แบบจำลองการเป็นโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

MODEL OF TETANUS AND VACCINATION

วิสสุตา ตั้งชนม์จำรัส
อทิตยา ฉลาด
อมรรัตน์ อมราภรณ์

ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (คณิตศาสตร์ประยุกต์)
ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

MODEL OF TETANUS AND VACCINATION

WISSUTA TUNGCHONJAMRAS
ATITTAYA CHALAD
AMORNRAT AMARAPORN

A SPECIAL PROBLEM SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (MATHEMATICS)
DEPARTMENT OF MATHEMATICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อปัญหาพิเศษ	แบบจำลองการเป็นโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน Model of tetanus and vaccination
ชื่อนักศึกษา	นางสาววิสสุตา ตั้งชนม์จำรัส รหัสนักศึกษา 57050135 นางสาวอทิตยา ฉลาด รหัสนักศึกษา 57050154 นางสาวอมรรัตน์ อมราภรณ์ รหัสนักศึกษา 57050158
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (คณิตศาสตร์ประยุกต์)
ภาควิชา	คณิตศาสตร์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.พันธนี พงศ์สัมพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.เทิดขวัญ ช้างเผือก

บทคัดย่อ

ปัญหาพิเศษนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการลดแนวโน้มของจำนวนผู้ที่จะเป็นโรคบาดทะยักในประเทศไทย ผู้จัดทำได้นำความรู้ทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อนำไปเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมโรคบาดทะยักในประเทศไทยต่อไป การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้จากการศึกษาเชื้อแบคทีเรีย Clostridium tetani ซึ่งเป็นเชื้อที่ทำให้เกิดโรคบาดทะยัก ผู้จัดทำได้พิจารณาลักษณะการแพร่กระจายของโรค ประชากรผู้ป่วยในแต่ละภาค ช่วงอายุ การวินิจฉัยโรคบาดทะยัก และระยะของโรคตามรายปีแล้วจึงนำข้อมูลของผู้ป่วยและทฤษฎีทางคณิตศาสตร์มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลเฉลยทางตัวเลขได้นำมาแสดงโดยใช้โปรแกรม ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้เพื่อเป็นแนวทางการลดจำนวนผู้ป่วยโรคบาดทะยักในประเทศไทย

คำสำคัญ : ผลเฉลยเชิงตัวเลข โรคบาดทะยัก วัคซีน สมการเชิงอนุพันธ์

Title	Model of tetanus and vaccination
Students	Miss Wissuta Tungchonjamras Student ID 57050135
	Miss Atittaya Chalad Student ID 57050154
	Miss Amornrat Amaraporn Student ID 57050158
Degree	Bachelor of Science (Applied Mathematics)
Department	Applied Mathematics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2017
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Puntani Pongsumpun
Co-advisor	Dr.Thurdkwan Changpuek

Abstract

The purpose of this special problem is to decrease the number of tetanus cases in Thailand. We used the mathematical knowledge and apply mathematical model to describe the infection of tetanus in Thailand. The mathematical model is found to study the bacteria Clostridium tetani , A bacteria that causes tetanus. We considered the spread of disease, the patients in each region, age of patients and duration of disease by year. Then we take the patient's information and mathematical theories to create mathematical models and numerical solution are shown by using the Microsoft Mathematica® program. The results from this study can be used as a guide to reduce the number of tetanus patients in Thailand.

Keywords : Numerical solution , Tetanus , vaccine , Differential equations

กิตติกรรมประกาศ

ปัญหาพิเศษเรื่อง “แบบจำลองการเป็นโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน” นี้สำเร็จไปด้วยความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.พันธนี พงศ์สัมพันธ์ ดร.เทิดขวัญ ช้างเผือก ดร.สิริพร แฮนน่า วินเทอร์ และ ผศ.ดร.กนกณัฏฐช์ วัฒนแจ่มศรี ที่ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในปัญหาพิเศษและความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรและคณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการต่างๆอย่างดียิ่ง ตลอดจนเพื่อนๆนักศึกษาภาควิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลตลอดมาและกระตุ้นให้เกิดความพยายามในการแก้ไขปัญหาอุปสรรคต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณพ่อ แม่ พี่ น้อง และบุคคลรอบข้างทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้ความสนับสนุนในเรื่องต่างๆด้วยดีและเข้าใจในสิ่งที่เป็นอุปสรรคที่เกิดขึ้น จนทำให้ปัญหาพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงอย่างสมบูรณ์ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

วิสสุตา ตั้งชนม์จำรัส
อทิตยา ฉลาด
อมรรัตน์ อมราภรณ์

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ **หน้า**

บทที่ 1

บทนำ

1.1) ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

โรคบาดทะยัก (Tetanus) เป็นโรคติดเชื้อแบคทีเรียชนิดหนึ่ง คำว่า Tetanus มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คือ Teinein ซึ่งแปลว่า 'ยืดออก' ที่เรียกเช่นนี้ เพราะผู้ป่วยที่เป็นโรคนี้จะมีการหดตัวและแข็งเกร็งตัวของกล้ามเนื้อเกิดขึ้นทั่วตัว โดยที่ทำให้แผ่นหลังมีการยืดตัวออก ซึ่งเป็นท่าทางที่เป็นรูปแบบเฉพาะ ทั้งนี้ แบคทีเรียที่ก่อโรคนี้ชื่อว่า Clostridium tetani ซึ่งความสำคัญของโรคนี้คือ ผู้ป่วยที่เป็นโรคนี้มีโอกาสเสียชีวิต และคนที่เคยเป็นโรคนี้ครั้งหนึ่งแล้ว สามารถเป็นได้อีก แต่โรคนี้มีวัคซีนฉีดป้องกันได้

โรคบาดทะยักพบได้ทั่วไปทุกแห่ง เชื้อแบคทีเรียโดยเฉพาะในรูปแบบของสปอร์พบติดตามพื้นหญ้าทั่วไปได้นานเป็นเดือนๆ หรืออาจเป็นปี เชื้อจะพบได้ในลำไส้ของคนและสัตว์ในสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนด้วยมูลสัตว์ เชื้อจะเข้าสู่ร่างกายทางบาดแผล โดยจะแบ่งตัวและขับ exotoxin ออกมา เชื้อจะเจริญแบ่งตัวได้ดีในแผลลึก อากาศเข้าไม่ได้ดี เช่น บาดแผลตะปูตำ แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ผิวหนังถลอกบริเวณกว้าง บาดแผลในปาก ฟันผุ หรือเข้าทางหูที่อักเสบ โดยการใช้เศษไม้ หรือต้นหญ้าที่มีเชื้อโรคนี้ติดอยู่แคะฟันหรือแยงหู บางครั้งอาจเข้าทางลำไส้ได้ ทางเข้าที่สำคัญและเป็นปัญหาใหญ่ในทารกแรกเกิดคือ เชื้อเข้าทางสายสะดือที่ตัดด้วยกรรไกร หรือของมีคมที่ไม่สะอาด ที่พบบ่อยในชนบทคือ การใช้ไม้ไผ่ หรือมีดทำครัวตัดสายสะดือและการพอกสะดือด้วยยากลางบ้าน หรือโรยด้วยแป้งที่อาจปนเปื้อนเชื้อบาดทะยัก ทำให้เชื้อเข้าสู่แผลรอยตัดที่สะดือ ทำให้เกิดโรคบาดทะยักในทารกเกิดโรคบาดทะยักมีอาการและความรุนแรงของโรคตั้งแต่มีอาการเล็กน้อยไปจนถึงภาวะหายใจวายซึ่งเป็นสาเหตุการเสียชีวิต ดังนั้นการฉีดวัคซีนเพื่อป้องกันโรคบาดทะยัก โดยเฉพาะฉีดตั้งแต่เด็ก การฉีดวัคซีนนั้นขัดขวางการแพร่ระบาด และลดผลกระทบที่ร้ายแรงของโรคบาดทะยักในบางกรณีอาจจะกำจัดโรคได้หมด คณะผู้จัดทำจึงศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโรคบาดทะยักและการฉีดวัคซีนโรคบาดทะยักเพื่อเป็นความรู้แก่ผู้ที่เป็นโรคหรือผู้ที่จะศึกษาและสนใจในโรคบาดทะยัก

1.2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก
2. ศึกษาแบบจำลองเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. เพื่อศึกษาหาแนวทางลดการระบาดของโรคบาดทะยัก

1.3) ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก

1.4) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีนซึ่งเป็นแนวทางในการลดการติดเชื้อของโรคนี้

1.5) ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าข้อมูลการเกิดโรคบาดทะยัก
2. รวบรวมข้อมูลสถิติการเกิดโรคบาดทะยัก
3. วิเคราะห์ข้อมูลสถิติการเกิดโรคบาดทะยัก
4. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์
5. วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ว่าสามารถใช้ได้จริงหรือไม่
6. ทดสอบแบบจำลองที่ได้ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่
7. พัฒนาแบบจำลองที่ได้ใหม่ ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสม
8. สรุปผลที่ได้จากแบบจำลองและเสนอแนะแนวทางการพัฒนาแบบจำลอง

1.6) ระยะเวลาดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา จากเดือนสิงหาคม 2560 – พฤษภาคม 2561									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค	ก.พ	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
นำเสนอหัวข้อต่ออาจารย์ที่ปรึกษา	↔									
ค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูล	↔	↔	↔							
วิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์		↔	↔							
หาแนวทางลดการระบาดของโรค					↔	↔	↔	↔		
ตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาด									↔	
นำเสนอต่อคณะกรรมการ					↔					↔
จัดทำเอกสารรูปเล่ม										↔

บทที่2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1) จุดสมดุล (Equilibrium)

จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

$$\frac{dx}{dt} = f_1(x, y) \tag{2.1}$$

$$\frac{dy}{dt} = f_2(x, y) \tag{2.2}$$

โดยที่ f_1และ f_2 เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ผลเฉลย $(\bar{x}, \bar{y})$ ของระบบสมการ (2.1) และ (2.2) นิยามโดย $f_1(\bar{x}, \bar{y}) = f_2(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ จะเรียกว่าผลเฉลยที่สภาวะคงที่ หรือ จุดสมดุล

2.1.2) จาโคเบียนเมทริกซ์

ให้ $x = [\, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ และ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันเวกเตอร์ของ x โดยที่ $f(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_m(x)]^T$ ดังนั้นอนุพันธ์ของ $f(x)$ เทียบกับ x จะเรียกว่าจาโคเบียนเมทริกซ์หรือจาโคเบียนของ $f(x)$ นิยามโดย

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

2.1.3) สมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation)

นิยาม ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด n x n สเกลาร์ λ จะเรียกว่าค่าเจาะจง ของ A ถ้ามีเวกเตอร์ x ที่ไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์ ที่ทำให้

$$Ax = \lambda x \qquad \text{---------- (*)}$$

และเรียก x ว่าเวกเตอร์เจาะจง สำหรับ λ ของเมทริกซ์ A

สมการ (*) สามารถเขียนใหม่ได้คือ $(A - \lambda I)x = 0$

เวกเตอร์ x ที่เป็นผลเฉลยของระบบสมการเชิงเส้น ต้องไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์ จึงกล่าวได้ว่าเมทริกซ์ $(A - \lambda I)$ จะไม่สามารถหาตัวผกผันได้ หรือ

$$|A - \lambda I| = 0 \qquad \textbf{(2.1*)}$$

เรียกสมการที่ (2.1*) นี้ว่า **สมการลักษณะเฉพาะ** ของเมริกซ์ A ทั้งนี้ พหุนามทางซ้ายมือของสมการลักษณะเฉพาะเรียกว่า **พหุนามลักษณะเฉพาะ** (characteristic Polynomial) โดยมีรากของพหุนามลักษณะเฉพาะเป็นค่าลักษณะเฉพาะ λ ดังนั้น การหาค่าลักษณะเฉพาะ λ ของเมทริกซ์ A ให้แก้สมการลักษณะเฉพาะ $|A - \lambda I| = 0$ และหาผลเฉลย λ

2.1.4) ตรวจสอบความเสถียรภาพของจุดสมดุล

ตรวจสอบความเสถียรภาพของจุดสมดุล ให้ $\lambda_i\ , i = 1,2,\ldots,n$ เป็นค่าลักษณะเฉพาะของระบบสมการ

1. ถ้า $\lambda_i < 0$ สำหรับบาง *i* และ $\lambda_i > 0$ สำหรับบาง *i* แล้วจะได้ว่า จุดสมดุลเป็นจุดอานม้า (saddle)

2. ถ้า $\lambda_i < 0$ สำหรับทุก *i* แล้วจะได้ว่าจุดสมดุลมีความเสถียรภาพ (stable)

3. ถ้า $\lambda_i > 0$ สำหรับทุก *i* แล้วจะได้ว่าจุดสมดุลไม่มีความเสถียรภาพ (unstable)

2.1.5) วิธีการทดสอบแบบเราท์เฮอร์วิธ (Routh-Hurwitz criteria)

กำหนดให้ $\lambda^k + a_1\lambda^{k-1} + a_2\lambda^{k-2} + \cdots + a_k = 0$

จากสมการลักษณะเฉพาะ (2.1) กำหนดให้มี k เมทริกซ์ จะได้ว่า

$$H_1 = (a_1),$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ a_3 & a_2 \end{pmatrix},$$

$$H_3 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_4 \end{pmatrix}, \ldots$$

$$H_j = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 & \cdots & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & \cdots & 0 \\ a_{2j-1} & a_{2j-2} & a_{2j-3} & a_{2j-3} & \cdots & a_j \end{pmatrix} \ldots$$

$$H_k = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & a_k \end{pmatrix}$$

โดยที่เทอมของ (l, m) ในเมทริกซ์ H_j คือ

$$\begin{array}{ll} a_{2l-m} & \text{สำหรับ } 0 < 2l - m < k \\ 1 & \text{สำหรับ } 2l = m \\ 0 & \text{สำหรับ } 2l < m \text{ หรือ } 2l > k + m \end{array}$$

แล้วทุกค่าเจาะจงจะต้องมีส่วนจริงเป็นลบ สภาพวะคงที่ $\bar{N}$ จะเสถียรภาพก็ต่อเมื่อดีเทอร์มิแนนท์ ของทุกเมทริกซ์เฮอร์วิธจะต้องเป็นบวก ซึ่งก็คือ

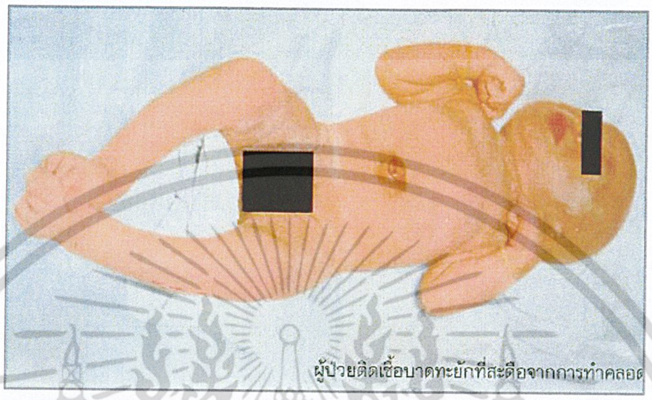
$$detH_j > 0 \qquad \text{โดยที่ } j = 1,2,3,\ldots,k$$

2.2) โรคบาดทะยัก (Tetanus)

บาดทะยัก เป็นโรคติดเชื้อที่จัดอยู่ในกลุ่มของโรคทางประสาทและกล้ามเนื้อ เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย Clostridium tetani เชื้อนี้จะเข้าร่างกายทางแผลซึ่งอาจจะถูกมีดบาด หรือเข็มหรือตะปูตำเมื่อเชื้อนี้เข้าสู่ร่างกายจะสร้างสารพิษหรือ toxin ที่เรียกว่า tetanospasmin ที่มีพิษต่อเส้นประสาทที่ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อ ทำให้มีการหดเกร็งตัวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะกล้ามเนื้อขากรรไกรและกล้ามเนื้อลำคอ เริ่มแรกกล้ามเนื้อขากรรไกรจะเกร็ง ทำให้อ้าปากไม่ได้โรคนี้จึงมีชื่อเรียกหนึ่งว่า โรคขากรรไกรแข็ง (lockjaw) ผู้ป่วยจะมีคอแข็ง หลังแข็ง ต่อไปจะมีอาการเกร็งของกล้ามเนื้อทั่วตัว ทำให้มีอาการชักได้ และยังอาจเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

2.2.1) สาเหตุของการเกิดโรคบาดทะยัก

โรคบาดทะยักเกิดจากการติดเชื้อแบคทีเรียที่ชื่อว่าคลอสตริเดียม เตตานิ (Clostridium Tetani) แพร่กระจาย โดยสปอร์ของแบคทีเรียที่พบได้ตามดิน ฝุ่น สิ่งสกปรก และอุจจาระของสัตว์อย่างม้าหรือวัว เชื้อจะเข้าสู่ร่างกายทางบาดแผล โดยจะแบ่งตัวและขับ exotoxin ออกมา โดยเชื้อชนิดนี้มีชีวิตอยู่ภายนอกร่างกายได้เป็นเวลานาน และยังคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ แม้แต่ในที่ที่มีความร้อนสูงก็ตาม



รูปที่ 2.1 ผู้ป่วยติดเชื้อบาดทะยักที่สะดือจากการทำคลอด

ที่มา: http://www.pharm.chula.ac.th/physiopharm/2543_sem2/9/badtayak.html

ทางเข้าที่สำคัญและเป็นปัญหาใหญ่ในทารกแรกเกิดคือ เชื้อเข้าทางสายสะดือที่ตัดด้วยกรรไกร หรือของมีคมที่ไม่สะอาด ที่พบบ่อยในชนบทคือ การใช้ไม้ไผ่ หรือมีดทำครัวตัดสายสะดือและการพอกสะดือด้วยยากลางบ้าน หรือโรยด้วยแป้งที่อาจปนเปื้อนเชื้อบาดทะยัก ทำให้เชื้อเข้าสู่แผลรอยตัดที่สะดือ ทำให้เกิดโรคบาดทะยักในทารกเกิด

การติดเชื้อบาดทะยักเกิดขึ้นได้เมื่อร่างกายบริเวณที่เกิดแผลสัมผัสเข้ากับเชื้อ สปอร์ของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของบาดทะยักสามารถเพิ่มตัวอย่างรวดเร็วและแพร่ผ่านกระแสเลือดไปสู่ระบบประสาทส่วนกลาง รวมถึงผลิตสารพิษที่มีชื่อว่าเตตาโนสปาสมิน (Tetanospasmin) ซึ่งจะส่งผลให้เส้นประสาทต่าง ๆ ที่ควบคุมกล้ามเนื้อเสียหาย จนเกิดเป็นอาการปวดและชักเกร็งของกล้ามเนื้อซึ่งเป็นอาการหลักของโรคบาดทะยัก

รูปที่ 2.1 บาดแผลลึกที่อาจจะทำให้เกิดบาดทะยัก

ที่มา: http://siangtai.com/2017/08/02/

รอยแผลลึกที่ปนเปื้อนสิ่งสกปรกหรือมีสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในแผลจะมีความเสี่ยงสูงต่อการติดเชื้อบาดทะยัก แต่แผลบาดเจ็บเล็กน้อยทั้งหลายก็อาจมีโอกาสทำให้เกิดบาดทะยักได้เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะผู้ที่ไม่เคยฉีดวัคซีนป้องกันบาดทะยักหรือในอดีตยังได้รับวัคซีนไม่ครบถ้วนตามกำหนด ผู้ที่มีความเสี่ยงเหล่านี้จึงควรไปพบแพทย์เพื่อตรวจรักษาโดยเร็วเมื่อเกิดแผล

เชื้อบาดทะยักยังสามารถแพร่เข้าสู่ร่างกายผ่านแผลที่มีลักษณะต่อไปนี้

- แผลถลอก รอยครูด หรือแผลจากการโดนบาด
- แผลจากการถูกสัตว์กัด เช่น สุนัข เป็นต้น
- แผลที่มีการฉีกขาดของผิวหนังเกิดขึ้น
- แผลไฟไหม้
- แผลถูกทิ่มจากตะปูหรือสิ่งของอื่น ๆ
- แผลจากการเจาะร่างกาย การสัก หรือการใช้เข็มฉีดยาที่ปนเปื้อนสิ่งสกปรก
- แผลจากกระสุนปืน
- กระดูกหักที่ทิ่มแทงผิวหนังออกมาภายนอก
- แผลติดเชื้อที่เท้าในผู้ป่วยโรคเบาหวาน
- แผลบาดเจ็บที่ดวงตา
- แผลจากการผ่าตัดที่ปนเปื้อนเชื้อ
- การติดเชื้อที่ฟัน
- การติดเชื้อทางสายสะดือในทารก เนื่องจากการทำคลอดที่ใช้ของมีคมที่ไม่สะอาดตัดสายสะดือ และยิ่งมีความเสี่ยงสูงเมื่อมารดาไม่ได้ฉีดวัคซีนป้องกันบาดทะยักอย่างครบถ้วน

2.2.2) อาการของโรคบาดทะยัก

หลังจากได้รับเชื้อสปอร์ที่เข้าไปตามบาดแผลจะแตกตัวออกเป็น vegetative form ซึ่งจะแบ่งตัวเพิ่มจำนวนและผลิต exotoxin ซึ่งจะกระจายจากแผลไปยังปลายประสาทที่แผ่กระจายอยู่ในกล้ามเนื้อ ทำให้เกิดความผิดปกติในการควบคุมการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ ระยะจากที่เชื้อเข้าสู่ร่างกายจนเกิดอาการเริ่มแรก คือ มีอาการขากรรไกรแข็ง ที่เรียกว่าระยะฟักตัวของโรคประมาณ 3-28 วัน เฉลี่ย 8 วัน ต่อไปนี้เป็นอาการของโรคบาดทะยัก

1. ผู้ป่วยจะมีอาการปวดศีรษะอย่างรุนแรงทั้งนี้เพราะเชื้อ toxin นั้นไปจับอยู่กับเส้นประสาทส่วนที่ควบคุมความรู้สึก ส่งผลให้เกิดอาการปวดที่ศีรษะอย่างมาก รวมไปถึงอาการปวดอย่างรุนแรงที่กรามทั้งสองข้าง ตามมาด้วยอาการกรามค้างอ้าปากไม่ได้ รวมไปถึงการกลืนน้ำลายไม่ได้ ซึ่งสาเหตุนั้นมาจากเชื้อ Toxin นี่เอง

2. มีอาการกล้ามเนื้อเกร็งทั้งร่างกาย เพราะเชื้อจะเข้าไปควบคุมบริเวณกล้ามเนื้อลาย โดยเริ่มแรกนั้นผู้ป่วยจะเริ่มปวดหรือเกร็งที่กล้ามเนื้อบริเวณรอบปากแผลก่อน แต่หลังจากนั้น 1-7 วัน จะลามไปสู่การเกร็งตัวของกล้ามเนื้อทั่วร่างกาย และเมื่อรวมกับอาการปวดกราม-กรามค้าง ก็จะทำให้ผู้ป่วยไม่สามารถรับประทานอาหารหรือน้ำได้ ทั้งนี้เพราะอ้าปากไม่ได้นั่นเอง

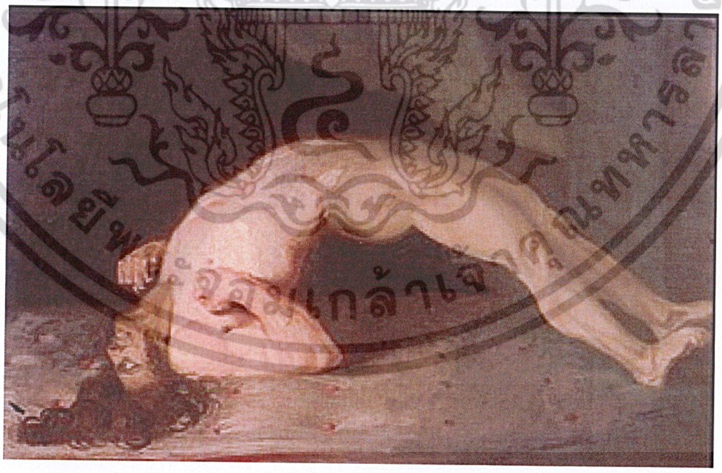
3. เนื่องจากกล้ามเนื้อทั่วร่างกายเกิดอาการเกร็ง ดังนั้นสิ่งที่ตามมาคืออาการปวดเมื่อยทั่วร่างกายอย่างรุนแรง และกล้ามเนื้อส่วนที่ช่วยในการหายใจไม่ทำงาน ซึ่งผู้ป่วยมักจะเสียชีวิตจากอาการหัวใจวายเมื่อถึงขั้นตอนนี้

4. มีไข้เหงื่อออก คือผู้ป่วยจะรู้สึกหนาวสั่น แต่ร่างกายนั้นจะมีอุณหภูมิสูงและมีเหงื่อไหลออกมาอยู่ตลอดเวลา

5. ความดันโลหิตสูงและหัวใจเต้นเร็ว

บาดทะยักในทารกแรกเกิดอาการมักจะเริ่มเมื่อทารกอายุประมาณ 3-10 วัน อาการแรกที่จะสังเกตได้คือ เด็กดูดนมลำบาก หรือไม่ค่อยดูดนม ทั้งนี้เพราะมีขากรรไกรแข็ง อ้าปากไม่ได้ ต่อมาเด็กจะดูดไม่ได้เลย หน้ายิ้มแสยะ (Risus sardonicus หรือ Sardonic grin) เด็กอาจร้องครางต่อมาจะมีมือ แขน และขาเกร็ง หลังแข็งและแอ่น ถ้าเป็นมากจะมีอาการชักกระตุกและหน้าเขียวอาการเกร็งหลังแข็งและหลังแอ่นนี้จะเป็นมากขึ้น ถ้ามีเสียงดังหรือเมื่อจับต้องตัวเด็ก อาการเกร็งชักกระตุกถ้าเป็นถี่ๆ มากขึ้น จะทำให้เด็กหน้าเขียวมากขึ้น ทำให้เป็นอันตรายถึงตายได้เพราะขาดออกซิเจน

บาดทะยักในเด็กโตหรือผู้ใหญ่ เมื่อเชื้อเข้าทางบาดแผล ระยะฟักตัวของโรคก่อนที่จะมีอาการประมาณ 5-14 วัน บางรายอาจนานถึง 1 เดือน หรือนานกว่านั้นได้ จนบางครั้งบาดแผลที่เป็นทางเข้าของเชื้อบาดทะยักหายไปแล้ว อาการเริ่มแรกที่จะสังเกตพบคือ ขากรรไกรแข็ง อ้าปากไม่ได้ มีคอแข็ง หลังจากนี้ 1-2 วัน ก็จะเริ่มมีอาการเกร็งแข็งในส่วนอื่น ๆ ของร่างกายคือ หลัง แขน ขา เด็กจะยืนและเดินหลังแข็ง แขนเหยียดเกร็งให้ก้มหลังจะทำไม่ได้ หน้าจะมีลักษณะเฉพาะคล้ายยิ้มแสยะและระยะต่อไปก็อาจจะมีอาการกระตุกเช่นเดียวกับในทารกแรกคลอด ถ้ามีเสียงดังหรือจับต้องตัวจะเกร็ง และกระดุกมากขึ้น มีหลังแอ่น และหน้าเขียว บางครั้งมีอาการรุนแรงมากอาจทำให้มีการหายใจลำบากถึงตายได้



รูปที่ 2.3 อาการของคนเป็นบาดทะยัก

ที่มา: https://medthai.com/%E0%B8%9A%E0%B8%B2%E0%B8%94%

2.2.3) การตรวจและวินิจฉัยโรค

แพทย์จะตรวจร่างกายเบื้องต้นเพื่อสังเกตดูอาการของโรคบาดทะยัก เช่น อาการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อและกล้ามเนื้อชักกระตุก รวมทั้งสอบถามถึงประวัติการฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก หากพบว่าผู้ป่วยไม่ได้รับการฉีดวัคซีนป้องกันหรือเคยได้รับแต่ไม่ครบถ้วน ก็นับว่าเสี่ยงที่จะเป็นอาการจากโรคบาดทะยักได้สูง

การวินิจฉัยโรคบาดทะยักโดยทั่วไปมักไม่มีการตรวจทางห้องปฏิบัติการ แต่บางกรณีแพทย์อาจส่งตรวจเพิ่มเติม เพื่อให้แน่ใจว่าอาการของผู้ป่วยไม่ได้เกิดจากโรคชนิดอื่นที่มีอาการคล้ายกัน เช่น เยื่อหุ้มสมองอักเสบที่เกิดจากการติดเชื้อแบคทีเรียที่สมองและไขสันหลัง หรือโรคพิษสุนัขบ้าซึ่งเกิดจากเชื้อไวรัสและส่งผลให้สมองบวม

2.2.4) การรักษาและภาวะแทรกซ้อนของโรคบาดทะยัก

หลังการตรวจวินิจฉัย หากแพทย์พิจารณาว่ามีความเสี่ยงหรือแนวโน้มที่จะติดเชื้อบาดทะยักแต่ผู้ป่วยยังไม่มีอาการใด ๆ ปรากฏให้เห็น กรณีนี้จะรักษาโดยทำความสะอาดแผลและฉีด Tetanus Immunoglobulin ซึ่งเป็นยาที่ประกอบด้วยแอนติบอดี้ ช่วยฆ่าแบคทีเรียจากโรคบาดทะยักและสามารถป้องกันโรคบาดทะยักได้ในช่วงระยะสั้น ๆ ถึงปานกลาง นอกจากนี้อาจฉีดวัคซีนป้องกันบาดทะยักร่วมด้วยหากผู้ป่วยยังไม่ได้รับวัคซีนชนิดนี้ครบกำหนด

ผู้ป่วยที่เริ่มแสดงอาการของโรคบาดทะยักแล้ว โดยทั่วไปจำเป็นจะต้องเข้ารักษาตัวที่โรงพยาบาลในห้องไอซียูเพื่อให้แพทย์เฝ้าดูอย่างใกล้ชิด และอาจได้รับการรักษาต่อไปนี้

- ให้ยา Tetanus Immunoglobulin และยาปฏิชีวนะ
- นำเอาเนื้อเยื่อแผลที่ตายแล้วหรือสิ่งแปลกปลอม เช่น ฝุ่นและสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกจากบาดแผล
- ให้ยาที่ช่วยบรรเทาอาการปวดเมื่อยและชักกระตุกของกล้ามเนื้อ เช่น ยาคลายกล้ามเนื้อและยาระงับประสาท
- ผู้ป่วยอาจต้องใช้เครื่องช่วยหายใจหากมีอาการหายใจลำบาก
- ส่วนบางรายที่รับประทานอาหารไม่ได้จะต้องใช้หลอดให้อาหารเชื่อมต่อไปยังท้องหรือการหยดสารอาหารเข้าเส้นเลือด

ภาวะแทรกซ้อนของโรคบาดทะยัก

อาการชักกระตุกของกล้ามเนื้ออย่างรุนแรงที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้เกิดภาวะแทรกซ้อนร้ายแรงต่อไปนี้ตามมา

- จังหวะการเต้นของหัวใจผิดปกติ
- สมองเสียหายจากการขาดออกซิเจน
- กระดูกสันหลังและกระดูกส่วนอื่น ๆ หักจากกล้ามเนื้อที่เกร็งมากผิดปกติ
- เกิดการติดเชื้อที่ปอดจนเกิดปอดบวม
- ไม่สามารถหายใจได้ เนื่องจากการชักเกร็งของเส้นเสียงและกล้ามเนื้อที่ใช้หายใจ
- การติดเชื้ออื่น ๆ แทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการพักฟื้นหรือรักษาตัวจากโรคบาดทะยักในโรงพยาบาลเป็นเวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน

การติดเชื้อโรคบาดทะยักอาจรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิต โดยสาเหตุของการเสียชีวิตจากโรคนี้ส่วนใหญ่เกิดจากภาวะหายใจล้มเหลว ส่วนสาเหตุอื่นที่นำไปสู่การเสียชีวิตได้เช่นกัน ได้แก่ ภาวะปอดบวม การขาดออกซิเจน และภาวะหัวใจหยุดเต้น เป็นต้น

2.2.5) การป้องกันโรคบาดทะยัก

การฉีดวัคซีนเป็นวิธีป้องกันโรคบาดทะยักที่ง่ายและได้ผล โดยควรฉีดกระตุ้นเมื่อเกิดแผลสกปรกหรือแผลเปิดที่ผู้ป่วยไม่แน่ใจว่าตนฉีดวัคซีนครั้งสุดท้ายเมื่อไร และทางที่ดีควรฉีดป้องกันตั้งแต่ยังเป็นทารกด้วยวัคซีน DTaP สำหรับป้องกันทั้งโรคคอตีบ โรคไอกรน และโรคบาดทะยักในวัคซีนเดียวกัน ซึ่งจะฉีดทั้งหมด 5 ครั้งที่บริเวณแขนหรือต้นแขนเมื่อเด็กอายุ 2 เดือน 4 เดือน 6 เดือน 15-18 เดือน และเมื่ออายุ 4-6 ปี หลังจากนั้นจึงฉีดกระตุ้นด้วยวัคซีน Tdap สำหรับป้องกันโรคบาดทะยักคอตีบไอกรน หรือวัคซีน Td สำหรับป้องกันโรคบาดทะยักคอตีบทุก ๆ 10 ปี

ส่วนเด็กอายุตั้งแต่ 7 ปีขึ้นไปและผู้ใหญ่ที่ไม่เคยได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก ควรได้รับการฉีดวัคซีนป้องกันโรคคอตีบ ไอกรน บาดทะยัก ในระยะแรก 3-4 ครั้ง ขึ้นอยู่กับว่าฉีดเมื่ออายุเท่าใดและเคยได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักมาก่อนหรือไม่ หลังจากนั้นจึงฉีดกระตุ้นทุก 10 ปี

การป้องกันด้วยตนเองเมื่อเกิดบาดแผล

แผลทุกชนิด ไม่ว่าบาดแผลลึก แผลถูกกัดจากสัตว์ และแผลสกปรกล้วนเสี่ยงต่อการเกิดโรคบาดทะยักได้สูง ยกเว้นแต่แผลเล็กน้อยที่ไม่สกปรกหรือเปรอะเปื้อน การป้องกันเบื้องต้นควรรีบล้างแผล ฟอกสบู่แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด จากนั้นจึงเช็ดด้วยยาฆ่าเชื้อ เช่น แอลลกอฮอล์หรือทิงเจอร์ใส่แผลสด แล้วรีบไปพบแพทย์เพื่อปรึกษาถึงการป้องกันการติดเชื้อบาดทะยัก รวมทั้งตรวจดูว่าวัคซีนที่เคยได้รับยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันได้อยู่หรือไม่

บาดแผลที่เล็กน้อยจะสามารถป้องกันการติดเชื้อโรคบาดทะยักด้วยตนเองได้ดังต่อไปนี้

- กดแผลไว้เพื่อหยุดหรือห้ามเลือด
- รักษาความสะอาดของแผล เมื่อเลือดหยุดไหลให้ล้างแผลด้วยน้ำสะอาด และทำความสะอาดบริเวณรอบๆ ด้วยสบู่และผ้าเช็ดแผล แต่หากพบว่ามีเศษสิ่งสกปรกใดๆ ฝังอยู่ในแผลให้รีบไปพบแพทย์ทันที
- ใช้ยาปฏิชีวนะ โดยหลังจากทำความสะอาดแผลให้ใช้ครีมหรือขี้ผึ้งปฏิชีวนะทาบริเวณแผล เช่น ยานีโอสปอริน (Neosporin) และโพลีสปอริน (Polysporin) ซึ่งแม้ยาเหล่านี้จะไม่ช่วยให้แผลหายเร็ว แต่ก็สามารถขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการติดเชื้อบาดทะยัก ทั้งนี้หากใช้ยาทาประเภทขี้ผึ้งแล้วเกิดอาการแพ้จนเกิดผื่น ควรหยุดใช้ยาทันที
- ใช้ผ้าปิดบาดแผลเพื่อให้แผลสะอาดและป้องกันจากการสัมผัสเชื้อแบคทีเรียของแผล โดยเฉพาะแผลพุพองที่กำลังแห้งจะยิ่งเสี่ยงต่อการติดเชื้อ จึงควรปิดแผลไว้จนกว่าแผลเริ่มก่อตัวเป็นสะเก็ด นอกจากนี้ควรเปลี่ยนผ้าทำแผลทุกวัน อย่างน้อยวันละ 1 ครั้งหรือเมื่อใดก็ตามที่ผ้าปิดแผลเปียกน้ำหรือเริ่มสกปรก เพื่อหลีกเลี่ยงจากการติดเชื้อ

2.2.6) วัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก

วัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก/วัคซีนบาดทะยักปัจจุบันถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท/ชนิดดังนี้

1. วัคซีนป้องกันบาดทะยักชนิดท็อกซอยด์ (Tetanus toxoid)

กล่าวคือ ท็อกซอยด์ (Toxoid) /สารพิษ/สารชีวพิษใช้ป้องกันโรคที่เกิดจากพิษของเชื้อแบคทีเรียบาดทะยัก ไม่ได้ป้องกันการติดเชื้อจากตัวแบคทีเรียนี้โดยตรง ผลิตโดยนำพิษของแบคทีเรียนี้มาทำให้หมดพิษแต่ยังสามารถกระตุ้นให้ร่างกายสร้างภูมิคุ้มกันฯได้เองที่เรียกว่า Active immunization เป็นวัคซีนที่จำเป็นสำหรับเด็กที่เด็ก ไทยทุกคนควรได้รับตามตารางการให้วัคซีนของกระทรวงสาธารณสุข ปัจจุบันวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักชนิดท็อกซอยด์นี้ไม่มีรูปแบบชนิดเดี่ยว แต่จะอยู่ในรูปแบบ วัคซีน

ชนิดผสมคือ เป็นวัคซีนรวมที่ผลิตขึ้นเพื่อป้องกัน “โรคคอตีบและโรคบาดทะยัก” หรือเพื่อป้องกัน “โรคคอตีบ ไอกรน และบาดทะยัก”

2. วัคซีนบาดทะยักชนิดอิมมูโนโกลบูลิน (Tetanus immunoglobulin)

ซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันโรคบาดทะยักและรักษาโรคบาดทะยักได้ทันทีโดยไม่ต้องรอให้ร่างกายสร้างภูมิคุ้มกันฯบาดทะยักเพราะเป็นวัคซีนชนิดที่ตัวยาเป็นยาภูมิคุ้มกันฯบาดทะยักซึ่งเรียกภูมิคุ้มกันฯ แบบนี้ว่า Passive immunization โดยแพทย์จะเลือกใช้วัคซีนฯ ชนิดอิมมูโนโกลบูลินกรณีผู้ป่วยมีความเสี่ยงสูงในการติดเชื้อบาดทะยักหรือไม่เคยมีภูมิคุ้มกันฯต่อเชื้อดังกล่าวมาก่อน ซึ่งการฉีดวัคซีนชนิดนี้จะเป็นภูมิคุ้มกันฯที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวตามปริมาณวัคซีนนี้ที่ได้รับ ซึ่งวัคซีนชนิดนี้จะไม่กล่าวถึงในบทความนี้แต่สามารถอ่านศึกษาเพิ่มเติมได้ในเว็บ haamor.com บทความเรื่อง “วัคซีนบาดทะยักชนิดอิมมูโนโกลบูลิน (Tetanus immuneoglobulin vaccine)”

การฉีดวัคซีนโรคบาดทะยัก

1. การฉีดวัคซีนชุดแรก **(primary immunization)**

   สำหรับผู้ใหญ่ (อายุ 15 ปีขึ้นไป) ที่ไม่เคยได้รับการฉีดวัคซีนรวมป้องกันโรคคอตีบ บาดทะยัก และไอกรน หรือวัคซีนป้องกันโรคคอตีบและบาดทะยักมาก่อน ให้ฉีดเข้าในกล้ามเนื้อครั้งละ 0.5 มล. รวม 2 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1-2 เดือน จากนั้นฉีดอีก 1 ครั้ง ด้วยขนาดเดียวกัน 6-12 เดือน หลังจากฉีดเข็มที่ 2

2. การฉีดกระตุ้น (reinforcing dose หรือ booster dose)

   ให้ฉีดครั้งละ 0.5 มล. ทุก ๆ 10 ปี เพื่อคงระดับภูมิต้านทานโรคตลอดไป

3. การฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักในหญิงมีครรภ์ เพื่อป้องกันโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิด ให้ซักประวัติการได้รับวัคซีนโดยละเอียด

3.1 ถ้าหญิงมีครรภ์ไม่เคยได้รับการฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักมาก่อน ควรฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักเข้ากล้ามเนื้อ ให้ครั้งละ 0.5 มล. รวม 3 ครั้ง โดยเริ่มฉีดครั้งที่ 1 ให้ในโอกาสแรกที่พบ จะเป็นระยะตั้งครรภ์เดือนไหนก็ไ ด้ ครั้งที่ 2 ห่างจากครั้งที่ 1 อย่างน้อย 1 เดือนและครั้งที่ 3 ห่างจากครั้งที่ 2 อย่างน้อย 6 เดือน (ถ้าฉีดให้ไม่ทันในขณะตั้งครรภ์ ก็ให้หลังคลอด)

3.2 ถ้าหญิงมีครรภ์เคยได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักมาแล้ว 1 ครั้ง ควรให้อีก 2 ครั้ง ห่างกันอย่างน้อย 1 เดือน ในระหว่างตั้งครรภ์

3.3 ถ้าหญิงมีครรภ์เคยได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักมาแล้ว 2 ครั้ง ควรให้อีก 1 ครั้งในระหว่างตั้งครรภ์

3.4 ถ้าหญิงมีครรภ์เคยฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักครบชุด (3 ครั้ง) มาแล้วเกิน 5 ปี ให้ฉีดกระตุ้นอีกเพียง 1 ครั้ง แต่เคยฉีดครบชุดมาแล้วไม่เกิน 5 ปี ไม่ต้องฉีดกระตุ้น

3.5 ในกรณีที่ประวัติไม่ชัดเจนให้ถือว่าไม่เคยได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักมาก่อน แล้วให้วัคซีนตามข้อ3.1

4. การฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักในผู้ที่มีบาดแผล

4.1 สำหรับผู้ที่ได้รับการฉีด tetanus toxoid อย่างเดียวหรือรวมกับวัคซีนอื่นมาครบชุดแล้วภายในระยะเวลาไม่เกิน 5 ปี ไม่จำเป็นต้องฉีดซ้ำอีก

4.2 ถ้าเคยได้รับการฉีด tetanus toxoid อย่างเดียว หรือรวมกับวัคซีนอื่นมาครบชุดแล้วตั้งแต่ระยะเวลาหลังเข็มสุดท้าย 5 ปีขึ้นไปให้ฉีดกระตุ้น 0.5 มล. เข้ากล้ามเนื้อเพียงครั้งเดียว

4.3 สำหรับผู้ที่ได้รับการฉีด tetanus toxoid ไม่ครบชุด หรือไม่เคยฉีดมาเลยหรือไม่ทราบว่า

เคยฉีดมาก่อนหรือไม่ ให้ฉีด tetanus toxoid 1 ชุด ตามข้อ (1) และหากบาดแผลฉกรรจ์ให้ฉีด antitoxin ให้ด้วย

วิธีผสมวัคซีน

ก่อนใช้ต้องเขย่าขวดจนตะกอนกระจายทั่วเสียก่อน

ข้อควรระวัง

การฉีด tetanus antitoxin ควรถามประวัติการแพ้ต่าง ๆ หรือประวัติเป็นลมพิษและต้องทำการทดสอบผิวหนัง (intracutaneous sensitivity test) ก่อนทุกครั้ง การทดสอบการแพ้ซีรั่มโดยวิธีฉีดเข้าในหนัง (intracutaneous) อาจทำได้โดยเจือจาง tetanus antitoxin ด้วย normal saline ให้ได้น้ำยา 1 : 100 แล้วฉีดเข้าในหนังขนาด 0.1 มล. จากนั้นเฝ้าดูอาการเป็นเวลา 10-30 นาที ถ้ามีอาการแพ้ หนังบริเวณที่ฉีดจะมีรอยนูนแดง โดยมีส่วนที่นูน (wheal) เกิน 1 ซม. (น้ำยา 1 : 100 ทำได้โดยใช้กระบอกฉีดยาดูด tetanus antitoxin 0.1 มล. แล้วดูด normal saline เข้าไปจนครบ 10 มล.)

ในการฉีดวัคซีนทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นการฉีดเข้าในหนังเพื่อทดสอบอาการแพ้ หรือฉีดเข้าใต้หนังเพื่อป้องกันหรือรักษาโรคก็ตาม ต้องเตรียม adrenaline ไว้ให้พร้อมที่จะใช้ได้ทันทีเมื่อผู้รับการฉีดเกิดแพ้

การฉีด tetanus antitoxin ต้องฉีดคนละข้างกับ tetanus toxoid และไม่ผสมปนในกระบอกฉีดเดียวกัน เพราะจะทำให้เสื่อมฤทธิ์ภูมิคุ้มกันที่เกิดขึ้น

การเก็บและการหมดอายุ

ให้เก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-8 องศาเซลเซียส ห้ามเก็บในช่องแช่แข็ง เพราะถ้าแช่วัคซีนนี้ให้แข็งจะเสื่อมคุณภาพทันที ถ้าเก็บถูกต้องตามนี้จะมีอายุอยู่ได้ประมาณ 2 ปี นับแต่วันที่ผลิต ให้ดูฉลากวันหมดอายุด้วย

2.3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อดิศักดิ์ นามสุโพธิ์ (2548) ศึกษาสำรวจระดับภูมิคุ้มกันต่อโรคบาดทะยัก ในผู้ป่วยอุบัติเหตุฉุกเฉินที่ได้รับการฉีดกระตุ้นด้วยวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก และศึกษาผลการตอบสนองต่อการฉีดกระตุ้นวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก รูปแบบการวิจัย - การวิจัยเชิงพรรณนาวิเคราะห์ไปข้างหน้า สถานที่ศึกษา - ห้องตรวจโรคอุบัติเหตุฉุกเฉิน โรงพยาบาลชลบุรี จังหวัดชลบุรี ประชากร - ผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาโดยการฉีดกระตุ้นวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักที่ห้องตรวจโรคอุบัติเหตุฉุกเฉิน โรงพยาบาลชลบุรี จังหวัดชลบุรี ตั้งแต่ มกราคม 2548 ถึง พฤษภาคม 2548 วิธีการศึกษา - ผู้ป่วยที่เข้าร่วมการศึกษาจะได้รับการซักประวัติข้อมูลพื้นฐานและการฉีดวัคซีนในอดีต และเจาะเลือดเพื่อนำไปตรวจหาระดับภูมิคุ้มกันต่อโรคบาดทะยัก ก่อนและหลังการฉีดกระตุ้นวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และผลการตอบสนองต่อวัคซีน ผลการศึกษา - ผู้ป่วยเข้าร่วมการศึกษาทั้งหมด 55 ราย มี 6 ราย ที่ได้รับการเจาะเลือดก่อนและหลังการฉีดกระตุ้นด้วยวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก อายุเฉลี่ยของผู้เข้าร่วมการศึกษาอยู่ที่ประมาณ 37 ปี พบว่าระดับภูมิคุ้มกันต่อโรคบาดทะยักลดลงเมื่ออายุมากขึ้น และพบผู้ที่มีระดับภูมิคุ้มกันสูงกว่าระดับปกป้องเพียง 78.2% และการตอบสนองต่อการฉีดกระตุ้นวัคซีนเป็น 100% โดยระดับภูมิคุ้มกันต่อโรคบาดทะยักเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 6.8 เท่า บทสรุป - การฉีดวัคซีนตามเกณฑ์การฉีดเดิมยังคงใช้ได้ผลดี

เนื่องจากระดับภูมิคุ้มกันภายหลังการฉีดวัคซีนตามเกณฑ์เบื้องต้น จะเริ่มลดลงภายหลังการฉีดเข็มสุดท้าย 10 ปี ดังนั้นผู้ที่มีอายุมากขึ้น เมื่อเกิดบาดแผลที่เสี่ยงต่อการได้รับเชื้อโรคบาดทะยักจึงได้ประโยชน์จากการฉีดกระตุ้น เนื่องจากทั้งหมดตอบสนองต่อการฉีดกระตุ้นและทำให้ระดับภูมิคุ้มกันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงพอต่อการป้องกันการเกิดโรคบาดทะยักได้

นิตยา อินทราวัฒนา (2553) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตโมโนโคลนาลแอนติบอดีของมนุษย์ที่มีความสามารถในการลบล้างพิษจากเชื้อบาดทะยักโดยใช้เทคนิคแอนติบอดีฟาจดิสเพลย์ การวิจัยเริ่มจากการเตรียมท็อกซอยด์ของพิษบาดทะยัก(tetanus toxoid) ที่จะใช้เป็นแอนติเจนสำหรับคัดเลือกฟาจที่ดิสเพลย์แอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อท็อกซอยด์ดังกล่าวจากคลังฟาจที่ดิสเพลย์แอนติบอดีของมนุษย์อยู่บนผิวของฟาจและมียีนของแอนติบอดีนั้นๆในจีโนมของฟาจด้วย ทั้งนี้โดยการนำวัคซีนท็อกซอยด์ของพิษบาดทะยัก (tetanus toxoid vaccine) มาแยกเอาอะลัม (alum) ที่เป็นแอดจูแวนท์ (adjuvant) ออกไป หลังจากนั้นนำท็อกซอยด์ของพิษบาดทะยักที่เตรียมได้มาใช้คัดเลือกฟาจที่ดิสเพลย์แอนติบอดีจำเพาะต่อท็อกซอยด์ด้วยเทคนิคไบโอแพนนิง (bio-panning) ซึ่งสามารถคัดเลือกฟาจที่ดิสเพลย์แอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อท็อกซอยด์ของพิษบาดทะยักได้ 5 โคลน จากนั้นนำฟาจแต่ละโคลนเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียเจ้าบ้านชนิดเอชเชอริเชียโคไล (E. coli) แล้วตรวจสอบความหลากหลายของยีนที่เป็นรหัสของแอนติบอดีสายเดี่ยวของมนุษย์ (genes coding for human monoclonal single chain variable fragments; huscfv) ในฟาจที่คัดเลือกไว้ด้วยวิธี Restriction Fragment Length Polymorphism (RFLP) ผลการวิเคราะห์พบว่ายีนที่เป็นรหัสของแอนติบอดีสายเดี่ยวของมนุษย์หรือ huscfv จากแบคทีเรียทั้ง 5 โคลนมีรูปแบบของท่อนดีเอ็นเอ (DNA bands) ที่แตกต่างกัน แสดงว่าแอนติบอดีจากยีนเหล่านี้น่าจะมีความจำเพาะต่อเอพิโทปต่างกันหรืออย่างน้อยก็มีแอฟินิตีต่อเอพิโทปไม่เท่ากัน จากนั้นนำแบคทีเรียไปเลี้ยงแล้วทำการเหนี่ยวนำให้เซลล์แบคทีเรียสร้างแอนติบอดีสายเดี่ยวของมนุษย์ที่จับจำเพาะกับท็อกซอยด์ของพิษบาดทะยัก (soluble human ScFv that bound to tetanus toxoid) ออกมา แล้วทำการแยกแอนติบอดีสายเดี่ยวออกมาจากโปรตีนอื่นๆของแบคทีเรีย โดยใช้ anti E-tag resin จากนั้นทำการทดสอบความสามารถของแอนติบอดีสายเดี่ยวในการลบล้างพิษจากเชื้อบาดทะยัก (tetanus toxin) โดยตรวจดูว่าแอนติบอดีสายเดี่ยวเหล่านั้นจะสามารถยับยั้งไม่ให้พิษจากเชื้อบาดทะยักย่อยสับเสตรทคือ recombinant synaptobrevin ได้หรือไม่ จากการศึกษาพบว่าแอนติบอดีสายเดี่ยวจากแบคทีเรียจำนวน 3 โคลน สามารถยับยั้งพิษจากเชื้อบาดทะยักได้ กล่าวได้ว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการผลิตต้นแบบของแอนติบอดีสายเดี่ยวของมนุษย์ชนิดโมโนโคลนาลที่สามารถลบล้างสารพิษบาดทะยักได้ ซึ่งแอนติบอดีสายเดี่ยวของมนุษย์ชนิดโมโนโคลนาลที่ผลิตได้นี้สามารถที่จะนำไปพัฒนาต่อตามขั้นตอนที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้รักษาผู้ป่วยบาดทะยักได้ในที่สุด ทั้งนี้เพราะแอนติบอดีต้นแบบเหล่านี้เป็นโมเลกุลโปรตีนของมนุษย์โดยสมบูรณ์ ย่อมไม่ก่อให้เกิดอาการข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ (anaphylaxis หรือ serum sickness) ในผู้รับ ดังที่มักจะเกิดเมื่อใช้แอนติบอดีจากสัตว์ในการรักษาบาดทะยัก

ไพลิน มหาพรรณ (2557) จากการระบาดของโรคคอตีบบริเวณชายแดนประเทศไทยในประชากรผู้ใหญ่ทำให้ตระหนักถึงความสำคัญว่าประชากรผู้ใหญ่บางส่วนไม่ได้รับการฉีดวัคซีนกระตุ้นทุก 10 ปี เนื่องจากจะมีการเปิดประเทศ ASEAN Economic Community(AEC) Era ในระยะเวลาอันใกล้นี้ ทำให้แรงงานต่างด้าวเข้ามาในประเทศไทยเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากประเทศเพื่อนบ้านบางประเทศโดยเฉพาะประเทศกัมพูชา ไม่ได้มีการฉีดวัคซีนในวัยเด็กที่เพียงพอ (Expanded Programs on Immunization ;EPI) จึงอาจนำไปสู่อัตราการเกิดโรคบาดทะยักในกลุ่มแรงงานต่างด้าวและอาจเกิดการระบาดของโรคคอตีบในคนไทยและแรงงานต่างด้าวขึ้นมากกว่าเดิมได้ จึงได้มีการเจาะเลือดสำรวจระดับภูมิคุ้มกันโรคบาดทะยักและคอตีบประชากรที่เข้ามาทำงานในกรุงเทพมหานครและจังหวัดข้างเคียง และฉีดวัคซีน Td ให้ประชากรเหล่านี้ โดยจุดประสงค์เพื่อ สำรวจระดับภูมิคุ้มกันของ immunity ดูช่วงอายุที่ควรจะเป็นเป้าหมายหลักในการทำ mass vaccination แก่ประชากรไทยและแรงงานจากประเทศเพื่อนบ้านที่มาอาศัยในประเทศไทย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการระบาดของโรคขึ้นมา โดยอาสาสมัครทั้งหมดในการศึกษา 229 คน เป็นอาสาสมัครคนไทย 117 คน และ แรงงานต่างด้าว 122 คน (กัมพูชา 72 คน และ พม่า 40 คน) พบว่าคนไทย 106 คน (90.6%)มีภูมิคุ้มกันสำหรับโรคบาดทะยัก (>0.1 IU/ml) แต่แรงงานต่างด้าวมีภูมิเพียง 58 คน (51.8%) ค่า Geometric mean titer (GMT)ของแรงงานต่างด้าวได้เพียง 0.13 IU/ml ซึ่งต่ำกว่าคนไทยอย่างมีนัยสำคัญ คนไทยมีค่า GMT 1.38 IU/ml (p<0.05, 95%CI 4.96-13.37) แต่อย่างไรก็ดี พบว่าระดับภูมิคุ้มกันต่อโรคคอตีบในคนไทยกลับน้อยกว่าแรงงานต่างด้าว โดยมีคนไทย 84 คน (70.9%)มีภูมิคุ้มกันสำหรับโรคบาดทะยัก (>0.1 IU/ml) แรงงานต่างด้าวมีภูมิ 91 คน (81.3%) โดยค่าGeometric mean titer (GMT)ของคนต่างด้าวสูงกว่าคนไทยแต่ไม่มีนัยสำคัญ โดยมีค่า 0.28 และ 0.17 IU/ml ตามลำดับ (p =0.68, 95%CI 0.47-0.85) จากผลการศึกษานี้ที่พบว่าแรงงานต่างด้าวมีภูมิต่อคอตีบมากกว่าคนไทยในขณะที่มีภูมิต่อบาดทะยักน้อยกว่ามาก อาจจะเป็นเพราะมีภูมิต่อคอตีบผ่านทางการกระตุ้นทางธรรมชาติ ซึ่งภูมิที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินี้จะไม่สามารถป้องกันหรือลดอัตราการเป็นพาหะของโรคคอตีบได้ วิธีการ: หลังจากฉีดวัคซีนTd ให้ทุกคน 1 เข็ม พบว่าอาสาสมัครคนไทยเกือบทุกคนที่เดิมไม่มีภูมิตอบสนองต่อการฉีดวัคซีนที่สามารถป้องกันโรคคอตีบได้ ยกเว้น คนไทย 1 ราย (<0.1 IU/ml ,2.6%) โดยเป็นภูมิที่สามารถป้องกันโรคได้แต่ไม่นาน 14 คน (0.1- <1 IU/ml, 35.9%) และเป็นภูมิที่สามารถป้องกันโรคในระยะยาว 24 คน (>1 IU/ml, 61.5%) ส่วนแรงงานต่างด้าวทุกคนตอบสนองต่อการฉีดวัคซีนคอตีบทุกคน แต่ไม่ตอบสนองต่อบาดทะยัก 5 คน (<0.1 IU/ml ,9.2%) ในขณะที่คนไทยตอบสนองต่อบาดทะยักทุกคน โดยคนที่ภูมิไม่ขึ้นมักจะจำประวัติการฉีดวัคซีนในวัยเด็กไม่ได้ สรุปผลการวิจัย: โดยสรุป การจะป้องกันการระบาดของโรคคอตีบที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในช่วง AEC จากการศึกษานี้แนะนำว่า ควรฉีดวัคซีน Td ให้แรงงานต่างด้าวทุกคนในทุกช่วงอายุ และ คนไทยที่อายุมากกว่า 30 ปี 1 เข็ม และฉีดกระตุ้นทุก 10 ปี โดยถ้าเป็นไปได้ในช่วงที่มีการระบาดของโรคคอตีบแนะนำให้ฉีดคนไทยอย่างน้อย 1 เข็มหรือถ้าเป็นเป็นได้ควรฉีด 2 เข็มเนื่องจากต้องการภูมิคุ้มกันระยะยาว ส่วนแรงงานต่างด้าวอาจพิจารณาฉีด 3 เข็ม

นิสา สิริสุขการ (2542) การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการให้วัคซีนป้องกันโรค บาดทะยักในหญิงวัยเจริญพันธุ์ และปัจจัยอื่นที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคบาดทะยักใน เด็กแรกเกิดในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดโรค โดยวิธี ecological study ศึกษาในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดโรคจากรายงานของสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดทั่วประเทศ ยกเว้นกรุงเทพมหานคร ระหว่าง ปี พ.ศ. 2533 ถึง 2536 จำนวน 809 ตำบล จาก 320 อำเภอใน 64 จังหวัด วิธีการศึกษาคือเจ้า หน้าที่สาธารณสุขที่รับผิดชอบงานสร้างเสริมภูมิคุ้มกันโรคและงานอนามัยแม่และเด็กที่ปฏิบัติงานอยู่ในสถานีอนามัยและโรงพยาบาลชุมชนที่รับผิดชอบตำบลที่เป็นพื้นที่เสี่ยง ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลการปฏิบัติงานตั้งแต่ ปี 2533 ถึง 2537 ซึ่งรวบรวมข้อมูลที่สำคัญคือจำนวน โรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิดในพื้นที่และผลงานการฉีดวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักในหญิงวัยเจริญ พันธุ์ ผลการศึกษาพบว่า ถึงแม้อัตราการได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักในหญิงวัยเจริญพันธุ์ ที่ศึกษาจะต่ำ (น้อยกว่า 20%) และไม่มีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิด ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ แต่พบแนวโน้มของความสัมพันธ์ โดยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่างการ เกิดโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิดกับปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการป้องกันโรคนี้เช่นกัน ได้แก่ การ ได้รับวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักในหญิงมีครรภ์ การคลอดโดยบุคลากรที่มีคุณภาพและดูแลเด็ก แรกเกิดครบตามเกณฑ์ซึ่งรวมความสะอาดของสายสะดือเด็ก ผลที่ได้จากการวิจัยอธิบายได้โดย เหตุผลต่อไปนี้ คือ ปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิด มีอีกหลายปัจจัย นอกจากการได้รับวัคซีนในหญิงวัยเจริญพันธุ์ และแต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกันในพื้นที่วิจัย ถึงแม้หญิงวัยเจริญพันธุ์ได้รับวัคซีนในอัตราต่ำแต่ปัจจัยอื่น ๆ ก็สูงมาก จึงสามารถป้องกัน โรคได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ระยะเวลาเฝ้าระวังสั้นไปจึงเห็นผลยังไม่ชัดเจน และเป็นผล จาก ecological fallacy ที่ไม่ได้ศึกษาในระดับปัจเจกบุคคล (individual) โดยติดตามหญิงวัย เจริญพันธุ์ที่ได้รับและไม่ได้รับวัคซีนไปจนกระทั่งตั้งครรภ์และวัดผลการเกิดโรค โดยทราบ ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโรค จนสามารถควบคุมได้ในการวิเคราะห์ผล จึงจะสามารถ วัด impact จากการได้รับวัคซีน

วราภรณ์ เตชะเสนา (2526) ศึกษาผลการใช้ PYRIDOXINE (วิตามิน B6) ร่วมกับการรักษาด้วยวิธีดั้งเดิม (CONVENTIONAL THERAPY) เพื่อลดอาการชัก, อัตราตายและศึกษาถึงโรคแทรกซ้อน ในผู้ป่วยที่มีอาการ และอาการแสดง เข้ากับโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิด ที่ได้รับไว้ในโรงพยาบาลเด็ก ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2525 ถึง กรกฎาคม 2526 จำนวน 15 ราย เปรียบเทียบกับผู้ป่วยในช่วงระยะเวลาเดียวกันของปีก่อน คือ สิงหาคม 2524 ถึง กรกฎาคม 2525 จำนวน 27 ราย ทั้งสองกลุ่มนี้มีความรุนแรงของโรคใกล้เคียงกัน พบว่า ในกลุ่มที่ใช้ PYRIDOXINE ผู้ป่วยรอดชีวิตส่วนใหญ่ (4 ใน 5 ราย) มีระยะเวลาที่การชักลดลง อยู่ในช่วงสัปดาห์ที่ 2 ของการอยู่โรงพยาบาล และเสียชีวิต 10 ราย (67%) ส่วนกลุ่ม control ผู้ป่วยที่รอดชีวิต 10 ใน 13 ราย มีระบะเวลาที่การชักลดลง อยู่ในช่วงสัปดาห์ที่ 2 เช่นกัน และเสียชีวิต 14 ราย (52%) มีระยะเวลาที่การชักลดลงและอัตราตายของผู้ป่วยทั้ง 2 กลุ่ม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) โรคแทรกซ้อนที่พบมากที่สุดคือ PNEUMONIA WITH OR WITHOUT ATELECTASIS และอาการของ SEPSIS จาก

การศึกษานี้ ไม่มีผลแทรกซ้อนจากการใช้ยา PYRIDOXINE เนื่องจากการศึกษานี้ยังไม่สมบูรณ์แบบ ฉะนั้นการที่จะสรุปผลว่า PYRIEOXINE ไม่มีผลต่อการรักษาโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิด

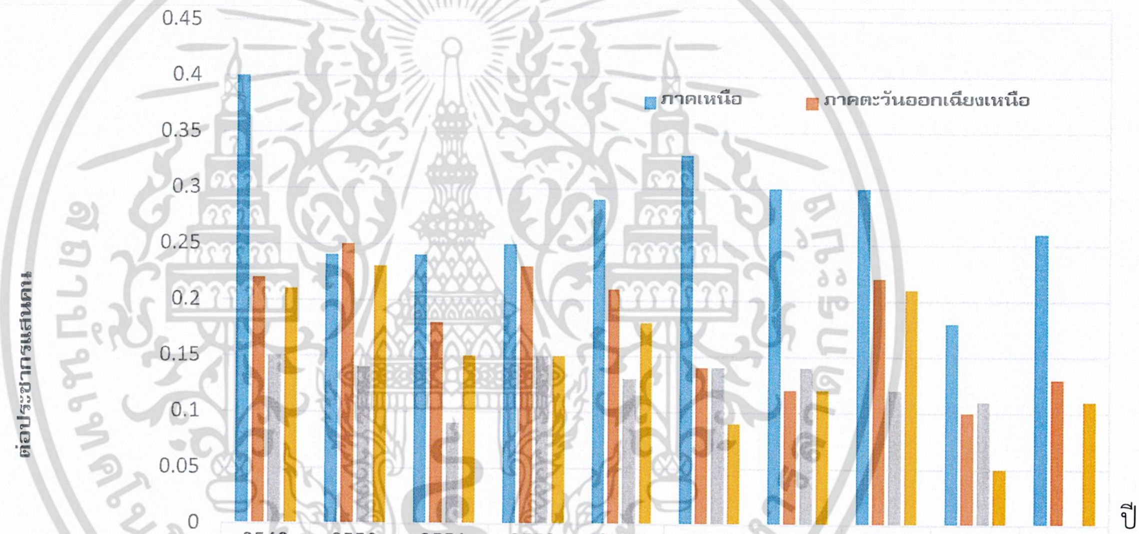
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.1.1) พิจารณาข้อมูลของผู้ป่วยโรคบาดทะยักโดยแบ่งตามแต่ละภาคของประเทศไทย 4 ภาค ดังนี้

1. ภาคเหนือ
2. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
3. ภาคกลาง
4. ภาคใต้



	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558
ภาคเหนือ	0.4	0.24	0.24	0.25	0.29	0.33	0.3	0.3	0.18	0.26
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	0.22	0.25	0.18	0.23	0.21	0.14	0.12	0.22	0.1	0.13
ภาคกลาง	0.15	0.14	0.09	0.15	0.13	0.14	0.14	0.12	0.11	
ภาคใต้	0.21	0.23	0.15	0.15	0.18	0.09	0.12	0.21	0.05	0.11

รูปที่ 3.1 กราฟแสดงจำนวนผู้ป่วยโรคบาดทะยักตามแต่ละภาค

หมายเหตุ ปี 2558 ภาคกลาง ไม่ระบุข้อมูล

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

ปี 2549 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.40 ต่อประชากรแสนคน รองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ภาคใต้ และภาคกลาง อัตราป่วย 0.22, 0.21 และ 0.15 ต่อประชากรแสนคน ตามลำดับ

ปี 2550 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีอัตราป่วยสูงสุด 0.25 ต่อประชากรแสนคน รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคใต้ และภาคกลาง อัตราป่วย 0.24, 0.23 และ 0.14 ต่อประชากรแสนคน

ปี 2551 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.24 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ และภาคกลาง อัตราป่วย 0.18, 0.15 และ 0.09 ต่อประชากรแสนคน ตามลำดับ

ปี 2552 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.25 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ(0.23) ภาคใต้(0.15) และภาคกลาง(0.15)

ปี 2553 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.29 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (0.21) ภาคใต้ (0.18) และภาคกลาง (0.13)

ปี 2554 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.33 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (0.14) ภาคกลาง (0.14) และภาคใต้ (0.09)

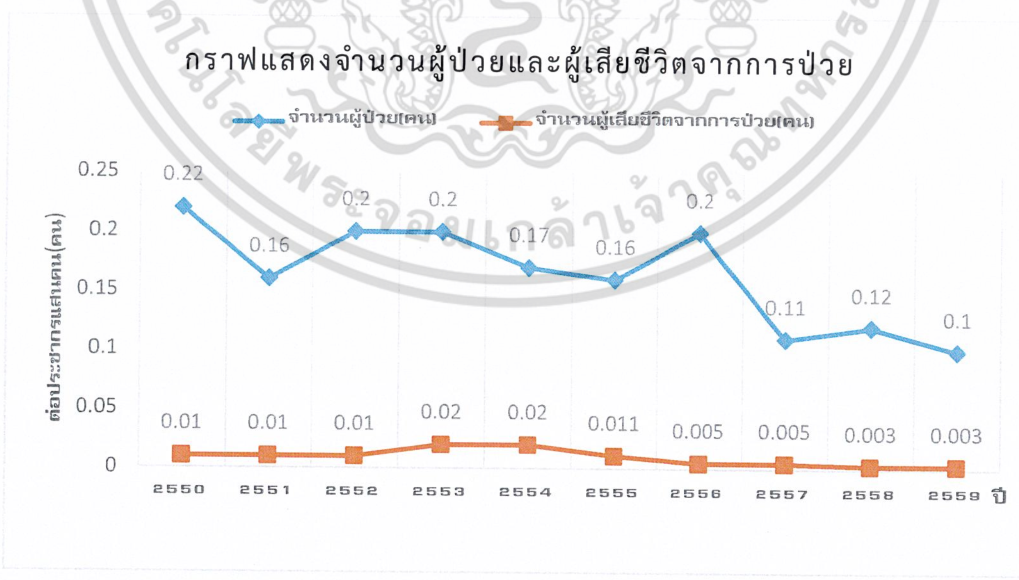
ปี 2555 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.30 ต่อประชากรแสนคน รอง ลงมาคือ ภาคกลาง (0.14) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (0.12) และ ภาคใต้ (0.12)

ปี 2556 ภาคเหนือ อัตราป่วยสูงสุด 0.30 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ(0.22) ภาคใต้(0.21)และ ภาคกลาง (0.12)

ปี 2557 ภาคเหนือ มีอัตราป่วยสูงสุด 0.18 ต่อประชากรแสน คน รองลงมา คือ ภาคกลาง (0.11) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (0.10) และภาคใต้ (0.05)

ปี 2558 ภาคเหนือ มีอัตราป่วยสูงสุด 0.26 ต่อประชากรแสน คน รองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (0.13) และภาคใต้ (0.11)

3.1.2) จำนวนผู้ป่วยและผู้เสียชีวิตของโรคบาดทะยักในประเทศไทย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงจำนวนผู้ป่วยและผู้เสียชีวิตของโรคบาดทะยักในประเทศไทย

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

ปี 2550 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.22 คน เสียชีวิต 0.01 คน

ปี 2551 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.16 คน เสียชีวิต 0.01 คน

ปี 2552 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.20 คน เสียชีวิต 0.01 คน

ปี 2553 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.20 คน เสียชีวิต 0.02 คน

ปี 2554 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.17 คน เสียชีวิต 0.02 คน

ปี 2555 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.16 คน เสียชีวิต 0.011 คน

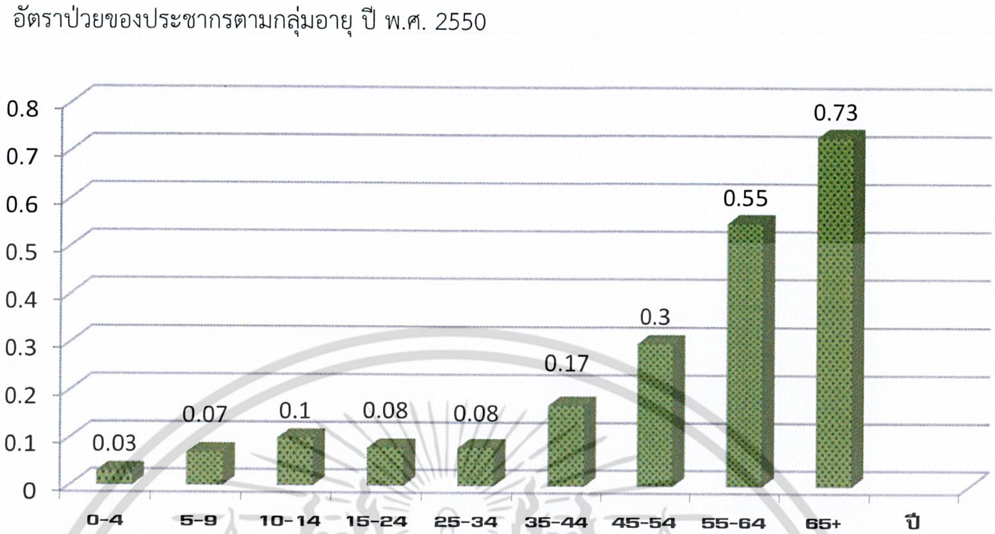
ปี 2556 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.20 คน เสียชีวิต 0.005 คน

ปี 2557 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.11 คน เสียชีวิต 0.005 คน

ปี 2558 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.12 คน เสียชีวิต 0.003 คน

ปี 2559 จากประชากร 100,000 คน สำนักระบาดวิทยา ได้รับรายงานมีผู้ป่วยโรคบาดทะยัก 0.10 คน เสียชีวิต 0.003 คน

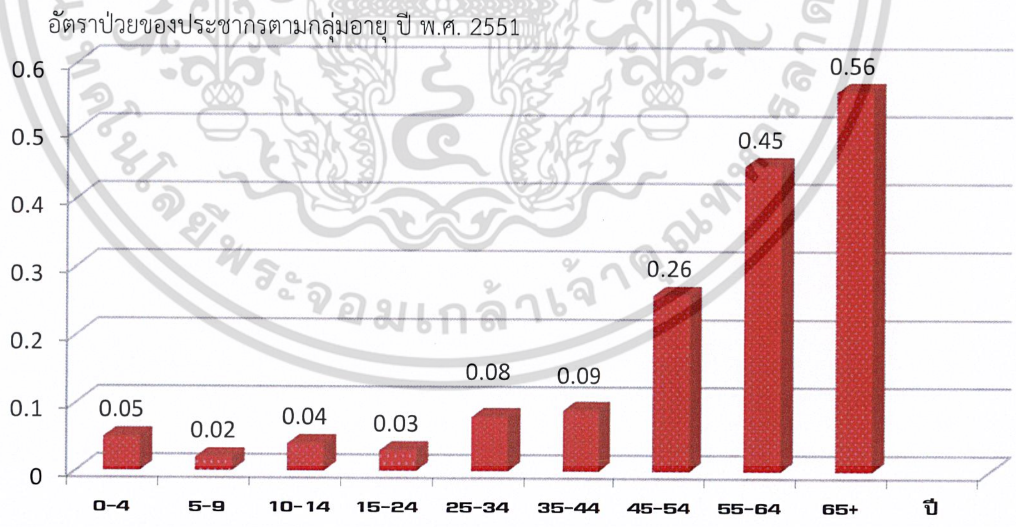
3.1.3) พิจารณาข้อมูลของผู้ป่วยโรคบาดทะยักโดย แบ่งตามกลุ่มอายุ



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2550

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

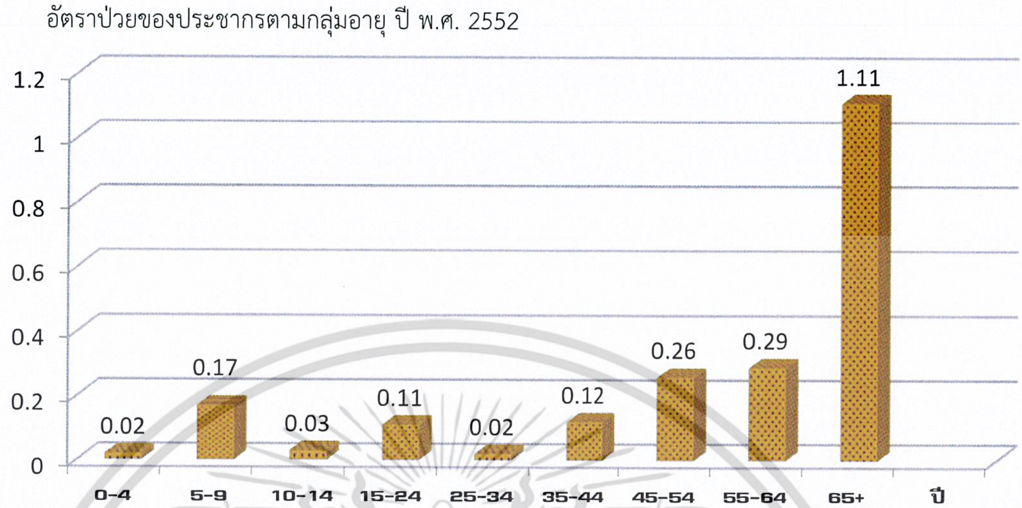
ผู้ป่วยกลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปี ขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุด เท่ากับ 0.73 ต่อประชากรแสนคน รองลงมา คือ กลุ่มอายุ 55 - 64 ปี และกลุ่มอายุ 45 - 54 ปี อัตราป่วย 0.55 และ 0.30ต่อประชากรแสนคน ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2551

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

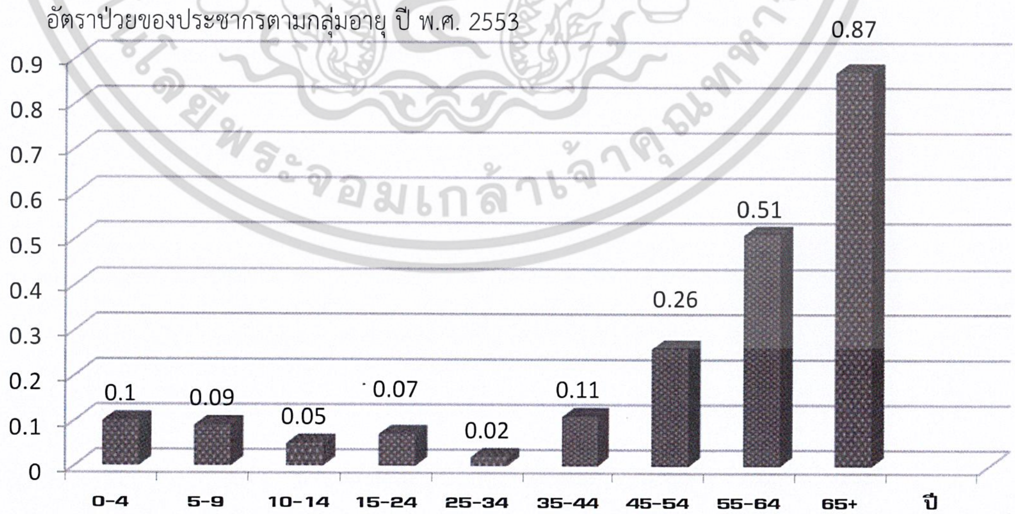
กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.56 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55-64 ปี และกลุ่มอายุ 45-54 ปี อัตราป่วย 0.45 และ 0.26 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2552

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

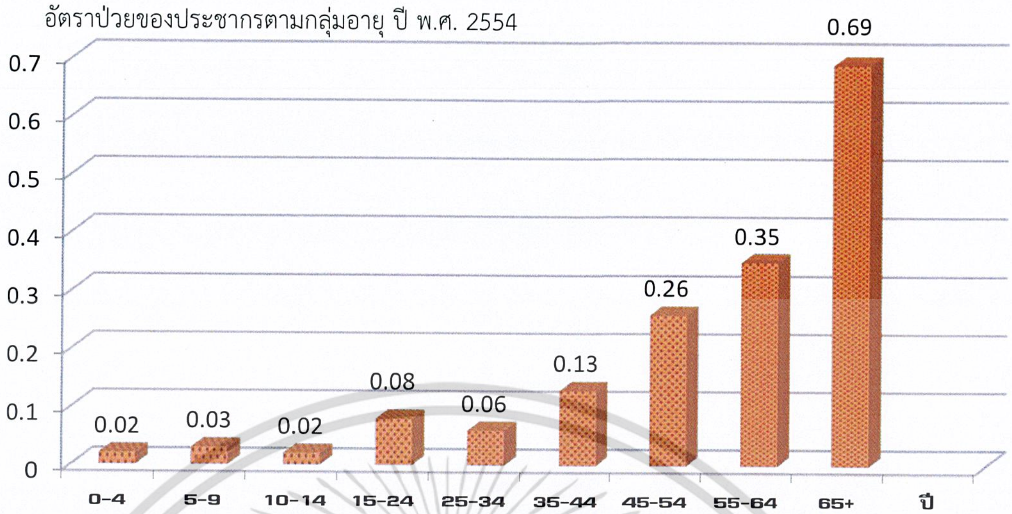
กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป อัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 1.11 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55– 64 ปี และกลุ่มอายุ 45 – 54 ปี อัตราป่วย 0.29 และ 0.26 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2553

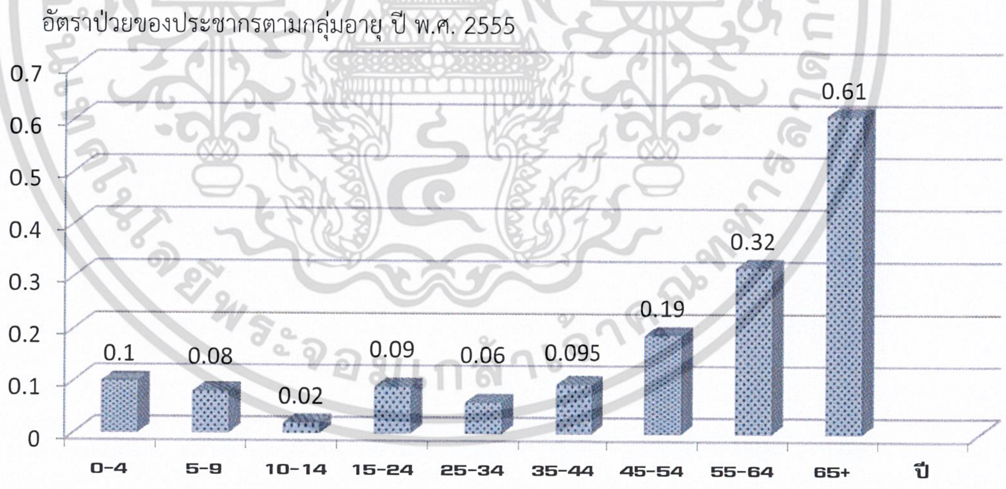
ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.87 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55-64 ปี และกลุ่มอายุ 45-54 ปี อัตราป่วย 0.51 และ 0.26 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ



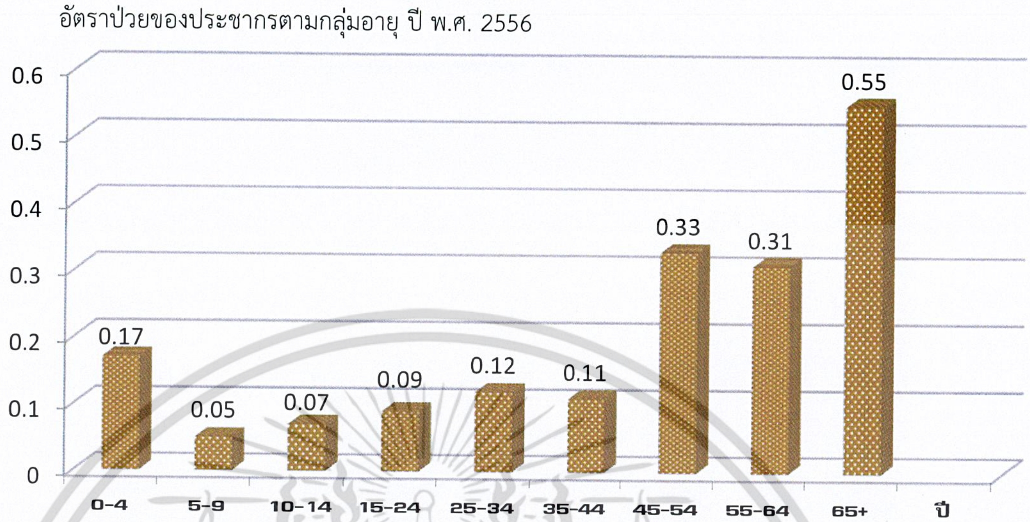
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2554
ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.69 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55-64 ปี และกลุ่มอายุ 45-54 ปี อัตราป่วย 0.35 และ 0.26 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2555
ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

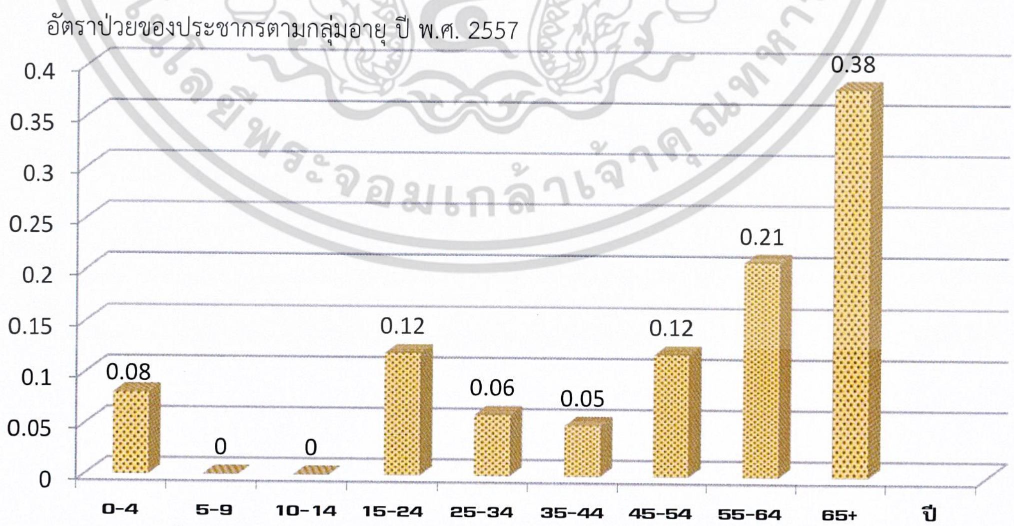
กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.61 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55-64 ปี และกลุ่มอายุ 45-54 ปี อัตราป่วย 0.32 และ 0.19 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2556

