

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

An upper bound on one-to-one exposure to infectious human respiratory particles

<https://www.pnas.org/content/118/49/e2110117118>

## ขอบเขตบนสุดของการได้รับอนุภาคจากการหายใจของมนุษย์ที่แพร่เชื้อได้แบบหนึ่งต่อหนึ่ง

### ความสำคัญ

การสวมหน้ากากและรักษาระยะห่างทางสังคมเป็นสิ่งที่ผู้คนทั่วโลกต่างคุ้นเคยในระหว่างการระบาดใหญ่ของ SARS-CoV-2 ที่ดำเนินอย่างต่อเนื่อง หลักฐานบ่งชี้ว่าวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 อย่างไรก็ตาม ไม่เป็นที่แน่ชัดว่าความเสี่ยงของการติดเชื้อได้รับผลกระทบอย่างไรจากการสวมหน้ากากในระหว่างการพบปะระหว่างบุคคลในระยะใกล้หรือเมื่อเว้นระยะห่างทางสังคมโดยไม่สวมหน้ากาก ผลลัพธ์ของเราชี้ว่าการสวมหน้ากากช่วยลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 ได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับการเว้นระยะห่างทางสังคม เราพบความเสี่ยงของการติดเชื้อที่ต่ำมากเมื่อทุกคนสวมหน้ากากอนามัย แม้จะไม่พอดีเข้ากับใบหน้าอย่างสมบูรณ์แบบก็ตาม

### บทคัดย่อ

มีหลักฐานมากมายที่บ่งชี้ว่าการสวมหน้ากากและการเว้นระยะห่างทางสังคมมีประสิทธิภาพในการลดการแพร่ของโคโรนาไวรัสก่อโรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง 2 (SARS-CoV-2) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความซับซ้อนของการแพร่ผ่านอากาศของโรค ทำให้เป็นเรื่องยากในการระบุระดับของประสิทธิผล โดยเฉพาะในกรณีของการได้รับเชื้อแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ในที่นี้เราเสนอแนวคิดสำหรับขอบเขตบนสุดของการได้รับอนุภาคจากการหายใจของมนุษย์ที่แพร่เชื้อได้แบบหนึ่งต่อหนึ่ง และนำมาใช้กับ SARS-CoV-2 ซึ่งในการคำนวณการได้รับเชื้อและความเสี่ยงของการติดเชื้อ เราใช้ฐานข้อมูลการแจกแจงขนาดอนุภาคจากการหายใจที่มีความครอบคลุม; ฟิสิกส์เกี่ยวกับการไหลของอากาศจากการหายใจออก; การรั่วจากหน้ากากประเภทต่างๆ และการปรับให้พอดีซึ่งตรวจวัดโดยใช้อาสาสมัคร; การพิจารณาถึงการลดขนาดของอนุภาคในสภาพแวดล้อมเนื่องจากการระเหย; รวมถึงการได้รับความชื้นคืน ความสามารถในการสูดเข้า และการเกาะตัวภายในทางเดินหายใจของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อ เราพบว่าสำหรับปริมาณไวรัสและปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรคของ SARS-CoV-2 ปกติ การเว้นระยะห่างทางสังคมเพียงอย่างเดียวทำให้มีขอบเขตบนสุดของความเสี่ยงของการติดเชื้อ 90% แม้ผ่านไปไม่กี่นาที แม้จะเว้นระยะถึง 3.0 ม. ระหว่างสองคนที่กำลังพูด หากผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากากเพียงฝ่ายเดียวและสนทนากับผู้พูดที่แพร่เชื้อได้โดยเว้นระยะห่าง 1.5 ม. ขอบเขตบนสุดจะลดลงอย่างชัดเจน; กล่าวคือ เมื่อสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ขอบเขตบนสุดจะถึง 90% หลังจาก 30 นาที และเมื่อใช้หน้ากาก FFP2 ค่าจะยังคงอยู่ที่ประมาณ 20% แม้หลังจากผ่านไป 1 ชม. เมื่อทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ขณะที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้กำลังพูด ขอบเขตบนสุดเชิงอนุรักษ์นิยมจะยังคงต่ำกว่า 30% หลังจาก 1 ชม. แต่เมื่อทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากาก FFP2 ที่ปรับให้พอดีอย่างเหมาะสม จะได้ค่า 0.4% เราสรุปว่าการสวมหน้ากากที่เหมาะสมในชุมชนเป็นการป้องกันที่ดีเยี่ยมทั้งต่อบุคคลอื่นๆ และผู้สวม ทั้งยังช่วยให้การเว้นระยะห่างทางสังคมมีความสำคัญน้อยลงอีกด้วย

โรคที่แพร่เชื้อผ่านอากาศได้ เช่น โรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง (SARS) 2002 โรคหัดไขหวัดใหญ่ตามฤดูกาล วัณโรค และโรคจากโคโรนาไวรัส 2019 (โควิด 19) อันเนื่องมาจากโคโรนาไวรัสโรคซาร์ส 2 (SARS-CoV-2) ซึ่งพบเมื่อไม่นานมานี้ มีการแพร่โดยการได้รับเชื้อทั้งโดยตรงและโดยอ้อมจากผู้แพร่เชื้อได้ไปยังผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อ (1-4) หนึ่งในเส้นทางการแพร่ทางอ้อมคือการเคลื่อนที่ผ่านอากาศของอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากทางเดินหายใจของผู้ที่แพร่เชื้อได้ นั่นคือ โพรงจมูก/ช่องปาก คอหอย กล้องเสียง หลอดลมใหญ่ และปอด ซึ่งในที่นี้เราใช้คำว่าอนุภาค สำหรับอนุภาคขนาด <1-มม. ที่แขวนลอยในอากาศ โดยไม่คำนึงถึงองค์ประกอบ

อนุภาคจากการหายใจของมนุษย์มีความแปรปรวนอย่างมากในแง่องค์ประกอบและขนาด ในมาตราส่วนความยาวที่แตกต่างกันหลายช่วงยกกำลังสิบ (เช่น ข้อมูลอ้างอิง 4 และ 5 และข้อมูลอ้างอิงในที่นี้) ความเข้มข้นของอนุภาคที่หายใจออกมาและขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์อย่างมากกับประเภทของกิจกรรมการหายใจ เช่น การพูดหรือร้องเพลง เมื่อเปรียบเทียบกับหายใจ กิจกรรมการหายใจที่เกี่ยวข้องกับการเปล่งเสียง มีปัจจัยจากความดันเสียง ความถี่ที่อากาศมีการไหลอัตราสูงสุด และเสียงพยัญชนะที่เปล่งออกมา ซึ่งสัมพันธ์อย่างมากต่อการปล่อยอนุภาค (4, 5) อนุภาคจากการหายใจที่แพร่เชื้อได้อาจมีจุลชีพก่อโรคเพียงตัวเดียวหรือจำนวนมากเมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้หายใจออกมา และเมื่อผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อสูดเข้าไปจะทำให้มีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อหากมีการดูดซับจนถึงปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรค (3) นอกจากนี้ ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และอุณหภูมิยังมีอิทธิพลต่อการระเหยและการตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วงของอนุภาคเปียก เมื่อหายใจออกมาสู่สภาพแวดล้อม (โปรดดูข้อมูลอ้างอิง 3-5 และข้อมูลอ้างอิงในที่นี้) เป็นที่ถกเถียงอย่างต่อเนื่องว่าโควิด 19 มีการแพร่ทางละอองลอยหรือว่าละอองเป็นหลัก (6, 7) และเป็นที่ถกเถียงมาอย่างยาวนานเกี่ยวกับความหมายที่แท้จริงของคำว่าละอองลอยหรือละออง (8) สิ่งที่สำคัญคือ สิ่งที่หล่อเลี้ยงการถกเถียงเหล่านี้คือการขาดความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการแพร่ของโรคผ่านอากาศ หรือกล่าวอย่างง่ายคือ ลักษณะที่แน่ชัดว่าอนุภาคต่างๆ ที่ก่อเกิดภายในทางเดินหายใจของผู้ที่แพร่เชื้อได้กลายเป็นอนุภาคที่แพร่ผ่านอากาศได้อย่างไร มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรในสภาพแวดล้อมรวมถึงเกาะตัวในทางเดินหายใจของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อที่ใดและในปริมาณเท่าใด แม้จะดูเป็นเรื่องง่าย แต่กลไกโดยละเอียดที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนของกระบวนการเหล่านี้ก็กลับมีความซับซ้อนอย่างยิ่ง (4)

สำหรับด้านต้นทางซึ่งหมายถึงผู้ที่แพร่เชื้อได้ เรามีการขึ้นต่อกันทางกายวิภาคสรีรวิทยาซึ่งผสมเข้ากับความซับซ้อนของการก่อเกิดอนุภาคซึ่งควบคุมโดยลักษณะของการหายใจ และความเข้มข้นของจุลชีพก่อโรคซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด อันเนื่องมาจากความแตกต่างของตำแหน่งที่ก่อเกิด ปริมาณหรือลักษณะธรรมชาติของจุลชีพก่อโรคเอง ผู้ที่แพร่เชื้อได้จะปล่อยกลุ่มอนุภาคที่ปั่นป่วนออกสู่อากาศในสภาพแวดล้อม ซึ่งมีการกระจายแบบปั่นป่วนและเคลื่อนที่ตามแนวอนนอกสู่สภาพแวดล้อม การกระจายตามแนวอนและแบบปั่นป่วนของกลุ่มละอองที่หายใจออกมาได้รับผลกระทบอย่างมากจากภาวะทางอุณหพลศาสตร์ของสภาพแวดล้อมและการไหลของอากาศ เช่น ประเภทและระดับของการระบายอากาศในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร หรือสภาวะของลมภายนอกอาคาร เช่นเดียวกับกระแสลมอื่นๆ ตามธรรมชาติที่พัดอากาศที่หายใจออกมาให้ไหลออกไป อนุภาคที่หายใจออกมาอาจสูญเสียส่วนประกอบที่สูญเสียได้ขณะที่เคลื่อนที่ตามแนวอน อันเนื่องจากการระเหย ซึ่งระบุได้จากองค์ประกอบทางเคมี สภาวะทางอุณหพลศาสตร์ของสภาพแวดล้อม ความเร็วของกระแสลมที่หายใจออกมา การผสมกับอากาศภายนอก และระยะเวลาที่จำเป็นเพื่อให้มีขนาดที่มีสภาพสมดุล (4, 9) ขณะที่เคลื่อนที่ตามแนวอนพร้อมกับการไหล อนุภาคบางส่วนจะสูญหายเนื่องจากการเกาะตัวบนพื้นผิวในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รูปทรง ความหนาแน่น และประจุของอนุภาค และอาจถูกกวาดตะกอนให้ลอยขึ้นมาในภายหลัง นอกจากนี้ จุลชีพก่อโรคอาจสูญเสียความสามารถในการแพร่เชื้อก่อนที่จะมีโอกาสดูดเชื้อเข้าสู่

ไป สำหรับด้านผู้รับซึ่งหมายถึงมีโอกาสดูดเชื้อ กลไกที่ควบคุมความสามารถในการสูดเข้าและการดูดซับอนุภาคที่มีจุลชีพก่อโรคไม่เพียงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและกายวิภาคศาสตร์ของผู้รับเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการหายใจของผู้รับ ขนาดและองค์ประกอบของอนุภาค และอัตราการเติบโตจากการได้รับความชื้นขึ้นเนื่องจากการควบแน่นในทางเดินหายใจของผู้รับ รวมถึงความเร็ว อุณหภูมิ และ RH ของอากาศที่สูดเข้าไป

สามารถสรุปได้ว่าการแพร่ของโรคผ่านอากาศเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพที่ซับซ้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับมาตราส่วนเชิงพื้นที่และระยะเวลาที่กว้าง การที่จะทำนายเส้นทางสืบเชื้อที่มีความไม่แน่นอนในระดับที่ยอมรับได้จึงทำได้ยากมาก ความไม่แน่นอนเกี่ยวกับเส้นทางและกลไกการแพร่ผ่านอากาศอาจถือเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เกิดความแตกต่างของมาตรการควบคุมการติดเชื้อที่ประเทศต่างๆ ได้นำมาใช้ ตัวอย่างที่โดดเด่นคือการใช้หน้ากากอนามัย ซึ่งในระยะแรกไม่แนะนำให้สาธารณะชนใช้ หรือแนะนำให้ใช้เพียงคนที่แสดงอาการและพนักงานสุขภาพในสหรัฐอเมริกาเท่านั้น (10) อีกตัวอย่างหนึ่งคือการกักเฝ้าเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการเว้นระยะห่างทางสังคมเพื่อลดความเสี่ยงของการแพร่ (โปรดดูข้อมูลอ้างอิง 11 and 12 เป็นต้น) ซึ่งเกิดขึ้นแม้จะพบข้อเท็จจริงที่ว่า การสวมหน้ากากและการเว้นระยะห่างทางสังคมในชุมชนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 ในหลายประเทศในเอเชียตะวันออก (โปรดดูข้อมูลอ้างอิง 13-16 เป็นต้น) และยังมีหลักฐานมากมายจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (17) รวมถึงการวิเคราะห์หัตถ์ภิธานและการสังเคราะห์ข้อมูลจากสิ่งตีพิมพ์ (11, 18-20) ที่ชี้ว่าการสวมหน้ากากรวมถึงการเว้นระยะห่างทางสังคมมีประสิทธิภาพในการลดการแพร่ของ SARS-CoV-2

ในระหว่างการระบาดใหญ่ของโควิด 19 ได้มีความคืบหน้าที่สำคัญเกี่ยวกับปัญหาว่าด้วยสื่อกลาง ซึ่งเป็นหนึ่งในสามส่วนสำคัญอันได้แก่ ต้นทาง-สื่อกลาง-ผู้รับ ด้วยการลดความซับซ้อนของการกระจายของละอองลอยที่แพร่เชื้อได้ให้เรียบง่ายขึ้นอย่างมาก โดยใช้สมมติฐานของห้องที่อากาศผสมอย่างสมบูรณ์ (เช่น ข้อมูลอ้างอิง 3, 12, and 21-25) โมเดลเหล่านี้ใช้สมมติฐานว่าสารมลพิษ (กล่าวคือ อนุภาคจากการหายใจ) มีการเจือจางในทันทีและผสมกันโดยสมบูรณ์ในปริมาตรของห้องก่อนที่จะไปถึงผู้รับ เป็นผลทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคมีค่าเท่ากันในทุกส่วนของห้อง และลดลงในอัตราเอ็กซ์โพเนนเชียลตามเวลา ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศของห้อง อัตราการเกาะตัว อัตราการกรอง และขนาดอนุภาค สมมติฐานนี้ช่วยให้สามารถศึกษาคุณสมบัติเฉลี่ยภายในห้องได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงความไม่สม่ำเสมอของลักษณะการปั่นป่วน การเคลื่อนย้ายตามการไหล หรือปัจจัยอื่นๆ ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง เพื่อประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อในเขตใกล้ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วในห้องจะมีความแปรปรวนของความเข้มข้น แม้ในกรณีที่มีการไหลของอากาศภายในห้องจะมีลักษณะปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ก็ตาม สมมติฐานของห้องที่อากาศผสมอย่างสมบูรณ์ไม่สามารถทำนายถึงความเสี่ยงของการติดเชื้อได้เมื่อห้องมีปริมาตรขนาดใหญ่หรือผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้ออยู่ห่างกันเพียงเล็กน้อย ในกรณีดังกล่าวจะต้องพิจารณาถึงการสัมผัสเขตใกล้ (กล่าวคือ ในระยะใกล้) ซึ่งความเข้มข้นของจุลชีพก่อโรคจะสูงกว่าที่ทำนายด้วยโมเดลห้องที่อากาศผสมอย่างสมบูรณ์อย่างมาก

ในชีวิตประจำวันมีเหตุการณ์การพบปะมากมายซึ่งบุคคลมีการสัมผัสในเขตใกล้ ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารโต้ตอบเป็นระยะสั้นๆ กับแคชเชียร์ในซูเปอร์มาร์เก็ต การรับประทานอาหารกลางวันกับเพื่อนร่วมงาน การเข้าแถวรอ การพูดคุย การร้องเพลงร่วมกัน การออกกำลังกาย และอื่นๆ ในการพบปะเหล่านี้ทั้งสองฝ่ายหรือฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งอาจสวมหน้ากาก พวกเขาอาจใช้หน้ากากประเภทต่างกันซึ่งมีการปรับให้พอดีแตกต่างกัน หรือพวกเขาอาจเว้นระยะห่างทางสังคมเพียงอย่างเดียว

ขณะที่การศึกษาอย่างชาญฉลาดช่วยให้ทราบข้อมูลมากมายในบริบทนี้ ([3](#), [4](#), [11](#), [17](#)–[19](#), [21](#), [22](#), [26](#)–[28](#)) ผลงานของเรามีความก้าวหน้ายิ่งกว่านั้นและยังนำเสนอขอบเขตบนสุดของความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อ ในรูปแบบปัจจัยระบุจำนวนที่สามารถช่วยชี้นำมาตรการควบคุมการติดเชื้อได้ ขณะที่การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเราถูกจำกัดไว้เพียงพารามิเตอร์ทั่วไปสำหรับ SARS-CoV-2 แต่วิธีการของเรายังสามารถใช้ได้กับพารามิเตอร์อื่นๆ และโรคติดเชื้อทางเดินหายใจชนิดอื่นๆ ได้เช่นกัน เราได้ตอบคำถามต่อไปนี้:

- อะไรคือขอบเขตบนสุดสำหรับความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 จากการสัมผัสในเขตใกล้?
- ขอบเขตบนสุดนี้มีความเปลี่ยนแปลงอย่างไรตามกิจกรรมการหายใจ กล่าวคือ การหายใจตามปกติเทียบกับการพูด?
- ขอบเขตบนสุดนี้มีความผันผวนตามระยะเวลาการสัมผัสอย่างไร?
- ประเภทของหน้ากากและลักษณะการสวมเข้ากับใบหน้าส่งผลต่อขอบเขตบนสุดอย่างไร?
- กลยุทธ์การแทรกแซงใดมีประสิทธิภาพมากที่สุด ระหว่างการสวมหน้ากากและการเว้นระยะห่างทางสังคม?

## ขอบเขตบนสุดของความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อ

ความเสี่ยงของการติดเชื้อจะสัมพันธ์กับปริมาณจุลชีพก่อโรคที่ดูดซับ  $\mu$  ซึ่งกำหนดไว้อย่างสมบูรณ์ใน [สมการ 3](#) และสามารถถือเป็น “การได้รับเชื้อประสิทธิภาพ” แต่ยังสามารถลดความซับซ้อนในที่นี้เพื่อเสนอแนวคิดของขอบเขตบนสุดได้

$$\mu \propto n_I \times TOL \times f_d \times TIL \times D_{rt}, \quad [1]$$

เมื่อ  $n_I$  เป็นความเข้มข้นของจำนวนจุลชีพก่อโรคซึ่งก่อเกิดจากผู้แพร่เชื้อได้  $TOL$  คือการรั่วไหลออกสู่ภายนอกโดยรวมของหน้ากากซึ่งผู้แพร่เชื้อได้สวม  $1-f_d$  คือการลดลงของความเข้มข้นของอนุภาคที่แพร่เชื้อได้อันเนื่องมาจากการเจือจางและการเกาะตัวในสิ่งแวดล้อมระหว่างผู้แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อ  $TIL$  คือการรั่วไหลขณะรับเข้าโดยรวมของหน้ากากซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อสวม และ  $D_{rt}$  คือประสิทธิภาพของการรับ/การเกาะตัวในทางเดินหายใจของมีโอกาสดูดเชื้อสำหรับผู้ที่แพร่เชื้อได้ (หรือผู้มีโอกาสติดเชื้อ) ที่ไม่ได้สวมหน้ากาก ค่า  $TOL$  (หรือ  $TIL$ ) จะเท่ากับ 1.0 สำหรับผู้ที่แพร่เชื้อได้ที่ไม่ได้สวมหน้ากาก ค่า  $TOL$  จะสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขณะที่หายใจเข้า  $d_0$  สำหรับผู้มีโอกาสติดเชื้อที่สวมหน้ากาก ค่า  $TIL$  จะสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคขณะที่หายใจเข้า  $d_e$  ซึ่งในกรณีส่วนใหญ่จะเล็กกว่า  $d_0$  อันเป็นผลเนื่องมาจากการระเหยไปในสภาพแวดล้อมที่

ค่า RH 30% ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำสำหรับพื้นที่ภายในอาคารทั่วไป ค่า  $d_e$  ควรเสถียรที่หนึ่งในสี่ของ  $d_o$ ; ซึ่งเป็นปัจจัยการลดขนาด  $w=d_o/d_e=4$  (โปรดดูภาพประกอบ 2B ในข้อมูลอ้างอิง 5)

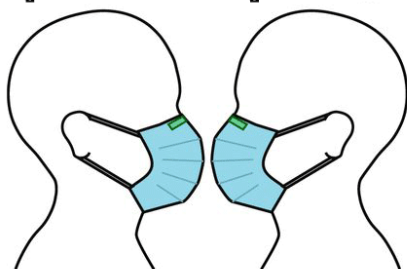
อัตราส่วนองค์ประกอบย่อย  $f_c$  เป็นพารามิเตอร์ที่ระบุได้ยากที่สุด เนื่องจากต้องพิจารณารวมกันทั้งผลของการเจือจางของอากาศที่หายใจออกมากับอากาศในสภาพแวดล้อม การสูญเสียเนื่องจากการเกาะตัว และการถูกทำให้หมดฤทธิ์ของจุลชีพก่อโรค ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่หายใจออกมา กิจกรรมการหายใจ ปัจจัยการลดขนาดเนื่องจากการระเหย ระยะทาง/เวลาของการกระจายตามแนวนอนจากผู้ที่พักผ่อนได้ไปยังผู้มีโอกาสติดเชื้อ สภาพของห้อง (RH อุณหภูมิ การไหลของอากาศ ประเภทของการระบายอากาศ) ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์และทางสรีรวิทยาของผู้ที่พักผ่อนได้/มีโอกาสดูดเชื้อ และการสวมหรือไม่สวมหน้ากากของผู้ที่พักผ่อนได้ (เนื่องจากส่งผลอย่างมากต่อการไหลของอากาศที่หายใจออกมา) และคุณสมบัติทางชีววิทยาของจุลชีพก่อโรค จึงเป็นเรื่องยากมากหรืออาจเป็นไปได้เลยที่จะทำนายความเสี่ยงโดยละเอียดของสถานการณ์ของการติดเชื้อในระหว่างการได้รับเชื้อแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ต่อให้ทราบตัวอย่างของกรณีหนึ่ง แต่ปัจจัยของสถานการณ์ก็มีความผันแปรอย่างมากจนเป็นการยากที่จะนำความรู้ที่เป็นตัวอย่างมากำหนดเพื่อเทียบเคียงเป็นการทั่วไป ด้วยเหตุนี้ ตัวอย่างที่มีข้อมูลโดยละเอียดจึงอาจไม่เป็นประโยชน์มากนักในการชี้นำมาตรการควบคุมการติดเชื้อ

ความคับหน้าจะเกิดขึ้นได้ด้วยการระบุสถานการณ์ซึ่งมีความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อเป็นขอบเขตบนสุด แนวคิดสำคัญของขอบเขตบนสุดก็คือ หากพิสูจน์แล้วว่าสถานการณ์หนึ่งๆ มีความปลอดภัยภายใต้ขอบเขตบนสุดซึ่งระบุในที่นี้ ก็ไม่ต้องสงสัยถึงประสิทธิผลในสภาวะจริงอีก ในที่นี้เรานำเสนอสามสถานการณ์ ([ภาพประกอบ 1](#)): 1) สถานการณ์สวมหน้ากาก ซึ่งทุกคนสวมหน้ากาก และผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับอนุภาคที่มีความเข้มข้นเพียงพอที่จะแทรกซึมผ่านหน้ากากของผู้ที่พักผ่อนได้ เช่น หน้ากาก FF หรือหน้ากาก SS หากทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากาก FFP2 หรือหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ซึ่งปรับให้พอดีตามลำดับ และระบุเป็นหน้ากาก FS หากผู้ที่พักผ่อนได้สวมหน้ากาก FFP2 ซึ่งปรับให้พอดี และผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ 2) สถานการณ์เกี่ยวกับระยะห่าง ซึ่งไม่มีฝ่ายใดสวมหน้ากาก และผู้มีโอกาสติดเชื้อหายใจรับอากาศซึ่งผู้ที่พักผ่อนได้หายใจออกและมีการเจือจางแบบปั่นป่วนในระยะห่างค่าหนึ่ง เช่น เว้นระยะห่าง 1.5 ม. หมายถึงพวกเขาอยู่ในระยะห่างจากกัน 1.5 เมตร และ 3) สถานการณ์ผสม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสถานการณ์เว้นระยะห่าง 1.5 ม. แต่ผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากาก เช่น สถานการณ์ผสม-F หรือ ผสม-S หมายถึงเมื่อผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากาก FFP2 หรือหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ซึ่งปรับให้พอดี ตามลำดับ



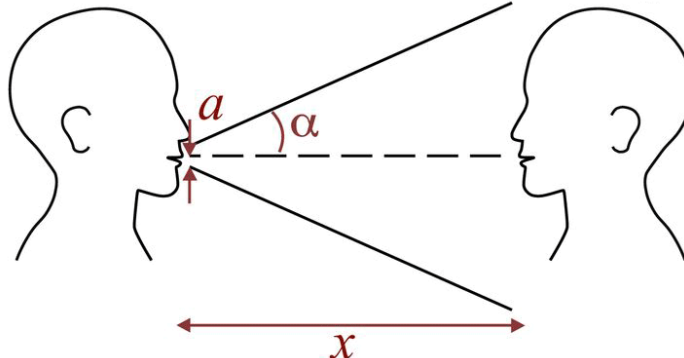
## A หน้ากาก SS

ผู้แพร่เชื้อได้    ผู้อาจติดเชื้อ



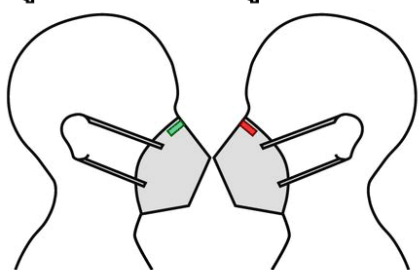
## C เว้นระยะห่าง xm

ผู้แพร่เชื้อได้    ผู้อาจติดเชื้อ



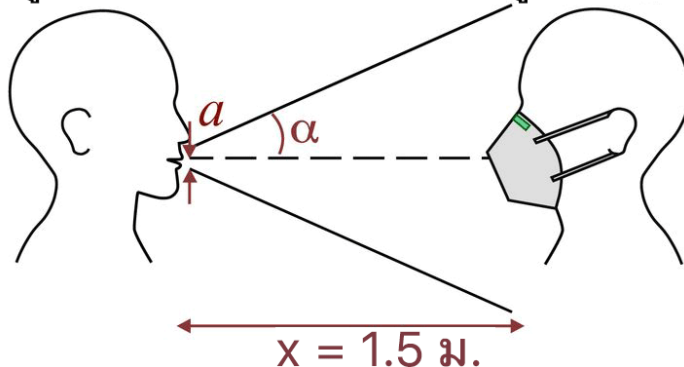
## B หน้ากาก Ff

ผู้แพร่เชื้อได้    ผู้อาจติดเชื้อ



## D ผสม F

ผู้แพร่เชื้อได้    ผู้อาจติดเชื้อ



### ภาพประกอบ 1.

แผนผังของสถานการณ์ที่ทำการตรวจสอบในการศึกษานี้ (A และ B) สถานการณ์ หน้ากาก is: ผู้ที่แพร่เชื้อได้ที่สวมหน้ากากได้หายใจ/พูดคุยกับผู้มีโอกาสติดเชื้อที่สวมหน้ากากซึ่งหายใจเพียงอย่างเดียว ซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อมีการสัมผัสอากาศทั้งหมดที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้หายใจออกซึ่งรั่วซึมออกมา โดยไม่มีการเจือจาง;  $i$  และ  $s$  หมายถึงประเภทของหน้ากากที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมตามลำดับ โดยหน้ากาก FFP2 ที่มีการปรับให้พอดี (กล่าวคือ ปรับให้พอดีกับใบหน้าอย่างเหมาะสม) จะย่อด้วย "F" และหน้ากาก FFP2 ที่ไม่ได้ปรับให้พอดี (กล่าวคือ ไม่มีการปรับเข้ากับใบหน้า) จะย่อด้วย "f" และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับให้พอดีจะย่อด้วย "S" (ในที่นี้จะแสดงหน้ากาก Ff และหน้ากาก SS เท่านั้น) สำหรับสถานการณ์นี้  $f_d=1.0$  (C) สถานการณ์ระยะห่าง xm: ผู้มีโอกาสติดเชื้อซึ่งไม่สวมหน้ากากและหายใจเพียงอย่างเดียวอยู่ในเขตทรงกรวยของการหายใจออกของผู้ที่แพร่เชื้อได้ซึ่งไม่สวมหน้ากากและหายใจ/พูดคุย ขณะที่ระยะห่างระหว่างทั้งสองคนคือ  $x$  เมตร สำหรับกรณีนี้  $f_r$  จะคำนวณโดยใช้สูตรเขตทรงกรวยของการหายใจออก  $f_d=a/(x \tan(\alpha))$  เมื่อ  $a=1.8$  ซม. คือรัศมีของปาก และ  $\alpha=10^\circ$  คือส่วนครึ่งมุมของเขตทรงกรวยของการ

หายใจออก ( $D$ ) สถานการณ์ผสม  $s$ : เช่นเดียวกับ  $C$  แต่ผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากาก และรักษาระยะห่าง 1.5 ม. คงที่;  $s$  แสดงประเภทของหน้ากากซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อ กรณีที่พิจารณาในสถานการณ์นี้ได้แก่ “ผสม S” และ “ผสม F” ซึ่งสอดคล้องกับ กรณีที่ผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ซึ่งปรับให้พอดี และ หน้ากาก FFP2 ซึ่งปรับให้พอดี ตามลำดับ (ในที่นี้แสดงภาพกรณี ผสม F เท่านั้น) สำหรับสถานการณ์นี้  $f_i$  จะคำนวณได้จากสูตรเขตทรงกรวยของการหายใจออก ซึ่ง คล้ายกับสถานการณ์ระยะห่าง ประเภทต่างๆ ของหน้ากากและการสวมได้แสดงไว้ใน [ภาพประกอบ 2](#) และจะกล่าวถึงในภายหลัง

ด้วยสถานการณ์เหล่านี้และเป้าหมายของเราในการคำนวณขอบเขตบนสุดของการได้รับเชื้อ เราสามารถแยกแยะระหว่างสองสถานการณ์ต่อไปนี้เพื่อคำนวณ  $f_d$ :

- 1. ผู้ที่แพร่เชื้อได้ไม่สวมหน้ากาก อ้างอิงจาก Yang และคณะ (26) สามารถถือว่าผู้มีโอกาสติดเชื้ออยู่ภายในเขตทรงกรวยของการหายใจออกของผู้ที่แพร่เชื้อได้ซึ่งมีการเจือจางแบบปั่นป่วน จากนั้นผู้มีโอกาสติดเชื้อสูดอากาศโดยไม่ได้สวมหน้ากาก (สถานการณ์เกี่ยวกับระยะห่าง) หรือสวมหน้ากาก (สถานการณ์ผสม) และดูดซับอนุภาคที่มีจุลชีพก่อโรคไว้บางส่วน จากความรู้เกี่ยวกับปริมาณไวรัสและปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรคซึ่งขึ้นอยู่กับโรคจะสามารถคำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้อของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อได้ ซึ่งช่วยในการระบุขอบเขตบนสุดเกี่ยวกับความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อ เนื่องจากถือว่าผู้มีโอกาสติดเชื้ออยู่กับที่ภายในเขตทรงกรวยของการหายใจออกตามระยะเวลาของการพบปะ โดยอากาศภายนอกหยุดนิ่งและไม่มีการไหลของอากาศแบบอื่นๆ และไม่มีการเกาะตัวของอนุภาครวมถึงการทำให้จุลชีพก่อโรคหมดฤทธิ์ เห็นได้ชัดว่าสถานการณ์ดังกล่าวไม่ใช่กรณีส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ยังคงสามารถใช้ขอบเขตบนสุดเป็นข้อแนะนำซึ่งเป็นที่ต้องการอย่างมาก ในสถานการณ์นี้จะใช้สูตรเขตทรงกรวยของการหายใจออก  $f_d = a/(x \tan(\alpha))$  โดยที่  $x$  คือระยะห่างระหว่างต้นทางและผู้รับ  $a$  คือรัศมีของปาก (ถือว่าเป็นรูปวงกลม) และ  $\alpha$  คือส่วนครึ่งมุมของกระแสมจากการหายใจออก เราสามารถถือได้ว่า  $a = 1.8$  ซม. และ  $\alpha = 10^\circ$  ซึ่งทำให้  $f_d = 0.1$  อยู่ที่ระยะ 1 ม. ซึ่งเป็นค่าขอบเขตบนสุดซึ่งประมาณการแบบอนุรักษนิยม สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดูที่ *ข้อมูลและวิธีการ*
- 2. ผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสดูดเชื้อต่างสวมหน้ากาก (สถานการณ์สวมหน้ากาก) เป็นที่ทราบดีว่าหน้ากากอนามัย เช่น ชนิด FFP2, KN95 และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ไม่เพียงแตกต่างกันในแง่คุณสมบัติการซึมผ่านของวัสดุกรองเท่านั้น แต่ที่สำคัญกว่านั้นคือความแตกต่างในการรั่วไหลจากบริเวณที่มีการแนบของหน้ากาก ในสถานการณ์นี้อาจเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปไม่ได้เลยที่จะระบุเขตทรงกรวยของการหายใจออก เนื่องจากทิศทางของการรั่วและการหายใจออกผ่านหน้ากากขึ้นอยู่กับพลวัตของการหายใจออก/หายใจเข้าซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงทั้งเชิงพื้นที่และระยะเวลาของหน้ากากรูปแบบต่างๆ ภายใต้สถานการณ์การหายใจที่เฉพาะเจาะจง แต่แม้จะมีความท้าทายทั้งหมดนี้ ก็ยังคงสามารถคำนวณขอบเขตบนสุดที่นิยามอย่างเหมาะสมและมีประโยชน์ได้ โดยการกำหนด  $f_d = 1.0$  ในทางปฏิบัติแล้ว ค่า  $f_d$  มีแนวโน้มที่จะต่ำกว่า 1.0 พอสมควร แม้ผู้มีโอกาสติดเชื้อจะอยู่ในระยะประชิดผู้ที่แพร่เชื้อได้ที่สวมหน้ากาก เนื่องจากบางส่วนของเขตทรงกรวยของการหายใจออกอาจหันออกจากผู้มีโอกาสติดเชื้อ เช่น มีโอกาสมากที่สุดที่จะเบี่ยงขึ้นไปยังจมูกสำหรับหน้ากาก FFP2 หรือทางด้านข้างและด้านบน ซึ่งเป็นเรื่องปกติสำหรับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์

ค่า  $n_i$  จะคำนวณได้จากการปรับพอดี้หลายรูปแบบซึ่งเผยแพร่โดย Bagheri และคณะ (5) โดยไม่มีการแก้ไขอายุของผู้ที่แพร่เชื้อได้ และถือว่ามีไวรัส SARS-CoV-2 ปริมาณ  $10^{8.5}$  มล.<sup>-1</sup> ดังที่อธิบายไว้ใน *โมเดลความเสี่ยงของการติดเชื้อ* Bagheri และคณะ (5) ได้ระบุการปรับให้พอดี้จากการตรวจวัดอาสาสมัครอายุระหว่าง 5 ปีถึง 80 ปีและมีสุขภาพดี 132 คน ในระหว่างที่หายใจและเปล่งเสียง พวกเขาใช้สเปกโตรมิเตอร์ละเอียดหลายชุดและการสร้างภาพโฮโลแกรมแบบเรียงแถวเพื่อให้ครอบคลุมขนาดอนุภาคตั้งแต่ 50 น.ม. ถึง 1 มม. ในที่นี้จะพิจารณาอนุภาคขนาด <50 ไมครอน ในการคำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้อ เว้นแต่จะระบุไว้เป็นอย่างอื่น เนื่องจากเราทำการพิจารณาขีดจำกัดเชิงอนุรักษนิยมและเป็นไปได้จริงตามการจำลองเชิงตัวเลขเมื่อไม่นานมานี้ (9, 29) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมครอน ไม่น่าจะสามารถเคลื่อนที่เป็นระยะทาง  $\geq 1.5$  ม. ซึ่งพิจารณาในการศึกษานี้ หรือเล็ดรอดจากหน้ากากของผู้แพร่เชื้อ ซึ่งจะแสดงในภายหลัง โปรด



