

ฉบับแปลไทย (Thai Translation)  
Economic Benefits of COVID-19 Screening Tests

<https://www.nber.org/papers/w28031>

กระดาษทำการของ NBER

ประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรองโควิด 19

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

กระดาษทำการ 28031  
<http://www.nber.org/papers/w2803>  
1

สำนักงานการวิจัยทางเศรษฐกิจแห่งชาติ  
1050 Massachusetts Avenue  
Cambridge, MA 02138  
ตุลาคม 2020

เราขอขอบคุณ Alan Auerbach, Daniel Larremore, Larry Summers และผู้เข้าร่วมการสัมมนาที่มหาวิทยาลัยจอห์ส Hopkins ธนาคารกลางของสหพันธ์ และวิทยาลัยฮาร์วาร์ดเดนเนต์ สำหรับการหารือรวมถึงข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ Droste และ Stock ทราบถึงการสนับสนุนการวิจัยภายใต้ NSF RAPID Grant SES-2032493 มุ่งมั่นที่นำเสนอในที่นี้เป็นของผู้จัดทำ และไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับมุมมองของสำนักงานการวิจัยทางเศรษฐกิจแห่งชาติ

กระดาษทำการ NBER ได้เผยแพร่เพื่อการหารือและการเสนอแนะ ซึ่งไม่ได้ผ่านการพิจารณาโดยผู้มีคุณวุฒิ เท่าเทียมกันหรือต้องได้รับการตรวจสอบโดยคณะกรรมการของ NBER ที่จัดทำสิ่งพิมพ์อย่างเป็นทางการของ NBER

© 2020 โดย Andrew Atkeson, Michael C. Droste, Michael Mina และ James H. Stock สงวนลิขสิทธิ์ทุกประการ การอ้างอิงข้อความเป็นตอนสั้นๆ ความยาวไม่เกินสองย่อหน้า สามารถทำได้โดยไม่ต้องขอสิทธิ์อย่างชัดแจ้ง หากมีการระบุเครดิตต่ออย่างครบถ้วนรวมถึงมีประกาศ © 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

## บทตัดย่อ

เราทำการประเมินถึงคุณค่าทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรองในฐานะนโยบายรับมือการระบาดใหญ่ของโรคโควิด 19 ซึ่งกำลังดำเนินอย่างต่อเนื่อง เราพบว่าโครงการตรวจคัดกรอง SARS-CoV-2 แบบเร็วนั้นให้ประโยชน์ทั้งด้านการเงิน เศรษฐศาสตร์มหาภาค และด้านสุขภาพมากกว่าต้นทุนที่ใช้เป็นอย่างมาก โดยมีอัตราส่วนประโยชน์ทางเศรษฐกิจต่อต้นทุนโดยปกติอยู่ในช่วง 4-15 (ขึ้นอยู่กับรายละเอียดของโครงการ) และยังไม่รวมถึงมูลค่าที่ได้เป็นเงินได้อันเนื่องมาจากการบริโภคที่ปลดภัย อย่างไรก็ตาม การตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียวให้ค่าบ่งบอกต่า นำไปสู่ข้อกังวลเกี่ยวกับการให้ความร่วมมือปฏิบัติตาม เว้นแต่การตรวจคัดกรองจะมีความเฉพาะเจาะจงอย่างมาก การตรวจเพื่อยืนยันผลจะช่วยเพิ่มประโยชน์สุทธิทางเศรษฐกิจของ การตรวจคัดกรอง โดยช่วยลดจำนวนพนักงานที่มีสุขภาพดีแต่ต้องกักตัว และยังเพิ่มการให้ความร่วมมือปฏิบัติตามมาตรการกักตัวอีกด้วย การวิเคราะห์ข้อมูล SIR ทางพฤติกรรมสำหรับประเทศไทยใน 5 กลุ่มอายุ 66 เชกเตอร์เศรษฐกิจ มีการตรวจคัดกรองและวินิจฉัย และได้รับความร่วมมือบางส่วนในการปฏิบัติตามคำแนะนำนำเกี่ยวกับการกักตัวผู้มีความเสี่ยงหรือการกักตัวผู้ป่วย

## 1. บทนำ

งานวิจัยด้านเศรษฐกิจชีงขยะนี้มีเนื้อหาจำนวนมากได้สรุปว่าความถดถอยของกิจกรรมทางเศรษฐกิจอันเนื่องมาจากการระบาดใหญ่ SARS-CoV-2 เป็นผลสืบเนื่องของพฤติกรรมปกป้องตนเอง<sup>1</sup> ความหมายโดยนัยคือ ในการฟื้นฟูอย่างเข้มแข็งในระหว่างที่ยังไม่ได้รับวัคซีน ผู้บริโภคจะต้องรู้สึกปลอดภัยในการซื้อสินค้า พนักงานจะต้องรู้สึกปลอดภัยในการกลับไปทำงาน และผู้ประกอบจะต้องรู้สึกปลอดภัยในการส่งบุตรหลานกลับไปยังโรงเรียน แต่นโยบายสาธารณสุขชี้ “ได้พยายามดำเนินการในสหราชอาณาจักรถึงขนาดนี้ ทั้งการล็อกดาวน์ สวยงามหาก เว้นระยะห่างทางสังคม ความปลอดภัยในที่ทำงาน ปกป้องผู้สูงอายุ เป็นต้น ต่างล้มเหลวในการยับยั้งไวรัส และไม่ช่วยให้มีการฟื้นตัวทางเศรษฐกิจที่ชัดเจน”

แต่ยังมีเครื่องมือสาธารณสุขอีกอย่างหนึ่งที่ยังไม่ได้นำมาใช้เพื่อยับยั้งไวรัส นั่นคือการตรวจคัดกรองในวงกว้าง การตรวจคัดกรองอย่าง “ได้ผลสามารถช่วยควบคุมไวรัสลดด้วยการตรวจหาและกักตัวผู้ที่แพร่เชื้อได้ ทั้งที่ไม่แสดงอาการ แสดงอาการเล็กน้อย หรืออยู่ในระยะก่อนแสดงอาการ การพัฒนาและปรับใช้วิธีการตรวจคัดกรองแบบเร็วชี้ “มีต้นทุนต่ำ” ได้รับการสนับสนุนดังแต่ช่วงแรกของกิจกรรมทางเศรษฐกิจใหญ่ โปรดดูข้อมูลจาก Gottlieb และคณะ (2020) สมาคมผู้ว่าการรัฐแห่งชาติ (2020), คณะกรรมการประชุม (2020), Romer (2020), สถาบันโรคกีเฟลเลอร์ (2020), Silcox และคณะ (2020) รวมถึง Kotlikoff และ Mina (2020) เป็นต้น ขณะที่กำลังการผลิตชุดตรวจ SARS-CoV-2 ด้วยวิธี PCR ในห้องปฏิบัติการมาตราฐานได้เพิ่มสูงขึ้น แต่ต้นทุนระยะเวลารอผล และการจัดเตรียมการตรวจ PCR ให้พร้อมเพื่อวัดคุณประสิทธิภาพในการวินิจฉัย ล้วนเป็นสิ่งที่จำกัดความสามารถในการตรวจด้วยวิธี PCR เพื่อทำการตรวจคัดกรองเป็นวงกว้าง แต่การตรวจวิธีใหม่ “ชี้ “มีต้นทุนต่ำ” และเวลาอผลลัพธ์มีศักยภาพในการใช้งานเป็นวงกว้าง อย่างไรก็ตาม การตรวจเหล่านี้มีความ “ไว” และความจำเพาะน้อยกว่าการตรวจด้วยวิธี PCR ในห้องปฏิบัติการ บทบรรณาธิการใน *Journal of Clinical Microbiology*, Pettengill and McAdam (2020) ได้ชี้ข้อกังวลว่าความจำเพาะต่ำ (กล่าวคือ มีอัตราผลบกวนสูง) ได้ทำให้ความน่าเชื่อถือของโคงการตรวจคัดกรองลดลง จึงทำให้ได้รับความร่วมมือน้อยลงในการปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวเมื่อได้รับผลบวก แม้จะได้รับความร่วมมือเพียงบางส่วนในการปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวผู้มีความเสี่ยงและผู้ป่วย แต่ความจำเพาะที่ต่ำก็ส่งผลฉุดรั้งเศรษฐกิจเนื่องจากพนักงานที่มีสุขภาพดีจำนวนมากต้องทำการกักตัว Pettengill และ McAdam (2020) ยังระบุว่าความ “ไม่สมบูรณ์” แบบนี้ “ไม่สามารถระบุผู้ที่ติดเชื้อบางคนได้” ข้อกังวลเหล่านี้ก่อให้เกิดคำถามเกี่ยวกับประโยชน์ในด้านสาธารณสุขและเศรษฐกิจในการใช้วิธีตรวจคัดกรองที่ “ไม่สมบูรณ์” แบบ

เอกสารฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจระดับมหภาค สำหรับโคงการในสหราชอาณาจักรตามสมมติฐานของการใช้การตรวจคัดกรองที่ “ไม่สมบูรณ์” แบบและ “ได้รับความร่วมมือปฏิบัติตามเพียงบางส่วน เราได้ขยายโนเดล SIR ทางพฤติกรรมใน Baqaee, Farhi, Mina และ Stock (2020b) (BFMS) เพื่อให้ครอบคลุมแผนการตรวจเพื่อวินิจฉัยและเพื่อคัดกรอง และ “ได้รับความร่วมมือบางส่วนในการกักตัวเอง การแพร่ระบาดของไวรัสชี้ “น้อยกว่าการรับประทานและแนวโน้มของไวรัส โนเดลนี้ช่วยให้เราสามารถระบุลักษณะเฉพาะ ว่าแผนการตรวจรูปแบบหนึ่งจะส่งผลอย่างไรต่อผลลัพธ์รวมของการแพร่ของโรคและกิจกรรมทางเศรษฐกิจ”

---

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

ประสิทธิผลของโครงการตรวจคัดกรองขึ้นอยู่กับว่าผู้ที่มีผลบวกปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวเองหรือไม่ เมื่อใช้ข้อมูลการสำรวจจากสหราชอาณาจักร ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคมปี 2020 โดย Smith และคณะ (2020) พบว่าผู้ที่รายงานถึงอาการของโควิดเพียง 18% เท่านั้นที่รายงานว่าได้กักตัวเอง ในกลุ่มของผู้ที่ระบบบริการสุขภาพแห่งชาติระบุว่ามีการสัมผัสอย่างใกล้ชิดกับเคสโควิด 19 ที่ยืนยันแล้ว มีเพียง 11% เท่านั้นที่รายงานว่าได้กักตัวเป็นเวลา 14 วันตามคำแนะนำ สิ่งที่ค้นพบเหล่านี้ชี้ว่าจะไม่มีการปฏิบัติตามคำแนะนำจำนวนมากหากหากได้รับสัญญาณบ่งบอกอื่นๆ ที่มีระดับของสาระต่ำ วานุคคลนั้นๆ ติดเชื้อจริงหรือไม่ โดยเฉพาะเมื่อคำคำน้ำยผลบวก (PPV)<sup>2</sup> ต่ำ เราจึงได้ให้อัตราความร่วมมือปฏิบัติตามขึ้นอยู่กับความจำเพาะของการตรวจคัดกรอง

ตารางที่ 1 แสดงผลลัพธ์สำหรับโครงการตรวจซึ่งเป็นตัวแทนสามรูปแบบ โครงการเหล่านี้ได้รับปรับเทียบให้สอดคล้องกับการตรวจที่มีอยู่เดิมหรือที่มีการนำเสนอ และได้รับการออกแบบให้เป็นตัวแทนของโครงการที่อาจนำมาใช้โดยได้รับทรัพยากรและการสนับสนุนอย่างเพียงพอ ในการพิจารณาต้นทุนและประโยชน์ เราถือว่าการตรวจสอบเพิ่มได้รับทุนจากการรัฐ

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

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



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

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

**ตารางที่ 1 ผลกระทบทางเศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิตของโครงการตราชดกรองสามรูปแบบ**

ความถี่ในการตรวจ (วัน)	ต้นทุนในการตรวจเพิ่มเติม (พันล้านดอลลาร์)	GDP เพิ่มเติม (พันล้านดอลลาร์)	รายได้ของรัฐเพิ่มเติม (พันล้านดอลลาร์)	ป้องกันการเสียชีวิต (พันราย)
<b>A. ความจำเพาะ 98.5% ยืนยันด้วย PCR 50% ให้ความร่วมมือตามผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว 25%</b>				
30	12	67	18	16
14	26	142	40	36
7	50	244	67	65
4	88	333	92	94
<b>B. ความจำเพาะ 98.5% ทั้งหมดยืนยันด้วย PCR ให้ความร่วมมือตามผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว 25%</b>				
30	13	262	72	65
14	27	426	117	111
7	55	541	149	152
4	97	593	163	172
<b>C ความจำเพาะ 99.7% ส่องชั้น ไม่มีการยืนยันด้วย PCR ให้ความร่วมมือตามผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว 50%</b>				
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 โดยมีการตรวจสองชั้นตอน มีความจำเพาะจากการรวมสองชั้นตอน 99.7% เพื่อให้เข้าใจอย่างชัดเจน วิธีนี้ในการได้ค่าความจำเพาะดังกล่าวคือการตรวจแอนติเจนแบบเร็วสองชั้นตอนอย่างเป็นอิสระ ตามการหารือของ Mina, Parker และ Larremore (2020) ชั้นตอนแรกใช้ชุดตรวจราคา 2 ดอลลาร์ซึ่งมีความจำเพาะต่ำ (80%) เช่น ชุดตรวจแอนติเจนแบบแคนเกรดราชาซึ่งเป็นกระดาษตรวจตามสมมติฐานที่มีต้นทุนต่ำ หากได้ผลตรวจเป็นบวก จะใช้วิธีตรวจยืนยันที่มีราคา 5 ดอลลาร์ ซึ่งมีความจำเพาะ 98.5% ดังในแผนภูมิ A และ B<sup>4</sup> โดยไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล เรายังนิษฐานว่าความจำเพาะ 99.7% จะทำให้มีอัตราการให้ความร่วมมือ 50% ต้นทุนในการตรวจที่เพิ่มขึ้นภายใต้โครงการนี้ต่ำกว่าโครงการ A หรือ B ส่วนหนึ่งเป็นเพราะมีเวลารอผลลัพธ์ จึงสามารถป้องกันการเสียชีวิตได้ 117,000 ราย และเพิ่ม GDP ได้ 395,000 ล้านดอลลาร์เมื่อใช้ความถี่ในการตรวจรายสัปดาห์ แม้ว่าจะมีการให้ความร่วมมืออยกว่าแบบแผนที่ใช้วิธี PCR ก็ตาม

---

<sup>4</sup> การวิเคราะห์อภิมานของชุดตรวจเอนติเจนไข้หวัดใหญ่มีความจำเพาะประมาณ 98.2% (Chartrand และคณะ (2012)) และ 98.4% (Antoniol และคณะ (2018)) โปรดดู Pettengill และ McAdam (2020) ความจำเพาะเหล่านี้ ใกล้เคียงกับความจำเพาะ 98.5% ของชุดตรวจ BinaxNOW™ เมื่อพิจารณาดังนั้น ความจำเพาะ 80% สำหรับการ ตรวจขั้นแรกจึงเป็นการคาดหมายที่รวมดังร่วง

