

ผลกระทบของความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรต่อความล่าช้า การใช้เชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษ กรณีศึกษาทางแยกวัดโคกนาว จังหวัดสงขลา

IMPACTS OF SIGNAL CYCLE LENGTHS ON DELAY, FUEL CONSUMPTION, AND EMISSION: CASE STUDY OF KHOK NAO INTERSECTION, SONGKHLA PROVINCE

กนต์ธร จันทร์ลามา^{1,*}, ประเมศวร์ เหลือเทพ¹ และ สิทธิธา เจนศิริศักดิ์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, จังหวัดสงขลา 90110, ประเทศไทย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, จังหวัดอุบลราชธานี 34190, ประเทศไทย

*Corresponding author address: E-mail: kontorn8977@gmail.com; Telephone: 09 9294 4195

บทคัดย่อ

ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรของทางแยกในเขตเมืองหลายพื้นที่ มักถูกกำหนดให้มีเวลานานซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาณการจราจรในแต่ละช่วงเวลา ส่งผลต่อความล่าช้าในการเดินทาง การสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษ บทความนี้เสนอผลกระทบของความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่ระยะเวลาต่าง ๆ ต่อความล่าช้าในการเดินทาง การสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง การปล่อยก๊าซ CO₂ และมูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์โดยรวมจากผลกระทบข้างต้น โดยใช้ทางแยกวัดโคกนาว อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เป็นกรณีศึกษา ในการศึกษาได้สำรวจข้อมูลกายภาพของทางแยก ปริมาณการจราจรที่ผ่านทางแยกตลอด 24 ชั่วโมงในช่วง 1 สัปดาห์ และการควบคุมทางแยกด้วยสัญญาณไฟจราจรในช่วงเวลาต่าง ๆ ผลการศึกษา พบว่า ในช่วงไม่เร่งด่วนลักษณะกายภาพบริเวณทางแยกและการควบคุมการจราจรด้วยสัญญาณไฟจราจรปัจจุบันให้ค่าความล่าช้าที่น้อยสุดเมื่อมีปริมาณจราจร 1,035 คันต่อชั่วโมงและกำหนดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่ 66 วินาที ส่วนช่วงเวลาเร่งด่วน หากลดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรในช่วงเร่งด่วนเช้า เย็น และเย็น ที่ปัจจุบันกำหนดไว้มากกว่า 120 วินาที (170 172 และ 192 วินาที ตามลำดับ) แต่หากลดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรให้เท่ากับ 120 วินาที (ค่าแนะนำ) จะลดมูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐกิจโดยรวมได้ร้อยละ 28.52 29.32 และ 36.42 ตามลำดับ ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดรอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

คำสำคัญ: รอบสัญญาณไฟจราจร, ความล่าช้าในการเดินทาง, การสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง, การปล่อยมลพิษ, มูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์

Abstract

Signal cycle length of the intersection in several urban areas has been set to be a long cycle time, which is inconsistent with the traffic volume in each period of the day. The long cycle length often leads to an increase in travel delay, fuel consumption and pollutant emissions. This paper presents the effects of different cycle lengths on travel delay, fuel consumption, CO₂ emission, and the economic losses. The Khok Nao intersection, Hat Yai District, Songkhla Province was selected as a case study. In the study, road geometry of the intersection was surveyed. Traffic volumes passing the intersection 24 hours for one week were collected. And the traffic signal control during different periods were investigated. The results showed that during off-peak periods the exiting geometry and the signal control at the intersection could handle the minimum delay at the traffic volume 1,035 vehicles per hour with the cycle length 66 seconds. During peak periods, if the cycle lengths were reduced from 170, 172, and 192 seconds during morning, noon, and evening periods, respectively, to 120 seconds (recommendation); the total economic losses would be significantly decreased by 28.52%, 29.32%, and 36.42%, respectively. The results of this study can be used as a guideline in setting the appropriate cycle length setting for the concerned authorities.

Keywords: Cycle length, Travel delay, Fuel consumption, Emission, Economic loss

1. บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

เมืองสำคัญในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย เช่น เชียงใหม่ ขอนแก่น ชลบุรี และหาดใหญ่ มีการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ

และสังคมเป็นอย่างมาก ทำให้แนวโน้มการใช้รถส่วนบุคคลเพิ่มขึ้น จากสถิติจำนวนรถจดทะเบียนภายในจังหวัดสงขลา ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2562 [1] พบว่า จำนวนรถจดทะเบียนเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4.26 ต่อปี โดยเฉพาะระหว่างปี พ.ศ. 2561-2562 จำนวนรถยนต์ส่วนบุคคล (รถเก๋งและรถกระบะ) เพิ่มขึ้นสูงถึงร้อยละ 5.28 ต่อปี

ส่วนรถจักรยานยนต์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.77 ต่อปี อย่างไรก็ตาม โครงสร้างพื้นฐานทางถนนและการจัดการจราจรที่มีอยู่ในพื้นที่ โดยเฉพาะสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยกกลับไม่ได้มีการพัฒนาให้สอดคล้องกับปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดผลกระทบทั้งปัญหาการจราจรติดขัด การสูญเสียพลังงานเชื้อเพลิง และมลพิษทางอากาศ ตามมา

เมื่อพิจารณาพื้นที่เมืองขนาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งมีการเติบโตของเศรษฐกิจและสังคม ประกอบกับมีสถาบันการศึกษาและศูนย์บริการทางการแพทย์ที่หลากหลายในพื้นที่ของเมือง