ทราบต่อไปที่เราจะไม่พิจารณาการสูญเสียสำหรับช่วงขนาดอนุภาคที่พิจารณา เช่น การสูญเสียเนื่องจากการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง หรือการทำให้จุลชีพก่อโรคหมดฤทธิ์ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของเราคือการคำนวณขอบเขตบนสุดสำหรับความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อ นอกจากนี้ สำหรับสถานการณ์ทั้งหมดที่ทำการพิจารณาในที่นี้จะถือว่าปัจจัยการลดขนาด  $w$  คือสี่ โดยไม่คำนึงถึงระยะห่างระหว่างผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อ (5) ซึ่งทำให้ได้ค่าประมาณการความเสี่ยงของการติดเชื้อที่สูงกว่าเมื่อใช้  $w < 4$

เราได้วัดค่า  $TIL$  ในการศึกษาโดยใช้อาสาสมัคร เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่ในสิ่งตีพิมพ์มักอ้างถึงการวัดโดยใช้หุ่นจำลอง (30-40) และมีข้อมูลเกี่ยวกับการขึ้นต่อกันของการรั่วและขนาดอนุภาคในกรณีมนุษย์น้อยมากหรือไม่เลย (41-48) มีการศึกษาไม่กี่งานในมนุษย์ที่เสนอข้อมูลการขึ้นต่อขนาด (49-52) ซึ่งใช้หน้ากากชนิดต่างๆ แต่ไม่มีการศึกษาที่ครอบคลุมช่วงขนาดอนุภาคที่สามารถเป็นตัวแทน ซึ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณความเสี่ยงที่พิจารณาในที่นี้ เนื่องจากการขาดวิธีการตรวจวัดที่เชื่อถือได้ในมนุษย์ และเนื่องจากข้อมูลจากสิ่งตีพิมพ์ไม่แน่ชัด เราถือว่าค่า  $TOL$  เท่ากับ  $TIL$  (สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดู การรั่วเข้าด้านในรวม และ การรั่วออกด้านนอกรวม)

ค่า  $D_{rt}$  จะคำนวณได้จากโมเดลที่พัฒนาขึ้นโดย คณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (ICRP) (53) สำหรับการคำนวณค่า  $D_{rt}$  เราได้พิจารณาถึงการเพิ่มขนาดของอนุภาคในทางเดินหายใจของผู้มีโอกาสติดเชื้อเนื่องจากการดูดซับความชื้นซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาด้วย รายละเอียดเพิ่มเติมของโมเดลทั้งหมด พารามิเตอร์อินพุต และสมมติฐาน ได้แสดงไว้ภายใต้หัวข้อ ข้อมูลและวิธีการ

เนื้อหาในหมวดต่อไปนี้จะเริ่มด้วยการนำเสนอผลลัพธ์จากการวัดประสิทธิภาพ/การรั่วของหน้ากากตามด้วยการอภิปรายถึงผลโดยรวมจากการรั่วของหน้ากากและการเกาะตัวภายในทางเดินหายใจ และในส่วนท้ายสุดจะเสนอความเสี่ยงของการติดเชื้อ SARS-CoV-2 เมื่อใช้หน้ากากชนิดต่างๆ การเว้นระยะห่างทางสังคม หรือสถานการณ์เหล่านี้ผสมกัน และอภิปรายถึงผลสืบเนื่องต่างๆ

## ประสิทธิภาพของหน้ากาก

กำหนดให้การรั่วไหลเข้าด้านในโดยรวมคือ  $TIL = q_{P,in}P_{in} + q_{L,in}L_{in}$  โดยที่  $P_{in} = P_{filter}$  คือการซึมผ่านวัสดุทอของหน้ากาก และ  $L_{in}$  คือการซึมผ่านรอยรั่วของบริเวณที่แนบเข้ากับใบหน้า  $q_{P,in}$  และ  $q_{L,in}$  คืออัตราส่วนของอัตราการไหลผ่านวัสดุทอของหน้ากากและการซึมผ่านรอยรั่วของการแนบเข้ากับใบหน้าตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราการไหลเข้าไปในหน้ากากโดยรวม ดังที่กล่าวถึงข้างต้น เรามีค่าการซึมผ่านของชั้นกรอง  $P_{filter}$  และการรั่วเข้ารวม  $TIL$  ซึ่งเป็นตัวอย่างค่าของอาสาสมัคร ผลการตรวจวัดเหล่านี้ได้แสดงไว้ที่ด้านล่าง

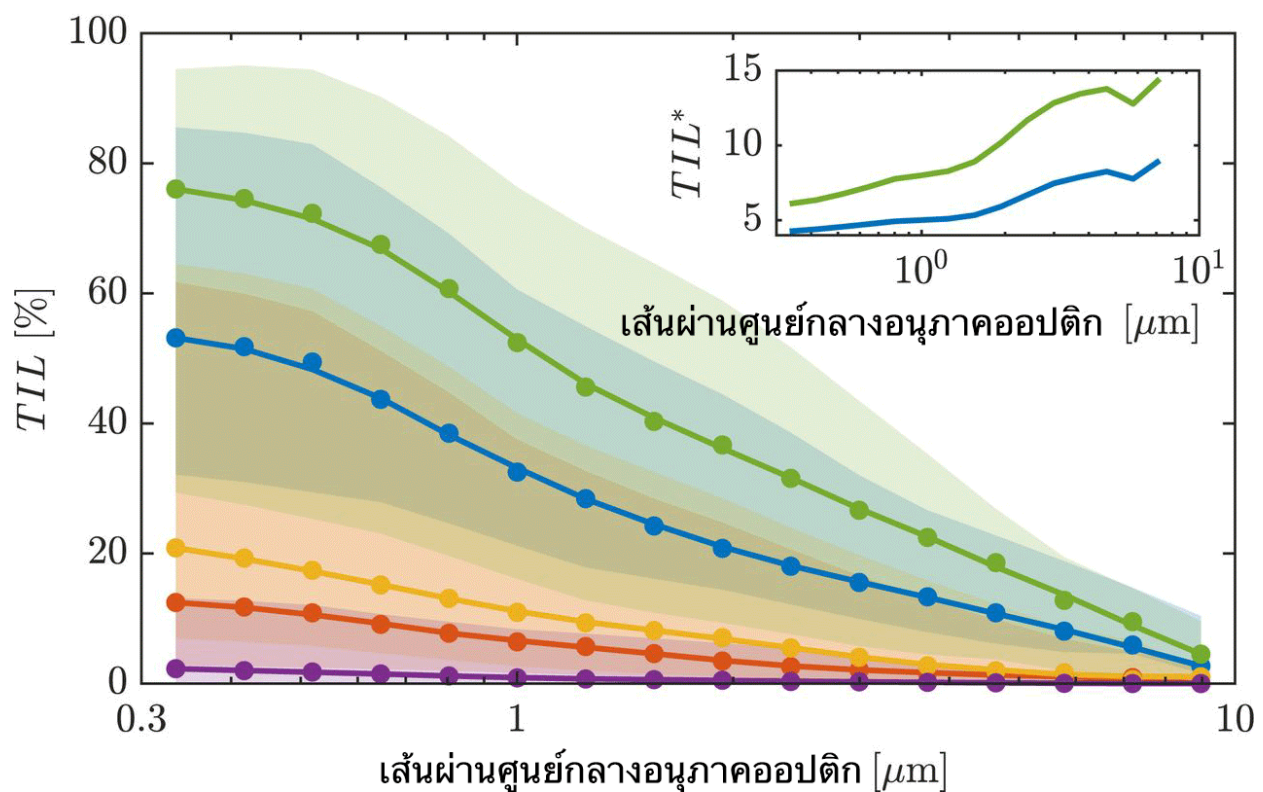
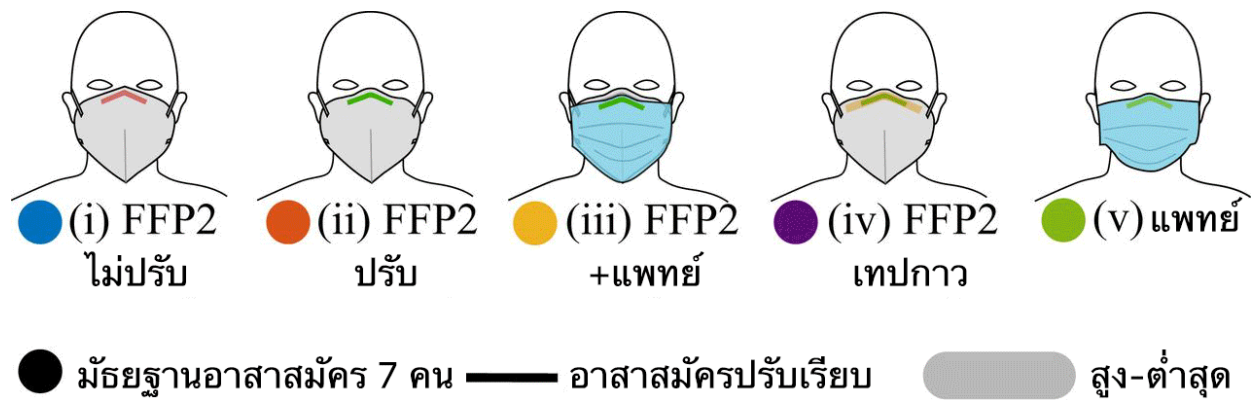
### การซึมผ่านชั้นกรอง

มีสิ่งตีพิมพ์ที่มีข้อมูลที่ดีเยี่ยมเกี่ยวกับการซึมผ่านชั้นกรอง โปรดดูข้อมูลอ้างอิง 47, 51, and 54-61 เป็นต้น เราได้ทำการวัดการแทรกซึมผ่านชั้นกรองของเราเอง โดยใช้เครื่องมือและชุดไล่ความชื้นแบบแพร่แบบเดียวกับที่เราใช้ในการตรวจวัด  $TIL$  ของเรา สำหรับการวัดการซึมผ่านชั้นกรอง เราได้ใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมคือ สเปกโตรมิเตอร์อนุภาคเคลื่อนที่แบบสแกน (SMPS) TSI NanoScan 3910 เพื่อทำการวัดขนาดที่เล็กกว่า 300 น.ม. รายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับชุดอุปกรณ์ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก SI หมวด 1.C ได้มีการทดลองกับช่วงขนาดอนุภาค

เดียวกัน (กลุ่ม) สำหรับชุดวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบออปติค (OPS) TSI รุ่น 3330 จากขนาด 300 น.ม. ถึง 10 ไมครอน โดยใช้ฝุ่นโดโลไมต์เป็นอนุภาคทดสอบ ผลลัพธ์ที่เราได้จากเครื่องมือ OPS (และ SMPS) สอดคล้องอย่างมากกับค่าการแทรกซึมที่รายงานในสิ่งตีพิมพ์ ซึ่งบ่งบอกว่าขั้นตอนการทดลองของเราซึ่งใช้ในการตรวจวัด *TIL* เป็นขั้นตอนที่เหมาะสม เราได้รายงานผลลัพธ์สำคัญไว้ในที่นี้เพื่อความครบถ้วนของข้อมูล เราได้ทำการวัดการซึมผ่านชั้นกรองสำหรับหน้ากากผ้าสามชั้น หน้ากากอนามัยทางการแพทย์แปดชั้น และหน้ากาก FFP2 ห้าชั้น หน้ากากผ้าที่ทำการตรวจสอบมีการซึมผ่านชั้นกรองมากที่สุด โดยมีค่าสูงสุดโดยเฉลี่ย 85% สำหรับอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน หน้ากากอนามัยทางการแพทย์มีประสิทธิภาพสูงกว่า กล่าวคือ มีการซึมผ่านชั้นกรองต่ำกว่าโดยตลอด แต่ดูเหมือนจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม หน้ากากสี่ชั้นจากทั้งหมดที่ทำการตรวจสอบมีค่าใกล้เคียงหน้ากากผ้า ชั้นที่อีกสี่ชั้นมีการซึมผ่านชั้นกรอง <12% โดยตลอด การซึมผ่านชั้นกรองของหน้ากาก FFP2 ที่ทำการตรวจสอบทุกชั้นต่ำกว่าขีดจำกัด 6% ซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน EN 149:2001+A1:2009 (62) ทั้งหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และ FFP2 ที่ใช้ในการทดสอบการรั่วต่างมีการซึมผ่านชั้นกรองต่ำกว่าค่าเฉลี่ยที่เราพบในแต่ละหมวด ผลลัพธ์โดยละเอียดและการเปรียบเทียบกับสิ่งตีพิมพ์ได้แสดงไว้ใน *ภาคผนวก SI หมวด 2.A*

### *การรั่วเข้า (และออก) รวม*

การรั่วเข้ารวมมีพื้นฐานของอาสาสมัครเจ็ดคนสำหรับกรณีสวมหน้ากาก / ถึง  $v$  แสดงไว้ใน *ภาพประกอบ 2* รายละเอียดของชุดอุปกรณ์ตรวจวัด ขนาดของหน้ากาก และขั้นตอนการสวม ได้แสดงไว้ใน *การรั่วเข้ารวม* พื้นที่แรกจะหมายถึงช่วงค่าการรั่วจากรูปแบบผสมของหน้ากาก/อาสาสมัครที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดไปยังดีที่สุด การรั่วเข้ารวมลดลงสำหรับกรณีสวมหน้ากากทั้งหมด / ถึง  $v$  ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 300 น.ม. ซึ่งสอดคล้องอย่างมากกับสิ่งตีพิมพ์ (30, 32, 33, 35, 49–51) การสวมหน้ากากที่พอดีที่สุด กล่าวคือมีการรั่วน้อยที่สุด พบในกรณี  $i/v$  ซึ่งจัดการรั่วที่บริเวณแนบใบหน้าด้วยการใช้เทปกาวยาวสองหน้า 3M-1509 ดังที่อธิบายไว้ใน *การรั่วเข้ารวม* ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าการรั่วที่ด้านข้างของจมูกมีอิทธิพลอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับการสำรวจหน้ากาก N95 ด้วยอินฟราเรด (63) ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาด้วยการจำลอง (63, 64) และการสังเกตอนุภาคช่วยติดตามโดยใช้หน้ากากชนิดครอบครึ่งหน้า โดย Oestenstad และคณะ (65) อย่างไรก็ตาม ในการตรวจสอบอีกครั้งหนึ่งโดย Oestenstad และ Bartolucci (66) พบว่าการรั่วที่บริเวณแก้มมีบทบาทที่สำคัญเช่นกัน ซึ่งอาจสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาถึงข้อเท็จจริงที่ว่าขนาดของใบหน้าที่มีบทบาทสำคัญต่อตำแหน่งของการรั่ว (63, 66) กล่าวโดยรวมคือ สิ่งที่เราค้นพบสอดคล้องกับสิ่งตีพิมพ์เกี่ยวกับการรั่วเข้ารวม แต่เราพบการรั่วในหน้ากากที่ทำการปรับแล้วสูงกว่าการศึกษาอื่นๆ ส่วนใหญ่ที่ตรวจสอบการรั่วไหลของหน้ากากของอาสาสมัคร สามารถดูการเปรียบเทียบที่ละเอียดยิ่งขึ้นสำหรับการตรวจวัดการรั่วที่มีอยู่เดิมสำหรับอาสาสมัครได้ใน *ภาคผนวก SI หมวด 2.F*



## ภาพประกอบ 2.

ค่ามัธยฐานของการรั่วเข้ารวมสำหรับอาสาสมัครทั้งหมดสำหรับการสวมหน้ากากกรณีต่างๆ เส้นกราฟปรับเรียบเป็นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สามจุด บริเวณแรเงาแสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดซึ่งระบุความผันแปรของการรั่วเข้ารวมสำหรับอาสาสมัครรายต่างๆ สามารถดูค่า  $TIL$  ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคที่ตรวจวัดแยกกันได้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 2.I](#) ค่าการรั่วรวมของกลุ่มแรกถึงกลุ่มสุดท้ายได้แก่ (i) 53.2 ถึง 2.7%, (ii) 12.5 ถึง 0%, (iii) 20.9 ถึง 1.0%, (iv) 2.3 ถึง 0% และ (v) 76.0 ถึง 4.5% ภาพแทรกแสดงการรั่วเข้ารวมของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก FFP2 โดยไม่มีการปรับ และปรับเป็นปกติโดยใช้การรั่วเข้ารวมของหน้ากาก FFP2 ที่มีการปรับ  $TIL^* = TIL / TIL_{FFP2,adj}$ .

