



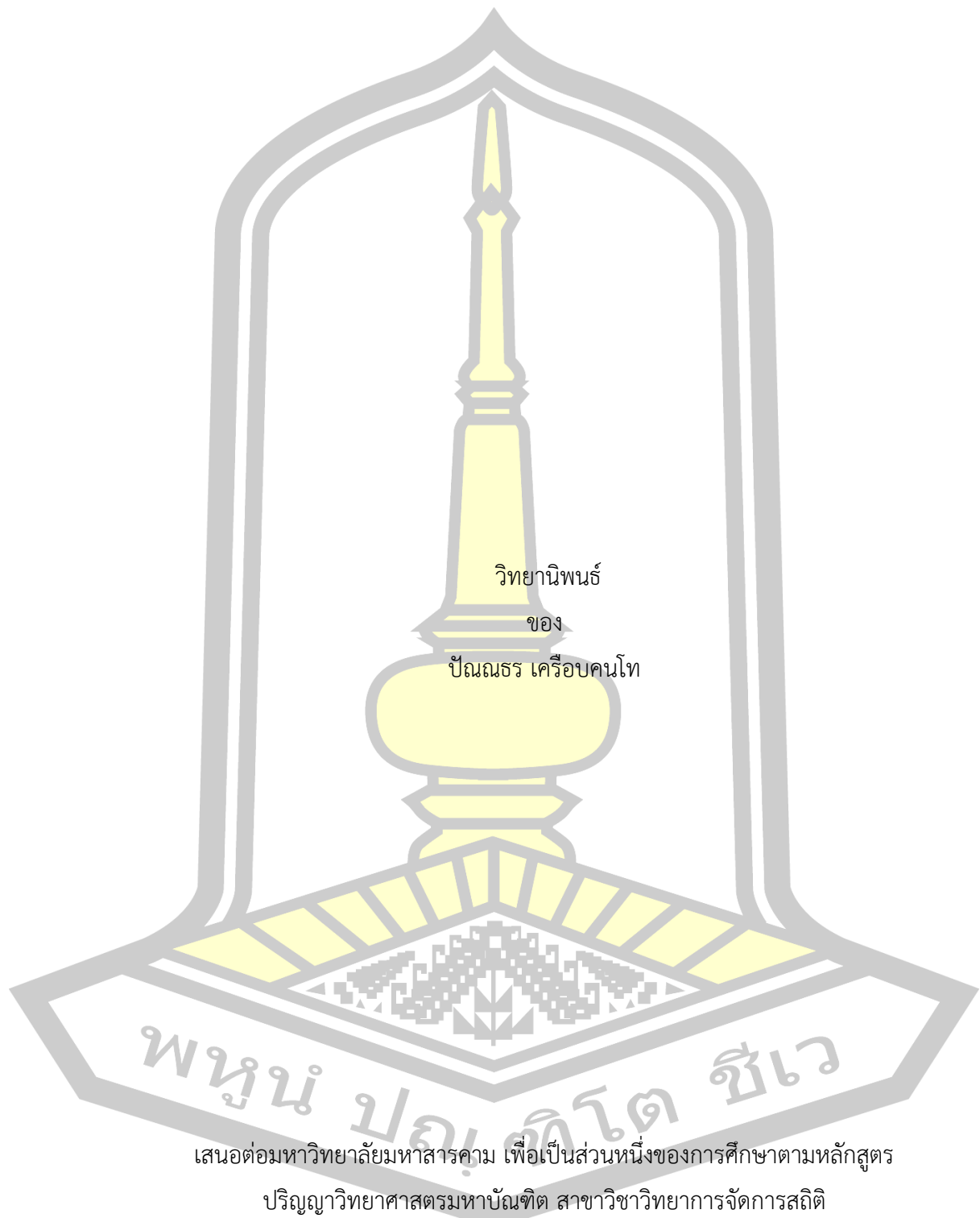
การศึกษาการระบาดของโรค Covid-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

วิทยานิพนธ์
ของ
ปณณธร เครือบคนโท

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการจัดการสถิติ
มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การศึกษาการระบาดของโรค Covid-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์



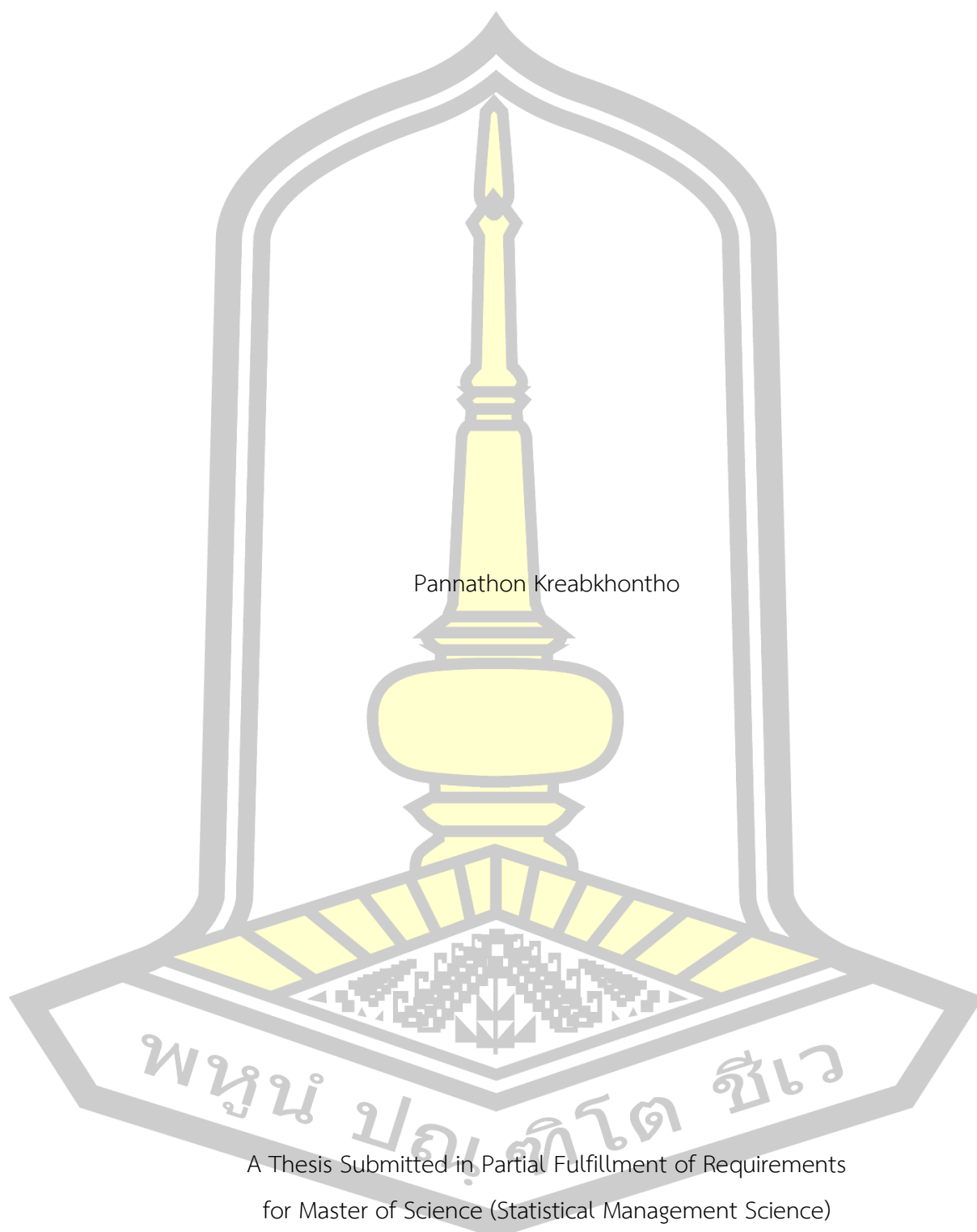
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการจัดการสถิติ

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Study of the 5th wave of COVID-19 outbreak in Thailand using Mathematical Model



Pannathon Kreabkhontho

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Statistical Management Science)

March 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปณณธร เครือบคนโท แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการจัดการสถิติ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. วุฒิชัย ศรีโสดาพล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. จูติยา เทพารส)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นงลักษณ์ วิริยะพงษ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. สุจิตตา สุระภี)

กรรมการ

(รศ. ดร. นิภาพร ชุตินันต์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการจัดการสถิติ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

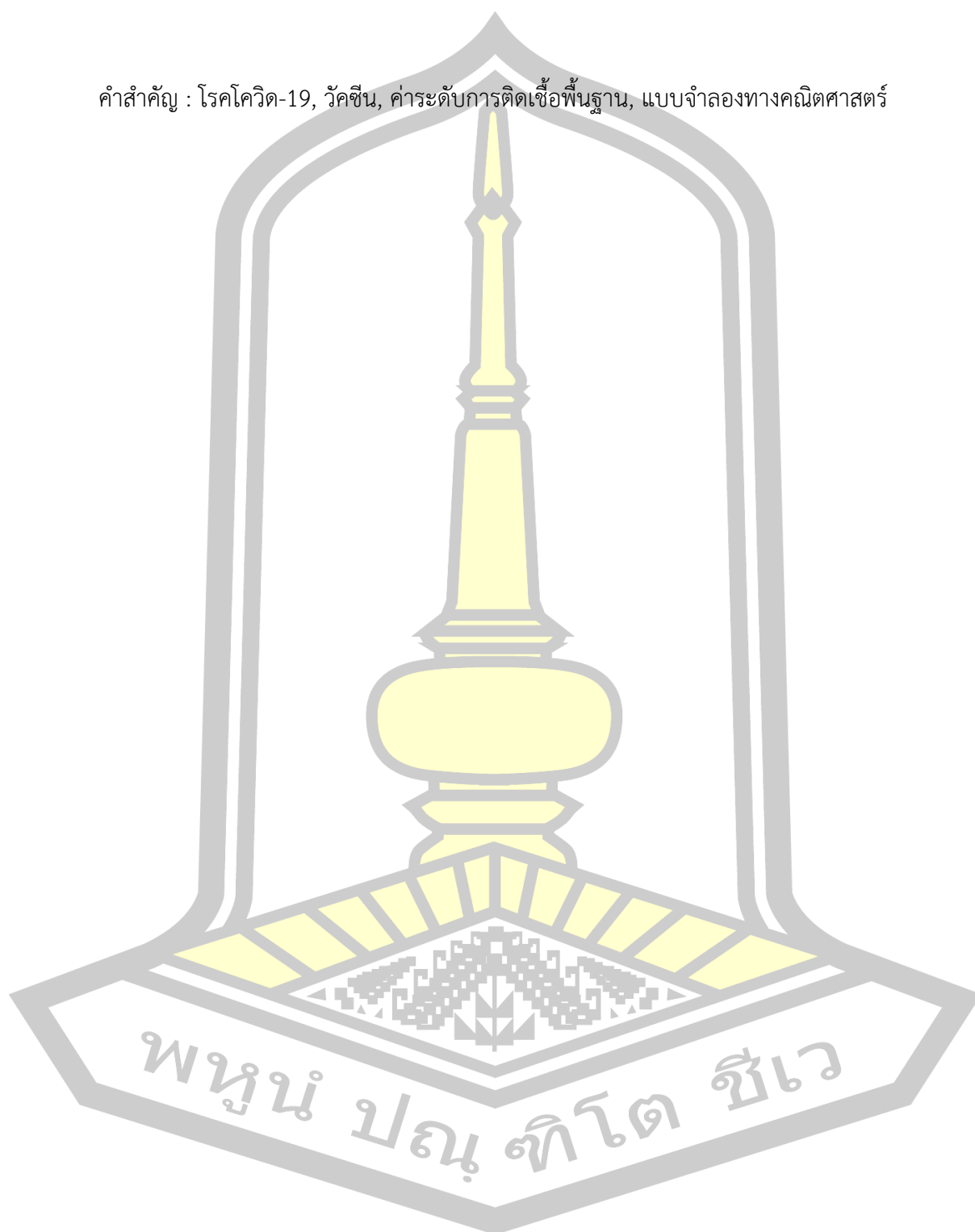
ชื่อเรื่อง	การศึกษาการระบาดของโรค Covid-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์		
ผู้วิจัย	ปณณธร เครือบคนโท		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุติยา เทพารส		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิทยาการจัดการสถิติ
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

โรคโควิด-19 เป็นโรคติดต่อจากคนสู่คนซึ่งเกิดจากละอองฝอยขนาดเล็กจากการไอหรือจาม โดยในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 สายพันธุ์โอมิครอน ในระลอกที่ 5 ซึ่งพบผู้ติดเชื้อเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับระลอกก่อนหน้านี้ ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาการแพร่ระบาด และมาตรการในการป้องกันโรคจากการฉีดวัคซีนทั้ง 3 เข็ม จึงได้พัฒนาและสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วย 8 กลุ่มประชากร ได้แก่ กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อ กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ (อาการไม่รุนแรง) กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษานในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง) กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษานในห้อง ICU (อาการวิกฤต) กลุ่มประชากรที่พักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล กลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อ และกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อ เพื่ออธิบายการแพร่ระบาดของโควิด-19 และศึกษาผลกระทบของการฉีดวัคซีนในการควบคุมการแพร่ระบาดโรคโควิด-19 ซึ่งได้มีการศึกษากลุ่มประชากรติดเชื้อเพื่อหาค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์และวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่า เสถียรภาพเฉพาะที่ของจุดสมดุลภายใต้สภาวะแพร่ระบาดจะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ ถ้า $R_0 > 1$ และจะไม่มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ ถ้า $R_0 < 1$ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังวิเคราะห์ความอ่อนไหวตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน และกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อภายใต้สภาวะการแพร่ระบาด จากการวิเคราะห์ พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานและส่งผลกระทบต่อกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อภายใต้สภาวะการแพร่ระบาดที่ส่งผลมากที่สุดในทางบวก คือ อัตราการแพร่เชื้อ และส่งผลมากที่สุดในทางลบ คือ ประสิทธิภาพวัคซีน จากการวิจัยพบว่าการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 และ 2 มีประสิทธิภาพในการควบคุมการแพร่กระจายโรคโควิด-19 ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งต่างจากการฉีดวัคซีนครบทั้ง 3 เข็ม พบว่า มีประสิทธิภาพในการควบคุมการแพร่กระจายโรคได้ดีกว่าการฉีดวัคซีนเพียงแค่สองเข็ม และพบว่าควรควบคุมอัตราการฉีดวัคซีนให้เหมาะสมในการควบคุมการแพร่ระบาดโรคมีค่าเท่ากับ 0.0012 หรือ

เท่ากับ 79,200 โดสต่อวัน

คำสำคัญ : โรคโควิด-19, วัคซีน, ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



TITLE	Study of the 5 th wave of COVID-19 outbreak in Thailand using Mathematical Model		
AUTHOR	Pannathon Kreabkhonho		
ADVISORS	Assistant Professor Thitiya Theparod , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Statistical Management Science
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

COVID-19 is a person-to-person disease caused by small droplets released during coughing or sneezing. Currently, Thailand is experiencing an outbreak of COVID-19, specifically the Omicron strain during the 5th wave, leading to a significant number of infections. This surge has sparked increased interest among researchers in studying the spread of the virus and implementing measures to prevent the disease through a three-dose vaccination strategy. Consequently, a mathematical model has been developed, comprising eight population groups. These groups include those at risk of infection, those receiving vaccination, individuals with mild symptoms, those undergoing hospital treatment for severe symptoms, individuals in critical condition receiving ICU treatment, individuals recovering from ICU treatment, individuals recovering from infection, and those who unfortunately succumbed to the infection. The objective of this model is to elucidate the dynamics of COVID-19 spread and investigate the impact of vaccination in controlling the disease. The study began by examining the baseline infection levels in the infected population. Subsequently, mathematical and numerical analyses were conducted. The findings revealed that the local stability of the epidemic equilibrium point during is asymptotically stable if the reproduction number is greater than 1 ($R_0 > 1$), while it is not asymptotically stable if R_0 is less than 1 ($R_0 < 1$). Furthermore, researchers explored the sensitivity of the model parameters

concerning baseline infection levels and the infected population during an epidemic. The analysis identified that the transmission rate and vaccine efficiency are critical factors affecting these parameters. The research highlighted the effectiveness of the first and second vaccine doses in controlling the spread of COVID-19, with no significant difference between them. In contrast, complete vaccination with all three doses was found to be more effective than just two doses, emphasizing the importance of the vaccination rate in disease control. The recommended vaccination rate for optimal control was determined to be 0.0012 or equivalent to 79,200 doses per day.

Keyword : Covid-19, Vaccine, Basic reproduction number, Mathematical model



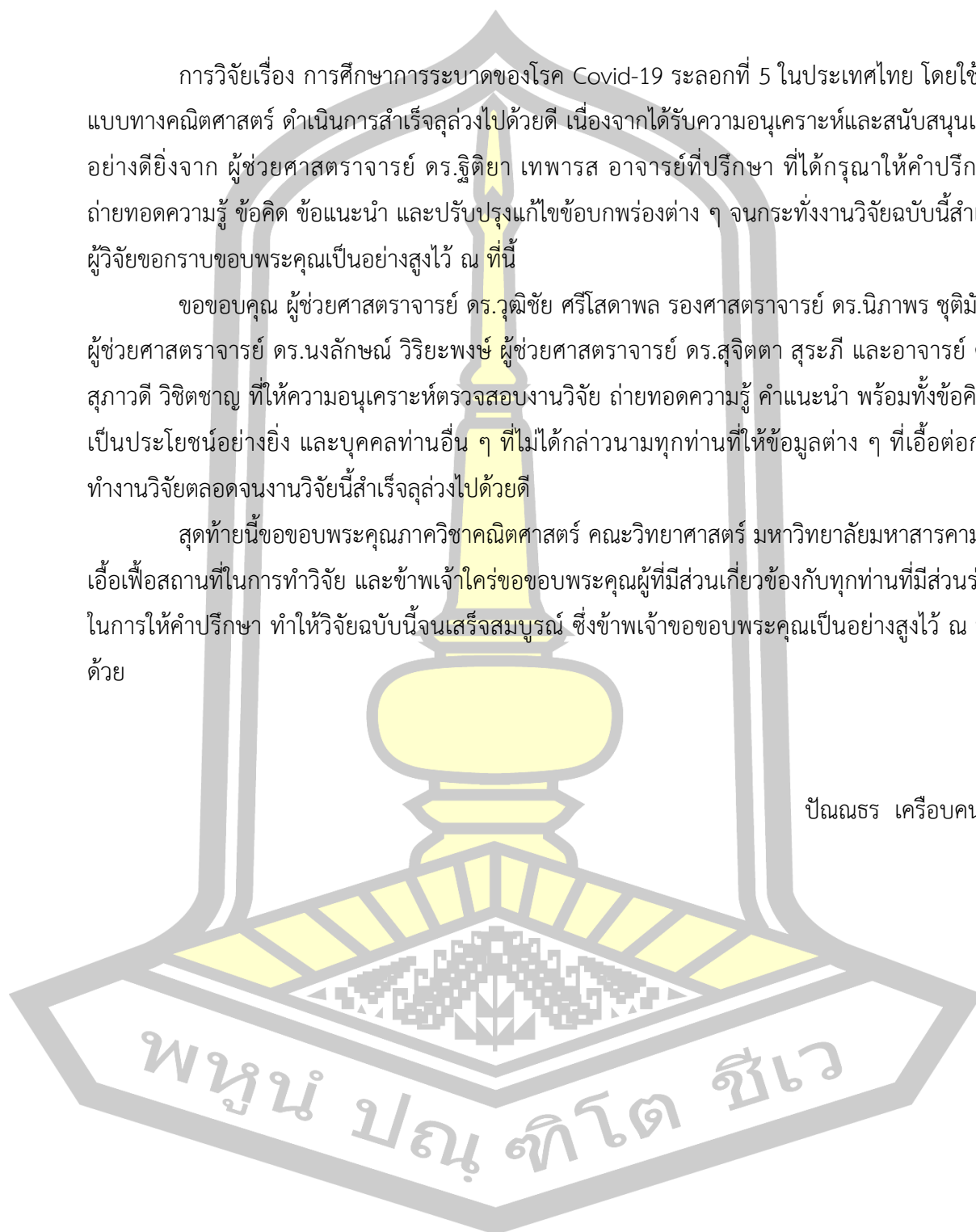
กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การศึกษาการระบาดของโรค Covid-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตียา เทพารส อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย ศรีไสดาพล รองศาสตราจารย์ ดร.นิภาพร ชูติมันต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงลักษณ์ วิริยะพงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตตา สุระภี และอาจารย์ ดร.สุภาวดี วิจิตชาญ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบงานวิจัย ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ พร้อมทั้งข้อคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และบุคคลท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามทุกท่านที่ให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่เอื้อต่อการทำงานวิจัยตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษา ทำให้วิจัยฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ปณณธร เครือบคนโท



สารบัญ

หน้า

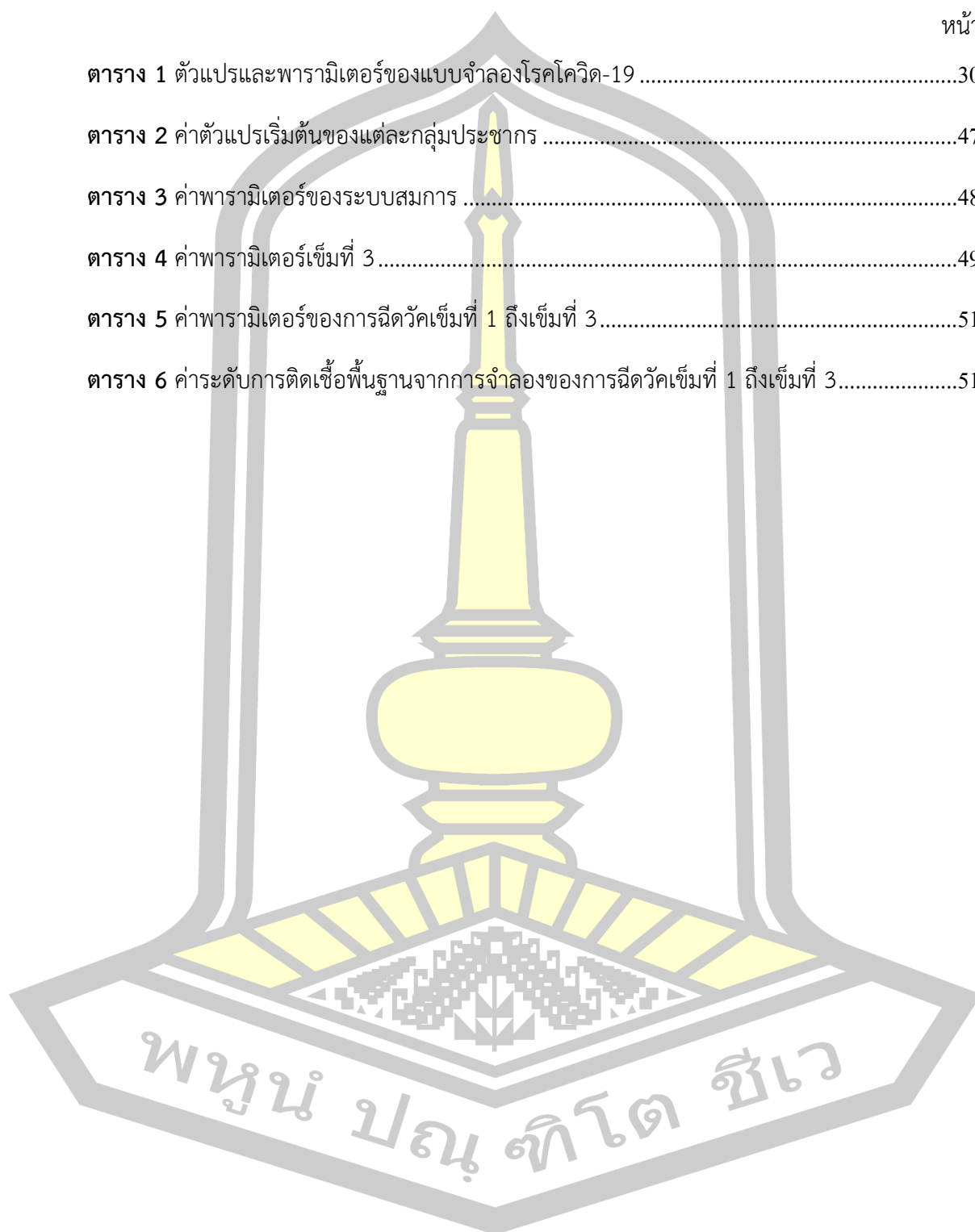
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ณ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. หลักการและเหตุผล	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3. ขอบเขตการวิจัย	3
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5. นิยามศัพท์เฉพาะ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 โรคโควิด-19	7
2.2 การแพร่ระบาดของโควิดในประเทศไทย	10
2.3 วัคซีนโควิด-19	13
2.4 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1 ข้อตกลงเบื้องต้นของแบบจำลอง	29
3.2 กำหนดค่าตัวแปรและพารามิเตอร์	30

3.3 การสร้างแบบจำลองของประชากร	31
3.4 การตรวจสอบความไม่เป็นลบและขอบเขตของจำนวนประชากร (Positive of Solution and invariant region)	36
3.5 การหาจุดสมดุล (Equilibrium Point)	36
3.6 การหาค่าระดับการติดเชื้อ (Basic Reproduction Number)	39
3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis)	41
3.8 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)	47
3.9 วิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)	51
บทที่ 4 ผลการวิจัย	54
4.1 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 เมื่อมีอัตราการแพร่เชื้อที่แตกต่างกัน	54
4.2 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 เมื่อมีประสิทธิภาพวัคซีนที่แตกต่างกัน	55
4.3 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 เมื่อมีอัตราการฉีดวัคซีนที่แตกต่างกัน	56
4.4 การเปรียบเทียบค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานกับอัตราการฉีดวัคซีนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	57
4.5 การวิเคราะห์ตัวเลขการแพร่ระบาด เมื่ออัตราการฉีดวัคซีนเท่ากับ 0.0012	58
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการวิจัย	59
5.2 อภิปรายผล	60
5.3 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	62
ประวัติผู้เขียน	67

สารบัญตาราง

หน้า

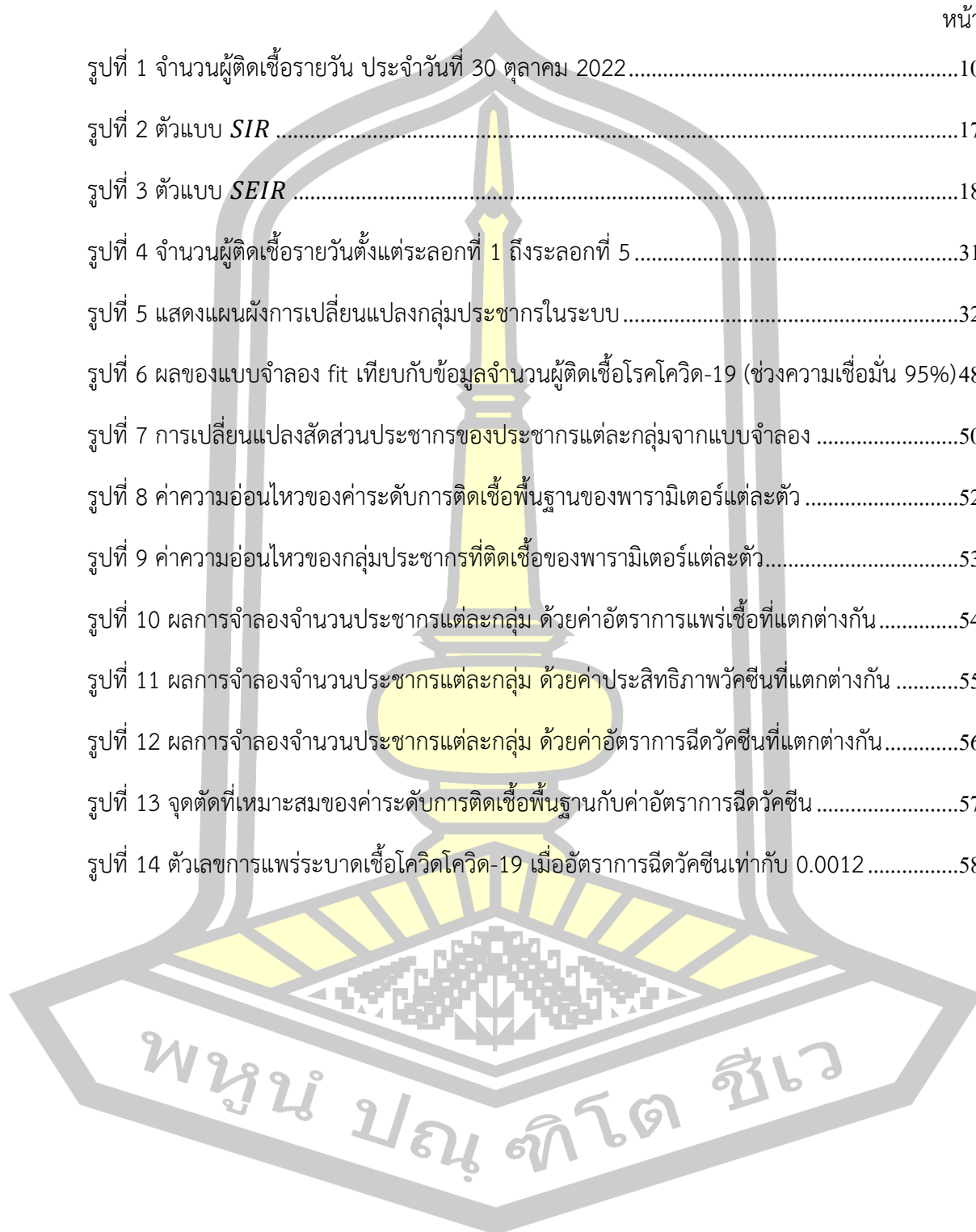
ตาราง 1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลองโรคโควิด-19	30
ตาราง 2 ค่าตัวแปรเริ่มต้นของแต่ละกลุ่มประชากร	47
ตาราง 3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสมการ	48
ตาราง 4 ค่าพารามิเตอร์เข็มที่ 3	49
ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3	51
ตาราง 6 ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานจากการจำลองของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3	51



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 จำนวนผู้ติดเชื้อรายวัน ประจำวันที่ 30 ตุลาคม 2022.....	10
รูปที่ 2 ตัวแบบ <i>SIR</i>	17
รูปที่ 3 ตัวแบบ <i>SEIR</i>	18
รูปที่ 4 จำนวนผู้ติดเชื้อรายวันตั้งแต่ระลอกที่ 1 ถึงระลอกที่ 5.....	31
รูปที่ 5 แสดงแผนผังการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรในระบบ	32
รูปที่ 6 ผลของแบบจำลอง fit เทียบกับข้อมูลจำนวนผู้ติดเชื้อโรคโควิด-19 (ช่วงความเชื่อมั่น 95%).....	48
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนประชากรของประชากรแต่ละกลุ่มจากแบบจำลอง	50
รูปที่ 8 ค่าความอ่อนไหวของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานของพารามิเตอร์แต่ละตัว	52
รูปที่ 9 ค่าความอ่อนไหวของกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อของพารามิเตอร์แต่ละตัว.....	53
รูปที่ 10 ผลการจำลองจำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม ด้วยค่าอัตราการแพร่เชื้อที่แตกต่างกัน	54
รูปที่ 11 ผลการจำลองจำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม ด้วยค่าประสิทธิภาพวัคซีนที่แตกต่างกัน	55
รูปที่ 12 ผลการจำลองจำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม ด้วยค่าอัตราการฉีดวัคซีนที่แตกต่างกัน.....	56
รูปที่ 13 จุดตัดที่เหมาะสมของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานกับค่าอัตราการฉีดวัคซีน	57
รูปที่ 14 ตัวเลขการแพร่ระบาดเชื้อโควิด-19 เมื่ออัตราการฉีดวัคซีนเท่ากับ 0.0012	58



