

ฉบับแปลไทย (Thai Translation)

Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.1c00183>

<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.09.09.20191676v2>

ที่มา:

Zhe Peng, Jose L. Jimenez. Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. medRxiv 2020.09.09.20191676. Now published in *Environmental Science & Technology Letters*. DOI: 10.1021/acs.estlett.1c00183.

สรุปเนื้อหา

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ถูกขับออกมาในลมหายใจออกของผู้ติดเชื้อโควิดพร้อมกับละอองลอย (Aerosol) ซึ่งมีไวรัสอยู่ภายใน เราจึงใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาเป็นตัวแทนในการประเมินความเข้มข้นของเชื้อไวรัสในพื้นที่ปิด (indoor) ได้

การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือราคาถูกน่าจะเป็นวิธีวัดความเสี่ยงต่อการระบาดของโควิด 19 และโรคระบบทางเดินหายใจอื่นๆ ผ่านทางละอองลอยภายในพื้นที่ปิดที่ดีและสามารถใช้ได้ในวงกว้าง

เราได้แสดงการวิเคราะห์โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแทนความเสี่ยงในสภาวะแวดล้อมของสถานที่อากาศไม่ถ่ายเทแบบต่างๆ และพบว่า ความเสี่ยงในการติดเชื้อมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกับระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีค่ามาก กับสภาพแวดล้อมที่มีการกำหนดขนาด และโดยเหตุผลดังกล่าว เราสามารถใช้การระบายอากาศเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันในพื้นที่นั้น

แม้ว่ามีค่าความไม่แน่นอนซึ่งส่วนใหญ่มาจากอัตราการหายใจออก ที่มีไวรัสปะปนมาด้วย และยังเกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ ทั้งนี้การศึกษาของเราให้คำแนะนำไปที่ การใช้ค่าวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต้นทุนต่ำ ในการติดตามความเสี่ยงในการติดเชื้อของสถานที่อากาศไม่ถ่ายเท

Introduction

โรคโคโรนาไวรัส 2019 (โควิด-19) กำลังระบาดไปทั่วโลก และก่อให้เกิดความสูญเสียครั้งใหญ่ต่อชีวิตมนุษย์ การล็อกดาวน์ ไม่ควรจะเป็นมาตรการระยะยาว มิฉะนั้นจะนำไปสู่ราคาที่สูงขึ้นไม่ถึง ในทางต้นทุนทางสังคมและเศรษฐกิจ แต่ในทางกลับกัน การเริ่มกิจกรรมทางสังคม การศึกษา และการดำเนินธุรกิจใหม่ ก็ทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับการกลับมาระบาดอีกครั้ง

ในช่วงไม่กี่เดือนที่ผ่านมา มีหลักฐานการแพร่เชื้อโควิด-19 ทางละอองลอยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกล่าวคือ โรคระบบทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง SARS-CoV-2 ซึ่งมีอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง น้อยกว่า 100 ไมครอน ที่สามารถลอยในอากาศได้นานตั้งแต่นาทีถึงชั่วโมง

ละอองลอยดังกล่าวได้รับการตรวจพบในอากาศที่หายใจออกของผู้ป่วยโควิด-19 และในอากาศในโรงพยาบาล และพบว่า พฤติกรรมของละอองลอยขนาดเล็กที่อยู่ห่างออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้น จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับก๊าซ การแพร่เชื้อภายในอาคารนั้นทำได้ง่ายกว่ากลางแจ้งมาก ซึ่งสอดคล้องกับ ละอองลอยมากที่สุด

เนื่องจากมนุษย์ใช้เวลาส่วนใหญ่ในสภาพแวดล้อมในร่ม ซึ่งปริมาณอากาศมีจำกัดและละอองไวรัสมักสะสมได้ง่าย

การลดการแพร่กระจายของโควิด 19 ในอาคารจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่ง และเป็นกุญแจสำคัญในการเปิดเศรษฐกิจและสังคมใหม่ ให้ประสบความสำเร็จ จำเป็นต้องมีมาตรการที่ใช้งานได้จริง ราคาไม่แพง และนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อทำการตรวจวัดและช่วยยับยั้งความเสี่ยงของการแพร่เชื้อภายในอาคารหรือสถานที่อากาศไม่ถ่ายเท