ผลลัพธ์เหล่านี้และการวิเคราะห์ความไวเพิ่มเติมที่ด้านล่างได้นำเราไปสู่ข้อสรุปสำคัญสี่ประการ

ประการแรก แม้จะมีการให้ความร่วมมือเพียงบางส่วน แต่การตรวจคัดกรองจะให้ประโยชน์สุทธิทางเศรษฐกิจอย่างมาก สำหรับตารางที่ 1 ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสูงกว่าต้นทุน 5-10 เท่าเมื่อทำการตรวจทุกสปีด้าห์ หากรัฐบาลลงเงินผู้อุดหนุนทุนในการตรวจทั้งหมด รายได้จากการภาษีที่เพิ่มขึ้นจากการเติบโตของ GDP ที่เกิดขึ้นจะถือว่าคุ้มค่าอย่างมากเมื่อเทียบกับต้นทุนในการตรวจ ประโยชน์สุทธิจะยังเพิ่มขึ้นหากพิจารณาムูลค่าเป็นเงินจากการป้องกันการเสียชีวิตโดยไข้มูลค่าของชีวิตในทางสถิติ

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

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

ประการที่สี่ เราพบว่าการตรวจโดยมุ่งเป้าผู้ใหญ่ที่มีอายุน้อยและวัยกลางคน ช่วยให้ได้รับผลที่ดีขึ้นทั้งในด้านเศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิต โดยใช้จำนวนการตรวจคัดกรองคงที่ แม้การมุ่งเป้าการตรวจไปยังกลุ่มอายุเหล่านี้จะทำให้กิจกรรมลดลงเนื่องจากพนักงานต้องเข้ารับการกักตัว แต่จะช่วยตัดวงจรการแพร่ระบาดไปยังกลุ่มผู้สูงอายุได้

ไม่เดลนี้ได้สรุปไว้ในหมวด 2 หมวด 3 จะแสดงผลจากการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ และจะพิจารณาการตรวจอีกกลุ่มอายุในหมวด 4

สิ่งที่พิมพ์ที่เกี่ยวข้อง เอกสารนี้มีความเกี่ยวข้องกับสิ่งที่พิมพ์ฉบับหนึ่งที่ยังคงมีการเพิ่มเติมข้อมูล ซึ่งทำการสังเคราะห์โน้ตเดลระบาดวิทยาสำหรับพลวัตของการแพร่เชื้อต่อเศรษฐศาสตร์หมู่ภาค<sup>5</sup> และบางส่วนมีการพิจารณาถึงการตรวจและการกักตัวผู้ที่มีความเสี่ยง Berger, Herkenhoff และ Mongey (2020) ได้พิจารณาผลของการตรวจและ



<sup>5</sup> จุดมุ่งหมายเริ่มแรกของสิ่งตีพิมพ์นี้เกี่ยวข้องกับผลกระทบเศรษฐกิจศาสตร์มหัพภาคและระบบดิจิทัลของนโยบายการล็อกดาวน์และการกลับมาดำเนินกิจกรรมตามปกติอีกครั้ง Eichenbaum, Rebelo, Trabandt (2020a) ได้พัฒนาโมเดลเศรษฐกิจศาสตร์มหัพภาคใหม่ของเคนส์ด้วยโมเดลแบบ SIR สำหรับการแพร่ของโรค โดยกำหนดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการบริโภค/การตัดสินใจเกี่ยวกับอุปทานแรงงานและการแพร่ของโรค รวมถึงศึกษาผลของนโยบายล็อกดาวน์อย่างง่าย Acemoglu, Chernozhukov, Werning และ Whinston (2020) ได้ศึกษาโมเดล SIR แบบหลายกลุ่ม ซึ่งการติดเชื้อ การเข้ารักษาในสถานพยาบาล และอัตราการเสียชีวิตมีความแปรผันระหว่างกลุ่มต่างๆ และกำหนดลักษณะของนโยบายล็อกดาวน์โดยปรับ ช่วงอายุที่เหมาะสมที่สุด สิ่งตีพิมพ์นี้ได้ขยายขอบเขตให้รวมถึงการเข้าควบคุมที่ไม่ใช่วิธีทางเภสัชศาสตร์ โปรดดูที่ Baqaee, Farhi, Mina และ Stock (2020a) สำหรับข้อมูลอ้างอิงเพิ่มเติมโปรดดูที่ BFMS (2020b)

การกักตัวผู้มีความเสี่ยงในโนเมเดล SIR โดยใช้การตรวจที่สมบูรณ์แบบครั้งเดียวและได้รับความร่วมมือที่ไม่สมบูรณ์แบบในการกักตัว ผู้จัดทำได้แสดงให้เห็นว่าการตรวจสามารถลดความเข้มงวดของการล็อกดาวน์ที่จำเป็นเพื่อให้ได้ผลในการลดการระบาดของโรคในระดับต้องการ Cherif และ Hasanov (2020) ได้ศึกษาถึงต้นทุนและผลตอบแทนของกลยุทธ์ตรวจและกักตัวในโนเมเดล SIR โดยให้ความสำคัญเป็นพิเศษต่อกลยุทธ์การตรวจอย่าง 'ชายหาด' ซึ่งใช้ประโยชน์จากความไม่สม่ำเสมอเชิงระยะทางของความชุกของโรคและความหนาแน่นของประชากร Brotherhood, Kircher, Santos และ Tertilt (2020) รวมถึง Eichenbaum, Rebelo และ Trabandt (2020b) ได้พิจารณาการตรวจเพื่อวินิจฉัยและการกักตัวโดยปรับช่วงอายุ ซึ่งในทั้งสองโนเมเดล บทบาทส่วนใหญ่ของการตรวจคือการแก้ไขความไม่เข้มข้นของบุคคลเกี่ยวกับสถานะการติดเชื้อ เอกสารอื่นๆ 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) เอกสารที่มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ในสิ่งตีพิมพ์ด้านระบบวิทยาของ Paltiel, Zheng และ Walensky (2020) ซึ่งพิจารณาการตรวจโควิดไว้รั้สในวิทยาลัยและรวมถึงใช้จ่ายในการตรวจและจัดหาที่พักสำหรับผู้ที่กักตัว และโปรดดูเอกสารอื่นๆ เช่น Larremore และคณะ (2020), Taiaple, Romer และ Linnarsson (2020) รวมถึง Peto และคณะ (2020)

เมื่อเทียบกับสิ่งตีพิมพ์ฉบับนี้ ส่วนร่วมที่สำคัญของเราคือการเสนอโนเมเดลที่ได้รับการปรับเทียบและประมาณค่าอย่างระมัดระวัง เพื่อประเมินประโยชน์สุทธิทางเศรษฐกิจ การเงิน และประโยชน์โดยรวม (รวมถึงอัตราการเสียชีวิต) ของการตรวจคัดกรองที่ไม่สมบูรณ์แบบหลายขั้นตอนร่วมกับการตรวจเพื่อวินิจฉัย เมื่อร่วมโนเมเดลทางเศรษฐกิจ 66 เซ็กเตอร์เข้ากับโนเมเดล SIR เชิงพฤติกรรมหักลุมอายุ เราสามารถพิจารณากลยุทธ์อิงกลุ่มอายุและผลของการกักตัวชั่วคราวต่อการจ้างงานและผลผลิตได้

## 2. โนเมเดล SIR เชิงพฤติกรรม โดยมีการตรวจเพื่อคัดกรองและวินิจฉัย

จุดเริ่มต้นของเราคือโนเมเดล SIR เชิงพฤติกรรม BFMS ซึ่งเชื่อมโยงโนเมเดล SIR ของการแพร์ของโรคเข้ากับกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ซึ่งโนเมเดล BFMS นี้มีหักลุมอายุ (อายุ 0-19, 20-44, 45- 64, 65-74 และ 75 ปีขึ้นไป) และเชกเตอร์ธุรกิจเอกชน 66 กลุ่ม และรัฐบาล เมทริกซ์การสัมผัสก่อนการระบาดมาจากการประมาณการของ POLYMOD (Mossong และคณะ (2017)) สำหรับที่ทำงาน บ้าน และกิจกรรมอื่นๆ เมทริกซ์การสัมผัสในที่ทำงานจะแบร์ผ่านตามเชกเตอร์ธุรกิจ ขึ้นอยู่กับระยะห่างของพนักงานในเชกเตอร์ (Mongey, Pilossoph และ Weinberg (2020)) แรงมุนทางพฤติกรรมของโนเมเดลนี้ได้มาจากการป้อนกลับสำหรับกิจกรรม ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเสียชีวิตรายสัปดาห์ในปัจจุบันและความชันของเส้นกราฟอัตราการเสียชีวิตรายสัปดาห์ นอกจากราคา กฎเชิงพฤติกรรมมีองค์ประกอบความล้าของการล็อกดาวน์ ซึ่งอัตราการว่างงานสูง และอัตราการว่างงานสะสมในอดีต (โดยที่ปัจจัยอื่นๆ เท่ากัน) ส่งผลต่อความปราศโรคที่จะกลับมาดำเนินกิจกรรมต่อ พารามิเตอร์ทางระบบวิทยา เช่น อัตราการเสียชีวิตอิงกลุ่มอายุ นำมายังสิ่งตีพิมพ์ด้านระบบวิทยาจาก CDC และสำหรับอัตราการแพร์และอัตราการติดเชื้อเริ่มแรกจะประมาณค่าจากข้อมูลการเสียชีวิตรายวันของสหรัฐอเมริกา สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดดูที่ ภาคผนวก 1 และ BFMS

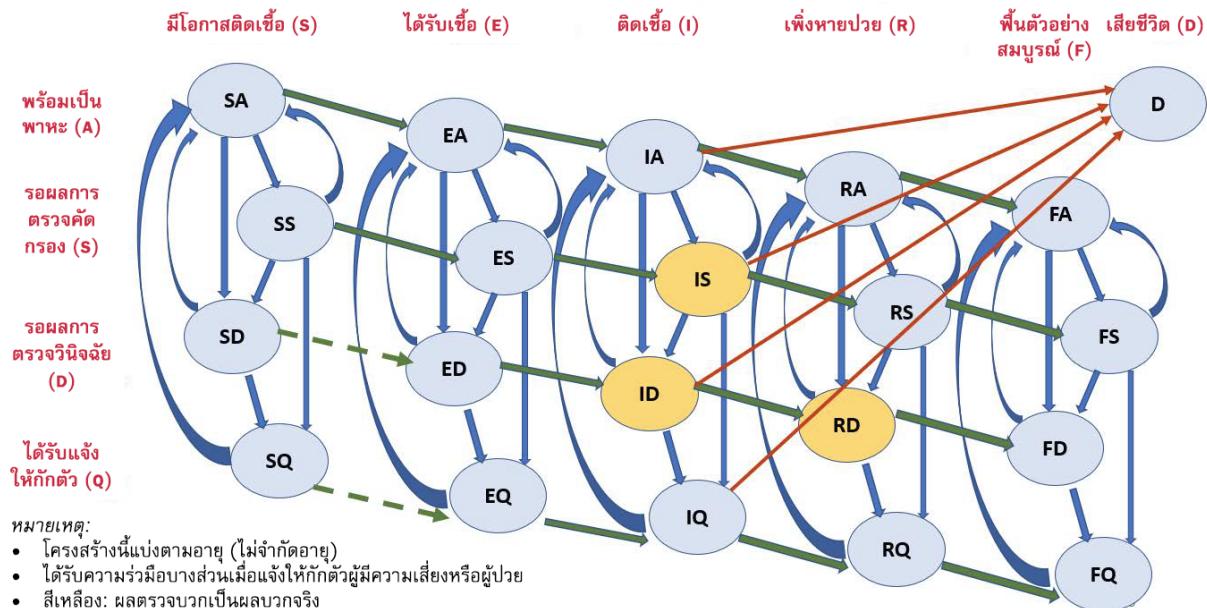
## 2.1 การขยายขอบเขตการตรวจเพื่อคัดกรองและเพื่อวินิจฉัย

เอกสารฉบับนี้ได้ขยายขอบเขตของโมเดล BFMS เพื่อให้ครอบคลุมการตรวจเพื่อคัดกรองและเพื่อวินิจฉัย โดยขัดจัง และได้รับความร่วมมือบางส่วน องค์ประกอบสำคัญของการขยายขอบเขตดังกล่าวได้แก่

- บุคคลได้รับเลือกโดยสุ่ม โดยมีอัตราการตรวจคัดกรองรายวัน /
- ส่วนหนึ่ง V ของผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกในการตรวจคัดกรองจะเข้ารับการตรวจวินิจฉัย (PCR) เพื่อยืนยันผล ส่วนที่เหลือ 1-V ของผู้ที่ได้ผลตรวจเป็นบวกได้รับคำแนะนำให้กักตัวเอง
- ผู้ที่แสดงอาการสามารถรับการตรวจเพื่อวินิจฉัยได้
- ผู้ที่รับผลตรวจวินิจฉัยได้รับคำแนะนำให้กักตัวเอง
- กลุ่มผู้กักตัวประกอบด้วยผู้ที่ได้รับผลตรวจเป็นบวกซึ่ง “เป็นที่ยดี” ซึ่งได้แก่ ผลตรวจเป็นบวกจากการตรวจ PCR ในกลุ่มผู้ที่แสดงอาการ ผลตรวจ PCR เป็นบวกในกลุ่ม V ของผู้ได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวกและเข้ารับการตรวจยืนยันผล หรือได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวก ในกลุ่ม 1-V ซึ่งไม่ตรวจยืนยันผล
- มีการให้ความร่วมมือปฏิบัติตามคำแนะนำในการกักตัวผู้มีความเสี่ยงหรือผู้ติดเชื้อบางส่วน

ภาพประกอบ 1 จะแสดงโมเดลแบบขยาย SIR (สมการต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก 1) เส้นทางในแนวโน้มหมายถึงความคืบหน้าของโรค ตั้งแต่ผู้มีโอกาสติดเชื้อได้รับเชื้อและติดเชื้อไปจนถึงเพียงหายป่วย จนกระทั่งพ้นตัวอย่างสมบูรณ์ หรือตั้งแต่ติดเชื้อจนกระทั่งเสียชีวิต ความแตกต่างระหว่างช่วงเพียงหายป่วย และพ้นตัวอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นในช่วงที่ได้รับผลตรวจ PCR เป็นบวกแต่ไม่สามารถแพะรับเชื้อได้ โปรดดู Larremore และคณะ (2020) เป็นต้น การตรวจคัดกรองจะถือว่ามีความไวต่ำกว่าการตรวจ PCR จึงสามารถตรวจพบไวรัสในผู้ที่ติดเชื้อได้ แต่ไม่สามารถตรวจพบในผู้ที่เพียงหายป่วยได้