บทที่ 1

บทนำ

1.1. หลักการและเหตุผล

สถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Van den Driessche & Watmough, 2002) หรือโรคโควิด-19 นั้นมีต้นกำเนิดมาจากเมืองอู่ฮั่น มณฑลหูเป่ย์ สาธารณรัฐประชาชนจีน โดยเมื่อในวันที่ 30 ธันวาคม 2019 สำนักงานสาธารณสุข ประจำ สาธารณรัฐประชาชนจีน ได้ออกประกาศอย่างเป็นทางการเรื่องการพบโรคปอดอักเสบโดยไม่ทราบสาเหตุและมีความเกี่ยวข้องกับตลาดอาหารทะเลที่เมืองอู่ฮั่น (Huang et al., 2020) โดย สาเหตุที่เป็นไปได้มากที่สุดในการติดต่อสู่คน คือการสัมผัสหรือรับประทานเนื้อสัตว์ประเภท ต่าง ๆ ภายในตลาดอาหารทะเล เนื่องจากเมืองอู่ฮั่นเป็นเมืองที่มีขนาดใหญ่ที่มีประชากรอาศัย อยู่เป็นจำนวนมากจากเหตุการณ์นี้ทำให้พบผู้ติดเชื้อและผู้เสียชีวิตจำนวนมาก ซึ่งหลังจากนั้น ไม่นานองค์การอนามัยโลก (World Health Organization) ได้ประกาศให้โรคโควิด-19 เป็นภาวะฉุกเฉินทางสาธารณสุข ระหว่างประเทศในวันที่ 30 มกราคม 2020 หลังจากนั้นได้ พบการยืนยันผู้ติดเชื้อในหลายประเทศทั่วโลก (World Health Organization Country Office for Thailand, 2022) ลักษณะการระบาดของโรคพบว่าเป็นการแพร่ระบาดจากคนสู่ คน ผ่านละอองฝอยขนาดเล็ก จากจมูก หรือปากซึ่งขับออกมาจากการไอหรือจาม ระยะทางที่ สามารถติดเชื้อได้ประมาณ 1-2 เมตร และยังสามารถติดต่อได้จากการสัมผัสสารคัดหลั่งของ ผู้ป่วยซึ่งอาจเกิดจากการสัมผัสน้ำเชื้อเข้าสู่ร่างกายผ่านทางตา หรือปากได้อีกด้วย โดยในวันที่ 11 มีนาคม 2020 องค์การอนามัยโลก ได้ประกาศให้โรคโควิด-19 เป็นโรคระบาดใหญ่ (Pandemic) เนื่องจากการรายงานผู้ติดเชื้อโควิด-19 สูงขึ้นทั่วโลก

สำหรับประเทศไทยได้รับผลกระทบจากการแพร่ระบาดโรคโควิด-19 เป็นระยะเวลา นาน โดยประเทศไทยมีประชากรกว่า 66,186,707 คน (National Statistical Office, 2021) ได้เกิดเหตุการณ์การแพร่ระบาดในหลาย ๆ สถานที่ เช่น ตลาดกลางบางกุ้ง สถาบันเทิง สนามมวย เป็นต้น ได้มีการกลายพันธุ์จากสายพันธุ์เดิม สายพันธุ์อู่ฮั่น เป็นสายพันธุ์อัลฟา สาย พันธุ์แอฟริกา สายพันธุ์เดลต้า และสายพันธุ์โอมิครอน ที่มีการแพร่ระบาดมากที่สุดในปัจจุบัน โดยทั้งหมดนี้ได้มีการใช้มาตรการในการควบคุมการแพร่ระบาด เช่น การเว้นระยะห่างทาง สังคม การสวมหน้ากากอนามัยในที่สาธารณะ และใช้เจลแอลกอฮอล์ล้างมือ เป็นต้น โดย สถานการณ์การแพร่ระบาดในประเทศไทย จากการระบาดในระลอกที่ 1 เกิดจากเชื้อสายพันธุ์ อู่ฮั่น สำหรับประเทศไทยพบผู้ติดเชื้อตั้งแต่เดือนมกราคม 2020 จนถึงเดือนพฤษภาคม 2020

มีการใช้มาตรการการควบคุมการแพร่ระบาดเชื้อ ได้แก่ ล้างมือด้วยเจลแอลกอฮอล์ เว้นระยะห่างทางสังคม ใส่หน้ากากอนามัย เป็นต้น ซึ่งในระลอกที่ 1 พบผู้ติดเชื้อทั้งสิ้น 2,907 ราย ต่อมาในระลอกที่ 2 เกิดขึ้นในช่วงกลางเดือนธันวาคม 2020 มีจุดแพร่ระบาดที่ตลาดกลางกุ้ง จังหวัดสมุทรสาคร ซึ่งเป็นที่ที่ประชากรแออัด เนื่องจากเป็นตลาดค้าอาหารทะเลขนาดใหญ่ โดยในระลอกนี้ได้มีการแพร่ระบาดไปยังพื้นที่ใกล้เคียงกินระยะเวลาการแพร่ระบาดในระลอกนี้ประมาณ 4 เดือน ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2020 ถึงเดือนมีนาคม 2021 มีผู้ติดเชื้อทั้งสิ้น 28,863 ราย จำนวนผู้เสียชีวิต 25 ราย (SAT-MOPH, 2022) ในระลอกที่ 3 เกิดขึ้นในช่วงต้นเดือนมีนาคม ถึง 10 มิถุนายน 2021 โดยมีคลัสเตอร์สถานบันเทิงย่านทองหล่อ-เอกมัย กรุงเทพมหานคร โดยระลอกนี้เกิดจากสายพันธุ์อัลฟาที่มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 158,675 ราย และจำนวนผู้เสียชีวิต 11,073 ราย ในช่วงระลอกที่ 4 เกิดจากสายพันธุ์เดลต้าซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่แพร่เชื้อได้เร็วมีความรุนแรงมาก และลงปอดได้เร็ว ทำให้จำนวนผู้ติดเชื้อและผู้เสียชีวิตสูงขึ้น ในระลอกที่ 4 มีจำนวนผู้ติดเชื้อจำนวน 2,042,020 ราย และจำนวนผู้เสียชีวิต 21,720 ราย (Rajatanavin, Tuangratananon, Suphanchaimat, & Tangcharoensathien, 2021) และในระลอกที่ 5 ได้มีการแพร่ระบาดสายจากสายพันธุ์โอมิครอนซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีการแพร่ระบาดได้รวดเร็วที่สุด แต่ความรุนแรงของการติดเชื้อค่อนข้างน้อย หลังจากนั้นพบผู้ติดเชื้อสายพันธุ์โอมิครอนเพิ่มสูงขึ้นไปทั่วประเทศในระยะเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตามทางภาครัฐได้ออกมาตรการในการควบคุมการแพร่ระบาดของโควิด-19 เช่น มาตรการลดปัจจัยเสี่ยงกิจกรรมที่มีคนจำนวนมาก มาตรการฉีดวัคซีนเพื่อลดความรุนแรงของโรค การรักษาตัวที่บ้าน เป็นต้น จากการแพร่ระบาดโควิด-19 ระลอกที่ 5 ส่งผลให้จำนวนผู้ติดเชื้อสูงถึง 2,232,485 ราย และจำนวนผู้เสียชีวิต 11,033 ราย จำนวนผู้ฉีดวัคซีนแต่ละเข็ม วันที่ 1 ตุลาคม 2022 เข็ม 1 จำนวน 57,005,497 ราย เข็ม 2 จำนวน 53,486,086 ราย และเข็ม 3 จำนวน 32,143,431 ราย การแพร่ระบาดโควิด-19 ในประเทศไทยตั้งแต่ช่วงแรกถึงปัจจุบัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการระบาดในระลอกที่ 5 เป็นการระบาดจากสายพันธุ์โอมิครอน ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็วส่งผลให้มีผู้ติดเชื้อเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการแพร่ระบาดโรคโควิด-19 ในระลอกที่ 5 โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงกลุ่มประชากรที่ฉีดวัคซีน เพื่อให้สอดคล้องกับกลุ่มประชากรและข้อมูลที่มีทั้งนี้ประชากรที่หายจากการติดเชื้อจะไม่สามารถกลับมาติดเชื้อได้อีก เนื่องจากมีภูมิคุ้มกันหรือต้องใช้เวลาในการกลับมาเป็นโรคเดิมซ้ำอีก ซึ่งในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้ได้แบ่งกลุ่มประชากรออกเป็น 8 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อ กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับการฉีดวัคซีน กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับการรักษาในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับการรักษาในห้อง

ICU (อาการวิกฤติ) กลุ่มประชากรที่พักรักษาตัวหลังจากการรักษาในห้อง ICU กลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อ และกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อ การศึกษานี้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และทำความเข้าใจผลกระทบของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3 ต่อแนวโน้มการลดการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยการศึกษานี้ได้มีการตรวจสอบความไม่เป็นลบของจำนวนประชากร ตรวจสอบการหาขอบเขตของตัวแบบ คำนวณหาจุดสมดุล คำนวณหาค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน คำนวณหาเสถียรภาพของจุดสมดุล และยังคำนวณหาค่าความอ่อนไหวที่มีผลต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน และกลุ่มผู้ติดเชื้อ ทั้งนี้เพื่อศึกษาการควบคุมความรุนแรงของการแพร่เชื้อ และศึกษาประสิทธิภาพวัคซีนในการควบคุมการแพร่ระบาดโรค ซึ่งเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจ หรือวางแผนของทางภาครัฐ เอกชน และประชาชน ในการดำเนินมาตรการการควบคุมโรคที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวต่อพลวัตการแพร่เชื้อโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3 ต่อการแพร่เชื้อโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ผู้วิจัยทำการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย

1.3.2 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งประชากรที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ประชากรในประเทศไทย จำนวน 66.09 ล้านคน ทุกช่วงอายุ ทั้งเพศชายและเพศหญิง

1.3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล ข้อมูลผู้ติดเชื้อโควิดจากกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข เช่น จำนวนผู้ติดเชื้อ จำนวนผู้เสียชีวิต จำนวนผู้ฉีดวัคซีน จำนวนผู้เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล จำนวนผู้หายจากการติดเชื้อ จำนวนผู้เข้ารับการรักษาในห้องผู้ป่วยฉุกเฉิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย ที่ใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการทำนายแนวโน้มการแพร่ระบาด โดยประมาณค่าของจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงเวลาที่ต่าง ๆ ที่สามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงได้ ช่วยในการวิเคราะห์ผลของมาตรการป้องกันและควบคุมโดยทำนายผลของมาตรการเหล่านี้ต่อการลดการแพร่ระบาดและประสิทธิภาพในการควบคุมโรค ช่วยในการวางแผนและการจัดการทรัพยากรโดยทำนายความต้องการทรัพยากรที่สูงขึ้นในเวลาต่าง ๆ ให้สามารถจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐกิจโดยการประมาณค่าของความสูญเสียในเศรษฐกิจ รวมถึงการส่งเสริมให้มีการวางแผนและการปรับปรุงนโยบายเศรษฐกิจเพื่อให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ทั้งนี้เป็นประโยชน์ต่อทั้งบุคลากรทางการแพทย์ นักวิชาการสาธารณสุข นักวิเคราะห์ อาจารย์ นักเรียน นักศึกษา และบุคคลอื่น ๆ ที่สนใจในเรื่องการศึกษาการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

1.4.2 ได้ทราบถึงลักษณะการแพร่ระบาด ผลกระทบ และความรุนแรงของโรคโควิด-19 ของระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ลักษณะการแพร่ระบาด ผลกระทบ และความรุนแรงของโรคโควิด-19 เพื่อการวางแผนและการดำเนินการในสาขาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านสาธารณสุข สังคม เศรษฐกิจ หรือการศึกษา โดยสามารถช่วยในการวางแผนและการควบคุมการแพร่ระบาดของโรค ช่วยในการทำนายแนวโน้มการแพร่ระบาดและการประเมินผลของมาตรการป้องกันและควบคุม ช่วยในการจัดทำแผนการป้องกันโรคและการรักษาผู้ป่วย โดยการประเมินและปรับปรุงนโยบายสาธารณสุขตามผลการวิเคราะห์ เป็นเครื่องมือสำคัญในการสื่อสารข้อมูลและข่าวสารที่เกี่ยวกับโรค ช่วยในการสร้างความเข้าใจในสังคมเกี่ยวกับผลกระทบของโรค เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการเข้าใจและปรับตัวต่อสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรค และส่งเสริมให้มีพฤติกรรมที่เหมาะสมต่อการป้องกันและควบคุมโรคในสังคม ช่วยในการประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจจากการแพร่ระบาดของโรค รวมถึงผลกระทบต่อภาพลักษณ์ทางเศรษฐกิจของประเทศ เป็นเครื่องมือในการวางแผนการเศรษฐกิจสำหรับการรับมือกับการแพร่ระบาดของโรค รวมถึงการปรับปรุงนโยบายทางเศรษฐกิจเพื่อให้เหมาะสมกับสถานการณ์ เป็นเครื่องมือสำคัญในการเรียนรู้และการศึกษาเกี่ยวกับโรค ช่วยให้ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของโรค และวิธีการป้องกัน และอีกมากมาย โดยทั้งหมดนี้จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศทั้งด้านสาธารณสุข สังคม เศรษฐกิจ หรือการศึกษา ทั้งกระทรวงสาธารณสุข กระทรวงการคลัง

กระทรวงศึกษาธิการ รวมทั้งกระทรวงและสถาบันอื่น ๆ สามารถนำปรับใช้ในการวางแผน หรือศึกษาศึกษาพลวัตการแพร่กระจายในการแพร่ระบาดโรคในอนาคตได้

1.4.3 ได้ทราบถึงผลมาตรการการฉีดวัคซีนในการควบคุมโรคโควิด-19 ในช่วงการระบาดระลอกที่ 5 ในประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบการลดอัตราการแพร่ระบาด เปรียบเทียบการลดความรุนแรงของโรค เปรียบเทียบการป้องกันการระบาดของโรคติดเชื้อ ทั้งนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการวางแผนการฉีดวัคซีนให้คุ้มค่ากับทรัพยากรและเพียงพอต่อค่าใช้จ่ายของทางภาครัฐ เอกชน และหน่วยงานอื่น ๆ ที่มีการจัดมาตรการการฉีดวัคซีน รวมทั้งยังสามารถปรับใช้มาตรการการฉีดวัคซีนกับการแพร่ระบาดที่มีรูปแบบการระบาดที่คล้าย ๆ กัน

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

เพื่อให้เข้าใจความหมายของคำที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ตรงกันผู้วิจัยจึงได้นิยามคำศัพท์ของคำต่อไปนี้

1.5.1 ระบาดของโรค (Outbreak) คือเหตุการณ์ที่มีผู้ป่วยเพิ่มขึ้นผิดปกติ ทั้งในกรณีโรคประจำถิ่นแต่มีจำนวนผู้ป่วยมากกว่าที่คาดการณ์ หรือในกรณีโรคอุบัติใหม่ ถึงแม้จะมีผู้ป่วยเพียงรายเดียว เช่น การระบาดของไข้เลือดออกในปี 2019 การระบาดของไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ในเมืองอู่ฮั่น

1.5.2 กลุ่มประชากรที่มีความเสี่ยง (Susceptible Population) คือกลุ่มที่ยังไม่ได้รับเชื้อและมีโอกาสที่จะติดเชื้อได้

1.5.3 กลุ่มประชากรที่ได้รับเชื้อ (Infectives Population) คือกลุ่มที่รับเชื้อแสดงอาการของโรคและยังแพร่เชื้อไปยังผู้อื่น

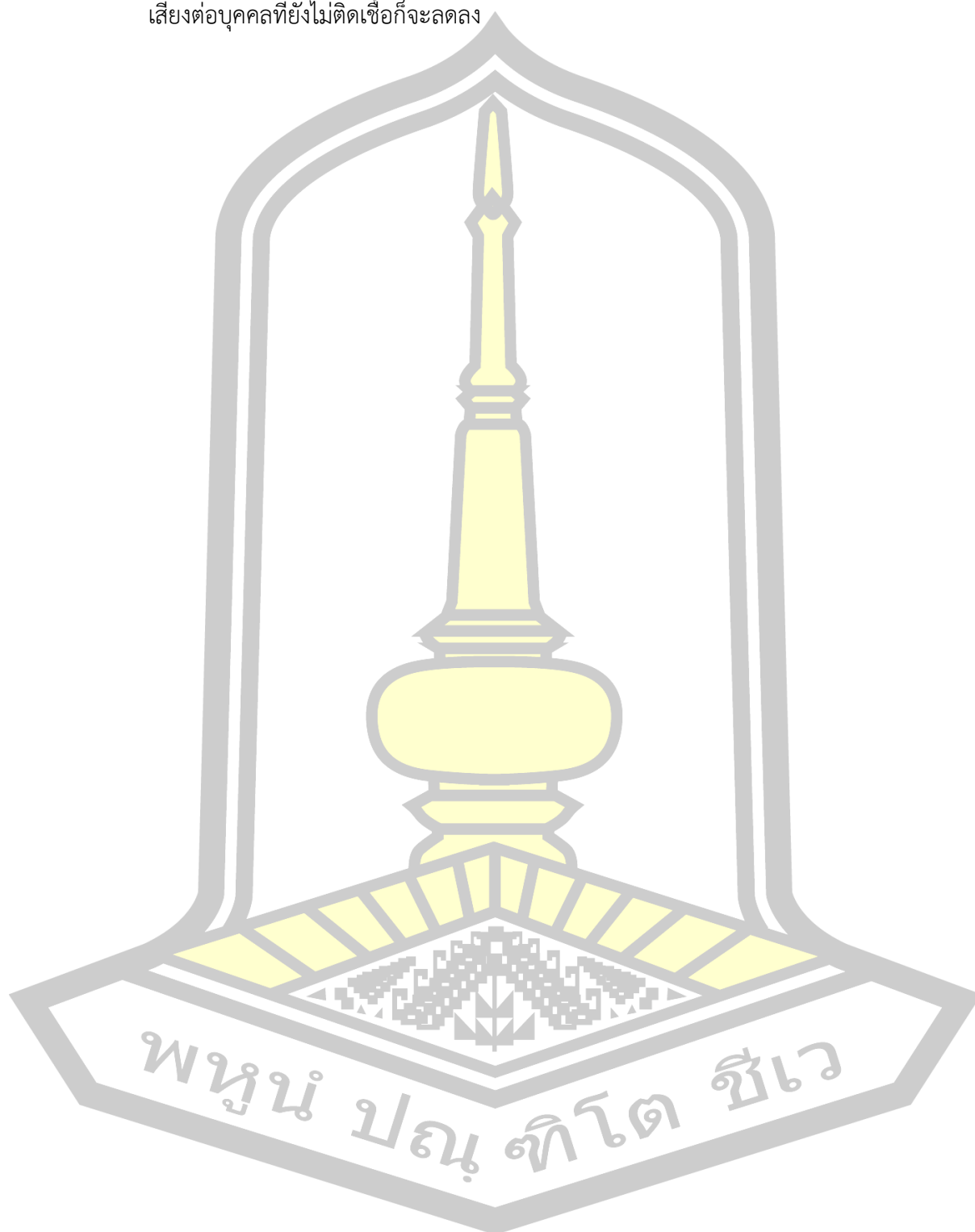
1.5.4 กลุ่มประชากรที่หายจากโรคหรือฟื้นตัวจากโรค (Recovered Population) คือกลุ่มที่ได้ รับการรักษา หรือมีภูมิคุ้มกันจนกระทั่งหายจากการเป็นโรค

1.5.5 โรคระบาดที่มีการระบาดอย่างรวดเร็ว (Epidemic) คือการระบาดของโรคที่แพร่กระจายเป็นวงกว้าง เริ่มมีการแพร่จากเมืองหนึ่งไปอีกเมืองหนึ่ง เช่น การระบาดของโรคโควิด-19 ในประเทศจีนและระบาดต่อมา ยังประเทศอื่นในทวีปเอเชีย เป็นต้น

1.5.6 โรคระบาดครั้งใหญ่ (Pandemic) คือโรคระบาดครั้งใหญ่ทั่วโลก มีการติดเชื้อภายในประเทศและระหว่างประเทศ ซึ่งยากต่อการควบคุม

1.5.7 สภาวะการแพร่ระบาดพลวัตการแพร่ (Dynamic transmission) คือความสามารถในการสร้างผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมที่เกิดขึ้นจากโรคติดต่อในประชากร ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง

เช่น หากมีการแทรกแซงจะสามารถช่วยลดการกระจายเชื้อได้ กล่าวอีกทางหนึ่งคือ ความเสี่ยงต่อบุคคลที่ยังไม่ติดเชื้อก็จะลดลง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้อธิบายการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยเกี่ยวข้องกับจำนวนผู้ติดเชื้อ จำนวนผู้ติดเชื้อที่ฉีดวัคซีน จำนวนผู้เข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาล จำนวนผู้เข้ารับการรักษาในห้อง ICU จำนวนผู้พักฟื้นหลังการรักษา จำนวนผู้หายจากการติดเชื้อ และจำนวนผู้เสียชีวิต จากโรคโควิด-19 เมื่อรับวัคซีนตั้งแต่เข็มที่ 1 ถึง 3 ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- 2.1 โรคโควิด-19
- 2.2 การแพร่ระบาดโรคโควิด-19 ในประเทศไทย
- 2.3 วัคซีนโควิด-19
- 2.4 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรคโควิด-19

ต้นกำเนิดของไวรัสโคโรนาหรือโรคโควิด-19 มาจากการรับเชื้อจากสัตว์ที่ระบาดสู่คน โดยผู้ป่วยรายแรกมีอาการป่วยตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม 2019 มีประวัติความเชื่อมโยงกับตลาดในเมืองอู่ฮั่น สาธารณรัฐประชาชนจีน โดยคาดการณ์ว่ามีผู้ป่วยหลายรายติดเชื้อตั้งแต่กลางเดือนพฤศจิกายนหรือก่อนหน้านั้น ซึ่งได้มีการเก็บตัวอย่างจากสถานที่ในตลาด โดยนำตัวอย่างมาทำการตรวจสอบพบเชื้อไวรัสโคโรนา บริเวณที่พบมากที่สุดคือบริเวณที่มีการค้าสัตว์ป่าและสัตว์เลี้ยงจากฟาร์ม ซึ่งตลาดดังกล่าวอาจเป็นต้นกำเนิดของไวรัสโคโรนา และอาจมีส่วนในการแพร่ระบาดเชื้อไวรัสโคโรนาในระยะเริ่มแรก (กองโรคติดต่อทั่วไป กรมควบคุมโรค, 2022)

อาการ

ร่างกายมนุษย์ไม่สามารถต่อต้านเชื้อไวรัสของโรคโควิด-19 ได้ เมื่อสัมผัสหรือใกล้ชิดผู้ป่วย โดยไม่มีการป้องกันก็มีโอกาสที่จะได้รับเชื้อ เมื่อเริ่มป่วยภูมิคุ้มกันลดลง อาการที่พบมากที่สุดของโรคโควิด-19 คือ มีไข้ ไอ อ่อนเพลีย ส่วนอาการที่พบได้แต่ไม่บ่อย เช่น ปวดเมื่อยตามตัว เจ็บคอ ท้องเสีย ตาแดงอักเสบ ปวดศีรษะ ไม่ได้กลิ่น ไม่รับรส มีผื่นบนผิวหนัง หรือน้ำมือนิ้วเท้าเปลี่ยนสี บางรายอาจมีปอดอักเสบรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิตได้ ซึ่งการที่มีอาการเหล่านี้ ก็ไม่ได้หมายความว่า จะติดเชื้อโควิด-19 เพียงอย่างเดียว และอาจเป็นอาการของโรคอื่น ๆ ก็ได้

โรคโควิด-19 มีส่วนทำให้เกิดภาวะแทรกซ้อน เช่น ปอดบวม ปอดอักเสบ ไตวาย บางรายมีอาการจุกไม่ได้อิ่มท้อง ลิ้นไม่รับรส การรักษาแบบประคับประคองเพื่อบรรเทาอาการป่วยต่าง ๆ ปัจจุบันมีวัคซีนป้องกันโรคแล้ว

ลักษณะ

ลักษณะการมีอยู่ของเชื้อ ดังนี้

- เชื้อไวรัสที่อยู่ในละอองฝอยน้ำมูก น้ำเสมหะ น้ำลาย และน้ำตา จะอยู่รอดในอากาศได้เพียง 5 นาที การดำรงอยู่ของเชื้อไวรัส

ลักษณะพื้นผิว อุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อระยะเวลาของการมีชีวิต

- เชื้อไวรัสมีชีวิตอยู่ในน้ำได้นาน 4 วัน
- เชื้อไวรัสมีชีวิตอยู่บนวัสดุ เช่น พื้น โตะ ลูกบิดประตู ได้นาน 7-8 ชั่วโมง
- เชื้อไวรัสอยู่ในผ้าหรือกระดาษทิชชูได้นาน 8-12 ชั่วโมง
- เชื้อไวรัสอยู่บนวัสดุพื้นเรียบได้นาน 24-48 ชั่วโมง
- ในตู้เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เชื้อไวรัสอาจอยู่ได้นานถึง 1 เดือน

ทั้งนี้ประเมินจากลักษณะเชื้อไวรัสอื่น ๆ ด้วย เช่น เชื้อไวรัสโรค SARS และโรค MERS ไม่ใช่เฉพาะไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 เท่านั้น

การระบาดของโรค

โรคโควิด-19 สามารถแพร่ระบาดได้ระหว่างบุคคล จากการสัมผัสหรืออยู่ใกล้ชิดเป็นหลัก โดยผ่านละอองเสมหะขนาดเล็กที่เกิดจากการไอ จาม หรือพูดคุยกัน แม้ละอองเหล่านี้เกิดเมื่อหายใจออก แต่ปกติจะตกลงสู่พื้นหรือติดค้างบนพื้นผิววัตถุต่าง ๆ ไม่ได้เกิดจากการติดเชื้อในระยะไกล บุคคลอาจติดเชื้อได้จากการสัมผัสพื้นผิวที่ปนเปื้อนแล้วนำมาแตะตา จมูก หรือปากของตน

ระยะฟักตัว

ระยะฟักตัวเป็นช่วงที่ไวรัสพยายามเข้าไปฝังอยู่ในร่างกาย ไวรัสชนิดต่าง ๆ ทำงานโดยการเข้าไปและยึดเซลล์ร่างกาย โดยไวรัสโคโรนา มีชื่อเรียกทางการว่า Sars-CoV-2 สามารถเข้าสู่ร่างกายเมื่อหายใจรับเชื้อเข้าไปในร่างกาย ในขั้นแรกเชื้อจะแพร่ไปตามเซลล์ที่เยื่อหุ้มคอ ท่อทางเดินหายใจ และปอด ก่อนจะเปลี่ยนอวัยวะไปยังส่วนต่าง ๆ ในร่างกายที่แพร่กระจายไวรัสไปติดเซลล์อื่นเพิ่มอีก ในช่วงแรกจะไม่มีอาการป่วย และสำหรับบางคนก็อาจไม่แสดงอาการใดเลย โดยเฉลี่ยแล้ว ระยะฟักตัวตั้งแต่ติดเชื้อถึงแสดงอาการอยู่ที่ 5-14 วัน ซึ่งก็แตกต่างกันไปตามกรณี

การป้องกันตนเอง

ประชาชนทั่วไปควรป้องกันตนเอง โดยหลีกเลี่ยงการสัมผัสใกล้ชิดผู้มีอาการป่วย สวมหน้ากากอนามัยหรือหน้ากากผ้าทุกครั้งที่ออกจากบ้าน ถ้าหากอยู่ในที่ที่มีคนจำนวนมากรวมตัวกัน เช่น ที่ทำงาน ตลาด ห้างสรรพสินค้า รักษาระยะห่างอย่างน้อย 1 เมตร ควรล้างมือบ่อย ๆ ด้วยน้ำสะอาด ล้างด้วยน้ำสบู่ หรือเจลแอลกอฮอล์ล้างมือ หลีกเลี่ยงการสัมผัสบริเวณตา จมูก และปาก โดยไม่ได้ทำความสะอาดมือ หากมีไข้ ไอ หายใจลำบาก ให้ไปพบแพทย์ทันทีและแจ้งประวัติการเดินทาง เมื่อมีอาการป่วยควรป้องกันการแพร่กระจายเชื้อสู่ผู้อื่นโดยควรพักอยู่ที่บ้าน ปิดปาก และจมูกด้วยทิชชูทุกครั้ง ไอหรือจาม และทิ้งลงถังขยะทำความสะอาดและทำลายเชื้อตามวัสดุสิ่งของ และผิวสัมผัสต่าง ๆ

มาตรการสำคัญสำหรับผู้เดินทาง

มีเอกสารหรือหลักฐานในการเดินทาง เช่น หนังสือขออนุญาตข้ามจังหวัดการลงทะเบียนในการเข้า-ออกจังหวัดพื้นที่ควบคุมสูงสุดและเข้มงวดพื้นที่ควบคุมสูงสุด และพื้นที่ควบคุม

1. ปฏิบัติตามมาตรการ DMHTT อย่างเคร่งครัด
 - D: Social Distancing เว้นระยะห่าง 1-2 เมตร เลี่ยงการอยู่ในที่แออัด
 - M: Mask Wearing สวมหน้ากากผ้าหรือหน้ากากอนามัยตลอดเวลา
 - H: Hand washing ล้างมือบ่อย ๆ ด้วยน้ำและสบู่หรือเจลแอลกอฮอล์
 - T: Testing การตรวจวัดอุณหภูมิและตรวจหาเชื้อโควิด 19
 - T: Thai Cha Na สแกนไทยชนะก่อนเข้า-ออกสถานที่สาธารณะทุกครั้ง
2. หากเดินทางมาจากพื้นที่เสี่ยงให้แจ้งเจ้าหน้าที่ อสม. และกักตัวอยู่ที่บ้านพักเป็นเวลา 14 วัน
3. ปฏิบัติตามที่คณะกรรมการโรคติดต่อจังหวัดประกาศอย่างเคร่งครัด

ความรุนแรงของโรคโควิด-19

ปัจจุบันนักวิจัยประเมินว่า ในจำนวนผู้ติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 1,000 คน มีผู้เสียชีวิตราว 5-40 คน หากจะระบุตัวเลขคาดการณ์ที่เฉพาะเจาะจงลงไปอีกก็คือ 9 คน ในผู้ติดเชื้อ 1,000 คน หรือเกือบ 1% แต่ก็ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งเรื่องของอายุ เพศ สุขภาพ โดยทั่วไป และระบบสาธารณสุขที่ผู้ป่วยเข้ารับบริการ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลคนไข้ 56,000 คน ที่จัดทำขึ้นโดยองค์การอนามัยโลกบ่งชี้ว่า ผู้ได้รับเชื้อ 4 ใน 5 คน จะมีอาการป่วยไม่รุนแรง โดยแบ่งได้ดังนี้

