

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

Airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments: A comprehensive review

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23744731.2021.1977693?scroll=top&needAccess=true&>

การแพร่ผ่านอากาศของ SARS-CoV-2 ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร: การพิจารณาอย่างครอบคลุม

JIALEI SHEN¹, MENG KONG^{1,2}, BING DONG¹, MICHAEL J. BIRNKRANT³ และ JIANSHUN ZHANG^{1,4*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล การบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยซีราคัส 263 Link Hall ซีราคัส นิวยอร์ก 13244 ประเทศสหรัฐอเมริกา

²Well Living Lab, Delos Living LLC, 221 First Ave SW Ste 100, Rochester มินเนโซตา 55902 ประเทศสหรัฐอเมริกา

³Carrier Corporation, 6304 Thompson Road, East, ซีราคัส นิวยอร์ก 13057 ประเทศสหรัฐอเมริกา

⁴วิทยาลัยสถาปัตยกรรมและการวางผังเมือง มหาวิทยาลัยหนานจิง 22 Hankou Road หนานจิง มณฑลเจียงซู 210093 ประเทศจีน

การระบาดใหญ่ของโรคโควิด 19 ทำให้มีผู้เสียชีวิตหลายล้านคน และส่งผลเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างร้ายแรงทั่วโลก มีหลักฐานมากมายที่สนับสนุนว่า SARS-CoV-2 มีการแพร่ผ่านอากาศ การแพร่ผ่านอากาศถือเป็นรูปแบบการแพร่หลักซึ่งสามารถแพร่เชื้อโรคเป็นระยะทางไกลและเป็นเวลานาน โดยปกติผู้ที่ไม่มีไวรัสจะมีปริมาณไวรัสในทางเดินหายใจน้อยกว่า 10^9 สำเนา RNA/มล. ซึ่งค่าดังกล่าวเกี่ยวข้องกับอัตราการปล่อยจุลชีพก่อโรค อนุภาคส่วนใหญ่ที่ขับออกในระหว่างกิจกรรมที่มีการหายใจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า $1-2 \mu\text{m}$ ละอองลอยที่มีไวรัสอาจยังคงแพร่เชื้อได้เป็นเวลาหลายชั่วโมงเมื่ออยู่ในสภาวะภายในอาคารทั่วไป แสงอาทิตย์ส่งผลอย่างมากต่อการหมดสภาวะอยู่รอดของเชื้อ SARS-CoV-2 ได้มีการพิจารณาการแพร่ระบาดในหลายสถานการณ์โดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่เดิม การแพร่ระบาดส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับสถานบริการดูแลระยะยาว โรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย ร้านอาหาร ร้านจำหน่ายปลีก และสำนักงาน ได้มีการเริ่มใช้โมเดล Wells-Riley เพื่อประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศร่วมกับพารามิเตอร์ของโมเดล เช่น อัตราการก่อเกิดควอนตัม การแจกแจงขนาดของอนุภาคที่มีไวรัส และอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ ได้มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกลยุทธ์ต่างๆ ในการควบคุม IAQ เพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศ เช่น กลยุทธ์การใช้ PPE การระบายอากาศ การใช้ฉากกั้นพื้นที่ เทคโนโลยีการฟอกอากาศและกำจัดเชื้อ รวมถึงการควบคุมการเข้าใช้สถานที่ ได้มีการพิจารณาทั้งประโยชน์และค่าใช้จ่ายในการออกแบบกลยุทธ์ควบคุมต่างๆ

ความเป็นมา

การระบาดใหญ่ของโรคจากโคโรนาไวรัสชนิดใหม่ 2019 (โควิด 19) ซึ่งเกิดจากโคโรนาไวรัสก่อโรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง 2 (SARS-CoV-2) ได้คงอยู่เป็นเวลากว่าหนึ่งปีครึ่งแล้ว การระบาดดังกล่าวทำให้มีผู้เสียชีวิตหลายล้านคนและส่งผลเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างร้ายแรงทั่วโลก ในปัจจุบันได้มีความพยายามให้วัคซีน เพื่อป้องกันโควิด 19 เป็นวงกว้างทั่วโลก แต่โลกยังคงประสบสถานการณ์ที่ร้ายแรงของการระบาดใหญ่ เนื่องจากตลอดไม่กี่สัปดาห์ที่ผ่านมา มีเคสโควิด 19 รายใหม่ถึงวันละกว่า 600,000 ราย ขณะนี้หลายประเทศกำลังพบการติดเชื้อระลอกใหม่ที่มีความรุนแรง (WHO 2021a) สายพันธุ์อุบัติใหม่ของ SARS-CoV-2 บางสายพันธุ์ เช่น สายพันธุ์เดลต้า มีความสามารถในการแพร่สูงขึ้น ซึ่งทำให้โลกต้องประสบความท้าทายใหม่เพิ่มเติม (CDC สหรัฐอเมริกา 2021n) ในขณะนี้ยังคงจำเป็นที่จะต้องลดการแพร่ของไวรัสเพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อโควิด 19

การศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการติดเชื้อโควิด 19 ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ขณะที่การแพร่ระบาดภายนอกอาคารมีสัดส่วนน้อยกว่า 10% ของเคสการติดเชื้อ (Bulfone และคณะ 2021) นอกจากการติดเชื้อผ่านวัตถุปนเปื้อนเชื้อทั้งจากการสัมผัสบุคคลที่ติดเชื้อหรือพื้นผิวที่ปนเปื้อน และการได้รับเชื้อผ่านละอองของเหลว ($5-100 \mu\text{m}$) หรือละอองขนาดใหญ่ ($>100 \mu\text{m}$) (Wei และ Li 2016) แล้ว ยังมีการศึกษาจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ ที่ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการแพร่ของ SARS-CoV-2 ผ่านละอองลอยในอากาศ ($<5 \mu\text{m}$) (D. Lewis 2020a; Y. Li และคณะ 2020; Luo และคณะ 2020; Miller และคณะ 2020; Morawska และ Milton 2020; Park และคณะ 2020; Setti และคณะ 2020a; Y. Shen และคณะ 2020; The Lancet Respiratory Medicine 2020a; N. Wilson, Corbett และ Tovey

2020a) ละอองลอยที่มีไวรัสอาจถูกขับออกมาเมื่อผู้แพร่เชื้อหายใจ พูด และไอ และจะคงอยู่ในอากาศเป็นเวลานาน และเป็นระยะทางไกล ซึ่งในบางกรณีอาจเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าระยะที่มีการแนะนำมากที่สุดในการเว้นระยะห่างทางสังคม (กล่าวคือ 2 เมตร) (Y. Li และคณะ 2020; Luo และคณะ 2020; Miller และคณะ 2020; Y. Shen และคณะ 2020) ดังนั้น การแพร่ผ่านอากาศจึงมีบทบาทสำคัญในการระบาดของ SARS-CoV-2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภายในอาคาร ที่มีคนหนาแน่นและมีการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอ ซึ่งไม่สามารถขจัดหรือเจือจางอนุภาคที่มีไวรัสซึ่งก่อให้เกิดจากผู้แพร่เชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ (CDC สหรัฐอเมริกา 2020d; WHO 2020f, 2020b) ในบางการศึกษายังระบุว่า การแพร่ผ่านอากาศเป็นรูปแบบการแพร่หลักของโควิด 19 อีกด้วย (Nature 2021; R.Zhang และคณะ 2020) และยังเชื่อกันว่าการแพร่ผ่านอากาศจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้งในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร (Swinkels 2020) หน่วยงานสาธารณสุขหรือสิ่งแวดล้อม เช่น WHO, CDC สหรัฐอเมริกา, NHC จีน, CDC ยุโรป, PHAC แคนาดา, EPA สหรัฐอเมริกา และ ASHRAE ได้แสดงความกังวลเกี่ยวกับรูปแบบการแพร่ผ่านอากาศของ SARS-CoV-2 (ASHRAE 2020b; NHC จีน 2020; CDC ยุโรป 2020; PHAC 2020; CDC สหรัฐอเมริกา 2020d; WHO 2020b)

ได้มีการรายงานถึงการแพร่ระบาดของโควิดภายในอาคารหลายกรณี เช่น ในสถานบริการดูแลระยะยาว ศูนย์การผลิต เรือจำ โรงเรียนและวิทยาลัย สถานดูแลสุขภาพและโรงพยาบาล ร้านค้าปลีก ร้านอาหาร และสำนักงาน (CDPHE 2020) เป็นที่สงสัยว่าการแพร่ผ่านอากาศอาจเป็นรูปแบบการแพร่ของ SARS-CoV-2 ในสถานการณ์ภายในอาคาร เหล่านี้ และยังคงเป็นรูปแบบที่มีการแพร่มากที่สุดอีกด้วย เมื่อพิจารณาสถานที่ภายในอาคารต่างๆ ทั้งความหนาแน่น และพฤติกรรมของผู้ที่อยู่ในพื้นที่ รูปแบบและการระบายอากาศของอาคาร ระหว่างสถานการณ์ต่างๆ จะพบความท้าทายของการแพร่ผ่านอากาศและมาตรการจัดการที่เหมาะสมในสถานการณ์ต่างๆ อาจแตกต่างกันอย่างมาก ได้มีการใช้กลยุทธ์การควบคุมมากมายเพื่อลดความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศให้น้อยที่สุด เช่น การใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (PPE) การปรับปรุงการระบายอากาศและการกระจายอากาศ เทคโนโลยีการฟอกอากาศและกำจัดเชื้อแบบสแตนด์อโลน รวมถึงการควบคุมและจำกัดการเข้าใช้สถานที่ (Bazant และ Bush 2021; A. K. Melikov, Ai และ Markov 2020; Morawska และคณะ 2020; J. Shen และคณะ 2021; J. Zhang 2020) ทั้งประโยชน์และค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์การควบคุมเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบกลยุทธ์การควบคุมในแต่ละสถานการณ์

ศึกษานี้ได้พิจารณางานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการแพร่ผ่านอากาศของ SARS-CoV-2 ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ในแง่คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality - IAQ) และการควบคุมคุณภาพ ได้มีการพิจารณาหลักฐานที่มีอยู่เดิมซึ่งสนับสนุนว่า SARS-CoV-2 มีการแพร่ผ่านอากาศ จากนั้นเสนอกลไกของการแพร่ผ่านอากาศ ซึ่งได้แก่ ปริมาณไวรัสภายในทางเดินหายใจ ความเข้มข้นและการแจกแจงขนาดของอนุภาคที่มีไวรัสที่ขับออกมา การหมดฤทธิ์ตามธรรมชาติของไวรัสภายใต้ปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ และความสามารถในการแพร่ของ SARS-CoV-2 บางสายพันธุ์ และยังมีมีการพิจารณาการแพร่ระบาดในสถานการณ์ต่างๆ ตามข้อมูลที่มีอยู่ และวิเคราะห์บทบาทของการแพร่ผ่านอากาศในการแพร่ระบาดเหล่านี้ มีการเสนอโมเดลที่ใช้ร่วมกันเพื่อประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศพร้อมด้วยการประมาณค่าพารามิเตอร์ของโมเดล และในส่วนท้ายมีการอภิปรายถึงกลยุทธ์การควบคุม IAQ เพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับ SARS-CoV-2

หลักฐานและกลไกของการแพร่ผ่านอากาศของ SARS-CoV-2

หลักฐานของการแพร่ผ่านอากาศ

มีข้อถกเถียงกันเกี่ยวกับวิธีการแพร่ของโควิด 19 ในช่วงเริ่มแรกของการระบาดใหญ่ เราเชื่อว่ารูปแบบการติดต่อหลักคือการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับผู้แพร่เชื้อ พื้นผิวที่ปนเปื้อน และละอองที่ขับออกมา เนื่องจากยังไม่มีหลักฐานอย่างเพียงพอข้อแนะนำของหน่วยงานสาธารณสุขหลักๆ (WHO 2020c, 2020e) จึงยังไม่ได้ระบุว่าโควิด 19 มีการแพร่ผ่านอากาศ แม้จะมีผู้ที่แสดงความกังวลถึงความเป็นไปได้ในการแพร่ผ่านละอองลอยก็ตาม (Favre 2020; Offord 2020) จากประสบการณ์จากโรคระบบทางเดินหายใจอื่นๆ (Xiao และคณะ 2018; Yu และคณะ 2004) เมื่อมีการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการระบาดใหญ่ดังกล่าว ก็พบข้อมูลทางวิทยาศาสตร์มากขึ้นเรื่อยๆ ว่าการแพร่ผ่านอากาศมีบทบาทสำคัญในการติดต่อ SARS-CoV-2 การศึกษาจำนวนมากได้ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์อากาศในสภาพแวดล้อมต่างๆ ซึ่งมีผู้แพร่เชื้ออยู่ เช่น โรงพยาบาล สถานดูแลสุขภาพ โรงแรมที่มีการกักตัวผู้ติดเชื้อ รวมถึงพื้นที่สาธารณะอื่นๆ และระบบขนส่ง เพื่อระบุว่าละอองลอยสามารถนำพาไวรัสและไวรัสสามารถเคลื่อนที่ไปตามการไหลของอากาศได้หรือไม่ การศึกษาเหล่านี้ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน งานวิจัยบางส่วนไม่พบ RNA ของไวรัสในตัวอย่างอากาศ (Cheng และคณะ 2020b; D'Éohla และคณะ 2020; Dunker และคณะ 2021; Faridi และคณะ 2020; U. J. Kim และคณะ 2020; Lane

และคณะ 2020; Y. h. Li และคณะ 2020; Masoumbeigi และคณะ 2020; Nakamura และคณะ 2020) ขณะที่การศึกษาส่วนใหญ่ตรวจพบผลบวกสำหรับ SARS-CoV-2 ในอากาศ (Binder และคณะ 2020; Chia และคณะ 2020b; Ding และคณะ 2021; B. Feng และคณะ 2021; Z. D. Guo และคณะ 2020; Hadei และคณะ 2021; Jiang และคณะ 2020; Jin และคณะ 2021; Kenarkoohi และคณะ 2020; Lednicky และคณะ 2020; Y. Liu และคณะ 2020; Ma และคณะ 2020; Moore และคณะ 2021; Moreno และคณะ 2021; Mouchtouri และคณะ 2020; Razzini และคณะ 2020; Santarpia และคณะ 2020; Setti และคณะ 2020b; Stern และคณะ 2021; Tan และคณะ 2020; Zhou และคณะ 2021) ตรวจพบ RNA ของไวรัสจำนวนมากในอากาศของโรงพยาบาล เช่น ในห้องผู้ป่วย หน่วยรักษาพยาบาลผู้ป่วยขั้นวิกฤต (ICU) ห้องน้ำ และโถงทางเดิน อาจเนื่องจากมีผู้แพร่เชื้อจำนวนมากในโรงพยาบาลและมีกระบวนการรักษาที่ก่อให้เกิดละอองลอย (เช่น การใส่ท่อช่วยหายใจ) ซึ่งอาจทำให้เกิดละอองลอยที่มีไวรัสเป็นปริมาณค่อนข้างมาก มีการพบไวรัสแม้ในระบบระบายอากาศในโรงพยาบาล ซึ่งบ่งบอกว่าไวรัสอาจสามารถแพร่ผ่านท่อระบายอากาศได้ (Horve และคณะ 2020; Nissen และคณะ 2020; Ong และคณะ 2020) การศึกษาส่วนใหญ่เสนอว่าอากาศภายนอกอาคารมีความปลอดภัยและไม่สามารถแพร่เชื้อให้กับคนทั่วไป ยกเว้นในสถานที่ที่มีคนจำนวนมาก (Chirizzi และคณะ 2021; Hu และคณะ 2020) แม้จะพบ RNA ของไวรัสในตัวอย่างอากาศภายนอกอาคารบางส่วนซึ่งเก็บได้ในประเทศอิตาลี (Setti และคณะ 2020b) แต่ไม่มีการประเมินความเข้มข้นของอนุภาคที่มีไวรัสในการศึกษาของพวกเขา ดังนั้น โควิด 19 จึงไม่น่าจะมีการแพร่ผ่านอากาศในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร ยกเว้นบริเวณที่มีคนจำนวนมาก

อย่างไรก็ตาม แม้จะพบ RNA ของไวรัสในตัวอย่างอากาศ แต่ผู้เชี่ยวชาญยังคงสงสัยเกี่ยวกับความอยู่รอดในอากาศของ SARS-CoV-2 ในละอองลอยที่นำไวรัส (WHO 2020c) เนื่องจากการศึกษาส่วนใหญ่ดังกล่าวต้องการระบุว่าการพบไวรัสหรือไม่ แต่ไม่มีการประเมินความสามารถในการแพร่เชื้อของไวรัสในตัวอย่าง ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญในการประเมินการแพร่ผ่านอากาศ (S. Tang และคณะ 2020) การศึกษาบางส่วนตรวจพบ RNA ของไวรัสในละอองลอย แต่ไม่มีตัวอย่างผลบวกที่เป็นหลักฐานของไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ (Binder และคณะ 2020; Maestre และคณะ 2021; Moore และคณะ 2021; Moreno และคณะ 2021) อย่างไรก็ตาม Santarpia และคณะ (2020) ตรวจพบไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ในตัวอย่างละอองลอยบางส่วน เมื่อใช้วิธีการเพาะเซลล์ในโรงพยาบาลในเนแบรสกา Lednicky และคณะ (2020, 2021) ตรวจพบ SARS-CoV-2 ที่มีสภาพสมบูรณ์ซึ่งคัดแยกจากตัวอย่างอากาศที่เก็บได้ในโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในฟลอริดาและในรถยนต์คันหนึ่งที่ผู้ป่วยคนหนึ่งขับ ดังนั้น มีความเป็นไปได้ที่ละอองลอยที่ขับออกมาจะเป็นแหล่งการแพร่ของไวรัส

การทดลองในห้องทดลองเป็นข้อมูลที่สนับสนุนความสามารถในการแพร่เชื้อของไวรัสในละอองลอยได้เป็นอย่างดี โดยปกติแล้วละอองลอยที่มีไวรัสที่ก่อเกิดขึ้นในสภาวะของการทดลองจะยังคงแพร่เชื้อได้เป็นเวลาหลายชั่วโมง van Doremalen และคณะ (2020) สังเกตว่าค่าครึ่งชีวิตของไวรัสที่แพร่เชื้อได้ในละอองลอยคือประมาณ 1.1 ชั่วโมง ขณะที่ค่าครึ่งชีวิตของไวรัสที่ Smither และคณะ (2020) วัดได้อยู่ระหว่างครึ่งชั่วโมงถึงเกือบ 3 ชั่วโมงในสภาวะที่มีความชื้นต่างกันไป Fears และคณะ (2020) สังเกตว่าความสามารถในการแพร่เชื้อและความสมบูรณ์ของอนุภาคไวรัสครบส่วนสามารถคงอยู่ได้ในละอองลอยเป็นเวลาถึง 16 ชั่วโมง Dabisch และคณะ (2020) ได้วัดเวลาที่ทำให้ไวรัสที่แพร่เชื้อได้ลดลง 90% และพบว่าต้องใช้เวลามากกว่า 2 ชั่วโมง เวลาที่ไวรัสสูญเสียความสามารถในการแพร่เชื้อ 90% ซึ่งวัดโดย Schuit และคณะ (2020) คือมากกว่า 4 ชั่วโมง และยังพบว่าไวรัสสูญเสียความสามารถในการแพร่เชื้ออย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแสงอาทิตย์จำลองอีกด้วย เวลาที่สูญเสียความสามารถในการแพร่เชื้อ 90% จะลดลงอย่างมาก เหลือเพียง 4.8 ถึง 19 นาที (Dabisch และคณะ 2020; Schuit และคณะ 2020) อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ของการทดลองในห้องทดลองเป็นที่สงสัยของผู้เชี่ยวชาญบางคน เนื่องจากละอองลอยที่ก่อเกิดในสภาวะของห้องทดลองน่าจะมีลักษณะที่แข็งแกร่งกว่าสภาวะจากการไอของมนุษย์ตามปกติ เนื่องจากการใช้เครื่องจักรกำลังสูงในการก่อเกิดอนุภาค (WHO 2020c) WHO (2020c) เชื่อว่ากระบวนการก่อเกิดละอองลอยในการทดลองเหล่านี้ไม่สอดคล้องกับสถานการณ์จริง จึงยังคงไม่เพียงพอที่จะระบุได้ถึงถึงการแพร่ผ่านอากาศ

การศึกษาอื่นๆ ได้ทำการวิเคราะห์แบบศึกษาย้อนกลับในเหตุการณ์การแพร่ระบาดจริง และระบุว่าน่าจะมีการแพร่ผ่านอากาศเกิดขึ้นในการแพร่ระบาดเหล่านี้ เนื่องจากการแพร่รูปแบบอื่นๆ ไม่สามารถอธิบายถึงการแพร่ของไวรัสในการแพร่ระบาดเหล่านี้ได้ ตัวอย่างเช่น การแพร่ผ่านอากาศน่าจะเป็นรูปแบบหลักที่สามารถอธิบายการระบาดของไวรัสที่มีลักษณะโดดเด่นในพื้นที่โดยรอบป่าฝนแอมะซอนได้ (Crema 2021) การแพร่ระบาดภายในอาคารอพาร์ทเมนต์ในกรุงโซล (Hwang และคณะ 2021) เมืองกวางโจว (Kang และคณะ 2020; S. Tang และคณะ 2020) และเมืองออร์ดอส (Wang และ Du 2020) ซึ่งเชื่อว่ามี ความเกี่ยวข้องอย่างมากกับการแพร่ผ่านอากาศ เนื่องจากการรายงานการสัมผัสรูปแบบอื่นๆ ระหว่างผู้ป่วยบางราย การแพร่ของไวรัสระหว่างบุคคลในระหว่างการร้องเพลงในโบสถ์ที่แมนดเวอรันนอน (Buonanno, Morawska และ Stabile 2020; Miller และคณะ 2020) และที่ซิดนีย์ (Katelaris และคณะ 2021) ใน

ระหว่างการเดินทางภายในรถโค้ชคันหนึ่งในมณฑลหูหนาน (Luo และคณะ 2020) และ Zhejiang (Y. Shen และคณะ 2020) ในระหว่างเที่ยวบินระยะไกลไปยังประเทศเวียดนาม (Khanh และคณะ 2020) และในระหว่างการทำงานภายในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์แห่งหนึ่งในประเทศเยอรมนี (G€unther และคณะ 2020) ซึ่งมีการเสนอแนะมากมายว่าน่าจะเกี่ยวข้องกับการแพร่ผ่านอากาศ เนื่องจากการติดเชื้อเกิดขึ้นในระยะห่างมากกว่า 2 เมตรหรือมากกว่านั้น การแพร่ระบาดในร้านอาหารแห่งหนึ่งในเมืองกว้างโจว (Buonanno, Morawska และ Stabile 2020; Y. Li และคณะ 2020) และบาร์แห่งหนึ่งในนครโฮจิมินห์ (Chau และคณะ 2021) น่าจะมีสาเหตุเนื่องจากการระบายอากาศภายในห้องที่ไม่ดี การแพร่ผ่านอากาศยังน่าจะเป็นรูปแบบการแพร่ของไวรัสสำหรับการแพร่ระบาดในเรือสำราญ Diamond Princess อีกด้วย (Azimi และคณะ 2021) รวมถึงในศูนย์การค้าแห่งหนึ่งในนครเวินโจว (J. Cai และคณะ 2020) R.Zhang และคณะ (2020) ได้ทำการวิเคราะห์เหตุการณ์การแพร่ระบาดจำนวนหนึ่งในประเทศจีน อิตาลี และนครนิวยอร์ก และเสนอว่าการแพร่ผ่านอากาศเป็นรูปแบบการแพร่ที่มีความสามารถในการก่อโรคสูง และถือเป็นรูปแบบการแพร่หลักของโรคหลักฐานได้ชี้ให้เห็นว่าการแพร่ผ่านอากาศอาจเป็นเหตุผลอย่างหนึ่งที่ทำให้เหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดหลายครั้งมีอัตราโจมตีสูง (Buonanno, Morawska และ Stabile 2020; D. Lewis 2021a) การแพร่ผ่านอากาศยังพบได้ระหว่างสัตว์บางชนิด เช่น เฟร็ดและแมว จากการทดลองในสัตว์ (Y. I. Kim และคณะ 2020; Kutter และคณะ 2021; Richard และคณะ 2020; Shi และคณะ 2020)

จากหลักฐานการวิจัย การแพร่ของไวรัสผ่านอากาศเป็นรูปแบบการแพร่ที่นักวิทยาศาสตร์และผู้เชี่ยวชาญให้การยอมรับอย่างกว้างขวาง (Aghalari และคณะ 2021; E. L. Anderson และคณะ 2020; Greenhalgh และคณะ 2021; Morawska และ Cao 2020) เมื่อเดือนกรกฎาคมปี 2020 นักวิทยาศาสตร์ 239 คนจากกว่า 30 ประเทศได้เน้นย้ำถึงความเป็นไปได้ที่ละอองลอยจะมีบทบาทในการแพร่ของ SARS-CoV-2 (Morawska และ Milton 2020) Greenhalgh และคณะ (2021) ซึ่งเมื่อไม่นานมานี้ได้เสนอเหตุผลทางวิทยาศาสตร์สืบข้อเพื่อสนับสนุนว่า SARS-CoV-2 มีการแพร่ผ่านอากาศได้ วารสารวิทยาศาสตร์หลายฉบับ เช่น Nature, The Lancet Respiratory Medicine, The BMJ และ Indoor Air ได้เผยแพร่บรรณาธิการของทางวารสารเพื่อเสนอแนะความเป็นไปได้ที่โควิด 19 จะมีการแพร่ผ่านอากาศ (A.

