study
λ_s	Particle settling loss rate	0.35	h^{-1}	Fixed	Current study
k	Virus inactivation rate	0.63	h^{-1}	Fixed	(van Doremalen et al. 2020)
λ	Total loss rate (baseline)	2.32	h^{-1}	Variable	$\lambda = N_{ACH} + k + \lambda_s$
t_{tot}	Duration	60	min	Fixed	50 min class period + 10 min before/after
$\eta_f, \eta_{f,M}$	Mask EFE	0	–	Variable	Baseline = 0 (no masks), for others see Table 1

สำหรับพารามิเตอร์ที่มีการผันแปรในการคำนวณ (ตัวแปร)

ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในที่นี้เป็นค่าพื้นฐานที่ใช้หรือกำหนดในการศึกษาวิจัยนี้

4.2. ผลที่ได้จากแบบจำลองกับประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) และอัตราการระบายอากาศต่าง ๆ กัน (Model results with varying mask EFE and ventilation rate)

ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขได้รับการทำนาย

(ภายใต้เงื่อนไขว่ามีผู้ที่ติดเชื้ออยู่หนึ่งคน) ในสถานการณ์ 3 อย่างในตารางที่ 2

ในฐานะที่เป็น function ของประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)

ของหน้าากที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐาน $N_{ACH} = 1.34$

h^{-1} (โดยการตั้งสมมติฐานว่าทุกคนที่อยู่ในห้องสวมหน้ากากชนิดเดียวกัน) และเป็น

function ของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)

สำหรับในกรณีที่ไม่มีใครสวมหน้ากากเลยสักคน ผลที่ได้สำหรับทั้งสองกรณีแสดงไว้ใน

[ภาพประกอบ 11](#) ในจำนวน 3 สถานการณ์ต่าง ๆ กันที่เราศึกษาวิจัยนี้ สถานการณ์ A

ซึ่งเป็นกรณีที่อาจารย์ผู้สอนมีการติดเชื่อและผู้เรียนอ่อนแอต่อการติดเชื่อมีผลของความเป็นไปได้ของการติดเชื่อที่มีเงื่อนไขสูงสุด

ซึ่งสันนิษฐานว่าเนื่องจากอัตราการปล่อยควอนตัมที่สูงกว่าจากอาจารย์ผู้สอน

สถานการณ์ B

ซึ่งมีผู้เรียนติดเชื่อหนึ่งคนและอาจารย์ผู้สอนอ่อนแอต่อการติดเชื่อมีความเป็นไปได้ระดับกลาง และสถานการณ์ C

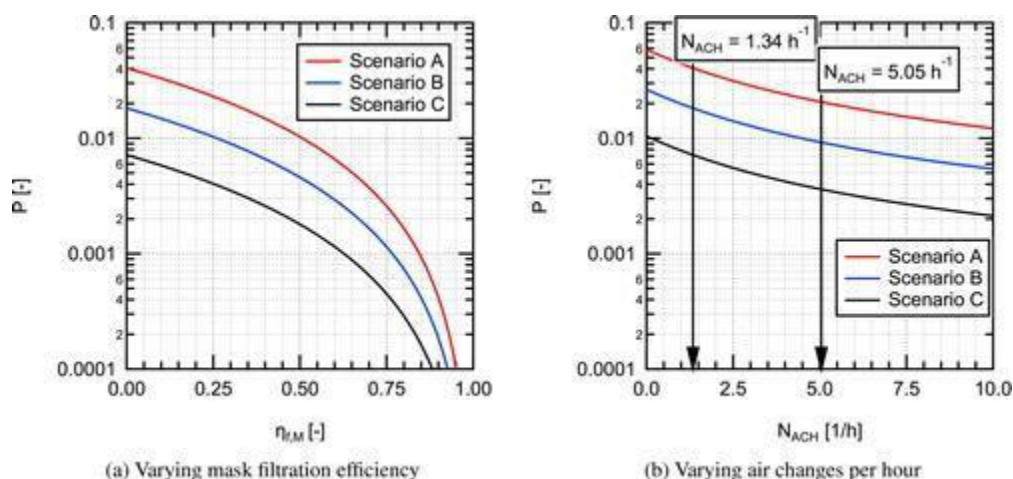
ซึ่งมีผู้เรียนติดเชื่อหนึ่งคนและผู้เรียนอ่อนแอต่อการติดเชื่อมีความเป็นไปได้ต่ำสุดเนื่องจากมีอัตราการปล่อยควอนตัมที่ต่ำกว่าบวกกับอัตราการหายใจต่ำกว่า

ภาพประกอบ

11. ค่าประมาณความเป็นไปได้ของการติดเชื่อที่มีเงื่อนไขจากการแพร่กระจายของละอองลอยในห้องเรียนใน 3 สถานการณ์ต่าง ๆ กันสำหรับ (a)

ประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากากต่าง ๆ กัน ($\eta_f, M\eta_f, M$) และ (b)

อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) ต่าง ๆ กัน (N_{ACH})



พื้นที่ว่างระหว่างเส้นโค้งสำหรับทั้ง 3 สถานการณ์ที่แสดงใน [ภาพประกอบ 11a](#) และ

[b](#) ยังคงคงที่บน log scale แนวตั้ง ในขณะที่พารามิเตอร์ที่เป็นที่สนใจ (parameter of interest) มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งบ่งชี้ถึงตัวประกอบค่าคงที่ (constant factor)

ระหว่างเส้นโค้งซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของอัตราการปล่อยควอนตัมและอัตราการหายใจสำหรับ 3 สถานการณ์นั้น

ในขณะที่ประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากากเพิ่มขึ้นความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขจะลดลง

ซึ่งตอนแรกลดลงค่อนข้างช้าแต่ต่อมาก็ลดลงอย่างรวดเร็วสำหรับประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากากที่เพิ่มสูงขึ้น ที่ประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากากเท่ากับ 0.5 (50%) ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขลดลง 4

เท่าเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐานที่ไม่ได้สวมหน้ากาก ($N_{ACH} = 1.34 \text{ h}^{-1}$)

เมื่อทุกคนสวมใส่หน้ากากที่มีประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากากเท่ากับ 0.9 (90%)

ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขลดลง 100 เท่า สิ่งนี้เกิดจากการลดลง 10

เท่าของควอนตัมที่ปล่อยออกมาในห้องบวกกับการลดลง 10

เท่าของควอนตัมที่หายใจเข้าไปผ่านหน้ากาก ส่งผลให้การลดลงทั้งหมดเท่ากับ 100

เท่าตามที่คาดว่าจะได้จากสมการที่ 7

ซึ่งทำให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อลดลงอย่างมากเปรียบเทียบกับค่าพื้นฐาน

สำหรับสถานการณ์ที่เป็น function ของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH)

ต่าง ๆ กัน ([ภาพประกอบ 11b](#)) เส้นโค้งมีการลดลงเร็วขึ้นที่ N_{ACH} ซึ่งมีค่าต่ำ ๆ

และความเป็นไปได้ที่มีเงื่อนไขมีการลดลงช้าลงเมื่อ N_{ACH} เพิ่มสูงขึ้นที่ค่าสูง ๆ

ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงการดูดอากาศออกที่ลดน้อยลง (diminishing return)

สำหรับอัตราการระบายอากาศที่สูงขึ้น แกนแนวนอนใน [ภาพประกอบ](#)

[11b](#) สามารถแสดงเป็นอัตราการสูญเสียทั้งหมด (λ)

