

กระดาษทำการของ NBER

ประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรองโควิด 19

Andrew Atkeson  
Michael C. Droste  
Michael Mina  
James H. Stock

กระดาษทำการ 28031  
<http://www.nber.org/papers/w28031>  
1

สำนักงานการวิจัยทางเศรษฐกิจแห่งชาติ  
1050 Massachusetts Avenue  
Cambridge, MA 02138  
ตุลาคม 2020

เราขอขอบคุณ Alan Auerbach, Daniel Larremore, Larry Summers และผู้เข้าร่วมการสัมมนาที่มหาวิทยาลัยจอนส์ฮอปกินส์ ธนาคารกลางบอสตัน และวิทยาลัยฮาร์วาร์ดเคนเนดี สำหรับการหารือรวมถึงข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ Droste และ Stock ทราบถึงการสนับสนุนการวิจัยภายใต้ NSF RAPID Grant SES-2032493 มุมมองที่น่าเสนอในที่นี้เป็นของผู้จัดทำ และไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับมุมมองของสำนักงานการวิจัยทางเศรษฐกิจแห่งชาติ

กระดาษทำการ NBER ได้เผยแพร่เพื่อการหารือและการเสนอแนะ ซึ่งไม่ได้ผ่านการพิจารณาโดยผู้มีความรู้ที่เท่าเทียมกันหรือต้องได้รับการตรวจสอบโดยคณะกรรมการของ NBER ที่จัดทำสิ่งพิมพ์อย่างเป็นทางการของ NBER

© 2020 โดย Andrew Atkeson, Michael C. Droste, Michael Mina และ James H. Stock สงวนลิขสิทธิ์ทุกประการ การอ้างอิงข้อความเป็นตอนสั้นๆ ความยาวไม่เกินสองย่อหน้า สามารถทำได้โดยไม่ต้องขอสัมัติอย่างชัดแจ้ง หากมีการระบุเครดิตอย่างครบถ้วนรวมถึงมีประกาศ © ยังแหล่งข้อมูล

ประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรองโควิด 19

Andrew Atkeson, Michael C. Droste, Michael Mina และ James H. Stock กระดาษ

ทำการของ NBER หมายเลข 28031

ตุลาคม 2020 JEL

No. E60,I10

## บทคัดย่อ

เราทำการประเมินถึงคุณค่าทางเศรษฐกิจของโครงการตรวจคัดกรองในฐานะนโยบายรับมือการระบาดใหญ่ของโรคโควิด 19 ซึ่งกำลังดำเนินอย่างต่อเนื่อง เราพบว่าโครงการตรวจคัดกรอง SARS-CoV-2 แบบเร็วนี้ให้ประโยชน์ทั้งด้านการเงิน เศรษฐศาสตร์มหัพภาค และด้านสุขภาพมากกว่าต้นทุนที่ใช้เป็นอย่างมาก โดยมีอัตราส่วนประโยชน์ทางเศรษฐกิจต่อต้นทุนโดยปกติอยู่ในช่วง 4-15 (ขึ้นอยู่กับรายละเอียดของโครงการ) และยังไม่รวมถึงมูลค่าที่ดีเป็นเงินได้อันเนื่องมาจากชีวิตมนุษย์ที่ปลอดภัย อย่างไรก็ตาม การตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียวให้ค่าบ่งบอกต่ำ นำไปสู่ข้อกังวลเกี่ยวกับการให้ความร่วมมือปฏิบัติตาม เว้นแต่การตรวจคัดกรองจะมีความเฉพาะเจาะจงอย่างมาก การตรวจเพื่อยืนยันผลจะช่วยเพิ่มประโยชน์สุทธิทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรอง โดยช่วยลดจำนวนพนักงานที่มีสุขภาพดีแต่ต้องกักตัว และยังเพิ่มการให้ความร่วมมือปฏิบัติตามมาตรการกักตัวอีกด้วย การวิเคราะห์ใช้โมเดล SIR ทางพฤติกรรมสำหรับประเทศสหรัฐอเมริกาใน 5 กลุ่มอายุ 66 เซกเตอร์เศรษฐกิจ มีการตรวจคัดกรองและวินิจฉัย และได้รับความร่วมมือบางส่วนในการปฏิบัติตามคำแนะนำเกี่ยวกับการกักตัวผู้มีความเสี่ยงหรือการกักตัวผู้ป่วย

## 1. บทนำ

งานวิจัยด้านเศรษฐกิจซึ่งขณะนี้มีความจำเป็นมากได้สรุปว่าความถดถอยของกิจกรรมทางเศรษฐกิจอันเนื่องมาจากการระบาดใหญ่ SARS-CoV-2 เป็นผลสืบเนื่องของพฤติกรรมปกป้องตนเอง<sup>1</sup> ความหมายโดยนัยคือ ในการฟื้นฟูอย่างเข้มแข็งในระหว่างที่ยังไม่ได้รับวัคซีน ผู้บริโภคจะต้องรู้สึกปลอดภัยในการซื้อสินค้า พนักงานจะต้องรู้สึกปลอดภัยในการกลับไปทำงาน และผู้ประกอบการจะต้องรู้สึกปลอดภัยในการส่งบุตรหลานกลับไปยังโรงเรียน แผนนโยบายสาธารณสุขซึ่งได้พยายามดำเนินการในสหรัฐอเมริกาจนถึงขณะนี้ ทั้งการล็อกดาวน์ สวมหน้ากาก เว้นระยะห่างทางสังคม ความปลอดภัยในที่ทำงาน ปกป้องผู้สูงอายุ เป็นต้น ต่างล้มเหลวในการยับยั้งไวรัส และไม่ช่วยให้มีการฟื้นตัวทางเศรษฐกิจที่ชัดเจน

แต่ยังมีเครื่องมือสาธารณสุขอีกอย่างหนึ่งที่ยังไม่ได้นำมาใช้เพื่อยับยั้งไวรัส นั่นคือการตรวจคัดกรองในวงกว้าง การตรวจคัดกรองอย่างได้ผลสามารถช่วยควบคุมไวรัสด้วยการตรวจหาและกักตัวผู้ที่แพร่เชื้อได้ ทั้งที่ไม่แสดงอาการ แสดงอาการเล็กน้อย หรืออยู่ในระยะก่อนแสดงอาการ การพัฒนาและปรับใช้วิธีการตรวจคัดกรองแบบเร็วซึ่งมีต้นทุนต่ำได้รับการสนับสนุนตั้งแต่ช่วงแรกของการระบาดใหญ่ โปรดดูข้อมูลจาก Gottlieb และคณะ (2020) สมาคมผู้ว่าราชการแห่งชาติ (2020), คณะกรรมการการประชุม (2020), Romer (2020), สถาบันรอกกีเฟลเลอร์ (2020), Silcox และคณะ (2020) รวมถึง Kotlikoff และ Mina (2020) เป็นต้น ขณะที่กำลังการผลิตชุดตรวจ SARS-CoV-2 ด้วยวิธี PCR ในห้องปฏิบัติการมาตรฐานได้เพิ่มสูงขึ้น แต่ต้นทุนระยะเวลารอผล และการจัดเตรียมการตรวจ PCR ให้พร้อมเพื่อวัตถุประสงค์ในการวินิจฉัย ล้วนเป็นสิ่งที่จำกัดความสามารถในขยายการตรวจด้วยวิธี PCR เพื่อทำการตรวจคัดกรองเป็นวงกว้าง แต่การตรวจวิธีใหม่ซึ่งมีต้นทุนต่ำและเวลารอผลสั้นมีศักยภาพในการใช้งานเป็นวงกว้าง อย่างไรก็ตาม การตรวจเหล่านี้มีความไวและความจำเพาะน้อยกว่าการตรวจด้วยวิธี PCR ในห้องปฏิบัติการ บทบรรณาธิการใน *Journal of Clinical Microbiology*, Pettengill and McAdam (2020) ได้ชี้ข้อกังวลว่าความจำเพาะต่ำ (กล่าวคือ มีอัตราผลบวกสูง) ได้ทำให้ความน่าเชื่อถือของโครงการตรวจคัดกรองลดลง จึงทำให้ได้รับความร่วมมือน้อยลงในการปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวเมื่อได้รับผลบวก แม้จะได้รับความร่วมมือเพียงบางส่วนในการปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวผู้มีความเสี่ยงและผู้ป่วย แต่ความจำเพาะที่ต่ำก็ส่งผลจัดตั้งเศรษฐกิจเนื่องจากพนักงานที่มีสุขภาพดีจำนวนมากต้องทำการกักตัว Pettengill และ McAdam (2020) ยังระบุว่าความไม่สมบูรณ์แบบเนื่องจากความไวที่ต่ำทำให้ไม่สามารถระบุผู้ที่ติดเชื้อบางคนได้ ข้อกังวลเหล่านี้ก่อให้เกิดคำถามเกี่ยวกับประโยชน์ในด้านสาธารณสุขและเศรษฐกิจในการใช้วิธีตรวจคัดกรองที่ไม่สมบูรณ์แบบ

เอกสารฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจระดับมหัพภาค สำหรับโครงการในสหรัฐอเมริกาตามสมมติฐานของการใช้การตรวจคัดกรองที่ไม่สมบูรณ์แบบและได้รับความร่วมมือปฏิบัติตามเพียงบางส่วน เราได้ขยายโมเดล SIR ทางพฤติกรรมใน Baqaee, Farhi, Mina และ Stock (2020b) (BFMS) เพื่อให้ครอบคลุมแผนการตรวจเพื่อวินิจฉัยและเพื่อคัดกรอง และได้รับความร่วมมือบางส่วนในการกักตัวเอง การแพร่ระบาดของไวรัสขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ในทางตรงข้าม กิจกรรมทางเศรษฐกิจก็ขึ้นอยู่กับภาระและแนวโน้มของไวรัส โมเดลนี้ช่วยให้เราสามารถระบุลักษณะเฉพาะว่าแผนการตรวจรูปแบบหนึ่งจะส่งผลอย่างไรต่อพลวัตร่วมของการแพร่ของโรคและกิจกรรมทางเศรษฐกิจ

---

<sup>1</sup> โปรดดู Arnon และคณะ (2020), Goolsbee และ Syverson (2020), Chetty และคณะ (2020) และ Gupta, Simon และ Wing (2020) และสิ่งตีพิมพ์อ้างอิงถึงในผลงานเหล่านั้น

ประสิทธิภาพของโครงการตรวจคัดกรองขึ้นอยู่กับว่าผู้ที่มีผลบวกปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวเองหรือไม่ เมื่อใช้ข้อมูลการสำรวจจากสหราชอาณาจักร ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคมปี 2020 โดย Smith และคณะ (2020) พบว่าผู้ที่รายงานถึงอาการของโควิดเพียง 18% เท่านั้นที่รายงานว่าได้กักตัวเอง ในกลุ่มของผู้ที่ระบบบริการสุขภาพแห่งชาติระบุว่ามีการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับเคสโควิด 19 ที่ยืนยันแล้ว มีเพียง 11% เท่านั้นที่รายงานว่าได้กักตัวเป็นเวลา 14 วันตามคำแนะนำ สิ่งที่ค้นพบเหล่านี้ชี้ว่าจะไม่มีการปฏิบัติตามคำแนะนำมากนักหากได้รับสัญญาณบ่งบอกอื่นๆ ที่มีระดับของสาระต่ำ ว่าบุคคลนั้นๆ ติดเชื้อจริงหรือไม่ โดยเฉพาะเมื่อค่าทำนายผลบวก (PPV)<sup>2</sup> ต่ำ เราจึงได้ให้อัตราความร่วมมือปฏิบัติตามขึ้นอยู่กับความจำเพาะของการตรวจคัดกรอง

ตารางที่ 1 แสดงผลลัพธ์สำหรับโครงการตรวจซึ่งเป็นตัวแทนสามรูปแบบ โครงการเหล่านี้ได้รับปรับเทียบให้สอดคล้องกับการตรวจที่มีอยู่เดิมหรือที่มีการนำเสนอ และได้รับการออกแบบให้เป็นตัวแทนของโครงการที่อาจนำมาใช้โดยได้รับทรัพยากรและการสนับสนุนอย่างเพียงพอ ในการพิจารณาต้นทุนและประโยชน์ เราถือว่าการตรวจส่วนเพิ่มได้รับทุนจากรัฐ

แผนภูมิ A พิจารณาถึงการตรวจคัดกรองซึ่งมีต้นทุน 5 ดอลลาร์ ความไว 97.1% และความจำเพาะ 98.5%<sup>3</sup> ซึ่งครึ่งหนึ่งของผู้ที่ได้รับผลบวกจากการตรวจคัดกรองจะเข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลซึ่งมีต้นทุน 50 ดอลลาร์ ระยะเวลารอผลเฉลี่ย 48 ชั่วโมง เราถือว่าผู้ที่ได้รับผลตรวจ PCR เป็นบวกให้ความร่วมมือสูง (75%) และผู้ที่ได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวกแต่ไม่เข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลให้ความร่วมมือต่ำ (25%) ในการตรวจคัดกรองประชากรแบบสุ่มด้วยความถี่สัปดาห์ละครั้ง ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นรวมของโครงการดังกล่าวคือ 51,000 ล้านดอลลาร์ ในระยะเวลาของการจำลองตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 ธันวาคม 2020 เมื่อใช้โมเดลระบาดวิทยา-เศรษฐศาสตร์ของเรา เราคาดว่าจะสามารถป้องกันการเสียชีวิตได้ 65,000 ราย ช่วยเพิ่ม GDP ได้ 244,000 ล้านดอลลาร์ และเพิ่มรายได้จากภาษีสำหรับรัฐ 67,000 ล้านดอลลาร์ตลอดระยะเวลาของโครงการหากดำเนินการจริง ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 ธันวาคม 2020 เมื่อเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานคือมีการวินิจฉัยแต่ไม่มีการตรวจคัดกรอง

แผนภูมิ B ในตารางที่ 1 ได้ปรับเปลี่ยนโครงการตรวจคัดกรองนี้โดยให้ทุกคนที่ได้รับผลตรวจเป็นบวกในการตรวจคัดกรองเข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล หากทำการตรวจสัปดาห์ละครั้ง จะทำให้ต้องทำการตรวจ PCR เพิ่มขึ้นประมาณ 630,000 ครั้งต่อวัน เมื่อเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานคือไม่มีการตรวจคัดกรอง ต้นทุนในการตรวจจะสูงกว่าอยู่บ้าง แต่เนื่องจากอัตราความร่วมมือประสิทธิภาพเมื่อใช้โครงการนี้สูงกว่าในแผนภูมิ A การป้องกันการเสียชีวิตจึงเพิ่มขึ้นเป็น 152,000 ราย และการเพิ่มของ GDP เพิ่มขึ้นเป็น 541,000 ล้านดอลลาร์เมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์

---

<sup>2</sup> ค่าทำนายผลบวกคือความน่าจะเป็นที่จะติดเชื้อจริงจากผลตรวจบวกทั้งหมด ตามกฎของ Bayes ค่า PPV จะขึ้นอยู่กับความจำเพาะและความไวของการตรวจ รวมไปถึงอัตราประชากรผู้ติดเชื้อ

<sup>3</sup> อัตราต้นทุนและความแม่นยำเป็นของชุดตรวจแอนติเจน BinaxNOW™ ของ Abbott Laboratories (FDA (2020)) ค่าประมาณการเพิ่มเติมของประสิทธิภาพและต้นทุนของการตรวจมืออยู่ในตารางที่ 2 ของ Silcox และคณะ (2020)



**ตารางที่ 1 ผลกระทบทางเศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิตของโครงการตรวจคัดกรองสามรูปแบบ**

ความถี่ในการตรวจ (วัน)	ต้นทุนในการตรวจ เพิ่มเติม (พันล้าน ดอลลาร์)	GDP เพิ่มขึ้น (พันล้าน ดอลลาร์)	รายได้ของรัฐเพิ่มขึ้น (พันล้านดอลลาร์)	ป้องกันการเสียชีวิต (พันราย)
<i>A. ความจำเพาะ 98.5% ยืนยันด้วย PCR 50% ให้ความร่วมมือตามผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว 25%</i>				
30	12	67	18	16
14	26	142	40	36
7	50	244	67	65
4	88	333	92	94
<i>B. ความจำเพาะ 98.5% ทั้งหมดยืนยันด้วย PCR ให้ความร่วมมือตามผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว 25%</i>				
30	13	262	72	65
14	27	426	117	111
7	55	541	149	152
4	97	593	163	172
<i>C ความจำเพาะ 99.7% สองชั้น ไม่มีการยืนยันด้วย PCR ให้ความร่วมมือตามผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว 50%</i>				
30	7	193	53	50
14	14	305	84	83
7	28	395	108	117
4	50	429	118	139

หมายเหตุ: การจำลองกรณีที่ไม่ได้ดำเนินการจริงได้เสนอว่าเริ่มโครงการตรวจในวันที่ 1 มิถุนายน 2020 การจำลองดังกล่าวสิ้นสุดในวันที่ 31 ธันวาคม 2020 รายการข้อมูลต่างๆ จะเปรียบเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งทำการตรวจเพื่อวินิจฉัยด้วยอัตราเทียบเท่าช่วงฤดูร้อนของปี 2020 โดยไม่มีการตรวจคัดกรอง จำนวนผู้เสียชีวิตนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2021 และมูลค่าที่ดีเป็นเงินได้เป็นดอลลาร์ในปัจจุบันในช่วงวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 ธันวาคม 2020

