

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

The cost-effectiveness of standalone HEPA filtration units for the prevention of airborne SARS CoV-2 transmission

<https://resource-allocation.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12962-022-00356-1>

ความคุ้มค่าคุ้มทุน (**cost-effectiveness**) ของเครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศชนิด **HEPA** และสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง (**standalone**) สำหรับการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ทางอากาศ

บทคัดย่อ (Abstract)

วัตถุประสงค์ (Objective)

การติดเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ที่อยู่ในรูปของละอองลอยนับเป็นความท้าทายทางด้านเศรษฐกิจสำหรับธุรกิจร้านค้าต่าง ๆ ที่ไม่มีระบบความร้อน ความเย็นและการระบายอากาศ (HVAC) สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency) ได้ตั้งข้อสงสัยว่าอาจจะสามารถใช้เครื่องกรองอากาศชนิดที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง (**standalone**) ในบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีระบบความร้อน ความเย็นและการระบายอากาศ (HVAC) แต่ต้นทุนและประสิทธิผลของเครื่องกรองอากาศชนิดที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองนี้ยังไม่เคยได้รับการประเมินมาก่อน

การออกแบบการศึกษาวิจัย (Study design)

เราใช้การวิเคราะห์ต้นทุนประสิทธิผล (**cost-effectiveness analysis**) โดยใช้การจำลองชนิด Monte Carlo และการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายของละอองลอย (**aerosol transmission modeling**)

วิธีดำเนินการวิจัย (Methods)

เราได้สร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การตัดสินใจที่มีความน่าจะเป็น (**probabilistic decision-analytic model**) ในการจำลองชนิด Monte Carlo ที่ทดสอบการแพร่กระจายของละอองลอยเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ในพื้นที่ภายในอาคาร ในฐานะที่เป็นการศึกษาวิจัยกรณีที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่เราจะพบ (**base case study**) เราได้สร้างแบบจำลองที่จำลองร้านอาหารซึ่งมีขนาดพื้นที่ 1000 ตารางฟุต และมีการระบายถ่ายเทอากาศภายในร้านที่ไม่ดี (**poorly ventilated**) และมีช่วงความชุกของโรคโควิด-19 ที่มีผู้ติดเชื้อระยะคุกคามของโรคในสถานการณ์ต่าง ๆ กัน (สถานการณ์ที่ดีที่สุด (**best-case**) เท่ากับ 0.1% สถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่เราจะพบ

(base-case) เท่ากับ 2% และสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (worst-case) เท่ากับ 3%) และอัตราการได้รับวัคซีนในสถานการณ์ต่าง ๆ (สถานการณ์ที่ดีที่สุด (best-case) เท่ากับ 90% สถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (base-case) เท่ากับ 70% และสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (worst-case) เท่ากับ 0%) ในมหานครนิวยอร์ก เราได้ประเมินวัดความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของอัตราการไหลเวียนระบายถ่ายเทอากาศที่ปรับปรุงถึงระดับ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) ซึ่งเป็นค่าที่เทียบเท่ากับของระบบเครื่องกรองอากาศเกรดที่ใช้ในโรงพยาบาล (hospital-grade) ซึ่งใช้ในแผนกฉุกเฉิน เราได้จัดหาเครื่องมือทางออนไลน์ที่ปรับแต่งได้ (customizable) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้

ผลที่ได้จากการวิจัย (Results)

สถานการณ์ทั้งหมดทั้ง 3 สถานการณ์ส่งผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนสุทธิ (net cost-savings) และหลีกเลี่ยงการติดเชื้อได้ สำหรับสถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (base-case) การปรับปรุงให้มีการไหลเวียนระบายถ่ายเทอากาศที่ระดับ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) มีความสัมพันธ์กับการหลีกเลี่ยงการติดเชื้อทางละอองลอยได้ถึง 54 ครั้ง ใน 1 ปี [ช่วงความเชื่อมั่น (CrI) 95%: 29–86] ซึ่งทำให้สามารถประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ได้รับการประมาณการอยู่ที่ 152,701 ดอลลาร์สหรัฐ (ช่วงความเชื่อมั่น (CrI) 95%: \$80,663, \$249,501) และเท่ากับจำนวนปีสุขภาวะ (QALYs) ที่ได้รับเท่ากับ 1.35 ปีสุขภาวะ (ช่วงความเชื่อมั่น (CrI) 95%: 0.72, 2.24)

สรุปผลการวิจัย (Conclusions)

เป็นสิ่งที่คุ้มค่าในการที่จะปรับปรุงให้มีการไหลเวียนระบายถ่ายเทอากาศภายในอาคารในกิจการขนาดเล็กที่อยู่ในอาคารเก่า ที่ไม่มีระบบความร้อน ความเย็นและการระบายอากาศ (HVAC) ในระหว่างการแพร่ระบาดของโรค

บทนำ (Introduction)

เชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 อาจแพร่กระจายจากคนหนึ่งไปสู่อีกคนหนึ่ง โดยผ่านทางละอองลอยจากลมหายใจออกที่สะสมอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีการระบายถ่ายเทอากาศไม่ดี ด้วยเหตุนี้การแพร่กระจายเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ทางอากาศจึงเป็นความท้าทายที่สำคัญทางด้านสาธารณสุขและทางด้านเศรษฐกิจในขณะที่มีการเปิดพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์ขึ้นใหม่อีกครั้ง เพื่อที่จะเผชิญกับความท้าทายในพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์ใหม่ ๆ สามารถทำการปรับปรุงระบบความร้อน ความเย็นและการระบายอากาศ (HVAC) ที่มีอยู่แล้วได้ มาตรฐานอย่างหนึ่งคือการไหลเวียนระบายถ่ายเทอากาศที่ระดับ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) ซึ่งเป็นอัตราการไหลเวียนระบายถ่ายเทอากาศที่ได้รับการแนะนำสำหรับห้องพักคอยของแผนกฉุกเฉิน

อย่างไรก็ตามอาคารเก่ามักจะมีการติดตั้งระบบความร้อน ความเย็นและการระบายอากาศ (HVAC) อยู่แล้ว ในกรณีที่ไม่มี การติดตั้งระบบความร้อน ความเย็นและการระบายอากาศสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (EPA) ได้แนะนำทางเลือกให้มีการมาเชื้อในอากาศ ทางเลือกเหล่านี้อาจรวมถึงระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง (standalone filtration systems) ซึ่งมีอากาศที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA หรือหน่วยไฟฟ้า

สถิต (electrostatic units) ที่กรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน อย่างไรก็ตามเครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA ที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง (standalone) ก็ไม่ได้รับการออกแบบมาสำหรับการกรองอากาศที่มีปริมาตรสูง ๆ และขนาดกับปริมาณของเครื่องกรองอากาศที่จำเป็นในการที่จะทำให้บรรลุถึงระดับการไหลเวียนระบายถ่ายเทอากาศที่ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) ก็อาจจะไม่เหมาะในการใช้งานจริง เรื่องนี้เป็นความจริงโดยเฉพาะในบาร์ คาเฟ่ และร้านอาหารที่มีการระบายถ่ายเทอากาศไม่ดี เนื่องจากว่าลูกค้ามีการสวมหน้ากากโดยไม่มีการสวมหน้ากาก

จากการที่เครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA ที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองอาจจะมีประสิทธิภาพแค่เพียงเล็กน้อย (marginally effective) และราคาค่อนข้างแพง เราจึงได้ทำการประเมินความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของเครื่องนี้ ในการวิจัยนี้เราได้ให้ข้อมูลสำหรับในสถานการณ์ตัวอย่าง (ร้านอาหารที่มีการระบายถ่ายเทอากาศไม่ดี) แต่แบบจำลองออนไลน์ของเราจะสามารถจะถูกปรับเปลี่ยนดัดแปลงให้เข้ากับสถานการณ์ใด ๆ ก็ได้

วิธีดำเนินการวิจัย (Methods)

เราได้สร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การตัดสินใจ (decision-analytic model) ซึ่งได้รับการออกแบบเพื่อที่จะช่วยหน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลกฎระเบียบข้อบังคับทั้งในระดับท้องถิ่นและในระดับชาติ ในการกำหนดมาตรฐานสำหรับการปรับปรุงการระบายถ่ายเทอากาศภายในตัวอาคาร ในบริเวณพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์ที่มีการระบายถ่ายเทอากาศภายในอาคารไม่ดี เพื่อเป็นการป้องกันการติดเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ผ่านทางอนุภาคละอองลอย แบบจำลองนี้ได้รับการออกแบบในการคำนวณอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไป (incremental cost-effectiveness ratio - ICER) ซึ่งเป็นต้นทุนสุทธิ (net cost) ของการดำเนินการแทรกแซง (intervention) หากด้วยจำนวนปีสุขภาวะ (QALYs) ที่ได้ อัตราส่วน ICER นี้สามารถใช้ในการเปรียบเทียบการดำเนินการแทรกแซง (interventions) ทางด้านสุขภาพหรือทางด้านการแพทย์ที่ปรับใช้กันเป็นปกติทั่วไป เพื่อที่จะประเมินว่าการดำเนินการแทรกแซง (interventions) เหล่านั้นพอซื้อได้ (affordable) เราจึงได้ทำตามแนวปฏิบัติในการดำเนินการวิเคราะห์ต้นทุนประสิทธิผลของเรา (cost-effectiveness analyses) ซึ่งรวมถึงการประมาณการต้นทุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ จากมุมมองทางสังคม (societal perspective) สำหรับการวิจัยนี้เราได้ดำเนินการวิเคราะห์ของเรานบนพื้นฐานของพื้นที่บริเวณที่ได้มาตรฐาน (standardized space) เราอ้างอิงช่วงพิสัย (range) ของการติดเชื้อระยะคุกคามของโรค (actively infectious cases) และอัตราการได้รับวัคซีนครบเข็ม (full vaccination rates) จากมหานครนิวยอร์กในระหว่างวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2563 จนถึงวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2565 ที่สำคัญยิ่งกว่านั้นก็คือเราได้จัดให้มีการติดต่อสื่อสารกันออนไลน์ (online interface) ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง (model input parameters) ให้เหมาะสมตามแต่ละสถานการณ์ได้ แบบจำลองออนไลน์นี้สามารถใช้ในการประมาณการความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศภายในอาคารต่อช่วงปริมาณต้นทุน (range of costs) พื้นที่บริเวณ (spaces) ตลอดจนอัตราการแพร่กระจายเชื้อไวรัส (viral transmission rates)