โดยการเพิ่มค่าที่ลงรายการบนแกนแนวนอนเท่ากับ

$\lambda_s + k = 0.98 \cdot \lambda_s + k = 0.98$. การเพิ่มขึ้นจากค่าพื้นฐานที่ $N_{ACH} = 1.34 \text{ h}^{-1}$ เป็น

5.05 h^{-1} ส่งผลให้เกิดการลดลงของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อประมาณเท่ากับ 2 เท่า

อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่เพิ่มขึ้นเป็น 10 h^{-1} ก็ส่งผลให้เกิดการลดลงเพิ่มเติมเท่ากับ 1.7

เท่าของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อ

เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่สังเกตพบว่าการถึงแม้ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่

10 h^{-1} ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อสำหรับสถานการณ์ A ก็ไม่สามารถลดลงให้ต่ำกว่า

0.01 หรือ 1% ได้ ในขณะที่เมื่อทุกคนสวมหน้ากาก EOC

โดยที่ไม่มีตัวรั้งหน้ากากที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศพื้นฐานในห้อง ($N_{ACH} = 1.34$) ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อสามารถลดลงต่ำกว่า 0.009 (0.9%) ได้ แผนภูมิความร้อน (heat map)

ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงในเวลาเดียวกันของทั้งประสิทธิภาพการกรองอากาศของหน้ากากและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่มีต่อความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขอยู่ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information)

4.3. ผลที่ได้จากการดำเนินการจำเพาะต่าง ๆ (Results for specific interventions)

ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขสำหรับทั้ง 3 สถานการณ์ในตารางที่ 2 ได้รับการประมาณการสำหรับกรณีที่มีการใช้การดำเนินการจำเพาะต่าง ๆ ร่วมกัน เช่น อัตราการไหลของอากาศจากระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) (อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ) หน้ากากที่ผู้เรียนและอาจารย์ผู้สอนสวมใส่ ตลอดจนการใช้ตัวรั้งหน้ากาก

มีการใช้อัตราการไหลของอากาศจากระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) ที่ 3 อัตราด้วยกัน คือที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) เท่ากับ 1.34 (พื้นฐาน) 5 และ 10

การใช้เครื่องฟอกอากาศระบบหมุนเวียนประจำห้องก็สามารถถือได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของอัตราการไหลของอากาศจากระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) ในการคำนวณเหล่านี้ โดยที่ตั้งสมมติฐานว่าเครื่องฟอกอากาศมีประสิทธิภาพการกรอง 100% และไม่มีผลกระทบต่อ**การประมาณการแบบจำลองที่มีการผสมผสานกันดี (well-mixed model approximation)** มีการคำนวณสำหรับในกรณีต่าง ๆ

คือกรณีที่ทุกคนในห้องสวมหน้ากากผ้าฝ้ายถัก หน้ากาก EOC และหน้ากากหัตถการราคาถูก ทั้งที่ใช้ร่วมกับตัวรั้งหน้ากากและไม่ใช้ตัวรั้งหน้ากาก (ค่าประสิทธิภาพการกรองที่ใช้เป็นค่าประสิทธิภาพการกรองสำหรับการสวมหน้ากากร่วมกับตัวรั้งหน้ากาก FTM)

หน้ากากทางการแพทย์ไม่ได้รับการพิจารณาในที่นี้เนื่องจากมีราคาแพง จัดหาซื้อได้ยาก

และไม่ต้องการให้มีผลกระทบกับการจัดหาหน้ากากให้กับบุคลากรทางการแพทย์ แต่ประสิทธิภาพก็น่าจะใกล้เคียงกับหน้ากาก EOC ที่สวมโดยไม่ใช้ตัวรัดหน้ากาก และแทบจะเท่ากับหน้ากากหัตถการที่ใช้ร่วมกับตัวรัดหน้ากาก นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาถึงกรณีเพิ่มเติมซึ่งเป็นกรณีที่อาจารย์ผู้สอนสวมหน้ากาก หัตถการร่วมกับตัวรัดหน้ากากและผู้เรียนทุกคนสวมหน้ากากผ้า กรณีนี้เป็นการมุ่งความสนใจไปที่การควบคุมที่จุดแหล่งกำเนิด คือผู้ที่มีความเป็นไปได้ที่จะมีอัตราการปล่อยคอนตัมสูงที่สุดจากกิจกรรมที่ทำและเป็นผู้ที่สามารถฝึกสอนให้สวมใส่หน้ากากและตัวรัดหน้ากากได้อย่างถูกวิธีและอย่างสม่ำเสมอ สำหรับในการใช้การดำเนินการจำเพาะต่าง ๆ แต่ละวิธีร่วมกัน ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขได้รับการคำนวณสำหรับทั้ง 3 สถานการณ์ในตารางที่ 2

ผลลัพธ์ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ กัน และการใช้การดำเนินการจำเพาะต่าง ๆ แต่ละวิธีร่วมกันได้แสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 12](#) ข้อมูลสำหรับความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขที่แสดงในกราฟมีอยู่ในตารางใน ส่วนของข้อมูลเพิ่มเติม (Supplemental Information) เราได้เพิ่มเส้นประที่ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขเท่ากับ 0.001 ลงไปในกราฟสำหรับอ้างอิง ค่าตัวเลขนี้ได้รับการแนะนำในผลงานการศึกษาวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้ ของ Buonanno, Morawska, และ Stabile ([2020a](#)) ให้เป็นเป้าหมาย กรณีพื้นฐานซึ่งไม่มีการสวมหน้ากากและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) เท่ากับ 1.34 มีค่าประมาณความเป็นไปได้ของการติดเชื้ออยู่ที่ 0.042 (4.2%) สำหรับสถานการณ์ A 0.0185 (1.85%) สำหรับสถานการณ์ B และ 0.0074 (0.74%) สำหรับสถานการณ์ C สำหรับสถานการณ์ A ที่พิจารณาถึงการจัดห้องเรียนแรกเริ่มว่ามีผู้เรียนจำนวนทั้งสิ้น 48 คน จำนวนของการติดเชื้อที่ประมาณการซึ่งเป็นผลจากเหตุการณ์นี้คือ

$$N_{event} = N_{event} = 2.0.$$

สำหรับความหนาแน่นของผู้เรียนที่ลดลงซึ่งเราศึกษาในที่นี้กับผู้เรียนจำนวนทั้งสิ้นแค่เพียง 16 คน ทำให้การติดเชื้อลดลงเป็น $N_{event} = N_{event} = 0.67$

ซึ่งเน้นย้ำถึงความสำคัญของการลดความหนาแน่นของผู้คนเป็นอันดับแรก เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่สังเกตพบว่าการจัดห้องเรียนที่มีจำนวนผู้เรียน 48