แผนภูมิ C จะพิจารณาโครงการตรวจคัดกรองรูปแบบต่างๆ โดยมีการตรวจสองขั้นตอน มีความจำเพาะจากการรวมสองขั้นตอน 99.7% เพื่อให้เข้าใจอย่างชัดเจน วิธีหนึ่งในการได้ค่าความจำเพาะดังกล่าวคือการตรวจแอนติเจนแบบเร็วสองขั้นตอนอย่างเป็นอิสระ ตามการหาหรือของ Mina, Parker และ Larremore (2020) ขั้นตอนแรกใช้ชุดตรวจราคา 2 ดอลลาร์ซึ่งมีความจำเพาะต่ำ (80%) เช่น ชุดตรวจแอนติเจนแบบแถบกระดาษ ซึ่งเป็นกระดาษตรวจตามสมมติฐานที่มีต้นทุนต่ำ หากได้ผลตรวจเป็นบวก จะใช้วิธีตรวจยืนยันที่มีราคา 5 ดอลลาร์ ซึ่งมีความจำเพาะ 98.5% ดังในแผนภูมิ A และ B<sup>4</sup> โดยไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล เราสันนิษฐานว่าความจำเพาะ 99.7% จะทำให้มีอัตราการให้ความร่วมมือ 50% ต้นทุนในการตรวจที่เพิ่มขึ้นภายใต้โครงการนี้ต่ำกว่าโครงการ A หรือ B ส่วนหนึ่งเป็นเพราะมีเวลารอผลสั้น จึงสามารถป้องกันการเสียชีวิตได้ 117,000 ราย และเพิ่ม GDP ได้ 395,000 ล้านดอลลาร์เมื่อใช้ความถี่ในการตรวจรายสัปดาห์ แม้ว่าน่าจะมีการให้ความร่วมมือน้อยกว่าแบบแผนที่ใช้วิธี PCR ก็ตาม

---

<sup>4</sup> การวิเคราะห์ห่อภิมาณของชุดตรวจแอนติเจนไข้วัดใหญ่มีความจำเพาะประมาณ 98.2% (Chartrand และคณะ (2012)) และ 98.4% (Antoniol และคณะ (2018)) โปรดดู Pettengill และ McAdam (2020)) ความจำเพาะเหล่านี้ใกล้เคียงกับความจำเพาะ 98.5% ของชุดตรวจ BinaxNOW™ เมื่อพิจารณาดังนั้น ความจำเพาะ 80% สำหรับการตรวจขั้นแรกจึงเป็นการคาดการณ์ที่ระมัดระวัง

ผลลัพธ์เหล่านี้และการวิเคราะห์ความไวเพิ่มเติมที่ด้านล่างได้นำเราไปสู่ข้อสรุปสำคัญสี่ประการ

ประการแรก แม้จะมีการให้ความร่วมมือเพียงบางส่วน แต่การตรวจคัดกรองจะให้ประโยชน์สุทธิทางเศรษฐกิจอย่างมาก สำหรับตารางที่ 1 ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสูงกว่าต้นทุน 5-10 เท่าเมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ หากรัฐบาลกลางเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการตรวจทั้งหมด รายได้จากภาษีที่เพิ่มขึ้นจากการเติบโตของ GDP ที่เกิดขึ้นจะถือว่าคุ้มค่าอย่างมากเมื่อเทียบกับต้นทุนในการตรวจ ประโยชน์สุทธิจะยิ่งเพิ่มขึ้นหากพิจารณามูลค่าเป็นเงินจากการป้องกันการเสียชีวิตโดยใช้มูลค่าของชีวิตในทางสถิติ

ประการที่สอง การตรวจคัดกรองที่ให้ผลบวกเพียงครั้งเดียวให้ค่าบ่งบอกต่ำ ซึ่งในการจำลองของเรา PPV โดยปกติจะต่ำกว่า 5% สำหรับการตรวจที่มีความจำเพาะ 98.5% ค่าบ่งบอกที่ต่ำเช่นนี้อาจทำให้ได้รับความร่วมมือน้อย และเกิดผลกระทบทางเศรษฐกิจในกลุ่มผู้ที่ให้ความร่วมมือ เนื่องจากพนักงานที่มีสุขภาพดีต้องกักตัวเอง การใช้วิธีตรวจยืนยันผลในแผน จะช่วยเพิ่มค่าบ่งบอก จึงช่วยลดการกักตัวที่ไม่จำเป็น และอาจนำไปสู่การให้ความร่วมมือมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประโยชน์สุทธิในที่สุด

ประการที่สาม ความไวของการตรวจคัดกรองไม่ใช่สิ่งที่สำคัญที่สุด ซึ่งสิ่งที่ค้นพบนี้สอดคล้องกับการศึกษาจำนวนหนึ่ง เช่น Larremore และคณะ (2020) และ Paltiel, Zheng และ Walensky (2020) ตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ในตารางที่ 1 มีความคล้อยคลึงอย่างมากหากความไวของการตรวจคัดกรองลดลงจาก 97.1% เหลือเพียง 85% ซึ่งแม้ความไวจะมีเพียง 85% ก็สามารถระบุผู้ติดเชื้อส่วนใหญ่ได้ และทำการกักตัวหากพวกเขาให้ความร่วมมือ

ประการที่สี่ เราพบว่าการตรวจโดยมุ่งเป้าผู้ใหญ่ที่มีอายุน้อยและวัยกลางคน ช่วยให้ได้รับผลที่ดีขึ้นทั้งในด้านเศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิต โดยใช้จำนวนการตรวจคัดกรองคงที่ แม้การมุ่งเป้าการตรวจไปยังกลุ่มอายุเหล่านี้จะทำให้กิจกรรมลดลงเนื่องจากพนักงานต้องเข้ารับการกักตัว แต่จะช่วยตัดวงจรการแพร่ระบาดไปยังกลุ่มผู้สูงอายุได้

โมเดลนี้ได้สรุปไว้ในหมวด 2 หมวด 3 จะแสดงผลจากการตรวจอย่างสม่ำเสมอ และจะพิจารณาการตรวจอิงกลุ่มอายุในหมวด 4

**สิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง** เอกสารนี้มีความเกี่ยวข้องกับสิ่งตีพิมพ์ฉบับหนึ่งที่ยังคงมีการเพิ่มเติมข้อมูล ซึ่งทำการสังเคราะห์โมเดลระบาดวิทยาสำหรับพลวัตของการแพร่เชื้อต่อเศรษฐศาสตร์มหัพภาค<sup>5</sup> และบางส่วนมีการพิจารณาถึงการตรวจและการกักตัวผู้มีความเสี่ยง Berger, Herkenhoff และ Mongey (2020) ได้พิจารณาผลของการตรวจและ



<sup>5</sup> จุดมุ่งหมายเริ่มแรกของสิ่งตีพิมพ์นี้เกี่ยวข้องกับผลทางเศรษฐศาสตร์มหัพภาคและระบาดวิทยาของนโยบายการล็อกดาวน์และการกลับมาดำเนินกิจกรรมตามปกติอีกครั้ง Eichenbaum, Rebelo, Trabandt (2020a) ได้พัฒนาโมเดลเศรษฐศาสตร์มหัพภาคใหม่ของเคนส์ด้วยโมเดลแบบ SIR สำหรับการแพร่ของโรค โดยกำหนดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการบริโภค/การตัดสินใจเกี่ยวกับอุปทานแรงงานและการแพร่ของโรค รวมถึงศึกษาผลของนโยบายล็อกดาวน์อย่างง่าย Acemoglu, Chernozhukov, Werning และ Whinston (2020) ได้ศึกษาโมเดล SIR แบบหลายกลุ่ม ซึ่งการติดเชื้อ การเข้ารับรักษาในสถานพยาบาล และอัตราการเสียชีวิตมีความแปรผันระหว่างกลุ่มต่างๆ และกำหนดลักษณะของนโยบายล็อกดาวน์โดยปรับช่วงอายุที่เหมาะสมที่สุด สิ่งตีพิมพ์นี้ได้ขยายขอบเขตให้รวมถึงการเข้าควบคุมที่ไม่ใช่วิธีทางเภสัชศาสตร์ โปรดดูที่ Baqaee, Farhi, Mina และ Stock (2020a) สำหรับข้อมูลอ้างอิงเพิ่มเติม โปรดดูที่ BFMS (2020b)

การกักตัวผู้มีความเสี่ยงในโมเดล SIR โดยใช้การตรวจที่สมบูรณ์แบบครั้งเดียวและได้รับความร่วมมือที่ไม่สมบูรณ์แบบในการกักตัว ผู้จัดทำได้แสดงให้เห็นว่าการตรวจสามารถลดความเข้มงวดของการล็อกดาวน์ที่จำเป็นเพื่อให้ได้ผลในการลดการระบาดของโรคในระดับต้องการ Cherif และ Hasanov (2020) ได้ศึกษาถึงต้นทุนและผลตอบแทนของกลยุทธ์ตรวจและกักตัวในโมเดล SIR โดยให้ความสำคัญเป็นพิเศษต่อกลยุทธ์การตรวจอย่าง 'ชาญฉลาด' ซึ่งใช้ประโยชน์จากความไม่สม่ำเสมอเชิงระยะทางของความชุกของโรคและความหนาแน่นของประชากร Brotherhood, Kircher, Santos และ Tertilt (2020) รวมถึง Eichenbaum, Rebelo และ Trabandt (2020b) ได้พิจารณาการตรวจเพื่อวินิจฉัยและการกักตัวโดยปรับช่วงอายุ ซึ่งในทั้งสองโมเดล บทบาทส่วนใหญ่ของการตรวจคือการแก้ไขความไม่เชื่อมั่นของบุคคลเกี่ยวกับสถานะการติดเชื้อเอกสารอื่นๆ ที่มุ่งเน้นการตรวจ การติดตามการติดต่อ หรือการกักตัวผู้มีความเสี่ยง ได้แก่ Acemoglu, Makhdoumi, Malekian และ Ozdaglar (2020), Augenblick, Obermeyer, Kolstad และ Wang (2020), BMFS (2020b), Gans (2020) และ Piguillem และ Shi (2020) เอกสารที่มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดในสิ่งตีพิมพ์ด้านระบาดวิทยาของ Paltiel, Zheng และ Walensky (2020) ซึ่งพิจารณาการตรวจโควิดในวิทยาลัยและรวมถึงใช้จ่ายในการตรวจและจัดหาที่พักสำหรับผู้กักตัว และโปรดดูเอกสารอื่นๆ เช่น Larremore และคณะ (2020), Taiaple, Romer และ Linnarsson (2020) รวมถึง Peto และคณะ (2020)

เมื่อเทียบกับสิ่งตีพิมพ์ฉบับนี้ ส่วนร่วมที่สำคัญของเราคือการเสนอโมเดลที่ได้รับการปรับเทียบและประมาณค่าอย่างระมัดระวัง เพื่อประเมินประโยชน์สุทธิทางเศรษฐกิจ การเงิน และประโยชน์โดยรวม (รวมถึงอัตราการเสียชีวิต) ของการตรวจคัดกรองที่ไม่สมบูรณ์แบบหลายขั้นตอนรวมกับการตรวจเพื่อวินิจฉัย เมื่อรวมโมเดลทางเศรษฐกิจ 66 เชกเตอร์เข้ากับโมเดล SIR เชิงพฤติกรรมหากลุ่มอายุ เราสามารถพิจารณาผลกระทบเชิงกลุ่มอายุและผลของการกักตัวชั่วคราวต่อการจ้างงานและผลผลิตได้

## 2. โมเดล SIR เชิงพฤติกรรม โดยมีการตรวจเพื่อคัดกรองและวินิจฉัย

จุดเริ่มต้นของเราคือโมเดล SIR เชิงพฤติกรรม BFMS ซึ่งเชื่อมโยงโมเดล SIR ของการแพร่ของโรคเข้ากับกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ซึ่งโมเดล BFMS นี้มีหากลุ่มอายุ (อายุ 0-19, 20-44, 45- 64, 65-74 และ 75 ปีขึ้นไป) และเชกเตอร์ธุรกิจเอกชน 66 กลุ่ม และรัฐบาล เมทริกซ์การสัมผัสก่อนการระบาดมาจากประมาณการของ POLYMOD (Mossong และคณะ (2017)) สำหรับที่ทำงาน บ้าน และกิจกรรมอื่นๆ เมทริกซ์การสัมผัสในที่ทำงานจะแปรผันตามเชกเตอร์ธุรกิจ ขึ้นอยู่กับระยะห่างของพนักงานในเชกเตอร์ (Mongey, Pilossoph และ Weinberg (2020)) แง่มุมทางพฤติกรรมของโมเดลนี้ได้มาจากกฎการป้อนกลับสำหรับกิจกรรม ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเสียชีวิตรายสัปดาห์ในปัจจุบันและความชันของเส้นกราฟอัตราการเสียชีวิตรายสัปดาห์ นอกจากนี้ กฎเชิงพฤติกรรมมีองค์ประกอบความล่าช้าของการล็อกดาวน์ ซึ่งอัตราการว่างงานสูงและอัตราการว่างงานสะสมในอดีต (โดยที่ปัจจัยอื่นๆ เท่ากัน) ส่งผลต่อความปรารถนาที่จะกลับมาดำเนินกิจกรรมต่อ พารามิเตอร์ทางระบาดวิทยา เช่น อัตราการเสียชีวิตอิงกลุ่มอายุ นำมาจากสิ่งตีพิมพ์ด้านระบาดวิทยาจาก CDC และสำหรับอัตราการแพร่และอัตราการติดเชื้อเริ่มแรกจะประมาณค่าจากข้อมูลการเสียชีวิตรายวันของสหรัฐอเมริกา สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดูที่ ภาคผนวก 1 และ BFMS

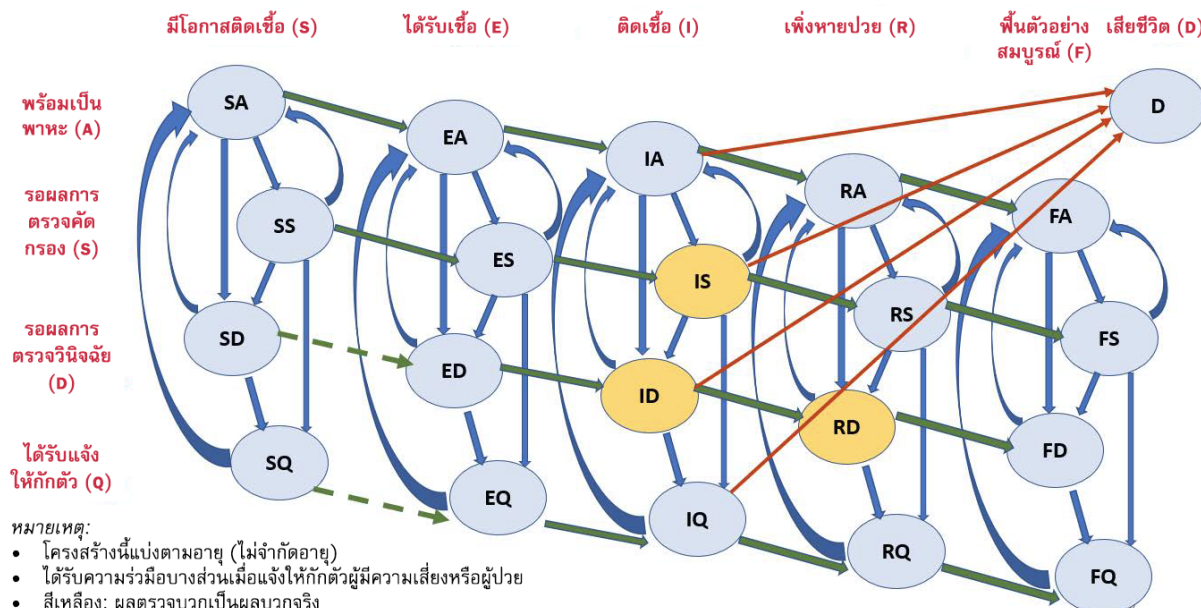
## 2.1 การขยายขอบเขตการตรวจเพื่อคัดกรองและเพื่อวินิจฉัย

T เอกสารฉบับนี้ได้ขยายขอบเขตของโมเดล BFMS เพื่อให้ครอบคลุมการตรวจเพื่อคัดกรองและเพื่อวินิจฉัย โดยชัดเจน และได้รับความร่วมมือบางส่วน องค์กรประกอบสำคัญของการขยายขอบเขตดังกล่าวได้แก่

1. บุคคลได้รับเลือกโดยสุ่ม โดยมีอัตราการตรวจคัดกรองรายวัน  $\mu$
2. ส่วนหนึ่ง  $V$  ของผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกในการตรวจคัดกรองจะเข้ารับการตรวจวินิจฉัย (PCR) เพื่อยืนยันผล ส่วนที่เหลือ  $1-V$  ของผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกได้รับคำแนะนำให้กักตัวเอง
3. ผู้ที่แสดงอาการสามารถรับการตรวจเพื่อวินิจฉัยได้
4. ผู้ที่รอผลตรวจวินิจฉัยได้รับคำแนะนำให้กักตัวเอง
5. กลุ่มผู้กักตัวประกอบด้วยผู้ที่ได้รับผลตรวจเป็นบวกซึ่ง “เป็นที่ยุติ” ซึ่งได้แก่ ผลตรวจเป็นบวกจากการตรวจ PCR ในกลุ่มผู้ที่แสดงอาการ ผลตรวจ PCR เป็นบวกในกลุ่ม  $V$  ของผู้ที่ได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวกและเข้ารับการตรวจยืนยันผล หรือได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวก ในกลุ่ม  $1-V$  ซึ่งไม่ตรวจยืนยันผล
6. มีการให้ความร่วมมือปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวผู้มีความเสี่ยงหรือผู้ติดเชื้อบางส่วน

ภาพประกอบ 1 จะแสดงโมเดลแบบขยาย SIR (สมการต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก 1) เส้นทางในแนวนอนหมายถึงความคืบหน้าของโรค ตั้งแต่ผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับเชื้อและติดเชื้อ ไปจนถึงเพิกหายป่วย จนกระทั่งฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์ หรือตั้งแต่ติดเชื้อจนกระทั่งเสียชีวิต ความแตกต่างระหว่างช่วงเพิกหายป่วย และฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์ก็คือ ช่วงเพิกหายป่วยจะได้รับผลตรวจ PCR เป็นบวกแต่ไม่สามารถแพร่เชื้อได้ โปรดดู Larremore และคณะ (2020) เป็นต้น การตรวจคัดกรองจะถือว่ามีความไวต่ำกว่าการตรวจ PCR จึงสามารถตรวจพบไวรัสในผู้ที่ติดเชื้อได้ แต่ไม่สามารถตรวจพบในผู้ที่เพิกหายป่วยได้