ลักษณะต่าง ๆ (Characteristics) ของบริเวณพื้นที่ที่ได้มาตรฐาน (standardized space)

ภัตตาคาร ร้านอาหาร คาเฟ่ หรือบาร์แต่ละแห่งแต่ละที่ต่างก็มีลักษณะเฉพาะตัวในด้านขนาด จำนวนลูกค้า ช่วงระยะเวลาที่เปิดให้บริการ ตลอดจนช่วงระยะเวลาที่ลูกค้าอยู่ในสถานที่นั้น ๆ ความผันแปรแตกต่างกันนี้ทำให้เกิดความท้าทายในการทำ ความเข้าใจในความต้องการหรือความจำเป็นที่จะต้องมีการไหลเวียนอากาศและการกรองอากาศสำหรับกิจกรรมนั้น ๆ ในการ วิจัยนี้เราได้ใช้พื้นที่บริเวณของร้านอาหารเล็ก ๆ แห่งหนึ่งที่มีการระบายถ่ายเทอากาศไม่ดีเป็นตัวอย่าง เพื่อที่ว่าผู้อ่านบทความ วิจัยนี้จะสามารถได้แนวคิดทั่ว ๆ ไปเกี่ยวกับความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของระบบการระบายถ่ายเท อากาศที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง (standalone ventilation) นอกจากนี้แล้วการติดต่อสื่อสารที่สามารถปรับแต่งได้ (customizable interface) ของเราก็สามารถทำให้ทั้งหน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลกฎระเบียบข้อบังคับ (regulators) และเจ้าของกิจการร้านอาหารสามารถได้รับค่าตัวเลขประมาณการสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ กัน

ร้านอาหารที่ได้มาตรฐานเปิดบริการเป็นเวลา 3 ชั่วโมงสำหรับอาหารมื้อเที่ยงและ 6 ชั่วโมงสำหรับอาหารมื้อเย็น เราอนุมานว่า ร้านอาหารแห่งนี้มีความจุที่นั่งจำนวน 30 ที่ ในบริเวณพื้นที่ 1000 ตารางฟุต และความสูงของเพดานอยู่ที่ 9 ฟุต และลูกค้า แต่ละรายใช้เวลา 1 ชั่วโมงสำหรับมื้อกลางวัน และ 1.5 ชั่วโมงสำหรับมื้อเย็น สมมุติฐานของแบบจำลองแจกแจงไว้ในตาราง ที่ 1

ตารางที่ 1. สมมุติฐานของแบบจำลองสำหรับการประเมินความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของการ ปรับปรุงการระบายถ่ายเทอากาศในบริเวณพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์สำหรับการป้องกันเชื้อไวรัสซาร์ส-โควิ-2

สมมุติฐาน (Assumptions)
ห้องที่ได้มาตรฐานขนาด 1000 ตารางฟุต และมีความสูงของเพดานอยู่ที่ 9 ฟุต มีอัตราการถ่ายเทแลกเปลี่ยนอากาศอยู่ที่ 0.8 รอบ ต่อชั่วโมง ซึ่งมาจากการเปิดปิดประตูและการเปิดใช้งานปล่องระบายควันและกลิ่นเป็นหลัก
สำหรับมื้อกลางวันร้านอาหารแห่งนี้เปิดบริการเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีลูกค้าทั้งสิ้นจำนวน 30 คน แต่ละคนนั่งอยู่ในร้านเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เราจำลองการบริการเสิร์ฟอาหารมื้อกลางวัน 3 ครั้งรวดต่อเนื่องกันสำหรับลูกค้าแต่ละคนในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมงนั้น
การเสิร์ฟอาหารแต่ละครั้งทำในขณะที่มีลูกค้านั่งอยู่เต็มทุกที่นั่ง สำหรับมื้อเย็นร้านอาหารแห่งนี้เปิดบริการเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีลูกค้า ทั้งสิ้นจำนวน 30 คน แต่ละคนนั่งอยู่เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เราจำลองการบริการเสิร์ฟอาหารมื้อเย็น 4 ครั้งรวดต่อเนื่องกันสำหรับลูกค้า แต่ละคนในช่วงระยะเวลา 1.5 ชั่วโมงนั้น
การเสิร์ฟอาหารแต่ละครั้งทำในขณะที่มีลูกค้านั่งอยู่เต็มทุกที่นั่ง ช่วงเวลาระหว่างมื้อกลางวันจนถึงมื้อเย็น ร้านอาหารจะปิดเพื่อให้มี เวลานานเพียงพอ เพื่อที่ว่าความเข้มข้นของไวรัสในอากาศภายในร้านจะลดลงเป็นศูนย์เมื่อพนักงานเปิดประตูและมีการเคลื่อนย้าย อุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ทั่วบริเวณพื้นที่
ร้านอาหารแห่งนี้เปิดบริการ 7 วันต่อสัปดาห์ มีช่วงเวลาเปิดให้บริการในแต่ละวันใกล้เคียงกัน แบบจำลองนี้สร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขว่า มีการผสมผสานของอากาศเป็นอย่างดี (well-mixed conditions) สำหรับผู้ที่ติดเชื้อมีอยู่ในร้าน และมีการไหลเวียนของอากาศ ที่ดี (dynamic airflow) ในรูปแบบที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ (unpredictable patterns) ซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหว ของผู้คนและพัดลมเพดาน

สมมุติฐาน (Assumptions)
เราตั้งสมมุติฐานว่าการแพร่กระจายเชื้อในระยะประชิด กล่าวคือเมื่อละอองลอยที่ทำให้ติดเชื้อ (infectious aerosols) จากลมหายใจออกของผู้ที่ติดเชื้อได้ถูกหายใจเข้าไปโดยตรงโดยผู้ที่อ่อนแอในระยะใกล้เคียง ๆ มีค่าเท่ากับระหว่างกลุ่มเปรียบเทียบ (comparison arms) ทั้ง 2 กลุ่ม ดังนั้นเฉพาะการติดเชื้อที่ผ่านทางหายใจเข้าซึ่งรับเอาละอองลอยที่สะสมรวมตัวกัน ซึ่งบ่อยครั้งจะหมายถึงการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศจากระยะไกลเท่านั้นที่ได้รับการจำลอง และการแพร่กระจายเชื้อในระยะประชิดจะไม่ได้มีการจำลอง
เราได้ตั้งสมมุติฐานว่าผู้ป่วยโควิด-19 ที่แสดงอาการจะมีการแยกกักตัวเป็นเวลา 14 วัน นอกจากนี้เรายังได้ตั้งสมมุติฐานว่าผู้ติดเชื้อที่จำเป็นต้องเข้ารับการรักษาด้านในโรงพยาบาลจะมีการแยกกักตัวเป็นเวลา 21 วัน
ค่าจ้างทั้งหมดคิดที่ค่าเฉลี่ย (ค่ามัธยฐาน) ของค่าจ้างต่อชั่วโมงในสหรัฐอเมริกา

วิวัฒนาการชั่วคราว (**temporal evolution**) ของความเข้มข้นของ **viral copies** ที่มีชีวิตอยู่รอด (**viable**) ในบริเวณพื้นที่ภายในอาคาร

