

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.

ลิงค์

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

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

สรุปเนื้อหา

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

การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือราคาถูกน่าจะเป็นวิธีวัดความเสี่ยงต่อการระบาดของโควิด 19 และโรคระบบทางเดินหายใจอื่นๆ ผ่านทางละอองลอยภายในพื้นที่ปิดที่ดีและสามารถใช้ได้ในวงกว้าง

เราได้แสดงการวิเคราะห์โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแทนความเสี่ยงในสภาวะแวดล้อมของสถานที่อากาศไม่ถ่ายเทแบบต่างๆ และพบว่า ความเสี่ยงในการติดเชื้อมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกับระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีค่ามาก กับสภาพแวดล้อมที่มีการกำหนดขนาด และโดยเหตุผลดังกล่าวเราสามารถใช้อากาศเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันในพื้นที่นั้น

แม้ว่ามีความไม่แน่นอนซึ่งส่วนใหญ่มาจากอัตราการหายใจออก ที่มีไวรัสปะปนมาด้วย และยังเกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ ทั้งนี้การศึกษาของเราให้คำแนะนำไปที่ การใช้ค่าวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต้นทุนต่ำ ในการติดตามความเสี่ยงในการติดเชื้อของสถานที่อากาศไม่ถ่ายเท

Introduction

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

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

ละอองลอยดังกล่าวได้รับการตรวจพบในอากาศที่หายใจออกของผู้ป่วยโควิด-19 และในอากาศในโรงพยาบาล และพบว่า พฤติกรรมของละอองลอยขนาดเล็กที่อยู่ห่างออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้น จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับก๊าซ การแพร่เชื้อภายในอาคารนั้นทำได้ง่ายกว่ากลางแจ้งมาก ซึ่งสอดคล้องกับละอองลอยมากที่สุด

เนื่องจากมนุษย์ใช้เวลาส่วนใหญ่ในสภาพแวดล้อมในร่ม ซึ่งปริมาณอากาศมีจำกัดและละอองไวรัสอาจสะสมได้ง่าย

การลดการแพร่กระจายของโควิด 19 ในอาคารจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่ง และเป็นกุญแจสำคัญในการเปิดเศรษฐกิจและสังคมใหม่ ให้ประสบความสำเร็จ จำเป็นต้องมีมาตรการที่ใช้งานได้จริง ราคาไม่แพง และนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อทำการตรวจวัดและช่วยยับยั้งความเสี่ยงของการแพร่เชื้อภายในอาคารหรือสถานที่อากาศไม่ถ่ายเท

การวัดไวรัสที่มากับละอองลอยโดยตรงนั้น ทำได้ยากและใช้เวลามาก

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำมาเป็นตัวบ่งชี้การระบายอากาศของพื้นที่ในร่ม ตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 และเมื่อเร็วๆ นี้ได้ถูกนำไปใช้ฐานะตัวแทนความเสี่ยงในการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อทางเดินหายใจ อันเนื่องมาจากละอองลอย ที่ประกอบด้วยเชื้อโรคและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกหายใจออกมารวมกันโดยผู้ที่ติดเชื้อ

เนื่องจากระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเกือบจะคงที่

และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มากเกินไปภายในอาคารมักจะมาจากการหายใจออกของมนุษย์

การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในร่มโดยเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ต้นทุนต่ำจะเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีของความเสี่ยงในการติดเชื้อและเหมาะสำหรับการใช้งาน จำนวนมาก

อย่างไรก็ตามระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สอดคล้องกับความเสี่ยงในการติดเชื้อโควิด 19 ยังไม่เป็นที่แน่ชัด

ระดับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกแนะนำให้เป็นเกณฑ์ แต่ยังคงขาดข้อมูลพื้นฐานที่เพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ข้อเสนอแนะเหล่านั้นให้ใช้เกณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพียงเท่านั้นในแต่ละแนวทาง

แม้ว่าการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงครั้งเดียว ในสภาพแวดล้อมในร่มทั่วไป

จะทำให้มั่นใจได้ถึงความเสี่ยงระดับต่ำของการติดเชื้อโควิด 19 หรือไม่ยังคงเป็นคำถามเปิดอยู่