รูป 1 โมเดล SIR โดยมีการตรวจเพื่อคัดกรองและเพื่อวินิจฉัย และได้รับความร่วมมือบางส่วน





ผู้ที่ได้รับคำแนะนำให้กักตัวจะเข้าสู่ส่วนกักตัว ( $Q$ ) เพื่อแยกแยะจากผู้ติดเชื้อ ( $I$ ) ระดับของความร่วมมือในการปฏิบัติตามคำแนะนำจะขึ้นอยู่กับว่าพวกเขามาถึงสถานะนี้เนื่องจากได้รับผลบวกในการตรวจวินิจฉัยซึ่งมีค่าบ่งบอกสูงหรือจากการตรวจคัดกรองซึ่งมีค่าบ่งบอกต่ำกว่า (แม้เราจะอธิบายว่าผู้ที่มาถึงสถานะนี้เนื่องจากได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวกให้ความร่วมมือ 25% เนื่องจากโมเดลนี้มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอทั้งนี้จึงเท่ากับว่าทุกคนที่มาถึงผ่านช่องทางนี้จะลดการสัมผัสของตนเอง 25%) หากได้รับความร่วมมืออย่างสมบูรณ์ ไม่ควรมีการติดเชื้อในกลุ่มผู้มีโอกาสติดเชื้อในกลุ่มที่กักตัวเนื่องจากมีความเสี่ยงและกักตัวเนื่องจากติดเชื้อ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความร่วมมือเพียงบางส่วนเท่านั้น บางส่วนของผู้มีโอกาสติดเชื้อที่กักตัวเนื่องจากติดเชื้อ ( $SQ$ ) และผู้มีโอกาสติดเชื้อที่กักตัวเนื่องจากมีความเสี่ยง ( $SD$ ) จึงมีโอกาสดำเนินการ

ตารางที่ 2 อธิบายค่าพารามิเตอร์เกณฑ์พื้นฐานของเรา ความไวและความจำเพาะของการตรวจวินิจฉัยควรอยู่ในช่วงของการตรวจ PCR ในห้องปฏิบัติการ ความไวและความจำเพาะของการตรวจคัดกรองเกณฑ์พื้นฐานได้รับการปรับเทียบตามค่าประมาณของการวิเคราะห์ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจแอนติเจนแบบเร็ว BinaxNOW™ แม้เราจะพิจารณาค่าทางเลือกต่างๆ ก็ตาม อัตราเข้ารับการตรวจเพื่อวินิจฉัยในกลุ่มผู้ติดเชื้อ ( $\rho_0$ ) และกลุ่มผู้ติดเชื้อ ( $\rho_1$ ) ได้รับการปรับเทียบให้สัมพันธ์กับจำนวนการตรวจรวมและอัตราผลบวกในสหรัฐอเมริกา ระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม 2020

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์การตรวจ

พารามิเตอร์	นิยาม	ค่า
$p_s$	การตรวจคัดกรอง: ความไว	0.97
$q_s$	การตรวจคัดกรอง: ความจำเพาะ	0.985
$p_d$	การตรวจวินิจฉัย: ความไว	0.999
$q_d$	การตรวจวินิจฉัย: ความจำเพาะ	0.997
$a_s$	อัตราการไม่ให้ความร่วมมือกักตัวหลังจากได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวก	0.75 สำหรับ $q_s = 0.985$ 0.5 สำหรับ $q_s = 0.997$
$a_d$	อัตราการไม่ให้ความร่วมมือกักตัวหลังจากได้รับผลตรวจวินิจฉัยเป็นบวก	0.25
$v$	กลุ่มได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวกและรับการตรวจยืนยันผล การตรวจวินิจฉัย	0, 0.5, 1
$\lambda_d$	อัตราการส่งผลตรวจวินิจฉัย ( $1/\lambda_d$ จำนวนวันที่ล่าช้าโดยเฉลี่ย)	1/2
$\lambda_s$	อัตราการส่งผลตรวจคัดกรอง	1/.1
$\mu$	ความถี่ในการตรวจคัดกรอง	0,...,1/3
$\rho_0$	อัตราผู้ไม่ติดเชื้อที่รับการตรวจวินิจฉัย	1/600
$\rho_1$	อัตราผู้ติดเชื้อที่รับการตรวจวินิจฉัย	1/10
$\zeta$	อัตราการออกจากกักตัว ( $Q$ )	1/14
$\theta$	อัตราการเปลี่ยนจากเพิกเฉยป่วยจนฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์	1/5
	ต้นทุนในการตรวจคัดกรอง	\$5, \$3
	ต้นทุนในการตรวจวินิจฉัย	\$50
	มูลค่าของชีวิตในทางสถิติ (US EPA 2020 เป็น \$ 2020)	\$9.3m

หมายเหตุ: มีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์ความไว

เราให้มีความถี่ของการตรวจคัดกรอง (ควบคุมโดย  $\mu$ ) แปรผันระหว่าง 0 (ไม่มีการตรวจคัดกรอง) ถึง 0.3 (แต่ละคนรับการตรวจคัดกรองทุกสามวันโดยเฉลี่ย) อัตราการให้ความร่วมมือก็กักตัวตามเกณฑ์พื้นฐานของเราคือ 25% สำหรับผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกจากการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5% และเป็น 50% สำหรับผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกจากการตรวจคัดกรองสองขั้นตอนซึ่งมีความจำเพาะ 99.7% และเป็น 75% สำหรับผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกจากการตรวจวินิจฉัย (ทั้งหลังจากมีการยืนยันเนื่องจากมีอาการหรือเป็นการตรวจขั้นที่สองหลังจากที่ได้ผลตรวจคัดกรองเป็นบวก)

## 2.2 เกณฑ์พื้นฐานของการจำลองและกรณีที่ไม่เกิดขึ้นจริงของการตรวจ

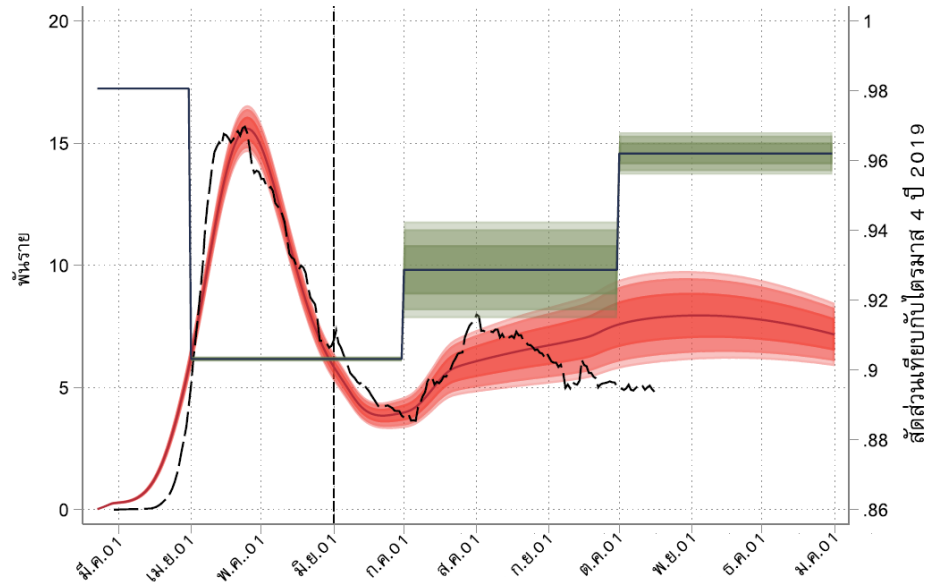
BFMS มีสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐานสองรูปแบบ ซึ่งทั้งสองแบบมีการเริ่มติดเชื้อระลอกที่สองในช่วงกลางฤดูร้อนของปี 2020 ใน BFMS การระบาดระลอกที่สองเป็นผลสืบเนื่องจากการผ่อนปรนการเว้นระยะห่างทางสังคม การสวมหน้ากาก และการป้องกันอื่นๆ ร่วมกับการกลับมาเรียนที่โรงเรียนอย่างเต็มรูปแบบในฤดูใบไม้ร่วง ความแตกต่างระหว่างสองสถานการณ์คือระดับการป้องกันกลับจากกลุ่มเสี่ยงชีวิต และอัตราการเติบโตของกลุ่มเสี่ยงชีวิตของกิจกรรม เกณฑ์พื้นฐานในกรณีนี้จะใช้พารามิเตอร์การป้องกันกลับซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐานสองรูปแบบที่พิจารณาใน BFMS

เราประมาณการโมเดลโดยใช้ข้อมูลถึงวันที่ 12 มิถุนายน 2020 ระยะเวลาของการจำลองเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2020 และสิ้นสุดในวันที่ 1 มกราคม 2021 ด้วยเหตุนี้ การจำลองจึงสอดคล้องกับเส้นทางทางเลือกซึ่งไม่เกิดขึ้นจริงสำหรับไวรัสและเศรษฐกิจในช่วงเจ็ดเดือนสุดท้ายของปี 2020

ภาพประกอบ 2 แสดงเส้นทางเวลาของการเสียชีวิตจริง (เส้นประสีดำ) การเสียชีวิตจากการจำลอง (สีแดง) และระดับ GDP (สีเขียว) กำหนดดัชนีตามระดับของค่าอื่นๆ ในเดือนกุมภาพันธ์ปี 2020 ภายใต้การปรับเทียบเกณฑ์พื้นฐานของเรา โดยไม่มีการตรวจคัดกรอง แยกการเสียชีวิตและ GDP คือแยกความผิดพลาดมาตรฐานจากความไม่แน่นอนของการประมาณการสำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของโมเดล แม้ว่าสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐานจะกำหนดขึ้นในเดือนมิถุนายน แต่สถานการณ์มีความสอดคล้องตามเส้นทางการเสียชีวิตตลอดช่วงกลางเดือนสิงหาคม หลังจากนั้น การเสียชีวิตในการจำลองได้เพิ่มสูงกว่าการเสียชีวิตจริง ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการจำลองถือว่าโรงเรียนได้กลับมาทำการสอนอย่างเต็มรูปแบบ ในขณะที่โรงเรียนในหลายพื้นที่กลับมาทำการสอนแบบทางไกลหรือแบบผสมผสาน ภายใต้เกณฑ์พื้นฐานมีผู้เสียชีวิต 359,000 ราย จนถึงวันที่ 1 มกราคม

ภายใต้เกณฑ์พื้นฐานจะไม่มีการตรวจคัดกรอง ( $\mu = 0$ ) อย่างไรก็ตาม มีการตรวจวินิจฉัยในอัตราที่สอดคล้องกับปริมาณและอัตราผลบวกของการตรวจจริงในเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม ภายใต้สถานการณ์ที่มีการตรวจคัดกรองซึ่งไม่เกิดขึ้นจริง มีการตรวจวินิจฉัยเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตรวจคัดกรองโดยที่คงพารามิเตอร์ของโมเดลทั้งหมดให้คงที่ ยกเว้นค่าซึ่งอธิบายถึงการตรวจคัดกรอง

**ภาพประกอบ 2 เส้นทางการเสียชีวิตและ GDP ตามความเป็นจริงและการจำลอง: ไม่มี  
เกณฑ์พื้นฐานของการตรวจคัดกรอง**



หมายเหตุ: GDP รายไตรมาส (ฟังก์ชันขั้นสี่เขียว) จะแสดงระดับจริงโดยกำหนดดัชนีเป็น 1 ในไตรมาสที่ 4 ของปี 2019 การเสียชีวิตรวม (ค่าจริงใช้เส้นประสีดำ ค่าจำลองใช้สีแดง) ภายใต้การจำลองเกณฑ์พื้นฐาน คือ 359,000 ราย ภายในวันที่ 1 มกราคม 2021 แถบต่างๆ จะระบุแถบความเชื่อมั่น 67%, 90% และ 95% โดยใช้ความผิดพลาดมาตรฐานสำหรับพารามิเตอร์ของโมเดลจากประมาณการ

### 2.3 การประเมินต้นทุนและประโยชน์

ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นและประโยชน์ของการตรวจได้รับการคำนวณจากจำนวนการตรวจและผลลัพธ์ทาง เศรษฐศาสตร์และอัตราการเสียชีวิตตามนโยบายของโมเดล ภายใต้สถานการณ์ที่มีการตรวจและไม่มีการ ตรวจ

เราถือว่าต้นทุนของการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5% คือ 5 ดอลลาร์ ถือว่าการตรวจคัดกรองที่มีความ จำเพาะ 80% มีต้นทุน 2 ดอลลาร์ แต่บรรจมาสำหรับการทำงานร่วมกับชุดตรวจที่มีต้นทุน 5 ดอลลาร์ซึ่ง มีความจำเพาะ 98.5% ในอัตรา 5 ต่อ 1 ชุด จึงมีต้นทุนเฉลี่ย 3 ดอลลาร์ต่อชุด ราคาของการตรวจ PCR เพื่อการวินิจฉัยมีความแปรผันค่อนข้างมากในสหรัฐอเมริกา เรากำหนดเกณฑ์พื้นฐานของเราที่ 50 ดอลลาร์

เราคำนวณประโยชน์สามอย่างของการตรวจ ได้แก่ GDP ที่เพิ่มขึ้น รายได้ของรัฐบาลกลางที่เพิ่มขึ้น และ มูลค่าที่ดีเป็นเงินได้อันเนื่องมาจากการเสียชีวิตที่หลีกเลี่ยงได้

GDP จะวัดเป็นดอลลาร์ 2020 และเนื่องจากการจำลองเริ่มต้นในวันที่ 1 มิถุนายน ค่า GDP จึงเท่ากันภายใต้ เกณฑ์พื้นฐาน และทางเลือกในการตรวจมีค่า GDP ตรงกันสำหรับห้าเดือนแรกของปี ดังนั้น ความแตกต่าง ของ GDP ภายใต้สองสถานการณ์จะเกิดขึ้นในช่วงตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนธันวาคมเท่านั้น จำนวน ดอลลาร์ของ GDP ส่วนเพิ่มเหล่านี้เป็นจำนวนดอลลาร์สำหรับเจ็ดเดือนดังกล่าวเท่านั้น ไม่ใช่อัตรารายปี

ผลจากการเพิ่มขึ้นของ GDP ต่อรายได้ของรัฐได้รับการคำนวณโดยใช้ความยืดหยุ่นของภาษีเงินได้ ภาษีจากผลกำไรขององค์กร FICA และภาษีจากอาชีพอิสระ จากสำนักงบประมาณแห่งสภาองเกรส (Russek และ Kowalewski (2015 ตารางที่ 3) และ CBO (2019)) และเช่นเดียวกับ GDP รายได้ส่วนเพิ่มเหล่านี้เป็นของเดือนมิถุนายนถึงธันวาคมเท่านั้น ไม่ใช่จำนวนรายปี ในการคำนวณประโยชน์ทางการเงินสุทธิ เราถือว่ารัฐบาลกลางเป็นผู้จ่ายค่าดำเนินการตรวจที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด

การเสียชีวิตที่หลีกเลี่ยงได้คือจำนวนการเสียชีวิตสะสมจากโควิด 19 ณ วันที่ 1 มกราคม 2020 ภายใต้สถานการณ์ทดสอบ ลบด้วยจำนวนรวมของผู้เสียชีวิตในสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐาน การเสียชีวิตจะถูกตีเป็นเงินโดยใช้มูลค่าของชีวิตในทางสถิติจาก US EPA (2020) แปลงเป็นจำนวนดอลลาร์ 2020 ซึ่งคิดเป็น 9.3 ล้านดอลลาร์ต่อหนึ่งชีวิต

### 3. ผลลัพธ์

หมวดนี้จะเสนอผลลัพธ์ที่สมบูรณ์สำหรับสามโครงการในตารางที่ 1 จากนั้นเสนอการตรวจสอบความไวและเส้นทางเวลาของไวรัสและ GDP สำหรับโครงการที่ใช้เป็นตัวอย่าง

#### 3.1. การตรวจคัดกรองขั้นตอนเดียว โดยมีการตรวจยืนยันผลบางส่วน

เราเริ่มด้วยโครงการ A ในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการตรวจคัดกรองขั้นตอนเดียวที่มีความจำเพาะ 98.5% และมีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล 50% อัตราการให้ความร่วมมือเมื่อได้รับคำแนะนำให้กักตัวเนื่องจากผลการตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียวคือ 25% และความร่วมมือเมื่อได้รับคำแนะนำให้กักตัวเนื่องจากผลการตรวจวินิจฉัยคือ 75%

ผลลัพธ์ด้านอัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ A ในตารางที่ 1 แสดงอยู่ในภาพประกอบ 3 ในภาพประกอบทั้งหมดจะพล็อตผลลัพธ์ที่สนใจซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการตรวจคัดกรอง  $\mu$  เส้นจำนวนมากในภาพประกอบแสดงถึงความไวระดับต่างๆ ของการตรวจคัดกรอง ตั้งแต่ 80% ถึง 98.5% เมื่อเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง คาดว่าการตรวจทุกสัปดาห์น่าจะช่วยลดความเสี่ยงการเสียชีวิตได้ประมาณ 37,000 ราย และการตรวจทุกสัปดาห์น่าจะช่วยลดความเสี่ยงการเสียชีวิตได้ประมาณ 66,000 ราย แม้การตรวจคัดกรองจะมีความไว 97% ก็ตาม จำนวนวันที่บุคคลได้รับการแนะนำให้กักตัว (ด้านบนขวา) จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเกือบเป็นเชิงเส้นตามจำนวนการตรวจคัดกรอง (มีความโค้งอยู่บ้างเนื่องจากการตรวจในกลุ่มผู้แสดงอาการลดลงเมื่ออัตราการตรวจคัดกรองเพิ่มขึ้น) เมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ จะมีการปฏิเสธกักตัวประมาณ 930 ล้านวัน ซึ่งคิดเป็น 1.3% ของจำนวนรวม 70,000 ล้านคน-วัน ในระหว่างระยะเวลาของการจำลองในเดือนมิถุนายนถึงธันวาคม (เนื่องจากมีการให้ความร่วมมือบางส่วน จึงมีจำนวนการกักตัว-วัน เพียงบางส่วนเท่านั้น) เนื่องจากผู้ที่ได้ผลบวกจากการตรวจคัดกรองเพียงครั้งเดียวเท่านั้นที่เข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล จำนวนส่วนใหญ่ของผู้ที่ได้รับคำแนะนำให้กักตัวจึงเป็นผลบวกลอง PPV ของการตรวจคัดกรอง (ตรงกลางซ้าย) มีค่าต่ำ คือประมาณ 6% สำหรับการตรวจทุกสัปดาห์ เนื่องจากไวรัสจะถูกยับยั้งอย่างชัดเจนเมื่อ  $\mu$  เพิ่มขึ้น ค่า GDP (ตรงกลางขวา) จึงเพิ่มขึ้นพร้อมกับ  $\mu$  สำหรับอัตราการตรวจ  $\mu$  ต่ำและปานกลาง แม้การเพิ่มขึ้นจะเป็นไปอย่างไม่เต็มที่เนื่องจากพนักงานที่มีสุขภาพดีจำนวนมากต้องกักตัวก็ตาม