ย่านพื้นที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ม.อ.) เป็นอีกหนึ่งพื้นที่หลักของเมืองขนาดใหญ่ ที่มีการให้บริการด้านการศึกษาและด้านสาธารณสุข โดยในส่วนของด้านการศึกษา ม.อ. มีนักศึกษาทั้งหมด 17,372 คน [2] และบุคลากรกว่า 3,928 คน [3] สำหรับด้านสาธารณสุขโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ที่เป็นศูนย์กลางทางการแพทย์ที่สำคัญของภาคใต้ มีบุคลากรทางการแพทย์กว่า 5,466 คน [3] และมีผู้ป่วยนอกมาใช้บริการเป็นจำนวนประมาณ 2,842 คนต่อวัน [4] ซึ่งผู้มาใช้บริการจากทั้งสองด้านข้างต้นจำนวนไม่น้อยมีการใช้รถส่วนบุคคลผ่านทางแยกวัดโคกนาว ทางแยกดังกล่าวมีการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบคงที่ (Fixed time signal) แต่มีระยะเวลารอบสัญญาณไฟจราจรที่ค่อนข้างนานโดยเฉพาะเวลาเร่งด่วน ส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัด ความล่าช้าในการเดินทาง การสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง และมลพิษทางอากาศ ผลกระทบดังกล่าวอาจสร้างมูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์โดยรวมเป็นจำนวนมาก หากมีการจัดการความยาวของรอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมอาจช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่มีต่อความล่าช้าในการเดินทาง การสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง การปล่อยก๊าซ CO₂ และมูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์โดยรวม โดยประยุกต์ใช้สูตรของ Webster [5] ในการวิเคราะห์รอบสัญญาณไฟจราจร ผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดรอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ลักษณะทางแยก

ทางแยกระดับเดียวกัน (At grade intersection) [6]-[7] เป็นทางแยกที่ถนนสองสายหรือมากกว่าเชื่อมหรือตัดกัน อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุจากการตัดกันระหว่างกระแสจราจรที่เรียกว่า จุดขัดแย้ง (Conflict point) โดยแบ่งได้ 4 แบบ คือ จุดตัดผ่าน (Crossing) จุดเข้าร่วม (Merging) จุดแยกออก (Diverging) และจุดตัดสลับ (Weaving) ทางแยกที่มีปริมาณการจราจรมาก อาจควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดจุดขัดแย้งและให้การจราจรคล่องตัว

2.2. สัญญาณไฟจราจร

สัญญาณไฟจราจร (Traffic signal) [6] คือ สัญญาณไฟเพื่อให้ผู้ใช้ทางปฏิบัติตาม ซึ่งช่วยควบคุมยานพาหนะและคนเดินเท้าให้มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย เช่น สัญญาณไฟทางแยก สัญญาณไฟทางข้าม สัญญาณไฟควบคุมช่องเดินรถ เป็นต้น

สัญญาณไฟจราจรสามารถจำแนกตามลักษณะการควบคุมการจราจรได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) สัญญาณไฟจราจรที่มีระยะเวลารอบสัญญาณไฟแบบคงที่ (Pre-time signal หรือ fixed time signal) สัญญาณไฟจราจรประเภทนี้ได้กำหนดเวลาของสัญญาณไว้ล่วงหน้าจากการคำนวณปริมาณจราจรและออกแบบให้มีรอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสม

2) สัญญาณไฟจราจรที่มีระยะเวลารอบสัญญาณไฟจราจรแบบเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการจราจรที่เข้าสู่ทางแยก (Vehicle actuated signal) แบ่งเป็น 2 ประเภทย่อย คือ Semi-actuated และ Fully-actuated โดยสัญญาณไฟจราจรทั้งสองประเภทย่อยนี้มีเครื่องตรวจจับปริมาณจราจรอัตโนมัติเพื่อส่งสัญญาณปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรตามปริมาณจราจรที่ตรวจจับได้

2.3. รอบสัญญาณไฟจราจร

รอบสัญญาณไฟจราจร (Cycle length, C) หมายถึง ระยะเวลาใน 1 รอบ มีหน่วยเป็นวินาที โดยเริ่มนับจากสัญญาณไฟเขียว ไฟเหลือง และไฟแดง จนกลับมาที่ไฟเขียวอีกครั้ง [6]

2.4. จังหวะสัญญาณไฟจราจร

จังหวะสัญญาณไฟจราจร (Signal phasing) คือ ช่วงเวลาย่อยในหนึ่งรอบสัญญาณไฟจราจร ที่กำหนดให้การจราจรทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือหลายทิศทางเคลื่อนที่ผ่านทางแยกเป็นลำดับ [6]

2.5. อัตราการไหลอิ่มตัว

อัตราการไหลอิ่มตัว (Saturation flow rate, S) คือ ปริมาณการจราจรสูงสุดที่สามารถผ่านทางแยกได้ในช่วงสัญญาณไฟเขียว มีหน่วยคันต่อชั่วโมง หรือ Passenger Car Unit (PCU) ต่อชั่วโมง [6]

2.6. การคำนวณออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจร

การคำนวณรอบสัญญาณไฟจราจรมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.6.1. ระยะเวลาที่สูญเสียในแต่ละจังหวะไฟจราจร

ระยะเวลาที่สูญเสียใน 1 จังหวะสัญญาณไฟจราจรเกิดจากยานพาหนะออกตัวช้าและการชะลอตัวก่อนหยุด [8] คำนวณได้ดังนี้

$$Y = y + ar \quad (1)$$

$$l_2 = Y - e \quad (2)$$

$$t_L = l_1 + l_2 \quad (3)$$

โดยที่	
Y	คือ ระยะเวลาที่เริ่มเปลี่ยนเป็นไฟเหลืองจนเคลียร์รถออกจากทางแยก (วินาที)
y	คือ ระยะเวลาไฟเหลือง (วินาที)
ar	คือ ระยะเวลาไฟแดงของทุกทิศทาง (วินาที)
e	คือ ระยะเวลาไฟเหลืองและไฟแดงทุกทิศทาง (วินาที)
l_1	คือ ระยะเวลาสูญเสียช่วงต้น (วินาที)
l_2	คือ ระยะเวลาสูญเสียช่วงปลาย (วินาที)
t_L	คือ ระยะเวลาสูญเสียทั้งหมด (วินาที)