ในงานวิจัยชิ้นหนึ่งก่อนหน้านี้ ผู้เขียนบทความผลการวิจัย 2 ท่านได้พัฒนาแบบจำลองและเครื่องมือออนไลน์ (**online tool**) สำหรับความเข้มข้นชั่วคราว (**temporal concentration**) ของ **viral copies** ที่อยู่ในละอองลอยในอากาศภายใต้ภาวะเงื่อนไขที่มีการผสมผสานเป็นอย่างดี (**well-mixed conditions**) สำหรับผู้ที่ติดเชื้อที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ภายในอาคาร ควรสังเกตว่าการแบ่งแยกชั้น (**stratification**) ของละอองลอยติดเชื้อ (**infectious aerosols**) และการเบี่ยงเบนจากภาวะเงื่อนไขที่มีการผสมผสานเป็นอย่างดี (**well-mixed conditions**) จะเกิดขึ้นตลอดทั่วสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่แตกต่างกัน ความแตกต่างกันทางด้านเรขาคณิต (**geometry**) ของห้อง อุณหภูมิ หรือการจัดวางตำแหน่ง (**positioning**) ของระบบเครื่องกรองอากาศที่อากาศผ่านการกรองด้วยแผ่นกรองอากาศชนิด **HEPA** จะมีผลกระทบต่อผลที่ได้ อย่างไรก็ตามการเคลื่อนไหวของผู้คนที่อยู่ในอาคารซึ่งมีลักษณะยุ่งวุ่นวาย อย่างเช่นในอาสาสมัครที่ได้รับการศึกษาวิจัยในงานวิจัยชิ้นนี้จะเพิ่มการผสมผสานเข้ากับอากาศภายในห้อง และนำไปสู่ภาวะเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับละอองลอยที่ได้รับการผสมผสานเป็นอย่างดี (**well-mixed aerosols**) ควรทำตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญในการจัดวาง (**positioning**) ระบบเครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศชนิด **HEPA** ที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองที่วุ่นวายแบบจำลองนี้พิจารณาถึงการระเหิดกลายเป็นละอองไอ (**evaporation**) และการตกลงมา (**settling**) ของละอองฝอยที่มีเชื้อไวรัส (**virus-laden droplets**) ขนาดต่าง ๆ กันที่ผู้ติดเชื้อหายใจออกมาในรูปแบบของ **plaque forming units (PFUs)** สิ่งเหล่านี้ได้รับการประเมินจากการผสมรวมกันระหว่างการจำลองแบบ **reduced-order modeling** และการวัดค่าจากการทดลองก่อนหน้านี้ รายละเอียดต่าง ๆ ได้รับการอธิบายไว้ในที่อื่น กล่าวโดยย่อ ๆ คือความเข้มข้นของ **PFUs** ที่ผู้ติดเชื้อขับออกมาในบริเวณพื้นที่ภายในอาคารสามารถแสดงโดยสมการต่อไปนี้ :

$$C(t) = n_{\text{inf}} \cdot \frac{N_{\text{gen}}}{V \cdot (\lambda + \kappa + \nu + s)} + \left[C(t_0) - n_{\text{inf}} \cdot \frac{N_{\text{gen}}}{V \cdot (\lambda + \kappa + \nu + s)} \right] \cdot \exp[-(\lambda + \kappa + \nu + s) \cdot (t - t_0)],$$

โดยที่ $C(t)$ เป็นความเข้มข้นของ PFUs ของไวรัสในหัวเวลานั้น ๆ และ $C(t_0)$ เป็นความเข้มข้นพื้นฐาน (baseline); n_{inf} เป็นจำนวนของผู้ติดเชื้อที่อยู่ในห้องนั้น; N_{gen} เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดอนุภาคไวรัสที่ขับออกมาโดยการหายใจออกอย่างต่อเนื่องของผู้ติดเชื้อในขณะที่มีการพูดคุยต่อหนึ่งหน่วยเวลา ปัจจัยที่ทำให้เกิดอนุภาคไวรัส (generating factor) เท่ากับ 0.059 PFU/วินาที ได้รับการประมาณการโดยใช้ปริมาณไวรัสที่เสมหะของผู้ติดเชื้อเท่ากับ 10^{10} virus RNA copies/ml ในขณะที่ความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของอาร์เอ็นเอไวรัส (virus RNA copies/ml) ของเสมหะที่ติดเชื้อสำหรับสายพันธุ์ดั้งเดิม (original strains) ของโรคโควิด-19 ได้รับการประมาณการว่าเท่ากับ 7×10^6 ก็มีหลักฐานเกิดขึ้นใหม่ que แสดงให้เห็นว่าจำนวนของ viral copies สูงกว่านี้ถึงเกือบจะ 1000 เท่าสำหรับสายพันธุ์เดลต้า ซึ่งเป็นสายพันธุ์ของโรคโควิด-19 ที่พบมากที่สุด ในขณะที่ตีพิมพ์เผยแพร่บทความผลงานการวิจัยนี้ ดังนั้นเพื่อเป็นเชิงสงวน (conservative) เราจึงสมมุติว่าค่าความเข้มข้นของอาร์เอ็นเอไวรัสถ้อยู่ที่ 10^{10} copies/ml สำหรับสายพันธุ์เดลต้า ต่อจากนั้นเราจึงได้ใช้ตัวเทียบหน่วย (conversion factor) ซึ่งอยู่ที่ 0.01 เพื่อประมาณการค่า PFUs (infectious units) จาก RNA copies ในการวิจัยนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตัดออก (cut-off diameter) ของละอองลอย ซึ่งเป็นขนาดต่ำสุดที่อนุภาคถูกนำไปโดยการไหลเวียนของการระบายถ่ายเทอากาศถูกสมมุติให้อยู่ที่ 20 ไมครอน อัตราการไหลของลมหายใจออกถูกสมมุติให้อยู่ที่ 0.211 ลิตร/วินาที ซึ่งเป็นตัวแทนของพฤติกรรมหรือกิจกรรมเนือยนิ่ง (sedentary activity) และ V หมายถึงปริมาตรความจุของห้อง เราแสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์ของเราสำหรับพื้นที่ของร้านอาหารขนาด 1000 ตารางฟุตและมีความสูงของเพดาน 9 ฟุต และ λ หมายถึงอัตราการเน่าเปื่อยย่อยสลายของไวรัสตามธรรมชาติ (natural viral decay rate) เราสมมุติให้การเน่าเปื่อยย่อยสลายของไวรัสแบบทวีคูณยกกำลัง (exponential) มีอัตราอยู่ที่ 0.636 ต่อชั่วโมง และ $K:K$ หมายถึงอัตราการตกลงสู่พื้น (settling rate) ของละอองลอยจากแรงโน้มถ่วงของโลก ค่าที่เราสมมุติอยู่ที่ 0.39 ต่อชั่วโมง และ v หมายถึงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศของห้องกับอากาศภายนอก และ S หมายถึงการทำให้ปลอดเชื้อ (sterilization rate) โดยผ่านแผ่นกรองอากาศหรือเครื่องฟอกอากาศ

ความเสี่ยงของการติดเชื้อในบริเวณพื้นที่ภายในตัวอาคารที่ผ่านทางการแพร่กระจายเชื้อระยะไกลของอนุภาคไวรัสซาร์ส-โควี-2 ในรูปละอองลอยในอากาศ

สำหรับการนั่งอยู่โดยเฉลี่ยของผู้ที่อ่อนแอแต่ละคนในร้านอาหาร เราได้คำนวณความเสี่ยงของการติดเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 โดยอิงตามจำนวนของ PFUs ของเชื้อไวรัสที่แต่ละคนรับสัมผัสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับมือกลางวัน หรือ 1.5 ชั่วโมงสำหรับมือค่ำ ผู้ที่อ่อนแอหมายถึงผู้ที่ไม่มีโรคในขณะที่เริ่มเข้ารับบริการอาหารมือกลางวันหรือมือค่ำ และมีความเสี่ยงในการติดโรคในขณะที่นั่งอยู่ในร้านอาหาร เราสมมุติว่าถ้าหากจำนวนผู้คน (N) กำลังนั่งอยู่ในร้านอาหารนั้น เมื่ออิงตามความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ (คือ P_r) ก็จะมีผู้ที่ติดเชื้อเฉลี่ยอยู่ที่จำนวนเท่ากับ $N \cdot P_r$ และผู้ที่อ่อนแอจำนวนเท่ากับ $N - N \cdot P_r$ ในเหตุการณ์นั้น เราได้คำนวณจำนวนของ PFU units ที่ผู้ที่อ่อนแอมีการรับสัมผัสในระหว่างเหตุการณ์นั้น (คือ $nPFU_{exposed}$) ดังต่อไปนี้:

$$nPFU_{exposed} = \int_{t_1}^{t_2} N \cdot P_r \cdot C_{PFU}(t) \cdot Inhalation_rate \cdot dt,$$

โดยที่ t_1 และ t_2 หมายถึงเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์ตามลำดับ และ $N \cdot P_r$ หมายถึงจำนวนเฉลี่ยของผู้ที่ติดเชื้อในเหตุการณ์นั้น $C_{PFU}(t)$ หมายถึงความเข้มข้นชั่วขณะ (temporal concentration) ของ PFU units ของเชื้อไวรัส