ผลลัพธ์ของต้นทุน-ประโยชน์สำหรับโครงการ A ได้แสดงไว้ในแผนภูมิด้านล่างของภาพประกอบ 3 และในภาพประกอบ 4 ต้นทุนในการทดสอบเพิ่มเติมจะเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเชิงเส้นตามอัตราการตรวจ สำหรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิ (ภาพประกอบ 3 ด้านล่างซ้าย) จะอยู่ในช่วง 75,000-120,000 ล้านดอลลาร์สำหรับการตรวจทุกสองสัปดาห์ และอยู่ในช่วง 150,000-200,000 ล้านดอลลาร์สำหรับการตรวจทุกสัปดาห์ ขึ้นอยู่กับความไวของการตรวจคัดกรอง เมื่อรวมมูลค่าของชีวิตไว้ในค่าประโยชน์ (ภาพประกอบ 3 ด้านล่างขวา) ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิจะอยู่ในช่วง 320,000-470,000 ล้านดอลลาร์สำหรับการตรวจทุกสองสัปดาห์ และอยู่ในช่วง 650,000-820,000 ล้านดอลลาร์ (215) สำหรับการตรวจทุกสัปดาห์ ขึ้นอยู่กับความไวของการตรวจคัดกรอง พบว่าโครงการตรวจคัดกรองเป็นสิ่งที่คุ้มค่าในเกือบทุกกรณีที่พิจารณา (ภาพประกอบ 4 ตรงกลางขวา) ภายใต้สมมติฐานว่ารัฐบาลกลางเป็นผู้ออกต้นทุนสำหรับการทดสอบเพิ่มเติมทั้งหมด

ในภาพประกอบทั้งหมดเหล่านี้ การเพิ่มความไวของการตรวจคัดกรองจะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น แต่การปรับปรุงเหล่านั้นมักมีส่วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเริ่มต้นโครงการตรวจคัดกรอง

### 3.2. การเข้าถึงการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี

ภาพประกอบ 5 และ ภาพประกอบ 6 เป็นชุดคู่ของ ภาพประกอบ 3 และ ภาพประกอบ 4 สำหรับโครงการ B ซึ่งมีการตรวจคัดกรองเช่นเดียวกันแต่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี การขยายขอบเขตของการตรวจเพื่อยืนยันผลจาก 50% เป็น 100% จะลดการเสียชีวิตและเพิ่ม GDP ได้อย่างมาก เนื่องจากพิจารณาได้ว่า จะได้รับอัตราความร่วมมือมากขึ้นเมื่อใช้การตรวจ PCR ซึ่งมีความจำเพาะสูงกว่าการตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ เนื่องจากการตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะช่วยลดจำนวนผู้ที่มีสุขภาพดีที่ต้องกักตัว จึงช่วยลดความเสี่ยงการกักตัวพนักงานที่มีสุขภาพดีจากการทำงาน และช่วยเพิ่ม GDP ในที่สุด ที่จริงแล้ว แม้จะทำการตรวจมากขึ้น แต่จำนวนวันที่กักตัวในโครงการ B ยังคงน้อยกว่าเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง ทั้งนี้ เนื่องจากความชุกของไวรัสได้ลดลงอย่างมาก จึงส่งผลให้จำนวนรวมของการตรวจวินิจฉัยที่ได้ผลบวกลดลง แม้ว่าจะมีการตรวจเพิ่มเติมซึ่งมาจากการตรวจคัดกรองที่ได้ผลบวกก็ตาม การตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะทำให้ต้นทุนในการตรวจเพิ่มขึ้น ดังนั้น การพิจารณาว่าการเสนอทำการตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะทำให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิเพิ่มขึ้นหรือลดลง จึงไม่ใช่สิ่งที่ *ทราบโดยไม่ต้องพิสูจน์* อย่างชัดเจน สำหรับมูลค่าที่พิจารณาในที่นี้ ประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจทุกกรณีมีความสำคัญสูงสุด และประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิเพิ่มขึ้น

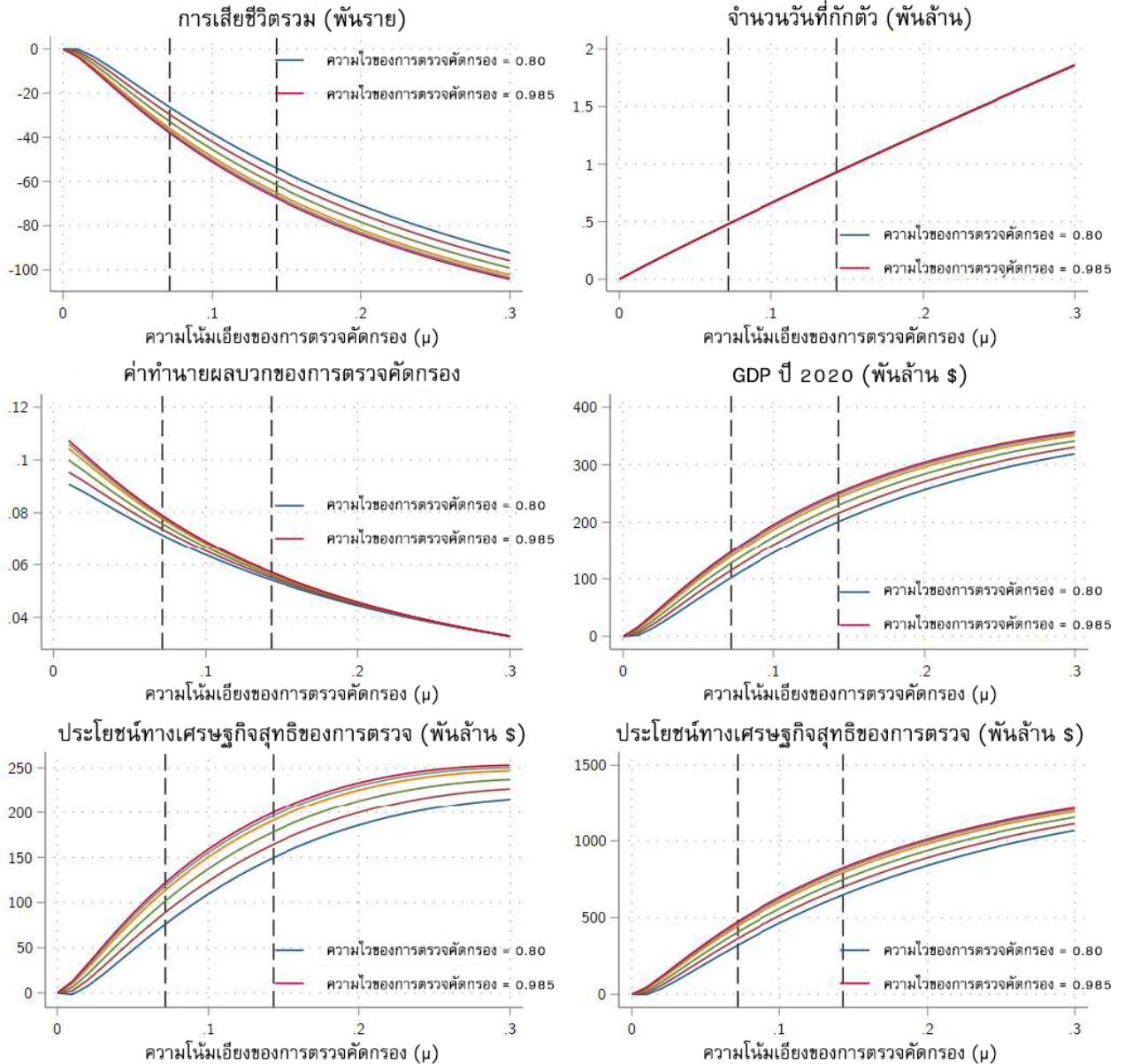
### 3.3. การตรวจคัดกรองสองขั้นตอนด้วยความจำเพาะ 99.7%

ผลลัพธ์สำหรับการตรวจคัดกรองสองขั้นตอนของโครงการ C จะแสดงอยู่ใน ภาพประกอบ 7 และ ภาพประกอบ 8 โครงการนี้ใช้การตรวจคัดกรองสองขั้นตอนซึ่งมีต้นทุน 3 ดอลลาร์ และมีความจำเพาะ 98.5% การให้ความร่วมมือกักตัว 50% และไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล ประโยชน์ในแง่อัตราการเสียชีวิต จำนวนวันกักตัวที่ถูกปฏิเสธ ประโยชน์ในแง่การจ้างงาน และประโยชน์จาก GDP อยู่ระหว่างการตรวจด้วยโครงการ A และ B ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการให้ความร่วมมือซึ่งคาดว่าจะน้อยกว่า แม้โครงการ C จะให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิน้อยกว่าโครงการ B แต่โครงการ C ให้อัตราส่วนประโยชน์-ต้นทุนสูงที่สุด เนื่องจากการตรวจมีต้นทุนน้อยกว่า

### ภาพประกอบ 3 อัตราการเสียชีวิตและผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจสำหรับ โครงการ A (การตรวจยืนยันผล 50%)

ผลลัพธ์ด้านอัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ A ความจำเพาะ 98.5% มีการตรวจยืนยันผล 50%

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง



ความไวของการตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

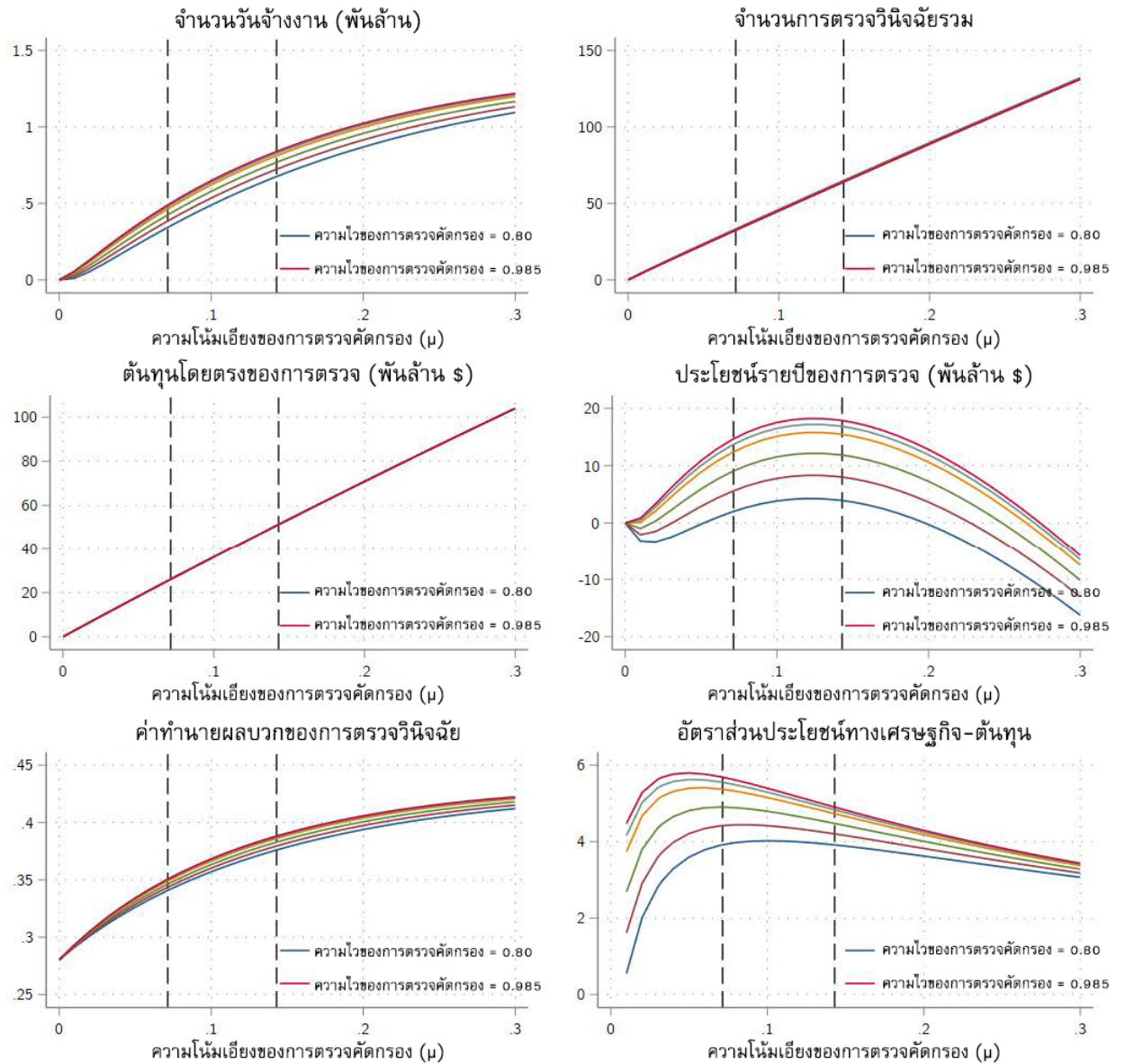
เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์และทุกสี่สัปดาห์

พารามิเตอร์อื่นๆ:  $v = .5$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$

ภาพประกอบ 4 ดันทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ A  
(การตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล 50%)

ดันทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ A ความจำเพาะ 98.5% มีการตรวจยืนยันผล 50%

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง



ความไวของการตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการศึกษาการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์และทุกสัปดาห์

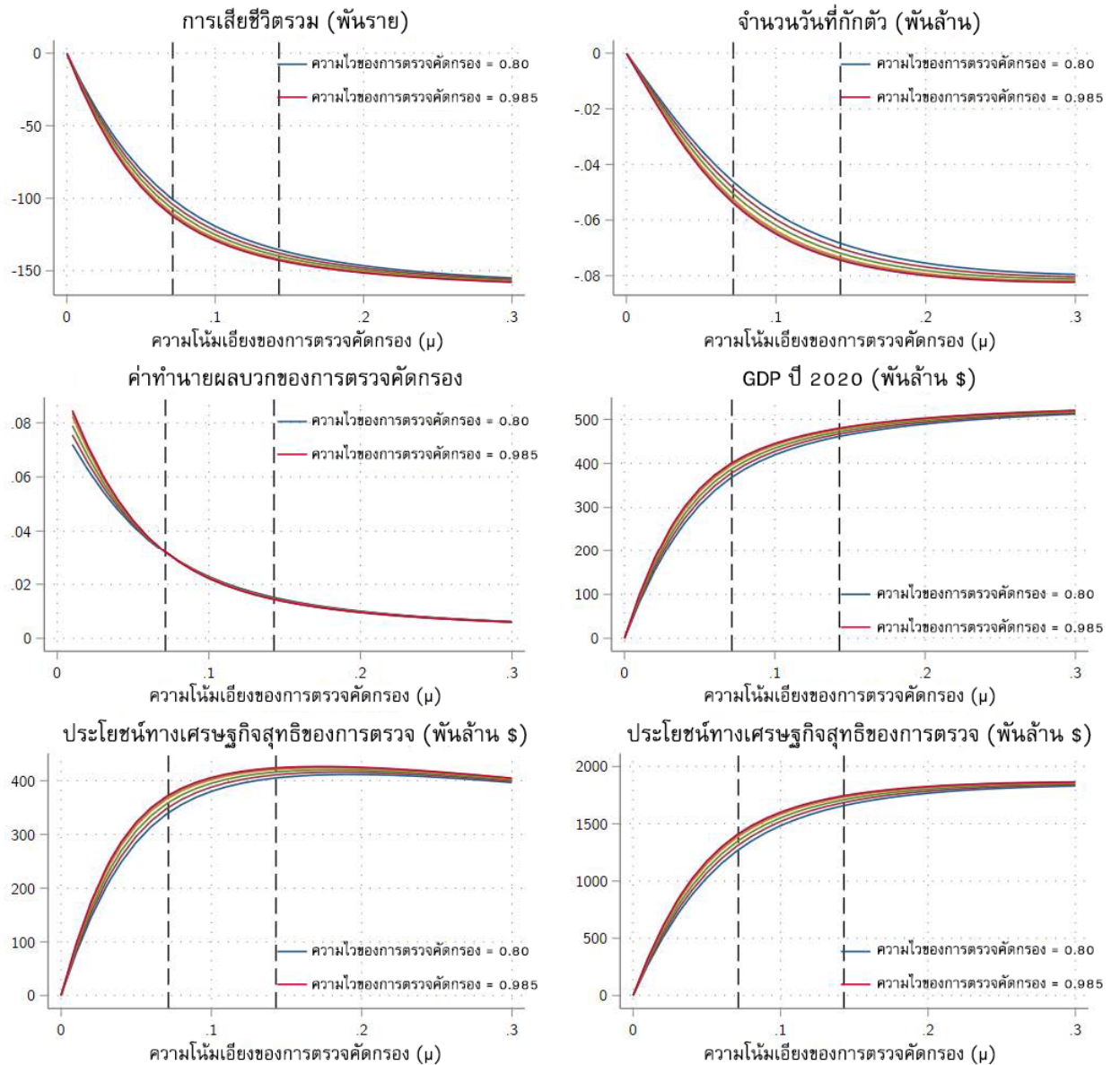
พารามิเตอร์อื่นๆ:  $v = .5$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$



**ภาพประกอบ 5 อัตราการเสียชีวิตและผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจสำหรับโครงการ B**  
**(การตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณี)**

