

## ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

## Effects of face masks and ventilation on the risk of SARS-CoV-2 respiratory transmission in public toilets: a quantitative microbial risk assessment

<https://iwaponline.com/jwh/article/20/2/300/86945/Effects-of-face-masks-and-ventilation-on-the-risk>

## Journal of Water &amp; Health

© 2022 The Authors

Journal of Water and Health Vol 00 No 0, 1 doi: 10.2166/wh.2022.190

ผลของการสวมหน้ากากและการระบายถ่ายเทอากาศที่มีต่อความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส **SARS-CoV-2** ผ่านทางการหายใจในห้องสุขาสาธารณะ: การประเมินความเสี่ยงจากเชื้อจุลินทรีย์ในเชิงปริมาณ

Thammanitchpol Denpetkul<sup>a</sup> , Monchai Pumkaew<sup>b</sup> , Oranoot Sittipunsakda<sup>a</sup>, Pornsawan Leangwutiwong<sup>c</sup> , Skorn Mongkolsuk<sup>d,e</sup>  and Kwanrawee Sirikanchana  <sup>d,e,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Social and Environmental Medicine, Faculty of Tropical Medicine, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

<sup>b</sup>Environmental Engineering and Disaster Management Program, School of Multidisciplinary, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Sai Yok, Kanchanaburi 71150, Thailand

<sup>c</sup>Department of Microbiology and Immunology, Faculty of Tropical Medicine, Mahidol University, Bangkok, Thailand 10400

<sup>d</sup>Research Laboratory of Biotechnology, Chulabhorn Research Institute, Bangkok 10210, Thailand

<sup>e</sup>Center of Excellence on Environmental Health and Toxicology (EHT), OPS, MHESI, Thailand

\*Corresponding author. E-mail: kwanrawee@cri.or.th

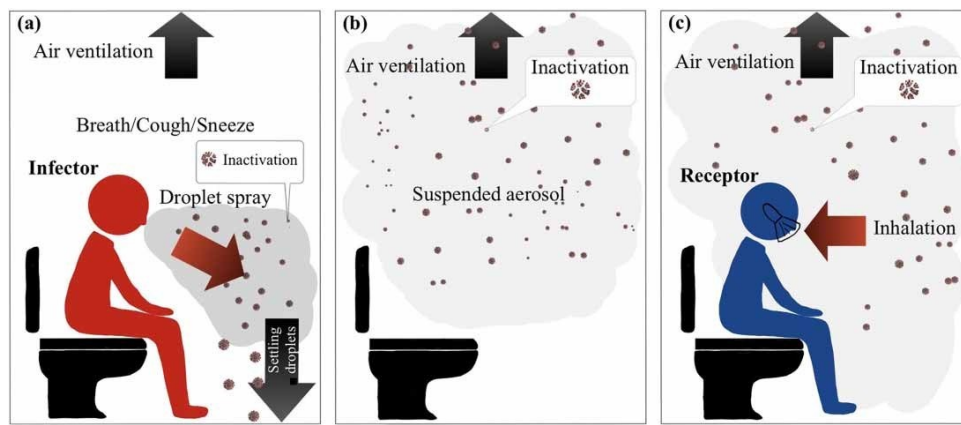
 TD, 0000-0001-8427-6183; MP, 0000-0003-4286-6817; PL, 0000-0001-6215-8290; SM, 0000-0002-8951-4598; KS, 0000-0001-7273-4060

## บทคัดย่อ

ห้องสุขาสาธารณะอาจเพิ่มความเสี่ยงของการติดเชื้อโรคโควิด 19 ผ่านทางการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องยังมีอยู่จำกัด เรามีจุดมุ่งหมายที่จะประมาณ (estimate) ความเสี่ยงของการติดเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ผ่านทางการแพร่กระจายเชื้อทางการหายใจ โดยใช้กรอบงานการประเมินความเสี่ยงจากเชื้อจุลินทรีย์ในเชิงปริมาณ โดยการเก็บกู้ (retrieving) ความเข้มข้นของไวรัส SARS-CoV-2 จากการตรวจตัวอย่าง swab ของผู้ปวยชาวไทยจำนวน 251 คน เราได้ศึกษาวิจัย 3 สถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อไวรัส (virus-generating scenarios) ได้แก่ สถานการณ์ที่ผู้ทำให้เกิดเชื้อ (infectors) หายใจปกติ หายใจร่วมกับการไอ และหายใจร่วมกับการจาม ความเสี่ยงของการติดเชื้อ (ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 95) มีค่าสูงถึง  $10^{-1}$  ในการหายใจ และเพิ่มขึ้นเป็น 1 เมื่อมีหายใจร่วมกับการไอหรือจาม เราสังเกตไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเกี่ยวกับเพศของผู้ใช้ห้องสุขา (ผู้รับเชื้อ) สถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงสุดคือการหายใจร่วมกับการจามได้รับการประเมินเพิ่มเติมต่อไปสำหรับมาตรการต่าง ๆ ในการบรรเทาความเสี่ยง การบรรเทาความเสี่ยงให้ต่ำกว่า  $10^{-3}$  ประสบความสำเร็จเฉพาะในกรณีที่ทั้งผู้ทำให้เกิดเชื้อ (infectors) และผู้รับเชื้อ (receptors) สวมใส่หน้ากากชนิด N95 หรือหน้ากากอนามัย การระบายถ่ายเทอากาศที่สูงถึง 20 หน่วยต่อชั่วโมง (air changes per hour - ACH) ไม่ได้ทำให้มีความเสี่ยงลดลง แต่อย่างไรก็ตามการขยายเวลาในการรอคอย (extended waiting time) ออกไป 10 นาทีระหว่างผู้ทำให้เกิดเชื้อ (infectors) กับผู้รับเชื้อ (receptors) ส่งผลให้มีการลดลงของความเสี่ยงประมาณ  $1.0 \log_{10}$  เมื่อทั้งสองฝ่ายต่างก็สวมหน้ากากพร้อมกับมีการระบายถ่ายเทอากาศที่ 12 ACH ตามที่องค์การอนามัยโลกแนะนำ ปริมาตรของละอองฝอย (droplets) ที่ออกมาจากลมหายใจ ความเข้มข้นของไวรัส ตลอดจนช่วงระยะเวลาที่ผู้รับเชื้อ (receptors) อยู่ในห้องสุขาได้รับการระบุขึ้นว่าเป็นปัจจัยหลัก ๆ (main contributors) ของโอกาสความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อ

## จุดเด่นและประเด็นที่น่าสนใจ (HIGHLIGHTS)

- การใช้ห้องสุขาสาธารณะมีความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ผ่านทางการหายใจ
- ไม่มีความแตกต่างเกี่ยวกับเพศสำหรับความเสี่ยง โดยการแก้ไข (counteracting) ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในห้องสุขา (dwell time) และอัตราการหายใจเข้า (inhalation rate)
- ถ้าเพียงแต่การระบายถ่ายเทอากาศที่ 20 ACH และการที่ผู้รับเชื้อเข้าสู่ห้องสุขาสาธารณะทันที (immediate receptor entrance) ไม่สามารถลดความเสี่ยงได้
- ช่วงระยะเวลาการรอคอยนาน 10 นาทีทำให้มีความเสี่ยงลดลง นอกเหนือจากการสวมใส่หน้ากากในที่ที่มีการระบายถ่ายเทอากาศอยู่ที่ 12 ACH
- การสวมหน้ากากชนิด N95 และหน้ากากอนามัยเป็นการลดความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับผู้ที่ใช้ห้องสุขา



dwel time =  $t_1$     waiting time =  $t_2$     dwel time =  $t_3$

## บทนำ (INTRODUCTION)

การระบาดของโรคโคโรนาไวรัส 2019 (โควิด 19) ได้ส่งผลกระทบต่อประชากรโลกนับตั้งแต่การอุบัติขึ้นของโรคนี้ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 เป็นต้นมา เส้นทางหลัก ๆ 3 เส้นทางในการแพร่กระจายของเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์กลุ่มอาการทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง (SARS-CoV-2) ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคโควิด 19 ได้รับการระบุไว้ได้แก่ (1) การหายใจเอาของเหลวจากระบบทางเดินหายใจ (respiratory fluids) ที่มีเชื้อไวรัสที่สามารถทำให้เกิดเชื้อ (infectious viruses) ได้เข้าไป (2) การกระเซ็นหรือเป็นอนุภาคของฝอย (droplets) และละอองลอย (aerosol) จากระบบทางเดินหายใจที่สามารถทำให้เกิดเชื้อ และ (3) การสัมผัสกับพื้นผิวที่มีการปนเปื้อน (ศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2564) บริเวณส่วนกลางที่ปิดอับอากาศอย่างเช่นห้องสุขาสาธารณะในศูนย์การค้า โรงเรียน หอการค้าร้านอาหาร ท่าอากาศยาน โรงพยาบาล และโรงพยาบาลอาจจะเป็นพื้นที่ที่สำคัญสำหรับการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 (Dancer และคณะ. พ.ศ. 2564) มีการรายงานว่ามีการปนเปื้อนพื้นผิวโดยเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ใน ห้อง สุ ข า และ ห้อง น้ า (Ding และคณะ. พ.ศ. 2564; Maestre และคณะ. พ.ศ. 2564) อย่างไรก็ตามความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อจากการสัมผัสกับวัตถุสัมผัสเชื้อ (fomite exposure) ก็อาจจะสามารถถูกทำให้ลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยผ่านวิธีการที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพ เช่น การล้างมือ การฆ่าเชื้อที่มือ และการฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิว (Dancer และคณะ. พ.ศ. 2564; Pitol & Julian พ.ศ. 2564; องค์การอนามัยโลก [WHO] พ.ศ. 2563a) ในทางตรงกันข้ามการแพร่กระจายเชื้อผ่านทางอากาศได้รับการพิจารณาว่าเป็นเส้นทางหลักของการแพร่กระจายโควิด 19 (ศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2564) และอาจจะสามารถทวีความรุนแรงมากขึ้นจากการใช้พื้นที่ที่ห้องสุขาสาธารณะที่ปิดอับและพลุกพล่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่มีการดำเนินการขั้นตอนต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมในการลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส (Dancer และคณะ. พ.ศ. 2564).

มีการรายงานการตรวจพบอาร์เอ็นเอของไวรัส SARS-CoV-2 ใน 23.8% ของตัวอย่างอากาศจากห้องสุขาของโรงพยาบาล ซึ่งแสดงถึงปริมาณไวรัสที่สูงกว่าในบริเวณพื้นที่คลินิก (Birgand และคณะ. พ.ศ. 2563) อย่างไรก็ตามการประเมินความเสี่ยงของการสัมผัสเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 จากการหายใจในห้องสุขาสาธารณะ ยังมีอยู่จำกัด ดันต่อแหล่งที่มาที่มีความเป็นไปได้ของละอองฝอย (droplets) และอนุภาคของฝอย (aerosol particles) จากการหายใจซึ่งสามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ในบริเวณแวดล้อมของห้องสุขาได้แก่ การหายใจออก (exhalation) และการขับออก (expelling) ตัวอย่างเช่น การจาม การพูดคุย และการไอจากผู้ในห้องสุขาที่เป็นผู้ติดเชื้อ ตลอดจนการกลายเป็นละอองลอย (aerosolization) ของอุจจาระและปัสสาวะที่ติดเชื้อมาหลังจากการกลืนโครก (Dancer และคณะ. พ.ศ. 2564; Schijven และคณะ. พ.ศ. 2564) และถึงแม้ว่าเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ที่สามารถทำให้เกิดเชื้อได้นั้นจะได้รับการแยก (isolated) ออกจากอุจจาระของผู้ป่วยที่ติดเชื้ออย่างรุนแรงแล้วก็ตาม (Xiao และคณะ. พ.ศ. 2563) แต่การศึกษาวิจัยที่อื่นอันว่าอุจจาระและปัสสาวะในน้ำเสียก็ยังจะสามารถทำให้เกิดเชื้อสำหรับไวรัส SARS-CoV-2 ได้จำกัด และมีหลักฐานสนับสนุนที่แสดงถึงการมีชีวิตรอดของเชื้อไวรัสที่ไม่ดี (poor virus survival) ในเส้นทางระบบการย่อยอาหาร (gastroin- testinal tracts) อันเนื่องมาจาก pH ที่ต่ำของน้ำย่อย น้ำดี เอนไซม์ในการย่อยต่าง ๆ ตลอดจนผลพลอยได้จากแบคทีเรียต่าง ๆ (Jones และคณะ. พ.ศ. 2563; Zang และคณะ. พ.ศ. 2563; Albert และคณะ. พ.ศ. 2564) ด้วยเหตุนี้จึงแม้ว่าการกลืนโครกจะสามารถผลิตละอองฝอยที่ลอยในอากาศ (airborne droplets) และละอองลอย (aerosols) แต่ความเสี่ยงที่สัมพันธ์กันซึ่งมีก็จะลดลง เพราะว่าการปนเปื้อนจากอนุภาคไวรัสที่ทำให้เกิดเชื้อได้มีความเป็นไปได้น้อยกว่า (Shi และคณะ. พ.ศ. 2564) ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้เราจึงมุ่งเน้นไปที่การอธิบายลักษณะ (characterizing) ความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัสทางการหายใจจากการหายใจปกติและการขับออก (การไอและการจาม) ในบริบทแวดล้อมของห้องสุขาสาธารณะ

