



**การหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ในการควบคุมจำนวน  
ผู้ใช้บุหรี่ไฟฟ้าในกลุ่มวัยรุ่นในประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**  
**Cost-Effectiveness of Optimal Control Strategies to Control the Number of E-Cigarette  
Users among Teenagers in Thailand Using Mathematical Model**

ขจรศักดิ์ เจริญคุณ, วิจิตร คลังภูเขียว และ ธิติยา เทพารัส

Khajonsak Jaroenkun, Wichit Khnagphukhieo and Thitiya Theparod\*

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Mathematics Department, Faculty of Science, Mahasarakham University

Received : 4 September 2021

Revised : 22 December 2021

Accepted : 23 March 2022

**บทคัดย่อ**

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ SIGR ของการสูบบุหรี่ไฟฟ้าในกลุ่มวัยรุ่นในประเทศไทย และตรวจสอบกลยุทธ์การควบคุมที่เหมาะสมของแบบจำลอง ในการศึกษาที่ประชากรถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเสี่ยงที่สูบบุหรี่มวนและบุหรี่ไฟฟ้า กลุ่มผู้สูบบุหรี่มวน กลุ่มผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า และกลุ่มผู้เลิกสูบบุหรี่ทั้งสองประเภท วัตถุประสงค์ของเราคือ ค้นหากลยุทธ์ที่ดีที่สุดในการลดจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า ในขณะที่รักษาต้นทุนของการควบคุมที่เกี่ยวข้องให้ต่ำที่สุด เราใช้มาตรการควบคุม 3 แบบ ได้แก่ ภาษีรณรงค์ถึงอันตรายของบุหรี่ไฟฟ้า การเพิ่มภาษีบุหรี่มวน และการจัดโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า กลยุทธ์การเพิ่มภาษีบุหรี่มวนไม่สามารถลดจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าได้ แต่จะเพิ่มจำนวนบุหรี่ไฟฟ้า เพราะการลดอัตราการสูบบุหรี่มวนจะเพิ่มโอกาสของประชากรหันไปสูบบุหรี่ไฟฟ้าแทน ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะดำเนินการโดยใช้อัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์ในการทำป้ายรณรงค์ถึงอันตรายของบุหรี่ไฟฟ้า คือกลยุทธ์การควบคุมที่เหมาะสมและคุ้มค่าที่สุดจากกลยุทธ์ทั้งหมดที่พิจารณาในการศึกษานี้

**คำสำคัญ :** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ; การควบคุมบุหรี่ไฟฟ้า ; การควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ; อัตราส่วนต้นทุนต่อประสิทธิภาพส่วนเพิ่ม



### Abstract

The aim of this paper is to propose an SIGR mathematical model representing the behaviour of e-cigarettes use among teenagers in Thailand and to investigate the optimal control strategies of the model. The population in this study is divided into four compartments: those at risk of smoking cigarettes and e-cigarettes, cigarette smoking group, e-cigarette smoking group and those who quit smoking permanently. Our goal is to find the best strategy that reduces the number of e-smokers while minimizing the cost of the control measures. We use three control measures which are e-cigarette smoking prevention campaign, tax increasing on cigarettes, and education programs on the dangers of both types of cigarettes. The results show that the increasing tax on cigarettes does not reduce the number of e-cigarette smokers, but the number of the e-cigarettes is increased. This is because reducing the rate of smoking cigarettes will increase the chance of individuals deciding to smoke e-cigarettes as an alternative. Moreover, cost-effectiveness analysis is performed using incremental cost-effectiveness ratio. The research shows e-cigarette smoking prevention campaign is the optimal control strategy and the most cost-effective of all strategies considered in this study.

**Keywords :** mathematical modeling ; e-cigarette control ; optimal control ; cost-effectiveness analysis



## บทนำ

การเสียชีวิตและการเจ็บป่วยจากการใช้บุหรี่ไฟฟ้าเป็นสาเหตุที่สามารถป้องกันได้ ปัจจุบันมีผู้เสียชีวิตจากการใช้บุหรี่ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี จากการรายงานข้อมูลของหน่วยงานด้านสุขภาพสหรัฐอเมริกาในปี 2563 พบว่ามีผู้ป่วยโรคปอดอักเสบจากการใช้บุหรี่ไฟฟ้า เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลทั้งหมด 2,558 ราย เสียชีวิตถึง 60 ราย (Werner *et al.*, 2020) ดังนั้นการควบคุมและการลดการเสียชีวิตจากการสูบบุหรี่ จึงเป็นประเด็นสำคัญที่องค์กรของรัฐต้องเผชิญในหลายประเทศ และจัดเป็นปัญหาด้านสาธารณสุข ซึ่งในหลายประเทศทั่วโลกนั้นได้มีมาตรการในการควบคุมบุหรี่ไฟฟ้า รวมทั้งการห้ามนำเข้าจำหน่ายหรือให้บริการ และห้ามสูบในที่สาธารณะ โดยในประเทศไทยนั้นบุหรี่ไฟฟ้าหรือน้ำยาสำหรับเติม ถูกประกาศให้เป็นสินค้าห้ามนำเข้าและจำหน่ายหรือให้บริการเช่นเดียวกัน (Ministry of Public Health, 2021) และนอกจากนี้ยังมีการนำมาตรการต่าง ๆ มาใช้เพื่อควบคุม ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมด้านกฎหมายและการขึ้นภาษีบุหรี่ การรณรงค์ด้านสื่อ รวมทั้งปัจจัยระหว่างบุคคล ได้แก่ การมีตัวแบบที่ดีจากพ่อแม่ บุคคลในครอบครัว ครู และบุคคลที่มีชื่อเสียง (Juree, 2015) ซึ่งมาตรการต่าง ๆ เหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ให้ประชาชนหลีกเลี่ยงและลดการใช้บุหรี่ไฟฟ้า รวมไปถึงป้องกันการเจ็บป่วยของโรคที่มาจากบุหรี่ไฟฟ้าในภายหลัง