เนื่องจากประสิทธิภาพการกรองที่สูงของหน้ากาก FFP2 (ดังที่แสดงใน [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S5](#)) ความเข้มข้นของอนุภาคที่ซึมผ่านหน้ากากโดยส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วที่บริเวณที่แนบกับใบหน้า กรณี / ซึ่งเป็นการสวมหน้ากาก FFP2 โดยไม่มีการปรับใดๆ ทำให้มีการรั่วเข้ารวม 53% สำหรับกลุ่มอนุภาคขนาดเล็กที่สุด (0.3 ไมครอน ถึง 0.37 ไมครอน) ซึ่งลดเหลือ 16% สำหรับขนาด 3 ไมครอน เมื่อทำการปรับส่วนประกบจมูกให้พอดีกับจมูกเพียงอย่างเดียว คือกรณี // ค่า *TIL* ของหน้ากากได้เพิ่มขึ้นด้วยแฟคเตอร์ 4.3 สำหรับอนุภาคขนาดเล็กที่สุด และแฟคเตอร์ 7.5 สำหรับอนุภาคขนาด 3 ไมครอน ([ภาพประกอบ 2, ภาพแทรก](#))

อย่างไรก็ตาม หน้ากากอนามัยทางการแพทย์มีความเกี่ยวข้องกับการรั่วเข้ารวมที่สูงที่สุด โดยมีค่าสูงมากกว่า 70% ซึ่งเกิดขึ้นกับขนาดอนุภาคเล็กที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการซึมผ่านชั้นกรองที่ค่อนข้างสูง (5% สำหรับอนุภาคขนาดประมาณ 0.3 ไมครอน ดังที่แสดงใน [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S5](#)) และการรั่วไหลที่สูงอย่างชัดเจน การรั่วเข้ารวมของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์แสดงถึงแนวโน้มที่คล้ายกับหน้ากาก FFP2 ที่ไม่ทำการปรับ และมีค่าสูงกว่า 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากาก FFP2 ที่ทำการปรับสำหรับอนุภาคขนาดเล็กที่สุด และสูงกว่า 12 เท่าสำหรับอนุภาคขนาด >3 ไมครอน ([ภาพประกอบ 2, ภาพแทรก](#)) ด้วยเหตุนี้ หน้ากากที่สวมได้พอดียิ่งขึ้นมีแนวโน้มที่จะให้การป้องกันจากอนุภาคขนาดใหญ่ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคขนาดเล็ก

การสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์เพิ่มเติมทับหน้ากาก FFP2 ที่ทำการปรับ ในกรณี /// ดูเหมือนจะให้ผลกระทบเชิงลบโดยรวมต่อการรั่วเข้ารวม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี // ผลของการกรองสองชั้นมีน้อยจนไม่นับสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพการกรองของหน้ากาก FFP2 มีค่าสูงอยู่แล้ว (>99.98% สำหรับอนุภาคขนาด >0.3 ไมครอน) สิ่งนี้อาจอธิบายถึงการลดลงของการป้องกัน (การรั่วเข้ามากขึ้น) นั่นคือแรงกดดันเพิ่มเติมบนหน้ากาก FFP2 เนื่องจากหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ทำให้หน้ากาก FFP2 ผิดรูปไป จึงทำให้เกิดการรั่วที่บริเวณแนบใบหน้าตำแหน่งใหม่ หรือมีการต้านทานการหายใจมากขึ้นซึ่งทำให้มีการรั่วมากขึ้น ([67](#)) อย่างไรก็ตาม สำหรับอาสาสมัครบางราย การสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ทับหน้ากาก FFP2 ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเล็กน้อย กล่าวคือ การรั่วเข้ารวมลดลง ในการทดลองช่วงเริ่มแรกของเราซึ่งไม่ได้ใช้ชุดไล่ความชื้นแบบแพร่เราพบประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้นในกรณี /// เมื่อเทียบกับกรณี // เราจึงพิจารณาว่าผลลัพธ์ของการสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ทับหน้ากาก FFP2 มีความน่าสนใจ แต่ในขณะนี้ยังคงไม่แน่ชัดพบว่าขนาดที่เราทำให้มีการรั่วที่บริเวณแนบใบหน้าเพิ่มขึ้น จึงทำให้การรั่วเข้ารวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ([ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S11](#))

เราพบว่าค่า *TIL* จะเพิ่มขึ้นเมื่ออาสาสมัครหายใจทางปากเมื่อเปรียบเทียบกับหายใจทางจมูก ในกรณี / และ // เมื่อใช้เทปปิดที่ส่วนประกบจมูกในกรณี /v เราพบผลที่ตรงกันข้าม (ไม่มีการทดลองการหายใจทางปากเทียบกับทางจมูกสำหรับกรณี /// และ v [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S9](#)) ดังนั้น ผลกระทบจากการหายใจทางจมูกหรือทางปากต่อการรั่วยังคงไม่เป็นที่แน่ชัด และจำเป็นต้องมีการทดลองในอาสาสมัครเพิ่มเติม การอ่านออกเสียงดัง (~ 80 dBA ถึง 90 dBA) พบว่าทำให้ *TIL* ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหายใจทางจมูกด้วยแฟคเตอร์ 3 สำหรับหน้ากาก FFP2 ที่ทำการปรับแล้ว ([ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S6](#)) เป็นผลทำให้ค่าการรั่วที่วัดได้ในระหว่างการทดลองการหายใจน่าจะเป็นค่าประมาณการระดับสูงสำหรับกิจกรรมที่ไม่มีการเคลื่อนไหวของหน้ากากโดยสัมพันธ์กับใบหน้าอย่างมีนัยสำคัญ

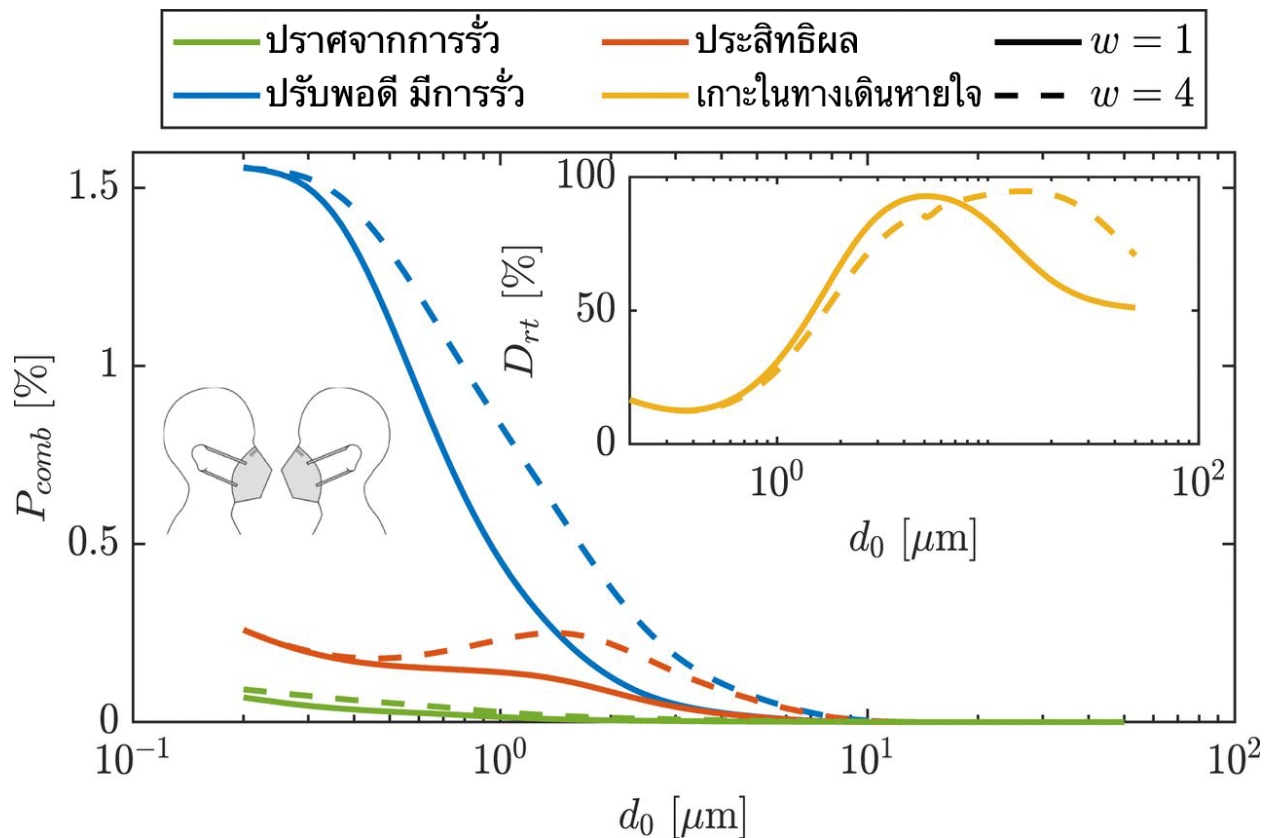
สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ไมครอน ถึง 0.3 ไมครอน ซึ่งเล็กกว่าที่เราตรวจวัด คาดได้ว่าการรั่วเข้ารวมจะเป็นแนวราบ (โปรดดูที่ข้อมูลอ้างอิง [50](#) และ [51](#) เป็นต้น) สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่กว่าที่ทำการตรวจวัด กล่าวคือ  $>10$  ไมครอน สามารถคาดได้ว่าการรั่วเข้ารวมจะค่อยๆ ลดลงจนทำให้  $TIL$  เหลือศูนย์ สำหรับอนุภาคที่อยู่นอกช่วงการตรวจจับของ OPS หาค่าได้โดยวิธี เอ็กซ์ตราโพลเทอเชิงเส้น ซึ่งนำมาปรับเรียบด้วยตัวกรองซาวิตซ์กี-โกเลย์ ด้วยช่วงระยะห้าเพื่อรักษา แนวโน้มของสัญญาณ สามารถพบค่าการรั่วมีฐานเป็นศูนย์สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดที่ทำการวัดซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 9 ไมครอน สำหรับหน้ากาก FFP2 ที่ทำการปรับและติด เทป (กรณี *ii* และ *iv*) ซึ่ง Hinds และ Bellin ได้ใช้สมมติฐานที่คล้ายกัน ([68](#)) ตามที่ได้อธิบายไว้ใน *ข้อมูลและวิธีการ* การรั่วออกภายนอกรวมในระหว่างการหายใจออกคือ  $TOL = q_{P,ex}P_{ex} + q_{L,ex}L_{ex}$  โดยที่  $q_{P,ex}$  และ  $q_{L,ex}$  คืออัตราส่วนการไหลผ่านชั้นกรองและการรั่วที่บริเวณแนบใบหน้าตามลำดับ ในระหว่างการหายใจออก เนื่องจากไม่มีกระบวนการตรวจวัดที่เหมาะสม และข้อมูลที่มีอยู่ในสิ่งตีพิมพ์เกี่ยวกับเรื่องนี้ขาดความแน่ชัด (โปรดดู *การรั่วออกรวม*) เรา จึงถือว่า  $TOL$  เท่ากับ  $TIL$

### การแทรกซึมทางเดินหายใจประสิทธิภาพ

เพื่อให้ทราบถึงการแทรกซึมของอนุภาคที่แท้จริงจากผู้แพร่เชื้อได้ไปยังผู้มีโอกาสติดเชื้อ จะต้องพิจารณาถึงผลกระทบโดยรวมของการซึมผ่านเข้าและออกจากหน้ากาก รวมถึงขนาดอนุภาค ช่วงระยะซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมและระยะเวลานับจากหายใจออกมา เนื่องจากมีการลดขนาดอนุภาคในสภาพแวดล้อม กล่าวคือ  $w = 4$  เส้นกราฟการแทรกซึมผ่านวัสดุของหน้ากากของผู้มีโอกาสติดเชื้อที่แสดงใน [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S5](#) ขณะหายใจเข้า  $P_{in}$  จึงเลื่อนไปทางขวาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุของหน้ากากของผู้แพร่เชื้อได้ขณะที่หายใจออก  $P_{ex}$  ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นกับการรั่วที่บริเวณแนบกับใบหน้าขณะหายใจออก  $L_{ex}$  และขณะหายใจเข้า  $L_{in}$  เช่นกัน เป็นผลทำให้การคาดการณ์การแทรกซึมโดยรวมในสถานการณ์สวมหน้ากากค่อนข้างมีความซับซ้อน

หากเราพิจารณาเฉพาะหน้ากากในอุดมคติที่ไม่มีการรั่ว กล่าวคือ  $q_{P,in}/ex=1$  และ  $q_{L,in}/ex=0$  การแทรกซึมโดยรวมผ่านวัสดุของหน้ากาก FFP2 ของผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อ  $P_{in}P_{ex}$  จะต่ำมาก และได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากอัตราส่วนการลดขนาด ดังที่แสดงใน [ภาพประกอบ 3](#) อย่างไรก็ตาม จะพบการรั่วของหน้ากากในทางปฏิบัติเสมอ การแทรกซึมโดยรวมของหน้ากาก FFP2 ที่ปรับแล้ว ซึ่งพิจารณาถึงการรั่ว กล่าวคือ  $TIL \times TOL = (q_{P,in}P_{in} + q_{L,in}L_{in})(q_{P,ex}P_{ex} + q_{L,ex}L_{ex})$  มีค่ามากกว่าของหน้ากากที่ปราศจากการรั่วอย่างมาก สำหรับช่วงขนาดอนุภาคที่กว้าง ดังที่แสดงในภาพด้วยเส้นสีน้ำเงินใน [ภาพประกอบ 3](#) เห็นถึงผลกระทบจากปัจจัยการลดขนาดได้อย่างชัดเจนมากขึ้นสำหรับการแทรกซึมที่รวมถึงการรั่ว เมื่อเทียบกับปราศจากการรั่ว การแทรกซึมโดยรวมสำหรับหน้ากาก FFP2 ที่มีการรั่วจะเพิ่มขึ้นตามปัจจัยการลดขนาดของอนุภาค เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งแทรกซึมผ่านหน้ากากของผู้แพร่เชื้อได้มีความเป็นไปได้สูงกว่าที่จะแทรกซึมผ่านหน้ากากของผู้มีโอกาสติดเชื้อ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กลงเนื่องจากปัจจัย  $w$





### ภาพประกอบ 3.

ค่าการแทรกซึมโดยรวมเมื่อทั้งผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากาก FFP2 กล่าวคือ สถานการณ์หน้ากาก FF (การแทรกซึมโดยรวมสำหรับสถานการณ์หน้ากาก SS ได้แสดงไว้ใน [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S14](#)) และที่ปัจจัยการลดขนาดค่าต่างๆ  $w=1$  (เส้นทึบ) กล่าวคือ ไม่มีการลดขนาด และ  $w=4$  (เส้นประ) โดยสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่หายใจออกมา นั่นคือเส้นผ่านศูนย์กลางขณะเป่า  $d_0$  เส้นกราฟ "ปราศจากการรั่ว" สอดคล้องกับ  $P_{exPin}$  เส้นกราฟ "มีการรั่วและปรับแล้ว" สอดคล้องกับ  $TOL \times TIL$  และเส้นกราฟ "ประสิทธิผล" สอดคล้องกับ  $TOL \times TIL \times D_{rt}$  การเกาะตัวในทางเดินหายใจ  $D_{rt}$  แสดงใน ภาพแทรก สำหรับ  $w=1$  และ  $w=4$



อย่างไรก็ตาม เพื่อตรวจสอบถึงความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อ การแทรกซึมโดยรวมควรพิจารณาถึงการเกาะตัวในทางเดินหายใจของผู้มีโอกาสติดเชื้อ  $D_{rt}$  ซึ่งแสดงไว้ใน **ภาพประกอบ 3 ภาพแทรก** ค่า  $D_{rt}$  สำหรับกรณีที่  $w = 1$  อ้างอิงตามโมเดลดั้งเดิมซึ่งได้จากโมเดล ICRP (53) อย่างไรก็ตาม สำหรับ  $w = 4$  เราคาดว่าอนุภาคผ่านการเพิ่มขนาดจากการดูดความชื้นแบบไม่คงที่ขณะที่เข้าสู่ทางเดินหายใจของผู้มีโอกาสติดเชื้อ ดังนั้น สัดส่วนที่เกาะตัวในบริเวณต่างๆ ของทางเดินหายใจจึงมีลักษณะแตกต่างกัน ดังที่แสดงด้วยเส้นประใน **ภาพประกอบ 3 ภาพแทรก** นอกจากการเพิ่มขนาดจากการดูดความชื้นแล้ว การลดขนาดของอนุภาคยังเพิ่มความเป็นไปได้ที่จะถูกสูดเข้าของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมขณะเปียก  $> 7$  ไมครอน นอกจากนี้ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขณะเปียก 1 ไมครอน ถึง 3 ไมครอน มีความเป็นไปได้ที่จะเกาะตัวลดลงประมาณ 10% เมื่อ  $w = 4$

ผลโดยรวมของหน้ากากที่มีการรั่วและการเกาะตัวในทางเดินหายใจ ซึ่งเป็นการแทรกซึมประสิทธิผล  $= TOL \times TIL \times D_{rt}$  แสดงไว้ใน **ภาพประกอบ 3** เห็นได้ว่าที่ค่า  $w = 4$  การแทรกซึมสูงสุดจะเกิดขึ้นกับอนุภาคขนาด  $\sim 1.5$  ไมครอน ในขณะที่ในกรณีที่ไม่มี การลดขนาด (กล่าวคือ  $w = 1$ ) การแทรกซึมสูงสุดจะเกิดขึ้นกับขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด นี่คือการแตกต่างที่สำคัญเนื่องจากปริมาณจุลชีพก่อโรคที่ดูดซับจะแปรผันตามปริมาตร  $d_0^3$  ของอนุภาค ผลลัพธ์สำหรับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์เป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันดังที่แสดงใน **ภาพประกอบ 3** แต่มีขนาดของการแทรกซึมสูงกว่ามาก (*ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S14*)

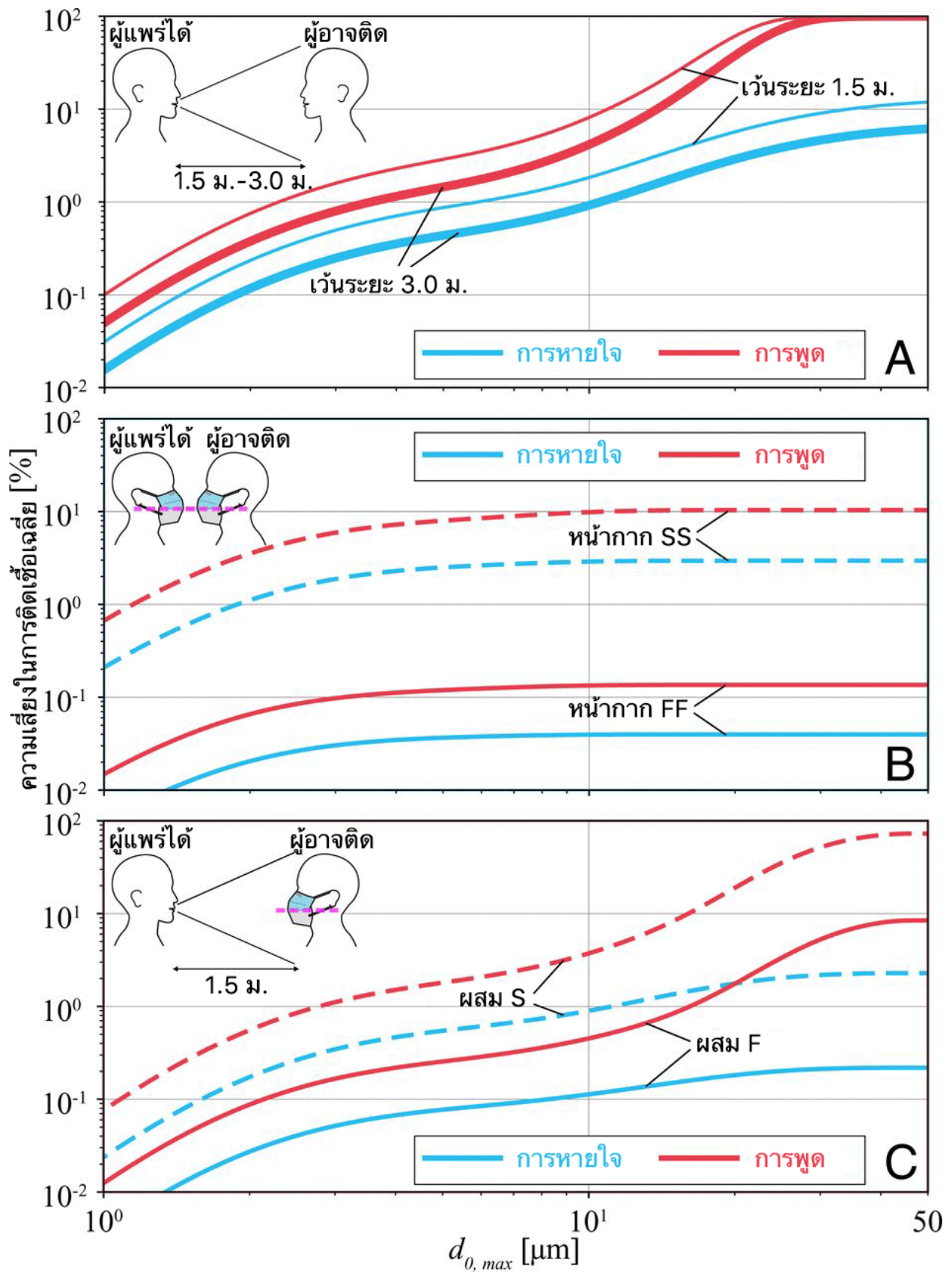
## ความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อสำหรับโควิด 19