- 80% มีอาการไม่รุนแรง
- 14% มีอาการรุนแรง

- 6% มีอาการวิกฤต
- ส่วนอัตราการเสียชีวิตอยู่ในระดับต่ำที่ 1-2%

2.2 การแพร่ระบาดของโควิดในประเทศไทย

การแพร่ระบาดเชื้อโควิด-19 ในประเทศไทยจากข้อมูลวันที่ 22 ธันวาคม 2022 พบผู้ป่วยติดเชื้อรายใหม่ 823 ราย ผู้ป่วยติดเชื้อสะสมรวม 4,682,123 ราย หายป่วยแล้ว 4,642,894 ราย กำลังรักษาตัวในโรงพยาบาล 6,467 ราย มีผู้เสียชีวิตสะสม 32,771 ราย (เพิ่มขึ้น 7 ราย) ผู้ที่มีอาการหนัก 466 ราย ต้องใช้เครื่องช่วยหายใจ 260 ราย มีแนวโน้มพบผู้ติดเชื้อเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจากการตรวจเชิงรุกเพิ่มมากขึ้นต่างจังหวัดมีแนวโน้มลดลง (งานโรคติดต่ออุบัติใหม่ กลุ่มพัฒนาวิชาการโรคติดต่อ, 2021)

มีจำนวนการได้รับวัคซีนในวันที่ 22 ธันวาคม 2022 รวม 142,635,014 โดส มีจำนวนการได้รับวัคซีนสะสม (เริ่มต้นการระบาด – 22 ธ.ค. 2022) ใน 77 จังหวัด แบ่งเป็น เข็มที่ 1 จำนวน 57,005,497 ราย และเข็มที่ 2 จำนวน 53,486,086 ราย และเข็มที่ 3 จำนวน 32,143,431 ราย



รูปที่ 1 จำนวนผู้ติดเชื้อรายวัน ประจำวันที่ 30 ตุลาคม 2022

ลำดับเวลาการเกิดสถานการณ์โรคโควิด-19

โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา-2019 (COVID-19) มีการระบาดในวงกว้างในสาธารณรัฐประชาชนจีนตั้งแต่เดือน ธันวาคม 2019 เป็นต้นมา โดยเริ่มจากเมืองอู่ฮั่น มณฑลหูเป่ย์จนถึงปัจจุบัน มีการรายงานผู้ป่วยยืนยันทั่วโลก รวม 214 ประเทศ มีการแพร่เชื้ออย่างรวดเร็วไปยังประเทศต่าง ๆ ในทุกภูมิภาคทั่วโลกในลักษณะการระบาดใหญ่ (Pandemic) องค์การอนามัยโลกได้ประเมินสถานการณ์ และเห็นว่าการระบาดของโรคโควิด-19 แพร่กระจายได้อย่าง

รวดเร็วจนน่ากังวลในวันที่ 30 มกราคม 2020 องค์การอนามัยโลกจึงได้ประกาศให้โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เป็นภาวะฉุกเฉินทางสาธารณสุขระหว่างประเทศ (Public Health Emergency of International Concern) และแนะนำทุกประเทศให้เร่งรัดการเฝ้าระวัง ป้องกัน และควบคุมโรค ซึ่งถือว่ามีความเสี่ยงด้านสาธารณสุขต่อทุกประเทศทั่วโลก และมีผลกระทบในการแพร่ระบาดสูง ในปัจจุบันประเทศต่าง ๆ กำลังดำเนินการพยายามอย่างเต็มที่ เพื่อเฝ้าระวังป้องกันการนำเข้าจากต่างประเทศ และควบคุมการระบาดในประเทศ ทั้งนี้โรคสามารถติดต่อโดยผ่านทางไอ จาม การสัมผัสโดยตรงกับสารคัดหลั่งของคน และสัตว์ที่อาจเป็นแหล่งของโรค (งานโรคติดต่ออุบัติใหม่ กลุ่มพัฒนาวิชาการโรคติดต่อ, 2021)

ประเทศไทยได้ดำเนินการป้องกัน และควบคุมโรคอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มตรวจคัดกรอง อุณหภูมิผู้เดินทางที่ด่านควบคุมโรคระหว่างประเทศ ตั้งแต่วันที่ 3 มกราคม 2020 หลังจากที่ประเทศจีนประกาศแจ้งเตือนว่าพบการระบาดของโรคปอดอักเสบไม่ทราบเชื้อสาเหตุในเมืองอู่ฮั่น มณฑลหูเป่ย์ ช่วงปลายเดือนธันวาคม พ.ศ. 2019 โดยประเทศไทยสามารถตรวจพบผู้ป่วยชาวจีนรายแรกที่น่าเชื่อเข้าสู่ประเทศไทยได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 8 มกราคม 2020 หลังจากนั้นพบผู้ป่วย วันที่ 31 มกราคม 2020 ประเทศไทยมีรายงานผู้ป่วยชาวไทยรายแรกอาชีพขับรถแท็กซี่ ซึ่งไม่เคยมีประวัติเดินทางไปต่างประเทศ แต่มีประวัติขับรถแท็กซี่ให้บริการกับผู้ป่วยชาวจีนหลังจากนั้นเป็นต้นมาเริ่มพบผู้ป่วยที่ติดเชื้อภายในประเทศไทยเพิ่มขึ้นในกลุ่มอาชีพเสี่ยงสูงที่ต้องทำงานใกล้ชิดกับนักท่องเที่ยวต่างชาติ ได้แก่ ขับรถสาธารณะ มัคคุเทศก์ พนักงานขายของ นอกจากนี้ยังมีคนไทยที่ป่วยภายหลังกลับจากเดินทางไปท่องเที่ยวต่างประเทศการป่วยด้วยโรคโควิด-19 ในคนไทยเหล่านี้ทำให้เกิดการแพร่เชื้อต่อไปยังผู้สัมผัสใกล้ชิดโดยเฉพาะคนในครอบครัวอย่างรักีตามกระทรวงสาธารณสุขร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ทำการค้นหาและติดตามผู้สัมผัสอย่างรวดเร็วจนสามารถควบคุมให้การระบาดยังอยู่ในวงจำกัดได้

ในช่วงกลางเดือนมีนาคม 2020 พบกลุ่มคนไทยติดเชื้อโควิด-19 เป็นจำนวนมากใน 2 เหตุการณ์ ได้แก่ การแพร่ระบาดในสถานบันเทิงและการแพร่ระบาดในสนามมวย 3 แห่ง ทั้งสองเหตุการณ์ทำให้เกิดการระบาดไปสู่คนใกล้ชิดทั้งในครอบครัว สถานที่ทำงานและสถานศึกษาอีกจำนวนมาก โดยเชื้อโควิด-19 ได้แพร่กระจายไปในจังหวัดอื่น ๆ ทั่วประเทศจำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณ 150 - 200 รายต่อวัน รัฐบาลจึงมีการประกาศใช้พระราชกำหนดการบริหารราชการในสถานการณ์ฉุกเฉิน พ.ศ. 2015 เมื่อวันที่ 26 มีนาคม 2020 และออกประกาศที่สำคัญเพื่อการป้องกันควบคุมโรค ได้แก่ การปิดพรมแดนระหว่างประเทศโดยเฉพาะท่าอากาศยาน การชะลอการเดินทางข้ามจังหวัด การจำกัดเวลาเข้าออกเคหสถาน และการปิดสถานที่ต่าง ๆ ทำให้จำนวนผู้ป่วยติดเชื้อในประเทศลดลงไปเรื่อย ๆ

และเริ่มมีการผ่อนปรนมาตรการต่าง ๆ ผู้ป่วยยืนยัน ณ วันที่ 19 พฤษภาคม 2021 ระยะสิ้นสุดเหตุการณ์ในระลอกที่ 1 มีจำนวนผู้ป่วยทั้งสิ้น 3,025 ราย เสียชีวิต 56 ราย

การระบาดในระลอกที่ 2 ตั้งแต่กลางเดือน ธันวาคม 2020 - 15 มีนาคม 2021 ซึ่งเกิดจากแรงงานประเทศเพื่อนบ้านที่เดินทางกลับจากประเทศเมียนมาตรวจพบเชื้อแรงงานเมียนมาที่ทำงานในตลาดกลางกุ้ง จ.สมุทรสาคร และแพร่ระบาดมายัง พ่อค้าแม่ค้าในตลาดและเชื่อมโยงไปตลาดไทย และอีกหลายจังหวัดที่มีผู้เดินทางมายังจังหวัดสมุทรสาครและได้รับเชื้อกลับไปทำให้มีผู้ป่วยยืนยันเพิ่มมากขึ้นจากจังหวัดข้างเคียงเริ่มจากกรุงเทพมหานครนครปฐมสมุทรปราการ ระยอง และจังหวัดอื่นๆ รวมทั้งสิ้น 35 จังหวัด โดยทางรัฐบาลได้ใช้มาตรการ 8 มาตรการ ที่ใช้ในพื้นที่ควบคุมสูงสุด 28 จังหวัด หลังจากที่ราชกิจจานุเบกษาประกาศข้อกำหนด พ.ร.ก.ฉุกเฉิน ฉบับที่ 16 เรื่อง 8 มาตรการควบคุมการระบาดของโรคโควิด-19 ดังนี้ 1. ห้ามใช้อาคารสถานศึกษาในพื้นที่ควบคุมสูงสุดโดยให้มีการจัดการเรียนออนไลน์แทน 2. ห้ามจัดกิจกรรมเสี่ยงต่อการแพร่โรคโดยเฉพาะที่มีผู้เข้าร่วมจำนวนมาก 3. ให้อำนาจผู้ว่าราชการจังหวัดในการปิดสถานบริการและสถานที่เสี่ยงต่อการแพร่โรค 4. เงื่อนไขการเปิดดำเนินการในพื้นที่ควบคุมสูงสุดจะต่างกันตามพื้นที่ 5. ให้ผู้ว่าราชการจังหวัดพิจารณาสั่งปิดกิจการหรือกิจกรรมในพื้นที่ที่รับผิดชอบ 6. ให้หลีกเลี่ยงงดการเดินทางข้ามจังหวัดและจะมีด่านตรวจบุคคลที่เดินทางจากพื้นที่ควบคุมสูงสุด 7. ขอให้มีการทำงานที่บ้าน (Work From Home) หรือลดจำนวนผู้ปฏิบัติงาน 8. คณะกรรมการเฉพาะกิจจะเสนอนายกฯ ผ่อนผันผ่อนคลายเป็นไปตามสถานการณ์สถานการณ์โดยรวมเมื่อเริ่มเกิดเหตุการณ์ ณ วันที่ 31 มีนาคม 2021 พบผู้ป่วยยืนยัน จาก 4246 ราย เสียชีวิต 60 ราย จนกระทั่งมีผู้ป่วยยืนยันทั้งสิ้น 35,910 ราย เสียชีวิต 97 ราย

ระลอกที่ 3 ช่วง 15 มีนาคม – 8 มิถุนายน 2021 เริ่มจากผู้ป่วยยืนยัน 37,453 ราย เสียชีวิต 97 ราย มีการแพร่ระบาดเชื้อโควิด-19 จากกลุ่มวัยทำงานไปเที่ยวในสถานบันเทิง ผับ บาร์ ในย่านทองหล่อกรุงเทพ และกระจายไปหลายจังหวัดจำนวนผู้ป่วยเพิ่มมากขึ้นและจากการวิเคราะห์รูปแบบของการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกใหม่มีความแตกต่างจากการระบาดใน 2 ระลอกแรกทั้งในแง่ความรวดเร็วของการแพร่ระบาดของเชื้อ และความรุนแรง จะเห็นได้จากในระลอกที่ 3 จำนวนผู้ติดเชื้อจากการแพร่ระบาดระลอกใหม่วันมีเฉลี่ย 175 รายต่อวัน ในขณะที่การระบาดใน 2 ระลอกแรก พบผู้ติดเชื้อเฉลี่ย 15 รายต่อวัน แต่ยังไม่ผู้เสียชีวิตจากการระบาดระลอกที่ 3 ในขณะที่การระบาดใน 2 ระลอกแรกพบผู้เสียชีวิต 60 ราย นอกจากนี้ในระลอกที่ 3 รูปแบบของการระบาดเริ่มเปลี่ยนแปลงจากการระบาดเป็นกลุ่มก้อนมาเป็นการติดเชื้อภายในครัวเรือนหรือผู้สัมผัสใกล้ชิดซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสัมผัสผู้ติดเชื้อที่ไม่มีอาการดังนั้นรูปแบบการควบคุมโรคต้องมีความรวดเร็วสามารถควบคุมการแพร่เชื้อ

ทั้งแบบกลุ่มก้อนและภายในครัวเรือนมีมาตรการที่จะสามารถตรวจการแพร่ระบาดในกลุ่มก้อนใหม่รวมถึงมีความเข้มข้นของมาตรการเว้นระยะห่างทางสังคมเพื่อจำกัดการแพร่ระบาดให้อยู่ในวงเล็ที่สุด

ระลอกที่ 4 คาดว่าช่วง 3 มิถุนายน 2021 - 31 ธันวาคม 2021 เชื้อไวรัสกลายพันธุ์โควิด-19 สายพันธุ์เดลตาที่มีความสามารถในการระบาดสูงกว่าสายพันธุ์อื่น ๆ ทำให้จำนวนผู้ติดเชื้อจากโควิด-19 สายพันธุ์นี้เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และยังอาจจะติดต่อกันจากวัคซีนที่ได้รับฉีดไปในช่วงนี้พบว่าจำนวนผู้ติดเชื้อที่เพิ่มสูงขึ้นและมาตรการการจัดการที่ไม่เพียงพอทำให้เกิดปัญหาขาดเตียงโดยเฉพาะช่วง 2 เดือนแรกที่มีการระบาดในระลอกที่ 4 มาตรการดูแลของรัฐไม่ได้เข้มข้นไปกว่าเดิมแต่กลับถดถอยลงขณะที่วิธีเดียวที่จะทำให้จำนวนผู้ติดเชื้อน้อยลงคือการระดมฉีดวัคซีนให้ได้กว้างที่สุดแต่ตอนนี้วัคซีนกลับมีไม่เพียงพอเมื่อบวกกับมาตรการที่ไม่ได้เข้มข้นจึงไม่ทำให้ยอดผู้ป่วยลดลงมีการการล็อกดาวน์ในบางจังหวัดของประเทศจะสามารถสกัดการระบาดได้ดีที่สุดเห็นผลรวดเร็วที่สุด แต่ทำได้ยากและสวนกับนโยบายการผ่อนคลายของภาครัฐที่ต้องการจะเปิดประเทศใน 120 วัน

ระลอกที่ 5 ช่วง 6 มกราคม 2022 - ปัจจุบัน โดยมีสายพันธุ์โอมิครอนเป็นตัวแปรที่สำคัญแต่ยังคงมีสายพันธุ์เดลตาคงอยู่ด้วยโดยมีความพร้อมเต็มที่ในการรองรับการแพร่ระบาดบนพื้นฐานเครื่องมือสำคัญคือการฉีดวัคซีนในจำนวนประมาณ 70% เข็มหนึ่งและเข็มสองไปจนถึงเข็มสามที่เป็นบูสเตอร์ และมีเป้าหมายการควบคุมการแพร่ระบาดให้ได้มากที่สุดและเปิดพื้นที่เศรษฐกิจให้มีผลกระทบน้อยที่สุด

2.3 วัคซีนโควิด-19

โดยปกติเมื่อเชื้อโรคทุกชนิดเข้าสู่ร่างกายร่างกายจะมีวิธีการเชื้อหลายแบบหนึ่งในนั้นคือเม็ดเลือดขาวชนิด Macrophage จะกลืนเชื้อเข้าไปและทิ้งเศษซากเชื้อบางส่วนไว้เรียกว่าแอนติเจน (Antigen) ร่างกายจะรับรู้ว่ามีแอนติเจนคือสิ่งแปลกปลอมและจะสร้างแอนติบอดี (Antibody) มาจัดการสิ่งแปลกปลอมนั้นรวมถึงมีเม็ดเลือดขาวอีกชนิดหนึ่งที่จำว่าเชื้อโรคนี้คือสิ่งแปลกปลอม ถ้าหากได้รับเชื้อในอนาคตร่างกายจะสามารถจดจำและจัดการได้การทำงานของวัคซีนเป็นไปในลักษณะเดียวกัน

วัคซีนป้องกันโควิด-19 จะช่วยกระตุ้นให้ร่างกายสร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อไวรัสขึ้นมามีช่วยป้องกันการติดเชื้อหากได้รับเชื้อในอนาคต แต่ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งหลังฉีดวัคซีนร่างกายจึงจะสร้างภูมิคุ้มกันขึ้นมาได้ การฉีดวัคซีนผู้รับวัคซีนยังต้องปฏิบัติตามมาตรการป้องกันโควิด-19 อย่างเคร่งครัด เช่น ใส่หน้ากากอนามัย ล้างมือบ่อย ๆ เว้นระยะห่างทางสังคม เป็นต้น วัคซีน

อาจไม่สามารถป้องกันทุกคนที่ฉีดจากการติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ได้แต่สามารถลดความรุนแรงของโรคได้

จากข้อมูลขององค์การอนามัยโลกมีการคิดค้นวัคซีนโควิด-19 โดยหลายบริษัทผู้ผลิตและหลายรูปแบบ (กองโรคติดต่อทั่วไป กรมควบคุมโรค, 2022) วิธีการผลิตวัคซีนหรือที่มาของวัคซีนมีหลายวิธีการแต่ทั้งหมดคือให้ต่อต้านไวรัสโคโรนาซาร์โควี-2 (SAR-CoV-2) ไม่ให้เข้าสู่ร่างกายเพื่อไปก่อโรคได้ โดยที่ไวรัสนี้จะมีส่วนที่เป็นไกลโคโปรตีนยื่นออกจากเซลล์เรียกว่าสไปค์ (Spike) จะไปจับกับตัวรับ (Receptor) ที่อยู่บนเซลล์ในร่างกาย เช่น ที่ทางเดินหายใจหรือลำไส้เมื่อจับกันแล้วไวรัสก็จะเข้าสู่ร่างกายและไปก่อโรคโดย 4 วิธีการที่มีการผลิตมากที่สุดได้แก่

1. Messenger RNA (mRNA) vaccine เป็นวัคซีนที่มีส่วนที่กำกับการสร้างโปรตีนของไวรัส SAR-CoV-2 ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายเมื่อฉีดวัคซีนแล้วร่างกายจะสร้างโปรตีนชนิดนั้นขึ้นมาและทำลาย mRNA ที่ฉีดเข้าไปจากนั้นร่างกายจะรับรู้ว่าเป็นโปรตีนที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นสิ่งแปลกปลอมและจะสร้างระบบภูมิคุ้มกันขึ้นมา ยี่ห้อวัคซีน เช่น วัคซีนไฟเซอร์ (Pfizer) และวัคซีนโมเดอร์นา (Moderna)

2. Viral Vector เป็นวัคซีนที่ติดต่อทางพันธุกรรมโดยการใช้สารทางพันธุกรรมของไวรัส SAR-CoV-2 ใส่เข้าไปในตัวไวรัสชนิดอื่นที่ไม่ก่อโรค (เรียกไวรัสนี้ว่า Viral Vector) เมื่อฉีดวัคซีนเข้าไปในร่างกายแล้ว Viral Vector จะพาเอาสารพันธุกรรมนั้นเข้าไปในเซลล์ของเราทำให้เกิดการสร้างโปรตีนที่จำเพาะต่อเชื้อไวรัส SAR-CoV-2 ขึ้นมา จากนั้นร่างกายจะรับรู้ว่าเป็นโปรตีนที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นสิ่งแปลกปลอมและจะสร้างระบบภูมิคุ้มกันขึ้นมา ยี่ห้อวัคซีน เช่น วัคซีนแอสตราเซนเนกา (AstraZeneca) และ วัคซีนโควิดจอห์นสันแอนด์จอห์นสัน (Johnson & Johnson)

3. Inactivated Virus Vaccine หรือวัคซีนเชื้อตายผลิตโดยการเลี้ยงไวรัสชนิดนี้ให้ได้ปริมาณมากแล้วมาทำให้ตายด้วยสารเคมีหรือความร้อนเมื่อฉีดวัคซีนแล้วร่างกายจะรับรู้ว่าเป็นสิ่งแปลกปลอมและจะสร้างระบบภูมิคุ้มกันขึ้นมา ยี่ห้อวัคซีน เช่น วัคซีนซิโนแวค (Sinovac), วัคซีนซิโนฟาร์ม (Sinopharm)

4. Protein Subunit Vaccine เป็นการผลิตวัคซีนมาจากโปรตีนส่วนหนึ่งของเชื้อไวรัส SAR-CoV-2 ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เมื่อฉีดวัคซีนแล้วร่างกายจะรับรู้ว่าเป็นสิ่งแปลกปลอมและจะสร้างระบบภูมิคุ้มกันขึ้นมา

วัคซีนโควิด-19 ในประเทศไทย

วัคซีนโควิดในประเทศไทยในปัจจุบันมีการอนุมัติจากคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) หลากหลายเทคโนโลยี ได้แก่ วัคซีนซิโนแวค (Sinovac), วัคซีนซิโนฟาร์ม

(Sinopharm), วัคซีนแอสตราเซนเนกา (AstraZeneca), วัคซีนโควิดจอห์นสันแอนด์จอห์นสัน (Johnson & Johnson), วัคซีนไฟเซอร์ (Pfizer) และวัคซีนโมเดอร์นา (Moderna)

ประสิทธิภาพวัคซีน

ข้อมูลการศึกษาจากการใช้งานจริง (real world data) โดยสำนักงานความมั่นคงด้านสุขภาพแห่งสหราชอาณาจักร (UK Health Security Agency (UKHSA)) ประเทศอังกฤษ พบว่า ผู้ที่ได้รับวัคซีนโมเดอร์นาเป็นเข็มที่ 3 มีประสิทธิภาพการป้องกันการติดเชื้อดีกว่าไฟเซอร์ ไม่ว่าจะได้รับวัคซีนเข็มที่ 1 และ 2 ยี่ห้อใด (AstraZeneca-AstraZeneca, Pfizer-Pfizer หรือ Moderna-Moderna)

ประสิทธิภาพการป้องกันการป่วยชนิดที่ต้องเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลของวัคซีนเข็มที่ 3 โดยรวม ต่อเชื้อสายพันธุ์ โอมิครอนอยู่ที่ 89% ซึ่งมีการศึกษาในระยะเวลาต่าง ๆ ดังนี้

- หลังฉีดเข็มที่ 1 ในระยะเวลาภายใน 4 สัปดาห์ จะมีประสิทธิภาพวัคซีนที่ 58%
- หลังฉีดเข็มที่ 2 ในระยะเวลาภายใน 6 เดือน จะมีประสิทธิภาพวัคซีนที่ 64%
- หลังฉีดเข็มที่ 2 ในระยะเวลา 6 เดือน ขึ้นไป จะมีประสิทธิภาพวัคซีนที่ 44%
- หลังฉีดเข็มที่ 3 ในระยะเวลาภายใน 4 สัปดาห์ จะมีประสิทธิภาพวัคซีนที่ 92%
- หลังฉีดเข็มที่ 3 ในระยะเวลา 2 เดือน ถึง 2 เดือนครึ่ง จะมีประสิทธิภาพวัคซีนที่ 88%
- หลังฉีดเข็มที่ 3 ในระยะเวลา 2 เดือนครึ่ง ขึ้นไป จะมีประสิทธิภาพวัคซีนที่ 83%

2.4 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการทำทำความเข้าใจพลวัตของโรคระบาด สามารถใช้อธิบายรูปแบบของการแพร่กระจายเชื้อที่สังเกตได้บนพื้นฐานของสมมติฐานทางคณิตศาสตร์ และสามารถใช้อ้างอิงทดสอบผลลัพธ์ของมาตรการควบคุมโรคต่าง ๆ เริ่มต้นตั้งแต่ ค.ศ.1927 ซึ่ง Kermack และ McKendrick ได้พัฒนาแบบจำลองการระบาดแบบคำนวณตายตัว (deterministic model) โดยเสนอเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) ที่สามารถใช้คาดการณ์ จำนวนประชากรที่ติดเชื้อจากโรคระบาดในประชากรขนาดใหญ่ โดยมีโครงสร้างของแบบจำลองซึ่งแบ่งประชากรที่ศึกษาออกเป็นกลุ่มย่อยตามสถานะของการติดเชื้อ และประชาชนแต่ละคนสามารถย้ายหรือเปลี่ยนสถานะไปมาได้ หรือแบบจำลองที่มีโครงสร้างลักษณะดังกล่าวเรียกว่า “compartmental model” เช่น แบ่งประชากรออกเป็นกลุ่มผู้มีโอกาสติดเชื้อ (Susceptible Population) กลุ่มผู้ติดเชื้อและแพร่เชื้อได้ (Infectious Population) และกลุ่มผู้ที่หายจากโรคและมีภูมิคุ้มกัน (Recovered Population) และเรียกแบบจำลองดังกล่าวว่า “SIR model” แบบจำลองนี้รายละเอียดการ

เปลี่ยนแปลงของจำนวนบุคคลในแต่ละกลุ่มตามเวลา โดยใช้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ (ODEs) ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในเวลาต่อมาเมื่อมีวงการแพทย์และสาธารณสุขมีความรู้เรื่องระยะฟักตัวของโรคของโรคติดเชื้อหลายโรคทำให้มีการพัฒนาแบบจำลองต่อยอดเพิ่มเติมจาก SIR model โดยแยกประชากรที่ติดเชื้อส่วนหนึ่งที่ยังไม่แสดงอาการออกมาจากกลุ่มผู้ติดเชื้อ และแพร่เชื้อได้เป็นกลุ่มประชากรที่สัมผัสเชื้อแต่ยังไม่แสดงอาการ (Exposed) และเรียกแบบจำลองดังกล่าวว่า “SEIR model” โดยมีรายละเอียดดังนี้

แบบจำลอง SIR Model

แบบจำลอง SIR เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อในประชากร (Jirawattanapanit, 2021) สามารถแบ่งประชากรออกเป็นประชากรกลุ่มผู้มีโอกาสติดเชื้อ (Susceptible Population) กลุ่มผู้ติดเชื้อและแพร่เชื้อได้ (Infectious Population) และกลุ่มผู้ที่หายจากโรคหรือมีภูมิคุ้มกัน (Recovered Population) แสดงจำนวนของกลุ่มประชากรย่อยแต่ละกลุ่ม (S, I, R) ในแต่ละช่วงเวลา แบบจำลองนี้รายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนบุคคล โดยใช้ระบบสมการอนุพันธ์เชิงอนุพันธ์ (ODEs) ในแต่ละช่วงเวลาโดยคาดการณ์จากกำหนดอัตราการความเร็วในการไหลเปลี่ยนสถานะการติดเชื้อของประชากรระหว่างกลุ่มด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามองค์ความรู้ที่มีเกี่ยวกับโรคนั้น รวมทั้งสามารถพัฒนาเพิ่มเติมปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอธิบายการระบาดของโรคติดเชื้อ เช่น อัตราการป่วย-ตาย หรืออัตราการได้รับวัคซีน เป็นต้น (Prakitsri, Rasri, Nithijirawat, & Para, 2019) และแบบจำลอง SIR (Susceptible, Infectious, Recovered) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ที่เกี่ยวข้องกับการระบาดของโรคโดยแบ่งกลุ่มผู้เกี่ยวข้องเป็น 3 กลุ่ม คือ

- 1) กลุ่มผู้ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Susceptible Population: S)
- 2) กลุ่มผู้ติดเชื้อ (Infectious Population: I)
- 3) กลุ่มผู้ที่หายจากการติดเชื้อ (Recovered Population: R) ซึ่งรวมทั้งผู้ที่รักษาหายและผู้ที่เสียชีวิต

N แทนจำนวนประชากรทั้งหมด และมีพารามิเตอร์ ดังนี้

τ แทน อัตราการเกิดของประชากร โดยที่ $\tau > 0$

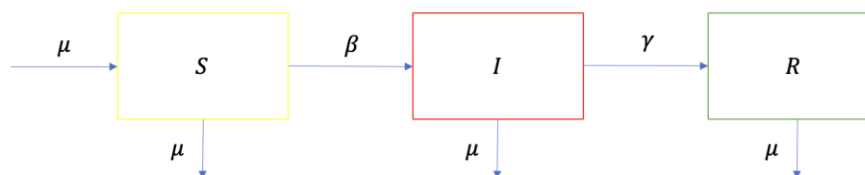
μ แทน อัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติของประชากร $\mu > 0$

β แทน อัตราการติดเชื้อของประชากร โดยที่ $\beta > 0$

γ แทน อัตราการหายจากการติดเชื้อของประชากร โดยที่ $\gamma > 0$

t แทน จำนวนวันในการศึกษา

แผนภาพการแพร่ระบาดของ SIR Model ดังนี้



รูปที่ 2 ตัวแบบ SIR

แสดงได้ด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญต่อไปนี้

$$\frac{dS}{dt} = \mu - \beta SI - \mu S$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - (\gamma + \mu)I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R$$

เมื่อ $S(0) = S_0 > 0, I(0) = I_0 > 0, R(0) = 0$

แบบจำลอง SEIR Model

แบบจำลอง SEIR เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อในประชากร (Jirawattanapanit, 2021) สามารถแบ่งประชากรออกเป็นผู้มีโอกาสติดเชื้อ (Susceptible Population) กลุ่มประชากรที่สัมผัสเชื้อแต่ยังไม่แสดงอาการ (Exposed Population) กลุ่มผู้ติดเชื้อและแพร่เชื้อได้ (Infectious Population) และกลุ่มผู้ที่หายจากโรคหรือมีภูมิคุ้มกัน (Recovered Population) แสดงจำนวนของกลุ่มประชากรย่อยแต่ละกลุ่ม (S, E, I, R) แบบจำลองนี้รายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนบุคคลในแต่ละกลุ่มตามเวลา โดยใช้ระบบสมการอนุพันธ์เชิงอนุพันธ์ (ODEs) ในแต่ละช่วงเวลาโดยคาดการณ์จากกำหนดอัตราการเร็วในการไหลเปลี่ยนสถานะการติดเชื้อของประชากรระหว่างกลุ่มด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามองค์ความรู้ที่มีเกี่ยวกับโรคนั้น รวมทั้งสามารถพัฒนาเพิ่มเติมปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอธิบายการระบาดของโรคติดเชื้อ เช่น อัตราการป่วย-ตาย หรืออัตราการได้รับวัคซีน เป็นต้น และแบบจำลอง SEIR (Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงโดยแบ่งกลุ่มผู้เกี่ยวข้องเป็น 4 กลุ่ม คือ

กลุ่มผู้ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Susceptible Population: S)

กลุ่มประชากรที่สัมผัสเชื้อแต่ยังไม่แสดงอาการ (Exposed Population: E)

กลุ่มผู้ติดเชื้อ (Infectious Population: I)

กลุ่มผู้ที่หายจากการติดเชื้อ (Recovered Population: R) ซึ่งรวมทั้งผู้ที่รักษาหาย และผู้ที่เสียชีวิตจากโรค