คนจำเป็นต้องมีอัตราการได้รับวัคซีนเท่ากับ 70.2%

เพื่อที่จะให้ได้ $N_{event} = N_{event} = 0.67$

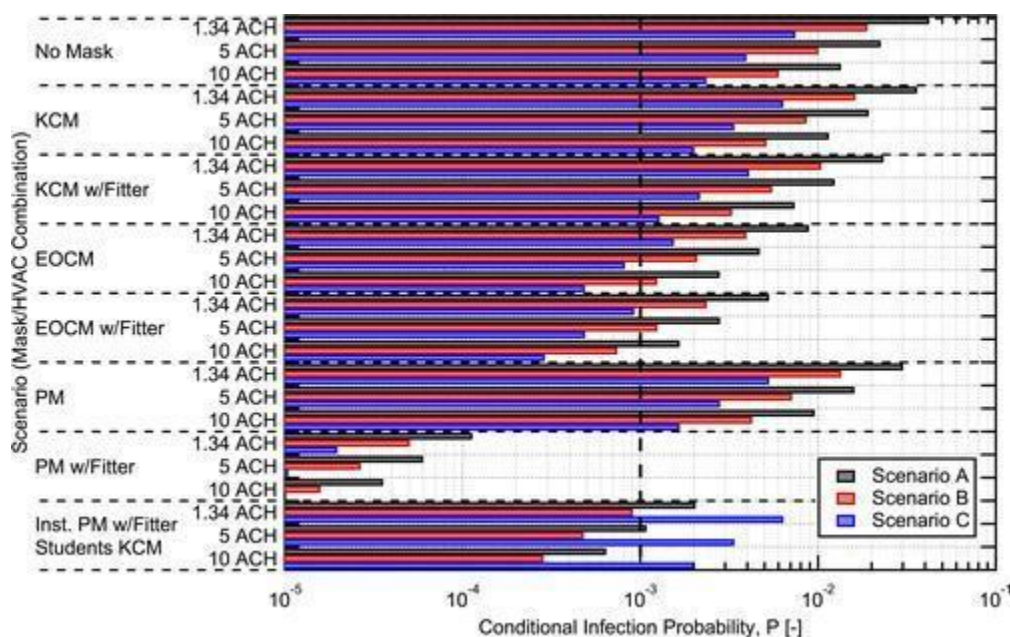
ซึ่งเทียบเท่ากับกรณีที่มีการลดความหนาแน่นของผู้เรียนลงเมื่อตั้งสมมติฐานว่าประสิทธิภาพของวัคซีนอยู่ที่ 95%

ภาพประกอบ

12. ค่าประมาณความเป็นไปได้ของการติดเชื้อจากการแพร่กระจายของละอองลอยในห้องเรียนสำหรับการใช้การดำเนินการจำเพาะต่าง ๆ แต่ละวิธีร่วมกัน

เส้นประในแนวตั้งแสดงที่ระดับความเป็นไปได้ที่มีเงื่อนไขเท่ากับ 0.001

ตัวย่อของชนิดหน้ากากที่ใช้ในกราฟเป็นดังนี้ KCM = หน้ากากผ้าฝ้ายถัก EOCM = หน้ากาก EOC PM = หน้ากากหัตถการ



ความเป็นไปได้ที่ได้รับการทำนายในที่นี้สอดคล้องกันดีกับความเป็นไปได้ที่ได้รับการ

ประมาณการในการศึกษาวิจัยชิ้นอื่น ๆ

สำหรับความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขในพื้นที่ห้องเรียนที่คล้ายคลึงกัน

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของระยะเวลาในการรับสัมผัสเชื้อระหว่างแต่ละการศึกษาวิจัย

(Pavilonis และคณะ [2021](#); Shen และคณะ [2021](#); Stabile และคณะ [2021](#)) ตัวอย่างเช่น

Pavilonis และคณะ ([2021](#))

พบว่าค่าเฉลี่ยโดยประมาณของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขเท่ากับ 0.35 (35%) สำหรับสถานการณ์ที่เทียบเท่ากับสถานการณ์ A ที่มีระยะเวลาในการรับสัมผัสเชื้อที่ยาวนานกว่าถึง 6.3 เท่า; **accounting for the difference in exposure duration gives a result similar in magnitude to that found here.** Shen และคณะ (2021) พบว่าความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขเท่ากับ 3.1% สำหรับสถานการณ์ที่เทียบเท่ากับสถานการณ์ C ที่มีระยะเวลาในการรับสัมผัสเชื้อ 2 ชั่วโมงและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) เท่ากับ 3.6 แม้แต่เมื่อมีการแก้ไขระยะเวลาในการรับสัมผัสเชื้อความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขก็สูงกว่า 0.74% ที่พบในการศึกษาวิจัยนี้อยู่เล็กน้อย เนื่องจากมีอัตราการปล่อยควอนตัมที่สูงกว่าตามที่ตั้งสมมติฐานในการศึกษาวิจัยนั้น

การสวมหน้ากากผ้าฝ้ายถักของทุกคนในห้องเรียนทำให้ได้ค่าความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขจากละอองลอยลดลงเล็กน้อยคือลดลง 15% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐานซึ่งไม่มีการสวมหน้ากาก ในการเปรียบเทียบนี้มาตรการเชิงป้องกันด้วยการเพิ่มอัตราการระบายอากาศจากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ที่ 1.34 เป็น 5.0 ส่งผลให้มีการลดลงเกือบจะเท่ากับ 2 เท่า (คือเท่ากับ 1.87 เท่า) ไม่ว่าจะมีการสวมหน้ากากหรือไม่ก็ตาม เมื่อมีการใช้ตัวรั้งหน้ากากเพื่อช่วยให้หน้ากากผ้าฝ้ายถักปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าผู้สวม ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขจะลดลงเกือบจะเท่ากับ 2 เท่า (คือเท่ากับ 1.81 เท่า) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐานซึ่งไม่มีการสวมหน้ากาก การลดลงนี้ใกล้เคียงกับเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการระบายอากาศจากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ที่ 1.34 เป็น 5.0 ซึ่งบ่งชี้ว่าหน้ากากผ้าที่มีการปิดแน่นแนบสนิทดีกับใบหน้าผู้สวมมีบทบาทสำคัญในการลด ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อจากการแพร่กระจายผ่านละอองลอย

การผสมผสานระหว่างอัตราการระบายอากาศที่สูงขึ้นกับการสวมหน้ากากเป็นการเสริมแรง ซึ่งกันและกัน และผลกระทบที่ได้รับก็เพิ่มสูงขึ้นเป็นทวีคูณตามที่แสดงใน [สมการที่ 7](#) ยกตัวอย่าง เช่น การใช้หน้ากากผ้าฝ้ายถักร่วมกับตัวรั้งหน้ากากและการเพิ่มขึ้นของอัตราการระบายอากาศ

จากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ที่ 1.34 เป็น 5.0
ส่งผลให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขมีการลดลงถึง 3.4
เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐานซึ่งไม่มีการสวมหน้ากาก
ซึ่งเท่ากับผลผลิตของการลดลงของแต่ละวิธีแยกกัน
เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่สังเกตพบว่าการลดลงจากการผสมผสานแต่ละวิธีการเข้าด้วยกันนี้มีผล
มากกว่าที่ได้รับจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่มีการระบายความร้อนและการปรับ
อากาศ (HVAC) จากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ที่ 1.34 เป็น 10
แต่เพียงอย่างเดียว

เราพบว่าความเป็นไปได้ของการติดเชื้อมีการลดลงอย่างมากมายและรวดเร็วสำหรับ
หน้ากากที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) สูงขึ้น
สำหรับหน้ากากที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้และมีประสิทธิภาพปานกลางอย่างเช่น
หน้ากาก EOC สามารถทำให้มีความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่ลดลง 4.75
เท่าเมื่อไม่มีการใช้ตัวรังหน้ากาก และลดลง 8.2 เท่าหากมีการใช้ตัวรังหน้ากากร่วมกับ
สำหรับหน้ากากหัตถการชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทั้งมีการปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าได้ไม่ดี
นักหากไม่ใช้ตัวรังหน้ากาก และมีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) แค่น้อย 15.8%
เท่านั้น แต่เมื่อใช้ร่วมกับตัวรังหน้ากากค่าประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE)
สามารถสูงถึง 94.8%
ซึ่งส่งผลให้มีการลดลงของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขเกือบจะถึง 400 เท่า
(คือลดลง 371 เท่า)
สิ่งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำให้การแพร่กระจายเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2
ผ่านทางละอองลอยสามารถลดลงได้ด้วยการใช้หน้ากากที่มีราคาเยอมาพร้อมกับตัวรังหน้า
กาก