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

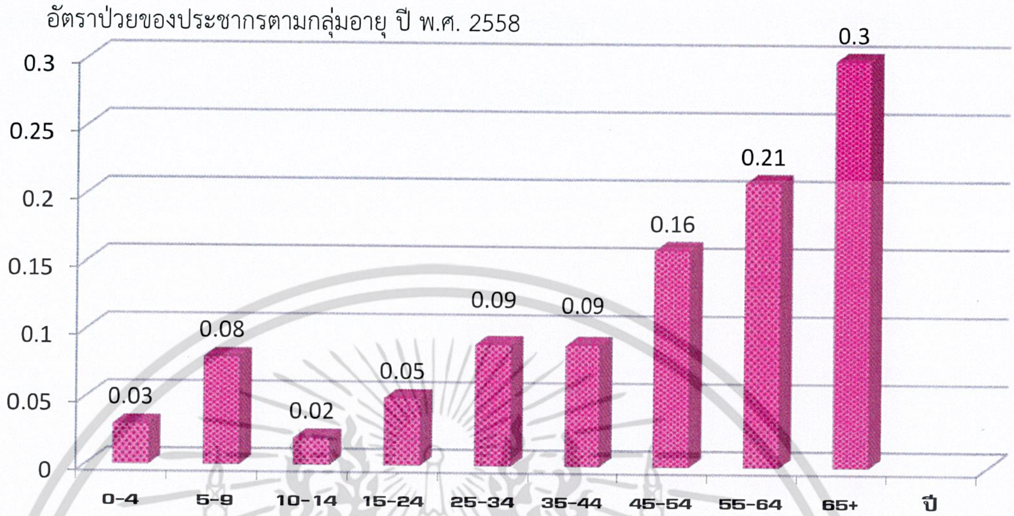
กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.55 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 45-54 ปี และกลุ่มอายุ 55-64 ปี อัตราป่วย 0.33 และ 0.31 ต่อประชากรแสนคน ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2557

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

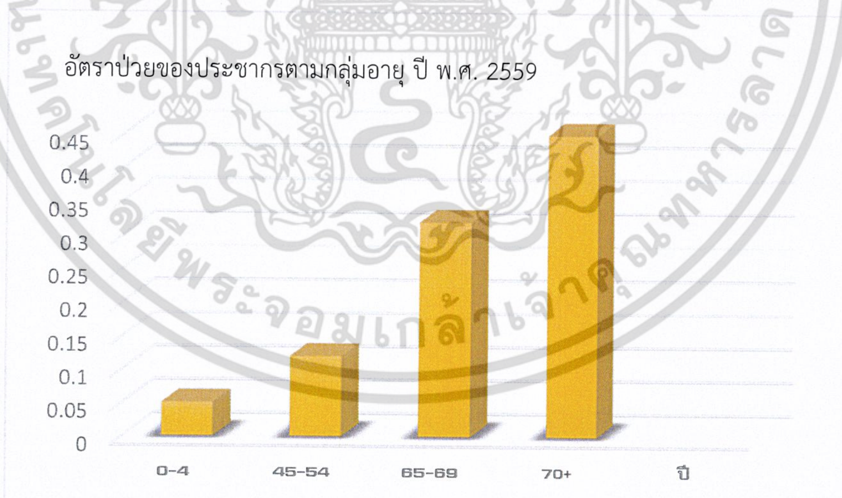
กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.38 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55-64 ปี และกลุ่มอายุ 45-54 ปี อัตราป่วย 0.21 และ 0.12 ต่อประชากรแสนคน ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2558

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

กลุ่มอายุตั้งแต่ 65 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.3 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 55-64 ปี และกลุ่มอายุ 45-54 ปี อัตราป่วย 0.21 และ 0.16 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ

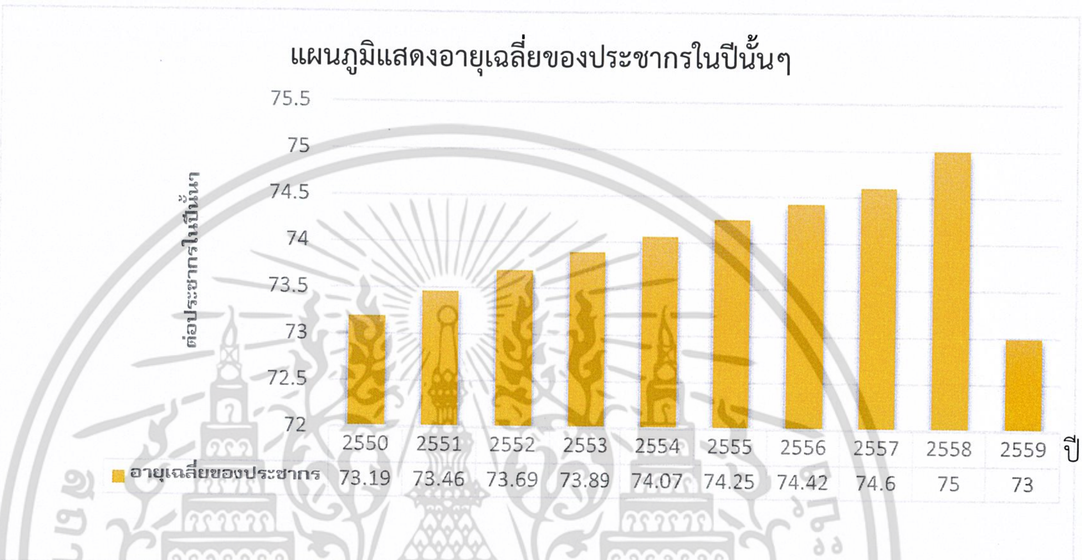


รูปที่ 3.12 กราฟแสดงอัตราป่วยของประชากรตามกลุ่มอายุ ในปี พ.ศ. 2559

ที่มา : สำนักระบาดวิทยา (http://www.boe.moph.go.th/)

กลุ่มอายุตั้งแต่ 70 ปีขึ้นไป มีอัตราป่วยสูงสุดเท่ากับ 0.45 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาคือ กลุ่มอายุ 65-69 ปี มีอัตราป่วย 0.32 กลุ่มอายุ 45-54 ปี มีอัตราป่วย 0.12 และกลุ่มอายุ 0-4 ปี มีอัตราป่วย 0.05 ต่อประชากรแสนคน

3.1.4) พิจารณาข้อมูลของประชากรในปี พ.ศ.2550-2559 โดย แบ่งตามอายุเฉลี่ยของแต่ละปี ดังนี้



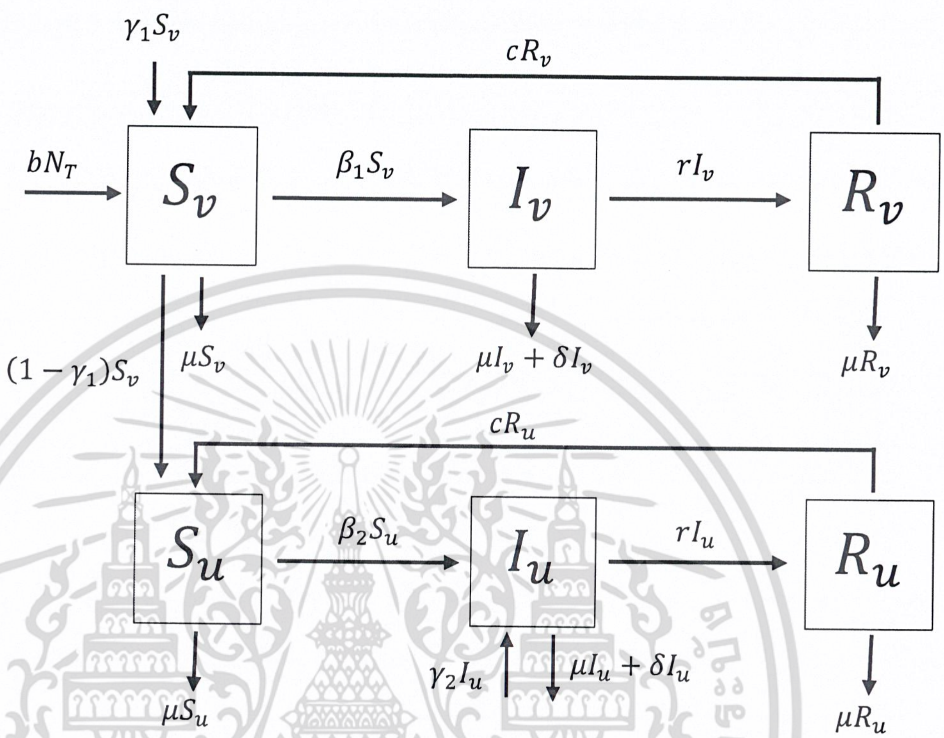
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงอายุเฉลี่ยของประชากร ในปี พ.ศ. 2550-2559

ที่มา : สำนักสถิติแห่งชาติ (http://www.nso.go.th)

ปี 2550	มี	63,038,247	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	73.19	ปี
ปี 2551	มี	63,389,730	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	73.46	ปี
ปี 2552	มี	63,525,062	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	73.69	ปี
ปี 2553	มี	63,878,267	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	73.89	ปี
ปี 2554	มี	64,076,033	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	74.07	ปี
ปี 2555	มี	64,456,695	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	74.25	ปี
ปี 2556	มี	64,785,909	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	74.42	ปี
ปี 2557	มี	65,124,716	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	74.60	ปี
ปี 2558	มี	65,729,098	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	75	ปี
ปี 2559	มี	65,931,550	คน	ประชากรมีอายุเฉลี่ย ที่	73	ปี

3.2) การสร้างแบบจำลอง

3.2.1) แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน



รูปที่ 3.14 แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

3.3) สมการคณิตศาสตร์จากแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

จากแบบจำลอง สามารถเขียนอัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรแต่ละกลุ่มได้ดังนี้

3.3.1) แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

$$\frac{dS_v}{dt} = bN_T + \gamma_1 S_v + cR_v - \beta_1 S_v - (1-\gamma_1)S_v - \mu S_v \quad (3.1)$$

$$\frac{dI_v}{dt} = \beta_1 S_v - rI_v - \mu I_v - \delta I_v \quad (3.2)$$

$$\frac{dR_v}{dt} = rI_v - cR_v - \mu R_v \quad (3.3)$$

$$\frac{dS_u}{dt} = \left(1-\gamma_1\right)S_v + cR_u - \beta_2 S_u - \mu S_u \quad (3.4)$$

$$\frac{dI_u}{dt} = \beta_2 S_u + \gamma_2 I_u - rI_u - \mu I_u - \delta I_u \quad (3.5)$$

$$\frac{dR_u}{dt} = rI_u - cR_u - \mu R_u \quad (3.6)$$

โดยกำหนดให้ $N_T = S_V + I_V + R_V + S_u + I_u + R_u$

ตัวแปร

S_V แทน ประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน

I_V แทน ประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก

R_V แทน ประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก

S_u แทน ประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน

I_u แทน ประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน

R_u แทน ประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก

พารามิเตอร์

b แทน อัตราการเกิดของประชากร

N_T แทน จำนวนประชากรทั้งหมด โดยที่ $N_T = N_v + N_u$

N_v แทน จำนวนประชากรที่ได้รับวัคซีน

N_u แทน จำนวนประชากรที่ได้รับวัคซีนเมื่อติดเชื้อบาดทะยัก

μ แทน อัตราการตายของประชากรโดยธรรมชาติ

δ แทน อัตราการตายของประชากรจากโรคบาดทะยัก

β_1 แทน อัตราเสี่ยงของประชากรที่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก

β_2 แทน อัตราเสี่ยงของประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก

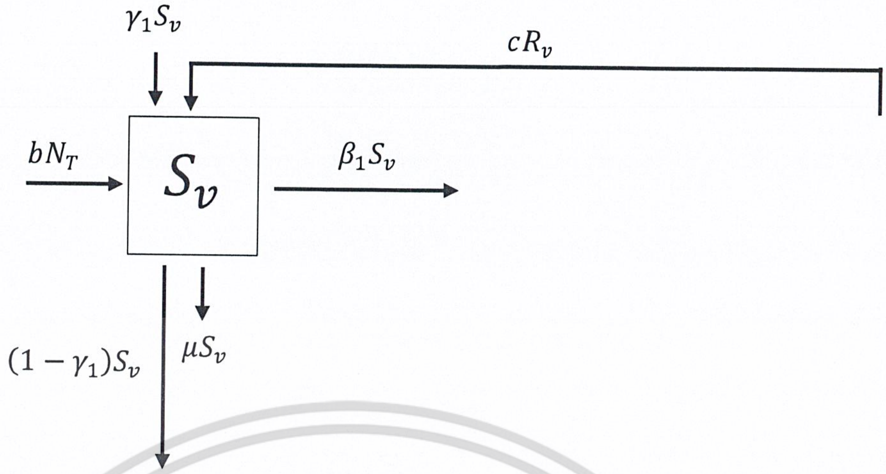
r แทน อัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก

γ_1 แทน อัตราการได้รับวัคซีนของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน

γ_2 แทน อัตราการได้รับวัคซีนของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน

c แทน อัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก

หมายเหตุ *:* เนื่องจากสมการเป็นการบอกถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรกลุ่ม = พจน์ที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มของประชากร พจน์ที่มีผลต่ออัตราการลดของประชากร



รูปที่ 3.15 แสดงส่วนประกอบแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน ของสมการ (3.1)

$$\frac{dS_v}{dt} = bN_T + \gamma_1 S_v + cR_v - \beta_1 S_v - \left(1-\gamma_1\right)S_v - \mu S_v$$

$\frac{dS_V}{dt}$ **หมายถึง** อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน

$+bN_T$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการเกิดของประชากร (b) จากประชากรทั้งหมด N_T

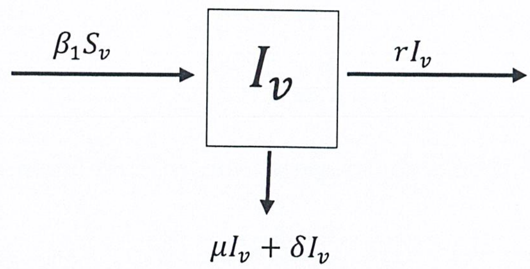
$+\gamma_1 S_V$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน จากการได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการได้รับวัคซีน γ_1

$+cR_V$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก (c)

$-\beta_1 S_V$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราเสี่ยงที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก (β_1)

$-(1-\gamma_1)S_v$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการไม่ได้รับวัคซีน $(1-\gamma_1)$

$-\mu S_V$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน เนื่องจากประชากรเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ด้วยอัตรา μ



รูปที่ 3.16 แสดงส่วนประกอบแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน ของสมการ ของสมการ (3.2)

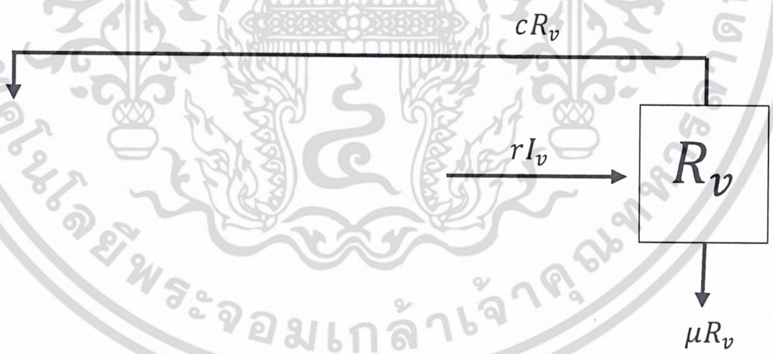
$$\frac{dI_v}{dt} = \beta_1 S_v - rI_v - \mu I_v - \delta I_v$$

$\frac{dI_V}{dt}$ **หมายถึง** อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก

$+\beta_1 S_V$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราเสี่ยงของประชากรที่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก (β_1)

$-rI_V$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก ด้วยอัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก (r)

$-(\mu I_v + \delta I_v)$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก เนื่องจากประชากรเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ด้วยอัตรา μ และเสียชีวิตจากโรคบาดทะยักด้วยอัตรา δ



รูปที่ 3.17 แสดงส่วนประกอบแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน ของสมการ ของสมการ (3.3)

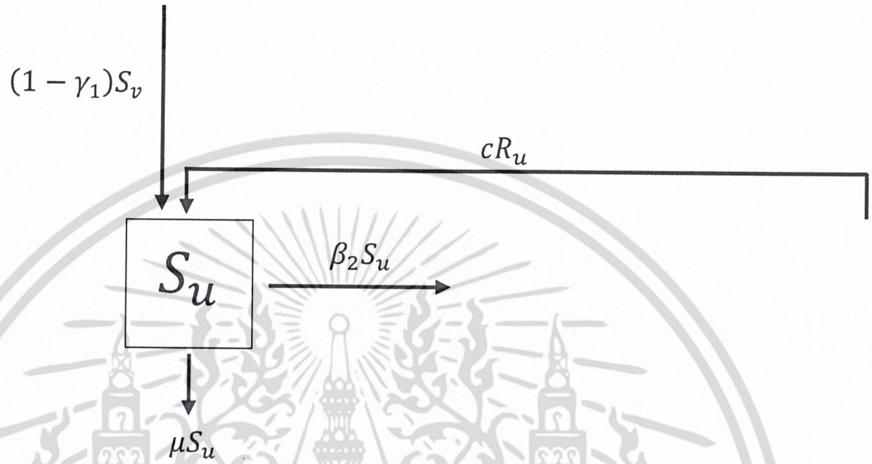
$$\frac{dR_v}{dt} = rI_v - cR_v - \mu R_v$$

$\frac{dR_V}{dt}$ **หมายถึง** อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก

$+rI_V$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก ด้วยอัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก (r)

$-cR_V$ หมายถึง การลดลงของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก เนื่องจากมีโอกาสเสี่ยงกลับไปติดเชื้อโรคบาดทะยัก ด้วยอัตรา c

$-\mu R_V$ หมายถึง การลดลงของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก เนื่องจากประชากรเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ด้วยอัตรา μ



รูปที่ 3.18 แสดงส่วนประกอบแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน ของสมการ ของสมการ (3.4)

$$\frac{dS_u}{dt} = (1-\gamma_1)S_v + cR_u - \beta_2 S_u - \mu S_u$$

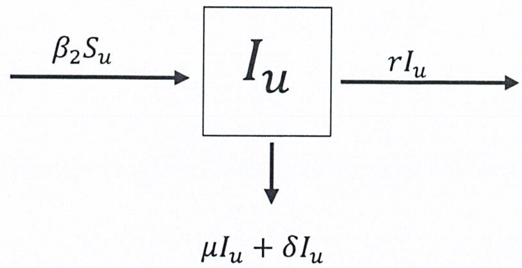
$\frac{dS_u}{dt}$ **หมายถึง** อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน

$+(1-\gamma_1)S_v$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการไม่ได้รับวัคซีน $(1-\gamma_1)$

$+cR_u$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก (c)

$-\beta_2 S_u$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราเสี่ยงที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก (β_1)

$-\mu S_u$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน เนื่องจากประชากรเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ด้วยอัตรา μ และเสียชีวิตจากโรคบาดทะยักด้วยอัตรา δ



รูปที่ 3.19 แสดงส่วนประกอบแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน ของสมการ ของสมการ (3.5)

$$\frac{dI_u}{dt} = \beta_2 S_u + \gamma_2 I_u - rI_u - \mu I_u - \delta I_u$$

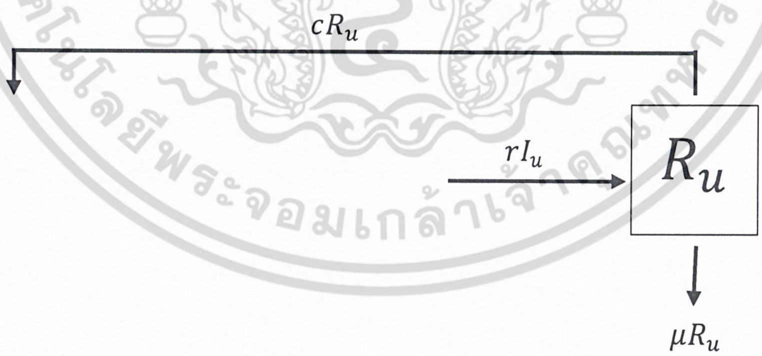
$\frac{dI_u}{dt}$ **หมายถึง** อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน

$+\beta_2 S_u$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราเสี่ยงที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก (β_2)

$+\gamma_2 I_u$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการได้รับวัคซีน (γ_2)

$-rI_u$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน ด้วยอัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก (r)

$-\mu I_u - \delta I_u$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน เนื่องจากประชากรเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ด้วยอัตรา μ และเสียชีวิตจากโรคบาดทะยักด้วยอัตรา δ



รูปที่ 3.20 แสดงส่วนประกอบแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน ของสมการ ของสมการ (3.6)

$$\frac{dR_u}{dt} = rI_u - cR_u - \mu R_u$$

$\frac{dR_u}{dt}$ **หมายถึง** อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก

$+rI_u$ **หมายถึง** การเพิ่มขึ้นของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก ด้วยอัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก (r)

$-cR_u$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก ด้วยอัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก (c)

$-\mu R_u$ **หมายถึง** การลดลงของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก เนื่องจากประชากรเสียชีวิตโดยธรรมชาติ ด้วยอัตรา μ

3.4) จุดสมดุล

จากเงื่อนไขระบบสมการของแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

กำหนดให้ $\frac{dS_v}{dt}, \frac{dI_v}{dt}, \frac{dR_v}{dt}, \frac{dS_u}{dt}, \frac{dI_u}{dt}, \frac{dR_u}{dt} = 0$

หาจุดสมดุลของระบบสมการ

ให้ $S_v^*, I_v^*, R_v^*, S_u^*, I_u^*, R_u^*$ เป็นจุดสมดุลของระบบสมการ (3.1) - (3.6)

จากแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน จะได้สมการดังนี้

$$bN_T+\gamma_1 S_v^*+cR_v^*-\beta_1 S_v^*-(1-\gamma_1)S_v^*-\mu S_v^*=0 \tag{3.7}$$

$$\beta_1 S_v^*-rI_v^*-\mu I_v^*-\delta I_v^*=0 \tag{3.8}$$

$$rI_v^*-cR_v^*-\mu R_v^*=0 \tag{3.9}$$

$$(1-\gamma_1)S_v^*+cR_u^*-\beta_2 S_u^*-\mu S_u^*=0 \tag{3.10}$$

$$\beta_2 S_u^*+\gamma_2 I_u^*-rI_u^*-\mu I_u^*-\delta I_u^*=0 \tag{3.11}$$

$$rI_u^*-cR_u^*-\mu R_u^*=0 \tag{3.12}$$

จะแสดงการแก้ระบบสมการเพื่อหาค่า

จาก (3.7) ; $(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)S_v^* = -bN_T-cR_v^*$

จะได้
$$S_v^* = \frac{-bN_T-cR_v^*}{(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)} \tag{3.13}$$

จาก (3.8) ; $(-r-\mu-\delta)I_v^* = -\beta_1 S_v^*$

จะได้
$$I_v^* = \frac{-\beta_1 S_v^*}{-r-\mu-\delta} \tag{3.14}$$

จาก (3.9) ; $(-c-\mu)R_v^* = -rI_v^*$

จะได้
$$R_v^* = \frac{-rI_v^*}{-c-\mu} \tag{3.15}$$

แทน (3.13) ; $S_v^* = \frac{-bN_T-cR_v^*}{(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)}$ ใน (3.14) ;

จะได้
$$I_v^* = \frac{-\beta_1\left(\frac{-bN_T-cR_v^*}{(\gamma_1-\beta-(1-\gamma_1)-\mu)}\right)}{-r-\mu-\delta}$$

$$I_v^* = -\beta_1\left(\frac{-bN_T-cR_v^*}{(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)}\right)\left(\frac{1}{-r-\mu-\delta}\right) \tag{3.16}$$

แทน (3.15) ; $R_v^* = \frac{-rI_v^*}{-c-\mu}$ ใน (3.16) ;

จะได้ $$I_v^* = -\beta_1\left(\frac{-bN_T-c\left(\frac{-rI_v^*}{-c-\mu}\right)}{(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)}\right)\left(\frac{1}{-r-\mu-\delta}\right)$$

$$I_v^* = \frac{-\beta_1\left(-bN_T-c\left(\frac{-rI_v^*}{-c-\mu}\right)\right)}{(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)}$$

$$(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)I_v^* = -\beta_1\left(-bN_T-c\left(\frac{-rI_v^*}{-c-\mu}\right)\right)$$

$$(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)I_v^* = \beta_1 bN_T-\left(\frac{\beta_1 crI_v^*}{-c-\mu}\right)$$

$$(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)I_v^*+\left(\frac{\beta_1 crI_v^*}{-c-\mu}\right) = \beta_1 bN_T$$

$$\left(\frac{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr}{-c-\mu}\right)I_v^* = \beta_1 bN_T$$

จะได้ $$I_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr} \qquad (3.17)$$

แทน (3.17) ; $I_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr}$ ใน (3.14) ;

จะได้ $$\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr} = \frac{-\beta_1 S_v^*}{-r-\mu-\delta}$$

$$S_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)} \qquad (3.18)$$

แทน (3.17) ; $I_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr}$ ใน (3.15) ;

จะได้ $$R_v^* = \frac{-r\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr}\right)}{-c-\mu}$$

$$R_v^* = \frac{-r\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{\left((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr\right)(-c-\mu)}$$

แทน (3.18) ; $S_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}$ ใน (3.10) ;

จะได้ $$(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)+cR_u^*-\beta_2 S_u^*-\mu S_u^*=0 \qquad (3.19)$$

จาก (3.19) ; จะได้

$$(-\beta_2-\mu)S_u^* = -\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)-cR_u^*\right)$$

$$S_u^*=\frac{-\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)-cR_u^*\right)}{-\beta_2-\mu} \tag{3.20}$$

จาก (3.11) ; $\beta_2 S_u^*+\gamma_2 I_u^*-rI_u^*-\mu I_u^*-\delta I_u^*=0$

จะได้ $(\gamma_2-r-\mu-\delta)I_u^*=-\beta_2 S_u^*$

$$I_u^*=\frac{-\beta_2 S_u^*}{(\gamma_2-r-\mu-\delta)} \tag{3.21}$$

จาก (3.12) ; $rI_u^*-cR_u^*-\mu R_u^*=0$

จะได้ $(-c-\mu)R_u^*=-rI_u^*$

$$R_u^*=\frac{-rI_u^*}{-c-\mu} \tag{3.22}$$

แทน (3.20) ใน (3.21) ;

จะได้ $$I_u^*=\frac{-\beta_2\left(\frac{-\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)-cR_u^*\right)}{-\beta_2-\mu}\right)}{(\gamma_2-r-\mu-\delta)}$$

$$I_u^*=\frac{-\beta_2\left(-\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\right)-cR_u^*\right)}{-\beta_2-\mu}\left(\frac{1}{\gamma_2-r-\mu-\delta}\right)$$

$$I_u^*=-\beta_2\left(-\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\right)-cR_u^*\right)\left(\frac{1}{(-\beta_2-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)}\right) \tag{3.23}$$

แทน (3.22) ใน (3.23) ;

จะได้ $$I_u^*=-\beta_2\left(-\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\right)-c\left(\frac{-rI_u^*}{-c-\mu}\right)\right)\left(\frac{1}{(-\beta_2-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)}\right)$$

$$(-\beta_2-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)I_u^*=-\beta_2\left(-\left((1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\right)-c\left(\frac{-rI_u^*}{-c-\mu}\right)\right)$$

$$(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta_2-\mu)I_u^*=\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)-\frac{\beta_2 crI_u^*}{(-c-\mu)}$$

$$(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta_2-\mu)I_u^*+\frac{\beta_2 crI_u^*}{(-c-\mu)}=\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)$$

$$\left(\frac{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}{-c-\mu}\right)I_u^*=\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)$$

$$I_u^* = \beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right) \quad (3.24)$$

แทน (3.24) ใน (3.21) ;

จะได้ $\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right) = \frac{-\beta_2 S_u^*}{(\gamma_2-r-\mu-\delta)}$

$$S_u^* = -\frac{1}{\beta_2}\left(\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right)(\gamma_2-r-\mu-\delta)\right)$$

แทน (3.24) ใน (3.22) ;

$$R_u^* = \frac{-r\left(\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right)\right)}{-c-\mu}$$

$$R_u^* = \frac{1}{-c-\mu}\left(-r\left(\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right)\right)\right)$$

ดังนั้นจะได้จุดสมดุล (Equilibrium point) ของระบบสมการดังนี้

$$S_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}$$

$$I_v^* = \frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{(-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr}$$

$$R_v^* = \frac{-r\beta_1 bN_T(-c-\mu)}{((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)(-c-\mu)}$$

$$S_u^* = -\frac{1}{\beta_2}\left(\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right)(\gamma_2-r-\mu-\delta)\right)$$

$$I_u^* = \beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right)$$

$$R_u^* = \frac{1}{-c-\mu}\left(-r\left(\beta_2(1-\gamma_1)\left(\frac{\beta_1 bN_T(-c-\mu)(-r-\mu-\delta)}{-\beta_1((-c-\mu)(\gamma_1-\beta_1-(1-\gamma_1)-\mu)(-r-\mu-\delta)+\beta_1 cr)}\right)\left(\frac{-c-\mu}{(-c-\mu)(\gamma_2-r-\mu-\delta)(-\beta-\mu)+\beta_2 cr}\right)\right)\right)$$

ตรวจสอบจุดสมดุลด้วยโปรแกรม Mathematica

แทน $S_v^*=X$, $I_v^*=Y$,$R_v^*=Z$, $S_u^*=S$,$I_u^*=A$,$R_u^*=R$

```
Solve[{b*N + γ1*X + c*Z - β3*X - (1 - γ1)*X - μ*X == 0, β3*X - r*Y - (μ*Y + δ*Y) == 0,
  r*Y - c*Z - μ*Z == 0, (1 - γ1)*X + c*R - β4*S - μ*S == 0, β4*S + γ2*A - r*A - (μ*A + δ*A) == 0,
  r*A - c*R - μ*R == 0}, {X, Y, Z, S, A, R}]
```

$$\Big\{\Big\{R \to \frac{b\,N\,r\,\beta 4\,(1-\gamma 1)\,(-c-\mu)\,(-r-\delta-\mu)}{(-c\,r\,\beta 3-(-c-\mu)\,(-1-\beta 3+2\,\gamma 1-\mu)\,(-r-\delta-\mu))\,(-c\,r\,\beta 4-(-c-\mu)\,(-\beta 4-\mu)\,(-r+\gamma 2-\delta-\mu))},$$

$$S \to \frac{b\,N\,(1-\gamma 1)\,(-c-\mu)^2\,(-r-\delta-\mu)\,(-r+\gamma 2-\delta-\mu)}{(-c\,r\,\beta 3-(-c-\mu)\,(-1-\beta 3+2\,\gamma 1-\mu)\,(-r-\delta-\mu))\,(-c\,r\,\beta 4-(-c-\mu)\,(-\beta 4-\mu)\,(-r+\gamma 2-\delta-\mu))},$$

$$A \to -\frac{b\,N\,\beta 4\,(1-\gamma 1)\,(-c-\mu)^2\,(-r-\delta-\mu)}{(-c\,r\,\beta 3-(-c-\mu)\,(-1-\beta 3+2\,\gamma 1-\mu)\,(-r-\delta-\mu))\,(-c\,r\,\beta 4-(-c-\mu)\,(-\beta 4-\mu)\,(-r+\gamma 2-\delta-\mu))},$$

$$Z \to \frac{b\,N\,r\,\beta 3}{-c\,r\,\beta 3-(-c-\mu)\,(-1-\beta 3+2\,\gamma 1-\mu)\,(-r-\delta-\mu)},$$

$$X \to \frac{b\,N\,(-c-\mu)\,(-r-\delta-\mu)}{-c\,r\,\beta 3-(-c-\mu)\,(-1-\beta 3+2\,\gamma 1-\mu)\,(-r-\delta-\mu)},$$

$$Y \to -\frac{b\,N\,\beta 3\,(-c-\mu)}{-c\,r\,\beta 3-(-c-\mu)\,(-1-\beta 3+2\,\gamma 1-\mu)\,(-r-\delta-\mu)}\Big\}\Big\}$$

3.5) การวิเคราะห์ความเสถียรภาพ

กำหนดให้

$$f_1 = \frac{dS_v}{dt} = bN_T + \gamma_1 S_v + cR_v - \beta_1 S_v - (1-\gamma_1)S_v - \mu S_v$$

$$f_2 = \frac{dI_v}{dt} = \beta_1 S_v - rI_v - \mu I_v - \delta I_v$$

$$f_3 = \frac{dR_v}{dt} = rI_v - cR_v - \mu R_v$$

$$f_4 = \frac{dS_u}{dt} = (1-\gamma_1)S_v + cR_u - \beta_2 S_u - \mu S_u$$

$$f_5 = \frac{dI_u}{dt} = \beta_2 S_u + \gamma_2 I_u - rI_u - \mu I_u - \delta I_u$$

$$f_6 = \frac{dR_u}{dt} = rI_u - cR_u - \mu R_u$$

จะได้จาโคเบียนเมทริกซ์ คือ

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial S_v} & \frac{\partial f_1}{\partial I_v} & \frac{\partial f_1}{\partial R_v} & \frac{\partial f_1}{\partial S_u} & \frac{\partial f_1}{\partial I_u} & \frac{\partial f_1}{\partial R_u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial S_v} & \frac{\partial f_2}{\partial I_v} & \frac{\partial f_2}{\partial R_v} & \frac{\partial f_2}{\partial S_u} & \frac{\partial f_2}{\partial I_u} & \frac{\partial f_2}{\partial R_u} \\ \frac{\partial f_3}{\partial S_v} & \frac{\partial f_3}{\partial I_v} & \frac{\partial f_3}{\partial R_v} & \frac{\partial f_3}{\partial S_u} & \frac{\partial f_3}{\partial I_u} & \frac{\partial f_3}{\partial R_u} \\ \frac{\partial f_4}{\partial S_v} & \frac{\partial f_4}{\partial I_v} & \frac{\partial f_4}{\partial R_v} & \frac{\partial f_4}{\partial S_u} & \frac{\partial f_4}{\partial I_u} & \frac{\partial f_4}{\partial R_u} \\ \frac{\partial f_5}{\partial S_v} & \frac{\partial f_5}{\partial I_v} & \frac{\partial f_5}{\partial R_v} & \frac{\partial f_5}{\partial S_u} & \frac{\partial f_5}{\partial I_u} & \frac{\partial f_5}{\partial R_u} \\ \frac{\partial f_6}{\partial S_v} & \frac{\partial f_6}{\partial I_v} & \frac{\partial f_6}{\partial R_v} & \frac{\partial f_6}{\partial S_u} & \frac{\partial f_6}{\partial I_u} & \frac{\partial f_6}{\partial R_u} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -1-\beta_1+2\gamma_1-\mu & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ \beta_1 & -r-\mu-\delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & -c-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 1-\gamma_1 & 0 & 0 & -\beta_2-\mu & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & \beta_2 & \gamma_2-r-\mu-\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & -c-\mu \end{bmatrix}$$

ค่าลักษณะเฉพาะสามารถหาได้จากสมการลักษณะเฉพาะ

$$det(J - \lambda I_6) = 0$$

เมื่อ I_6 เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด 6×6

$$I_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$\begin{vmatrix} (-1-\beta_1+2\gamma_1-\mu)-\lambda & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ \beta_1 & (-r-\mu-\delta)-\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & (-c-\mu)-\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 1-\gamma_1 & 0 & 0 & (-\beta_2-\mu)-\lambda & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & \beta_2 & (\gamma_2-r-\mu-\delta)-\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & (-c-\mu)-\lambda \end{vmatrix} = 0$$

จะได้สมการลักษณะเฉพาะคือ

$$\lambda^6+1.24396\lambda^5+0.228249\lambda^4+0.0172527\lambda^3+0.000565859\lambda^2+6.57032\times10^{-6}\lambda+7.54791\times10^{-10}=0$$

วิธีการทดสอบแบบเราท์เฮอร์วิธ (Routh-Hurwitz criteria)

กำหนดให้ $\lambda^k + a_1\lambda^{k-1} + a_2\lambda^{k-2} + \cdots + a_k = 0$

จะได้ว่า

$$\lambda^6 + 1.24403\lambda^5 + 0.22833\lambda^4 + 0.0172652\lambda^3 + 0.000566595\lambda^2 + 6.5891\times10^{-6}\lambda + 9.29832\times10^{-10} = 0$$

โดยที่

$a_1 = 1.24403$, $a_2 = 0.22833$, $a_3 = 0.0172652$, $a_4 = 0.000566595$, $a_5 = 6.5891\times10^{-6}$, $a_6 = 9.29832\times10^{-10}$

จากสมการลักษณะเฉพาะ (2.1) กำหนดให้มี $k = 6$ เมทริกซ์

โดยที่เทอมของ (l, m) ในเมทริกซ์ H_j คือ

a_{2l-m} สำหรับ $0 < 2l - m < k$

1 สำหรับ $2l = m$

0 สำหรับ $2l < m$ หรือ $2l > k + m$

จะได้ว่า

$H_1 = (a_1)$; $H_1 = (1.24403)$,

$H_2 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ a_3 & a_2 \end{pmatrix}$; $H_2 = \begin{pmatrix} 1.24403 & 1 \\ 0.0172652 & 0.22833 \end{pmatrix}$,

$H_3 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{pmatrix}$; $H_3 = \begin{pmatrix} 1.24403 & 1 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 \end{pmatrix}$,

จาก $H_j = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 & \cdots & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{2j-1} & a_{2j-2} & a_{2j-3} & a_{2j-3} & \cdots & a_j \end{pmatrix}$

เมื่อ $j = 4,5$ จะได้

$$H_4 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 \end{pmatrix};$$

$$H_4 = \begin{pmatrix} 1.24403 & 1 & 0 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 \\ 0 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.0005665959 \end{pmatrix},$$

$$H_5 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 \\ a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & a_5 \end{pmatrix};$$

$$H_5 = \begin{pmatrix} 1.24403 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 & 0 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 \\ 0 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 \\ 0 & 0 & 1.24403 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} \end{pmatrix},$$

จาก $H_k = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & a_j \end{pmatrix}$

เมื่อ $k = 6$ จะได้

$$H_6 = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 \\ a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & a_5 \\ a_{11} & a_{10} & a_9 & a_8 & a_7 \end{pmatrix};$$

$$H_6 = \begin{pmatrix} 1.24403 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 & 0 & 0 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 \\ 0 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 \\ 0 & 0 & 1.24403 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 \\ 0 & 0 & 1 & 0.22833 & 0.000566595 & 9.29832\times10^{-10} \end{pmatrix}$$

แล้วทุกค่าเจาะจงจะต้องมีส่วนจริงเป็นลบ จุดสมดุล $\overline{N}$ จะเสถียรภาพก็ต่อเมื่อดีเทอร์มิแนนท์ ของทุกเมทริกซ์เฮอร์วิธจะต้องเป็นบวก ซึ่งก็คือ

$$detH_j > 0 \qquad \text{โดยที่ } j = 1,2,3,\ldots,k$$

$$detH_1 = |1.24403| = 1.24403 > 0$$

$$detH_2 = \begin{vmatrix} 1.24403 & 1 \\ 0.0172652 & 0.22833 \end{vmatrix} = 0.266783 > 0$$

$$detH_3 = \begin{vmatrix} 1.24403 & 1 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 \end{vmatrix} = 0.0037374 > 0$$

$$detH_4 = \begin{vmatrix} 1.24403 & 1 & 0 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 \\ 0 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.0005665959 \end{vmatrix}$$

$$= 1.72113\times10^{-6} > 0$$

$$detH_5 = \begin{vmatrix} 1.24403 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 & 0 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 \\ 0 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 \\ 0 & 0 & 1.24403 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} \end{vmatrix}$$

$$= 0.00105942 > 0$$

$detH_6$

$$= \begin{vmatrix} 1.24403 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 & 0 & 0 \\ 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 & 1.24403 & 1 \\ 0 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 & 0.0172652 & 0.22833 \\ 0 & 0 & 1.24403 & 9.29832\times10^{-10} & 6.5891\times10^{-6} & 0.000566595 \\ 0 & 0 & 1 & 0.22833 & 0.000566595 & 9.29832\times10^{-10} \end{vmatrix}$$

$= 0.0202067 \ \ > 0$

จะเห็นว่า

$detH_j > 0$ เมื่อ $j = 1,2,3,4,5,6$ ซึ่งตรงกับเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz criteria แสดงว่าจุดสมดุลนี้มีความเสถียรภาพ

บทที่ 4

ผลการวิจัย และอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงตัวเลข โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสำรวจเก็บข้อมูลเชิงสถิติในชีวิตจริงเกี่ยวกับโรคบาดทะยัก ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปร (variables) ต่างๆ ของแบบจำลองโรคบาดทะยักในประเทศไทย

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าตัวแปรเริ่มต้น	หน่วย
S_v	จำนวนประชากรที่ได้รับวัคซีน γ_1	600	คน
I_v	จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน	200	คน
R_v	จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน	400	คน
S_u	จำนวนประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีน	150	คน
I_u	จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน γ_2	50	คน
R_u	จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน	100	คน
N	จำนวนประชากรทั้งหมด $= S_v + I_v + R_v + S_u + I_u + R_u$	1500	คน

ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์แสดงพารามิเตอร์ (parameters) ต่างๆ ของแบบจำลองโรคบาดทะยักในประเทศไทย