**รูป 1 โมเดล SIR โดยมีการตรวจเพื่อคัดกรองและเพื่อวินิจฉัย และได้รับความร่วมมือบางส่วน**



ผู้ที่ได้รับค่าแนะนำให้กักตัวจะเข้าสู่ส่วนกักตัว ( $Q$  เพื่อแยกแยะจากผู้ที่ติดเชื้อ  $I$ ) ระดับของความร่วมมือในการปฏิบัติตามค่าแนะนำจะขึ้นอยู่กับว่าพากขาสามารถถึงสถานะนี้เนื่องจากได้รับผลบวกในการตรวจวินิจฉัยซึ่งมีค่าปั่นออกสูงหรือจากการตรวจคัดกรองซึ่งมีค่าปั่นออกต่ำกว่า (แม้เราจะอธิบายว่าผู้ที่มาถึงสถานะนี้เนื่องจากได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวกให้ความร่วมมือ 25% เนื่องจากโนเมเดลน์มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ กันจึงเท่ากับว่าทุกคนที่มาถึงผ่านช่องทางนี้จะลดการสัมผัสของตนเอง 25%) หากได้รับความร่วมมืออย่างสมบูรณ์ ไม่ควรมีการติดเชื้อในกลุ่มผู้มีโอกาสติดเชื้อในกลุ่มที่กักตัวเนื่องจากมีความเสี่ยงและกักตัวเนื่องจากติดเชื้อ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความร่วมมือเพียงบางส่วนเท่านั้น บางส่วนของผู้มีโอกาสติดเชื้อที่กักตัวเนื่องจากติดเชื้อ ( $SQ$ ) และผู้มีโอกาสติดเชื้อที่กักตัวเนื่องจากมีความเสี่ยง ( $SD$ ) จึงมีโอกาสได้รับเชื้อ

ตารางที่ 2 อธิบายค่าพารามิเตอร์เกณฑ์พื้นฐานของเรา ความไวและความจำเพาะของ การตรวจวินิจฉัย ควรอยู่ในช่วงของการตรวจ PCR ในห้องปฏิบัติการ ความไวและความจำเพาะของ การตรวจคัดกรองเกณฑ์พื้นฐานได้รับการปรับเทียบตามค่าประมาณของ การวิเคราะห์ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจแอนติเจนแบบเร็ว BinaxNOW™ แม้เราจะพิจารณาค่าทางเลือกต่างๆ ก็ตาม อัตราเข้ารับการตรวจเพื่อวินิจฉัยในกลุ่มผู้ไม่ติดเชื้อ ( $\rho_0$ ) และกลุ่มผู้ติดเชื้อ ( $\rho_1$ ) ได้รับการปรับเทียบให้สัมพันธ์กับจำนวนการตรวจรวมและอัตราผลบวกในสหรัฐอเมริกา ระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม 2020

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์การตรวจ

พารามิเตอร์	นิยาม	ค่า
$ps$	การตรวจคัดกรอง: ความไว	0.97
$qs$	การตรวจคัดกรอง: ความจำเพาะ	0.985
$pd$	การตรวจวินิจฉัย: ความไว	0.999
$qd$	การตรวจวินิจฉัย: ความจำเพาะ	0.997
$as$	อัตราการไม่ให้ความร่วมมือกักตัวหลังจากได้รับผลตรวจคัดกรองเป็นบวก	0.75 สำหรับ $qs = 0.985$ 0.5 สำหรับ $qs = 0.997$
$ad$	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
$\zeta$	อัตราการออกจาก การกักตัว ( $Q$ )	1/14
$\theta$	อัตราการเปลี่ยนจากเพียงหายป่วยจนพื้นตัวอย่างสมบูรณ์ ต้นทุนในการตรวจคัดกรอง	1/5 \$5, \$3
	ต้นทุนในการตรวจวินิจฉัย	\$50
	มูลค่าของชีวิตในทางสถิติ (US EPA 2020 เป็น \$ 2020)	\$9.3m

หมายเหตุ: มีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์ความไว

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

## 2.2 เกณฑ์พื้นฐานของการจำลองและการนี้ที่ไม่เกิดขึ้นจริงของการตรวจ

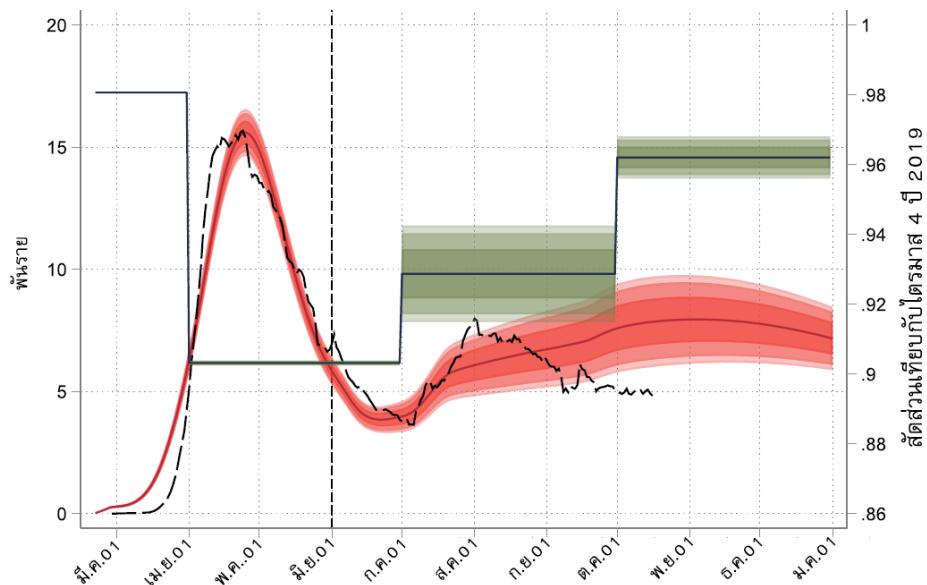
BFMS มีสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐานสองรูปแบบ ซึ่งทั้งสองแบบมีการเริ่มติดเชื้อระลอกที่สองในช่วงกลางฤดูร้อนของปี 2020 ใน BFMS การระบาดระลอกที่สองเป็นผลลัพธ์เนื่องจากการผ่อนปรนการเว้นระยะห่างทางสังคม การสวมหน้ากาก และการป้องกันอื่นๆ ร่วมกับการกลับมาเรียนที่โรงเรียนอย่างเต็มรูปแบบในฤดูใบไม้ร่วง ความแตกต่างระหว่างสองสถานการณ์คือระดับการป้อนกลับจากกลุ่มเสี่ยงชีวิต และอัตราการเดินต่อของกลุ่มเสี่ยงชีวิตของกิจกรรม เกณฑ์พื้นฐานในการนี้จะใช้พารามิเตอร์การป้อนกลับซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐานสองรูปแบบที่พิจารณาใน BFMS

เราประมาณการโน้มเดลโดยใช้ข้อมูลถึงวันที่ 12 มิถุนายน 2020 ระยะเวลาของการจำลองเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2020 และสิ้นสุดในวันที่ 1 มกราคม 2021 ด้วยเหตุนี้ การจำลองจึงสอดคล้องกับเส้นทางทางเลือกซึ่งไม่เกิดขึ้นจริงสำหรับไวรัสและเศรษฐศาสตร์ในช่วงเจ็ดเดือนสุดท้ายของปี 2020

ภาพประกอบ 2 แสดงเส้นทางเวลาของการเสียชีวิตจริง (เส้นประสีดำ) การเสียชีวิตจากการจำลอง (สีแดง) และระดับ GDP (สีเขียว) กำหนดด้วยตามระดับของค่านั้นๆ ในเดือนกุมภาพันธ์ปี 2020 ภายใต้การปรับเทียบเกณฑ์พื้นฐานของเรา โดยไม่มีการตรวจคัดกรอง และการเสียชีวิตและ GDP คือแอบความผิดพลาดมาตรฐานจากความไม่แน่นอนของการประมาณการสำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของโน้มเดล แม้ว่าสถานการณ์เกณฑ์พื้นฐานจะกำหนดขึ้นในเดือนมิถุนายน แต่สถานการณ์มีความสอดคล้องตามเส้นทางการเสียชีวิตตลอดช่วงกลางเดือนสิงหาคม หลังจากนั้น การเสียชีวิตในการจำลองได้เพิ่มสูงกว่าการเสียชีวิตจริง ส่วนหนึ่งเนื่องมาจาก การจำลองถือว่าโรงเรียนได้กลับมาทำการสอนอย่างเต็มรูปแบบ ในขณะที่โรงเรียนในหลายพื้นที่กลับมาทำการสอนแบบทางไกลหรือแบบผสมผสาน ภายใต้เกณฑ์พื้นฐานมีผู้เสียชีวิต 359,000 ราย จนถึงวันที่ 1 มกราคม

ภายใต้เกณฑ์พื้นฐานจะไม่มีการตรวจคัดกรอง ( $\mu = 0$ ) อย่างไรก็ตาม มีการตรวจวินิจฉัยในอัตราที่สอดคล้องกับปริมาณและอัตราผลลัพธ์ของการตรวจจริงในเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม ภายใต้สถานการณ์ที่มีการตรวจคัดกรองซึ่งไม่เกิดขึ้นจริง มีการตรวจวินิจฉัยเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตรวจคัดกรองโดยที่คงพารามิเตอร์ของโน้มเดลทั้งหมดให้คงที่ ยกเว้นค่าซึ่งอธิบายถึงการตรวจคัดกรอง

## ภาพประกอบ 2 เส้นทางการเสียชีวิตและ GDP ตามความเป็นจริงและจากการจำลอง: “ไม่มีเกณฑ์พื้นฐานของการตรวจคัดกรอง



หมายเหตุ: GDP รายไตรมาส (ฟังก์ชันขั้นสีเขียว) จะแสดงระดับจริงโดยกำหนดต้นนี้เป็น 1 ในไตรมาสที่ 4 ของปี 2019 การเสียชีวิตรวม (ค่าจริงใช้เส้นประสีดำ ค่าจำลองใช้สีแดง) ภายใต้การจำลองเกณฑ์พื้นฐาน คือ 359,000 ราย ภายในวันที่ 1 มกราคม 2021 แยกต่างๆ จะระบุແຄบความเชื่อมั่น 67%, 90% และ 95% โดยใช้ความผิดพลาดมาตรฐานสำหรับพารามิเตอร์ของโมเดลจากประมาณการ

### 2.3 การประเมินดันทุนและประโยชน์

ดันทุนที่เพิ่มขึ้นและประโยชน์ของการตรวจได้รับการคำนวณจากจำนวนการตรวจและผลลัพธ์ทางเศรษฐศาสตร์และอัตราการเสียชีวิตตามนัยของโมเดล ภายใต้สถานการณ์ที่มีการตรวจและไม่มีการตรวจ

เราถือว่าดันทุนของการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5% คือ 5 ดอลลาร์ ถือว่าการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 80% มีดันทุน 2 ดอลลาร์ แต่บรรจุมาสำหรับการใช้งานร่วมกับชุดตรวจที่มีดันทุน 5 ดอลลาร์ซึ่งมีความจำเพาะ 98.5% ในอัตรา 5 ต่อ 1 ชุด จึงมีดันทุนเฉลี่ย 3 ดอลลาร์ต่อชุด ราคาของการตรวจ PCR เพื่อการวินิจฉัยมีความแปรผันค่อนข้างมากในสหรัฐอเมริกา เรากำหนดเกณฑ์พื้นฐานของเราที่ 50 ดอลลาร์

เราคำนวณประโยชน์สามอย่างของการตรวจ ได้แก่ GDP ที่เพิ่มขึ้น รายได้ของรัฐบาลกลางที่เพิ่มขึ้น และมูลค่าที่ต้องจ่ายให้กับคนที่เสียชีวิตที่หลักเลี้ยงได้

GDP จะรับเป็นดอลลาร์ 2020 และเนื่องจากการจำลองเริ่มต้นในวันที่ 1 มิถุนายน ค่า GDP จึงเท่ากันภายใต้เกณฑ์พื้นฐาน และทางเลือกในการตรวจมีค่า GDP ตรงกันสำหรับห้าเดือนแรกของปี ดังนั้น ความแตกต่างของ GDP ภายใต้สองสถานการณ์จะเกิดขึ้นในช่วงตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนธันวาคมเท่านั้น จำนวนดอลลาร์ของ GDP ส่วนเพิ่มเหล่านี้เป็นจำนวนดอลลาร์สำหรับเงื่อนไขเดือนตั้งกล่าวเท่านั้น ไม่ใช้อัตรารายปี

ผลกระทบการเพิ่มขึ้นของ GDP ต่อรายได้ของรัฐได้รับการคำนวณโดยใช้ความยืดหยุ่นของภาษีเงินได้ ภาษีจากผลกำไรขององค์กร FICA และภาษีจากอาชีพอิสระ จากสำนักงบประมาณแห่งสภาพองเกรส (Russia และ Kowalewski (2015 ตารางที่ 3) และ CBO (2019)) และเช่นเดียวกับ GDP รายได้ส่วนเพิ่มเหล่านี้เป็นของเดือนมิถุนายนถึงธันวาคมเท่านั้น ในจำนวนรายปี ในการคำนวณประโยชน์ทางการเงินสุทธิ เราถือว่า รัฐบาลกลางเป็นผู้จ่ายค่าดำเนินการตรวจที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด

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

### 3. ผลลัพธ์

หมวดนี้จะเสนอผลลัพธ์ที่สมบูรณ์สำหรับสามโครงการในตารางที่ 1 จากนั้นเสนอการตรวจสอบความไวและเส้นทางเวลาของไวรัสและ GDP สำหรับโครงการที่ใช้เป็นตัวอย่าง

#### 3.1. การตรวจคัดครองขั้นตอนเดียว โดยมีการตรวจยืนยันผลบางส่วน

เราริ่มด้วยโครงการ A ในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการตรวจคัดครองขั้นตอนเดียวที่มีความจำเพาะ 98.5% และมีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล 50% อัตราการให้ความร่วมมือเมื่อได้รับคำแนะนำให้กักตัวเนื่องจากผลการตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียว 25% และความร่วมมือเมื่อได้รับคำแนะนำให้กักตัวเนื่องจากผลการตรวจ 75%

ผลลัพธ์ด้านอัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ A ในตารางที่ 1 แสดงอยู่ในภาพประกอบ 3 ในภาพประกอบทั้งหมดจะพิสูจน์ผลลัพธ์ที่สนใจซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการตรวจคัดกรอง / เส้นจำนวนมากในภาพประกอบแสดงถึงความไวระดับต่างๆ ของการตรวจคัดกรอง ตั้งแต่ 80% ถึง 98.5% เมื่อเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง คาดว่าการตรวจทุกสองสัปดาห์น่าจะช่วยหลีกเลี่ยงการเสียชีวิตได้ประมาณ 37,000 ราย และการตรวจทุกสัปดาห์น่าจะช่วยหลีกเลี่ยงการเสียชีวิตได้ประมาณ 66,000 ราย แม้การตรวจคัดกรองจะมีความไว 97% ก็ตาม จำนวนวันที่บุคคลได้รับการแนะนำให้กักตัว (ด้านบนขวา) จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเกือบเป็นเชิงเส้นตามจำนวนการตรวจคัดกรอง (มีความโถงอยู่บ้างเนื่องจากการตรวจในกลุ่มผู้แสดงอาการลดลงเมื่ออัตราการตรวจคัดกรองเพิ่มขึ้น) เมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ จะมีการปฏิเสธกักตัวประมาณ 930 ล้านวัน ซึ่งคิดเป็น 1.3% ของจำนวนรวม 70,000 ล้านคน-วัน ในระหว่างระยะเวลาของการจำลองในเดือนมิถุนายนถึงธันวาคม (เนื่องจากมีการให้ความร่วมมือของบุคคล จึงมีจำนวนการกักตัว-วัน เพียงบางส่วนเท่านั้น) เนื่องจากผู้ที่ได้ผลบวกจากการตรวจคัดกรองเพียงครึ่งเดียวเท่านั้นที่เข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล จำนวนส่วนใหญ่ของผู้ที่ได้รับคำแนะนำให้กักตัวจึงเป็นผลบวกกลวง PPV ของการตรวจคัดกรอง (ตรวจกลางชัย) มีค่าต่ำ คือประมาณ 6% สำหรับการตรวจทุกสัปดาห์ เนื่องจากไวรัสจะถูกยับยั้งอย่างชัดเจนเมื่อ / เพิ่มขึ้น ค่า GDP (ตรวจกลางชัย) จึงเพิ่มขึ้นร่วมกับ / สำหรับอัตราการตรวจ / ต่ำและปานกลาง แม้การเพิ่มขึ้นจะเป็นไปอย่างไม่เต็มที่เนื่องจากพนักงานที่มีสุขภาพดีจำนวนมากต้องกักตัวก็ตาม