ผลกระทบของอัตราการระบายอากาศที่เราพบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใกล้เคียงกับที่พบใน
การศึกษาวิจัยชิ้นอื่น ๆ สำหรับในกรณีของพื้นที่ภายในตัวอาคารอย่างเช่น ห้องเรียน
(Foster และ Kinzel [2021](#); Stabile และคณะ [2021](#); Zhang [2020](#))
ในทางกลับกันการศึกษาวิจัยชิ้นอื่น ๆ
มีแนวโน้มในการที่จะประมาณการลดลงของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไข

สำหรับสถานการณ์ที่มีการใช้หน้ากากสูงกว่าความเป็นจริง (Shen และคณะ [2021](#); Zhang [2020](#))

ทั้งนี้เนื่องมาจากการขาดแคลนข้อมูลในวรรณกรรมผลงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของการปิดแน่นแนบสนิทของหน้ากากกับใบหน้าผู้สวมที่มีต่อประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ในช่วงเวลาที่ผลงานการศึกษาวิจัยเหล่านี้ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ตัวอย่างเช่น Shen และคณะ ([2021](#))

พบว่าการสวมหน้ากากผ้าสามารถช่วยลดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขลง 48% โดยเฉลี่ย

แต่ในการศึกษาวิจัยของเราครั้งนี้พบว่ามีการลดลงของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขแค่เพียง 15% เท่านั้นสำหรับหน้ากากผ้าฝ่ายถัก ในการศึกษาวิจัยของ Zhang ([2020](#)) ก็มีการตั้งสมมติฐานว่าความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขลดลง 2 เท่า คล้าย ๆ กัน

อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ว่าระดับการลดลงของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขจะเกิดขึ้นได้กับหน้ากากผ้าก็เฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับตัวรั้งหน้ากากเท่านั้น

กรณีของสถานการณ์ที่อาจารย์ผู้สอนใช้หน้ากากหัตถการร่วมกับตัวรั้งหน้ากากและผู้เรียนใช้หน้ากากผ้าฝ่ายถักทำให้เห็นภาพว่าการควบคุมที่แหล่งกำเนิดละอองลอยสามารถทำให้เกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อได้อย่างไร

กรณีนี้มีความน่าสนใจเนื่องจากมีความคุ้มค่ากับค่าใช้จ่าย

ในกรณีนี้การใช้หน้ากากที่มีประสิทธิภาพสูงในการกรองอากาศกับผู้ที่มีความเป็นไปได้ว่าเป็นผู้ที่ปล่อยควอนตัมสูงสุด (เนื่องจากระดับกิจกรรมที่ทำ)

สามารถทำให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขลดลงได้ 5.67 เท่า

ด้วยเหตุนี้การดำเนินการที่มุ่งเป้าหรือเฉพาะเจาะจง (targeted intervention)

จึงสามารถส่งผลกระทบได้เป็นอย่างมากต่อความเป็นไปได้ของการติดเชื้อในกรณีที่ผู้ทำกิจกรรมที่รับรู้กันว่าทำให้มีการปล่อยควอนตัมในอัตราสูง ๆ

แค่เพียงคนเดียวหรือสองสามคน

และยังเป็นการเผชิญกับความจริงที่ว่าทำให้ความรู้และฝึกอบรมอาจารย์ผู้สอนในเรื่องการสวมหน้ากากอย่างถูกวิธีเป็นเรื่องที่สามารถจะกระทำได้ที่แทนที่จะพึ่งพาอาศัยกลยุทธ์ในการควบคุมทางการบริหารอย่างเดียวกันสำหรับผู้เรียนซึ่งเป็นกลุ่มใหญ่กว่า

ผลที่ได้สำหรับความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขสำหรับการดำเนินการ (intervention) ต่าง ๆ กันแสดงให้เห็นประเด็นสำคัญสองสามประการ ประการแรกอัตราการไหลของอากาศของระบบการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) ที่เพิ่มสูงขึ้น (การระบายอากาศ) (ถ้าหากเป็นไปได้) และการมีอัตราการระบายอากาศในระดับที่เป็นที่ยอมรับได้เป็นอย่างน้อยมีความสำคัญในการลดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อ แต่ก็มีผลที่ได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่าย (ดู [ภาพประกอบ 11](#)) ประการที่ 2 ทั้ง 3 สถานการณ์ (จากตารางที่ 2) ให้ผลของความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแตกต่างของอัตราการปล่อยควอนตัมและอัตราการหายใจในระหว่างแต่ละสถานการณ์เหล่านั้น

สำหรับในกรณีสถานการณ์ที่อาจารย์ผู้สอนติดเชื้อและผู้เรียนอ่อนแอต่อการติดเชื้อ (สถานการณ์ A) ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขมีค่าสูงมากที่สุด เนื่องจากสันนิษฐานว่าอาจารย์ผู้สอนมีอัตราการปล่อยควอนตัมในระดับที่สูงกว่า สำหรับสถานการณ์ C ซึ่งมีผู้เรียนติดเชื้อหนึ่งคนและผู้เรียนในห้องคนอื่น ๆ อ่อนแอต่อการติดเชื่อนั้นอัตราการปล่อยควอนตัมต่ำกว่าถึง 5.76 เท่า (อัตราการหายใจเท่าเดิม) และความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขลดลงถึง 5.65 เท่า ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยประมาณกับการลดลงของอัตราการปล่อยควอนตัมตามที่คาดไว้ซึ่งอ้างอิง [สมการ 7](#) (ผลลัพธ์ที่แสดงในที่นี้สามารถเพิ่มได้อย่างง่าย ๆ

เพื่อที่จะประมาณการค่าตัวเลขของจำนวนผู้ติดเชื้อในห้อง อัตราการปล่อยควอนตัม อัตราการสูญเสีย ปริมาตรห้อง อัตราการหายใจ ตลอดจนประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก)

สิ่งนี้ทำให้น่าเชื่อได้ว่าการควบคุมที่แหล่งกำเนิดมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นกลยุทธ์วิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับกรณีที่มีความเป็นไปได้ว่ามีอัตราการปล่อยควอนตัมอยู่ในระดับสูง ๆ ประการสุดท้ายเป็นที่แน่ชัดว่าการสวมหน้ากากรวมกับการใช้ตัวรังหน้ากากเพื่อลดการรั่วรอบ ๆ หน้ากาก (หรือการออกแบบหน้ากากให้ดีขึ้นเพื่อให้บรรลุผลลัพธ์อย่างเดียวกัน) สามารถทำให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อผ่านทางการแพร่กระจายของละอองลอยมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญและมากกว่าที่ได้จากการระบายอากาศเพียงอย่างเดียว