ในปัจจุบันบุหรี่ไฟฟ้าเริ่มแพร่หลายโดยเฉพาะในกลุ่มวัยรุ่น เนื่องจากบุหรี่ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์นำส่งนิโคตินด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำให้เกิดความร้อนเพื่อเปลี่ยนน้ำยาให้เป็นละอองไอ และผู้ผลิตอุปกรณ์เหล่านี้มักเพิ่มรสชาติให้กับของเหลว เพื่อให้การได้รับสารนิโคตินในครั้งแรกเป็นที่น่าพึงพอใจยิ่งขึ้น และยังพบว่าในกลุ่มวัยรุ่นมีอัตราการสูบที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Jeffrey *et al.*, 2019; Miech *et al.*, 2019) ด้วยความเชื่อที่ว่าไม่มีอันตรายต่อตนเองและคนรอบข้าง สูบแล้วไม่ติดจึงทำให้มีนักสูบหน้าใหม่เพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาของ Nuttapon (2017) พบว่าในกลุ่มวัยรุ่นมีทัศนคติเชิงบวกในการรับข่าวสารเกี่ยวกับบุหรี่ไฟฟ้า โดยเป็นผู้ที่สูบบุหรี่มานานมาก่อนแล้วหันมาใช้บุหรี่ไฟฟ้า และยังมีแนวโน้มพฤติกรรมที่จะสูบบุหรี่ไฟฟ้าต่อไป ซึ่งในการเข้าสู่วงจรการสูบบุหรี่ไฟฟ้าและการทดลองสูบนั้น เกิดจากประสบการณ์การสูบบุหรี่ธรรมดา ร่วมกับเห็นตัวอย่างบุคคล คนในครอบครัว การชักชวนจากเพื่อน และการได้รับโฆษณาชวนเชื่อ รวมทั้งขาดความรู้และความเชื่อที่ถูกต้องต่อการเลิกสูบบุหรี่ (Piyawan *et al.*, 2019; Saowaluk *et al.*, 2018)

ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ปรากฏการณ์การสูบบุหรี่ และตรวจสอบผลกระทบของมาตรการควบคุมต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดความชุกของการสูบบุหรี่ (Verma, 2020; Harvim *et al.*, 2021; Ilmayasinta *et al.*, 2021) จากการศึกษาของ Pang *et al.* (2019) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อตรวจสอบพลวัตของพฤติกรรมการสูบบุหรี่ โดยนำมาตราการควบคุมรวมในแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่าการรวมสื่อและการบำบัดการเลิกบุหรี่เป็นกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่เดียวกันยังสามารถลดต้นทุนรวมของการดำเนินการตามกลยุทธ์ดังกล่าวได้ นอกจากนี้ Abderrahim *et al.* (2018) ได้พัฒนาแบบจำลองแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete-time model) เพื่อศึกษาพลวัตของผู้สูบบุหรี่ โดยใช้กลยุทธ์การควบคุม 3 แบบ ได้แก่ การสร้างความตระหนักผ่านสื่อและการศึกษา การรักษา และการสนับสนุนด้านจิตใจ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการยืนยันประสิทธิภาพของแบบจำลองในการปรับกลยุทธ์ให้เหมาะสม

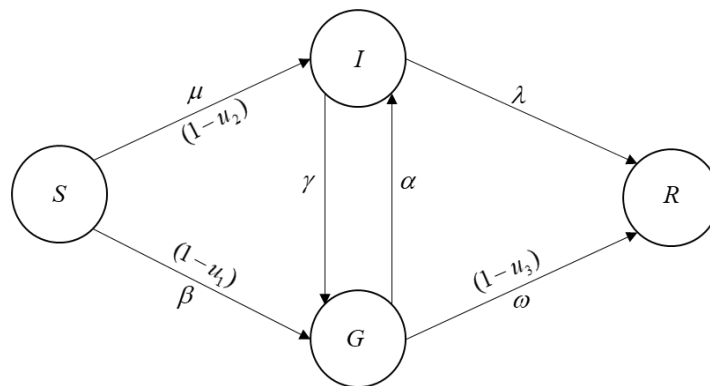
เนื่องจากแบบจำลองแบบเวลาไม่ต่อเนื่องเหมาะกับข้อมูลทางสถิติที่ถูกเก็บรวบรวมในช่วงเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง และยังสามารถหลีกเลี่ยงความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ได้ รวมทั้งการจำลองเชิงตัวเลขของตัวแบบเวลาต่อเนื่องได้

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้เราจะพัฒนาแบบจำลองแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาพลวัตของผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าในประชากรวัยรุ่น โดยแบบจำลองครั้งนี้ผู้วิจัยพัฒนามาจากแบบจำลองระบาดวิทยา SIR และทดสอบผลกระทบและค้นหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าในกลุ่มวัยรุ่นไทย รวมถึงการหาระดับการสูบบุหรี่ของประชากร เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความรุนแรงของจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า นอกจากนี้เราเสนอมাত্রการควบคุม 3 มাত্রการ ได้แก่ 1) ป้ายรณรงค์ถึงอันตรายของบุหรี่ไฟฟ้า 2) เพิ่มภาษีบุหรี่มวน และ 3) การจัดโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า และตรวจสอบผลกระทบของมาตรการควบคุมทั้งสามแบบ ในส่วนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์หาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ว่ากลยุทธ์ใดที่คุ้มค่าที่สุดในการควบคุมการสูบบุหรี่ไฟฟ้า

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

ในงานวิจัยชิ้นนี้เราสมมติให้ผู้สูบบุหรี่สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมไปมา ระหว่างการสูบบุหรี่ไฟฟ้าและสูบบุหรี่มวนได้ (Miech et al., 2021) และเราจะไม่พิจารณากลุ่มประชากรที่สูบบุหรี่ทั้งสองชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อไม่ให้ตัวแบบซับซ้อนเกินความจำเป็น (overcomplicated model) และเพื่อให้สามารถแยกค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการควบคุมผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราจะทำการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบแยกส่วน (compartment model) ในการอธิบายพฤติกรรมการสูบบุหรี่ของกลุ่มวัยรุ่น โดยแบ่งประชากรออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้ 1) ประชากรวัยรุ่นที่เสี่ยงต่อการสูบบุหรี่ทั้งสองประเภท ( $S$ ) 2) ประชากรที่สูบบุหรี่มวนเพียงอย่างเดียว ( $I$ ) 3) ประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ( $G$ ) และ 4) ประชากรที่เลิกสูบบุหรี่ทั้งสองประเภทและไม่กลับไปสูบอีก ( $R$ ) โดยกำหนดให้  $N$  คือจำนวนประชากรทั้งหมดเป็นระบบประชากรแบบปิด นั่นคือ ไม่พิจารณาการตายหรือเกิดตามธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงระหว่างประชากรย่อยเหล่านี้แสดงดังภาพที่ 1 โดยที่



ภาพที่ 1 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มประชากร SIGR และอัตราการเคลื่อนย้ายของกลุ่มประชากร

สมการแบบจำลองในระบบสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น เราจะกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรและพารามิเตอร์ควบคุมในแต่ละกลุ่มได้ดังนี้  $\beta$  คือ อัตราที่กลุ่มเสี่ยงจะเสพติดบุหรี่ไฟฟ้า  $\mu$  คือ อัตราที่กลุ่มเสี่ยงจะเสพติดบุหรี่รวม  $\gamma$  คือ อัตราที่กลุ่มประชากรเสพติดบุหรี่รวมหันไปเสพติดบุหรี่ไฟฟ้า  $\alpha$  คือ อัตราที่กลุ่มประชากรที่เสพติดบุหรี่ไฟฟ้าแล้วหันไปเสพติดบุหรี่รวม  $\omega$  คือ อัตราที่กลุ่มประชากรเลิกเสพบุหรี่ไฟฟ้า และ  $\lambda$  คือ อัตราที่กลุ่มประชากรที่เสพติดบุหรี่รวมแล้วจะเลิกเสพบุหรี่รวม เราสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -SI\mu(1-u_2) - S\beta G(1-u_1) \\ \frac{dI}{dt} &= SI\mu(1-u_2) - I\gamma - I\lambda + \alpha G \\ \frac{dG}{dt} &= S\beta G(1-u_1) + I\gamma - G\omega(1+u_3) - \alpha G \\ \frac{dR}{dt} &= I\lambda + G\omega(1+u_3) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