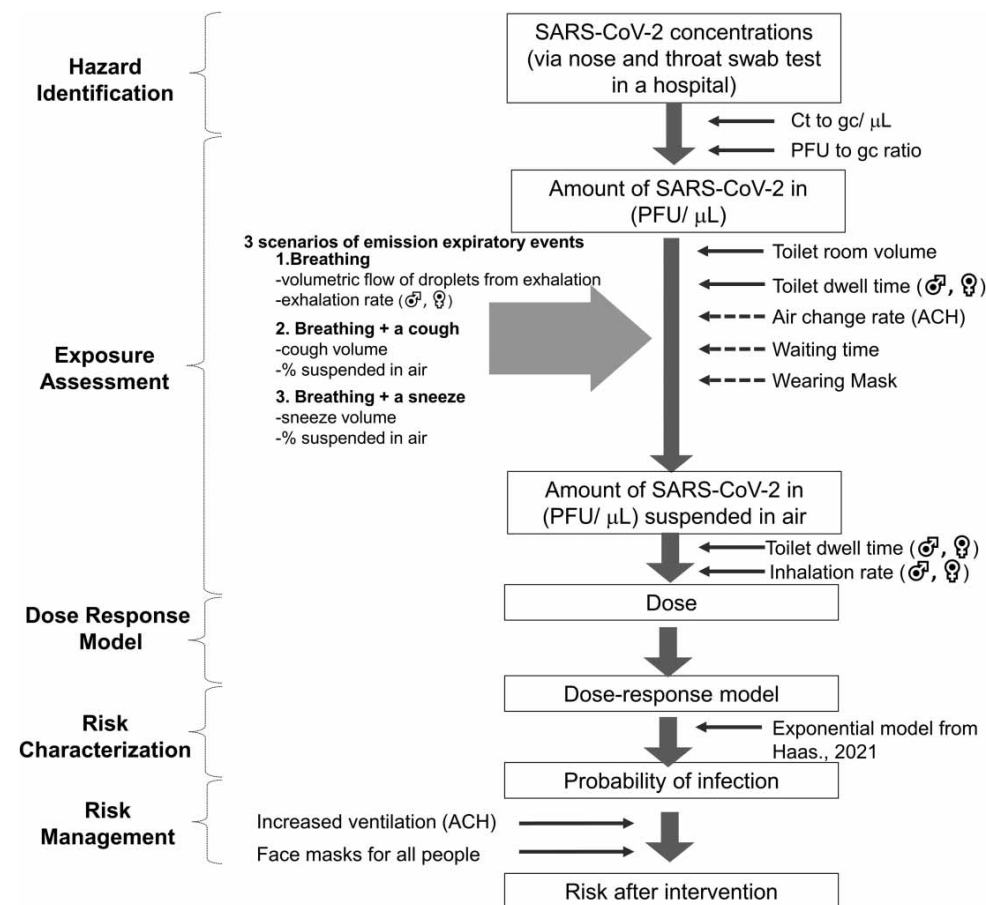
การประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (quantitative microbial risk assessment หรือ QMRA) เป็นเครื่องมือที่มีค่าที่ใช้ในการประมาณความเสี่ยงของสุขภาพมนุษย์ในเชิงปริมาณที่สัมพันธ์กับการรับสัมผัสกับเชื้อโรคต่าง ๆ ในเมตริกซ์ทางสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันไป (Rose & Gerba พ.ศ. 2534; Haas และคณะ. พ.ศ. 2557) มีการประยุกต์ใช้กรอบงานของการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA framework) ในการประมาณความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ในกลุ่มคนงานของโรงงานบำบัดน้ำเสีย (Dada & Gyawali พ.ศ. 2564; Zaneti และคณะ. พ.ศ. 2564) ในผู้เข้าร่วมงานมหกรรมกีฬาโอลิมปิกปี ค.ศ. 2020 ที่กรุงโตเกียว (Murakami และคณะ. พ.ศ. 2564) รวมทั้งในผู้โดยสารทางพาหนะที่ปิดล้อม (confined) และในผู้ใช้ห้องพักร่วมกัน (Schijven และคณะ. พ.ศ. 2564) ในการศึกษาวิจัยนี้เรามีจุดมุ่งหมายในการประมาณ (estimate)

ความเสี่ยงของการติดเชื้อที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการรับสัมผัสกับเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ในห้องสุขาสาธารณะผ่านการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ โดยใช้วิธีการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA approach) เพื่อความสะดวกเราได้เรียกผู้ที่มีสุขภาพดีผู้ซึ่งรับสัมผัสกับความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อว่าเป็นผู้รับเชื้อ (receptor) ในขณะที่ผู้ที่เป็โรคนีไม่จะมีอาการหรือไม่มีอาการก็ตามถูกเรียกว่าผู้ที่ทำใหัติดเชื้อ (infector) เราได้ทำการเก็บข้อมูลป้อนเข้า (input parameters) จากแหล่งต่าง ๆ รวมทั้งข้อมูลความเข้มข้นของ COVID-19 ที่ได้จากการตรวจตัวอย่าง swab ในผู้ป่วยชาวไทยจำนวน 251 คนจากโรงพยาบาลของรัฐบาลแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร และปัจจัยต่าง ๆ ในการรับสัมผัสที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรม 3 อย่างที่ก่อให้เกิดละอองฝอยและละอองลอยของผู้ที่ติดเชื้อ (infectors) คือการหายใจปกติ การหายใจร่วมกับการไอ และการหายใจร่วมกับการจาม ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนได้รับการระบุถึงจากแหล่งที่มาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (Duguid พ.ศ. 2489; Loudon & Roberts พ.ศ. 2510; Fabian และคณะ. พ.ศ. 2554; Han และคณะ. พ.ศ. 2556; Schijven และคณะ. พ.ศ. 2564) ความเสี่ยงของการติดเชื้อได้รับการคำนวณแยกกันสำหรับผู้รับเชื้อที่เป็นเพศชายและเพศหญิง เนื่องจากว่ามีความแตกต่างกันของอัตราการหายใจ (respiratory rates) และช่วงระยะเวลาที่ใช้ในห้องสุขา ที่เรียกกันว่า dwell times (ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในห้องสุขา) เพื่อที่จะรวมเอาความไม่แน่นอน (uncertainty) และความแปรปรวน (variability) ในการอธิบายลักษณะความเสี่ยง (risk characterization) เราจึงได้ใช้เทคนิคการจำลอง Monte Carlo simulation (MCs) ในการคำนวณค่าความเสี่ยง ความไว (sensitivity) ของ model parameters ได้รับการประเมินเพื่อระบุว่า input parameters ตัวไหนบ้างที่สามารถช่วยลดความไม่แน่นอน (uncertainty) ที่เกี่ยวข้อง ประการสุดท้ายมาตรการ 3 อย่างในการลดความเสี่ยง ได้แก่ การสวมหน้ากาก การเพิ่มการระบายถ่ายเทอากาศ และการขยายช่วงระยะเวลาการคอยได้รับการประเมินเพื่อให้แน่ใจในประสิทธิภาพของมาตรการเหล่านี้ ความเสี่ยงและมาตรการบรรเทาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการคำนวณอาจจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนานโยบายด้านการสาธารณสุข ที่มีจุดมุ่งหมายในการให้มีการควบคุมการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ที่มีประสิทธิภาพ

## เครื่องมือและวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)

### สถานการณ์ความเสี่ยง (Risk scenarios)

เราได้ประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อในสถานการณ์ต่าง ๆ ทั้งที่มีมาตรการในการป้องกันและที่ไม่มีมาตรการในการป้องกัน สำหรับโมเดลห้องสุขาสาธารณะขนาดตามมาตรฐานของประเทศไทยซึ่งมีขนาดความยาว  $1.5 \text{ m} \times$  กว้าง  $0.8 \text{ m} \times$  สูง  $2.7 \text{ m}$  (ปริมาตร 3.24 ลูกบาศก์เมตร) ได้รับการกำหนดสำหรับการประเมินความเสี่ยง (กระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2559) 3 สถานการณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งสามารถเป็นเหตุให้ผู้ทำใหัติดเชื้อ (infectors) ผลิละอองฝอย (droplets) และละอองลอย (aerosols) ที่ทำใหัติดเชื้อได้ ได้แก่ การหายใจปกติ (Br) การหายใจร่วมกับการไอ (BrpCo) และการหายใจร่วมกับการจาม (BrpSn) สถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงสุดได้รับการศึกษาต่อมาในการวัดประสิทธิภาพของมาตรการบรรเทาต่าง ๆ ที่ได้รับการระบุ (การสวมหน้ากาก การระบายถ่ายเทอากาศ และช่วงระยะเวลาการคอย) เพื่อที่จะประเมินผลของการสวมหน้ากาก หน้ากากประเภทต่าง ๆ (หน้ากากชนิด N95 หน้ากากอนามัย และ หน้ากากผ้า) ถูกใช้ในแบบจำลองเมื่อสวมโดยผู้ที่ทำใหัติดเชื้อ (infector) หรือสวมโดยผู้รับเชื้อ (receptor) ฝ่ายใดฝ่ายหนึ่ง หรือสวมโดยทั้งสองฝ่าย สำหรับการประเมินการระบายถ่ายเทอากาศ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) มีความหลากหลาย คือตั้งแต่ 0 (ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศ) 0.5 (การระบายถ่ายเทอากาศไม่ดี) 10 (มาตรฐานการระบายถ่ายเทอากาศสำหรับห้องสุขาสาธารณะ DIN พ.ศ. 2489) 12 (การระบายถ่ายเทอากาศมาตรฐานที่องค์กรอนามัยโลกแนะนำ พ.ศ. 2564) และ 20 (การระบายถ่ายเทอากาศยิ่งยวด) นอกจากนี้ช่วงระยะเวลาการคอย (คือช่วงระยะเวลาที่ไม่มีผู้ใช้) ระหว่างผู้ที่ทำใหัติดเชื้อ (infector) กับผู้รับเชื้อ (receptor) ก็ถูกกำหนดไว้ที่ 0 นาที 3 นาที 5 นาที และ 10 นาที เค้าโครง (outline) ของขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA steps) สำหรับสถานการณ์ทั้งหมดแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 1



ภาพประกอบที่ 1.เค้าโครง (outline) ของขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA steps) สำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ กัน ซึ่งเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับการแพร่กระจายทางการหายใจของเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ในบริบทแวดล้อมของห้องสุชาสาธารณะ.

#### ระดับของไวรัสที่เกิดจากผู้ทำให้ติดเชื้อ (infectior)

ความเข้มข้นของไวรัส SARS-CoV-2 ที่ใช้ในการศึกษาวัดนี้ได้ถูกกู้กลับคืนมา (retrieved) จากค่า reverse-transcription quantitative polymerase chain reaction quantification cycle (Ct) values ของผลการตรวจหาชิ้น N2 เป็นบวกสำหรับตัวอย่าง swab จำนวน 251 ตัวอย่างจากผู้ป่วยในโรงพยาบาลของรัฐบาลแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ระหว่างเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2564 เนื่องจากการขาดแคลนเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) สำหรับการตรวจตัวอย่าง swab ทางคลินิกในประเทศไทย ความเข้มข้นของไวรัสจึงได้รับการประมาณการ (estimate) โดยใช้เส้นโค้งมาตรฐาน (standard curves) ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (Sherchan และคณะ. พ.ศ. 2563) ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง  $4.4 \times 10^{-1}$  ถึง  $6.4 \times 10^8$  gene copies (gc)/μL ความเข้มข้นของไวรัส SARS-CoV-2 (A) มีการ fitted กับการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม (triangular distribution) ตามที่แสดงไว้ในตารางเสริม S1 เพื่อที่จะแปลงความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อได้จาก gc เป็นหน่วย plaque-forming unit (PFU) อัตราส่วนของ PFU ต่อ gc (R) ของไวรัส SARS-CoV-2 ได้รับการคำนวณเป็น 1:10 เพราะอัตราส่วนของ tissue culture infectious dose (TCID<sub>50</sub>) เฉลี่ย (มัธยฐาน) ต่อ RNA copies ของไวรัสในน้ำลายของตัวเฟรตส์ (ferrets) ถูกพบว่าเท่ากับ 0.15 (Kim และคณะ. พ.ศ. 2563) และอัตราส่วนของ PFU ต่อ TCID<sub>50</sub> ได้รับการกำหนดไว้ที่ 0.7 (Covés-Datson และคณะ. พ.ศ. 2563) ผลคูณกันของ 0.15 และ 0.7 ถูกทำให้กลม ๆ เป็น 0.1 (Murakami และคณะ. พ.ศ. 2564) จำนวนของเชื้อไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อได้ซึ่งแขวนลอยในอากาศโดยรอบ (ambient air) ของห้องสุชาได้รับการคำนวณโดยใช้สมการสมดุลมวล (สมการที่ (1.1) และ (1.2)) ซึ่งในสมการเหล่านี้แต่ละค่าหรือข้อความ (term) ในสมการมีหน่วย mass per time

ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์การสะสมของอนุภาคไวรัสเป็นละอองลอย (aerosols) ได้มาจากผลรวมของการหายใจของผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter) การหมดฤทธิ์ของไวรัส (virus inactivation) และการกำจัดไวรัสออกไปโดยการระบายถ่ายเทอากาศเชิงกล (mechanical ventilation) และการหายใจเข้า ภายใต้สภาวะเงื่อนไขปกติทั่วไปที่มีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 20–70% อุณหภูมิ 20 °C และไม่มีแสงแดดที่ส่องลงมาโดยตรง อัตราการหมดฤทธิ์ของไวรัส SARS-CoV-2 โดยเฉลี่ยที่  $0.008 \text{ (min}^{-1}\text{)}$  ถูกนำมาใช้ (Schuit และคณะ. พ.ศ. 2563) เราได้สันนิษฐานว่าอนุภาคไวรัสได้รับการปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องในระหว่างเวลาที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter) อยู่ในห้องสุขา ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในห้องสุขาของผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter)  $\frac{1}{4}t_i$  นาที ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในห้องสุขาสำหรับผู้ชายและผู้หญิงซึ่งสอดคล้องกับช่วงระยะเวลาที่ได้รับการระบุขึ้นในการศึกษาวิจัยในท่าอากาศยานในอาสาสมัครเพศชายจำนวน 250 คนและเพศหญิงจำนวน 237 คนมีการ fitted กับการแจกแจงแบบล็อกปกติ (ตารางเสริม S1; Gwynne และคณะ. พ.ศ. 2562) ความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อซึ่งผลิตโดยผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter) ซึ่งคงเหลืออยู่หลังจากที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อออกจากห้องสุขาไปแล้ว ( $C_t$ ) ได้รับการคำนวณตามสมการที่ (2) โดยการบูรณาการ (integrating) สมการ (1.2) ที่ไม่มีอนุภาคไวรัสแรกเริ่ม (initial virus particles) ( $C/40$ ) อัตราการหายใจเข้า ( $q_{in}$ ) หลังจากมีการกระจายสม่ำเสมอ (uniform distribution) อยู่ในช่วงระหว่าง 8.40 ถึง 14.93 L/min สำหรับเพศชาย และระหว่าง 7.71 ถึง 11.32 L/min สำหรับเพศหญิง (Stifelman พ.ศ. 2550) ความเข้มข้นเพิ่มเติมของไวรัสของไวรัส SARS-CoV-2 ที่ทำให้ติดเชื้อซึ่งขับออกมาโดยการไอ ( $C_{co}$ ) และการจาม ( $C_{sn}$ ) ได้รับการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ การไหลของปริมาตรของละอองฝอย (droplets) จากการหายใจออกของผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ ( $q_{br}$ ) อยู่ในช่วงระหว่าง  $5 \times 10^{-9}$  ถึง  $6 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{L/min}$  (Schijven และคณะ. พ.ศ. 2564) นอกจากนี้ปริมาตรของละอองลอยและละอองฝอยที่ขับออกมาต่อการไอหนึ่งครั้ง ( $V_{co}$ ) และต่อการจามหนึ่งครั้ง ( $V_{sn}$ ) ยังได้รับการกำหนดตามผลการศึกษาวิจัยของ Schijven และคณะ. (พ.ศ. 2564) อย่างไรก็ตามขนาดของละอองฝอย (droplets) สามารถมีบทบาทสำคัญในกิจกรรมของพวกมัน ละอองฝอยที่มีขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มที่จะตกลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ละอองฝอยที่มีขนาดเล็กกว่า (ละอองลอย) สามารถยังคงแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานานกว่า ดังนั้นอัตราส่วนโดยปริมาตร (volumetric ratios) ของละอองลอย (aerosol) ต่อละอองฝอยทั้งหมด (total droplets) ที่ถูกขับออกมา ( $F$ ) จึงได้รับการพิจารณาโดยใช้ขนาดของละอองฝอย (droplet size)  $\leq 70 \text{ } \mu\text{m}$  ซึ่งอ้างอิงการกระจายขนาด (size distribution) ของละอองฝอย (droplets) ในผลการศึกษาวิจัยสำหรับการหายใจ (Fabian และคณะ. พ.ศ. 2554) การไอ (Duguid พ.ศ. 2489; Loudon & Roberts พ.ศ. 2510; Han และคณะ. พ.ศ. 2556) และการจาม (Duguid พ.ศ. 2489; Han และคณะ. พ.ศ. 2556; ตารางเสริม S1)

$$(1.1) \quad \begin{array}{l} \text{การสะสม} \\ \text{ภายในระบบ} \end{array} = \begin{array}{l} \text{การไหลเข้าผ่าน} \\ \text{เขตแดนของระบบ} \end{array} - \begin{array}{l} \text{การไหลออกผ่าน} \\ \text{เขตแดนของระบบ} \end{array} - \begin{array}{l} \text{ปฏิกิริยาภายในระบบ} \end{array}$$

$$(1.2) \quad V \frac{dC}{dt} = q_{br}AR - \mu VC - q_{vent}C - q_{in}C$$

$$(2) \quad C_{t1} = \frac{q_{br}AR}{(\mu V + q_{vent} + q_{in})} \left( 1 - e^{-\frac{\mu V + q_{vent} + q_{in}}{V} t1} \right)$$

$$(3) \quad C_{co} = \frac{A V_{co} R F}{V}$$

$$(4) \quad C_{sn} = \frac{A V_{sn} R F}{V}$$

ในขณะที่พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไวรัสโดยผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) ได้แก่:  $q_{br}$  เป็นอัตราการไหลของปริมาตร (volumetric flow rate) ของละอองฝอย (droplets) จากการหายใจออกของผู้ทำให้ติดเชื้อ ( $\mu\text{L-droplet}\cdot\text{min}$ );  $A$  เป็นความเข้มข้นของไวรัสใน genome copies ต่อปริมาตรของละอองฝอย ( $\text{gc}\mu\text{L-droplet}$ );  $C_{co}$  เป็นความเข้มข้นเพิ่มเติมของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อในอากาศที่เกิดจากการไอ ( $\text{PFU}\cdot\text{L}$ );  $C_{sn}$  เป็นความเข้มข้นเพิ่มเติมของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อในอากาศที่เกิดจากการจาม ( $\text{PFU}\cdot\text{L}$ );  $R$  เป็นอัตราส่วนระหว่าง PFU ต่อ gc ( $\text{PFU}\cdot\text{gc ratio}$ );  $F$  เป็นเศษส่วน (fraction) ของปริมาตรละอองลอย (aerosol volume) ต่อปริมาตรทั้งหมดของละอองฝอย (droplets) ที่ถูกขับออกมา (ไม่มีมิติ);  $V_{co}$  เป็นปริมาตรของละอองฝอย (droplets) ที่ถูกขับออกมาต่อการไอหนึ่งครั้ง ( $\mu\text{L}\cdot\text{cough}$ );  $V_{sn}$  เป็นปริมาตรของละอองฝอย (droplets) ที่ถูกขับออกมาต่อการจามหนึ่งครั้ง ( $\mu\text{L}\cdot\text{sneeze}$ );  $q_{in}$  เป็นอัตราการหายใจเข้า ( $\text{L}\cdot\text{min}$ );  $q_{vent}$  เป็นอัตราการระบายถ่ายเทอากาศ ( $\text{L}\cdot\text{min}$ ) ซึ่งเท่ากับ  $\text{ACH}\times V/60$ ;  $V$  เป็นปริมาตรของอากาศในห้องสุขา ( $3,240\text{ L}\cdot\text{air}$ );  $t_1$  เป็นช่วงระยะเวลาที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) อยู่ในห้องสุขา ( $\text{min}$ );  $\mu$  เป็นอัตราการหมดฤทธิ์ (inactivation rate) ของไวรัสในอากาศที่มีระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 20–70% ( $\text{min}^{-1}$ )

#### ระดับของไวรัส (virus levels) ในระหว่างช่วงเวลารอคอย (waiting time)

ห้องสุขาวางไม่มีการใช้งานในระหว่างช่วงเวลารอคอย ( $t_2$ ) และไม่มีแหล่งที่มาของไวรัส (virus input source) ในขณะนั้น (ไม่มีผู้ทำให้ติดเชื้อ) จากสมการที่ (1.1), (5), และ (6) ความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อมีการลดลงโดยอยู่บนพื้นฐานของการระบายถ่ายเทอากาศและการหมดฤทธิ์ของไวรัส ความเข้มข้นของไวรัสเบื้องต้น ( $C_0$ ) ถูกใช้ให้สอดคล้องกับทั้ง 3 สถานการณ์นั้น (การหายใจแต่เพียงอย่างเดียว การหายใจรวมกับการไอ และการหายใจรวมกับการจาม [สมการที่ (7) – (9)]) ในการศึกษาวิจัยนี้ช่วงเวลารอคอยที่ใช้ได้จริง (practical waiting times) ที่ 3 นาที 5 นาที และ 10 นาที ได้รับการพิจารณา ในกรณีที่ผู้รับเชื้อ (receptor) เข้าสู่ห้องสุขาทันทีหลังจากผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) ออกจากห้องสุขานั้นช่วงเวลารอคอยก็เท่ากับศูนย์

$$(5) \quad V \frac{dC}{dt} = \mu VC - q_{vent}C$$

$$(6) \quad C_{t2} = C_0 \left( e^{-\frac{\mu V + q_{vent}}{V} t_2} \right)$$

โดยที่  $C_0$  จึงตามสถานการณ์จำเพาะดังต่อไปนี้:

$$(7) \quad \text{การหายใจแต่เพียงอย่างเดียว} \quad C_0 = C_{t1}$$

$$(8) \quad \text{การหายใจรวมกับการไอ} \quad C_0 = C_{t1} + C_{co}$$

$$(9) \quad \text{การหายใจรวมกับการจาม} \quad C_0 = C_{t1} + C_{sn}$$

#### ขนาดหรือปริมาณของไวรัส (virus doses) ที่ผู้รับเชื้อ (receptor) หายใจเข้าไป

ภายหลังช่วงเวลารอคอย ( $t_2$ ) ผู้รับเชื้อ (receptor) ที่เข้าสู่ห้องสุขามีการสัมผัสกับความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อ  $C_{t2}$  ใดๆก็ตามตามความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อมันก็ได้รับการกำจัดออกไปอย่างต่อเนื่องจากการระบายถ่ายเทอากาศ การหมดฤทธิ์ (inactivation) ตลอดจนการหายใจเข้า ในระหว่างที่ผู้รับเชื้อ (receptor) อยู่ในห้องสุขา ( $t_3$ ) การสัมผัสกับความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อ ( $C_{t3}$ ) ได้รับการคำนวณโดยใช้สมการที่ (10):

$$(10) \quad C_{t3} = C_{t2} \left( e^{-\frac{\mu V + q_{vent} + q_{in}}{V} t_3} \right)$$



ขนาดหรือปริมาณของไวรัส ( $d$ ) ที่จะถูกหายใจเข้าไปโดยผู้รับเชื้อ (receptor) ได้รับการคำนวณโดยการรวมเอาอัตราการหายใจเข้า ( $q_{in}$ ) กับ definite integral ของฟังก์ชันระหว่างความเข้มข้นของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อมีช่วงระยะเวลา ( $C_{t_3}$ ) ขีดจำกัด (limits) ของการบูรณาการถูกกำหนดจากเวลาที่เข้าสู่ห้องสุขาไปถึงช่วงระยะเวลาที่อยู่ในห้องสุขาของผู้รับเชื้อ ( $t_3$ ) (สมการที่ (11.1) และ (11.2)) ความเข้มข้นของการสัมผัสเบื้องต้น ( $C_{t_2}$ ) ก็เป็นไปตามสมการที่ (6) ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ที่ต้องการ

$$(11.1) \quad d = q_{in} \int_{t=0}^{t=t_3} C_{t_3} dt$$

$$(11.2) \quad d = \left( \frac{q_{in} V C_{t_2}}{(\mu V + q_{vent} + q_{in})} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\mu V + q_{vent} + q_{in}}{V} t_3} \right)$$

โดยที่  $t_3$  เป็นช่วงระยะเวลาที่อยู่ในห้องสุขาของผู้รับเชื้อ (min) และ  $d$  เป็นขนาดหรือปริมาณของไวรัส SARS-CoV-2 ที่ทำให้ติดเชื้อ (PFU)



## โมเดลขนาดหรือปริมาณของไวรัส SARS-CoV-2 กับปฏิกิริยาการตอบสนอง

การประเมินความเสี่ยงได้รับการดำเนินการ โดยทำตามกรอบงานของการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA framework) จากการศึกษาที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับขนาดกับปฏิกิริยา (dose-response) สำหรับเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 เราจึงได้ใช้ชุดข้อมูลของไวรัส SARS-CoV (Watanabe และคณะ. พ.ศ. 2553) ซึ่งใช้ในการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ที่เป็นการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ สำหรับเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 (Cortellessa และคณะ. พ.ศ. 2564; Dada & Gyawali พ.ศ. 2564; และคณะ. พ.ศ. 2564; Zaneti และคณะ. พ.ศ. 2564) ความเสี่ยงของการติดเชื้อเป็นไปตาม exponential model (สมการที่ (12)):

$$(12) \quad P_{\text{event}} = 1 - e \left( -\frac{d}{k} \right)$$

โดยที่  $P_{\text{event}}$  คือความเป็นไปได้ของการติดเชื้อต่อหนึ่งเหตุการณ์ ( $p_{pe}$ ) และ  $k$  เป็นค่า optimal dose-response function เท่ากับ 18.54 ที่ได้จาก Coronavirus 229E ซึ่งเทียบเท่ากับโอกาสความเป็นไปได้ที่เชื้อโรคหนึ่งหน่วย (single pathogen) จะริเริ่มให้เกิดปฏิกิริยาการตอบสนองต่อการติดเชื้อ (Watanabe และคณะ. พ.ศ. 2553; Haas พ.ศ. 2564)

### การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (risk characterization) และการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis)