N แทนจำนวนประชากรทั้งหมด และมีพารามิเตอร์ ดังนี้

τ แทน อัตราการเกิดของประชากร โดยที่ $\tau > 0$

μ แทน อัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติของประชากร $\mu > 0$

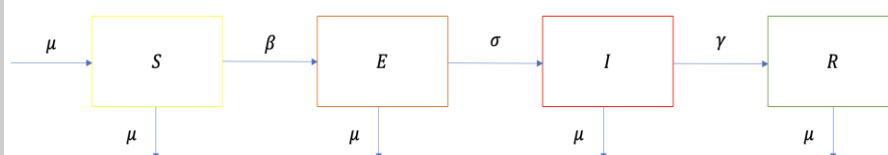
σ แทน อัตราการฟักตัวโรคโควิด-19 ของประชากร โดยที่ $\sigma > 0$

β แทน อัตราการติดเชื้อของประชากร โดยที่ $\beta > 0$

γ แทน อัตราการหายจากการติดเชื้อของประชากร โดยที่ $\gamma > 0$

t แทน จำนวนวันในการศึกษา

แผนภาพการแพร่ระบาดของ SEIR Model ดังนี้



รูปที่ 3 ตัวแบบ SEIR

แบบจำลอง SEIR ที่ใช้คาดการณ์จำนวนประชากรที่ติดเชื้อจากโรคระบาดในประชากร โดยทั่วไป สามารถแสดงได้ด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \tau - \beta SI - \mu S \\ \frac{dE}{dt} &= \beta SI - (\sigma + \mu)E \\ \frac{dI}{dt} &= \sigma E - (\gamma + \mu)I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \mu R\end{aligned}$$

เมื่อ $S(0) = S_0 > 0, E(0) = 0, I(0) = I_0 > 0, R(0) = 0$

ความรู้คณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

นิยาม 2.1 สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) คือ สมการที่มีอนุพันธ์ (Derivative) หรือ ผลต่างเชิงอนุพันธ์ (Differential) ของตัวแปรตาม (Dependent variable) หนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัวเทียบกับตัวแปรอิสระ (Independent variable) หนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว (ชื่นรังสิกุล, 2012)

โดยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัวเทียบกับตัว

แปรต้นเพียงหนึ่งตัวว่า สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation, ODE)

นิยาม 2.2 อันดับ (Order) ของสมการเชิงอนุพันธ์ คือ อันดับของการอนุพันธ์ที่มีอันดับสูงสุดที่ปรากฏอยู่ในสมการ (ขึ้นรังสิกุล, 2012)

นิยาม 2.3 สมการเชิงอนุพันธ์อันดับ n (ขึ้นรังสิกุล, 2012)

$$y^{(n)} = f(x, y, y', y'', \dots, y^{(n-1)})$$

จะกล่าวว่าเป็น สมการเชิงอนุพันธ์แบบเชิงเส้น (linear differential equations) อันดับ n เมื่อ f เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของ $y, y', y'', \dots, y^{(n-1)}$ นั่นคือ สมการเชิงอนุพันธ์จะเป็นสมการเชิงเส้นอันดับ n จะสามารถเขียนอยู่ในรูปดังนี้

$$a_n(x) \frac{d^n y}{dx^n} + a_{n-1}(x) \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + a_1(x) \frac{dy}{dx} + a_0(x)y = g(x)$$

หรือ

$$a_n(x)y^{(n)} + a_{n-1}(x)y^{(n-1)} + \dots + a_1(x)y' + a_0(x)y = g(x)$$

เมื่อ $g(x)$ และสัมประสิทธิ์ $a_0(x), a_1(x), \dots, a_n(x)$ เป็นฟังก์ชันของ x

และ $a_n(x) \neq 0$

ตัวอย่าง สมการต่อไปนี้เป็นตัวอย่างเป็นตัวอย่างของสมการเชิงอนุพันธ์ จงหาอันดับและระดับ

1. $\left(\frac{dx}{dy}\right)^3 + xy = 5$

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับ 3 และระดับชั้น 1

2. $\frac{d^2 x}{dy^2} + 5xy \frac{dx}{dy} = 5$

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับ 1 และระดับชั้น 2

นิยาม 2.4 สมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป (ขึ้นรังสิกุล, 2012)

$$a(x) \frac{dy}{dx} + b(x)y = c(x) \text{ เมื่อ } a(x) \neq 0$$

ว่า สมการเชิงเส้นอันดับหนึ่ง (linear differential equation of first order) หรือเรียกว่าสมการเชิงเส้น

ถ้า $a(x) \neq 0$ หารถลอดสมการจะได้

$$\frac{dy}{dx} + \frac{b(x)}{a(x)}y = \frac{c(x)}{a(x)}$$

และให้ $P(x) = \frac{b(x)}{a(x)}$ และ $Q(x) = \frac{c(x)}{a(x)}$ จะได้

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x)$$

เรียกสมการนี้ว่า รูปแบบมาตรฐานของสมการเชิงเส้น

ในกรณี x เป็นฟังก์ชันของ y เราอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานได้เป็น

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x)$$

การหาผลเฉลยของสมการเชิงเส้น

พิจารณาสมการอนุพันธ์เชิงเส้นในรูปจะมีตัวประกอบปริพันธ์ คือ

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x)$$

จะมีตัวประกอบปริพันธ์ คือ

$$\lambda(x) = e^{\int P(x)dx}$$

ผลเฉลยทั่วไป คือ

$$y = \frac{1}{\lambda(x)} \left[\int Q(x)\lambda(x)dx + c \right]$$

นิยาม 2.5 เมทริกซ์ หมายถึง การเรียงจำนวนจริงให้เป็นแถว แต่ละแถวมีจำนวนเท่า ๆ กัน ภายใน [] แต่ละจำนวนในเมทริกซ์ เรียกว่า **สมาชิกของเมทริกซ์** (สัตยาภรณ์, 2009)

ตัวอย่าง

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$$

นิยาม 2.6 (มิติของเมทริกซ์) สำหรับแต่ละจำนวนเต็มบวก m และ n ใด ๆ ถ้า A เป็นเมทริกซ์ซึ่งมี m แถว และ n หลัก จะกล่าวว่า A เป็น $m \times n$ เมทริกซ์และกล่าวว่า A มีมิติหรือขนาด (dimension) เท่ากับ $m \times n$ (สัตยาภรณ์, 2009)

นิยาม 2.7 ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ 3×3 (สัตยาภรณ์, 2009)

$$\text{ถ้า } A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \text{ เป็นเมทริกซ์ที่มีมิติ } 3 \times 3$$

$$\text{แล้ว } \det(A) = (aei + bfg + cdh) - (ceg + afh + bdi)$$

ตัวอย่าง

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\text{จะได้ } \det(A) = (2 + 18 + 6) - (9 + 3 + 8) = 26 - 20 = 6$$

เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) (สัตยาภรณ์, 2009)

ให้ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ และ $f(X)$ เป็นฟังก์ชันเวกเตอร์ของ X โดยที่ $f(X) \in \mathbb{R}^m$ ดังนั้นอนุพันธ์ย่อยของ $f(X)$ เทียบกับ X จะเรียกว่า เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ของ $f(X)$ เขียนแทนด้วย $J(f_1, f_2, \dots, f_n)$ นิยามโดย

$$J(f_1, f_2, \dots, f_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

ตัวอย่าง

เมทริกซ์จาโคเบียนของ $f_1(x, y) = x^2y$ และ $f_2(x, y) = 2x^2 + 4y$ จะได้

$$J(f_1, f_2) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(x^2y)}{\partial x} & \frac{\partial(x^2y)}{\partial y} \\ \frac{\partial(2x^2 + 4y)}{\partial x} & \frac{\partial(2x^2 + 4y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2xy & x^2 \\ 4x & 4 \end{bmatrix}$$

นิยาม 2.8 เมทริกซ์นอนซิงกูลาร์และเมทริกซ์ซิงกูลาร์ (non-singular and singular matrix) (สตัยาภรณ์, 2009)

กำหนดเมทริกซ์จัตุรัส A ที่มีมิติ $n \times n$ จะเรียกว่า เมทริกซ์นอนซิงกูลาร์ ก็ต่อเมื่อจะต้องมี เมทริกซ์จัตุรัส B ที่มีมิติ $n \times n$ ซึ่งทำให้ $AB = BA = I_n$

กำหนดเมทริกซ์จัตุรัส A ที่มีมิติ $n \times n$ จะเรียกว่า เมทริกซ์ซิงกูลาร์ ก็ต่อเมื่อไม่มีเมทริกซ์จัตุรัส B ที่มีมิติ $n \times n$ ซึ่งทำให้ $AB = BA = I_n$

สมการลักษณะเฉพาะและค่าลักษณะเฉพาะ (สตัยาภรณ์, 2009)

ให้ A เป็นเมทริกซ์จัตุรัสมิติ n เรียก $\det(A - \lambda I_n) = 0$ ว่า สมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic equation) ของเมทริกซ์ A และเรียก $\det(A - \lambda I_n)$ ซึ่งเป็นพหุนามที่มีดีกรี n ว่า พหุนามลักษณะเฉพาะ (Characteristic polynomial) ของเมทริกซ์ A

ตัวอย่าง

ให้ $A = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}$ จงหาพหุนามลักษณะเฉพาะ สมการลักษณะเฉพาะ และค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ A

วิธีทำ $A = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}$ จะได้

$$\det(A - \lambda I_2) = \begin{vmatrix} 3 - \lambda & 2 \\ 2 & -\lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 - 3\lambda - 4$$

ดังนั้น พหุนามลักษณะเฉพาะ คือ $\lambda^2 - 3\lambda - 4$

สมการลักษณะเฉพาะ คือ $\lambda^2 - 3\lambda - 4 = 0$ หรือ $(\lambda - 4)(\lambda + 1) = 0$

และ ค่าลักษณะเฉพาะ คือ $\lambda = 4$ หรือ -1

ทฤษฎี 2.9 เกณฑ์ความมั่นคง (Routh-Hurwitz criteria) (Gantmakher, 2000)

ให้พหุนาม

$$P(\lambda) = \lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ a_i เป็นจริงและไม่เป็นศูนย์ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ โดยเกณฑ์ความมั่นคง (Routh-Hurwitz criteria) จะมีเกณฑ์สำหรับ $n = 2, 3, 4$ คือ

$$n = 2; a_1 > 0 \text{ และ } a_2 > 0$$

$$n = 3; a_1 > 0, a_3 > 0 \text{ และ } a_1 a_2 > a_3$$

$$n = 4; a_1 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0 \text{ และ } a_1 a_2 a_3 > a_3^2 + a_1^2 a_4$$

ข้อสรุป 2.10 สมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์ a_i ของพหุนามลักษณะเฉพาะเป็นจริง ถ้ารากทั้งหมดของพหุนามต่อไปนี้

$$P(\lambda) = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n$$

เป็นลบหรือมีส่วนจริงเป็นลบ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ a_i จะต้องเป็นบวกหรือจำนวนบวก โดยที่ $a_i > 0$ สำหรับ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

ทฤษฎีบท 2.11 การตรวจสอบความไม่เป็นลบของจำนวนประชากร (Positive of Solution) และการหาขอบเขตค่าคงที่ (Invariant Region) (Kuddus, Paul, & Theparod, 2024)

ถ้าค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง $S(0) > 0, E(0) > 0, I(0) > 0, R(0) > 0$ แล้ว $\{S(t), E(t), I(t), R(t)\} > 0$ สำหรับทุก $t \geq 0$ เมื่อกำหนดให้ $D = \{(S, E, I, R) \in \mathbb{R}_+^4 : S + E + I + R = N\}$

นิยาม 2.12 จุดสมดุล (Equilibrium Point) (สลิลทิพย์ แดงกองโค & ตั้งศิริเวชกุล., 2013) พิจารณาระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

$$\frac{dx}{dt} = F(x)$$

โดยที่ $F = (F_1, \dots, F_n)^T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \in \mathbb{C}^r (r \geq 1), X = (x_1, \dots, x_n)^T$ เป็นตัวแปรเปลี่ยนสถานะของระบบ และ $t \in \mathbb{R}$ เป็นเวลา ให้ $\bar{X} \in \mathbb{R}^n$ เป็นจุดสมดุล ซึ่ง $F(\bar{X}) = 0$

ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (Basic Reproduction Number, R_0) (Jirawattanapanit, 2021)

ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (Basic Reproduction Number, R_0) เป็นตัวบ่งชี้วัดอย่างหนึ่งในการระบาด ที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ป่วยรายใหม่ในกลุ่มประชากรที่ยังไม่เคยติดเชื้อจากผู้ป่วย 1 ราย ตัวชี้วัดนี้มีประโยชน์ในการประเมินว่า โรคติดเชื้อมัน ๆ สามารถแพร่ระบาดในกลุ่มประชากรที่ยังไม่มีการติดเชื้อเฉลี่ยเท่าใด พิจารณาค่า R_0 ดังนี้

1. ถ้า $R_0 > 1$ แสดงว่าโรคมีการระบาด โดย ผู้ป่วย 1 คนสามารถแพร่เชื้อได้โดยเฉลี่ยทุก ๆ เวลา มากกว่า 1 คน

2. ถ้า $R_0 = 1$ แสดงว่า โรคเริ่มเสถียร โดย ผู้ป่วย 1 คนสามารถแพร่เชื้อได้โดยเฉลี่ยทุก ๆ เวลาเท่ากับ 1 คน
3. ถ้า $R_0 < 1$ แสดงว่า โรคไม่มีการระบาด โดย ผู้ป่วย 1 คนสามารถแพร่เชื้อได้โดยเฉลี่ยทุก ๆ เวล่าน้อยกว่า 1 คน

นิยาม 2.13 รัศมีเชิงสเปกตรัม (Spectral Radius) (Jirawattanapanit, 2021)

ให้ $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ เป็นค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ A เรียก เซต $\{\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ ว่า สเปกตรัม (Spectral) ของเมทริกซ์ A และเรียก $\rho(A) = \max_{i \leq n} \{|\lambda_i|\}$ ว่า รัศมีเชิงสเปกตรัม (Spectral radius) ของเมทริกซ์ A

วิธีการทางเมทริกซ์รุ่นถัดไป (Next Generation Matrix Method) (Jirawattanapanit, 2021)

วิธีการทางเมทริกซ์รุ่นถัดไป จะใช้เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะ โดยจัดสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นในรูป

$$\frac{dX}{dt} = F(X) - V(X)$$

จากเมทริกซ์ $\rho(Fv^{-1})$ เมื่อ $\rho(Fv^{-1}) = \max_{i \leq n} \{|\lambda_i|\}$ คือ Spectral radius

ซึ่ง $F(X)$ คือ เมทริกซ์ของผู้ที่มีการติดเชื้อ และ $V(X)$ คือ เมทริกซ์ของผู้ป่วยที่ได้เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปยังอีกกลุ่มหนึ่ง โดยที่

$$X = [x_i]^T, F = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_i} \right], v = \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right]; i = 1, 2, \dots, n$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis) (Chu et al., 2021)

การวิเคราะห์เสถียรภาพ เป็นการหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigen values) เพื่ออธิบายคำตอบของสมการเกี่ยวกับค่าความสมดุล สำหรับตรวจสอบว่าระบบสมการมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ (Local asymptotically stable) ซึ่งมี 2 กรณีดัง

ทฤษฎีบท 2.14 ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค (E_{DFE}) เป็นระบบเสถียรภาพกำกับเส้นเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 < 1$ และไม่มีเสถียรภาพกำกับเส้นเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 > 1$

ทฤษฎีบท 2.15 ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะการแพร่ระบาด (E_{EE}) เป็นระบบเสถียรภาพกำกับเส้นเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 > 1$ และไม่มีเสถียรภาพกำกับเส้นเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 < 1$

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) (Chitnis, Hyman, & Cushing, 2008)

การศึกษาการวิเคราะห์ความอ่อนไหว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหาพารามิเตอร์ส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดจำนวนประชากรที่ต้องการศึกษา

ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน (R_0) จากแบบจำลอง SEIR ที่ส่งผลต่อการแพร่ระบาดของโรคจากคนสู่คน โดยที่การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน (R_0) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Y_{R_0}^K = \frac{\partial R_0}{\partial K} \cdot \left(\frac{K}{R_0} \right)$$

โดยที่ K คือ พารามิเตอร์ของการแพร่ระบาดโรคประกอบไปด้วย τ แทน อัตราการเกิดของประชากร, μ แทน อัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติของประชากร, σ แทน อัตราการฟักตัวโรคโควิด-19 ของประชากร, β แทน อัตราการติดเชื้อของประชากร, γ แทน อัตราการหายจากการติดเชื้อของประชากร

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน (R_0) ทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลหรือส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสืบพันธุ์พื้นฐาน (R_0) ที่ทำให้ผู้ศึกษาทราบว่าโรคที่ทำการศึกษานั้นจะมีการระบาดมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ตัวใด

ตัวเลขการแพร่ระบาด (Reproduction number: R_t) (Barratt, Kirwan, & Shantikumar, 2018)

ตัวเลขการแพร่ระบาด (Reproduction number: R_t) หรือตัวเลขการแพร่ระบาดอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective reproduction number: R_{EE}) โดยในความเป็นจริงนั้น ประชากรจะมีภูมิคุ้มกันที่อาจเกิดได้จากการติดเชื้อมาก่อนหน้านี้ แล้วร่างกายจึงมีการสร้างภูมิคุ้มกันชนิดตลอดชีพ (Life-long immunity) หรืออาจเป็นผลมาจากการได้รับวัคซีนก่อนหน้านี้ (Previous immunization) ดังนั้นผู้ที่ได้รับหรือสัมผัสเชื้อ (Contact) ทั้งหมดอาจจะไม่ได้ติดเชื้อ (Infected) และค่าเฉลี่ยของกรณีการติดเชื้อในระดับทุติยภูมิต่อการติดเชื้อ (Average number of secondary cases per infectious case) จะมีค่าต่ำกว่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (R_0) ดังนั้นตัวเลขการแพร่ระบาด (R_t) จะเป็นค่าเฉลี่ยของกรณีการติดเชื้อในระดับทุติยภูมิต่อการติดเชื้อของจำนวนประชากรจากทั้งที่อ่อนแอและที่แข็งแรง

สำหรับการคำนวณหาค่า R_t สามารถประมาณได้จากการหาผลคูณระหว่างค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (R_0) กับสัดส่วนของประชากรกลุ่มเสี่ยง ดังนี้

$$R_t = R_0 \cdot (x)$$

เมื่อ $x \in (0,1)$ เป็นสัดส่วนของประชากรกลุ่มเสี่ยง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในประเทศ

ผู้วิจัยได้สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาระเบียบวิธีบริหารการศึกษา และข้อค้นพบ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการอภิปรายผลการศึกษาได้ประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากงานวิจัยในประเทศ 4 เรื่อง ดังต่อไปนี้

อนุวัตร จิรวัฒนพาณิช (2016) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อแสดงผลของการควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัสตับอักเสบบี โดยการรณรงค์ให้ความรู้ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อการควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัสตับอักเสบบี โดยการรณรงค์ให้ความรู้ในจังหวัดภูเก็ต วิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้ วิธีมาตรฐาน ศึกษาจุดสมดุล ศึกษาเสถียรภาพของจุดสมดุล หาคำตอบเชิงวิเคราะห์ ศึกษาอัตราการรณรงค์ให้ความรู้การแพร่ระบาดของไวรัสตับอักเสบบีในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และหาคำตอบเชิงตัวเลข จากการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นจำนวน 4 สมการ จุดสมดุลที่มีโรค จุดสมดุล ที่ไม่มีโรค และค่าระดับการติดเชื้อ นอกจากนี้ พบว่าอัตราการรณรงค์ให้ความรู้การแพร่ระบาดของโรคตับอักเสบบีเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าระดับการติดเชื้อของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งถ้าอัตราการรณรงค์ให้ความรู้มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระดับการติดเชื้อลดลง และยังพบว่าถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อมีความรู้เกี่ยวกับการแพร่ระบาดของโรคตับอักเสบบีน้อยจะส่งผลให้การแพร่ระบาดของโรคเพิ่มขึ้น

อิทธิเทพ นวาระสุจิตร์, ณัฐดนัย ปานพวง, และ วุฒิชัย ศรีวงศ์แสน (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโรคไข้หวัดใหญ่ (Influenza) ซึ่งเป็นโรคที่เกิดจากเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่ (Influenza virus) 3 ชนิดคือ AB และ C อยู่ในสกุล Orthomyxoviridae ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ซึ่งมีผลกระทบจากปริมาณน้ำฝน โดยการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการจำลองสถานการณ์จริง ผู้วิจัยได้ทำการหาจุดสมดุล หาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดความเสถียรภาพของจุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรคและภายใต้สภาวะการแพร่ระบาดเร็วรั้งมีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการจำลอง หลังจากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับจำนวนผู้ป่วยคือปริมาณน้ำฝนมากผู้ป่วยก็จะมีจำนวนมาก ปริมาณน้ำฝนน้อยผู้ป่วยก็จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นฤดูกาลมีผลต่อการระบาดของโรค

พงษ์สัณญ์ ประกฤตศรี, อาณิชา ราศรี, ขนกานต์ นิธิจิรวัฒน์, และ นริศรา ภารา (2019) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการแพร่กระจายเชื้อวัณโรคในประเทศไทยที่มีปัจจัยของการฉีดวัคซีนและการต่อต้านการรักษาด้วยยา วัณโรคเป็นโรคติดต่อที่เกิดจากเชื้อไม

โคโรนาไวรัสที่เรียกว่าโคโรนาไวรัส ซึ่งสามารถติดต่อจากคนสู่คนผ่านทางอากาศโดยการหายใจ ไอ จาม หรืออยู่ร่วมกับผู้ป่วยเป็นเวลานาน ในประเทศไทยนั้นมีปัญหาของการแพร่ระบาดของวัณโรคสูง เนื่องจากในแต่ละปี จำนวนผู้ป่วยเป็นวัณโรคมีการดื้อยาเพิ่มสูงขึ้น ผู้วิจัยจึงทำการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของวัณโรคในประเทศไทยที่มีปัจจัยของการฉีดวัคซีนและการต่อต้านการรักษาด้วยยา ซึ่งประกอบด้วย กลุ่มประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ กลุ่มประชากรที่ฉีดวัคซีน กลุ่มประชากรที่เป็นโรครออยู่ในระยะไม่แสดงอาการ กลุ่มประชากรที่เป็นโรคอยู่ในระยะแสดงอาการ กลุ่มประชากรดื้อยา และกลุ่มประชากรที่หายจากโรค จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ หาจุดสมดุล หาค่าความมีเสถียรภาพของจุดสมดุลสถานะไร้โรค หาอัตราการแพร่กระจายเชื้อของวัณโรคในประเทศไทยโดยใช้วิธีรันถัดไป และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของ อัตราการแพร่กระจายเชื้อของวัณโรคในประเทศไทย จากนั้นทำการหาผลเฉลยเชิงตัวเลข แล้วเปรียบเทียบผลเฉลยเชิงตัวเลขกับข้อมูลจริงของผู้ป่วยวัณโรคตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014-2017 พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ 9.0868 นอกจากนี้การปรับปรุงผลเฉลยเชิงตัวเลขโดยการประมาณค่าพารามิเตอร์บางค่าด้วยการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการถดถอยเชิงพหุนาม พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนลดลงประมาณร้อยละ 0.3

นรพัชร อัสวาลลภ และ กวิน เอี่ยมตระกูล (2019) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้แก่ แบบจำลอง SIR ซึ่งแบ่งกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มผู้ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Susceptible : S) 2) กลุ่มผู้ที่ติดเชื้อ (Infectious : I) และ 3) กลุ่มผู้ที่หายจากการติดเชื้อ (Recovered : R) ซึ่งกลุ่มสุดท้ายนี้จะเป็นการรวมกลุ่มของผู้ที่รักษาหายและผู้เสียชีวิตจากโรคด้วย

ทั้งนี้ เมื่อนำแบบจำลอง SIR มาประยุกต์ใช้กับการคาดการณ์จำนวนผู้ป่วยโควิด-19 รายใหม่ในแต่ละวันของประเทศไทย ภายใต้สมมติฐานที่กำหนดขึ้น ในกรณีสูง (High Scenario) จำนวนผู้ติดเชื้อเพิ่มสูงสุดในวันที่ 1 มิถุนายน จำนวน 3,793 คน และค่อยๆปรับลดลง ส่วนกรณีต่ำ (Low Scenario) และกรณีฐาน (Baseline Scenario) จำนวนผู้ป่วยรายใหม่จะปรับลดลงอย่างต่อเนื่อง และต่ำกว่า 100 คน ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 ของเดือน มิถุนายน และสัปดาห์ที่ 3 ของเดือนกรกฎาคม 2021 เป็นต้นไป ตามลำดับ ในขณะที่จำนวนผู้ป่วยติดเชื้อที่รักษาตัวอยู่ในโรงพยาบาลในกรณีสูง (High Scenario) จะเพิ่มสูงถึง 50,894 คน ในวันที่ 8 มิถุนายน และปรับตัวลดลงต่ำกว่า 100 คนตั้งแต่วันที่ต้นเดือนตุลาคมเป็นต้นไป ส่วนกรณีต่ำ (Low Scenario) และกรณีฐาน (Baseline Scenario) จำนวนผู้ป่วยติดเชื้อที่รักษาตัวในโรงพยาบาลจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลการคาดการณ์ ดังกล่าว แม้จะเป็นกรณีสูงจำนวนผู้ป่วยที่ต้องเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลก็ยังอยู่ในระดับที่ระบบสาธารณสุขของไทยยังสามารถรองรับได้ นอกจากนี้ หากรัฐบาลสามารถจัดหาวัคซีนได้ 100 ล้านโดสในปี 2021 และ 50 ล้าน โดสในปี

2022 ผลการศึกษาพบว่า การเกิดภูมิคุ้มกันหมู่หรือ Herd Immunity น่าจะเกิดขึ้นได้ภายในไตรมาสที่ 1/2022 อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง SIR ยังมีข้อจำกัดหลายประการที่อาจทำให้ผลการศึกษาเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น การใช้ประโยชน์จากผลลัพธ์ของแบบจำลองจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ร่วมด้วย

งานวิจัยต่างประเทศ

ผู้วิจัยได้สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาระเบียบวิธีบริหารการศึกษาและข้อค้นพบซึ่งสามารถนำไปใช้ในการอธิบายผลการศึกษาได้ประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากต่างประเทศ 3 เรื่อง ดังนี้

Djenina et al. (2022) ได้ทำการศึกษาการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ในระหว่างการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ทั่วโลก นักคณิตศาสตร์หลายคนได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาหลายแบบ เน้นอนว่านี่คือการทำความเข้าใจการคาดการณ์และพฤติกรรมของการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีข้อมูลมากนัก การประยุกต์ใช้แบบจำลองจำนวนมากจึงกลายเป็นเรื่องยากในความเป็นจริงและบางครั้งก็เกินไปไม่ได้ ไม่เหมือนแบบจำลอง SIR แบบธรรมดา ในงานนี้ มีการเสนอแบบจำลอง SEIR เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 โมเดลดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของจำนวนผู้ติดเชื้อ สำหรับแบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบด้วยวิธี Picard Lindelöf ผลลัพธ์ทางทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องระหว่างความมีเสถียรภาพ ณ จุดสมดุลของแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน และมีการหาพารามิเตอร์หลายตัวเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้

Durai, Begum, Jebaseeli, and Sabahath (2022) ได้ทำการศึกษาการระบาดใหญ่ของโรคโควิด-19 การคาดการณ์และการควบคุมในซาดูติาระเบียโดยใช้แบบจำลอง SIR-F และแบบจำลอง SEIR ที่มีโครงสร้างตามอายุ โรคโควิด-19 ส่งผลกระทบต่อทุกคน ส่งผลให้เกิดผลกระทบอย่างมากต่อการรับมือและป้องกันอันตรายของการระบาดใหญ่ เนื่องจากขาดวัคซีนหรือยารักษาโรคที่มีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมอย่างเร่งด่วนเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้การประมวลผลขั้นสูง เช่น intelligence (AI) machine learning (ML) deep learning (DL) cloud computing และ edge computing เพื่อต้องการควบคุมการแพร่กระจายของไวรัสชนิดใหม่ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับประเทศต่าง ๆ ที่จะต้องควบคุมและเพื่อป้องกันการแพร่ระบาด มีการใช้มาตรการควบคุมหลายอย่างในแต่ละประเทศ เช่น ประเทศซาอุดีอาระเบียมีการบังคับใช้มาตรการต่าง ๆ จนกระทั่งลดการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 จากการระบาดใหญ่จึงมี

ข้อมูลเพียงพอสำหรับนักวิจัยในการคาดการณ์ผลกระทบของการแพร่ระบาดในอนาคต บทความนี้ได้ศึกษาผลกระทบของโรคโควิด-19 โดยใช้แบบจำลอง Susceptible-Infected-Recovered (SIR-F) ในขณะที่ F ย่อมาจาก 'Fatal with Confirm' แบบจำลอง SEIR ที่มีโครงสร้างตามอายุ (Susceptible Exposed Infectious Removed) และ ใช้ machine learning (ML) สำหรับการดูแลสุขภาพและ ความเป็นอยู่ที่ดีของพลเมืองชาอดิอาระเบีย นอกจากนี้ยังตรวจสอบสถานการณ์การวัดการควบคุมต่างๆ ที่สร้างโดยแบบจำลอง SEIR โดยผลของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าการแทรกแซงมีความสำคัญต่อการเพิ่มการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 ซึ่งสามารถชะลอการแพร่ระบาดและลดอัตราการเสียชีวิตได้

Kifle and Obsu (2022) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 กรณีศึกษาในเอธิโอเปีย ในบทความนี้ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ขั้นแรกผู้วิจัยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบ เช่น ค่าคำตอบและขอบเขตที่มากกว่าศูนย์ การมีอยู่ของสภาวะจุดสมดุลของการเกิดโรคและไม่เกิดโรคทั้ง 2 วิธี นอกจากนี้ เราคำนวณค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (R_0) และศึกษาหาค่าความอ่อนไหวของตัวแปรต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (R_0) ซึ่งบ่งบอกถึงพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุด โดยสภาวะจุดสมดุลของการเกิดโรค ยังได้รับการตรวจสอบด้วยเมทริกซ์จาโคเบียน และเกณฑ์ Routh Hurwitz นอกจากนี้การหาเสถียรภาพของสภาวะจุดสมดุลของการไม่เกิดโรค ยังได้พิสูจน์โดยใช้แนวทางของ Castillo-Chavez และ Song และพิสูจน์การดำรงอยู่ของทั้งสองจุดสมดุล โดยใช้ทฤษฎี center manifold จากนั้น โมเดลดังกล่าวจะใช้กับผู้ติดเชื้อโควิด-19 โดยมีรายงานตั้งแต่วันที่ 13 มีนาคม 2020 ถึง 31 กรกฎาคม 2021 ในเอธิโอเปีย จากนั้น ค่าของพารามิเตอร์โมเดลจะถูกประเมินจากข้อมูลที่รายงานโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความถดถอยร่วมกับฟังก์ชัน fminsearch ในชุดคำสั่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB และมีการดำเนินการจำลองกรณีต่างๆ โดยใช้ซอฟต์แวร์ PYTHON เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลจริงกับผลการวิเคราะห์ ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าสามารถจัดการการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 ได้โดยการลดอัตราการติดต่อของผู้ติดเชื้อและเพิ่มการกักกันผู้สัมผัสเชื้อโควิด-19