รายละเอียดของโมเดลความเสี่ยงของการติดเชื้อ สมมติฐานที่เกี่ยวข้อง และการอธิบายพารามิเตอร์อื่นพูดทั้งหมดได้เสนอไว้โดยละเอียดใน โมเดลความเสี่ยงของการติดเชื้อ ในการอภิปรายต่อไปนี้ เราจะถือว่าหน้ากาก FFP2 และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ตรวจสอบในการศึกษาของเรามีลักษณะที่สามารถเทียบได้กับหน้ากาก FFP2 และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ชนิดอื่นๆ ในแง่การรั่วเข้าและออกรวม รวมถึงการปรับให้พอดีกับใบหน้าของอาสาสมัคร

**ภาพประกอบ 4** แสดงความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉลี่ยสำหรับสถานการณ์ต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที โดยสัมพันธ์กับค่าคัทออฟเส้นผ่านศูนย์กลางขณะเปียก  $d_{0,max}$  (อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่านี้จะถือว่าเกาะตัวก่อนที่จะไปถึงผู้มีโอกาสติดเชื้อหรือถูกกรองโดยหน้ากากของผู้ที่แพร่เชื้อได้) สิ่งแรกที่สังเกตได้คือที่ขนาดคัทออฟ 5 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดคัทออฟปกติสำหรับละอองลอย (8) มีความเสี่ยงของการติดเชื้อต่ำกว่า 10% สำหรับสถานการณ์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ที่ขนาดคัทออฟ 50 ไมครอน และค่า  $w = 4$  จะทำให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล  $d_e = 12.5$  ไมครอน ความเสี่ยงของการติดเชื้อจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดสำหรับสถานการณ์เว้นระยะห่างและผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้กำลังพูด ขณะที่แนวโน้มความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉลี่ยสำหรับผู้แพร่เชื้อได้ที่หายใจและพูดจะคล้ายกันอย่างมากสำหรับขนาดคัทออฟ 10 ไมครอน แต่สังเกตเห็นความเบี่ยงเบนที่มีนัยสำคัญสำหรับค่าคัทออฟขนาดใหญ่ใน **ภาพประกอบ 4 A และ B** สาเหตุที่ทำให้มีความเบี่ยงเบนที่มีนัยสำคัญระหว่างการหายใจและการพูดคือความเป็นไปได้ที่เพิ่มขึ้นของการก่อเกิดอนุภาคขนาด  $> 10$  ไมครอน สำหรับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเปล่งเสียง ([5]) อย่างไรก็ตาม ความเบี่ยงเบนของแนวโน้มดังกล่าวหายไปในสถานการณ์สวมหน้ากาก **ภาพประกอบ 4B** ซึ่งบังคับให้ได้ค่าคัทออฟ 10 ไมครอน เนื่องจากตัวหน้ากากเอง ดังที่แสดงใน **ภาพประกอบ 2 และ 3** นอกจากนี้ **ภาพประกอบ 4 A** ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะห่างจาก 1.5 ม. เป็น 3.0 ม. ช่วยลดความเสี่ยงของการติดเชื้อขณะที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้กำลังหายใจ แต่ไม่ใช่ผู้ที่แพร่เชื้อได้ที่กำลังพูด

แตกต่างจากการสวมหน้ากากทุกฝ่ายซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ ดังที่แสดงใน **ภาพประกอบ 4B** แม้ในสถานการณ์สุดโต่งที่พิจารณาในที่นี้ ซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับอากาศที่ไม่เจือจางซึ่งซึมผ่านวัสดุทอและรั่วไหลผ่านหน้ากากของผู้ที่แพร่เชื้อได้ (กล่าวคือ  $fd=1.0$  ใน **สมการ 1**) เมื่อทั้งผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสดูดเชื้อสวมหน้ากาก FFP2 นั่นคือ **ภาพประกอบ 4B** สามารถคาดการณ์การลดลงของความเสี่ยงของการติดเชื้อด้วยแฟคเตอร์  $\sim 75$  เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ สำหรับรูปแบบการผสมชนิดของหน้ากาก/การรั่วรูปแบบอื่นๆ จะกล่าวถึงในภายหลัง

ท้ายสุด **ภาพประกอบ 4C** แสดงว่าเมื่อผู้มีโอกาสดูดเชื้อปฏิบัติตามข้อกำหนดการสวมหน้ากากเพียงฝ่ายเดียว และแม้พวกเขาจะเว้นระยะห่าง แต่ความเสี่ยงของการติดเชื้ออาจสูงถึง  $\sim 10\%$  หากผู้มีโอกาสดูดเชื้อสวมหน้ากาก FFP2 ที่ปรับแล้ว หรือ  $\sim 70\%$  หากผู้มีโอกาสดูดเชื้อสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ขณะที่อยู่ในเขตทรงกรวยของการหายใจออกของผู้ที่แพร่เชื้อได้ซึ่งกำลังพูด **ภาพประกอบ 4C** แสดงว่าหน้ากาก FFP2 ที่ปรับแล้วจะช่วยลดความเสี่ยงของการติดเชื้อด้วยแฟคเตอร์ประมาณ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับแล้ว โดยไม่ขึ้นอยู่กับกิจกรรมของผู้ที่แพร่เชื้อได้

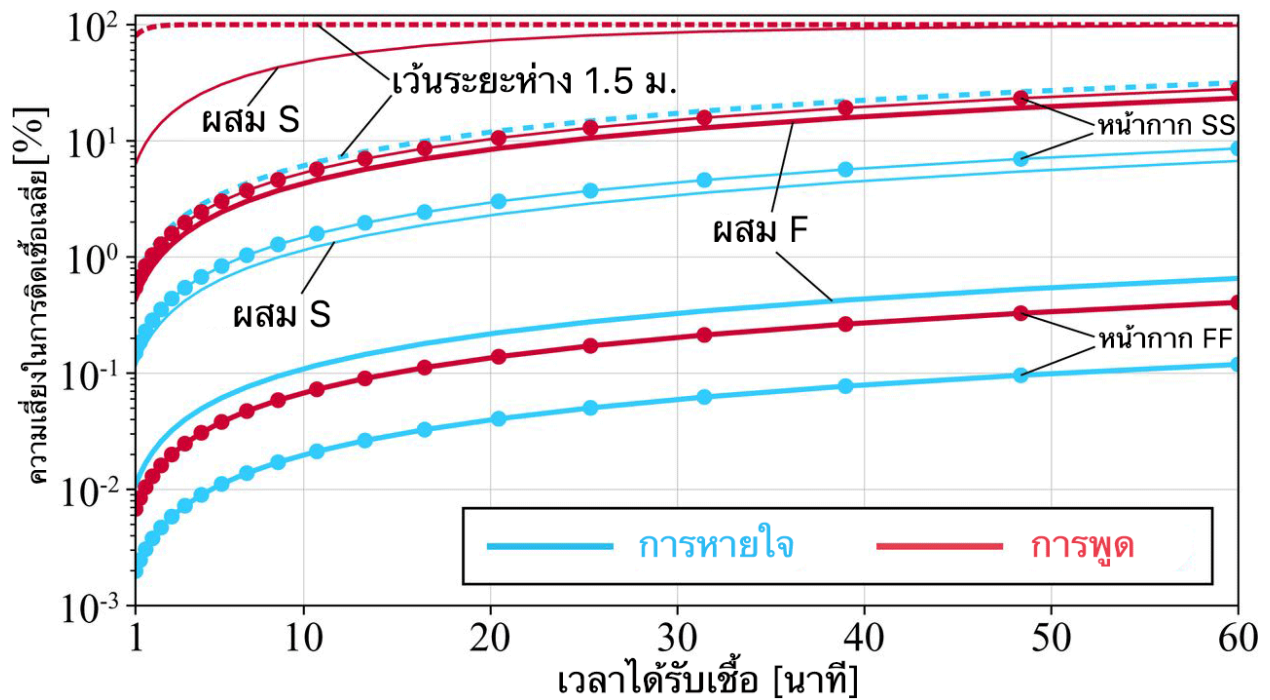


#### ภาพประกอบ 4.

ความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉลี่ยโดยสัมพันธ์กับค่าคัทออฟเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่หายใจออก (เป็ยก)  $d_{0,max}d_{0,max}$  เมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้หายใจหรือพูดโดยหันไปทางผู้มีโอกาสติดเชื้อซึ่งหายใจเพียงอย่างเดียวเป็นเวลา 20 นาที โดยพิจารณาสถานการณ์ (A) เว้นระยะห่าง (B) สวมหน้ากาก และ (C) ผสม พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ได้แก่  $w = 4$ , ปริมาณไวรัส  $p_p = 10^{8.5}$   $p_p = 10^{8.5}$  จำนวนสำเนาไวรัสต่อ มล., และ  $ID\ 63.21 = 200$  รายละเอียดของพารามิเตอร์จะจงสถานการณ์ เช่น  $f_d$  ได้แสดงไว้ในคำอธิบายของ [ภาพประกอบ 1](#)

จะเห็นได้ว่าระยะทางที่เคลื่อนที่และระยะเวลาที่คงอยู่ของอนุภาคขนาด  $>50$  ไมครอน ในอากาศมีค่ามากกว่าอนุภาคที่พิจารณาโดยปกติใน (9, 29, 69) อย่างมาก ด้วยเหตุนี้ ความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉื่อยที่แสดงใน**ภาพประกอบ 4** ที่ค่าคัทออฟ  $d_{0,max}=50$  ไมครอนจึงเป็นขีดจำกัดบนที่สมเหตุสมผลอย่างมาก เมื่อพิจารณาว่าค่าคัทออฟของอนุภาคขนาดใหญ่ น่าจะส่งผลต่อสถานการณ์ที่ผู้แพร่เชื้อไม่ได้สวมหน้ากากและกำลังพูดเป็นหลัก ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ไม่ปลอดภัยอยู่แล้วแม้ที่ค่าคัทออฟ  $d_{0,max}=50$  ไมครอน ดังนั้นต่อไปนี้จะสนใจเพียงผลลัพธ์ที่ได้สำหรับค่าคัทออฟนี้เท่านั้น

**ภาพประกอบ 5** แสดงความเสี่ยงของการติดเชื้อโดยสัมพันธ์กับระยะเวลาการได้รับเชื้อสำหรับสถานการณ์ต่างๆ เราจะพิจารณาความเสี่ยงของการติดเชื้อ 1% เป็นค่าเกณฑ์ซึ่งจะถือว่าค่าสูงกว่านี้เป็นสถานการณ์ที่ไม่ปลอดภัย จากเกณฑ์ดังกล่าว สถานการณ์เว้นระยะห่างจะถือว่าไม่ปลอดภัยอย่างรวดเร็ว แม้หลังจากผู้ที่แพร่เชื้อได้พูดเพียงประมาณ 1.5 นาทีเท่านั้น ซึ่งความเสี่ยงของการติดเชื้อสำหรับผู้มีโอกาสติดเชื้อที่ระยะห่าง 1.5 ม. คือ 90% สถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงลำดับต่อไปคือ สถานการณ์ผสม S ซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้กำลังพูด ซึ่งทำให้พ้นค่าเกณฑ์ 1% ในเวลาน้อยกว่าหนึ่งนาที และไปถึงค่าเกณฑ์ 90% หลังจากผ่านไปครึ่งชั่วโมง สถานการณ์ทั้งหมดที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้มีการพูด ยกเว้นสถานการณ์สวมหน้ากาก FF พ้นจากค่าเกณฑ์ 1% ภายในเวลาเพียงสองสามนาทีเท่านั้น และไปถึง  $>10\%$  ภายใน 1 ชม. สถานการณ์เดียวที่ผู้แพร่เชื้อได้ที่กำลังหายใจมีความเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงของการติดเชื้อ  $>10\%$  ใน 1 ชม. คือสถานการณ์เว้นระยะห่าง 1.5 ม. สถานการณ์ที่ปลอดภัยที่สุดที่ยังคงต่ำกว่าเกณฑ์ 1% เป็นเวลา 1 ชม. ของการได้รับเชื้อ เรียงตามลำดับจากดีที่สุดไปยังแย่ที่สุด ได้แก่ หน้ากาก FF สำหรับผู้แพร่เชื้อได้ที่กำลังหายใจและพูดตามลำดับ ตามด้วยสถานการณ์ผสม F ซึ่งผู้แพร่เชื้อได้กำลังหายใจ ที่น่าสนใจคือ ค่าประมาณการเชิงอนุรักษ์นิยมที่สุดของสถานการณ์สวมหน้ากาก FF ซึ่งผู้แพร่เชื้อได้กำลังพูด มีความปลอดภัยกว่าสถานการณ์ผสม F ซึ่งผู้แพร่เชื้อได้กำลังหายใจ นี่คือนิยามที่ง่ายซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิผลของการสวมหน้ากากทุกฝ่าย ซึ่งสอดคล้องกับการสำรวจในโลกแห่งความเป็นจริง (เช่น ข้อมูลอ้างอิง [11](#), [13](#)~~14~~–[16](#), [18](#) และ [19](#))

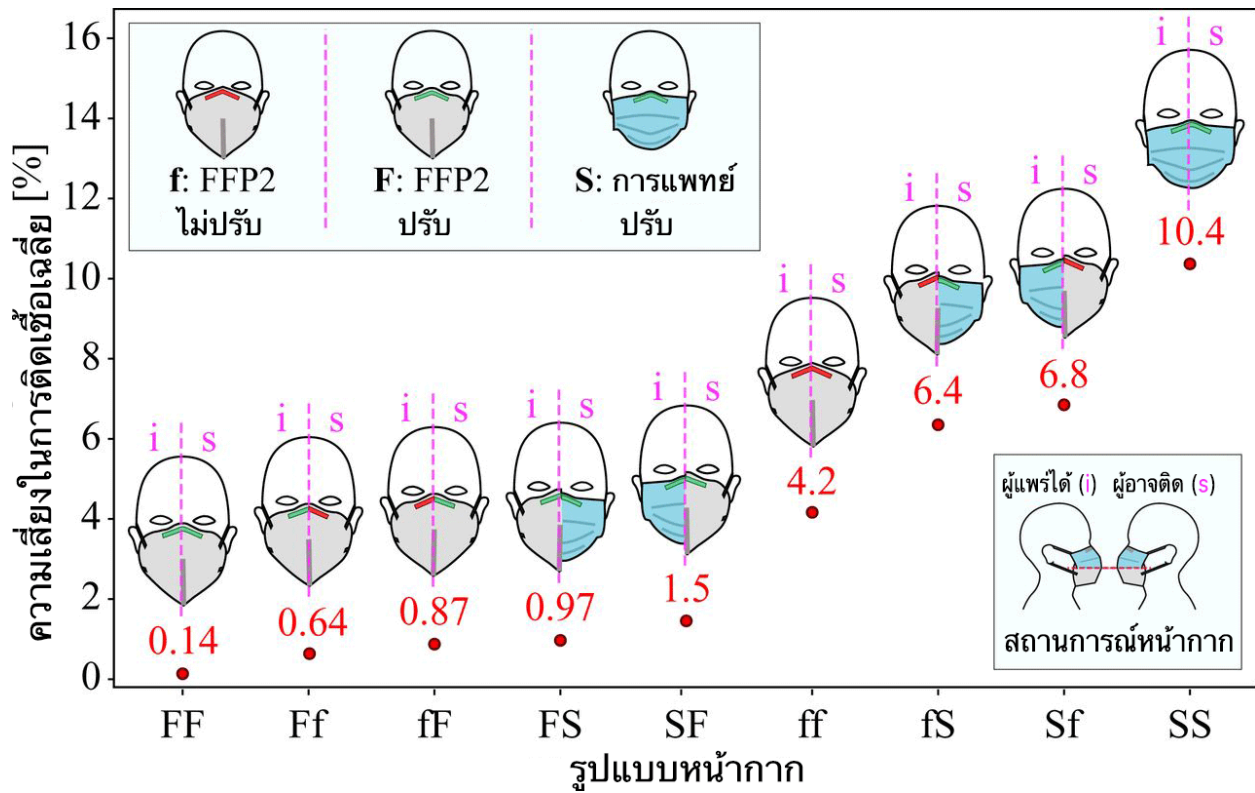


#### ภาพประกอบ 5.

ความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉลี่ยสำหรับผู้มีโอกาสติดเชื้อที่หายใจเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้รับเชื้อจากผู้แพร่เชื้อได้ซึ่งกำลังหายใจหรือพูดในสถานการณ์ต่างๆ โดยสัมพันธ์กับเวลาและที่ค่าคําทอพอเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ไมครอน พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการสร้างผลลัพธ์ที่แสดงในกราฟนี้ได้แก่  $d_{0,max}=50$  ไมครอน,  $w = 4$ , ปริมาณไวรัส  $\rho_p=10^{8.5}$  สำเนาไวรัสต่อ มล. และ  $ID\ 63.21 = 200$  รายละเอียดของพารามิเตอร์จะลงสถานการณ์ เช่น  $f_c$  ได้แสดงไว้ในคำอธิบายของ [ภาพประกอบ 1](#)