ผลลัพธ์ของต้นทุน-ประโยชน์สำหรับโครงการ A ได้แสดงไว้ในแผนภูมิตัวนี้ด้านล่างของภาพประกอบ 3 และในภาพประกอบ 4 ต้นทุนในการทดสอบเพิ่มเติมจะเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเชิงเส้นตามอัตราการตรวจ สำหรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิ (ภาพประกอบ 3 ตัวนี้ล่างช้าย) จะอยู่ในช่วง 75,000-120,000 ล้านเหรียญสำหรับการตรวจทุกสองสัปดาห์ และอยู่ในช่วง 150,000-200,000 ล้านเหรียญสำหรับการตรวจทุกสัปดาห์ ขึ้นอยู่กับความไวของการตรวจคัดกรอง เมื่อร่วมมูลค่าของชีวิตไว้ในค่าประโยชน์ (ภาพประกอบ 3 ตัวนี้ล่างขวา) ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิจะอยู่ในช่วง 320,000-470,000 ล้านเหรียญสำหรับการตรวจทุกสองสัปดาห์ และอยู่ในช่วง 650,000-820,000 ล้านเหรียญ (215) สำหรับการตรวจทุกสัปดาห์ ขึ้นอยู่กับความไวของการตรวจคัดกรอง พนวจโครงการตรวจคัดกรองเป็นสิ่งที่คุ้มค่าในเกือบทุกกรณีที่พิจารณา (ภาพประกอบ 4 ตรงกลางขวา) ภายใต้สมมติฐานวาระสูงบากลางเป็นผู้ออกต้นทุนสำหรับการทดสอบเพิ่มเติมทั้งหมด

ในภาพประกอบทั้งหมดเหล่านี้ การเพิ่มความไวของการตรวจคัดกรองจะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น แต่การปรับปรุงเหล่านี้มักมีส่วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการริเริ่มดำเนินโครงการตรวจคัดกรอง

### 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 จะได้รับอัตราความรุ่มมีมากขึ้นเมื่อใช้การตรวจ PCR ซึ่งมีความจำเพาะสูงกว่าการตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ เนื่องจากการตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะช่วยลดจำนวนผู้ที่มีสุขภาพดีที่ต้องกักตัว จึงช่วยหลีกเลี่ยงการกักตัวพนักงานที่มีสุขภาพดีจากการทำงาน และช่วยเพิ่ม GDP ในที่สุด ที่จริงแล้ว แม้จะทำการตรวจมากขึ้น แต่จำนวนวันที่กักตัวในโครงการ B ยังคงน้อยกว่าเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง ทั้งนี้ เนื่องจากความชุกของไวรัสได้ลดลงอย่างมาก จึงส่งผลให้จำนวนรวมของการตรวจวินิจฉัยที่ได้ผลบวกลดลง แม้ว่าจะมีการตรวจเพิ่มเติมซึ่งมาจาก การตรวจคัดกรองที่ได้ผลบวกก็ตาม การตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะทำให้ต้นทุนในการตรวจเพิ่มขึ้น ดังนั้น การพิจารณาว่าการเสนอทำการตรวจเพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะทำให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิเพิ่มขึ้นหรือลดลง จึงไม่ใช่สิ่งที่ทราบโดยไม่ต้องพิสูจน์ อย่างชัดแจ้ง สำหรับมูลค่าที่พิจารณาในที่นี้ ประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจทุกกรณีมีความสำคัญสูงที่สุด และประโยชน์ทางเศรษฐกิจสุทธิเพิ่มขึ้น

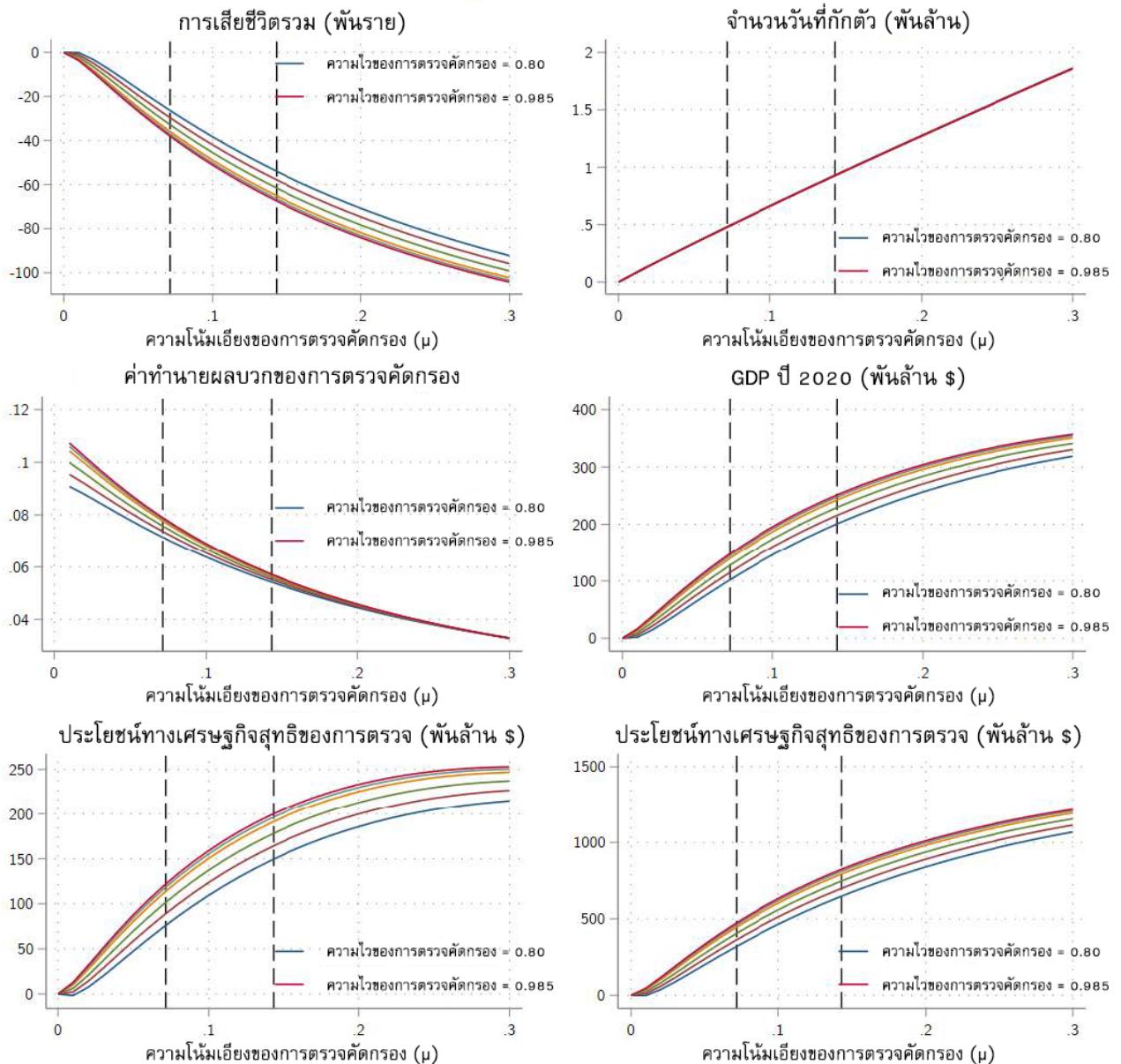
### 3.3. การตรวจคัดกรองสองขั้นตอนด้วยความจำเพาะ 99.7%

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

### ภาพประกอบ 3 อัตราการเสียชีวิตและผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจสำหรับโครงการ A (การตรวจยืนยันผล 50%)

ผลลัพธ์ด้านอัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ A ความจำเพาะ 98.5% มีการตรวจยืนยันผล 50%

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง



ความไวของ การตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

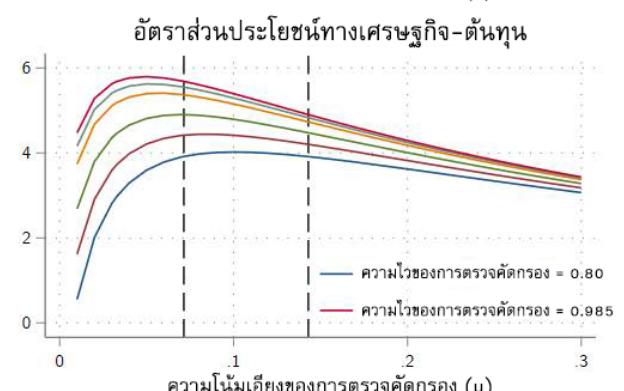
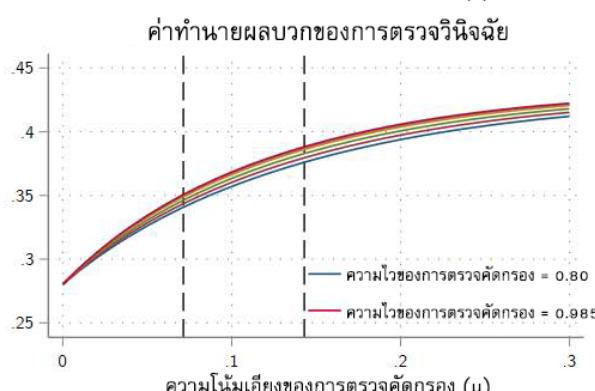
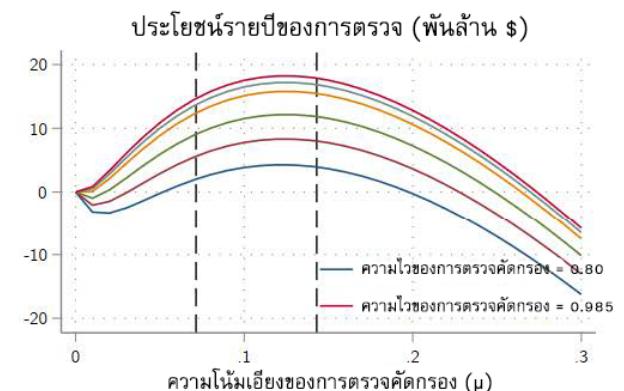
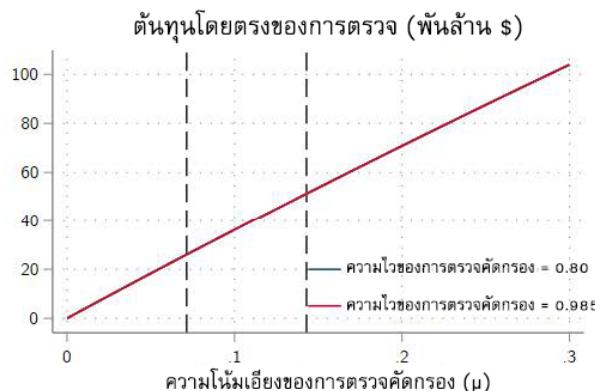
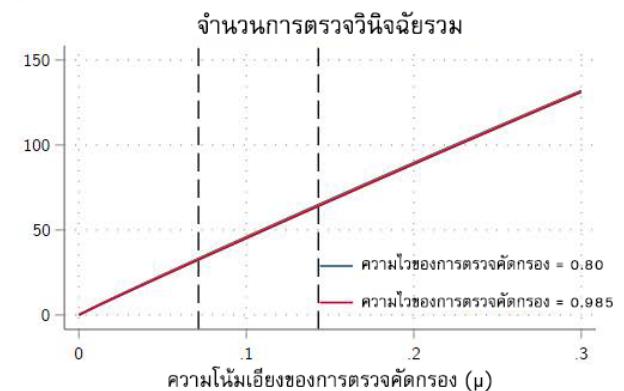
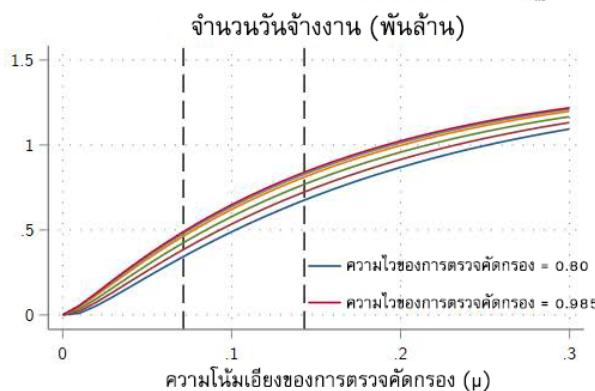
เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์และทุกสัปดาห์

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

## ภาพประกอบ 4 ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ A (การตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล 50%)

ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ A ความจำเพาะ 98.5% มีการตรวจยืนยันผล 50%

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง

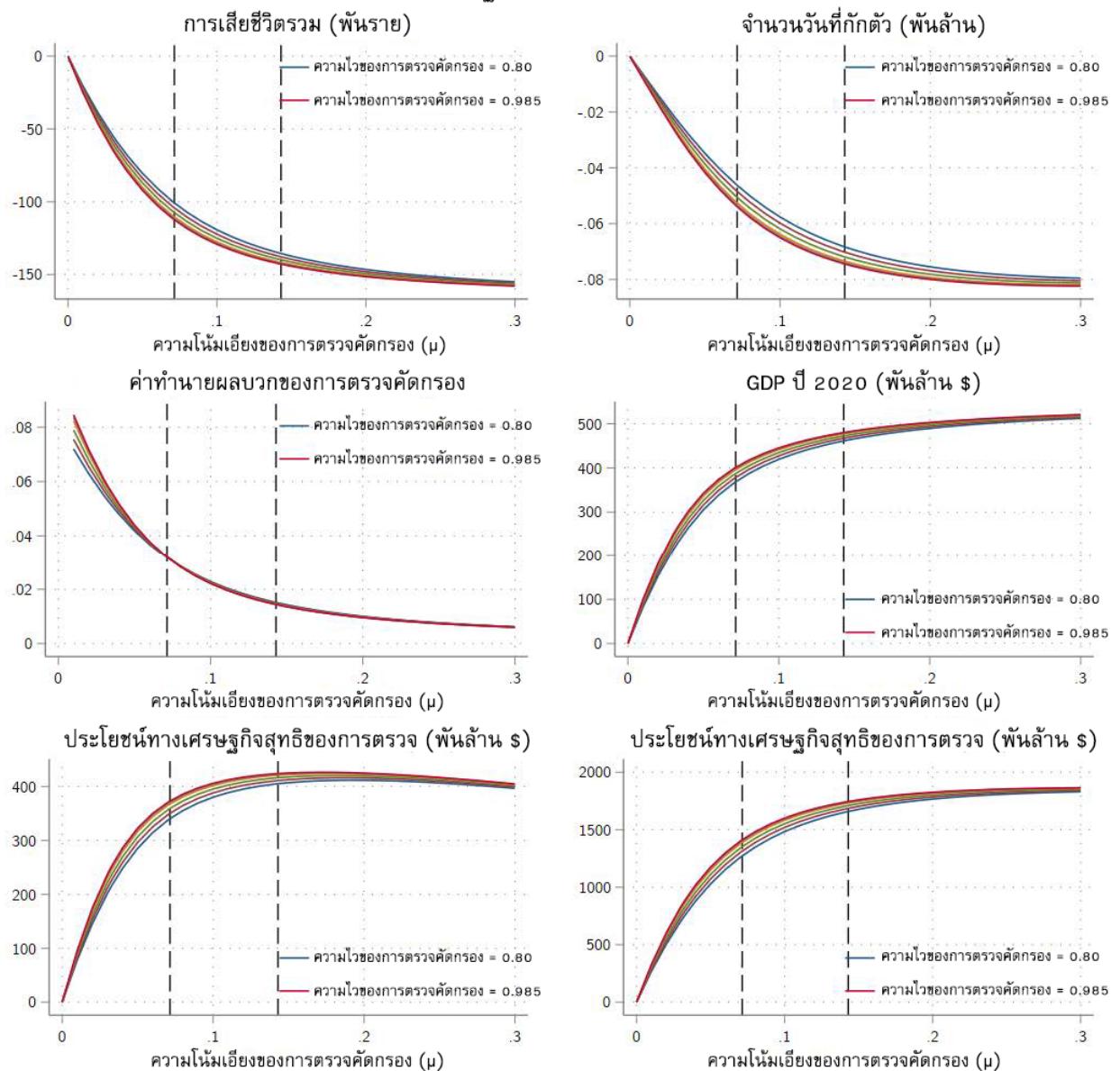


ความไวของ การตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

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

**ภาพประกอบ 5 อัตราการเสียชีวิตและผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจสำหรับโครงการ B  
(การตรวจเพื่อยืนยันผลทุกราย)**