ในพื้นที่ห้องเรียนที่พิจารณาสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นที่ชัดเจนว่าลำพังอัตราการระบายอากาศแค่เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะให้ได้มาซึ่งความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขที่ต่ำกว่า 0.001 เป็นที่น่ายินดีว่าการผสมผสานการสวมหน้ากากและการระบายอากาศเข้าด้วยกันให้ผลที่เสริมแรงซึ่งกันและกันและผลที่ได้ก็เพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ อย่างที่เป็นไปตาม [สมการที่ 7](#) และการใช้สองสิ่งนี้พร้อมกันก็ส่งผลให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อมีการลดลงอย่างมาก ตัวอย่างเช่นการใช้หน้ากากที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศระดับปานกลางอย่างเช่น หน้ากาก EOC ร่วมกับอัตราการไหลที่มีค่าสูง ๆ ของอากาศที่มีการระบายความร้อนและการปรับอากาศ (HVAC) สามารถทำให้เข้าใกล้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขที่ 0.001 ได้ถึง 2 ใน 3 ของสถานการณ์ (สถานการณ์ B และ C) เมื่อพิจารณาถึงการกลับสู่การปฏิบัติงานตามปกติโดยที่มีการกระจายการฉีดวัคซีนอย่างแพร่หลายกว้างขวางแล้ว การจะได้มาซึ่งการลดลงของการแพร่กระจายโรคจากการฉีดวัคซีนที่ใกล้เคียงกันกับที่ได้จากการผสมผสานระหว่างการลดความหนาแน่นของประชากรและการสวมหน้ากากในพื้นที่ที่โดยทั่วไปมีความหนาแน่นของประชากรสูงอย่างห้องเรียนจำเป็นจะต้องมีอัตราการได้ รับวัคซีนที่สูง (สูงกว่า 70%) รวมทั้งวัคซีนจะต้องมีประสิทธิภาพสูง

5. ข้อสรุป (Summary and conclusions)

ในการศึกษาวิจัยนี้เราใช้วิธีการที่เป็นลักษณะพิเศษเฉพาะในการประเมินเชิงทดลองสำหรับ input parameter ต่าง ๆ ที่จำเป็นเกี่ยวกับการระบายอากาศและประสิทธิภาพในการกรองอากาศของหน้ากาก และในการประเมินเชิงทดลองสำหรับความถูกต้องแม่นยำของ **สมมติฐานที่ผสมผสานกันดี (well-mixed assumption)** สำหรับแบบจำลอง Wells–Riley ในห้องเรียนที่ the University of Wisconsin-Madison โดยที่ input ต่าง ๆ ที่ได้รับการ validate ถูกใช้ในแบบจำลอง

Wells–Riley

เพื่อประมาณการความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขสำหรับกรณีเชื้อซาร์สโคโรนาไวรัส 2

ในบริบทของห้องเรียนอย่างเดียวกันผลที่ได้จากแบบจำลองเป็นข้อมูลที่มีคุณค่าเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหน้ากาก ตัวกรองหน้ากาก และการดำเนินการต่าง ๆ เกี่ยวกับอัตราการระบายอากาศ รวมทั้งการผสมผสานวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้เข้าด้วยกันในการลดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขจากละอองลอยในบริบทของห้องเรียน

ข้อสรุปสำคัญ ๆ จากการศึกษาวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้ :

1. อัตราการสูญเสียอนุภาคที่ประมาณจากอัตราการระบายอากาศสอดคล้องกันดีกับอัตราการสูญเสียอนุภาคที่วัดจาก **วิวัฒนาการของเวลาสำหรับความเข้มข้นของละอองลอย (aerosol concentration time evolution)**
2. เมื่ออ้างอิงตามการวัด ณ.
จุดกำเนิดในห้องเรียนที่เป็นตัวแทนซึ่งมีระบบกลไกการระบายอากาศ **สมมติฐานที่ผสมผสานกันดี (well-mixed assumption)** มีการประมาณที่สมเหตุสมผล **(within better than a factor of 2)** สำหรับระยะห่างมากกว่า 2 เมตรจากแหล่งกำเนิดในพื้นที่ห้องเรียนที่ศึกษาวิจัย
3. อัตราการรั่วรอบ ๆ หน้ากากโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 20–80%
เมื่อหน้ากากมีการสวมปิดแน่นแนบสนิทกับใบหน้าผู้สวมที่ดีอย่างสมเหตุสมผล ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFEs) ที่ต่ำกว่าประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFEs) เป็นอย่างมาก
4. เมื่อมีการใช้ตัวกรองหน้ากากร่วมด้วยสามารถทำให้หน้ากากมีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) มีค่าเข้าใกล้กับประสิทธิภาพการกรองอากาศของวัสดุ (MFE) หน้ากากชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งที่มีราคาย่อมเยาที่ใช้ร่วมกับตัวกรองหน้ากากสามารถทำให้มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ใกล้เคียง 95% ได้ในบางกรณี

5. การระบายอากาศในพื้นที่โดยการใช้อากาศบริสุทธิ์หรืออากาศที่ผ่านการกรองเป็น
อย่างดีเป็นสิ่งสำคัญแต่อัตราการระบายอากาศที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อ
ชั่วโมง (ACH) สูงกว่า 5
ก็ทำให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อลดลงเพิ่มเติมแค่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
และอาจจะไม่มีความสมน้ำสมเนื้อเนื่องจากราคาต้นทุนที่สูงรวมทั้งปัจจัยประกอบอื่น ๆ
6. เมื่อทุกคนในห้องเรียนมีการสวมหน้ากาก
ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อที่มีเงื่อนไขจากละอองลอยมีการลดลงอย่างมาก
และการลดลง 4 เท่า 10 เท่า หรือแม้แต่ 100 เท่าก็สามารถที่จะทำได้
7. การควบคุมที่แหล่งกำเนิด
กล่าวคือการจัดหาหน้ากากที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศ (EFE) ในระดับสูง ๆ
(พร้อมกับตัวกรองหน้ากาก)
ให้กับผู้ที่ทำกิจกรรมที่รู้กันว่ามีอัตราการปล่อยคอนแทกสูงสามารถเป็นวิธีการที่
มีประสิทธิภาพในการจำกัดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อจากละอองลอย
8. การใช้หน้ากากและการระบายอากาศพร้อมกันมีผลที่เสริมแรงซึ่งกันและกัน
(ทำให้เกิดการลดลงอย่างมากมาเป็นทวีคูณ)
และสามารถทำให้ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อจากการแพร่กระจายของละอองลอยมี
การลดลงเป็นอย่างมาก

ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้เป็นแนวทางเสนอแนะเกี่ยวกับประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของการ
ระบายอากาศ การสวมหน้ากาก ตัวกรองหน้ากาก
ตลอดจนการผสมผสานวิธีการเหล่านี้เข้าด้วยกัน
ในการลดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อจากการแพร่กระจายของละอองลอย
ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้เน้นย้ำเป็นการเฉพาะถึงศักยภาพอันใหญ่หลวงของ
การ สวมหน้ากากที่มีประสิทธิภาพ หน้ากากที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพ
หรือการใช้ตัวกรองหน้ากากในการลดความเป็นไปได้ของการติดเชื้อลงได้อย่างมาก
ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ยังเป็นการบ่งชี้ว่าการที่จะให้ได้มาซึ่งอัตราการแพร่กระจายของ
โรคโควิด 19 ที่ใกล้เคียงกับอัตราการแพร่กระจายที่ได้จากการผสมผสานระหว่างการลด

ความหนาแน่นของประชากร การปรับปรุงการระบายอากาศ และการสวมหน้ากากเข้าด้วยกัน จำเป็นจะต้องมีอัตราการได้รับวัคซีนที่สูง (สูงกว่า 70%) รวมทั้งวัคซีนจะต้องมีประสิทธิภาพสูงเมื่อกลับเข้าสู่ระดับความหนาแน่นในห้องเรียนปกติเหมือนในช่วงก่อนหน้าการระบาดโดยที่ไม่มีมาตรการเพิ่มเติม (เช่น การสวมหน้ากาก)

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgments)