2.6.2. ระยะเวลาที่สูญเสียใน 1 รอบสัญญาณไฟจราจร

ระยะเวลาที่สูญเสียทั้งหมดในรอบสัญญาณไฟจราจร เป็นผลรวมของระยะเวลาที่สูญเสียของแต่ละจังหวะไฟจราจรที่อยู่ใน 1 รอบสัญญาณไฟจราจร คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$L = \sum_i^n t_{Li} \quad (4)$$

โดยที่	
L	คือ ระยะเวลาสูญเสียทั้งหมดใน 1 รอบสัญญาณไฟจราจร (วินาที)
t_{Li}	คือ ระยะเวลาสูญเสียทั้งหมดของจังหวะไฟ i (วินาที) คำนวณได้จากสมการที่ (3)
n	คือ จำนวนจังหวะไฟทั้งหมดใน 1 รอบสัญญาณ

2.6.3. อัตราการไหลอิมิตัว

อัตราการไหลอิมิตัว คือ ปริมาณการจราจรสูงสุดที่รุดผ่านจากเส้นหยุดของทางแยกเมื่อได้สัญญาณไฟเขียว คำนวณได้ดังนี้

1) กรณีอัตราการไหลอิมิตัวปกติ (Basic saturation flow, s)

1.1) ช่องจราจรที่ใกล้ขอบทาง (Nearside lane)

$$s = 1,940 + 100(w - 3.25) \quad (5)$$

โดยที่ w คือ ความกว้างของช่องจราจร (เมตร)

1.2) ช่องจราจรที่ไม่ใกล้ขอบทาง (Non-nearside lane)

$$s = 2,080 + 100(w - 3.25) \quad (6)$$

2) กรณีเปรียบเทียบช่องจราจรสำหรับเลี้ยว (s_r)

2.1) ช่องจราจรที่ไม่มีกระแสจราจรฝั่งตรงข้าม

$$s_r = \frac{s}{1 + \frac{1.5}{r}} \quad (7)$$

โดยที่

r คือ รัศมีมุมเลี้ยว (เมตร)

2.2) ช่องจราจรที่มีกระแสจราจรฝั่งตรงข้าม

$$s_r = \frac{s - 230}{1 + \frac{1.5}{r}} \quad (8)$$

3) กรณีเปรียบเทียบช่องจราจรที่มีทิศทางจราจรหลายรูปแบบ (S_m)

3.1) ช่องจราจรที่ไม่มีกระแสจราจรฝั่งตรงข้าม

$$S_m = \frac{s}{1 + (1.5 \frac{L}{r})} \quad (9)$$

3.2) ช่องจราจรที่มีกระแสจราจรฝั่งตรงข้าม

$$S_m = \frac{(s - 230)}{1 + (1.5 \frac{L}{r})} \quad (10)$$

โดยที่

f คือ สัดส่วนยานพาหนะที่เลือกต่อยานพาหนะทั้งหมดบนช่องจราจรที่พิจารณา

2.6.4. สัดส่วนอัตราการไหลบนช่องจราจรวิกฤติ

ช่องจราจรวิกฤติเป็นช่องจราจรที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลออกแบบ q_i และอัตราการไหลอิมิตัว s_i มีค่าสูงสุด โดยในแต่ละช่องจราจร (L) คำนวณค่าสัดส่วนดังกล่าว (\tilde{y}_i) ได้จากสมการที่ (11)

$$\tilde{y}_i = \frac{q_i}{s_i} \quad (11)$$

จากนั้นพิจารณาค่าสูงสุด (\tilde{Y}_i) ของสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการที่ (11) ของทุกช่องจราจรในจังหวะไฟ i ตามสมการที่ (12)

$$\tilde{Y}_i = \max(\tilde{y}_{i,j}) \quad (12)$$

สุดท้ายหาผลรวม (\hat{Y}) ของค่าสัดส่วนสูงสุดจากทุกจังหวะไฟใน 1 รอบสัญญาณไฟจราจรได้จากสมการที่ (13)

$$\hat{Y} = \sum_i^n \tilde{Y}_i \quad (13)$$

2.6.5. รอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสม

รอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมควรรองรับ 3 กรณี [8] ดังนี้

1) กรณีพิจารณาความล่าช้าที่น้อยที่สุด (C_o)

$$C_o = \frac{(1.5L + 5)}{(1 - \hat{Y})} \quad (14)$$

2) กรณีพิจารณาจากอัตราการไหลของการจราจร (C_m)

$$C_m = \frac{L}{(1 - \hat{Y})} \quad (15)$$

3) กรณีพิจารณาการไปใช้ในทางปฏิบัติ (C_p)

$$C_p = \frac{0.9L}{(0.9 - \hat{Y})} \quad (16)$$

สุดท้ายเลือกเวลาสัญญาณไฟจราจรที่มีค่ามากที่สุด (C) จาก

$$C = \max(C_o, C_m, C_p) \quad (17)$$

2.6.6. ความล่าช้าจากสัญญาณไฟจราจร

ความล่าช้าของยานพาหนะแต่ละคันบนแต่ละช่องจราจรในแต่ละจังหวะไฟ คำนวณได้จากสมการที่ (18) [5]

$$d_i = 0.9 \left[\frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i x_i)} + \frac{x_i^2}{2v_i(1-x_i)} \right] \quad (18)$$

โดยที่

d_i คือ ความล่าช้าของยานพาหนะแต่ละคันบนช่องจราจรในจังหวะไฟ i (วินาที/คัน/ช่องจราจร)