เพื่อที่จะประมาณ (estimate)  $P_{\text{event}}$  สำหรับผู้รับเชื้อ (receptor) ที่มีการสัมผัสกับไวรัส SARS-CoV-2 ข้อมูลจากขั้นตอนต่าง ๆ ก่อนหน้านั้นได้รับการบูรณาการเข้ากับการจำลอง Monte Carlo simulation (MCs) ที่มีการทำซ้ำ (iterations) 10,000 ครั้งสำหรับสภาพเงื่อนไขแต่ละอย่างโดยใช้โปรแกรม Oracle Crystal Ball software เวอร์ชัน 11.1.2.4.850 การจำลอง Monte Carlo simulation (MCs) เป็นเทคนิควิธีการสุ่มซึ่งใช้การสุ่มตัวอย่างซ้ำ ๆ จากการกระจาย (distributions) ที่มีเพื่อที่จะใส่ตัวแปรป้อนเข้า (input variables) ในโมเดลรวมทั้งโพรไฟล์ความไวที่สอดคล้องกัน (corresponding sensitivity profiles) ความเสี่ยงของการติดเชื้อมีการแสดงให้เห็นในเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 ค่าเฉลี่ย (mean) และเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 โดยใช้ forest plot ใน GraphPad Prism เวอร์ชัน 7.0 นอกจากนี้การวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) ก็ได้รับการดำเนินการเพื่อระบุผลของตัวแปรป้อนเข้า (input variables) ที่มีต่อการคำนวณความเสี่ยง

### การประเมินการบริหารจัดการความเสี่ยง

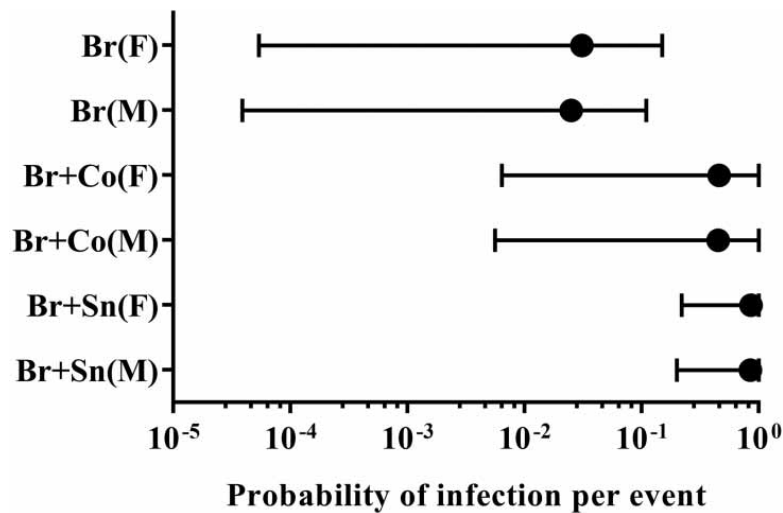
มีการศึกษาการดำเนินการแทรกแซง (interventions) 3 วิธีการในการลดความเสี่ยง คือการสวมหน้ากาก การระบายถ่ายเทอากาศ และการขยายช่วงระยะเวลารอคอย การสวมหน้ากากซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปได้รับการแนะนำ ในฐานะที่เป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายไม่มากและมีประสิทธิภาพในการลดการแพร่กระจายเชื้อไวรัส (องค์การอนามัยโลก พ.ศ. 2563b) ในบรรดาหน้ากากประเภทต่าง ๆ หน้ากากชนิด N95 หน้ากากอนามัย และหน้ากากผ้าเป็นหน้ากากที่มีการใช้กันทั่วโลกมากกว่าหน้ากากประเภทอื่น ๆ ประสิทธิภาพในการกรองไวรัส (VFE) ตามที่ได้รับการอธิบายลักษณะ (characterized) โดยใช้ bacteriophage MS2 ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM F2101-14 ได้เปิดเผยถึงประสิทธิภาพในการกรองไวรัส (VFE) อยู่ที่ 99.8-100% สำหรับหน้ากากชนิด N95 99.3-99.8% สำหรับหน้ากากอนามัย และ 54.8-92.1% สำหรับหน้ากากผ้า (Whiley และคณะ. พ.ศ. 2563; ตารางเสริม S1) MS2 bacteriophages ได้รับการคัดเลือกเป็นจุลินทรีย์ตัวอย่าง (model microbes) ด้วยเหตุที่ว่าจุลินทรีย์เหล่านี้มีขนาดเล็กกว่าไวรัส SARS-COV-2 (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70-90 nm) ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า

การระบายถ่ายเทอากาศก็เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญที่ถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในห้องสุชาสาธาณะ การติดตั้งระบบการระบายถ่ายเทอากาศเชิงกลหรือการใช้การระบายถ่ายเทอากาศจากธรรมชาติอาจจะเป็นสิ่งจำเป็น ขึ้นอยู่กับมาตรฐานอาคารสิ่งก่อสร้างตามกฎหมายที่บังคับ ผลของอัตราการเปลี่ยนอากาศ (air change rates) ที่มีต่อความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ได้รับการพิจารณาในการศึกษาวิจัยนี้ สำหรับการแพร่ระบาดของโรคการอนามัยโลกได้นำว่าการระบายถ่ายเทอากาศในบริเวณพื้นที่ภายในอาคารที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ในการผลิตละอองลอย (aerosol-generating potential) ควรจะต้องมีไม่ต่ำกว่า 12 ACH (องค์การอนามัยโลก พ.ศ. 2564) ในการศึกษาวิจัยนี้อัตราการเปลี่ยนอากาศ (air change rates) 5 ระดับได้รับการทดสอบ คือที่ 0 ACH (ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศ) 0.5 ACH (การระบายถ่ายเทอากาศไม่ดี) 10 ACH (มาตรฐานการระบายถ่ายเทอากาศสำหรับห้องสุชาสาธาณะ DIN พ.ศ. 2489) 12 ACH (การระบายถ่ายเทอากาศมาตรฐานตามท้องที่การอนามัยโลกแนะนำ) และ 20 ACH (การระบายถ่ายเทอากาศยิ่งยวด) (ตารางเสริม S1) นอกจากนี้แล้วช่วงระยะเวลาการคอยระหว่างผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter) ออกจากห้องสุชาไปจนถึงเวลาที่ผู้รับเชื้อ (receptor) เข้าสู่ห้องสุชานั้น คือช่วง 3 นาที 5 นาที และ 10 นาทีที่ได้รับการพิจารณาด้วย

## ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยและการอภิปราย (RESULTS AND DISCUSSION)

ความเสี่ยงของการติดเชื้อจากการแพร่กระจายเชื้อทางการหายใจในห้องสุชาสาธาณะ

ความเสี่ยงของการติดเชื้อจากการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ผ่านทาง 3 สถานการณ์ของการสัมผัสทางการหายใจ คือ การหายใจปกติ การหายใจร่วมกับการไอ และการหายใจร่วมกับการจามได้รับการอธิบายลักษณะ (characterized) ในการศึกษาวิจัยนี้เราไม่พบว่ามี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของความเป็นไปได้ (probability) ของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) ระหว่างผู้ชายกับผู้หญิง ( $p > 0.05$ ; Mann-Whitney  $U$  test) ตลอดทุก ๆ สถานการณ์ทั้งหมด (ภาพประกอบที่ 2 และตารางเสริม S2) ถึงแม้ว่าโดยปกติแล้วผู้ชายมีอัตราการหายใจที่สูงกว่า (Stifelman พ.ศ. 2550) ซึ่งส่งผลให้มีการสัมผัสกับเชื้อไวรัสได้มากกว่า แต่ผู้ชายก็ใช้เวลาอยู่ในห้องสุชาเฉลี่ยแล้วน้อยกว่าผู้หญิงประมาณ 22% (Gwynne และคณะ. พ.ศ. 2562) ซึ่งนำไปสู่ความเสี่ยงที่ลดลงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส เมื่อผู้รับเชื้อ (receptor) ที่ไม่สวมหน้ากากป้องกันอยู่ในห้องสุชาสาธาณะที่ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศ ความเสี่ยงของการติดเชื้อโดยเฉลี่ยอยู่ที่  $2.5 \times 10^{-2}$  ppe สำหรับผู้ชาย และ  $3.1 \times 10^{-2}$  ppe สำหรับผู้หญิง ในสถานการณ์ที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter) หายใจตามปกติ (ภาพประกอบที่ 2 และตารางเสริม S2) ที่น่าสนใจก็คือว่าค่าความเสี่ยงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณไวรัสเพิ่มเติมถูกขับออกมาสู่อากาศโดยการที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infecter) มีการไอหรือจาม การไอและการจามสามารถผลิตละอองฝอยของน้ำลายขนาดต่าง ๆ กัน (Duguid พ.ศ. 2489; Loudon & Roberts พ.ศ. 2510; Han และคณะ. พ.ศ. 2556) และดังนั้นจึงผลิตละอองลอยที่มีเชื้อไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อในห้องสุชาสาธาณะ สำหรับการหายใจร่วมกับการไอ ความเสี่ยงเฉลี่ย (mean risk) สูงขึ้นเป็น  $4.5 \times 10^{-1}$  ppe สำหรับผู้ชาย และ  $4.6 \times 10^{-1}$  ppe สำหรับผู้หญิง ในทำนองเดียวกันการจามก็ทำให้ความเสี่ยงของการติดเชื้อเพิ่มสูงขึ้นเป็น  $8.5 \times 10^{-1}$  ppe และ  $8.6 \times 10^{-1}$  ppe สำหรับผู้ชายและผู้หญิงตามลำดับ ดังนั้นเราจึงได้แสดงให้เห็นว่าผู้รับเชื้อ (receptors) มีความเสี่ยงสูงในการติดเชื้อเมื่อใช้ห้องสุชาสาธาณะที่ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศโดยที่ไม่สวมหน้ากากป้องกัน

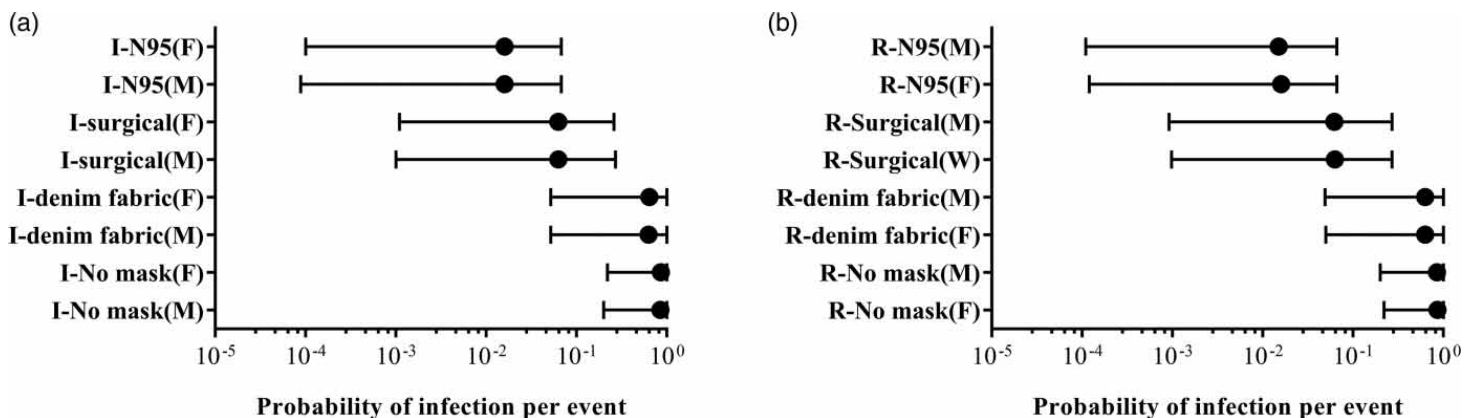


ภาพประกอบที่ 2. ความเสี่ยงของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) สำหรับผู้รับเชื้อ (receptor) เพศชาย (M) และเพศหญิง (F) ใน 3 สถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อไวรัส (virus-generating scenarios) ได้แก่ ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) หายใจตามปกติ (Br) หายใจร่วมกับการไอ (Br Co) และหายใจร่วมกับการจาม (Br Sn). กราฟชนิด forest plots แสดงค่าเฉลี่ย (mean values) ในวงกลมทึบ และช่วงความเชื่อมั่น 90% (จากเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 [whiskers ซ้าย] ถึงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95th [whiskers ขวา]).