การวัดไวรัสที่มากับละอองลอยโดยตรงนั้น ทำได้ยากและใช้เวลานาน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำมาเป็นตัวบ่งชี้การระบายอากาศของพื้นที่ในร่ม ตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 และเมื่อเร็วๆ นี้ได้ถูกนำไปใช้ฐานะตัวแทน ความเสี่ยงในการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อทางเดินหายใจ อันเนื่องมาจากละอองลอย ที่ประกอบด้วยเชื้อโรคและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกหายใจออกมารวมกัน โดยผู้ที่ติดเชื้อ

เนื่องจากระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเกือบจะคงที่

และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มากเกินไปภายในอาคารมักจะมาจากการหายใจออกของมนุษย์

การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในร่มโดยเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต้นทุนต่ำจะเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีของความเสี่ยงในการติดเชื้อและเหมาะสำหรับการใช้งาน จำนวนมาก อย่างไรก็ตามระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สอดคล้องกับความเสี่ยงในการติดเชื้อโควิด 19 ยังไม่เป็นที่แน่ชัด

ระดับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกแนะนำให้ใช้เป็นเกณฑ์ แต่ยังขาดข้อมูลพื้นฐานที่เพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้อแนะนำเหล่านั้นให้ใช้เกณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เดียวเท่านั้นในแต่ละแนวทาง

แม้ว่าการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงครั้งเดียว ในสภาพแวดล้อมในร่มทั่วไป จะทำให้มั่นใจได้ถึงความเสี่ยงระดับต่ำของการติดเชื้อโควิด 19 หรือไม่ยังคงเป็นคำถามเปิดอยู่ แต่ก็ยังมีความสำคัญสำหรับการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยใช้ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการศึกษานี้ เราได้แสดงการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อโควิด 19 ในอาคาร โดยการการส่งผ่านละอองลอย ในระดับห้องเท่านั้น (กล่าวคือ สมมติว่ามีการรักษาระยะห่างทางสังคมไว้ เพื่อจำกัดผลของละอองลอยในระยะใกล้ และไม่รวมการแพร่กระจายของการติดเชื้อจากการสัมผัสพื้นผิวร่วมกัน)

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์หายใจออก และต่อมาก็คือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บางส่วนในฐานะตัวแทนความเสี่ยงในการติดเชื้อ บนพื้นฐานของข้อมูลที่มีอยู่ เราสามารถอนุมานความสัมพันธ์เหล่านี้กับค่าทั่วไปของพื้นที่ในร่ม เพื่อตอบคำถามที่กล่าวถึงข้างต้น

Material and Methods

เพื่อให้ได้ ความเข้มข้นของละอองลอยที่มีไวรัสในอากาศในพื้นที่ปิด เราใช้สมมติฐานว่า อากาศในห้องผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Well-mixed air) สามารถวัดระดับความไม่เนื้อเดียวกันได้โดยเครื่องมือวัดราคา

ไม่แพง ถ้ามีลักษณะปรากฏว่ามีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของอากาศ พื้นที่ในห้องนั้นจะถูกประเมินเสมือนมีหลายส่วน และแต่ละส่วนมีอากาศในห้องผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

การระบายอากาศด้วยอากาศภายนอก การสลายตัวของไวรัสและการสะสมของไวรัสบนพื้นผิว และมาตรการควบคุมเพิ่มเติม (เช่น การใช้ระบบกรองอากาศและการใช้แสงยูวีเพื่อฆ่าเชื้อ) ซึ่งส่งผลให้ไวรัสในอากาศในอาคารดังกล่าวลดลง การลดลงเพราะปัจจัยอื่นๆ (การหายใจเข้าของคนและสัตว์) ถือว่าไม่มีนัยยะสำคัญ

แบบจำลองนี้จะให้ค่าน้อยลงสำหรับความเสี่ยงจากสภาพแวดล้อมที่มีแหล่งกำเนิดละอองลอยติดเชื้อ ที่ไม่เกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ (เช่น ห้องน้ำเนื่องจากการกดชักโครก การพักผ่อนในสถานพยาบาลเพื่อใส่และถอดอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล)

ปริมาณของไวรัสที่แพร่เชื้อต่อครั้ง (n , “quanta”) ที่หายใจเข้าโดยบุคคลที่มีโอกาสรับเชื้อ จะเป็นตัวกำหนดความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) ตามรูปแบบของการติดเชื้อละอองลอยของ Wells–Riley

$$\text{ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ } P = 1 - e^{-n} \quad (1)$$