(ดูในส่วน “วิวัฒนาการช่วงระยะเวลาของความเข้มข้นของจำนวนไวรัสที่มีชีวิตอยู่รอด”) และ **Inhalation_rate** หมายถึงอัตราการหายใจเข้าซึ่งอยู่ที่ **0.521** ลิตรต่อวินาทีสำหรับผู้ที่กำลังมีพฤติกรรมหรือกิจกรรมเนือยนิ่ง (**sedentary activity**) โดยเฉลี่ย (เช่น กำลังนั่งและพูดคุยกัน) เราคำนวณค่าความเสี่ยงของการติดเชื้อ (คือ p_{inf} สำหรับคนทั่วไปโดยเฉลี่ยอิงตามจำนวน PFUs ของเชื้อไวรัสที่แต่ละคนมีการรับสัมผัสในระหว่างเหตุการณ์นั้นดังต่อไปนี้:

$$p_{inf} = 1 - (1 - p_d)^{nPFU_{exposed}},$$

โดยที่ p_d หมายถึงความน่าจะเป็นหรือความเป็นไปได้ของการติดเชื้อต่อการรับสัมผัสเชื้อไวรัส 1 PFU เราคำนวณ p_d อยู่ที่ **0.0024** [ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95%, 0.0013–0.0053] โดยอิงตามขนาดของไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อ (**infectious dose**) ที่ **50 (ID50)** เท่ากับ **280 PFUs** (ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95%, 130–530) ค่า **ID50** หมายถึงจำนวนของอนุภาคเชื้อไวรัสที่ต้องมีในการทำให้ติดเชื้อใน **50%** ของผู้ที่รับสัมผัสกับอนุภาคเหล่านี้ เราทำการปรับเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นหรือความเป็นไปได้ที่ระดับต่าง ๆ ของการติดเชื้อในการรับสัมผัสเชื้อไวรัส 1 PFU เพื่อทดสอบความคุ้มค่าคุ้มทุน (**cost-effectiveness**) ของช่วงค่าความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควิ-2 สำหรับสายพันธุ์ที่ผ่านมาในอดีตและสายพันธุ์ในอนาคตที่มีความเป็นไปได้

วิธีการจำลองข้างบนนี้พิจารณาเฉพาะการติดเชื้อผ่านทางหายใจเข้าที่มีละอองลอยสะสมรวมตัวอยู่ ซึ่งบ่อยครั้งเรียกกันว่าวิธีการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศแบบ “ระยะไกล” ด้วยเหตุนี้การแพร่กระจายเชื้อในระยะประชิด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อละอองลอยติดเชื้อจากลมหายใจออกของผู้ที่ติดเชื้อถูกหายใจเข้าไปโดยตรงโดยผู้ที่อ่อนแอที่อยู่ใกล้ ๆ จึงอนุมานว่ามีค่าเท่ากับระหว่างกลุ่มที่เปรียบเทียบและไม่ได้รับความสนใจ

ต้นทุนค่าใช้จ่าย (Costs)

เราทำการจำลองต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวเองที่มีแผ่นกรองชนิด **HEPA** ซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่เล็กมาก ๆ จนถึงขนาดต่ำกว่าระดับไมครอนได้ เมื่ออิงตามขนาดของร้านอาหารแห่งนี้และอัตราการไหลเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (**CFM**) ของเครื่องนี้แล้ว เราคำนวณจำนวนเครื่องที่จะต้องมีการก่อให้เกิดอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเทียบเท่า **12** รอบต่อชั่วโมง (**ACH**) ในห้อง เราอนุมานว่าเครื่องเหล่านี้ได้รับการติดตั้งอย่างเหมือนกัน (**uniformly**) ในห้องเพื่อให้เกิดจุดต่าง ๆ กันของการกวนอากาศ (**air disturbance**)

เราจำลองต้นทุนค่าใช้จ่ายทั้งโดยตรงและโดยอ้อมของการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลเนื่องจากป่วยเป็นโรคโควิด-19 สำหรับต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยอ้อมของการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาล เราสมมุติว่าต้องมีการหยุดงานเป็นเวลา 21 วันในระหว่างอยู่ที่โรงพยาบาลและระหว่างพักอยู่ที่บ้านหลังจากที่ออกจากโรงพยาบาลแล้ว เราสมมุติว่าผู้ป่วยสูญเสียเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน คิดเป็นการสูญเสียรายได้จำนวน **25** ดอลลาร์สหรัฐฯ ต่อชั่วโมง เราสมมุติว่าผู้ป่วยมีการกักตัว 14 วันสำหรับการติดเชื้อที่แสดงอาการต่อเวลาการผลิตและเวลาพักผ่อนที่สูญเสียหายไป **8** ชั่วโมงต่อวัน ค่าตัวเลขต่าง ๆ ในอนาคตถูกลดลงที่อัตรา **3%** ต้นทุนค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้รับการปรับเข้ากับค่าเงินดอลลาร์สหรัฐฯ ของปี พ.ศ. 2563 (ตารางที่ [2](#))

ตารางที่ 2. ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง (model input parameters) สำหรับการประเมินความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ในการปรับปรุงการระบายถ่ายเทอากาศในบริเวณพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์ในการป้องกันเชื้อไวรัสซาร์ส-โควิ-2

พารามิเตอร์ (parameter)	ค่าปกติ (Base case value)	การแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability distribution)
จำนวนของผู้คนที่นั่งอยู่ในร้านอาหารแต่ละครั้ง	30	(เปลี่ยนไปในการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) จาก 20 เป็น 40)
อายุเฉลี่ยของผู้คนที่นั่งอยู่ในร้านอาหาร	45	(เปลี่ยนไปในการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) จาก 35 เป็น 55)
ความน่าจะเป็นและอัตรา		
ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อสำหรับไวรัส 1 หน่วย PFU ที่รับสัมผัส (อิงตาม ID50 ของ 280 หน่วย PFU (ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95%, 130-530)	0.0024	เบต้า (15.9592, 6633.707)
สัดส่วนของผู้ป่วยที่ไม่แสดงอาการในบรรดาผู้ที่รับสัมผัสเชื้อทั้งหมด (ไม่รวมผู้ที่ไม่แสดงอาการในตอนต้นแต่สุดท้ายก็แสดงอาการในที่สุด)	0.25	เบต้า (18.5, 55.5)
ความน่าจะเป็นในการเกิดการลงโควิด-19 ในบรรดาผู้ที่แสดงอาการ	0.133	เบต้า (86.567, 564.3127)
อัตราการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลจากการติดเชื้อ	ขึ้นอยู่กับอายุ: 0.019 สำหรับอายุเฉลี่ยที่ 45 ปี	เบต้า (98.081, 5064.077)
อัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อ	ขึ้นอยู่กับอายุ: 0.001 สำหรับอายุเฉลี่ยที่ 45 ปี	เบต้า (99.899, 99,799.1)
อัตราเชิงสัมพัทธ์ของการติดเชื้อชนิดแสดงอาการจากสายพันธุ์เดลต้าในบรรดาผู้ที่ได้รับวัคซีนครบเข็ม (อัตราเชิงสัมพัทธ์ที่ 0.22 เทียบเท่ากับการลดลง 78% ของการติดเชื้อที่แสดงอาการ ค่าตัวเลขหมายถึงประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของวัคซีนชนิด BNT162b2 และชนิด ChAdOx1 ต่อสายพันธุ์เดลต้า	0.22	เบต้า (14.8808, 52.7592)
ต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยตรง (ค่าเงินดอลลาร์สหรัฐฯ ในปี พ.ศ. 2563)		
การปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องให้อยู่ที่ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) (โดยการติดตั้งระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวมันเอง 5 เครื่องที่มีแผ่นกรองชนิด HEPA ซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่เล็กมาก ๆ จนถึงขนาดต่ำกว่าระดับไมครอนที่ได้รับการติดตั้งอย่างเหมือนกัน (uniformly) ในห้อง และก่อให้เกิดอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเทียบเท่า 12 รอบต่อชั่วโมง (ACH) ในห้องสำหรับพื้นที่ห้องขนาด 1000 ตารางฟุต (แต่ละเครื่องผลิตการไหลเวียนของอากาศที่ 347 CFM และมีราคา \$750)	\$3750	แกมมา (100, 0.02667)
การเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลจากการป่วยด้วยโรคโควิด-19	\$23,489	แกมมา (100, 0.00426)
ต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยอ้อม (ค่าเงินดอลลาร์สหรัฐฯ ในปี พ.ศ. 2563)		
การติดเชื้อโรคโควิด-19 ที่ไม่ต้องการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลสำหรับผู้ที่ไม่แสดงอาการ (สูญเสียการผลิตในช่วง 2 สัปดาห์ของการแยกกักตัว)	\$2800	แกมมา (100, 0.036)
การติดเชื้อโรคโควิด-19 ที่จำเป็นต้องเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาล (สูญเสียการผลิตในช่วง 3 สัปดาห์)	\$4200	แกมมา (100, 0.024)
การเสียชีวิตก่อนวัยอันสมควรจากโรคโควิด-19 (คำนวณการสูญเสียค่าจ้างเฉลี่ยในแต่ละปีที่อัตรา \$50,000 ต่อปีเมื่อพิจารณาจากการเสียชีวิตตอนอายุ 45 ปีในการจำลองกรณีที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (base case model) จนกระทั่งถึงอายุ 65 ปี ค่าตัวเลขต่าง ๆ ในอนาคตถูกลดลงที่อัตรา 3%)	\$793,874	แกมมา (100, 0.000126)
คุณภาพชีวิตที่สัมพันธ์กับสุขภาพ		
การสูญเสียปีสุขภาวะ (QALYs) ที่สัมพันธ์กับการติดเชื้อโรคโควิด-19 ชนิดที่แสดงอาการ	0.008	เบต้า (99.192, 12,299.81)
การสูญเสียปีสุขภาวะ (QALYs) ที่สัมพันธ์กับการติดเชื้อที่มีอาการลงโควิด-19	0.034	เบต้า (96.566, 2743.61)
การสูญเสียปีสุขภาวะ (QALYs) ที่สัมพันธ์กับการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลเนื่องจากป่วยเป็นโรคโควิด-19	0.020	เบต้า (97.970, 4776.154)
การสูญเสียปีสุขภาวะ (QALYs) ที่สัมพันธ์กับการเสียชีวิตด้วยโรคโควิด-19 (คำนวณโดยอ้างอิงการเสียชีวิตที่อายุเฉลี่ย 45 ปี ช่วงอายุชั้น 80 ปี ปีสุขภาวะ (QALYs) ที่ขึ้นอยู่กับอายุของประชากรทั่วไปของสหรัฐอเมริกา และค่าตัวเลขต่าง ๆ ในอนาคตที่ถูกลดลง 3%)	18.33	ปกติ (18.33, 1.83)