ผลลัพธ์อัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ B ความจำเพาะ 98.5% ตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณี

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง



ความไวของการตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

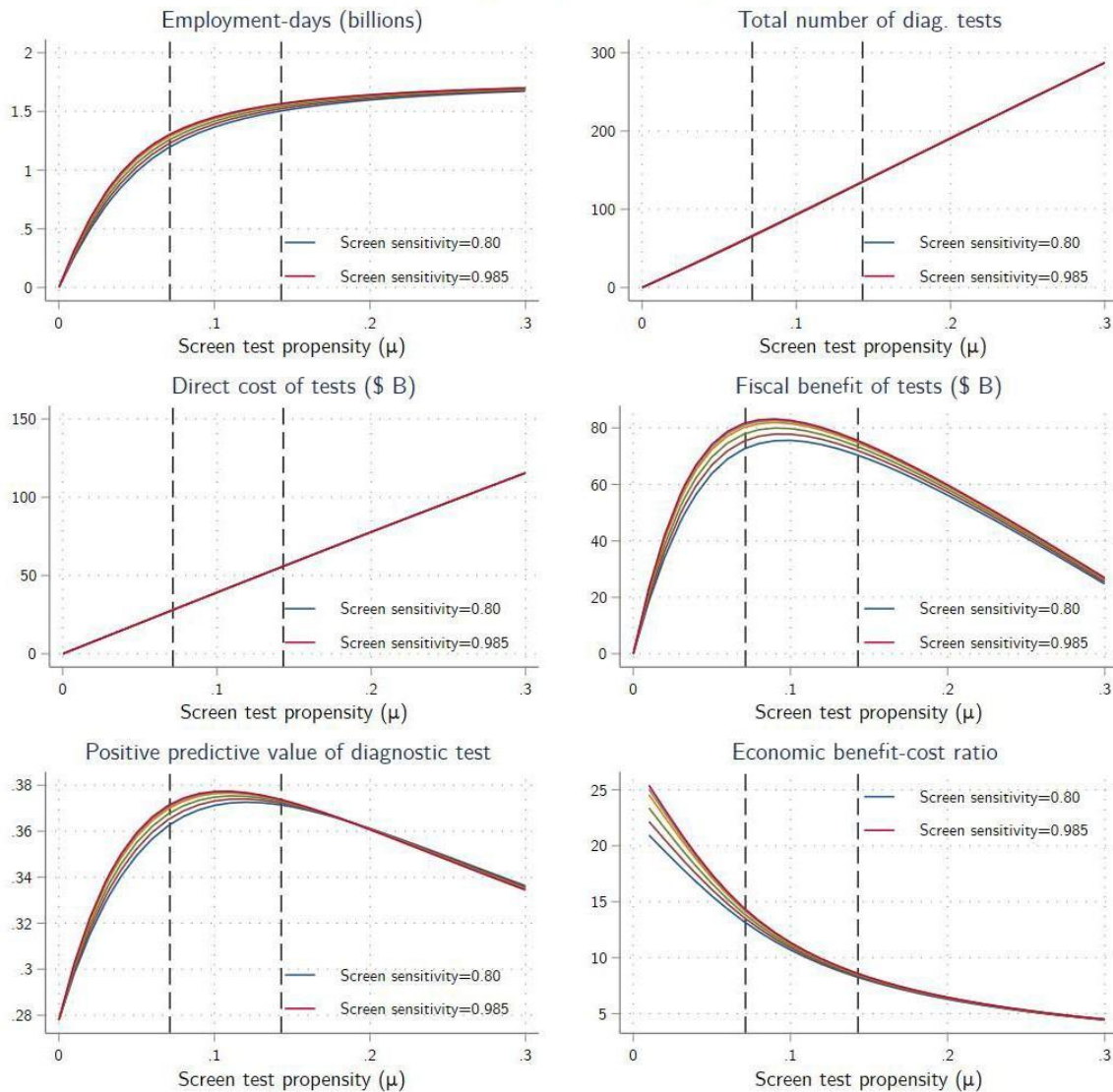
เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์และทุกสัปดาห์

พารามิเตอร์อื่นๆ:  $\nu = .5$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$



ภาพประกอบ 6 ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ B  
(การตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี)

Costs and benefits for Program B: 98.5% specificity, universal confirmatory testing  
Relative to baseline with no screening tests



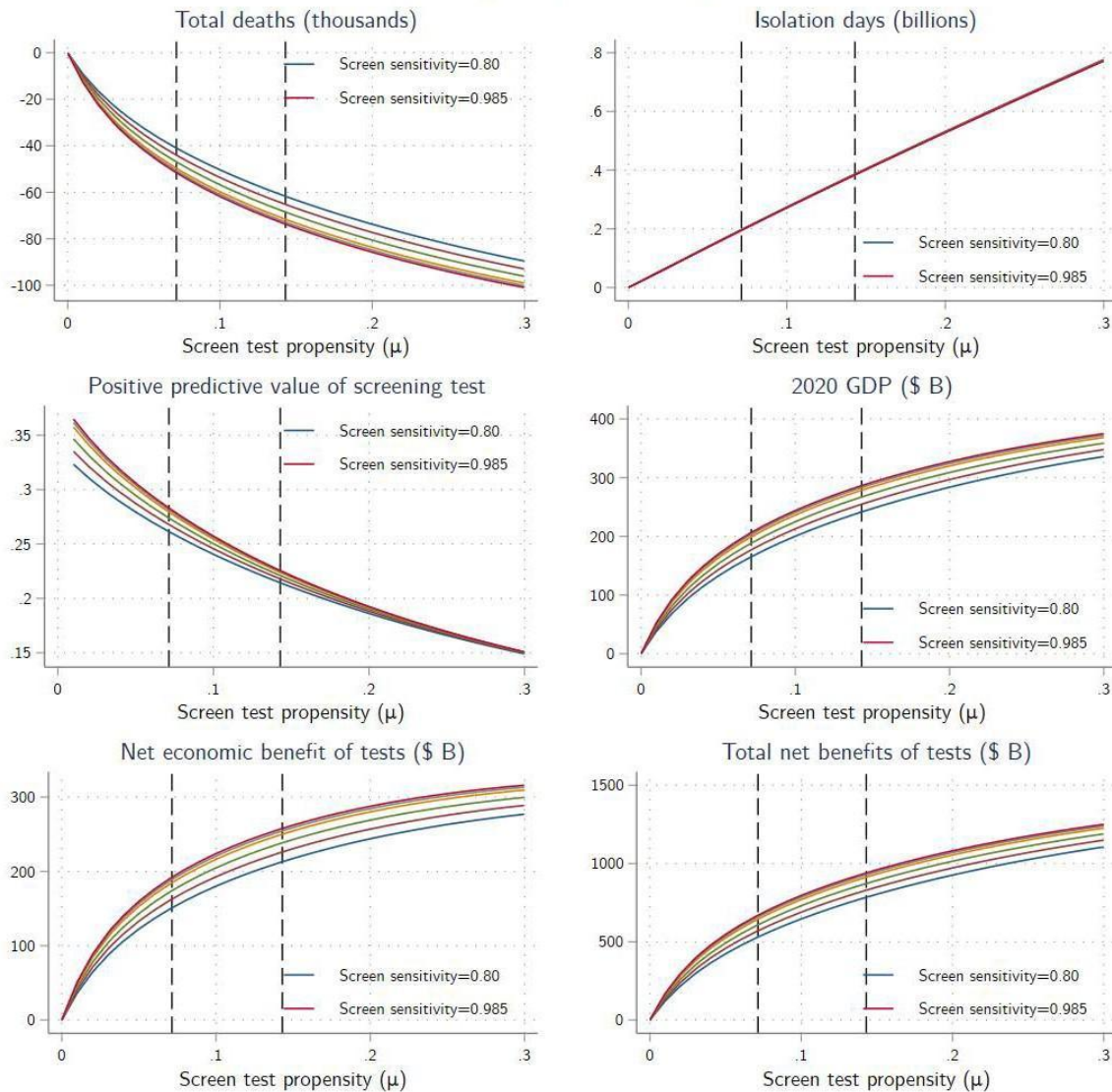
Screen test sensitivity: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

Vertical lines indicate biweekly and weekly screening test rates.

Other parameters:  $v = 1$ ,  $\alpha_s = .5$ ,  $\lambda_D = .5$

ภาพประกอบ 7 อัตราการเสียชีวิตและผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจสำหรับโครงการ C  
(ไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล)

Mortality and economic outcomes for Program C: 99.7% specificity, no confirmatory testing  
Relative to baseline with no screening tests

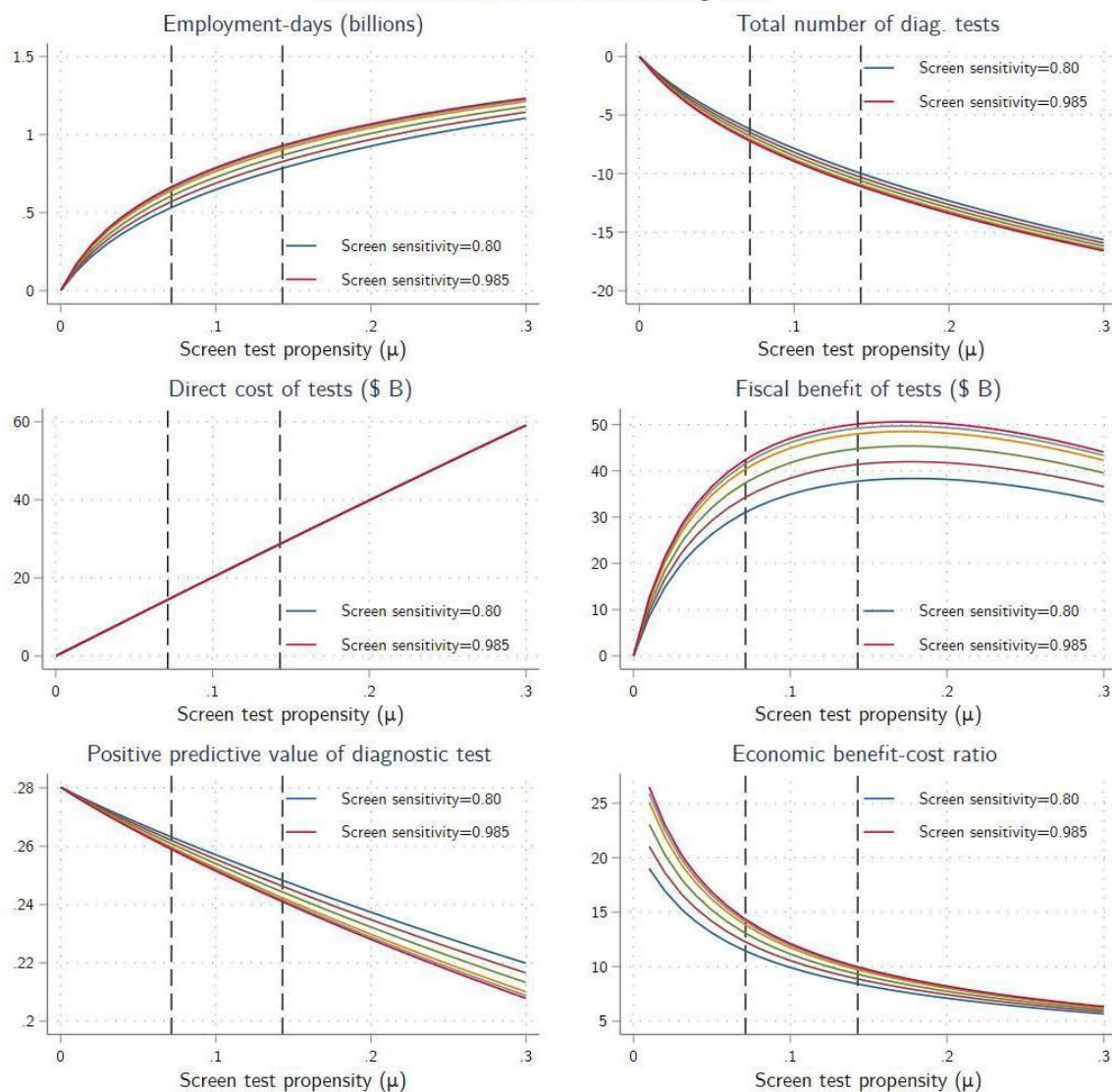


Screen test sensitivity: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995  
Vertical lines indicate biweekly and weekly screening test rates.  
Other parameters:  $\nu = 0$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$

ภาพประกอบ 8 ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ C  
(ไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล)

Costs and benefits for Program C: 99.7% specificity, no confirmatory testing

Relative to baseline with no screening tests



Screen test sensitivity: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

Vertical lines indicate biweekly and weekly screening test rates.

Other parameters:  $v = 0$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$

### 3.4.การตรวจสอบความไว

ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ได้สรุปผลลัพธ์ของการตรวจสอบความไวรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 3 ผลกระทบต่อเศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิต: การวิเคราะห์ความไว				
ความถี่ในการตรวจ (วัน)	ต้นทุนการตรวจ เพิ่มเติม (\$B)	ส่วนเพิ่ม GDP (\$B)	ส่วนเพิ่ม รายได้ของรัฐ (\$B)	การป้องกันการ เสียชีวิต (พันราย)
<i>D. โครงการ A แต่ไม่มีการตรวจเพื่อยืนยันผล</i>				
30	11	-10	-3	-2
14	23	56	15	17
7	46	166	46	48
4	79	266	73	84
<i>E. โครงการ A แต่การตรวจคัดกรองมีความจำเพาะ 97%</i>				
30	13	4	1	2
14	27	83	23	24
7	53	201	56	58
4	91	294	81	93
<i>F. โครงการ A แต่การให้ความร่วมมือจากผลตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียว 50%</i>				
30	12	171	47	45
14	25	288	78	82
7	51	365	100	120
4	88	363	100	142
<i>g. โครงการ B แต่มีต้นทุนในการตรวจวินิจฉัย 100 เหรียญ</i>				
30	14	262	72	65
14	31	429	117	111
7	63	544	149	152
4	109	593	164	172

หมายเหตุ: โปรดดูหมายเหตุของตารางที่ 1

**การตรวจคัดกรองขั้นตอนเดียวที่มีความจำเพาะ 98.5% และไม่มีการตรวจเพื่อยืนยันผล** ประเด็นซึ่งเป็นที่วิจารณ์โดยทั่วไปของการตรวจคัดกรองอย่างกว้างขวาง คือค่าความจำเพาะต่ำอาจทำให้ผู้ที่มีสุขภาพดีจำนวนมาก ซึ่งรวมถึงพนักงานที่มีสุขภาพดี ต้องทำการกักตัวโดยไม่จำเป็น (เช่น จาก Pettengill และ McAdam (2020)) แผนภูมิ D ในตารางที่ 3 ได้พิจารณากรณีดังกล่าวสำหรับการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5%

การกำจัดการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลออกจากโครงการ A อย่างสิ้นเชิง จะทำให้จำนวนบุคคลที่มีสุขภาพดีซึ่งรวมถึงแรงงานที่มีสุขภาพดีที่ต้องทำการกักตัวเพิ่มขึ้น และยังลดการให้ความร่วมมือโดยรวมอีกด้วย เนื่องจากการตรวจคัดกรองที่มี PPV ต่ำไม่มีการตรวจวินิจฉัยติดตามผล

ปัจจัยทั้งสองประการดังกล่าวทำให้ประโยชน์จากโครงการตรวจคัดกรองลดลงอย่างมาก ที่จริงแล้ว การไม่ทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลจากโครงการตรวจคัดกรอง เป็นสิ่งที่ไม่คุ้มค่าในกรณีส่วนใหญ่ที่ได้ทำการพิจารณา หากไม่มีการตรวจเพื่อยืนยันผล จะมีจำนวนวันกักตัวที่ถูกปฏิเสธ 1.8 พันล้านวันเมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ คิดเป็นประมาณ 2.5% ของจำนวนคน-วันทั้งหมด

**การตรวจคัดกรองขั้นตอนเดียวที่มีความจำเพาะ 97% และมีการตรวจเพื่อยืนยันผลบางส่วน**  
แผนภูมิ E มีการปรับเปลี่ยนจากโครงการ A โดยพิจารณาว่ามีการตรวจคัดกรองที่ให้อัตราผลบวกสองเท่าของการตรวจในโครงการ A เพื่อการเปรียบเทียบ เรากำหนดให้ความร่วมมือยังคงที่ แม้แผนภูมิ E น่าจะได้รับความร่วมมือน้อยกว่า ความจำเพาะที่ลดลงได้ทำให้จำนวนผู้ที่มีสุขภาพดีซึ่งปฏิเสธการกักตัวมีมากขึ้น ต้นทุนในการตรวจจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีผลบวกจากการคัดกรองที่ต้องยืนยันผลมากขึ้น และการกักตัวพนักงานที่มีสุขภาพดีเป็นจำนวนมากส่งผลให้ GDP ชะลอตัวเพิ่มเติม เป็นผลทำให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิต่ำกว่าโครงการ A

**การตรวจคัดกรองขั้นตอนเดียวที่มีความจำเพาะ 98.5% มีการตรวจเพื่อยืนยันผลบางส่วน และได้รับความร่วมมือมากขึ้น** สถานการณ์จำลองนี้ซึ่งแสดงในแผนภูมิ F ได้ปรับเปลี่ยนโครงการ A โดยเพิ่มความร่วมมือจาก 25% เป็น 50% สำหรับผู้ที่ได้รับผลการตรวจคัดกรองเป็นบวก แต่ไม่เข้ารับการตรวจเพื่อยืนยันผล ความร่วมมือที่สูงขึ้นส่งผลอย่างมากต่อการป้องกันการเสียชีวิต GDP และรายได้ และยังลดต้นทุนในการตรวจโดยรวมเล็กน้อยอีกด้วย เนื่องจากการยับยั้งไวรัสที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นจะช่วยลดต้นทุนในการตรวจกลุ่มที่แสดงอาการ ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิมีค่าสูง แม้จะทำการตรวจทุกสองสัปดาห์ก็ตาม