**ภาพประกอบ 6** แสดงรูปแบบผสมต่างๆ ของลักษณะการสวมหน้ากาก FFP2 (F: มีการปรับส่วนประกอบจมูก และ f: ไม่มีการปรับส่วนประกอบจมูก) และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับส่วนประกอบจมูก (S) สำหรับผู้แพร่เชื้อได้ที่กำลังพูด โดยพิจารณาสถานการณ์สวมหน้ากากในระยะเวลาได้รับเชื้อ 20 นาที เห็นได้ชัดว่ามาตรการป้องกันที่ดีที่สุดคือการสวมหน้ากาก FFP2 ที่ปรับแล้ว (กรณี FF) ทั้งผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อ และมาตรการที่ปลอดภัยน้อยที่สุดคือทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ (กรณี SS) ที่น่าสนใจคือ หน้ากาก FFP2 ที่หลวมอย่างมาก (กรณี ff) ให้ประสิทธิภาพดีกว่าหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับแล้ว (กรณี SS) ด้วยแฟคเตอร์ 2.5 การปรับส่วนประกอบจมูกของหน้ากาก FFP2 อย่างเหมาะสมสามารถลดความเสี่ยงของการติดเชื้อด้วยแฟคเตอร์ 30 (กรณี FF เทียบกับกรณี ff) ขณะที่หากผู้ที่แพร่เชื้อได้หรือผู้มีโอกาสติดเชื้อฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งหรือทั้งสองฝ่ายปรับหน้ากาก FFP2 ของตน ความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี FF คือประมาณ 5 ถึง 7 เท่า ความเสี่ยงของการติดเชื้อสำหรับกรณีอสมมาตร กล่าวคือ Ff เทียบกับ ff, FS เทียบกับ SF และ fs เทียบกับ Sf จะน้อยกว่าประมาณ 7 ถึง 50% เมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้สวมหน้ากากที่ดีขึ้นหรือหน้ากากที่ปรับให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่าหน้ากากมีประสิทธิภาพสูงกว่าในทางขาออก (การป้องกันบุคคลที่สาม) ดังที่แสดงใน [ภาคผนวก SI หมวด 2.H](#) การแทรกซึมโดยรวมซึ่งเป็นผลมาจาก  $TIL \times TOL$  ทำให้ความเสี่ยงของการติดเชื้อลดลงเมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้สวมหน้ากากที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเสี่ยงของการติดเชื้อสำหรับบางรูปแบบมีความใกล้เคียงกันจนไม่เห็นถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ มีการพิจารณาถึงสมมติฐานที่แตกต่างกันเล็กน้อย เช่น ค่า  $TOL \neq TIL$  อาจทำให้ลำดับใน **ภาพประกอบ 6** มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ขนาดสัมบูรณ์ยังคงเป็นขอบเขตบนสุดที่แท้จริง เนื่องจากเราใช้ค่า  $f_d = 1.0$  ซึ่งเป็นค่าเชิงอนุรักษ์นิยมที่สุดเมื่อพิจารณาทั้งสามประเด็นเหล่านี้ ข้อสรุปที่ปลอดภัยจาก **ภาพประกอบ 6** มีดังนี้: 1) เมื่อทั้งสองฝ่ายใช้หน้ากาก FFP2 ที่ปรับเป็นอย่างดี กล่าวคือกรณี FF เป็นรูปแบบที่ดีที่สุด 2) เมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้หรือผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากาก FFP2 ที่ปรับเป็นอย่างดี กล่าวคือกรณี Ff, ff, FS และ SF เป็นมาตรการที่ด้อยลงมา 3) เมื่อฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งหรือทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากาก FFP2 ใ่ว์หลวมๆ (กรณี ff, fs และ Sf) มีแนวโน้มที่จะให้การป้องกันที่ต่ำกว่าเมื่อทั้งสองฝ่ายสวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับเป็นอย่างดี (กรณี SS) และ 4) ความเสี่ยงโดยรวมของการติดเชื้อจะต่ำมากหากทุกคนปฏิบัติตามมาตรการสวมหน้ากาก ไม่ว่าจะเป็นหน้ากากชนิดใด เนื่องจากแม้จะพิจารณาขอบเขตบนสุดที่เป็นไปได้ซึ่งใช้พารามิเตอร์อันตรายอนุรักษ์นิยมที่สุด ก็มีความเสี่ยงของการติดเชื้อเพียง 10% เท่านั้น



ภาพประกอบ 6.

ความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉลี่ยในสถานการณ์สวมหน้ากากโดยใช้หน้ากากรูปแบบต่างๆ ในระยะเวลา 20 นาที แกนนอนแสดงรูปแบบของหน้ากากซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อสวม โดยระบุด้วยตัวอักษรสองตัว ตัวอักษรแรกคือชนิดของหน้ากากซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้สวม และตัวที่สองคือหน้ากากของผู้มีโอกาสติดเชื้อ ตัวอย่างสำหรับชนิดของหน้ากากและการปรับให้พอดีมีดังนี้: f คือหน้ากาก FFP2 ที่ไม่มีการปรับ ([ภาพประกอบ 2](#) กรณี i); F คือหน้ากาก FFP2 ที่มีการปรับ ([ภาพประกอบ 2](#) กรณี ii); S คือหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่มีการปรับ ([ภาพประกอบ 2](#) กรณี v) พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการสร้างผลลัพธ์ที่แสดงในกราฟนี้ได้แก่  $f_d=1.0$ ,  $d_{0,max}=50$  ไมครอน,  $w=4$  ปริมาณไวรัส  $p_p=10^{8.5}$  สำเนาไวรัสต่อ มล. และ  $ID\ 63.21 = 200$

เรายังได้ตรวจสอบว่ามีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญหรือไม่ระหว่างโมเดลที่มีจุลชีพก่อโรคจำนวนมากและมีจุลชีพก่อโรคเพียงตัวเดียว และพบว่าความแตกต่างไม่มีนัยสำคัญในสถานการณ์ที่พิจารณาในที่นี้ คาดได้ว่าในสถานการณ์ที่มีปริมาณไวรัสสูงและกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการก่อเกิดอนุภาคขนาดใหญ่ เช่น การจาม ความแตกต่างจะมีนัยสำคัญมากขึ้น

## การสรุปผล

เราได้คำนวณขอบเขตบนสุดสำหรับความเสี่ยงของการได้รับเชื้อ/การติดเชื้อระหว่างสองบุคคลในเขตใกล้และได้รับเชื้อในระยะเวลาสั้นๆ ( $<1$  ชม.) ในสถานการณ์ที่มีการสวมหน้ากากและเว้นระยะห่างทางสังคมรูปแบบต่างๆ โดยใช้ค่าปริมาณไวรัสและปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรคตามค่าประมาณการทั่วไปสำหรับ SARS-CoV-2 เราได้ใช้ฐานข้อมูลที่ครอบคลุมสำหรับอนุภาคที่มนุษย์หายใจออกมา พลศาสตร์ของไหลของกระแสน้ำอากาศที่หายใจออกมา และการรั่วจากหน้ากากประเภทต่างๆ และการปรับให้พอดีซึ่งตรวจวัดโดยใช้อาสาสมัคร ในการคำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้อ เรายังได้พิจารณาถึงการลดขนาดของอนุภาคในสภาพแวดล้อมเนื่องจากการระเหย เช่นเดียวกับการได้รับความชื้นคืน ความสามารถในการสูดเข้า และการเกาะตัวภายในทางเดินหายใจของผู้ที่มีโอกาสติดเชื้อโดยสัมพันธ์กับขนาดอนุภาค การคำนวณความเสี่ยงใช้โมเดลจุลชีพก่อโรคจำนวนมาก แม้ผลลัพธ์จะคล้ายกับโมเดลเอ็กซ์โพเนนเชียลที่มีจุลชีพก่อโรคตัวเดียว

เพื่อคำนวณขอบเขตบนสุดของความเสี่ยงของการติดเชื้อเมื่อผู้มีโอกาสติดเชื้ออยู่ในเขตใกล้กับผู้แพร่เชื้อได้ เราได้พิจารณาสามสถานการณ์ เมื่อทั้งผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากาก (สถานการณ์สวมหน้ากาก) เราถือว่าผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับความเข้มข้นของอนุภาคจากการหายใจที่ไม่มีการเจือจางซึ่งแทรกผ่านวัสดุท่อและรั่วออกมาจากหน้ากากของผู้ที่แพร่เชื้อได้ กล่าวคือ การสูญเสียอนุภาคเนื่องจากการสวมหน้ากากมีเพียงเนื่องจากกลไกการขจัดอนุภาคเท่านั้น เมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้ไม่ได้สวมหน้ากาก เราถือว่าผู้มีโอกาสติดเชื้อซึ่งไม่สวมหน้ากาก (สถานการณ์เว้นระยะห่าง) หรือผู้มีโอกาสติดเชื้อที่สวมหน้ากาก (สถานการณ์ผสม) อยู่ในระยะห่างคงที่จากผู้แพร่เชื้อได้ และอยู่ภายในเขตทรงกรวยของการหายใจออกของผู้ที่แพร่เชื้อได้เสมอ ในกรณีนี้ความเข้มข้นที่ผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับมีความสัมพันธ์กับระยะห่างจากผู้แพร่เชื้อได้ เนื่องจากการเจือจางแบบปั่นป่วนเพียงอย่างเดียว (ไม่พิจารณาถึงการสูญเสียอนุภาคเนื่องจากการเกาะตัวลงบนพื้น) สำหรับสถานการณ์ทั้งหมดที่ได้ตรวจสอบ เรายังถือว่าอนุภาคลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงด้วยแฟคเตอร์ 4 ก่อนที่จะถึงผู้มีโอกาสติดเชื้อ (ไม่ขึ้นอยู่กักระยะห่างระหว่างผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อ) และการทำให้จุลชีพก่อโรคหมดฤทธิ์ถือว่าไม่มีนัยสำคัญ

ขอบเขตบนสุดที่เสนอในที่นี้เป็นเชิงอนุรักษ์นิยมที่สุดโดยนิยาม โดยเฉพาะในสถานการณ์สวมหน้ากาก ผลลัพธ์ที่น่าเสนอในที่นี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากอิงปัจจัยจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ขอบเขตบนสุดดังกล่าวไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงรายละเอียดของสถานการณ์อย่างเจาะจง ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์จำนวนมากที่เราได้กล่าวถึงไปแล้วในสามส่วนสำคัญอันได้แก่ ต้นทาง-สื่อกลาง-ผู้รับ เราจึงตั้งใจที่จะไม่เสนอค่าที่เจาะจงเพื่อการประเมินที่มากเกินไป เนื่องจากในบางสถานการณ์นี้อาจไม่ใช่การประเมินที่มากเกินไป และในบางสถานการณ์ก็อาจเป็นการประเมินที่เกินจริงอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ หากพิสูจน์แล้วว่าสถานการณ์หนึ่งๆ มีความปลอดภัยภายใต้ขอบเขตบนสุดซึ่งระบุในที่นี้ ก็ไม่ต้องสงสัยถึงประสิทธิผลในสภาวะจริงอีก แน่แน่นอนว่าแนวคิดของขอบเขตบนสุดยังใช้ได้กับความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาได้รับเชื้อและความเสี่ยงของการติดเชื้อ ซึ่งขึ้นอยู่กับ

กับสถานการณ์เช่นกัน ซึ่งในทุกกรณีขอบเขตบนสุดช่วยให้สามารถทำการเปรียบเทียบอย่างง่ายระหว่างสถานการณ์ต่างๆ ที่พิจารณา

ผลลัพธ์ของเราบ่งบอกว่าการเว้นระยะห่างทางสังคมเพียงอย่างเดียวโดยไม่สวมหน้ากากมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงของการติดเชื้อที่สูงมาก โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้กำลังพูด และสามารถคาดได้ถึงความเสี่ยงของการติดเชื้อที่สูงเมื่อผู้มีโอกาสติดเชื้อสวมหน้ากากเพียงฝ่ายเดียว แม้จะมีการเว้นระยะห่างทางสังคมก็ตาม เราแสดงให้เห็นว่าการสวมหน้ากากทุกฝ่ายเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการจำกัดการแพร่ผ่านอากาศของ SARS-CoV-2 แม้ในกรณีที่หน้ากากมีการรั่ว บั๊จหลักที่ส่งผลต่อความเสี่ยงของการติดเชื้อในสถานการณ์ที่สวมหน้ากากทุกฝ่ายคือการรั่วระหว่างหน้ากากและใบหน้า หน้ากาก FFP2 ที่ปรับให้พอดีซึ่งได้ศึกษาในที่นี้ (และน่าจะรวมถึงหน้ากาก FFP2 ที่มีรูปแบบคล้ายกันซึ่งมีแนวการพับในแนวตั้ง) เมื่อปรับให้เข้ากับใบหน้าของผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้ออย่างเหมาะสม สามารถลดความเสี่ยงของการติดเชื้อได้ด้วยแฟคเตอร์ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากที่สวมไว้อย่างหลวมๆ และด้วยแฟคเตอร์ 75 เมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับให้พอดี เมื่อมีระยะเวลาได้รับเชื้อ 20 นาที ผลลัพธ์ของเราบ่งบอกว่าควรใช้หน้ากาก FFP2 มากกว่าหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ซึ่งแม้แต่หน้ากาก FFP2 ที่สวมไว้เพียงหลวมๆ ก็สามารถลดความเสี่ยงของการติดเชื้อได้ด้วยแฟคเตอร์ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ปรับให้พอดี เมื่อพิจารณาว่าขอบเขตบนสุดสำหรับความเสี่ยงของการติดเชื้อที่ใช้ในที่นี้เป็นการประเมินเชิงอนุรักษ์นิยมที่สุดโดยนิยาม เราจึงสรุปได้ว่าการสวมหน้ากากทุกฝ่ายโดยใช้หน้ากากอนามัยทางการแพทย์หรือหน้ากาก FFP2 เป็นมาตรการที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดการแพร่ของโควิด 19

## ข้อมูลและวิธีการ

### การวัดประสิทธิภาพของหน้ากาก

#### การซึมผ่านชั้นกรอง

รายละเอียดของวิธีการสำหรับการซึมผ่านชั้นกรอง ได้อธิบายไว้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 1.C](#)

#### การรั่วเข้ารวม

ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดและพื้นที่ผิวของหน้ากากได้เสนอไว้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 1.B](#) ภาพวาดชุดอุปกรณ์ตรวจวัดได้แสดงไว้ใน [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S3](#) การรั่วเข้ารวม  $TIL$  ของหน้ากากคืออัตราส่วนความเข้มข้นของอนุภาคภายในหน้ากาก  $C_{mask}$  ต่อความเข้มข้นของอนุภาคในพื้นที่หลัง  $C_{bg}$  กล่าวคือ  $TIL = C_{mask}/C_{bg}$  ซึ่งค่า  $TIL$  ยังเท่ากับผลรวมถ่วงน้ำหนักของการซึมผ่านชั้นกรองด้านเข้า  $P_{in} = P_{filter}$  และการแทรกซึมของอนุภาคด้านเข้าผ่านรอยรั่วของบริเวณที่แนบเข้ากับใบหน้า  $L_{in}$  ดังนั้น  $TIL = q_{P,in}P_{in} + q_{L,in}L_{in}$  ในการวัดการรั่วเข้ารวมซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค จากหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก FFP2 ที่มีการปรับแตกต่างกัน และสวมเพียงฝ่ายเดียวหรือทั้งสองฝ่าย เราได้ตรวจสอบรูปแบบต่างๆ ของหน้ากาก/การปรับให้พอดี (โปรดดูที่แผนภูมิอธิบาย [ภาพประกอบ 2](#) เช่นกัน):

- 1) กรณี 1: หน้ากาก FFP2 ที่ไม่มีการปรับ/ปรับทรงของส่วนประกอบจมูก (หรือเรียกว่าคลิปลิ้นจมูกหรือลวดแบบจมูก) ซึ่งจัดส่งโดยพับไว้ จึงทำให้มีลักษณะเป็นสันแหลม

- 2) กรณี *ii*: หน้ากาก FFP2 ที่พบในแนวตั้ง ปรับให้พอดีกับใบหน้าด้วยการปรับส่วนรับตั้งจมูก หลีกเลียงการพับเป็นสันแหลมเหนือตั้งจมูก และปรับทรงที่ด้านข้าง (กล่าวคือ บริเวณเชื่อมต่อระหว่างจมูกและแก้ม) แล้วกดส่วนรับตั้งจมูกให้สนิทโดยใช้สองนิ้วเลื่อนจากเหนือจมูกไปทางด้านข้างพร้อมกัน
- 3) กรณี *iii*: หน้ากาก FFP2 ที่สวมหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ทับ ปรับส่วนประกบจมูก หน้ากากทั้งสองชั้นให้พอดีด้วยการดัดไว้ล่วงหน้า
- 4) กรณี *iv*: หน้ากาก FFP2 ที่ใช้เทปกาวทางการแพทย์สองหน้า 3M 1509 ขนาด  $1 \times 1 \times 12$  ซม. ติดที่ได้ส่วนประกบจมูก เพื่อซีลหน้ากากเข้ากับจมูกและบริเวณโดยรอบอย่างสมบูรณ์แบบ และ
- 5) กรณี *v*: หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่มีการปรับส่วนประกบจมูกให้พอดีคล้ายกับกรณี *ii*