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าตัวแปร	หน่วย
b	อัตราการเกิดของประชากร	$\frac{1}{365 \times 73.94}$	ต่อคนต่อวัน
μ	อัตราการเสียชีวิตของประชากรโดยธรรมชาติ	$\frac{1}{365 \times 73.94}$	ต่อคนต่อวัน
δ	อัตราการตายของประชากรจากโรคบาดทะยัก	$\frac{1}{10 \times 365}$	ต่อคนต่อวัน
β_1	อัตราเสี่ยงของประชากรที่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก	0.04	ต่อคนต่อวัน
β_2	อัตราเสี่ยงของประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก	0.07	ต่อคนต่อวัน
r	อัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก	$\frac{1}{30}$	ต่อคนต่อวัน

γ_1	อัตราคนที่ได้รับวัคซีนของประชากรที่ได้รับวัคซีน	$0.8 \times \left(\frac{1}{365 \times 73.94}\right)$	-
γ_2	อัตราคนที่ได้รับวัคซีนของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก	$0.2 \times \left(\frac{1}{365 \times 73.94}\right)$	-
c	อัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก	$\frac{1}{30}$	ต่อคนต่อวัน

คำอธิบายค่าตัวแปรเสริมของแบบจำลองในตารางที่ 4.2

b คือ อัตราการเกิดของประชากร คิดจาก อายุเฉลี่ยของประชากรต่อคนในปีนั้น

ดังนั้นจะได้ $b = \frac{1}{365\times73.94}$ ต่อคนต่อวัน

μ คือ อัตราการเสียชีวิตของประชากร (เสียชีวิตโดยธรรมชาติ) คิดจาก อายุเฉลี่ยของประชากรต่อคนในปีนั้น

ดังนั้นจะได้ $\mu = \frac{1}{365\times73.94}$ ต่อคนต่อวัน

δ คือ อัตราการเสียชีวิตของประชากร (เสียชีวิตโดยโรคบาดทะยัก) คิดจาก การรอดชีวิตประมาณ 10 ปี

ดังนั้นจะได้ $\delta = \frac{1}{10\times365}$ ต่อคนต่อวัน

β_1 คือ อัตราเสี่ยงของประชากรที่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก คิดจาก ความน่าจะเป็นที่ประชากรจะได้รับเชื้อโรคบาดทะยักเริ่มต้น (เลือกจากช่วง [0,1])

ดังนั้นจะได้ $\beta_1 = 0.04$ ต่อคนต่อวัน

β_2 คือ อัตราเสี่ยงของประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก คิดจาก ความน่าจะเป็นที่ประชากรจะได้รับเชื้อโรคบาดทะยักเริ่มต้น (เลือกจากช่วง [0,1])

ดังนั้นจะได้ $\beta_2 = 0.07$ ต่อคนต่อวัน

r คือ อัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก คิดจาก ระยะเวลาที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับการได้รักษาซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 30 วัน

ดังนั้นจะได้ $r = \frac{1}{30}$ ต่อคนต่อวัน

γ_1 คือ อัตราคนที่ได้รับวัคซีนของประชากรที่ได้รับวัคซีน คิดจาก โอกาสเกิดโรคบาดทะยักกรณีที่ผู้เสี่ยงติดเชื้อได้รับวัคซีน 80 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจะได้ $\gamma_1 = 0.8 \times \left(\frac{1}{365\times73.94}\right)$ ต่อคนต่อวัน

γ_2 คือ อัตราคนที่ได้รับวัคซีนของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก คิดจาก โอกาสเกิดโรคบาดทะยักกรณีที่ผู้ป่วยได้รับวัคซีน 20 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจะได้ $\gamma_2 = 0.2 \times \left(\frac{1}{365 \times 73.94}\right)$ ต่อคนต่อวัน

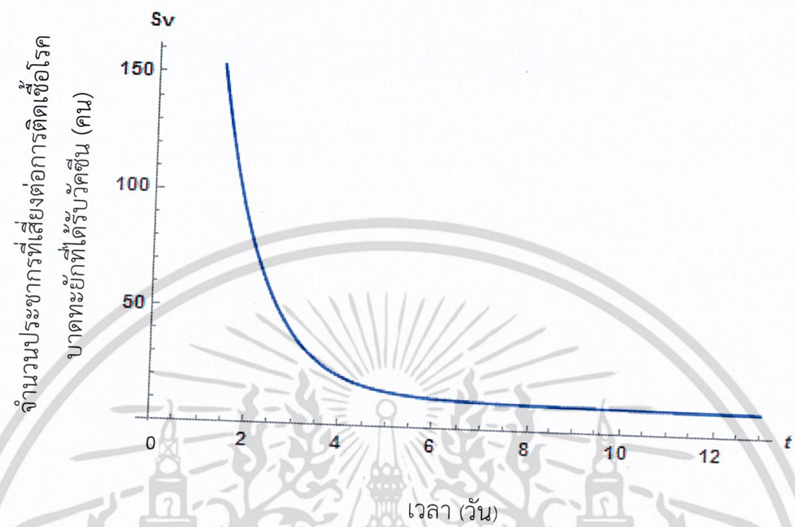
c คือ อัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก คิดจาก ระยะเวลาที่หายเป็นปกติแล้วมีโอกาสกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 30 วัน

ดังนั้นจะได้ $c = \frac{1}{30}$ ต่อคนต่อวัน

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณด้วยโปรแกรม $Mathematica^{®}$

4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยัก

จากการศึกษาเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาคำนวณแล้ว ทำให้ได้กราฟ ดังต่อไปนี้

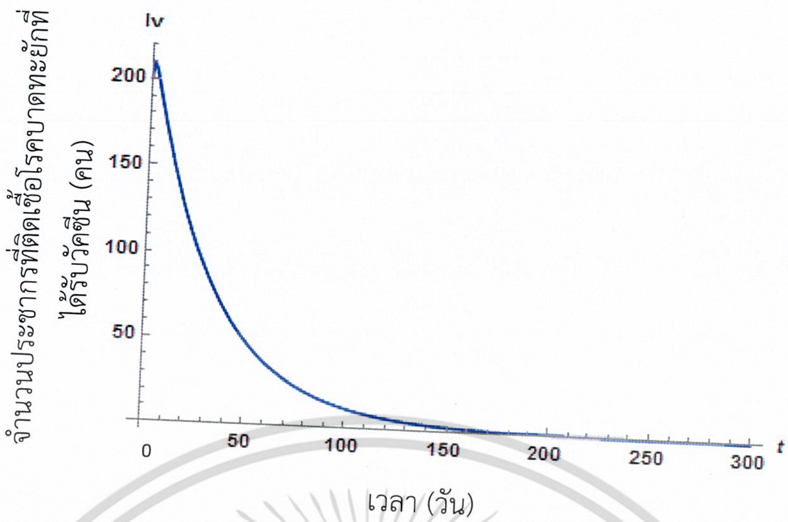


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v เทียบกับเวลา (วัน)

โดยมีค่าพารามิเตอร์

$b = 0.00003705$, $\mu = 0.00003705$, $\beta_1 = 0.04$, $\beta_2 = 0.07$, $\gamma 1 = 0.00002964$, $\gamma 2 = 0.00000741$

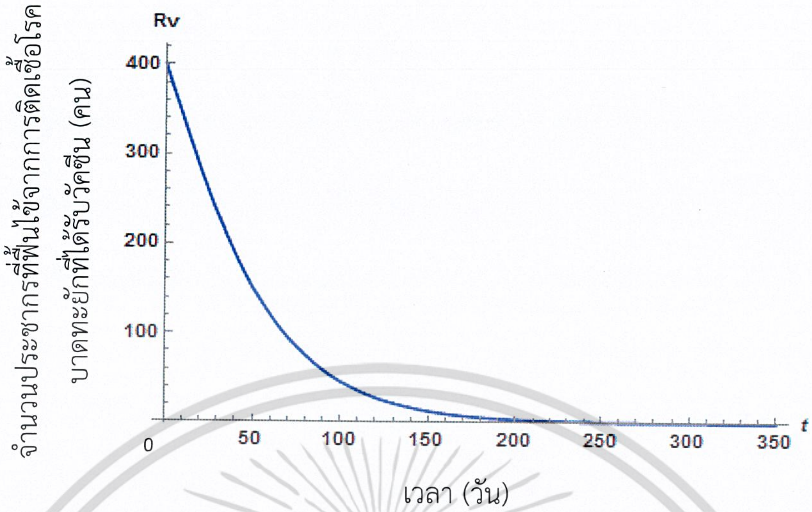
จากรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า จำนวนของผู้ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยัก (S_v) จะลู่เข้าสู่ 11.6521 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลาประมาณ 8 วัน นั่นแสดงว่า จำนวนของผู้ที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยัก (S_v) มีจำนวนคงที่ ณ เวลา 8 วัน และสามารถควบคุมการติดเชื้อของโรคได้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v เทียบกับเวลา (วัน) โดยมีค่าพารามิเตอร์

b = 0.00003705 , μ = 0.00003705 , β_1 = 0.04 , β_2 = 0.07 , γ1 = 0.00002964 , γ2 = 0.00000741

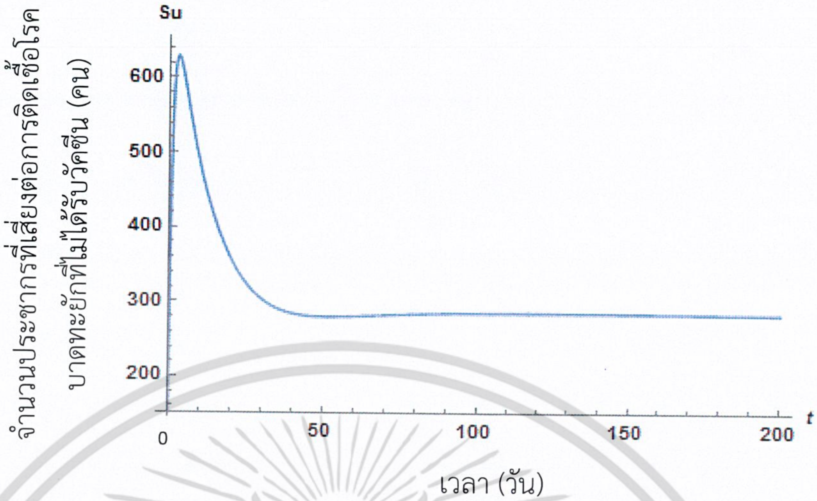
จากรูปที่ 4.2 อธิบายได้ว่า จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) จะลู่เข้าสู่ 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลาประมาณ 237 วัน นั่นแสดงว่าจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) มีจำนวนคงที่ ณ 237 วัน และสามารถควบคุมการติดเชื้อของโรคได้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v เทียบกับเวลา(วัน) โดยมีค่าพารามิเตอร์

$b = 0.00003705$, $\mu = 0.00003705$, $\beta_1 = 0.04$, $\beta_2 = 0.07$,$\gamma 1 = 0.00002964$, $\gamma 2 = 0.00000741$

จากรูปที่ 4.3 อธิบายได้ว่า จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) จะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลาประมาณ 288 วัน นั่นแสดงว่า จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) มีจำนวนคงที่ ณ เวลา 288 วัน และสามารถควบคุมการติดเชื้อของโรคได้



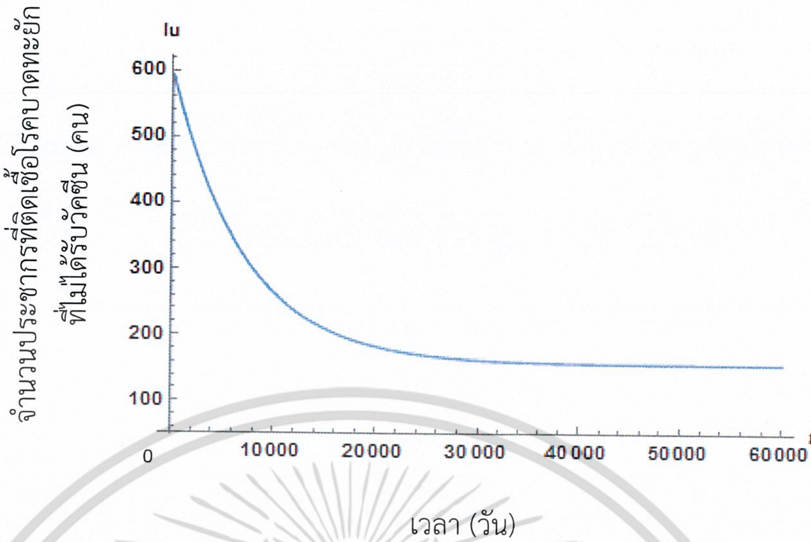
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน S_u

เทียบกับเวลา (วัน)

โดยมีค่าพารามิเตอร์

b = 0.00003705 , μ = 0.00003705 , β_1 = 0.04 , β_2 = 0.07 ,γ1 = 0.00002964 , γ2= 0.00000741

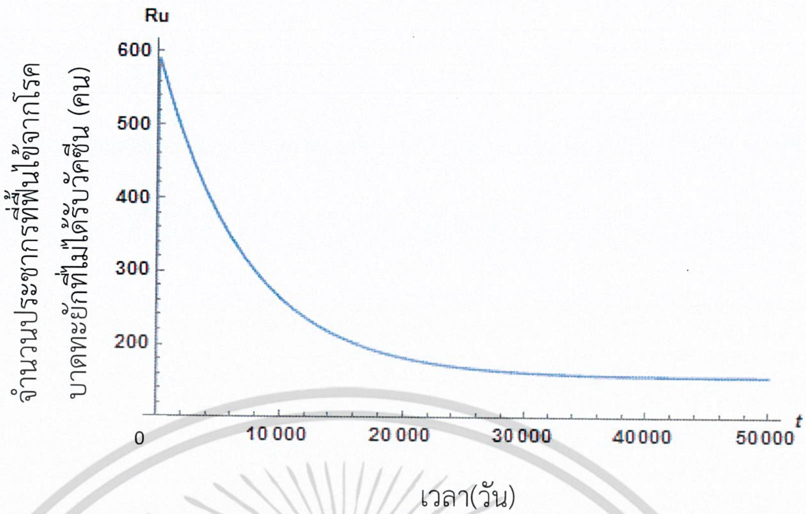
จากรูปที่ 4.4 อธิบายได้ว่า จำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) จะลู่เข้าสู่ 285.3901 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลาประมาณ 111 วัน นั่นแสดงว่า จำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) มีจำนวนคงที่ ณ เวลา 111 วัน และสามารถควบคุมการติดเชื้อของโรคได้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_u เทียบกับเวลา(วัน) โดยมีค่าพารามิเตอร์

$b = 0.00003705$, $\mu = 0.00003705$, $\beta_1 = 0.04$, $\beta_2 = 0.07$,$\gamma 1 = 0.00002964$, $\gamma 2= 0.00000741$

จากรูปที่ 4.5 อธิบายได้ว่า จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) จะลู่เข้าสู่ 159.756 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลาประมาณ 34972 วัน นั่นแสดงว่า จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) มีจำนวนคงที่ ณ เวลา 34972 วัน และสามารถควบคุมการติดเชื้อของโรคได้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_u เทียบกับเวลา (วัน)

โดยมีค่าพารามิเตอร์

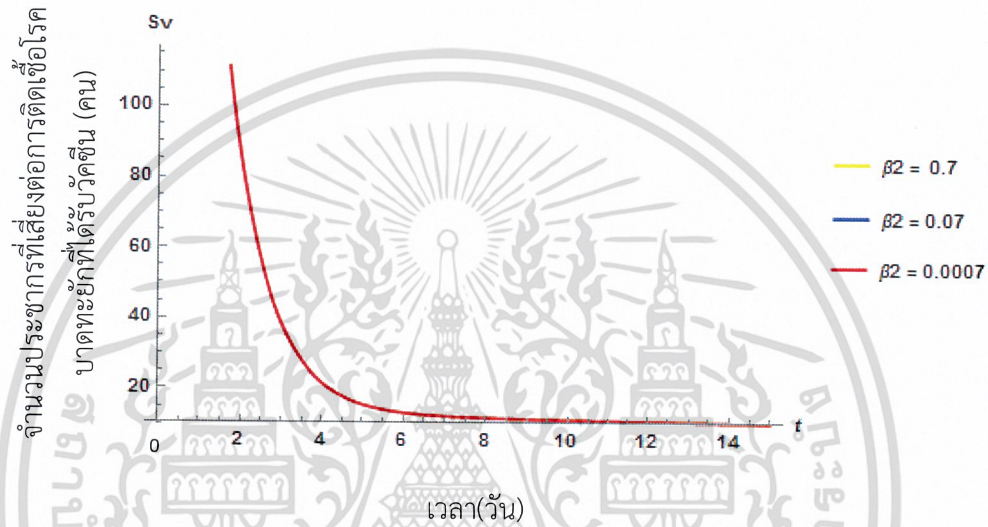
b = 0.00003705 , μ = 0.00003705 , β_1 = 0.04 , β_2 = 0.07 ,$\gamma 1$ = 0.00002964 , $\gamma 2$= 0.00000741

จากรูปที่ 4.6 อธิบายได้ว่า จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) จะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลาประมาณ 29437 วัน นั่นแสดงว่า จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) มีจำนวนคงที่ ณ เวลา 29437 วัน และสามารถควบคุมการติดเชื้อของโรคได้

พิจารณาค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว พบว่า β , r และ c เป็นค่าไม่คงที่ สามารถเปลี่ยนค่าได้ เมื่อเปลี่ยนค่าแล้วนำมาคำนวณในโปรแกรม $Mathematica^{®}$ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังต่อไปนี้

1. ค่าพารามิเตอร์ β เปลี่ยน โดยที่ค่าพารามิเตอร์อื่น คงที่ จะแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

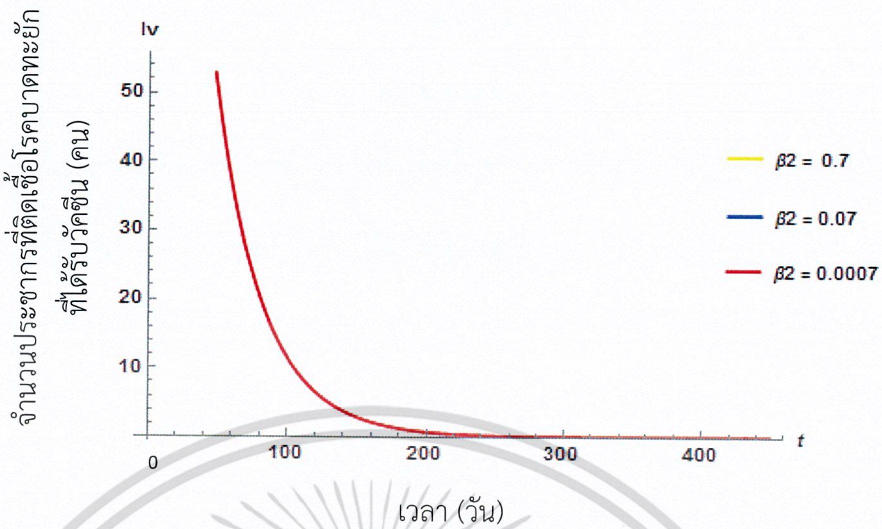
กรณี 1 เมื่อค่าพารามิเตอร์ β_1 คงที่ เท่ากับ 0.04 และให้ β_2 เพิ่มขึ้นจาก 0.07 เป็น 0.7 และลดลงจาก 0.07 เป็น 0.0007 จะได้กราฟการลู่เข้าสู่จุดสมดุล ดังนี้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v เทียบกับเวลา (วัน) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่เท่ากับ 0.04 และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.7 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) แทนด้วยเส้นสีเหลือง จะลู่เข้าสู่ 11.6521 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 8 วัน เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน และ β_2 ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 11.6521 (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 8 วัน

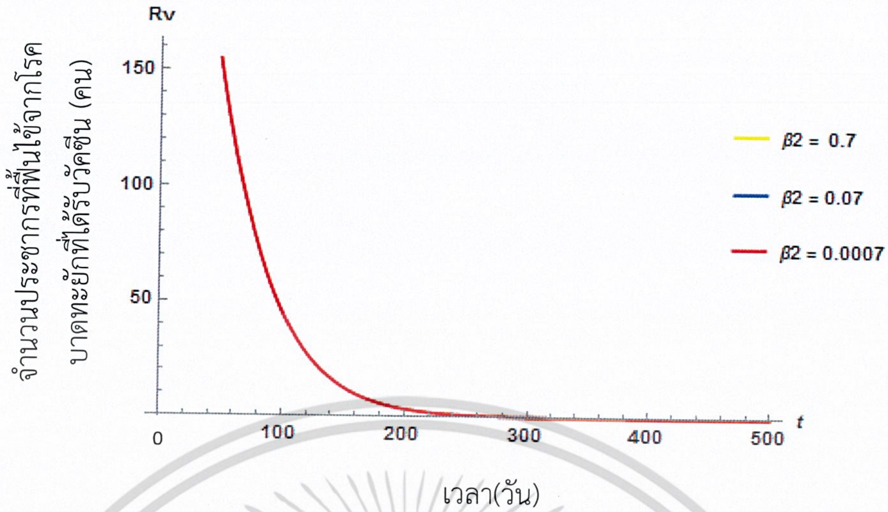
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่เท่ากับ 0.04 และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.8 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) แทนด้วยเส้นสีเหลือง จะลู่เข้าสู่ 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 237 วัน เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน และลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้า 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 237 วัน

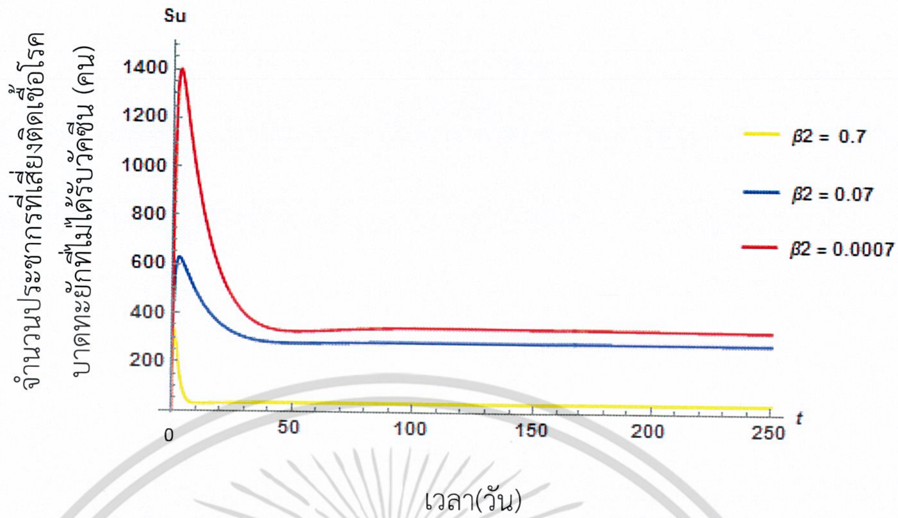
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่เท่ากับ 0.04 และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.9 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) แทนด้วยเส้นสีเหลือง จะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 288 วัน เหมือนกับ กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v)เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน และลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 288 วัน

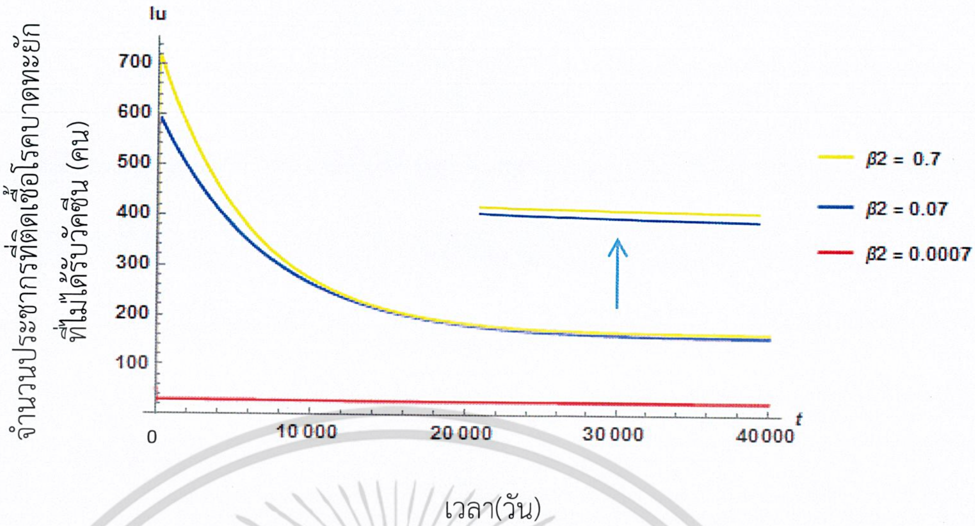
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน S_u เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่เท่ากับ 0.04 และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.10 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1คงที่ และ β_2เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 30.8154 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 48 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 285.39 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 111 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 386.24 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 142 วัน

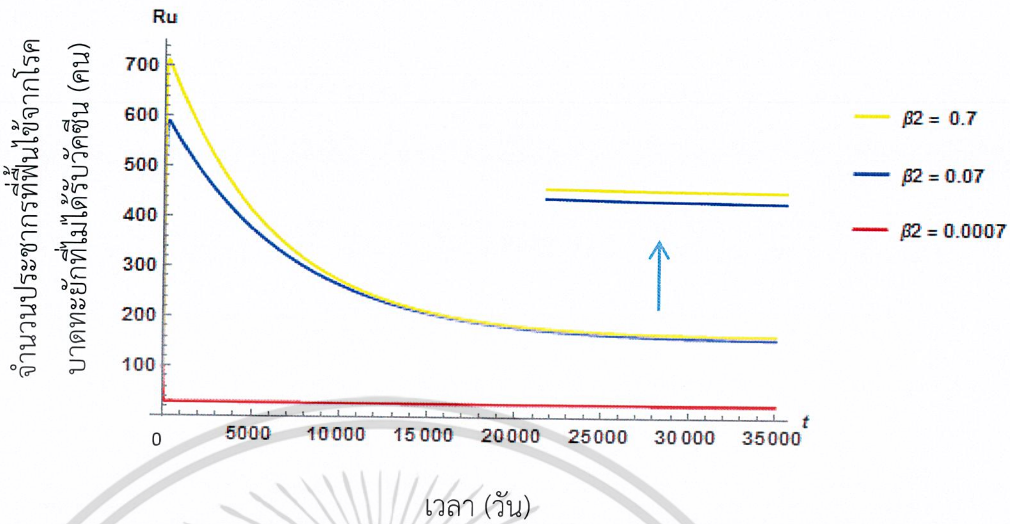
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น จาก 0.07 เป็น 0.7 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 ลดลง จาก 0.07 เป็น 0.0007 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_u เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่เท่ากับ 0.04 และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.11 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 165.302 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 34996 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 159.756 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 34972 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 27.4378 (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 64 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น จาก 0.07 เป็น 0.7 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 ลดลงจาก 0.07 เป็น 0.0007 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น

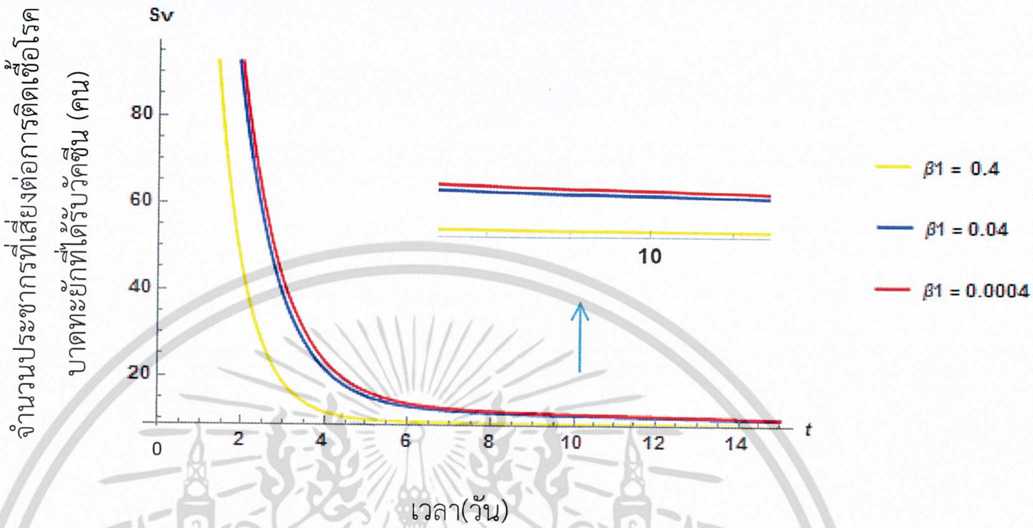


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_u เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่เท่ากับ 0.04 และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.12 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้นแทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 167.742 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 29490 วัน ต่างจากกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 29437 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 29.2971 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 141 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้น จาก 0.07 เป็น 0.7 ส่งผลให้ผู้ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 ลดลง จาก 0.07 เป็น 0.0007 ส่งผลให้ผู้ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น

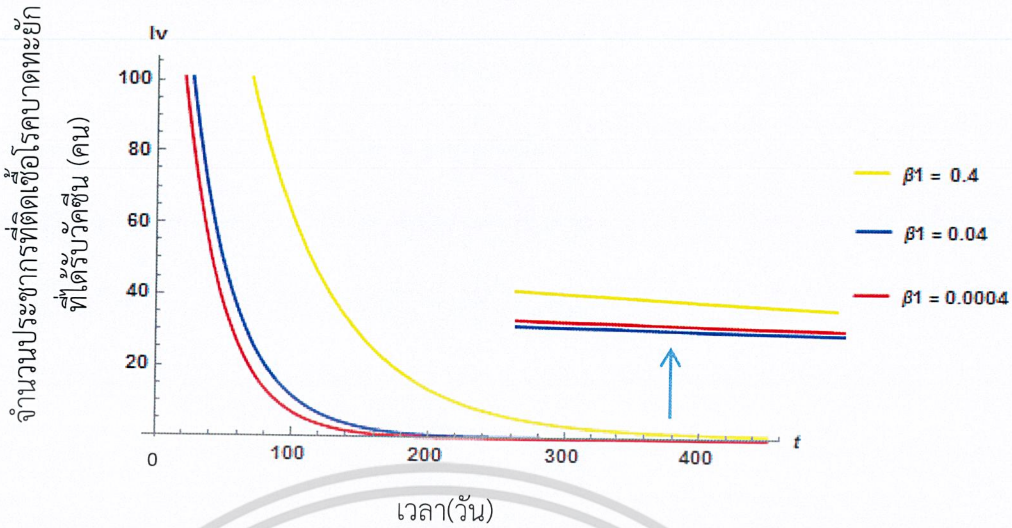
กรณี 2 เมื่อค่าพารามิเตอร์ β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และให้ β_1 เพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0.4 และลดลงจาก 0.04 เป็น 0.0004 จะได้กราฟการลู่เข้าสู่จุดสมดุล ดังนี้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v เทียบกับเวลา(วัน) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.13 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 9.86919 (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 5 วัน ต่างกับ กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 11.6521 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 8 วัน และ เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 11.6946 (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 9 วัน

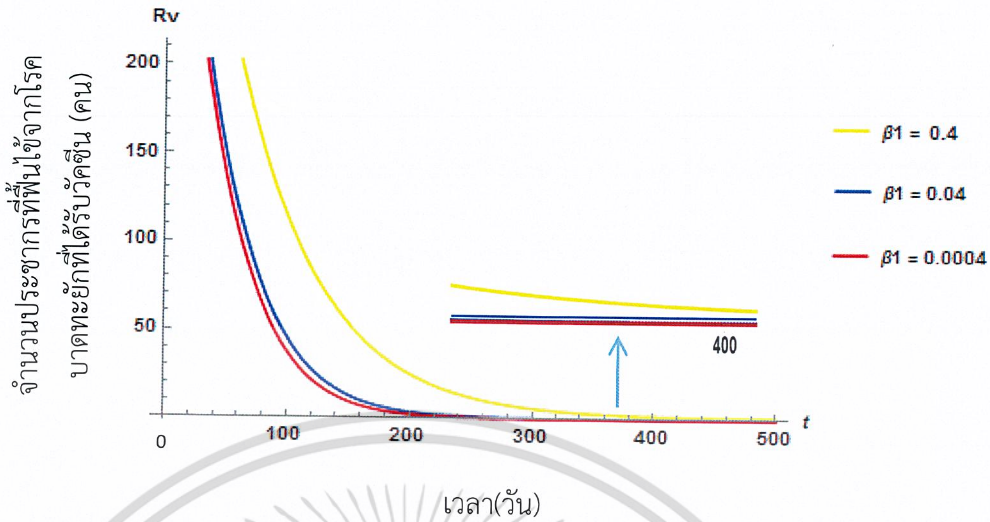
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น จาก 0.04 เป็น 0.4 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลง จาก 0.04 เป็น 0.0004 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีนกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.14 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 1.16841 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 407 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 237 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.0269633 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 197 วัน

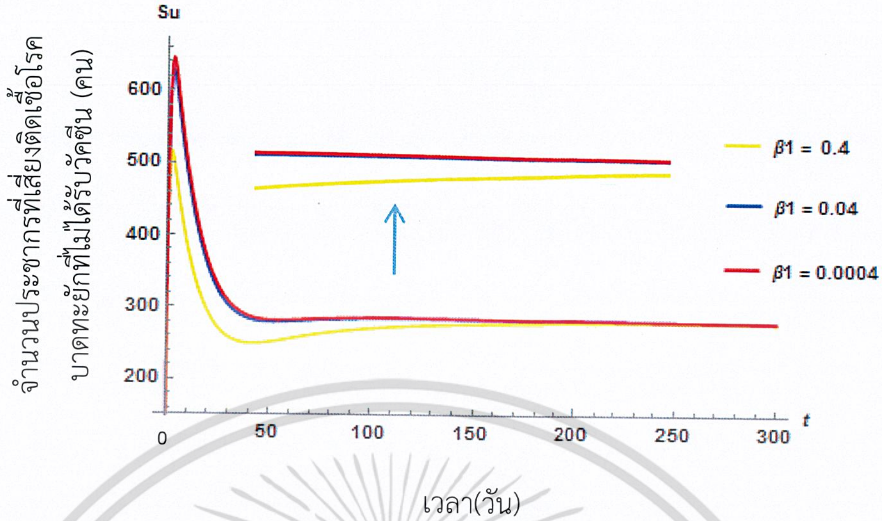
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0. ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลงจาก 0.04 เป็น 0.0004 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.15 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 1.13915 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 451 วัน ต่างจากกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 288 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v)เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.289002 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 267 วัน

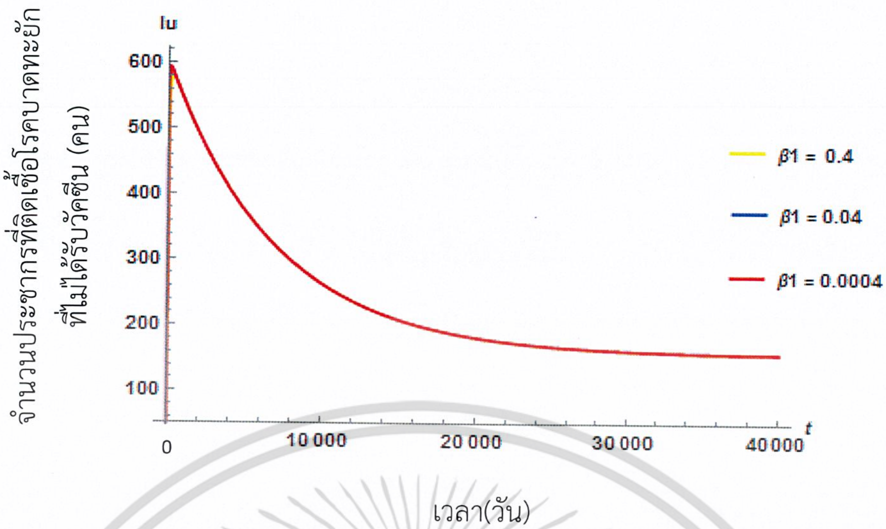
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0.4 ส่งผลให้ผู้ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลงแล้วจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลง จาก 0.04 เป็น 0.0004 ส่งผลให้ผู้ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้นและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน S_u เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.16 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 271.90 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 108 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 285.39 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 111 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 286.24 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 119 วัน

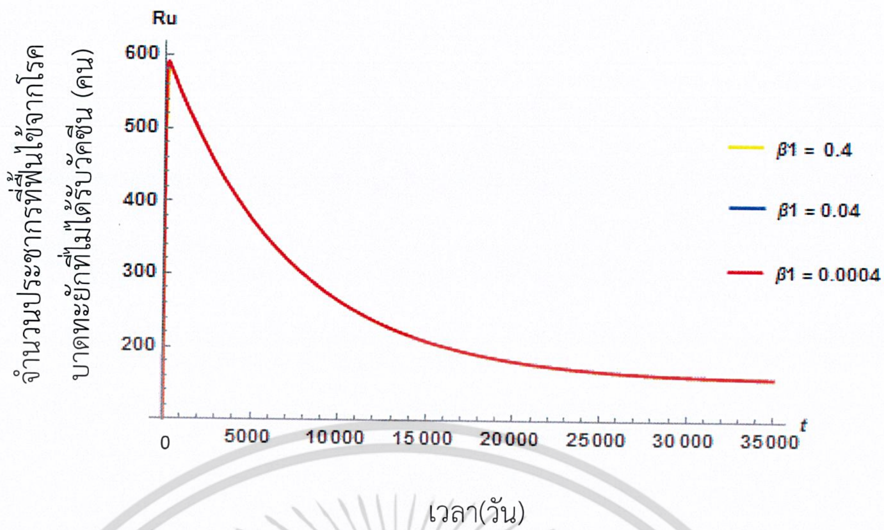
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0.4 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1ลดลง จาก 0.04 เป็น 0.0004 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีนกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_u เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.17 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 159.756 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 34972 วัน และเมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 159.756 (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 34972 วัน

จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน I_u ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง



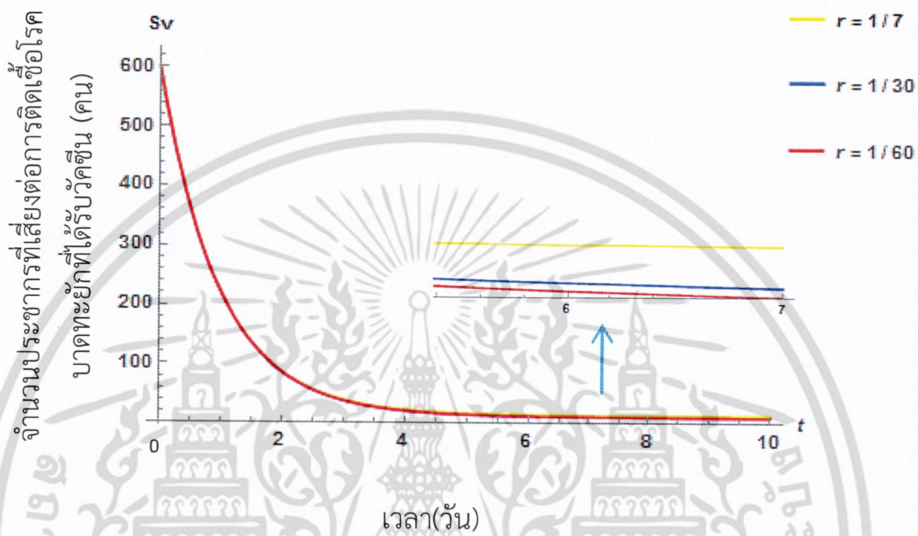
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน R_u เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.18 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 29437 วัน และ เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 29437 วัน

จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน R_u ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลง

2. ค่าพารามิเตอร์ r เปลี่ยน โดยที่ค่าพารามิเตอร์อื่น คงที่ คือ

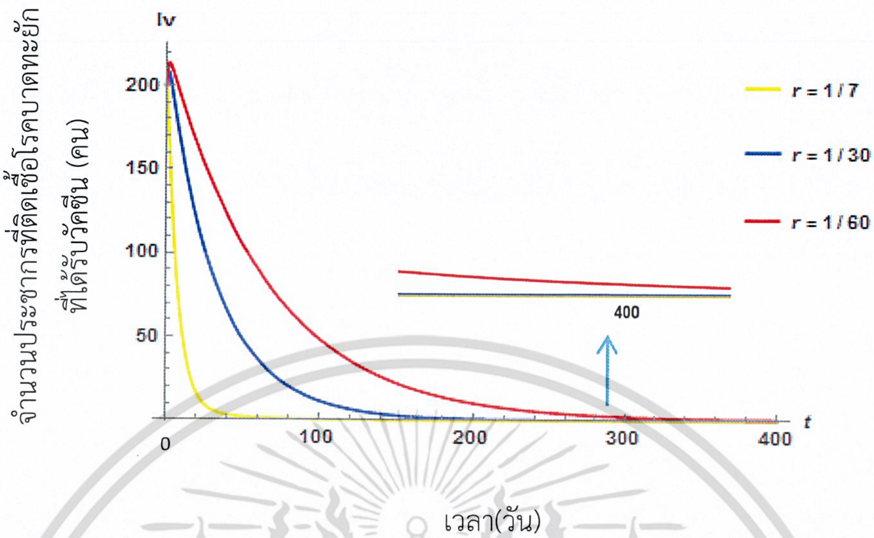
- เมื่อค่าพารามิเตอร์ r เพิ่มขึ้น จากการลดจำนวนวันของอัตราการฟื้นไข้ โดยเปลี่ยนค่าจาก 30 วัน เป็น 7 วันต่อประชากร 1 คน และ
- เมื่อค่าพารามิเตอร์ r ลดลง จากการเพิ่มจำนวนวันของอัตราการฟื้นไข้ โดยเปลี่ยนค่าจาก 30 วัน เป็น 60 วันต่อประชากร 1 คน จะได้กราฟการลู่เข้าสู่จุดสมดุล ดังนี้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.19 อธิบายได้ว่ากราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 13.9002 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 10 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 11.6521 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 8 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 11.5548 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 7 วัน

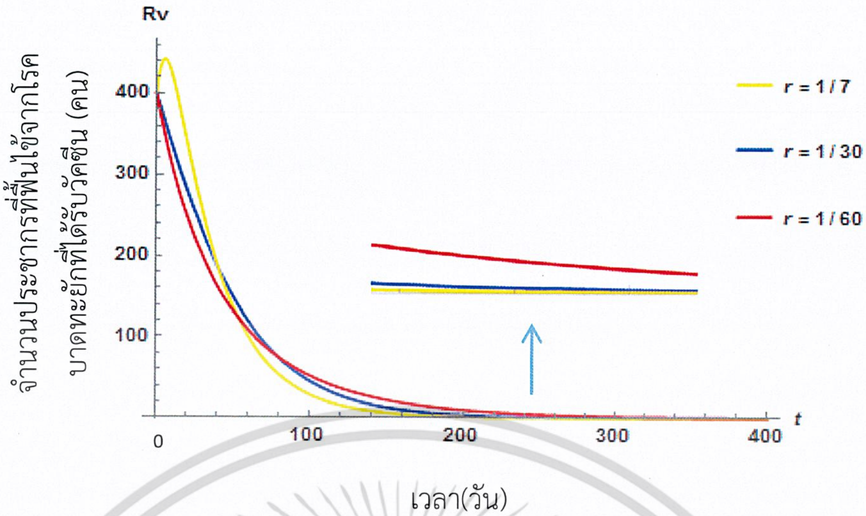
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.20 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นแทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.238951 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 113 วัน ต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 237 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.639698 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 390 วัน