λ_i คือ สัดส่วนระหว่างเวลาไฟเขียวประสิทธิภาพ (g_i) กับรอบสัญญาณไฟจราจร = $\frac{g_i}{C}$

x_i คือ อัตราของความอึดตัวของกระแสจราจร $\frac{v_i}{\lambda_i r_i}$

v_i คือ อัตราการไหลของจราจรบนแต่ละช่องจราจรในจังหวะไฟ i (คัน/ชั่วโมง/ช่องจราจร)

ค่าเฉลี่ยความล่าช้าของรถทุกคันที่ผ่านทางแยก (\bar{D}) มีหน่วยวินาทีต่อคัน คำนวณได้จากการถ่วงน้ำหนักความล่าช้าของรถแต่ละคัน (ผลจากสมการที่ 18) ด้วยอัตราการไหลของจราจร ดังสมการที่ (19)

$$\bar{D} = \frac{\sum_i^n d_i v_i}{\sum_i^n v_i} \quad (19)$$

2.7. ความสูญเสียพลังงานเชื้อเพลิง

การสูญเสียพลังงานเชื้อเพลิงจากรถที่หยุดหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำคำนวณได้จากสมการที่ (20) [ปรับปรุงจาก 10]

$$\text{มูลค่าสูญเสียเชื้อเพลิง} = C_{fuel} \times FC \times Q_m \times D_{av} \quad (20)$$

โดยที่

C_{fuel} คือ มูลค่าเฉลี่ยพลังงานเชื้อเพลิง (บาท/ลิตร)

FC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ลิตร/นาท)

Q_m คือ จำนวนรถที่ได้รับผลกระทบ (คัน/นาท)

D_{av} คือ ความล่าช้าเฉลี่ย (นาท/คัน) จากสมการที่ (19)

จากข้อมูลในอดีต [12] พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์ทั่วไปขณะรถติดมีค่าประมาณ 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นบทความนี้จึงกำหนดค่า FC ไว้ที่ 0.025 ลิตรต่อนาที

2.8. ความสูญเสียจากการปล่อยมลพิษทางอากาศ

มลพิษจากยานพาหนะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การระเหยของเชื้อเพลิง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน และกลุ่มก๊าซที่ส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ (NOX , VOC และ PM_{10}) [ที่มา 10-13]

มูลค่าความสูญเสียของมลพิษทางอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (21) [ปรับปรุงจาก 10]

$$\text{มูลค่ามลพิษทางอากาศ} = C_{pol} \times EF \times Q_m \times D_{av} \quad (21)$$

โดยที่

C_{pol} คือ มูลค่าต่อหน่วยของมลพิษทางอากาศ (บาท/ตัน)

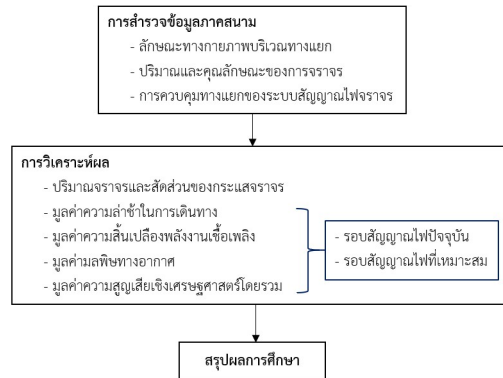
EF คือ อัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ (ตัน/นาท)

จากข้อมูลอัตราการปล่อยมลพิษของรถแต่ละประเภทขณะหยุด

นิ่งในอดีต [11] พบว่า รถขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันเบนซินมีค่า 21.17×10^{-9} ตันต่อชั่วโมง ส่วนรถขนาดใหญ่ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่า 46.36×10^{-9} ตันต่อชั่วโมง

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

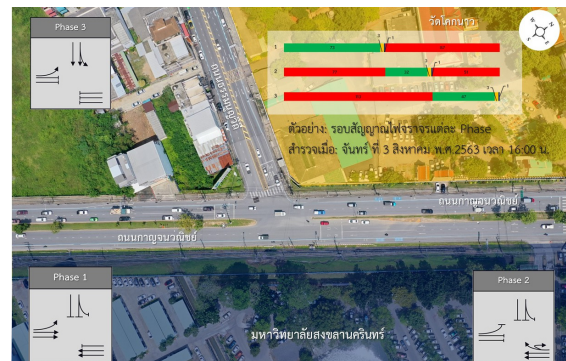
การวิเคราะห์ผลกระทบของรอบสัญญาณไฟจราจรต่อความล่าช้า การใช้เชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษ มีขั้นตอนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาทางแยกสัญญาณไฟจราจรวัดโคกนาว (รูปที่ 2) เป็นทางสามแยกตัดกันระหว่างถนนกาญจนาภิเษกกับถนนธรรมญูวิถี ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มี การควบคุมการจราจรด้วยระบบสัญญาณไฟจราจรแบบคงที่



รูปที่ 2 พื้นที่ศึกษาและจังหวะสัญญาณไฟจราจร

3.2. การสำรวจข้อมูลภาคสนาม

3.2.1. ลักษณะทางกายภาพ

การสำรวจลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกที่ศึกษา ได้แก่ 1) องค์ประกอบของทางแยก 2) ความกว้างช่องจราจร/เกาะกลาง/ไหล่ทาง 3) ความยาวของช่องรอเลี้ยว เป็นต้น ในภาพรวมพบว่า ถนนกาญจนาภิเษก เป็นถนนขนาด 4 ช่องจราจรต่อทิศทาง กว้างเฉลี่ย 3.5 เมตร มีเกาะกลางกว้าง 3.3 เมตร และมีไหล่ทางกว้าง 1.7 เมตร และมีช่องจราจรสำหรับเลี้ยวขวาไปยังถนนธรรมญูวิถี กว้าง 2.6 เมตร ผิวจราจรเป็นแบบแอสฟัลต์คอนกรีต ส่วนถนนธรรมญู