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยสำหรับสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายพลวัตการแพร่เชื้อโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย โดยมีศึกษาการติดเชื้อ 4 รูปแบบดังนี้ รูปแบบที่ไม่แสดงอาการ (อาการไม่รุนแรง) รูปแบบที่แสดงอาการ (รุนแรง) รูปแบบที่แสดงอาการ (อาการรุนแรงขั้นวิกฤติ) และรูปแบบที่พักรักษาตัวที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล ดังนั้นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาจะพิจารณาทั้งหมด 8 กลุ่มประชากร ซึ่งกำหนดให้ประชากรมีขนาดคงที่ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนโดยแยกตามขั้นตอนดังนี้

- 3.1 สมมติฐานของแบบจำลอง
- 3.2 กำหนดค่าตัวแปรและพารามิเตอร์
- 3.3 การสร้างแบบจำลองของประชากร
- 3.4 การตรวจสอบความไม่เป็นลบของจำนวนประชากร
- 3.5 การหาขอบเขตค่าคงที่
- 3.6 การหาจุดสมดุล
- 3.7 การหาค่าระดับการติดเชื้อ
- 3.8 การวิเคราะห์เสถียรภาพ
- 3.9 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข
- 3.10 วิเคราะห์ความอ่อนไหว

3.1 ข้อตกลงเบื้องต้นของแบบจำลอง

3.1.1 แบบจำลองสำหรับโรคติดเชื้อโควิด-19 สมมติให้ผู้ติดเชื้อและผู้ที่ย้ายจากการติดเชื้อแล้วจะมีภูมิคุ้มกันกล่าวคือ กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ และกลุ่มประชากรที่ย้ายจากการติดเชื้อแล้วจะไม่สามารถกลับมาติดเชื้อได้ เนื่องจากมีภูมิคุ้มกันหรือต้องใช้เวลาในการกลับมาเป็นโรคเดิมซ้ำอีก

3.1.2 พิจารณาวัคซีนชนิด Sinovac, Sinopharm, AstraZeneca, Pfizer และ Moderna

3.1.3 กลุ่มประชากรที่พิจารณา คือประชากรในประเทศไทย ทุกช่วงอายุ ทั้งเพศชายและหญิง จำนวน 66 ล้านคน

3.1.4 แบบจำลองโควิดนี้ไม่ได้พิจารณาระยะพักตัว เนื่องจากสายพันธุ์โอมิครอนมีระยะพักตัวที่สั้น (3 วัน) ทำให้ติดเชื้อได้เร็วขึ้นและเมื่อทราบว่าติดเชื้อก็ผ่านช่วงระยะพักตัวมาแล้วจึงไม่พิจารณาระยะพักตัว

3.1.5 ประชากรที่ทำการศึกษเป็นประชากรเปิด โดยมีการพิจารณาอัตราการเกิดโดยธรรมชาติ และอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ซึ่งในที่นี้เรากำหนดให้อัตราการเกิดและอัตราการเสียชีวิตเท่ากัน เนื่องจากจำนวนการเกิดของปี 2021 มีค่าเท่ากับ 544,570 คน และจำนวนการเสียชีวิตของปี 2021 มีค่าเท่ากับ 563,650 คน (Nisakorn, 2021) ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน

3.1.6 สมมติให้ประชากรทุกคนต้องเป็นกลุ่มเสี่ยงติดเชื้อ

3.1.7 ไม่พิจารณาการเคลื่อนย้ายของประชากร กล่าวคือประชากรไม่มีการเคลื่อนย้ายออกนอกประเทศ หรือไม่พิจารณาประชากรที่ย้ายเข้ามาในประเทศไทย

3.2 กำหนดค่าตัวแปรและพารามิเตอร์

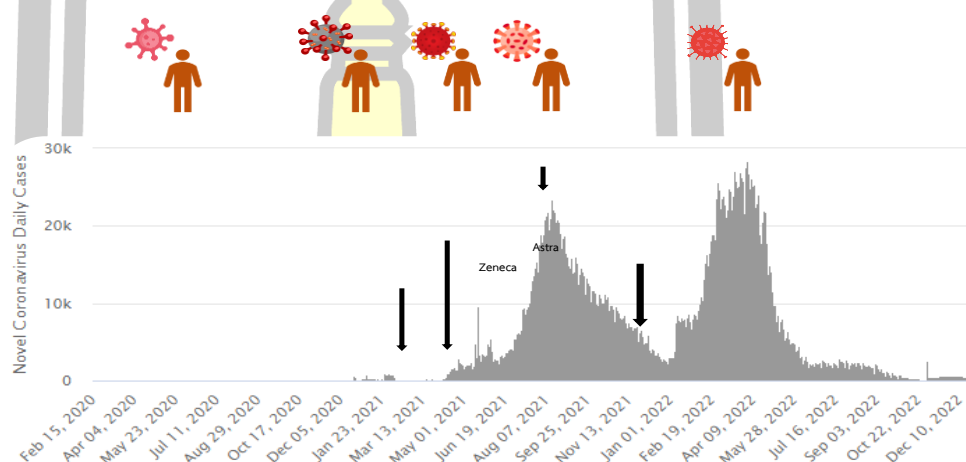
ในการเขียนแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้ใช้ตัวแปรและพารามิเตอร์มากำหนดค่าในสมการ ดังนี้

ตาราง 1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลองโรคโควิด-19

ตัวแปร	คำอธิบาย	หน่วย
S	สัดส่วนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อ	คน
S_v	สัดส่วนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน	คน
I	สัดส่วนประชากรที่ติดเชื้อ (อาการไม่รุนแรง)	คน
H_1	สัดส่วนประชากรที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง)	คน
C	สัดส่วนประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU (อาการวิกฤต)	คน
H_2	สัดส่วนประชากรที่พักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล	คน
R	สัดส่วนประชากรที่หายจากการติดเชื้อ	คน
D	สัดส่วนประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อ	คน
พารามิเตอร์		
μ	อัตราการเกิด และอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติของประชากร	-
τ_i	อัตราการฉีดวัคซีนเข็มที่ i โดยที่ $i = 1,2,3$	คน/วัน
β	อัตราการแพร่เชื้อ	คน/วัน
γ	อัตราการหายจากการติดเชื้อ	คน/วัน
σ	อัตราการหายจากการติดเชื้อในขณะที่เข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาล	คน/วัน
η	อัตราการหายจากการติดเชื้อในขณะที่พักรักษาตัวที่โรงพยาบาล	คน/วัน

δ	อัตราการฟักฟื้นจากการรักษาที่ห้อง ICU	คน/วัน
ω	อัตราการเข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาล	คน/วัน
λ	อัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อ	คน/วัน
π	อัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อในระหว่างที่เข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาล	คน/วัน
ρ	อัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อในระหว่างที่เข้ารับการรักษาที่ห้อง ICU	คน/วัน
α	อัตราการเข้ารับการรักษาที่ห้อง ICU	คน/วัน
m_i	ประสิทธิภาพวัคซีนในการป้องกันโรคโควิด-19 เข็มที่ i โดยที่ $i = 1,2,3$	เปอร์เซ็นต์
v_i	สัดส่วนประชากรที่ฉีดวัคซีนเข็มที่ i โดยที่ $i = 1,2,3$	-

3.3 การสร้างแบบจำลองของประชากร

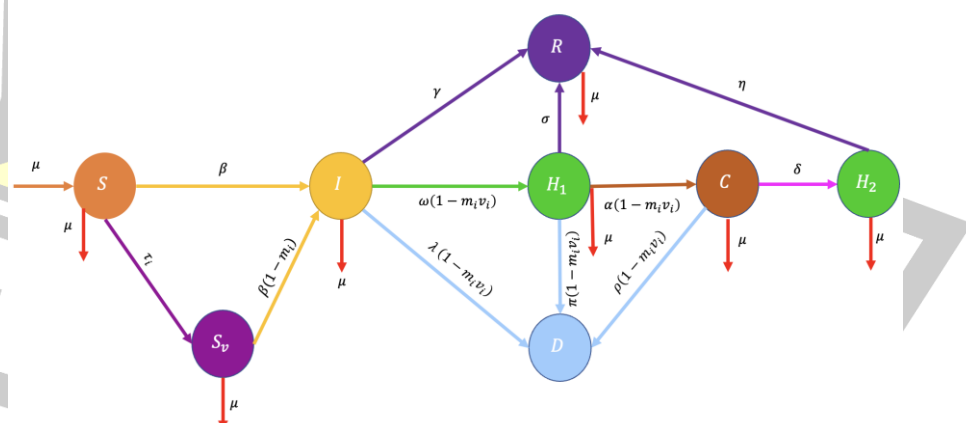


รูปที่ 4 จำนวนผู้ติดเชื้อรายวันตั้งแต่ระลอกที่ 1 ถึงระลอกที่ 5

ผู้วิจัยทำการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ได้จากการติดตามสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ในประเทศไทย จากรูปที่ 4 ตั้งแต่เริ่มต้นการระบาดในระลอกที่ 1 มาจนถึงระลอกที่ 5 พบว่าการแพร่ระบาดระลอกที่ 5 มีการรายงานพบจำนวนผู้ติดเชื้อมากที่สุดเมื่อเทียบกับการรายงานผู้ติดเชื้อในระลอกก่อนหน้านี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สนใจศึกษาการแพร่ระบาดระลอกที่ 5 จากการวิเคราะห์ลักษณะการแพร่ระบาดจากสถานการณ์การแพร่ระบาดในระลอกที่ 5 ตั้งแต่วันที่ 3 มกราคม ถึง 1 ตุลาคม 2022 จำนวน 272 วัน พบว่าสายพันธุ์ที่แพร่ระบาดคือสายพันธุ์โอมิครอนที่มีลักษณะการแพร่ระบาดสูง โดยประชากรทุกคนมีโอกาสที่จะติดเชื้อ ซึ่งผู้ติดเชื้อแล้วอาการไม่รุนแรงจะสามารถพักฟื้นตัวที่บ้านได้ ส่วนผู้ที่มีการรุนแรงก็ต้องเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล รวมทั้งผู้ที่มีอาการวิกฤตก็ยังสามารถเข้ารับการรักษาในห้อง ICU ได้เลย แต่เมื่อเข้ารับการรักษาในห้อง ICU แล้วจะต้องฟักฟื้นตัวที่โรงพยาบาลเพื่อให้ร่างกายฟื้นฟูก่อนออกจากโรงพยาบาล โดยทุก

กลุ่มมีอาการรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิตจากการติดเชื้อ ส่วนผู้ที่มีภูมิคุ้มกันดีหรือเข้ารับการรักษา จนหายก็จะสามารถกลับไปใช้ชีวิตตามปกติได้ เนื่องจากมีภูมิคุ้มกันโรคแล้ว และในระลอกที่ 5 เป็นระลอกที่มีการแพร่ระบาดโรคโควิด-19 ที่รุนแรง และมีการกระตุ้นการฉีดวัคซีนจากการฉีด วัคซีนที่หลากหลายยี่ห้อ ซึ่งแต่ละยี่ห้อมีประสิทธิภาพวัคซีนแตกต่างกัน ซึ่งผู้วิจัยต้องการทราบ ถึงความรุนแรงของโรคโควิด-19 จากแบบจำลองซึ่งก็คืออัตราการแพร่เชื้อต่อประสิทธิภาพ วัคซีนในการป้องกันการแพร่ระบาดได้มากหรือน้อยเพียงใด โดยผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของประชากรที่เกิดขึ้นจริงในช่วงการแพร่ระบาดโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศ ไทย

โดยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างคือแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ ประกอบไป ด้วยกลุ่มกลุ่มประชากรออกเป็นประชากรทั้งหมด 8 กลุ่มประชากร ได้แก่ กลุ่มประชากรที่ เสี่ยงติดเชื้อ (S) กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับการฉีดวัคซีน (S_v) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ (I) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง, H_1) กลุ่ม ประชากรที่ติดเชื้อเข้ารับการรักษาในห้อง ICU (อาการวิกฤติ, C) กลุ่มประชากรที่พักรักษา หลังจากรักษาในห้อง ICU (H_2) กลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อ (R) และกลุ่ม ประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อ (D) โดยประชากรทั้งระบบเท่ากับ 66 ล้านคน หรือเป็น สัดส่วนของประชากรทั้งหมดในระบบเท่ากับ 1 ซึ่งไม่พิจารณาการเคลื่อนย้ายของประชากร ตามพื้นที่ ผู้วิจัยจึงสมมติให้ประชากรมีภูมิคุ้มกัน (Immune) กล่าวคือกลุ่มที่หายจากการติด เชื้อไม่สามารถกลับมาติดเชื้อได้และต้องใช้เวลาในการกลับมาเป็นโรคเดิมซ้ำอีก แสดงดัง รูปภาพที่ 5



รูปที่ 5 แสดงแผนผังการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรในระบบ

จากรูปที่ 5 แสดงตัวแบบ $SS_vIH_1CH_2RD$ ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรตาม ช่วงเวลา ซึ่งจำนวนการเกิดของปี 2021 มีค่าเท่ากับ 544,570 คน และจำนวนการเสียชีวิตของ

ปี 2021 มีค่าเท่ากับ 563,650 คน (Nisakorn, 2021) ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน ผู้วิจัยจึงกำหนดให้อัตราการเกิดและอัตราการเสียชีวิตเท่ากัน โดยค่าอัตราการเกิดและค่าอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ เราคำนวณจากค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดและจำนวนผู้เสียชีวิตของปี 2021 หาดด้วยประชากรทั้งหมด ซึ่งเท่ากับ 0.008 และในแบบจำลองนี้ประชากรทั้งหมดมีสัดส่วนเท่ากับ 1 โดยเริ่มจากกลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อจะมีประชากรเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการเกิด และมีการเปลี่ยนสถานะได้ 2 สถานะดังนี้ เปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีนหากได้รับวัคซีนด้วยอัตราการฉีดวัคซีนเพิ่มที่ i เมื่อ $i = 1$ แสดงว่าฉีดวัคซีน 1 เข็ม $i = 2$ แสดงว่าฉีดวัคซีน 2 เข็ม และ $i = 3$ แสดงว่าฉีดวัคซีน 3 เข็ม และเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ หากมีการติดเชื้อด้วยอัตราการแพร่เชื้อ โดยกลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อจะมีการออกจากระบบด้วยอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ต่อมากลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีนจะมีการเปลี่ยนสถานะได้ 1 สถานะดังนี้ เปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อด้วยอัตราการแพร่เชื้อโดยมีประสิทธิภาพวัคซีนมาช่วยป้องกันการติดเชื้อเพิ่มที่ i โดยกลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีนจะมีการออกจากระบบด้วยอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ มีการเปลี่ยนสถานะได้ 3 สถานะดังนี้ เปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อด้วยอัตราการหายจากการติดเชื้อ ต่อมาเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลด้วยอัตราการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลโดยมีประสิทธิภาพวัคซีนและสัดส่วนผู้ฉีดวัคซีนมาช่วยป้องกันความรุนแรง และเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อด้วยอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อโดยมีประสิทธิภาพวัคซีนและสัดส่วนผู้ฉีดวัคซีนมาช่วยป้องกันความรุนแรง โดยกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อจะมีการออกจากระบบด้วยอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลมีการเปลี่ยนสถานะได้ 3 สถานะดังนี้ เปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อด้วยอัตราการหายจากการติดเชื้อจากการรักษาในโรงพยาบาล ต่อมาเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU ด้วยอัตราการเข้ารับการรักษาในห้อง ICU โดยมีประสิทธิภาพวัคซีนและสัดส่วนผู้ฉีดวัคซีนมาช่วยป้องกันความรุนแรง และเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อด้วยอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลโดยมีประสิทธิภาพวัคซีนและสัดส่วนผู้ฉีดวัคซีนมาช่วยป้องกันความรุนแรง โดยกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลจะมีการออกจากระบบด้วยอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU จะมีการเปลี่ยนสถานะอยู่ 2 สถานะดังนี้ เปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตด้วยอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อในระหว่างที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU โดยมีประสิทธิภาพวัคซีนและสัดส่วนผู้ฉีดวัคซีนมาช่วยป้องกันความรุนแรง และเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากร

ที่พักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล ด้วยอัตราการพักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU โดยกลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU จะมีการออกจากระบบด้วยอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ กลุ่มประชากรที่พักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล จะเปลี่ยนสถานะไปยังกลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อด้วยอัตราการหายจากการติดเชื้อใน ขณะที่พักรักษาตัวที่โรงพยาบาล โดยกลุ่มประชากรที่พักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล จะมีการออกจากระบบด้วยอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ กลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อ จะมีการเพิ่มประชากรด้วยอัตราการหายจากการติดเชื้อจากกลุ่มประชากรติดเชื้อ กลุ่มประชากรติดเชื้อที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล และกลุ่มประชากรที่พักรักษาตัวจากการรักษาที่ห้อง ICU ในโรงพยาบาล โดยกลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อจะมีการออกจากระบบด้วย อัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ และกลุ่มสุดท้ายกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อมีการเพิ่มประชากรด้วยอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อ จากกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล และกลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU ซึ่งแสดงในรูปแบบของระบบสมการคณิตศาสตร์ เนื่องจากแบบจำลองนี้เราได้มีการจัดการระบบสมการให้อยู่ในรูปสัดส่วนแบบปกติโดยการนำประชากร (N) มาหารทั้งระบบสมการ ดังนี้

$$\frac{dS(t)}{dt} = \mu - \tau_i S(t) - \mu S(t) - \beta S(t)I(t) \quad (1)$$

$$\frac{dS_v(t)}{dt} = \tau_i S(t) - \mu S_v(t) - \beta(1 - m_i)S_v(t)I(t) \quad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) + \beta(1 - m_i)S_v(t)I(t) - (\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)I(t) \quad (3)$$

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \omega(1 - m_i v_i)I(t) - (\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)H_1(t) \quad (4)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha(1 - m_i v_i)H_1(t) - (\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)C(t) \quad (5)$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \delta C(t) - (\eta + \mu)H_2(t) \quad (6)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) + \sigma H_1(t) + \eta H_2(t) - \mu R(t) \quad (7)$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \lambda(1 - m_i v_i)I(t) + \pi(1 - m_i v_i)H_1(t) + \rho(1 - m_i v_i)C(t) \quad (8)$$

$$\text{ที่ } N(t) = S(t) + S_v(t) + I(t) + H_1(t) + I(t) + H_2(t) + R(t) + D(t) = 1$$

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแต่ละกลุ่มประชากรได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น ดังสมการที่ (1) – (8) สามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากตัวแบบ $SS_vIH_1CH_2RD$ เป็นระบบเปิด มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยสมการที่ (1) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $S(t)$

ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา μ และมีจำนวนประชากรที่ออกจากกลุ่ม S จากการเปลี่ยนกลุ่มไปยัง S_v ด้วยอัตรา τ_i เปลี่ยนกลุ่มไปยัง I ด้วยอัตรา β จากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกลุ่ม S และกลุ่ม I และสุดท้ายออกจากกลุ่ม S ด้วยอัตรา μ สมการที่ (2) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $S_v(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา τ_i และมีจำนวนประชากรที่ออกจากกลุ่ม S_v จากการเปลี่ยนกลุ่มไปยัง I ด้วยอัตรา β จากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกลุ่ม S_v และกลุ่ม I ซึ่งมีการป้องกันด้วยประสิทธิภาพฉีดวัคซีน $1 - m_i$ และจะมีการออกจากกลุ่ม S_v ด้วยอัตรา μ สมการที่ (3) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $I(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา β จากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกลุ่ม S, S_v และกลุ่ม I และมีจำนวนประชากรที่ออกจากกลุ่ม I จากการเปลี่ยนกลุ่มไปยัง R ด้วยอัตรา γ เปลี่ยนกลุ่มไปยัง H_1 ด้วยอัตรา ω ซึ่งมีการป้องกันด้วย $(1 - m_i v_i)$ และเปลี่ยนกลุ่มไปยัง D ด้วยอัตรา λ ซึ่งมีการป้องกันด้วย $(1 - m_i v_i)$ และจะมีการออกจากกลุ่ม I ด้วยอัตรา μ สมการที่ (4) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $H_1(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา ω จากกลุ่ม I และมีจำนวนประชากรที่ออกจากกลุ่ม H_1 จากการเปลี่ยนกลุ่มไปยัง R ด้วยอัตรา σ เปลี่ยนกลุ่มไปยัง C ด้วยอัตรา α ซึ่งมีการป้องกันด้วย $(1 - m_i v_i)$ และเปลี่ยนกลุ่มไปยัง D ด้วยอัตรา π ซึ่งมีการป้องกันด้วย $(1 - m_i v_i)$ และจะมีการออกจากกลุ่ม H_1 ด้วยอัตรา μ สมการที่ (5) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $C(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา α จากกลุ่ม H_1 และมีจำนวนประชากรที่ออกจากกลุ่ม C จากการเปลี่ยนกลุ่มไปยัง H_2 ด้วยอัตรา δ และเปลี่ยนกลุ่มไปยัง D ด้วยอัตรา ρ ซึ่งมีการป้องกันด้วย $(1 - m_i v_i)$ และจะมีการออกจากกลุ่ม C ด้วยอัตรา μ สมการที่ (6) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $H_2(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา δ จากกลุ่ม C และมีจำนวนประชากรที่ออกจากกลุ่ม H_2 จากการเปลี่ยนกลุ่มไปยัง R ด้วยอัตรา η และจะมีการออกจากกลุ่ม H_2 ด้วยอัตรา μ สมการที่ (7) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $R(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา γ จากกลุ่ม I อัตรา σ จากกลุ่ม H_1 และอัตรา η จากกลุ่ม H_2 ซึ่งจะมีการออกจากกลุ่ม R ด้วยอัตรา μ และสมการที่ (8) จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ $D(t)$ ต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีจำนวนประชากรเข้ากลุ่มด้วยอัตรา λ จากกลุ่ม I อัตรา π จากกลุ่ม H_1 และอัตรา ρ จากกลุ่ม C ซึ่งมีการป้องกันด้วย $(1 - m_i v_i)$ ซึ่งแสดงค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1

3.4 การตรวจสอบความไม่เป็นลบและขอบเขตของจำนวนประชากร (Positive of Solution and invariant region)

เนื่องจากจำนวนประชากรในแต่ละกลุ่มประชากรไม่ควรเป็นลบในทุกช่วงเวลา ดังนั้น การพิสูจน์ว่าประชากรของตัวแบบ $SS_vIH_1CH_2RD$ ไม่เป็นลบ จึงมีความจำเป็นสำหรับการนำแบบจำลองนี้ไปใช้จริง

ทฤษฎีบท 1 ถ้าค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง $S(0) > 0, S_v(0) > 0, I(0) > 0, H_1(0) > 0, C(0) > 0, H_2(0) > 0, R(0) > 0, D(0) > 0$ แล้ว $\{S(t), S_v(t), I(t), H_1(t), C(t), H_2(t), R(t), D(t)\} > 0$ สำหรับทุก $t \geq 0$ เมื่อกำหนดให้ $D = \{(S, S_v, I, H_1, C, H_2, R, R) \in \mathbb{R}_+^8 : S + S_v + I + H_1 + C + H_2 + R + D = N\}$

พิสูจน์

$$\text{ให้ } N = S + S_v + I + H_1 + C + H_2 + R + D$$

$$\text{แล้ว } \frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} + \frac{dS_v}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dH_1}{dt} + \frac{dC}{dt} + \frac{dH_2}{dt} + \frac{dR}{dt} + \frac{dD}{dt}$$

$$\text{และ } \frac{dN}{dt} = \mu - \mu N(t) = 0 \text{ โดย } N(t) = 1$$

แสดงให้เห็นว่าคำตอบของระบบสมการ (1) – (8) เข้าใกล้ D ดังนั้น D เป็นค่าคงตัวในทางบวก และคำตอบของระบบสมการ (1) – (8) มีขอบเขต จากทฤษฎีบท 1 จะเห็นได้ว่าคำตอบของระบบสมการ (1) – (8) ไม่เป็นลบและมีขอบเขต

3.5 การหาจุดสมดุล (Equilibrium Point)

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์หาจุดสมดุลซึ่งเป็นค่าคงที่ของทุกกลุ่มประชากร และจุดสมดุลไม่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยที่จุดสมดุลของระบบมี 2 จุด คือ

1. จุดสมดุลในสภาวะไร้โรค (Disease Free Equilibrium point, DFE) เป็นจุดสมดุลการแพร่ระบาดหายไปจากระบบ
2. จุดสมดุลในสภาวะการแพร่ระบาด (Endemic Equilibrium Point, EE) เป็นจุดสมดุลการแพร่ระบาดยังคงอยู่ในระบบ

การหาจุดสมดุลในสภาวะไร้โรคและจุดสมดุลในสภาวะการแพร่ระบาด พิจารณาแบบจำลองจากสมการ (1) – (8) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ (9) – (16) ดังนี้

$$0 = \mu - \tau_i S(t) - \mu S(t) - \beta S(t)I(t) \quad (9)$$

$$0 = \tau_i S(t) - \mu S_v(t) - \beta(1 - m_i)S_v(t)I(t) \quad (10)$$

$$0 = \beta S(t)I(t) + \beta(1 - m_i)S_v(t)I(t) - (\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)I(t) \quad (11)$$

$$0 = \omega(1 - m_i v_i)I(t) - (\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)H_1(t) \quad (12)$$

$$0 = \alpha(1 - m_i v_i)H_1(t) - (\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)C(t) \quad (13)$$

$$0 = \delta C(t) - (\eta + \mu)H_2(t) \quad (14)$$

$$0 = \gamma I(t) + \sigma H_1(t) + \eta H_2(t) - \mu R(t) \quad (15)$$

$$0 = \lambda(1 - m_i v_i)I(t) + \pi(1 - m_i v_i)H_1(t) + \rho(1 - m_i v_i)C(t) \quad (16)$$

คำตอบของระบบสมการ (9) - (16) คือจุดสมดุล ซึ่งมี 2 คำตอบ นั่นคือ

3.5.1. จุดสมดุลในสภาวะไร้โรค

$$E_{DFE} = (S_0^*, S_{v_0}^*, H_{1_0}^*, I_0^*, H_{2_0}^*, C_0^*, R_0^*, D_0^*) = \left(\frac{\mu}{\mu + \tau_i}, \frac{\tau_i}{\mu + \tau_i}, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \right)$$

โดยแทน $S_0(t) = S_0^*, S_{v_0}(t) = S_{v_0}^*, H_{1_0}(t) = 0, I_0(t) = 0, H_{2_0}(t) = 0, C_0(t) = 0,$

$$R_0(t) = 0, D_0(t) = 0 \text{ ในสมการ (10) - (17)}$$

$$0 = \mu - \tau_i S_0^* - \mu S_0^*$$

$$0 = \tau_i S_0^* - \mu S_{v_0}^*$$

$$\text{จะได้ผลเฉลย } S_0^*, S_{v_0}^* \text{ ดังนี้ } S_0^* = \frac{\mu}{\mu + \tau_i}, S_{v_0}^* = \frac{\tau_i}{\mu + \tau_i}$$

3.5.2. จุดสมดุลในสภาวะการแพร่ระบาด

$$E_{EE} = (S^*, S_v^*, I^*, H_1^*, C^*, H_2^*, R^*, D^*)$$

$$S^* = \frac{\mu}{\tau_i + \mu + \beta I^*}$$

$$S_v^* = \frac{\tau_i S^*}{\mu + \beta(1 - m_i)I^*}$$

$$I^* = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$H_1^* = \frac{\omega(1 - m_i v_i)I^*}{\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu}$$

$$C^* = \frac{\alpha\omega(1 - m_i v_i)^2 I^*}{(\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)(\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)}$$

$$H_2^* = \frac{\delta\alpha\omega(1 - m_i v_i)^2 I^*}{(\eta + \mu)(\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)(\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)}$$

$$R^* = \frac{\gamma I^*}{\mu} + \frac{\sigma\omega(1 - m_i v_i)I^*}{\mu(\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)}$$

$$+ \frac{\eta\delta\alpha\omega(1 - m_i v_i)^2 I^*}{\mu(\eta + \mu)(\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)(\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)}$$

$$D^*(t) = N(t) - (S(t) + S_v(t) + I(t) + H_1(t) + C(t) + H_2(t) + R(t))$$

โดย

$$A = \beta^2 K(1 - m_i)$$

$$B = -\beta^2 \mu(1 - m_i) + \beta \mu K + \beta K(1 - m_i)(\tau_i + \mu)$$

$$C = -\beta \mu^2 - \beta(1 - m_i)\tau_i \mu + \tau_i \mu K + \mu^2 K$$

$$K = \lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu$$

$$\text{และ } B^2 - 4AC > 0$$

พิสูจน์

พิจารณา จาก (9)

$$S^* = \frac{\mu}{\tau_i + \mu + \beta I^*} \quad (17)$$

จาก (10)

$$S_v(\mu + \beta(1 - m_i)I) = \tau_i S^* \quad (18)$$

$$S_v^* = \frac{\tau_i S^*}{\mu + \beta(1 - m_i)I^*}$$

นำ (17) และ (18) แทนใน (11)

$$0 = \frac{\beta\mu}{\tau_i + \mu + \beta I} + \frac{\beta(1 - m_i)\tau_i S^*}{\mu + \beta(1 - m_i)I} - (\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)$$

แทน

$$K = \lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu$$

$$0 = \frac{\beta\mu}{\tau_i + \mu + \beta I} + \frac{\beta(1 - m_i)\tau_i\mu}{(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)} - \frac{K(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)}{(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)}$$

$$= \frac{\beta\mu(\mu + \beta(1 - m_i)I)}{(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)} + \frac{\beta(1 - m_i)\tau_i\mu}{(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)} - \frac{K(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)}{(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I)}$$

$$0 = \beta\mu^2 + \beta^2\mu(1 - m_i)I + \beta(1 - m_i)\tau_i\mu - \tau_i\mu K - \mu^2 K - \beta I\mu - \beta K(1 - m_i)I\tau_i - \beta K(1 - m_i)I\mu - \beta^2 K(1 - m_i)I^2$$

เงื่อนไข $(\mu + \beta(1 - m_i)I)(\tau_i + \mu + \beta I) > 0$

จัดรูปให้อยู่ในรูป I

$$0 = \beta^2 K(1 - m_i)I^2 + (-\beta^2\mu(1 - m_i) + \beta\mu K + \beta K(1 - m_i)\tau_i + \beta K(1 - m_i)\mu)I - \beta\mu^2 - \beta(1 - m_i)\tau_i\mu + \tau_i\mu K + \mu^2 K$$

$$A = \beta^2 K(1 - m_i)$$

$$B = -\beta^2\mu(1 - m_i) + \beta\mu K + \beta K(1 - m_i)\tau_i + \beta K(1 - m_i)\mu$$

$$C = -\beta\mu^2 - \beta(1 - m_i)\tau_i\mu + \tau_i\mu K + \mu^2 K$$

แก้สมการกำลังสอง จากสูตร

$$I = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; B^2 - 4AC > 0$$

โดยพิจารณา $B^2 - 4AC$

$$B^2 - 4AC = (-\beta^2\mu(1 - m_i) + \beta\mu K + \beta K(1 - m_i)\tau_i + \beta K(1 - m_i)\mu)^2 - 4(\beta^2 K(1 - m_i))(-\beta\mu^2 - \beta(1 - m_i)\tau_i\mu + \tau_i\mu K + \mu^2 K)$$

$$= (\beta(-\beta\mu(1 - m_i) + K(1 - m_i)\mu + \mu K + K(1 - m_i)\tau_i))^2 + 4\mu(\beta^2 K(1 - m_i))((\beta - K)\mu + (\beta(1 - m_i) - K)\tau_i)$$