ผลลัพธ์อัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ B ความจำเพาะ 98.5% ตรวจเพื่อยืนยันผลทุกราย

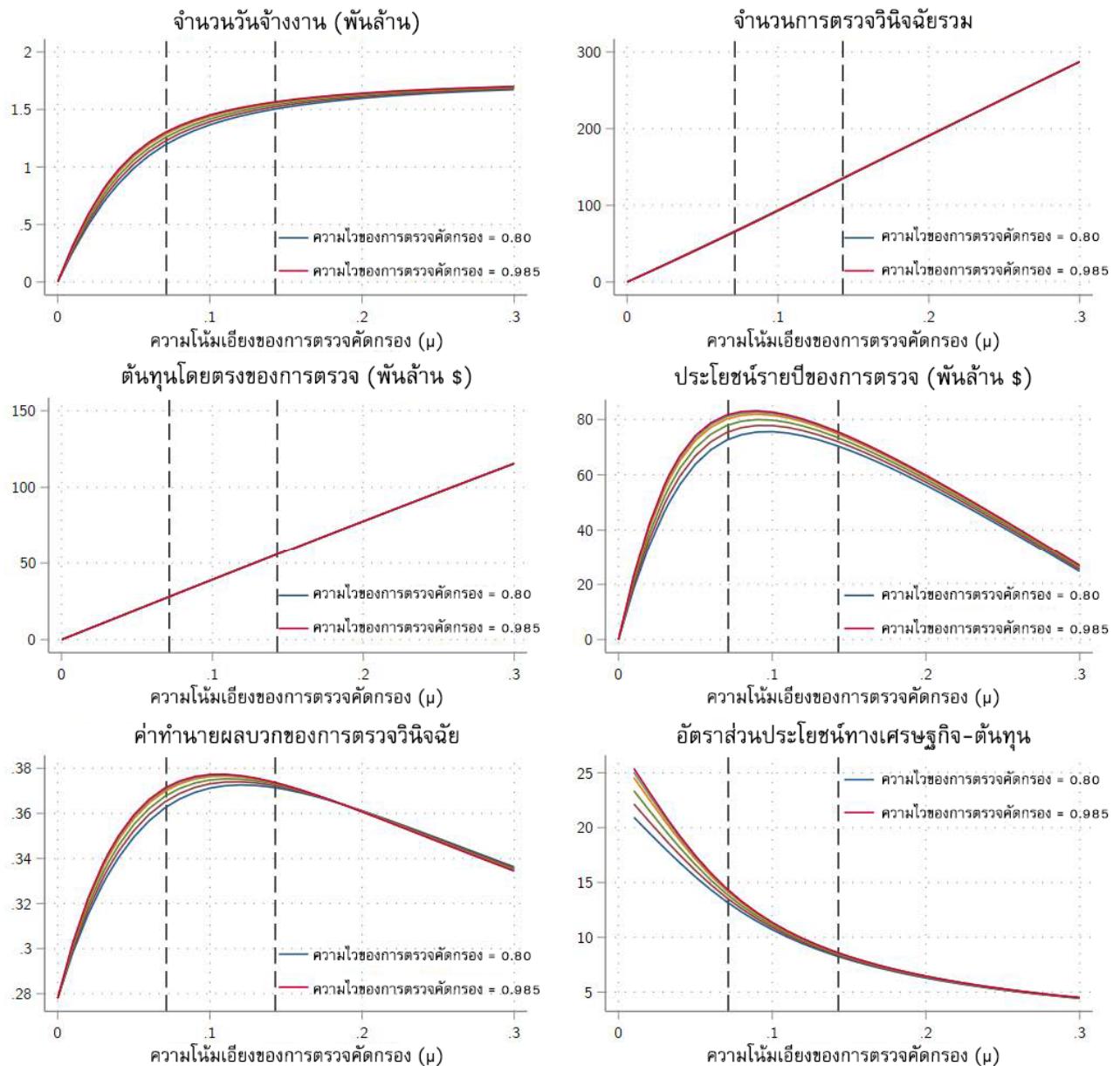


ความไวของ การตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995  
เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์ และทุกสัปดาห์  
พารามิเตอร์อื่นๆ:  $v = .5$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$

## ภาพประกอบ 6 ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ B (การตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี)

**ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ B ความจำเพาะ 98.5% ตรวจยืนยันผลทุกกรณี**

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง

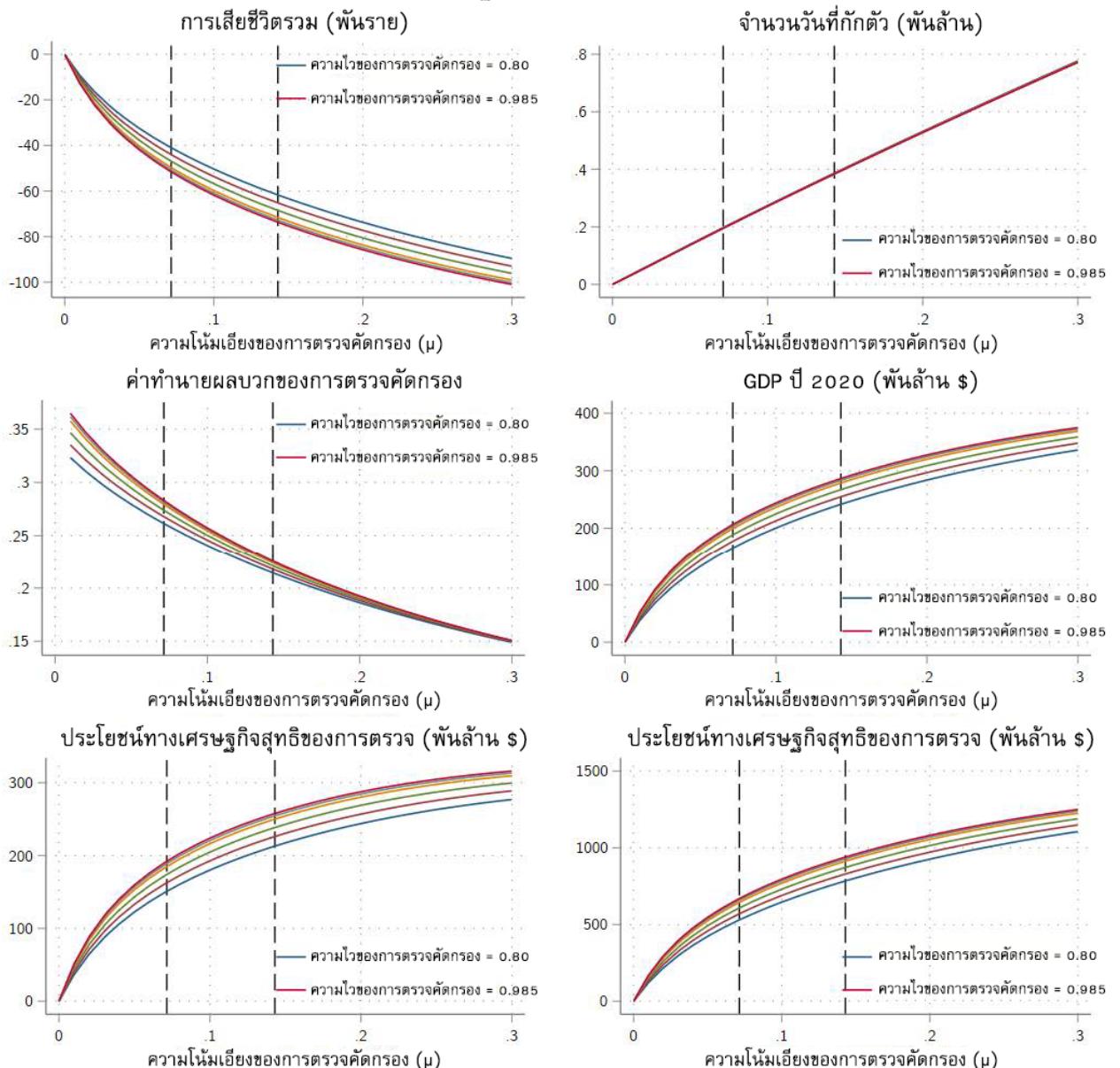


ความไวของการตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995  
เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์และทุกสัปดาห์  
พารามิเตอร์อื่นๆ:  $v = .5$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$

**ภาพประกอบ 7 อัตราการเสียชีวิตและผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจสำหรับโครงการ C  
(ไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล)**

ผลลัพธ์อัตราการเสียชีวิตและเศรษฐกิจสำหรับโครงการ C ความจำเพาะ 99.7% ไม่มีการตรวจเพื่อยืนยันผล

เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง



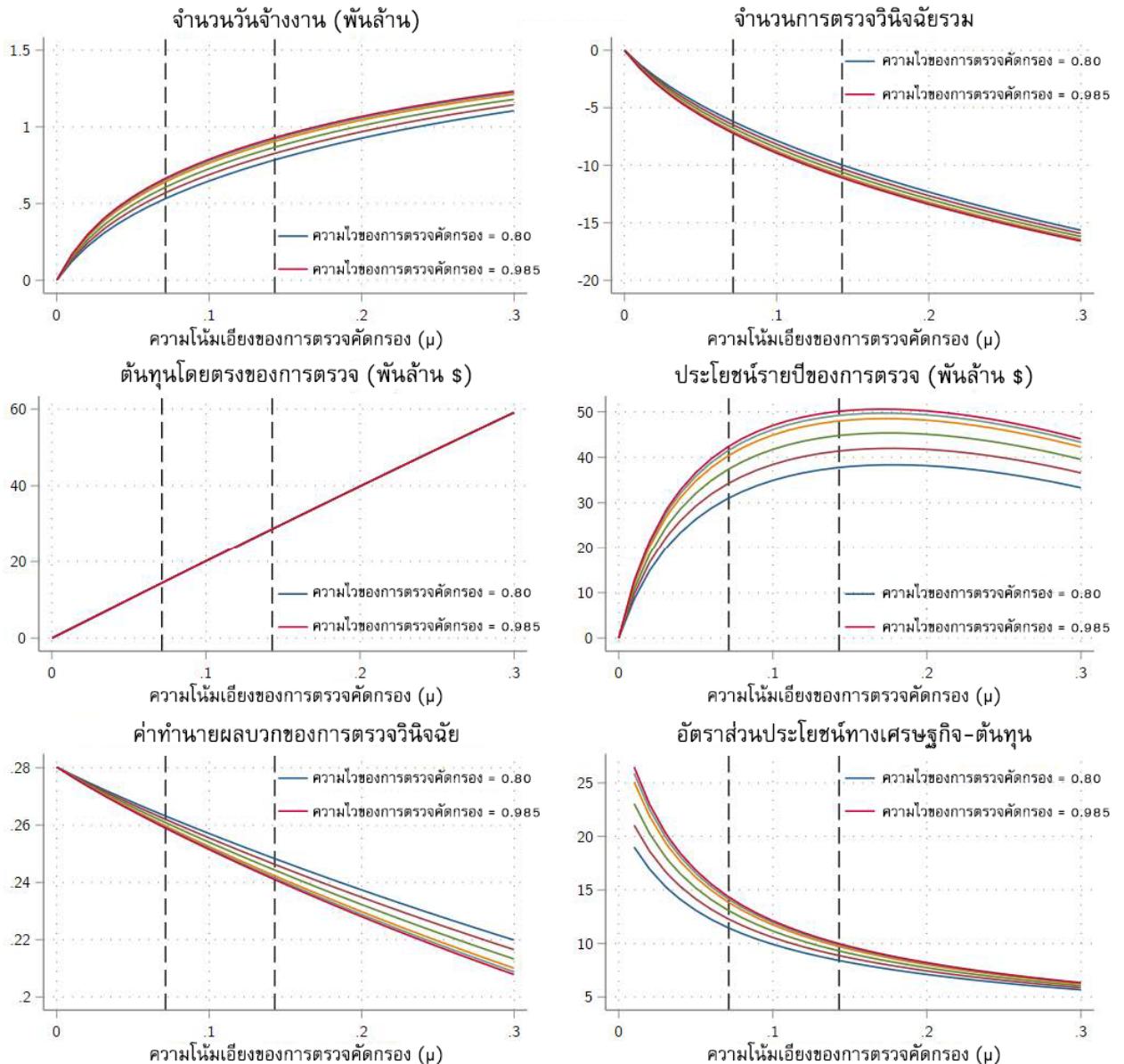
ความไวของ การตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995

เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสัปดาห์และทุกสัปดาห์

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

## ภาพประกอบ 8 ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ C (ไม่มีการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล)

ต้นทุนและประโยชน์สำหรับโครงการ C ความจำเพาะ 99.7% ไม่มีการตรวจเพื่อยืนยันผล  
เทียบกับเกณฑ์พื้นฐานซึ่งไม่มีการตรวจคัดกรอง



ความไวของ การตรวจคัดกรอง: 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975, 0.985, 0.995  
เส้นแนวตั้งแสดงอัตราการตรวจคัดกรองทุกสองสปีด้าห์และทุกสปีด้าห์  
พารามิเตอร์อื่นๆ:  $v = .5$ ,  $\alpha_s = .75$ ,  $\lambda_D = .5$