## การลดความเสี่ยง (Risk mitigation)

### การสวมหน้ากากโดยผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) หรือโดยผู้รับเชื้อ (receptor)

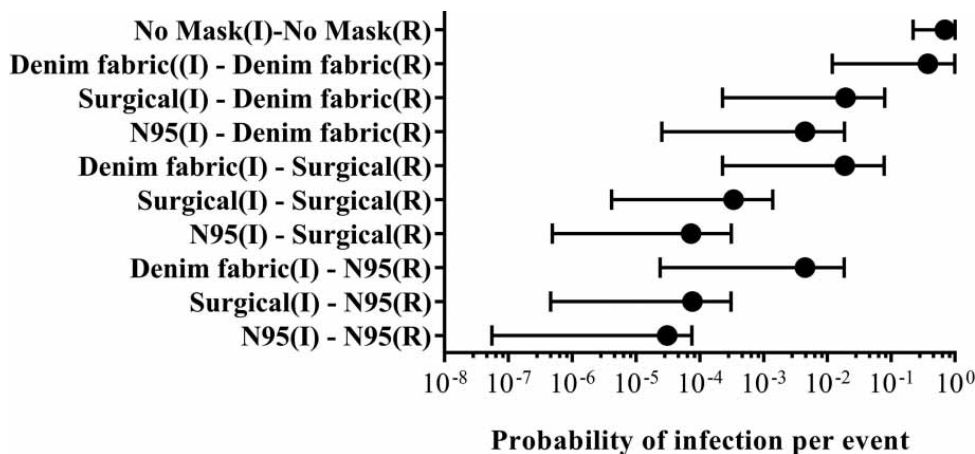
จากการที่มีความเสี่ยงสูงที่สุดสถานการณ์ที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) หายใจร่วมกับการจามจึงได้รับเลือกในการประเมินประสิทธิภาพของการสวมหน้ากากเพื่อที่จะลดความเสี่ยงของการติดเชื้อในผู้รับเชื้อ (receptor) ต่อไป ความเป็นไปได้ของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) สำหรับหน้ากากประเภทต่าง ๆ กันได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3 และตารางเสริม S3 เราสังเกตพบว่าความเสี่ยงมีการลดลงสูงสุดที่ประมาณ 2-log เมื่อผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) หรือผู้รับเชื้อ (receptor) ฝายใดฝายหนึ่งสวมหน้ากากชนิด N95 ดังนั้นผลที่ได้เหล่านี้ระบุบ่งชี้ว่าความเสี่ยงสูง ๆ ของการแพร่กระจายเชื้อไวรัสในพื้นที่ปิดอย่างเช่นในห้องสุชาสาธารณะจึงยังคงมีความเป็นไปได้แม้ว่าได้สวมหน้ากากชนิด N95 หรือหน้ากากอนามัยแล้วก็ตาม นี่อาจจะเป็นเพราะว่าความเสี่ยงของการติดเชื้อมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับปัจจัยต่าง ๆ มากมาย รวมทั้งความเข้มข้นสูง ๆ ของละอองลอยของเชื้อไวรัสในอากาศรอบ ๆ อันเนื่องมาจากการระบายถ่ายเทอากาศไม่เพียงพอ การที่ผู้ใช้ห้องสุชาใช้เวลาอยู่ในห้องสุชานั้นนาน อัตราการหมดฤทธิ์ของไวรัส SARS-CoV-2 ที่ต่ำ และการรั่วซึมของอากาศรอบ ๆ ขอบหน้ากาก (Brooks และคณะ, พ.ศ. 2564; Gwynne และคณะ, พ.ศ. 2562; Schuit และคณะ, พ.ศ. 2563; Whiley และคณะ, พ.ศ. 2563; Stabile และคณะ, พ.ศ. 2564) นอกจากนี้แล้วเรายังได้สังเกตพบว่าการลดลงของความเสี่ยงที่ต่ำถึง  $0.14\text{-log}_{10}$  เมื่อผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) หรือผู้รับเชื้อ (receptor) ฝายใดฝายหนึ่งสวมหน้ากากผ้า



ภาพประกอบที่ 3. ความเสี่ยงของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) ในผู้รับเชื้อ (receptor) เพศชาย (M) และเพศหญิง (F) ในสถานการณ์ที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (i) หายใจร่วมกับการจาม (Br Sn) เมื่อ (a) เฉพาะผู้ที่ทำให้ติดเชื้อเท่านั้นที่สวมหน้ากากประเภทต่าง ๆ และ (b) เฉพาะผู้รับเชื้อ (R) เท่านั้นที่สวมหน้ากากประเภทต่าง ๆ. กราฟชนิด forest plots แสดงค่าเฉลี่ย (mean values) ในวงกลมทึบ และช่วงความเชื่อมั่น 90% (จากเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 [whiskers ซ้าย] ถึงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95th [whiskers ขวา]).

## การสวมหน้ากากทั้งโดยผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) และโดยผู้รับเชื้อ (receptor)

ในสถานการณ์ที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) หายใจร่วมกับการจาม ความเสี่ยงในการแพร่เชื้อสามารถถูกทำให้ลดลงมากขึ้นถ้าหากว่าทั้งผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) และผู้รับเชื้อ (receptor) มีการสวมหน้ากากทั้งสองฝ่าย (ตารางเสริม S3) เพศของผู้รับเชื้อ (receptor) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเสี่ยงไม่ว่าในสภาวะเงื่อนไขใด ความเสี่ยงต่อผู้รับเชื้อ (receptor) เพศหญิงแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4 เมื่อทั้งผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) และผู้รับเชื้อ (receptor) มีการสวมหน้ากาก ไม่ว่าหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากชนิด N95 ความเสี่ยงของการติดเชื้อเฉลี่ยมีการลดลง 3.4-4.7  $\log_{10}$  จากการที่มีการลดลงแค่เพียง 0.4  $\log_{10}$  หน้ากากผ้าอาจจะไม่สามารถให้การป้องกันที่เพียงพอ ถึงแม้ว่าจะมีการสวมหน้ากากประเภทนี้ทั้งโดยผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) และโดยผู้รับเชื้อ (receptor) แล้วก็ตาม บนพื้นฐานของสิ่งที่เราพบจากการศึกษาวิจัยนี้ เราเสนอแนะว่าในฐานะที่เป็นผู้รับเชื้อ (receptor) เราควรสวมหน้ากากอนามัยหรือไมก็หน้ากากชนิด N95 เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล เพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อในห้องสุชาสาธารณะที่ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศ รวมทั้งในบริเวณพื้นที่ส่วนกลางอื่น ๆ ที่อับอากาศด้วยถ้าหากเป็นไปได้ โดยทั่วไปเราพบว่าการสวมหน้ากากเป็นหนึ่งในมาตรการวิธีการแทรกแซง (intervention measures) ที่มีต้นทุนต่ำสุด มีความเรียบง่ายมากที่สุดแต่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่สามารถใช้ในชีวิตประจำวัน เพื่อลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อให้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานผลการศึกษาวิจัยอื่น ๆ (Asadi และคณะ, พ.ศ. 2563b; Chu และคณะ, พ.ศ. 2563; องค์การอนามัยโลก พ.ศ. 2563b; Cheng และคณะ, พ.ศ. 2564; Goyal และคณะ, พ.ศ. 2564) นอกจากนี้ในบริเวณพื้นที่ส่วนกลางควรจะมีการดำเนินการมาตรการอื่น ๆ ได้แก่ การเพิ่มการระบายถ่ายเทอากาศ การขยายช่วงระยะเวลาในการรอคอย เพื่อลดความเสี่ยงของการติดเชื้อด้วย



ภาพประกอบที่ 4 ความเสี่ยงของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) ในผู้รับเชื้อ (receptor) เพศชาย (M) และเพศหญิง (F) ในสถานการณ์ที่ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศ (0 ACH) และผู้ทำให้ติดเชื้อ (I) หายใจร่วมกับการจาม (Br Sn) และผู้รับเชื้อ (R) สวมหน้ากากประเภทต่าง ๆ. ความเสี่ยงของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) ในสถานการณ์ที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (I) หายใจร่วมกับการจาม (Br Sn) เมื่อทั้งผู้ทำให้ติดเชื้อ (infector) และผู้รับเชื้อ (receptor) มีการสวมหน้ากากประเภทต่าง ๆ. ความเสี่ยงต่อผู้รับเชื้อเพศหญิงถูกใช้เป็นตัวแทน (represented) เนื่องจากผลต่อเพศไม่มีความชัดเจน. กราฟชนิด forest plots แสดงค่าเฉลี่ย (mean values) ในวงกลมทึบ และช่วงความเชื่อมั่น 90% (จากเปอร์เซ็นไทล์ที่ 5 [whiskers ซ้าย] ถึงเปอร์เซ็นไทล์ที่ 95th [whiskers ขวา]).

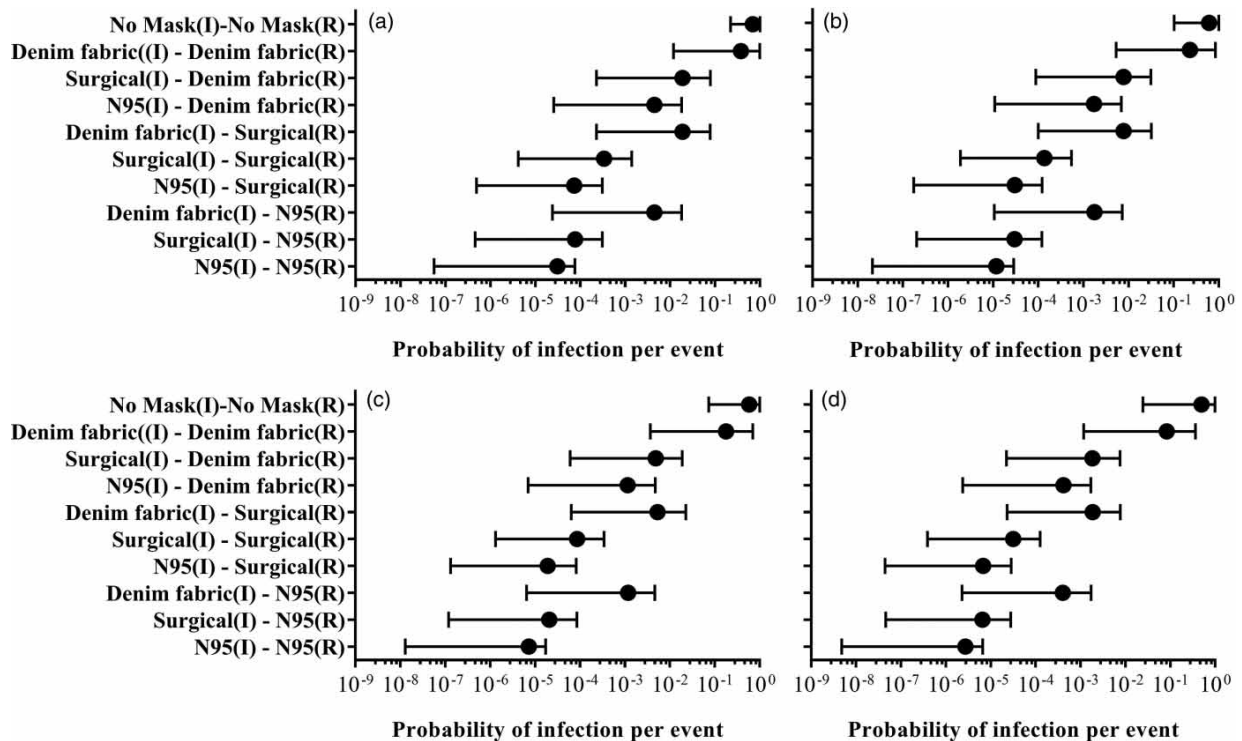
## การระบายถ่ายเทอากาศและการขยายช่วงระยะเวลารอคอย

ผลของการระบายถ่ายเทอากาศ (0–20 ACH) ได้รับการอธิบายลักษณะ (characterized) สำหรับ 3 สถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อไวรัส (virus-generating scenarios) ได้แก่ สถานการณ์ที่ผู้ทำให้เกิดติดเชื้อ (infecter) หายใจตามปกติ หายใจร่วมกับการไอ และหายใจร่วมกับการจาม (ตารางเสริม S4) ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มการระบายถ่ายเทอากาศ (increasing ACH) ไม่ได้ทำให้มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคโควิด 19 ในบริบทแวดล้อมของห้องสุขาสาธารณะ ถ้าหากว่ามีการหมุนเวียนที่สูง (high turnover) ของผู้ที่ใช้บริการห้องสุขาสาธารณะ ถึงแม้ว่าได้มีการแนะนำให้มีอัตราการระบายถ่ายเทอากาศสูง ๆ เป็นหนทางวิธีการอย่างหนึ่งในการลดจำนวนของละอองฝอย (droplets) และละอองลอย (aerosols) ที่มีเชื้อไวรัสในอากาศ (Morawska และคณะ, พ.ศ. 2563; Li และคณะ, พ.ศ. 2564; Stabile และคณะ, พ.ศ. 2564; องค์การอนามัยโลก พ.ศ. 2564) แต่การลดความเข้มข้นของเชื้อไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อจนถึงระดับที่มีความเสี่ยงต่ำ ๆ (low-risk level) เป็นสิ่งที่ต้องใช้เวลา (time-consuming) ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ (completely mixed conditions) นอกจากนี้แล้วปรากฏว่าการจับเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ออกมาอย่างต่อเนื่องจากการหายใจและ/หรือการจามโดยผู้ทำให้เกิดติดเชื้อ (infecter) ที่ไม่มีการสวมหน้ากากเป็นสาเหตุสำคัญของการสะสมตัวกันของละอองลอยไวรัสในอากาศรอบ ๆ ในการแลกเปลี่ยนอากาศสะอาดบริสุทธิ์ในห้องสุขาควรจะต้องพิจารณาถึงการมีช่วงระยะเวลารอคอยที่ยาวนานเพียงพอ ตัวอย่างเช่น ในสถานการณ์ที่ผู้ทำให้เกิดติดเชื้อ (infecter) หายใจร่วมกับการจามที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศอยู่ที่ 12 ACH ตามที่องค์การอนามัยโลกแนะนำ (พ.ศ. 2564) ความเป็นไปได้เฉลี่ย (mean probabilities) ของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) สำหรับผู้รับเชื้อ (receptor) เพศหญิงมีค่าสูงถึง  $7.4 \times 10^{-1}$ ,  $6.7 \times 10^{-1}$  และ  $4.7 \times 10^{-1}$  ppe สำหรับช่วงระยะเวลารอคอย (waiting times) ที่นาน 3 นาที 5 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ (ภาพประกอบเสริม S1) การศึกษาวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าลำพังแค่การระบายถ่ายเทอากาศในอาคารเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อ SARS-CoV-2 ในบริบทแวดล้อมของห้องสุขาสาธารณะที่เป็นห้องสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงน้อยกว่าการสวมหน้ากาก การศึกษาวิจัยอีกชิ้นหนึ่งก็มิได้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกัน คือพบว่าการสวมหน้ากากสามารถลดความเสี่ยงในการติดเชื้อที่มีสาเหตุมาจากเชื้อโคโรนาไวรัสโรคทางเดินหายใจตะวันออกกลางในบริบทแวดล้อมของโรงพยาบาลในร่ม (indoor hospital setting) ได้ดีกว่าการระบายถ่ายเทอากาศ (Adhikari และคณะ, พ.ศ. 2562) ด้วยเหตุนี้จึงควรใช้หลายมาตรการร่วมกันในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อลงสู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