เมื่อ 
$$\frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dG}{dt} + \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

กำหนดให้ ตัวแปรพารามิเตอร์ควบคุม  $u_1$  คือ สัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมจากการทำปายโฆษณาณรงค์งดสูบบุหรี่ไฟฟ้า และ  $u_2$  คือ สัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมจากการเพิ่มภาษีบุหรี่รวม และตัวแปรพารามิเตอร์ควบคุม  $u_3$  คือ สัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมจากการจัดโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า โดยที่  $(1-u_1)$  ช่วยลดอัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้า  $(1-u_2)$  ช่วยลดอัตราการสูบบุหรี่รวม และ  $(1+u_3)$  ช่วยในการเพิ่มอัตราการเลิกสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากร ในที่นี้เราไม่พิจารณาการควบคุมการสูบบุหรี่รวม

## 2. คุณสมบัติพื้นฐานและค่าพารามิเตอร์ (Basic Properties and Parameter Values)

### 2.1 การหาจุดสมดุลไม่มีผู้เสพ (Disease Free Equilibrium: $E_0$ )

การหาจุดสมดุลดำเนินการโดยจัดสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นของตัวแบบ (1) ด้านซ้ายมือให้เท่ากับศูนย์ พิจารณาจุดไม่มีผู้สูบบุหรี่ ( $I^*, G^*$ ) = (0, 0) จะได้ว่า  $E_0 = (S_0^*, I_0^*, G_0^*, R_0^*) = (1, 0, 0, 0)$

### 2.2 การหาค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากร (Basic Reproduction Number: $R^0$ )

เนื่องจากสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่รวมมีผลต่อจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า เราจึงหาค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากรเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความรุนแรงของจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าในขณะนั้น โดยใช้วิธีการ Next Generation Method (Diekmann et al., 2010) เราสามารถจัดสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นได้  $\frac{dX}{dt} = f(x) - v(x)$  เมื่อ  $f(x)$  คือเมทริกซ์ของอัตราที่ทำให้มีผู้สูบบุหรี่เพิ่มขึ้น และ  $v(x)$  คือ เมทริกซ์ของกลุ่มประชากรที่เปลี่ยนสถานะจากกลุ่มหนึ่งไปอีกกลุ่มหนึ่ง เราหาค่า  $R^0$  ได้จาก



การหาค่าลักษณะเฉพาะมากที่สุด (Maximum Eigenvalue) ของเมทริกซ์  $FV^{-1}$  โดย  $F(X)$  และ  $V(X)$  สามารถหาได้จากอนุพันธ์ย่อย (Partial Derivative) ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} I \\ G \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i(E_0)}{\partial X_i} \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_j(E_0)}{\partial X_j} \end{bmatrix}$$

$$\text{โดยที่ } f(x) = \begin{bmatrix} SI\mu(1-u_2) + G\alpha \\ S\beta G(1-u_1) + I\gamma \end{bmatrix}, \quad v(x) = \begin{bmatrix} I\gamma + I\lambda \\ G\omega(1+u_3) + G\alpha \end{bmatrix} \tag{3}$$

จาก (3) สามารถนำมาหา  $F(X)$  และ  $V(X)$  จะได้ว่า

$$F(X) = \begin{bmatrix} \mu(1+u_2) + \alpha & 0 \\ \gamma & \beta(1-u_1) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad V(X) = \begin{bmatrix} \gamma + \lambda & 0 \\ G\alpha & \omega(1+u_3) + I\alpha \end{bmatrix}$$

กำหนดให้  $H = FV^{-1}$  ดังนี้

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\mu(1-u_2)}{\gamma + \alpha} & \frac{\alpha}{\alpha + \omega(1+u_3)} \\ \frac{\gamma}{\gamma + \lambda} & \frac{\beta(1-u_1)}{\alpha + \omega(1-u_3)} \end{bmatrix}$$

เมื่อกำหนดให้  $\det(H - \rho I_{2 \times 2}) = 0$  คือ สมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) เมื่อ  $\rho$  คือ ตัวแปรลักษณะเฉพาะ (Eigen variable) จะได้ว่า  $R^0$  คือ

$$\left( \frac{\mu(1-u_2)}{\gamma + \alpha} - \rho \right) \left( \frac{\beta(1-u_1)}{\alpha + \omega(1+u_3)} - \rho \right) - \left( \frac{\alpha}{\alpha + \omega(1+u_3)} \times \frac{\gamma}{\gamma + \lambda} \right) = 0 \tag{4}$$

ดังนั้นค่าระดับการสูญบุหรืของประชากร คือ

$$R^0 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \tag{5}$$

โดยที่  $A = 1, B = \frac{\mu(1-u_2)}{\gamma + \alpha} + \frac{\beta(1-u_1)}{\alpha + \omega(1+u_3)}, C = \frac{\mu(1-u_2)}{\gamma + \alpha} \times \frac{\beta(1-u_1)}{\alpha + \omega(1+u_3)} - \frac{\alpha}{\alpha + \omega(1+u_3)} \times \frac{\gamma}{\gamma + \lambda}$

จากสมการ (5) ในการพิจารณาค่า  $R^0$  ถ้าค่า  $R^0 > 1$  จะมีจำนวนผู้สูญบุหรืที่จุดสมดุลมากกว่าศูนย์ ถ้า  $R^0 \leq 1$  จำนวนผู้เสพติดบุหรืมีจำนวนลดลงจนเป็น 0 ที่จุดสมดุล

### 2.3 ค่าพารามิเตอร์ (Parameter Value)

ในการวิเคราะห์ผลเฉลยเชิงตัวเลข เราทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อ  $R^0$  และศึกษาผลกระทบของ  $R^0$  ต่อสัดส่วนของผู้สูญบุหรืไฟฟ้า และสำหรับการศึกษากการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การควบคุม เพื่อหากกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมจำนวนผู้สูญบุหรืไฟฟ้า เราจะพิจารณารณณที่  $R^0 > 1$  กล่าวคือสัดส่วนจำนวนผู้สูญบุหรืไฟฟ้าที่จุดสมดุลมากกว่าศูนย์ โดยสมมติค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อให้ได้สัดส่วนของจำนวนผู้สูญบุหรืไฟฟ้าเท่ากับ 0.375 ( $R^0 = 1.53$ ) โดยได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ความหมายและค่าประมาณข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้