K. Melikov 2020; Nature 2021; Rijn และคณะ 2020; J. W. Tang และคณะ 2021; The Lancet Respiratory Medicine 2020b; N. Wilson, Corbett และ Tovey 2020b; J. Zhang 2020) หน่วยงานสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่ รวมถึง WHO, CDC สหรัฐอเมริกา, NHC จีน, CDC ยุโรป, PHAC แคนาดา และ ASHRAE ได้ประกาศความเป็นไปได้ของการแพร่ผ่านอากาศไว้ในคำแนะนำของตนเช่นกัน การศึกษาเกี่ยวกับการแพร่ผ่านอากาศที่กล่าวถึงข้างต้นได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 1 ลำดับช่วงเวลาโดยคร่าวของการศึกษาเกี่ยวกับการแพร่ผ่านอากาศและการตอบสนองจากหน่วยงานรัฐได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 1 จากหลักฐานที่มีอยู่ เป็นที่แน่ชัดและเป็นที่ยอมรับว่าอย่างกว้างขวางว่าการแพร่ผ่านอากาศมีส่วนสำคัญในการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็วและเป็นระยะทางไกลของ SARS-CoV-2

ตารางที่ 1 การศึกษาที่สำคัญเกี่ยวกับการแพร่ผ่านอากาศของ SARS-CoV-2

อ้างอิง ^a	สถานที่	สิ่งที่ค้นพบ
การตรวจวัดไวรัสในอากาศหรือละอองลอย ณ สถานที่		
<u>Binder และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบตัวอย่างละอองลอยที่มีผลบวกน้อยมาก (3/195) ^b ; ไม่มีตัวอย่างผลบวกจากละอองลอยที่เป็นหลักฐานของไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์;
<u>Cheng และคณะ (2020B)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/8)
<u>Cheng และคณะ (2020a)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (ผู้ป่วย 0/6 คน)
<u>Chia และคณะ (2020a)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (2/3 ห้อง) ^c (1.85×10^3 สำเนา RNA/ม. ³) ^d
<u>de Man และคณะ (2020)</u>	ศูนย์ดูแลผู้สูงอายุที่มีผู้แพร่เชื้อ	ตรวจพบ RNA ของไวรัสในระบบปรับอากาศของศูนย์ดูแลผู้สูงอายุแห่งหนึ่ง
<u>Ding และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (1/46)
<u>D€ohla และคณะ (2020)</u>	ครัวเรือน (แฟลตหรือบ้าน) ที่ใช้ในการกักตัว ซึ่งมีผู้แพร่เชื้ออย่างน้อยหนึ่งคน	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/15)
<u>Dunker และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ
<u>Faridi และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/10)
<u>B. Feng และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (1/12) (1112 สำเนา/ม. ³ ในละอองลอยขนาด $<1 \mu\text{m}$, 745 สำเนา/ม. ³ ในละอองลอยขนาด $>4 \mu\text{m}$)
<u>Z. D. Guo และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (14/40)
<u>Hadei และคณะ (2021)</u>	พื้นที่สาธารณะและระบบขนส่ง	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (18/28)
<u>Horve และคณะ (2020)</u>	ระบบปรับอากาศของโรงพยาบาล	ตรวจพบ RNA ของไวรัสที่วัดปริมาณได้ในระบบจ่ายอากาศ (5/15)
<u>Jiang และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (1/28)
<u>Jin และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (1/1)
<u>Kenarkoohi และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (2/14)
<u>J. Y. Kim และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/52)
<u>Lane และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศในห้องผู้ป่วยที่ใส่เครื่องช่วยหายใจ (0/30)
<u>Lednický และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ (แพร่เชื้อได้) ในละอองลอย (4/6) (6–74 ไวรัส/ลิตร)
<u>Lednický และคณะ (2021)</u>	รถยนต์	ตรวจพบไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ (แพร่เชื้อได้) ในอนุภาคในอากาศที่มีขนาดตั้งแต่ 0.25 ถึง $0.5 \mu\text{m}$ ในรถยนต์คันหนึ่งที่ผู้ป่วยโควิด 19 ขับ

<u>Y. Li และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างละอองลอย (0/135)
<u>Liu และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (21/35) (1–42 สำเนา RNA/ม. ³); การแขวนลอยอีกครั้งของอนุภาคที่ตกตะกอนแล้ว อาจเป็นรูปแบบหนึ่งของการแพร่;
<u>Ma และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาลหรือโรงแรมที่มีการกักตัว	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศในห้องสุขาที่ไม่มีการถ่ายเทอากาศห้องหนึ่งในโรงแรม (1/26)
<u>Maestre และคณะ (2021)</u>	ครัวเรือนที่มีการกักตัวและมีสมาชิกที่ติดเชื้อ	ตรวจพบ RNA ของไวรัสในตัวกรองของระบบปรับอากาศ (ประมาณ 69 ± 43 สำเนา RNA/ม. ³); RNA ของไวรัสที่ตรวจพบไม่ได้บ่งบอกถึงความสามารถในการแพร่เชื้อ;
<u>Masoumbeigi และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/31)
<u>Moore และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (4/55) (<10 –460 สำเนา RNA/ม. ³); ไม่สามารถเก็บกู้ไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ (แพร่เชื้อได้) จากตัวอย่างอากาศที่ได้ผลบวกทั้งหมด;
<u>Moreno และคณะ (2021)</u>	ระบบขนส่งสาธารณะ	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (3/12); แนวโน้มความสามารถในการแพร่เชื้อของตัวอย่างที่ได้ผลบวกถือว่าต่ำมาก;
<u>Mouchtouri และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล ศูนย์ดูแลผู้สูงอายุ เรือข้ามฟาก สถานบริการดูแลระยะยาว	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (1/12); ตรวจพบ RNA ของไวรัสบนพื้นผิวปล่องระบายอากาศและตัวกรองของระบบปรับอากาศ;
<u>Nakamura และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/11)
<u>Nissen และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบไวรัสในระบบระบายอากาศ
<u>Ong และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลลบจากตัวอย่างอากาศ (0/3 ห้อง); ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างบนพื้นผิวปล่องระบายอากาศ;
<u>Razzini และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (100% ในพื้นที่ปนเปื้อน)
<u>Santarpia และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (11/18 ห้อง/ผู้ป่วย) (2.42–8.34 สำเนา RNA/ลิตรสำหรับตัวอย่างอากาศในห้องผู้ป่วย, 2.08–8.69 สำเนา RNA/ลิตรสำหรับตัวอย่างอากาศจากโถงทางเดิน, 5.37–48.22 สำเนา RNA/ลิตรสำหรับตัวอย่างอากาศจากบุคคล); ตรวจพบไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ (แพร่เชื้อได้) ในตัวอย่างบางส่วน;
<u>Setti และคณะ (2020a)</u>	สภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (20/34)
<u>Stern และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (9%)
<u>Tan และคณะ (2020)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศในระหว่างการใส่ท่อช่วยหายใจ (1/12)

<u>Zhou และคณะ (2021)</u>	ห้องในโรงพยาบาล	ตรวจพบผลบวกจากตัวอย่างอากาศ (3/44) (9–219 ไวรัส/ม. ³); พบไวรัสในอากาศที่หายใจออกมา (2/9) ($\sim 10^5$ สำเนา RNA/ม. ³)
การทดลองในห้องทดลอง		
<u>Dabisch และคณะ (2020)</u>	สภาวะการทดลอง	เวลาที่ทำให้ไวรัสที่แพร่เชื้อได้ลดลง 90% มีตั้งแต่ 4.8 นาทีภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มสูง ไปจนถึงมากกว่า 2 ชั่วโมงเมื่อไม่ได้รับแสงอาทิตย์
<u>Fears และคณะ (2020)</u>	สภาวะการทดลอง	ความสามารถในการแพร่และความสมบูรณ์ของอนุภาคไวรัสครบส่วนคงอยู่ในละอองลอยได้ 16 ชั่วโมง
<u>Schuit และคณะ (2020)</u>	สภาวะการทดลอง	อัตราการเสื่อมสภาพเฉลี่ยของละอองลอยเมื่อได้รับแสงอาทิตย์จำลองคือ $0.121\text{--}0.306$ นาที ⁻¹ (สูญเสีย 90%, 8–19 นาที) และอัตราการเสื่อมสภาพเฉลี่ยของละอองลอยเมื่อไม่ได้รับแสงอาทิตย์จำลองคือ 0.008 นาที ⁻¹ (สูญเสีย 90%, 286 นาที)
<u>Smither และคณะ (2020)</u>	สภาวะการทดลอง	ค่าครึ่งชีวิตของไวรัสแพร่เชื้อได้ในสภาวะต่างๆ มีตั้งแต่ 30 ถึง 177 นาที
<u>van Doremalen และคณะ (2020)</u>	สภาวะการทดลอง	ค่าครึ่งชีวิตของไวรัสที่แพร่เชื้อได้ในละอองลอยคือประมาณ 1.1 ชั่วโมง
การวิเคราะห์แบบศึกษาย้อนกลับในเหตุการณ์การแพร่ระบาดจริง		
<u>Almilaji และ Thomas (2020)</u>	เรือสำราญ	การแพร่ผ่านอากาศของโควิด 19 ผ่านระบบระบายอากาศบนเรือสำราญ Diamond Princess สามารถอธิบายสาเหตุที่ไวรัสสามารถแพร่ไปยังห้องต่างๆ ของเรือได้มากกว่าที่คาดหมายโดยที่ก่อนหน้านี้ยังไม่มีเคสที่ยืนยันแล้วในระหว่างระยะเวลาที่กักตัว
<u>Azimi และคณะ (2021)</u>	เรือสำราญ	การสุดละอองลอยน่าจะเป็นปัจจัยหลักในการแพร่ของไวรัสบนเรือสำราญ Diamond Princess
<u>Buonanno, Morawska และ Stabile (2020)</u>	ร้านอาหารและวงประสานเสียงในโบสถ์แห่งหนึ่ง	การแพร่ผ่านอากาศน่าจะเป็นรูปแบบการแพร่หลักในระหว่างการแพร่ระบาดภายในร้านอาหารแห่งหนึ่งในเมืองกว้างโจวและในวงประสานเสียงที่แมนดเวอ์นอน
<u>J. Cai และคณะ (2020)</u>	ศูนย์การค้า	การแพร่ผ่านละอองลอยในพื้นที่ปิดทึบน่าจะเกี่ยวข้องกับคลัสเตอร์โควิด 19 ในศูนย์การค้าแห่งหนึ่งในนครเวินโจว
<u>Chau และคณะ (2021)</u>	บาร์	เหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดที่บาร์แห่งหนึ่งในนครโฮจิมินห์ชี้ให้เห็นว่าเมื่อมีคนจำนวนมากในอาคารปิดทึบและมีการระบายอากาศที่ไม่ดี อาจถือได้ว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการแพร่ระบาด

<u>Crema (2021)</u>	พื้นที่โดยรอบป่าฝนแอมะซอน	การแพร่ผ่านอากาศน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถอธิบายการระบาดของไวรัสที่มีลักษณะโดดเด่นในบริเวณป่าฝนแอมะซอนได้
<u>Eichler และคณะ (2021)</u>	โรงแรมที่มีการกักตัว	ละอองลอยน่าจะเป็นรูปแบบการแพร่หลักในโรงแรมที่มีการกักตัวแห่งหนึ่งในประเทศนิวซีแลนด์ ซึ่งพื้นที่ปิดทึบและไม่มีการระบายอากาศในโถงทางเดินของโรงแรมน่าจะเอื้ออำนวยให้เกิดการแพร่เชื้อ
<u>Günther และคณะ (2020)</u>	โรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์	ในพื้นที่ปิดทึบในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์แห่งหนึ่งในประเทศเยอรมนี การแพร่ของ SARS-CoV-2 อาจเกิดขึ้นระหว่างระยะห่าง 8 เมตรหรือมากกว่านั้น ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ
<u>Hwang และคณะ (2021)</u>	อาคารอพาร์ทเมนต์	การแพร่ผ่านอากาศผ่านท่ออากาศในห้องน้ำน่าจะเป็นสาเหตุหลักของการระบาดของไวรัสระหว่างผู้แพร่เชื้อภายในอาคารอพาร์ทเมนต์แห่งหนึ่งในกรุงโซล
<u>Kang และคณะ (2020)</u>	อาคารอพาร์ทเมนต์	การแพร่ในแนวตั้งของละอองอุจจาระที่มีไวรัสผ่านท่อแนวตั้งและช่องระบายอากาศน่าจะเป็นสาเหตุของการแพร่ระบาดในอพาร์ทเมนต์อาคารสูงแห่งหนึ่งในเมืองกวางโจว โดยมีหลักฐานสนับสนุนเป็นตัวอยางจากสภาพแวดล้อมที่ให้ผลตรวจเป็นบวก
<u>Katelaris และคณะ (2021)</u>	วงประสานเสียงในโบสถ์	มีการเสนอว่าสาเหตุคือการแพร่ผ่านอากาศ เนื่องจากผู้ป่วยที่ศึกษานั่งอยู่ห่างจากผู้ป่วยรายแรก 15 เมตร โดยไม่มีการสัมผัสทางกายภาพอย่างใกล้ชิดในระหว่างการขับร้องประสานเสียงในโบสถ์ที่ซิดนีย์
<u>Khanh และคณะ (2020)</u>	เครื่องบิน	การแพร่ผ่านละอองลอยเกิดขึ้นในบริเวณชั้นธุรกิจในระหว่างเที่ยวบินระยะไกลไปยังประเทศเวียดนาม ซึ่งที่นั่งมีระยะเว้นมากกว่าชั้นประหยัด และมีการติดเชื้อไกลกว่ากฎเว้นระยะ 2 แถวที่นั่งหรือ 2 เมตรตามข้อแนะนำเพื่อป้องกันโควิด 19 บนเครื่องบินและระบบขนส่งสาธารณะอื่นๆ อย่างมาก
<u>Y. Li และคณะ (2020)</u>	ร้านอาหาร	การแพร่ผ่านละอองลอยเนื่องจากการระบายอากาศที่ไม่ดีสามารถอธิบายถึงการระบาดของไวรัสในร้านอาหารแห่งหนึ่งในกวางโจว
<u>Luo และคณะ (2020)</u>	รถทัวร์และรถมินิบัส	การแพร่ผ่านอากาศสามารถอธิบายถึงอัตราโคม่าจับที่สูงในรถทัวร์คันหนึ่งและรถมินิบัสคันหนึ่งในมณฑลหูหนาน
<u>Miller และคณะ (2020)</u>	วงประสานเสียงในโบสถ์	การแพร่ผ่านละอองลอยน่าจะเป็นสาเหตุ เนื่องจากการแพร่ผ่านวัตถุปนเปื้อนเชื้อหรือละอองที่สามารถตกสู่พื้นไม่น่าจะสามารถอธิบายถึงเคสที่กระจุกกระจายอย่างมากในวงประสานเสียงที่เมานต์เวอร์นอนนได้
<u>Y. Shen และคณะ (2020)</u>	รถทัวร์	การแพร่ผ่านอากาศของไวรัสน่าจะสามารถอธิบายถึงอัตราโคม่าจับที่สูงเป็นพิเศษในรถทัวร์คันหนึ่งในมณฑลเจ้อเจียงได้ไม่มากนัก

<u>S. Tang และคณะ (2020)</u>	การทดลองโดยการจำลองติดตามเชื้อ ณ สถานที่ ในอพาร์ทเมนต์แห่งหนึ่ง	พบละอองลอยในห้องน้ำที่ชั้น 25 และ 27 หลังจากกดน้ำสุขภัณฑ์ในห้องน้ำที่ชั้น 15 ซึ่งอาจอธิบายได้ถึงการแพร่ของไวรัสระหว่างห้องที่ทำการศึกษาในอาคารอพาร์ทเมนต์แห่งหนึ่งในกว้างโจว
<u>Wang และ Du (2020)</u>	อาคารอพาร์ทเมนต์	การแพร่ผ่านอากาศน่าจะเป็นสาเหตุหลักที่อธิบายได้ถึงการแพร่ของไวรัสในอาคารอพาร์ทเมนต์แห่งหนึ่งในเมืองออร์ดอส
<u>R.Zhang และคณะ (2020)</u>	การแพร่ระบาดในประเทศจีน อิตาลี และนครนิวยอร์ก	การแพร่ผ่านอากาศเป็นรูปแบบการแพร่ที่มีความสามารถในการก่อโรคสูงและถือเป็นรูปแบบการแพร่หลักของโรค
การทดลองในสัตว์		
<u>Y. I. Kim และคณะ (2020)</u>	การทดลองกับเฟรริด	พบการแพร่ผ่านอากาศ
<u>Kutter และคณะ (2021)</u>	การทดลองกับเฟรริด	มีการแพร่ของ SARS-CoV-2 ผ่านอากาศ
<u>Richard และคณะ (2020)</u>	การทดลองกับเฟรริด	SARS-CoV-2 สามารถแพร่ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ
<u>Shi และคณะ (2020)</u>	การทดลองกับสัตว์เลี้ยง	ไวรัสสามารถแพร่ระหว่างแมวด้วยรูปแบบผ่านอากาศได้

^aระบุตามลำดับตัวอักษร

^bสัดส่วนของตัวอย่างที่ได้ผลบวกในตัวอย่างที่มีอยู่ทั้งหมด (กล่าวคือ จำนวนตัวอย่างที่ได้ผลบวก/ตัวอย่างทั้งหมด)

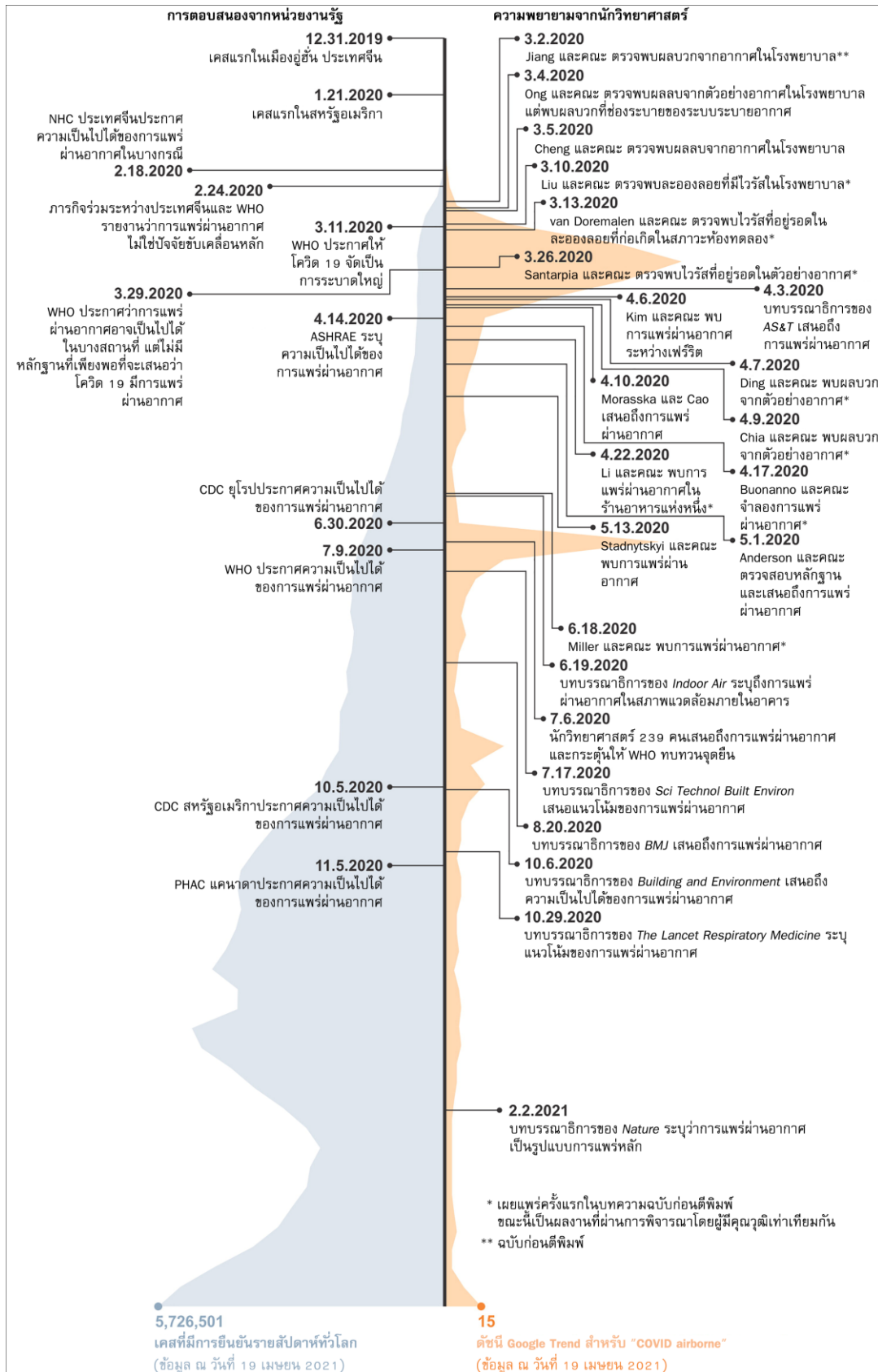
^cตรวจพบผลบวกในตัวอย่างอากาศสองในสามห้อง มีการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 18 ชุด (หกชุดต่อห้อง) แต่ไม่มีการรายงานจำนวนตัวอย่างที่ได้ผลบวก

^dความเข้มข้นของไวรัสที่ตรวจวัดได้

กลไกของการแพร่ผ่านอากาศ

มีหลายวิธีที่สารคัดหลั่งและของเสียจากร่างกายที่มีไวรัสสามารถถูกทำให้กลายเป็นละอองหรืออนุภาคที่มีไวรัสซึ่งแพร่เชื้อได้ (S. Tang และคณะ 2020) สารคัดหลั่งจากการหายใจสามารถกลายเป็นละอองเมื่อทำกิจกรรมประจำวัน (เช่น การหายใจ พูดคุย ไอ และจาม) รวมถึงกระบวนการทางการแพทย์ (เช่น การใส่ท่อช่วยหายใจ) (Zietsman, Phan และ Jones 2019) ขณะที่ของเสียสามารถถูกทำให้เป็นละอองจากการกดน้ำสุขภัณฑ์ (Johnson และคณะ 2013) เนื่องจากกิจกรรมเกี่ยวกับการหายใจเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการแพร่ของละอองลอยเนื่องจากกิจกรรมเกี่ยวกับการหายใจประจำวันเท่านั้น แต่การแพร่ของ SARS-CoV-2 ผ่านละอองลอยที่ก่อเกิดจากกระบวนการทางการแพทย์หรือการกดน้ำสุขภัณฑ์ยังคงเป็นเส้นทางที่มีศักยภาพในการแพร่ กระบวนการทางการแพทย์น่าจะเกี่ยวข้องกับ RNA ของไวรัสจำนวนมากที่ตรวจพบในโรงพยาบาล (Tan และคณะ 2020) เป็นที่น่าสงสัยว่าการแพร่ของละอองอุจจาระเนื่องจากการกดน้ำสุขภัณฑ์อาจเกี่ยวข้องกับบางเคสที่มีการรายงานในอาคารอพาร์ทเมนต์ (Hwang และคณะ 2021; Kang และคณะ 2020; Ma และคณะ 2020)

ละอองที่มีไวรัสก่อเกิดขึ้นในทางเดินหายใจและถูกปล่อยออกจากปากและจมูกสู่สภาพแวดล้อมโดยการหายใจ พูด ไอ และจาม (Dhand และ Li 2020; Wei และ Li 2016) จำนวนและขนาดของละอองที่ขับออกมาขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ก่อเกิดภายในทางเดินหายใจเป็นอย่างมาก ช่องปากมักทำให้เกิดละอองขนาดใหญ่ (ขนาด $\geq 100 \mu\text{m}$) ในระหว่างการพูดและไอ ในขณะที่ละอองขนาดเล็กจะก่อเกิดภายในกล่องเสียงในระหว่างการร้องเพลงและไอ ($\geq 1 \mu\text{m}$) และในหลอดลมฝอยในระหว่างการหายใจตามปกติ ($\leq 1 \mu\text{m}$) (Dhand และ Li 2020) ระยะเวลาและระยะทางที่ละอองที่ขับออกมาสามารถเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้จะขึ้นอยู่กับกระแสอากาศที่หายใจออกมา ขนาดอนุภาคและสนามกระแสลมในบริเวณโดยรอบเป็นอย่างมาก โดยปกติแล้วการไอและจามจะมีความเร็วในการหายใจออกและความเข้มข้นของละอองสูง แต่เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่บ่อย ขณะที่การหายใจและการพูดมีความเร็วและความเข้มข้นของละอองน้อยกว่าแต่เกิดขึ้นบ่อยกว่า



ภาพประกอบ 1. ลำดับช่วงเวลาของการศึกษาที่สำคัญเกี่ยวกับการแพร่ผ่านอากาศของโควิด 19 และการตอบสนองจากหน่วยงานรัฐ (ข้อมูล ณ วันที่ 19 เมษายน 2021 (WHO 2021a)) (ดัชนีของ Google Trends แสดงการเรียกค้นข้อมูลเกี่ยวกับ "การแพร่ผ่านอากาศของโควิด" ด้วย Google ทั่วโลก (2020) ดัชนีนี้คำนวณขึ้นโดยให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 100 (Choi และ Varian 2012))

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นและสัดส่วนของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่หายใจออกมา ในระหว่างกิจกรรมต่างๆ (adapted from Morawska และคณะ (2009))

ค่าความเข้มข้น [ชม.^{-3}] และสัดส่วน [%] ของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่หายใจออกมา						
เส้นผ่านศูนย์กลางของ อนุภาค [μm]	การนับเลขโดยการดูด	การนับเลขโดย การกระชับ	การดูดปกติ	การกระชับปกติ	การหายใจ	การไอ
50.80 ± 0.08	0.236 (73.3%)	0.110 (84.6%)	0.751 (69.0%)	0.636 (94.6%)	0.084 (85.7%)	0.567 (83.6%)
1.8 ± 0.3	0.068 (21.1%)	0.014 (10.8%)	0.139 (12.8%)	0.037 (5.5%)	0.009 (9.2%)	0.093 (13.7%)
3.5 ± 0.7	0.007 (2.2%)	0.004 (3.1%)	0.139 (12.8%)	0.000 (0%)	0.003 (3.1%)	0.012 (1.8%)
5.5 ± 1.0	0.011 (3.4%)	0.002 (1.5%)	0.059 (5.4%)	0.000 (0%)	0.002 (2.0%)	0.006 (0.9%)
รวม	0.322	0.13	1.088	0.672	0.098	0.678