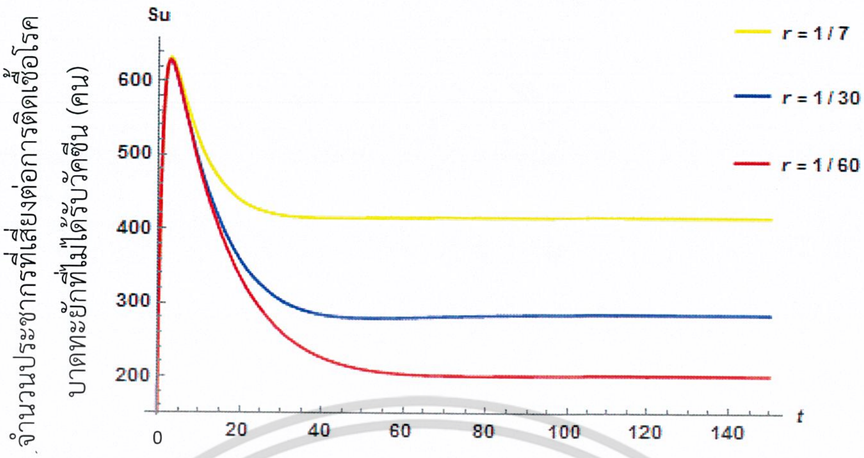
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น และลดลง

จากรูปที่ 4.21 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นแทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.32818 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 248 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 288 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.628841 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 380 วัน และจากกราฟ เส้นสีเหลืองมีแนวโน้มต่างจากเส้นสีน้ำเงินและแดง เนื่องจาก ค่า r มีค่าที่ต่างกันมากเกินไป จึงทำให้เส้นกราฟต่างจากเส้นอื่น

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้นและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง

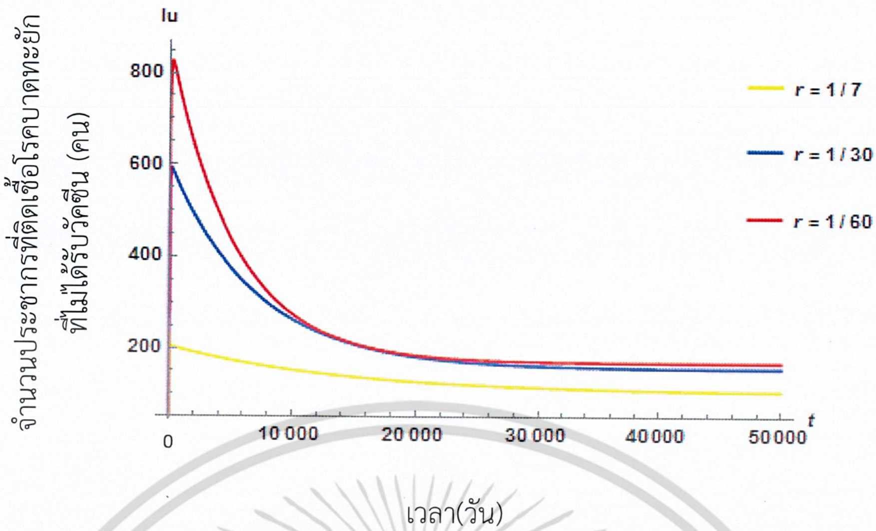


เวลา(วัน)

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน S_u เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.22 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 416.183 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 116 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 285.39 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 111 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 201.352 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 77 วัน

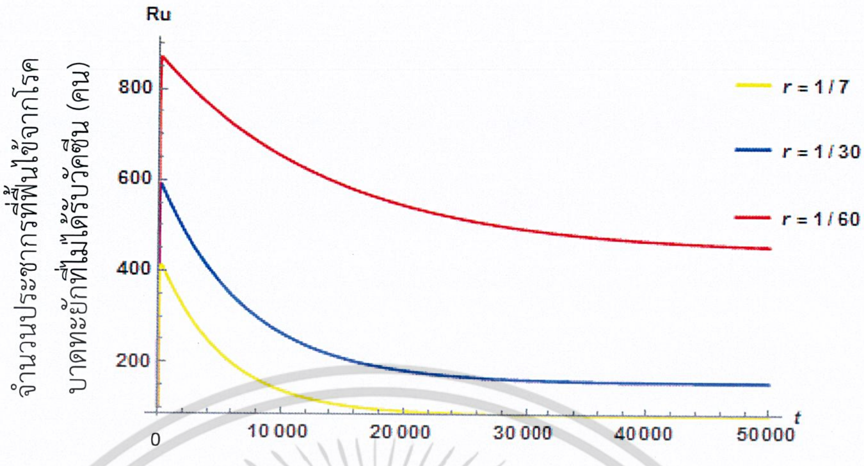
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_u เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.23 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 115.361 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 29975 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 159.756 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 34972 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u)เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 172.238 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 35724 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



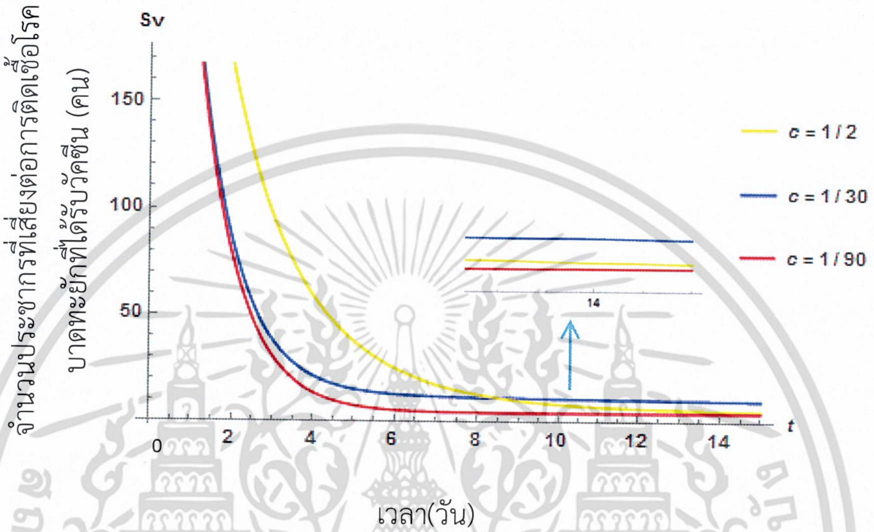
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน R_u เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.24 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 87.9109 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 25073 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 29437 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 456.749 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 49979 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้นและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง

3. ค่าพารามิเตอร์ c เปลี่ยน คือ

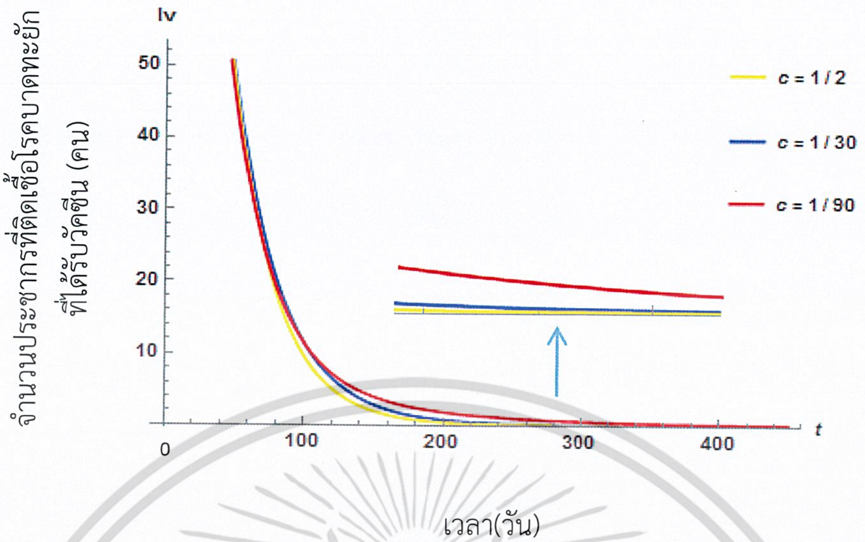
- เมื่อค่าพารามิเตอร์ c เพิ่มขึ้น จากการลดจำนวนวันของอัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อ โดยเปลี่ยนค่าจาก 30 วัน เป็น 2 วันต่อประชากร 1 คน และ
- เมื่อค่าพารามิเตอร์ c ลดลง จากการเพิ่มจำนวนวันของอัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อ โดยเปลี่ยนค่าจาก 30 วัน เป็น 90 วันต่อประชากร 1 คน จะได้กราฟการลู่เข้าสู่จุดสมดุล ดังนี้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อ c เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.25 อธิบายได้ว่ากราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 6.6715 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 12 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 11.6521 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 8 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 4.8762 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 7 วัน

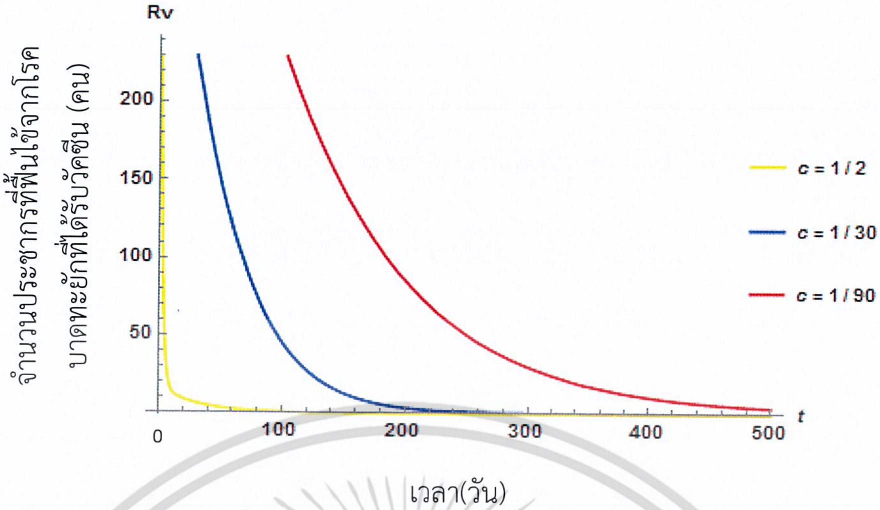
จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง และเมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ะลดลงจาก 1/30 เป็น 1/90 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.26 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.3221 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 212 วัน ต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 237 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ะลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.62453 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 306 วัน

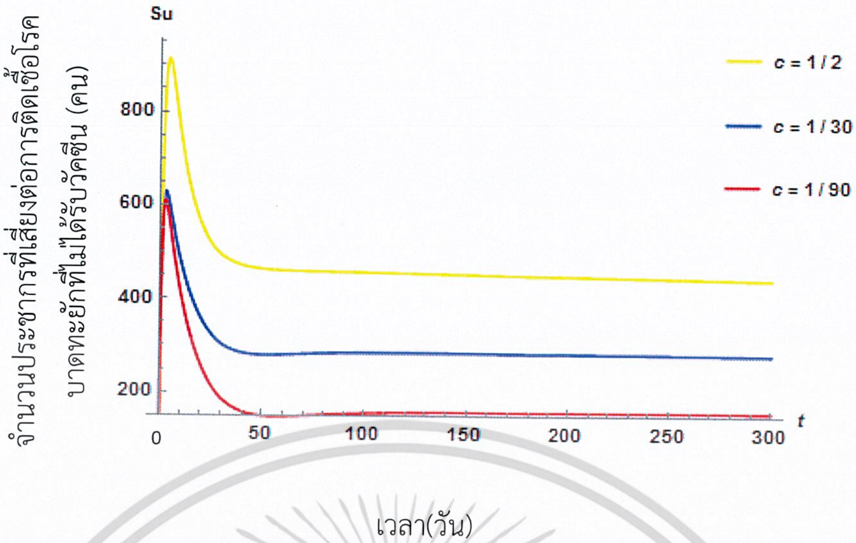
จึงสรุปได้เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อกลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/90 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.27 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.22675 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 135 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 288 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.95012 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 643 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้นและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/90 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง

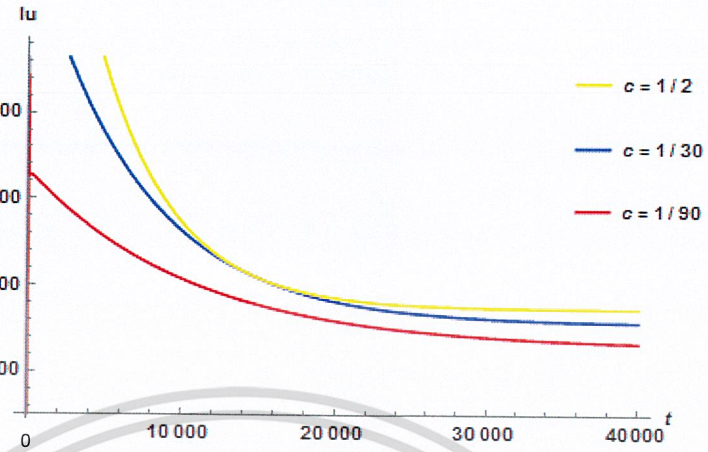


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน S_u เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.28 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 459.103 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 79 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 285.39 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 111 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 157.67 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 156 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/90 ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง

จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก ที่ไม่ได้รับวัคซีน (คน)

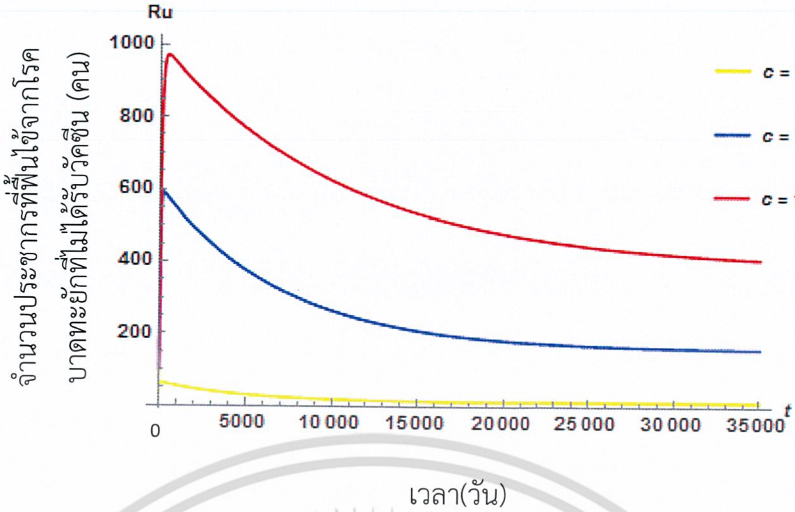


เวลา(วัน)

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_u เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.29 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 196.22 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 21812 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 159.756 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 34972 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 134.2001 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 39976 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลงจาก 1/30 เป็น 1/90 ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



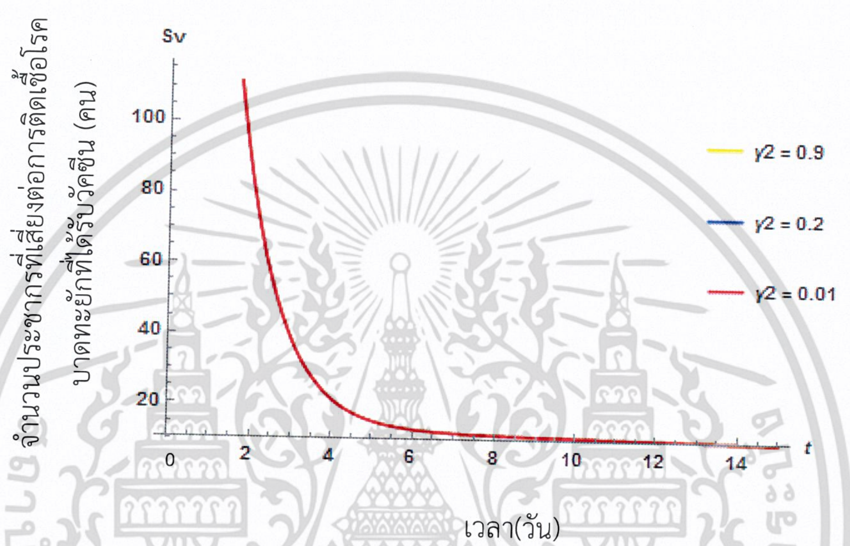
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน R_u เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.30 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 18.3197 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 9975 วัน ต่างจากกราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 29437 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 407.67 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 35977 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้นและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/90 ส่งผลให้ผู้ที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง

เมื่อพิจารณา กรณีอัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและ ลดลง จะแบ่งได้ดังนี้

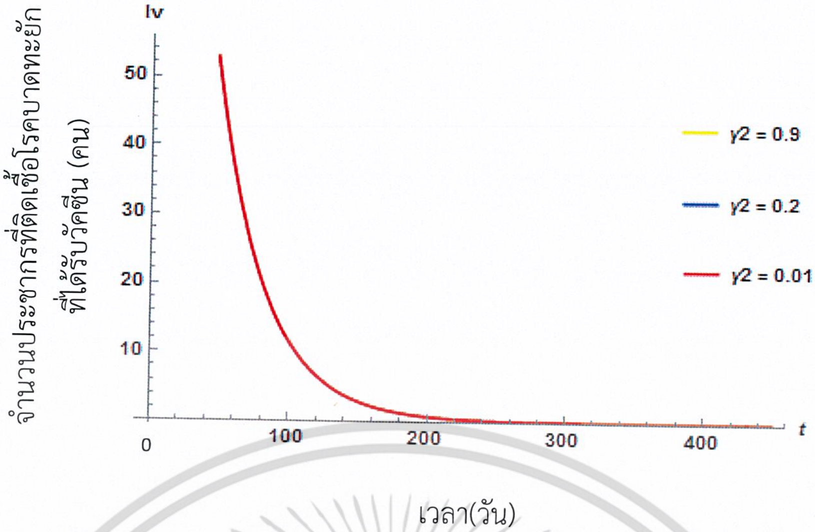
<u>กรณีที่ 1</u> γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง เพิ่มขึ้น จาก 0.2 เป็น 0.7 และ ลดลง จาก 0.2 เป็น 0.05 แล้วนำมาคำนวณในโปรแกรม $Mathematica^{®}$ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง จะได้กราฟ ดังนี้



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.31 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (S_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 11.6521 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 8 วัน และเมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 11.6516 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 8 วัน

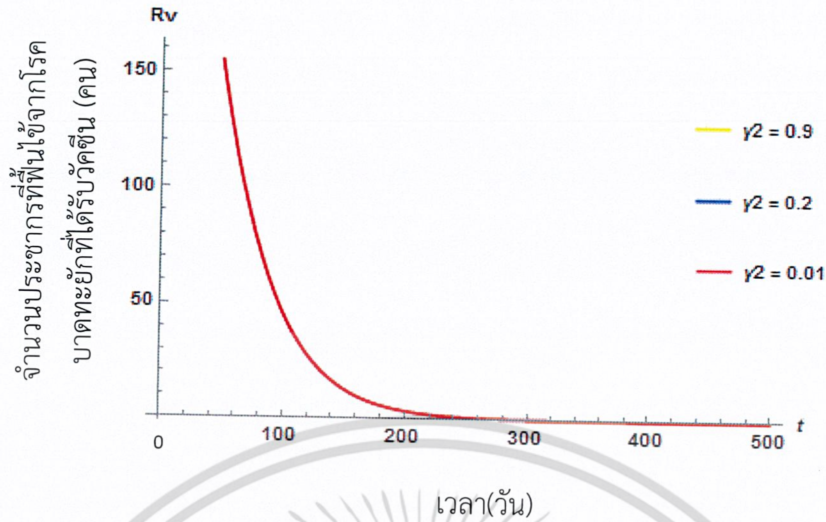
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน S_v ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.32 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v)เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง เหมือนกับ กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.3342คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 237 วัน และ เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.3342 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 237 วัน

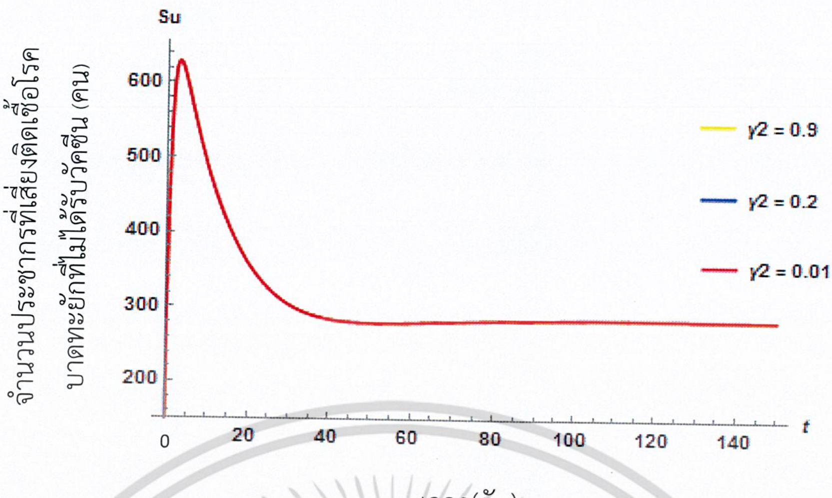
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_v ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.33 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v)เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_v) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 288 วันและ เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 0.39196 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 288 วัน

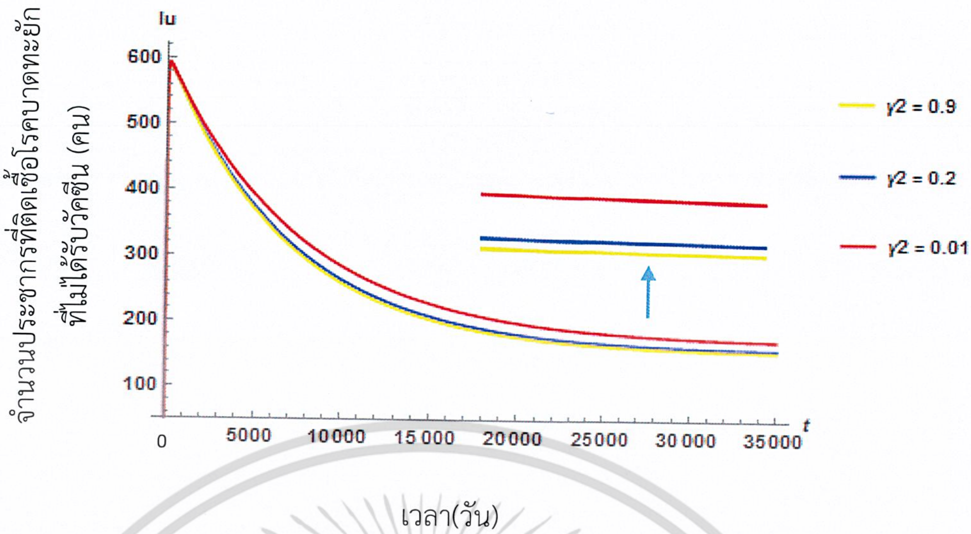
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน R_v ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน S_u เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.34 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง เหมือนกับกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 285.39 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 111 วัน และเมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 285.394 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 111 วัน

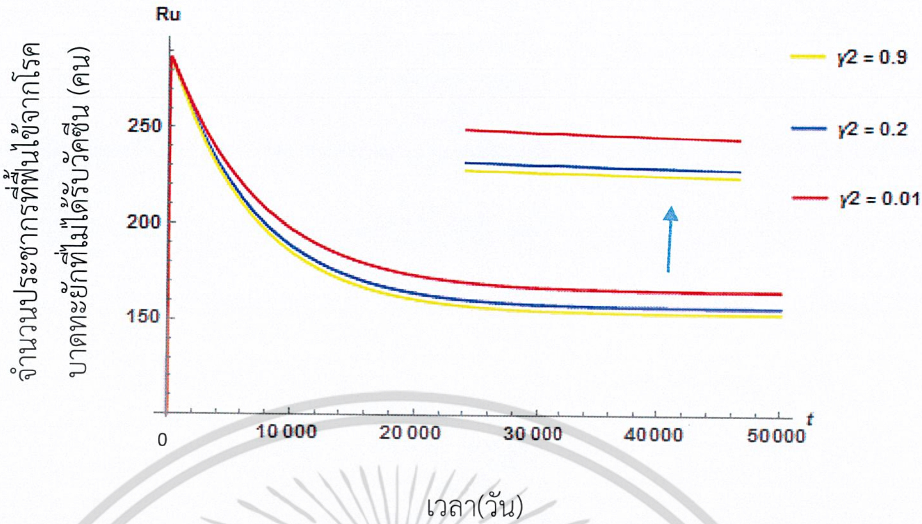
จึงสรุปได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ ไม่ได้รับวัคซีน S_u ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน I_u เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.35 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 157.3214 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 32116 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 159.756 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 34972 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนของผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลงแทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 167.931 (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 36964 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อกลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลง ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน R_u เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง

จากรูปที่ 4.36 อธิบายได้ว่า กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น แทนด้วยเส้นสีเหลือง กราฟจะลู่เข้าสู่ 159.047 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 29280 วัน ต่างจาก กราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (R_u) แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน จะลู่เข้าสู่ 163.253 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) เมื่อเวลา 29437 วัน และต่างจากกราฟแสดงจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลง แทนด้วยเส้นสีแดง กราฟจะลู่เข้าสู่ 172.713 คน (ลู่เข้าสู่จุดสมดุล) ณ เวลา 37846 วัน

จึงสรุปได้ว่า เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผู้ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้น และจะกลับไปเปลี่ยนประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น และเมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 ลดลง ส่งผลให้ผู้ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักที่ไม่ได้รับวัคซีน ฟื้นไข้ได้ช้าลง และจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงช้าลง กราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลช้าลง

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล (คน)	เวลาประมาณ (วัน)
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v) เทียบกับเวลา	11.6521	8
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_v) เทียบกับเวลา	0.3342	237
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_v) เทียบกับเวลา	0.39196	288
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เทียบกับเวลา	285.3901	111
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_u) เทียบกับเวลา	159.756	34,972
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_u) เทียบกับเวลา	163.253	29,437

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

<u>กรณี 1</u> เมื่อค่าพารามิเตอร์ β_1 คงที่ เท่ากับ 0.04 และให้ β_2 เพิ่มขึ้นจาก 0.07 เป็น 0.7 และลดลงจาก 0.07 เป็น 0.0007

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน	β_2 = 0.7		β_2 = 0.07		β_2 = 0.007	
	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v) เทียบกับเวลา	11.6521	8	11.6521	8	11.6521	8
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_v) เทียบกับเวลา	0.3342	237	0.3342	237	0.3342	237
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_v) เทียบกับเวลา	0.39196	288	0.39196	288	0.39196	288
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เทียบกับเวลา	30.8154	48	285.39	111	386.24	142
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_u) เทียบกับเวลา	165.302	96 ปี	159.756	96 ปี	27.4378	64
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_u) เทียบกับเวลา	167.742	81 ปี	163.253	80 ปี	29.2971	141

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

<u>กรณีที่ 2</u> เมื่อค่าพารามิเตอร์ β_2 คงที่เท่ากับ 0.07 และให้ β_1 เพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0.4 และลดลงจาก 0.04 เป็น 0.0004

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน	β_1 = 0.4		β_1 = 0.04		β_1 = 0.0004	
	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล (คน)	เวลาประมาณ (วัน)
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v) เทียบกับเวลา	9.86919	5	11.6521	8	11.6946	9
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_v) เทียบกับเวลา	1.16841	407	0.3342	237	0.0269633	197
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_v) เทียบกับเวลา	1.13915	451	0.39196	288	0.289002	267
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เทียบกับเวลา	271.90	108	285.39	111	286.24	119
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เทียบกับเวลา	159.756	96 ปี	159.756	96 ปี	159.756	96 ปี
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เทียบกับเวลา	163.253	81 ปี	163.253	81 ปี	163.253	81 ปี

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน เมื่อค่าพารามิเตอร์ r เพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนจากค่า 30 วันเป็น 7 วัน เมื่อพารามิเตอร์ r ลดลง โดยเปลี่ยนค่าจาก 30 วันเป็น 60 วัน

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน	r = 1/7		r = 1/30		r = 1/60	
	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล (คน)	เวลาประมาณ (วัน)
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v) เทียบกับเวลา	13.9002	10	11.6521	8	11.5548	7
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_v) เทียบกับเวลา	0.238951	113	0.3342	237	0.639698	390
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_v) เทียบกับเวลา	0.32818	248	0.39196	288	0.628841	380
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เทียบกับเวลา	416.183	116	285.39	111	201.352	77
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เทียบกับเวลา	115.361	82 ปี	159.756	96 ปี	172.238	98 ปี
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เทียบกับเวลา	87.9109	69 ปี	163.253	80 ปี	456.749	137 ปี

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

เมื่อค่าพารามิเตอร์ c เพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนจากค่า 30 วันเป็น 2 วัน

เมื่อพารามิเตอร์ c ลดลง โดยเปลี่ยนค่าจาก 30 วันเป็น 90 วัน

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน	c = 1/7		c = 1/30		c = 1/60	
	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล (คน)	เวลาประมาณ (วัน)
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v) เทียบกับเวลา	6.6715	12	11.6521	8	4.8762	7
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_v) เทียบกับเวลา	0.3221	212	0.3342	237	0.62453	306
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_v) เทียบกับเวลา	0.22675	135	0.39196	288	0.95012	643
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เทียบกับเวลา	459.103	79	285.39	111	157.67	156
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เทียบกับเวลา	196.22	60 ปี	159.756	96 ปี	134.2001	109 ปี
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เทียบกับเวลา	18.3197	27 ปี	163.253	81 ปี	407.67	98 ปี

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน

กรณีที่ 1 เมื่อค่าพารามิเตอร์ γ_1 คงที่เท่ากับ 0.8 และให้ γ_2 เพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.7 และลดลงจาก 0.2 เป็น 0.05

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีน	γ_2 = 0.7		γ_2 = 0.2		γ_2 = 0.05	
	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล(คน)	เวลาประมาณ (วัน)	ลู่เข้าสู่จุดสมดุล (คน)	เวลาประมาณ (วัน)
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (S_v) เทียบกับเวลา	11.6521	8	11.6521	8	11.6516	8
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน (I_v) เทียบกับเวลา	0.3342	237	0.3342	237	0.3342	237
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ได้รับวัคซีน (R_v) เทียบกับเวลา	0.39196	288	0.39196	288	0.39196	288
จำนวนประชากรที่เสี่ยงติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) เทียบกับเวลา	285.39	111	285.39	111	285.394	111
จำนวนประชากรที่ติดเชื้อที่ไม่ได้รับวัคซีน (I_u) เทียบกับเวลา	157.3214	88 ปี	159.756	96 ปี	167.931	101 ปี
จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้ที่ไม่ได้รับวัคซีน (R_u) เทียบกับเวลา	159.047	80 ปี	163.253	81 ปี	172.713	103 ปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ปัญหาพิเศษนี้ ได้เสนอรายละเอียดของโรคบาดทะยัก (Tetanus) ที่เกิดจากการติดเชื้อจากแบคทีเรียร้ายแรงที่สามารถแพร่ผ่านบาดแผลที่เกิดขึ้นตามร่างกาย เชื้อบาดทะยักนี้จะไปกระทบต่อระบบประสาท จึงมักทำให้มีอาการเจ็บปวดและเกร็งกล้ามเนื้อเป็นอย่างมาก และยังอาจเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ เราจึงนำความรู้ทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับโรคบาดทะยักนี้ จากนั้นพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยนำเสนอและอธิบายแบบจำลองโรคบาดทะยักและการได้รับวัคซีนเพื่อเป็นแนวทางลดการระบาดของโรคบาดทะยัก

แบบจำลองนี้ได้สมมติ อัตราเสี่ยงของประชากรที่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก อัตราเสี่ยงของประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีนที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก อัตราคนที่ได้รับวัคซีนของประชากรที่ได้รับวัคซีน อัตราการได้รับวัคซีนของประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก อัตราการฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก และ อัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อโรคบาดทะยัก

จากนั้นได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ในรูปของ จำนวนประชากรที่ได้รับวัคซีน (S_v) จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยัก (I_v) จำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก (R_v) จำนวนประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีน (S_u) จำนวนประชากรที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน (I_u) และจำนวนประชากรที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยัก (R_u) จากนั้นหาจุดสมดุล และความเสถียรของจุดสมดุล

จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีผลต่อแบบจำลองของโรคบาดทะยัก ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ จะได้ผลดังต่อไปนี้

เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_1 คงที่ และ β_2 เพิ่มขึ้นและลดลงจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับประชากรที่ได้รับวัคซีน แต่จะมีผลกับประชากรที่ไม่ได้รับวัคซีน เมื่อ β_2 เพิ่มขึ้นจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ ไม่ได้รับวัคซีน จะกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น และฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง เมื่อ β_2 ลดลง ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ ไม่ได้รับวัคซีน จะกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้ช้าลง และฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น

เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยัก β_2 คงที่ และ β_1 เพิ่มขึ้นและลดลงจะมีผลกับประชากรที่ได้รับวัคซีน เมื่อ β_1 เพิ่มขึ้น จำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน จะกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น และฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง เมื่อ β_1 ลดลง ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคบาดทะยักที่ได้รับวัคซีน จะกลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อโรคบาดทะยักได้ช้าลง และฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น

เมื่ออัตราการฟื้นไข้ของประชากร r เพิ่มขึ้นและลดลง จะส่งผลต่อประชากรทุกกลุ่มทั้งที่ได้รับวัคซีนและไม่ได้รับวัคซีน เมื่อ r เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้ช้าลง ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้นและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น และเมื่อ r ลดลง ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น ฟื้นไข้ได้ช้าลงและจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงช้าลง

เมื่ออัตราการกลับไปเสี่ยงติดเชื้อc เพิ่มขึ้นและลดลง เมื่อ c เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้ช้าลง ฟื้นไข้ได้เร็วขึ้น และจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น และเมื่อ c ลดลงส่งผลให้ผู้ที่เสี่ยงติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ติดเชื้อจากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น ฟื้นไข้ได้ช้าลง และจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงช้าลง

เมื่ออัตราคนที่ได้รับวัคซีน γ_1 คงที่ และ γ_2 เพิ่มขึ้นและลดลง จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับประชากรที่ได้รับวัคซีน γ_1 แต่จะส่งผลกับประชากรที่ติดเชื้อที่ได้รับวัคซีน γ_2 เมื่อ γ_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้เร็วขึ้น และจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงเร็วขึ้น เมื่อ γ_2 ลดลง ส่งผลให้ผู้ที่ติดเชื้อ กลายเป็นผู้ที่ฟื้นไข้จากโรคบาดทะยักได้ช้าลง และจะกลับไปเป็นประชากรที่เสี่ยงช้าลง

ดังนั้น จะสรุปได้ว่า เมื่ออัตราการเสี่ยงของประชากรที่จะติดเชื้อโรคบาดทะยักลดลง อัตราการฟื้นไข้เพิ่มขึ้น อัตราคนที่ได้รับวัคซีนเพิ่มขึ้น จะทำให้สามารถควบคุมโรคได้ดีขึ้นและทำให้ประชากรเป็นโรคบาดทะยักได้น้อยลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จัดทำสื่อหรือโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อศึกษาระยะเวลาในการลดการติดเชื้อโรคบาดทะยักได้

เอกสารอ้างอิง

สำนักระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค. (2559). **โรคบาดทะยัก**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.boe.moph.go.th/fact/Tetanus.htm เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2560

สลิล ศิริอุดมภาส. (2557). **โรคบาดทะยัก**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://haamor.com/th เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2560

ไพลิน มหาพรรณ. (2557). **การศึกษาความชุกของระดับภูมิคุ้มกันของบาดทะยักและคอตีบในประชากรไทยและแรงงานต่างด้าว.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/46585 เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2560

วราภรณ์ เตชะเสนา (2526). **การศึกษาผลการใช้ pyridoxine ในการรักษาโรคบาดทะยักในเด็กแรกเกิด.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://dlibrary.childrenhospital.go.th/handle/6623548333/326 เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2560

วรวุฒิ เจริญศิริ. (2552). **การป้องกันโรคบาดทะยัก.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.vachiraphuket.go.th/www/public-health/index.php?name=knowledge&file=readknowledge&id=242 เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม 2560

นิตยา อินทราวัฒนา. (2553). **การเตรียมแอนติบอดีของมนุษย์ชนิดโมโนโคลนาลที่สามารถลบล้างพิษของสารพิษจากเชื้อบาดทะยัก โดยเทคนิคฟาจดิสเพลย์.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.tnrr.in.th/?page=result_search&record_id=59611 เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2560

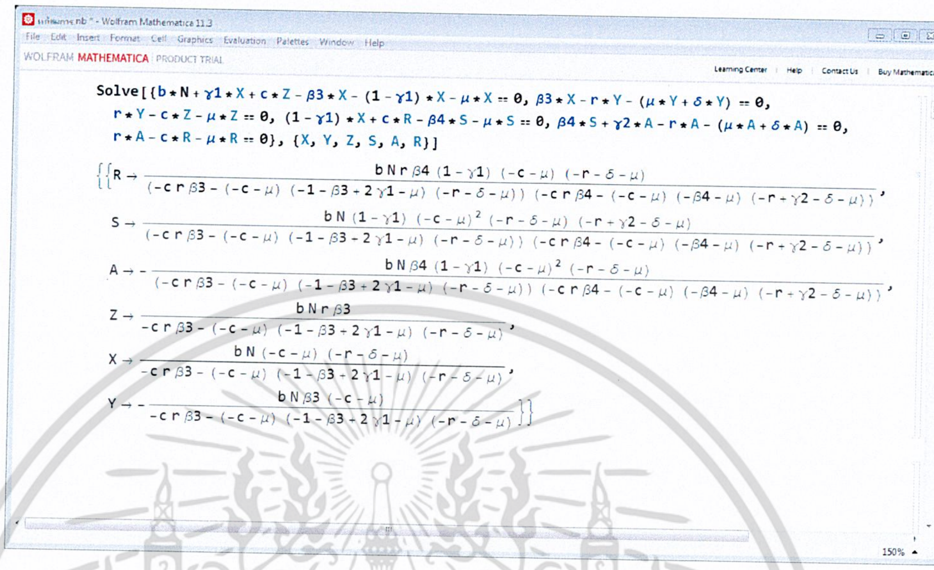
นิสา สิริสุขการ. (2542). **ความสัมพันธ์ของการให้วัคซีนป้องกันโรคบาดทะยักในหญิงวัยเจริญพันธุ์กับการเกิดโรคบาดทะยัก ในเด็กแรกเกิดในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดโรค** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.tnrr.in.th/?page=result_search&record_id=306789 เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2560

อดิศักดิ์ นามสุโพธิ์. (2548). **ระดับภูมิคุ้มกันต่อโรคบาดทะยักในผู้ป่วยอุบัติเหตุฉุกเฉินก่อนและหลังการฉีดกระตุ้นวัคซีนป้องกันโรคบาดทะยัก**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://info.rdi.ku.ac.th/ThailandResearch/?itemID=424556 เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2560

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2557). **พื้นฐานแมทมาทิกา** (MATHEMATICA FUNDAMENTALS)

ภาคผนวก

3. กด Shift + Enter จะได้จุดสมดุลดังรูป



ขั้นตอนการตรวจสอบความเสถียรภาพของจุดสมดุล

1. กำหนดฟังก์ชันแต่ละสมการ ดิฟเทียบทุกตัวแปร โดยใช้คำสั่งดังรูป

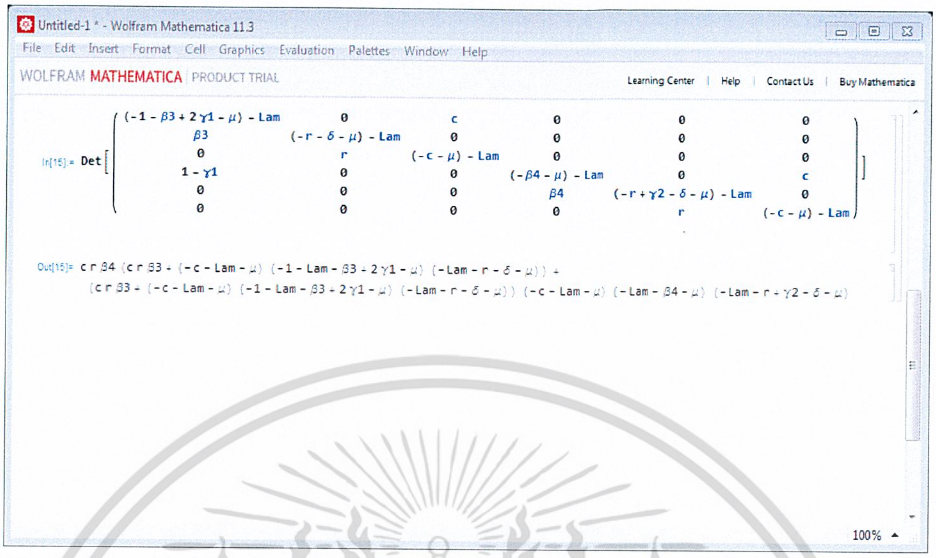
```
f1 = (b N + c Z - X β3 - X (1 - γ1) + X γ1 - X μ);
D[f1, X]; D[f1, Y]; D[f1, Z]; D[f1, S]; D[f1, A]; D[f1, R];
f2 = (-r Y + X β3 - Y δ - Y μ);
D[f2, X]; D[f2, Y]; D[f2, Z]; D[f2, S]; D[f2, A]; D[f2, R];
f3 = (r Y - c Z - Z μ);
D[f3, X]; D[f3, Y]; D[f3, Z]; D[f3, S]; D[f3, A]; D[f3, R];
f4 = (c R - S β4 + X (1 - γ1) - S μ);
D[f4, X]; D[f4, Y]; D[f4, Z]; D[f4, S]; D[f4, A]; D[f4, R];
f5 = (-A r + S β4 + A γ2 - A δ - A μ);
D[f5, X]; D[f5, Y]; D[f5, Z]; D[f5, S]; D[f5, A]; D[f5, R];
f6 = (A r - c R - R μ);
D[f6, X]; D[f6, Y]; D[f6, Z]; D[f6, S]; D[f6, A]; D[f6, R];
MatrixForm[{{D[f1, X], D[f1, Y], D[f1, Z], D[f1, S], D[f1, A], D[f1, R]},
  {D[f2, X], D[f2, Y], D[f2, Z], D[f2, S], D[f2, A], D[f2, R]},
  {D[f3, X], D[f3, Y], D[f3, Z], D[f3, S], D[f3, A], D[f3, R]},
  {D[f4, X], D[f4, Y], D[f4, Z], D[f4, S], D[f4, A], D[f4, R]},
  {D[f5, X], D[f5, Y], D[f5, Z], D[f5, S], D[f5, A], D[f5, R]},
  {D[f6, X], D[f6, Y], D[f6, Z], D[f6, S], D[f6, A], D[f6, R]}}]
```