### 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)
<b>D. โครงการ A แต่ไม่มีการตรวจเพื่อยืนยันผล</b>				
30	11	-10	-3	-2
14	23	56	15	17
7	46	166	46	48
4	79	266	73	84
<b>E. โครงการ A แต่การตรวจคัดกรองมีความจำเพาะ 97%</b>				
30	13	4	1	2
14	27	83	23	24
7	53	201	56	58
4	91	294	81	93
<b>F. โครงการ A แต่การให้ความร่วมมือจากผลตรวจคัดกรองเพียงอย่างเดียว 50%</b>				
30	12	171	47	45
14	25	288	78	82
7	51	365	100	120
4	88	363	100	142
<b>g. โครงการ B แต่มีต้นทุนในการตรวจวินิจฉัย 100 เหรียญ</b>				
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 คือค่าความจำเพาะต่ำอาจทำให้ผู้ที่มีสุขภาพดีจำนวนมากซึ่งรวมถึงพนักงานที่มีสุขภาพดี ต้องทำการกักตัวโดยไม่จำเป็น (เช่น จาก Pettengill และ McAdam (2020)) แผนภูมิ D ในตารางที่ 3 ได้พิจารณากรณีดังกล่าวสำหรับการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5%

การกำจัดการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลออกจากโครงการ A อย่างสิ้นเชิง จะทำให้จำนวนบุคคลที่มีสุขภาพดีซึ่งรวมถึงแรงงานที่มีสุขภาพดีที่ต้องทำการกักตัวเพิ่มขึ้น และยังลดการให้ความร่วมมือโดยรวมอีกด้วยเนื่องจากการตรวจคัดกรองที่มี 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 โดยพิจารณาว่ามีการตรวจคัดกรองที่ให้อัตราผลบางส่วนเท่าของการตรวจในโครงการ A เพื่อการเปรียบเทียบ เรากำหนดให้ความร่วมมืออย่างคงที่ แม้แผนภูมิ E น่าจะได้รับความร่วมมืออย่างกว่า ความจำเพาะที่ลดลงได้ทำให้จำนวนผู้ที่มีสุขภาพดีซึ่งปฏิเสธการกักตัวมีมากขึ้น ต้นทุนในการตรวจจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีผลบางส่วนจากการคัดกรองที่ต้องยืนยันผลมากขึ้น และการกักตัวพนักงานที่มีสุขภาพดีเป็นจำนวนมากส่งผลให้ GDP ชะลอตัวเพิ่มเติม เป็นผลทำให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสูญเสียมากกว่าโครงการ A

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

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

**ทางเลือกของกฎการป้อนกลับทางเศรษฐกิจ** ผลลัพธ์จนถึงขณะนี้ใช้กฎการป้อนกลับทางเศรษฐกิจใน BFMS (2020) (โปรดดูภาคผนวก 1) เพื่อการตรวจสอบความไว เราจึงพิจารณาทางเลือกของกฎการป้อนกลับทางเศรษฐกิจซึ่งนำมาจาก Arnon, Ricco และ Smetters (2020) ด้วย ตามกฎของพวคเข้า กิจกรรมและการจ้างงานจะผลผันกับจำนวนเคลสในปัจจุบัน เมื่อใช้ข้อมูลรายวันสำหรับกิจกรรมและจำนวนเคลส พวคเข้าได้ประมาณค่าความยึดหยุ่นของการจ้างงานโดยสัมพันธ์กับจำนวนเคลส  $-0.0048$  กฎ BFMS ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเสียชีวิตรายสัปดาห์อย่างเฉพาะเจาะจง (ไม่ใช่ความชันของเส้นกราฟการเสียชีวิตหรืออัตราการว่างงาน) ช่วยให้ทราบความยึดหยุ่นของจำนวนชั่วโมงทำงานซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและสถานะของโรค เทียบกับอัตราการเสียชีวิตในปัจจุบัน เราได้คำนวณพารามิเตอร์ป้อนกลับ BFMS โดยให้

ค่าเฉลี่ยความยึดหยุ่นของการจ้างงานต่อจำนวนเคลสที่ได้ทราบตลอดระยะเวลาของการจำลองเท่ากับความยึดหยุ่นประมาณการของ 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)
<b><i>h. โครงการ A</i></b>				
30	12	23	6	15
14	26	60	17	35
7	50	111	31	63
4	88	152	43	90
<b><i>I. โครงการ B</i></b>				
30	13	160	45	65
14	27	267	74	105
7	55	354	100	138
4	97	397	112	154
<b><i>J. โครงการ C</i></b>				
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 และคณะตอบสนองต่อไวรัสน้อยกว่ากฏ BFMS และทำให้พลวัตแตกต่างกัน ประโยชน์โดยประมาณค่าจากโครงการตรวจ ทั้งในแง่การป้องกันการเสียชีวิตและในแง่

---

<sup>6</sup> เพื่อปรับให้กู้ BFMS สอดคล้องกับของ Arnon และคณะอย่างเฉพาะเจาะจง เราได้กำหนด  $K_{up}$ ,  $K_{ui}$  และ  $K_{dd}$  ในสมการในภาคผนวก (24) เป็น 0 และได้หาค่าของ  $K_{dp}$  ซึ่งจะทำให้ความยึดหยุ่นเฉลี่ยที่ได้ทราบจากโมเดลสอดคล้องกับความยึดหยุ่นการจ้างงานต่อจำนวนเคสของ Arnon และคณะ ความยึดหยุ่นดังกล่าว สัมพันธ์กับความยึดหยุ่นของจำนวนชั่วโมงทำงานเทียบกับจำนวนการเสียชีวิต ซึ่งคำนวณขึ้นจากการในภาคผนวก (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  $\varepsilon_f$  คือความยึดหยุ่นของอัตราการเสียชีวิตของเคสเทียบกับจำนวนเคส และ  $\varepsilon_h$  คือความยึดหยุ่นของจำนวนชั่วโมงต่อสัปดาห์เทียบกับการจ้างงาน  
ความยึดหยุ่น  $\varepsilon_h$  ประมาณค่าจากข้อมูลชั่วโมงและการว่างงานสะสมของสหรัฐอเมริกา และความยึดหยุ่น  $\varepsilon_f$  ประมาณค่าจากข้อมูลจำนวนเคสและการเสียชีวิตตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคมถึง 22 ตุลาคม 2020 (ช่วงเวลาที่จำนวนการตรวจค่อนข้างคงที่)

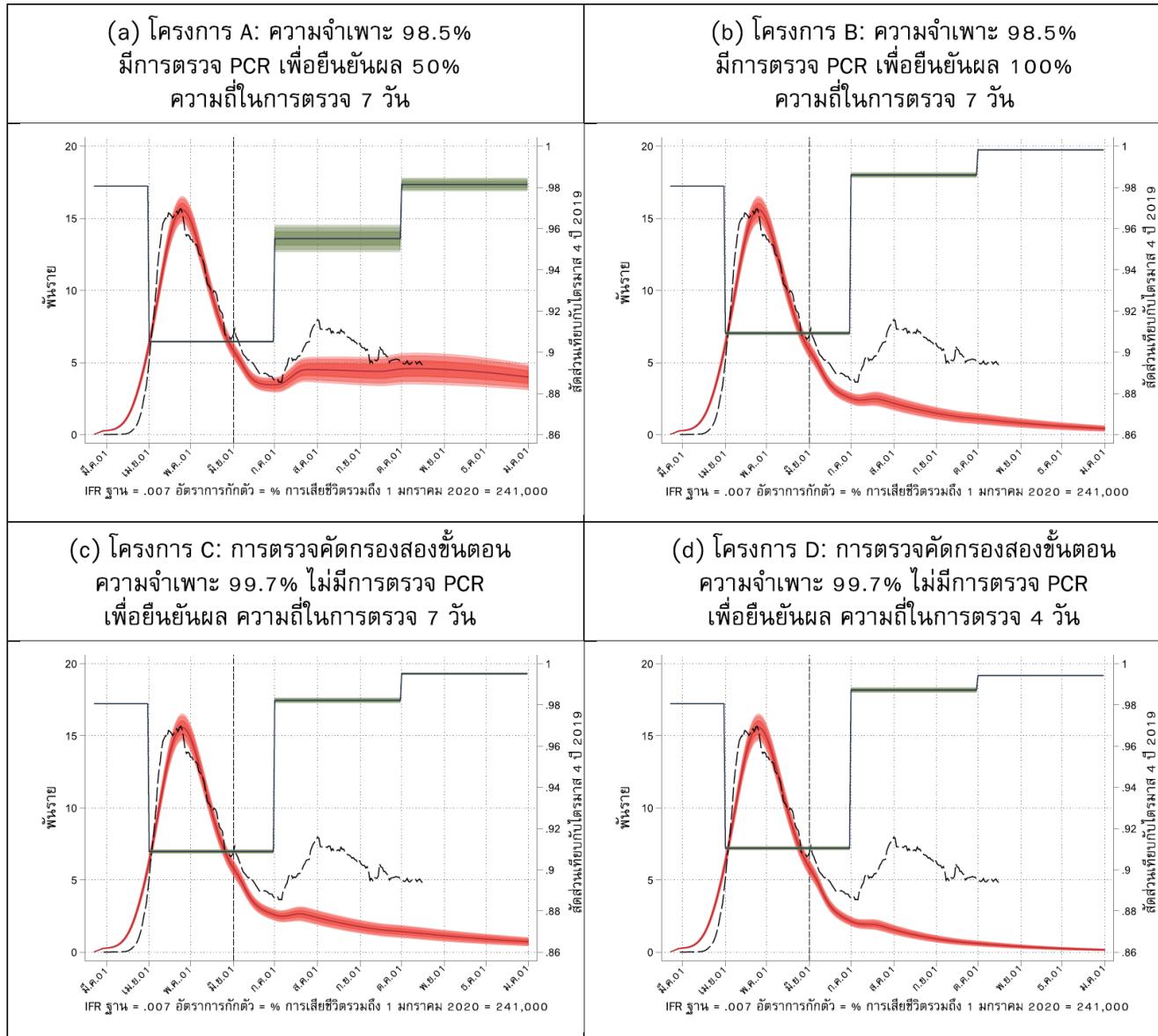
ประโยชน์ในแต่ GDP เมื่อใช้กูของ Arnon และคณะจะน้อยกว่ากู BFMS อย่างไรก็ตาม โครงการทั้งหมดยังคงให้ประโยชน์มากทางเศรษฐกิจสุทธิและประโยชน์รวมสุทธิจากการประเมินการโครงการตรวจคัดกรอง B และ C น่าจะสร้างรายได้ของรัฐมากกว่าต้นทุนในการตรวจภายในตัวอย่างของ Arnon และคณะ อย่างไรก็ตาม โครงการตรวจคัดกรอง A ไม่เป็นเช่นนั้น

### 3.5. พลวัตของสถานการณ์ที่เลือก

ภาพประกอบ 9 แสดงเส้นทางเวลาที่จำลองขึ้นของการเสียชีวิตและ GDP รายไตรมาส พร้อมด้วยแบบจำลองพลาダメตรฐานและการเสียชีวิตจริง สำหรับสถานการณ์จำลองซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นจริงสี่รูปแบบ ส่วน (a), (b) และ (c) แสดงโครงการ A, B และ C ตามลำดับ สำหรับอัตราการตรวจทุกสัปดาห์ และแผนภูมิ (d) และแสดงโครงการ C สำหรับอัตราการตรวจทุกวัน ซึ่งหั้งหมวดคำนวนขั้นภายในตัวอย่างให้สมมติฐานของตารางที่ 1 ทุกรุ่นในภาพประกอบ 9 มีเส้นทางจำนวนการเสียชีวิตต่ำกว่าและมีเส้นทาง GDP สูงกว่ากรณีพื้นฐานซึ่งไม่มีตรวจคัดกรองในภาพประกอบ 2

โครงการ A ช่วยชะลอการระบาดของไวรัสได้ แต่ไม่สามารถยับยั้งได้ อย่างไรก็ตาม แผนภูมิอื่นๆ มีความสามารถใกล้เคียงการยับยั้ง และการตรวจสอบขั้นตอน (โครงการ C) ด้วยอัตราทุก 4 วันสามารถยับยั้งไวรัสอย่างได้ผล ซึ่งส่งเสริมการพื้นตัวทางเศรษฐกิจอย่างเข้มแข็ง เมื่อทำการตรวจทุกสัปดาห์ โครงการ B และ C น่าจะสามารถหลีกเลี่ยงการระบาดระลอกที่สองในฤดูหนาวและฤดูใบไม้ร่วงได้

## ภาพประกอบ 9 เส้นทางการเสียชีวิตและ GDP ตามความเป็นจริงและการจำลอง



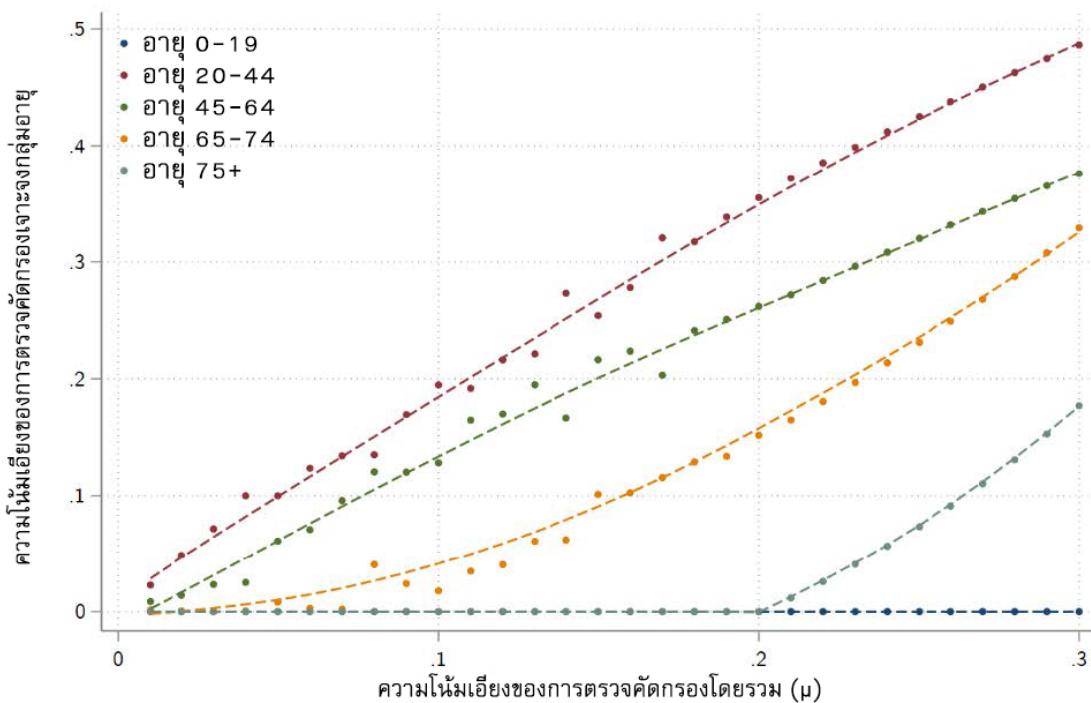
หมายเหตุ: โครงการตรวจคัดกรอง A, B และ C มีลักษณะเดียวกับในตารางที่ 1 โปรดดูหมายเหตุที่ภาพประกอบ 2