**การตรวจวินิจฉัยที่มีต้นทุนสูงขึ้น** แผนภูมิ G ในตารางที่ 3 ได้พิจารณาโครงการ B (ความจำเพาะ 98.5% ตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณี) แต่ใช้วิธีการตรวจเพื่อยืนยันผลที่มีต้นทุนสูงขึ้น เนื่องจากรัฐบาลเป็นผู้ออกต้นทุนของการตรวจวินิจฉัย ดังนั้นในโมเดลจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจส่วนบุคคล จึงไม่ส่งผลต่ออัตราการเสียชีวิต การจ้างงาน หรือ GDP แต่อย่างใด แม้ต้นทุนของการตรวจ PCR จะเพิ่มเป็นสองเท่า แต่การลดต้นทุนในการตรวจโดยรวมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น เพิ่มจาก 56 ล้านเหรียญเมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ในโครงการ A (ตารางที่ 1) เป็น 63 ล้านเหรียญ เหตุผลคือ เมื่อทำการตรวจเพื่อยืนยันผลด้วยวิธี PCR ทุกกรณี ต้นทุนที่คาดไว้ในการดำเนินการตรวจรวมสำหรับผู้ที่ไม่ติดเชื้อจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น จาก 5 เหรียญ +  $.015 \times 50$  เหรียญ = 5.75 เหรียญสำหรับการตรวจเพื่อยืนยันผลที่มีต้นทุน 50 เหรียญ เป็น 6.50 เหรียญสำหรับการตรวจเพื่อยืนยันผลที่มีต้นทุน 100 เหรียญ

**ทางเลือกของกฎการป้อนกลับทางเศรษฐกิจ** ผลลัพธ์จนถึงขณะนี้ใช้กฎการป้อนกลับทางเศรษฐกิจใน BFMS (2020) (โปรดดูภาคผนวก 1) เพื่อการตรวจสอบความไว เราจึงพิจารณาทางเลือกของกฎการป้อนกลับทางเศรษฐกิจซึ่งนำมาจาก Arnon, Ricco และ Smetters (2020) ด้วย ตามกฎของพวกเขา กิจกรรมและการจ้างงานจะผันผวนกับจำนวนเคสในปัจจุบัน เมื่อใช้ข้อมูลรายวันสำหรับกิจกรรมและจำนวนเคส พวกเขาได้ประมาณค่าความยืดหยุ่นของการจ้างงานโดยสัมพันธ์กับจำนวนเคส -0.0048 กฎ BFMS ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเสียชีวิตรายสัปดาห์อย่างเฉพาะเจาะจง (ไม่ใช่ความชันของเส้นกราฟการเสียชีวิตหรืออัตราการว่างงาน) ช่วยให้ทราบความยืดหยุ่นของจำนวนชั่วโมงทำงานซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและสถานะของโรค เทียบกับอัตราการเสียชีวิตในปัจจุบัน เราได้คำนวณพารามิเตอร์ป้อนกลับ BFMS โดยให้

ค่าเฉลี่ยความยืดหยุ่นของการจ้างงานต่อจำนวนเคสที่ได้ทราบตลอดระยะเวลาของการจำลองเท่ากับ ความยืดหยุ่นประมาณการของ Arnon และคณะ<sup>6</sup>

**ตารางที่ 4 ผลกระทบต่อเศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิต: กฎการป้อนกลับของ Arnon และ**

คณะ (2020)				
ความถี่ในการตรวจ (วัน)	ต้นทุนการตรวจ เพิ่มเติม (\$B)	ส่วนเพิ่ม GDP (\$B)	ส่วนเพิ่ม รายได้ของรัฐ (\$B)	การป้องกันการ เสียชีวิต (พันราย)
<i>h. โครงการ A</i>				
30	12	23	6	15
14	26	60	17	35
7	50	111	31	63
4	88	152	43	90
<i>I. โครงการ B</i>				
30	13	160	45	65
14	27	267	74	105
7	55	354	100	138
4	97	397	112	154
<i>J. โครงการ C</i>				
30	7	111	32	47
14	14	179	50	76
7	28	239	67	105
4	50	261	73	122

หมายเหตุ: โปรดดูหมายเหตุของตารางที่ 1

ผลลัพธ์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4 สำหรับโครงการทั้งสามในตารางที่ 1 กฎการป้อนกลับของ Arnon และคณะตอบสนองต่อไวรัสน้อยกว่ากฎ BFMS และทำให้พลวัตแตกต่างกัน ประโยชน์โดยประมาณค่าจากโครงการตรวจ ทั้งในแง่การป้องกันการเสียชีวิตและในแง่

---

<sup>6</sup> เพื่อปรับให้กฎ BFMS สอดคล้องกับของ Arnon และคณะอย่างเฉพาะเจาะจง เราได้กำหนด  $K_{up}$ ,  $K_{ui}$  และ  $K_{dd}$  ในสมการในภาคผนวก (24) เป็น 0 และได้หาค่าของ  $K_{dp}$  ซึ่งจะทำให้ความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ได้ทราบจากโมเดลสอดคล้องกับความยืดหยุ่นการจ้างงานต่อจำนวนเคสของ Arnon และคณะ ความยืดหยุ่นดังกล่าวสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นของจำนวนชั่วโมงทำงานเทียบกับจำนวนการเสียชีวิต ซึ่งคำนวณขึ้นจากสมการในภาคผนวก (24) และ (25) ดังนี้

$$\frac{d \ln E_t}{d \ln C_t} = \left( \frac{1 + \varepsilon_f}{1 + \varepsilon_h} \right) \frac{d \ln L_t}{d \ln \dot{D}_t}$$

เมื่อ  $E_t$  คือการจ้างงาน  $L_t$  คือจำนวนชั่วโมงทำงาน  $C_t$  คือจำนวนเคส  $D_t$  คือการเสียชีวิตรายวัน  $\varepsilon_f$  คือความยืดหยุ่นของอัตราการเสียชีวิตของเคสเทียบกับจำนวนเคส และ  $\varepsilon_h$  คือความยืดหยุ่นของจำนวนชั่วโมงต่อสัปดาห์เทียบกับการจ้างงาน

ความยืดหยุ่น  $\varepsilon_h$  ประเมินค่าจากข้อมูลชั่วโมงและการว่างงานสะสมของสหรัฐอเมริกา และความยืดหยุ่น  $\varepsilon_f$  ประเมินค่าจากข้อมูลจำนวนเคสและการเสียชีวิตตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคมถึง 22 ตุลาคม 2020 (ช่วงเวลาที่จำนวนการตรวจค่อนข้างคงที่)



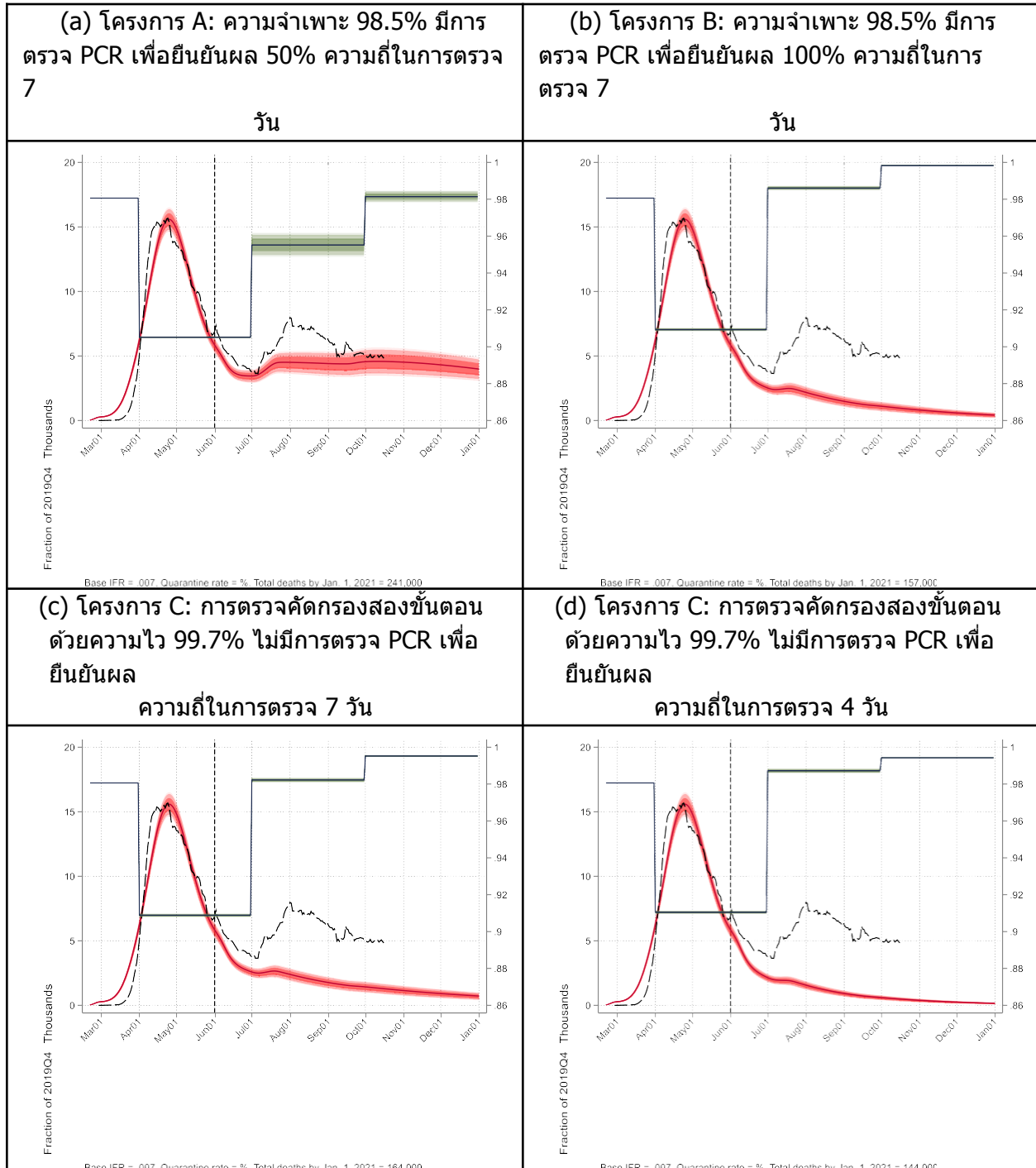
ประโยชน์ในแง่ GDP เมื่อใช้กฎของ Arnon และคณะจะน้อยกว่ากฎ BFMS อย่างไรก็ตาม โครงการทั้งหมด ยังคงให้ประโยชน์มหาศาลทั้งประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิและประโยชน์รวมสุทธิ จากการประมาณการ โครงการตรวจคัดกรอง B และ C น่าจะสร้างรายได้ของรัฐมากกว่าต้นทุนในการตรวจภายใต้กฎของ Arnon และคณะ อย่างไรก็ตาม โครงการตรวจคัดกรอง A ไม่เป็นเช่นนั้น

### 3.5. พลวัตของสถานการณ์ที่เลือก

ภาพประกอบ 9 แสดงเส้นทางเวลาที่จำลองขึ้นของการเสียชีวิตและ GDP รายไตรมาส พร้อมด้วยแถบข้อผิดพลาดมาตรฐานและการเสียชีวิตจริง สำหรับสถานการณ์จำลองซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นจริงสี่รูปแบบ ส่วน (a), (b) และ (c) แสดงโครงการ A, B และ C ตามลำดับ สำหรับอัตราการตรวจทุกสัปดาห์ และแผนภูมิ (d) แสดงโครงการ C สำหรับอัตราการตรวจทุกสัปดาห์ ซึ่งทั้งหมดคำนวณขึ้นภายใต้สมมติฐานของตารางที่ 1 ทุกกรณีในภาพประกอบ 9 มีเส้นทางจำนวนการเสียชีวิตต่ำกว่าและมีเส้นทาง GDP สูงกว่าเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีตรวจคัดกรองในภาพประกอบ 2

โครงการ A ช่วยชะลอการระบาดของไวรัสได้ แต่ไม่สามารถยับยั้งได้ อย่างไรก็ตาม แผนภูมิอื่นๆ มีความสามารถใกล้เคียงการยับยั้ง และการตรวจสอบสองขั้นตอน (โครงการ C) ด้วยอัตราทุก 4 วันสามารถยับยั้งไวรัสได้อย่างได้ผล ซึ่งส่งเสริมการฟื้นตัวทางเศรษฐกิจอย่างเข้มแข็ง เมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ โครงการ B และ C น่าจะสามารถหลีกเลี่ยงการระบาดระลอกที่สองในฤดูร้อนและฤดูใบไม้ร่วงได้

**ภาพประกอบ 9 เส้นทางการเสียชีวิตและ GDP ตามความเป็นจริงและจากการจำลอง**



หมายเหตุ: โครงการตรวจคัดกรอง A, B และ C มีลักษณะเดียวกับในตารางที่ 1 โปรดดูหมายเหตุที่ภาพประกอบ 2

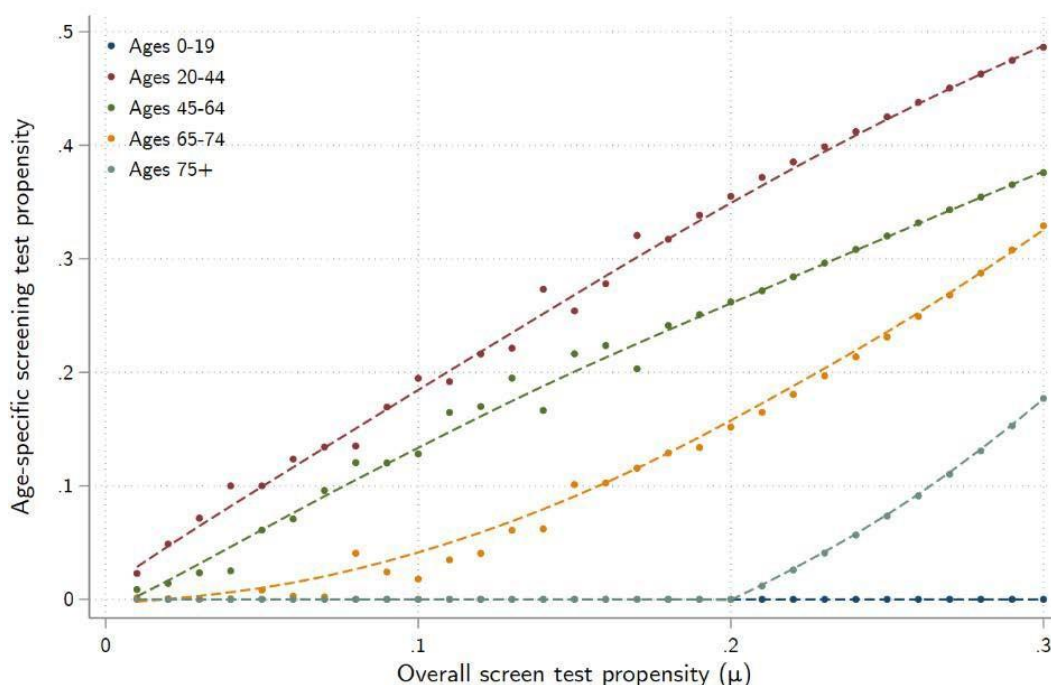
#### 4. การตรวจคัดกรองเจาะจงกลุ่มอายุ

การตรวจคัดกรองอย่างเจาะจงลักษณะของบุคคลอาจให้ประสิทธิผลสูงกว่าการตรวจคัดกรองโดยสุ่มทั้ง

กลุ่มประชากร เนื่องจากการสัมผัสและอัตราการเสียชีวิตมีความแตกต่างกันไปตามอายุ หมวดนี้จึงพิจารณาถึงตรวจคัดกรองโดยสุ่มภายในหมวดหมู่อายุ โดยมีอัตราการตรวจแตกต่างกันในหมวดหมู่ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เราคำนวณอัตราการตรวจตามกลุ่มอายุที่ทำให้ได้ประโยชน์รวมสุทธิสูงสุด (เศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิตที่ดีเป็นเงิน) ของการตรวจคัดกรอง โดยมีข้อจำกัดคืออัตราการตรวจคัดกรองทั้งกลุ่มประชากรมีค่าตามที่กำหนดค่าหนึ่ง

ผลลัพธ์ของการคำนวณครั้งแรก คืออัตราการตรวจเจาะจงกลุ่มอายุที่เหมาะสมที่สุด สำหรับโครงการตรวจคัดกรอง B (การตรวจคัดกรองมีความจำเพาะ 98.5% และทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี) จะแสดงในภาพประกอบ 10 ซึ่งแต่ละเส้นคือความน่าจะเป็นของการตรวจสำหรับกลุ่มอายุหนึ่ง อัตราการตรวจโดยปรับเปลี่ยนกลุ่มอายุอย่างเหมาะสมที่สุดมีค่าสูงสุดสำหรับกลุ่มผู้ใหญ่วัยหนุ่มสาว (อายุ 20-44 ปี) ตามด้วยกลุ่มอายุ 45-64 ปี ตามด้วยกลุ่มอายุ 65-74 ปี ผลลัพธ์เหล่านี้ระบุว่าสามารถใช้การตรวจคัดกรองและการกักตัวเพื่อตัดวงจรการแพร่ของโรคจากผู้ใหญ่วัยกลางคนไปยังผู้สูงอายุได้ ไม่ว่าผ่านครอบครัวหรือผ่านพนักงานที่ดูแลผู้สูงอายุ ซึ่งเมื่อเทียบกับกลุ่มอายุอื่นๆ พบว่าการกำหนดกลุ่มเป้าหมายดังกล่าวให้ประโยชน์ในแง่อัตราการใช้ชีวิตเหนือต้นทุนทางเศรษฐกิจในการกักตัวกลุ่มประชากรวัยทำงานที่เป็นกลุ่มค่อนข้างใหญ่กว่า