ID50 infectious dose 50; CI confidence interval; PFU plaque forming unit; ACH: air changes per hour; HEPA high efficiency particulate air; CFM cubic feet per minute (to measure airflow); QALY quality adjusted life year

คุณภาพชีวิตที่สัมพันธ์กับสุขภาพ (Health-related quality of life)

เราได้จำลองการสูญเสียปีสุขภาวะ (QALYs) ที่สัมพันธ์กับการติดเชื้อโรคโควิด-19 ชนิดที่แสดงอาการและการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลเนื่องจากป่วยเป็นโรคโควิด-19 ปีสุขภาวะ (QALYs) เป็นเมตริกซ์ที่จับทั้งความยืนยาวของชีวิต (longevity) และคุณภาพชีวิตที่สัมพันธ์กับสุขภาพ (HRQL) ปีสุขภาวะสามารถคิดเป็นจำนวนปีที่มีการใช้ชีวิตโดยที่มีสุขภาพดีสมบูรณ์ และคำนวณเป็นผลผลิตของจำนวนปีที่ยังมีชีวิตเหลืออยู่และคะแนนคุณภาพชีวิตที่สัมพันธ์กับสุขภาพ (HRQL score) เรายังได้จำลองการเปลี่ยนแปลงของปีสุขภาวะสำหรับส่วนของผู้ที่ติดเชื้อที่มีอาการลงโควิด-19 ด้วยสุดท้ายเราได้จำลองการสูญเสียปีสุขภาวะที่สัมพันธ์กับการเสียชีวิตก่อนวัยอันสมควรด้วยโรคโควิด-19 เราได้ลดค่าตัวเลขต่าง ๆ ในอนาคตลง 3%

การวิเคราะห์ (Analysis)

เราได้เปรียบเทียบการดำเนินการแทรกแซง (intervention) 2 ชนิด คือ (1) ไม่มีการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศพื้นฐานซึ่งอยู่ที่ 0.8 รอบต่อชั่วโมง ('status quo') และ (2) มีการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องเป็น 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรามีความเป็นไปได้ (probabilistic) และได้รับการพัฒนาในการจำลองชนิด Monte Carlo ที่มีการทำซ้ำ ๆ กัน (iterations) 5000 ครั้ง โดยที่การทำซ้ำแต่ละครั้งสุ่มจากการแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distributions) ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไป (input parameters) ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง (model input parameters) พร้อมด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้

เราได้ทำการวิเคราะห์สำหรับเงื่อนไขต่าง ๆ กัน ซึ่งกำหนดขอบเขตโดยความชุกเฉลี่ยทั้งปีของผู้ป่วยแพร่เชื้อในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ และสัดส่วนของลูกค้าผู้ชดหนุ่ยที่ได้รับวัคซีนแล้ว สำหรับการจำลองกรณีที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (base case model) เราสมมุติว่ามีความชุกเฉลี่ยทั้งปีของผู้ป่วยแพร่เชื้อในชุมชนรอบ ๆ อยู่ที่ 2% และอัตราการได้รับวัคซีนครบเข็ม (วัคซีนที่ได้รับการอนุมัติจากองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกาจำนวน 2 เข็มตามที่กำหนด) ของลูกค้าที่นั่งอยู่ในร้านอาหารแห่งนี้อยู่ที่ 70% เราได้จำลองอัตราอุบัติการณ์รายวันชนิดสุ่มจากการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) และรวมยอดอัตราอุบัติการณ์รายวันในห้วงเวลา 12 วันเพื่อให้ได้ความชุกของผู้ป่วยแพร่เชื้อรายวัน นี่เป็นการสมมุติค่าเฉลี่ย 12 วันของการติดเชื้อสำหรับผู้รับสัมผัสเชื้อซึ่งเริ่มต้นก่อนเริ่มแสดงอาการ 2 วัน (สำหรับรายที่แสดงอาการ) บวกกับ 10 วันหลังจากเริ่มแสดงอาการแล้ว

สำหรับสถานการณ์ที่ดีที่สุด (จำนวนการติดเชื้อต่ำสุด) เราได้สมมุติให้มีความชุกตลอดทั้งปีของผู้ป่วยแพร่เชื้อในชุมชนรอบ ๆ อยู่ที่ 0.1% และอัตราการได้รับวัคซีนครบเข็มในบรรดาลูกค้าที่นั่งอยู่ในร้านอาหารแห่งนี้อยู่ที่ 90%

สำหรับสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (จำนวนการติดเชื้อมากที่สุด) เราได้สมมุติให้มีความชุกตลอดทั้งปีของผู้ป่วยแพร่เชื้อในชุมชนรอบ ๆ อยู่ที่ 3% และอัตราการได้รับวัคซีนครบเข็มในบรรดาลูกค้าที่นั่งอยู่ในร้านอาหารแห่งนี้อยู่ที่ 0%

ช่วงระยะเวลาของการจำลองครั้งนี้คือ 1 ปี และช่วงระยะเวลาในการวิเคราะห์คือตลอดชีวิต ผลลัพธ์ของแบบจำลองคือต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยตรงและโดยอ้อมรวมทั้งการติดเชื้อที่เพิ่มขึ้นที่ได้รับการหลีกเลี่ยง จำนวนปีสุขภาวะ (QALYs) ที่ได้รับตลอดจนอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไป (incremental cost-effectiveness ratio - ICER) สำหรับการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศ นอกจากนี้เรายังได้ทำการวิเคราะห์ความไวชนิดทางเดียว (one-way sensitivity analyses) สำหรับพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าสำคัญ ๆ (core input parameters) ทั้งหมดของแบบจำลองเพื่อวัดความแข็งแกร่ง (robustness) ของผลลัพธ์จากการจำลองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้

ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัย (Results)

สถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (Base-case scenario) (ความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ที่อัตรา 2% และอัตราการได้รับวัคซีนครบถ้วนในบรรดาลูกค้าของร้านอาหารที่อัตรา 70%) การปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องเป็น 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) มีความสัมพันธ์กับการติดเชื้อจำนวน 54 ครั้งที่หลีกเลี่ยงได้ [ช่วงความเชื่อมั่น (CrI) 95%: 29, 86] ในร้านอาหารที่ได้มาตรฐานในช่วงเวลา 1 ปี สิ่งนี้ทำให้สามารถประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายจำนวนเท่ากับ 152,701 ดอลลาร์สหรัฐ (ช่วงความเชื่อมั่น (CrI) 95%: \$80,663, \$249,501) และจำนวนปีสุขภาวะที่ได้รับเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.35 ปีสุขภาวะ (ช่วงความเชื่อมั่น (CrI) 95%: 0.72, 2.24) ตารางที่ 3 แสดงผลที่ได้ที่ครบถ้วนสมบูรณ์

ตารางที่ 3. ผลลัพธ์จากการจำลองซึ่งรวมถึงการติดเชื้อที่หลีกเลี่ยงได้ ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น จำนวนปีสุขภาวะ (QALYs) ที่เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไป (incremental cost-effectiveness ratio) สำหรับการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องจาก 0.8 เป็น 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH)

	ค่าเฉลี่ยการติดเชื้อทางอากาศที่หลีกเลี่ยงได้ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยต้นทุนค่าใช้จ่ายสุทธิ (\$) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย (\$) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยการสูญเสียปีสุขภาวะ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยปีสุขภาวะ (QALYs) ที่ได้รับเพิ่มขึ้น (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	อัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้น (ICER ^b) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)
สถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (ความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ที่อัตรา 2% และ 70% ของลูกค้าได้รับวัคซีน)						
อัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องที่ 0.8 รอบต่อชั่วโมง (0.8 ACH)		\$185,579 (\$100,099, \$300,430)		1.6 (0.85, 2.66)		
ปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องให้อยู่ที่ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH)	54 (29, 86)	\$32,877 (\$19,394, \$50,877)	\$152,701 (\$80,663, \$249,501)	0.25 (0.13, 0.42)	1.35 (0.72, 2.24)	- \$113,126/QALY (dominant, dominant)
สถานการณ์ที่ดีที่สุด (ความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ที่อัตรา 0.1% และ 90% ของลูกค้าได้รับวัคซีน)						