2. กด Shift + Enter จะได้จาโคเบียนเมทริกซ์

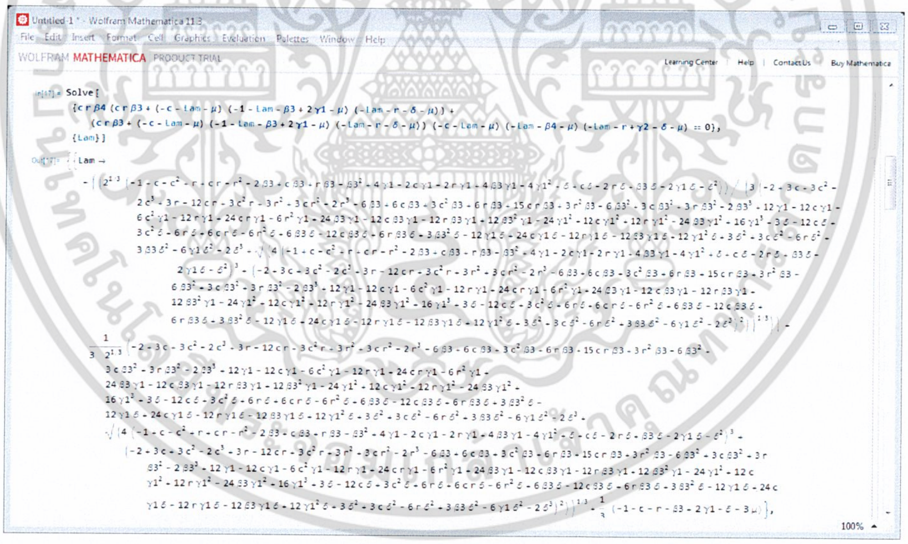
Out[13]//MatrixForm=

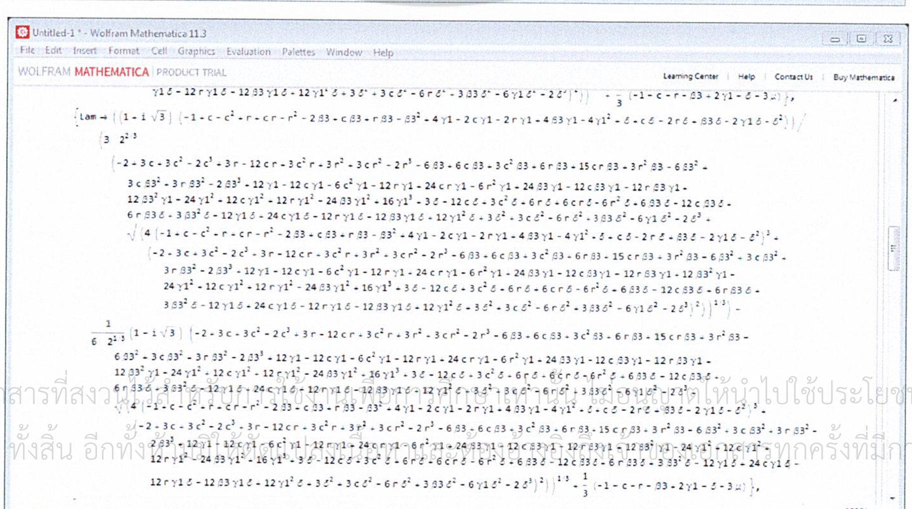
$$\begin{pmatrix} -1-\beta3+2\gamma1-\mu & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ \beta3 & -r-\delta-\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & -c-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 1-\gamma1 & 0 & 0 & -\beta4-\mu & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & \beta4 & -r+\gamma2-\delta-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & -c-\mu \end{pmatrix}$$

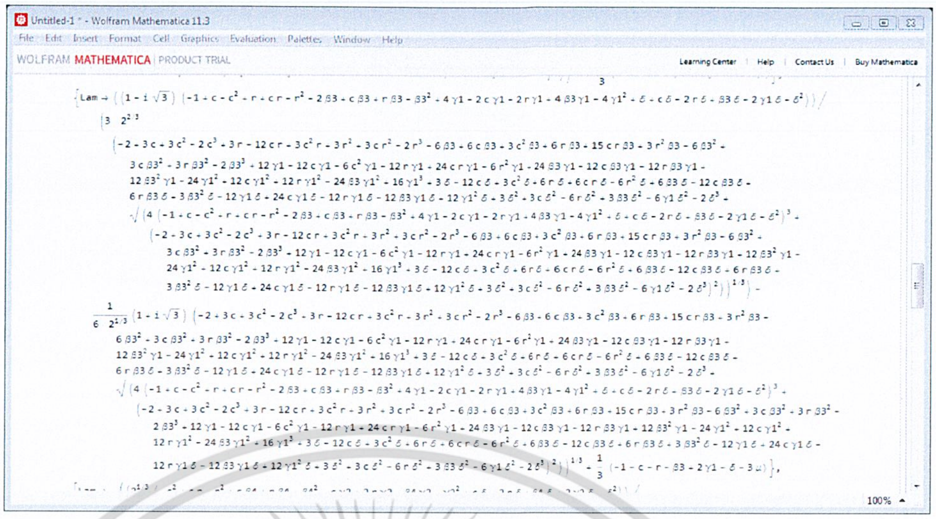
3. หาค่าลักษณะเฉพาะ โดยใช้คำสั่งดังนี้

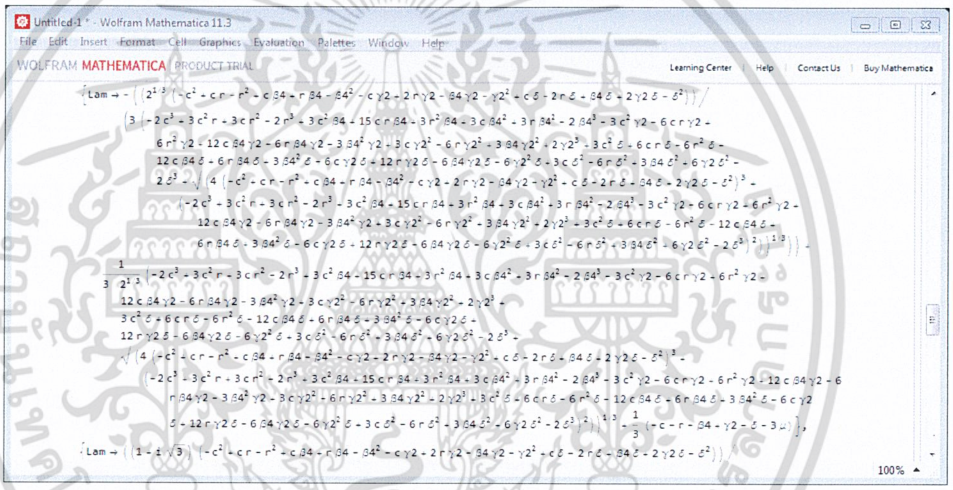


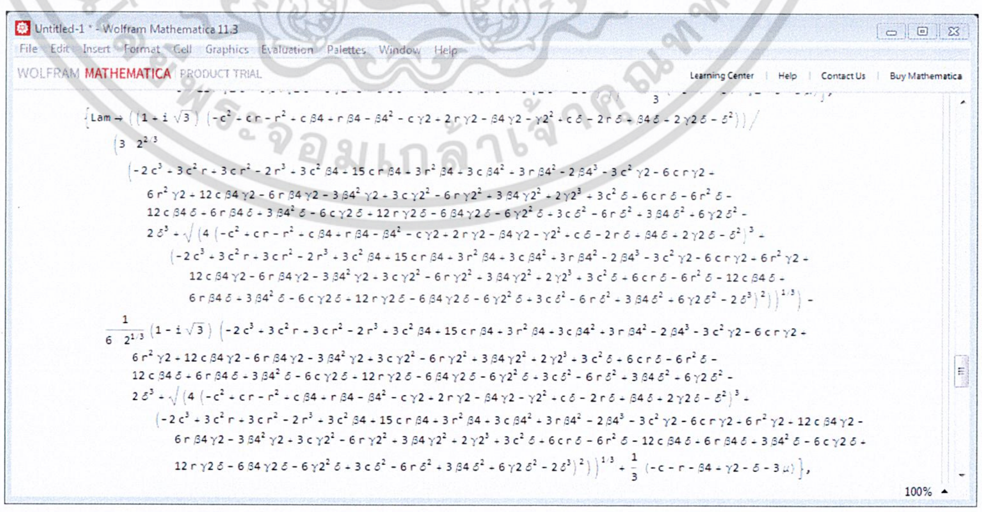
4. แก้สมการหาค่าลักษณะเฉพาะ จะได้ดังนี้

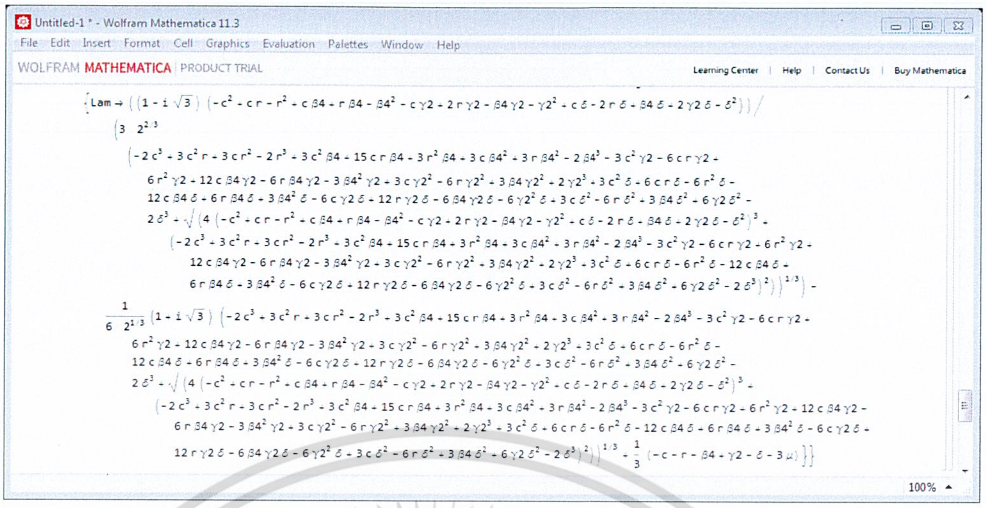





Untitled-1 * - Wolfram Mathematica 11.3
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL
Learning Center | Help | Contact Us | Buy Mathematica
100%

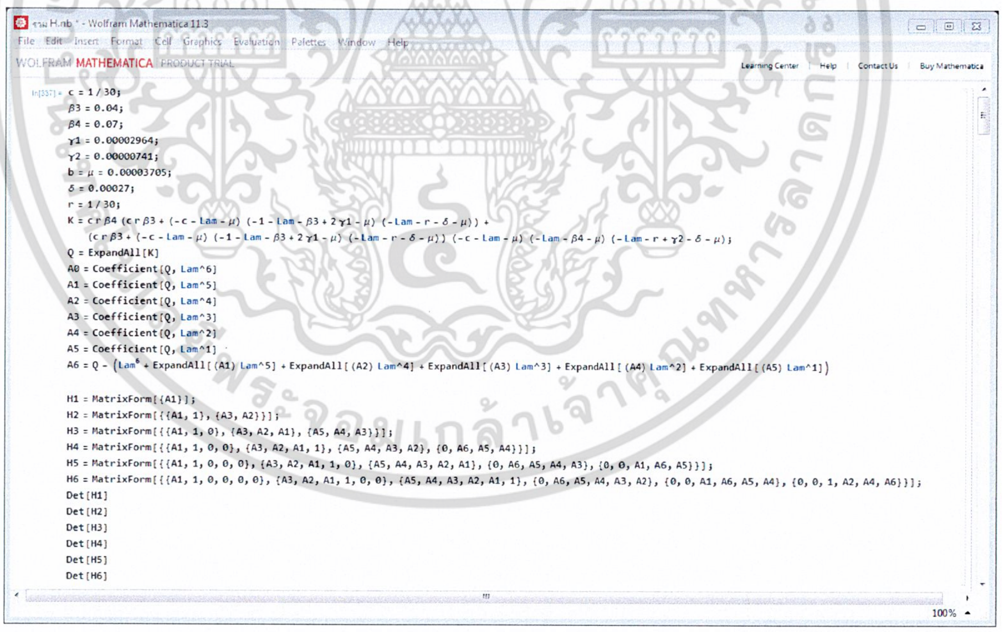

Untitled-1 * - Wolfram Mathematica 11.3
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL
Learning Center | Help | Contact Us | Buy Mathematica
100%


Untitled-1 * - Wolfram Mathematica 11.3
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL
Learning Center | Help | Contact Us | Buy Mathematica
100%

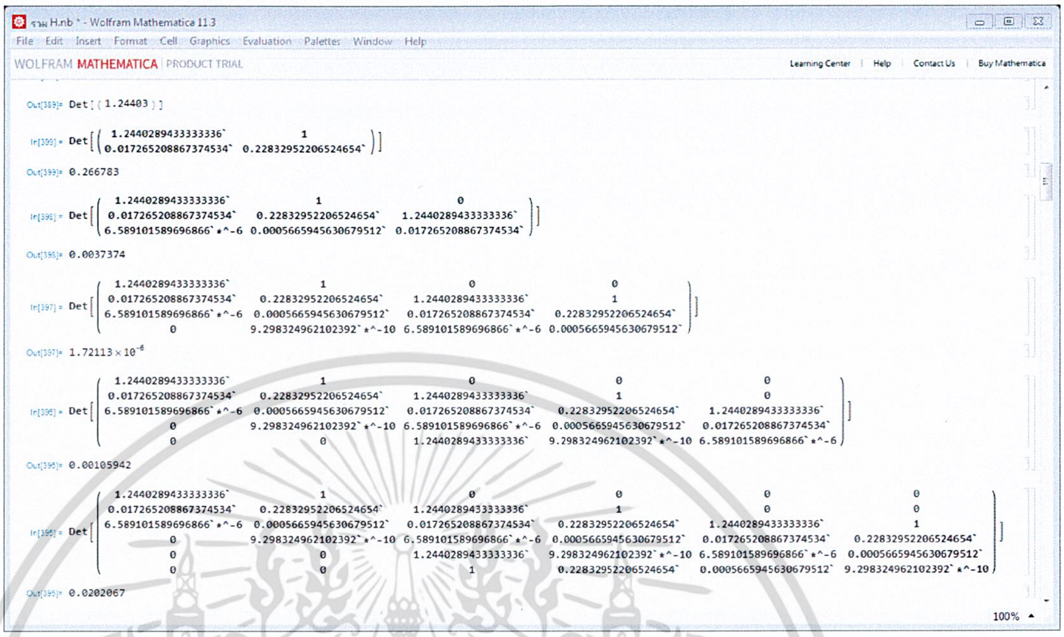


เนื่องจากค่าลักษณะเฉพาะแต่ละตัวมีค่าซับซ้อนเกินไป จึงใช้วิธีทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

1. หารูทเฮอวิธโดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์แล้วใช้คำสั่ง ดังต่อไปนี้



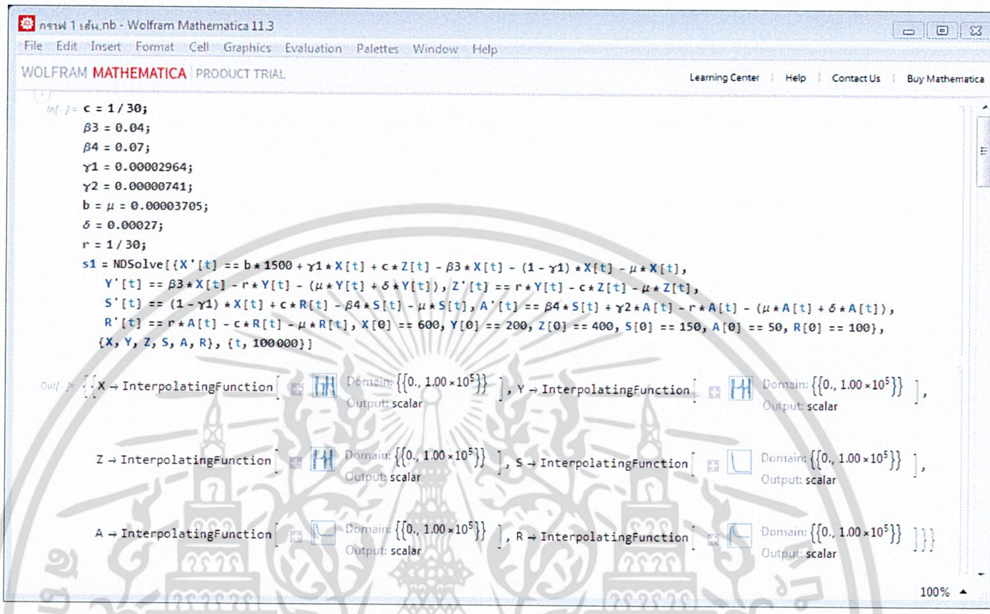
2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป



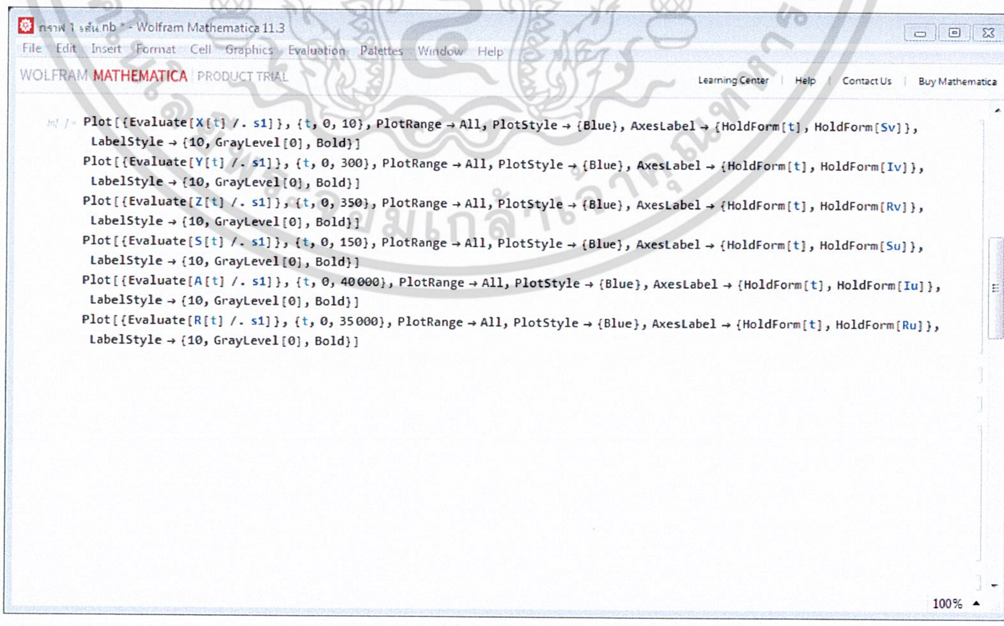
ตัวกำหนดของ H1-H6 มีค่ามากกว่า 0 ดังนั้น แสดงว่าจุดสมดุลนี้มีความเสถียรภาพ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

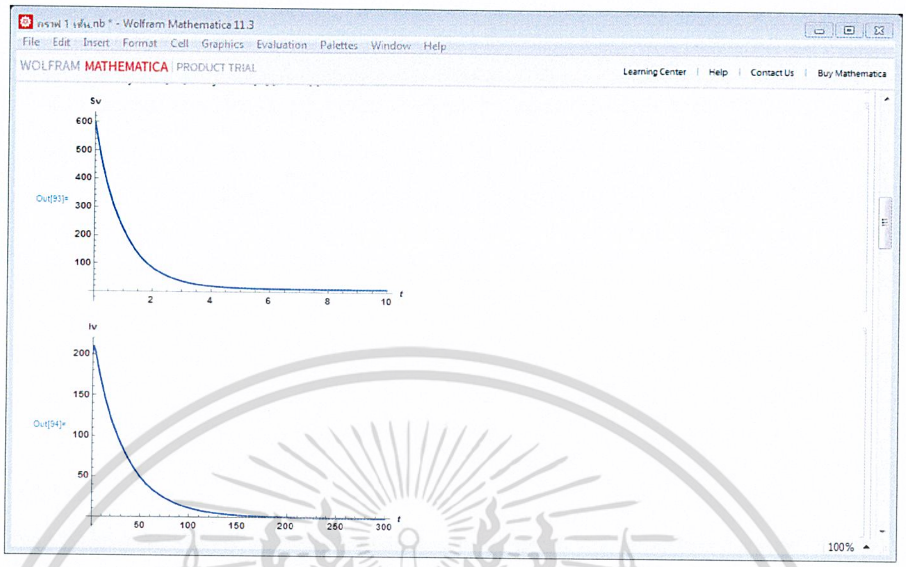
1. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจสอบความเสถียรภาพด้วยวิธีรูทเฮอวิธ แล้วใช้คำสั่ง NDSolve ตามด้วยสมการ แล้วกด Shift+Enter จะได้ดังรูปต่อไปนี้

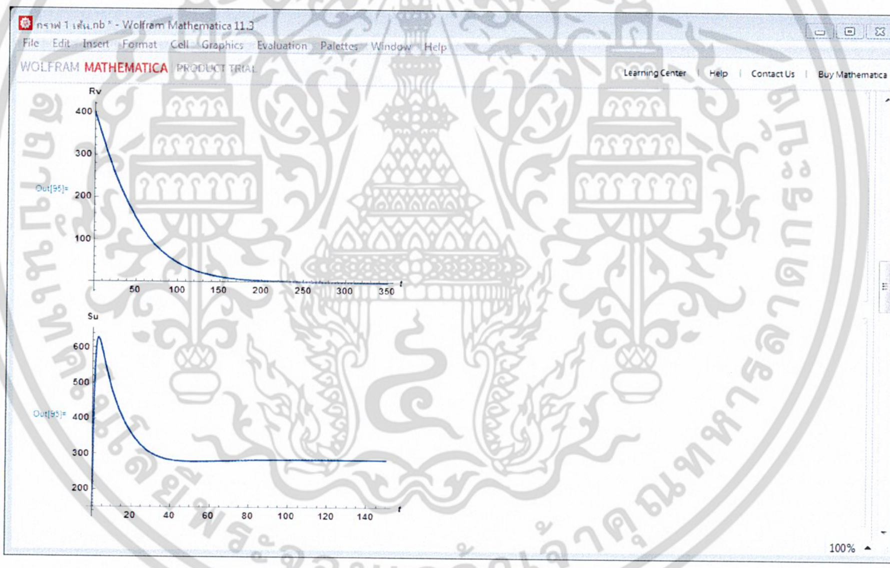


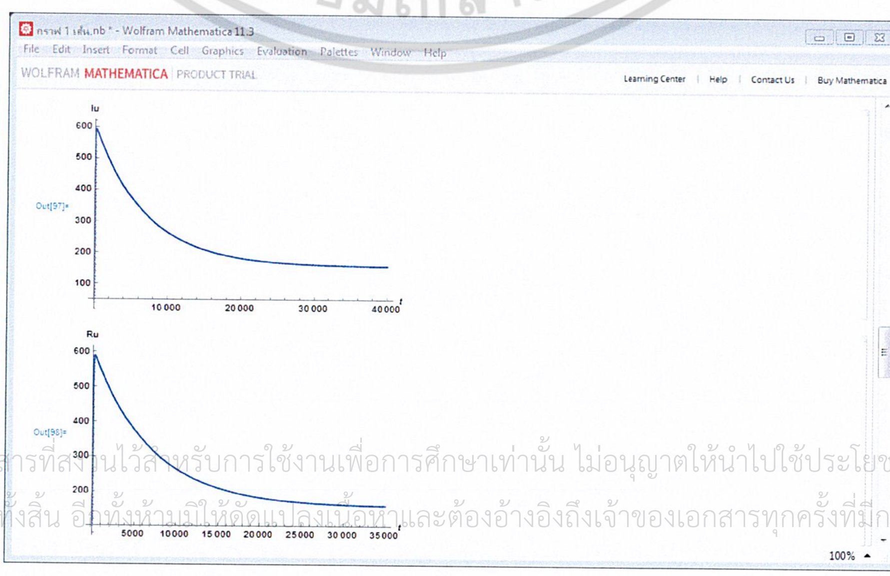
2. Plot กราฟโดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้



3. กด Shift+Enter จะได้กราฟ ดังรูป





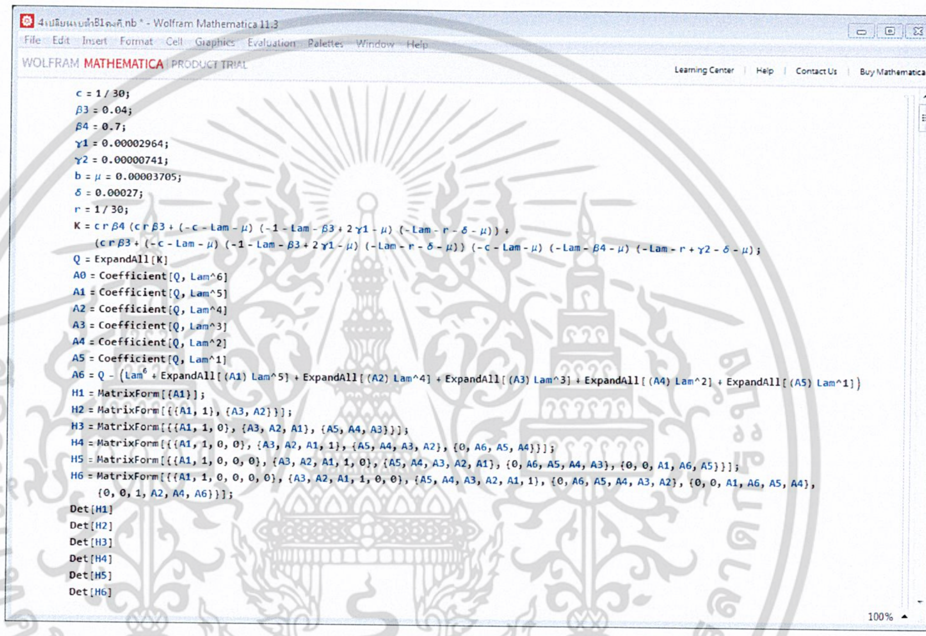


การเปรียบเทียบกราฟเมื่อเปลี่ยนค่า β_3, β_4 เพิ่มขึ้น และลดลง

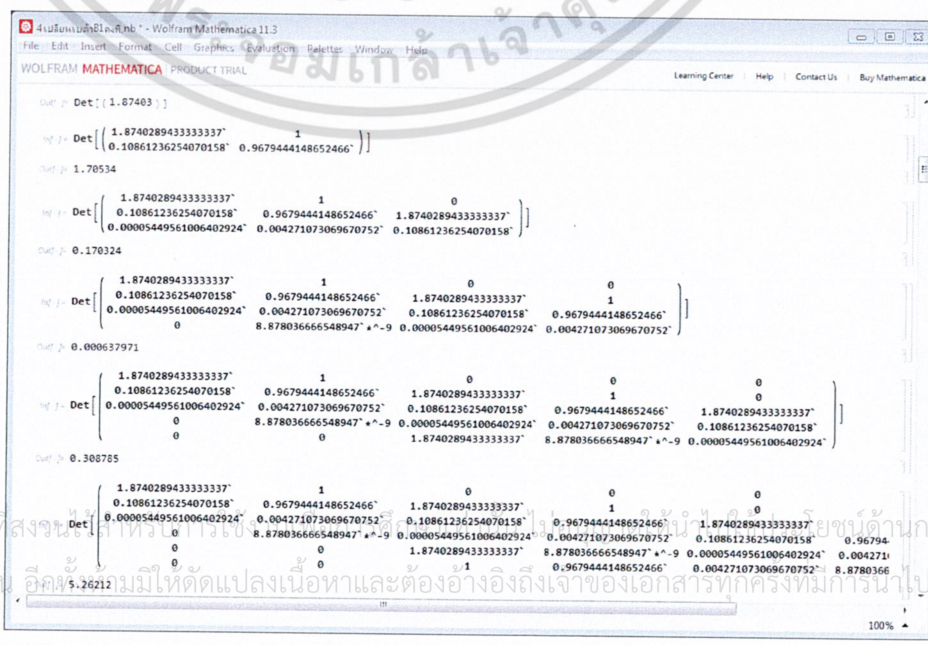
กรณี 1 $\beta_3 = 0.04$ คงที่ และให้ β_4 เพิ่มขึ้น จาก 0.07 เป็น 0. 7 และลดลงจาก 0.07 เป็น 0.0007

เมื่อ $\beta_3 = 0.04$ คงที่ และให้ β_4 เพิ่มขึ้น

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

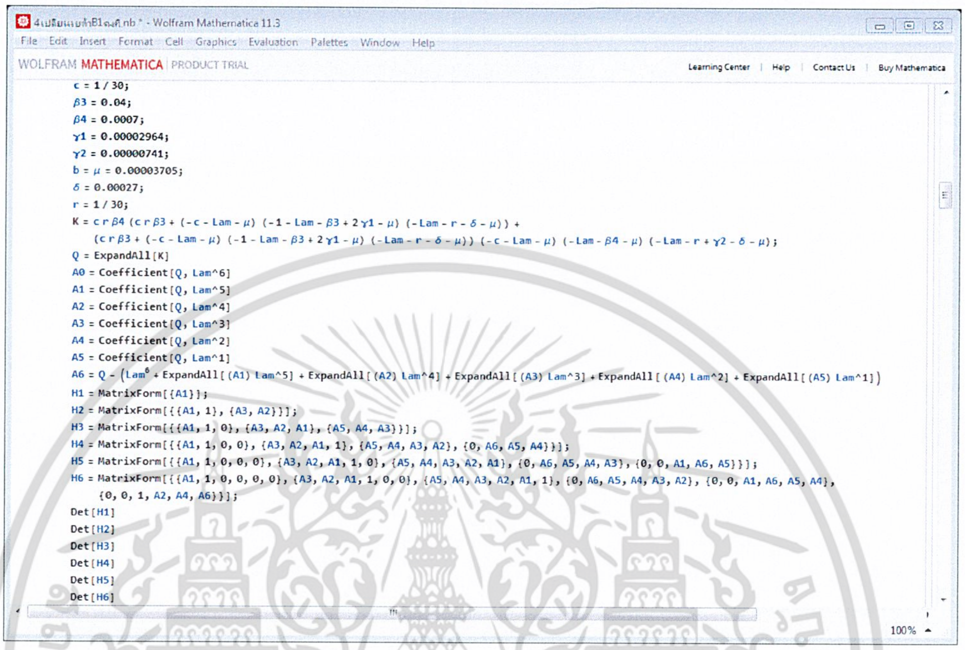


2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

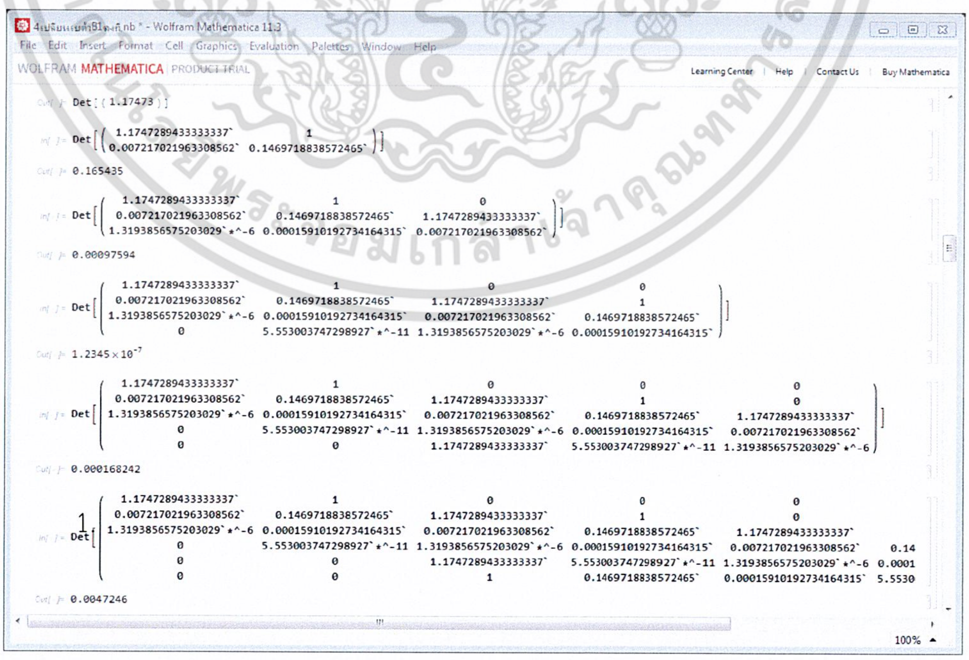


เมื่อ $\beta_3 = 0.04$ คงที่ และให้ β_4 ลดลง

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

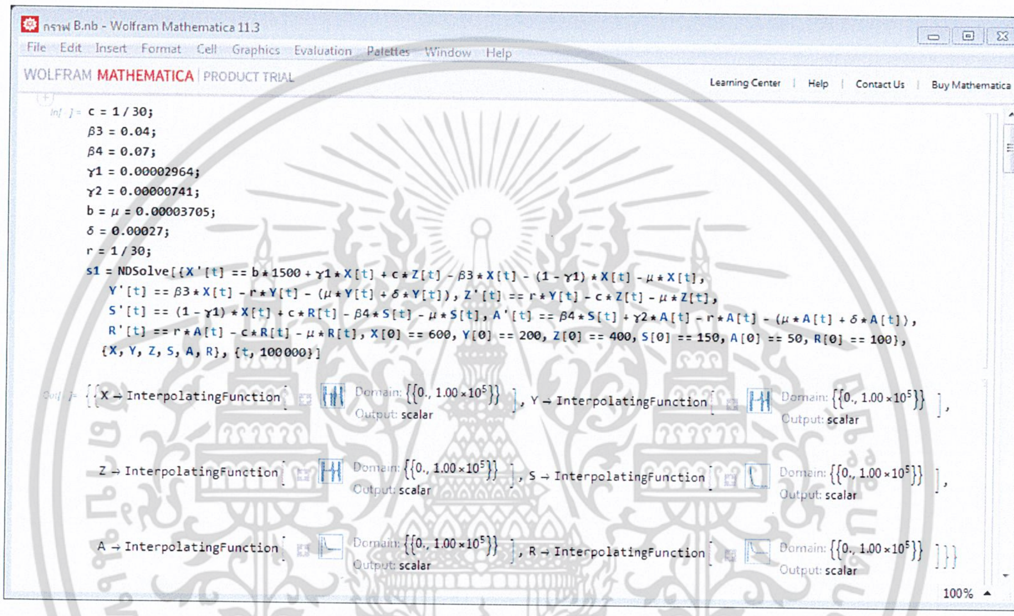


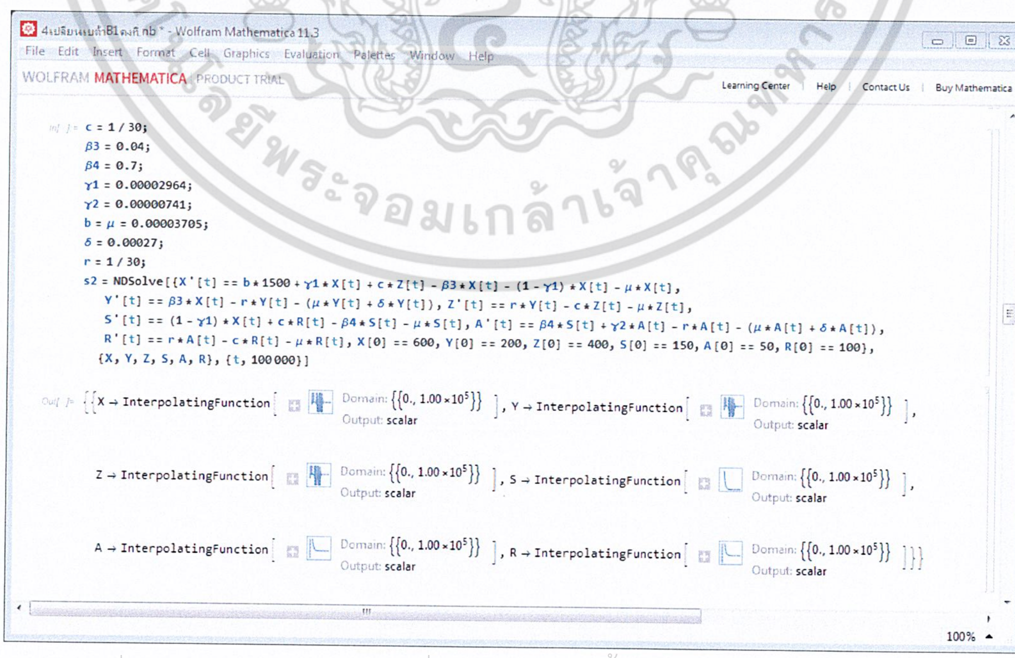
2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

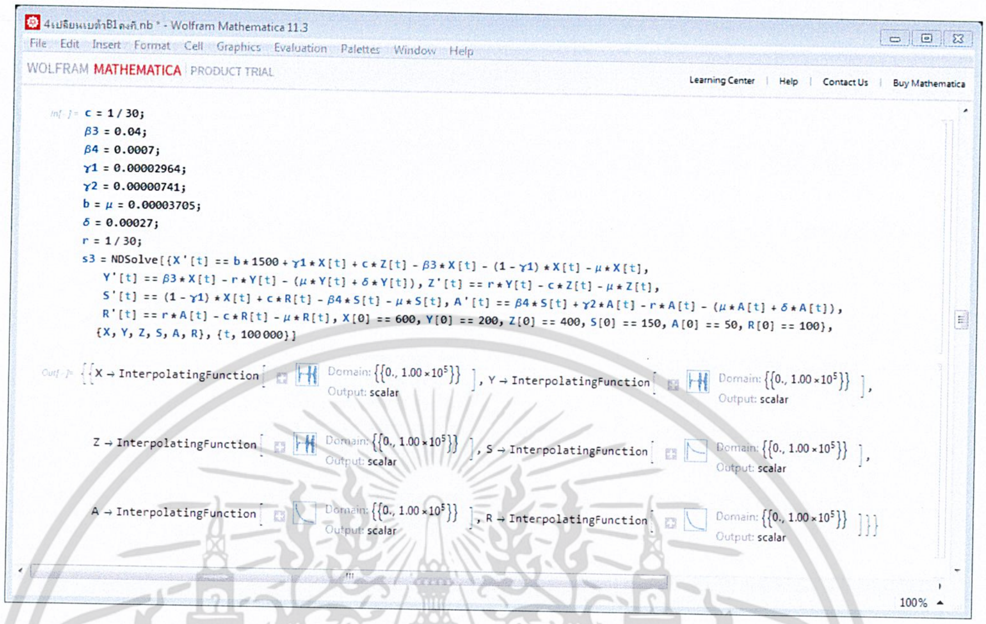


เมื่อทดสอบความเสถียรของการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละชุดแล้ว ก็นำมา Plot กราฟเปรียบเทียบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง

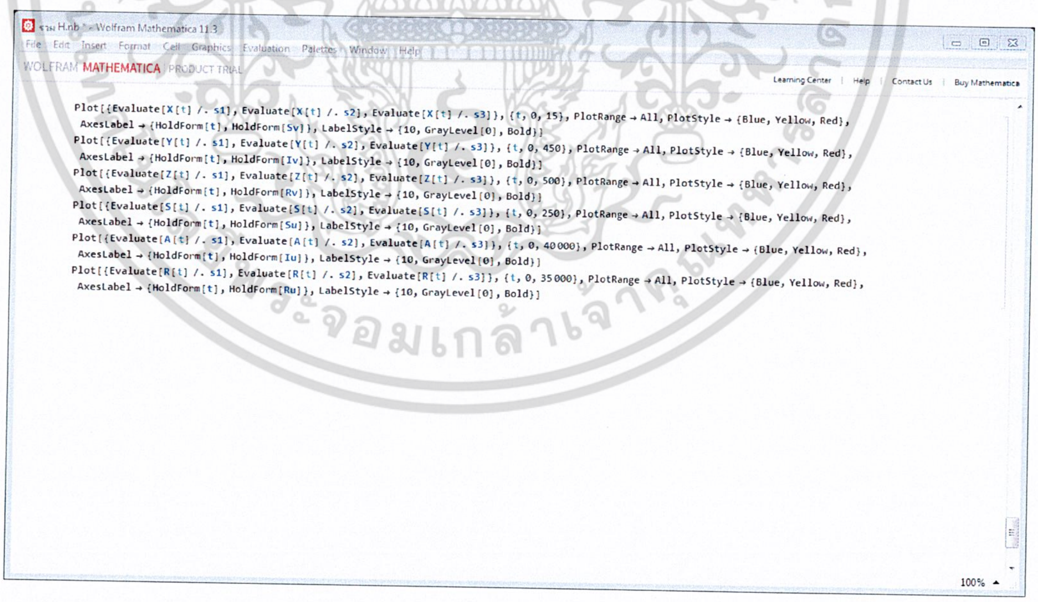
1. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจสอบความเสถียรภาพด้วยวิธีรูทเฮอวิธ แล้วใช้คำสั่ง NDSolve ตามด้วยสมการ แล้วกด Shift+Enter จะได้ดังรูปต่อไปนี้