หนึ่งหน่วยของไวรัส SARS-CoV-2 สอดคล้องกับความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ $1 - 1/e$ (63%) ค่าที่คาดหวังของ n ($\langle n \rangle$) สำหรับผู้ที่เดินในไม่ติดเชื้อที่ สอดคล้องกับ ระดับภูมิคุ้มกันที่กำหนดในประชากรท้องถิ่น (ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยคนหนึ่งกำลังมีภูมิคุ้มกัน η_{im}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\langle n \rangle = (1 - \eta_{im}) c_{avg} B D (1 - m_{in}) \quad (2)$$

โดยที่

c_{avg} คือค่าความเข้มข้นของไวรัส (ปริมาณต่อลูกบาศก์เมตร)

B คือ อัตราการหายใจของบุคคลที่มีโอกาสรับเชื้อ (ปริมาณต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

D คือ ช่วงระยะเวลา (ชั่วโมง) และ

$(1 - m_{in})$ คือ ประสิทธิภาพของหน้ากากในการกรองอากาศจากการหายใจเข้า

ในสมการมีการใส่เทอม $(1 - \eta_{im})$ เพราะว่าปริมาณเชื้อที่ถูกหายใจเข้าโดยผู้ที่มีภูมิคุ้มกันอยู่แล้วจะไม่เกิดการติดเชื้อ และควรแยกออกจากแบบจำลอง

สมมติฐานรวมถึงในช่วงเริ่มต้น ไม่มีผู้อาศัยอยู่ภายในและไม่มีเชื้อไวรัสกระจายอยู่ก่อนหน้า การแสดงการวิเคราะห์ค่าคาดหวังของค่าความเข้มข้นของไวรัส c_{avg} ตามความชุกของการติดเชื้อในประชากรท้องถิ่น (ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยหนึ่งคนกำลังเป็นผู้ติดเชื้อ, η_i), โดยที่ค่าคาดหวังของค่าความเข้มข้นของไวรัส $\langle c_{avg} \rangle$, คือ

$$\langle c_{avg} \rangle = \frac{\eta_i (N - 1) E_p (1 - m_{ex})}{V} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1 - e^{-\lambda D}}{\lambda^2 D} \right) \quad (3)$$

เมื่อ N คือจำนวนผู้อยู่อาศัย

E_p คือลมหายใจที่มีไวรัสออกมาจากผู้ติดเชื้อ (ปริมาณต่อชั่วโมง)
 M_{ex} คือ ประสิทธิภาพของหน้ากากในการกรองอากาศจากการหายใจออก
 V คือปริมาตรของสถานที่หรืออาคารนั้น (ลูกบาศก์เมตร)

λ คือค่าคงที่สำหรับการสลายของไวรัส (ต่อชั่วโมง) ที่รวมผลจากการระบายอากาศ และการกำจัดไวรัสโดยวิธีอื่นๆ

ถ้าไม่มีแหล่งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อื่นๆ และปัจจัยอื่นๆ (ก๊าซ/เตาไปจากถ่านหิน สัตว์เลี้ยงและต้นไม้) และพิจารณา ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินภายในอาคาร (เทียบกับนอกอาคาร) เกิดจากการหายใจออกของมนุษย์เท่านั้น และการสูญเสียไปโดยการระบายอากาศ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คล้ายกันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$n_{\Delta CO_2} = \Delta c_{avg, CO_2} BD \quad (4)$$

$$\Delta c_{avg, CO_2} = \frac{NE_{p, CO_2}}{V} \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{-\lambda_0 D}}{\lambda_0^2 D} \right) \quad (5)$$

โดยที่

$n_{\Delta CO_2}$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน (จากลมหายใจออกจากมนุษย์) ที่หายใจเข้าไป (ลูกบาศก์เมตร)

$\Delta c_{avg, CO_2}$ คือ อัตราส่วนการผสมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินโดยเฉลี่ย

E_{p, CO_2} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจออกต่อคน (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

λ_0 คือ อัตราการระบายอากาศ (ต่อชั่วโมง)

เมื่อความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) มีค่าต่ำ จะเป็นช่วงที่ปลอดภัยต่อการกลับมาเริ่มเปิดดำเนินการอีกครั้ง, $P \approx n$