Chao และคณะ (2009) วัดความเร็วของอากาศจากการหายใจออกโดยเฉลี่ยได้ 11.7 ม./วินาทีสำหรับการไอ และ 3.9 ม./วินาทีสำหรับการพูด ละอองขนาดใหญ่มักเกาะตัวกับวัตถุหรือระเหยเป็นนิวเคลียสขนาดเล็กอย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร การเกาะตัวของละอองสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากการนอนก้นด้วยแรงโน้มถ่วง การชนเนื่องจากการไหลวนแบบปั่นป่วน หรือการเกาะตัวจากการเคลื่อนที่แบบแกว่งของอนุภาค อนุภาคที่เกาะตัวอาจแขวนลอยสู่อากาศอีกครั้งเนื่องจากกิจกรรมของผู้ที่อยู่ในพื้นที่ เช่น การเดิน จึงกลายเป็นแหล่งที่อาจแพร่เชื้อได้ (Y. Li และคณะ 2020) มีการรายงานว่าละอองขนาดใหญ่ที่ขับออกมามักเดินทางได้ประมาณ 2 เมตรก่อนจะตกสู่พื้นหรือระเหยไป (Wei และ Li 2016) ดังนั้น การแพร่ผ่านละอองส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในระยะใกล้ จึงมีการเว้นระยะห่างทางสังคม 2 เมตรอย่างกว้างขวางตามคำแนะนำต่างๆ อย่างไรก็ตาม สำหรับละอองขนาดเล็ก การนอนก้นด้วยแรงโน้มถ่วงอาจถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่การชนเนื่องจากการไหลวนแบบปั่นป่วนหรือการเกาะตัวจากการเคลื่อนที่แบบแกว่งของอนุภาคอาจเกิดขึ้นได้ ละอองขนาดเล็กได้รับผลกระทบจากสนามความเร็วโดยรอบ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการระเหยของละออง (กลายเป็นนิวเคลียสขนาดเล็ก) มีส่วนช่วยในการนำพาละอองเป็นระยะทางค่อนข้างไกล (Dhand และ Li 2020) ดังนั้น โดยปกติแล้วละอองขนาดเล็กจะแขวนลอยในอากาศได้เป็นเวลานานและเคลื่อนที่ตามการไหลของอากาศโดยรอบได้ไกลกว่า (มากกว่า 2 เมตร) หลักฐานชี้ให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1–3 μm สามารถแขวนลอยได้นานแทบจะไม่มีขีดจำกัด (Wei และ Li 2016)

ดังนั้น เชื่อได้ว่าละอองลอย (เส้นผ่านศูนย์กลาง <5 μm) ที่ขับออกออกมามีบทบาทสำคัญต่อการแพร่ของ SARS-CoV-2

รูปแบบการแพร่ผ่านอากาศหมายถึงกรณีที่มีโอกาสติดเชื้อสูดอากาศที่ปนเปื้อนละอองลอยที่แพร่เชื้อได้ซึ่งขับออกมาจากผู้ติดเชื้อ (Wei และ Li 2016) ละอองลอยที่มี SARS-CoV-2 จะยังคงแพร่เชื้อได้เป็นเวลาหลายชั่วโมงเมื่ออยู่ในอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น และการได้รับแสงอาทิตย์ (Azuma และคณะ 2020; Dabisch และคณะ 2020; Fears และคณะ 2020; Schuit และคณะ 2020; van Doremalen และคณะ 2020) ผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อซึ่งสูดละอองลอยที่แพร่เชื้อได้เหล่านี้เข้าไปอาจติดเชื้อโควิด 19 ได้ อนุภาคที่สูดเข้าไปสามารถเกาะตัวภายในทางเดินหายใจและก่อให้เกิดการติดเชื้อ ความเสี่ยงของการติดเชื้อขึ้นอยู่กับปริมาณของไวรัสที่สูดเข้าไปและตำแหน่งที่อนุภาคที่มีไวรัสเกาะตัวภายในทางเดินหายใจ ดังนั้น การแพร่ของไวรัสด้วยรูปแบบผ่านอากาศจึงมักประกอบด้วยสามช่วง กล่าวคือ การปล่อยอนุภาคจากการหายใจ การเคลื่อนที่และการกระจายของละอองลอยในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และการได้รับเชื้อของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อในขั้นสุดท้าย การทำความเข้าใจถึงกลไกของการแพร่ผ่านอากาศอาจเป็นประโยชน์ในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

ปริมาณไวรัสภายในปาก

ปริมาณไวรัสของอนุภาคที่ผู้แพร่เชื้อหายใจออกมามีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศ อย่างไรก็ตาม ยังคงเป็นเรื่องยากที่จะระบุปริมาณไวรัสของอนุภาคที่หายใจออกมาได้โดยตรง เมื่อพิจารณาว่าอนุภาคที่หายใจออกมาก่อตัวขึ้นภายในทางเดินหายใจและปลดปล่อยออกมาเมื่อทำกิจกรรมเกี่ยวกับการหายใจ จึงเป็นไปได้ที่จะหาปริมาณไวรัสที่หายใจออกมาโดยเทียบเคียงจากปริมาณไวรัสในทางเดินหายใจซึ่งสามารถตรวจหาได้ง่ายกว่า (Buonanno, Stabile และ Morawska 2020) Walsh และคณะ (2020) ได้พิจารณาการศึกษาต่างเกี่ยวกับปริมาณไวรัสของ SARS-CoV-2 อย่างละเอียด และไม่พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญของปริมาณไวรัสระหว่างผู้ป่วยที่ไม่แสดงอาการและที่แสดงอาการ หลักฐานยังบ่งบอกว่าปริมาณไวรัสของ SARS-CoV-2 จะถึงระดับสูงสุดใกล้เคียงกับช่วงที่เริ่มปรากฏอาการหรือหลังจากนั้นสองสามวัน และไม่สามารถตรวจจับได้เมื่อผ่านไปประมาณสองสัปดาห์หลังจากเริ่มปรากฏอาการ ปริมาณไวรัสที่สูงขึ้นน่าจะสัมพันธ์กับอาการที่รุนแรงยิ่งขึ้น (Walsh และคณะ 2020) Buonanno, Stabile และ Morawska (2020) ได้เสนอวิธีการ (สมการ 1) เพื่อประมาณค่าปริมาณไวรัสที่ผู้ติดเชื้อปล่อยออกมา ตามปริมาณไวรัสภายในปาก (หรือเสมหะ) ประเภทของกิจกรรมที่มีการหายใจ (เช่น การหายใจ พูด หรือไอ) และระดับของกิจกรรม (เช่น พักผ่อน ยืน หรือออกกำลังกายระดับเบา) อัตราการปล่อยควอนตัมไวรัส (ER) สามารถวัดได้จากปริมาณไวรัสในเสมหะ (c_v) แพ็คเตอร์แปลง (c_i) อัตราการหายใจเข้า (IR) และปริมาตรอนุภาคโดยรวม (ขึ้นอยู่กับจำนวนอนุภาค ND และปริมาตร VD ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D แต่ละขนาด) หนึ่งควอนตัมในโมเดลหมายถึงปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรค ซึ่งจะทำให้ 63% ของผู้ที่ได้รับเชื้อติดเชื้อ กล่าวคือ โดสการติดเชื้อ ID63 (E. C Riley, Murphy และ Riley 1978) อัตราการก่อเกิดควอนตัมแพร่เชื้อได้มีหน่วยเป็นควอนตัมต่อชั่วโมง (ชม.^{-1}) ซึ่งอธิบายถึงจำนวนอนุภาค/จุลชีพก่อโรคที่แพร่เชื้อได้ โดยค่าดังกล่าวสื่อถึงจำนวนอนุภาคไวรัสที่ก่อเกิดภายในช่วงเวลาดังกล่าวและความสามารถในการแพร่เชื้อของอนุภาค (ซึ่งช่วยให้ทราบผลของขนาดอนุภาคและความน่าจะเป็นในการเกาะตัวในบริเวณที่เหมาะสมของระบบทางเดินหายใจเช่นกัน) (Sze To และ Chao 2010)

$$ER = c_v \cdot c_i \cdot IR \cdot \int (N_D \cdot dV_D)$$

ในบางการศึกษาได้ทำการวัดปริมาณไวรัสในเสมหะ Fajnzylber และคณะ (2020) วัดได้ 1.8–9.0 \log_{10} สำเนา RNA/มล. ในเสมหะ โดยมีระดับมัธยฐาน 4.4 \log_{10} สำเนา RNA/มล. Wolfel และคณะ (2020) วัดปริมาณไวรัสเฉลี่ยในเสมหะได้ 6.85 \log_{10} สำเนา RNA/มล., โดยมีค่าสูงสุด 9.37 \log_{10} สำเนา RNA/มล. J. Yoon และคณะ (2020) ได้รายงานปริมาณไวรัสในเสมหะของผู้ป่วยสองคนในระหว่าง 4.86 และ 8.22 \log_{10} สำเนา RNA/มล. J. Y. Kim และคณะ (2020) ตรวจพบปริมาณไวรัสในเสมหะของผู้ป่วยสองคนแรกในประเทศเกาหลีใต้ได้ประมาณ 5 ถึง 9 \log_{10} สำเนา RNA/มล. Pan และคณะ (2020) ได้รวบรวมตัวอย่างเสมหะจากผู้ป่วย 80 คน และพบปริมาณไวรัสมัธยฐาน 5.88 \log_{10} สำเนา RNA/มล. โดยมีค่าสูงสุด 11.13 \log_{10} สำเนา RNA/มล. S. Zheng และคณะ (2020) ได้รวบรวมตัวอย่างจากการหายใจ 1846 ชุด (รวมถึงตัวอย่างเสมหะและน้ำลาย) และตรวจพบปริมาณไวรัสประมาณ 3 ถึง 8 \log_{10} สำเนา RNA/มล. To และคณะ (2020) วัดปริมาณไวรัสสูงสุดในทางเดินหายใจได้ระหว่าง 3.91 ถึง 7.56 \log_{10} สำเนา RNA/มล. โดยมีค่ามัธยฐาน 5.29 \log_{10} สำเนา RNA/มล. ใน

ผู้ป่วยที่มีอาการของโรคเล็กน้อย และมีปริมาณไวรัสสูงสุดระหว่าง 4.27 ถึง 7.40 log₁₀ สำเนา RNA/มล. โดยมีค่ามัธยฐาน 6.91 log₁₀ สำเนา RNA/มล. ในผู้ป่วยที่มีอาการของโรคระดับรุนแรง Han และคณะ (2020) ตรวจพบปริมาณไวรัสในเสมหะของผู้ป่วยประมาณ 4 ถึง 6 log₁₀ สำเนา RNA/มล. สังเกตได้ว่าเสมหะสามารถมีปริมาณไวรัสได้มากถึง 11 log₁₀ สำเนา RNA/มล. ในขณะที่ข้อมูลส่วนใหญ่ที่มีอยู่เดิมได้ประมาณค่าไว้น้อยกว่า 9 log₁₀ สำเนา RNA/มล. การศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ (J. Li และคณะ 2021) ได้พิจารณาและวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่เดิมเกี่ยวกับปริมาณไวรัสในเสมหะในสิ่งตีพิมพ์ (397 ตัวอย่าง) และพบการแจกแจงแบบปกติของปริมาณไวรัสโดยมีค่าเฉลี่ย 4.87 log₁₀ สำเนา RNA/มล. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.90 ซึ่งชี้ว่า 99% ของปริมาณไวรัสในเสมหะต่ำกว่า 9.30 log₁₀ สำเนา RNA/มล. ซึ่งบางสายพันธุ์อาจมีปริมาณไวรัสสูงกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม การศึกษาหนึ่งได้รายงานว่าสายพันธุ์เดลต้ามีปริมาณไวรัสจากการสวอบคอหอยส่วนบนสูงกว่าสายพันธุ์ไวรัสดั้งเดิม 1000 เท่า (B. Li และคณะ 2021)

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นและการแจกแจงของ SARS-CoV-2 ในอากาศ ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

สถานการณ์	ความเข้มข้นของ SARS-CoV-2 [สำเนา RNA/ม. ³]		อ้างอิง
	การแจกแจงขนาด	รวม	
ห้องถอดชุดป้องกัน	0–0.25 µm: 0	42	<u>Liu และคณะ (2020)</u>
	0.25–0.5 µm: 40		
	0.5–1 µm: 0		
	1–2.5 µm: 1		
	>2.5 µm: 1		
ห้องถอดชุดป้องกัน	0–0.25 µm: 1	20	
	0.25–0.5 µm: 2		
	0.5–1 µm: 9		
	1–2.5 µm: 1		
	>2.5 มม.: 7		
สำนักงานของเจ้าหน้าที่แพทย์	0–0.25 µm: 3	20	
	0.25–0.5 µm: 2		
	0.5–1 µm: 2		
	1–2.5 µm: 3		
	>2.5 µm: 10		
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างใกล้ช่องระบายอากาศ ห่างจากผู้ป่วย >1 เมตร)	<1 µm: 0	0	<u>Chia และคณะ (2020b)</u>
	1–4 µm: 0		
	>4 µm: 0		
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างห่างจากผู้ป่วยน้อยกว่า 1 เมตร)	<1 µm: 0	3384	
	1–4 µm: 1384		
	>4 µm: 2000		
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่ไม่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างห่างจากผู้ป่วยน้อยกว่า 1 เมตร)	<1 µm: 0	1843	
	1–4 µm: 916		
	>4 µm: 927		
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการหนึ่งคน (เก็บตัวอย่างที่ข้างเตียง ห่างจากเตียง 0.2 เมตร)	<1 µm: 1112	1857	<u>Z. Feng และคณะ (2021)</u>
	1–4 µm: 0		
	>4 µm: 745		
โถงทางเดินโรงพยาบาล	/	9	<u>Zhou และคณะ (2021)</u>
ห้อง ICU โรงพยาบาลที่มีผู้แพร่เชื้อ	/	21	
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อ (เก็บตัวอย่างที่ข้างเตียง)	/	219	
ห้องผู้ป่วยรวมขนาดสี่เตียงสองห้องซึ่งมีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างในระยะห่าง <1 เมตรจากผู้ป่วยสี่คน)	/	<10–460	<u>Moore และคณะ (2021)</u>
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างที่ระยะห่างจากผู้ป่วย >เมตร)	/	2.70–8.34 x 10 ³	<u>Santarpia และคณะ (2020)</u>
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างที่ระยะห่างจากผู้ป่วย >เมตร)	/	2.42–2.48 x 10 ³	
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อที่แสดงอาการ (เก็บตัวอย่างใกล้ผู้ป่วย)	/	4.07 x 10 ³	
โถงทางเดินโรงพยาบาล	/	2.08–8.69 x 10 ³	
ตัวอย่างอากาศของบุคคล	/	5.37–48.22 x 10 ³	
ห้องสุขาในโรงแรมที่มีการกักตัวซึ่งไม่มีการระบายอากาศ	/	6.07 x 10 ³	<u>Ma และคณะ (2020)</u>
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อสองคน (เก็บตัวอย่างที่ระยะ 2 เมตรจากผู้ป่วยคนที่ 1 และ 4.6 เมตรจากผู้ป่วยคนที่ 2)	/	74 x 10 ³	<u>Lednický และคณะ (2020)</u>
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อหนึ่งคน (เก็บตัวอย่างที่ระยะ 2 เมตรจากผู้ป่วย)	/	18 x 10 ³	
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อสองคน (เก็บตัวอย่างที่ระยะ 4.8 เมตรจากผู้ป่วยคนที่ 1 และ 3 เมตรจากผู้ป่วยคนที่ 2)	/	27 x 10 ³	
ห้องผู้ป่วยที่มีผู้แพร่เชื้อหนึ่งคน (เก็บตัวอย่างที่ระยะ 4.8 เมตรจากผู้ป่วย)	/	6 x 10 ³	

ความเข้มข้นและการแจกแจงขนาดของอนุภาคที่มีไวรัส

Morawska และคณะ (2009) ได้วัดการแจกแจงของละอองลอยที่ขับออกมาในระหว่างกิจกรรมที่มีการหายใจต่างๆ (ตารางที่ 2) ได้แก่การหายใจ การนับเลขโดยการกระซิบ การนับเลขโดยการพูด การพูดปกติ การกระซิบปกติ และการไอ ซึ่งสามารถระบุได้ว่าละอองที่ขับออกมามากที่สุดคือละอองขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $0.8 \mu\text{m}$ และความเข้มข้นเฉลี่ยไม่เกิน 0.75 ซม.^{-3} (มีสัดส่วนประมาณ 70–80% ของจำนวนอนุภาครวม) ตามด้วยละอองขนาด $1.8 \mu\text{m}$ ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า กล่าวคือไม่เกิน 0.14 ซม.^{-3} (ประมาณ 10–20%) ขณะที่ละอองขนาดประมาณ $3.5 \mu\text{m}$ และ $5.5 \mu\text{m}$ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (โดยปกติแล้วน้อยกว่า 6%) อย่างไรก็ตาม การพูดทำให้เกิดอนุภาคเพิ่มเติมซึ่งมีขนาดประมาณ $3.5 \mu\text{m}$ และ $5.5 \mu\text{m}$ โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ย 0.04 ซม.^{-3} และ 0.16 ซม.^{-3} (18% ของอนุภาครวม) ตามลำดับ Stephens (2013) ได้ทำการพิจารณาอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการแจกแจงขนาดอนุภาคของละอองฝอยขนาดเล็ก และได้ข้อสรุปที่คล้ายกันว่าอนุภาคส่วนใหญ่ (โดยปกติแล้ว 80–90%) ที่ขับออกมาในระหว่างกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า $1\text{--}2 \mu\text{m}$ และยังคงบอกว่าการแจกแจงขนาดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนระหว่างกิจกรรมต่างๆ แม้โดยเฉลี่ยแล้วการไอจะปล่อยอนุภาคเป็นจำนวนมากว่าการหายใจและการพูด ความไม่สม่ำเสมอของขนาดระหว่างกลุ่มอายุและกลุ่มเพศถือว่าไม่มีนัยสำคัญเช่นกัน

แม้ละอองที่ขับออกมาส่วนใหญ่จะมีการแจกแจงขนาดในกลุ่มขนาดเล็ก แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กจะสามารถบรรจุไวรัสได้น้อยกว่าเนื่องจากปริมาตรของอนุภาคที่เล็กกว่า ซึ่งหมายความว่า การแจกแจงจำนวนจุลชีพก่อโรคในอากาศไม่ได้สอดคล้องกับการแจกแจงจำนวนอนุภาคทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงปริมาตรของละอองและการแจกแจงขนาดของละอองแล้ว ละอองขนาดใหญ่จะมีจุลชีพก่อโรคมมากกว่า ซึ่งโดยปกติจะมีจำนวน 80–90% สำหรับอนุภาคขนาด $>3 \mu\text{m}$ (J. Shen และคณะ 2021) สิ่งนี้ยังสามารถอธิบายเหตุผลที่อุปกรณ์กรองที่ไม่ใช่ตัวกรองอนุภาคในอากาศประสิทธิภาพสูง (HEPA - High-Efficiency Particulate Air) บางชนิด เช่น อุปกรณ์กรองที่มีค่ารายงานประสิทธิภาพต่ำสุด (Minimum Efficiency Reporting Value - MERV) 13 ยังคงมีประสิทธิภาพในการขจัดจุลชีพก่อโรค เนื่องจากอุปกรณ์กรองเหล่านี้มักมีประสิทธิภาพสูงในการขจัดอนุภาคขนาดใหญ่ (J. Shen และคณะ 2021) บางการศึกษาได้ทำการวัดการแจกแจงของไวรัสในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร แทนที่จะวัดละอองที่หายใจออกมาโดยตรง Stephens (2013) ได้พิจารณาการศึกษาเหล่านี้สำหรับโรคไข้หวัดใหญ่ และได้ประมาณค่าการแจกแจงจุลชีพก่อโรคในขนาดโดยใช้ข้อมูลในสิ่งตีพิมพ์ (Lindsley และคณะ 2010) กล่าวคือ 15% ของจุลชีพก่อโรคอยู่ในช่วงขนาด $0.3\text{--}1 \mu\text{m}$ 25% อยู่ในช่วงขนาด $1\text{--}3 \mu\text{m}$ และ 60% อยู่ในช่วงขนาด $3\text{--}10 \mu\text{m}$ รายงานจาก CDC (2020) เสนอว่ามีการแจกแจง 20%, 30% และ 50% ของอนุภาค SARS-CoV-2 ที่แพร่เชื้อได้ขนาด $0.3\text{--}1 \mu\text{m}$, $1\text{--}3 \mu\text{m}$ และ $3\text{--}10 \mu\text{m}$ ตามลำดับ คาดได้ว่าค่าที่ตรวจวัดได้ภายในอาคารเหล่านี้สอดคล้องกับกิจกรรมเกี่ยวกับการหายใจของมนุษย์ทุกประเภทที่เกิดขึ้นภายในอาคาร (Stephens 2013) ข้อมูลที่มีการเผยแพร่เกี่ยวกับความเข้มข้นและการแจกแจงขนาดของไวรัสที่ตรวจวัดได้สำหรับละอองลอยที่มี SARS-CoV-2 ในอากาศ ได้แสดงโดยสรุปไว้ในตารางที่ 3 สัดส่วนของจุลชีพก่อโรคในละอองขนาดใหญ่จะน้อยกว่าสัดส่วนในละอองที่ขับออกมา ซึ่งน่าจะมีสาเหตุเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีการเกาะตัวและการระเหยมมากกว่า การพบละอองลอยที่มีไวรัสในห้องกักกันป้องกัน สำนักงานของเจ้าหน้าที่และในโถงทางเดิน บ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการติดเชื้อนอกห้องผู้ป่วยในโรงพยาบาล โดยปกติแล้วจะพบความเข้มข้นของไวรัสสูงในบริเวณใกล้ตัวผู้ป่วย ซึ่งผู้ป่วยทั้งที่แสดงอาการและไม่แสดงอาการต่างสามารถก่อเกิดละอองลอยที่มีไวรัสเป็นจำนวนค่อนข้างมาก

อัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ตามธรรมชาติสำหรับละอองลอยที่แพร่เชื้อได้

มีการตรวจพบว่าละอองลอยที่มีไวรัสซึ่งขับออกจากผู้ป่วยโควิด 19 สามารถแพร่เชื้อได้ในโรงพยาบาลบางแห่ง (Lednický และคณะ 2020; Santarpia และคณะ 2020) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากสถานที่ที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อให้สามารถระบุได้ว่าไวรัสสามารถอยู่รอดได้เป็นเวลานานเท่าใด ในการศึกษาเชิงทดลองบางส่วนได้ดำเนินการในสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง เพื่อศึกษาความอยู่รอดของละอองลอยที่มีไวรัสในอากาศภายใต้ปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยปกติแล้วละอองลอยที่มีไวรัสมีความสามารถในการแพร่เชื้อเป็นเวลาหลายชั่วโมงในอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมภายในอาคารทั่วไป แต่พบว่าความสามารถในการแพร่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อละอองลอยได้รับแสงอาทิตย์ (Dabisch และคณะ 2020; Schuit และคณะ 2020) อุณหภูมิและความชื้นอาจมีอิทธิพลต่อการตกค้างยาวนานของ SARS-CoV-2 ที่มีสภาพสมบูรณ์ในละอองลอย van Doremalen และคณะ (2020) ได้ทำการทดสอบค่าครึ่งชีวิตของ SARS-CoV-2 ในละอองลอย และประมาณค่าได้ 1.1 ชั่วโมง (ช่วงความน่าเชื่อถือ (CI) 95% $0.64\text{--}2.64$ ชั่วโมง) ที่ $21\text{--}23^\circ\text{C}$ และ 40% RH ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ 0.63 ซม.^{-1} (95% CI $0.26\text{--}1.08 \text{ ซม.}^{-1}$) ค่านี้ใช้อย่างกว้างขวางในบางโมเดล (Buonanno, Morawska และ Stabile 2020; Buonanno, Stabile และ Morawska 2020; Rothamer และคณะ 2020) Fears และคณะ (2020) สังเกตเห็นการไม่เสื่อมสภาพของละอองลอยที่มีไวรัสเป็นเวลา 16 ชั่วโมงที่ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ และ $53 \pm 11\%$ RH ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์เกือบเป็นศูนย์ Smither และคณะ (2020) ได้เสนออัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์เฉลี่ย 0.75 ซม.^{-1} ในละอองลอยที่ $19\text{--}22^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ปานกลาง (40–60%) ในที่มืด และ 0.80 ซม.^{-1} ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง (68–88%) สำหรับ SARS-CoV-2 สายพันธุ์อัลฟา Schuit และคณะ (2020) ได้เสนอว่าความชื้นสัมพัทธ์เพียงอย่างเดียวไม่ส่งผลต่ออัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ แต่สามารถมีอันตรกิริยาเล็กน้อยร่วมกับปัจจัยอื่นๆ อัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์โดยไม่มีแสงอาทิตย์ในระดับความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด (20–70%) คือ $0.48 \pm 0.66 \text{ ซม.}^{-1}$ (สูญเสีย 90%, 286 นาที) อัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ตามธรรมชาติภายใต้แสงอาทิตย์จำลองสอดคล้องกับช่วงปลายฤดูหนาวหรือต้นฤดูใบไม้ร่วง และสำหรับฤดูร้อนคือ $7.26 \pm 1.02 \text{ ซม.}^{-1}$ (สูญเสีย 90%, 19 นาที) และ $18.36 \pm 5.82 \text{ ซม.}^{-1}$ (สูญเสีย 90%, 8 นาที) ตามลำดับ Dabisch และคณะ (2020) พบว่าทั้งอุณหภูมิ แสงอาทิตย์ และความชื้น ล้วนเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการตกค้างยาวนานของ SARS-CoV-2 ที่มีสภาพสมบูรณ์ในละอองลอย ขณะที่แสงอาทิตย์และอุณหภูมิส่งผลต่อการเสื่อมสภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นตลอดช่วงที่มีการทดลอง ($10\text{--}40^\circ\text{C}$, 20–70% RH, พลังงานการแผ่รังสี UVB $0\text{--}1.9 \text{ วัตต์/ม.}^2$) โดยปกติแล้วอุณหภูมิที่สูงและความชื้นของแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มอัตราการทำให้ไวรัสหมดความสามารถในการแพร่เชื้อ ซึ่งที่อุณหภูมิภายในอาคารปกติ (20°C) และไม่มีแสงอาทิตย์ พบอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์เฉลี่ย 0.69 ซม.^{-1}

พบอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ที่เพิ่มขึ้นที่ 20°C ภายใต้สภาพแสงอาทิตย์ความเข้มต่ำ (สอดคล้องกับช่วงปลายฤดูหนาว/ต้นฤดูใบไม้ร่วง 7.26 ชม.⁻¹) และความเข้มสูง (สอดคล้องกับฤดูร้อน 18.09 ชม.⁻¹)