วิถีเป็นถนนขนาด 3 ช่องจราจรต่อทิศทาง กว้างช่องละ 3.5 เมตร บริเวณแยกมีเกาะคอนกรีตกว้าง 1 เมตร

3.2.2. การสำรวจปริมาณจราจร

การสำรวจข้อมูลปริมาณการจราจรในแต่ละทิศทาง (เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา ตรง และกลับรถ) ของยานพาหนะ (รถจักรยานยนต์ รถยนต์ และรถบรรทุก) ที่สัญจรผ่านทางแยก ตลอด 24 ชั่วโมง จำนวน 7 วัน ระหว่างวันที่ 2-9 สิงหาคม พ.ศ. 2563

3.2.3. การสำรวจรอบสัญญาณไฟจราจร

การสำรวจรอบสัญญาณไฟจราจรทั้งจังหวะสัญญาณไฟจราจรของแต่ละขาและรอบเวลาสัญญาณไฟจราจร ได้ดำเนินการช่วงวันและเวลาเดียวกับการสำรวจปริมาณจราจร พบว่า ปัจจุบันมีการควบคุมสัญญาณไฟจราจร 3 จังหวะ (ดังรูปที่ 2) จากตัวอย่างในวันจันทร์ที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2563 เวลา 15:00-16:00 น. มีรอบสัญญาณไฟเท่ากับ 164 วินาที

3.3. การวิเคราะห์ผลกระทบความยาวรอบสัญญาณไฟ

ในบทความนี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบของความยาวรอบสัญญาณไฟจราจร จากรอบสัญญาณไฟปัจจุบันเปรียบเทียบกับ การเพิ่มและลดรอบสัญญาณไฟ 30 และ 60 วินาที โดยวิเคราะห์ผลกระทบต่อมูลค่าความสูญเสียใน 3 ด้าน ดังต่อไปนี้

3.3.1. มูลค่าความล่าช้าในการเดินทาง

การวิเคราะห์มูลค่าความล่าช้าในการเดินทางของแต่ละรอบสัญญาณไฟจราจร จากสมการที่ (22)

$$\text{มูลค่าความล่าช้า} = \text{มูลค่าเวลา} \times Q_m \times D_{av} \quad (22)$$

ในบทความนี้ พิจารณามูลค่าเวลา (ขั้นต่ำ) จากอัตราค่าแรงขั้นต่ำของจังหวัดสงขลาซึ่งมีค่า 325 บาทต่อวัน [14] หรือคิดเป็น 40.63 บาทต่อชั่วโมง (กำหนด 8 ชั่วโมงทำงาน)

3.3.2. มูลค่าการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง

มูลค่าการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการที่ (20) ในบทความนี้ได้พิจารณามูลค่าเฉลี่ยพลังงานเชื้อเพลิง (C_{fuel}) จากราคาน้ำมัน E85 ซึ่งเป็นน้ำมันเบนซินที่มีราคาต่ำสุด โดยจากข้อมูล [15] มีค่าเท่ากับ 21.49 บาทต่อลิตร

3.3.3. มูลค่ามลพิษทางอากาศ

มูลค่ามลพิษทางอากาศคำนวณได้จากสมการที่ (21) ในบทความนี้กำหนดมูลค่าต่อหน่วยมลพิษทางอากาศ (C_{pol}) เท่ากับ 1,030.59 บาท/ตัน [11] ส่วนอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ (EF) กำหนดให้รถจักรยานยนต์และรถยนต์เท่ากับ 21.17×10^{-9} ตัน/ชั่วโมง ส่วนรถบรรทุกเท่ากับ 46.36×10^{-9} ตัน/ชั่วโมง

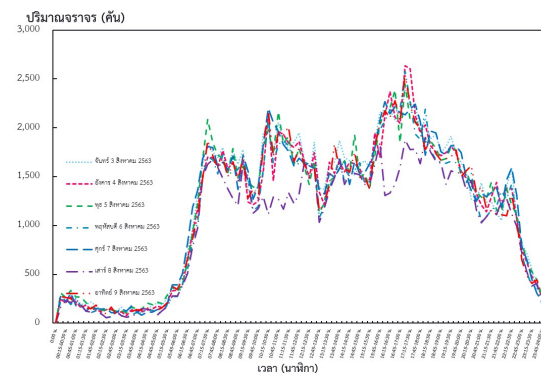
สุดท้ายเมื่อรวมมูลค่าความสูญเสียทั้งสามส่วนเข้าด้วยกันจะได้มูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์โดยรวมของรอบสัญญาณไฟ

4. ผลการวิจัย

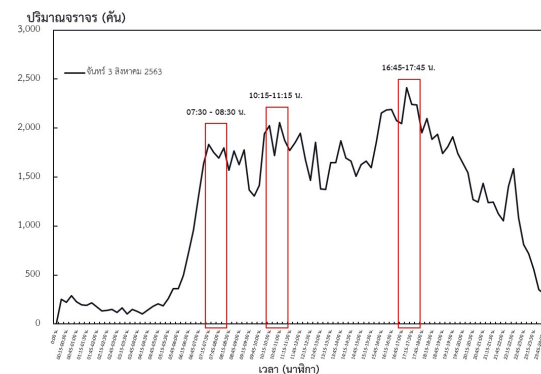
4.1. ผลการสำรวจข้อมูลปริมาณจราจร

4.1.1. ปริมาณจราจรในภาพรวม

ผลการสำรวจปริมาณจราจรที่ผ่านทางแยกรายชั่วโมง ตลอด 24 ชั่วโมง ระยะเวลา 1 สัปดาห์ แสดงดังรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาตัวอย่างในวันจันทร์ พบ ช่วงเวลาเร่งด่วน (เช้า เย็น และเย็น) ดังรูปที่ 4 และจากการสำรวจข้อมูลพบสัดส่วนของรถยนต์ จักรยานยนต์ และรถบรรทุก ร้อยละ 55 44 และ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ปริมาณจราจรที่ผ่านทางแยกชั่วโมง 24 ตลอด 1 สัปดาห์