เนื่องจากการติดเชื้อทางอากาศของ SARS-CoV-2 และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน เป็นลมหายใจเข้าและออกร่วมกัน ดังนั้นในหลักการ $n_{\Delta CO_2}$ สามารถเป็นตัวแทนของ $\langle n \rangle$

$$\frac{n_{\Delta CO_2}}{\langle n \rangle} = \frac{NE_{p, CO_2}}{(1 - \eta_{im}) \eta_I (N - 1) E_p (1 - m_{ex}) (1 - m_{in})} \times \frac{\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{-\lambda_0 D}}{\lambda_0^2 D}}{\frac{1}{\lambda} - \frac{1 - e^{-\lambda D}}{\lambda^2 D}} \quad (6)$$

สัดส่วนของ $n_{\Delta CO_2}$ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินที่หายใจเข้าไป (ลูกบาศก์เมตร) ต่อ $\langle n \rangle$ ค่าที่คาดหวังของสำหรับผู้ใดนั้นไม่ติดเชื้อ แสดงถึงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ที่หายใจเข้าซึ่งสอดคล้องกับเชื้อหนึ่งหน่วยที่ถูกหายใจเข้า

อย่างไรก็ตาม การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวทำได้ค่อนข้างยาก และไม่เหมาะสำหรับการตรวจสอบความเสี่ยงในการแพร่เชื้อในวงกว้าง ซึ่งมักต้องการกระบวนการตัดสินใจที่รวดเร็ว โดยอาศัยการอ่านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคาร (โดยปกติวัดใน หน่วยต่อล้านส่วน) ของเครื่องวัดที่มีราคาไม่แพง

ดังนั้นเราจึงเสนอตัววัดอื่นที่เป็นตัวแทนของความเสี่ยงของสภาพแวดล้อมที่มี ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยเป็นโรคติดเชื้อ (η_i) = 0.1% ที่ค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ($\Delta c_{\text{CO}_2}^*$) ได้แก่ “ปริมาณของส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ที่บุคคลที่ไม่ติดเชื้อหายใจเข้าไปเป็นระยะเวลาปกติ (1 ชั่วโมง) ในสภาพแวดล้อมนั้นสำหรับความน่าจะเป็นโดยทั่วไปของการติดเชื้อ (0.01%)”

$$\Delta c_{\text{CO}_2}^* = \frac{0.0001/1h \times NE_{p,\text{CO}_2}}{(1 - \eta_{\text{im}})\eta_i(N - 1)E_p(1 - m_{\text{ex}})(1 - m_{\text{in}})B} \times \frac{\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{-\lambda_0 D}}{\lambda_0^2 D}}{\frac{1}{\lambda} - \frac{1 - e^{-\lambda D}}{\lambda^2 D}} \quad (7)$$

ปริมาณดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ที่ไปสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่คนหนึ่งจะแพร่เชื้อกระจายออกไปได้อีกก็คน (R_0) และสามารถเปรียบเทียบได้โดยง่ายกับค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องมือวัดอ่านค่าได้ สัดส่วนของค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินที่วัดค่าได้ ต่อ ปริมาตรของส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ที่บุคคลที่ไม่ติดเชื้อหายใจเข้าไปเป็นระยะเวลาปกติ (1 ชั่วโมง) ในสภาพแวดล้อมนั้นสำหรับความน่าจะเป็นโดยทั่วไปของการติดเชื้อ (0.01%)

โดยที่ค่าดังกล่าว มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพารามิเตอร์อื่นๆ ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) 0.01% เป็นค่าอ้างอิงไม่ได้หมายความว่าไปถึงความปลอดภัยในทุกสถานการณ์ สาเหตุเพราะเมื่อค่าขนาดของประชากรและช่วงระยะเวลามีขนาดใหญ่ รวมถึงเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นๆ ความสำคัญอยู่ที่ ความน่าจะเป็นโดยรวมของการติดเชื้อของผู้มีโอกาสรับเชื้อหนึ่งคนและหรือ การติดเชื้อโดยรวม

Results and Discussion

ค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ลำดับและการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลให้มีความแตกต่างของ ($\Delta c_{\text{CO}_2}^*$) แม้จะมีการตั้งค่าคล้ายกัน ดังในตัวอย่าง เราได้ทำแบบจำลองสำหรับชั้นเรียนในมหาวิทยาลัย

ค่าของ ($\Delta c_{\text{CO}_2}^*$) และ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินที่หายใจเข้า

ต่อปริมาณเชื้อหนึ่งหน่วยที่ถูกหายใจเข้า $\frac{n_{\Delta\text{CO}_2}}{\langle n \rangle}$ แสดงในรูปประกอบที่ 2A และ S1A