	ค่าเฉลี่ยการติดเชื้อทางอากาศที่หลีกเลี่ยงได้ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยต้นทุนค่าใช้จ่ายสุทธิ (\$) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย (\$) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยการสูญเสียปีสุขภาวะ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	ค่าเฉลี่ยปีสุขภาวะ (QALYs ^a) ที่ได้รับเพิ่มขึ้น (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	อัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้น (ICER ^b) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)
อัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องที่ 0.8 รอบต่อชั่วโมง (0.8 ACH)		\$ 6824 (\$ 3524, \$ 11,356)		0.06 (0.03, 0.11)		
ปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องให้อยู่ที่ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH)	2 (1,4)	\$ 4821 (\$ 3930, \$ 5865)	\$ 2003 (-\$ 881, \$ 5968)	0.01 (0.01, 0.02)	0.05 (0.03, 0.09)	- \$ 38,104/QALY (dominant, \$ 30,503/QALY)
สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (ความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารตั้งอยู่ที่อัตรา 3% และไม่มีลูกค้ารายใดที่ได้รับวัคซีน)						
อัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องที่ 0.8 รอบต่อชั่วโมง (0.8 ACH)		\$ 544,521 (\$ 298,694, \$875,492)		4.35 (2.34, 7.14)		
ปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศในห้องให้อยู่ที่ 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH)	135 (76, 213)	\$ 89,243 (\$ 50,540, \$ 141,203)	\$ 455,277 (\$ 247,879, \$ 734,424)	0.68 (0.37, 1.12)	3.66 (1.98, 6.02)	- \$ 124,294/QALY (dominant, dominant)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองได้รับการคำนวณสำหรับสถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่จะควรจะเป็น (base-case scenario) (ความชุกเฉลี่ยทั้งปียู่ที่ 2% ในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่และ 70% ของลูกค้าได้รับวัคซีน). สถานการณ์ที่ดีที่สุด (best-case scenario) (ความชุกเฉลี่ยทั้งปียู่ที่ 0.1% ในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ และ 90% ของลูกค้าร้านอาหารได้รับวัคซีน). สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (worst-case scenario) (ความชุกเฉลี่ยทั้งปียู่ที่ 3% ในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ และไม่มีลูกค้ารายใดที่ได้รับวัคซีน)

อัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไปเป็นลบ (Negative ICERs) ในตารางนี้หมายถึงสถานการณ์ที่ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย (cost-saving scenario) ซึ่งหมายความว่าค่าเงินการแทรกแซงเพื่อเปรียบเทียบ (comparator intervention) ทำให้สามารถประหยัดเงินและปรับปรุงอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไปด้านสุขภาพ (health ICER incremental cost-effectiveness ratio) ปีสุขภาวะ (QALY quality adjusted life year) และอัตราการแลกเปลี่ยนถ่ายเทอากาศต่อชั่วโมง (ACH air changes per hour)

^a ปีสุขภาวะ (Quality-adjusted life years) ซึ่งเท่ากับผลคูณจำนวนปีของการมีชีวิตที่ได้รับและคะแนนคุณภาพชีวิตที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพ

^b อัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไป (incremental cost-effectiveness ratio หรือ ICER) เท่ากับต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นหารด้วยจำนวนปีสุขภาวะที่ได้รับเพิ่มขึ้น

^c อัตราการแลกเปลี่ยนถ่ายเทอากาศต่อชั่วโมง (Air exchanges per hour) ในการทำซ้ำ ๆ กัน (iteration) ในการจำลองครั้งนี้เราใช้อัตราที่ 0.8 เป็นค่าพื้นฐาน (baseline)

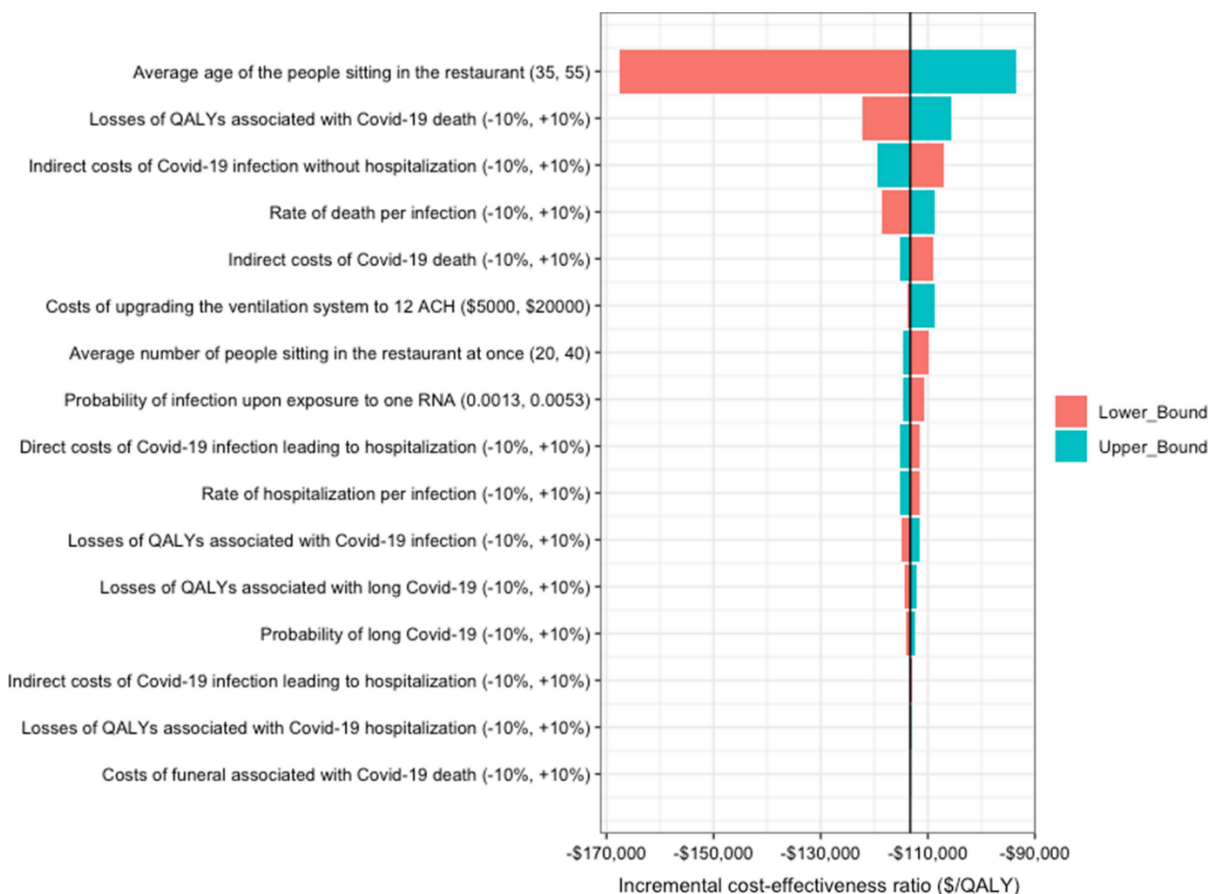
สถานการณ์ที่ดีที่สุด (best-case scenario)

(ความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารตั้งอยู่ที่อัตรา 0.1% และ 90% ของลูกค้าร้านอาหารได้รับวัคซีนครบถ้วน) สถานการณ์นี้สะท้อนถึงสภาพเงื่อนไขที่ดีกว่าที่สังเกตเห็นในกรณีของประเทศสหรัฐอเมริกาสำหรับการแพร่ระบาด ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2564 อยู่มาก สถานการณ์นี้สัมพันธ์กับการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายเป็นจำนวน 2,003 ดอลลาร์สหรัฐ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%: - \$881, \$5968) และจำนวนปีสุขภาวะที่ได้รับเท่ากับ 0.05 (ช่วงความเชื่อมั่น 95%: 0.03, 0.09)

สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (worst-case scenario)