รูปที่ 4 ช่วงเวลาเร่งด่วนของตัวอย่างวันจันทร์

4.1.2. ความแตกต่างของปริมาณจราจร

ในการหาอัตราการไหลเพื่อการออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจรของช่วงเวลานึง มักใช้อัตราการไหลของชั่วโมงตัวแทน ในบทความนี้จึงได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณจราจรแต่ละช่วงเวลาในแต่ละวันและระหว่างวัน (ใน 7 วัน) เพื่อจัดกลุ่มช่วงเวลาที่มีปริมาณจราจรแตกต่างกัน โดยใช้ T-test [16] โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของวันจันทร์ดังรูปที่ 5 พบว่า ช่วงเวลาส่วนใหญ่มีปริมาณจราจรแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นบางช่วง เช่น 00:00-02:00 น. กับ 02:00-05:00 น. และ

05:00-06:30 น. แตกต่างอย่างไม่มีความสำคัญ ซึ่งหมายความว่า
ช่วงเวลานี้สามารถนำปริมาณจราจรมาหาอัตราการไหลออกแบบ
ร่วมกันได้ ส่วนช่วงเวลาอื่นต้องพิจารณาแยกกัน

วันที่ 3	00:00-02:00 น.	02:00-05:00 น.	05:00-06:30 น.	06:30-09:00 น.	09:00-12:00 น.	12:00-15:30 น.	15:30-19:00 น.	19:00-22:15 น.	22:15-24:00 น.
00:00-02:00 น.	-	0.06*	0.07*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02:00-05:00 น.	-	-	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05:00-06:30 น.	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06:30-09:00 น.	-	-	-	-	0.10*	0.38	0.00	0.95	0.00
09:00-12:00 น.	-	-	-	-	-	0.14	0.00	0.02	0.00
12:00-15:30 น.	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00
15:30-19:00 น.	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00
19:00-22:15 น.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
22:15-24:00 น.	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ * คือ แตกต่างอย่างไม่มีความสำคัญที่ร้อยละ 95

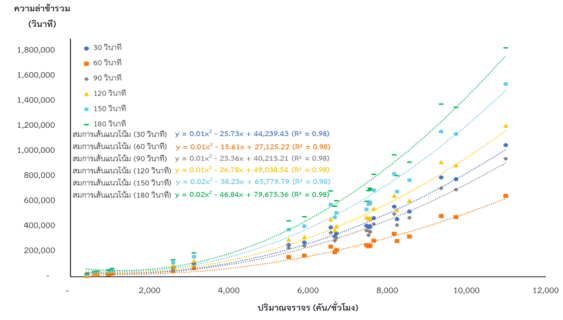
รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณ
จราจรในแต่ละช่วงเวลาของวันจันทร์

4.2. ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณจราจรและ ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรต่อความล่าช้า

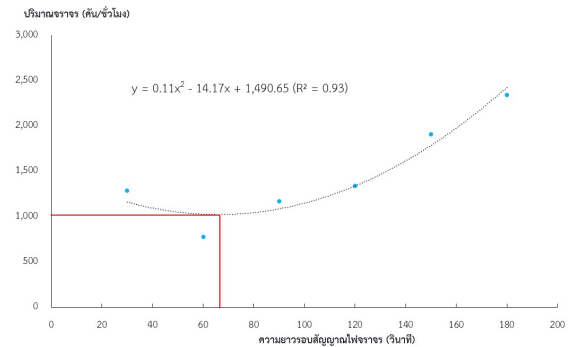
ข้อมูลปริมาณจราจรในแต่ละช่วงเวลาได้ถูกนำมาคำนวณหา
ความล่าช้ารวมของทางแยกตามความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่
แตกต่างกันตั้งแต่ 30 60 90 120 150 และ 180 วินาที โดย
ยกตัวอย่างของวันจันทร์ได้ผลดังรูปที่ 6 ซึ่งนอกจากแสดงผลความ
ล่าช้าและปริมาณจราจรที่คำนวณได้แล้ว ยังแสดงเส้นแนวโน้ม
ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการพาราโบลา โดยแต่ละความยาว
รอบสัญญาณไฟจราจรให้สมการที่ต่างกัน แต่ทุกสมการให้ค่า
 R^2 เท่ากับ 0.98 ซึ่งมีค่าสูงสามารถนำมาสมการไปใช้งานต่อได้

ในแต่ละสมการบ่งบอกว่า ความยาวรอบสัญญาณไฟที่กำหนด
ไว้ หากปริมาณจราจรเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อความล่าช้ารวมอย่างไร
จะเห็นว่า เมื่อปริมาณจราจรมีน้อย ความล่าช้ารวมจะมีค่าน้อย แต่
เมื่อปริมาณจราจรเพิ่มขึ้น ความล่าช้าจะเพิ่มขึ้นทวีคูณ ดังนั้นหาก
ต้องการทราบว่าความยาวรอบสัญญาณไฟที่กำหนดไว้เหมาะสมกับ
ปริมาณจราจรเท่าใด (ให้ค่าความล่าช้ารวมน้อยที่สุด) เพียงนำแต่ละ
สมการมาหาผลต่างอนุพันธ์และกำหนดให้เท่ากับ 0 จะได้ปริมาณ
จราจรที่เหมาะสมกับความยาวรอบสัญญาณไฟจราจร