พารามิเตอร์	ความหมาย	ค่าประมาณ
$S(0)$	จำนวนประชากรเริ่มต้นของประชากรกลุ่ม S	0.95
$I(0)$	จำนวนประชากรเริ่มต้นของประชากรกลุ่ม I	0.02
$G(0)$	จำนวนประชากรเริ่มต้นของประชากรกลุ่ม G	0.03
$R(0)$	จำนวนประชากรเริ่มต้นของประชากรกลุ่ม R	0
$\beta$	อัตราที่จะเสพติดบุหรืไฟฟ้า	0.13
$\mu$	อัตราที่จะเสพติดบุหรืมวน	0.02
$\gamma$	อัตราที่เสพติดมวนแล้วจะเสพติดบุหรืไฟฟ้า	0.05
$\alpha$	อัตราที่เสพติดบุหรืไฟฟ้าแล้วจะเสพติดบุหรืมวน	0.065
$\lambda$	อัตราที่เสพติดบุหรืมวนแล้วจะเลิกเสพบุหรืมวน	0.01
$\omega$	อัตราที่เสพติดบุหรืไฟฟ้า	0.05

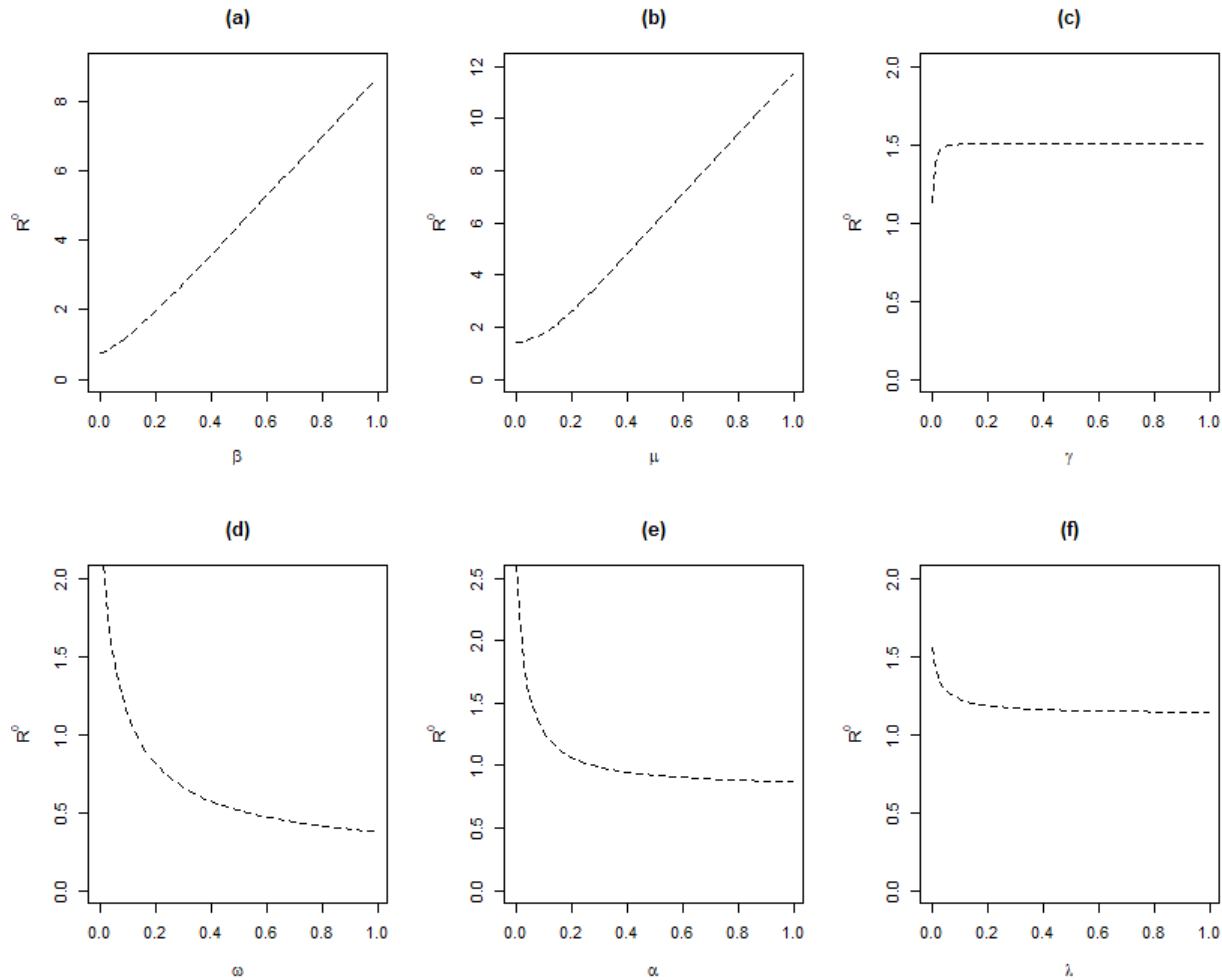
## ผลการวิจัย

### *ผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical Solution Analysis)*

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าระดับการสูบบุหรี่ มีส่วนสำคัญด้านการควบคุมจำนวนประชากรผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า เนื่องจากค่าระดับการสูบบุหรี่จะขึ้นอยู่กับอัตราพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งในส่วนนี้เราจะพิจารณาในกรณียังไม่มีการควบคุม กล่าวคือ  $u_1, u_2, u_3 = 0$  เมื่อพิจารณาอัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากร ( $\beta$ ) อัตราการสูบบุหรี่มวนของประชากร ( $\mu$ ) และอัตราที่เสพติดบุหรี่ไฟฟ้า ( $\omega$ ) ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่ ( $R^0$ ) เนื่องจากอัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าอาจมีผลทำให้ค่าระดับของการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากรเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นเราจึงทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทีละตัว และกำหนดให้พารามิเตอร์ตัวอื่นมีค่าคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 2