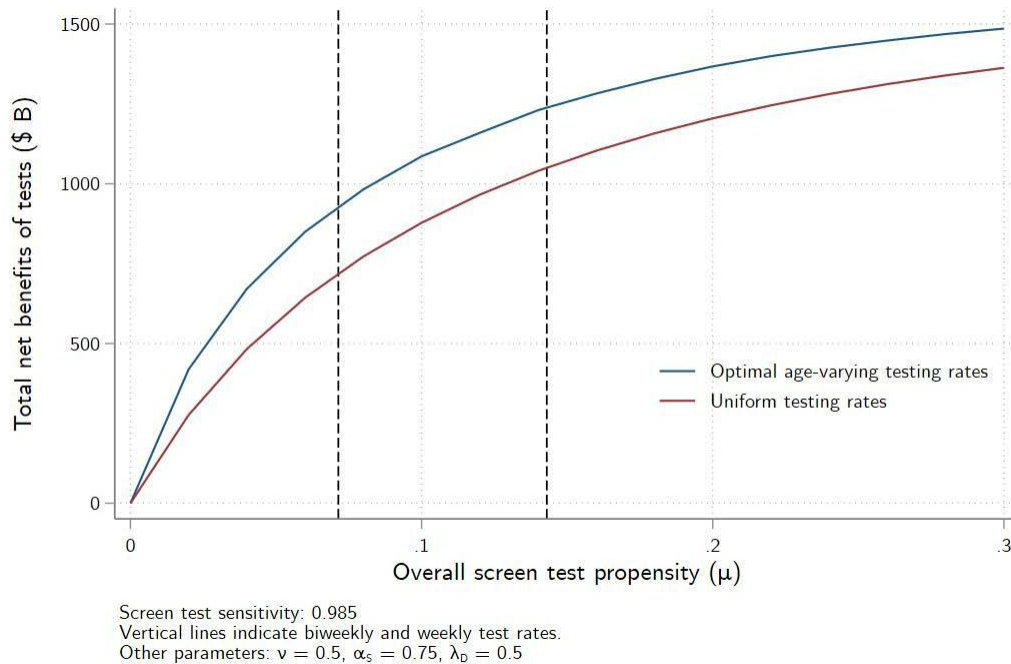
**ภาพประกอบ 10 อัตราการตรวจคัดกรองเจาะจงกลุ่มอายุที่ทำให้ได้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิสูงสุด**



หมายเหตุ: จุดที่แสดงคือค่าประมาณตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราการตรวจกลุ่มประชากรโดยรวม  $\mu$  ที่กำหนด และเส้นต่างๆ ได้รับการปรับให้สม่ำเสมอโดยการประมาณการตามกลุ่มอายุ

ภาพประกอบ 11 แสดงประโยชน์สุทธิรวมสำหรับการตรวจคัดกรองเจาะจงกลุ่มอายุ และสำหรับการตรวจคัดกรองแบบสุ่มประชากรเพื่อการเปรียบเทียบ เมื่อใช้อัตราการตรวจต่ำ การตรวจเจาะจงเป้าหมายจะให้ประโยชน์อย่างมากเมื่อใช้การจัดสรรที่ไม่จำกัดในภาพประกอบ 10 ประโยชน์ที่ได้รับเหล่านี้จะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการตรวจเนื่องจากไวรัสถูกยับยั้ง อย่างไรก็ตาม ประโยชน์สุทธิจะสูงกว่าเสมอหากใช้กลยุทธ์เจาะจงกลุ่มอายุ อย่างไรก็ตาม เราพบว่าต้นทุนในกรณีนี้ไม่ได้รวมถึงต้นทุนด้านการพัฒนาและด้านการศึกษาสำหรับเด็กที่ไม่สามารถไปโรงเรียนได้ ซึ่งการรวมต้นทุนดังกล่าวจะเป็นเหตุผลเพิ่มเติมในการตรวจกลุ่มอายุน้อยเพื่อให้โรงเรียนสามารถกลับมาเปิดอีกครั้งและทำการสอนต่อไปได้

**ภาพประกอบ 11 ประโยชน์สุทธิรวมจากการตรวจคัดกรองโดยเจาะจงกลุ่มอายุและไม่พิจารณาอายุ**



## 5. การอภิปราย

ค่าตัวเลขที่เฉพาะเจาะจงซึ่งรายงานในที่นี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางระบาดวิทยา เศรษฐศาสตร์ และค่าตามการออกแบบของโครงการ ทั้งที่ได้จากการประมาณการหรือการเปรียบเทียบ ซึ่งค่าทั้งหมดนี้มีความไม่แน่นอน ความไม่แน่นอนดังกล่าวแสดงให้เห็นในการวิเคราะห์ความไวในหมวด 3.4 ด้วยเหตุนี้ เราจึงไม่เน้นถึงชุดค่าตัวเลขที่เฉพาะเจาะจง แต่จะเน้นทำการสรุปทิศทางโดยรวมว่าโครงการตรวจคัดกรองหลายขั้นตอนที่มีความจำเพาะสูง และได้รับการออกแบบเพื่อให้ได้รับความร่วมมือสูง มีศักยภาพทั้งในการป้องกันการเสียชีวิตและให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมาก

มีข้อถกเถียงที่สำคัญหกเรื่องเกี่ยวกับการตรวจคัดกรองเป็นวงกว้าง (เช่น Pettengill และ McAdam (2020)) เรื่องแรก ความจำเพาะที่ต่ำจะลดทอนความเชื่อถือได้ของโครงการ และนำไปสู่การให้ความร่วมมือต่ำและปฏิเสธที่จะกักตัวเมื่อได้ผลบวก เรื่องที่สอง ความจำเพาะที่ต่ำทำให้พนักงานที่มีสุขภาพดีจำนวนมากต้องหยุดงานโดยไม่จำเป็น เรื่องที่สาม เนื่องจากการตรวจแอนติเจนมีความไวต่ำกว่าการตรวจ PCR จึงไม่สามารถระบุผู้ที่ติดเชื้อจำนวนมาก ซึ่งจะลดทอนประสิทธิภาพของโครงการ เรื่องที่สี่ หากได้รับการอุดหนุนโดยรัฐ ต้นทุนดังกล่าวจะสูงมาก ขณะที่การขาดทุนสะสมของรัฐจะสูงมากหลังจากการรับมือโรคระบาด เรื่องที่ห้า เพื่อให้ได้ผล จึงต้องดำเนินการในระดับที่เข้มข้นจนทำได้ยาก เช่น ตรวจทุกวันหรือวันเว้นวัน เรื่องที่หก การมีโครงการตรวจคัดกรองอาจทำให้พฤติกรรมเปลี่ยนไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นลบระมัดระวังน้อยลง เช่น มีความเต็มใจน้อยลงที่จะสวมหน้ากาก

การวิเคราะห์ของเราได้ตอบข้อกังวลำเรื่องแรกเหล่านี้ ผลลัพธ์ของเราได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของข้อกังวลสองเรื่องแรก นั่นคือ จากการวิเคราะห์ของเรา พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดคือความจำเพาะของการตรวจคัดกรอง โครงการตรวจคัดกรองจะต้องมีค่าความจำเพาะสูง จึงจะมีความน่าเชื่อถือและทำให้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดี ค่าความจำเพาะสูงดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้โดยใช้การตรวจแบบสองขั้นตอน หากการตรวจมีความเป็นอิสระต่อกันอย่างเพียงพอ ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นของการตรวจแบบสองขั้นตอนถือว่าไม่สูงนัก เมื่อเปรียบเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ แม้การตรวจขั้นที่สองจะเป็นวิธี PCR ก็ตาม ซึ่งการตรวจคัดกรองโดยทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะทำให้ได้รับประโยชน์สุทธิอย่างมาก โดยปกติแล้วความจำเพาะของการตรวจจะประมาณค่าขึ้นในห้องทดลองโดยใช้ตัวอย่างจำนวนน้อย ดังนั้นความจำเพาะของการตรวจในสถานการณ์จริงอาจแตกต่างอย่างมากจากค่าประมาณการในห้องทดลอง เนื่องจากค่าความจำเพาะต่ำส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของโครงการตรวจ ความไม่แน่นอนดังกล่าวจึงเป็นการเน้นย้ำถึงความสำคัญของการตรวจยืนยันผลเพื่อเพิ่มความจำเพาะ

ข้อกังวลเรื่องที่สาม ค่าความไว ประเด็นนี้ถูกต้องในทางทฤษฎี แต่การจำลองโมเดลของเรา (เช่น Larremore และคณะ (2020)) พบว่าแม้ความไวจะลดลงอย่างมาก เช่น 90% ก็ส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ต่อพลวัตทางระบาดวิทยาและเศรษฐกิจ ข้อกังวลเรื่องที่สี่ ความยั่งยืนทางการเงิน ประเด็นนี้มีความถูกต้องในทางทฤษฎีเช่นกัน แต่การประมาณการของเราชี้ว่าประโยชน์ที่ได้รับในทางเศรษฐกิจจากการยับยั้งไวรัสมีมหาศาลและทำให้การทดสอบเป็นสิ่งที่คุ้มค่าเนื่องจากรายได้ที่เพิ่มขึ้น สำหรับข้อกังวลเรื่องที่ห้า ขนาดของการตรวจ เราพบว่า การตรวจทุกสัปดาห์ในแบบแผนที่ได้รับความร่วมมือสูงให้ผลใกล้เคียงการยับยั้งไวรัส และจะได้ผลสูงเมื่อปรับไปใช้การตรวจทุกสัปดาห์ การตรวจสัปดาห์ด้วยการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5% และทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี จะทำให้จำนวนการตรวจ PCR เพิ่มขึ้นประมาณสามในสี่เท่าของอัตราที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน การตรวจทุกสัปดาห์จะทำให้การตรวจ PCR เพิ่มขึ้นกว่าสองเท่าของความสามารถในการรองรับ

การวิเคราะห์ของเราไม่ได้ตอบข้อกังวลำเรื่องสุดท้ายที่ว่า การตรวจจะทำให้เกิดพฤติกรรมที่เสี่ยงมากขึ้น แม้เช่นนั้นเรื่องนี้ก็ไม่สามารถทราบได้อย่างชัดเจนว่าจะเป็นจริง ผู้คนต่างให้ความร่วมมือในการระงับทางสังคมและสวมหน้ากากเพื่อป้องกันตนเอง ป้องกันผู้อื่น และเพื่อปฏิบัติตามบรรทัดฐานและกฎหมายของท้องถิ่น การได้รับผลตรวจเป็นลบในตอนเช้าไม่ได้ลดความตั้งใจที่จะป้องกันตัวเองตลอดทั้งวันนั้น ผลกระทบต่อพฤติกรรมจากผลตรวจเป็นบวกมีความคลุมเครือ นั่นคือ ความเห็นแก่ผู้อื่นจะส่งผลให้บุคคลลดการสัมผัสแม้จะไม่ได้กักตัว แต่ความไม่กังวลถึงสุขภาพของตนเองและเห็นแก่สุขภาพผู้อื่นเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดพฤติกรรมที่มีความเสี่ยงมากขึ้น จำเป็นต้องมีการวิจัยเชิงประจักษ์เกี่ยวกับผลกระทบดังกล่าว

การวิเคราะห์ในที่นี้มีการลดความซับซ้อนหลายประการ จึงมีข้อแม้จำนวนมาก ในด้านเศรษฐกิจ แนวคิดเกี่ยวกับ GDP ในเอกสารนี้คือผลผลิตของภาคเอกชน และไม่ได้รวมถึงมาตรการรับมือฉุกเฉินซึ่งทำให้มีการขาดทุนสะสมที่ต้องดำเนินการในระหว่างระบาดใหญ่ โมเดลดังกล่าวเป็นค่าประมาณการสำหรับทั้งประเทศสหรัฐอเมริกา จึงจำเป็นต้องมองข้ามลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค และอาจไม่ได้จำลองถึงความขัดแย้งหรือพลวัตที่ส่งผลปรับเปลี่ยนต่างๆ นอกเหนือจากที่เกิดขึ้นจากพลวัตทางระบาดวิทยา

ในแง่ระบาดวิทยา เราไม่ได้รวมการติดตามการติดต่อไว้ด้วย เนื่องจากโดยทั่วไปไม่สามารถทำการติดตามการติดต่อได้อย่างทันต่อสถานการณ์ในสหรัฐอเมริกาในขณะนี้ การติดตามการติดต่อจะช่วยเพิ่มประโยชน์ของการตรวจที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจากการตรวจ PCR เพิ่มเติมภายในระบบสาธารณสุข

เนื่องจากจะสามารถระบุจำนวนเคสได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ต้นทุนจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย และลำดับต่อไปคือต้องทำการประเมินต้นทุน-ประโยชน์ ของการรวมการตรวจคัดกรองเข้ากับการติดตามการติดต่อที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (และได้รับความร่วมมือบางส่วน) อีกประการหนึ่ง โมเดลนี้ไม่ได้แยกแยะความแตกต่างระหว่างสถานที่ทำงานที่มีความเสี่ยงสูงและต่ำ จากที่เราพบประโยชน์ของการตรวจคัดกรองโดยเจาะจงกลุ่มอายุ ก็เป็นไปได้ว่าการตรวจคัดกรองโดยเจาะจงตามจำนวนการติดต่อจากงานนั้นๆ น่าจะเกิดประโยชน์เช่นกัน นอกจากนี้ เราไม่ได้จำลองโมเดลการตรวจแบบพูล หากผลิตรวดตรวจแอนติเจนได้ซ้ำ อาจใช้วิธีการตรวจแบบพูล เช่น ในระดับรวมทั้งครัวเรือน โดยมีการยืนยันผลด้วยการตรวจแอนติเจนหรือการตรวจ PCR หรือทั้งสองวิธี ซึ่งวิธีดังกล่าวมีศักยภาพที่จะช่วยเพิ่มอัตราส่วนประโยชน์-ต้นทุน และเราไม่ได้จำลองโมเดลความตั้งใจที่จะทำให้ได้รับความร่วมมือในการกักตัวตามคำแนะนำมากขึ้น แม้การวิเคราะห์ความไวของเรายืนยันว่าความร่วมมือที่เพิ่มขึ้นจะช่วยยับยั้งไวรัสได้ดีขึ้นก็ตาม สำหรับบางคน การให้ความร่วมมือเป็นการตอบสนองทางพฤติกรรม แต่สำหรับคนอื่นๆ การให้ความร่วมมือเป็นไปได้ยากเนื่องจากสภาพการดำรงชีวิต (มีเพื่อนร่วมห้อง หรือครอบครัวใหญ่ที่อาศัยอยู่ในอาคารเดียวกัน) หรือเนื่องจากปัจจัยทางการเงินเพราะต้องขาดงาน ซึ่งในกลุ่มเหล่านี้การเข้าจัดการตามนโยบายเคสจะช่วยผู้ที่ต้องการให้ความร่วมมือกักตัวได้ นอกจากนี้ เราไม่ได้พิจารณาการตรวจ PCR ซ้ำ เนื่องจากขณะนี้สามารถรองรับการตรวจ PCR ได้จำกัด อย่างไรก็ตาม การตรวจ PCR ซ้ำอาจมีประโยชน์ในการระบุสถานะของการติดเชื้อ จึงช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนระยะเวลาของการกักตัวให้เหมาะสมกับบุคคลได้โดยละเอียด และลดภาระโดยรวมในการกักตัว (Kissler และคณะ (2020))

ท้ายสุด การศึกษาของเราเกี่ยวกับประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรองโควิด 19 ไม่ได้พิจารณาถึงประโยชน์ทางสาธารณสุขของข้อมูลที่ได้สร้างขึ้นจากโครงการเฝ้าระวังโรคดังกล่าว (เราตระหนักว่าได้มีการตรวจเพื่อวัตถุประสงค์ในการวินิจฉัยโรคและในด้านสาธารณสุขสำหรับใช้หัตถ์ใหญ่ตามฤดูกาลและเพื่อหาสายพันธุ์ใหม่ของใช้หัตถ์ใหญ่ A เป็นระยะอยู่แล้ว) แม้ผลการตรวจคัดกรองที่บ้านไม่ได้รวมเข้าไปในระบบข้อมูลสาธารณะ แต่การตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะช่วยเพิ่มความครอบคลุมของข้อมูลเนื่องจากจะไม่มีการจำกัดการตรวจเพียงเพื่อวินิจฉัยผู้ที่แสดงอาการเท่านั้น ดังที่เป็นอยู่ในขณะนี้ ด้วยเหตุนี้ แบบแผนการตรวจของเราน่าจะช่วยให้มีการวิเคราะห์ที่ทันทั่วถึงและละเอียดลออยิ่งขึ้นอย่างมากเกี่ยวกับความชุกและการแพร่ของโควิด 19 สำหรับใช้ในกลยุทธ์การควบคุมด้านสาธารณสุขและการบรรเทาการระบาดได้อย่างครอบคลุมมากกว่าที่สามารถทำได้ด้วยข้อมูลการตรวจวินิจฉัยเท่าที่มีอยู่ในขณะนี้ สันนิษฐานได้ว่าการพิจารณาถึงการใช้งานข้อมูลที่สร้างขึ้นจากแบบแผนการตรวจคัดกรองเป็นวงกว้างเพื่อช่วยปรับรูปแบบของมาตรการบรรเทาการระบาดที่ได้ผลและต้นทุนต่ำ จะช่วยเพิ่มประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

## ภาคผนวก 1

ภาคผนวกนี้เสนอรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับโมเดล ซึ่งขยายขอบเขตของโมเดลที่พัฒนาขึ้นใน Baqaee, Farhi, Mina และ Stock (2020) โมเดลของเราได้เพิ่มแง่มุมสำคัญหลายอย่างแตกต่างไปจาก BFMS ประการแรก เราได้ขยายโมเดลให้ครอบคลุมทั้งแบบแผนการตรวจคัดกรองและแบบแผนการตรวจวินิจฉัย ประการที่สอง เราถือว่าบุคคลได้รับคำแนะนำให้กักตัวเมื่อได้รับผลบวกเป็นที่ยุติ ไม่ว่าจากการตรวจคัดกรองโดยไม่มีการตรวจยืนยันผล หรือจากการตรวจวินิจฉัยที่ได้ผลบวกผู้ที่รอผลการตรวจวินิจฉัยได้รับคำแนะนำให้กักตัวเอง ประการที่สาม เราได้แยกแยะผู้ที่เพิ่งหายป่วยและผู้ที่ฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์ออกจากโรค เพื่อชี้ให้เห็นว่าบุคคลเหล่านี้อาจยังคงได้ผลบวกจากการตรวจ PCR หลังจากที่ไม่สามารถแพร่เชื้อได้แล้วก็ตาม ประการสุดท้าย เรากำหนดให้มีความร่วมมือเพียงบางส่วนในการกักตัวผู้ที่มีความเสี่ยงและผู้ป่วย