กรณีเหล่านี้ได้รับการตรวจวัดกับอาสาสมัครซึ่งเป็นผู้ใหญ่อายุเฉลี่ย 40 ปี (ผู้หญิงหนึ่งคนและผู้ชายหกคน สามคนมีขนาดเคราที่สังเกตเห็นได้ ขนาดใบหน้าของอาสาสมัครได้แสดงไว้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 1.A และตาราง S1](#)) ขณะที่พวกเขาหายใจทางจมูกตามปกติ การทดลองทำในห้องขนาด  $200 \text{ m}^3$  ก่อนเริ่มต้นการตรวจวัด จะมีการปล่อยอนุภาคทดสอบ (ผงโดโลไมต์จาก DMT GmbH & Co KG) เข้าไปในห้องด้วยการเขย่าผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีฝุ่นที่ด้านหน้าพัดลมขนาด  $120 \text{ W}$  ที่มีใบพัดขนาด  $0.26 \text{ m}$ . เพื่อผสมอนุภาคเข้ากับอากาศในห้อง พัดลมทำงานตลอดการวัดโดยอยู่ห่างจากอาสาสมัคร  $3 \text{ m}$ . และหันทำมุม  $\sim 30^\circ$  เข้าหาเพดาน เพื่อลดความลำเอียงในการเก็บตัวอย่างแบบนอนไอโซไคเนติกที่อาจเกิดขึ้นในการวัดความเข้มข้นพื้นหลัง มีการปล่อยอนุภาคเข้าสู่ห้องเป็นระยะๆ เพื่อชดเชยการสูญเสียอนุภาคขนาดใหญ่ในพื้นที่ด้านหลังเนื่องจากการเกาะตัวบนพื้นและใบพัดลม ทำการตรวจสอบการรั่วเข้ารวมของเคสต่างๆ / ถึง  $\nu$  สำหรับอาสาสมัครแต่ละรายขณะที่พวกเขานั่งบนเก้าอี้ อาสาสมัครนั่งในท่าทางผ่อนคลายเป็นเวลาอย่างน้อย  $1 \text{ นาที}$  ก่อนเริ่มทำการตรวจวัด ใช้สเปกโตรมิเตอร์ OPS ทำงานประสานกันสองชุด (โปรดดูที่ [ข้อมูลและวิธีการ](#)) เพื่อวัดตัวอย่างอากาศในพื้นที่ด้านหลังและที่หายใจเข้าในเวลาเดียวกัน ความละเอียดในการเก็บตัวอย่างที่เลือกใช้คือ  $1 \text{ s}$  และทำการวัดการรั่วเข้ารวมเป็นเวลาอย่างน้อย  $100 \text{ s}$  สำหรับแต่ละกรณี (ระยะเวลา  $\sim 15 \text{ นาที}$  ต่ออาสาสมัครหนึ่งคน) อัตราการไหลในการเก็บตัวอย่างของสเปกโตรมิเตอร์ทั้งสองชุดคือ  $1 \text{ ลิตร} \times \text{นาที}^{-1}$  ท่อเก็บตัวอย่างสำหรับวัดความเข้มข้นภายในหน้ากาก  $C_{mask}$  ถูกยึดไว้ในตำแหน่งด้วยแขนยึดที่ปรับได้ง่ายซึ่งต่อเข้ากับหมวกที่อาสาสมัครสวม ดังที่แสดงใน [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S3](#) ท่อเก็บตัวอย่างภายในหน้ากากเชื่อมต่อกับช่องร้อยท่อพลาสติกซึ่งสอดผ่านรูเจาะในหน้ากากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $8 \text{ มม.}$  และใช้น็อตขันยึดเข้ากับหน้ากากจากด้านใน ตำแหน่งแนวอนของช่องร้อยท่อคือ  $1 \text{ ซม.}$  วัดจากรอยต่อตำแหน่งกลางของหน้ากาก และเลือกตำแหน่งแนวตั้งสำหรับอาสาสมัครแต่ละคนโดยให้อยู่ในตำแหน่งครึ่งทางระหว่างจมูกและริมฝีปากบน การทดลองทำการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ ชี้ให้เห็นว่าตำแหน่งของเข้าที่เลือกไม่ได้นำไปสู่ผลลัพธ์ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตำแหน่งช่องเข้าที่ต่ำกว่านั้น คือระหว่างริมฝีปากล่างและคาง ([ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S7](#)) แขนยึดของหมวกสำหรับยึดท่อเก็บตัวอย่างอากาศที่หายใจเข้าได้รับการปรับสำหรับอาสาสมัครแต่ละคน เพื่อให้ท่อไม่มีการกดหรือดึงหน้ากาก นอกจากนี้ ระยะ  $35 \text{ ซม.}$  สุดท้ายของท่อเก็บตัวอย่างยังทำจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าท่อโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) นำไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อลดแรงที่กระทำต่อหน้ากาก ทำการวัดความเข้มข้นพื้นหลัง  $C_{bg}$  ที่ระยะ  $\sim 20 \text{ ซม.}$  ด้านหน้าศีรษะของอาสาสมัคร ท่อเก็บตัวอย่างทั้งสองท่อ (ภายในหน้ากากและในพื้นที่หลัง) มีความยาวเท่ากันและความโค้งใกล้เคียงกัน ความแตกต่างระหว่าง

เส้นทางของอนุภาคและ OPS ที่เป็นไปได้ไม่ว่าในกรณีใดๆ จะถูกแก้ไขโดยทำการแก้ไขความไวตามที่ได้อธิบายไว้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 1.E.1](#) นอกจากนี้ ท่อเก็บตัวอย่างแต่ละท่อเชื่อมต่อกับชุดไล่ความชื้นแบบแพร์ (TOPAS DDU570/H) เพื่อขจัดความชื้นซึ่งอาจส่งผลต่อขนาดอนุภาคที่วัดได้ (สำหรับการเปรียบเทียบกับกรวดโดยไม่มีชุดไล่ความชื้นแบบแพร์ โปรดดูที่ [ภาคผนวก SI ภาพประกอบ S8](#)) ท่อและจุดเชื่อมต่อทั้งหมดได้รับการตรวจหาการรั่วที่อาจมีอยู่ก่อนทำการวัด โดยใช้ชุดกรอง HEPA และสังเกตจำนวนอนุภาคเป็นศูนย์ที่สเปกโตรมิเตอร์

### *การวิเคราะห์ข้อมูลหน้ากาก*

เพื่อแก้ไขความไวที่เปลี่ยนแปลงได้ในกลุ่มต่างๆ ของสเปกโตรมิเตอร์ (OPS และ SMPS) จึงได้ทำการเฉลี่ยทางเรขาคณิตในสามกลุ่ม สำหรับการวัดการรั่วซึ่งทำโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ OPS พร้อมกัน ได้มีการแก้ไขความผันแปรที่อาจมีอยู่ของความไวและอัตราการสูญเสียอนุภาคภายในท่อและชุดไล่ความชื้นแบบแพร์ โดยทำการวัดพื้นหลังเพื่อปรับเทียบพร้อมกันเป็นเวลา 27 นาที สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 1.E.1](#) สำหรับการคำนวณการรั่วโดยรวม ควรรวมเฉพาะความเข้มข้นของอนุภาคภายในหน้ากากในระหว่างการหายใจเข้าไว้ในการวิเคราะห์ (20) การหายใจเข้ามีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุดภายในหน้ากาก ดังนั้นการวิเคราะห์การรั่วโดยรวมจึงพิจารณาเฉพาะตัวอย่างที่เก็บในช่วง 10% สูงสุดของช่วงที่มีจำนวนอนุภาครวมสูงสุดเท่านั้น สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [ภาคผนวก SI หมวด 1.E.2](#)

### *การรั่วออกรวม*

การรั่วออกรวม  $TOL$  คือผลรวมของการซึมผ่านชั้นกรองออกภายนอก  $P_{ex}$  และการรั่วที่บริเวณแนบใบหน้าออกภายนอกในระหว่างที่หายใจออก  $L_{ex}$  นั่นคือ  $TOL = q_{p,ex}P_{ex} + q_{L,ex}L_{ex}$  การซึมผ่านชั้นกรองไม่ควรขึ้นอยู่กับทิศทางกรวด ดังนั้น  $P_{ex} = P_{in} = P_{filter}$  ไม่มีการวัดการรั่วออกของหน้ากากในการศึกษานี้ การศึกษาเกี่ยวกับการรั่วออกก่อนหน้านี้เสนอภาพที่ไม่แน่ชัด Van der Sande และคณะ (46) พบว่าหน้ากาก FFP2 และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์มีการรั่วออกรวมมากกว่า (แฟคเตอร์การป้องกันด้านนอกน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับกรวดโดยรวม ความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญสำหรับหน้ากาก FFP2 มากกว่า (อัตราส่วน  $TOL/TIL$  สูงถึง  $\sim 50$  สำหรับ FFP2 และ  $\sim 2$  สำหรับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์) ซึ่งอาจอธิบายได้โดยความแตกต่างของแรงดันที่สูงระหว่างภายในและภายนอกหน้ากาก ซึ่งผลักหน้ากากให้ออกห่างจากใบหน้า ซึ่งทำให้มีการรั่วมากขึ้น (71) อย่างไรก็ตาม การศึกษาของพวกเขาได้ทำการวัดการรั่วโดยรวมโดยใช้อาสาสมัคร ขณะที่ศึกษาการรั่วออกรวมโดยใช้หุ่นจำลอง ซึ่งอาจส่งผลต่อความพอดีของหน้ากาก ซึ่งต่างจากการศึกษาที่ใช้หุ่นจำลองเพียงอย่างเดียวของ Koh และคณะ (72) ซึ่งไม่พบความแตกต่างระหว่างการรั่วเข้าด้านในและออกด้านนอกสำหรับอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ N95 ที่มีการปรับให้พอดี สำหรับหน้ากาก N95 และหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ไม่มีการปรับการรั่วออกที่วัดได้ต่ำกว่าการรั่วเข้าเล็กน้อย ซึ่งยังพบในการศึกษากับหุ่นจำลองอีกครั้งหนึ่งโดย Pan และคณะ (73) สำหรับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ในข้อมูลอ้างอิง 73 พบว่าความแตกต่างระหว่างการรั่วเข้าด้านในและออกด้านนอกของหน้ากากแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน สำหรับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์การรั่วเข้ามีมากกว่าการรั่วออกเช่นกัน อัตราส่วน  $TOL/TIL$  มีค่าในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 1 ในการศึกษาเหล่านั้น ผลลัพธ์ที่ไม่แน่ชัดเหล่านี้ร่วมด้วยความไม่แน่นอนของวิธีการทดลอง ทำให้เราต้องถือว่า  $Lin \approx Lex$  และทำให้  $TOL \approx TIL$



## โมเดลความเสี่ยงของการติดเชื้อ

เพื่อพิจารณาข้อเท็จจริงที่ว่าอนุภาคที่หายใจออกมาอาจมีจุลชีพก่อโรคเพียงตัวเดียวหรือจำนวนมาก ตามขนาดและความเข้มข้นของจุลชีพก่อโรค สามารถคำนวณความน่าจะเป็นในการติดเชื้อเฉลี่ยซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า ความเสี่ยงของการติดเชื้อ ได้จาก ([3])

$$R_I = 1 - \exp \left[ - \sum_{k=1}^{\infty} \left( 1 - (1 - r)^k \right) \mu_k \right] , \quad [2]$$

เมื่อ  $\mu_k$  คือปริมาณละอองลอยที่ดูดซับซึ่งมีจำนวน  $k$  กล่าวคือมีจุลชีพก่อโรคจำนวน  $k$  ตัวอยู่ใน และ  $r$  คือความน่าจะเป็นที่จุลชีพก่อโรคแต่ละตัวจะทำให้เกิดการติดเชื้อ พึงระลึกว่า  $r=1/D$  เมื่อ  $D$  คือปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรคที่จำเป็นสำหรับโอกาสการติดเชื้อ 63.21% หรือ ID 63.21 รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการคำนวณปริมาณละอองลอยที่ดูดซับมีอยู่ในข้อมูลอ้างอิง [3](#) ในโมเดลเอ็กซ์โพเนนเชียลดั้งเดิมจะพิจารณาเฉพาะอนุภาคที่  $k = 1$  เท่านั้น ซึ่งกรณีนี้ [สมการ 2](#) จะลดเหลือ  $R_{I,mono} = 1 - e^{-r\mu_1}$  เมื่อ  $\mu_1$  คือจำนวนเฉลี่ยของอนุภาคที่มีจุลชีพก่อโรคเพียงตัวเดียวที่ถูกดูดซับ ความเสี่ยงของการติดเชื้อจากจุลชีพก่อโรคเพียงตัวเดียว  $R_{I,mono}$  เป็นการประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อเกินจริงเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรจุลชีพก่อโรคจำนวนมาก  $R_I$  ที่แสดงใน [สมการ 2](#) (สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดูข้อมูลอ้างอิง [3](#)) ในการคำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้อและปริมาณที่ถูกดูดซับเฉลี่ย จะใช้สมมติฐานต่อไปนี้:

- ความเข้มข้นของจุลชีพก่อโรคเริ่มแรกในห้องและปริมาณจุลชีพก่อโรคที่ถูกดูดซับเริ่มแรกของผู้มีโอกาสติดเชื้อเป็นศูนย์ทั้งสองค่า
- พิจารณาการแพร่ผ่านอากาศจากผู้ที่พักผ่อนได้เพียงคนเดียวไปยังผู้มีโอกาสติดเชื้อเพียงคนเดียว
- ผู้มีโอกาสดูดเชื้ออยู่ในเขตทรงกรวยของการหายใจออกของผู้ที่พักผ่อนได้เสมอ
- การสะสมจุลชีพก่อโรคในสภาพแวดล้อมถือว่าไม่นับสำคัญ ดังนั้น ผู้มีโอกาสดูดเชื้อจึงสามารถสูดรับจุลชีพก่อโรคเฉพาะขณะที่ผู้ที่แพร่เชื้อได้มีกิจกรรมเท่านั้น เป็นผลทำให้ระยะเวลาการได้รับเชื้อน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะเวลาที่ด้านต้นทางมีกิจกรรม และ
- ระยะเวลาได้รับเชื้อสั้นกว่าเวลาที่จำเป็นในการทำให้จุลชีพก่อโรคหมดฤทธิ์อย่างมีนัยสำคัญอย่างมาก

ตามสมมติฐานเหล่านี้ สามารถคำนวณปริมาณที่ผู้มีโอกาสติดเชื้อดูดซับรวมได้ดังนี้:

$$\begin{aligned}
 \mu_k(t) &= \int_{d_{0,min}(k)}^{d_{0,max}(k)} d\phi \int_0^{t_{exp}} dt \\
 &\quad \text{infect. particle conc. in breath. zone of susceptible} \\
 &\times \underbrace{n_{I,k}(\phi, t) f_d(\phi, \lambda_I(t), w(\phi, t), t)}_{\text{total outward leakage (TOL)}} \\
 &\times \underbrace{[q_{P,ex} P_{ex}(\phi, \lambda_I(t)) + q_{L,ex} L_{ex}(\phi, \lambda_I(t))]}_{\text{total inward leakage (TIL)}} \\
 &\times \underbrace{[q_{P,in} P_{in}(\phi, w(\phi, t), \lambda_S(t)) + q_{L,in} L_{in}(\phi, w(\phi, t), \lambda_S(t))]}_{\text{intake\&deposition eff. susc. resp. tract} \quad \text{susc. inhalation rate}} \\
 &\times \underbrace{D_{rt}(\phi, w(\phi, t), \lambda_S(t))}_{\text{D}_{rt}(\phi, w(\phi, t), \lambda_S(t))} \underbrace{\lambda_S(t)}_{\lambda_S(t)},
 \end{aligned}$$

[3]

เมื่อ

$$n_{I,k}(d_0, t) = \begin{cases} C_{n,I}(d_0, t) e^{-\langle k \rangle (d_0)} \left( \frac{\langle k \rangle (d_0)^k}{k!} \right) & \text{if } d_0 \geq d_{0,min}(k) \\ 0 & \text{if } d_0 < d_{0,min}(k) \end{cases},$$

[4]

และ  $\langle k \rangle (d_0) = (\pi/6)d_0^3 \rho_p$ ,  $d_0$  คือขนาดอนุภาคขณะเป่าลมเริ่มแรกเมื่อผู้ที่แพร่เชื้อได้หายใจออกมา  $w(d_0, t) = d_0/d_e$  คือแฟคเตอร์การลดขนาดซึ่งนิยามด้วยอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางขณะเป่าลมเริ่มแรกของอนุภาค  $d_0$  ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสภาพสมดุล  $d_e$  หลังจากที่อยู่ ในสภาวะที่ไม่อิ่มตัวโดยปกติของห้อง และสูญเสียองค์ประกอบที่สูญเสียได้  $d_{0,min}(k)$  และ  $d_{0,max}(k)$  คือขนาดอนุภาคต่ำสุดและสูงสุดที่สามารถเกิดเป็นละอองลอยและมีจุลชีพก่อโรคจำนวน  $k$  สำเนา  $t_{exp}$  คือระยะเวลาซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับเชื้อ  $\rho_p$  คือความเข้มข้นของจำนวนจุลชีพก่อโรค กล่าวคือ ปริมาณไวรัส ในของไหลภายในทางเดินหายใจของผู้ที่แพร่เชื้อได้  $C_{n,I}(d_0, t)$  คือความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคที่หายใจออกมาที่ปาก/จมูกของผู้ที่แพร่เชื้อได้  $f_d(d_0, \lambda_I(t), w(d_0, t), t)$  คืออัตราเศษส่วนที่ความเข้มข้นของอนุภาคของอากาศซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้หายใจออกมามีผลลงจนกระทั่งไปถึงบริเวณการหายใจของผู้มีโอกาสติดเชื้อ เนื่องจากการสูญเสียจากการผสม (แบบปั่นป่วนรวมถึงการผสมโมเลกุล) กับอากาศในห้องหรือการเกาะตัวของอนุภาค  $P_{ex}(d_0, \lambda_I)$  คือการซึมผ่านชั้นกรองออกด้านนอกของวัสดุของหน้ากากที่ผู้ที่แพร่เชื้อ

ได้สวม  $\text{Lex}(d_0, \lambda_i)$  คือการซึมออกด้านนอกผ่านรอยรั่วของบริเวณที่แนบเข้ากับใบหน้าของหน้ากากที่ผู้ติดเชื้อสวมในระหว่างที่หายใจออก  $Q_{P,ex}$  และ  $Q_{L,ex}$  คืออัตราส่วนของอัตราการไหลที่หายใจออกผ่านชั้นกรองและการรั่วของบริเวณที่แนบกับใบหน้า ตามลำดับ เทียบกับอัตราการไหลของการหายใจออกรวมของผู้ที่แพร่เชื้อได้  $P_{in}(d_0, w(d_0, t), \lambda_s)$  คือการซึมผ่านชั้นกรองเข้าด้านในของวัสดุทอของหน้ากากซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อสวม  $L_{in}(d_0, w(d_0, t), \lambda_s)$  คือการรั่วของบริเวณที่แนบกับใบหน้าเข้าด้านในของหน้ากากซึ่งผู้มีโอกาสติดเชื้อสวม  $Q_{P,in}$  และ  $Q_{L,in}$  คืออัตราส่วนของอัตราการไหลของการหายใจเข้าผ่านชั้นกรอง และการรั่วของบริเวณที่แนบกับใบหน้า ตามลำดับ เทียบกับอัตราการไหลของการหายใจเข้ารวมของผู้มีโอกาสติดเชื้อ  $D_{rt}(d_0, w(d_0, t), \lambda_s(t))$  คือประสิทธิภาพในการรับเข้า/การเกาะตัวของอนุภาคที่สุทธเข้าไปภายในทางเดินหายใจของผู้มีโอกาสติดเชื้อ และ  $\lambda_i(t)$  และ  $\lambda_s(t)$  คืออัตราการหายใจเข้าเชิงปริมาตร (หรือเรียกว่าอัตราการถ่ายเทอากาศ) ของผู้ที่แพร่เชื้อได้และผู้มีโอกาสติดเชื้อตามลำดับ โปรดสังเกตว่าพารามิเตอร์จำนวนมากที่แสดงใน [สมการ 3](#) สัมพันธ์กับสภาวะของห้อง เช่น RH อุณหภูมิ ประเภทของการระบายอากาศ ความเร็วของอากาศ ซึ่งไม่พิจารณาในที่นี้