### 4. การตรวจคัดกรองเจาะจงกลุ่มอายุ

การตรวจคัดกรองอย่างเจาะจงลักษณะของบุคคลอาจให้ประสิทธิผลสูงกว่าการตรวจคัดกรองโดยสุ่มทั้งกลุ่มประชากร เนื่องจากการสัมผัสและอัตราการเสียชีวิตมีความแตกต่างกันไปตามอายุ หมวดนี้จึงพิจารณาถึงการตรวจคัดกรองโดยสุ่มภายใต้หมวดหมู่อายุ โดยมีอัตราการตรวจแต่ละกลุ่มในหมวดหมู่ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เรายังคงอัตราการตรวจตามกลุ่มอายุที่ทำให้ได้ประโยชน์รวมสูงสุด (เศรษฐกิจและอัตราการเสียชีวิตที่ตีเป็นเงิน) ของการตรวจคัดกรอง โดยมีข้อจำกัดคืออัตราการตรวจคัดกรองทั้งกลุ่มประชากรมีค่าตามที่กำหนดค่านั้น

ผลลัพธ์ของการค่านวนครั้งแรก คืออัตราการตรวจเจาะจงกลุ่มอายุที่เหมาะสมที่สุด สำหรับโครงการตรวจคัดกรอง B (การตรวจคัดกรองมีความจำเพาะ 98.5% และทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกราย) จะแสดงในภาพประกอบ 10 ซึ่งแต่ละเส้นคือความน่าจะเป็นของการตรวจสำหรับกลุ่มอายุหนึ่ง อัตราการตรวจโดยปรับเปลี่ยนกลุ่มอายุอย่างเหมาะสมที่สุดมีค่าสูงสุดสำหรับกลุ่มผู้ใหญ่วัยหนุ่มสาว (อายุ 20-44 ปี) ตามด้วยกลุ่มอายุ 45-64 ปี ตามด้วยกลุ่มอายุ 65-74 ปี ผลลัพธ์เหล่านี้ระบุว่าสามารถใช้การตรวจคัดกรองและกักตัวเพื่อตัดวงจรการแพร่ของโรคจากผู้ใหญ่วัยกลางคนไปยังผู้สูงอายุได้ ไม่ว่าผ่านครอบครัวหรือผ่านพนักงานที่ดูแลผู้สูงอายุ ซึ่งเมื่อเทียบกับกลุ่มอายุอื่นๆ พบว่าการกำหนดกลุ่มเป้าหมายดังกล่าวให้ประโยชน์ในแง่อัตราการเสียชีวิตเนื้อตันทุนทางเศรษฐกิจในการกักตัวกลุ่มประชากรวัยทำงานที่เป็นกลุ่มค่อนข้างใหญ่กว่า

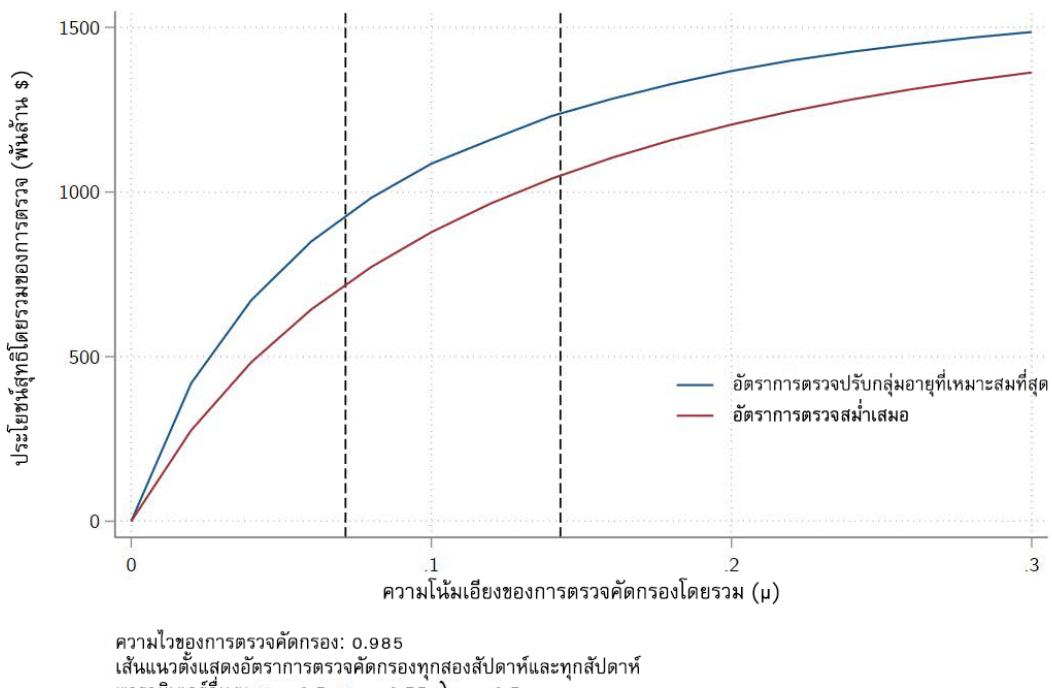
### ภาพประกอบ 10 อัตราการตรวจคัดกรองเจาะจงกลุ่มอายุที่ทำให้ได้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจสูงสุด



**หมายเหตุ:** จุดที่แสดงคือค่าประมาณตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราการตรวจกลุ่มประชากรโดยรวม  $\mu$  ที่กำหนด และเส้นต่างๆ ได้รับการปรับให้สม่ำเสมอโดยการประมาณการตามกลุ่มอายุ

ภาพประกอบ 11 แสดงประโยชน์สุทธิรวมสำหรับการตรวจคัดกรองเจาะจงกลุ่มอายุ และสำหรับการตรวจคัดกรองแบบสุมประชากรเพื่อการเปรียบเทียบ เมื่อใช้อัตราการตรวจต่อ การตรวจเจาะจงเป้าหมายจะให้ประโยชน์อย่างมากเมื่อใช้การจัดสรรที่ไม่จำกัดในภาพประกอบ 10 ประโยชน์ที่ได้รับเหล่านี้จะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการตรวจเนื่องจากໄວรัสสุกัญยังอยู่ในไวรัสตาม ประโยชน์สุทธิจะสูงกว่าเสมอหากใช้กลยุทธ์เจาะจงกลุ่มอายุ อย่างไรก็ตาม เรายังคงต้องศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพและการพัฒนาและด้านการศึกษา สำหรับเด็กที่ไม่สามารถไปโรงเรียนได้ ซึ่งการรวมต้นทุนดังกล่าวจะเป็นเหตุผลเพิ่มเติมในการตรวจกลุ่มอายุน้อยเพื่อให้โรงเรียนสามารถกลับมาเปิดอีกครั้งและทำการสอนต่อไปได้

## ภาพประกอบ 11 ประโยชน์สุทธิรวมจากการตรวจคัดกรองโดยเจาะจงกลุ่มอายุและไม่พิจารณาอายุ



## 5. การอภิปราย

ค่าตัวเลขที่เฉพาะเจาะจงซึ่งรายงานในที่นี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางระบาดวิทยา เศรษฐศาสตร์ และค่าตามการออกแบบของโครงการ ทั้งที่ได้จากการประมาณการหรือการปรับเทียบ ซึ่งค่าทั้งหมดนี้มีความไม่แน่นอน ความไม่แน่นอนดังกล่าวแสดงให้เห็นในการวิเคราะห์ความไวในหมวด 3.4 ด้วยเหตุนี้ เราจึงไม่เน้นถึงชุดค่าตัวเลขที่เฉพาะเจาะจง แต่จะเน้นทำการสรุปทิศทางโดยรวมว่าโครงการตรวจคัดกรองหลายขั้นตอนที่มีความจำเพาะสูง และได้รับการออกแบบเพื่อให้ได้รับความร่วมมือสูง มีศักยภาพทั้งในการป้องกันการเสียชีวิต และให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมาก

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

การวิเคราะห์ของเราได้ตอบข้อกังวลห้าเรื่องแรกเหล่านี้ ผลลัพธ์ของเราได้นเน้นย้ำถึงความสำคัญของข้อ กังวลสองเรื่องแรก นั่นคือ จากการวิเคราะห์ของเรา พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดคือความจำเพาะของการตรวจคัดกรอง โครงการตรวจคัดกรองจะต้องมีความจำเพาะสูง จึงจะมีความน่าเชื่อถือและทำให้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดี ค่าความจำเพาะสูงดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้โดยใช้การตรวจแบบสองชั้นตอน หากการตรวจมีความเป็นอิสระต่อกันอย่างเพียงพอ ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นของการตรวจแบบสองชั้นตอนถือว่าไม่สูงนัก เมื่อเปรียบเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ แม้การตรวจขั้นที่สองจะเป็นวิธี PCR ตาม ซึ่งการตรวจคัดกรองโดยทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณีจะทำให้ได้รับประโยชน์สูงเช่นอย่างมาก โดยปกติแล้วความจำเพาะของการตรวจจะประมาณค่าขึ้นในห้องทดลองโดยใช้ตัวอย่างจำนวนน้อย ดังนั้นความจำเพาะของการตรวจในสถานการณ์จริงอาจแตกต่างอย่างมากจากค่าประมาณการในห้องทดลอง เนื่องจากค่าความจำเพาะต่อส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของโครงการตรวจ ความไม่แนนอนดังกล่าวจึงเป็นการเน้นย้ำถึงความสำคัญของการตรวจยืนยันผลเพื่อเพิ่มความจำเพาะ

ข้อกังวลเรื่องที่สาม ค่าความไว ประเด็นนี้ถูกต้องในทางทฤษฎี แต่การจำลองโมเดลของเรา (เช่น Larremore และคณะ (2020)) พบว่าแม้ความไวจะลดลงอย่างมาก เช่น 90% ก็ส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ต่อผลลัพธ์ทางระบบวิทยาและเศรษฐกิจ ข้อกังวลเรื่องที่สี่ ความยั่งยืนทางการเงิน ประเด็นนี้มีความถูกต้องในทางทฤษฎีเช่นกัน แต่การประมาณการของเรารู้ว่าประโยชน์ที่ได้รับในทางเศรษฐกิจจากการยับยั้งไวรัส มีมาตราสัลและทำให้การทดสอบเป็นสิ่งที่คุ้มค่าเนื่องจากรายได้ที่เพิ่มขึ้น สำหรับข้อกังวลเรื่องที่ห้า ขนาดของการตรวจ เรายกเว้าการตรวจทุกสัปดาห์ในแบบแผนที่ได้รับความร่วมมือสูงให้ผลใกล้เคียงการยับยั้งไวรัส และจะได้ผลสูงเมื่อปรับไปใช้การตรวจทุกวัน การตรวจสัปดาห์ด้วยการตรวจคัดกรองที่มีความจำเพาะ 98.5% และทำการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกกรณี จะทำให้จำนวนการตรวจ PCR เพิ่มขึ้น ประมาณสามในสี่เท่าของอัตราที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน การตรวจทุกวันจะทำให้การตรวจ PCR เพิ่มเป็นกว่าสองเท่าของความสามารถในการรองรับ

การวิเคราะห์ของเรานี้ไม่ได้ตอบข้อกังวลเรื่องสุดท้ายที่ว่าการตรวจจะทำให้เกิดพฤติกรรมที่เสี่ยงมากขึ้น แม้ เช่นนั้นเรื่องนี้ก็ไม่สามารถทราบได้อย่างชัดแจ้งว่าจะเป็นจริง ผู้คนต่างให้ความร่วมมือในการระยะห่างทางสังคมและส่วนหน้ากากเพื่อป้องกันตนเอง ป้องกันผู้อื่น และเพื่อปฏิบัติตามบรรทัดฐานและกฎหมายของท้องถิ่น การได้รับผลตรวจเป็นลบในตอนเช้าไม่ได้ลดความตั้งใจที่จะป้องกันตัวเองตลอดทั้งวันนั้น ผลกระทบต่อพฤติกรรมจากผลตรวจเป็นบวกมีความคลุมเครือ นั่นคือ ความเห็นแก่ผู้อื่นจะส่งผลให้บุคคลลดการสัมผัสมemens ไม่ได้กักตัว แต่ความไม่กังวลถึงสุขภาพของตนเองและเห็นแก่สุขภาพผู้อื่นเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดพฤติกรรมที่มีความเสี่ยงมากขึ้น จำเป็นต้องมีการวิจัยเชิงประจักษ์เกี่ยวกับผลกระทบดังกล่าว

การวิเคราะห์ในที่นี้มีการลดความชันช้อนหลายประการ จึงมีข้อแม้จำนวนน้ำมาก ในด้านเศรษฐกิจ แนวคิดเกี่ยวกับ GDP ในเอกสารนี้คือผลผลิตของภาคเอกชน และไม่ได้รวมถึงมาตรการรับมือฉุกเฉินซึ่งทำให้มีการขาดทุนสะสมที่ต้องดำเนินการในระหว่างการระบาดใหญ่ โดยเฉพาะการรับมือฉุกเฉินทั้งประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกา จึงจำเป็นต้องมองข้างลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค และอาจไม่ได้จำลองถึงความชัดแย้งหรือผลลัพธ์ที่ส่งผลปรับเปลี่ยนต่างๆ นอกเหนือจากที่เกิดขึ้นจากผลลัพธ์ทางระบบวิทยา

ในแง่ระบาดวิทยา เราไม่ได้รวมการติดตามการติดต่อไว้ด้วย เนื่องจากโดยทั่วไปไม่สามารถทำการติดตาม การติดต่อได้อย่างทันต่อสถานการณ์ในสหราชอาณาจักรในขณะนี้ การติดตามการติดต่อจะช่วยเพิ่มประโยชน์ของ การตรวจที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจากการตรวจ PCR เพิ่มเติมภายในระบบสาธารณสุข

เนื่องจากจะสามารถระบุจำนวนแคลสได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ต้นทุนจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย และลำดับต่อไปคือ ต้องทำการประเมินต้นทุน-ประโยชน์ ของการรวมการตรวจคัดกรองเข้ากับการติดตามการติดต่อที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (และได้รับความร่วมมือบางส่วน) อีกประการหนึ่ง โนเดลน์ไม่ได้แยกแยกความแตกต่างระหว่างสถานที่ทำงานที่มีความเสี่ยงสูงและต่ำ จากที่เราพบประโยชน์ของการตรวจคัดกรองโดยเจาะจงกลุ่มอายุ ก็เป็นไปได้ว่าการตรวจคัดกรองโดยเจาะจงตามจำนวนการติดต่อจากการนั้นๆ น่าจะเกิดประโยชน์เช่นกัน นอกจากนี้ เราไม่ได้จำลองโนเดลการตรวจแบบพูล หากผลิตชุดตรวจแอนติเจนได้ช้าอาจใช้วิธีการตรวจแบบพูล เช่น ในระดับรวมทั้งครัวเรือน โดยมีการยืนยันผลด้วยการตรวจแอนติเจนหรือการตรวจ PCR หรือทั้งสองวิธี ซึ่งวิธีดังกล่าวมีศักยภาพที่จะช่วยเพิ่มอัตราส่วนประโยชน์-ต้นทุน และเราไม่ได้จำลองโนเดลความลุյใจที่จะทำให้ได้รับความร่วมมือในการกักตัวตามคำแนะนำมากขึ้น แม้การวิเคราะห์ความไวของเรายืนยันว่าความร่วมมือที่เพิ่มขึ้นจะช่วยยับยั้งไวรัสได้ชั้นก้าวตาม สำหรับบังคน การให้ความร่วมมือเป็นการตอบสนองทางพฤติกรรม แต่สำหรับคนอื่นๆ การให้ความร่วมมือเป็นไปได้ยากเนื่องจากสภาพการดำรงชีวิต (มีเพื่อนร่วมห้อง หรือครอบครัวใหญ่ที่อาศัยอยู่ในอาคารเดียวกัน) หรือเนื่องจากปัจจัยทางการเงิน เพราะต้องขาดงาน ซึ่งในกลุ่มเหล่านี้การเข้าจัดการตามนโยบายเคสจะช่วยผู้ที่ต้องการให้ความร่วมมือกักตัวได้ นอกจากนี้ เราไม่ได้พิจารณาการตรวจ PCR ช้า เนื่องจากขณะนี้สามารถรองรับการตรวจ PCR ได้จำกัด อย่างไรก็ตาม การตรวจ PCR ช้าอาจมีประโยชน์ในการระบุสถานะของการติดเชื้อ จึงช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนระยะเวลาของการกักตัวให้เหมาะสมสมกับบุคคลได้โดยละเอียด และลดภาระโดยรวมในการกักตัว (Kissler และคณะ (2020))