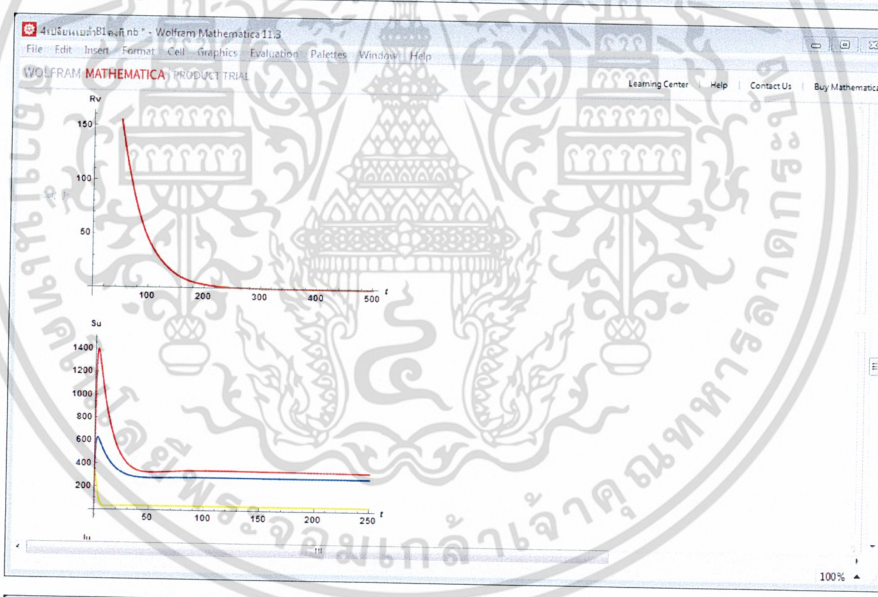


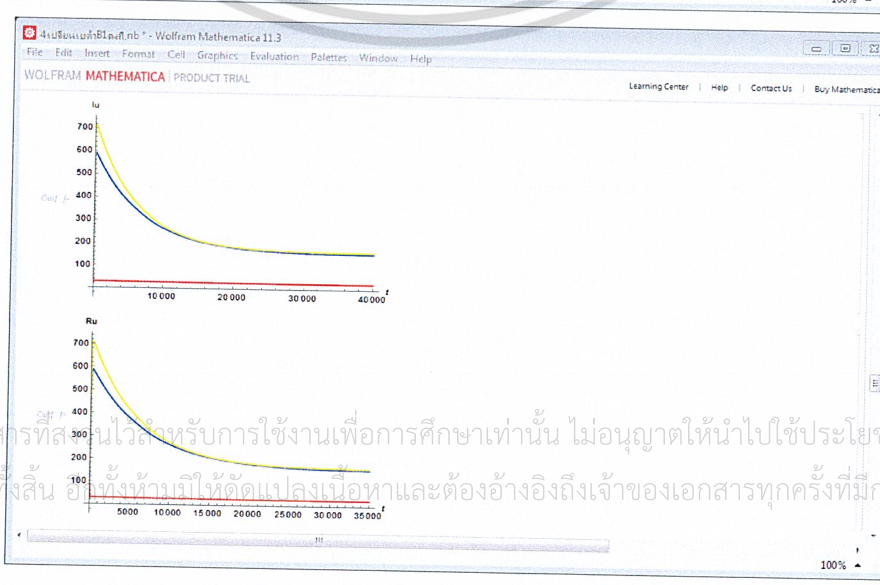


2. Plot กราฟโดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้



3. กด Shift+Enter จะได้กราฟ ดังรูป

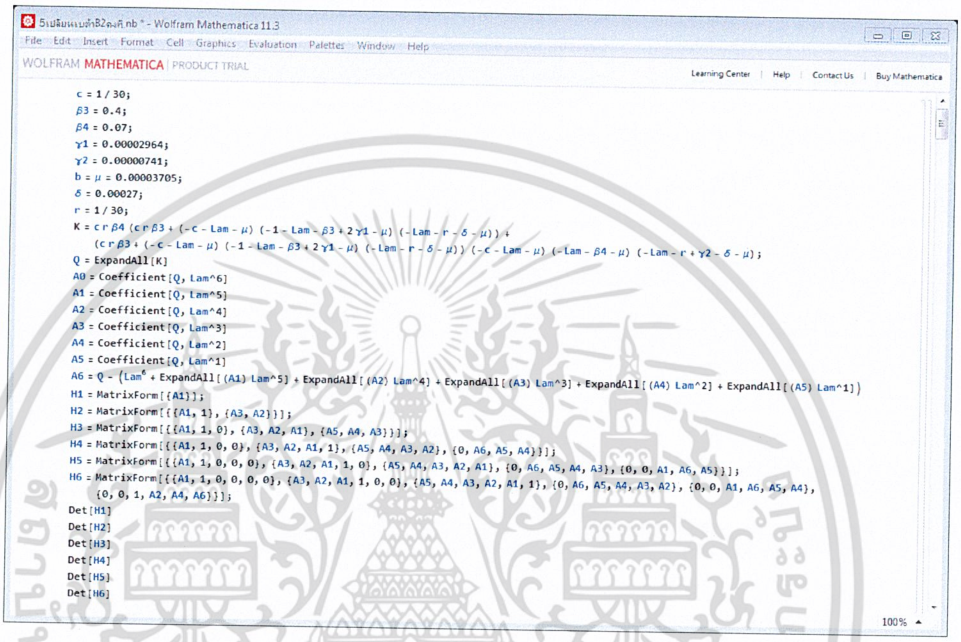




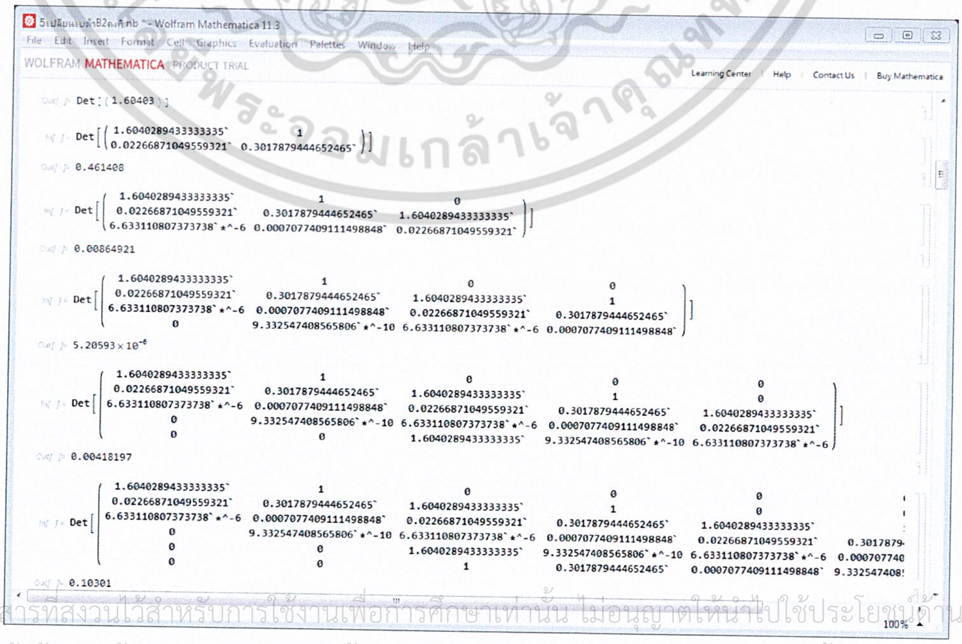
กรณี 2 $\beta_4 = 0.07$ คงที่ และให้ β_3 เพิ่มขึ้น จาก 0.04 เป็น 0. 4 และลดลงจาก 0.04 เป็น 0.0004

เมื่อ $\beta_4 = 0.07$คงที่ และให้ β_3 เพิ่มขึ้น

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

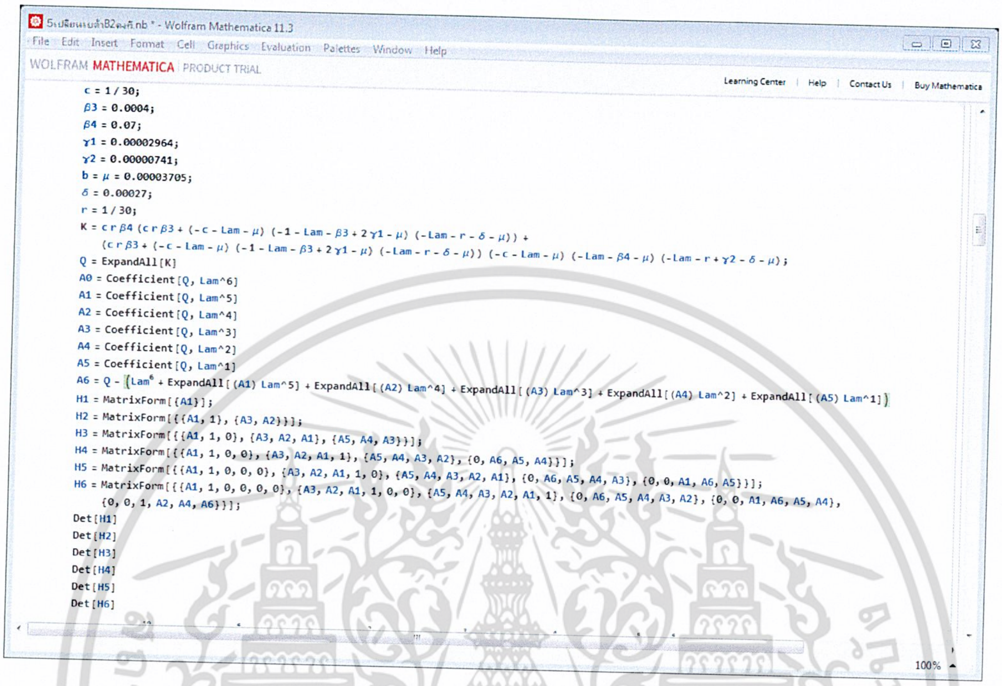


2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

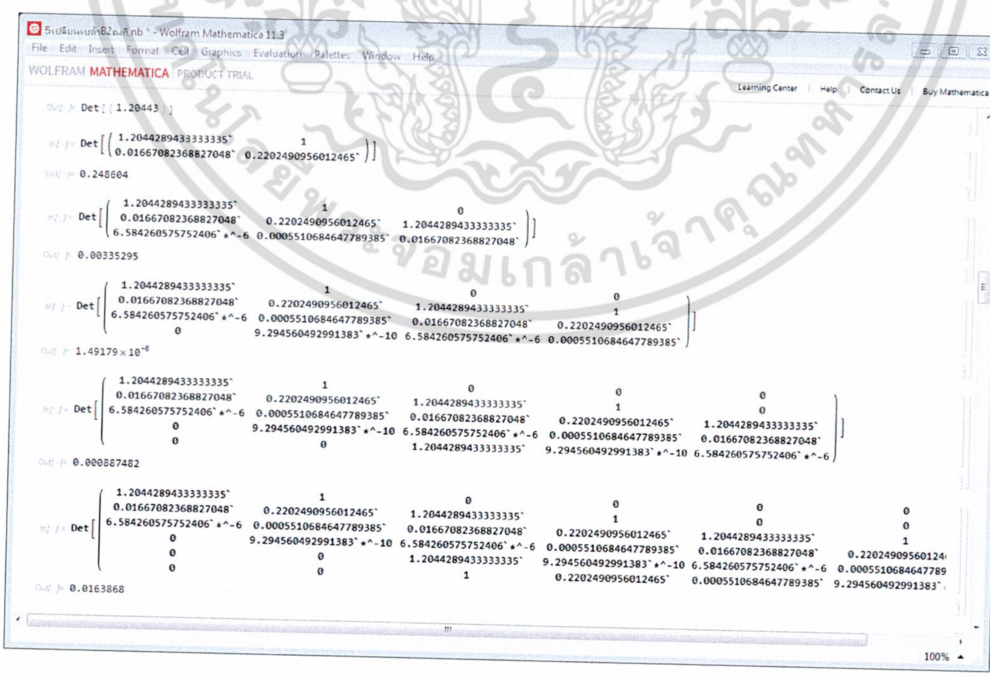


เมื่อ $\beta_4 = 0.07$คงที่ และให้ β_3 ลดลง

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ



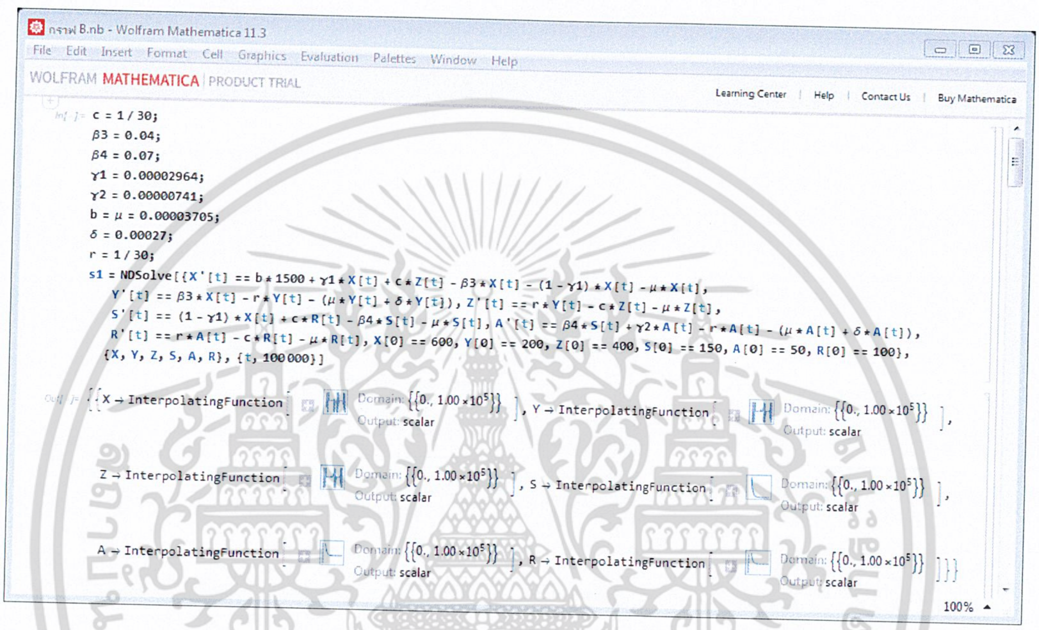
2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

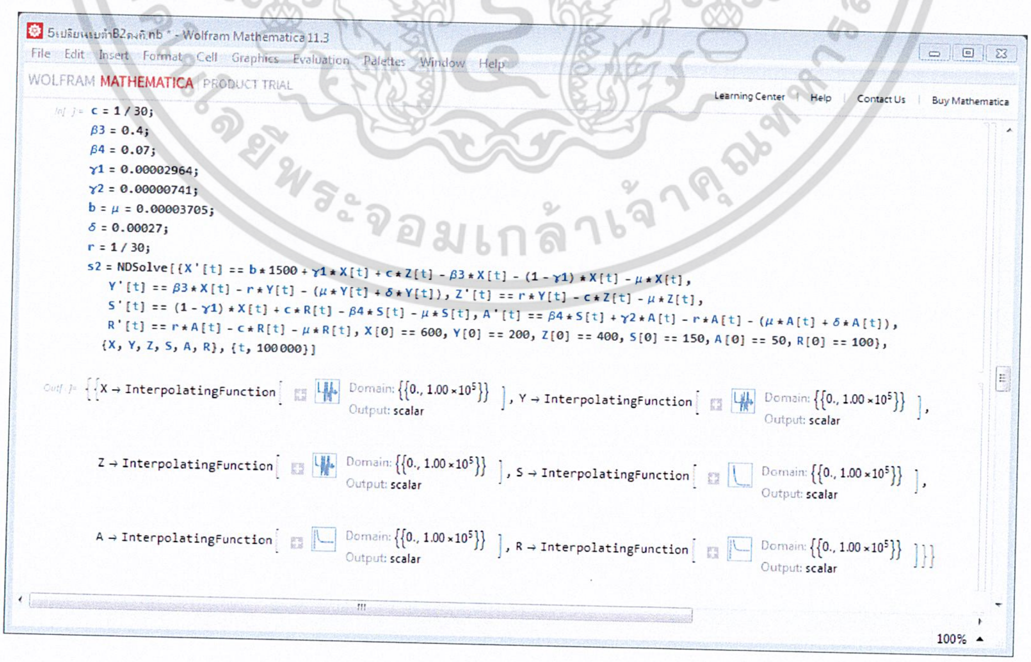


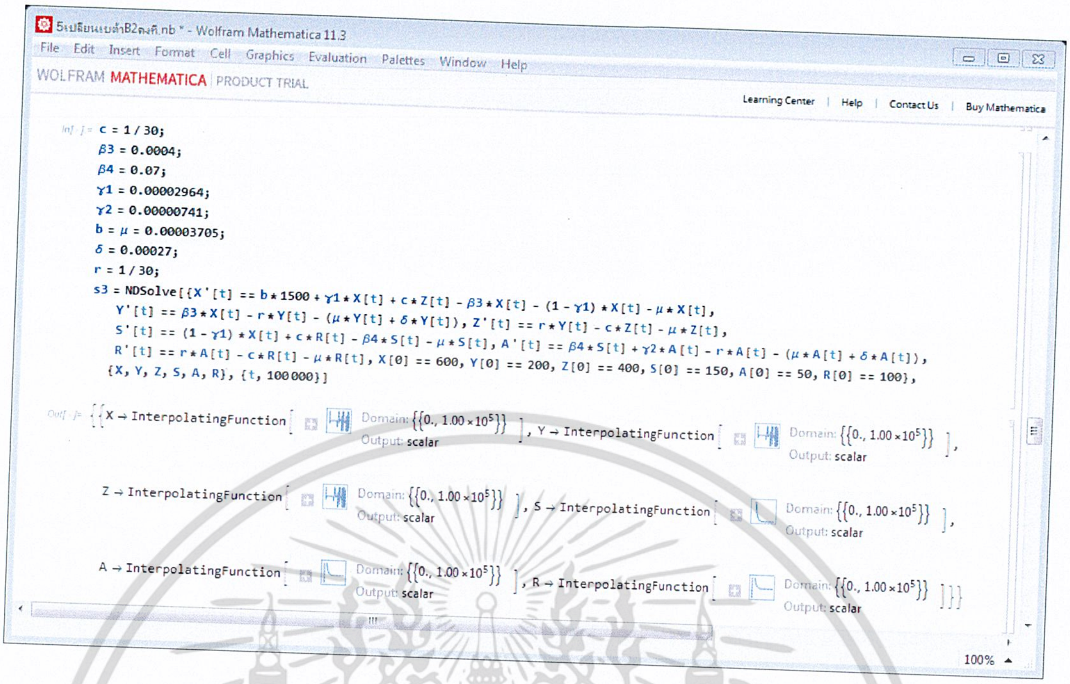
2.

เมื่อทดสอบความเสถียรของการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละชุดแล้ว ก็นำมา Plot กราฟเปรียบเทียบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง

1. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจสอบความเสถียรภาพด้วยวิธีรูทเฮอวิธ แล้วใช้คำสั่ง NDSolve ตามด้วยสมการ แล้วกด Shift+Enter จะได้ดังรูปต่อไปนี้

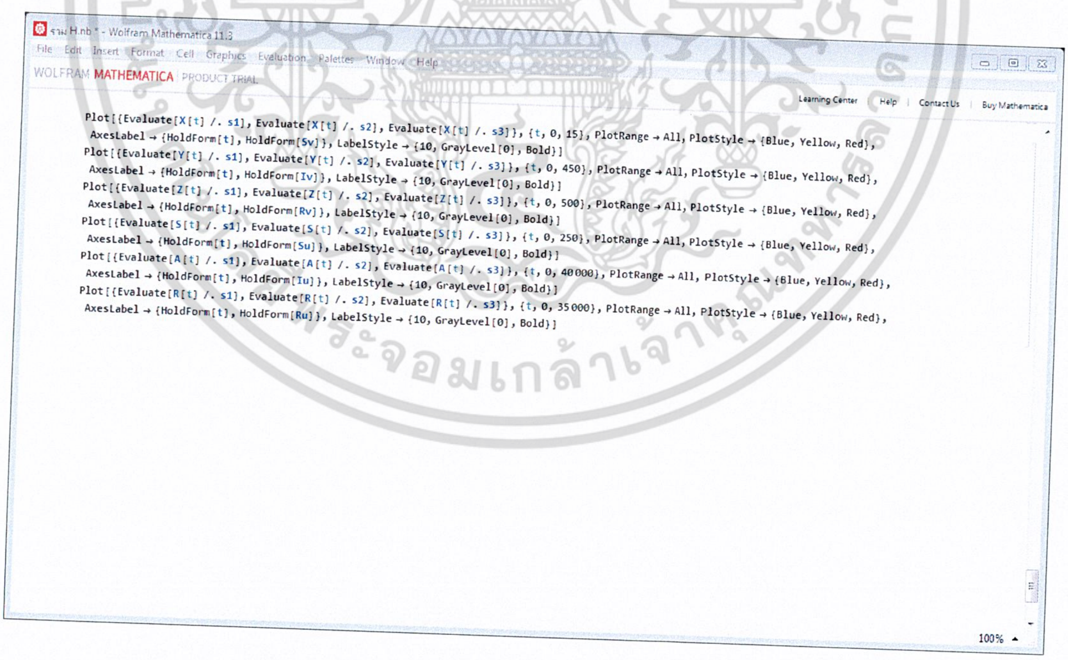






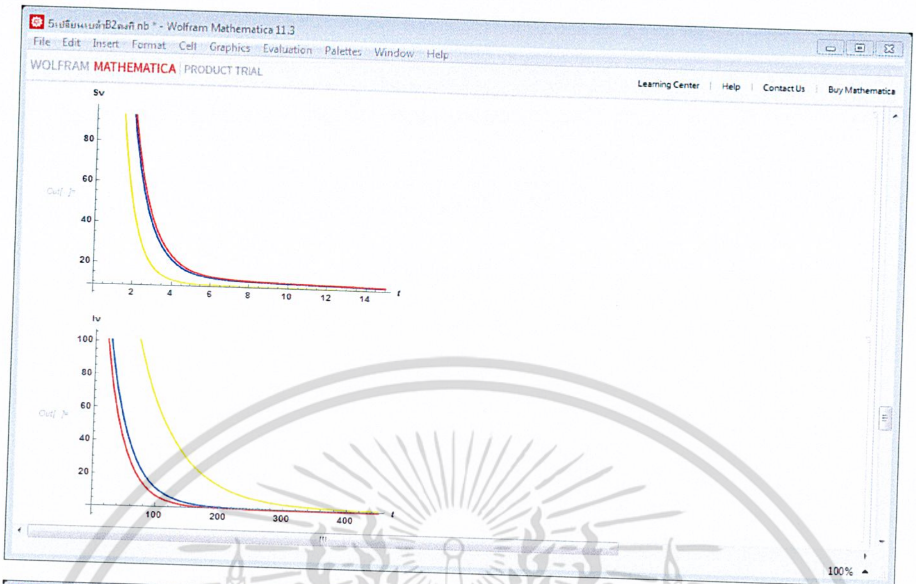
```
c = 1 / 30;
β3 = 0.0004;
β4 = 0.07;
γ1 = 0.00002964;
γ2 = 0.00000741;
b = μ = 0.00003705;
δ = 0.00027;
r = 1 / 30;
s3 = NDSolve[{X'[t] == b * 1500 + γ1 * X[t] + c * Z[t] - β3 * X[t] - (1 - γ1) * X[t] - μ * X[t],
   Y'[t] == β3 * X[t] - r * Y[t] - (μ * Y[t] + δ * Y[t]), Z'[t] == r * Y[t] - c * Z[t] - μ * Z[t],
   S'[t] == (1 - γ1) * X[t] + c * R[t] - β4 * S[t] - μ * S[t], A'[t] == β4 * S[t] + γ2 * A[t] - r * A[t] - (μ * A[t] + δ * A[t]),
   R'[t] == r * A[t] - c * R[t] - μ * R[t], X[0] == 600, Y[0] == 200, Z[0] == 400, S[0] == 150, A[0] == 50, R[0] == 100},
  {X, Y, Z, S, A, R}, {t, 100000}]

{{X → InterpolatingFunction[Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar], Y → InterpolatingFunction[Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar],
  Z → InterpolatingFunction[Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar], S → InterpolatingFunction[Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar],
  A → InterpolatingFunction[Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar], R → InterpolatingFunction[Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar]}}
```

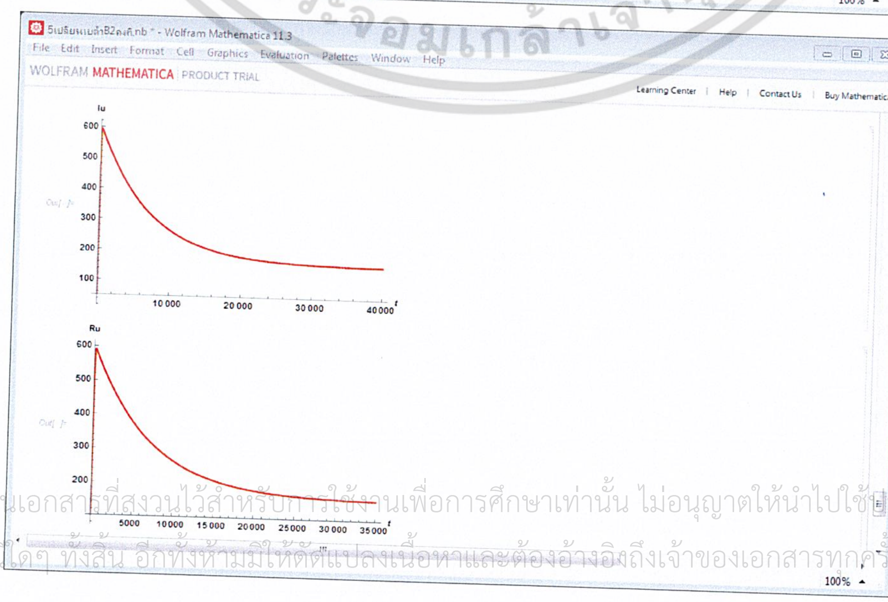
2. Plot กราฟโดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้



```
Plot[{Evaluate[X[t] /. s1], Evaluate[X[t] /. s2], Evaluate[X[t] /. s3]}, {t, 0, 15}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Sv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[Y[t] /. s1], Evaluate[Y[t] /. s2], Evaluate[Y[t] /. s3]}, {t, 0, 450}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Iv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[Z[t] /. s1], Evaluate[Z[t] /. s2], Evaluate[Z[t] /. s3]}, {t, 0, 500}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Rv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[S[t] /. s1], Evaluate[S[t] /. s2], Evaluate[S[t] /. s3]}, {t, 0, 250}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Su]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[A[t] /. s1], Evaluate[A[t] /. s2], Evaluate[A[t] /. s3]}, {t, 0, 40000}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Iu]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[R[t] /. s1], Evaluate[R[t] /. s2], Evaluate[R[t] /. s3]}, {t, 0, 35000}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Ru]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
```

3. กด Shift+Enter จะได้กราฟ ดังรูป

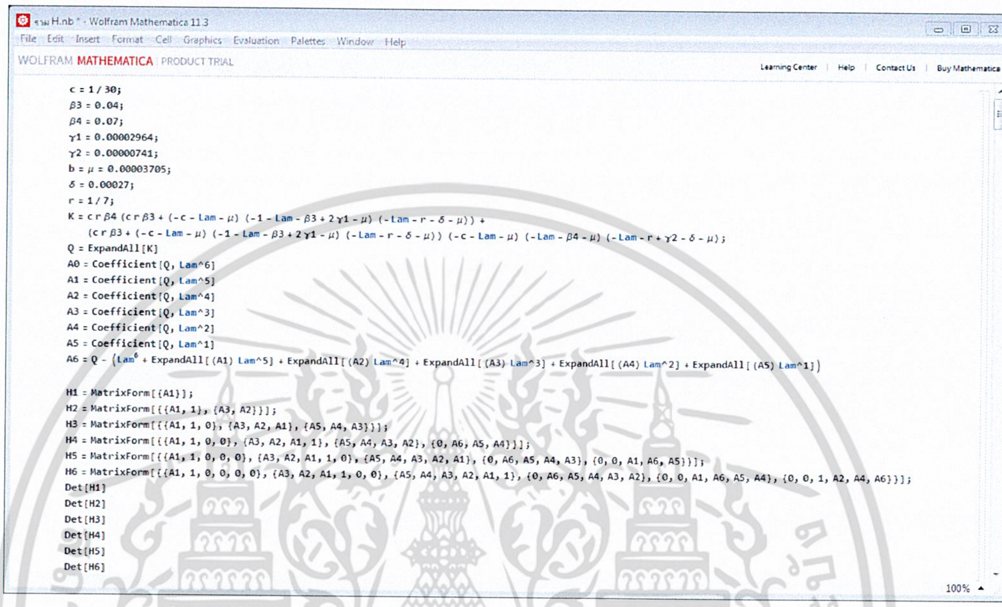




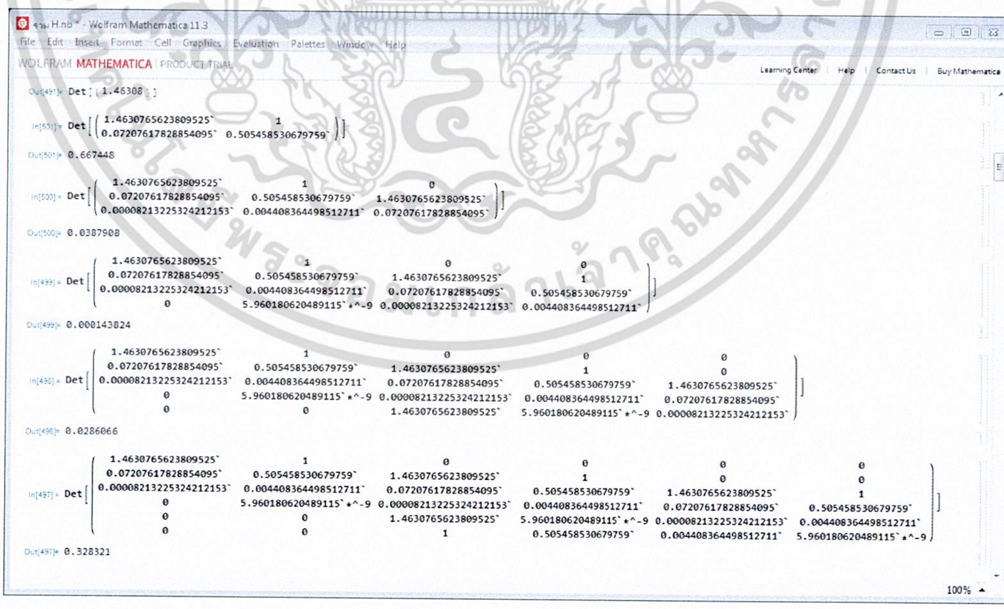
การเปรียบเทียบกราฟเมื่อเปลี่ยนค่า r เพิ่มขึ้น และลดลง

กรณี r เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/7

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

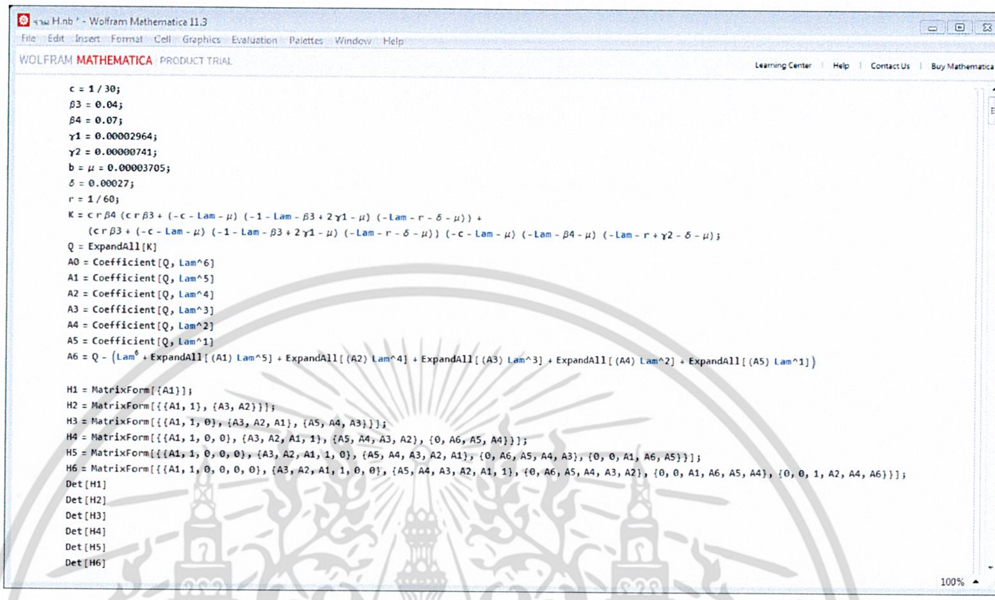


2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

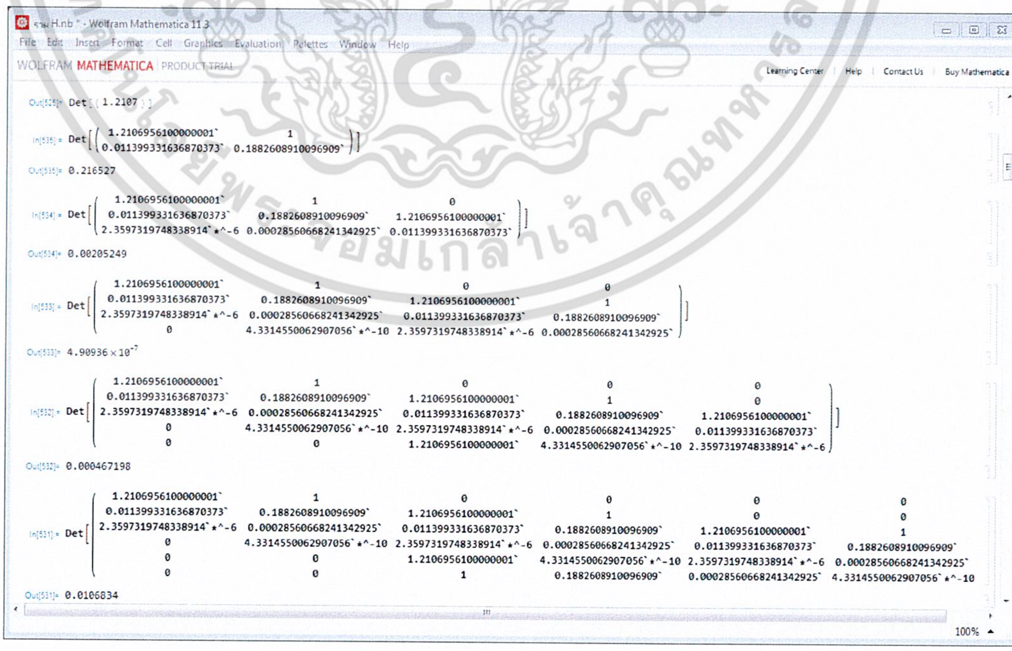


กรณี r ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/60

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

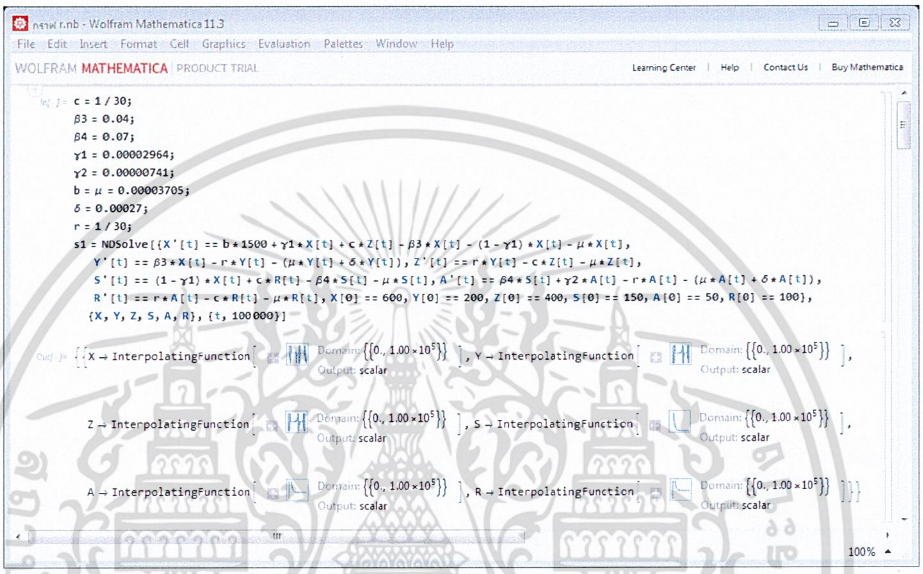


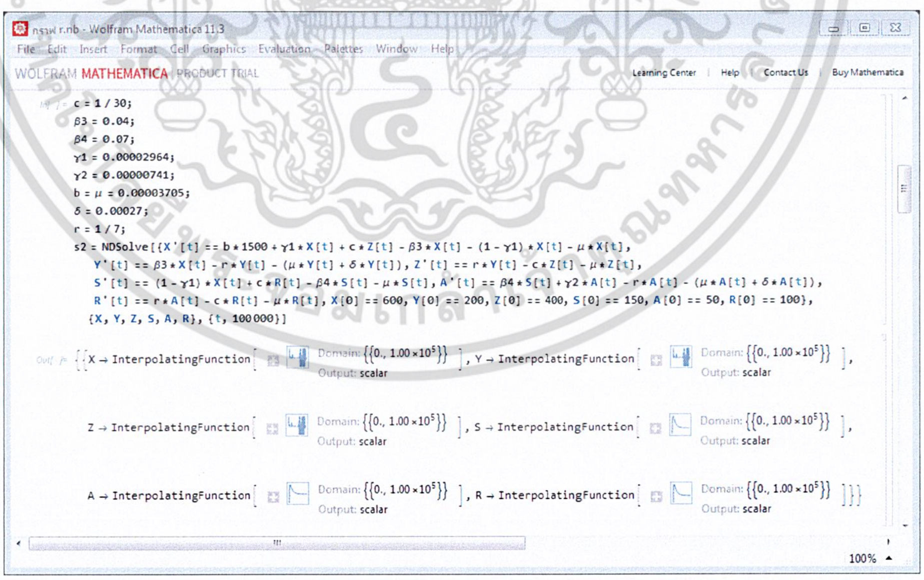
2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

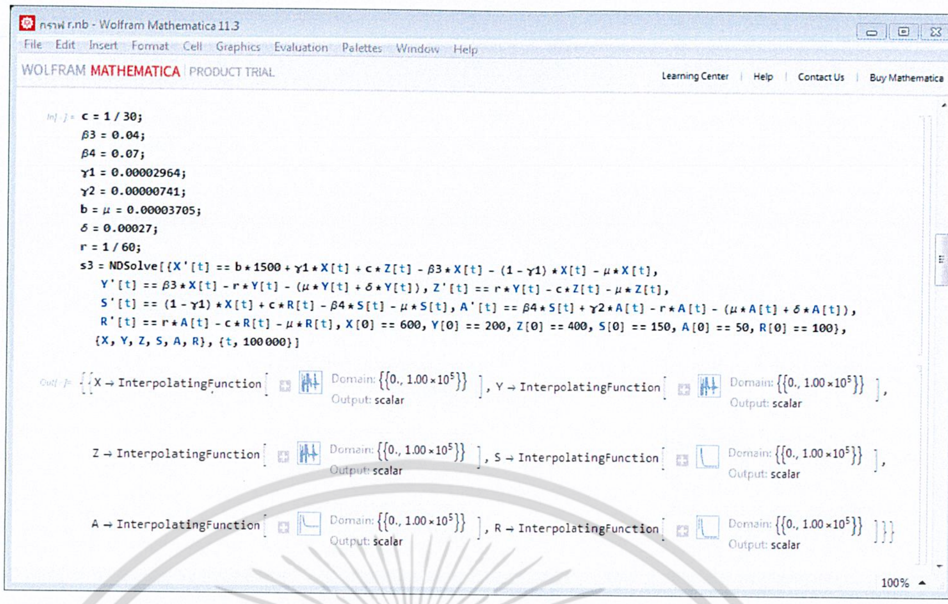


เมื่อทดสอบความเสถียรของการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละชุดแล้ว ก็นำมา Plot กราฟเปรียบเทียบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง

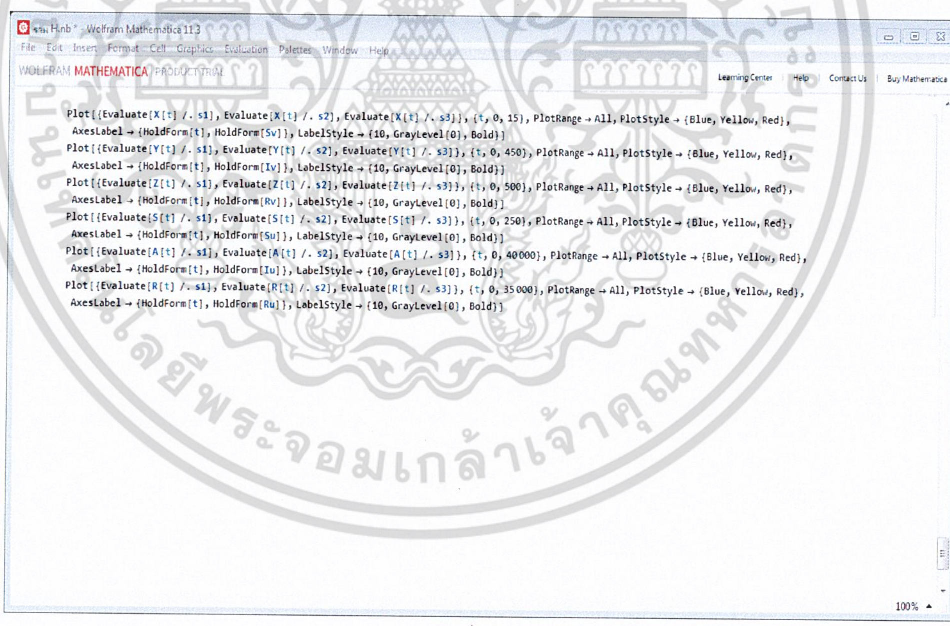
1. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจสอบความเสถียรภาพด้วยวิธีรูทเฮอวิธ แล้วใช้คำสั่ง NDSolve ตามด้วยสมการ แล้วกด Shift+Enter จะได้ดังรูปต่อไปนี้