## การผสมผสานระหว่างการสวมหน้ากาก การระบายถ่ายเทอากาศ และช่วงระยะเวลารอคอย

การเพิ่มการสวมหน้ากากเข้ามาได้รับการศึกษาสำหรับประสิทธิผลรวม (combined effectiveness) ในการลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 เมื่อใช้การสวมหน้ากากพร้อมกันกับการระบายถ่ายเทอากาศที่เพิ่มขึ้น และการขยายช่วงระยะเวลารอคอยให้ยาวนานออกไป ในสถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อไวรัส (virus-generating scenario) ที่ผู้ทำให้เกิดติดเชื้อ (infecter) หายใจร่วมกับการจาม การสวมหน้ากากทั้งโดยผู้ทำให้เกิดติดเชื้อ (infecter) และโดยผู้รับเชื้อ (receptor) ได้รับการประเมิน โดยมีการระบายถ่ายเทอากาศที่ 12 ACH ตามที่องค์การอนามัยโลกแนะนำ และที่ช่วงระยะเวลารอคอยต่าง ๆ กัน คือ ที่ 3 นาที 5 นาที และ 10 นาที (ภาพประกอบที่ 5 และตารางเสริม S5) เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีช่วงระยะเวลารอคอย (ภาพประกอบ 5(a)) แล้วการขยายช่วงระยะเวลารอคอยออกไปเป็น 10 นาที ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเท่ากับ 12 ACH แสดงให้เห็นถึงการลดลง  $1.0 \log_{10}$  ของความเสี่ยงของการติดเชื้อ (infection risks) เฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ที่ 95 ในกรณีส่วนใหญ่ที่สวมหน้ากาก 2 ชั้น แต่ถึงอย่างไร ช่วงระยะเวลารอคอยนาน 10 นาทีสำหรับห้องสุขาสาธารณะอาจจะเป็นสิ่งที่ไม่สามารถทำได้ในบางสภาพการณ์ ด้วยเหตุนี้เราจึงย้ำว่าการระบายถ่ายเทอากาศที่ถูกต้องเหมาะสมไม่มีผลในการลดความเสี่ยงสำหรับการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ในบริบทแวดล้อมของห้องสุขาสาธารณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่เป็นห้องสุขาสี่เหลี่ยมแคบ ๆ ดังนั้นการสวมหน้ากากจึงควรได้รับการส่งเสริมให้เป็นการปฏิบัติปกติประจำเมื่อเข้าสู่พื้นที่บริเวณสาธารณะภายในอาคาร นอกจากนี้การสวมหน้ากากที่กระชับใบหน้ามากขึ้นก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการลดความเสี่ยงด้วยเช่นกัน เพราะสามารถลดการรั่วซึมบริเวณขอบหน้ากาก็ได้ (Brooks และคณะ, พ.ศ. 2564)

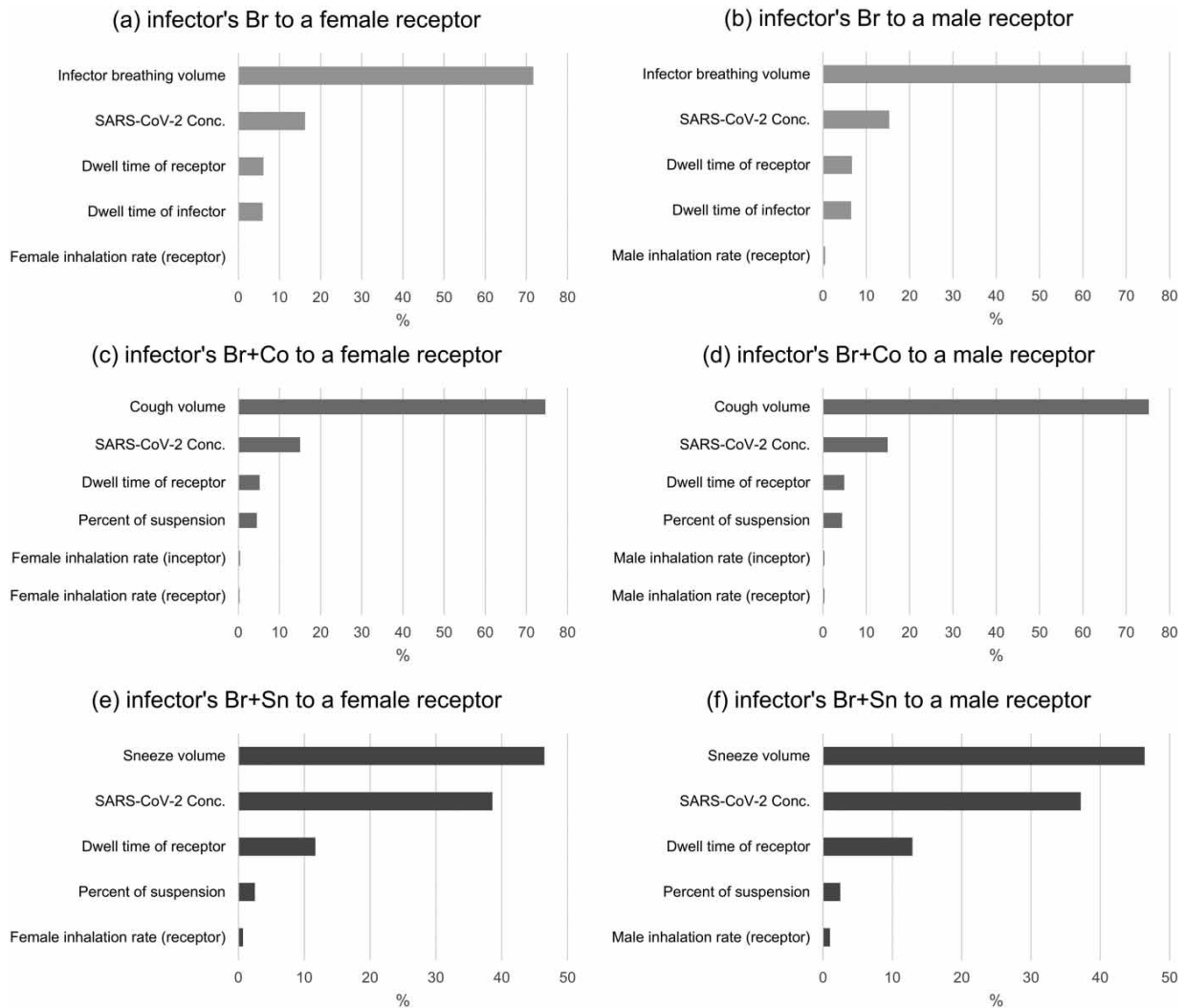




ภาพประกอบที่ 5. ความเสี่ยงของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) ในสถานการณ์ที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (I) หายใจรวมกับการจาม (Br Sn) โดยที่ทั้งผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) และผู้รับเชื้อ (receptor) มีการสวมหน้ากากประเภทต่าง ๆ. ความเสี่ยงต่อผู้รับเชื้อเพศหญิงถูกใช้เป็นตัวแทน (represented) เนื่องจากผลต่อเพศไม่มีความชัดเจน. ผลของช่วงระยะเวลาการคอยที่นาน (a) 0 นาที (b) 3 นาที (c) 5 นาที และ (d) 10 นาที ที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศอยู่ที่ 12 ACH ได้รับการแสดงให้เห็น. กราฟชนิด forest plots แสดงค่าเฉลี่ย (mean values) ในวงกลมทึบ และช่วงความเชื่อมั่น 90% (จากเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 [whiskers ซ้าย] ถึงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95th [whiskers ขวา]).

#### การวิเคราะห์ความไว

การวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) ของการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA) ได้รับการดำเนินการเพื่อระบุตัวแปรป้อนเข้า (input variables) ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการประมาณความเสี่ยง (risk estimation) มากที่สุด ปริมาตรและความหนาแน่นของเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ในละอองฝอย (น้ำลายและเมือก) ที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) ขับออกมาเป็นพารามิเตอร์ที่มีความไว (sensitive) มากที่สุด ซึ่งมีสัดส่วนคิดเป็น 71.7%, 74.6%, และ 46.5% ของความเป็นไปได้ (probability) ของการติดเชื้อตามลำดับในผู้หญิง (ภาพประกอบที่ 6 และตารางเสริม S6) ตัวแปรที่มีความไวเป็นอันดับ 2 ได้แก่ความหนาแน่นของเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 (คิดเป็นหน่วย gc/ $\mu$ L) ในละอองฝอย (น้ำลายและเมือก) ซึ่งมีสัดส่วนคิดเป็น 16.2%, 15.0%, และ 38.6% ตามลำดับในผู้หญิง ตัวแปรอื่น ๆ คือ ช่วงเวลาที่ผู้รับเชื้อ (receptor) อยู่ในห้องสุขา ช่วงเวลาที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) อยู่ในห้องสุขา ตลอดจนเปอร์เซ็นต์ของการแขวนลอยของละอองฝอย (droplet suspension) เป็นตัวแปรรองลงมา (minor parameters) ในแง่ของความไว (ภาพประกอบที่ 6 และตารางเสริม S6) เนื่องจากการหายใจรวมกับการจามเป็นสถานการณ์ความเสี่ยงที่มีการแพร่เชื้อไวรัสสูงสุด การวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) จึงได้รับการดำเนินการ โดยที่ทั้งผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) และผู้รับเชื้อ (receptor) มีการสวมหน้ากาก (ตารางเสริม S7) ความเข้มข้นของไวรัส (หน่วยเป็น gc/ $\mu$ L) ปริมาตรของการจาม (sneeze volume) และช่วงเวลาที่ผู้รับเชื้อ (receptor) อยู่ในห้องสุขาเป็น 3 ตัวแปรที่มีผลต่อความเสี่ยงของการติดเชื้อมากที่สุด เนื่องจากการควบคุมในเรื่องความเข้มข้นของเชื้อไวรัสและปริมาตรที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) ขับออกมาเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก (a challenge) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผู้ป่วยที่ไม่แสดงอาการ เราจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้เวลานาน ๆ ในบริเวณพื้นที่ปิดอับในอาคาร (Dancer และคณะ, พ.ศ. 2564; Stabile และคณะ, พ.ศ. 2564).



ภาพประกอบที่ 6. การวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) ที่แสดงถึงมีส่วนช่วยสนับสนุน (contribution) ของตัวแปรป้อนเข้า (input variables) ให้เกิดความเสี่ยงของการติดเชื้อต่อเหตุการณ์ (infection per event) สำหรับผู้รับเชื้อ(receptor) เพศชายและเพศหญิง โดยที่ไม่มีการระบายถ่ายเทอากาศและไม่มี การสวมหน้ากากใน 3 สถานการณ์ของการแพร่กระจายเชื้อ ได้แก่ สถานการณ์ที่ผู้ทำให้ติดเชื้อหายใจปกติ (Br) หายใจรวมกับการไอ (BrCo) และหายใจรวมกับการ จาม (BrSn): (a) ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อหายใจปกติ (Br) ไปยังผู้รับเชื้อเพศหญิง (b) ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อหายใจปกติ (Br) ไปยังผู้รับเชื้อเพศชาย (c) ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อหายใจรวมกับการไอ (BrCo) ไปยังผู้รับเชื้อเพศหญิง (d) ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อหายใจรวมกับการไอ (BrCo) ไปยังผู้รับเชื้อเพศชาย (e) ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อหายใจรวมกับการจาม (BrSn) ไปยังผู้รับเชื้อเพศหญิง และ (f) ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อหายใจรวมกับการจาม (BrSn) ไปยังผู้รับเชื้อเพศชาย