ในตัวอย่างกรณีชั้นเรียน มีการสมมติว่าผู้แพร่เชื่อเป็นผู้สอน เปรียบเทียบกับกรณีที่นักเรียนเป็นผู้ติดเชื้อ ค่า $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ น้อยกว่ากัน 1.5 เท่า นั้นเป็นเพราะว่าการออกเสียง มีลมหายใจที่มีไวรัส ออกมาจากของผู้สอนมาก เมื่อเทียบกับนักเรียนที่น่าจะพูดและออกเสียงน้อยกว่า ส่วนในการเรียนกรณีวิชาพลศึกษาในห้องเรียนแบบเดียวกันนั้น มีสมมติฐานว่าผู้ร่วมกิจกรรมมีการออกกำลังกาย แต่ไม่ได้พูดคุยกัน ค่า $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ น้อยกว่าผู้ติดเชื้อที่เข้าเรียนในห้องเรียนปกติ เมื่อเทียบกับการนั่ง การออกกำลังกายอย่างหนักจะเพิ่มอัตราการติดเชื้อไวรัสและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของผู้อาศัยในอาคารให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่ได้เปลี่ยนระดับค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน อย่างไรก็ตามอัตราการหายใจของผู้ที่ทำการกิจกรรมที่เข้มข้นนั้นสูงกว่าการนั่งมาก

แม้ว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ SARS-CoV-2 จะเท่ากันกับกรณีของนักเรียนที่ติดเชื้อ แต่ผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อในชั้นเรียนพลศึกษายังสามารถหายใจนำ SARS-CoV-2 เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มากขึ้นไปและมีความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ ที่แตกต่างกันอย่างน่าทึ่ง

ด้วยเหตุนี้ ค่าแนะนำเดียวเกี่ยวกับเกณฑ์ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคารจึงใช้ไม่ได้ ในเกณฑ์เดียวกับกับหลายโรงเรียน

ช่วงของระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ในห้องเรียนในความเป็นจริงนั้นกว้างมาก ค่าอ้างอิงระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิน ของกรณีนักเรียนติดเชื้อ (ค่อนข้างปลอดภัย) มีค่าเกินในบางห้องเรียน ในขณะที่ค่าอ้างอิงระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกินของผู้สอนที่ติดเชื้อ (ค่อนข้างเสี่ยง) จะพบในห้องเรียนอื่น

ตามสมการที่ (2) และ (3) ไม่ว่าผู้โดยสารจะสวมหน้ากากหรือไม่และสวมหน้ากากชนิดใดก็ตาม มีโอกาสเกิดความต่างของความเสี่ยงในการติดเชื้อ ผ่านการกรองไวรัสในสภาพแวดล้อม ในแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตามหน้ากากไม่สามารถกรองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ กรณีอ้างอิงในชั้นเรียน (ที่สวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์) ที่เทียบกับที่ผู้เรียนทุกคนสวมหน้ากาก N95 และที่ไม่ใช้หน้ากาก มีอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหมือนกัน แต่มีความน่าจะเป็นของการติดเชื้อต่างกันถึง 2 เท่า (ตาราง S2) เนื่องจากผลของการกรองอนุภาคที่มีไวรัสด้วยหน้ากาก

ดังนั้น สำหรับความน่าจะเป็นของการติดเชื้อที่ 0.01% เท่ากัน กลุ่มที่อ้างอิงในชั้นเรียน หากประมาณการโดยสมการที่ 7 ที่ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินเดียวกัน จะมีปริมาณต่ำกว่ากรณีที่ผู้โดยสารร่วมที่สวมหน้ากาก N95 ทั้งหมดถึง 30 เท่า แต่สูงกว่าประมาณ 2 เท่า หากเทียบกลุ่มผู้ไม่สวมหน้ากาก (รูปที่ 2A)

ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยหนึ่งคนกำลังเป็นผู้ติดเชื้อ, (η_i) เป็นอีกปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อความเสี่ยงในการติดเชื้อ เนื่องจากความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) เป็นสัดส่วนกับมัน กลับไม่มีผลกระทบกับค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับกรณีอ้างอิงในชั้นเรียน ($\eta = 0.001$) การประมาณการของชั้นเรียนที่มีลักษณะคล้ายกันในนิวยอร์กซิตี้ (NYC) ในเดือนเมษายน ($\eta_i = 0.023$) และในโบลเดอร์ รัฐโคโลราโด ในเดือนมิถุนายน ($\eta_i = 0.0003$) มีค่า ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ P สูงกว่าประมาณ 20 เท่าและต่ำกว่าประมาณ 2 เท่าตามลำดับ (ตาราง S2) และด้วยเหตุนี้ Δc^* จึงมีค่าตามสัดส่วนของ CO_2 ต่ำกว่าและสูงกว่าตามลำดับ (รูปที่ 2A) และเนื่องจาก Δc^* คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่าความแม่นยำทั่วไปในปัจจุบันของเซ็นเซอร์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ราคาประหยัด (± 50 ppm) และเซ็นเซอร์เหล่านั้น ไม่สามารถให้ค่าวัดที่มีความหมาย ในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงหลากหลาย เช่น กรณีของ NYC.