ท้ายสุด การศึกษาของเราก็ยังคงประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการตรวจคัดกรองโควิด 19 ไม่ได้พิจารณาถึงประโยชน์ทางสาธารณสุขของข้อมูลที่ได้สร้างขึ้นจากโครงการเฝ้าระวังโรคตั้งกล่าว (เราตระหนักรว่าได้มีการตรวจเพื่อวัดคุณประสิทธิภาพในการวินิจฉัยโรคและในด้านสาธารณสุขสำหรับไข้หวัดใหญ่ตามฤดูกาลและเพื่อหาสายพันธุ์ใหม่ของไข้หวัดใหญ่ A เป็นระยะอยู่แล้ว) แม้ผลการตรวจคัดกรองที่บ้านไม่ได้รวมเข้าไปในระบบข้อมูลสาธารณสุข แต่การตรวจ PCR เพื่อยืนยันผลทุกรายจะช่วยเพิ่มความครอบคลุมของข้อมูล เนื่องจากจะไม่มีการจำกัดการตรวจเพียงเพื่อวินิจฉัยผู้ที่แสดงอาการเท่านั้น ดังที่เป็นอยู่ในขณะนี้ ด้วยเหตุนี้ แบบแผนการตรวจของเราน่าจะช่วยให้มีการวิเคราะห์ที่ทันท่วงทีและละเอียดลออยิ่งขึ้นอย่างมาก เกี่ยวกับความชุกและการแพร่ของโควิด 19 สำหรับไข้ในกลุ่มคนที่สามารถทำได้ด้วยข้อมูลการตรวจวินิจฉัยเท่าที่มีอยู่ในขณะนี้ สันนิษฐานได้ว่าการพิจารณาถึงการใช้งานข้อมูลที่สร้างขึ้นจากแบบแผนการตรวจคัดกรองเป็นวงกว้างเพื่อช่วยปรับรูปแบบของมาตรการบรรเทาการระบาดที่ได้ผลและต้นทุนต่ำ จะช่วยเพิ่มประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

## ภาคผนวก 1

ภาคผนวกนี้เสนอรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับโนเมเดล ซึ่งขยายขอบเขตของโนเมเดลที่พัฒนาขึ้นใน Baqaee, Farhi, Mina และ Stock (2020) โนเมเดลของเรามีเปลี่ยนแปลงสำคัญหลายอย่างแตกต่างไปจาก BFMS ประการแรก เราได้ขยายโนเมเดลให้ครอบคลุมทั้งแบบแผนการตรวจคัดกรองและแบบแผนการตรวจริบิจฉัย ประการที่สอง เราถือว่าบุคคลได้รับคำแนะนำให้กักตัวเมื่อได้รับผลบวกเป็นที่ยุติ ไม่ว่าจากการตรวจคัดกรองโดยไม่มีการตรวจยืนยันผล หรือจากการตรวจวินิจฉัยที่ได้ผลบวกผู้ที่รอผลตรวจวินิจฉัยได้รับคำแนะนำให้กักตัวเอง ประการที่สาม เราได้แยกแบ่งผู้ที่เพียงหายป่วยและผู้ที่ฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์ออกจากโรค เพื่อชี้ให้เห็นว่าบุคคลเหล่านี้อาจยังคงได้ผลบวกจากการตรวจ PCR หลังจากที่ไม่สามารถแพร์เชื้อได้แล้วก็ตาม ประการสุดท้าย เรากำหนดให้มีความร่วมมือเพียงบางส่วนในการกักตัวผู้มีความเสี่ยงและผู้ป่วย

### โนเมเดลทางระบาดวิทยา

กลุ่มอายุมีหักลุม ซึ่งระบุด้วย  $a$  หมายถึงอายุ 0-19, 20-44, 45-64, 65-74 และ 75 ปีขึ้นไป เชกเดอร์ธริกเจอกชนมี 66 เชกเตอร์ ซึ่งระบุด้วย  $i$  บุคคลจะแบ่งออกเป็นกลุ่ม S (Susceptible - มีโอกาสติดเชื้อ), E (Exposed - ได้รับเชื้อ), I (Infected - ติดเชื้อ), R (Recently recovered - เพียงหายป่วย), F (Fully recovered - ฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์) หรือ D (Dead - เสียชีวิต) นอกจากนี้ ผู้ที่ไม่เสียชีวิตจะอยู่ในกลุ่ม Actively circulating - พร้อมเป็นพาหะ (A) Awaiting diagnostic test results - รอผลการตรวจริบิจฉัย (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 มีโอกาสติดเชื้อและรอผลการตรวจริบิจฉัย และ มีโอกาสติดเชื้อและอยู่ระหว่างกักตัว ตามลำดับ เราถือว่าผู้ที่หายป่วย (ทั้งกลุ่มเพียงหายป่วยและฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์) มีภูมิคุ้มกันจนกระหึ่มสูงสุดระยะเวลาการจำลองของเรา

อัตราการตรวจคัดกรองและการตรวจวินิจฉัยจะระบุด้วยพารามิเตอร์  $\mu$ ,  $\rho_0$  และ  $\rho_1$  ดังที่ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 2 เราถือว่าพารามิเตอร์เหล่านี้เท่ากับศูนย์ในระยะเวลาประมาณการของโนเมเดลของเรา คือตั้งแต่รันที่ 1 มีถูกนัยน์ และได้รับการปรับเทียบหลังจากนั้นตามข้อความหลักของเอกสารนี้

ตัวแปรสถานะของโรค (นั่นคือ SA) คือเวกเตอร์ห้ามติดทั้งหมด กำหนดให้  $Xa$  เป็นองค์ประกอบที่ 0 ของสถานะของโรคสถานะใดก็ได้ X (กลุ่มอายุที่  $a$ ) ด้านระบาดวิทยาของโนเมเดลนี้มีสมการการเปลี่ยนผ่าน 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  $Inf_a$  คือจำนวนประลิขิผลของผู้ที่ติดเชื้อซึ่งพร้อมเป็นพาหะ  $Inf_a = IA_a + IS_a + \alpha ID_a + \alpha IQ_a$  ในนิพจน์สุดท้ายนี้เราให้ค่าคงบวกของการรับการตรวจวินิจฉัยเท่ากับการรับการตรวจคัดกรองได้ผลบวก (ซึ่งเหมือนกับการได้ผลบวกจากการตรวจคัดกรองและเข้ารับการตรวจ PCR เพื่อยืนยันผล) ดังนั้นการไม่ให้ความร่วมมือกักตัวจึงเท่ากับการไม่ให้ความร่วมมือเมื่อได้ผลตรวจคัดกรองเป็นบวกเป็นที่ยุติ

พารามิเตอร์  $\alpha$  คือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\alpha_D$  ซึ่งเป็นอัตราการให้ความร่วมมือกักตัวสำหรับผู้ที่เข้ารับการตรวจคัดกรองและการตรวจวินิจฉัยตามลำดับ ค่าน้ำหนักดังกล่าวได้รับการกำหนดและระบุโดยไม่มีปัจจัยจากภายนอก ตามสัดส่วนสัมพัทธ์ของผู้ที่ได้รับคำแนะนำให้กักตัว

หลังจากเข้ารับการตรวจคัดกรองเทียบกับหลังจากการตรวจวินิจฉัย ตั้งนั้น  $\alpha$  คืออัตราการให้ความร่วมมือ ประสิทธิ์ผลของผู้ที่อยู่ระหว่างการกักตัว หากผู้ที่กักตัวมาจากการตรวจคัดกรองเป็นส่วนใหญ่ ค่า  $\alpha$  จะใกล้เคียงกับ  $\alpha$  อัตราการให้ความร่วมมือกักตัวสำหรับประชากรที่ได้รับการคัดกรอง เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรากฏในสมการ (1) จนถึง (21) ข้างต้น และกำหนดสภาวะตั้งต้น จะสามารถใช้โมเดลนี้เพื่อหาคำตอบในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างไม่ยุ่งยาก ด้วยการทำซ้ำต่อไปข้างหน้า หน่วยของเวลาคือหนึ่งวัน และโมเดลนี้จะหาคำตอบ 12 ขั้นในแต่ละวัน

### เมทริกซ์การสัมผัส

เมทริกซ์การสัมผัส  $C$  คือนายถึงจำนวนการติดต่อที่คาดไว้ว่าระหว่างแต่ละกลุ่มอายุในกลุ่มประชากร ผู้ที่พร้อมเป็นพาหะในกลุ่มอายุ  $a$  ซึ่งมีการติดต่อ กับผู้ที่อยู่ในกลุ่มอายุ  $b$  มีความเป็นไปได้ในการติดเชื้อในทันที  $\beta$  เท่าของความเป็นไปได้ที่ผู้ที่อยู่ในกลุ่มอายุ  $b$  จะติดเชื้อ ความเป็นไปได้ที่ผู้ที่มีอายุในกลุ่ม  $a$  จะติดเชื้อในช่วงเวลาที่กำหนดจึงระบุได้โดยการรวมการติดต่อทั้งหมดของพวกเข้า เรายังแยกแยะการสัมผัสที่เกิดขึ้นที่บ้าน ที่ทำงาน และที่อื่นๆ เมทริกซ์การสัมผัสจะแบ่งตามเวลา และสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากหลายปัจจัย เช่น NPI หรือสูบบุหรี่ หรือการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมส่วนบุคคลเพื่อลดเสี่ยงการได้รับไวรัส เป็นต้น เราเม

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

เมื่อ  $C_{ab}^{home}$ ,  $C_{ab}^{other}$ ,  $C_{ab}^{work}$  แสดงจำนวนที่คาดไว้ว่าของการสัมผัสที่บ้าน ที่ทำงาน และสภาพแวดล้อมอื่นๆ แต่ละแห่ง ในกรณีเมื่อยู่ที่บ้าน ที่ทำงาน หรือที่อื่นๆ พารามิเตอร์  $p_a^{home}$ ,  $p_a^{other}$  และ  $p_{a,i}^{work}$  แสดงความเป็นไปได้ที่ผู้ที่อยู่ในกลุ่มอายุ  $a$  จะอยู่ที่บ้าน ที่ทำงาน หรือที่อื่นๆ เราทราบว่า  $p_{a,i}^{work}$  คือส่วนที่มีการจ้างงานในเขตเดอร์ที่แสดง

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

เมื่อ  $L_{a,i}$  คือจำนวนพนักงานในกลุ่มอายุ  $a$  ซึ่งทำงานในเขตเดอร์  $i$  ส่าหรับข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับประมาณการจากการสร้างและจากประวัติของเมทริกซ์การสัมผัส โปรดดูหมวด 1.2 และ 2 ของ BFMS (2020)

### กฎการควบคุมป้อนกลับทางพฤติกรรม

องค์ประกอบของโมเดลนี้จะกำหนดเมทริกซ์การสัมผัสในช่วงเวลาของการจำลองของเรา (กล่าวคือ หลังจากวันที่ 1 มิถุนายน) โดยไม่มีปัจจัยจากภายนอก ส่วนนี้ของโมเดลไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก BFMS 2020 เราจะอธิบายโดยคร่าวถึงองค์ประกอบสำคัญของกฎควบคุมในส่วนนี้เพื่อความครบถ้วน ในช่วงเวลาการจำลองของเรา (วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 ธันวาคม) เราถือว่าเมทริกซ์การสัมผัสดูแลสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแนวทางของการระบาดใหญ่โดยไม่มีปัจจัยจากภายนอก เราได้นำมาปรับใช้โดย

ใช้กฎการควบคุมปริพันธ์-อนุพันธ์สัดส่วน (PID) แบบเชิงเส้น ซึ่งการป้อนกลับจะขึ้นอยู่กับการเสียชีวิตในปั๊มจุบัน การเปลี่ยนแปลงของการเสียชีวิตใน 14 วัน อัตราการว่างงานในปั๊มจุบัน 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  $D$  ค่าดังกล่าวจะมีร่วมกับข้อมูลสะสมเดือนหรือร่วมกับการรายงานความล่าช้าเท่านั้น เราจึงใช้ค่าอัตราการว่างงานเฉลี่ย 14 วัน อัตราการว่างงานรายวันสะสมตั้งแต่วันที่ 7 มีนาคม การเสียชีวิตตลอดสองวันที่ผ่านมา และการเปลี่ยนแปลงในช่วง 14 วันของอัตราการเสียชีวิตในสองวัน สำหรับพจน์ต่างๆ ที่ด้านขวาของสมการนี้

ตัวควบคุม PID จะระบุลำดับของผลกระทบของอุปทานแรงงานในเชกเตอร์ 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  $L_{it}$  ในเชกเตอร์  $i$  ณ วันที่  $t$  ซึ่งเป็นส่วนย่อยของจำนวนชั่วโมงแรงงานก่อนการระบาดใหญ่ (กล่าวคือ กุมภาพันธ์ 2020) และ  $t_R$  คือวันที่เริ่มนับระยะเวลาของการจำลอง (1 มิถุนายน) และ  $\Phi$  คือการแจกแจงแบบเกาส์ส์สม (ซึ่งไม่มีบทบาท ยกเว้นเป็นขีกมอยด์สำหรับจำกัดตัวควบคุมระหว่าง 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  $a$  ซึ่งกลับมาทำงานในเชกเตอร์  $i$  ในสเกลจริง ดัชนี GDP ต่อความเสี่ยงไม่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางระบบวิทยา ยกเว้นเมทริกซ์การสัมผัสหน่วย  $\theta$  ไม่มีความหมาย เราจึงได้กำหนดมาตรฐานให้หมายถึงศูนย์ และเป็นรูปแบบของหน่วยในเชกเตอร์ต่างๆ (ถ่วงน้ำหนักเท่ากัน)

ดังนี้ ตัวควบคุมจึงปรับเปลี่ยนองค์ประกอบการสัมผัสในที่ทำงานของเมทริกซ์การสัมผัสอย่างได้ผล ในท่านองเดียวกัน เราสามารถนึกถึงตัวควบคุมขณะที่สร้างลำดับของผลกระทบของอุปทานแรงงาน ซึ่งสามารถใช้เพื่อคืนค่า GDP โดยใช้ทฤษฎีของ Hulten เป็นประมาณการอันดับแรก ดังนี้

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

เมื่อตัวห้อย · แสดงผลรวมตลอดช่วงกลุ่มอายุ และ  $\Psi_i$  แสดงส่วนแบ่งรายได้ของแรงงานสำหรับเชกเตอร์  $i$