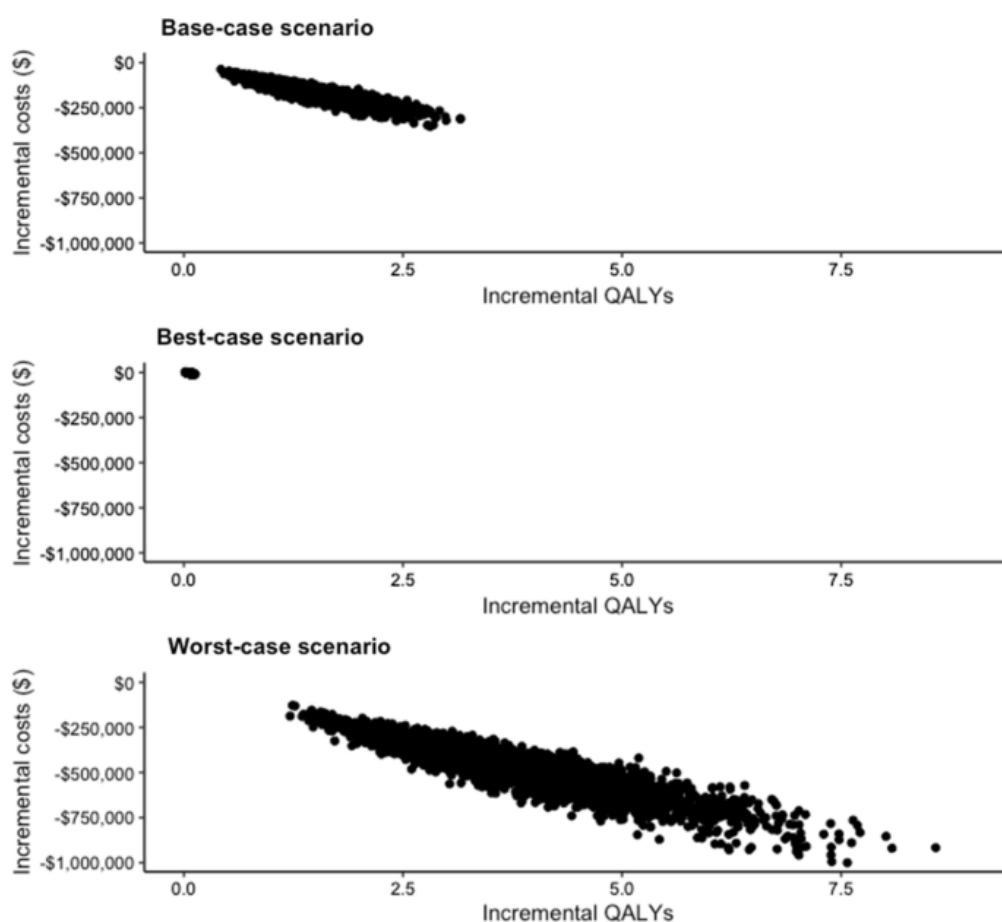
(ความชุกของโรคในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารตั้งอยู่ที่อัตรา 3% และไม่มีลูกค้ารายได้ของร้านอาหารที่ได้รับวัคซีนครบเต็ม ในสถานการณ์นี้การปรับปรุงอัตราการถ่ายเทระบายอากาศในห้องเป็น 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) สัมพันธ์กันกับการติดเชื้อที่หลีกเลี่ยงได้จำนวน 135 ครั้ง (ช่วงความเชื่อมั่น 95%: 76, 213) การประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายจำนวน 455,277 ดอลลาร์สหรัฐ (ช่วงความเชื่อมั่น 95%: \$247,879, \$734,424) และจำนวนปีสุขภาวะที่ได้รับเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.66 (ช่วงความเชื่อมั่น 95%: 1.98, 6.02)

ภาพประกอบที่ 1 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความไวชนิดทางเดียว (one-way sensitivity analyses). ในการวิเคราะห์ความไว ทุกครั้งการปรับปรุงอัตราการถ่ายเทระบายอากาศในห้องเป็นการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย (กลยุทธ์วิธีการที่โดดเด่น) ในสถานการณ์ที่เป็นไปอย่าง ปกติอย่างที่เราจะเป็น (base-case scenario) ซึ่งหมายถึงว่าระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวเองสามารถลดการติดเชื้อ ทางอากาศ เพิ่มจำนวนปีสุขภาวะ (QALYs) ที่ได้รับ และส่งผลให้เกิดการประหยัดสำหรับกิจการเชิงพาณิชย์.



การวิเคราะห์ความไวชนิดทางเดียว (tornado diagram) สำหรับพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าสำคัญ ๆ (core input parameter) แต่ละตัวของแบบจำลอง. ช่วงพิสัยของแต่ละค่า หมายถึงอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไป (incremental cost-effectiveness ratio - ICER) ที่สัมพันธ์กับพารามิเตอร์ป้อนเข้าที่เปลี่ยนแปลงต้นทุนแปรของแบบจำลอง (varying model input parameters) ในช่วงพิสัยของค่าต่าง ๆ ที่มีความเป็นไปได้สำหรับ สถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่เราจะเป็น (บริเวณพื้นที่ในร้านอาหารขนาด 1000 ตารางฟุต ความชุกของผู้ป่วยแพร่เชื้อที่อัตรา 2% อัตราการได้รับวัคซีนที่ 70% และการปรับปรุงการ ระบายถ่ายเทอากาศจาก 0.8 รอบต่อชั่วโมงเป็น 12 รอบต่อชั่วโมง). ปีสุขภาวะ (QALYs); อัตราการแลกเปลี่ยนถ่ายเทระบายอากาศต่อชั่วโมง (ACH). สังเกตว่าในการวิเคราะห์ความไวทุกครั้ง การปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศเป็น 12 รอบต่อชั่วโมง (12 ACH) ทำให้ประหยัดเงินและปรับปรุงภาวะสุขภาพให้ดีขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับ ประสิทธิภาพในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไปที่เป็นลบ (negative incremental cost-effectiveness ratios) บนแกนเอ็กซ์จึงสามารถแปลผล เป็นการลดลงของต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศสำหรับหนึ่งปีสุขภาวะที่ได้รับ. เราสนับสนุนให้ผู้อ่านใช้แบบจำลองออนไลน์เพื่อให้ได้รับผลผลิต จากแบบจำลอง (model outputs) ที่จำเพาะต่อสถานการณ์ที่ต้องการจะประเมิน.

ภาพประกอบที่ 2 แสดงการแจกแจงความน่าจะเป็น (probabilistic distribution) ของต้นทุนค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน และจำนวนปีสุขภาวะที่แตกต่างกันของการปรับปรุงอัตราการถ่ายเทระบายอากาศในห้องตลอดทั่วการจัดองชนิด Monte Carlo ทุกครั้ง สำหรับในสถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (base-case) และสถานการณ์ที่เลวร้ายมากที่สุด (worst-case) ในทุกครั้งของการจำลอง การปรับปรุงอัตราการถ่ายเทระบายอากาศส่งผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย และจำนวนปีสุขภาวะที่ได้รับ ภายใต้สถานการณ์ที่ดีที่สุด (best-case scenario) 89% ของการจำลองมีผลทำให้เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายและจำนวนปีสุขภาวะที่ได้รับ และช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับอัตราส่วนระหว่างต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับประสิทธิผลในรูปของปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นระหว่างทางเลือกตั้งแต่ 2 ทางขึ้นไป (incremental cost-effectiveness ratio - ICER) มีขอบเขตตั้งแต่การประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย (สำหรับการดำเนินการแทรกแซง (intervention)) ไปจนถึง 30,503 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อปีสุขภาวะ (น้อยกว่า 50,000 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อปีสุขภาวะที่ได้)



กราฟชนิด cost-effectiveness plane ที่แสดงถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับจำนวนปีสุขภาวะที่เพิ่มขึ้นสำหรับการปรับปรุงอัตราการถ่ายเทระบายอากาศของพื้นที่ตัวอย่าง ซึ่งเป็นร้านอาหารขนาดพื้นที่ 1000 ตารางฟุตให้มีอัตราการถ่ายเทแลกเปลี่ยนอากาศที่ 12 รอบต่อชั่วโมง สำหรับ: **A** สถานการณ์ที่เป็นไปอย่างปกติอย่างที่ควรจะเป็น (อัตราความชุกเฉลี่ยตลอดทั้งปีอยู่ที่ 2% ในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ และ 70% ของลูกค้าได้รับวัคซีน; **B** สถานการณ์ที่ดีที่สุด (อัตราความชุกเฉลี่ยตลอดทั้งปีอยู่ที่ 0.1% ในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ และ 90% ของลูกค้าร้านอาหาร

ได้รับวัคซีน); และ (C) สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (อัตราความชุกเฉลี่ยตลอดทั้งปีอยู่ที่ 3% ในชุมชนรอบ ๆ ที่ร้านอาหารแห่งนี้ตั้งอยู่ และไม่มีลูกค้ารายใดที่ได้รับวัคซีน). จุดต่าง ๆ ในกราฟนี้แสดง probabilistic runs ของ Monte Carlo simulation ที่มีการทำซ้ำ ๆ กัน 5000 ครั้ง. QALYs = quality-adjusted life years (จำนวนปีสุขภาพ) ที่มีการเปลี่ยนแปลง $ACH = \text{air changes per hour}$ (อัตราการถ่ายเทแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง).

การวิเคราะห์สถานการณ์สำหรับช่วงค่าความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ (airborne transmissibility values)

เนื่องจากว่าเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 สายพันธุ์ต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (เช่นจากสายพันธุ์เดลต้าไปสู่สายพันธุ์โอมิครอน BA.2) เราจึงได้ดำเนินการวิเคราะห์สถานการณ์เพื่อที่จะทดสอบความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) สำหรับค่าความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศต่าง ๆ กันของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 (โดยการเปลี่ยนความน่าจะเป็นของการติดเชื้อต่อการรับสัมผัสเชื้อไวรัสหนึ่ง PFU) เมื่อความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศถูกทำให้ลดลง 50% (สำหรับสายพันธุ์ที่มีอัตราการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศต่ำกว่า 50%) ระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง (standalone units) สัมพันธ์กับการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายจำนวน 74,327 ดอลลาร์สหรัฐฯ และการเพิ่มขึ้น 0.67 ของจำนวนปีสุขภาพ (QALYs) ที่ได้ เมื่อความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศถูกทำให้เพิ่มสูงขึ้น 50% (สำหรับสายพันธุ์ที่มีอัตราการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศสูงกว่า 50%) ระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวเองสัมพันธ์กับการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายจำนวน 230,557 ดอลลาร์สหรัฐฯ และการเพิ่มขึ้น 2.02 ของจำนวนปีสุขภาพ (QALYs) ที่ได้ แบบจำลองออนไลน์ของเราสามารถให้ผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ได้ ตามที่มีหลักฐานใหม่ ๆ เกิดขึ้น