สภาพแวดล้อมปิดมีแนวโน้มว่ามีความจำเป็น เนื่องจากส่งผลต่อค่าน้อยๆที่พอยอมรับได้ของ $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ “ปริมาตรของส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ที่บุคคลที่ไม่ติดเชื้อหายใจเข้าไปเป็นระยะเวลาปกติ (1 ชั่วโมง) ในสภาพแวดล้อมนั้นสำหรับความน่าจะเป็นโดยทั่วไปของการติดเชื้อ (0.01%)”

อย่างไรก็ตาม (ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยคนหนึ่งกำลังมีภูมิคุ้มกัน η_{im}) มักจะไม่สามารถส่งผลให้เกิดความแตกต่างต่อความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) ที่มากกว่าหนึ่ง ปัจจัยภายใต้ 2 เงื่อนไขที่น่าสนใจ เพราะถ้า $\eta_{im} > 50\%$ ของประชากรถึงหรือใกล้เคียงกับภูมิคุ้มกันหมู่ และไม่จำเป็นต้องติดตามความเสี่ยงในการแพร่ระบาดในวงกว้างอีกต่อไป

ตามสมการที่ 7 ตัวแปรอื่นๆที่สามารถส่งผลต่อค่า Δc^*_{co2} คือจำนวนผู้อาศัยในอาคาร (N) ช่วงระยะเวลา (D) ค่าคงที่สำหรับการสลายของไวรัส (λ) และ อัตราการระบายอากาศ (λ_0)

โดยปกติ ค่า Δc^*_{co2} จะไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเหล่านั้นมากนัก แม้ว่าบางตัวแปรจะมีผลต่อ

$$\frac{N}{(N-1)}$$

ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) ตรงใดที่ไม่ได้มีผู้อาศัยเพียงไม่กี่คน เมื่อ N มีบทบาทในสมการที่ 7 ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 เทอมเศษส่วนรวมถึง D, λ และ λ_0 ในสมการที่ 7 มักจะไม่เบี่ยงเบนจาก 1 (รูปที่ S2) และจะใกล้เคียงกับ 1 เมื่อ λD มีขนาดเล็กมาก และ λ/λ_0 เมื่อ λD มีขนาดใหญ่มาก ตรงใดที่สภาพแวดล้อมภายในอาคารไม่มีการระบายอากาศที่ต่ำเกินไป หรือมีการกำจัดไวรัสที่เข้มข้นมาก (เช่น การกรองอากาศหมุนเวียนจำนวนมาก แผ่นกรอง HEPA แบบพกพา และยูวีฆ่าเชื้อโรค) λ/λ_0 จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับ 1 เปรียบเทียบกับ กลุ่มที่อ้างอิงในชั้นเรียน (λ/λ_0 มีค่าประมาณ 1.3) การเพิ่มเวลาเป็นสองเท่าของการระบายอากาศ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Δc^*_{co2} เล็กน้อย ส่วนการเพิ่ม λ/λ_0 ไปถึงค่าประมาณ 3 โดยการเพิ่มวิธีการควบคุมไวรัส จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Δc^*_{co2} มากกว่า แม้ว่ามาตรการเหล่านั้นจะไม่ได้ไปลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น กิจกรรมของผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร ซึ่งลมหายใจที่มีไวรัสออกมาจากผู้ติดเชื้อ (E_p), ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจออกต่อคน ($E_{p,CO2}$) และอัตราการหายใจของบุคคลที่มีโอกาสรับเชื้อ (B) ล้วนเกี่ยวข้องกัน เป็นปัจจัยหลัก หรือปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสี่ยงในการติดเชื้อ

เราจึงรวบรวมข้อมูลของพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นหน้าที่ของกิจกรรม (ระดับความเข้มและระดับการเปลี่ยนแปลง) (ตารางที่ S3) ทั้งนี้ การรวบรวมข้อมูลนี้มีความไม่แน่นอนอย่างมากจากข้อมูล E_p , $E_{p,CO2}$ และ B