จากแนวทางข้างต้น เมื่อนำปริมาณจราจรที่เหมาะสมกับแต่ละ
ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจร มาเขียนความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 7
โดยพบว่า ภายภาพและการจัดการสัญญาณไฟจราจรของทางแยก
ในปัจจุบันจะมีความล่าช้ารวมน้อยที่สุด (จุดต่ำสุดของกราฟ) เมื่อ
ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรเท่ากับ 66 วินาที โดยสามารถ
รองรับปริมาณจราจรได้ประมาณ 1,035 คันต่อชั่วโมง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรกับความล่าช้ารวมที่
ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรต่าง ๆ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอบสัญญาณไฟจราจร
กับปริมาณจราจร

4.3. ผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียจากความยาว รอบสัญญาณไฟจราจร

ในบทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียที่เกิด
จากความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่กำหนดในปัจจุบันเทียบกับที่
เหมาะสม (โดยทั่วไป [17] แนะนำไว้ไม่ควรเกิน 120 วินาที) ในช่วง
เวลาเร่งด่วนเช้า เทียง และเย็น ของตัวอย่างวันจันทร์ โดยช่วง
เร่งด่วนเช้า (07:30-08:30 น.) ปัจจุบันกำหนดไว้ 170 วินาที
(ปริมาณจราจร 8,065 คันต่อชั่วโมง) ส่วนช่วงเร่งด่วนเที่ยง (10:15-
11:15 น.) ปัจจุบันกำหนดไว้ 172 วินาที (ปริมาณจราจร 8,908 คัน
ต่อชั่วโมง) และช่วงเร่งด่วนเย็น (16:45-17:45 น.) ปัจจุบันกำหนด
ไว้ 192 วินาที (ปริมาณจราจร 11,602 คันต่อชั่วโมง) ได้ผลดังนี้

4.3.1. มูลค่าความสูญเสียจากความล่าช้ารวม

ผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียจากความล่าช้ารวมดัง
ตารางที่ 1 พบว่า เมื่อลดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรปัจจุบัน
เป็น 150 วินาที (ค่าทดสอบ) และ 120 วินาที (ค่าแนะนำ) จะลด
มูลค่าความสูญเสียจากความล่าช้าในช่วงเช้าได้ร้อยละ 11.42 และ
28.56 คล้ายกับช่วงเที่ยงร้อยละ 12.42 และ 29.35 ส่วนช่วงเย็นลด
ได้มากถึงร้อยละ 21.25 และ 36.42 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์มูลค่าความล่าช้าในการเดินทาง

ช่วง เร่งด่วน	มูลค่าจากความล่าช้า (บาท/ชม.)		
	ปัจจุบัน	150 วินาที	120 วินาที
เช้า	8,846	-1,011 (-11.42 %)	-2,526 (-28.56 %)
เที่ยง	10,566	-1,312 (-12.42 %)	-3,101 (-29.35 %)
เย็น	41,079	-8,728 (-21.25 %)	-14,960 (-36.42 %)

4.3.2. ผลกระทบด้านการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียจากการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อลดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรปัจจุบันเป็น 150 และ 120 วินาที จะลดความสูญเสียช่วงเช้าได้ร้อยละ 11.42 และ 28.56 คล้ายกับช่วงเที่ยงร้อยละ 12.42 และ 29.35 ส่วนช่วงเย็นลดได้ถึงร้อยละ 21.25 และ 36.42 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์มูลค่าการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง

ช่วง เร่งด่วน	มูลค่าการใช้เชื้อเพลิง (บาท/ชม.)		
	ปัจจุบัน	150 วินาที	120 วินาที
เช้า	7,019	-802 (-11.42 %)	-2,004 (-28.56 %)
เที่ยง	8,383	-1,041 (-12.42 %)	-2,460 (-29.35 %)
เย็น	32,591	-6,924 (-21.25 %)	-11,869 (-36.42 %)

4.3.3. ผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังตารางที่ 3 พบว่า เมื่อลดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรปัจจุบันเป็น 150 และ 120 วินาที จะลดมูลค่าความสูญเสียในช่วงเช้าได้ร้อยละ 11.41 และ 28.52 คล้ายกับช่วงเที่ยงร้อยละ 12.42 และ 29.36 ส่วนช่วงเย็นลดได้มากถึงร้อยละ 21.22 และ 36.37 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์มูลค่ามลพิษทางอากาศ

ช่วง เร่งด่วน	มูลค่ามลพิษทางอากาศ (บาท/ชม.)		
	ปัจจุบัน	150 วินาที	120 วินาที
เช้า	320	-37 (-11.41 %)	-91 (-28.52 %)
เที่ยง	412	-51 (-12.42 %)	-121 (-29.36 %)
เย็น	1,734	-368 (-21.22 %)	-631 (-36.37 %)

4.3.4. ผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์ในภาพรวม ดังตารางที่ 4 พบว่า เมื่อลดความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรปัจจุบันเป็น 150 และ 120 วินาที จะลดความสูญเสียช่วงเช้าได้ร้อยละ 11.42 และ 28.56 คล้ายกับช่วงเที่ยงร้อยละ 12.42 และ 29.35 ส่วนช่วงเย็นลดได้ถึงร้อยละ 21.25 และ 36.42 ตามลำดับ

ทั้งนี้อาจมีข้อสังเกตในประเด็นค่าร้อยละความแตกต่างของความสูญเสียในแต่ละช่วงเวลาของทั้งสามผลกระทบข้างต้นกับผลกระทบในภาพรวมที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการศึกษาประเมินผลกระทบจากจำนวนยานพาหนะที่ได้รับผลกระทบในภาพรวม ซึ่งความสูญเสียทั้งสี่ส่วนใช้ข้อมูลเดียวกัน จึงทำให้ค่าดังกล่าวให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์มูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์