การวิเคราะห์หัตถถอยระหว่างจำนวนเคสที่ยืนยันและปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม (กล่าวคือ อุณหภูมิ RH และความชื้นของไอโซน) ของเมืองต่างๆ ในประเทศจีน ระหว่างเดือนมกราคมถึงมีนาคมปี 2020 ยังสนับสนุนถึงผลกระทบของปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมต่อความสามารถในการแพร่เชื้อไวรัสอีกด้วย (Yao และคณะ 2020) ผลลัพธ์ชี้ว่าการแพร่ของ SARS-CoV-2 ได้ลดลงเมื่อระดับความชื้นของไอโซนในสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 48.83 เป็น 94.67 มก./ม.³ และความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจาก 82.67 เหลือ 23.33% และอุณหภูมิลดลงจาก 19 เหลือ 13.17°C (Yao และคณะ 2020)

กล่าวโดยสรุป อัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ปกติของละอองลอยที่มี SARS-CoV-2 ที่มีสภาพสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ (20–23°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (20–70%) ภายในอาคารปกติและไม่มีแสงอาทิตย์ โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ชม.⁻¹ แสงอาทิตย์อาจส่งผลอย่างมากต่อการหมดสภาวะอยู่รอดของเชื้อ SARS-CoV-2 อัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ของละอองลอยที่มีสภาพสมบูรณ์โดยปกติแล้วจะมากกว่า 7 ชม.⁻¹ ภายใต้แสงอาทิตย์ความเข้มต่ำ และมากกว่า 18 ชม.⁻¹ ภายใต้แสงอาทิตย์ความเข้มสูง ซึ่งมีแนวโน้มที่จะใช้เป็นกลยุทธ์เชิงรับเพื่อบรรเทาการแพร่ของไวรัสภายในอาคารได้ อุณหภูมิและความชื้นยังอาจส่งผลให้ละอองลอยที่มีไวรัสหมดความสามารถในการแพร่เชื้ออีกด้วย

ความสามารถในการแพร่ของสายพันธุ์ต่างๆ ของ SARS-CoV-2

มีการพบสายพันธุ์ต่างๆ ของ SARS-CoV-2 ซึ่งหมุนเวียนไปทั่วโลกตลอดการระบาดใหญ่ของโควิด 19 (CDC สหรัฐอเมริกา 2021m) หลักฐานชี้ให้เห็นว่าบางสายพันธุ์เชื่อมโยงกับความสามารถในการแพร่ที่สูงขึ้นและโรคที่ร้ายแรงยิ่งขึ้น เช่น มีการเข้ารับการรักษาในสถานพยาบาลหรือการเสียชีวิตเพิ่มขึ้น และยังอาจทำให้มาตรการที่เคยใช้ก่อนหน้านี้ด้วยประสิทธิภาพพลง (CDC สหรัฐอเมริกา 2021m) ในขณะนี้สายพันธุ์ที่น่ากังวล (VOC) ของ SARS-CoV-2 ได้แก่ สายพันธุ์อัลฟา (B.1.1.7 ซึ่งพบครั้งแรกในสหราชอาณาจักร) สายพันธุ์เบต้า (B.1.351 ซึ่งพบครั้งแรกในแอฟริกาใต้) สายพันธุ์แกมมา (P.1 ซึ่งพบครั้งแรกในประเทศบราซิล) สายพันธุ์เอปซิลอน (B.1.427 และ B.1.429 ซึ่งพบครั้งแรกในรัฐแคลิฟอร์เนีย) และสายพันธุ์เดลต้า (B.1.617.2 ซึ่งพบครั้งแรกในประเทศอินเดีย) การศึกษามากมายได้ช่วยให้ทราบว่าสายพันธุ์เหล่านี้มักมีความสามารถในการแพร่สูงกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม จึงทำให้เกิดความกังวลว่าจะมีการแพร่ระบาดมากขึ้น มีการสังเกตว่าสายพันธุ์อัลฟาสามารถแพร่ได้มากกว่าสายพันธุ์เดิม 43 ถึง 90% (N. Davies และคณะ 2021) มีการประเมินว่าสายพันธุ์เบต้าสามารถแพร่ได้มากกว่าสายพันธุ์เดิม 1.56 เท่า (95% CI 1.50–1.74) เมื่อเทียบกับสายพันธุ์ที่มีการหมุนเวียนก่อนหน้านี้ (Pearson และคณะ 2020) มีการตรวจพบและประเมินว่าสายพันธุ์เอปซิลอนมีความสามารถในการแพร่เพิ่มขึ้น 18.6–24% (Deng และคณะ 2021) และสายพันธุ์เดลต้าซึ่งพบล่าสุดและพบมากที่สุดในขณะนี้มีส่วนในการติดเชื้อกว่า 83% ของผู้ติดเชื้อรายใหม่ในสหรัฐอเมริกา ในเดือนกรกฎาคมปี 2021 (Fry และ Rapp 2021) สายพันธุ์ดังกล่าวมีการติดต่อสูงมาก คือเกือบสองเท่าของสายพันธุ์ดั้งเดิมหรือสายพันธุ์ก่อนหน้านี้ (อัตราส่วนของโอกาส 1.88 (95% CI 0.95–3.76) เมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ดั้งเดิม (Ong และคณะ 2021) หรืออัตราส่วนของโอกาส 1.64 (95% CI 1.26–2.13) เมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์อัลฟา (Hester Allen และคณะ 2021)) รายงานเมื่อไม่นานมานี้ชี้ว่าโดยเฉลี่ยแล้วผู้ติดเชื้อเดลต้ามีปริมาณไวรัสสูงกว่าโควิด 19 สายพันธุ์ดั้งเดิมประมาณ 1000 เท่า (B. Li และคณะ 2021) สายพันธุ์เดลต้าได้กลายเป็นความท้าทายหลักของหลายประเทศในการรับมือโควิด 19 ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีการตระหนักและการศึกษาเกี่ยวกับการแพร่ในรูปแบบผ่านอากาศสำหรับสายพันธุ์เดลต้า

การแพร่ระบาดในสถานการณ์ต่างๆ และบทบาทของการแพร่ผ่านอากาศ

เนื่องจากความแตกต่างอย่างมากของลักษณะการใช้พื้นที่ (เช่น ความหนาแน่น กลุ่มอายุ และพฤติกรรม) รูปแบบของห้อง (เช่น ขนาด และการจัดวางเครื่องเรือน) และลักษณะของการระบายอากาศ (เช่น อัตราการจ่ายอากาศบริสุทธิ์และปริมาณอากาศรวม การกรองอากาศ ลักษณะการกระจายอากาศ และการระบายอากาศตามธรรมชาติ) การแพร่ของไวรัสในสถานการณ์ภายในอาคารจึงมีความแตกต่างกันอย่างมาก การเข้าจัดการเพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการติดเชื้อในสถานการณ์ต่างๆ จึงอาจมีความแตกต่างกันอย่างมาก หน่วยงานสาธารณสุขได้เสนอข้อแนะนำสำหรับสถานการณ์หลักบางรูปแบบ เช่น โรงเรียน วิทยาลัย และที่ทำงาน (CDC สหรัฐอเมริกา 2021a) รายงานฉบับนี้ได้ทำการนับจำนวนเคสโควิด 19 ในสถานการณ์ต่างๆ แต่ยังไม่มีการวิเคราะห์บทบาทของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับการแพร่ของไวรัสในสถานการณ์เหล่านั้น

รายงานฉบับหนึ่งเกี่ยวกับการแพร่ระบาดของโควิด 19 โดยรวมในรัฐโคโลราโดนับตั้งแต่มีการระบาดใหญ่ ได้เปิดเผยสัดส่วนของการแพร่ระบาดในพื้นที่รูปแบบต่างๆ (ข้อมูล ณ วันที่ 26 พฤษภาคม 2021 (CDPHE 2020)) การแพร่ระบาดที่มีการบันทึกมีความเกี่ยวข้องกับการติดเชื้อกว่า 86,000 เคส คิดเป็นประมาณ 16% ของเคสติดเชื้อสะสมทั้งหมดในรัฐโคโลราโด การแพร่ระบาดส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับสถานบริการดูแลระยะยาว โรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย ร้านอาหารและบาร์ ร้านจำหน่ายปลีก และสำนักงาน (ภาพประกอบ 2) นอกจากนี้ การแพร่ระบาดในสถานบริการดูแลระยะยาว (เฉลี่ย 25 เคสต่อการแพร่ระบาด), เรือนจำ (เฉลี่ย 123 เคสต่อการแพร่ระบาด), วิทยาลัยและมหาวิทยาลัย (เฉลี่ย 90 เคสต่อการแพร่ระบาด) และระบบขนส่ง (เฉลี่ย 24 เคสต่อการแพร่ระบาด) โดยปกติแล้วจะมีผู้ติดเชื้อมากขึ้น ข้อมูลในรัฐมิชิแกน (MDHHS 2020) รายงานเพียงการระบาดครั้งใหม่และที่ดำเนินอยู่ในสถานที่ลักษณะต่างๆ เท่านั้น ข้อมูลที่มีการบันทึกไว้ชี้ว่าโรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย โรงงานผลิตและสถานที่ก่อสร้าง สถานบริการดูแลระยะยาว และร้านค้าปลีก กำลังเผชิญความเสี่ยงสูง (ภาพประกอบ 2) ค่าจำกัดความของอาคาร/สถานที่อาจแตกต่างกันเล็กน้อยในข้อมูลแต่ละชุด แต่จะเห็นได้ว่า สถานบริการดูแลระยะยาว โรงงานผลิต เรือนจำ

โรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย วิทยาลัย สถานดูแลสุขภาพและโรงพยาบาล ร้านค้าปลีก ร้านอาหาร และสำนักงาน คือสถานการณ์ทั่วไปที่มีโอกาสพบการแพร่ระบาดสูง แม้รูปแบบของการแพร่ในเคสที่มีการบันทึกเหล่านี้จะมีความซับซ้อนก็ตาม ข้อมูลในรัฐอีลลินอยส์ (IDPH 2020) และหลุยส์เซียนา (LDHH 2020) ได้ชี้ให้เห็นผลลัพธ์ที่คล้ายกัน J. Shen และคณะ (2021) ได้ทำการจำลองการแพร่ผ่านอากาศในสถานการณ์ต่างๆ สำหรับสถานที่ที่พบได้ทั่วไป และได้ประเมินว่า สถานบริการดูแลระยะยาว วิทยาลัย โรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ โรงแรม ร้านอาหาร ป่อน้ำมัน และเรือสำราญ กำลังประสบความเสี่ยงในการติดเชื้อค่อนข้างสูง และมีแนวโน้มสูงที่จะทำให้เกิดการแพร่ระบาดที่รุนแรงรวมไปถึงเหตุการณ์ซูเปอร์สเปรด ซึ่งโดยทั่วไปมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่มีการรายงาน เนื้อหาในหมวดนี้จะพิจารณาสถานการณ์สอดคล้องของการแพร่ระบาดของโควิด 19 จากข้อมูลที่มีการบันทึก และวิเคราะห์บทบาทของการแพร่ผ่านอากาศในการแพร่ของไวรัส

สถานบริการดูแลระยะยาวให้บริการหลายลักษณะ ทั้งด้านการแพทย์และด้านการดูแลส่วนบุคคล สำหรับผู้ที่ต้องพึ่งพาผู้อื่นในการใช้ชีวิต ซึ่งรวมถึงสถานที่ต่างๆ เช่น ศูนย์ดูแลผู้สูงอายุและสถานสงเคราะห์ (CDC สหรัฐอเมริกา 2019) ขณะที่ในสหรัฐอเมริกามีผู้ที่พักอาศัยหรือทำงานในสถานบริการดูแลระยะยาวกว่า 5 ล้านคน (Chidambaram 2020) โควิด 19 ได้ส่งผลกระทบเป็นพิเศษต่อผู้ที่อยู่ในสถานบริการดูแลระยะยาว ทำให้สถานบริการดูแลระยะยาวมีความเสี่ยงอย่างมากต่อการระบาดของโควิด 19 (The New York Times 2020a, 2020b) อัตราการเสียชีวิตของเคสผู้ติดเชื้อที่อาศัยในศูนย์ดูแลผู้สูงอายุในสหรัฐอเมริกาคือเกือบ 11% (CMS สหรัฐอเมริกา 2021) (ณ วันที่ 16 พฤษภาคม 2021) ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยอัตราการเสียชีวิตทั้งประเทศ 1.8% อย่างมาก (WHO 2021a) การศึกษาทั่วโลกได้ตรวจสอบการเสียชีวิตของโควิด 19 ในประเทศรายได้สูงจำนวนหนึ่ง และพบว่า 46% ของการเสียชีวิตทั้งประเทศที่มีการรายงานเกิดขึ้นในศูนย์ดูแลผู้สูงอายุ (ข้อมูล ณ วันที่ 26 มิถุนายน 2020) (Comas-Herrera และคณะ 2020; Gregg Girvan 2020) ในบางประเทศ สัดส่วนนี้อาจมากถึง 80% (Comas-Herrera และคณะ 2020; Gregg Girvan 2020) ใน 13 รัฐของสหรัฐอเมริกา การเสียชีวิตอย่างน้อยครึ่งหนึ่งเกี่ยวข้องกับศูนย์ดูแลผู้สูงอายุ (The New York Times 2020b) ผู้ที่พักอาศัยในสถานบริการดูแลระยะยาวโดยปกติแล้วคือผู้สูงอายุ (83.5% ของผู้ที่พักอาศัยในศูนย์ดูแลผู้สูงอายุมีอายุ 65 ปีขึ้นไป (Harris-Kojetin และคณะ 2019)) ซึ่งอยู่ในกลุ่มเสี่ยงของโรคโควิด 19 และอาจมีความเสี่ยงมากเป็นพิเศษที่จะป่วยด้วยอาการรุนแรงเมื่อติดเชื้อ (F. Li และคณะ 2021) จึงต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเกี่ยวกับการแพร่และการป้องกัน SARS-CoV-2 ในสถานบริการดูแลระยะยาว (D. C Anderson และคณะ 2020)

มีการเสนอว่าการแพร่ผ่านอากาศจะเป็นการแพร่รูปแบบหนึ่งของ SARS-CoV-2 ในสถานบริการดูแลระยะยาว

Mouchtouri และคณะ (2020) ตรวจพบ RNA ของไวรัสในชุดกรองของเครื่องปรับอากาศในห้องผู้ป่วยภายในศูนย์ดูแลผู้สูงอายุแห่งหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกว่าละอองลอยที่มีไวรัสที่ผู้ป่วยที่ติดเชื้อได้ขับออกมาสามารถถ่ายเทตามการไหลของอากาศได้ de Man และคณะ (2020) เสนอว่าการแพร่ระบาดในศูนย์ดูแลผู้สูงอายุมีสาเหตุจากการแพร่ของละอองลอยในสถานการณ์ที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ จากการพิจารณา RNA ของไวรัสที่ตรวจพบในระบบปรับอากาศและการหมุนเวียนอากาศที่ยังไม่ผ่านการกรองของระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ยังมีการรายงานการแพร่ทั้งกลุ่มที่ไม่แสดงอาการและกลุ่มก่อนแสดงอาการเป็นจำนวนมากในสถานบริการดูแลระยะยาว (Dora และคณะ 2020; Kimball และคณะ 2020) ซึ่งสนับสนุนความเป็นไปได้ของการแพร่ผ่านอากาศ (Greenhalgh และคณะ 2021)

สถานบริการดูแลระยะยาวโดยทั่วไปมักมีห้องพักซึ่งมีผู้อยู่อาศัยหนึ่งหรือสองคนจำนวนหลายห้อง (มีห้องนอนและห้องน้ำในตัว) และมีพื้นที่ส่วนกลางอื่นๆ เช่น ห้องอาหาร ห้องนั่งเล่น ห้องกิจกรรม หรือห้องรับรอง ศูนย์ดูแลผู้สูงอายุบางแห่งอาจมีพื้นที่สำหรับกิจกรรมทางการแพทย์เพิ่มเติม สถานบริการดูแลระยะยาวแต่ละแห่งสามารถรองรับจำนวนผู้พักอาศัยได้ต่างกันไป ตั้งแต่ไม่เกิน 20 คน ไปจนถึงกว่า 120 คน (National Institute on Aging 2017) การสำรวจระดับประเทศสำหรับศูนย์ดูแลผู้สูงอายุครั้งหนึ่งในสหรัฐอเมริการะบุว่าจำนวนเฉลี่ยของเตียงต่อศูนย์ดูแลผู้สูงอายุคือประมาณ 107.6 เตียง ซึ่งมีอัตราการพักอาศัยเฉลี่ย 86.3% (National Center for Health Statistics 2004) แสดงถึงจำนวนผู้พักอาศัยเฉลี่ย 93 คนต่อศูนย์ดูแลผู้สูงอายุหนึ่งแห่ง อัตราการพักอาศัยที่สูงและการมีพื้นที่ส่วนกลาง ทำให้สถานบริการดูแลระยะยาวมีความหนาแน่นของการใช้พื้นที่สูง เมื่อพิจารณาเคสไม่แสดงอาการที่มีการรายงานบ่อยครั้ง (Dora และคณะ 2020; Kimball และคณะ 2020) การแพร่ผ่านอากาศในพื้นที่ส่วนกลางจึงมีโอกาสดังกล่าวมีการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอและไม่มีการใช้มาตรการจัดการอย่างเหมาะสม (de Man และคณะ 2020) J. Shen และคณะ (2021) ได้จัดทำโมเดลความเสี่ยงของการติดเชื้อผ่านอากาศในสถานบริการดูแลระยะยาวแห่งหนึ่งซึ่งมีรูปแบบอาคารแบบทั่วไป และเสนอว่าไวรัสจะแพร่ตามการไหลของอากาศในห้องนอนที่มีผู้อยู่อาศัยสองคนและในพื้นที่ส่วนกลาง เช่น ห้องอาหารและห้องบำบัด ระหว่างที่มีการรับประทานอาหารรวมและทำกิจกรรมเป็นกลุ่ม CDC สหรัฐอเมริกา (2021i) ได้แนะนำให้ผู้พักอาศัยสวม PPE ในพื้นที่ส่วนกลางเพื่อควบคุมแหล่งของเชื้อที่อาจมีอยู่ และแนะนำให้พักอาศัยในลักษณะกักตัวโดยใช้ห้องนอนเดี่ยวแทนที่จะเป็นห้องนอนคู่ ควรปรับปรุงการระบายอากาศภายในอาคารเพื่อลดการแพร่ผ่านอากาศของไวรัส เช่น เพิ่มการรับอากาศภายนอกอาคารของระบบปรับอากาศ และใช้ชุดกรองที่มีค่า MERV 13 ขึ้นไปสำหรับระบบอากาศหมุนเวียน (รัฐบาลประเทศแคนาดา 2021; MDH 2021) และยังมีการแนะนำให้ปิดประตูห้องตลอดเวลาเพื่อลดการแพร่ของ SARS-CoV-2 ตามการไหลของอากาศระหว่างห้อง (CDC สหรัฐอเมริกา 2021i) Lynch และ Goring (2020) ได้เสนอขั้นตอนที่นำไปใช้ได้จริงในการปรับปรุงการไหลของอากาศเพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ โดยใช้กลยุทธ์ต่างๆ ซึ่งประยุกต์จากห้องแยกโรคความดันลบในศูนย์ดูแลผู้ป่วยเฉียบพลัน

โรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย

ได้มีการบันทึกการแพร่ระบาดของโควิด 19 ในโรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลายจำนวนมากทั่วโลก (D. Lewis 2020b; Otte Im Kampe และคณะ 2020; Pray และคณะ 2020; Stein-Zamir และคณะ 2020) การศึกษาก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่าการแพร่ระบาดไม่ก็ครั้งที่มีการรายงานในโรงเรียน และการติดเชื้อส่วนใหญ่ที่มีการรายงานในเด็ก ที่จริงแล้วได้รับเชื้อจากที่บ้านของเด็กเอง (ECDC 2020; D. Lewis 2020b; WHO 2020g). แม้แต่ในการแพร่ระบาดที่โรงเรียนก็มีความเป็นไปได้มากกว่าที่พนักงานโรงเรียนจะเป็นพาหะของไวรัส (ECDC 2020; WHO 2020g) การศึกษาจำนวนมากเสนอว่าเด็กๆ มักมีโอกาสดูแลเชื้อน้อยกว่า และแพร่เชื้อได้น้อยกว่า และยังมีแนวโน้มที่จะมีอาการร้ายแรงน้อยกว่าผู้ใหญ่ โดยเฉพาะเด็กเล็ก (อายุ <10 ปี) (ECDC 2020; Goldstein, Lipsitch และ Cevik 2020; Ludvigsson 2020; Viner และคณะ 2020; WHO 2020g) แต่การวิจัยเมื่อไม่นานมานี้เสนอว่าเด็กๆ สามารถแพร่สายพันธุ์อุบัติใหม่ของ SARS-CoV-2 ได้ไม่ต่างจากผู้ใหญ่ (D. Lewis 2021b) ดังนั้น แม้อัตราการเสียชีวิตโดยทั่วไปในเด็กและวัยรุ่นจะต่ำกว่าประชากรกลุ่มอื่นๆ แต่การแพร่ระบาดครั้งใหญ่และอาการป่วยที่รุนแรงหรือแม้แต่การเสียชีวิตก็ยังคงเกิดขึ้นในโรงเรียนได้ โดยเฉพาะหากพิจารณาถึงการอุบัติใหม่ของสายพันธุ์ต่างๆ ที่มีความสามารถในการแพร่สูง เช่นสายพันธุ์เดลตา (Mallapaty 2020; Stein-Zamir และคณะ 2020; Szablewski และคณะ 2020; WHO

2020d) ข้อมูลบ่งบอกว่า 31% ของการแพร่ระบาดครั้งใหม่และที่กำลังดำเนินอยู่ในรัฐมิชิแกน (MDHHS 2020) และ 17% ของการแพร่ระบาดทั้งหมดในรัฐโคโลราโด (CDPHE 2020) เกี่ยวข้องกับโรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย ทำให้โรงเรียนกลายเป็นฮอตสปอตใหม่สำหรับการแพร่ของไวรัส แต่ด้วยข้อมูลที่มีอยู่ ทำให้ไม่สามารถตัดการแพร่ด้วยรูปแบบอื่นๆ (การสัมผัสหรือผ่านละออง) ออกไปได้

หลักฐานชี้ว่าโรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลายจำนวนมากซึ่งใช้กลยุทธ์เชิงป้องกันที่เข้มงวดสามารถเปิดทำการสอนที่โรงเรียนได้อย่างปลอดภัยและยังคงเปิดสอนอยู่ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j) การศึกษาก่อนหน้านี้ในประเทศเกาหลีใต้ (Y. Yoon และคณะ 2020) และประเทศสเปน (Catala และคณะ 2020) พบว่าไม่มีการเพิ่มของการติดเชื้อโควิด 19 อย่างมีนัยสำคัญหลังจากที่เปิดโรงเรียนอีกครั้ง ที่จริงแล้วการปิดโรงเรียนทำให้เกิดความเสี่ยงและผลเสียบางประการต่อนักเรียนและครอบครัวของพวกเขา เช่น ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดูแลเด็กเพิ่มเติม และสูญเสียโอกาสในการเข้าถึงการศึกษา (สาธารณสุขรัฐออนแทรีโอ 2020; สหประชาชาติ 2020; WHO 2020g) WHO เสนอว่าควรพิจารณาปิดโรงเรียนเฉพาะในกรณีที่ไม่มีทางเลือกอื่นเท่านั้น (WHO 2020g) ดังนั้น จำเป็นต้องควบคุมและลดการแพร่ของไวรัสในโรงเรียน เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีต่อสุขภาพและปลอดภัยสำหรับนักเรียนและครู

การศึกษาครั้งหนึ่งในห้องเรียน 101 ห้องของโรงเรียนเอกชน 19 แห่งในนครนิวยอร์ก ได้ทำการประเมินว่าความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศและเปิดเผยว่าการแพร่จากนักเรียนไปยังนักเรียนมีความเป็นไปได้น้อยกว่าการแพร่จากครูไปยังนักเรียน (Pavilonis และคณะ 2021) ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ที่มีการรายงาน (ECDC 2020; WHO 2020g) และผลจากการทำโมเดลอื่นๆ (J. Shen และคณะ 2021) ความหนาแน่นของการใช้พื้นที่ที่สูง เวลาการรับเชื้อที่ยาวนาน และการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอ น่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้มีการแพร่ของไวรัสผ่านอากาศมากขึ้น การศึกษาก่อนหน้านี้ได้ชี้ให้เห็นว่าโรงเรียนส่วนใหญ่ไม่ได้จัดเตรียมการระบายอากาศไว้อย่างเพียงพอ (Fisk 2017) การระบายอากาศที่ไม่ดีในห้องเรียนสามารถเพิ่มความเสี่ยงของการติดเชื้อ (Jones และคณะ 2021) พื้นที่ส่วนกลางอื่นๆ ในโรงเรียน เช่น โรงอาหาร ห้องรับประทานอาหาร และโรงยิม อาจพบความเสี่ยงที่สูงเช่นกัน (J. Shen และคณะ 2021) จึงควรดำเนินกลยุทธ์การป้องกันอย่างเข้มงวดในโรงเรียน Curtius, Granzin และ Schrod (2021) ได้ทดสอบเครื่องฟอกอากาศแบบพกพาในห้องเรียนของโรงเรียนแห่งหนึ่งและเสนอว่าเครื่องฟอกอากาศสามารถลดความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับ SARS-CoV-2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ J. Zhang (2020) ได้เสนอกิจกรรมการควบคุม IAQ จำนวนมาก เช่น การควบคุมแหล่งอากาศ การระบายอากาศ และการฆ่าเชื้อ ทั้งนี้เพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 แบบไม่แสดงอาการในห้องเรียน