ผู้เขียนขอขอบคุณในความเห็นข้อติชมที่เป็นประโยชน์และความช่วยเหลือจาก James Morrision, Jesse Decker, Jessica Cebula, และ Christopher Strang, รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่แผนก Environment, Health & Safety ของ the College of Engineering, and Facilities Planning and Management แห่ง the University of Wisconsin-Madison ผู้เขียนขอขอบคุณ Lennon Rodgers ตลอดจนพนักงานลูกจ้างของ the University of Wisconsin-Madison Makerspace

สำหรับความพยายามในการดำเนินการออกแบบและผลิตตัวรังหน้ากาก Badger Seal ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจส่วนหนึ่งจากงานระยะแรก ๆ ของการศึกษาวิจัยนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณนักศึกษาบัณฑิตวิทยาลัย Logan Kossel และ James Rice รวมทั้ง Prof. Alejandro Roldan-Alzate

สำหรับความเห็นข้อติชมที่เป็นประโยชน์และความช่วยเหลือ

ผลประโยชน์ทับซ้อน (Conflict of interest)

ผู้เขียนผลงานการศึกษาวิจัยนี้รับรองว่าไม่มีความผูกพันเกี่ยวข้องกับองค์กรหรือหน่วยงานใด ๆ ในด้านผลประโยชน์ทั้งที่เกี่ยวกับการเงินและอื่น ๆ

ในส่วนหนึ่งของเนื้อหาที่กล่าวถึงในเอกสารผลงานการศึกษาวิจัยนี้

ถ้อยแถลงเกี่ยวกับการมีให้ของข้อมูล (Data availability statement)

ข้อมูลที่สนับสนุนสิ่งที่เราค้นพบจากการศึกษาวิจัยนี้สามารถมีให้ตามการร้องขอ โดยติดต่อไปที่ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

เอกสารอ้างอิง (References)

1. 42 CFR Part 84. 2021. Code of federal regulations. [\[Google Scholar\]](#)
2. Adams, W. C. 1993. Measurement of breathing rate and volume in routinely performed daily activities. Report, Physical Education Department, University of California, Davis, Human Performance Laboratory. [\[Google Scholar\]](#)
3. Alsved, M., A. Matamis, R. Bohlin, M. Richter, P. E. Bengtsson, C. J. Fraenkel, P. Medstrand, and J. Löndahl. 2020. Exhaled respiratory particles during singing and talking. *Aerosol Science and Technology* 54 (11):1245–8. doi:10.1080/02786826.2020.1812502 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
4. ASTM. 2019. ASTM F2100-19E1: Standard specification for performance of materials used in medical face masks. [\[Google Scholar\]](#)
5. Azimi, P., and B. Stephens. 2013. Hvac filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs. *Building and Environment* 70:150–60. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.025 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
6. Bagheri, M. H., I. Khalaji, A. Azizi, R. T. Loibl, N. Basualdo, S. Manzo, M. L. Gorrepati, S. Mehendale, C. Mohr, and S. N. Schiffres. 2021. Filtration efficiency, breathability, and reusability of improvised materials for face masks. *Aerosol Science and Technology* 1–15. [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
7. Brooks, J. T., D. H. Beezhold, J. D. Noti, J. P. Coyle, R. C. Derk, F. M. Blachere, and W. G. Lindsley. 2021. Maximizing fit for cloth and medical procedure masks to improve performance and reduce sars-cov-2 transmission and exposure, 2021. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 70 (7):254–7. doi:10.15585/mmwr.mm7007e1 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
8. Buonanno, G., L. Morawska, and L. Stabile. 2020a. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International* 145:106112. doi:10.1016/j.envint.2020.106112 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
9. Buonanno, G., L. Stabile, and L. Morawska. 2020b. Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International* 141:105794. doi:10.1016/j.envint.2020.105794 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)

10. CDC, U. S. 2020a. Scientific brief: Community use of cloth masks to control the spread of SARS-CoV-2. Report, Centers for Disease Control and Prevention. [\[Google Scholar\]](#)
11. CDC, U. S. 2020b. Scientific brief: SARS-CoV-2 and potential airborne transmission. 2020. Report, Centers for Disease Control and Prevention. [\[Google Scholar\]](#)
12. Chia, P. Y., K. K. Coleman, Y. K. Tan, S. W. X. Ong, M. Gum, S. K. Lau, X. F. Lim, A. S. Lim, S. Sutjipto, P. H. Lee, et al. 2020. Detection of air and surface contamination by SARS-CoV-2 in hospital rooms of infected patients. *Nature Communications* 11 (1):2800. doi:10.1038/s41467-020-16670-2 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
13. Clapp, P. W., E. E. Sickbert-Bennett, J. M. Samet, J. Berntsen, K. L. Zeman, D. J. Anderson, D. J. Weber, and W. D. Bennett. 2021 Evaluation of cloth masks and modified procedure masks as personal protective equipment for the public during the covid-19 pandemic. *JAMA Internal Medicine* 181 (4):463–9. doi:10.1001/jamainternmed.2020.8168 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
14. Clase, C. M., E. L. Fu, A. Ashur, R. C. L. Beale, I. A. Clase, M. B. Dolovich, M. J. Jardine, M. Joseph, G. Kansime, J. F. E. Mann, et al. 2020. Forgotten technology in the COVID-19 pandemic: Filtration properties of cloth and cloth masks – A narrative review. *Mayo Clinic Proceedings* 95 (10):2204–24. doi:10.1016/j.mayocp.2020.07.020 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
15. Crilley, L. R., A. A. Angelucci, B. Malile, C. J. Young, T. C. VandenBoer, and J. I. L. Chen. 2021. Non-woven materials for cloth-based face masks inserts: Relationship between material properties and sub-micron aerosol filtration. *Environmental Science: Nano*. [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
16. Davies, A., K.-A. Thompson, K. Giri, G. Kafatos, J. Walker, and A. Bennett. 2013. Testing the efficacy of homemade masks: Would they protect in an influenza pandemic? *Disaster Medicine and Public Health Preparedness* 7 (4):413–8. doi:10.1017/dmp.2013.43 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
17. Drewnick, F., J. Pikmann, F. Fachinger, L. Moormann, F. Sprang, and S. Borrmann. 2021. Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks. *Aerosol Science and Technology* 55 (1):63–79. doi:10.1080/02786826.2020.1817846 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
18. Fennelly, K. P. 2020. Particle sizes of infectious aerosols: Implications for infection control. *The Lancet Respiratory Medicine* 8 (9):914–24. doi:10.1016/S2213-2600(20)30323-4 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
19. Fennelly, K. P., and E. A. Nardell. 1998. The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 19 (10):754–9. doi:10.2307/30141420 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
20. Fisk, W. J., O. Seppänen, D. Faulkner, and J. Huang. 2005. Economic benefits of an economizer system: Energy savings and reduced sick leave. In *ASHRAE Transactions*, vol. 111, PART 2, 673–9. [\[Google Scholar\]](#)