การอภิปรายผลการวิจัย (Discussion)

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เราได้ประเมินความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของการปรับปรุงการระบายถ่ายเทอากาศภายในพื้นที่ร้านค้า โดยใช้ระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวเองที่มีแผ่นกรองชนิด HEPA เป็นวิธีการในการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ทางอากาศ เราได้สร้างแบบจำลองความน่าจะเป็น (probabilistic model) โดยการใช้การจำลองชนิด Monte Carlo เพื่อที่ว่าผลลัพธ์โดยเฉลี่ยของแบบจำลองมีส่วนสำหรับความไม่แน่นอน (uncertainties) และเป็นตัวแทนของช่วงการแปรผัน (ranges of variability) ที่แตกต่างกันของพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้า (model input parameters) และสมมุติฐานต่าง ๆ การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น (probabilistic analyses) ของเราแสดงให้เห็นว่าภายใต้ทุกสถานการณ์ แม้แต่เมื่อความชุกเฉลี่ยตลอดทั้งปีของผู้ป่วยแพร่เชื้อจะต่ำขนาด 0.1% และ 90% ของลูกค้าร้านอาหารได้รับวัคซีนครบเข็มแล้ว แต่กระนั้นก็ตามการปรับปรุงอัตราการระบายถ่ายเทอากาศของพื้นที่ภายในอาคารโดยใช้ระบบเครื่องกรองอากาศชนิดที่ทำงานได้ด้วยตัวเองก็必将ยังคงส่งผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายและจำนวนปีสุขภาพที่ได้ แบบจำลองของเรามีความแข็งแกร่งต่อการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงของข้อมูลป้อนเข้า (range of inputs) และสมมุติฐาน ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่านโยบายที่ออกคำสั่งให้มีการใช้ระบบเครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA จะเป็นการลดรอบคอบในสถานการณ์ส่วนใหญ่

มีผู้ศึกษาวิจัยเพิ่มมากขึ้นที่จำลองการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ที่ผ่านทางอนุภาคละอองลอยในพื้นที่ภายในอาคาร งานวิจัยชิ้นหนึ่งเมื่อเร็ว ๆ นี้บ่งบอกว่าการหายใจเข้ารับเอาอนุภาคของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ในรูปของละอองลอยได้รับการพิจารณาว่าเป็นต้นเหตุที่สำคัญของการแพร่กระจายเชื้อไวรัสในประชากรทั่ว ๆ ไป และงานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้แบบจำลองทางทฤษฎีในการวัดปริมาณของหมวกนิรภัย (safety cap) สำหรับจำนวนของผู้คนที่อยู่ในอาคาร และปริมาณเวลาที่พวกเขาควรจะอยู่ในบริเวณพื้นที่ภายในอาคารในการลดการแพร่กระจายเชื้อไวรัสทางอากาศ งานวิจัยชิ้นอื่น ๆ สนับสนุนการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 ผ่านทางละอองลอย และเสนอแนะว่าการระบายถ่ายเทอากาศภายในอาคารสามารถลดการติดเชื้อลงได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามความคุ้มค่าคุ้มทุน (cost-effectiveness) ของมาตรการเชิงป้องกันทางอากาศเช่นนั้นในบริเวณพื้นที่ภายในอาคารที่มีการระบายถ่ายเทอากาศไม่ดีก็ไม่เป็นที่ชัดเจน และขึ้นอยู่กับปัจจัยมากมายหลายอย่าง ปัจจัยเหล่านี้รวมถึงความชุกของโรคในชุมชน จำนวนของผู้คนที่อยู่ภายใน และระยะเวลาที่พวกเขาอยู่ในห้อง ขนาดของห้อง ตลอดจนสัดส่วนของผู้ที่ได้รับวัคซีนครบเข็มแล้ว แบบจำลองของเราสามารถให้มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองได้โดยผู้ใช้งานโดยใช้แอปพลิเคชันออนไลน์ที่มาพร้อมกันนี้: [\(https://openupuniversities.shinyapps.io/Airborne_Transmission_Covid19/\)](https://openupuniversities.shinyapps.io/Airborne_Transmission_Covid19/).

แบบจำลองการแพร่กระจายความเสี่ยงที่รองรับนี้เคยได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดมาแล้วก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของความสามารถในการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ หรือความน่าจะเป็นของการติดเชื้อสำหรับการสัมผัสกับเชื้อไวรัสหนึ่ง PFU จะต้องได้รับการปรับเปลี่ยนตามข้อมูลที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ จากเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 สายพันธุ์ที่โดดเด่นในขณะนี้ นอกจากนี้แล้วลักษณะทางเรขาคณิตของห้อง (room geometry) ความแตกต่างกันของอุณหภูมิ หรือการเคลื่อนไหวของผู้คนที่อยู่ในห้องก็สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเชื้อไวรัสในรูปของละอองลอยได้อย่างมากมาย

งานวิจัยของเรามีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ประการแรกเราจำลองอัตราการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลและอัตราการเสียชีวิต เฉพาะในฐานะที่เป็นฟังก์ชันของอายุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีแล้วอัตราการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลและอัตราการเสียชีวิตก็ยังเป็นฟังก์ชันของลักษณะเฉพาะอื่น ๆ ของผู้ป่วย เช่น เพศ เชื้อชาติ โรคร่วม และสถานะทางเศรษฐกิจและสังคมอีกด้วย เนื่องจากว่าเจตนารมณ์ในการวิเคราะห์ของเราคือการปรับปรุงการระบายถ่ายเทอากาศ ดังนั้นเราจึงจำลองเฉพาะแค่เพียงการติดเชื้อที่ผ่านทางหายใจเข้าที่รับเอาเชื้อไวรัสในรูปของละอองลอยในอากาศ ซึ่งอาจจะมีการสะสมอยู่ภายในอาคาร และเราไม่ได้จำลองการติดเชื้อที่ผ่านทางช่องทางอื่น ๆ เช่น การแพร่กระจายเชื้อจากการสัมผัสวัตถุสิ่งของที่มีเชื้อไวรัสติดอยู่ (fomite transmission) หรือการหายใจเข้ารับเอาละอองฝอยขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ที่เพิ่งถูกหายใจออกมาได้ไม่นาน นี่จะส่งผลให้เกิดการประมาณการการประหยัลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและจำนวนปีสุขภาพ (QALYs) ที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้แล้วการจำลองของเราที่ไม่ได้ให้ข้อมูลตลอดทั่วสายพันธุ์ต่าง ๆ กันของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 ผู้ใช้แบบจำลองออนไลน์ของเราจะต้องป้อนข้อมูลอัตราการแพร่กระจายเชื้อของสายพันธุ์ที่กำลังแพร่ระบาดอยู่ในขณะนั้น เพื่อที่จะประมาณการผลกระทบของระบบเครื่องกรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA ซึ่งสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง (standalone) เรายังได้ตั้งข้อสังเกตว่าโดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงว่าไม่ว่าการแพร่กระจายเชื้อผ่านทางละอองลอย (aerosol) หรือผ่านทางละอองฝอย (droplet) หรือผ่านทางสัมผัสวัตถุสิ่งของที่มีเชื้อไวรัสติดอยู่

(fomite) ช่องทางใดจะมีความโดดเด่น (dominant) หรือไม่ก็ตาม ผลลัพธ์ของแบบจำลองของเราที่ไม่ได้รับผลกระทบตาม

สรุปผลการวิจัย (Conclusions)

แม้แต่เมื่อไม่มีเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 อยู่ก็ตาม แต่ระบบการระบายถ่ายเทอากาศที่ไม่ดีในบริเวณพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์ก็ยังทำให้เกิดความเสี่ยงที่มีนัยสำคัญทางด้านสาธารณสุข ในขณะที่โรคโควิด-19 กำลังกลายเป็นโรคประจำถิ่น (endemic disease) และในขณะที่มีเชื้อโรคชนิดใหม่ ๆ อุบัติขึ้นมา จึงนับเป็นความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ สำหรับการระบายถ่ายเทอากาศของบริเวณพื้นที่กิจกรรมเชิงพาณิชย์แม้ว่าจะอยู่ในอาคารเก่าก็ตาม ในการนี้หน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลกฎระเบียบข้อบังคับจะต้องทำบางสิ่งที่ยาก ระหว่างการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ ที่อาจจะเป็นการเข้มงวดจนเกินไปในการอยู่รอดทางเศรษฐกิจสำหรับผู้ประกอบการธุรกิจร้านค้าขนาดเล็ก กับความปลอดภัยของลูกค้าของกิจการเหล่านั้น เราพบว่าระบบเหล่านี้สามารถซื้อได้ (affordable) สำหรับธุรกิจร้านค้าส่วนใหญ่จากจุดยืนของหน่วยงานภาครัฐที่มีหน้าที่กำกับดูแลกฎระเบียบข้อบังคับ นอกจากนี้แล้วในขณะที่มีการแข่งขันเพิ่มมากขึ้นสำหรับระบบเครื่องกรองอากาศแบบใหม่ ๆ ระบบเหล่านี้ก็มีแนวโน้มที่จะมีราคาต่ำลงและประสิทธิภาพสูงขึ้น