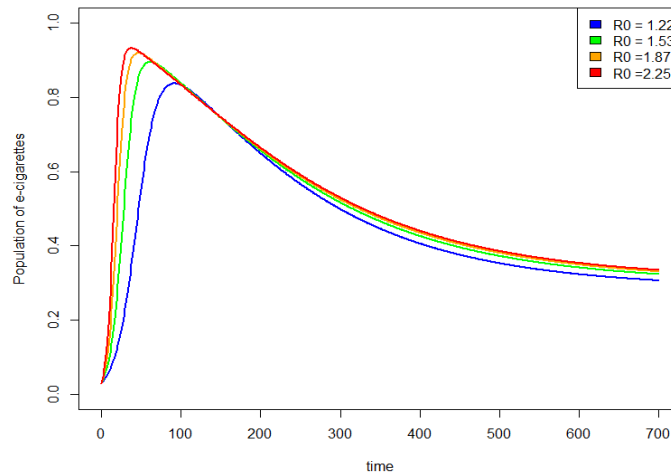
ภาพที่ 2a แสดงอัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของกลุ่มเสี่ยงต่อค่าระดับการสูบบุหรี่ โดยกำหนดให้  $\beta$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่  $\mu = 0.01, \gamma = 0.2, \omega = 0.05, \lambda = 0.12$  พบว่าเมื่ออัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของกลุ่มเสี่ยงเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องทำการควบคุมอัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากร ภาพที่ 2b แสดงผลกระทบของอัตราการสูบบุหรี่มวนของประชากรที่เพิ่มขึ้นต่อค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากร โดยกำหนดให้  $\mu$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่  $\beta = 0.1, \gamma = 0.2, \omega = 0.05, \lambda = 0.12$  พบว่าเมื่ออัตราการสูบบุหรี่มวนของประชากรเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ค่าระดับการสูบบุหรี่เพิ่มมากขึ้น และทำให้มีประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ภาพที่ 2c แสดงอัตราการสูบบุหรี่มวนแล้วสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากรต่อค่า  $R^0$  โดยกำหนดให้  $\gamma$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่  $\mu = 0.01, \beta = 0.1, \omega = 0.05, \lambda = 0.12$  พบว่าเมื่ออัตราการสูบบุหรี่มวนแล้วจะสูบบุหรี่ไฟฟ้า จะมีผลต่อค่า  $R^0$  อย่างเห็นได้ชัดเมื่อ  $\gamma = 0$  และ  $\gamma = 1$  แต่เมื่อ  $\gamma$  เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีผลต่อค่า  $R^0$  มากจนมองเห็นเป็นเส้นตรง ภาพที่ 2d แสดงอัตราการเลิกสูบบุหรี่ไฟฟ้าต่อค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากร โดยกำหนดให้  $\omega$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่  $\mu = 0.01, \beta = 0.1, \gamma = 0.2, \lambda = 0.12$  พบว่าเมื่ออัตราการเลิกสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากรเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากรลดลง ดังนั้น จึงต้องทำการเพิ่มอัตราการเลิกสูบบุหรี่ไฟฟ้าให้มีค่าที่มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทำนองเดียวกันพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\lambda$  ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อ  $R^0$  มีค่าลดลง





**ภาพที่ 2** อิทธิพลของพารามิเตอร์  $\beta$  ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่  $R^0$  (a), อิทธิพลของพารามิเตอร์  $\mu$  ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่  $R^0$  (b), อิทธิพลของพารามิเตอร์  $\gamma$  ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่  $R^0$  (c), อิทธิพลของพารามิเตอร์  $\omega$  ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่  $R^0$  (d), และอิทธิพลของพารามิเตอร์  $\alpha$  ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่  $R^0$  (e) และอิทธิพลของพารามิเตอร์  $\lambda$  ต่อค่าระดับการสูบบุหรี่  $R^0$  (f)

ในการวิเคราะห์ค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากรที่เปลี่ยนแปลง ต่อจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า โดยกำหนดให้อัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของประชากร  $\beta$  มีค่าเพิ่มขึ้นดังนี้ 0.08, 0.13, 0.18 และ 0.23 และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลง เพื่อวิเคราะห์จำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า เมื่อระดับ  $R^0$  แตกต่างกันและมีความสัมพันธ์กันอย่างไรเมื่อเทียบกับระยะเวลา โดยกำหนดให้พารามิเตอร์  $\mu = 0.01, \gamma = 0.05, \omega = 0.05, \lambda = 0.02$



ภาพที่ 3 แสดงค่าระดับการสูบบุหรี่ของประชากรที่แตกต่างกันต่อสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าสำหรับ

$$\beta = 0.08(R^0 = 1.22), \beta = 0.13(R^0 = 1.53), \beta = 0.18(R^0 = 1.87), \beta = 0.23(R^0 = 2.25)$$

จากภาพที่ 3 สัดส่วนจำนวนผู้เสพติบบุหรี่ไฟฟ้าคำนวณได้จากผลเฉลยเชิงตัวเลขของระบบสมการที่ (1) และค่า  $R^0$  คำนวณได้โดยตรงจากสมการที่ (5) พบว่าเมื่อค่า  $R^0$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น สัดส่วนของผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าจะเข้าสู่ค่าที่ใกล้เคียงกัน ณ จุดสมดุลค่าระดับการสูบบุหรี่ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้น แสดงให้เห็นความรุนแรงและความรวดเร็วในการแพร่ระบาดของติบบุหรี่ไฟฟ้า ซึ่งสังเกตได้จากจุดสูงสุดของสัดส่วนประชากรผู้เสพติบบุหรี่ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาที่เร็วขึ้นตามลำดับ

#### ผลการประยุกต์ใช้การควบคุมที่เหมาะสมกับแบบจำลอง

จำนวนผู้ติบบุหรี่ไฟฟ้าในวัยรุ่นจะกลายเป็นปัญหาใหญ่ในสังคม หากไม่มีมาตรการควบคุมใด ๆ เพื่อควบคุมและแก้ไขกับปัญหานี้ ในหัวข้อนี้จะศึกษาการควบคุมจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบเมื่อไม่มีการควบคุมจำนวนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า และหาวิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะพิจารณาการควบคุมโดยแบ่งกรณีการควบคุมจำนวนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า ดังนี้

$u_1$  คือ จำนวนสัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมโดยการทำร้ายณรงค์อันตรายของบุหรี่ไฟฟ้า

$u_2$  คือ จำนวนสัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมโดยการเพิ่มภาษีหรือมวนทุกประเภท

$u_3$  คือ จำนวนสัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมโดยการจัดการโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า

ในการควบคุมที่ทำการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ มีค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการควบคุมจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า โดยทำการสมมติค่าใช้จ่ายดังกล่าว เมื่อกำหนดให้  $c_1$  มีค่าเท่ากับ 21.42 บาท/คน ให้  $c_2$  มีค่าเท่ากับ 80.82 บาท/คน และให้  $c_3$  มีค่าเท่ากับ 257.60 บาท/คน ในการควบคุมจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าข้างต้นในแต่ละวิธีมีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน ดังนั้นเราจึงศึกษาเพื่อหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งออกเป็น 6 กลยุทธ์ แสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** กลยุทธ์ในการควบคุมและความหมาย