จะได้ $B^2 - 4AC > 0$ เมื่อ $\beta > K$ และ $\beta(1 - m_i) > K$

$$I^* = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (19)$$

จาก (12)

$$(\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)H_1^* = \omega(1 - m_i v_i)I^*$$

$$H_1^* = \frac{\omega(1 - m_i v_i)I^*}{(\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)} \quad (20)$$

จาก (13)

$$(\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)C^*(t) = \alpha(1 - m_i v_i)H_1^*(t)$$

$$C^*(t) = \frac{\alpha(1 - m_i v_i)H_1^*(t)}{(\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)} \quad (21)$$

จาก (14)

$$(\eta + \mu)H_2^* = \delta C^*$$

$$H_2^* = \frac{\delta C^*}{(\eta + \mu)} \quad (22)$$

จาก (15)

$$\mu R = \gamma I + \sigma H_1 + \eta H_2$$

$$R^* = \frac{\gamma I^* + \sigma H_1^* + \eta H_2^*}{\mu} \quad (23)$$

3.6 การหาค่าระดับการติดเชื้อ (Basic Reproduction Number)

เราทำการพิจารณาเฉพาะกลุ่มติดเชื้อ ดังนี้

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) + \beta(1 - m_i)S_v(t)I(t) - (\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)I(t)$$

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \omega(1 - m_i v_i)I(t) - (\pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)H_1(t)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha(1 - m_i v_i)H_1(t) - (\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)C(t)$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \delta C(t) - (\eta + \mu)H_2(t)$$

ตามหลักของ Next Generation Matrix นำระบบสมการข้างต้น มาจัดให้อยู่ในรูป $\frac{dx}{dt} = f(x) - v(x)$ โดย f คือ เมทริกซ์ของกลุ่มประชากรผู้ป่วยที่ติดเชื้อใหม่ และ v คือ เมทริกซ์ของกลุ่มประชากรผู้ป่วยที่เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปอีกกลุ่มหนึ่ง (Van den Driessche & Watmough, 2002) จะได้ว่า

$$x = \begin{bmatrix} I \\ H_1 \\ C \\ H_2 \end{bmatrix}, f(x) = \begin{bmatrix} \beta SI + \beta(1 - m_i)S_v I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, v(x) = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

โดย

$$\begin{aligned} a_1 &= (\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)I \\ a_2 &= -\omega(1 - m_i v_i)I + ((1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu)H_1 \\ a_3 &= -\alpha(1 - m_i v_i)H_1 + (\rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu)C \\ a_4 &= -\delta C(t) + (\eta + \mu)H_2(t) \end{aligned}$$

เราทำการหาเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) ของ f และ v ซึ่งจะได้

$$F = \begin{bmatrix} \beta S + \beta(1 - m_i)S_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} X_1 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & X_3 & 0 & 0 \\ 0 & X_4 & X_5 & 0 \\ 0 & 0 & X_6 & X_7 \end{bmatrix}$$

โดย

$$\begin{aligned} X_1 &= \lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu \\ X_2 &= -\omega(1 - m_i v_i) \\ X_3 &= \pi(1 - m_i v_i) + \alpha(1 - m_i v_i) + \sigma + \mu \\ X_4 &= -\alpha(1 - m_i v_i) \\ X_5 &= \rho(1 - m_i v_i) + \delta + \mu \\ X_6 &= -\delta \\ X_7 &= \eta + \mu \end{aligned}$$

ทำให้ได้ว่า

$$V^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{X_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{X_2}{X_1 X_3} & \frac{1}{X_3} & 0 & 0 \\ \frac{X_4 X_2}{X_1 X_3 X_5} & -\frac{X_4}{X_3 X_5} & \frac{1}{X_5} & 0 \\ -\frac{X_2 X_4 X_6}{X_1 X_3 X_5 X_7} & \frac{X_4 X_6}{X_3 X_5 X_7} & -\frac{X_6}{X_5 X_7} & \frac{1}{X_7} \end{bmatrix}$$

และเราสามารถหาค่าลักษณะเฉพาะของ FV^{-1} โดยที่ค่าลักษณะเฉพาะ FV^{-1} คือ ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน
จะได้ว่า

$$FV^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\beta S + \beta(1 - m_i)S_v}{X_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ค่าลักษณะเฉพาะของ FV^{-1} คือ

$$\sigma_1 = \frac{\beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^*}{\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu}, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0, \sigma_4 = 0$$

เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} R_0 &= \rho(FV^{-1}) = \max\{|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|, |\sigma_4|\} \\ &= \frac{\beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^*}{\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu} \end{aligned}$$

$$= \frac{\beta\mu + \tau_i\beta(1 - m_i)}{(\lambda(1 - m_i v_i) + \omega(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)(\mu + \tau_i)}$$

3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis)

ทำการพิจารณาทั้งสองจุดสมดุล ดังนี้

3.7.1 เสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค (Local stable of Disease Free Equilibrium, E_{DFE})

ทฤษฎีบท 2 จุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค (Disease Free Equilibrium point, E_{DFE}) จะมีความเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 < 1$ และจะไม่มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 > 1$

พิสูจน์ การวิเคราะห์จุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค (E_{DFE}) เราทำการพิจารณาสมการ (1) – (8) พิจารณาเมทริกซ์จาโคเบียน ดังนี้

$$J_{E_{DFE}} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & A_3 & A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_7 & A_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{10} & A_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{13} & A_{14} & 0 \\ 0 & 0 & A_8 & A_{11} & 0 & A_{15} & A_{16} \end{bmatrix}$$

โดย

$$A_1 = -\mu - \tau_i$$

$$A_2 = \tau_i$$

$$A_3 = -\mu$$

$$A_4 = -\beta S_0^*$$

$$A_5 = -\beta(1 - m_i)S_{v_0}^*$$

$$A_6 = \beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^* - \omega(1 - m_i v_i) - \lambda(1 - m_i v_i) - \gamma - \mu$$

$$A_7 = \omega(1 - m_i v_i)$$

$$A_8 = \gamma$$

$$A_9 = -\alpha(1 - m_i v_i) - \pi(1 - m_i v_i) - \mu - \sigma$$

$$A_{10} = \alpha(1 - m_i v_i)$$

$$A_{11} = \sigma$$

$$A_{12} = -\rho(1 - m_i v_i) - \delta - \mu$$

$$A_{13} = \delta$$

$$A_{14} = -\eta - \mu$$

$$A_{15} = \eta$$

$$A_{16} = -\mu$$

เราทำการพิจารณาค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์จาโคเบียน จาก $\det(J_{E_{DFE}} - \lambda I_7) = 0$

$$J_{DFE} = \begin{bmatrix} A_1 - \lambda_1 & 0 & A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & A_3 - \lambda_2 & A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_6 - \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_7 & A_9 - \lambda_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{10} & A_{12} - \lambda_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{13} & A_{14} - \lambda_6 & 0 \\ 0 & 0 & A_8 & A_{11} & 0 & A_{15} & A_{16} - \lambda_7 \end{bmatrix}$$

เราจะได้

$$0 = \det(J_{DFE} - \lambda I_7) = (A_1 - \lambda_1)(A_2 - \lambda_2)(A_3 - \lambda_3)(A_9 - \lambda_4)(A_{12} - \lambda_5)(A_{14} - \lambda_6)(A_{16} - \lambda_7)$$

$$0 = \det(J_{DFE} - \lambda I_7) = (-\mu - \tau_i - \lambda_1)(-\mu - \lambda_2)(-\eta - \mu - \lambda_6)(-\mu - \lambda_7) \\ (\beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^* - \omega(1 - m_i v_i) - \lambda(1 - m_i v_i) - \gamma - \mu \\ - \lambda_3)(-\alpha(1 - m_i v_i) - \pi(1 - m_i v_i) - \mu - \sigma \\ - \lambda_4)(-\rho(1 - m_i v_i) - \delta - \mu - \lambda_5)$$

เราทำการพิจารณาผลเฉลยของสมการ ดังนี้

$$\lambda_1 = -\mu - \tau_i < 0$$

$$\lambda_2 = -\mu < 0$$

$$\lambda_4 = -\alpha(1 - m_i v_i) - \pi(1 - m_i v_i) - \mu - \sigma < 0$$

$$\lambda_5 = -\rho(1 - m_i v_i) - \delta - \mu < 0$$

$$\lambda_6 = -\eta - \mu < 0$$

$$\lambda_7 = -\mu < 0$$

$$\text{ส่วน } \lambda_3 = \beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^* - \omega(1 - m_i v_i) - \lambda(1 - m_i v_i) - \gamma - \mu$$

พิจารณา ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค

$$E_{DFE} = (S_0^*, S_{v_0}^*, H_{1_0}^*, I_0^*, H_{2_0}^*, C_0^*, R_0^*) = \left(\frac{\tau_i}{\mu + \tau_i}, \frac{\mu}{\mu + \tau_i}, 0, 0, 0, 0, 0 \right)$$

ทำการพิจารณา λ_3 ว่ามีค่าน้อยกว่า 0 หรือไม่

$$\lambda_3 = \beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^* - (\omega(1 - m_i v_i) + \lambda(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)$$

$$\lambda_3 = \frac{\beta S_0^* + \beta(1 - m_i)S_{v_0}^*}{(\omega(1 - m_i v_i) + \lambda(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu)} - 1 = R_0 - 1 < 0 \text{ เมื่อ } R_0 < 1$$

ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่า $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ และ λ_7 ไม่มีค่าลักษณะเฉพาะที่เป็นจำนวนจริงบวกหรือจำนวนเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงเป็นบวก จากทฤษฎีจุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค (Phat, 2001) จึงสรุปได้ว่า ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะไร้โรค (E_{DFE}) ของระบบสมการ $SS_v IH_1 CH_2 RD$ มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 < 1$

3.7.2 เสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะการแพร่ระบาด

(Local stable of Endemic Equilibrium, E_{DFE})

ทฤษฎีบท 3 จุดสมดุลในสภาวะการแพร่ระบาด (Endemic Equilibrium Point, EE) จะมีความเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 > 1$ และจะไม่มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 < 1$

พิสูจน์

จากสมการ (1)–(8) พิจารณาเมทริกซ์จาโคเบียน ดังนี้

$$J_{EEE} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & B_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_2 & B_4 & B_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_3 & B_5 & B_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_9 & B_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{12} & B_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{15} & B_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{10} & B_{13} & 0 & B_{17} & B_{18} & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$B_1 = -I^*\beta - \mu - \tau_i$$

$$B_2 = \tau_i$$

$$B_3 = \beta I^*$$

$$B_4 = -\mu - \beta(1 - m_i)I^*$$

$$B_5 = \beta(1 - m_i)I^*$$

$$B_6 = -\beta S^*$$

$$B_7 = -\beta(1 - m_i)S_v^*$$

$$B_8 = \beta S^* + \beta(1 - m_i)S_v^* - \omega(1 - m_i v_i) - \lambda(1 - m_i v_i) - \gamma - \mu$$

$$B_9 = \omega(1 - m_i v_i)$$

$$B_{10} = \gamma$$

$$B_{11} = -\alpha(1 - m_i v_i) - \pi(1 - m_i v_i) - \mu - \sigma$$

$$B_{12} = \alpha(1 - m_i v_i)$$

$$B_{13} = \sigma$$

$$B_{14} = -\rho(1 - m_i v_i) - \delta - \mu$$

$$B_{15} = \delta$$

$$B_{16} = -\eta - \mu$$

$$B_{17} = \eta$$

$$B_{18} = -\mu$$

พิจารณาลักษณะเฉพาะจาก $\det(J_{EE} - \lambda I_7) = 0$

$$\det(J_{EEE} - \lambda I_7) = \begin{bmatrix} B_1 - \lambda_1 & 0 & B_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_2 & B_4 - \lambda_2 & B_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_3 & B_5 & B_8 - \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_9 & B_{11} - \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{12} & B_{14} - \lambda_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{15} & B_{16} - \lambda_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{10} & B_{13} & 0 & B_{17} & B_{18} - \lambda_7 \end{bmatrix}$$

จะได้ $0 = \det(J_{EEE} - \lambda I_7) = (-\alpha(1 - m_i v_i) - \pi(1 - m_i v_i) - \mu - \sigma - \lambda_4)$

$$(-\rho(1 - m_i v_i) - \delta - \mu - \lambda_5)(-\eta - \mu - \lambda_6)(-\mu - \lambda_7)(-1)(\lambda^3 + Z_1 \lambda^2 + Z_2 \lambda + Z_3)$$

ค่าลักษณะเฉพาะ คือ

$$\lambda_4 = -\alpha(1 - m_i v_i) - \pi(1 - m_i v_i) - \mu - \sigma < 0$$

$$\lambda_5 = -\rho(1 - m_i v_i) - \delta - \mu < 0$$

$$\lambda_6 = -\eta - \mu < 0$$

$$\lambda_7 = -\mu < 0$$

จาก $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ ซึ่งต่างมีค่าน้อยกว่า 0 และค่ารากของพหุนาม $\lambda^3 + Z_1 \lambda^2 + Z_2 \lambda + Z_3$

ที่สามารถหาได้จากเกณฑ์ความมั่นคง (Routh-Hurwitz) จะได้ว่าไม่มีรากส่วนจริงเป็นบวก

จาก $(-1)(\lambda^3 + Z_1 \lambda^2 + Z_2 \lambda + Z_3)$ จะได้

$$\begin{aligned} (-1)(\lambda^3 + Z_1 \lambda^2 + Z_2 \lambda + Z_3) &= (-1)(\lambda^3 + (-B_1 - B_4 - B_8)\lambda^2 \\ &\quad + (B_1 B_4 + B_1 B_8 - B_3 B_6 + B_4 B_8 - B_5 B_7)\lambda - B_1 B_4 B_8 \\ &\quad + B_1 B_5 B_7 - B_2 B_6 B_5 + B_3 B_6 B_4) \end{aligned}$$

$$Z_1 = -B_1 - B_4 - B_8$$

$$Z_2 = B_1 B_4 + B_1 B_8 - B_3 B_6 + B_4 B_8 - B_5 B_7$$

$$Z_3 = B_1 B_5 B_7 + B_3 B_6 B_4 - B_1 B_4 B_8 - B_2 B_6 B_5$$

โดย

$$B_1 = -I^* \beta - \mu - \tau_i$$

$$B_2 = \tau_i$$

$$B_3 = \beta I^*$$

$$B_4 = -\mu - \beta(1 - m_i)I^*$$

$$B_5 = \beta(1 - m_i)I^*$$

$$B_6 = -\beta S^*$$

$$B_7 = -\beta(1 - m_i)S_v^*$$

$$B_8 = \beta S^* + \beta(1 - m_i)S_v^* - \omega(1 - m_i v_i) - \lambda(1 - m_i v_i) - \gamma - \mu$$

จากเกณฑ์ความมั่นคง (Routh-Hurwitz) ให้พหุนาม

$$P(\lambda) = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ a_i เป็นจริงและไม่เป็นศูนย์ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ โดยเกณฑ์ความ

มั่นคง (Routh-Hurwitz) จะมีเกณฑ์สำหรับ $n = 3$ คือ $n = 3; a_1 > 0, a_3 > 0$ และ

$$a_1 a_2 > a_3$$

จากเงื่อนไข $n = 3$ ต้องพิจารณาตามเกณฑ์ $Z_1 > 0, Z_3 > 0$ และ $Z_1 Z_2 > Z_3$

พิจารณา $Z_1 > 0$

$$Z_1 = -B_1 - B_4 - B_8$$

$$\begin{aligned} Z_1 = -(-I^* \beta - \mu - \tau_i) - (-\mu - \beta(1 - m_i)I^*) - (\beta S^* + \beta(1 - m_i)S_v^* \\ - \omega(1 - m_i v_i) - \lambda(1 - m_i v_i) - \gamma - \mu) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1 = I^* \beta + \mu + \tau_i + \mu + \beta(1 - m_i)I^* - \beta S^* - \beta(1 - m_i)S_v^* + \omega(1 - m_i v_i) \\ + \lambda(1 - m_i v_i) + \gamma + \mu \end{aligned}$$

พิจารณา $I^* \beta - \beta S^* = \beta(I^* - S^*)$

$$\beta(1 - m_i)I^* - \beta(1 - m_i)S_v^* = \beta(1 - m_i)(I^* - S_v^*)$$

ดังนั้น $Z_1 > 0$ โดยมีเงื่อนไข $I^* > S^*, S_v^*$

พิจารณา $Z_3 > 0$

จะได้ว่า $B_3B_6B_4 - B_2B_6B_5 > 0$

และพิจารณา $B_1B_5B_7 - B_1B_4B_8 > 0$

$$\begin{aligned} Z_3 &= B_1B_5B_7 - B_1B_4B_8 = B_1(B_5B_7 - B_4B_8) \\ B_5B_7 - B_4B_8 &= -\beta(1-m_i)I^*(\beta(1-m_i)S_v^*) + (\mu + \beta(1-m_i)I^*)(\beta S^* \\ &\quad + \beta(1-m_i)S_v^* - \omega(1-m_iv_i) - \lambda(1-m_iv_i) - \gamma - \mu) \\ B_5B_7 - B_4B_8 &= -\beta^2(1-m_i)^2I^*S_v^* + \mu\beta S^* + \mu\beta(1-m_i)S_v^* - \mu\omega(1-m_iv_i) \\ &\quad - \mu\lambda(1-m_iv_i) - \mu\gamma - \mu^2 + \beta^2(1-m_i)I^*S^* \\ &\quad + \beta^2(1-m_i)^2I^*S_v^* - \beta(1-m_i)I^*\omega(1-m_iv_i) \\ &\quad - \beta(1-m_i)I^*\lambda(1-m_iv_i) - \beta(1-m_i)I^*\gamma - \beta(1-m_i)I^*\mu \\ B_5B_7 - B_4B_8 &= \mu\beta S^* + \mu\beta(1-m_i)S_v^* - \mu\omega(1-m_iv_i) - \mu\lambda(1-m_iv_i) - \mu\gamma \\ &\quad - \mu^2 + \beta^2(1-m_i)I^*S^* - \beta(1-m_i)I^*\omega(1-m_iv_i) \\ &\quad - \beta(1-m_i)I^*\lambda(1-m_iv_i) - \beta(1-m_i)I^*\gamma - \beta(1-m_i)I^*\mu \end{aligned}$$

จาก $B_5B_7 - B_4B_8$

เราพิจารณา $\mu(\beta(1-m_i)S_v^* - \omega(1-m_iv_i) - \lambda(1-m_iv_i) - \gamma - \mu)$

เราจะได้ว่า $\beta(1-m_i)S_v^* - \omega(1-m_iv_i) - \lambda(1-m_iv_i) - \gamma - \mu > 0$

ซึ่งเราจะได้เงื่อนไข $S_v^* > \frac{(\omega+\lambda)(1-m_iv_i)+\gamma+\mu}{\beta(1-m_i)}$

และเราพิจารณา $\beta(1-m_i)I^*(\beta S^* - \omega(1-m_iv_i) - \lambda(1-m_iv_i) - \gamma - \mu)$

เราจะได้ว่า $\beta S^* - \omega(1-m_iv_i) - \lambda(1-m_iv_i) - \gamma - \mu > 0$

ซึ่งเราจะได้เงื่อนไข $S^* > \frac{(\omega+\lambda)(1-m_iv_i)+\gamma+\mu}{\beta}$

ดังนั้น $Z_3 > 0$ เมื่อ $S_v^* > \frac{(\omega+\lambda)(1-m_iv_i)+\gamma+\mu}{\beta(1-m_i)}$ และ $S^* > \frac{(\omega+\lambda)(1-m_iv_i)+\gamma+\mu}{\beta}$

พิจารณา $Z_1Z_2 > Z_3$

$$\begin{aligned} Z_1 &= -B_1 - B_4 - B_8 \\ Z_2 &= B_1B_4 + B_1B_8 - B_3B_6 + B_4B_8 - B_5B_7 \\ Z_3 &= B_1B_5B_7 + B_3B_6B_4 - B_1B_4B_8 - B_2B_6B_5 \end{aligned}$$

จาก $Z_1Z_2 > Z_3$ จะได้

$$\begin{aligned} (B_1+B_4+B_8)(B_3B_6+B_5B_7-B_1B_4-B_1B_8-B_4B_8) \\ > B_1B_5B_7+B_3B_6B_4-B_1B_4B_8-B_2B_6B_5 \end{aligned}$$

จัดรูป

$$\begin{aligned} (B_1B_3B_6+B_1B_5B_7-B_1B_1B_4-B_1B_1B_8-B_1B_4B_8)(B_3B_4B_6+B_4B_5B_7 \\ -B_1B_4B_4-B_1B_4B_8-B_4B_4B_8)(B_3B_6B_8+B_5B_7B_8-B_1B_4B_8 \\ -B_1B_8B_8-B_4B_8B_8) \end{aligned}$$

จัดรูป

$$\begin{aligned} B_1B_3B_6+B_1B_5B_7-B_1B_1B_4-B_1B_1B_8-B_1B_4B_8+B_3B_4B_6+B_4B_5B_7 \\ -B_1B_4B_4-B_1B_4B_8-B_4B_4B_8+B_3B_6B_8+B_5B_7B_8-B_1B_4B_8 \\ -B_1B_8B_8-B_4B_8B_8 > B_1B_5B_7+B_3B_6B_4-B_1B_4B_8-B_2B_6B_5 \end{aligned}$$

จัดรูป

$$\begin{aligned} & B_1B_3B_6 + B_1B_5B_7 - B_1B_1B_4 - B_1B_1B_8 - B_1B_4B_8 + B_3B_4B_6 + B_4B_5B_7 \\ & - B_1B_4B_4 - B_1B_4B_8 - B_4B_4B_8 + B_3B_6B_8 + B_5B_7B_8 - B_1B_4B_8 \\ & - B_1B_8B_8 - B_4B_8B_8 - B_1B_5B_7 - B_3B_4B_6 + B_1B_4B_8 + B_2B_5B_6 \\ & > 0 \end{aligned}$$

จัดรูป

$$\begin{aligned} & B_1B_3B_6 + B_1B_5B_7 - B_1B_1B_4 - B_1B_1B_8 - B_1B_4B_8 + B_3B_4B_6 + B_4B_5B_7 \\ & - B_1B_4B_4 - B_1B_4B_8 - B_4B_4B_8 + B_3B_6B_8 + B_5B_7B_8 - B_1B_4B_8 \\ & - B_1B_8B_8 - B_4B_8B_8 - B_1B_5B_7 - B_3B_4B_6 + B_1B_4B_8 + B_2B_5B_6 \\ & > 0 \end{aligned}$$

จัดรูป

$$\begin{aligned} & B_1B_3B_6 - B_1B_1B_4 - B_1B_1B_8 + B_4B_5B_7 - B_1B_4B_4 - B_1B_4B_8 - B_4B_4B_8 \\ & + B_3B_6B_8 + B_5B_7B_8 - B_1B_4B_8 - B_1B_8B_8 - B_4B_8B_8 + B_2B_5B_6 \\ & > 0 \end{aligned}$$

แยกพิจารณา

$$-B_1B_4B_4 - B_4B_4B_8 = B_4B_4(-B_1 - B_8) > 0$$

$$-B_1B_1B_4 - B_1B_4B_8 = B_1B_4(-B_1 - B_8) > 0$$

$$-B_1B_1B_8 - B_1B_4B_8 = B_1B_8(-B_1 - B_8) > 0$$

$$-B_1B_8B_8 - B_4B_8B_8 = B_8B_8(-B_1 - B_8) > 0$$

$$B_5B_7B_8 + B_4B_5B_7 = B_5B_7(B_1 + B_8) > 0$$

$$\text{เงื่อนไข } I^* > S^* + (1 - m_i)S_v^*$$

$$\text{และ } B_1B_3B_6 + B_3B_6B_8 + B_2B_5B_6 = B_6(B_1B_3 + B_3B_8 + B_2B_5)$$

$$\begin{aligned} & B_6(B_1B_3 + B_3B_8 + B_2B_5) \\ & = (-\beta S^*)((-I^*\beta - \mu - \tau_i)(\beta I^*) + (\beta I^*)(B_8) \\ & + (\beta(1 - m_i)I^*)(-\beta S^*)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & B_6(B_1B_3 + B_3B_8 + B_2B_5) \\ & = (\beta S^*)((I^*\beta + \mu + \tau_i)(\beta I^*) - (\beta I^*)(B_8) \\ & + (\beta(1 - m_i)I^*)(\beta S^*)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (I^*\beta + \mu + \tau_i)(\beta I^*) - (\beta I^*)(B_8) + (\beta(1 - m_i)I^*)(\beta S^*) \\ & = I^{*2}\beta^2 + \mu\beta I^* + \tau_i\beta I^* + \beta^2(1 - m_i)I^*S^* - \beta^2 I^*S^* \\ & - \beta^2 I^*(1 - m_i)S_v^* + \beta I^*\omega(1 - m_i v_i) + \beta I^*\lambda(1 - m_i v_i) \\ & + \beta I^*\gamma + \beta I^*\mu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (I^*\beta + \mu + \tau_i)(\beta I^*) - (\beta I^*)(B_8) + (\beta(1 - m_i)I^*)(\beta S^*) \\ & = I^{*2}\beta^2 + \mu\beta I^* + \tau_i\beta I^* + \beta^2(1 - m_i)I^*S^* - \beta^2 I^*S^* \\ & - \beta^2 I^*(1 - m_i)S_v^* + \beta I^*\omega(1 - m_i v_i) + \beta I^*\lambda(1 - m_i v_i) \\ & + \beta I^*\gamma + \beta I^*\mu \end{aligned}$$

$$\text{เงื่อนไข } I^* > S^*, S_v^*$$

$$\text{ดังนั้น } Z_1 Z_2 > Z_3 \text{ เมื่อ } I^* > S^* + (1 - m_i)S_v^* \text{ และ } I^* > S^*, S_v^*$$

$$\text{พบว่าค่าของ } Z_1 > 0, Z_3 > 0 \text{ และ } Z_1 Z_2 > Z_3$$

$$\text{โดยมีเงื่อนไข } I^* > \min(S^*, S_v^*), I^* > S^* + (1 - m_i)S_v^*,$$

$$S_v^* \text{ และ } S^* > \min \left(\frac{(\omega+\lambda)(1-m_i v_i)+\gamma+\mu}{\beta(1-m_i)}, \frac{(\omega+\lambda)(1-m_i v_i)+\gamma+\mu}{\beta} \right)$$

จากเงื่อนไขข้างต้นค่าลักษณะเฉพาะทุกตัวของ J_{EE} มีส่วนจริงเป็นลบ ดังนั้น ณ จุดสมดุลภายใต้สภาวะการแพร่ระบาดจะมีความเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับเฉพาะที่ เมื่อ $R_0 > 1$

3.8 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis)

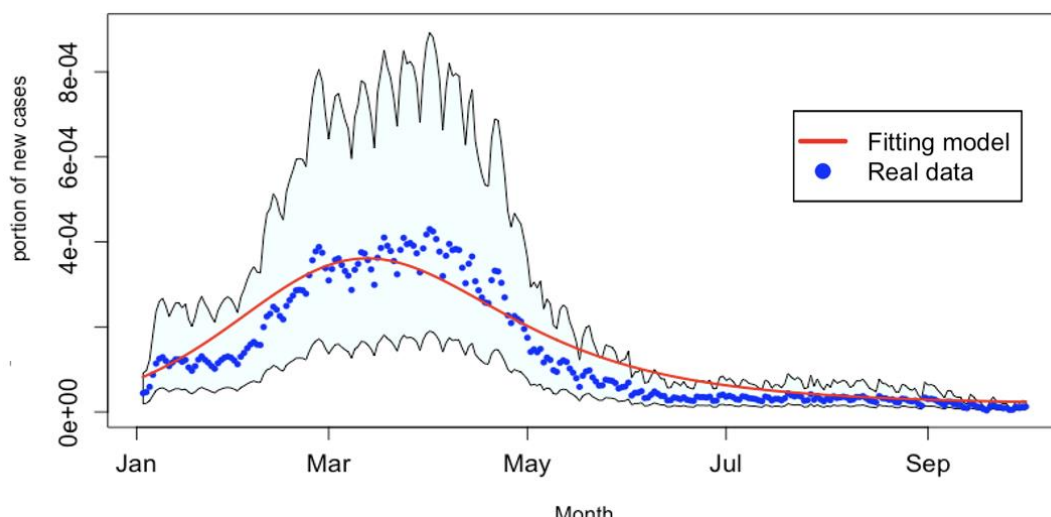
ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลเฉลยเชิงตัวเลขของการผู้ติดเชื้อที่คิดวัคซีนครบ 3 เข็ม สำหรับแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ จะใช้ค่าของตัวแปรและค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลจริงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างผลของการจำลองกับข้อมูลผู้ติดเชื้อรายวัน ตั้งแต่ 3 มกราคม ถึง 1 ตุลาคม 2022 จำนวน 272 วัน ซึ่งอัตราการเกิดและอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดและเสียชีวิตโดยธรรมชาติของปี 2021 ต่อจำนวนประชากรทั้งหมด รวมทั้งค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ จากรายงานสถานการณ์ประจำวัน โรคโควิด-19 ของสำนักงานสถิติแห่งชาติ (National Statistical Office, 2021) กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข (SAT-MOPH, 2022) โดยประชากรทั้งระบบสมการเท่ากับ 66 ล้านคน เปรียบเป็นสัดส่วนเท่ากับ 1 โดยใช้วิธี Nelder-Mead ในคำสั่ง OPTIM ด้วยโปรแกรม R Studio ในการจำลองข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับข้อมูลจริง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้แบบจำลองมีค่าเข้าใกล้ข้อมูลจริงมากที่สุด ในที่นี้ผู้วิจัยทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ β และ λ ที่เหมาะสมโดยมีประชากรเริ่มต้นและพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2 และ 3

ตาราง 2 ค่าตัวแปรเริ่มต้นของแต่ละกลุ่มประชากร

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	แหล่งที่มา
กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อ (S)	58,511,326 (คน)	กรมควบคุมโรค กระทรวง สาธารณสุข (SAT-MOPH, 2022)
กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v)	7,466,139 (คน)	
กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ (อาการไม่รุนแรง) (I)	2,927 (คน)	
กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง) (H_1)	15,945 (คน)	
กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU (อาการวิกฤต) (C)	704 (คน)	
กลุ่มประชากรที่พักรักษาจากการรักษาในห้อง ICU ในโรงพยาบาล (H_2)	38 (คน)	
กลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อ (R)	2,903 (คน)	
กลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อ (D)	18 (คน)	