ความไม่แน่นอนเหล่านี้คือปัจจุบันยังยากที่วัดเชิงปริมาณ แต่น่าจะใหญ่พอ ที่จะเป็แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนที่สำคัญสำหรับผลลัพธ์ของแบบจำลอง สำหรับแหล่งความไม่แน่นอนอื่นๆ จึงไม่ได้มีการกล่าวถึง

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนอย่างเป็นระบบเพิ่มเติมจะเป็นจุดที่ควรสนใจ อย่างไรก็ตาม แนวโน้มที่แสดงนั้น มีความชัดเจน และสามารถเปิดเผยความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องของกิจกรรมเหล่านี้ ได้อย่างมั่นใจ พุดง่าย ๆ ก็คือ ยิ่งการเปล่งเสียงแข็งแกร่งขึ้นเท่าไร ความเสี่ยงก็จะยิ่งสูงขึ้น และยิ่งทำกิจกรรมที่เข้มข้นมากขึ้นเท่าไร ความเสี่ยงก็จะยิ่งสูงขึ้นเช่นกัน

เราคำนวณ Δc^*_{co2} สำหรับกิจกรรมเหล่านี้เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อ N มีขนาดใหญ่ $D = 1$ ชั่วโมง $\eta_I = 0.001$ $\lambda_0 = 3h^{-1}$, $\lambda = 4h^{-1}$, และไม่สวมหน้ากาก (รูปที่ 2B) ซึ่งเป็นการตั้งค่าที่คล้ายกับกรณีชั้นเรียนเปรียบเทียบ

ทั้งสามกรณี คือ กรณีชั้นเรียนเปรียบเทียบ นักเรียนที่ติดเชื้อ และการเรียนพลศึกษา สามารถเกี่ยวข้องกับกิจกรรมต่างๆ อาทิ “การยืนพูดส่งเสียงดัง” “การหายใจระหว่างหยุดพัก” และ “การหายใจช่วงออกกำลังกายหนัก” ตามลำดับ แต่ละคู่มีค่า Δc^*_{co2} ประมาณ 2 เท่า ที่แตกต่างกัน รวมถึงการสวมใส่หน้ากากด้วย แต่ความแตกต่างของ E_p , $E_{p,CO2}$ และ B จะส่งผลต่อค่า Δc^*_{co2} มากกว่า

จากนั้น เราใช้การวิเคราะห์นี้กับสถานที่จริงนอกเหนือจากกรณีของชั้นเรียน เช่น งานแสดงนักร้อง ประสานเสียงของ Skagit County, รถไฟใต้ดิน, ซูเปอร์มาร์เก็ต (เน้นที่คนงาน) และงานอีเวนต์ในสนาม

กีฬา ซึ่งแม้จะอยู่กลางแจ้ง แต่มักจะมีอากาศนิ่งอยู่ข้าง ทำให้ละอองที่ติดไวรัสสะสมตัวได้ จึงสามารถรักษาได้เหมือนสภาพแวดล้อมในร่ม (ดูตาราง S4)

รูปที่ 2C และรูปที่ S1B แสดง $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ และ $\frac{n_{\Delta\text{CO}_2}}{\langle n \rangle}$ ตามลำดับ

ค่าที่ได้จากสถานที่เหล่านี้ครอบคลุมลำดับความสำคัญและสามารถเชื่อมโยงกรณีเหล่านี้ กับประเภทกิจกรรมของ "การยืนพูดเสียงดัง" "การหายใจขณะหยุดพัก" "การหายใจเบาๆ ขณะออกกำลังกาย" (หรือ "การพูดเบา ๆ") และ "การพูดคุยระหว่างการออกกำลังกายเบา ๆ" (หรือ "การออกกำลังกายเบาๆโดยมีการพูดเสียงดัง")

สำหรับคณะกรรมาธิการประสานเสียงจริง ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยหนึ่งคนกำลังเป็นผู้ติดเชื้อ, (η_i) มีลำดับสำคัญต่ำกว่า 0.1% ในขณะที่ ลมหายใจที่มีไวรัสออกมาจากผู้ติดเชื้อ (E_p) มีความสำคัญมากขึ้น ผลก็คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน จะใกล้เคียงกับคำว่า "การยืนพูดดัง" ใน รูปที่ 2B. ค่า $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ ในกรณีของสนามกีฬา จะอยู่ระหว่าง "การพูดระหว่างการออกกำลังกายแบบเบา" และ "การพูดเสียงดังระหว่างการออกกำลังกายเบา" เนื่องจากกิจกรรมทั้งสองอาจเกิดขึ้นได้พร้อมกัน