A. K. Melikov, Ai และ Markov (2020) ได้เสนอกิจกรรมการเข้าใช้สถานที่แบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับการระบายอากาศ เพื่อลดความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศในห้องเรียน ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงได้อย่างชัดเจน Rothamer และคณะ (2020) ได้เสนอว่าอนุภาคไวรัสสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางไกลในการไหลของอากาศของระบบระบายอากาศในห้องเรียน และยังแนะนำให้สวมหน้ากากเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากให้ดียิ่งขึ้น CDC สหรัฐอเมริกา (2021j) ได้เน้นถึงการสวมหน้ากากและการระบายอากาศที่ดีขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงเช่นกัน และยังเสนอให้ย้ายการทำกิจกรรมที่มีอัตราการหายใจสูง (เช่น การร้องเพลง ตะโกน เล่นดนตรี หรือกีฬาและกายบริหาร) ไปยังพื้นที่ที่มีการถ่ายเทอากาศที่ดีหรือภายนอกอาคาร หากสามารถทำได้ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j) และเสนอให้ปิดพื้นที่ส่วนกลาง เช่น โรงอาหาร ไม่ให้มีการใช้งานร่วมกัน (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j)

วิทยาลัยและมหาวิทยาลัย

เมื่อสิ้นปี 2020 วิทยาลัยและมหาวิทยาลัยกว่า 1,800 แห่งในสหรัฐอเมริกาได้บันทึกว่ามีเคสโควิด 19 ที่ยืนยันแล้ว 397,000 เคส คิดเป็นประมาณ 2.4% ของเคสยืนยันทั้งหมดของประเทศ (W. Cai และคณะ 2020) ขณะที่นักศึกษาและพนักงานในวิทยาลัยและมหาวิทยาลัยมีสัดส่วน ประมาณ 7% ของประชากรทั้งหมดในสหรัฐอเมริกา (Hussar และคณะ 2020; Univstats 2020) แต่เคสเหล่านี้เสียชีวิตน้อยมาก การเสียชีวิตส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาลัยจะเกี่ยวข้องกับพนักงานหรือสมาชิกของคณะ (Hubler และ Hartocollis 2020) วิทยาลัยและมหาวิทยาลัยจำนวนมากในสหรัฐอเมริกาได้เปิดทำการอีกครั้งเป็นบางส่วน แต่ได้ดำเนินมาตรการที่เข้มงวดเพื่อป้องกันการระบาดของโควิด 19 ในวิทยาเขต เช่น การสอนออนไลน์ การเว้นระยะห่างทางสังคม ข้อกำหนดให้สวมหน้ากากอนามัย การติดตั้งฉากกั้น และการปรับปรุงระบบระบายอากาศ (CDC สหรัฐอเมริกา 2020b)

เป็นที่เชื่อกันว่ามาตรการป้องกันที่เข้มงวดซึ่งดำเนินการในพื้นที่เรียนรู้ในวิทยาเขต เช่น ห้องเรียน สำนักงาน และห้องสมุด มีประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากมีการรายงานการแพร่ระบาดที่เกิดขึ้นในพื้นที่เหล่านั้นน้อยมาก (Diep 2020) มีการรายงานการแพร่ระบาดที่บ่อยกว่าในการพบปะทางสังคมนอกวิทยาเขต รวมถึงในหอพักและชมรมกีฬา ซึ่งผู้คนมีแนวโน้มที่จะสวมหน้ากากอนามัยหรือทำการเว้นระยะห่างทางกายภาพน้อยกว่า (Blinder, Higgins และ Guggenheim 2020; Diep 2020; Hubler และ Hartocollis 2020; M. Lewis 2020; Teran และคณะ 2020; E. Wilson และคณะ 2020) การระบายอากาศที่ไม่เพียงพอในพื้นที่ที่มีคนหนาแน่นเหล่านี้ทำให้มีการปนเปื้อนมากขึ้นเนื่องจากการแพร่ผ่านอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการจำลองโดย Gressman และ Peck (2020) ซึ่งชี้ว่าความเสี่ยงจากการสัมผัสในกิจกรรมการศึกษา (ที่เกี่ยวข้องกับห้องเรียนโดยตรง) มีน้อยกว่าความเสี่ยงของการสัมผัสจากการอยู่อาศัยร่วมกันและการสัมผัสจากกิจกรรมขนาดใหญ่ของสังคมรูปแบบอื่นอย่างชัดเจน J. Shen และคณะ (2021) การจำลองยังชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงที่สูงของการแพร่ผ่านอากาศในโรงอาหาร โรงยิม หอพัก และบ้านพักสโมสร ขณะที่บริเวณที่มีการเรียนมีความเสี่ยงค่อนข้างต่ำ ดังนั้น จึงเสนอให้งดการทำกิจกรรมของสังคมในพื้นที่ที่ใช้ร่วมกัน เช่น โรงอาหาร เลานจ์ และโรงยิม หากสามารถทำได้ ไม่เช่นนั้นควรใช้กลยุทธ์เชิงป้องกันที่เข้มงวดในระหว่างที่มีการชุมนุมในสถานการณ์เหล่านี้ ควรกำหนดให้มีการสวมหน้ากากตลอดเวลา ควรเปลี่ยนและปรับปรุงระบบระบายอากาศ เช่น เพิ่มอากาศจากภายนอกอาคาร เพิ่มอัตราการจ่ายอากาศ และใช้ชุดกรองที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อเพิ่มการจ่ายอากาศสะอาดและเจือจางสิ่งปนเปื้อนที่อาจมีอยู่ใน

อาคารของวิทยาเขต (CDC สหรัฐอเมริกา 2020b) แนะนำให้เปิดหน้าต่างหากสภาพอากาศเอื้ออำนวย เพื่อนำอากาศจากภายนอกอาคารเข้ามามากขึ้น ร่วมกับการใช้พัดลมเพื่อเสริมประสิทธิภาพของการเปิดหน้าต่าง (CDC สหรัฐอเมริกา 2020b) และยังแนะนำให้ใช้กลยุทธ์การฟอกและกำจัดเชื้อในอากาศเช่นกัน หากการระบายอากาศไม่เพียงพอ จะต้องลดจำนวนผู้ที่อยู่ในห้องเพื่อรักษาอัตราการระบายอากาศต่อบุคคลให้เพียงพอ (CDC สหรัฐอเมริกา 2020b)

โรงงานผลิต

มีการรายงานถึงการแพร่ระบาดของโควิด 19 ในโรงงานผลิตอย่างกว้างขวางทั่วโลก ทำให้เป็นสอดสปลอดรูปแบบหนึ่งในการระบาดของโควิด 19 (BBC News 2020a, 2020b; Guenther และคณะ 2020; G€unther และคณะ 2020; Middleton, Reintjes และ Lopes 2020; Platsky และคณะ 2020; Richards และ Vassalos 2020; Steinberg และคณะ 2020; Stewart, Kottasova และ Khaliq 2020; Waltenburg และคณะ 2020) จากข้อมูลในสหรัฐอเมริกา โรงงานผลิตได้กลายเป็นหนึ่งในความเสี่ยงหลักของการติดเชื้อโควิด 19 ภายในประเทศตลอดช่วงเวลาของการระบาดใหญ่ (CDPHE 2020; IDPH 2020; MDHHS 2020) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีการบันทึกการแพร่ระบาดหลายครั้งในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ ซึ่งบางแห่งมีการรายงานว่าเป็นเหตุการณ์ซูเปอร์สเปรด ซึ่งอาจทำให้มีผู้ติดเชื้อหลายร้อยคน (Waltenburg และคณะ 2020) เช่น การแพร่ระบาดครั้งหนึ่งในพนักงานที่โรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์แห่งหนึ่งในรัฐเซาธ์ดาโคตา ส่งผลให้มีเคสโควิด 19 ที่ยืนยันแล้ว 929 คน (25.6%) จากพนักงานทั้งหมด 3,635 คน (Steinberg และคณะ 2020) ที่โรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ในรัฐนอร์ทแคโรไลนา พนักงานได้รับผลตรวจเป็นบวกทั้งสิ้น 570 คน (25.4%) จาก 2,244 คน (Tyson Foods Inc 2020) มีการยืนยันการติดเชื้อในพนักงานกว่าครึ่งหนึ่งจาก 300 คนในโรงงานแปรรูปไก่แห่งหนึ่งในรัฐเดลาแวร์ (Steinberg 2020) ในบรรดาพนักงาน 1,216 คนซึ่งทำงานในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์แห่งหนึ่งในรัฐเนแบรสกา ได้รับผลตรวจเป็นบวก 375 คน (31%) (Donahue และคณะ 2020) เมื่อเดือนกรกฎาคม ปี 2020 ทาง CDC สหรัฐอเมริกาได้รายงานการติดเชื้อที่เกี่ยวข้องกับโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ในสหรัฐอเมริกามากกว่า 16,000 ราย และเสียชีวิต 86 ราย (Waltenburg และคณะ 2020) แต่จำนวนเหล่านี้เป็นการประเมินต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากมีเพียง 28 รัฐเท่านั้นที่รายงานข้อมูล ตามข้อมูลสองสัปดาห์สุดท้ายของปี 2020 เคสที่รายงานประมาณ 20.8% ในรัฐหลุยส์เซียนามีความเกี่ยวข้องกับโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงของการติดเชื้อสูงที่สุด (LDHH 2020) แต่การแพร่ผ่านอากาศไม่ได้เป็นสาเหตุเดียวของการระบาดแบบซูเปอร์สเปรดเหล่านี้ เนื่องจากไม่สามารถตัดความเป็นไปได้ของการแพร่ด้วยรูปแบบอื่นๆ

มีการเสนอเหตุผลหลายประการสำหรับการแพร่ระบาดในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ เช่น การทำงานในพื้นที่แออัด สภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงานที่หนาวเย็น การระบายอากาศภายในอาคารที่ไม่ดี พนักงานไม่สวมหน้ากากอย่างเหมาะสมหรือไม่สวมเลย และพนักงานจำเป็นต้องพูดด้วยเสียงดังเนื่องจากมีเสียงรบกวนจากเครื่องจักรในพื้นที่ (Donaldson 2020; Nabarro, Deland และ Lasbennes 2020; Stewart, Kottasova และ Khaliq 2020) บางการศึกษาเชื่อว่าการใช้น้ำแรงดันสูงบ่อยครั้งเพื่อทำความสะอาดพื้นและพื้นผิวต่างๆ ในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์อาจทำให้เกิดละอองและละอองลอยจำนวนมาก ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงของการได้รับละอองโดยการหายใจเข้าไป หากบนพื้นและพื้นผิวต่างๆ มีไวรัสปนเปื้อนอยู่ (Donaldson 2020; Nabarro, Deland และ Lasbennes 2020) การแพร่ระบาดของโควิด 19 ในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์แห่งหนึ่งในประเทศเยอรมนีคือหลักฐานว่าน่าจะมีการแพร่ในรูปแบบผ่านอากาศเป็นระยะไกล (มากกว่า 8 เมตร) ในพื้นที่ปิดทึบ (G€unther และคณะ 2020) ภายในโรงงานเนื้อสัตว์มีปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิต่ำ อัตราแลกเปลี่ยนอากาศต่ำ และการหมุนเวียนอากาศคงที่ มีระยะห่างของพนักงานค่อนข้างน้อย และยังเป็นงานที่ต้องใช้กำลัง ทั้งหมดนี้น่าจะทำให้เกิดปัจจัยที่ไม่พึงปรารถนาซึ่งทำให้อนาคต SARS-CoV-2 มีการแพร่ผ่านละอองลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ (G€unther และคณะ 2020) เชื่อกันว่าปัจจัยเหล่านี้คือสาเหตุของการแพร่ระบาดที่ยังคงดำเนินอย่างต่อเนื่องในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์แห่งอื่นๆ ทั่วโลก (G€unther และคณะ 2020) โมเดลการแพร่ผ่านอากาศยังสนับสนุนอัตราโจมตีที่สูงในโรงงานเนื้อสัตว์อีกด้วย (J. Shen และคณะ 2021)

ในการป้องกันการแพร่ระบาดในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ จะต้องมิกกลยุทธ์ในการป้องกัน เช่น การลดความหนาแน่นของผู้ที่อยู่ในพื้นที่ การสวมหน้ากากอย่างเหมาะสม การแยกพื้นที่ของพนักงานให้ห่างจากกันเพื่อรักษาระยะห่างทางสังคม การติดตั้งฉากกั้นระหว่างพนักงาน การใช้กลยุทธ์ที่ดีขึ้นในการทำความสะอาดและกำจัดเชื้อ และการปรับปรุงระบบระบายอากาศ (CDC สหรัฐอเมริกา 2020f)

ร้านค้าปลีก

ร้านค้าปลีกมักประกอบด้วยร้านหลายประเภท เช่น ร้านขายของชำ ซูเปอร์มาร์เก็ต ร้านอุปกรณ์ปรับปรุงบ้าน และศูนย์การค้า ร้านค้าปลีกจำนวนมาก โดยเฉพาะซูเปอร์มาร์เก็ต ไม่ได้ปิดทำการในระหว่างการระบาดใหญ่ แต่ร้านเหล่านี้ส่วนใหญ่จะลดเวลาทำการหรือจำกัดจำนวนลูกค้าภายในร้าน การมีลูกค้าจำนวนมากที่เข้าและออกจากพื้นที่ในอัตราสูงน่าจะทำให้ร้านค้าปลีกล่อแหลมต่อการระบาดของโควิด 19 โดยเฉพาะสำหรับพนักงานซึ่งมีระยะเวลาทำงานค่อนข้างยาวนานและมีการสัมผัสกับลูกค้าอย่างใกล้ชิด (Chang และคณะ 2020) จากพนักงาน 104 คนในร้านขายของชำแห่งหนึ่งในเมืองบอสตัน มี 21 คน (20.2%) ที่ได้ผลตรวจเป็นบวก ซึ่งสูงกว่าความเสี่ยงโดยเฉลี่ยในชุมชน (Lan และคณะ 2020) ในรัฐโคโลราโด ประมาณ 7% ของเคสการติดเชื้อมีความเกี่ยวข้องกับร้านค้าปลีก ซึ่งเคสส่วนใหญ่เป็นพนักงานในร้านค้าปลีก (CDPHE 2020)

การแพร่ผ่านอากาศน่าจะเป็นรูปแบบการแพร่ของไวรัสในร้านค้าปลีก คลัสเตอร์โควิด 19 ในศูนย์การค้าแห่งหนึ่งในนครเวโนไวจะเกี่ยวข้องกับการแพร่ผ่านละอองลอย (Shao และคณะ 2021) Vuorinen และคณะ (2020) เสนอว่าโอกาสที่จะได้รับเชื้อผ่านอากาศในระหว่างใช้บริการซูเปอร์มาร์เก็ตน่าจะค่อนข้างต่ำ แม้จะมีความหนาแน่นของลูกค้าค่อนข้างสูงก็ตาม สาเหตุหนึ่งคือการอยู่ในพื้นที่เป็นเวลาเพียงสั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่มีการรายงาน (CDPHE 2020) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแต่ละวันมีผู้ที่เข้าใช้บริการซูเปอร์มาร์เก็ตเป็นจำนวนมาก จึงอาจมีลูกค้าที่ได้รับเชื้อจำนวนมากในกลุ่มประชากรขนาดใหญ่ และยังพบด้วยว่าการอยู่ในตลาดเป็นเวลานานจะทำให้ละอองลอยที่มีไวรัสที่สูดเข้า

ไปมีจำนวนมากขึ้น ดังนั้น ลูกค้ายิ่งควรจำกัดความถี่และระยะเวลาในการใช้บริการซูเปอร์มาร์เก็ต หลีกเลี่ยงชั่วโมงเร่งด่วน และลดระยะเวลาที่ใช้ที่เคาน์เตอร์จ่ายเงิน (Vuorinen และคณะ 2020) สำหรับพนักงาน ควรใช้กลยุทธ์การป้องกันที่เข้มงวดเพื่อลดความเสี่ยงของการได้รับเชื้อผ่านอากาศ

สถานดูแลสุขภาพ

พนักงานสุขภาพในสถานดูแลสุขภาพมักพบความเสี่ยงของการได้รับเชื้อโควิด 19 มากเป็นพิเศษในที่ทำงาน เนื่องจากพวกเขามีแนวโน้มที่จะมีการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับผู้ป่วยโควิด 19 มีการรายงานเหตุการณ์ติดเชื้อในพนักงานสุขภาพบ่อยครั้งทั่วโลก (Khurana และคณะ 2020; Koh 2020; Lai และคณะ 2020) ข้อมูลชี้ว่าพนักงานสุขภาพกว่า 328,000 คนในสหรัฐอเมริกาเคยได้รับเชื้อ ในช่วงสิ้นปี 2020 ซึ่งคิดเป็นกว่า 17% ของเคสดูแลสุขภาพทั้งหมด (CDC สหรัฐอเมริกา 2020a) เนื่องจากการรวบรวมข้อมูลมีความไม่สม่ำเสมออย่างมาก การประมาณการนี้จึงอาจประเมินจำนวนพนักงานสุขภาพที่ติดเชื้อน้อยกว่าความเป็นจริง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องให้ความสำคัญและศึกษาเกี่ยวกับการแพร่ของไวรัสในสถานดูแลสุขภาพมากขึ้น ควรใช้กลยุทธ์การป้องกันที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นเพื่อลดอัตราเจ็บป่วยที่สูง

สถานดูแลสุขภาพสามารถแบ่งออกเป็นสถานดูแลสุขภาพสำหรับผู้ป่วยในและผู้ป่วยนอก ซึ่งโดยปกติได้แก่โรงพยาบาลและคลินิกต่างๆ (EIA สหรัฐอเมริกา 2020) มีการตรวจพบ RNA ของไวรัสมากมายในอากาศในสถานที่ของโรงพยาบาล เช่น ห้องผู้ป่วย ICU ห้องนำ โถงทางเดิน และแม้แต่ในห้องถอดชุดป้องกันและสำนักงานเจ้าหน้าที่แพทย์ (Binder และคณะ 2020; Chia และคณะ 2020a; Ding และคณะ 2021; B. Feng และคณะ 2021; Z. D. Guo และคณะ 2020; Jiang และคณะ 2020; Jin และคณะ 2021; Kenarkoohi และคณะ 2020; Lednický และคณะ 2020; Y. Li และคณะ 2020; Moore และคณะ 2021; Razzini และคณะ 2020; Santarpia และคณะ 2020; Stern และคณะ 2021; Tan และคณะ 2020; Zhou และคณะ 2021) และมีการพบไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ในบางตัวอย่าง (Lednický และคณะ 2020; Santarpia และคณะ 2020) ซึ่งเป็นหลักฐานสนับสนุนการแพร่ของไวรัสผ่านอากาศที่เชื่อถือได้ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนที่สูดดมจะมีสาเหตุจากมีผู้ติดเชื้ออยู่อย่างหนาแน่นในโรงพยาบาล และเนื่องจากกระบวนการรักษาที่ก่อเกิดละอองลอย (เช่น การใส่ท่อช่วยหายใจ) ซึ่งสามารถทำให้เกิดละอองลอยที่มีไวรัสเป็นจำนวนมาก แนะนำให้ใช้ความระมัดระวังเกี่ยวกับการแพร่ผ่านอากาศเป็นพิเศษ สำหรับกรณีและสถานที่ที่มีการปฏิบัติขั้นตอนที่ก่อให้เกิดละอองลอย (WHO 2020c) การแพร่ผ่านอากาศยังอาจเกิดขึ้นในสถานที่รักษาผู้ป่วยนอก เช่น คลินิกทันตกรรม แม้ไม่มีการรายงานหลักฐานที่ชัดเจนก็ตาม (Melo และคณะ 2021) ขั้นตอนทางทันตกรรม เช่น การใช้สว่าน เลื่อย และน้ำแรงดันสูง อาจก่อให้เกิดอนุภาคค่อนข้างมากในระยะใกล้ตัวผู้ป่วย ซึ่งทำให้ทันตแพทย์มีความเสี่ยงสูงที่จะได้รับเชื้อ (Cecchi และคณะ 2021) เสนอให้ใช้กลยุทธ์ทั้งการสวมหน้ากากและการกำจัดเชื้อในอากาศเพื่อป้องกันการแพร่ผ่านอากาศที่อาจเกิดขึ้น

สำนักงาน

มีการรายงานการแพร่ระบาดของโควิด 19 ในอาคารสำนักงานทั่วโลก (CDPHE 2020; Loop News 2020; Park และคณะ 2020; Weissberg และคณะ 2020) ข้อมูลชี้ว่าประมาณ 7% ของการแพร่ระบาดที่มีการบันทึกในรัฐโคโลราโดเกิดขึ้นในสถานการณ์ของสำนักงาน (CDPHE 2020) แม้จะไม่มีหลักฐานที่ชัดเจน แต่อัตราเจ็บป่วยที่สูงในศูนย์บริการทางโทรศัพท์แห่งหนึ่งในประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งทำให้พนักงาน 94 จาก 216 คนติดเชื้อ (43.5%) มีความสอดคล้องกับรูปแบบการแพร่ผ่านอากาศในระดับหนึ่ง (Park และคณะ 2020) ซึ่งเป็นการเน้นย้ำว่าการอยู่ในพื้นที่ปิดทึบและการหายใจด้วยอากาศเดียวกันเป็นระยะเวลานานจะทำให้ความเสี่ยงของการได้รับเชื้อและการติดเชื้อเพิ่มขึ้น (ASHRAE 2021) ดังนั้น การแพร่ของไวรัสในพื้นที่สำนักงานจึงน่าจะเกี่ยวข้องกับการที่พนักงานต้องอยู่ร่วมกันภายในพื้นที่ขนาดเล็กและปิดทึบตลอดเวลาทำงาน ซึ่งการเว้นระยะห่างทางสังคมน่าจะทำได้ยาก และการระบายอากาศอาจไม่เพียงพอ จึงแนะนำให้ใช้วิธีระบายอากาศที่ดียิ่งขึ้น เช่น เพิ่มปริมาณอากาศจากภายนอกอาคาร เพิ่มอัตราการจ่ายอากาศ และใช้ชุดกรองประสิทธิภาพสูง เพื่อลดความเสี่ยงในสำนักงาน การระบายอากาศตามธรรมชาติสามารถช่วยเพิ่มการจ่ายอากาศสะอาดได้เช่นกัน และแนะนำให้ใช้เทคโนโลยีการฟอกอากาศแบบสแตนด์อโลน เช่น เครื่องฟอกอากาศแบบพกพา หรือระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้องเช่นกัน นอกจากนี้ การจัดเวลาทำงานให้เหลื่อมกันเพื่อลดจำนวนพนักงานในพื้นที่ส่วนกลาง เช่น ห้องประชุมและห้องรับรอง น่าจะเป็นกลยุทธ์การควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการลดการแพร่ผ่านอากาศ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021f)

เรือนจำ

มีการรายงานการแพร่ระบาดของโควิด 19 ที่เกี่ยวข้องกับเรือนจำอย่างกว้างขวางทั่วโลก ทำให้เป็นข้อด้อยที่สำคัญอีกหนึ่งกรณีของการแพร่ระบาดของโควิด 19 (สภายุโรป 2020; Davlantes และคณะ 2020; Hagan และคณะ 2020; Njuguna และคณะ 2020; Wallace และคณะ 2020a, 2020b) ข้อมูลในสหรัฐอเมริกาเปิดเผยว่ามีการยืนยันผู้ป่วยโควิด 19 กว่า 433,000 รายในเรือนจำ 1,960 แห่งทั่วประเทศเมื่อสิ้นปี 2020 ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 22% ของเคสดูแลสุขภาพทั้งหมดในสหรัฐอเมริกา (The New York Times 2020a; CDC สหรัฐอเมริกา 2020a) แต่อัตราเจ็บป่วยที่สูงของโควิด 19 ในเรือนจำไม่ได้เกี่ยวข้องกับการแพร่ผ่านอากาศเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

เคสที่ยืนยันแล้วส่วนใหญ่ (82.4%) คือผู้ถูกจองจำ (CDC สหรัฐอเมริกา 2020a) เนื่องจากพวกเขาต้องอาศัยอยู่ในพื้นที่ปิดทึบร่วมกันเป็นระยะเวลานาน มีการรายงานการแพร่ระบาดแบบซูเปอร์สเปรดของโควิด 19 จำนวนมากในเรือนจำทั่วโลก (Swinkels 2020) เช่น ประมาณ 10% ของผู้ถูกจองจำ และ 21% ของเจ้าหน้าที่ในเรือนจำในรัฐมิชิแกนได้รับผลตรวจโควิด 19 เป็นบวก ในเดือนมิถุนายน 2020 (Detroit Free Press 2020) ข้อมูลในรัฐโคโลราโดเปิดเผยว่าการแพร่ระบาดในเรือนจำแต่ละครั้งทำให้มีผู้ติดเชื้อโดยเฉลี่ย 123 คน (CDPHE 2020) เรือนจำมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความหนาแน่นของผู้อยู่อาศัยและมีอัตราการเข้าออกพื้นที่สูง มีพื้นที่ไม่เพียงพอต่อจำนวนคน รวมถึงมีการเคลื่อนย้ายภายในอาคารและระหว่างอาคารบ่อยครั้ง (Beaudry และคณะ 2020) นอกจากนี้ ผู้ถูกจองจำ

จำนวนมากมีแนวโน้มที่จะป่วยอย่างรุนแรงเมื่อเป็นโรค เนื่องจากปัญหาสุขภาพที่ซ่อนอยู่และมักเป็นผู้สูงอายุ (Beaudry และคณะ 2020) โดยปกติแล้วเรือนจำจะประกอบด้วยเรือนนอนและพื้นที่ส่วนกลางจำนวนมาก เรือนนอนมักประกอบด้วยพื้นที่สำหรับนอน (ห้องซิงหรือห้องพัก) และห้องกิจกรรมซึ่งมักอยู่ติดกับพื้นที่สำหรับนอน และผู้ถูกจองจำอาจเข้าใช้ห้องกิจกรรมเพื่อทำกิจกรรมในเวลากลางวัน เช่น รับประทานอาหาร อาน้ำ และทำกิจกรรมสันทนาการหรือออกกำลังกาย (NIC สหรัฐอเมริกา 2011) การใช้โมเดลการแพร่ผ่านอากาศชี้ให้เห็นว่าห้องนอนรวมและห้องกิจกรรมซึ่งมีผู้ใช้พื้นที่จำนวนมากอาจทำให้โรคมีการแพร่ระหว่างผู้ถูกจองจำอย่างรวดเร็ว (J. Shen และคณะ 2021) จึงต้องใชกลยุทธ์ควบคุมต่างๆ เช่น การสวมหน้ากาก การปรับปรุงการระบายอากาศ การทำความสะอาดและกำจัดเชื้ออย่างสม่ำเสมอ รวมถึงป้องกันภาวะพื้นที่ไม่เพียงพอต่อจำนวนคน เพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021g)