21. Foster, A., and M. Kinzel. 2021. Estimating covid-19 exposure in a classroom setting: A comparison between mathematical and numerical models. *Physics of Fluids* (Woodbury, N.Y.: 1994) 33 (2):021904.
doi:10.1063/5.0040755 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
22. Gammaitoni, L., and M. C. Nucci. 1997. Using a mathematical model to evaluate the efficacy of tb control measures. *Emerging Infectious Diseases* 3 (3):335–42.
doi:10.3201/eid0303.970310 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
23. Hao, W., A. Parasch, S. Williams, J. Li, H. Ma, J. Burken, and Y. Wang. 2020. Filtration performances of non-medical materials as candidates for manufacturing facemasks and respirators. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 229:113582.
doi:10.1016/j.ijheh.2020.113582 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
24. Hao, W., G. Xu, and Y. Wang. 2021. Factors influencing the filtration performance of homemade face masks. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 18 (3):128–38. doi:10.1080/15459624.2020.1868482 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
25. Hendrix, M. J., C. Walde, K. Findley, and R. Trotman. 2020. Absence of apparent transmission of SARS-CoV-2 from two stylists after exposure at a hair salon with a universal face covering policy—Springfield, Missouri, May 2020. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 69 (28):930–2.
doi:10.15585/mmwr.mm6928e2 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
26. Hill, W. C., M. S. Hull, and R. I. MacCuspie. 2020. Testing of commercial masks and respirators and cotton mask insert materials using SARS-CoV-2 virion-sized particulates: Comparison of ideal aerosol filtration efficiency versus fitted filtration efficiency. *Nano Letters* 20 (10):7642–7.
doi:10.1021/acs.nanolett.0c03182 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
27. Hinds, W. C. 1999. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. New York: John Wiley & Sons, Inc. [\[Google Scholar\]](#)
28. Holmgren, H., B. Bake, A.-C. Olin, and E. Ljungström. 2011. Relation between humidity and size of exhaled particles. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery* 24 (5):253–60. doi:10.1089/jamp.2011.0880 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
29. Jang Ji, Y., and W. Kim Seung. 2015. Comparative evaluation of filtration efficiency performance of similar mask products on the market. *Journal of the Korean Society of Environmental Health* 41 (3):203–15. [\[Google Scholar\]](#)
30. Johnson, G. R., L. Morawska, Z. D. Ristovski, M. Hargreaves, K. Mengersen, C. Y. H. Chao, M. P. Wan, Y. Li, X. Xie, D. Katoshevski, et al. 2011. Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science* 42 (12):839–51.
doi:10.1016/j.jaerosci.2011.07.009 [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
31. Joo, T., M. Takeuchi, F. Liu, M. P. Rivera, J. Barr, E. S. Blum, E. Parker, J. H. Tipton, J. Varnedoe, B. Dutta, et al. 2021. Evaluation of particle filtration efficiency of commercially available materials for homemade face mask usage. *Aerosol Science and Technology*, Pages 1–15. [\[Google Scholar\]](#)

32. Jung, H., J. K. Kim, S. Lee, J. Lee, J. Kim, P. Tsai, and C. Yoon. 2014. Comparison of filtration efficiency and pressure drop in anti-yellow sand masks, quarantine masks, medical masks, general masks, and handkerchiefs. *Aerosol and Air Quality Research* 14 (3):991–1002. doi:10.4209/aaqr.2013.06.0201 [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
33. Kelly, E., S. Pirog, J. Ward, and P. J. Clarkson. 2020. Ability of fabric face mask materials to filter ultrafine particles at coughing velocity. *BMJ Open* 10 (9):e039424. doi:10.1136/bmjopen-2020-039424 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
34. Kohanski, M. A., L. J. Lo, and M. S. Waring. 2020. Review of indoor aerosol generation, transport, and control in the context of COVID-19. *International Forum of Allergy & Rhinology* 10 (10):1173–9. doi:10.1002/alr.22661 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
35. Konda, A., A. Prakash, G. Moss, M. Schmoltdt, G. Grant, and S. Guha. 2020a. Correction to aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano* 14 (8):10742–3. doi:10.1021/acsnano.0c04676 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
36. Konda, A., A. Prakash, G. A. Moss, M. Schmoltdt, G. D. Grant, and S. Guha. 2020b. Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano* 14 (5):6339–47. doi:10.1021/acsnano.0c03252 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
37. Lawrence, R. B., M. G. Duling, C. A. Calvert, and C. C. Coffey. 2006. Comparison of performance of three different types of respiratory protection devices. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 3 (9):465–74. doi:10.1080/15459620600829211 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
38. Leung, N. H. L., D. K. W. Chu, E. Y. C. Shiu, K.-H. Chan, J. J. McDevitt, B. J. P. Hau, H.-L. Yen, Y. Li, D. K. M. Ip, J. S. M. Peiris, et al. 2020. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nature Medicine* 26 (5):676–80. doi:10.1038/s41591-020-0843-2 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
39. Lindsley, W. G., F. M. Blachere, D. H. Beezhold, B. F. Law, R. C. Derk, J. M. Hettick, K. Woodfork, W. T. Goldsmith, J. R. Harris, M. G. Duling, et al. 2021a. A comparison of performance metrics for cloth face masks as source control devices for simulated cough and exhalation aerosols. medRxiv. [\[PubMed\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
40. Lindsley, W. G., F. M. Blachere, B. F. Law, D. H. Beezhold, and J. D. Noti. 2021b. Efficacy of face masks, neck gaiters and face shields for reducing the expulsion of simulated cough-generated aerosols. *Aerosol Science and Technology* 55 (4):449–57. doi:10.1080/02786826.2020.1862409 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
41. Long, K. D., E. V. Woodburn, I. C. Berg, V. Chen, and W. S. Scott. 2020. Measurement of filtration efficiencies of healthcare and consumer materials using modified respirator fit tester setup. *PLOS One* 15 (10):e0240499.

- doi:10.1371/journal.pone.0240499 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
42. Lu, J., J. Gu, K. Li, C. Xu, W. Su, Z. Lai, D. Zhou, C. Yu, B. Xu, and Z. Yang. 2020. COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging Infectious Diseases* 26 (7):1628–31. doi:10.3201/eid2607.200764 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 43. Miller, S. L., W. W. Nazaroff, J. L. Jimenez, A. Boerstra, G. Buonanno, S. J. Dancer, J. Kurnitski, L. C. Marr, L. Morawska, and C. Noakes. 2020. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air*. [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 44. Morawska, L. 2006. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air* 16 (5):335–47. doi:10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 45. Morawska, L., J. Allen, W. Bahnfleth, P. M. Bluyssen, A. Boerstra, G. Buonanno, J. Cao, S. J. Dancer, A. Floto, F. Franchimon, et al. 2021. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science (New York, N.Y.)* 372 (6543):689–91. doi:10.1126/science.abg2025 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 46. Morawska, L., and J. Cao. 2020. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International* 139:105730. doi:10.1016/j.envint.2020.105730 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 47. Morawska, L., G. R. Johnson, Z. D. Ristovski, M. Hargreaves, K. Mengersen, S. Corbett, C. Y. H. Chao, Y. Li, and D. Katoshevski. 2009. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of Aerosol Science* 40 (3):256–69. doi:10.1016/j.jaerosci.2008.11.002 [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 48. Morawska, L., and D. K. Milton. 2020. It is time to address airborne transmission of COVID-19. *Clinical Infectious Diseases*. doi:10.1093/cid/ciaa939 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 49. Mueller, A. V., M. J. Eden, J. M. Oakes, C. Bellini, and L. A. Fernandez. 2020. Quantitative method for comparative assessment of particle removal efficiency of fabric masks as alternatives to standard surgical masks for PPE. *Matter* 3 (3):950–62. doi:10.1016/j.matt.2020.07.006 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 50. Nardell, E. A., and R. R. Nathavitharana. 2020. Airborne spread of SARS-CoV-2 and a potential role for air disinfection. *JAMA* 324 (2):141–2. doi:10.1001/jama.2020.7603 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 51. Nazaroff, W. 2004. Indoor particle dynamics. *Indoor Air* 14 (s7):175–83. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00286.x [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)