ค่าความต่างของ $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ ในซูเปอร์มาร์เก็ตและกิจกรรมเชื่อมโยงกันแสดงในรูปที่ 2B โดยมีการพิจารณาช่วงเวลาค่อนข้างนาน (8 ชั่วโมง) การหายใจเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินเข้าไปของพนักงานระหว่างช่วง 8 ชั่วโมง นั้นเปรียบเทียบกับได้กับ "การหายใจระหว่างการออกกำลังกายแบบเบา" หรือ "การพูดระหว่างการออกกำลังกายเบา" ส่วนค่า $\Delta c^*_{\text{CO}_2}$ ในรถไฟใต้ดินนั้นมีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของ "การหายใจขณะหยุดพัก" แสดงในรูป 2B เหตุเพราะ ใช้เวลาสั้นกว่า และสวมใส่หน้ากาก

ดังที่แสดงไว้ข้างต้น การวิเคราะห์ความเสี่ยงในการติดเชื้อสำหรับเงื่อนไขต่างๆ อาจขึ้นอยู่กับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องด้วยการปรับ ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยหนึ่งคนกำลังเป็นผู้ติดเชื้อ ระยะเวลา การสวมใส่หน้ากาก ฯลฯ

สำหรับการกำหนดนโยบายเกี่ยวกับระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคารที่ยอมรับได้ เรายังคงการแนะนำแนวทางให้พิจารณาจากกิจกรรมร่วมอีกด้วย การอ้างอิงระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินสำหรับสภาพแวดล้อมในร่มที่มีกิจกรรมบางประเภทที่เกี่ยวข้องเป็นหลัก สามารถดูได้ในรูปที่ 2B

จากนั้น อัตราส่วนการผสมนี้สามารถปรับขนาดสำหรับระยะเวลาทั่วไป (D) (โดยการคูณ) และเป้าหมายความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) (โดยการคูณอัตราส่วนเป็น 0.01%) เพื่อให้ได้เกณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ซึ่งอาจผ่อนคลายได้อีกเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับนโยบายการสวมหน้ากากในพื้นที่

ผลรวมของค่านี้และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกอาคารในพื้นที่ ซึ่งเราแนะนำให้วัดค่าหลังอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากความผันแปรที่เป็นไปได้คือเกณฑ์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอาคารขั้นสุดท้ายที่แนะนำ สำหรับการตั้งค่าที่ซับซ้อนมากขึ้น (เช่น ด้วยเครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จำนวนมากในบริษัทหรือโรงเรียน) ควรวางมิเตอร์ไว้กลางแจ้งเพื่อวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง

ตามความรู้ของเราก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการวัดเชิงปริมาณ ที่สามารถทำได้ง่ายโดยเซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำ ที่รวดเร็วในเป็นตัวแทนของความเสี่ยงในการติดเชื้อ ความเสี่ยงสัมพัทธ์ของการติดเชื้อในสถานการณ์ที่กำหนด สามารถแสดงได้จากคาร์ระดับที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน สามารถประมาณค่าความเสี่ยง ได้เมื่อทราบพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ ในสถานการณ์ต่างๆ สามารถทำได้ง่ายด้วยเครื่องมือประมาณการ การแพร่กระจายของละอองลอย COVID-19 ทางออนไลน์

นอกจากนั้น วิธีนี้เป็นการใช้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ ที่ดีกว่า การเกณฑ์วัดค่าเดียวของสำหรับทุกสถานการณ์ จากการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน

อย่างไรก็ตาม การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของเราอาจยังไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานทั่วไป หน่วยงานกำกับดูแล อาจมีเกณฑ์ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับพื้นที่ในร่มประเภทต่างๆ หรือให้ความช่วยเหลือเพิ่มเติมสำหรับธุรกิจ ในการดำเนินการดังกล่าว

แม้ว่าจะไม่ทราบค่าบางพารามิเตอร์ แต่การศึกษาของเราแนะนำว่า การรักษาระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความเข้มข้นของกิจกรรมทางกายภาพ และระดับการเปล่งเสียงของกิจกรรมให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ในสภาพแวดล้อมในร่มจะยังช่วยลดความเสี่ยง