โรงแรม

CDC สหรัฐอเมริกาเสนอว่าการพักในโรงแรมหรือที่พักรูปแบบอื่นที่มีห้องพักจำนวนมากมีความเสี่ยงสูง ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีการสัมผัสกับบุคคลอื่นๆ (CDC สหรัฐอเมริกา 2020e) อย่างไรก็ตาม ไม่ได้มีการรายงานการแพร่ระบาดของโควิด 19 ในโรงแรมบ่อยครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากผู้บริโภคจำนวนมากยังคงหลีกเลี่ยงการเดินทางเนื่องจากการระบาดใหญ่ที่ยังคงดำเนินอย่างต่อเนื่อง และข้อจำกัดในการเดินทางที่เกี่ยวข้องซึ่งส่งผลให้โรงแรมส่วนใหญ่มีอัตราการเข้าพักน้อยกว่าครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์ปกติ โดยเฉพาะโรงแรมในเขตเมือง (AHLA 2020)

มีการตรวจพบ RNA ของไวรัสในอากาศในห้องสุขาที่ไม่มีการระบายอากาศห้องหนึ่งของห้องพักที่ใช้ในการกักตัวในโรงแรมในประเทศจีน (Ma และคณะ 2020) นอกจากนี้ การศึกษาแบบใช้ข้อมูลในอดีต (Eichler และคณะ 2021) ชี้ว่าละอองลอยน่าจะเป็นรูปแบบการแพร่หลักในโรงแรมที่มีการกักตัวแห่งหนึ่งในประเทศนิวซีแลนด์ ซึ่งพื้นที่ปิดทึบและไม่มีการระบายอากาศในโถงทางเดินของโรงแรมน่าจะเอื้ออำนวยให้เกิดการแพร่เชื้อ ดังนั้น การแพร่ผ่านอากาศจึงน่าจะเป็นหนึ่งในรูปแบบการแพร่ระบาดของ SARS-CoV-2 ในโรงแรม นอกจากห้องพักแล้ว พื้นที่ส่วนกลางของโรงแรม เช่น ลิฟต์และห้องจัดเลี้ยง ก็มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการแพร่ผ่านอากาศเช่นกัน (J. Shen และคณะ 2021) ควรใช้กลยุทธ์การป้องกันที่เข้มงวดในพื้นที่ส่วนกลางเหล่านี้

ร้านอาหารและบาร์

มีการรายงานเคสโควิด 19 จำนวนมากในร้านอาหาร บาร์ หรือร้านกาแฟ (ABC News 2020; Y. Li และคณะ 2020; Lu และคณะ 2020; NBC News 2020) การศึกษาครั้งหนึ่งพบว่าผู้ที่ได้ผลตรวจโควิด 19 เป็นบวกมีแนวโน้มสูงที่จะเกี่ยวข้องกับการรับประทานอาหารในร้านอาหาร บาร์ หรือร้านกาแฟ ก่อนที่จะป่วย ซึ่งบ่งบอกว่าสถานที่เหล่านี้มีความเสี่ยงสูง (Fisher และคณะ 2020) ข้อมูลเปิดเผยว่า 8% ของการแพร่ระบาดในรัฐโคโลราโด (CDPHE 2020) มีการรายงานว่าเกิดขึ้นในร้านอาหารและบาร์ ประมาณ 19.3% ของการแพร่ระบาดของโควิด 19 ที่มีการรายงานในสองสัปดาห์สุดท้ายของปี 2020 ในรัฐหลุยส์เซียนามีความเกี่ยวข้องกับการรับประทานอาหารหรือบาร์ ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีความเสี่ยงหลักอันดับที่สองของรัฐ (LDHH 2020) ดังนั้น ร้านอาหารและบาร์จึงเป็นหนึ่งในฮอตสปอตการระบาดของโควิด 19 ขณะนี้ร้านอาหารและบาร์หลายแห่งได้กลับมาเปิดบริการเต็มรูปแบบหรือบางส่วน แม้จะมีการดำเนินมาตรการป้องกันแล้ว แต่ลูกค้าในร้านที่หนาแน่น มีการสัมผัสอย่างใกล้ชิด และการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอในร้านอาหารและบาร์ ทำให้สถานที่เหล่านี้ยังคงมีความเสี่ยงในการติดเชื้อสูงเป็นพิเศษ โดยเฉพาะหากพิจารณาปัจจัยจากผู้คนที่มักไม่สวมหน้ากากขณะรับประทานอาหารหรือดื่มเครื่องดื่ม ซึ่ง CDC สหรัฐอเมริกา (2021c) ได้ประเมินว่าการรับประทานอาหารที่ร้านโดยนั่งโต๊ะภายในอาคารมีความเสี่ยงสูงและสูงที่สุด

และยังคงแนะนำให้ใช้บริการอาหารบางรูปแบบ เช่น บริการเดลิเวอรี่ การส่งถึงที่พัก การซื้อจากร้าน และการส่งอาหารที่จอดรถ

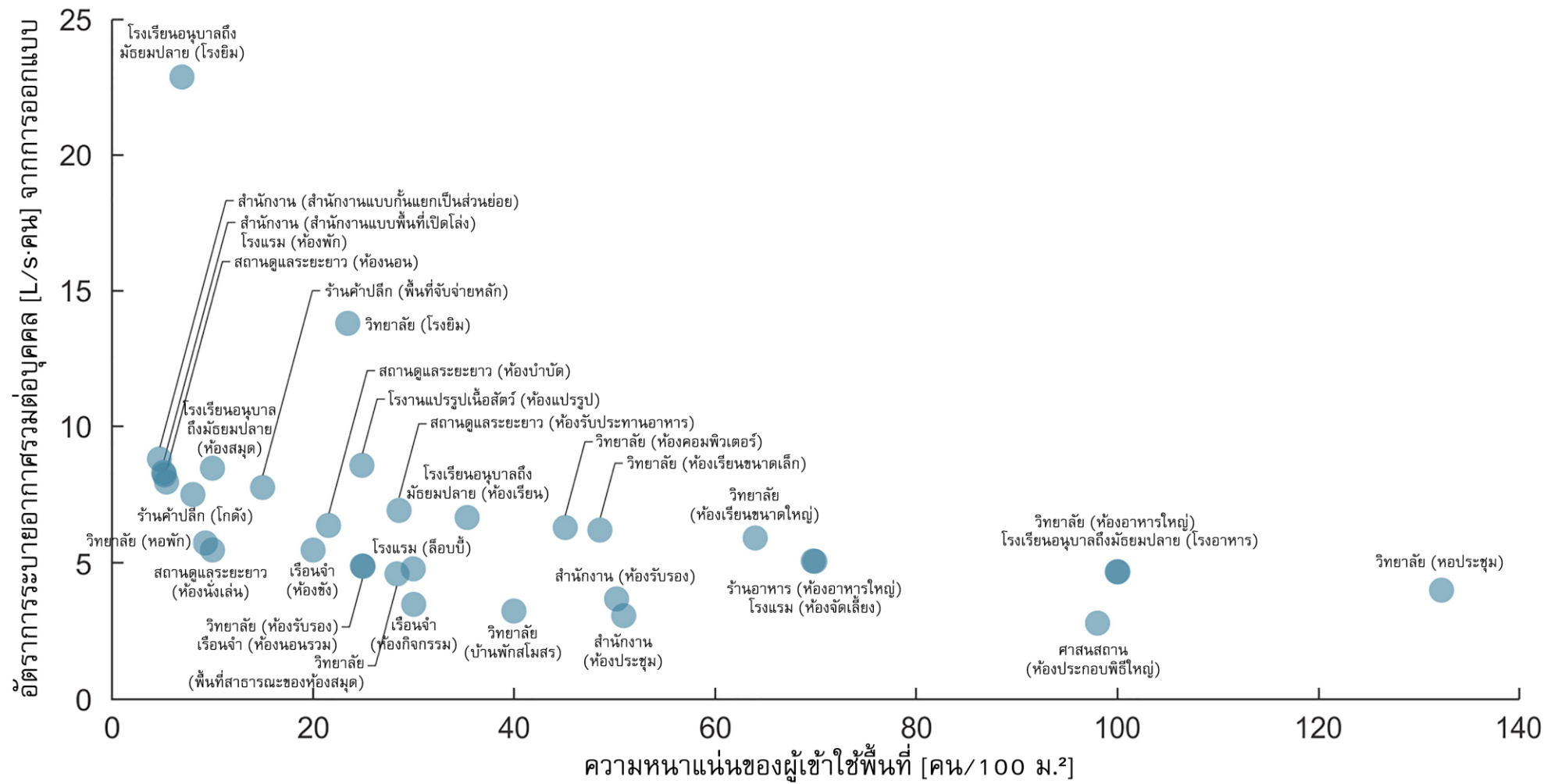
เป็นที่น่าสงสัยว่าการแพร่ผ่านอากาศอาจเกี่ยวข้องกับการแพร่ระบาดในร้านอาหารแห่งหนึ่งในเมืองกว่างโจว (Y. Li และคณะ 2020) และบาร์แห่งหนึ่งในนครโฮจิมินห์ (Chau และคณะ 2021) การจ่ายอากาศสะอาดที่ไม่เพียงพอและการหมุนเวียนอากาศปนเปื้อนทำให้มีความเสี่ยงที่จะมีการติดเชื้อโดยการแพร่ผ่านอากาศมากขึ้น ได้มีการกำหนดให้สวมหน้ากาก ปรับปรุงการระบายอากาศ และใช้เทคโนโลยีการฟอกอากาศและกำจัดเชื้อในอากาศ สำหรับร้านอาหารและบาร์ มีการเสนอให้ติดตั้งจากกัน โดยเฉพาะในบริเวณที่ไม่สะดวกที่จะเว้นระยะห่างระหว่างบุคคลอย่างน้อย 2 เมตร (CDC สหรัฐอเมริกา 2021c)

ศาสนสถาน

สถานที่ที่คนจำนวนมากรวมตัวกันเพื่อทำกิจกรรมทางศาสนา เช่น ห้องสวดมนต์ โบสถ์ มัสยิด สุเหร่ายิว และวัด มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการแพร่ระบาดของโควิด 19 เช่นกัน มีการรายงานการติดเชื้อโควิด 19 อย่างกว้างขวางในสถานที่เหล่านี้ (Conger, Healy และ Tompkins 2020; James และคณะ 2020; Lee และคณะ 2020) ประมาณ 8% ของการแพร่ระบาดของโควิด 19 ที่มีการรายงานในช่วงสองสัปดาห์สุดท้ายของปี 2020 ในรัฐหลุยส์เซียนามีความเกี่ยวข้องกับการไปศาสนสถาน (LDHH 2020) ผู้คนภายในอาคารศาสนสถานที่มีพื้นที่ปิดทึบและมีการระบายอากาศที่ไม่ดีจะได้รับความเสี่ยงสูง โดยเฉพาะหากพิจารณาปัจจัยจากอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการสวดมนต์และการร้องเพลง

เป็นที่สงสัยว่าการแพร่ระบาดบางครั้งในระหว่างกิจกรรมภายในศาสนสถานอาจเกี่ยวข้องกับการแพร่ผ่านละอองลอย Miller และคณะ (2020) ได้เปิดเผยว่าการแพร่ผ่านละอองลอยน่าจะเกิดขึ้นในเหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดที่ Skagit Valley Chorale เนื่องจากการติดต่อผ่านวัตถุปนเปื้อนเชื้อหรือละอองของเหลวไม่จำเป็นใช้อธิบายสาเหตุที่มีการติดเชื้อเป็นกลุ่มใหญ่ในวงประสานเสียงใต้ Katelaris และคณะ (2021) เสนอว่าการแพร่ผ่านอากาศอาจเป็นรูปแบบการแพร่ของไวรัสในระหว่างการร้องเพลงในโบสถ์ของวงประสานเสียงที่ซิดนีย์ เนื่องจากผู้ติดเชื้อบางรายนั่ง

อยู่ห่างจากผู้ป่วยรายแรกถึง 15 เมตรโดยไม่มีการติดต่อทางกายภาพอย่างใกล้ชิด จึงควรส่งเสริมให้สวมหน้ากาก จัดให้มีการทำความสะอาด
การกำจัดเชื้อ และการระบายอากาศที่ดีขึ้นในศาสนสถาน เพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021b)



ภาพประกอบ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของผู้ใช้พื้นที่และอัตราการระบายอากาศรวมต่อบุคคลตามการออกแบบสำหรับสถานการณ์ต่างๆ ตาม ASHRAE 62.1 (ข้อมูลประยุกต์จาก J. Shen และคณะ (2021))

ตาราง 4 อัตราการปล่อยควอนตัม (ER) ของอนุภาค SARS-CoV-2 ในการศึกษาต่างๆ

กิจกรรม	ER [h ⁻¹]	ข้อความนำเสนอ	อ้างอิง
ค่าโดยประมาณจากการวิเคราะห์แบบศึกษาย้อนกลับในเหตุการณ์การแพร่ระบาดจริง			
ยืนและร้องเพลง	970 ± 390	เหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดที่ Skagit Valley Chorale	Miller และคณะ (2020)
ยืนและร้องเพลง	341	เหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดที่ Skagit Valley Chorale	Buonanno, Morawska และ Stabile (2020)
ยืนและร้องเพลง	870	เหตุการณ์ซูเปอร์สเปรดที่ Skagit Valley Chorale	Bazant และคณะ (2021)
นั่งและใช้เสียง	61	เหตุการณ์การแพร่ระบาดที่ร้านอาหารในเมืองกว้างโจว	Buonanno, Stabile และ Morawska (2020)
พักผ่อนและหายใจ	29	การแพร่ระบาดในเมืองอู่ฮั่น	Bazant และคณะ (2021)
พักผ่อนและหายใจ	185.63	เหตุการณ์การแพร่ระบาดในเรือสำราญ Diamond Princess	Chen และคณะ (2021)
ค่าจากการประมาณโดยใช้โมเดลปริมาณไวรัส			
พักผ่อน	<1		Buonanno, Stabile และ Morawska (2020)
ระดับปานกลาง	≤ 100	ค่าโดยประมาณจากปริมาณไวรัสในเสมหะ	
กิจกรรมระดับเบาและเปล่งเสียง	>100		
พักผ่อนและหายใจ/กระซิบ	3	ค่าโดยประมาณจาก cv = 10 ⁹ สำเนา RNA/มล. และ ci = 0.02	Buonanno, Morawska และ Stabile (2020)
ยืนและหายใจ/กระซิบ	3		
กิจกรรมระดับเบาและหายใจ/กระซิบ	9		
พักผ่อนและพูด	50		
ยืนและพูด	56		
กิจกรรมระดับเบาและพูด	142 ^c		
ค่าจากการประมาณโดยใช้วิธีการทางสถิติ			
ไม่มีกิจกรรม	14–48	ค่าโดยประมาณจากการรวมกราฟระหว่าง ER และ R ₀ จากข้อมูลของโรคระบบทางเดินหายใจอื่นๆ (เช่น ไข้หวัดใหญ่และ SARS-CoV-1)	Dai และ Zhao (2020b)

^aการหายใจ/กระซิบ หมายถึงค่าเฉลี่ยระหว่างการกระซิบและการหายใจ (Buonanno, Stabile และ Morawska 2020)

^bการพูด ถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างการพูดปกติและการนับเลขโดยการพูด (Buonanno, Stabile และ Morawska 2020)

^cการศึกษาจำนวนมากใช้คำนี้ (Harrichandra, Ierardi และ Pavilonis 2020; S. Zhang และ Lin 2020)

การศึกษาหนึ่งได้เสนอว่าการแพร่ระบาดของโควิด 19 เนื่องจากการขนส่งจัดเป็นหมวดหมู่หลักลำดับที่สองของการแพร่ระบาด รองจากการระบาดในอาคาร (Qian และคณะ 2020) มีการรายงานการแพร่ระบาดที่เกี่ยวข้องพื้นที่ในการขนส่งอย่างกว้างขวาง เช่น ในเครื่องบิน เรือสำราญ และรถทัวร์ โดยเฉพาะในช่วงแรกของการระบาดใหญ่ (ก่อนมีการจำกัดการเดินทาง) (ASHRAE 2020c; Kasper และคณะ 2020; Khanh และคณะ 2020; Luo และคณะ 2020; Moriarty และคณะ 2020; Y. Shen และคณะ 2020; Xu และคณะ 2020; S. Zhao และคณะ 2020; R. Zheng และคณะ 2020) การศึกษาหนึ่งพบว่ารูปแบบของการขนส่งที่ทำให้ผู้โดยสารต้องอยู่รวมกันในห้องปิดทึบเป็นเวลานาน เช่น รถทัวร์หรือเครื่องบิน มีส่วนอย่างมากในการแพร่ของไวรัส (Sam Schwartz Consulting 2020) แต่สำหรับพื้นที่ที่ผู้โดยสารใช้เวลาอยู่นั้นเพียงไม่นานและมีแนวโน้มที่จะไม่พูดคุยกัน เช่น ระบบขนส่งมวลชน กลับมีความเสี่ยงค่อนข้างต่ำ หากพื้นที่ดังกล่าวมีการถ่ายเทอากาศที่ดี และผู้โดยสารสวมหน้ากากอนามัยอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม หากไม่ใช้มาตรการป้องกัน เช่น การสวมหน้ากาก เว้นระยะห่างทางสังคม หรือปรับปรุงการระบายอากาศ จะมีการแพร่ของไวรัสในระบบขนส่งมวลชนอย่างรวดเร็วได้ดินและรถบัสได้งานเช่นกัน การศึกษาหนึ่งได้เสนอว่าระบบขนส่งมวลชนเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งสำหรับการติดเชื้อ SARS-CoV-2 ในนครนิวยอร์กในช่วงเริ่มแรกของการระบาดใหญ่ (Harris 2020) การขนส่งที่มีการรายงานว่าเป็นฮอตสปอตสำคัญในระหว่างการระบาดใหญ่ได้แก่ อากาศยาน เรือสำราญ รถบัส (เช่น รถบัสประจำทาง รถทัวร์ และรถโรงเรียน) รถไฟใต้ดิน และรถยนต์

ไวรัสมีแนวโน้มที่จะแพร่ผ่านอากาศค่อนข้างน้อยในอากาศยาน เมื่อพิจารณาถึงอัตราการระบายอากาศที่สูง และใช้ชุดกรองที่มีประสิทธิภาพสูงในการหมุนเวียนอากาศ (Gupta, Lin และ Chen 2012) จากการสำรวจครั้งหนึ่งในระบบปรับอากาศของอากาศยาน ในระหว่างเดินทางจะมีอัตราแลกเปลี่ยนอากาศโดยปกติในห้องผู้โดยสารของอากาศยานประมาณ 20 ถึง 25 ชม.⁻¹ (National Research Council 2002) สำหรับอากาศยานสมัยใหม่ อากาศจะไหลผ่านชุดกรอง HEPA ก่อนที่จะกลับเข้าสู่ห้องผู้โดยสาร (WHO 2020a) ซึ่งสามารถขจัดอนุภาคต่างๆ ได้อย่างน้อย 99.9% (ASHRAE 2017) อย่างไรก็ตาม หากไม่มีการควบคุมการไหลของอากาศอย่างเหมาะสม อากาศในห้องผู้โดยสารของอากาศยานอาจมีการผสมกันอย่างมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนระหว่างกันและทำให้ความเสี่ยงในการได้รับเชื้อเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะหากพิจารณาห้องโดยสารซึ่งมีความหนาแน่นของผู้โดยสารสูง (Gupta, Lin และ Chen 2012; Poussou และคณะ 2010) ดังนั้น การแพร่ผ่านอากาศจึงยังคงเป็นหนึ่งในรูปแบบการแพร่ระบาดที่เป็นไปได้ของ SARS-CoV-2 ในอากาศยาน เช่น การแพร่ผ่านละอองลอยน่าจะเกิดขึ้นในบริเวณชั้นธุรกิจในระหว่างเที่ยวบินระยะไกลไปยังประเทศเวียดนาม ซึ่งหนึ่งมีระยะเวลายาวกว่าชั้นประหยัด และมีการติดเชื้อไกลกว่ากฎเว้นระยะ 2 แถวที่นั่งหรือ 2 เมตรตามข้อแนะนำเพื่อป้องกันโควิด 19 อย่างมาก (Khanh และคณะ 2020) การศึกษาจำนวนมากเสนอว่าระบบระบายอากาศที่ปรับให้เหมาะสม เช่น การระบายแบบแทนที่อากาศ การระบายอากาศส่วนบุคคล และการระบายอากาศเฉพาะบริเวณ สามารถลดความเสี่ยงที่จะได้รับเชื้อภายในห้องโดยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Dyert และ Dang 2012; You และคณะ 2019) จะต้องกำหนดให้สวมหน้ากากตลอดเวลา เพื่อการป้องกันที่ดียิ่งขึ้น นอกเหนือจากห้องโดยสารของอากาศยานแล้ว ผู้ที่โดยสารทางอากาศยังต้องใช้เวลาค่อนข้างมากระหว่างที่เข้าแถวตรวจความปลอดภัยและเมื่ออยู่ในเทอร์มินัลของท่าอากาศยาน ขณะที่เครื่องบินจอดหรือแวะพัก ซึ่งอาจทำให้ผู้โดยสารมีการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับบุคคลอื่นๆ ทั้งหมดนี้อาจทำให้การเดินทางทางอากาศมีความเสี่ยงเพิ่มขึ้น มีการตรวจพบ RNA ของไวรัสในอากาศของท่าอากาศยานบางแห่ง (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j) ดังนั้น ขอแนะนำให้ใช้บริการเที่ยวบินที่มีการจอดหรือแวะพักน้อยที่สุด หากสามารถทำได้ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021i)

เรือสำราญเป็นหนึ่งในฮอตสปอตการแพร่ระบาดของโควิด 19 ในช่วงเริ่มแรกของการระบาดใหญ่ การแพร่ระบาดบนเรือสำราญ Diamond Princess และเรือสำราญ Grand Princess ทำให้มีผู้ติดเชื้อรวมมากกว่า 800 คน (Moriarty และคณะ 2020) เชื่อกันว่าเรือสำราญทำให้ประชากรที่มีความหลากหลายจำนวนมากอยู่ในระยะใกล้กันเป็นเวลาหลายวัน จึงเอื้ออำนวยต่อการแพร่ของ SARS-CoV-2 การชุมนุมในพื้นที่ส่วนกลางของเรือสำราญ เช่น ชุมอาหาร โรงอาหาร บอลรูม คาสีโน และโรงมหรสพ (Princess Cruises 2020) อาจทำให้มีการแพร่ของไวรัสระหว่างผู้โดยสารมากขึ้น (Xu และคณะ 2021) การศึกษาครั้งหนึ่งได้เปิดเผยว่าการสุดละอองลอยน่าจะเป็นปัจจัยหลักสำหรับการแพร่ของไวรัสบนเรือสำราญ Diamond Princess แม้จะพิจารณาด้วยสมมติฐานเชิงอนุรักษ์นิยมว่าบนเรือมีอัตราการระบายอากาศสูง และไม่มีกิจกรรมในอากาศสำหรับเรือสำราญ (Azimi และคณะ 2021) การแพร่ของไวรัสที่สูงกว่าที่คาดหมายในห้องโดยสารที่ไม่มีเคสที่ยืนยันแล้วก่อนหน้านี้ในระหว่างที่มีการกักตัวบนเรือสำราญ Diamond Princess สามารถอธิบายได้ด้วยการแพร่ผ่านอากาศโดยผ่านระบบระบายอากาศ (Almilaji และ Thomas 2020) แม้การศึกษาอีกครั้งหนึ่งจะเสนอว่าระบบระบายอากาศส่วนกลางของห้องโดยสารไม่มีส่วนช่วยในการแพร่ของไวรัสระหว่างห้องโดยสารในระหว่างที่มีการกักตัว เนื่องจากไม่พบการแพร่ข้ามห้อง และการติดเชื้อส่วนใหญ่เกิดขึ้นก่อนที่จะมีการกักตัว (Xu และคณะ 2021) เมื่อพิจารณาถึงความเสี่ยงของการติดเชื้อที่สูงบนเรือสำราญ ขอแนะนำว่าทุกคนควรหลีกเลี่ยงการเดินทางด้วยเรือสำราญทั่วโลก รวมถึงการล่องแม่น้ำเช่นกัน (CDC สหรัฐอเมริกา 2021o) จำเป็นต้องบรรเทาความเสี่ยงของการติดเชื้อด้วยการจัดการพื้นที่ส่วนกลางบนเรือสำราญ เช่น การปรับปรุงการระบายอากาศ

การแพร่ผ่านอากาศน่าจะสามารถอธิบายถึงอัตราโจมตีที่สูงอย่างชัดเจนของโควิด 19 บนรถบัส (รถทัวร์และรถมินิบัส) ในมณฑลหูหนาน (Luo และคณะ 2020) และ Zhejiang (Y. Shen และคณะ 2020) ในประเทศจีน นอกจากนั้น มีการตรวจพบ RNA ของไวรัสในละอองลอยในอากาศที่เก็บรวบรวมจากรถบัสประจำทาง (Hadei และคณะ 2021; Moreno และคณะ 2021) ดังนั้น ผู้โดยสารบนรถบัส ทั้งรถทัวร์ รถบัสประจำทาง และรถโรงเรียน อาจประสบความเสี่ยงในการได้รับเชื้อไวรัสอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยปกติรถทัวร์น่าจะมีความเสี่ยงสูงเนื่องจากใช้เวลาในการเดินทาง ขณะที่รถบัสประจำทางและรถโรงเรียนมีความเสี่ยงค่อนข้างน้อยกว่า เนื่องจากโดยปกติจะใช้เวลาในการเดินทางสั้นกว่า (J. Shen และคณะ 2021) จึงเสนอให้ปรับปรุงการระบายอากาศบนรถบัส เนื่องจากสามารถลดความเสี่ยงได้อย่างมาก (Moreno และคณะ 2021) ลักษณะการจ่ายอากาศมีบทบาทสำคัญต่อรูปแบบของการไหลของอากาศและการกระจายของอนุภาคที่มีไวรัสภายในรถบัส (Yang และคณะ 2020) แนะนำให้จ่ายอากาศไปทางด้านหลังเพื่อลดการแพร่ของละอองของเหลวที่มีไวรัส (Yang และคณะ 2020) หาก