ตาราง 3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสมการ

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	แหล่งที่มาของข้อมูล
μ	0.008 $((544570+563650)/2)/66000000$	สำนักงานสถิติแห่งชาติ (National Statistical Office, 2021)
σ	1/14 (คน/วัน)	กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข (Department of Disease Control, 2021)
η	1/10 (คน/วัน)	
γ	1/10 (คน/วัน)	
δ	1/10 (คน/วัน)	
ω	1/7 (คน/วัน)	
π	1/10 (คน/วัน)	
ρ	1/10 (คน/วัน)	
α	1/10 (คน/วัน)	



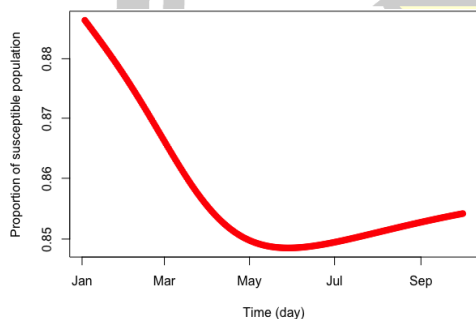
รูปที่ 6 ผลของแบบจำลอง fit เทียบกับข้อมูลจำนวนผู้ติดเชื้อโรคโควิด-19 (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของแบบจำลอง $SS_IH_1CH_2RD$ เราทำการวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ β และ λ จากข้อมูลการฉีดวัคซีนครบ 3 เข็ม ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ β และ λ ในตารางที่ 4 โดยการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่ทำให้แบบจำลองมีค่าเข้าใกล้ข้อมูลจริงมากที่สุด

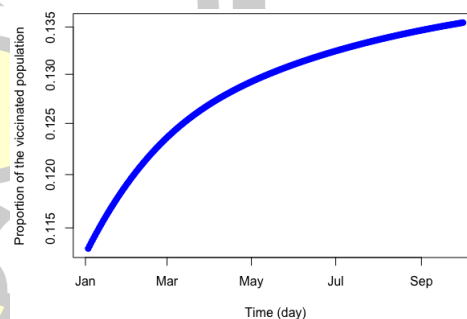
ตาราง 4 ค่าพารามิเตอร์เข็มที่ 3

พารามิเตอร์	เข็มที่3	หน่วย
τ_3	0.0012	ต่อวัน
m_3	87 %	เปอร์เซ็นต์
v_3	7,466,139/66,000,000	-
β	2.061	คน/วัน
λ	1.753	คน/วัน

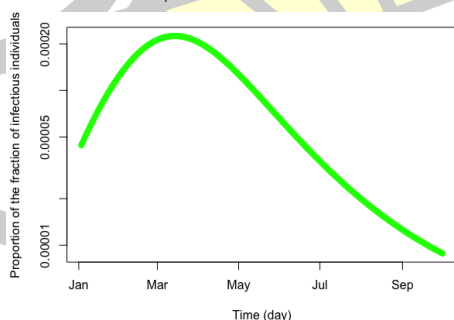
จากตารางที่ 4 เราจะได้ค่าอัตราการแพร่เชื้อ (β) เท่ากับ 2.061 หมายความว่าโอกาสของผู้ติดเชื้อ 1 คนสามารถแพร่เชื้อออกไปได้สำเร็จ 2 คนต่อวัน และค่าอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อ หมายความว่าอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อ ที่เกิดจากจำนวนผู้ป่วยที่เสียชีวิตด้วยโรคโควิด-19 ในจำนวนผู้ป่วยโควิด-19 ทั้งหมด ในช่วงระยะเวลาหนึ่งวัน ซึ่งค่าอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อ (λ) เท่ากับ 1.753 และจากการวิเคราะห์แบบจำลองสามารถแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนประชากรของประชากรแต่ละกลุ่มที่ฉีดวัคซีนครบ 3 เข็ม จะสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6(a) ถึงรูปที่ 6(h)



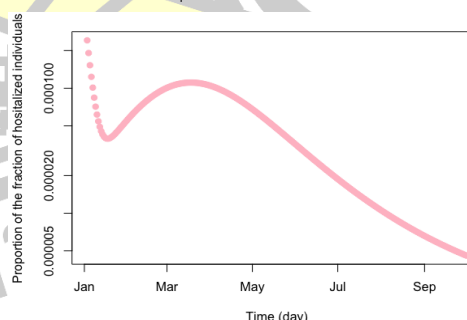
(a) กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อ



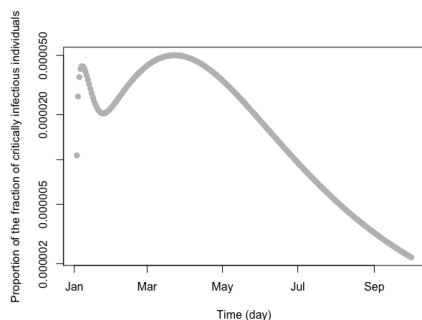
(b) กลุ่มประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน



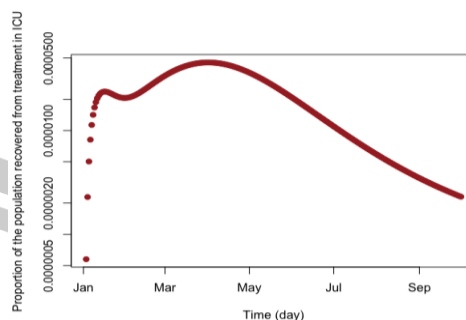
(c) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อ (อาการไม่รุนแรง)



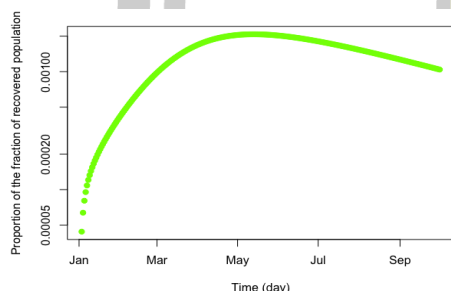
(d) กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง)



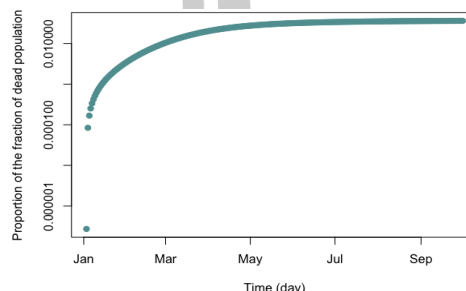
(e) กลุ่มประชากรที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU (อาการวิกฤต)



(f) กลุ่มประชากรที่พักรักษาตัวจากอาการวิกฤตในห้อง ICU ในโรงพยาบาล



(g) กลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อ



(h) กลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อ

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนประชากรของประชากรแต่ละกลุ่มจากแบบจำลอง

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่ากลุ่มประชากรที่เสี่ยงที่ฉีดวัคซีนครบ 3 เข็มจะมีผลต่อแต่ละกลุ่มประชากรดังนี้ รูปที่ 6(a) เมื่อเริ่มมีการระบาด กลุ่มประชากร S จะลดลงด้วยอัตราการแพร่เชื้อ (β) อัตราการฉีดวัคซีนเข็มที่ 3 (τ_3) และอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ (μ) ซึ่งในรูปที่ 6(b) เมื่อเริ่มมีการระบาด กลุ่มประชากร S_v จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการฉีดวัคซีน และจะลดลงด้วยอัตราการติดเชื้อ (β) ประสิทธิภาพวัคซีนเข็มที่ 3 (m_3) และอัตราการเสียชีวิตโดยธรรมชาติ (μ) ในขณะที่กลุ่มประชากร I จากรูปที่ 6(c) จำนวนประชากรจะเพิ่มในช่วงเริ่มการระบาด เนื่องจากมีผู้ติดเชื้อเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจำนวนประชากรติดเชื้อก็จะลดลง จนเข้าสู่ค่าจุดสมดุล I^* และในทางเดียวกันจากรูปที่ 6(d) รูปที่ 6(e) และรูปที่ 6(f) ประชากรกลุ่ม H_1, C, H_2 ในช่วงแรกประชากรจะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และหลังจากนั้นจำนวนประชากรก็จะลดลง และเพิ่มขึ้นจนระยะเวลาหนึ่งก็จะลดลงเรื่อย ๆ จนเข้าสู่ค่าจุดสมดุล H_1^*, C^*, H_2^* ตามลำดับ และจากรูปที่ 6(g) และรูปที่ 6(h) ประชากรกลุ่ม R, D ในช่วงแรกประชากรกลุ่มเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงระยะเวลาหนึ่งก็จะเข้าสู่ค่าจุดสมดุล R^*, D^* ตามลำดับ

3.8.1 ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3 จากแบบจำลอง

จากตารางที่ 2 และ 3 แสดงค่าตัวแปรและพารามิเตอร์เริ่มต้น ที่ใช้ในการหาค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานของการฉีดวัคซีนแต่ละเข็ม โดยเราได้หาค่าพารามิเตอร์ β, λ ของทั้ง 3 เข็ม จากแบบจำลองเทียบกับข้อมูลจริง โดยใช้วิธี Nelder-Mead ในคำสั่ง OPTIM พร้อมกับ

ค่าพารามิเตอร์แต่ละเข็มประกอบด้วย τ_i คือ อัตราการฉีดวัคซีนเข็มที่ i โดยที่ $i = 1, 2, 3$ m_i คือประสิทธิภาพการฉีดวัคซีนเข็มที่ i โดยที่ $i = 1, 2, 3$ v_i คือสัดส่วนผู้ฉีดวัคซีนเข็มที่ i โดยที่ $i = 1, 2, 3$ โดยข้อมูลดังกล่าวนำมาจากข้อมูลของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข (SAT-MOPH, 2022) ซึ่ง $\tau_i = \frac{v_t}{n_i \times 272}$ โดย n_i คือจำนวนประชากรทั้งหมด ได้แก่ $n_i = 66,000,000$ และ v_t คือจำนวนผู้ฉีดวัคซีนสะสมของแต่ละเข็ม ได้แก่ $v_1 = 5,146,604$, $v_2 = 5,830,754$, $v_3 = 21,264,434$ ซึ่งมีค่าดังนี้

ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3

พารามิเตอร์	เข็มที่1	เข็มที่2	เข็มที่3	หน่วย
β	0.6465	0.6980	2.061	คน/วัน
λ	0.7884	0.8631	1.753	คน/วัน
τ_i	0.00029	0.00032	0.0012	ต่อวัน
m_i	58 %	64 %	87 %	เปอร์เซ็นต์
v_i	51,416,846/66,000,000	46,330,080/66,000,000	7,466,139/66,000,000	-

ซึ่งจากตารางที่ 5 เราจะคำนวณค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3 ได้ดังนี้

ตาราง 6 ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานจากการจำลองของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3

	เข็มที่ 1	เข็มที่ 2	เข็มที่ 3
R_0	1.031	1.028	1.006

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อฉีดวัคซีนครบ 3 เข็ม จะทำให้เห็นว่าค่าระดับการติดเชื้อน้อยกว่าการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 และ 2 ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการฉีดวัคซีนครบ 3 เข็ม เป็นการป้องกันการแพร่เชื้อได้ดีกว่าการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 และ 2

3.9 วิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Chitnis et al., 2008) เพื่อทราบความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แบบจำลองการแพร่ระบาดโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย ต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานและประชากรกลุ่มติดเชื้อ โดยคำนวณค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์แต่ละตัวจากวิธี PRCC ด้วยโปรแกรม R โดยสามารถคำนวณค่าความอ่อนไหวได้จากสูตรดังนี้

$$\gamma_K^{J_i} = \frac{\partial K}{\partial J_i} \cdot \left(\frac{J_i}{K} \right)$$

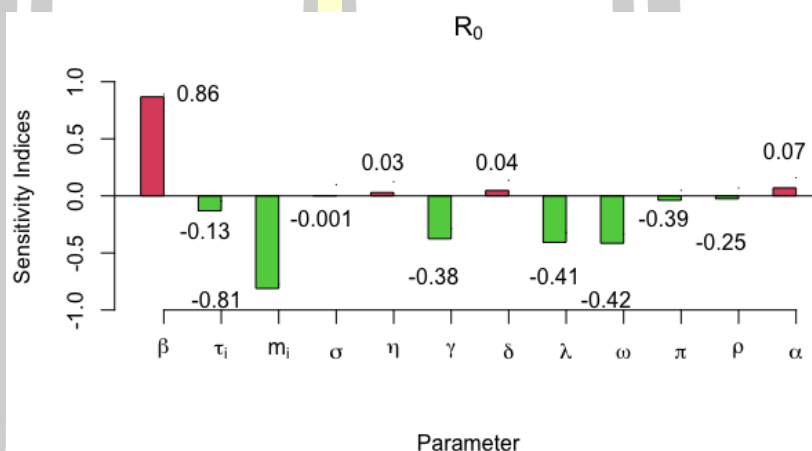
เราทำการพิจารณาโดย $K = R_0, I^*, H_1^*, C^*, H_2^*$ และ J_i คือ $\tau_i, \beta, m_i, \sigma, \eta, \gamma, \delta, \omega, \lambda$,

π, ρ, α เนื่องจาก R_0 และกลุ่มประชากร I^*, H_1^*, C^*, H_2^* ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทั้ง 12 ตัว

โดยสามารถหาความอ่อนไหวของแต่ละพารามิเตอร์ได้จากสูตรดังนี้

$$\gamma_K^{\tau_i} = \frac{\partial K}{\partial \tau_i} \cdot \left(\frac{\tau_i}{K}\right), \gamma_K^\beta = \frac{\partial K}{\partial \beta} \cdot \left(\frac{\beta}{K}\right), \gamma_K^{m_i} = \frac{\partial K}{\partial m_i} \cdot \left(\frac{m_i}{K}\right), \gamma_K^\sigma = \frac{\partial K}{\partial \sigma} \cdot \left(\frac{\sigma}{K}\right), \gamma_K^\eta = \frac{\partial K}{\partial \eta} \cdot \left(\frac{\eta}{K}\right), \gamma_K^\gamma = \frac{\partial K}{\partial \gamma} \cdot \left(\frac{\gamma}{K}\right), \gamma_K^\delta = \frac{\partial K}{\partial \delta} \cdot \left(\frac{\delta}{K}\right), \gamma_K^\omega = \frac{\partial K}{\partial \omega} \cdot \left(\frac{\omega}{K}\right), \gamma_K^\lambda = \frac{\partial K}{\partial \lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{K}\right), \gamma_K^\pi = \frac{\partial K}{\partial \pi} \cdot \left(\frac{\pi}{K}\right), \gamma_K^\rho = \frac{\partial K}{\partial \rho} \cdot \left(\frac{\rho}{K}\right), \gamma_K^\alpha = \frac{\partial K}{\partial \alpha} \cdot \left(\frac{\alpha}{K}\right)$$

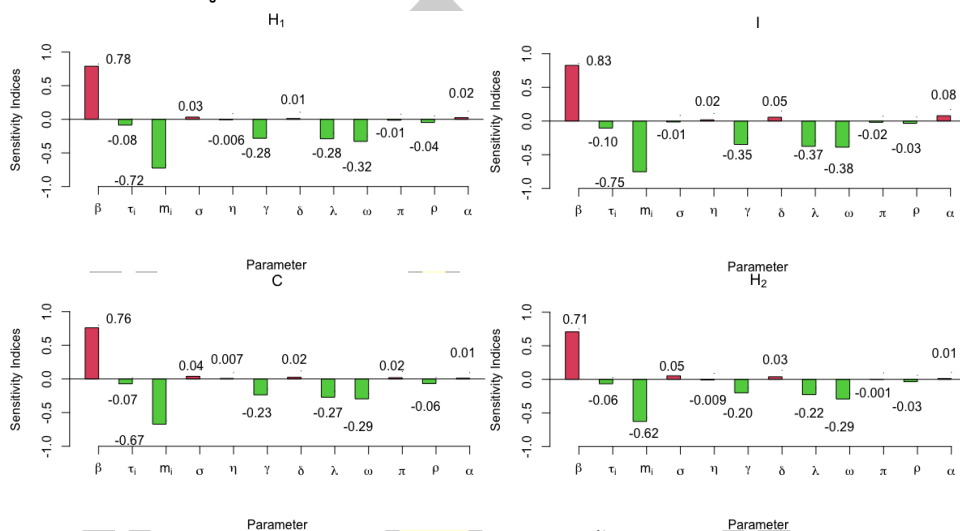
เราหาค่าความอ่อนไหวของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแต่ละพารามิเตอร์ ดังนี้



รูปที่ 8 ค่าความอ่อนไหวของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานของพารามิเตอร์แต่ละตัว

รูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากค่าความอ่อนไหวเป็นบวก ได้แก่ $\beta, \eta, \delta, \alpha$ ซึ่งจะส่งผลให้การแพร่ระบาดเชื้อเพิ่มขึ้น ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากค่าความอ่อนไหวเป็นลบ ได้แก่ $\tau_i, m_i, \sigma, \gamma, \omega, \pi, \rho, \lambda$ จะส่งผลให้การแพร่ระบาดเชื้อลดลง และจะเห็นได้ชัดว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานมากที่สุดในทางบวก ได้แก่ β คืออัตราการแพร่เชื้อ และพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าการติดเชื้อพื้นฐานมากที่สุดในทางลบ ได้แก่ m_i คือประสิทธิภาพวัคซีน เมื่อปรับพารามิเตอร์ β ลดลง 10% จาก β เท่ากับ 2.061 เป็น 1.875 โดยค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานเดิมมีค่าเท่ากับ 1.006 เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์จะได้ว่าค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานใหม่มีค่าเท่ากับ 0.915 ซึ่งจะส่งผลให้ประชากรที่ติดเชื้อลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อปรับพารามิเตอร์ m_i เพิ่มขึ้นจาก m_i เท่ากับ 87% เป็น 99% โดยค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานเดิมมีค่าเท่ากับ 1.006 เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์จะได้ว่าค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานใหม่มีค่าเท่ากับ 0.997 ซึ่งจะส่งผลให้ประชากรที่ติดเชื้อลดลงอย่างเห็นได้ชัด สามารถแสดงค่าความอ่อนไหวของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานของพารามิเตอร์แต่ละตัว

เราสามารถทราบค่าความอ่อนไหวของประชากรกลุ่มที่ติดเชื้อที่เกี่ยวข้องกับแต่ละพารามิเตอร์ ได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าความอ่อนไหวของกลุ่มประชากรที่ติดเชื้อของพารามิเตอร์แต่ละตัว

จะเห็นได้ว่ากลุ่มประชากรแต่ละกลุ่มจะมีการเพิ่มหรือลดของประชากรภายในกลุ่ม ตามค่าความอ่อนไหวของแต่ละพารามิเตอร์ โดยพารามิเตอร์ที่มีค่าความอ่อนไหวเป็นบวกของทุกกลุ่มประชากร คือ β, δ, α ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลต่อการเพิ่มของจำนวนประชากรในแต่ละกลุ่มโดย ถ้า β, δ, α เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนประชากรในกลุ่ม I, H_1, C, H_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับพารามิเตอร์ $\tau_i, m_i, \gamma, \lambda, \omega, \rho$ เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนประชากรในกลุ่ม I, H_1, C, H_2 ลดลง และในกลุ่ม I พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เป็นบวก คือ $\beta, \eta, \alpha, \delta$ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าความอ่อนไหวต่อกลุ่ม I เป็นลบ คือ $\tau_i, m_i, \gamma, \lambda, \sigma, \pi, \rho, \omega$ ในกลุ่ม I พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบมากที่สุด คือ β ซึ่งคือ อัตราการแพร่เชื้อ มีค่าเท่ากับ 0.826 ในกลุ่ม H_1 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เป็นบวก คือ $\beta, \sigma, \delta, \alpha$ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าความอ่อนไหวต่อกลุ่ม H_1 เป็นลบ คือ $\tau_i, m_i, \gamma, \lambda, \eta, \omega, \pi, \rho$ ในกลุ่ม H_1 พารามิเตอร์ที่ส่งมากที่สุด คือ β ซึ่งคือ อัตราการแพร่เชื้อ มีค่าเท่ากับ 0.789 ในกลุ่ม C พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เป็นบวก คือ $\beta, \sigma, \eta, \delta, \pi, \alpha$ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าความอ่อนไหวต่อกลุ่ม C เป็นลบ คือ $\tau_i, m_i, \gamma, \lambda, \omega, \rho$ โดยในกลุ่มนี้พารามิเตอร์ที่ส่งมากที่สุด คือ β ซึ่งคือ อัตราการแพร่เชื้อ มีค่าเท่ากับ 0.760 และสุดท้ายในกลุ่ม H_2 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เป็นบวก คือ $\beta, \sigma, \delta, \alpha$ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าความอ่อนไหวต่อกลุ่ม H_2 เป็นลบ คือ $\tau_i, m_i, \lambda, \gamma, \omega, \eta, \pi, \rho$ โดยในกลุ่มนี้พารามิเตอร์ที่ส่งมากที่สุด คือ β ซึ่งคือ อัตราการแพร่เชื้อ มีค่าเท่ากับ 0.708

บทที่ 4

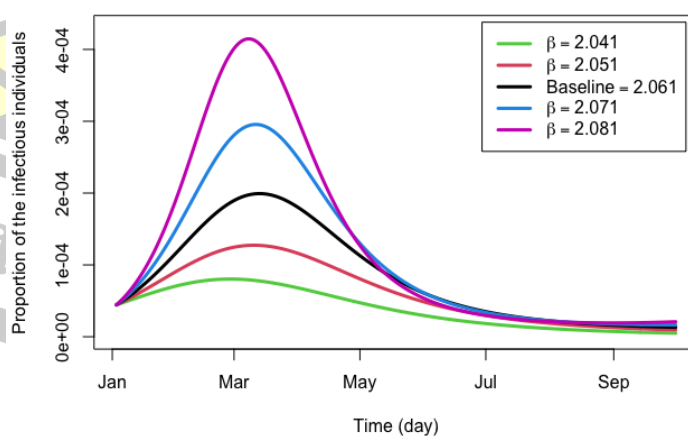
ผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ทำการจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ในแต่ละกลุ่มของประชากรของแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ โดยการปรับพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแบบจำลอง ซึ่งประกอบไปด้วย 4 กรณีดังนี้

- 4.1 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ในแต่ละกลุ่มของประชากรของแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ เมื่อมีอัตราการแพร่เชื้อที่แตกต่างกัน
- 4.2 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ในแต่ละกลุ่มของประชากรในแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ เมื่อมีประสิทธิภาพวัคซีนที่แตกต่างกัน
- 4.3 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ในแต่ละกลุ่มของประชากรในแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ เมื่อมีอัตราการฉีดวัคซีนที่แตกต่างกัน
- 4.4 การเปรียบเทียบค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานกับอัตราการฉีดวัคซีนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์
- 4.5 การวิเคราะห์ตัวเลขการแพร่ระบาด เมื่ออัตราการฉีดวัคซีนเท่ากับ 0.0012

4.1 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 เมื่อมีอัตราการแพร่เชื้อที่แตกต่างกัน

เราจะแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ ด้วยอัตราการแพร่เชื้อที่แตกต่างกัน เราทำการเปรียบเทียบค่า β ทั้งหมด 4 ค่า โดย จากเดิมค่า β เท่ากับ 2.061 จะได้ค่า β เท่ากับ 2.041, 2.051, 2.071, 2.081 ซึ่งทั้ง 5 กรณี จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

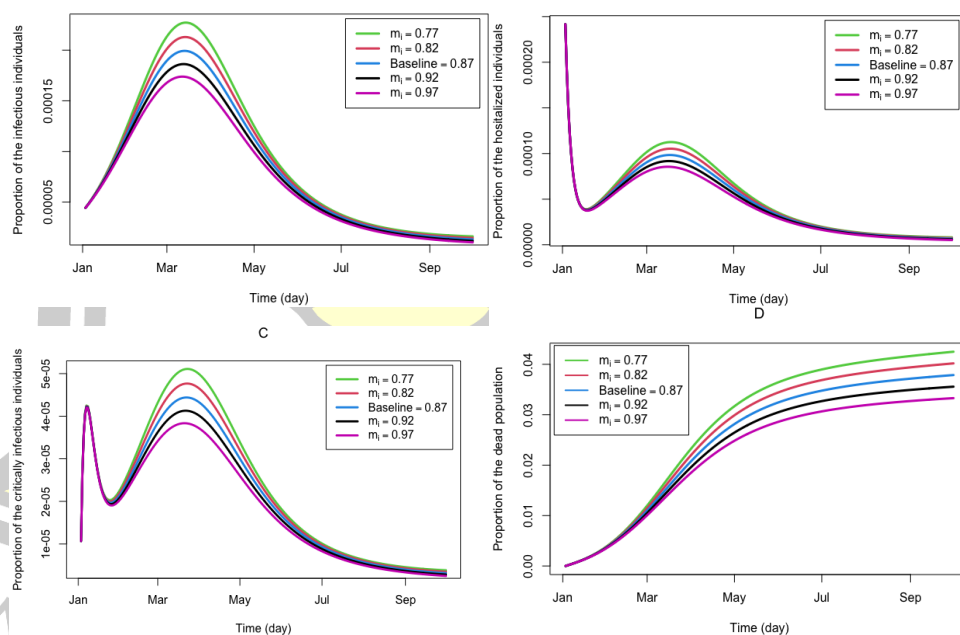


รูปที่ 10 ผลการจำลองจำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม ด้วยค่าอัตราการแพร่เชื้อที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 10 เราจะเห็นได้ชัดว่า กลุ่มประชากร I เมื่อเพิ่มอัตราการแพร่เชื้อ เทียบกับ Baseline พบว่า จำนวนประชากร I เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อลดอัตราการแพร่เชื้อลง เทียบกับ Baseline พบว่าจำนวนประชากร I ลดลง จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เห็นได้ชัดว่าพารามิเตอร์อัตราการแพร่ระบาดเชื้อมีค่าความอ่อนไหวสูง จึงส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงในระบบค่อนข้างสูง ดังนั้นต้องมีการป้องกันการแพร่เชื้อโดยการกำหนดมาตรการ เช่น ต้องมีการสวมหน้ากากอนามัย เว้นระยะห่างทางสังคม เป็นต้น เพื่อป้องกันการแพร่เชื้อหรือลดอัตราการแพร่เชื้อในการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19

4.2 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 เมื่อมีประสิทธิภาพวัคซีนที่แตกต่างกัน

เราจะแสดงผลการวิเคราะห์ตัวแบบ $SS_vIH_1CH_2RD$ ด้วยประสิทธิภาพวัคซีนที่แตกต่างกัน โดยใช้ค่า m_i ทั้งหมด 4 ค่า โดยการเพิ่มและลดประสิทธิภาพฉีดวัคซีนลง 5% และ 10% จาก Baseline ของค่า $m_{baseline} = 87\%$ จะได้ค่า m_i เท่ากับ 77%, 82%, 92%, 97% ซึ่งรวมเป็น 5 กรณี จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



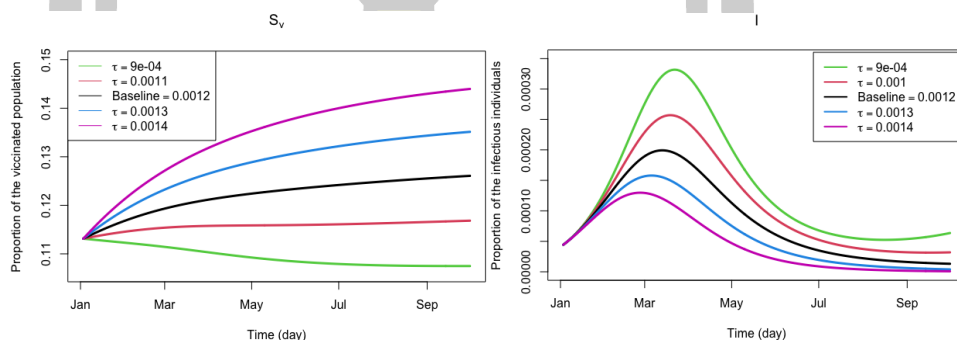
รูปที่ 11 ผลการจำลองจำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม ด้วยค่าประสิทธิภาพวัคซีนที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 11 เราจะเห็นได้ชัดว่า กลุ่มประชากร I, H_1, C, D เมื่อเพิ่มประสิทธิภาพวัคซีนขึ้น เทียบกับ Baseline พบว่า จำนวนประชากร I, H_1, C, D ลดลง และเมื่อลดประสิทธิภาพวัคซีนลง เทียบกับ Baseline พบว่าจำนวนประชากร I, H_1, C, D เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เห็นได้ชัดว่ามีค่าความอ่อนไหวต่อค่าระดับการติด

เชื้อพื้นฐานเป็นลบ เท่ากับ -0.811 เมื่อเราปรับประสิทธิภาพวัคซีนสูงขึ้น ผู้ติดเชื้อจะลดลง ดังนั้นเพื่อลดจำนวนผู้ติดเชื้อลง และลดจำนวนผู้เสียชีวิต จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพวัคซีนจากการวิจัย หรือจากการทดลอง เป็นต้น

4.3 การจำลองการแพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 เมื่อมีอัตราการฉีดวัคซีนที่แตกต่างกัน

เราจะแสดงผลการวิเคราะห์ตัวแบบ $SS_vIH_1CH_2RD$ ด้วยอัตราการฉีดวัคซีนที่แตกต่างกัน โดยใช้ค่า τ_i ทั้งหมด 4 ค่า จาก Baseline ของค่า $\tau_{baseline} = 0.0012$ เกิดจาก $\tau_3 = \frac{v_3}{n_i \times 272}$ โดย n_i คือจำนวนผู้ฉีดวัคซีนแต่ละเข็มทั้ง 272 วัน ได้แก่ $n_t = 66,000,000$ และ $v_3 = 21,264,434$ ซึ่งมีค่าดังนี้ และค่า τ_i เท่ากับ 0.0009, 0.001, 0.0013, 0.0014 คน ซึ่งรวมเป็น 5 กรณี จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

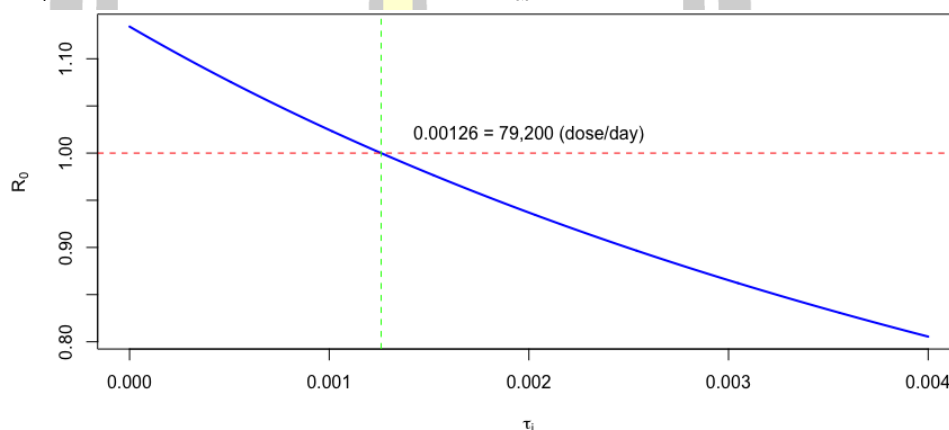


รูปที่ 12 ผลการจำลองจำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม ด้วยค่าอัตราการฉีดวัคซีนที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 12 เราจะเห็นได้ชัดว่ากลุ่มประชากร s_v เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนขึ้น เทียบกับ Baseline พบว่า จำนวนประชากร s_v เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อลดอัตราการฉีดวัคซีนลง เทียบกับ Baseline พบว่าจำนวนประชากร s_v ลดลงอย่างรวดเร็ว และกลุ่มประชากร I เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนขึ้น เทียบกับ Baseline พบว่า จำนวนประชากร I เพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า และเมื่อลดอัตราการฉีดวัคซีนลง เทียบกับ Baseline พบว่าจำนวนประชากร I เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เห็นได้ชัดว่ามีค่าความอ่อนไหวเป็นลบ มีค่าเท่ากับ -0.13092446 เมื่อปรับอัตราการฉีดวัคซีนสูงขึ้นประชากรในกลุ่ม s_v จะเพิ่มสูงขึ้น และประชากรกลุ่มผู้ติดเชื้อจะลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดจำนวนผู้ติดเชื้อลงและควรส่งเสริมให้มีภูมิคุ้มกันหมู่ จึงต้องบังคับใช้มาตรการจากทางรัฐบาลในการส่งเสริมให้ประชาชนในประเทศฉีดวัคซีนเพิ่มขึ้น