52. Nazaroff, W. W., M. Nicas, and S. L. Miller. 1998. Framework for evaluating measures to control nosocomial tuberculosis transmission. *Indoor Air* 8 (4):205–18. doi:10.1111/j.1600-0668.1998.00002.x [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
53. Nicas, M., W. W. Nazaroff, and A. Hubbard. 2005. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2 (3):143–54. doi:10.1080/15459620590918466 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
54. NIOSH. 2019. Determination of particulate filter efficiency level for n95 series filters against solid particulates for non-powered, air-purifying respirators standard test procedure (stp). [\[Google Scholar\]](#)
55. Nissen, K., J. Krambrich, D. Akaberi, T. Hoffman, J. Ling, Å. Lundkvist, L. Svensson, and E. Salaneck. 2020. Long-distance airborne dispersal of SARS-CoV-2 in COVID-19 wards. *Scientific Reports* 10 (1):19589. doi:10.1038/s41598-020-76442-2 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
56. Noakes, C. J., and P. A. Sleight. 2009. Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards. *Journal of the Royal Society, Interface* 6 (Suppl 6):S791–S800. [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
57. Pan, J., C. Harb, W. Leng, and L. C. Marr. 2021. Inward and outward effectiveness of cloth masks, a surgical mask, and a face shield. *Aerosol Science and Technology* 55 (6):718–33. doi:10.1080/02786826.2021.1890687 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
58. Pavilonis, B., A. M. Ierardi, L. Levine, F. Mirer, and E. A. Kelvin. 2021. Estimating aerosol transmission risk of SARS-CoV-2 in New York City public schools during reopening. *Environmental Research* 195:110805. doi:10.1016/j.envres.2021.110805 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
59. Rengasamy, S., B. Eimer, and R. E. Shaffer. 2010. Simple respiratory protection—evaluation of the filtration performance of cloth masks and common fabric materials against 20–1000 nm size particles. *The Annals of Occupational Hygiene* 54 (7):789–98. doi:10.1093/annhyg/meq044 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
60. Riley, E., G. Murphy, and R. Riley. 1978. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American Journal of Epidemiology* 107 (5):421–32. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a112560 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
61. Riley, W. J., T. E. McKone, A. C. K. Lai, and W. W. Nazaroff. 2002. Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms. *Environmental Science & Technology* 36 (2):200–7. doi:10.1021/es010723y [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
62. Shen, J., M. Kong, B. Dong, M. J. Birnkrant, and J. Zhang. 2021. A systematic approach to estimating the effectiveness of multi-scale IAQ strategies for reducing the risk of airborne infection of SARS-CoV-2. *Building and Environment* 200:107926. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107926 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
63. Smith, S. H., G. A. Somsen, C. v Rijn, S. Kooij, L. v d Hoek, R. A. Bem, and D. Bonn. 2020. Aerosol persistence in relation to possible transmission of SARS-

- CoV-2. *Physics of Fluids* (Woodbury, N.Y.: 1994) 32 (10):107108. doi:10.1063/5.0027844 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
64. Somsen, G. A., C. van Rijn, S. Kooij, R. A. Bem, and D. Bonn. 2020a. Measurement of small droplet aerosol concentrations in public spaces using handheld particle counters. medRxiv. [\[Google Scholar\]](#)
 65. Somsen, G. A., C. van Rijn, S. Kooij, R. A. Bem, and D. Bonn. 2020b. Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *The Lancet. Respiratory Medicine* 8 (7):658–9. doi:10.1016/S2213-2600(20)30245-9 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 66. Stabile, L., A. Pacitto, A. Mikszewski, L. Morawska, and G. Buonanno. 2021. Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses at schools. medRxiv. [\[Google Scholar\]](#)
 67. Teesing, G. R., B. van Straten, P. de Man, and T. Horeman-Franse. 2020. Is there an adequate alternative to commercially manufactured face masks? a comparison of various materials and forms. *Journal of Hospital Infection* 106 (2):246–53. doi:10.1016/j.jhin.2020.07.024 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 68. Tham, K. W. 2016. Indoor air quality and its effects on humans—A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy and Buildings* 130:637–50. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.071 [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 69. Ueki, H., Y. Furusawa, K. Iwatsuki-Horimoto, M. Imai, H. Kabata, H. Nishimura, and Y. Kawaoka. 2020. Effectiveness of face masks in preventing airborne transmission of SARS-CoV-2. *mSphere* 5 (5):e00637–20. [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 70. van der Sande, M., P. Teunis, and R. Sabel. 2008. Professional and home-made face masks reduce exposure to respiratory infections among the general population. *PLOS One* 3 (7):e2618. doi:10.1371/journal.pone.0002618 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 71. Van Der Steen, J. M., M. G. Loomans, N. Schellens, and J. L. Hensen. 2017. Full-scale performance assessment of an innovative climate system for a classroom environment. In *Healthy Buildings Europe 2017, HB 2017*. International Society of Indoor Air Quality and Climate-ISIAQ, 1–6. [\[Google Scholar\]](#)
 72. van Doremalen, N., T. Bushmaker, D. H. Morris, M. G. Holbrook, A. Gamble, B. N. Williamson, A. Tamin, J. L. Harcourt, N. J. Thornburg, S. I. Gerber, et al. 2020. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine* 382 (16):1564–7. doi:10.1056/NEJMc2004973 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 73. Wallace, L. 1996. Indoor particles: A review. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 46 (2):98–126. doi:10.1080/10473289.1996.10467451 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
 74. Wang, Y., H. Tian, L. Zhang, M. Zhang, D. Guo, W. Wu, X. Zhang, G. L. Kan, L. Jia, D. Huo, et al. 2020. Reduction of secondary transmission of SARS-CoV-2 in households by face mask use, disinfection and social distancing: A cohort study in Beijing, China. *BMJ Global Health* 5 (5):e002794. doi:10.1136/bmjgh-2020-002794 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)

75. Wells, W. 1955. *Airborne Contagion and Air Hygiene*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press. [\[Google Scholar\]](#)
76. Wells, W. F. 1955. Airborne contagion and air hygiene. An ecological study of droplet infections. *Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections*. [\[Google Scholar\]](#)
77. Whiley, H., T. P. Keerthirathne, M. A. Nisar, M. A. White, and K. E. Ross. 2020. Viral filtration efficiency of fabric masks compared with surgical and N95 masks. *Pathogens* 9 (9):762. doi:10.3390/pathogens9090762 [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
78. WHO. 2020a. Coronavirus disease (covid-19) advice for the public: When and how to use masks. [\[Google Scholar\]](#)
79. WHO. 2020b. Key planning recommendations for mass gatherings in the context of the current COVID-19 outbreak. [\[Google Scholar\]](#)
80. WHO. 2020c. Recommendations to member states to improve hand hygiene practices to help prevent the transmission of the COVID-19 virus. [\[Google Scholar\]](#)
81. Zhang, J. 2020. Integrating IAQ control strategies to reduce the risk of asymptomatic SARS Cov-2 infections in classrooms and open plan offices. *Science and Technology for the Built Environment* 26 (8):1013–8. doi:10.1080/23744731.2020.1794499 [\[Taylor & Francis Online\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
82. Zhao, M., L. Liao, W. Xiao, X. Yu, H. Wang, Q. Wang, Y. L. Lin, F. S. Kilinc-Balci, A. Price, L. Chu, et al. 2020. Household materials selection for homemade cloth face coverings and their filtration efficiency enhancement with triboelectric charging. *Nano Letters* 20 (7):5544–52. doi:10.1021/acs.nanolett.0c02211 [\[Crossref\]](#), [\[PubMed\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)
83. Zhu, S., S. Kato, and J.-H. Yang. 2006. Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Building and Environment* 41 (12):1691–702. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.024 [\[Crossref\]](#), [\[Web of Science ®\]](#), [\[Google Scholar\]](#)