สภาพอากาศเอื้ออำนวย สามารถเปิดหน้าต่างเพื่อเพิ่มการระบายอากาศในห้องโดยสารได้ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j) แม้ประโยชน์ที่ได้รับไม่ได้ส่งผลถึงผู้โดยสารทุกคนบนรถโดยสารอย่างเท่าเทียมกัน (ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลของอากาศที่แน่ชัด) (Z. Zhang และคณะ 2021) แนะนำให้สวมหน้ากากตลอดเวลาเมื่อใช้บริการขนส่งสาธารณะ แนะนำให้ผู้โดยสารนั่งบนที่นั่งซึ่งไม่ติดกัน (Yang และคณะ 2020) นอกจากนี้ผู้โดยสารควรหลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารหรือดื่มเครื่องดื่มบนระบบขนส่งสาธารณะ เนื่องจากจำเป็นจะต้องถอดหน้ากากเป็นเวลาครู่หนึ่ง (CDC สหรัฐอเมริกา 2021k) นอกจากนี้ แนะนำให้ผู้คนลดความเสี่ยงของการใช้บริการขนส่งสาธารณะ เช่น รถบัส

มีการตรวจพบ RNA ของไวรัสผ่านอากาศทั้งในสถานีรถไฟใต้ดินและบนขบวนรถ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j) อย่างไรก็ตาม การแพร่ผ่านอากาศมีแนวโน้มไม่มากนักที่จะเกิดขึ้นบนขบวนรถไฟใต้ดิน เนื่องจากระบบระบายอากาศมักสามารถจ่ายอากาศที่ค่อนข้างสะอาดให้กับผู้โดยสารได้ (J. Shen และ Gao 2019) และผู้คนมักใช้เวลาในการอยู่บนขบวนรถไฟใต้ดินเพียงสั้นๆ เท่านั้น แต่การผสมกันของอากาศภายในขบวนรถอาจส่งผลให้มีการปนเปื้อนระหว่างกัน และส่งผลให้ความเสี่ยงของการได้รับเชื้อเพิ่มขึ้น ผู้โดยสารควรหลีกเลี่ยงการใช้ระบบขนส่งสาธารณะ และควรสวมหน้ากากตลอดเวลาในการเดินทาง

การเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล แท็กซี่ และใช้รถคันเดียวกัน อาจมีความเสี่ยงสูงในการได้รับเชื้อ SARS-CoV-2 เนื่องจากการแพร่ผ่านอากาศ มีการตรวจพบไวรัสที่แพร่เชื้อได้ในอนุภาคในอากาศที่มีขนาดตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.5 μm ในรถยนต์คันหนึ่งที่ผู้ป่วยโควิด 19 ขับ (Lednicky และคณะ 2021) พื้นที่ขนาดเล็กของห้องโดยสารของรถยนต์ที่มีผู้โดยสารอยู่กันอย่างหนาแน่นอาจทำให้อากาศมีการปนเปื้อนและผสมกันได้อย่างง่ายดาย ผู้โดยสารอาจได้รับอากาศที่มีการปนเปื้อนอย่างมาก ดังนั้น จำเป็นต้องสวมหน้ากากเพื่อลดการได้รับเชื้อ และยังแนะนำให้ปรับปรุงการระบายอากาศภายในรถยนต์หากสามารถทำได้ เช่น โดยเปิดหน้าต่างหรือตั้งคาร์เบทปรับอากาศเป็นโหมดที่ไม่มีการหมุนเวียนอากาศ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021k) รูปแบบที่ดีที่สุดก็คือ ควรเปิดหน้าต่างทุกบานให้สุดหากสามารถทำได้ หากไม่สามารถทำได้ ควรเปิดหน้าต่างสองบาน โดยควรเปิดบานหนึ่งที่ด้านหลังและอีกบานหนึ่งที่ด้านหน้า (Mathai และคณะ 2021) การแพร่ผ่านละอองลอยในลานจอดรถกลางแจ้งน่าจะเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากเป็นสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เว้นแต่จะมีการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับผู้ติดเชื้อ แต่การแพร่ผ่านอากาศมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่จอดรถใต้ดินซึ่งมีพัดลมผลักอากาศ (Nazari และคณะ 2021) บริเวณที่อยู่ใกล้แหล่งจ่ายอากาศจากภายนอกจะมีความปลอดภัยมากกว่าบริเวณอื่นๆ การติดตั้งระบบ UVGI และชุดกรอง HEPA ภายในพัดลมผลักอากาศสามารถช่วยกำจัดไวรัสได้

การวิเคราะห์ข้างต้นเกี่ยวกับการแพร่ระบาดในสถานการณ์ภายในอาคารรูปแบบต่างๆ แสดงให้เห็นว่าการแพร่ผ่านอากาศน่าจะมีบทบาทสำคัญ ความเสี่ยงของการติดเชื้อเนื่องจากการแพร่ผ่านอากาศในสถานการณ์ต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะการเข้าใช้สถานที่ รูปแบบของห้อง รูปแบบของการระบายอากาศ ลักษณะการกระจายอากาศ และการจัดการด้วยวิธีต่างๆ การจัดการซึ่งสามารถลดการแพร่ผ่านอากาศจะช่วยลดความเสี่ยงของการติดเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ การระบายอากาศภายในอาคารคือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงในการติดเชื้อ ข้อแนะนำด้านการออกแบบการระบายอากาศภายในอาคาร ASHRAE 62.1 (2019) ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ช่วยในการควบคุมอัตราการระบายอากาศต่ำสุดของอาคารรูปแบบต่างๆ ตามค่าประมาณการของการระบายอากาศต่อบุคคลที่จำเป็นและพื้นที่ของชั้นอาคาร ดังนั้น เมื่อใช้มาตรฐาน ASHRAE 62.1 ห้องขนาดเล็กจะมีข้อเสียเปรียบ เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงของจำนวนผู้เข้าใช้สถานที่ต่อขนาดพื้นที่ชั้นอาคาร จะทำให้มีการระบายอากาศน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับห้องขนาดใหญ่ (ที่มีจำนวนผู้เข้าใช้สถานที่เท่ากัน) ภาพประกอบ 3 แสดงอัตราการระบายอากาศโดยรวมต่อบุคคล ซึ่งประมาณค่าจาก ASHRAE 62.1 ในสถานการณ์ทั่วไปที่มีความหนาแน่นของผู้เข้าใช้สถานที่ระดับต่างๆ (J. Shen และคณะ 2021) โดยปกติแล้วอากาศที่จ่ายให้กับแต่ละบุคคลในสถานการณ์ที่มีความหนาแน่นของผู้เข้าใช้สถานที่สูงจะน้อยกว่าการจ่ายอากาศในสถานการณ์ที่มีความหนาแน่นของผู้เข้าใช้สถานที่ต่ำกว่า ดังนั้น การระบายอากาศที่ออกแบบตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 จึงอาจไม่เพียงพอสำหรับผู้เข้าใช้สถานที่เสมอไป โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงข้อกำหนดสำหรับการบรรเทาความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว หลักเกณฑ์การออกแบบการระบายอากาศภายในอาคารซึ่งอิงแหล่งจุลชีพก่อโรคหรืออิงสุขภาพอาจจะเป็นหลักการที่มีความเหมาะสมมากกว่าในการป้องกันการติดเชื้อ ยังจำเป็นต้องใช้ความพยายามมากขึ้นในการออกแบบการระบายอากาศภายในอาคารเพื่อป้องกันการแพร่เชื้อ (Morawska และคณะ 2021)

โมเดลสำหรับการประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศ

จำเป็นต้องมีการประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เพื่อออกแบบกลยุทธ์การควบคุมเพื่อลดความเสี่ยง โมเดลที่ใช้มากที่สุดในการประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศในพื้นที่ปิดทึบคือ โมเดล Wells-Riley ซึ่งถือว่าอากาศในพื้นที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ในสถานะเสถียร (E. C. Riley, Murphy และ Riley 1978; Wells 1955) นักวิจัยบางรายได้ขยายโมเดลนี้เพื่อให้รวมถึงการได้รับเชื้อในสถานะไม่เสถียร (Gammaitoni และ Nucci 1997) และมีการผสมที่ไม่สมบูรณ์ (Ko และคณะ 2001, Ko, Thompson และ Nardell 2004) และได้นำมารวมกับการทำโมเดลแบบแปรปรวน (Noakes และ Sleight 2009) ความเสี่ยงของการติดเชื้อที่คำนวณได้จากโมเดล Wells-Riley ขึ้นอยู่กับการได้รับเชื้อของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อซึ่งสุดท้ายได้รับจุลชีพก่อโรคที่ก่อเกิดจากผู้แพร่เชื้อ (Stephens 2013; Sze To และ Chao 2010)

โมเดลนี้ได้มีการนำไปปรับใช้อย่างกว้างขวางเพื่อประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับโรคระบบทางเดินหายใจหลายชนิด เช่น ไข้หวัดใหญ่ ทุเบอร์คูโลซิส โรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง (SARS-CoV-1) โรคทางเดินหายใจตะวันออกกลาง (MERS) และโรคหัด (S. C. Chen และ Liao 2008; Qian และคณะ 2009; Stephens 2013; Yates และคณะ 2016; Zemouri และคณะ 2020) การศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ยังได้ใช้โมเดล Wells-Riley ในการประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับ SARS-CoV-2 ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

อีกด้วย เช่น Dai และ Zhao (2020b) ได้ใช้โมเดลนี้เพื่อประเมินอัตราการระบายอากาศที่จำเป็นในสถานการณ์ทั่วไปในรูปแบบ เพื่อให้มั่นใจว่ามีความน่าจะเป็นของการติดเชื้อต่ำกว่า 1% Harrichandra, Ierardi และ Pavilonis (2020) ได้ประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับ SARS-CoV-2 ในร้านทำเล็บในนครนิวยอร์กโดยใช้โมเดล Wells-Riley และได้ประเมินว่าการสวมหน้ากากส่งผลต่อความเสี่ยงอย่างไร J. Shen และคณะ (2021) ได้ใช้โมเดลดังกล่าวในการประเมินความเสี่ยงในสถานการณ์ 18 รูปแบบสำหรับสถานที่ทั่วไป และพบว่ามีความเสี่ยงของการติดเชื้อสูงในสถานบริการดูแลระยะยาว วิทยาลัย โรงเรียนเนื้อสัตว์ โรงแรม ร้านอาหาร คาสิโน และเรือสำราญ Pavilonis และคณะ (2021) ได้ประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อผ่านละอองลอยสำหรับ SARS-CoV-2 ในโรงเรียนรัฐในนครนิวยอร์กระหว่างที่กลับมาเปิดเรียนอีกครั้ง และได้เปิดเผยว่าความเสี่ยงของการแพร่จะสูงเป็นพิเศษในระหว่างฤดูที่ต้องใช้ระบบทำความร้อนและในอาคารที่สร้างใหม่ Stabile และคณะ (2021) ได้ประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศในโรงเรียน และได้เสนอกลยุทธ์การควบคุมแบบป้องกันซึ่งไม่เคยมีมาก่อน โดยใช้ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเฝ้าสังเกตและปรับกระบวนการระบายอากาศเพื่อลดการแพร่ผ่านอากาศ Peng และ Jimenez 2021) ได้พัฒนาโมเดลต้นแบบและหาวิธีเพื่อการวิเคราะห์ตามค่า CO₂ ซึ่งเป็นค่าตัวแทนความเสี่ยงสำหรับการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อโควิด 19 และได้นำไปใช้ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารทั่วไปรูปแบบต่างๆ

โมเดล Wells-Riley สามารถประเมินความเสี่ยงโดยใช้สมมติฐานว่าอากาศมีการผสมโดยสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้วอากาศในสภาพแวดล้อมภายในอาคารไม่ได้ผสมกันอย่างสมบูรณ์ โดยปกติการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับผู้ที่ติดเชื้อจะทำให้มีการสูดหายใจรับละอองลอยที่มีไวรัสมากขึ้น ขณะที่การอยู่ในระยะห่างจากผู้แพร่เชือน่าจะเป็นการลดการได้รับเชื้อ เนื่องจากอนุภาคไวรัสมีการเจือจางโดยการระบายอากาศและการเกาะตัว รวมถึงการถูกทำให้หมดฤทธิ์ตามธรรมชาติ แต่การหมุนเวียนอากาศในพื้นที่อาจนำละอองลอยที่มีไวรัสไปยังบริเวณที่อยู่ไกลออกไปได้ (Y. Li และคณะ 2020) ดังนั้น รูปแบบการไหลของอากาศในพื้นที่รวมถึงตำแหน่งของผู้ติดเชื้อและผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อจึงส่งผลกระทบต่อการกระจายเชิงพื้นที่ของไวรัส เพื่อให้ความเสี่ยงของการได้รับเชื้อมีการพิจารณาถึงการกระจายเชิงพื้นที่ของความเสี่ยงในการได้รับเชื้อ สามารถรวมอากาศส่วนที่หายใจเข้าไปในโมเดล Wells-Riley ได้ ซึ่งเป็นสัดส่วนของอากาศที่ผู้แพร่เชื้อหายใจออกมาและมีการหายใจรับเข้าไป (Rudnick และ Milton 2003) นักวิจัยคนอื่นๆ ได้ใช้วิธีการที่คล้ายกันเพื่อประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อสำหรับโควิด 19 (J. Shen และคณะ 2021; Sun และ Zhai 2020) เมื่อทราบปริมาณละอองลอยที่เกิดจากผู้แพร่เชื้อและผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อสูดเข้าไปในตำแหน่งเชิงพื้นที่ที่เจาะจง จะสามารถประเมินความเสี่ยงในการได้รับเชื้อของผู้มีโอกาสติดเชื้อโดยใช้โมเดล Wells-Riley ได้ (Sze To และ Chao 2010) ซึ่งทำได้โดยการตรวจวัดแก๊สตามรอย ในการศึกษาอื่นๆ บางส่วนได้ทำการจำลอง CFD เพื่อหาการกระจายความเข้มข้นเชิงพื้นที่ของไวรัส และนำไปรวมไว้ในโมเดล Wells-Riley เพื่อประเมินการกระจายความเสี่ยงในการได้รับเชื้อเชิงพื้นที่ภายในพื้นที่นั้นๆ (Gao และคณะ 2008; Qian และคณะ 2009; Tung และ Hu 2008) ได้มีการจำลอง CFD ในสถานการณ์ต่างๆ เช่น ร้านอาหาร ห้องเรียน ร้านขายของชำ รถบัส รถยนต์ ลิฟต์ แผนกในโรงพยาบาล และที่จอดรถใต้ดิน เพื่อประเมินการกระจายความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของ SARS-CoV-2 (Dbouk และ Drikakis 2021; Y. Guo และคณะ 2021; Y. Li และคณะ 2020; h. Liu และคณะ 2021; Mathai et al. 2021; Nazari และคณะ 2021; Shao และคณะ 2021; Yang และคณะ 2020; Z. Zhang และคณะ 2021)

โมเดล Wells-Riley

โมเดล Wells-Riley เป็นโมเดลคลาสสิกในการประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อโดยการแพร่ผ่านอากาศในสถานะเสถียรในพื้นที่ที่อากาศมีการผสมอย่างสมบูรณ์ (E. C Riley, Murphy และ Riley 1978; Wells 1955) ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อ (P) ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินเคสติดเชื้อใหม่ (NC) จากเคสที่มีโอกาสติดเชื้อ (NS) จะได้รับการคำนวณโดยสัมพันธ์กับปริมาณการได้รับจากการหายใจเข้า (E. C Riley, Murphy และ Riley 1978) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้แพร่เชื้อ (I) อัตราการปล่อยควอนตัมที่แพร่เชื้อได้ของผู้แพร่เชื้อแต่ละคน (ER) สัดส่วนอนุภาคแพร่เชื้อได้ที่สามารถทะลุผ่านหน้ากากได้ (R) อัตราการหายใจเข้า (IR) เวลาการได้รับเชื้อ (t) และอัตราการระบายอากาศของห้องด้วยการป้อนอากาศสะอาด (Q):

$$P = \frac{N_C}{N_S} = 1 - e^{-R \frac{I \cdot ER \cdot IR \cdot t}{Q}}$$

หนึ่งควอนตัมในโมเดลคือปริมาณเชื้อที่ทำให้ประชากร 63% ติดเชื้อจากการได้รับเชื้อ ตามโมเดล Wells-Riley (E. C Riley, Murphy และ Riley 1978) ซึ่งอธิบายจำนวนอนุภาคที่แพร่เชื้อได้พร้อมสื่อโดยนัยถึงจำนวนและความสามารถในการแพร่เชื้อของอนุภาคไวรัส (ซึ่งช่วยให้ทราบผลของขนาดอนุภาคและความน่าจะเป็นในการเกาะตัวในบริเวณที่เหมาะสมของระบบทางเดินหายใจเช่นกัน) (Stephens 2012) หน่วยของอัตราการปล่อยควอนตัมคือ ควอนตัมต่อชั่วโมง (ชม.⁻¹) และขนาดของค่าจะขึ้นอยู่กับชนิดของโรค กิจกรรมของผู้แพร่เชื้อ (เช่น หายใจ ไอ) และการควบคุม ซึ่งอาจแตกต่างกันอย่างมากในแต่ละกรณี (Buonanno, Stabile และ Morawska 2020; Stephens 2012)

อัตราการปล่อยควอนตัมสามารถประมาณได้จากปริมาณไวรัสภายในปากของผู้ติดเชื้อ (Buonanno, Stabile และ Morawska 2020) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 1 อีกวิธีหนึ่งในการประมาณอัตราการก่อเกิดควอนตัมคือ การวิเคราะห์แบบศึกษาย้อนกลับจากเหตุการณ์การแพร่ระบาดจริง อัตราการก่อเกิดควอนตัมสามารถคำนวณย้อนกลับได้เมื่อทราบอัตราโจมตี กิจกรรมของผู้เข้าใช้สถานที่ ลักษณะห้อง และรูปแบบการระบายอากาศของการแพร่ระบาดที่ทำการศึกษานอกจากนี้ ได้มีการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประมาณค่าอัตราการก่อเกิดควอนตัมของ SARS-CoV-2 จากความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (R₀) และ ER ของโรคระบบทางเดินหายใจอื่นๆ อัตราการก่อเกิดควอนตัมโดยประมาณของ SARS-CoV-2 จากการใช้วิธีการต่างๆ ในการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้ระบุไว้ในตารางที่ 4

อัตราการระบายอากาศของห้องด้วยการป้อนอากาศสะอาดในโมเดล Wells-Riley จะระบุถึงปริมาณอากาศบริสุทธิ์/ปราศจากไวรัสทั้งหมดที่จ่ายให้กับห้อง ซึ่งรวมถึงอากาศจากภายนอกอาคารและอากาศหมุนเวียนของระบบระบายอากาศที่ผ่านการกรอง/กำจัดเชื้อ อากาศจากภายนอกอาคารที่ได้รับจากการระบายอากาศตามธรรมชาติ อากาศสะอาดที่ได้รับจากเครื่องฟอกอากาศแบบพกพา การขจัดอนุภาคที่มีไวรัสด้วยระบบ UVGI การเกาะตัวของอนุภาค และการถูกทำให้หมดฤทธิ์ตามธรรมชาติ อากาศภายนอกอาคารเป็นอากาศที่สะอาดและปลอดภัยสำหรับใช้ในการระบายอากาศภายในอาคาร ยกเว้นในกรณีที่ภายนอกอาคารมีแหล่งการปล่อยอากาศที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมาก (Setti และคณะ 2020b)

ตาราง 5 กลยุทธ์การควบคุม IAQ เพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศ

หมวดหมู่	กลยุทธ์	ประสิทธิภาพ	สเกลประสิทธิภาพ	ต้นทุนค่าลงทุน ^a	ความคงทน	การจัดหา
PPE	หน้ากากผ้า	ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 30% สำหรับหน้ากากที่มีวางจำหน่าย (พิจารณาถึงการรั่วตามช่องว่างเนื่องจากความไม่กระชับพอดี) (Konda และคณะ 2020); ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 20% สำหรับหน้ากากแบบประดิษฐ์เอง (วัสดุเป็นผ้าฝ้ายและไนลอน) (M. Zhao และคณะ 2020)	บริเวณระดับหายใจ	US\$3/หน่วย (ซื้อ); US\$0/หน่วย (ประดิษฐ์เอง)	ใช้ซ้ำได้	ง่าย ^b ; ประดิษฐ์เอง (โดยใช้วัสดุในครัวเรือน เช่น ผ้าฝ้ายและไนลอน (A. Davies และคณะ 2013)); ควรพิจารณาถึงความสบาย
	หน้ากากแพทย์	ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 50% (พิจารณาถึงการรั่วตามช่องว่างเนื่องจากความไม่กระชับพอดี) (Konda และคณะ 2020; Rothamer และคณะ 2020)	บริเวณระดับหายใจ	US\$0.2/หน่วย	ใช้แล้วทิ้ง ^c	ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดหา (ได้แก่ สถานการณ์ปกติ เหตุฉุกเฉิน และเหตุวิกฤติ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021 d)); ควรพิจารณาถึงความสบาย
	หน้ากาก N95	ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค 50% (พิจารณาถึงการรั่วตามช่องว่างเนื่องจากความไม่กระชับพอดี) (Konda และคณะ 2020; Rothamer และคณะ 2020)	บริเวณระดับหายใจ	US\$2/หน่วย	ใช้แล้วทิ้ง ^c	ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดหา (ได้แก่ สถานการณ์ปกติ เหตุฉุกเฉิน และเหตุวิกฤติ (CDC สหรัฐอเมริกา 2021d)); ควรพิจารณาถึงความสบาย;
	หน้ากากครอบเต็มหน้า	ลดการสูดละอองลอยได้ 23% เมื่อใช้เป็นเวลานาน (ลดละอองลอยได้มากขึ้นในกรณีที่ใส่ในระยะใกล้) (Lindsley และคณะ 2014)	บริเวณระดับหายใจ	US\$2/หน่วย	ใช้ซ้ำได้	ง่าย; ประดิษฐ์เอง (โดยใช้แผ่นพลาสติกและวัสดุอื่นๆ);
	โครงรัดหน้ากาก/ซิล/โครงเสริม ^e	ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหน้ากากได้อย่างมาก โดยลดการรั่วผ่านช่องว่าง (เช่น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากแพทย์ได้กว่า 90% (Rothamer และคณะ 2020))	บริเวณระดับหายใจ	US\$9/หน่วย (ซื้อ (UW Madison 2020)); US\$0/หน่วย (ประดิษฐ์เอง)	ใช้ซ้ำได้	ง่าย; ประดิษฐ์เอง (โดยใช้ยางหรือวัสดุอื่นๆ (ประกอบเข้ากับหน้ากาก 2020)); ความสบายลดลง
การระบายอากาศ	การปรับปรุงชุดกรองระบบระบายอากาศ (เช่น HEPA) ของอาคาร	ประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคขนาด >0.3 มม. ได้ 99.9% (ชุดกรอง HEPA)	อาคาร	US\$280/หน่วย (พัดลมใช้พลังงานมากขึ้นเนื่องจากต้องใช้แรงดันสูงขึ้นในการจ่ายผ่านชุดกรองที่มีอัตราการกรองสูงขึ้น (Risbeck และคณะ 2021))	เปลี่ยนทุก 6–12 เดือน	ง่าย
	เพิ่มการจ่ายอากาศจากภายนอกอาคารของระบบระบายอากาศอาคาร (เช่น ใช้อากาศจากภายนอกอาคาร 100%)	เพิ่มอัตราการระบายอากาศของห้องอย่างมาก (เช่น ได้รับอากาศสะอาดมากขึ้น 60% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอ้างอิงซึ่งรับอากาศจากภายนอกอาคาร 25% และใช้ชุดกรอง MERV 8)	อาคาร	US\$5/ม. ² -ปี สำหรับการเพิ่มพลังงานที่เพิ่มขึ้น (ระบบส่วนกลาง); US\$10/ม. ² -ปี สำหรับการเพิ่มพลังงานที่เพิ่มขึ้น (อุปกรณ์แต่ละชุด) ^g (EIA สหรัฐอเมริกา 2018)	การใช้งานระยะยาว	ง่าย (สลับวาล์วปรับปริมาณลมเพื่อเพิ่มการจ่ายอากาศจากภายนอกอาคาร)
	การระบายอากาศส่วนบุคคล (สำหรับการจ่ายอากาศสะอาด)	การเพิ่มการจ่ายอากาศสะอาดให้กับสภาพแวดล้อมจุลภาคของบุคคล โดยมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศปกติ 1.7	สภาพแวดล้อมส่วนบุคคล	แปรผันอย่างมาก (ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบ)	การใช้งานระยะยาว (ต้องเปลี่ยน)	ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง