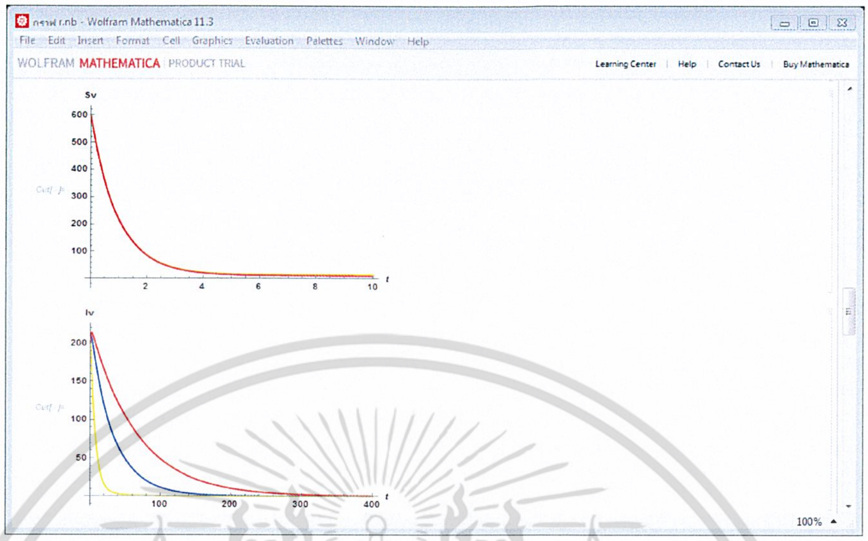


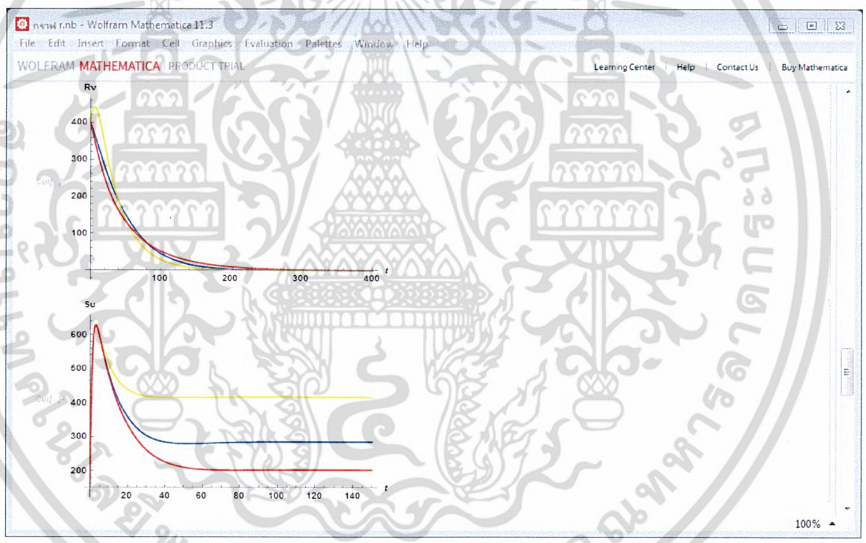


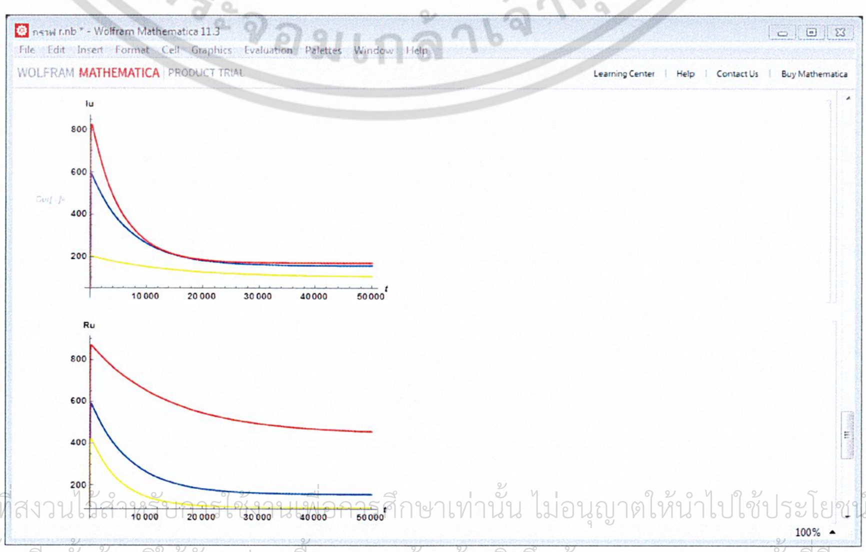
2. Plot กราฟโดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้



3. กด Shift+Enter จะได้กราฟ ดังรูป



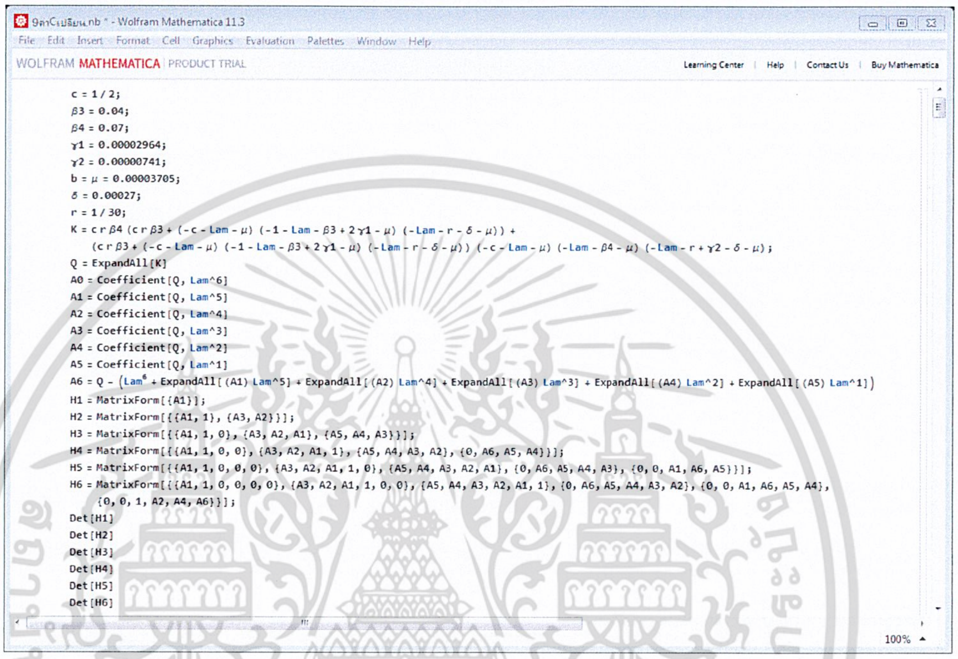




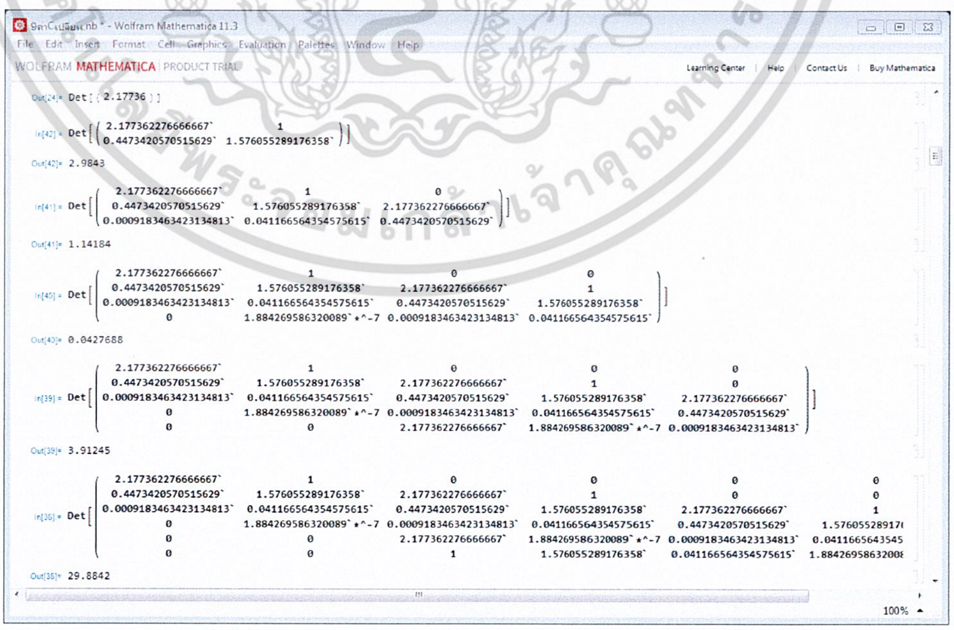
การเปรียบเทียบกราฟเมื่อเปลี่ยนค่า C เพิ่มขึ้น และลดลง

กรณี C เพิ่มขึ้น จาก 1/30 เป็น 1/2

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

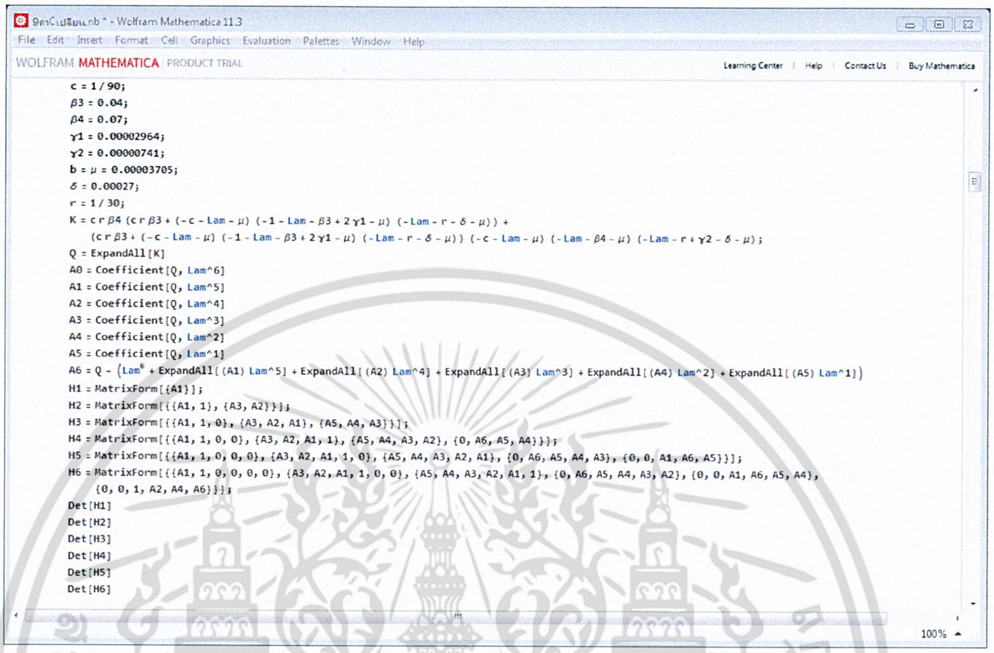


2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

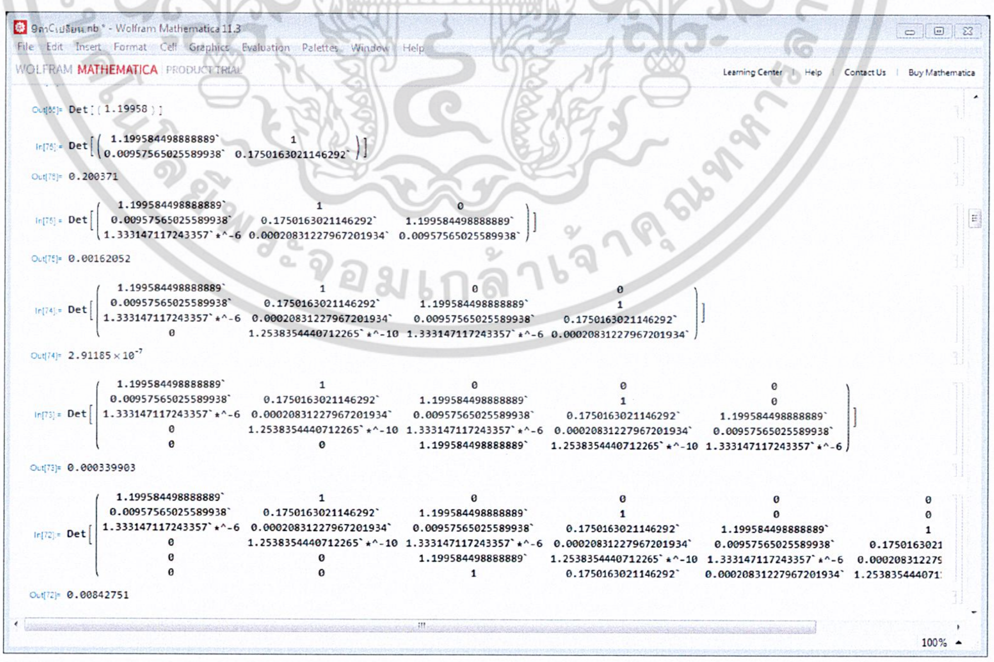


กรณี C ลดลง จาก 1/30 เป็น 1/90

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

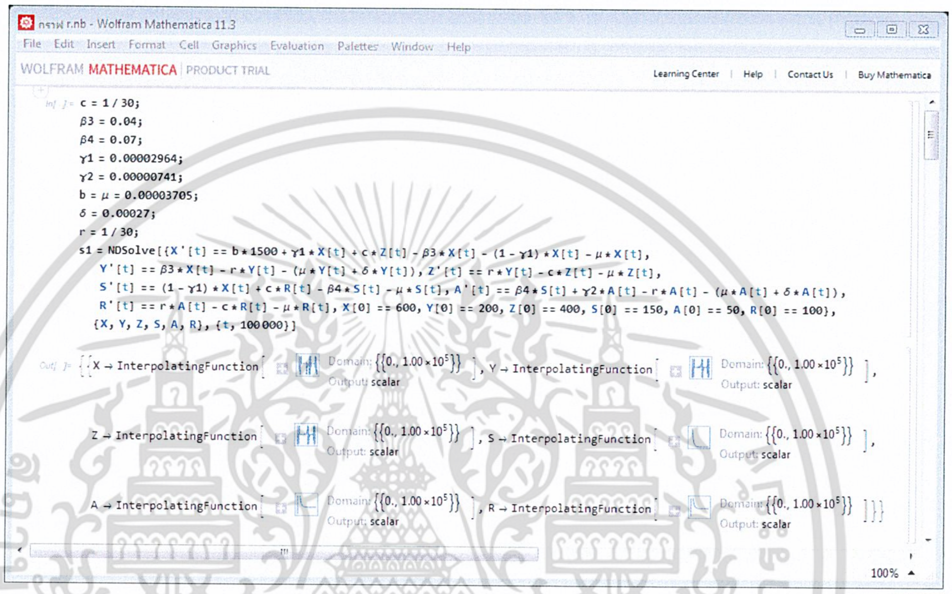


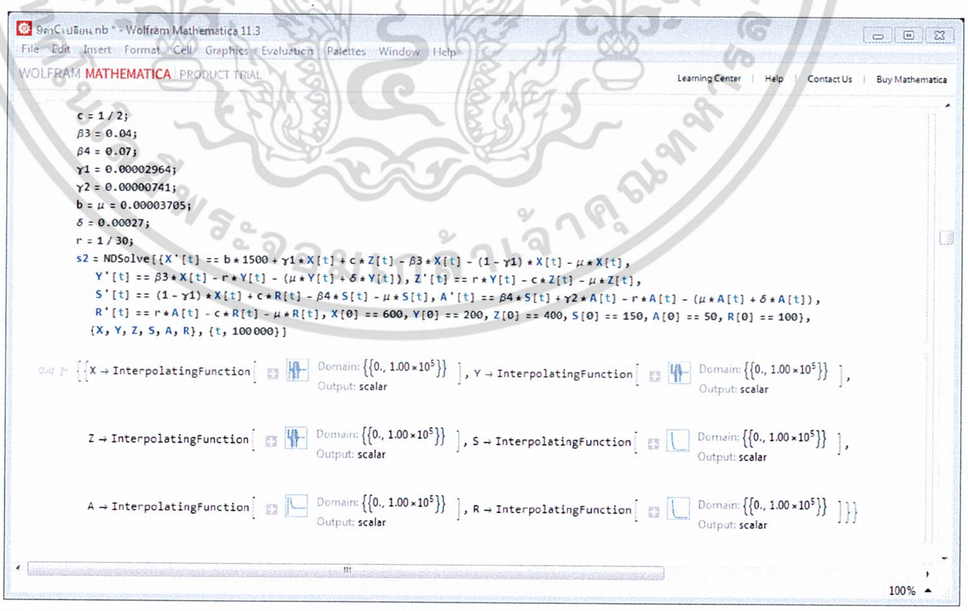
2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป



เมื่อทดสอบความเสถียรของการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละชุดแล้ว ก็นำมา Plot กราฟเปรียบเทียบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง

1. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจสอบความเสถียรภาพด้วยวิธีรูทเฮอวิธ แล้วใช้คำสั่ง NDSolve ตามด้วยสมการ แล้วกด Shift+Enter จะได้ดังรูปต่อไปนี้



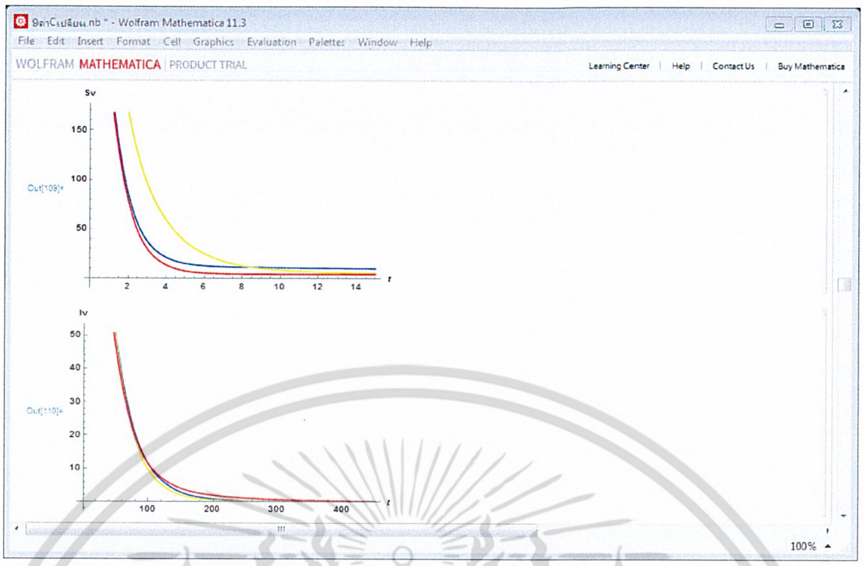


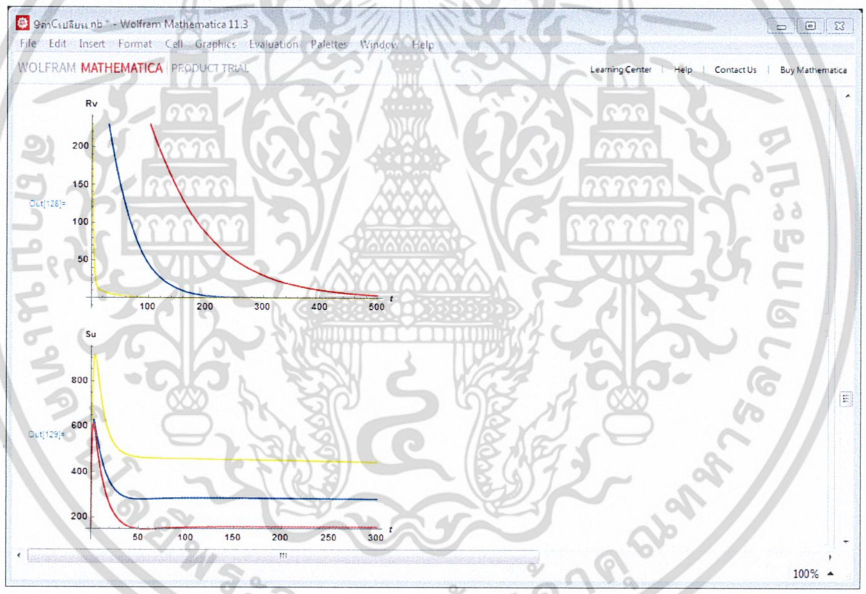
```
c = 1 / 90;
β3 = 0.04;
β4 = 0.07;
γ1 = 0.00002964;
γ2 = 0.00000741;
b = μ = 0.00003705;
δ = 0.00027;
r = 1 / 30;
s3 = NDSolve[{X'[t] == b * 1500 + γ1 * X[t] + c * Z[t] - β3 * X[t] - (1 - γ1) * X[t] - μ * X[t],
   Y'[t] == β3 * X[t] - r * Y[t] - (μ * Y[t] + δ * Y[t]), Z'[t] == r * Y[t] - c * Z[t] - μ * Z[t],
   S'[t] == (1 - γ1) * X[t] + c * R[t] - β4 * S[t] - μ * S[t], A'[t] == β4 * S[t] + γ2 * A[t] - r * A[t] - (μ * A[t] + δ * A[t]),
   R'[t] == r * A[t] - c * R[t] - μ * R[t], X[0] == 600, Y[0] == 200, Z[0] == 400, S[0] == 150, A[0] == 50, R[0] == 100},
  {X, Y, Z, S, A, R}, {t, 100000}]

{{X → InterpolatingFunction[ Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar ], Y → InterpolatingFunction[ Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar ],
  Z → InterpolatingFunction[ Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar ], S → InterpolatingFunction[ Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar ],
  A → InterpolatingFunction[ Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar ], R → InterpolatingFunction[ Domain: {{0., 1.00×10^5}} Output: scalar ]}}
```

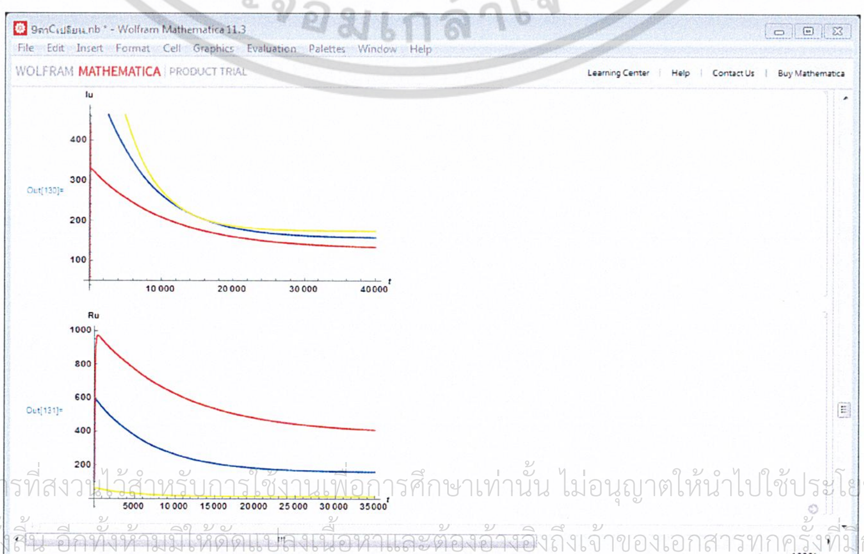
2. Plot กราฟโดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้

```
Plot[{Evaluate[X[t] /. s1], Evaluate[X[t] /. s2], Evaluate[X[t] /. s3]}, {t, 0, 15}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Sv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[Y[t] /. s1], Evaluate[Y[t] /. s2], Evaluate[Y[t] /. s3]}, {t, 0, 450}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Iv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[Z[t] /. s1], Evaluate[Z[t] /. s2], Evaluate[Z[t] /. s3]}, {t, 0, 500}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Rv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[S[t] /. s1], Evaluate[S[t] /. s2], Evaluate[S[t] /. s3]}, {t, 0, 250}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Su]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[A[t] /. s1], Evaluate[A[t] /. s2], Evaluate[A[t] /. s3]}, {t, 0, 40000}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Iu]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[R[t] /. s1], Evaluate[R[t] /. s2], Evaluate[R[t] /. s3]}, {t, 0, 35000}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Ru]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
```

3. กด Shift+Enter จะได้กราฟ ดังรูป



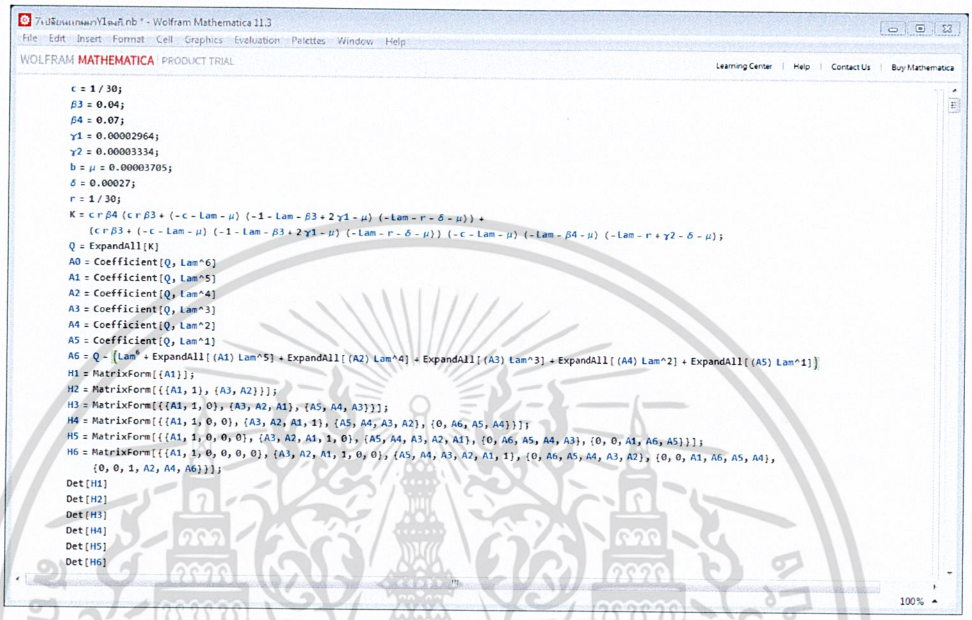




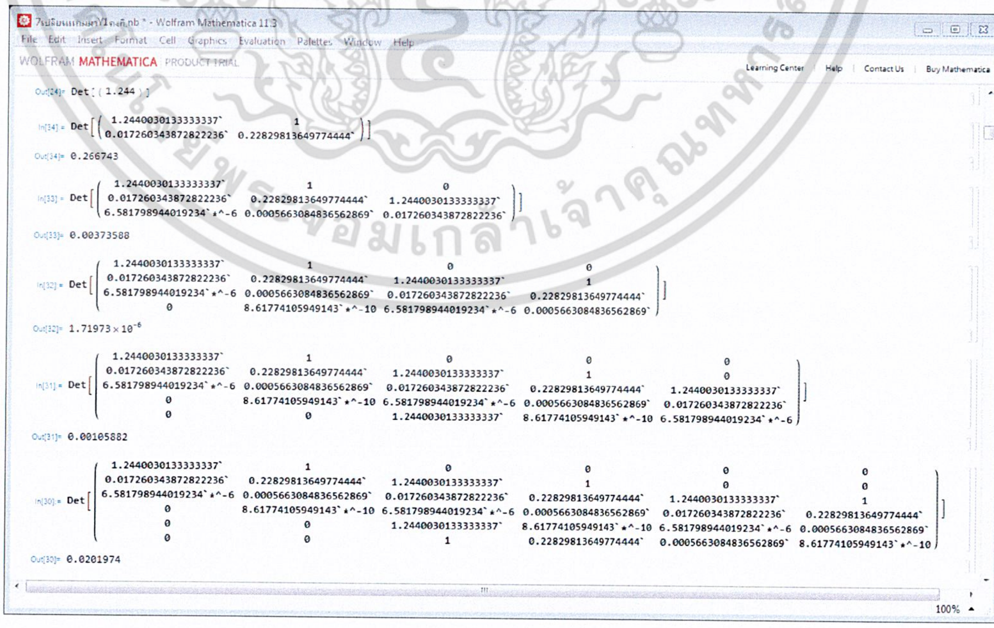
การเปรียบเทียบกราฟเมื่อเปลี่ยนค่า γ1 คงที่ และ γ2 เพิ่มขึ้นและลดลง

γ1 คงที่ และ γ2 เพิ่มขึ้น จาก 0.2 เป็น 0.9

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

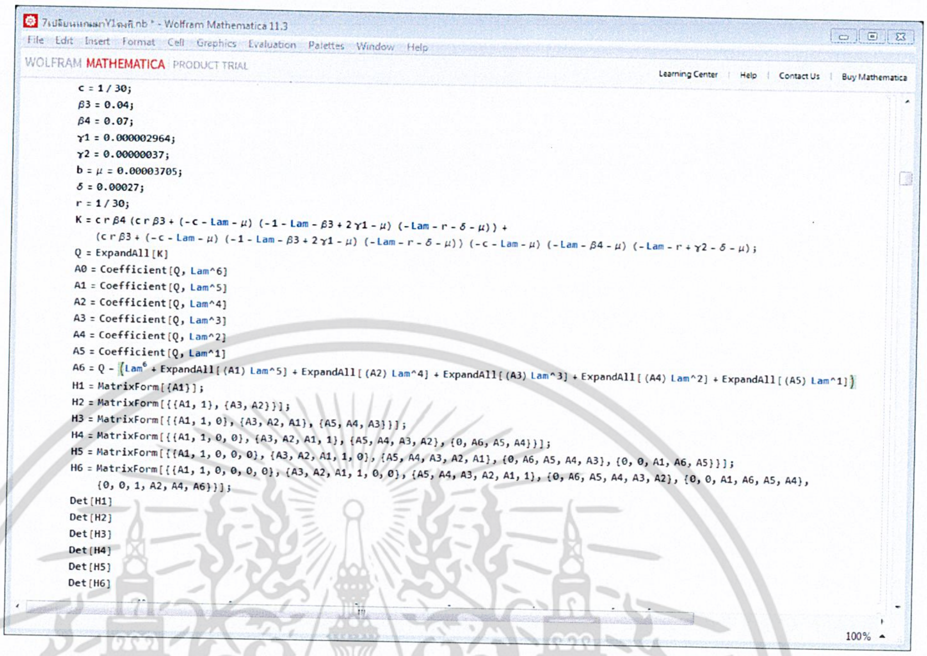


2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

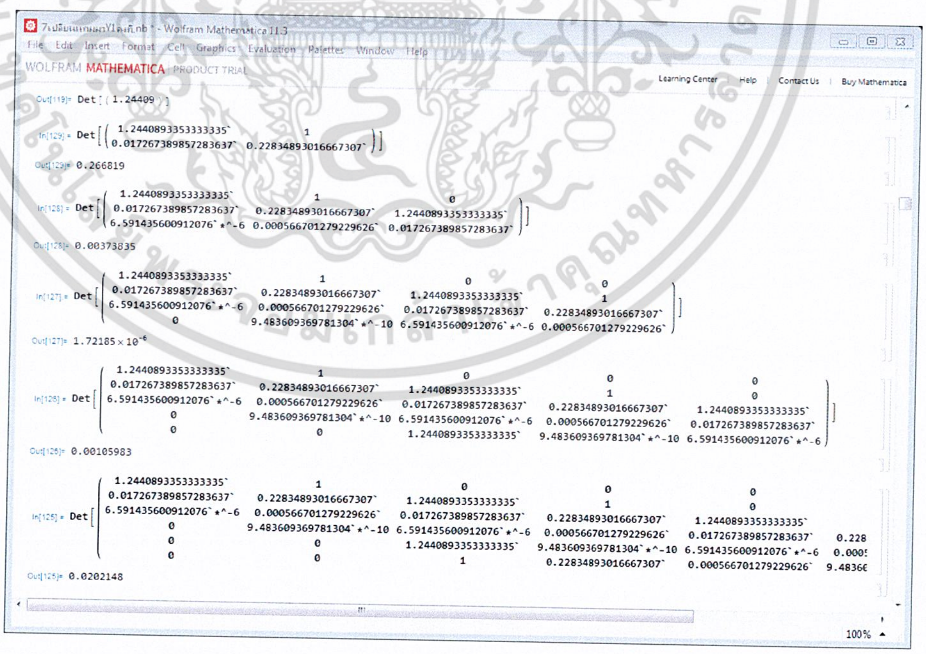


เมื่อ γ1 คงที่ และ γ2 ลดลง จาก 0.2 เป็น 0.01

1. ทดสอบด้วยวิธีรูทเฮอวิธ

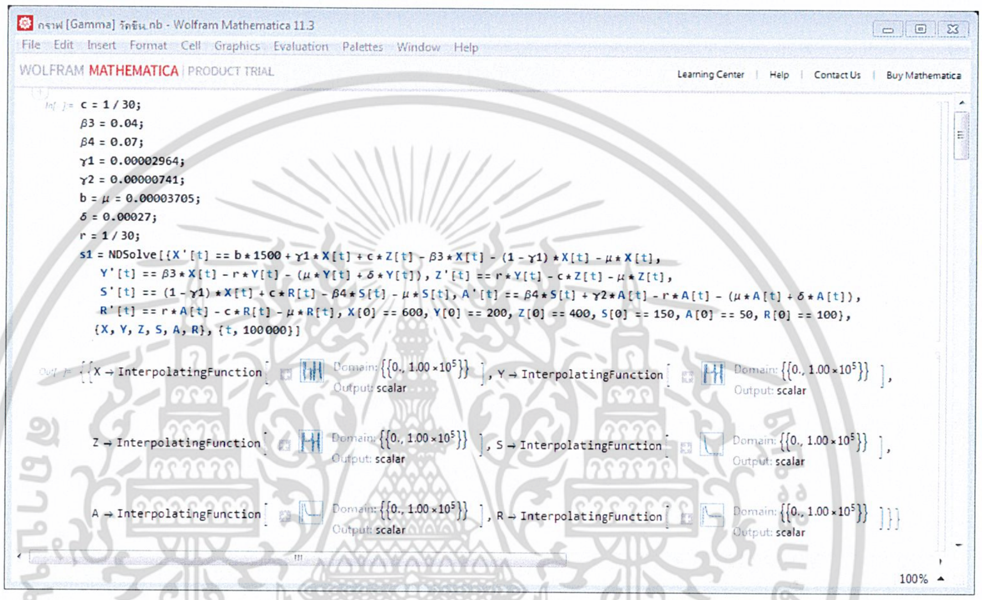


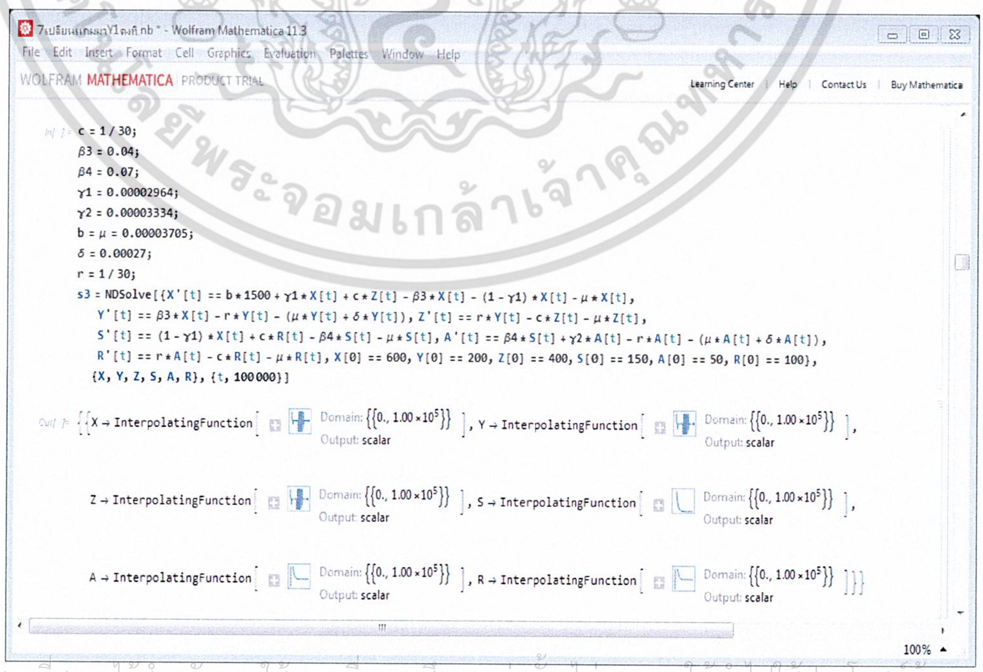
2. กด Shift + Enter จะได้ค่า H1-H6 ดังรูป

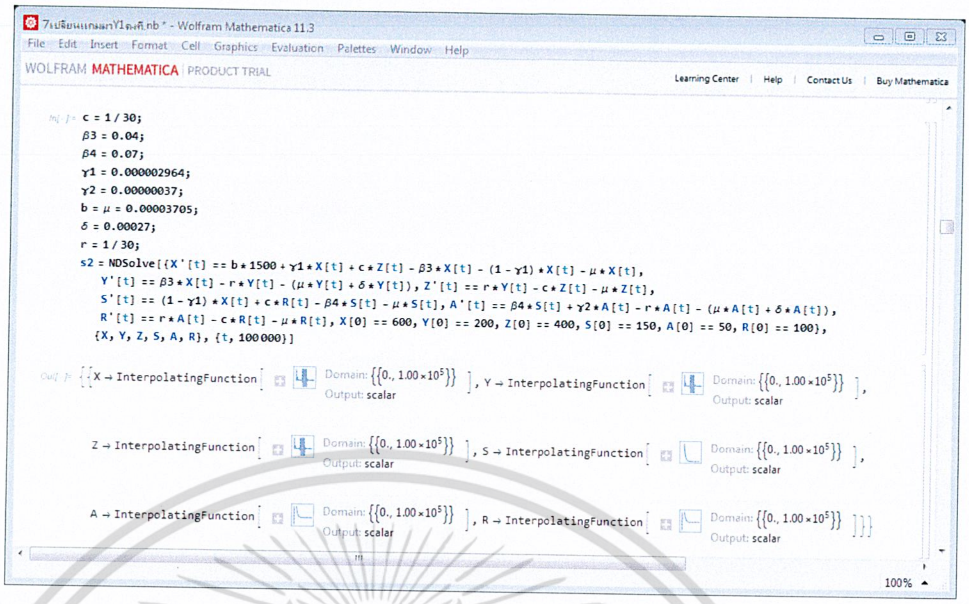


เมื่อทดสอบความเสถียรของการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละชุดแล้ว ก็นำมา Plot กราฟเปรียบเทียบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง

1. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจสอบความเสถียรภาพด้วยวิธีรูทเฮอวิธ แล้วใช้คำสั่ง NDSolve ตามด้วยสมการ แล้วกด Shift+Enter จะได้ดังรูปต่อไปนี้

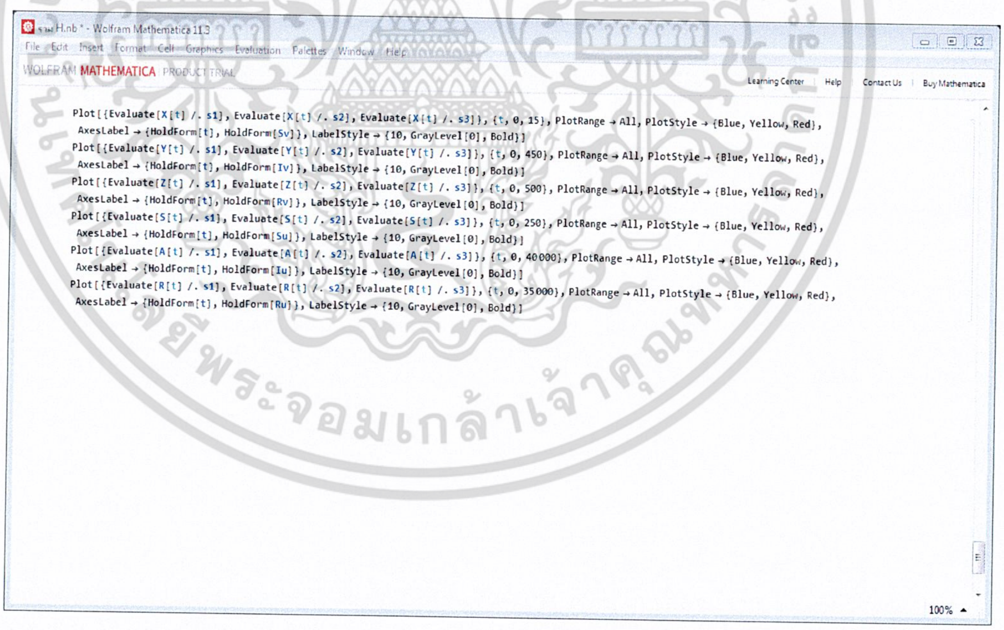






```
c = 1 / 30;
β3 = 0.04;
β4 = 0.07;
γ1 = 0.000002964;
γ2 = 0.00000037;
b = μ = 0.00003705;
δ = 0.00027;
r = 1 / 30;
s2 = NDSolve[{X'[t] == b * 1500 + γ1 * X[t] + c * Z[t] - β3 * X[t] - (1 - γ1) * X[t] - μ * X[t],
   Y'[t] == β3 * X[t] - r * Y[t] - (μ * Y[t] + δ * Y[t]), Z'[t] == r * Y[t] - c * Z[t] - μ * Z[t],
   S'[t] == (1 - γ1) * X[t] + c * R[t] - β4 * S[t] - μ * S[t], A'[t] == β4 * S[t] + γ2 * A[t] - r * A[t] - (μ * A[t] + δ * A[t]),
   R'[t] == r * A[t] - c * R[t] - μ * R[t], X[0] == 600, Y[0] == 200, Z[0] == 400, S[0] == 150, A[0] == 50, R[0] == 100},
  {X, Y, Z, S, A, R}, {t, 100000}]
```

2. Plot กราฟโดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้



```
Plot[{Evaluate[X[t] /. s1], Evaluate[X[t] /. s2], Evaluate[X[t] /. s3]}, {t, 0, 15}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Sv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[Y[t] /. s1], Evaluate[Y[t] /. s2], Evaluate[Y[t] /. s3]}, {t, 0, 450}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Iv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[Z[t] /. s1], Evaluate[Z[t] /. s2], Evaluate[Z[t] /. s3]}, {t, 0, 500}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Rv]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[S[t] /. s1], Evaluate[S[t] /. s2], Evaluate[S[t] /. s3]}, {t, 0, 250}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Su]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[A[t] /. s1], Evaluate[A[t] /. s2], Evaluate[A[t] /. s3]}, {t, 0, 40000}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Iu]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
Plot[{Evaluate[R[t] /. s1], Evaluate[R[t] /. s2], Evaluate[R[t] /. s3]}, {t, 0, 35000}, PlotRange → All, PlotStyle → {Blue, Yellow, Red},
 AxesLabel → {HoldForm[t], HoldForm[Ru]}, LabelStyle → {10, GrayLevel[0], Bold}]
```

3. กด Shift+Enter จะได้กราฟ ดังรูป