4.4 การเปรียบเทียบค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานกับอัตราการฉีดวัคซีนของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

เราพิจารณาค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานเทียบกับอัตราการฉีดวัคซีน ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 สามารถแสดงได้จากการวิเคราะห์ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน ซึ่งแสดงถึงจำนวนเฉลี่ยของการเกิดผู้ติดเชื้อรายใหม่ที่ได้รับเชื้อจากผู้ป่วย 1 ราย เปรียบเสมือนความรุนแรงในการแพร่ระบาดโรค โดยการเพิ่มค่าอัตราการฉีดวัคซีนจาก 0 ถึง 0.004 ได้ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยเส้นประสีแดงแสดงจุดตัดระหว่างค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานกับวันที่การแพร่ระบาดโรคเริ่มเสถียร เส้นประสีเขียวแสดงจุดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานเท่ากับ 1



รูปที่ 13 จุดตัดที่เหมาะสมของค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานกับค่าอัตราการฉีดวัคซีน

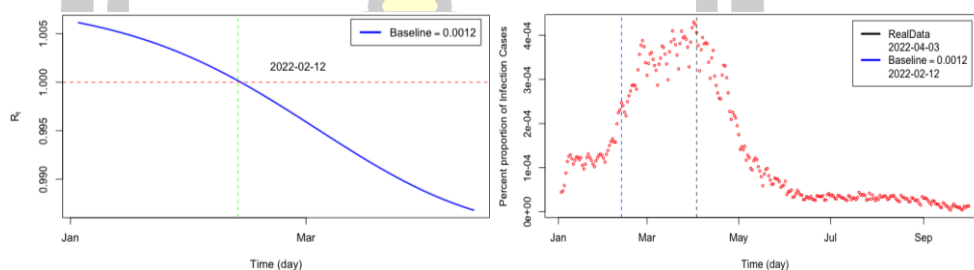
จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าควรควบคุมอัตราการฉีดวัคซีนให้เหมาะสมกับการควบคุมการแพร่ระบาดโรค มีค่าเท่ากับ 0.0012 หรือเท่ากับ 79,200 โดสต่อวัน เพื่อที่จะควบคุมการระบาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในความเป็นจริงช่วงการแพร่ระบาดโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทยมีอัตราการฉีดวัคซีนเข็มที่ 3 อยู่ที่ 21,168,922 โดส (Ministry of Higher Education, 2022) เฉลี่ย 77,827 โดสต่อวัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ตัวแบบควรต้องเพิ่มจำนวนผู้ฉีดวัคซีนให้ไม่ต่ำกว่า 79,200 โดสต่อวัน หรือควรเพิ่มไปอีก 351 โดสต่อวัน เพื่อควบคุมค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานให้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จึงจะสามารถควบคุมการแพร่ระบาดโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงและสะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมอัตราการฉีดวัคซีนหรือจำนวนประชากรที่ฉีดวัคซีนต่อวัน เพื่อความคุ้มค่าในการใช้จ่ายและความเหมาะสมของผู้ฉีดวัคซีน

4.5 การวิเคราะห์ตัวเลขการแพร่ระบาด เมื่ออัตราการฉีดวัคซีนเท่ากับ 0.0012

เราทำการวิเคราะห์ค่าตัวเลขการแพร่ระบาดของวัคซีนแต่ละเข็ม เพื่อต้องการทราบค่าเฉลี่ยของผู้ติดเชื้อ 1 รายที่สามารถแพร่เชื้อให้ประชากรจากทั้งที่อ่อนแอและที่แข็งแรง สำหรับการคำนวณหา R_t ได้จากการหาผลคูณระหว่างค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐาน (R_0) กับสัดส่วนของประชากรกลุ่มเสี่ยง ดังนี้

$$R_t = R_0 \cdot (x)$$

เมื่อ $x \in (0,1)$ ซึ่ง $x = S + S_v$ เป็นสัดส่วนของประชากรกลุ่มเสี่ยง เราได้พิจารณาอัตราการฉีดวัคซีนโดย τ_i เท่ากับ 0.0012 ซึ่งเท่ากับการฉีดเข็มที่ 3 ทั้งหมด 21,264,434 โดส ซึ่งจะแสดงผลได้ดังนี้



รูปที่ 14 ตัวเลขการแพร่ระบาดเชื้อโควิด-19 เมื่ออัตราการฉีดวัคซีนเท่ากับ 0.0012

การวิเคราะห์ตัวเลขการแพร่ระบาดจากรูปที่ 14 พบว่าเมื่ออัตราการฉีดวัคซีนเท่ากับ 0.0012 ตัวเลขการแพร่ระบาดจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 นั่นคือจำนวนประชากรที่ติดเชื้อเริ่มลดลงหลังวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2022 และเมื่อพิจารณาตัวเลขการแพร่ระบาดของอัตราการฉีดวัคซีนเทียบกับข้อมูลจริง พบว่าจำนวนประชากรของข้อมูลจริงมีผู้ติดเชื้อเริ่มลดลงหลังวันที่ 3 เมษายน 2022 ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ต้องการให้ตัวเลขการแพร่ระบาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ให้เร็วที่สุด ควรให้ทางรัฐบาลออกมาตรการบังคับฉีดวัคซีนอย่างต่ำเป็นจำนวนเท่ากับ 79,200 โดสต่อวัน หรือเพิ่มการฉีดวัคซีนในระลอกที่ 5 ไปอีก 1,373 โดสต่อวัน จะช่วยทำให้ลดเวลาในควบคุมการแพร่ระบาดได้ประมาณ 2 เดือน ซึ่งส่งผลดีกว่าการฉีดวัคซีนครบ 3 เข็ม ในระลอกที่ 5 ทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการกำหนดจำนวนการฉีดวัคซีนในแต่ละวัน เพื่อควบคุมการแพร่ระบาดโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย ให้เหมาะสมกับสถานการณ์และเกิดความคุ้มค่าในการจัดการค่าใช้จ่ายให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับโรคโควิด-19 มาใช้ในการศึกษาการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยจากการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้อธิบายการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของโรคโควิด-19 ในแต่ละกลุ่มประชากร รวมทั้งการปรับพารามิเตอร์จากแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ จะช่วยให้เราสามารถทดสอบสถานการณ์ต่าง ๆ และนำไปสู่การวางแผนและการป้องกันที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวในแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ ต่อการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย พบว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประชากรในแต่ละกลุ่ม ซึ่งเป็นกระบวนการที่เชื่อมโยงกันระหว่างข้อมูลจริงของจำนวนประชากรในแต่ละกลุ่มจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 กับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแบบจำลอง พบว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการแพร่ระบาดมากที่สุด ได้แก่ อัตราการแพร่ระบาด (β) ที่แสดงถึงความเร็วของการแพร่ระบาดผ่านการสัมผัสระหว่างบุคคล และประสิทธิภาพวัคซีน (m_i) ที่แสดงถึงความสามารถในการป้องกันการติดเชื้อ ป้องกันความรุนแรง รวมถึงป้องกันการเสียชีวิต จากการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์นี้ทำให้ผู้ที่เกี่ยวข้อง เช่น แพทย์ พยาบาล นักวิเคราะห์ นักวิจัย หรือบุคคลอื่น ๆ ที่สนใจสามารถวิเคราะห์การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 จากแบบจำลองนี้สามารถทำนายสถานการณ์ในอนาคต หรือปรับแก้นโยบายสาธารณสุข เพื่อลดการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ได้

การฉีดวัคซีนเป็นหนึ่งในมาตรการที่มีผลในการควบคุมการแพร่ระบาดของโรค COVID-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย และการใช้แบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$ เพื่อศึกษาผลกระทบของการฉีดวัคซีนต่อพลวัตการแพร่ระบาด พบว่าการฉีดวัคซีนมีผลในการลดการระบาดของโรคโควิด-19 รวมทั้งลดการเสี่ยงจากการติดเชื้อ ลดความรุนแรงจากการติดเชื้อ และลดการเสียชีวิต ในประชากรที่ติดเชื้อ กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (อาการรุนแรง) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อที่เข้ารับการรักษาในห้อง ICU (อาการวิกฤต) และกลุ่มประชากรที่เสียชีวิตจากการติดเชื้อผลกระทบของวัคซีนทั้งหมดนี้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของวัคซีน และยังขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดวัคซีนในประชากร โดยแบบจำลอง $SS_vIH_1CH_2RD$

สามารถปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อทดสอบผลกระทบของวัคซีนในสถานการณ์ต่าง ๆ และเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการวางแผนและการดำเนินการป้องกัน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและสอดคล้องกับสถานการณ์จริง จึงสามารถนำไปใช้เป็นตัวแบบในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 และระลอกอื่น ๆ ในประเทศไทย รวมโรคติดเชื้ออื่น ๆ ที่มีการแพร่ระบาดในลักษณะเดียวกันได้อีกด้วย

5.2 อภิปรายผล

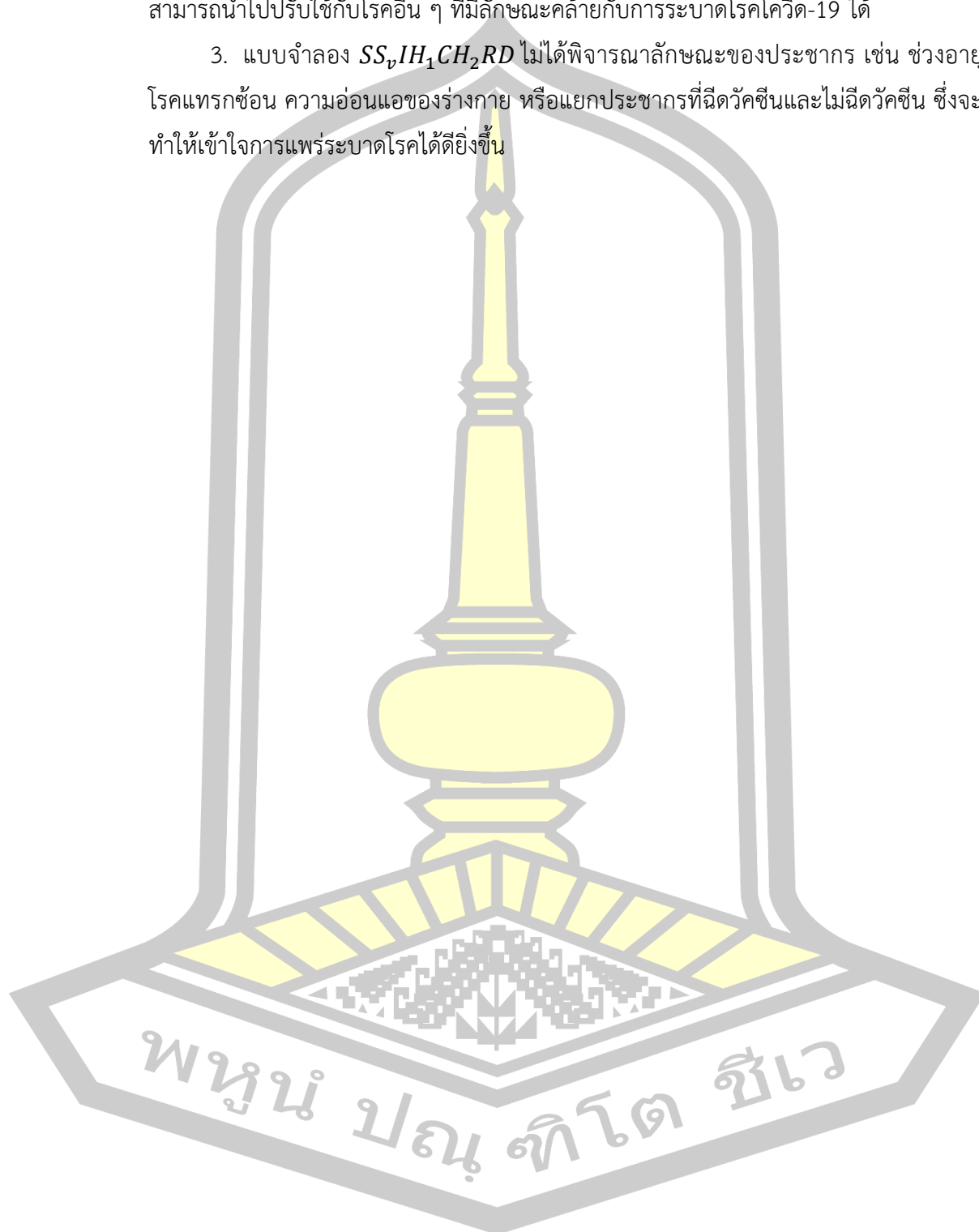
การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย รวมทั้งศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวต่อพลวัตการแพร่เชื้อโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย และเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการฉีดวัคซีนเข็มที่ 1 ถึงเข็มที่ 3 ต่อการแพร่เชื้อโรคโควิด-19 ระลอกที่ 5 ในประเทศไทย พบว่าอัตราการแพร่เชื้อ และประสิทธิภาพวัคซีน เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการแพร่ระบาดของโรค ดังนั้นควรมีมาตรการการป้องกันการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 เช่น การเว้นระยะห่างทางสังคม การสวมหน้ากากอนามัย การฉีดวัคซีนให้ครบอย่างน้อย 3 เข็มเพื่อเพิ่มภูมิคุ้มกันในการป้องกันโรคโควิด-19 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suthar (2022) และ Ribeiro Xavier (2022) ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพของวัคซีน พบว่าถ้าประสิทธิภาพวัคซีนสูงขึ้นจะช่วยป้องกันการแพร่ระบาดในสังคม พร้อมกับลดความรุนแรงในการติดเชื้อได้อีกด้วย และทราบว่าอัตราการแพร่ระบาดเชื้อยังเป็นเหตุของความรุนแรงในการแพร่ระบาดที่ส่งผลกระทบต่อภาระโรคใหญ่ในประเทศ บราซิล แอฟริกาใต้ และเยอรมนี ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีความสามารถในการควบคุมโรคมามากที่สุด คือ ประสิทธิภาพวัคซีน โดยผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพวัคซีนเข็มที่ 3 ส่งผลต่อค่าระดับการติดเชื้อพื้นฐานให้มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการแพร่ระบาดของโรค และจากการวิเคราะห์การพบว่าการเพิ่มอัตราการฉีดวัคซีนให้ไม่ต่ำกว่า 79,200 โดสต่อวัน หรือควรเพิ่มไปอีก 351 โดสต่อวัน จะช่วยให้ลดเวลาในควบคุมการแพร่ระบาดได้ประมาณ 2 เดือน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้ คือ แบบจำลอง $SS_IH_1CH_2RD$ เป็นการศึกษาจากข้อมูลจริงที่มีข้อมูลอยู่ในปี 2022 ในอนาคตอาจจะมีข้อมูลที่ปรับปรุงให้ทันสมัยมากกว่านี้ สามารถนำตัวแบบดังกล่าวไปใช้ปรับให้เข้ากับข้อมูลในอนาคต เพื่อให้ได้แบบจำลองประสิทธิภาพสูงสุด และเข้ากับสถานการณ์นั้น ๆ ได้

2. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้ คือ แบบจำลอง $SS_IH_1CH_2RD$ สามารถนำไปปรับใช้กับโรคอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับการระบาดโรคโควิด-19 ได้

3. แบบจำลอง $SS_IH_1CH_2RD$ ไม่ได้พิจารณาลักษณะของประชากร เช่น ช่วงอายุ โรคแทรกซ้อน ความอ่อนแอของร่างกาย หรือแยกประชากรที่ฉีดวัคซีนและไม่ฉีดวัคซีน ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจการแพร่ระบาดโรคได้ดียิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- Barratt, H., Kirwan, M., & Shantikumar, S. (2018). Epidemic theory (effective & basic reproduction numbers, epidemic thresholds) & techniques for analysis of infectious disease data (construction & use of epidemic curves, generation numbers, exceptional reporting & identification of significant clusters). *Health Knowledge*.
- Chitnis, N., Hyman, J. M., & Cushing, J. M. (2008). Determining important parameters in the spread of malaria through the sensitivity analysis of a mathematical model. *Bulletin of mathematical biology*, 70, 1272-1296.
- Chu, Y.-M., Farhan, M., Khan, M. A., Alshahrani, M. Y., Muhammad, T., & Islam, S. (2021). Mathematical modeling and stability analysis of Buruli ulcer in Possum mammals. *Results in Physics*, 27, 104471.
- Department of Disease Control. (2021). Guidelines for people who need COVID-19 Epidemic Situation in 2021 in Thailand. Retrieved from <https://ddc.moph.go.th/vaccine-covid19/getFiles/11/1628849610213.pdf>
- Djenina, N., Ouannas, A., Batiha, I. M., Grassi, G., Oussaeif, T.-E., & Momani, S. (2022). A novel fractional-order discrete SIR model for predicting COVID-19 behavior. *Mathematics*, 10(13), 2224.
- Durai, C. A. D., Begum, A., Jebaseeli, J., & Sabahath, A. (2022). COVID-19 pandemic, predictions and control in Saudi Arabia using SIR-F and age-structured SEIR model. *The Journal of Supercomputing*, 1-13.
- Gantmakher, F. R. (2000). The Theory of Matrices, Volume 2, American Mathematical Soc. Retrieved from Rhode Island.
- Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., . . . Gu, X. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The lancet*, 395(10223), 497-506.
- Jirawattanapanit, A. (2021). ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เพื่อการควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัสตับอักเสบ บี โดยการรณรงค์ให้ความรู้. *PKRU SciTech Journal*, 5(2), 1-16.
- Kifle, Z. S., & Obsu, L. L. (2022). Mathematical modeling for COVID-19 transmission dynamics: A case study in Ethiopia. *Results in Physics*, 34, 105191.

- Kuddus, M. A., Paul, A. K., & Theparod, T. (2024). Cost-effectiveness analysis of COVID-19 intervention policies using a mathematical model: an optimal control approach. *Scientific Reports*, 14(1), 494.
- Ministry of Higher Education, S., Research and Innovation,. (2022, 12 December 2023). Summary of vaccination information. Retrieved from https://www.mhesi.go.th/index.php/all-media/infographic/6844-650131Covid_19.html
- National Statistical Office. (2021). Demography Population and Housing. Retrieved from <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx>
- Nisakorn, R. (2021). Rates of COVID-19 Cases and Deaths by Vaccination Status. Retrieved from <https://thestandard.co/birth-death-rate-in-9-years/>
- Phat, V. N. (2001). Introduction to mathematical control theory. *Hanoi National University Publisher, Hanoi*, 421-429.
- Prakitsri, P., Rasri, A., Nithijirawat, C., & Para, N. (2019). ตัว แบบ เชิง คณิตศาสตร์ ของ การ แพร่ กระจาย เชื้อ วัณโรค ใน ประเทศไทย ที่ มี ปัจจัย ของ การ ฉีด วัคซีน และ การ ต่อต้าน การ รักษา ด้วย ยา. *The Journal of Applied Science*, 18(1), 116-134.
- Rajatanavin, N., Tuangratananon, T., Suphanchaimat, R., & Tangcharoensathien, V. (2021). Responding to the COVID-19 second wave in Thailand by diversifying and adapting lessons from the first wave. *BMJ global health*, 6(7), e006178.
- Ribeiro Xavier, C., Sachetto Oliveira, R., da Fonseca Vieira, V., Lobosco, M., & Weber dos Santos, R. (2022). Characterisation of omicron variant during COVID-19 pandemic and the impact of vaccination, transmission rate, mortality, and reinfection in South Africa, Germany, and Brazil. *BioTech*, 11(2), 12.
- SAT-MOPH. (2022). DDC COVID-19 Interactive Dashboard. Retrieved from <https://ddc.moph.go.th/covid19-dashboard/?dashboard=main>
- Sriprom, M. (2016). ตัว แบบ เชิง คณิตศาสตร์ ของ โรค ไข้หวัดใหญ่ โดย พิจารณา ผล กระทบ จาก ปริมาณ น้ำ ฝน Influenza transmission model with the effect of rainfall. *Creative Science*, 8(2), 233-239.
- Suthar, A. B., Wang, J., Seffren, V., Wiegand, R. E., Griffing, S., & Zell, E. (2022). Public health impact of covid-19 vaccines in the US: observational study. *Bmj*, 377.
- UK Health Security Agency (UKHSA). (2022). SARS-CoV-2 variants of concern and variants

under investigation in England. Retrieved from

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1050236/technical-briefing-34-14-january-2022.pdf

Van den Driessche, P., & Watmough, J. (2002). Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical biosciences*, 180(1-2), 29-48.

World Health Organization. (2021). Listings of WHO's response to COVID-19. Retrieved from <https://www.who.int/news/item/29-06-2020-covidtimeline>

World Health Organization Country Office for Thailand. (2022). COVID-19 Situation, Thailand 15 June 2022. Retrieved from https://cdn.who.int/media/docs/default-source/searo/thailand/2022_06_15_tha-sitrep-240-covid-19.pdf?sfvrsn=6ee80816_1

กองโรคติดต่อทั่วไป กรมควบคุมโรค. (2022). แนวทางการเฝ้าระวัง ป้องกัน และควบคุมโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019. Retrieved from

<https://ddc.moph.go.th/uploads/publish/1150920210610033910.pdf>

งานโรคติดต่ออุบัติใหม่ กลุ่มพัฒนาวิชาการโรคติดต่อ. (2021). สถานการณ์โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19),. Retrieved from

<https://ddc.moph.go.th/uploads/files/2017420210820025238.pdf>

ชินรังสิกุล, ส. (2012). สมการเชิงอนุพันธ์ = *Differential equations*. กรุงเทพฯ :: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

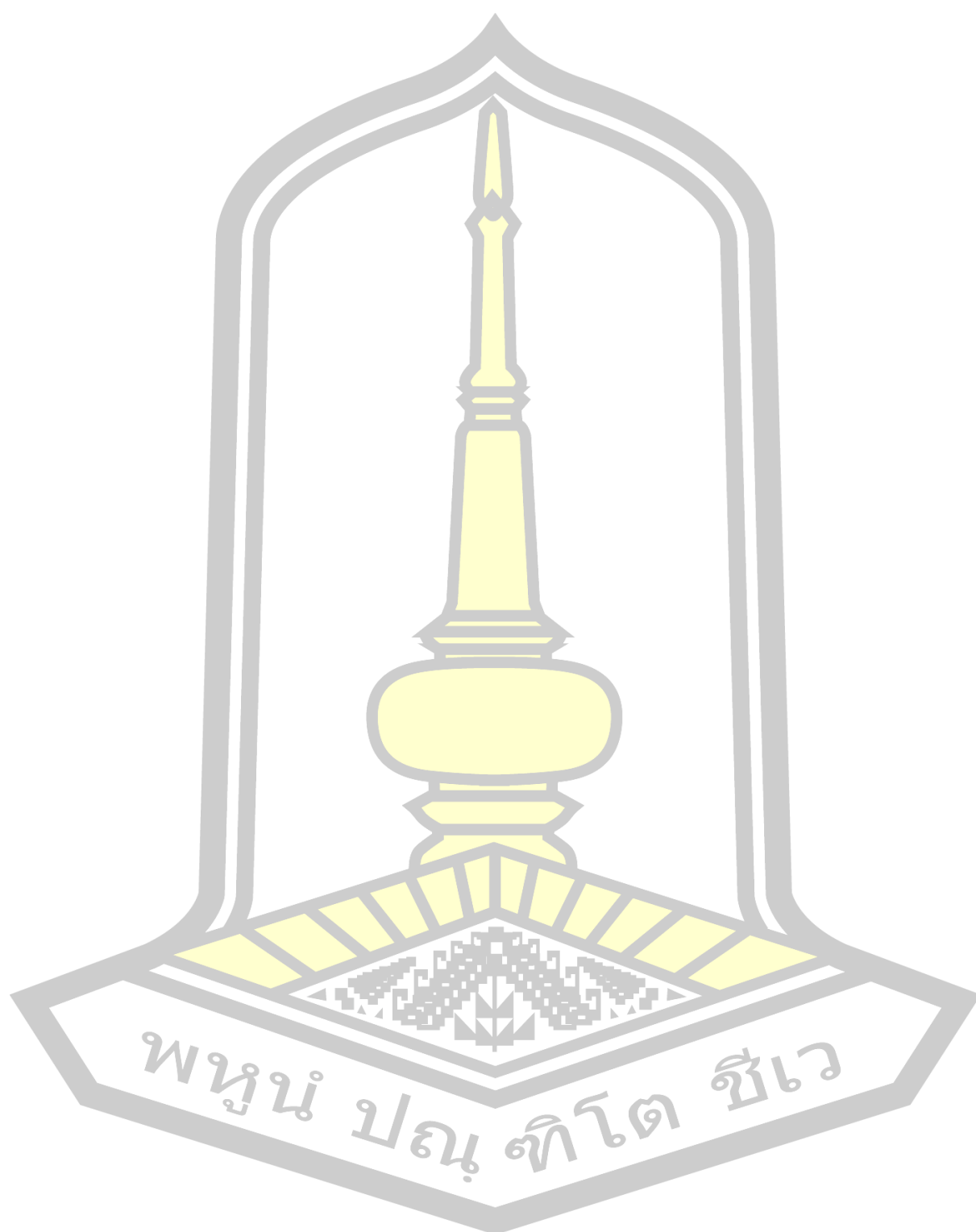
นรพัชร อัครวัตรกล, & กวิน เอี่ยมตระกูล. (2019). การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์คาดการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโควิด-19. Retrieved from

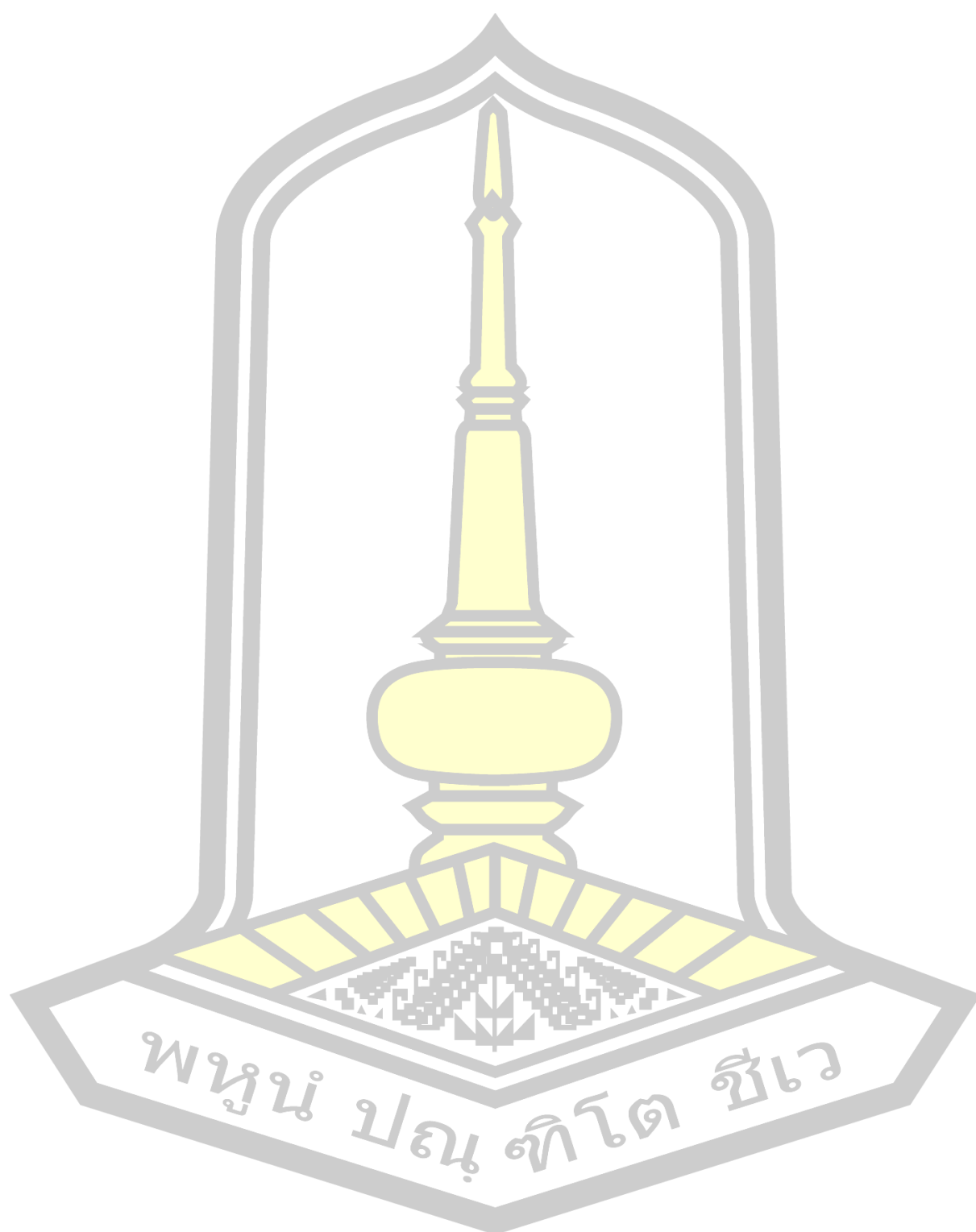
<https://thaipublica.org/2021/05/epidemic-sir-model/>

สลิลทิพย์ แดงกองโค, & ตั้งควิเวชกุล, จ. (2013). เสถียรภาพสำหรับแบบจำลองโรคระบาด. พิษณุโลก. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.

สตัยารณ, ส. (2009). พีชคณิตเชิงเส้นและการประยุกต์. กรุงเทพฯ :: ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนุวัตร จิรวัฒนพาณิชย์. (2564). ตัว แบบ เชิง คณิตศาสตร์ เพื่อ การ ควบคุม การ แพร่ ระบาด ของไวรัส ตับ อักเสบ ปี โดย การ รณรงค์ ให้ ความ รู้. *PKRU SciTech Journal*, 5(2), 1-16.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายปณณธร เครือบคนโท
วันเกิด	25 มกราคม 2542
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลมหาราชนครราชสีมา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	164 ม. 1 บ.ปะใหญ่ ต.อุดมทรัพย์ อ.วังน้ำเขียว จ. นครราชสีมา 30370
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ พ.ศ. 2564 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขา คณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขา วิทยาการจัดการสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พณณ ปณ จิตโต ชีเว