	การระบายอากาศเฉพาะจุด	ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่องจ่ายและอัตราการไหลของอากาศ (A. Melikov, Grønbaek และ Nielsen 2007) ลดการปนเปื้อนระหว่างกัน โดยมีประสิทธิภาพของการระบายอากาศปกติ 1.4 ถึง 10 ขึ้นอยู่กับรูปแบบของฉากกั้นของแต่ละจุด ตำแหน่งการรับอากาศเสีย และอัตราการไหลของอากาศ (Dygert and Dang 2012)	สภาพแวดล้อมส่วนบุคคล	แปรผันอย่างมาก (ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบ)	ชุดกรองอย่างสม่ำเสมอ)	ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง
	การระบายแบบแทนที่อากาศ	เพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายอากาศสะอาด โดยมีประสิทธิภาพการระบายอากาศปกติ 1.2 ถึง 2 (Q. Chen และ Glicksman 2003)	ห้อง	แปรผันอย่างมาก (ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบ)	การใช้งานระยะยาว (ต้องเปลี่ยนชุดกรองอย่างสม่ำเสมอ)	ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง
	การระบายอากาศตามธรรมชาติ	ให้อากาศจากภายนอกอาคารเข้ามาในห้องมากขึ้น เช่น เปลี่ยนอากาศ >10 ซม. ¹ ในบางสถานการณ์ (Qian และคณะ 2010) (ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการเปิดหน้าต่าง ลักษณะของกระแสลม และ รูปทรงของอาคาร) ^h	ห้อง	US\$0	การใช้งานระยะยาว	ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและเงื่อนไขจากคุณภาพอากาศภายนอกอาคาร
	ปิดประตูระหว่างห้อง (แยกห้องและปิดกั้นการไหลของอากาศระหว่างห้อง)	ลดการปนเปื้อนระหว่างกันข้ามห้อง (สามารถกำจัดความเสี่ยงของการปนเปื้อนระหว่างกันได้หากปิดประตูให้สนิท)	อาคาร/ห้อง	US\$0	การใช้งานระยะยาว	ง่าย (ต้องประสานกำหนดการของผู้เข้าใช้สถานที่)
แผงกั้น	ฉากกั้นพื้นที่	ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้อง (แผงกั้นที่ออกแบบเป็นอย่างดีสามารถลดความเสี่ยงของการปนเปื้อนระหว่างกันได้ ขณะที่อุปกรณ์ที่ออกแบบไม่ดีอาจเพิ่มความเสี่ยงในสถานที่บางลักษณะ) (Rooney และคณะ 2021)	สภาพแวดล้อมส่วนบุคคล	วัสดุ US\$100/ม. ²	การใช้งานระยะยาว	ง่าย
	พื้นที่ทำงานแบบคอกเล็ก	ลดการปนเปื้อนระหว่างคอกเล็ก โดยมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศปกติ 1.1 ถึง 3.6 (ต้องมีการระบายอากาศและการกระจายอากาศที่ออกแบบมาเป็นอย่างดี) (Haghighat และคณะ 1996)	สภาพแวดล้อมส่วนบุคคล	US\$2000 สำหรับคอกเล็กขนาด 2 x 2 เมตร	การใช้งานระยะยาว	ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง (ร่วมกับระบบระบายอากาศ)
	ผนังสำนักงานแบบโมดูลปิด/กึ่งปิด	ผนังสำนักงานแบบโมดูลปิดสามารถหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนข้ามพื้นที่ระหว่างโมดูลได้อย่างสมบูรณ์แบบ (พื้นที่แต่ละส่วนต้องได้รับการระบายอากาศที่เพียงพอ)	สภาพแวดล้อมส่วนบุคคล	US\$3000 สำหรับที่นั่งขนาด 2x2 เมตร	การใช้งานระยะยาว	ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง (ร่วมกับระบบระบายอากาศ)
การฟอกอากาศและการกำจัดเชื้อ	ระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้อง	การใช้งานอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ของไวรัสได้อย่างมาก (เช่น 16 ซม. ⁻¹ สำหรับ M. Parafortuitum) ⁱ	ห้อง	US\$1200–2500 (US\$40–90/พื้นที่ชั้นอาคาร ม. ²) (VirusLights 2021)	การใช้งานระยะยาว	ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง (ร่วมกับระบบระบายอากาศ)

เครื่องฟอกอากาศแบบพกพา	โดยปกติสามารถจ่ายได้ค่า CADR 361 ม. ³ /ชม. (CADR มีพื้นฐานจากการสำรวจตลาด (B. Zhao, Liu และ Chen 2020))	ห้อง	US\$493/หน่วย (กล่าวคือ US\$1.32 ต่อ CADR ม. ³ /ชม. ราคามีพื้นฐานจากการสำรวจตลาด (B. Zhao, Liu และ Chen 2020)) (น้อยกว่า US\$50/ครั้ง สำหรับการเปลี่ยนชุดกรอง HEPA)	การใช้งานระยะยาว (ต้องเปลี่ยนชุดกรองอย่างสม่ำเสมอ)	ง่าย; ควรพิจารณาสารที่อาจปล่อยออกมา (เครื่องฟอกอากาศบางเครื่องอาจก่อให้เกิดสารที่เป็นอันตราย เช่น โอโซน (Guo, Gao และ Shen 2019))
แสงแดด	การเพิ่มอัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์ตามธรรมชาติของ SARS-CoV-2 ในละอองลอย (อัตราการเสื่อมสภาพ: <1 ชม. ⁻¹ เมื่อไม่มีแสงอาทิตย์, >7 ชม. ⁻¹ เมื่อมีแสงอาทิตย์ความเข้มต่ำ, >18 ชม. ⁻¹ เมื่อมีแสงอาทิตย์ความเข้มสูง)	ห้อง	US\$0 ¹	การใช้งานระยะยาว	ง่าย (ต้องประสานกำหนดการของผู้เข้าใช้สถานที่)
การเข้าใช้สถานที่อย่างไม่ต้องเนื่อง (A. K. Melikov, Ai และ Markov 2020) หรือจัดเวลาใช้พื้นที่เหลื่อมกัน (CDC สหรัฐอเมริกา 2021j)	การลดแนวโน้มของการปล่อยจุลชีพก่อโรคสู่อากาศ และลดการสูดจุลชีพก่อโรคของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อ (เช่น ขอให้นักศึกษาออกจากห้องเรียนในระหว่างพัก 15 นาที หลังจากการสอนเป็นเวลา 35 นาที สามารถลดจุลชีพก่อโรคที่สูดเข้าไปได้ 35% (A. K. Melikov, Ai และ Markov 2020))	อาคาร/ห้อง	US\$0	การใช้งานระยะยาว	ง่าย (ต้องประสานกำหนดการของผู้เข้าใช้สถานที่)

^aต้นทุนค่าลงทุนเป็นค่าโดยประมาณจากการสำรวจตลาดในช่วงสั้นๆ ในสหรัฐอเมริกา (ได้รับข้อมูลจากผลลัพธ์การค้นหาที่ Google) ต้นทุนจริงอาจแตกต่างกันอย่างมากในประเทศหรือภูมิภาคอื่นๆ

^bเป็นกลยุทธ์ที่สามารถจัดการได้ง่าย โดยใช้อุปกรณ์ได้จากร้านค้า/ระบบออนไลน์ หรือขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก

^cหน้ากากทางการแพทย์และ N95 ออกแบบมาให้ใช้แล้วทิ้ง แต่ในบางกรณีสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้สองครั้งหลังจากกำจัดการปนเปื้อนแล้ว (CDC สหรัฐอเมริกา 2021e)

^dโดยทั่วไปหน้ากาก N95 จะสวมพอดีมากกว่าหน้ากากผ้าและหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ การใช้หน้ากาก N95 อย่างเหมาะสมสามารถลดการรั่วไหลของอากาศผ่านช่องว่างต่างๆ ได้

^eกลยุทธ์อื่นๆ ที่สามารถช่วยให้หน้ากากอนามัยทางการแพทย์มีความพอดีมากขึ้นได้แก่ (1) การใช้หน้ากากผ้าหุ้มทับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ และ (2) การผูกปมที่สายคล้องหูของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคให้สูงถึงประมาณ 80% (Brooks และคณะ 2021)

^fการใช้งานระยะยาวหมายถึงระยะเวลาโดยปกติมากกว่าหนึ่งปี

^gค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีของการปรับอากาศด้วยชุดอุปกรณ์ส่วนกลางและแบบแยกชุดในสหรัฐอเมริกาคือ US\$0.31 และ US\$0.15 ต่อตารางฟุตตามลำดับ (EIA สหรัฐอเมริกา 2018) หากถือว่าการปรับอากาศมีสัดส่วนอากาศจากภายนอกอาคาร 25% การจ่ายอากาศจากภายนอกอาคาร 100% จะใช้พลังงานมากขึ้น 3 เท่าในการทำความร้อนหรือทำความเย็นให้กับอากาศจากภายนอกอาคารที่รับเข้ามามากขึ้น

^hสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการระบายอากาศตามธรรมชาติและช่วยนำอากาศจากภายนอกอาคารเข้ามาในห้องมากขึ้นรวมกับการใช้พัดลม

ⁱประสิทธิภาพของการทำให้ไวรัสหมดฤทธิ์ของระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้องจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของห้องเช่นกัน การระบายแบบแทนที่อากาศอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการลดระยะเวลาที่ไวรัสคงอยู่ในบริเวณฉายแสง (Kanaan และ Abou Moughilbay 2018)

^jการให้แสงอาทิตย์ส่องเข้ามาในห้องมากขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในการทำความร้อนและการทำความเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ

^kการออกแบบอาคาร เช่น อัตราส่วนหน้าต่าง/ผนัง และรูปทรงของอาคาร อาจส่งผลกระทบต่อระดับแสงอาทิตย์ที่ได้รับจริง

^lไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียทางเศรษฐกิจที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการจำกัดการเข้าใช้สถานที่

^mแนะนำระยะห่างทางสังคมที่ปลอดภัย 1.6–3.0 ม. เมื่อพิจารณาถึงการแพร่ผ่านละอองลอยของละอองขนาดใหญ่ที่หายใจออกมาขณะที่พูดคุย (Sun และ Zhai 2020)

ได้มีการพัฒนาเครื่องมือหลายอย่างเพื่อประเมินความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศของโควิด 19 โดยอิงโมเดล Wells-Riley เช่น Kasibhatla และคณะ (2020) ได้พัฒนาเครื่องมือบนเว็บ COVID Exposure Modeler เพื่อประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อโควิด 19 จากการแพร่ผ่านอากาศในระหว่างการสอนในห้องเรียน โดยใช้วิธีมอนติคาร์โล Allen, Cedeno-Laurent และ Miller (2020) ได้พัฒนาเอกสาร Google Sheet เพื่อคำนวณการลดความเสี่ยงโดยใช้เครื่องฟอกอากาศแบบพกพา Corsi, Van Den Wymelenberg และ Parhizkar (2020) ได้จัดทำแพลตฟอร์มผ่านเว็บ ชื่อ SafeAirSpaces COVID-19 Aerosol Relative Risk Estimator

เพื่อประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อผ่านอากาศและติดตามอนุภาคที่แพร่เชื้อได้ Dols และคณะ (2020) และ William และคณะ (2020) ได้พัฒนาเครื่องมือบนเว็บ Fate and Transport of Indoor Microbiological Aerosols (FaTIMA) ซึ่งช่วยในการระบุสิ่งที่จะเกิดขึ้นกับละอองลอยทางจุลชีววิทยาภายในอาคาร ที่เกี่ยวข้องกับกลไกการระบายอากาศ การกรอง การเกาะยึด และการถูกทำให้หมดฤทธิ์ Riediker และ Monn (2020) ได้สร้างเครื่องมือสเปรดชีต Indoor Scenario Simulator เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของไวรัสภายในห้องและปริมาณที่บุคคลอื่นๆ ซึ่งอยู่ภายในห้องเดียวกันสูดหายใจเข้าไป REHVA (2020) ได้พัฒนาเครื่องมือสเปรดชีต COVID-19 Ventilation Calculator เพื่อประเมินผลของการระบายอากาศที่มีต่อการแพร่ผ่านอากาศของโควิด 19 Jimenez และ Peng (2020) ได้จัดทำ COVID-19 Aerosol Transmission Estimator บนเอกสาร Google Sheet และได้ประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อในสถานการณ์ภายในอาคารทั่วไป เช่น ในห้องเรียน ซูเปอร์มาร์เก็ต และสนามกีฬา Bazant (2021) ได้พัฒนาแอปพลิเคชันบนเว็บ COVID19 Indoor Safety Guideline ซึ่งสามารถประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อโดยใช้โมเดล Wells-Riley และระดับปลอดภัยของการเข้าใช้สถานที่หรือระยะเวลา ตามลักษณะของข้อมูลที่ป้อน และยังสามารถประเมินความเสี่ยงตามความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคารได้อีกด้วย J. Shen และคณะ (2021) ได้พัฒนาเครื่องมือคำนวณบนสเปรดชีตเพื่อประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อในพื้นที่หลายประเภท เช่น บอลรูม ห้องประชุม ห้องอาหาร/โรงอาหาร ห้องพักของโรงแรม สำนักงาน และห้องเรียน ซึ่งเครื่องมือคำนวณดังกล่าวสามารถทำการจำลองได้ทั้งแบบเสถียรและแบบแปรปรวน เพื่อประเมินประสิทธิผลของกลยุทธ์ต่างๆ ที่ใช้เพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการติดเชื้อจากสถานะเกณฑ์พื้นฐานซึ่งกำหนดโดย ASHRAE 62.1 (2019)

กลยุทธ์การบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศ

หน่วยงานสาธารณสุขต่างๆ ได้เสนอกลยุทธ์การควบคุมมากมายเพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับโควิด 19 ไว้ในข้อเสนอแนะของตนเอง (ASHRAE 2020a; Osha n.d.; REHVA 2021; CDC สหรัฐอเมริกา 2021h; EPA สหรัฐอเมริกา 2020; WHO 2021b) บทวิจารณ์เมื่อไม่นานมานี้ได้เสนอและเปรียบเทียบข้อเสนอแนะในการใช้ระบบปรับอากาศในประเทศต่างๆ ในระหว่างการระบาดใหญ่ (M. Guo และคณะ 2021) นักวิจัยจำนวนมากได้เสนอกลยุทธ์ต่างๆ เพื่อควบคุม IAQ เช่นกัน (Bazant และ Bush 2021; A. K. Melikov, Ai และ Markov (2020; Lidia Morawska และคณะ 2020; J. Shen และคณะ 2021; J. Zhang 2020) โดยปกติแล้วกลยุทธ์การควบคุม IAQ ในระดับต่างๆ (ตั้งแต่ทั้งอาคาร หรือสำหรับห้อง และสภาพแวดล้อมจุลภาคส่วนบุคคล ไปจนถึงบริเวณระดับหายใจ) สามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภท กล่าวคือ การควบคุมที่แหล่ง การระบายอากาศ และการฟอกอากาศ กลยุทธ์ที่ใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุดในสภาพแวดล้อมภายในอาคารเพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อจากการแพร่ผ่านอากาศ โดยปกติจะรวมถึงการสวมหน้ากาก (Brooks และคณะ 2021; Cook 2020; A. Davies และคณะ 2013; Liao และคณะ 2021; Tabatabaeizadeh 2021; Ueki และคณะ 2020) การปรับปรุงการระบายอากาศและการจ่ายอากาศ (Ahlawat และคณะ 2020; Almilaji และ Thomas 2020; Blocken และคณะ 2021; Borro และคณะ 2021; CDPH 2020; Correia และคณะ 2020; Dai และ Zhao 2020a; Dillon และ Sextro 2020; Dygert และ Dang 2012; Masotti และคณะ 2021; Lidia Morawska และคณะ 2021; Stabile และคณะ 2021; Sun และ Zhai 2020) เครื่องฟอกอากาศแบบสแตนด์อโลนและระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้อง (Beggs และ Avital 2020; Blocken และคณะ 2021; Z. Feng และคณะ 2021; He และคณะ 2021; Ko, First และ Burge 2002; Xu et al. 2003) และการควบคุมและการจำกัดการเข้าใช้สถานที่ (Bazant และคณะ 2021; A. K. Melikov, Ai และ Markov (2020; Sun และ Zhai 2020). การพิจารณาโดยละเอียดสำหรับกลยุทธ์การบรรเทาต่างๆ สามารถดูได้ในเอกสารที่เผยแพร่หลายฉบับ (M. Guo และคณะ 2021; Kong และคณะ 2020; J. Shen และคณะ 2021; S. Tang และคณะ 2020; J. Zhang 2020) อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่มีอยู่โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงประสิทธิภาพของกลยุทธ์การบรรเทาในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ แต่ไม่พิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการนำกลยุทธ์การบรรเทาความเสี่ยงมาใช้ในทางปฏิบัติ เช่น ค่าใช้จ่าย ความคงทน และการจัดหา การพิจารณาทั้งคุณประโยชน์และค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์การควบคุมสามารถช่วยในการออกแบบกลยุทธ์การควบคุมในสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้

ประสิทธิผลและค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์การควบคุมต่างๆ อาจมีความแตกต่างกันอย่างมากตามขนาดของระบบ โดยปกติหน้ากาทงการแพทย์จะสามารถปกป้องผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูดหายใจรับละอองลอยที่มีไวรัสได้ประมาณ 50% และมีค่าใช้จ่ายต่ำมาก (ประมาณ US\$0.2 ต่อชิ้น) อย่างไรก็ตาม การใช้หน้ากากในระยะยาวยังคงมีค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากหน้ากาทงการแพทย์เป็นแบบใช้แล้วทิ้ง การปรับปรุงชุดกรองในระบบปรับอากาศสามารถให้ประโยชน์กับผู้เข้าใช้ห้องในหลายห้องได้ โดยปกติชุดกรอง HEPA สามารถขจัดอนุภาคได้กว่า 99.9% สำหรับอากาศที่หมุนเวียนในระบบระบายอากาศของอาคาร แต่ยังคงมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการจัดซื้อ (โดยปกติมีราคา US\$280 ต่อชุด) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงจำนวนของผู้ที่ได้รับประโยชน์ และระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานของชุดกรอง (โดยปกติสามารถใช้ได้ 6–12 เดือน) ค่าใช้จ่ายทั่วไปของการใช้ชุดกรอง HEPA ในระบบระบายอากาศจึงไม่สูงนักในความเป็นจริง แต่การปรับปรุงชุดกรองของระบบระบายอากาศอาคารไม่สามารถหลีกเลี่ยงการแพร่ผ่านอากาศในระยะใกล้ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่การสวมหน้ากากสามารถลดการได้รับละอองลอยในระยะใกล้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหน้ากากสามารถปกป้องบริเวณ

ระดับหายใจของบุคคลได้ ดังนั้นจึงควรพิจารณาทั้งคุณประโยชน์และค่าใช้จ่ายในการออกแบบกลยุทธ์การควบคุมสำหรับแต่ละสถานการณ์อย่างเฉพาะเจาะจง J. Shen และคณะ (2021) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์การควบคุม IAQ บางประเภทในการบรรเทาความเสี่ยงของการแพร่ผ่านอากาศสำหรับโควิด 19 นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงความสะดวกในการจัดหาของกลยุทธ์ด้วย ซึ่งบางกลยุทธ์ เช่น การสวมหน้ากากผ้า สามารถจัดหาได้ค่อนข้างง่าย และสามารถประดิษฐ์เองได้โดยใช้วัสดุในครัวเรือน เมื่อหน้ากาขาดแคลน (A. Davies และคณะ 2013) จึงทำให้กลยุทธ์นี้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง สำหรับ PPE ควรพิจารณาถึงความสะดวกสบายในการสวมใส่ ซึ่งสามารถประเมินได้จากแรงดันที่ลดลงในวัสดุของ PPE (A. Davies และคณะ 2013; M. Zhao และคณะ 2020) เนื่องจากอาจส่งผลต่อการใช้งาน PPE ในประชากรเช่นกัน กลยุทธ์การควบคุมอื่นๆ บางประเภทต้องได้รับการออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญก่อนที่จะนำมาใช้ เพื่อโอกาสที่ดีที่สุดในการบรรเทาความเสี่ยง เช่น การระบายแบบแทนที่อากาศ การระบายอากาศส่วนบุคคล และการระบายอากาศเฉพาะบริเวณ ซึ่งการระบายอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ความเสี่ยงเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (Y. Li และคณะ 2020; Shao และคณะ 2021) อีกตัวอย่างหนึ่งคือการใช้ระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้อง โดยปกติแล้วระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้องที่ออกแบบมาเป็นอย่างดีจะให้ประสิทธิภาพเทียบเท่าการเปลี่ยนอากาศ 6.7 ถึง 33 ปริมาตรห้องต่อชั่วโมง โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสภาวะของการใช้งาน (R. Riley และ Nardell 1989; CDC สหรัฐอเมริกา และ NIOSH 2009; Xu และคณะ 2003) แต่ประสิทธิภาพในการทำให้ไวรัสหมดฤทธิ์ของระบบ UVGI ในบริเวณส่วนบนของห้องจะขึ้นอยู่กับอัตราการกระจายอากาศของห้องเช่นกัน การระบายอากาศแบบแทนที่อากาศอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลง (ประสิทธิภาพประมาณ 78% เมื่อใช้การระบายอากาศแบบผสมอากาศ (Kanaan และ Abou Moughlby 2018)) เนื่องจากการลดระยะเวลาที่ไวรัสคงอยู่ในบริเวณฉายแสง นอกจากนี้ ความสะดวกในการจัดหาสำหรับกลยุทธ์การควบคุมบางประเภทอาจแตกต่างกันไปตามระยะของการระบาดใหญ่ CDC สหรัฐอเมริกาได้นิยามกลยุทธ์สามประเภทสำหรับข้อแนะนำในการใช้ PPE กล่าวคือ กลยุทธ์สำหรับสถานการณ์ปกติ เหตุฉุกเฉิน และเหตุวิกฤติ ตามสถานการณ์ต่างๆ ของความสามารถในการจัดหา PPE (CDC สหรัฐอเมริกา 2021d) หากคาดว่าแหล่งจัดหา PPE กำลังจะขาดแคลนหรือเริ่มขาดแคลนแล้ว ควรสวม PPE เกรดการแพทย์ เช่น หน้ากากแพทย์และ N95 ไว้สำหรับเจ้าหน้าที่สุขภาพเท่านั้น (CDC สหรัฐอเมริกา 2020c) NIOSH (2015) ได้กำหนดลำดับขั้นการควบคุมเพื่อกำจัดการได้รับความเสี่ยงจากการประกอบอาชีพ เช่น จุลชีพก่อโรคทางเดินหายใจ ซึ่งได้มีการนำมาใช้เป็นวิธีหนึ่งในการระบุวิธีใช้โซลูชันการควบคุมที่สามารถปฏิบัติได้จริงและมีประสิทธิภาพ

ได้มีการแนะนำกลยุทธ์การควบคุมบางประเภทที่ใช้เพื่อบรรเทาการแพร่ผ่านอากาศในสถานการณ์ต่างๆ ไว้ในหมวด “การแพร่ระบาดในสถานการณ์ต่างๆ และบทบาทของการแพร่ผ่านอากาศ” เนื้อหาในหมวดดังกล่าวได้ตรวจสอบกลยุทธ์การควบคุมบางประเภทที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยพิจารณาถึงคุณประโยชน์และค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์ รวมถึงประสิทธิผลในการลดความเสี่ยง สเกลประสิทธิผล ต้นทุนเงินลงทุน ความคงทน และความสะดวกในการจัดหา (ตาราง 5) ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อช่วยในการเลือกกลยุทธ์การควบคุมที่ดีที่สุด (ทั้งเชื่อถือได้และต้นทุนเหมาะสม) ในสถานการณ์ต่างๆ

สรุปสิ่งที่ค้นพบที่สำคัญ

มีหลักฐานมากมายที่สนับสนุนว่า SARS-CoV-2 มีการแพร่ผ่านอากาศ เช่น มีการตรวจพบละอองลอยที่มีไวรัสที่มีสภาพสมบูรณ์ในอากาศ ซึ่งสนับสนุนด้วยการวิเคราะห์แบบศึกษาย้อนกลับจากการแพร่ระบาดจริง ในเหตุการณ์การแพร่ระบาดหลายครั้ง มีการพิจารณาว่าการแพร่ผ่านอากาศเป็นรูปแบบหลักของการแพร่ของไวรัส ปริมาณไวรัสในทางเดินหายใจมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการปล่อยจุลชีพก่อโรคในกิจกรรมที่มีการหายใจ โดยปกติแล้วปริมาณไวรัสภายในปากของผู้ป่วยโควิด 19 จะน้อยกว่า 10^9 สำเนา RNA/มล. อนุภาคที่ขับออกมาในระหว่างกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยส่วนใหญ่ (ปกติ 80–90%) จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า $1-2 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาว่าละอองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสามารถมีจำนวนไวรัสได้น้อยกว่า เนื่องจากปริมาณของอนุภาคเล็กกว่า ดังนั้นอนุภาคขนาดใหญ่ที่ขับออกมาจึงมักจะมีจำนวน RNA ของไวรัสมากกว่า อัตราการถูกทำให้หมดฤทธิ์โดยปกติของละอองลอยที่มี SARS-CoV-2 ที่มีสภาพสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิห้องปกติ ($20-23^\circ\text{C}$) และความชื้นสัมพัทธ์ (30–70%) และไม่ได้รับแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ชม.^{-1} ขณะที่แสงอาทิตย์อาจส่งผลอย่างมากต่อการหมดสภาวะอยู่รอดของเชื้อ SARS-CoV-2 ($>7 \text{ ชม.}^{-1}$ และ $>18 \text{ ชม.}^{-1}$ ภายใต้แสงอาทิตย์ความเข้มต่ำและความเข้มสูง) การแพร่ระบาดในสถานการณ์ภายในอาคารที่มีการรายงานโดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับสถานบริการดูแลระยะยาว โรงเรียนอนุบาลถึงมัธยมปลาย ร้านอาหารและบาร์ ร้านจำหน่ายปลีก และสำนักงาน โดยปกติแล้วการแพร่ระบาดในเรือนจำ วิทยาลัยและมหาวิทยาลัย สถานบริการดูแลระยะยาว และระบบขนส่ง จะทำให้มีผู้ติดเชื้อจำนวนมาก ตามข้อมูลที่มีการรายงาน การระบายอากาศภายในอาคารคือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงของการติดเชื้อ หลักเกณฑ์การออกแบบการระบายอากาศภายในอาคารซึ่งอิงแหล่งจุลชีพก่อโรคหรืออิงสุขภาพอาจจะเป็นหลักการที่มีความเหมาะสมมากกว่าในการป้องกันการแพร่ที่ทำให้เกิดการติดเชื้อ สามารถดำเนินการเพิ่มเติมเกี่ยวกับหลักเกณฑ์การออกแบบการระบายอากาศภายในอาคารต่อไปในอนาคตได้ นอกจากนี้ ควรพิจารณาทั้งคุณประโยชน์และค่าใช้จ่ายในการออกแบบกลยุทธ์การควบคุมเพื่อบรรเทาความเสี่ยงของการติดเชื้อ เช่น กลยุทธ์การใช้ PPE การระบายอากาศ จากกัน เทคโนโลยีการฟอกอากาศและกำจัดเชื้อ และการควบคุมการเข้าใช้สถานที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนร่วมกันโดย Carrier Corporation และมหาวิทยาลัยชิราคัส

ประกาศการเปิดเผยข้อมูล

ผู้จัดทำเอกสารนี้รับรองว่าตนไม่มีความสัมพันธ์หรือความเกี่ยวข้องกับองค์กรหรือนิติบุคคลที่มีผลประโยชน์ทั้งในทางการเงินหรือไม่ใช่ทางการเงินที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อหรือเนื้อหาที่ได้นำเสนอในเอกสารนี้

ORCID

Jialei Shen  <http://orcid.org/0000-0002-8336-9828>

ประกาศการเข้าถึงข้อมูล

สามารถรับข้อมูลสนับสนุนสิ่งที่ค้นพบจากการศึกษานี้ได้จากผู้จัดทำแต่ละราย เมื่อมีการร้องขออันสมควร