แต่ก็ยังมีมีความสำคัญสำหรับการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ โดยใช้ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการศึกษานี้ เราได้แสดงการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อโควิด 19 ในอาคาร โดยการการส่งผ่านละอองลอย ในระดับห้องเท่านั้น

(กล่าวคือ สมมติว่ามีการรักษาระยะห่างทางสังคมไว้ เพื่อจำกัดผลของละอองลอยในระยะใกล้

และไม่รวมการแพร่กระจายของการติดเชื้อจากการสัมผัสพื้นผิวร่วมกัน)

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์หายใจออก และต่อมาก็คือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

บางส่วนในฐานะตัวแทนความเสี่ยงในการติดเชื้อ บนพื้นฐานของข้อมูลที่มีอยู่ เราเสนอสมมติฐานของความสัมพันธ์เหล่านี้กับค่าทั่วไปของพื้นที่ในร่ม

เพื่อตอบคำถามที่กล่าวถึงข้างต้น

Material and Methods

เพื่อให้ได้ ความเข้มข้นของละอองลอยที่มีไวรัสในอากาศในพื้นที่ปิด เราใช้สมมติฐานว่า อากาศในห้องผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Well-mixed air)

สามารถวัดระดับความไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้โดยเครื่องมือวัดราคาไม่แพง 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 ($\langle n \rangle$) สำหรับผู้ที่เดิมนั้นไม่ติดเชื้อที่สอดคล้องกับ ระดับภูมิคุ้มกันที่กำหนดในประชากรท้องถิ่น (ความน่าจะเป็นของผู้อาศัยคนหนึ่งกำลังมีภูมิคุ้มกัน 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 การแสดงการวิเคราะห์ของค่าที่คาดหวัง c_{avg} ตามความชุกของการติดเชื้อในประชากรท้องถิ่น (ความน่าจะเป็นของผู้อาศัยหนึ่งคนกำลังเป็นผู้ติดเชื้อ, η_i), โดยที่ ค่าความเข้มข้นของไวรัส (c_{avg}) 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 คือจำนวนผู้อาศัย

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

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

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

โดยที่

$n_{\Delta\text{CO}_2}$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน (จากลมหายใจออกจากมนุษย์) ที่หายใจเข้าไป (ลูกบาศก์เมตร)

$\Delta c_{\text{avg,CO}_2}$ คือ อัตราส่วนการผสมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน

E_{p,CO_2} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจออก (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

λ_0 คือ อัตราการระบายอากาศ (ต่อชั่วโมง)

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

เนื่องจากการติดเชื้อทางอากาศของ SARS-CoV-2 และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน เป็นลมหายใจเข้าและออกร่วมกัน ดังนั้นในหลักการ $n_{\Delta\text{CO}_2}$ สามารถเป็นตัวแทนของ $\langle n \rangle$

$$\frac{n_{\Delta\text{CO}_2}}{\langle n \rangle} = \frac{NE_{p,\text{CO}_2}}{(1 - \eta_{\text{im}})\eta_I(N - 1)E_p(1 - m_{\text{ex}})(1 - m_{\text{in}})} \times \frac{\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{-\lambda_0 D}}{\lambda_0^2 D}}{\frac{1}{\lambda} - \frac{1 - e^{-\lambda D}}{\lambda^2 D}} \quad (6)$$

สัดส่วนของ $n_{\Delta\text{CO}_2}$ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินที่หายใจเข้าไป (ลูกบาศก์เมตร) ต่อ $\langle n \rangle$

ค่าที่คาดหวังของสำหรับผู้ที่เดิมนั้นไม่ติดเชื้อ แสดงถึงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน

ที่หายใจเข้าซึ่งสอดคล้องกับเชื้อหนึ่งหน่วยที่ถูกหายใจเข้า

อย่างไรก็ตาม การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวทำได้ค่อนข้างยาก

และไม่เหมาะสำหรับการตรวจสอบความเสี่ยงในการแพร่เชื้อในวงกว้าง ซึ่งมักต้องการกระบวนการตัดสินใจที่รวดเร็ว

โดยอาศัยการอ่านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคาร (โดยปกติวัดใน หน่วยต่อล้านส่วน) ของเครื่องวัดที่มีราคาไม่แพง