### โมเดลทางระบาดวิทยา

กลุ่มอายุมีห้ากลุ่ม ซึ่งระบุด้วย  $a$  หมายถึงอายุ 0-19, 20-44, 45-64, 65-74 และ 75 ปีขึ้นไป เซกเตอร์ธุรกิจเอกชนมี 66 เซกเตอร์ ซึ่งระบุด้วย  $i$  บุคคลจะแบ่งออกเป็นกลุ่ม  $S$  (Susceptible - มีโอกาสติดเชื้อ),  $E$  (Exposed - ใต้เชื้อ),  $I$  (Infected - ติดเชื้อ),  $R$  (Recently recovered - เพิ่งหายป่วย),  $F$  (Fully recovered - ฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์) หรือ  $D$  (Dead - เสียชีวิต) นอกจากนี้ ผู้ที่ไม่เสียชีวิตจะอยู่ในกลุ่ม Actively circulating - พร้อมเป็นพาหะ (A) Awaiting diagnostic test results - รอผลการตรวจวินิจฉัย (D) Awaiting screening test results - รอผลการตรวจคัดกรอง (S) หรือ In isolation following a positive test - กักตัวหลังจากได้ผลตรวจเป็นบวก (Q) ดังนั้น ประชากรถูกจัดกลุ่มสถานะของโรคเป็น 21 สถานะ เช่น  $SA_2$   $SS_2$   $SAD_2$  และ  $SQ_2$  หมายถึงจำนวนผู้ที่มีอายุ 20-44 ที่มีโอกาสติดเชื้อและพร้อมเป็นพาหะ มีโอกาสติดเชื้อและรอผลการตรวจคัดกรอง มีโอกาสติดเชื้อและรอผลการตรวจวินิจฉัย และ มีโอกาสติดเชื้อและอยู่ระหว่างกักตัว ตามลำดับ เราถือว่าผู้ที่หายป่วย (ทั้งกลุ่มเพิ่งหายป่วยและฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์) มีภูมิคุ้มกันจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาการจำลองของเรา

อัตราการตรวจคัดกรองและการตรวจวินิจฉัยจะระบุด้วยพารามิเตอร์  $\mu$ ,  $\rho_0$  และ  $\rho_1$  ดังที่ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 2 เราถือว่าพารามิเตอร์เหล่านี้เท่ากับศูนย์ในระยะเวลาประมาณการของโมเดลของเรา คือตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน และได้รับการปรับเทียบหลังจากนั้นตามข้อความหลักของเอกสารนี้

ตัวแปรสถานะของโรค (นั่นคือ  $SA$ ) คือเวกเตอร์ห้ามิติทั้งหมด กำหนดให้  $Xa$  เป็นองค์ประกอบที่  $a$  ของสถานะของโรคสถานะใดก็ได้  $X$  (กลุ่มอายุที่  $a$ ) ด้านระบาดวิทยาของโมเดลนี้มีสมการการเปลี่ยนผ่าน 21 สมการ ได้แก่



$$dSA_a = q_S \lambda_S SS_a + q_D \lambda_D SD_a + \zeta SQ_a - \beta SA_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} - \mu SA_a - \rho_0 SA_a \quad (1)$$

$$dSS_a = \mu SA_a - \beta SS_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} - (1 - q_S) \lambda_S SS_a - q_S \lambda_S SS_a \quad (2)$$

$$dSD_a = (1 - q_S) \nu \lambda_S SS_a + \rho_0 SA_a - \alpha_S \beta SD_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} - (1 - q_D) \lambda_D SD_a - q_D \lambda_D SD_a \quad (3)$$

$$dSQ_a = (1 - q_S)(1 - \nu) \lambda_S SS_a + (1 - q_D) \lambda_D SD_a - \zeta SQ_a - \alpha \beta SQ_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} \quad (4)$$

$$dEA_a = \beta SA_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} + q_S \lambda_S ES_a + q_D \lambda_D ED_a + \zeta EQ_a - \mu EA_a - \rho_0 EA_a - \sigma EA_a \quad (5)$$

$$dES_a = \mu EA_a + \beta SS_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} - q_S \lambda_S ES_a - (1 - q_S) \lambda_S ES_a - \sigma ES_a \quad (6)$$

$$dED_a = (1 - q_S) \nu \lambda_S ES_a + \rho_0 EA_a + \alpha_S \beta SD_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} - q_D \lambda_D ED_a - (1 - q_D) \lambda_D ED_a - \sigma ED_a \quad (7)$$

$$dEQ_a = \alpha \beta SQ_a \sum_b C_{ab} \frac{Inf_b}{N_b} + (1 - q_S)(1 - \nu) \lambda_S ES_a + (1 - q_D) \lambda_D ED_a - \sigma EQ_a - \zeta EQ_a \quad (8)$$

$$dIA_a = \sigma EA_a + (1 - p_S) \lambda_S IS_a + (1 - p_D) \lambda_D ID_a + \zeta IQ_a - \mu IA_a - \rho_1 IA_a - \delta_a IA_a - \gamma IA_a \quad (9)$$

$$dIS_a = \sigma ES_a + \mu IA_a - (1 - p_S) \lambda_S IS_a - p_S \lambda_S IS_a - \delta_a IS_a - \gamma IS_a \quad (10)$$

$$dID_a = p_S \nu \lambda_S IS_a + \sigma ED_a + \rho_1 IA_a - (1 - p_D) \lambda_D ID_a - p_D \lambda_D ID_a - \delta_a ID_a - \gamma ID_a \quad (11)$$

$$dIQ_a = \sigma EQ_a + p_S(1 - \nu) \lambda_S IS_a + p_D \lambda_D ID_a - \zeta IQ_a - \delta_a IQ_a - \gamma IQ_a \quad (12)$$

$$dRA_a = \gamma IA_a + q_S \lambda_S RS_a + (1 - p_D) \lambda_D RD_a + \zeta RQ_a - \mu RA_a - \rho_1 RA_a - \theta RA_a \quad (13)$$

$$dRS_a = \gamma IS_a + \mu RA_a - q_S \lambda_S RS_a - (1 - q_S) \lambda_S RS_a - \theta RS_a \quad (14)$$

$$dRD_a = (1 - q_S) \nu \lambda_S RS_a + \gamma ID_a + \rho_1 RA_a - (1 - p_D) \lambda_D RD_a - p_D \lambda_D RD_a - \theta RD_a \quad (15)$$

$$dRQ_a = \gamma IQ_a + (1 - q_S)(1 - \nu) \lambda_S RS_a + p_D \lambda_D RD_a - \zeta RQ_a - \theta RQ_a \quad (16)$$

$$dFA_a = \theta RA_a + q_S \lambda_S FS_a + q_D \lambda_D FD_a + \zeta FQ_a - \mu FA_a - \rho_0 FA_a \quad (17)$$

$$dFS_a = \theta RS_a + \mu FA_a - q_S \lambda_S FS_a - (1 - q_S) \lambda_S FS_a \quad (18)$$

$$dFD_a = (1 - q_S) \nu \lambda_S FS_a + \theta RD_a + \rho_0 FA_a - q_D \lambda_D FD_a - (1 - q_D) \lambda_D FD_a \quad (19)$$

$$dFQ_a = \theta RQ_a + (1 - q_S)(1 - \nu) \lambda_S FS_a + (1 - q_D) \lambda_D FD_a - \zeta FQ_a \quad (20)$$

$$dD_a = \delta_a (IA_a + ID_a + IS_a + IQ_a) \quad (21)$$

ซึ่ง  $N_a$  คือจำนวนผู้ที่มีอายุในกลุ่ม  $a$  (รวมกันทั้ง 21 สถานะ) และ  $Inf_a$  คือจำนวนประสิทธิผลของผู้ที่ติดเชื้อซึ่งพร้อมเป็นพาหะ  $Inf_a = IA_a + IS_a + \alpha ID_a + \alpha IQ_a$  ในนิพจน์สุดท้ายนี้เราให้ค่าบ่งบอกของการรับการตรวจวินิจฉัยเท่ากับการรับการตรวจคัดกรองได้ผลบวก (ซึ่งเหมือนกับการได้ผลบวกจากการตรวจคัดกรองและเข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล) ดังนั้นการไม่ให้ความร่วมมือกักตัวจึงเท่ากับการไม่ให้ความร่วมมือเมื่อได้ผลตรวจคัดกรองเป็นบวกเป็นที่ยุติ

พารามิเตอร์  $\alpha$  คือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\alpha_D$  ซึ่งเป็นอัตราการให้ความร่วมมือกักตัวสำหรับผู้ที่ได้รับการตรวจคัดกรองและการตรวจวินิจฉัยตามลำดับ คำนำนั้หนักดังกล่าวได้รับการกำหนดและระบุโดยไม่มีปัจจัยจากภายนอก ตามสัดส่วนสัมพัทธ์ของผู้ที่ได้รับคำแนะนำให้กักตัว

หลังจากเข้ารับการตรวจคัดกรองเทียบกับหลังจากการตรวจวินิจฉัย ดังนั้น  $\alpha$  คืออัตราการให้ความร่วมมือ ประสิทธิภาพของผู้ที่อยู่ระหว่างการกักตัว หากผู้ที่กักตัวมาจากแบบแผนการตรวจคัดกรองเป็นส่วนใหญ่ ค่า  $\alpha$  จะใกล้เคียงกับ  $\alpha$  อัตราการให้ความร่วมมือกักตัวสำหรับประชากรที่ได้รับการคัดกรอง

เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรากฏในสมการ (1) จนถึง (21) ข้างต้น และกำหนดสภาวะตั้งต้น จะสามารถใช้โมเดลนี้เพื่อหาคำตอบในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างไม่ยุ่งยาก ด้วยการทำซ้ำต่อไปข้างหน้า หน่วยของเวลาคือหนึ่งวัน และโมเดลนี้จะหาคำตอบ 12 ชั้นในแต่ละวัน

### เมทริกซ์การสัมผัส

เมทริกซ์การสัมผัส  $C$  อธิบายถึงจำนวนการติดต่อที่คาดไว้ระหว่างแต่ละกลุ่มอายุในกลุ่มประชากร ผู้ที่พร้อมเป็นพาหะในกลุ่มอายุ  $a$  ซึ่งมีการโต้ตอบกับผู้ที่อยู่ในกลุ่มอายุ  $b$  มีความเป็นไปได้ในการติดเชื้อในทันที  $\beta$  เท่าของความเป็นไปได้ที่ผู้ที่อยู่ในกลุ่มอายุ  $b$  จะติดเชื้อ ความเป็นไปได้ที่ผู้ที่มีอายุในกลุ่ม  $a$  จะติดเชื้อในช่วงเวลาที่กำหนดจึงระบุได้โดยการรวมการติดต่อทั้งหมดของพวกเขา เราได้แยกแยะการสัมผัสที่เกิดขึ้นที่บ้าน ที่ทำงาน และที่อื่นๆ เมทริกซ์การสัมผัสจะแปรผันตามเวลา และสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากหลายปัจจัย เช่น NPI ที่รัฐบาลใช้ หรือการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมส่วนบุคคลเพื่อหลีกเลี่ยงการได้รับไวรัส เป็นต้น เรามี

$$C_{ab} = p_a^{home} C_{ab}^{home} + p_a^{other} C_{ab}^{other} + \sum_{sectors\ i} p_{a,i}^{work} C_{ab,i}^{work} \quad (22)$$

เมื่อ  $C_{ab}^{home}, C_{ab}^{other}, C_{ab}^{work}$  แสดงจำนวนที่คาดไว้ของการสัมผัสที่บ้าน ที่ทำงาน และสภาพแวดล้อมอื่นๆ แต่ละแห่ง ในกรณีเมื่ออยู่ที่บ้าน ที่ทำงาน หรือที่อื่นๆ พารามิเตอร์

$p_a^{home}, p_a^{other}$  และ  $p_{a,i}^{work}$  แสดงความเป็นไปได้ที่ผู้ที่อยู่ในกลุ่มอายุ  $a$  จะอยู่ที่บ้าน ที่ทำงาน หรือที่อื่นๆ เราทราบว่า  $p_{a,i}^{work}$  คือส่วนที่มีการจ้างงานในเซกเตอร์ที่แสดง

$$p_{a,i}^{work} = \frac{L_{a,i}}{N_a} \quad (23)$$

เมื่อ  $L_{a,i}$  คือจำนวนพนักงานในกลุ่มอายุ  $a$  ซึ่งทำงานในเซกเตอร์  $i$

สำหรับข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับประมาณการจากการสร้างและจากประวัติของเมทริกซ์การสัมผัส โปรดดูหมวด 1.2 และ 2 ของ BFMS (2020)

### กฎการควบคุมย้อนกลับทางพฤติกรรม

องค์ประกอบทางพฤติกรรมของโมเดลนี้จะกำหนดเมทริกซ์การสัมผัสในช่วงเวลาของการจำลองของเรา (กล่าวคือ หลังจากวันที่ 1 มิถุนายน) โดยไม่มีปัจจัยจากภายนอก ส่วนนี้ของโมเดลไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก BFMS 2020 เราจะอธิบายโดยคร่าวถึงองค์ประกอบสำคัญของกฎควบคุมในส่วนนี้เพื่อความสะดวกในช่วงเวลาการจำลองของเรา (วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 ธันวาคม) เราถือว่าเมทริกซ์การสัมผัสตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแนวทางของการระบาดใหญ่โดยไม่มีปัจจัยจากภายนอก เราได้นำมาปรับใช้โดย

ใช้กฎการควบคุมปริพันธ์-อนุพันธ์สัดส่วน (PID) แบบเชิงเส้น ซึ่งการป้อนกลับจะขึ้นอยู่กับ การเสียชีวิตในปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงของการเสียชีวิตใน 14 วัน อัตราการว่างงานในปัจจุบัน และปริพันธ์ของอัตราการว่างงาน กฎการควบคุม PID เชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_t = \kappa_0 + \kappa_{up}U_{t-1} + \kappa_{ui} \int_{t_0}^{t-1} U_s ds + \kappa_{dp}D_{t-1} + \kappa_{dd}\dot{D}_{t-1} \quad (24)$$

เมื่อ  $U_t$  คืออัตราการว่างงาน และ  $D$  คืออนุพันธ์เวลาของอัตราการเสียชีวิต ซึ่งโดยปกติจะไม่ทราบทั้ง  $U_t$  และ  $D$  ค่าดังกล่าวจะมีร่วมกับข้อมูลสะสมเวลาหรือร่วมกับการรายงานความล่าช้าเท่านั้น เราจึงใช้ค่าอัตราการว่างงานเฉลี่ย 14 วัน อัตราการว่างงานรายวันสะสมตั้งแต่วันที่ 7 มีนาคม การเสียชีวิตตลอดสองวันที่ผ่านมา และการเปลี่ยนแปลงในช่วง 14 วันของอัตราการเสียชีวิตในสองวัน สำหรับพจน์ต่างๆ ที่ด้านขวาของสมการนี้

ตัวควบคุม PID จะระบุลำดับของผลกระทบของอุปทานแรงงานในเซกเตอร์ ปรับตามดัชนี GDP ต่อความเสี่ยง ดังนี้

$$s_{it} = s_{it_R} + \Phi(v_t + \kappa_\theta \theta_i)(1 - s_{it_R}) \quad (25)$$

เมื่อ  $s_{it}$  คือจำนวนชั่วโมงแรงงาน  $L_{it}$  ในเซกเตอร์  $i$  ณ วันที่  $t$  ซึ่งเป็นส่วนย่อยของจำนวนชั่วโมงแรงงานก่อนการระบาดใหญ่ (กล่าวคือ กุมภาพันธ์ 2020) และ  $t_R$  คือวันที่เริ่มต้นระยะเวลาของการจำลอง (1 มิถุนายน) และ  $\Phi$  คือการแจกแจงแบบเกาส์สะสม (ซึ่งไม่มีบทบาท ยกเว้นเป็นซิกมอยด์สำหรับจำกัดตัวควบคุมระหว่าง 0 และ 1)

พจน์  $\theta_i$  คือดัชนี GDP ต่อความเสี่ยง นั่นคือ

$$\theta_i = \frac{d \ln Y / d L_{a,i}}{d R_0 / d L_{a,i}} \quad (26)$$

ดัชนี GDP ต่อความเสี่ยงสามารถประเมินค่าขณะที่ตรวจวัดอัตราส่วนอิทธิพลส่วนเพิ่มของผลผลิต เทียบกับอิทธิพลส่วนเพิ่มของ  $R_0$  จากแรงงานเพิ่มเติมในกลุ่มอายุ  $a$  ซึ่งกลับมาทำงานในเซกเตอร์  $i$  ในสเกลจริง ดัชนี GDP ต่อความเสี่ยงไม่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางระบาดวิทยา ยกเว้นเมทริกซ์การสัมผัสหน่วย  $\theta$  ไม่มีความหมาย เราจึงได้กำหนดมาตรฐานให้หมายถึงศูนย์ และเป็นรูปแบบของหน่วยในเซกเตอร์ต่างๆ (ถ่วงน้ำหนักเท่ากัน)

ดังนั้น ตัวควบคุมจึงปรับเปลี่ยนองค์ประกอบการสัมผัสในที่ทำงานของเมทริกซ์การสัมผัสอย่างได้ผล ในทำนองเดียวกัน เราสามารถนึกถึงตัวควบคุมขณะที่สร้างลำดับของผลกระทบของอุปทานแรงงาน ซึ่งสามารถใช้เพื่อค้นหา GDP โดยใช้ทฤษฎีของ Hulten เป็นประมาณการอันดับแรก ดังนี้

$$d \ln Y = \sum \Psi_i d \ln L_i \quad (27)$$

เมื่อตัวห้อย  $\cdot$  แสดงผลรวมตลอดช่วงกลุ่มอายุ และ  $\Psi_i$  แสดงส่วนแบ่งรายได้ของแรงงานสำหรับเซกเตอร์  $i$