กลยุทธ์ที่	กลยุทธ์	ความหมาย
1	$u_1 \neq 0, u_2 = 0, u_3 = 0$	ควบคุมโดยตัดป้ายรถรงค์คันตรายของบู่หรือไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว
2	$u_1 = 0, u_2 \neq 0, u_3 = 0$	ควบคุมโดยเพิ่มภาซีน้หรือมวนทุกประเภทเพียงอย่างเดียว
3	$u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 \neq 0$	ควบคุมโดยจัดโครงการบำบัดผู้สูบบู่หรือไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว
4	$u_1 \neq 0, u_2 \neq 0, u_3 = 0$	ควบคุมโดยตัดป้ายรถรงค์คันตรายบู่หรือไฟฟ้าและเพิ่มภาซีน้หรือมวนทุกประเภท
5	$u_1 \neq 0, u_2 = 0, u_3 \neq 0$	ควบคุมโดยตัดป้ายรถรงค์คันตรายบู่หรือไฟฟ้าและโครงการบำบัดผู้สูบบู่หรือไฟฟ้า
6	$u_1 = 0, u_2 \neq 0, u_3 \neq 0$	ควบคุมโดยการเพิ่มภาซีน้หรือมวนทุกประเภทและโครงการบำบัดผู้สูบบู่หรือไฟฟ้า

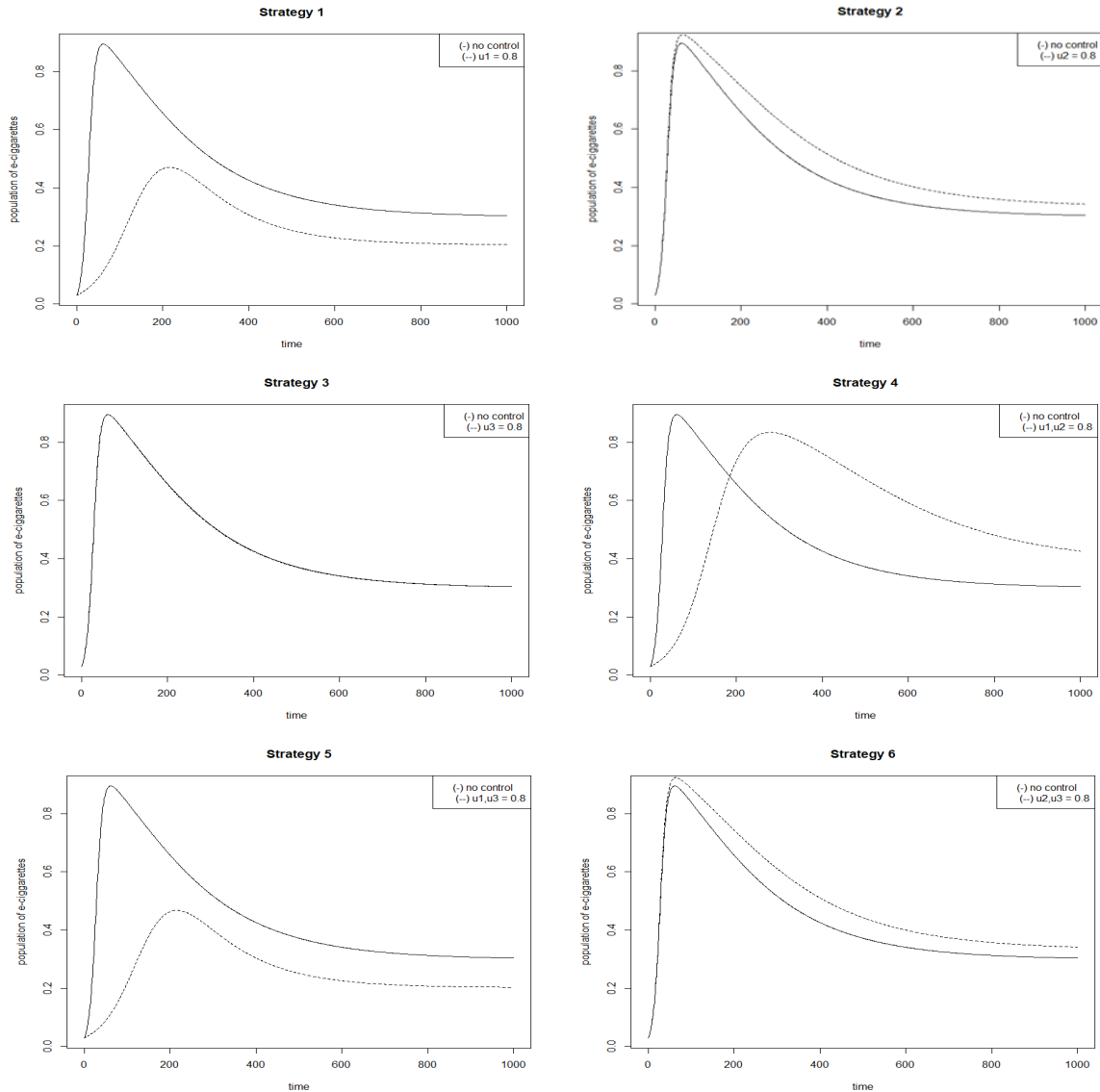
ในส่วนของการหาผลเฉลยทางตัวเลขสำหรับกรณีศึกษา ในการหายุทธวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมจำนวนผู้สูบบู่หรือไฟฟ้า เราใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สมมติขึ้นตามตารางที่ 1 เราสามารถหาค่าการควบคุมจำนวนสัดส่วนประชากรแต่ละกลยุทธ์ โดยการพิจารณาสมการค่าระดับการสูบบู่หรือของประชากรให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าเกณฑ์ในทางระบาดวิทยา เพื่อเป็นแนวทางในการประมาณค่า  $u_1, u_2, u_3$  ซึ่งพบว่าหากต้องการควบคุมจำนวนผู้สูบบู่หรือไฟฟ้าให้หมดไปจากประชากร เราควรต้องควบคุม 100% ของประชากรเสพติดบู่หรือ แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายร่วมด้วย เราจึงสมมติให้สัดส่วนประชากรที่ถูกควบคุมเท่ากับประมาณ 0.8 สำหรับทั้งสามตัวควบคุม กล่าวคือ  $u_1 = u_2 = u_3 = 0.8$  ผลเฉลยเชิงตัวเลขหลังประยุกต์แต่กลยุทธ์แสดงได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งจากตารางที่ 3 จะเห็นว่า กลยุทธ์ที่มีการควบคุมโดยการเพิ่มภาซีน้หรือมวนทุกประเภทไม่สามารถลดจำนวนผู้สูบบู่หรือไฟฟ้า แต่จะเป็นการเพิ่มจำนวนผู้สูบบู่หรือไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4

**ตารางที่ 3** ค่าการควบคุมและจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบู่หรือไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ในแต่ละกลยุทธ์

กลยุทธ์	$u_i$	สัดส่วนประชากรที่ควบคุมได้
กลยุทธ์ที่ 1	$u_1 = 0.8$	0.108206
กลยุทธ์ที่ 2	$u_2 = 0.8$	-
กลยุทธ์ที่ 3	$u_3 = 0.8$	0.001330
กลยุทธ์ที่ 4	$u_1 = u_2 = 0.8$	-
กลยุทธ์ที่ 5	$u_1 = u_3 = 0.8$	0.1094725
กลยุทธ์ที่ 6	$u_2 = u_3 = 0.8$	-

ภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบู่หรือไฟฟ้าก่อนและหลังการควบคุมในแต่ละกลยุทธ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำกลยุทธ์การควบคุมไปใช้ จะสามารถลดจำนวนผู้สูบบู่หรือไฟฟ้าได้ ยกเว้นกลยุทธ์ที่มีการควบคุมภาซีน้หรือมวนรวมอยู่ด้วย ได้แก่ กลยุทธ์ที่ 2 กลยุทธ์ที่ 4 และกลยุทธ์ที่ 6 เนื่องจากการควบคุมจำนวนประชากรไม่ให้สูบบู่หรือมวน

จะเป็นการเพิ่มโอกาส หรือเพิ่มอัตราให้กลุ่มประชากรหันไปสูบบุหรี่ไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณา นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ากลยุทธ์ที่ 3 ที่ทำการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว สามารถลดจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าได้ในสัดส่วนที่น้อยมาก



ภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนสัดส่วนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าก่อนและหลังการควบคุมในแต่ละกลยุทธ์

*การวิเคราะห์ต้นทุนต่อประสิทธิผล (Cost Effectiveness Analysis)*

ในการวิเคราะห์ต้นทุนต่อประสิทธิผลและเปรียบเทียบกลยุทธ์ในการควบคุม (Control) ในการศึกษาครั้งนี้เราใช้วิธีการอัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผลส่วนเพิ่ม (Incremental Cost-Effectiveness Ratio : *ICER*) โดยหาได้ดังสมการที่ (7)

$$ICER(X) = \frac{X_{Cost\ of\ intervention} - Y_{Cost\ of\ intervention}}{X_{Effect\ of\ intervention} - Y_{Effect\ of\ intervention}} = \frac{\Delta C_T}{\Delta E} \tag{7}$$

โดยที่ *X* และ *Y* เป็นกลยุทธ์การควบคุมสองแบบที่ถูกเปรียบเทียบ  $\Delta C_T$  คือ ต้นทุนส่วนเพิ่ม และ  $\Delta E$  คือผลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้  $C_T$  ยังแสดงถึงต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการใช้กลยุทธ์เฉพาะ *E* หมายถึงประสิทธิภาพของกลยุทธ์ซึ่งหมายถึงการควบคุมจำนวนผู้ติดเชื้อหรือเมื่อมีการใช้มาตรการการควบคุมที่จะพิจารณา หาได้จากผลต่างระหว่างผู้ติดเชื้อไฟฟ้าในกรณีที่มีการใช้มาตรการควบคุม และจำนวนผู้ติดเชื้อไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีการใช้มาตรการควบคุม (Edward et al., 2020) สมมติประชากรทั้งหมด  $N = 10,000$  คน จะได้สัดส่วนประชากรที่ควบคุมได้ และค่าใช้จ่ายทั้งหมด หาได้จาก  $c_1u_1G(t) + c_2u_2I(t) + c_3u_3G(t)$  เมื่อ  $t = 0, 1, 2, \dots, 1000$  ผลเฉลยแสดงได้ดังตารางที่ 4 โดยตัดกลยุทธ์ที่ 2 กลยุทธ์ที่ 4 และกลยุทธ์ที่ 6

**ตารางที่ 4** ผลการเปรียบเทียบกลยุทธ์ที่ควบคุมจำนวนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า

กลยุทธ์	จำนวนประชากรที่ควบคุมได้	ค่าใช้จ่าย (บาท)	<i>ICER</i>
กลยุทธ์ที่ 3	13.3	91,999.42	6917.25
กลยุทธ์ที่ 1	1,082.062	7,649.952	-78.92259
กลยุทธ์ที่ 5	1,094.725	99,649.38	7265.216

เพื่อทำการเปรียบเทียบกลยุทธ์ที่สามารถควบคุมจำนวนประชากรได้ และลดต้นทุนในการควบคุมจำนวนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าให้ต่ำที่สุด โดยเรียงลำดับจำนวนประชากรที่ควบคุมได้จากน้อยไปมากจากนั้นทำการหา *ICER* ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4 พบว่ากลยุทธ์ที่ 5 ถึงแม้ว่าจะมีประชากรที่ควบคุมได้มากที่สุดนั่นคือจำนวน 1,094.725 คน แต่มีค่าใช้จ่ายรวมสูงที่สุด คือ 99,649.38 บาท และมีค่า *ICER* เท่ากับ 7265.216 ซึ่งมากกว่ากลยุทธ์อื่น ๆ กลยุทธ์ที่มีค่า *ICER* ที่มากกว่าแสดงว่าเป็น กลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์น้อยกว่า จึงทำการตัดกลยุทธ์ที่ 5 ออก แสดงวิธีการหาค่า *ICER* ในแต่ละกลยุทธ์ ได้ดังนี้



$$ICER_3 = \frac{91,999.42}{13.3} = 6917.25$$

$$ICER_1 = \frac{(7,649.952 - 91,999.42)}{(1,082.062 - 13.3)} = -78.9225$$

$$ICER_5 = \frac{(99,649.38 - 7,649.952)}{(1,094.725 - 1,082.062)} = 7265.216$$

จากการหาค่า ICER เมื่อทำการตัดกลยุทธ์ที่ 5 ออก ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5 พบว่ากลยุทธ์ที่ 3 มีค่า ICER เท่ากับ 6917.25 ซึ่งมากกว่ากลยุทธ์ที่ 1 มีค่า ICER เท่ากับ -78.92259 ดังนั้นกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด คือ กลยุทธ์ที่ 1 มีประชากรที่สามารถควบคุมได้ จำนวน 1,082.062 คน และมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมรวมทั้งสิ้น 7,649.952 บาท

**ตารางที่ 5** ผลการเปรียบเทียบกลยุทธ์ที่ควบคุมจำนวนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า (ตัดกลยุทธ์ที่ 5)

กลยุทธ์	จำนวนประชากรที่ควบคุมได้	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ICER
กลยุทธ์ที่ 3	13.3	91,999.42	6917.25
กลยุทธ์ที่ 1	1,082.062	7,649.952	-78.92259

### วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่า  $R^0$  เมื่อยังไม่มีมาตรการในการควบคุมจะเห็นว่าเมื่ออัตราการสูบบุหรี่ไฟฟ้าของกลุ่มเสี่ยงเพิ่มขึ้น และอัตราการสูบบุหรี่ที่มวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $R^0$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอัตราการสูบบุหรี่ที่มวนแล้วจะสูบบุหรี่ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่า  $R^0$  น้อยมากจนมองเห็นเป็นเส้นตรง และเมื่ออัตราการเลิกสูบบุหรี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า  $R^0$  ลดลง และเมื่อใช้มาตรการในการควบคุมเข้าไปในแบบจำลอง กลยุทธ์ที่ควบคุมจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าได้ดีที่สุดคือ การควบคุมโดยการตีป้ายรณรงค์อันตรายของบุหรี่ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวและจัดโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า และยังพบว่ากลยุทธ์ในการควบคุมด้วยการเพิ่มภาษีบุหรี่ที่มวนทุกประเภท ไม่มีจำนวนสัดส่วนประชากรที่สามารถควบคุมได้แต่ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการควบคุม เมื่อทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ต้นทุนต่อประสิทธิภาพส่วนเพิ่ม กลับพบว่าค่าใช้จ่ายมากกว่ากลยุทธ์อื่น ๆ และพบว่ากลยุทธ์ที่คุ้มทุนมากที่สุดคือการควบคุมการควบคุมโดยการตีป้ายรณรงค์อันตรายของบุหรี่ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เราใช้ผลลัพธ์ของทฤษฎีการควบคุมเพื่อให้ได้มาตรการของการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด การจำลองเชิงตัวเลขผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นประสิทธิผลของกลยุทธ์การควบคุมที่เสนอ และทำการวิเคราะห์ต้นทุนต่อประสิทธิภาพส่วนเพิ่มของกลยุทธ์การควบคุม



## สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นระบบสมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วยประชากรที่เสี่ยงที่จะสูบบุหรี่ไฟฟ้าหรือบุหรี่มวน ประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้า ประชากรที่สูบบุหรี่มวน และประชากรที่เลิกสูบบุหรี่ทั้งสองประเภท ซึ่งได้เพิ่มตัวแปรมาตรการที่ใช้ในการควบคุมจำนวนผู้ติดบุหรี่ไฟฟ้าเข้าไปในตัวแบบ คือ การทำป้ายรณรงค์อันตรายของบุหรี่ไฟฟ้า การเพิ่มภาษีบุหรี่มวนทุกประเภท และโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าในกลุ่มประชากรวัยรุ่น โดยใช้มาตรการเพิ่มภาษีบุหรี่มวนหรือลดอัตราการสูบบุหรี่มวนของประชากร ไม่ได้ช่วยให้จำนวนประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าลดลง แต่จะเป็นการเพิ่มจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าและยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการควบคุมเนื่องจากการลดอัตราการสูบบุหรี่มวน จะเป็นการเพิ่มโอกาสให้ประชากรกลุ่มเสี่ยงหันมาสูบบุหรี่ไฟฟ้าแทน จึงสรุปได้ว่ามาตรการการลดอัตราการสูบบุหรี่มวนหรือการควบคุมจำนวนผู้สูบบุหรี่มวน ไม่สามารถควบคุมจำนวนผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าให้ลดลงได้ ในขณะเดียวกันคือ การควบคุมโดยการติดป้ายรณรงค์อันตรายของบุหรี่ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวและจัดโครงการบำบัดผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า จะช่วยลดประชากรที่สูบบุหรี่ไฟฟ้าได้ดีกว่าการควบคุมโดยกลยุทธ์อื่น ๆ แต่เมื่อพิจารณาในด้านประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ ด้วยการวิเคราะห์ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นต่อประสิทธิภาพ พบว่าการควบคุมโดยการทำป้ายรณรงค์อันตรายของบุหรี่ไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลยุทธ์อื่น ๆ โดยมีประชากรควบคุมได้จำนวน 1,082.062 คน และมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมรวมทั้งสิ้น 7,649.952 บาท

## เอกสารอ้างอิง

Abderrahim, L., Omar, B., & Mostafa, R. (2018). Optimal Control Strategy for a Discrete Time Smoking Model with Specific Saturated Incidence Rate. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018. Article ID 5949303.

Diekmann O, Heesterbeek JA & Roberts MG. (2010). The construction of next-generation matrices for compartmental epidemic models. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(47), 873-85.

Edward, S., Shaban, N., & Mureithi, E. (2020). Optimal Control of Shigellosis with Cost-Effective Strategies. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2020, Article ID 9732687.

Harvim, P., Zhang, H., Georgescu, P. & Zhang, L. (2021). Cigarette smoking on college campuses: an epidemical modelling approach. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 65, 515–540.



- Juree, U., Titiporn, G., Seranee, J. & Vilailak, H. (2015). Meta synthesis of preventive factors for cigarette smoking among Thai youths. *Disease Control Journal*, 41(4), 271-284. (in Thai)
- Miech, R., Johnston, L., O'Malley, PM., Bachman, JG. & Patrick, ME. (2019). Trends in Adolescent Vaping, 2017-2019. *New England Journal of Medicine*, 381(15), 1490-1491.
- Miech R., Leventhal A., Johnston L., O'Malley PM., Patrick ME. & Barrington-Trimis J. (2021). Trends in Use and Perceptions of Nicotine Vaping Among US Youth From 2017 to 2020. *JAMA Pediatr*, 175(2),185-190.
- Ministry of Public Health (2021). *News form Department of Disease Control*. Retrieved May 26, 2021, from <https://ddc.moph.go.th/brc/news.php?news=13087&deptcode=brc> (in Thai)
- Nuttapon, R. (2017). *Perception attitude and behavior towards electronic cigarette*. Master's Thesis, Degree of Master of Arts Program in Corporate Communication Management, Faculty of Journalism and Mass Communication, Thammasat University. (in Thai)
- Ilmayasinta, N., Anjarsari, E. & Moh W. Ahdi, (2021). Optimal Control for Smoking Epidemic Model. In Proceedings of the 7th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Sciences (ICRIEMS 2020). (pp. 323-328). Atlantis Press.
- Pang, L., Liu, S., Zhang, X., & Tian, T. (2019). The Cost-Effectiveness Analysis and Optimal Strategy of the Tobacco Control. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2019, Article ID 8189270.
- Piyawan, B., Pavana, M., & Piyachat, B. (2019). E-Cigarettes Behavior and Smoking Cessation Behavior of Youth in Higher Education Institute, Bangkok. *Journal of Humanities and Development*, 11(22), 111-127. (in Thai)
- Saowaluk, M., Pornnapa, H. & Rungrat, S. (2018). Factors Related to Smoking Initiation among Female Vocational Students in Chachoengsao Province. *Journal of Public Health Nursing*, 41(4), 271-284. (in Thai)





Verma, V. (2020). Optimal control analysis of a mathematical model on smoking. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 2535-2542.

Werner, AK., Koumans, EH., Chatham-Stephens, K., Salvatore, PP., Armatas, C., Byers, P., Clark, CR., Ghinai, I., Holzbauer, SM., Navarette, KA., Danielson, ML., Ellington, S., Moritz, ED., Petersen, EE., Kiernan, EA., Baldwin, GT., Briss, P., Jones, CM., King, BA., Krishnasamy V, Rose, DA., & Reagan-Steiner, S., (2020). Lung Injury Response Mortality Working Group. Hospitalizations and Deaths Associated with EVALI. *The New England Journal of Medicine*, 382(17), 1589-1598.