ดังนั้นเราจึงเสนอตัววัดอื่นที่เป็นตัวแทนของความเสี่ยงของสภาพแวดล้อมที่มี ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยเป็นโรคติดเชื้อ (η_I) = 0.1%

ที่ค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ($\Delta c_{\text{CO}_2}^*$) ได้แก่ อัตราส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน

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

ที่ปลอดภัยกับค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่คนหนึ่งจะแพร่เชื้อกระจายออกไปได้อีกก็คน (R_0) และ

สามารถเปรียบเทียบได้โดยง่ายกับค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องมือวัดอ่านค่าได้

สัดส่วนของค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินต่อค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน เป็นความน่าจะเป็นของผู้ที่ไม่ติดเชื้อจากช่วงเริ่มต้น
ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงที่ 0.01%

ค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับพารามิเตอร์อื่นๆ ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ (P) 0.01%
เป็นค่าอ้างอิงไม่ได้หมายความว่าไปถึงความปลอดภัยในทุกสถานการณ์ สาเหตุเพราะเมื่อค่าขนาดของประชากรและช่วงระยะเวลามีขนาดใหญ่
รวมถึงเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น ความสำคัญอยู่ที่ ความน่าจะเป็นโดยรวมของการติดเชื้อของผู้มีโอกาสรับเชื้อหนึ่งคนและหรือ การติดเชื้อโดยรวม

Results and Discussion

ค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ลำดับและการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลให้มีความแตกต่างของ
อัตราส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินแม้จะมีการตั้งค่าคล้ายกัน ดังในตัวอย่าง เราได้ทำแบบจำลองสำหรับชั้นเรียนในมหาวิทยาลัย
ค่าของ อัตราส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($\Delta C^*_{CO_2}$) และ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน ที่หายใจเข้า
ซึ่งสอดคล้องกับเชื้อหนึ่งหน่วยที่ถูกหายใจเข้า แสดงในรูปประกอบที่ 2A และ S1A

$$\frac{n_{\Delta CO_2}}{\langle n \rangle}$$

ในตัวอย่างกรณีชั้นเรียน มีการสมมติว่าผู้แพร่เชื้อเป็นผู้สอน เปรียบเทียบกับกรณีที่นักเรียนเป็นผู้ติดเชื้อ ค่า $\Delta C^*_{CO_2}$ น้อยกว่ากัน 1.5 เท่า
นั่นเป็นเพราะว่าการออกเสียง มีลมหายใจที่มีไวรัส ออกมาจากของผู้สอนมาก เมื่อเทียบกับนักเรียนที่นำจะพูดและออกเสียงน้อยกว่า
ส่วนในการเรียนกรณีวิชาพลศึกษาในห้องเรียนแบบเดียวกันนั้น มีสมมติฐานว่าผู้ร่วมกิจกรรมมีการออกกำลังกาย แต่ไม่ได้พูดคุยกัน ค่า $\Delta C^*_{CO_2}$
น้อยกว่าผู้ติดเชื้อที่เข้าเรียนในห้องเรียนปกติ เมื่อเทียบกับการนั่ง
การออกกำลังกายอย่างหนักจะเพิ่มอัตราการติดเชื้อไวรัสและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของผู้อาศัยในอาคารให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน
ซึ่งไม่ได้เปลี่ยนระดับค่าอ้างอิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน อย่างไรก็ตามอัตราการหายใจของผู้ที่ทำกิจกรรมที่เข้มข้นนั้นสูงกว่าการนั่งมาก

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

ด้วยเหตุนี้ ค่าแนะนำเดียวเกี่ยวกับเกณฑ์ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคารจึงใช้ไม่ได้ ในเกณฑ์เดียวกับกับหลายโรงเรียน

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

เห็นได้ชัดว่า ความน่าจะเป็นของผู้อยู่อาศัยหนึ่งคนกำลังเป็นผู้ติดเชื้อ η_i เป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่ควบคุมความเสี่ยงในการติดเชื้อ
เนื่องจากความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ P เป็นสัดส่วนกัน กลับไม่มีผลกระทบบนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

[ยังแปลไม่จบ]