## ข้อจำกัดของการศึกษาวินิจฉัยนี้และมุมมองในอนาคต (Limitations of this study and future perspectives)

โดยที่การศึกษาวินิจฉัยนี้ประเมินความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ตามกรอบงานของการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA framework) ข้อจำกัด (limitations) และความไม่แน่นอน (uncertainties) ต่าง ๆ ควรได้รับการรับรู้อย่างระมัดระวัง (carefully acknowledged) ความเข้มข้นของเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 (ในหน่วยของ gc $\mu$ L) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความไวมากที่สุดและมีผลต่อการคำนวณค่าความเสี่ยงก็ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ (natural variations) ในน้ำลายและเมือกของผู้ป่วยที่ติดเชื้อ (Azzi และคณะ, พ.ศ. 2563; Wölfel และคณะ, พ.ศ. 2563) ในการศึกษาวินิจฉัยนี้ค่า  $C_t$  values สำหรับการตรวจตัวอย่าง swab จำนวน 251 ตัวอย่างถูกใช้เป็นตัวแทนระดับของเชื้อไวรัสในผู้ป่วยชาวไทย จากการที่ไม่มีเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) จากห้องปฏิบัติการในโรงพยาบาลของประเทศไทย เราจึงได้ใช้เส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) ของยีน N2 ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (Sherchan และคณะ, พ.ศ. 2563) ในการประมาณ (estimate) ความเข้มข้นของไวรัสในการศึกษาวินิจฉัยนี้ อย่างไรก็ตามก็มีการสังเกตพบที่มีความหลากหลายไม่เป็นเอกพันธ์ (heterogeneity) ของเส้นโค้งมาตรฐานต่าง ๆ สำหรับเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (Bivins และคณะ, พ.ศ. 2564) นอกจากนี้แล้วความแตกต่างกันของการตรวจวิเคราะห์ทางเทคนิคและทางห้องปฏิบัติการ (เช่น วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลและเครื่องมือในการควบคุม) ก็อาจทำให้เกิดอคติความเอนเอียง (bias) มากขึ้นได้อันจะนำไปสู่ความแปรปรวน (variability) ของความเข้มข้นของเชื้อไวรัสที่ได้รับการคำนวณ (Kongprajug และคณะ, พ.ศ. 2563; Bivins และคณะ, พ.ศ. 2564) ดังนั้นการยึดมั่นปฏิบัติตามมาตรฐานและมาตรการต่าง ๆ ในการควบคุมคุณภาพจึงได้รับการเน้นย้ำ เพื่อสนับสนุนการแลกเปลี่ยนแบ่งปันข้อมูล (data sharing) และการอ้างอิง (referencing) ในการศึกษาวินิจฉัยในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโรคติดต่อต่าง ๆ ที่เป็นโรคอุบัติใหม่ อย่างไรก็ตามแม้ว่าได้มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนดังกล่าวข้างต้นแล้วก็ตามแต่ความเข้มข้นของไวรัสในละอองฝอย (droplets) ที่คำนวณได้ ซึ่งใช้ในการศึกษาวินิจฉัยนี้ ซึ่งอยู่ในช่วง  $4.4 \times 10^{-1}$  ถึง  $6.4 \times 10^8$  gc $\mu$ L ก็สอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการศึกษาวินิจฉัยของ Schijven และคณะ (พ.ศ. 2564)

เราเลือกที่จะประเมิน 3 สถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อไวรัส ได้แก่ สถานการณ์ที่ผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) หายใจตามปกติ หายใจรวมกับการไอ และหายใจรวมกับการจาม อย่างไรก็ตามผู้ที่ทำให้ติดเชื้อ (infector) อาจจามและ/หรือไ้มากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับอาการของผู้นั้น ซึ่งก็อาจจะสามารถทำให้ความเสี่ยงของการติดเชื้อเพิ่มสูงขึ้นได้ การไอเป็นอาการที่เด่นเห็นได้ชัดในผู้ป่วยโรคโควิด 19 Wang และคณะ, พ.ศ. 2563) ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าการไอมีความสำคัญมากกว่าการจาม อย่างไรก็ตามมีงานศึกษาวินิจฉัยบางชิ้นที่เสนอแนะว่าการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศของโรคติดเชื้อมีความเป็นไปได้เพียงแค่มาน ลมหายใจออกของผู้ที่มีอาการเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการไอหรือจาม (Asadi และคณะ, พ.ศ. 2563a) นอกจากนี้แล้วการที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับขนาดหรือปริมาณของเชื้อกับปฏิกิริยาการตอบสนอง (dose-response information) และเกณฑ์มาตรฐานของความเสี่ยงในการติดเชื้อ (infection risk benchmarks) สำหรับในกรณีของเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ก็ก่อให้เกิดความท้าทาย (challenge) เมื่อทำการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อไวรัสชนิดนี้ เราสันนิษฐานว่าขนาดหรือปริมาณของเชื้อกับปฏิกิริยาการตอบสนอง (dose-response) ของเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 มีความคล้ายคลึงกันกับที่ระบุข้างขึ้นข้อมูลเชื้อไวรัส SARS-CoV จากการศึกษาวินิจฉัยของ Haas (พ.ศ. 2564) ซึ่งอ้างอิงถึง Coronavirus 229E จากการที่มีการอุบัติขึ้นใหม่ของไวรัส SARS-CoV-2 สายพันธุ์กลายพันธุ์ต่าง ๆ (variants) เมื่อเร็ว ๆ นี้ เราจึงยังคงไม่รู้ข้อมูลอีกมากเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะของเชื้อไวรัสชนิดนี้ ในการศึกษาวินิจฉัยนี้เราใช้ค่าสัมประสิทธิ์การหมดฤทธิ์ (inactivation coefficients) ของไวรัส SARS-CoV-2 ที่อุณหภูมิ 20 °C (Schuit และคณะ, พ.ศ. 2563) ที่มีอยู่ ซึ่งอาจจะทำให้การประมาณค่าความเสี่ยงในประเทศไทยที่คำนวณได้สูงกว่าความเป็นจริง (overestimated) จากการที่อุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละวันของประเทศไทยอยู่ที่ 27 °C (Denpetkul & Phosri พ.ศ. 2564)

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการป้องกันเชื้อไวรัสโดยการใช้น้ำกากประเภทต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการป้องกันความเสี่ยง แต่เราก็ไม่ได้รวมเอาปัจจัยองค์ประกอบของการรั่วซึมจากบริเวณขอบหน้ากาก เนื่องจากมีวิธีการที่แตกต่างกันในการสวมหน้ากาก (เช่น การสวมหน้ากาก 2 ชั้น การสวมหน้ากากที่ผูกเป็นปม (knotted) และจีบพับ (tucked)) Brooks และคณะ. พ.ศ. 2564 ได้ระบุไว้ว่า วิธีการสวมหน้ากากมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการป้องกันของหน้ากาก ข้อมูลจากการศึกษาวิจัยของคณะผู้วิจัยนี้ได้ระบุว่า การสวมหน้ากากอนามัยแค่เพียงอย่างเดียวสามารถสกัดกั้นอนุภาคเชื้อไวรัสจากการไอได้ 56.1% ในขณะที่การสวมหน้ากากผ้าแค่เพียงอย่างเดียวสามารถสกัดกั้นอนุภาคอย่างเดียวกันได้ 51.4% ในขณะเดียวกันการสวมหน้ากากอนามัยที่ผูกเป็นปม (knotted) และจีบพับ (tucked) สามารถสกัดกั้นอนุภาคเชื้อไวรัสจากการไอได้ 77.0% และการสวมหน้ากาก 2 ชั้น (double masking) สามารถสกัดกั้นอนุภาคอย่างเดียวกันได้ 85.4% การรั่วซึมที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการสวมหน้ากากควรได้รับการรวมอยู่ในการประเมินความเสี่ยงในอนาคตด้วย

ขอบเขตของการศึกษาวิจัยนี้ไม่ได้รวมเอาความเสี่ยงของการแพร่กระจายทางระบบการหายใจของเชื้อ SARS-CoV-2 ที่เกิดจากการกดชักโครกซึ่งอาจจะเป็นไปได้ ตลอดจนความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อผ่านช่องทางอื่น ๆ (เช่น การกระเซ็นเปรอะเปื้อนและการแพร่กระจายเชื้อผ่านผิวสัมผัสโดยตรง) (Verani และคณะ. พ.ศ. 2557) ตามที่มีหลักฐานชัดเจนจากการศึกษาวิจัยของ McKinney และคณะ. (พ.ศ. 2549) เกี่ยวกับเชื้อไวรัส SARS-CoV-1 ในการแพร่กระจายเชื้อในอาคารสูงที่ฮ่องกง จำเป็นจะต้องเน้นย้ำว่าการขั้นตอนปฏิบัติในการซ่อมบำรุงที่ได้รับการออกแบบที่ดีและมีมาตรฐานสำหรับระบบท่อและการระบายถ่ายเทอากาศในห้องสุขาอาจจะมีบทบาทสำคัญในการควบคุมละอองฝอยที่ทำให้ติดเชื้อ (infectious droplets) โดยการบูรณาการต้นตอแหล่งที่มาของความเสี่ยงทั้งหมดที่เรารู้องค์ความรู้ที่ละเอียดครอบคลุมรอบด้านเกี่ยวกับการประมาณความเสี่ยงก็อาจจะเป็นสิ่งที่บรรลุได้ เพื่อที่จะได้ให้ข้อมูลที่ถูกต้องสำหรับนโยบายทางด้านการสาธารณสุข และช่วยลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อต่อไป เป็นที่ปรากฏชัดว่าการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ยังคงมีการดำเนินการอย่างต่อเนื่องต่อไป และข้อมูลซึ่งเพิ่มเติมมากขึ้นก็จะเป็นประโยชน์เป็นอย่างมากต่อการศึกษาวิจัยในอนาคตที่มีเป้าหมายในการทำทำความเข้าใจลักษณะเฉพาะของเชื้อไวรัสนี้ได้ดีขึ้น โมเดลความเสี่ยงซึ่งอิงการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA-based risk models) ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในการศึกษาวิจัยนี้อาจจะสามารถช่วยทำให้การประเมินความเสี่ยงในอนาคตทำได้โดยสะดวกขึ้น โดยการดัดแปลงปรับปรุงสำหรับสถานการณ์ความเสี่ยงที่เฉพาะเจาะจง และการปรับปรุงตัวแปรป้อนเข้า (input parameters) ต่าง ๆ ให้ทันสมัย (updating) ตามข้อมูลที่มีมาใหม่ โมเดลความเสี่ยงที่ได้รับการปรับปรุงเช่นนั้นจะเป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินผลกระทบของกลยุทธ์วิธีการต่าง ๆ ในการลดความเสี่ยงในระหว่างการแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 และการแพร่ระบาดในอนาคต

## สรุปผลการศึกษาวิจัย (CONCLUSION)

ห้องสุชาสาธาณะภายในอาคารอาจสามารถเป็นศูนย์การแพร่กระจายเชื้อไวรัสในระหว่างการแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 ได้ การศึกษาวิจัยนี้ศึกษาความเสี่ยงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ทางอากาศในห้องสุชาสาธาณะสำหรับ 3 สถานการณ์ที่มีการแพร่เชื้อไวรัส (virus-generating scenarios) ได้แก่ การที่ผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) หายใจปกติ หายใจร่วมกับการไอ และหายใจร่วมกับการจาม การวิเคราะห์ความเสี่ยงซึ่งทำตามกรอบงานของการประเมินความเสี่ยงจากจุลินทรีย์เชิงปริมาณ (QMRA framework) เผยให้เห็นว่าความเสี่ยงสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อผู้ทำให้ติดเชื้อ (infecter) ที่ไม่มีอาการหรือที่มีอาการจาม เราพบว่าทั้งเพศหญิงและเพศชายมีความเสี่ยงใกล้เคียงกันในการสัมผัสเชื้อ ควรมีการใช้มาตรการต่าง ๆ ร่วมกัน ได้แก่ การระบายถ่ายเทอากาศที่เหมาะสม การขยายช่วงระยะเวลารอคอย และการสวมหน้ากากในฐานะที่เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับผู้ให้ห้องสุชาสาธาณะ

## กิตติกรรมประกาศ (ACKNOWLEDGEMENTS)

การศึกษาวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ (grant no. 2536702/43410) มหาวิทยาลัยมหิดล และ Kurita Overseas Research Grant (Grant No. 21Pthoo8-38Uto T.D.) ได้รับการจัดหาให้โดย Kurita Water and Environment Foundation

## ผลประโยชน์ทับซ้อน (CONFLICT OF INTEREST)

ผู้เขียนประกาศว่าผู้เขียนทุกคนไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนในการศึกษาวิจัยนี้ การศึกษาวิจัยนี้ได้รับการอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยแห่งคณะวิทยาศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย (Ethical number MUTM 2021-060-01)

## ถ้อยแถลงเกี่ยวกับการเข้าถึงข้อมูล (DATA AVAILABILITY STATEMENT)

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้รวมอยู่ในเอกสารผลงานการศึกษาวิจัยนี้และในส่วนของคุณข้อมูลเสริม (Supplementary Information)

## เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)

- Adhikari, U., Chabrelie, A., Weir, M., Boehnke, K., McKenzie, E., Ikner, L., Wang, M., Wang, Q., Young, K., Haas, C. N., Rose, J. & Mitchell, J. 2019 A case study evaluating the risk of infection from middle eastern respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) in a hospital setting through bioaerosols. *Risk Analysis* 39 (12), 2608-2624.
- Albert, S., Ruiz, A., Pemán, J., Salavert, M. & Domingo-Calap, P. 2021 Lack of evidence for infectious SARS-CoV-2 in feces and sewage. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases* 0123456789, 2-4. <https://doi.org/10.1007/s10096-021-04304-4>.
- Asadi, S., Bouvier, N., Wexler, A. S. & Ristenpart, W. D. 2020a The coronavirus pandemic and aerosols: does COVID-19 transmit via expiratory particles? *Aerosol Science and Technology* 54 (6), 635-638.
- Asadi, S., Cappa, C. D., Barreda, S., Wexler, A. S., Bouvier, N. M. & Ristenpart, W. D. 2020b Efficacy of masks and face coverings in controlling outward aerosol particle emission from expiratory activities. *Scientific Reports* 10 (1), 15665.
- Azzi, L., Carcano, G., Gianfagna, F., Grossi, P., Gasperina, D. D., Genoni, A., Fasano, M., Sessa, F., Tettamanti, L., Carinci, F., Maurino, V., Rossi, A., Tagliabue, A. & Baj, A. 2020 Saliva is a reliable tool to detect SARS-CoV-2. *Journal of Infection* 81 (1), e45-e50. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.04.005>.
- Birgand, G., Peiffer-Smadja, N., Fournier, S., Kerneis, S., Lescure, F. X. & Lucet, J. C. 2020 Assessment of air contamination by SARS-CoV-2 in hospital settings. *JAMA Network Open* 3 (12), 1-14.
- Bivins, A., Kaya, D., Bibby, K., Simpson, S. L., Bustin, S. A., Shanks, O. C. & Ahmed, W. 2021 Variability in RT-qPCR assay parameters indicates unreliable SARS-CoV-2 RNA quantification for wastewater surveillance. *Water Research* 117516. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117516>.
- Brooks, J. T., Beezhold, D. H., Noti, J. D., Coyle, J. P., Derk, R. C., Blachere, F. M. & Lindsley, W. G. 2021 Maximizing fit for cloth and medical procedure masks to improve performance and reduce SARS-CoV-2 transmission and exposure, 2021. *MMWR Surveillance Summaries* 70 (7), 254-257.
- CDC 2021 COVID-19 Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission. Updated May 7, 2021.
- Cheng, Y., Cheng, Y., Ma, N., Witt, C., Rapp, S., Wild, P. S. & Andreae, M. O. 2021 Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. *Science* 6296, 1-11.
- Chu, D. K., Akl, E. A., Duda, S., Solo, K., Yaacoub, S., Schünemann, H. J., El-harakeh, A., Bognanni, A., Lotfi, T., Loeb, M., Hajizadeh, A., Bak, A., Izcovich, A., Cuello-Garcia, C. A., Chen, C., Harris, D. J., Borowiack, E., Chamseddine, F., Schünemann, F., Morgano, G. P., Muti Schünemann, G. E. U., Chen, G., Zhao, H., Neumann, I., Chan, J., Khabsa, J., Hneiny, L., Harrison, L., Smith, M., Rizk, N., Giorgi Rossi, P., AbiHanna, P., El-khoury, R., Stalteri, R., Baldeh, T., Piggott, T., Zhang, Y., Saad, Z., Khamis, A. & Reinap, M. 2020 Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet* 395 (10242), 1973-1987.
- Cortellessa, G., Stabile, L., Arpino, F., Faleiros, D. E., van den Bos, W., Morawska, L. & Buonanno, G. 2021 Close proximity risk assessment for SARS-CoV-2 infection. *Science of the Total Environment* 794, 148749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148749>.
- Covés-Datson, E. M., King, S. R., Legendre, M., Gupta, A., Chan, S. M., Gitlin, E., Kulkarni, V. V., García, J. P., Smee, D. F., Lipka, E., Evans, S. E., Tarbet, E. B., Ono, A. & Markovitz, D. M. 2020 A molecularly engineered antiviral banana lectin inhibits fusion and is efficacious against influenza virus infection in vivo. *PNAS* 117 (4), 2122-2132.
- Dada, A. C. & Gyawali, P. 2021 Quantitative microbial risk assessment (QMRA) of occupational exposure to SARS-CoV-2 in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment* 763, 142989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142989>.
- Dancer, S. J., Li, Y., Hart, A., Tang, J. W. & Jones, D. L. 2021 What is the risk of acquiring SARS-CoV-2 from the use of public toilets? *Science of the Total Environment* 148341. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.104743>.
- Denpetkul, T. & Phosri, A. 2021 Daily ambient temperature and mortality in Thailand: estimated effects, attributable risks, and effect modifications by greenness. *Science of the Total Environment* 791, 148373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148373>.
- Ding, Z., Qian, H., Xu, B., Huang, Y., Miao, T., Yen, H., Xiao, S., Cui, L., Wu, X., Shao, W., Song, Y., Sha, L., Zhou, L., Xu, Y., Zhu, B. & Li, Y. 2021 Toilets dominate environmental detection of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in a hospital. *Science of the Total Environment* 753, 141710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141710>.
- Duguid, J. P. 1946 The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Journal of Hygiene* 44 (6), 471-479.
- Fabian, P., Brain, J., Houseman, E. A., Gern, J. & Milton, D. K. 2011 Origin of exhaled breath particles from healthy and human rhinovirus-infected subjects. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery* 24 (3), 137-147.
- Goyal, A., Reeves, D. B., Thakkar, N., Famulare, M., Cardozo-Ojeda, E. F., Mayer, B. T. & Schiffer, J. T. 2021 Slight reduction in SARS-CoV-2 exposure viral load due to masking results in a significant reduction in transmission with widespread implementation. *Scientific Reports* 11 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91338-5>.
- Gwynne, S. M. V., Hunt, A. L. E., Thomas, J. R., Thompson, A. J. L. & Séguin, L. 2019 The toilet paper: bathroom dwell time observations at an airport. *Journal of Building Engineering* 24, 100751. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100751>.
- Haas, C. N. 2021 Action levels for SARS-CoV-2 in air: preliminary approach. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis* 41 (5), 705-709.

- Haas, C. N., Rose, J. B. & Gerba, C. P. 2014 *Quantitative Microbial Risk Assessment*. Wiley, Hoboken, NJ.
- Han, Z. Y., Weng, W. G. & Huang, Q. Y. 2013 Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *Journal of the Royal Society Interface* 10 (88), 24026469.
- Jones, D. L., Baluja, M. Q., Graham, D. W., Corbishley, A., McDonald, J. E., Malham, S. K., Hillary, L. S., Connor, T. R., Gaze, W. H., Moura, I. B., Wilcox, M. H. & Farkas, K. 2020 Shedding of SARS-CoV-2 in feces and urine and its potential role in person-to-person transmission and the environment-based spread of COVID-19. *Science of the Total Environment* 749, 141364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141364>.
- Kim, Y. I., Kim, S. G., Kim, S. M., Kim, E. H., Park, S. J., Yu, K. M., Chang, J. H., Kim, E. J., Lee, S., Casel, M. A. B., Um, J., Song, M. S., Jeong, H. W., Lai, V. D., Kim, Y., Chin, B. S., Park, J. S., Chung, K. H., Foo, S. S., Poo, H., Mo, I. P., Lee, O. J., Webby, R. J., Jung, J. U. & Choi, Y. K. 2020 Infection and rapid transmission of SARS-CoV-2 in ferrets. *Cell Host and Microbe* 27 (5), 704-709. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2020.03.023>.
- Kongprajug, A., Chyerochana, N., Mongkolsuk, S. & Sirikanchana, K. 2020 Effect of quantitative polymerase chain reaction data analysis using sample amplification efficiency on microbial source tracking assay performance and source attribution. *Environmental Science & Technology* 54, 8232-8244.
- Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Cheng, P., Ling, H., Wang, S., Liang, P., Li, J., Xiao, S., Wei, J., Liu, L., Cowling, B. J. & Kang, M. 2021 Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment* 196, 107788. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107788>.
- Loudon, R. G. & Roberts, R. M. 1967 Droplet expulsion from the respiratory tract. *American Review of Respiratory Disease* 95 (3), 435-442.
- Maestre, J. P., Jarma, D., Yu, C., Siegel, J., Horner, S. & Kinney, K. A. 2021 Distribution of SARS-CoV-2 RNA signal in a home with COVID-19 positive occupants. *Science of the Total Environment* 778, 146201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146201>.
- McKinney, K. R., Gong, Y. Y. & Lewis, T. G. 2006 Environmental transmission of SARS at Amoy Gardens. *Journal of Environmental Health* 68 (9), 26-30.
- Ministry of Public Health. 2016 *Standard Construction Plan and Layout for Public Toilets*. Bureau of Environmental Health, Department of Health, Ministry of Public Health, Thailand.
- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L. C., Mazzarella, L., Melikov, A. K., Miller, S., Milton, D. K., Nazaroff, W., Nielsen, P. V., Noakes, C., Peccia, J., Querol, X., Sekhar, C., Seppänen, O., Tanabe, S. i., Tellier, R., Tham, K. W., Wargocki, P., Wierzbicka, A. & Yao, M. 2020 How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International* 142, 105832.
- Murakami, M., Miura, F., Kitajima, M., Fujii, K., Yasutaka, T., Iwasaki, Y., Ono, K., Shimazu, Y., Sorano, S., Okuda, T., Ozaki, A., Katayama, K., Nishikawa, Y., Kobashi, Y., Sawano, T., Abe, T., Saito, M. M., Tsubokura, M., Naito, W. & Imoto, S. 2021 COVID-19 risk assessment at the opening ceremony of the Tokyo 2020 Olympic Games. *Microbial Risk Analysis* 100162. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2021.100162>.
- Pitol, A. K. & Julian, T. R. 2021 Community transmission of SARS-CoV-2 by surfaces: risks and risk reduction strategies. *Environmental Science and Technology Letters* 8 (3), 263-269.
- Rose, J. B. & Gerba, C. P. 1991 Use of risk assessment for development of microbial standards. *Water Science and Technology* 24 (2), 29-34.
- Schijven, J., Vermeulen, L. C., Swart, A., Meijer, A., Duizer, E. & de Roda Husman, A. M. 2021 Quantitative microbial risk assessment for airborne transmission of SARS-CoV-2 via breathing, speaking, singing, coughing, and sneezing. *Environmental Health Perspectives* 129 (4), 1-10.
- Schuit, M., Ratnesar-Shumate, S., Yolitz, J., Williams, G., Weaver, W., Green, B., Miller, D., Krause, M., Beck, K., Wood, S., Holland, B., Bohannon, J., Freeburger, D., Hooper, I., Biryukov, J., Altamura, L. A., Wahl, V., Hevey, M. & Dabisch, P. 2020 Airborne SARS-CoV-2 is rapidly inactivated by simulated sunlight. *Journal of Infectious Diseases* 222 (4), 564-571.
- Sherchan, S. P., Shahin, S., Ward, L. M., Tandukar, S., Aw, T. G., Schmitz, B., Ahmed, W. & Kitajima, M. 2020 First detection of SARS-CoV-2 RNA in wastewater in North America: a study in Louisiana, USA. *Science of the Total Environment* 743, 140621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140621>.
- Shi, K. W., Huang, Y. H., Quon, H., Ou-Yang, Z. L., Wang, C. & Jiang, S. C. 2021 Quantifying the risk of indoor drainage system in multi-unit apartment building as a transmission route of SARS-CoV-2. *Science of the Total Environment* 762, 143056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143056>.
- Stabile, L., Pacitto, A., Mikszewski, A., Morawska, L. & Buonanno, G. 2021 Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms. *Building and Environment* 202, 108042. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108042>.
- Stifelman, M. 2007 Using doubly-labeled water measurements of human energy expenditure to estimate inhalation rates. *Science of the Total Environment* 373 (2-3), 585-590.
- Verani, M., Bigazzi, R. & Carducci, A. 2014 Viral contamination of aerosol and surfaces through toilet use in health care and other settings. *American Journal of Infection Control* 42, 758-762.
- Wang, Z., Yang, B., Li, Q., Wen, L. & Zhang, R. 2020 Clinical features of 69 cases with coronavirus disease 2019 in Wuhan, China. *Clinical Infectious Diseases* 71 (15), 769-777.
- Watanabe, T., Bartrand, T. A., Weir, M. H., Omura, T. & Haas, C. N. 2010 Development of a dose-response model for SARS coronavirus. *Risk Analysis: An International Journal* 30 (7), 1129-1138.
- Whiley, H., Keerthirathne, T. P., Nisar, M. A., White, M. A. F. & Ross, K. E. 2020 Viral filtration efficiency of fabric masks compared with surgical and N95 masks. *Pathogens* 9 (9), 1-8.

- WHO 2020a *Considerations for Public Health and Social Measures in the Workplace in the Context of COVID-19*. World Health Organisation, (May), 1. Available from: <https://www.who.int/publications-detail/risk> (accessed August 7, 2021).
- WHO 2020b *Coronavirus Disease (COVID-19) Advice for the Public: When and How to Use Masks*. (December 2020). Available from: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public/when-and-how-to-use-masks> (accessed August 8, 2021).
- WHO 2021 *Roadmap to Improve and Ensure Good Indoor Ventilation in the Context of COVID-19*. ISBN 978-92-4-002128-0 (electronic version). World Health Organization, Geneva.
- Wölfel, R., Corman, V. M., Guggemos, W., Seilmaier, M., Zange, S., Müller, M. A., Niemeyer, D., Jones, T. C., Vollmar, P., Rothe, C., Hoelscher, M., Bleicker, T., Brünink, S., Schneider, J., Ehmann, R., Zwirgmaier, K., Drosten, C. & Wendtner, C. 2020 *Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019*. *Nature* 581 (7809), 465–469.
- Xiao, F., Sun, J., Xu, Y., Li, F., Huang, X., Li, H., Zhao, J., Huang, J. & Zhao, J. 2020 *Infectious SARS-CoV-2 in feces of patient with severe COVID-19*. *Emerging Infectious Diseases* 26 (8), 1920–1922.
- Zanetti, R. N., Girardi, V., Spilki, F. R., Mena, K., Westphalen, A. P. C., da Costa Colares, E. R., Pozzebon, A. G. & Etchepare, R. G. 2021 *Quantitative microbial risk assessment of SARS-CoV-2 for workers in wastewater treatment plants*. *Science of the Total Environment* 754, 142163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142163>.
- Zang, R., Castro, M. F. G., McCune, B. T., Zeng, Q., Rothlauf, P. W., Sonnek, N. M., Liu, Z., Brulois, K. F., Wang, X., Greenberg, H. B., Diamond, M. S., Ciorba, M. A., Whelan, S. P. J. & Ding, S. 2020 *TMPRSS2 and TMPRSS4 promote SARS-CoV-2 infection of human small intestinal enterocytes*. *Science Immunology* 5 (47), 1–14.

First received 13 August 2021; accepted in revised form 4 February 2022. Available online 11 February 2022