เราถือว่า  $\rho_p$  เป็นค่าคงที่และไม่ขึ้นอยู่กับการขนาดอนุภาค แม้จะเห็นได้ว่าอนุภาคที่มีขนาดต่างกันมีตำแหน่งการก่อเกิดภายในทางเดินหายใจที่แตกต่างกัน ([5](#)) และอนุภาคที่มีตำแหน่งก่อเกิดแตกต่างกันอาจมีปริมาณไวรัสแตกต่างกัน ([24](#)) ปริมาณไวรัส SARS-CoV-2  $\rho_p$  มีช่วงกว้างมาก ตั้งแต่  $10^2$  มล.<sup>-1</sup> ไปจนถึง  $10^{11}$  มล.<sup>-1</sup> ([23](#)) ค่าเฉลี่ยสำหรับสายพันธุ์ของ SARS-CoV-2 ที่ทำการวัดในขณะนี้คือ  $10^{8.2}$  มล.<sup>-1</sup> ถึง  $10^{8.5}$  มล.<sup>-1</sup> ([25](#)) ในที่นี้เราใช้ค่า  $10^{8.5}$  มล.<sup>-1</sup> เพื่อให้ได้ค่าประมาณการสูงสุดสำหรับความเสี่ยงของการติดเชื้อ ซึ่งน่าจะเหมาะสมมากขึ้นสำหรับสายพันธุ์ใหม่ๆ ของ SARS-CoV-2 มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไวรัสในสายพันธุ์ใหม่ๆ ซึ่งกำลังแพร่ระบาดทั่วโลกในขณะนี้ โดยมีการค้นพบในการศึกษาอื่นๆ (โปรดดูข้อมูลอ้างอิง [26](#) และข้อมูลอ้างอิงในที่นี้ เป็นต้น) ค่า ID<sub>63.21</sub> ของ SARS-CoV-2 ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด และในสิ่งตีพิมพ์นี้ได้ใช้ช่วงค่าระหว่าง 100 ถึง 1,000 กล่าวคือ  $\sim 400$  ([3](#), [21](#)) และ 100 ([26](#)) ในการตรวจสอบดังกล่าว เราถือว่า  $ID_{63.21} = 200$  ซึ่งเมื่อปริมาณจุลชีพก่อโรคคงที่ จะได้ค่าความเสี่ยงของการติดเชื้อไม่มากไปกว่าครึ่งหนึ่ง (หรือ 2 เท่า) ของค่าที่คำนวณโดยใช้  $ID_{63.21} = 100$  (หรือ 400) ค่า  $C_{n,I}$  คำนวณจากการปรับพอดิหลายรูปแบบซึ่งพบโดยข้อมูลอ้างอิง [5](#) และได้รับการตรวจวัดอาสาสมัครกว่า 130 คนซึ่งมีอายุ 5 ปีถึง 80 ปี โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์วิเคราะห์ขนาดละอองลอยและการสร้างภาพไฮโลแกรมแบบเรียงแถวเพื่อให้ครอบคลุมขนาดอนุภาคเปียก  $d_0$  ตั้งแต่ 50 น.ม. จนถึง 1 มม. การปรับพอดิหลายรูปแบบซึ่งเสนอโดยข้อมูลอ้างอิง [5](#) ช่วยให้ทราบค่าประมาณการเฉลี่ยของ  $C_{n,I}$  สำหรับผู้ใหญ่ (ไม่ขึ้นอยู่กับการเพศ) ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความเสี่ยงของการติดเชื้อ กล่าวคือ  $d_{0,min}$  คือ 0.2 ไมครอน ซึ่งมีขนาดประมาณ 2 เท่าของไวรัส SARS-CoV-2 (โปรดดูข้อมูลอ้างอิง [3](#) และ [4](#) เป็นต้น) สำหรับขีดจำกัดบน เราได้พิจารณา  $d_{0,max} = 50$  ไมครอน และถือว่าอนุภาคขนาดใหญ่เกาะตัวบนพื้นอย่างรวดเร็วมากในบริเวณใกล้เคียงผู้ที่แพร่เชื้อได้ อย่างไรก็ตาม โปรดสังเกตว่ามีการอภิปรายอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับระยะเวลาการกระจายตามแนวนอนของอนุภาคที่หายใจออกมา ในกิจกรรมที่มีการหายใจและสภาวะของห้องที่แตกต่างกัน (สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดูข้อมูลอ้างอิง [9](#) และ [29](#) และข้อมูลอ้างอิงที่ระบุในที่นี้ เป็นต้น) อนุภาคซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้หายใจออกมามีความชื้น และอาจลดขนาดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการระเหย ซึ่งขึ้นอยู่กับการ RH จนกระทั่งไปถึงบริเวณการหายใจของผู้มีโอกาสติดเชื้อ ในส่วนที่ไม่ได้ระบุเป็นอย่างอื่นเราถือว่าอนุภาคทั้งหมดมีการลดขนาดด้วยแฟคเตอร์ 4 กล่าวคือ  $w = 4.0$  ซึ่งเป็นแฟคเตอร์การหดตัวที่คาดสำหรับ  $RH < 30\%$  ([5](#)) ซึ่งเป็นค่าประมาณการเชิงอนุรักษ์นิยมสำหรับ RH ที่พบได้ใน

สภาพแวดล้อมภายในอาคารทั่วไป (4) ค่าที่แสดงในตาราง 15 ของข้อมูลอ้างอิง 53 ใช้สำหรับการคำนวณ  $\lambda_i(t)$  และ  $\lambda_s(t)$  อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอัตราเหล่านี้ระบุไว้สำหรับกิจกรรมทางกายภาพทั่วไป กล่าวคือ การนอนหลับ การนั่ง และการออกกำลังกายระดับเบาและหนัก ค่าเหล่านี้จึงถูกรวมโดยใช้แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดซึ่งพบในแหล่งข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งทำให้ได้อัตราที่ระบุในสิ่งตีพิมพ์สำหรับกิจกรรมเกี่ยวกับการหายใจต่างๆ (77-79) อัตราการถ่ายเทอากาศของการหายใจและการพูดถือว่ามีความคงที่และเท่ากับ  $0.57 \text{ m}^3 \times \text{ชม.}^{-1}$  และ  $0.67 \text{ m}^3 \times \text{ชม.}^{-1}$  ตามลำดับ ขณะที่ค่า  $P_{ex}$  และ  $L_{ex}$  สัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในระหว่างการหายใจออก ค่า  $d_0$ ,  $P_{in}$  และ  $L_{in}$  ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในระหว่างการหายใจเข้า  $d_e = d_0/w$  การแทรกซึมผ่านวัสดุของหน้ากากยังสัมพันธ์กับอัตราหายใจด้วย เนื่องจากส่งผลต่อการสูญเสียอนุภาคเนื่องจากการกระทบด้วยแรงเฉื่อย (มีความสำคัญสำหรับอนุภาคที่ใหญ่กว่า 1 ไมครอน) และเวลาที่ใช้ในการจับอนุภาคซับไมครอนเนื่องจากการกระจายแบบบราวน์ การแทรกซึมเนื่องจากการรั่วของหน้ากากยังสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอัตราการหายใจเช่นกัน สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ใน การวัดประสิทธิภาพของหน้ากาก ใช้โมเดลการเกาะตัวในทางเดินหายใจของ ICRP (ICRP94) (53) ในการคำนวณค่า  $D_{rt}(d_0, w(d_0, t), \lambda_s(t))$  โมเดล ICRP94 ดังกล่าวสามารถให้ค่าประมาณการสำหรับความสามารถในการสูดเข้าของอนุภาค รวมถึงประสิทธิภาพในการเกาะตัวในห้าส่วนของทางเดินหายใจ ตามโมเดลเชิงประจักษ์และเชิงเลข กล่าวคือ ในบริเวณจมูก ปาก หลอดลม หลอดลมฝอย และถุงลมปอด เพื่อให้ครอบคลุมถึงการเกาะตัวของอนุภาคที่หายใจออกมาซึ่งแห้งในอากาศภายในห้องซึ่งไม่อิ่มตัวโดยปกติ จะต้องพิจารณาว่าอนุภาคดังกล่าวจะมีการเพิ่มขนาดจากการดูดความชื้นขณะที่เข้าสู่สภาพแวดล้อมที่เกือบอิ่มตัวภายในทางเดินหายใจ กล่าวคือ ค่า RH 99.5% (4, 53, 80, 81) เพื่อให้พิจารณาครอบคลุมถึงการเพิ่มขนาดเนื่องจากการดูดความชื้นของอนุภาคที่สูดเข้า จะต้องแก้สมการอธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคและอุณหภูมิของอนุภาคควบคู่กัน ดังที่อธิบายไว้ในหมวด 13.2.1 ของข้อมูลอ้างอิง 82 โดยถือว่าอนุภาคที่แห้งสนิทประกอบด้วยผลึก NaCl บริสุทธิ์ สมมติฐานดังกล่าวเป็นการประมาณการที่ดีสำหรับละอองลอยของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม หากมีความรู้ที่ละเอียดยิ่งขึ้นก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ค่าสัมประสิทธิ์ออสโมติกที่จำเป็นสำหรับการเพิ่มขนาดเนื่องจากการดูดความชื้นของสารละลาย NaCl คำนวณโดยใช้สูตรที่ได้จากข้อมูลอ้างอิง 83 รหัสการเพิ่มขนาดเนื่องจากการดูดความชื้นได้รับการตรวจสอบเทียบกับกราฟอัตราการเพิ่มขนาดเนื่องจากการแพร่ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 13.2 ของข้อมูลอ้างอิง 82 รวมถึงที่ได้จากเว็บแอป E-AIM (84) สำหรับบริเวณทั้งหมด จะนำค่าระยะเวลาที่อนุภาคคงอยู่ในบริเวณนั้นๆ บวกด้วยระยะเวลาที่คงอยู่ในบริเวณก่อนหน้านี้ทั้งหมด เพื่อให้ได้ระยะเวลาสำหรับการคำนวณขนาดที่เพิ่มขึ้นของอนุภาค ระยะเวลาที่อนุภาคอยู่ในทางเดินหายใจในการหายใจเข้า+หายใจออกแต่ละครั้ง จะคำนวณด้วย  $60/f_R$  เมื่อ  $f_R$  คือความถี่ของการหายใจต่อนาทีซึ่งได้จากโมเดล ICRP94 จากนั้นคำนวณเวลาที่อนุภาคคงอยู่ในแต่ละบริเวณโดยทำการแจกแจงเวลาการหายใจรวมตามค่าคงที่เวลาที่ได้จากโมเดลการเกาะตัว ICRP94 สำหรับบริเวณหลอดลม หลอดลมฝอย และถุงลมปอด เวลาที่อนุภาคคงอยู่สำหรับบริเวณนอกทรวงอกซึ่งไม่ได้ระบุไว้ในโมเดล ICRP94 ในระหว่างการหายใจเข้าหรือออก จะถือว่ามีความคงที่ 0.1 วินาที ถือว่าผู้มีโอกาสติดเชื่อเป็นชายอายุ 35 ปีซึ่งหายใจทางจมูก ดังที่กล่าวถึงข้างต้น อัตราเศษส่วน  $fd(d_0, \lambda_i(t), w(d_0, t), t)$  เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ทำลายที่สุดใน สมการ 3 แม้การจำลองที่ละเอียดที่สุดในปัจจุบันก็ถือว่าการไหลของการหายใจออกมีลักษณะคล้ายกับกระแสลมปั่นป่วนในห้องที่อากาศสงบ (โปรดดูข้อมูลอ้างอิง 9 และ 29 และข้อมูลอ้างอิงซึ่งระบุในที่นี้ เป็นต้น) ดังนั้นในสถานการณ์ซึ่งผู้ที่แพร่เชื่อได้ไม่ได้สวมหน้ากาก เราใช้สูตรในทางทฤษฎีอย่างง่ายซึ่งมีการเสนอเมื่อไม่นานมานี้สำหรับการไหลของกระแสอากาศซึ่งนำพาอนุภาค (26, 27) กล่าวคือ  $fd = a/(x \tan(\alpha))$  เมื่อ  $x$  คือระยะห่างระหว่างต้นทางและผู้รับ  $a$  คือรัศมีของปาก (ถือว่าเป็นรูป

วงกลม) และ  $d$  คือส่วนครึ่งมุมกระแสงอากาศของการหายใจออก สำหรับ  $X = 1$  ม.  $a = 1.2$  ซม. และ  $\alpha \approx 10^\circ$ ,  $f_d$  เป็น  $\sim 6.8\%$  ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $4.9\%$  ซึ่งวัดได้ในการทดลองสำหรับอนุภาคขนาด  $0.77$  ไมครอนในข้อมูลอ้างอิง [85](#) สำหรับการหายใจทางจมูก ข้อมูลอ้างอิง [79](#) พบว่าพื้นที่การเปิดของจมูกมีค่าเฉลี่ย  $0.56$  ซม.<sup>2</sup> ถึง  $0.71$  ซม.<sup>2</sup> ( $a = 0.42$  ซม. ถึง  $0.48$  ซม.) และ  $\alpha \approx 11.5^\circ$ , เมื่อ  $f_d = 2$  ถึง  $3\%$  ที่ระยะห่าง  $1$  ม. สำหรับการหายใจทางปาก ข้อมูลอ้างอิง [79](#) พบว่าค่า  $a \approx 0.61$  ซม. ถึง  $0.75$  ซม. และ  $\alpha \approx 17^\circ$ , เมื่อ  $f_d = 2\%$  ที่ระยะห่าง  $1$  ม. สำหรับการพูด ข้อมูลอ้างอิง [79](#) พบว่าค่าเฉลี่ยช่องเปิดของปากคือ  $1.8$  ซม.<sup>2</sup> ซึ่งสอดคล้องกับ  $a \approx 0.76$  ซม. อย่างไรก็ตาม ไม่มีการเสนอข้อมูลสำหรับ  $d$  เพื่อให้สามารถทำการคำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้ออย่างอนุรักษ์นิยม เราถือว่า  $a = 1.8$  ซม. และ  $\alpha = 10^\circ$  เพื่อให้ได้ค่า  $f_d = 0.1$  ที่ระยะห่าง  $1$  ม. ค่าเหล่านี้ใช้สำหรับสถานการณ์ทั้งหมดซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้ไม่ได้สวมหน้ากาก เพื่อคำนวณ  $f_d$  สำหรับสถานการณ์ซึ่งผู้ที่แพร่เชื้อได้สวมหน้ากาก ค่า  $f_d = 1$

## การเข้าถึงข้อมูล

ข้อมูลที่เผยแพร่ก่อนหน้านี้ใช้สำหรับผลงานนี้ (<https://aerosol.ds.mpg.de/>) ข้อมูลจากการศึกษาอื่นๆ ทั้งหมดได้รวมอยู่ในบทความหรือ *ภาคผนวก SI*

## กิตติกรรมประกาศ

เราขอขอบคุณ Udo Schminke และทีมงานของเขาในข้อปเครื่องจักรของ Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization (MPI-DS) ที่ให้ความช่วยเหลือสำหรับอุปกรณ์ยัดหน้ากาก อุปกรณ์แปลง และอุปกรณ์เฉพาะการทดลองอื่นๆ ขอขอบคุณ ศ. Simone Scheithauer (University Medicine Göttingen) เป็นพิเศษสำหรับการอภิปรายที่เป็นประโยชน์มากมายเกี่ยวกับ SARS-CoV-2 และละอองลอยที่แพร่เชื้อได้ และขอขอบคุณ ดร. Mira Pöhlker (Max Planck Institute for Chemistry นครไมนซ์) สำหรับการจัดหา SMPS และชุดไล่ความชื้นแบบแพร่ ขอขอบคุณเธอและ ดร. Christopher Pöhlker (รวมถึง MPI for Chemistry) สำหรับการอภิปรายที่เป็นประโยชน์มากมายเกี่ยวกับอนุภาคจากการหายใจของมนุษย์

## เชิงอรรถ

- [↩](#) โปรดติดต่อที่  
อีเมล: [gholamhossein.bagheri@ds.mpg.de](mailto:gholamhossein.bagheri@ds.mpg.de) หรือ [eberhard.bodenschatz@ds.mpg.de](mailto:eberhard.bodenschatz@ds.mpg.de)
- รับผลงานเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2021
- ความมีส่วนร่วมของผู้จัดทำ: G.B., B.T., B.H., O.S. และ E.B. ออกแบบการวิจัย B.T. และ O.S. ดำเนินการทดลองกับอาสาสมัคร G.B., B.T., O.S. และ E.B. ทำการเปรียบเทียบระหว่างกันและการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกโตรมิเตอร์อนุภาค และการตรวจวัดการแทรกซึมผ่านวัสดุทอของชั้นกรอง G.B. คำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้อ และ G.B., B.T., B.H., O.S. และ E.B. จัดทำเอกสาร
- ผู้จัดทำแจ้งว่าไม่มีผลประโยชน์แข่งขัน
- บทความนี้เป็น PNAS Direct Submission

- บทความนี้มีข้อมูลสนับสนุนออนไลน์  
ที่ [https://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.2110117118/-  
/DCSupplemental](https://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.2110117118/-/DCSupplemental)
- สงวนลิขสิทธิ์ © 2021 โดยผู้จัดทำ เผยแพร่โดย PNAS

บทความที่เข้าถึงแบบเสรีนี้เผยแพร่ภายใต้ [Creative Commons Attribution License 4.0 \(CC BY\)](#)