ช่วง เร่งด่วน	มูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์ (บาท/ชม.)		
	ปัจจุบัน	150 วินาที	120 วินาที
เช้า	16,185	-1,849 (-11.42 %)	-4,622 (-28.56 %)
เที่ยง	19,361	-2,404 (-12.42 %)	-5,682 (-29.35 %)
เย็น	75,404	-16,020 (-21.25 %)	-27,460 (-36.42 %)

5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรต่อความล่าช้า การใช้เชื้อเพลิง การปล่อยมลพิษทางอากาศ และความสูญเสียในภาพรวมของทางแยกกรณีวัดโคนาว ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงไม่เร่งด่วน ลักษณะกายภาพและสัญญาณไฟจราจรปัจจุบันให้ค่าความล่าช้าที่น้อยสุดเมื่อมีปริมาณจราจร 1,035 คันต่อชั่วโมง และความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรเท่ากับ 66 วินาที ส่วนช่วงเวลาเร่งด่วน ผลการคำนวณมูลค่าความสูญเสียของผลกระทบเปรียบเทียบระหว่างความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่กำหนดในปัจจุบันกับค่าที่แนะนำ (120 วินาที) พบว่า มูลค่าความสูญเสียจากความล่าช้า การใช้เชื้อเพลิง มลพิษทางอากาศ และมูลค่าความสูญเสียรวม ลดลงอย่างชัดเจน โดยมูลค่าความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์รวมของช่วงเร่งด่วนเช้า เที่ยง เย็น ลดลงร้อยละ 28.56 29.35 และ 36.42 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่แนะนำ 120 วินาที อาจยังไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมที่สุดที่จะลดความสูญเสียเชิงเศรษฐศาสตร์ในภาพรวมของทางแยกในช่วงเวลาเร่งด่วน ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม อีกทั้งควรมีการศึกษาการใช้งานสัญญาณไฟจราจรแบบเปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณการจราจร (Vehicle actuated signal) รวมทั้งการพิจารณาผลกระทบของทางแยกที่ศึกษาทั้งทางแยกบริเวณใกล้เคียง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยคนที่ 1 ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณทุนบัณฑิตศึกษา พ.ศ. 2562 วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

7. การอ้างอิง

- [1] กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก. (2563). *จำนวนรถที่จัดทะเบียนสะสม* กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.
- [2] กองทะเบียนและประมวลผลมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. (2563). *สถิตินักศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*. [ออนไลน์]. ได้จาก: <https://reg.psu.ac.th/StatStudentHatYai/index.aspx> [สืบค้นข้อมูล: 9 มีนาคม 2564].
- [3] กองนโยบาย ยุทธศาสตร์ และแผน สำนักงานอธิบดี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2563). *ข้อมูลสรุปข้อมูลบุคลากร*. [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.planning.psu.ac.th/index.php/information/stat/stats-staff>. [สืบค้นเมื่อ 2 มีนาคม 2564].
- [4] งานเวชระเบียน โรงพยาบาลสงขลานครินทร์. (2563). *ข้อมูลสถิติผู้ป่วยนอกทั้งหมดในเวลาราชการ*. [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://medinfo2.psu.ac.th/medrec/status.html>. [สืบค้นเมื่อ 2 มีนาคม 2564].
- [5] F Webster. (1957). *Traffic Signals Settings*. London, England: Road Research Laboratory.
- [6] ประเมศวร์ เหลือเทพ. (2561). *วิศวกรรมจราจรจากทฤษฎีสู่ปฏิบัติ*. (พิมพ์ครั้งที่ 1) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 7-8 และ 12-13.
- [7] ชัยวัฒน์ ไทญ่บก. (2558). *การปรับปรุงการจราจรบริเวณสี่ทางแยกบนถนนกาญจนาภิเษยในเมืองหาดใหญ่*. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ประเทศไทย.
- [8] Regina McElroy. (2008). *SIGNAL TIMING MANUAL U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*. Portland, 6-3.
- [9] Roger P. Roess, Elena S. Prassas, William R. McShane. (2011). *Traffic Engineering, Fourth Edition*. United States, 504.
- [10] ชญาดา รวีวรรณ. (2563). *การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม สำหรับการออกแบบและควบคุมทางแยกบนถนนสายหลัก ด้วยแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค*. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ประเทศไทย.
- [11] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2562). *รายงานโครงการศึกษาพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่มในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมาตรการและนโยบายด้านการขนส่งเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ*. กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 6-3.
- [12] กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. (2543). *เอกสารทางเทคนิครวมพลังหยุดรถชนน้ำมัน*. [ออนไลน์]. ได้จาก : www.eppo.go.th. [สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2564].
- [13] ศรายุทธ เรืองผล. (2559). *การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคขนส่งทางบก กลุ่มจังหวัดอันดามัน*. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ประเทศไทย.
- [14] กระทรวงแรงงาน. (2563). *ประกาศคณะกรรมการค่าจ้าง*. (ฉบับ 10). กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.
- [15] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2564). *ราคาน้ำมัน*. [ออนไลน์]. ได้จาก : [http://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/petroleum/price/oilprice?orders\[publishUp\]=publishUp&search=1](http://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/petroleum/price/oilprice?orders[publishUp]=publishUp&search=1). [สืบค้นเมื่อ 30 มีนาคม 2564].
- [16] อรุณ จิรวัฒน์กุล (2558) *สถิติทางวิทยาศาสตร์สุขภาพเพื่อการพิมพ์ครั้งที่ 1*. กรุงเทพมหานคร, 199-212
- [17] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2015). *Signal Timing Manual, Second Edition*. Chapter 6, NCHRP REPORT 812, Washington, DC.