การประเมินผลการเปิดช่องจราจรสวนทางบนทางพิเศษฉลองรัช

Evaluation of Reversible Lane on Inbound of Chalong Rat Expressway

เบญจวรรณ องอาจ[1*] และเทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร[2]

[1,2] กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

**Corresponding author; E-mail address: polyben46@hotmail.com, thepp9@hotmail.com*

บทคัดย่อ

จากปัญหาการจราจรติดขัดบนทางพิเศษฉลองรัชขาเข้าเมืองในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) ให้บริการทางพิเศษ 1.9 ล้านเที่ยวต่อวัน จึงเกิดเป็นแถวคอยสะสมตั้งแต่ทางลงถนนพระราม 9 ยาวไปถึงถนนรามอินทรา แต่ในทางกลับกันมีปริมาณจราจรเบาบางในช่องขาออก กทพ. จึงได้ทำการเปิดช่องจราจรสวนทางช่วยระบายการจราจรฝั่งขาเข้า ตั้งแต่ กม.12+100 ถึง กม.7+700 ด้วยมาตรการ Reversible Lane เริ่มจากการศึกษาปริมาณการจราจร พบว่า รถฝั่งขาเข้ามีปริมาณ 7,849 คัน/ชม. ฝั่งขาออกมีปริมาณ 2,540 คัน/ชม. เป็นอัตราส่วน 76:24 ซึ่งเหมาะสมแก่การทำในทางทฤษฎี ตำแหน่งจุดเปิดทางออก ได้ขยับจาก กม. 7+700 ไปเป็นตำแหน่ง กม. 6+400 เพื่อให้เลยพ้นทางลงถนนพระราม 9 ซึ่งเป็นจุดที่การจราจรติดขัด เป็นไปตามหลักการของการเปิดช่องจราจรสวนทางที่ให้พ้นช่วงติดขัดไป มีการปรับปรุงด้านกายภาพ ช่องเปิดเกาะกลางบริเวณ กม.12+100 และ กม. 6+400 ได้รับการปรับปรุงใหม่ให้ยาวมากขึ้นจากเดิม 20 เมตร เป็น 35 เมตร ซึ่งเป็นความกว้างมากสุดเท่าที่จะดำเนินการได้ โครงสร้างจุดเปิดมีการก่อสร้างใหม่ให้ลื่น เปิด-ปิด เบากว่าเดิมเพื่อลดภาระเจ้าหน้าที่ มีการติดตั้งป้ายเตือนแขวนสูงแบบถาวรที่ระยะ 500 และ 1,000 เมตร ด้านความปลอดภัยการจราจร ได้มีป้ายไฟประจำช่องทางเพื่อเตือนผู้ใช้ทางในช่องขาออก พร้อมกับขึ้นข้อความเตือนบนป้ายแสดงข้อความ (Variable Message Sign) และป้ายเตือนช่องทาง (Matrix Sign) พร้อมออกประกาศราชกิจจานุเบกษา เรื่อง “การเดินรถแบบสวนทางบนทางพิเศษ” การจัดการจราจรได้จัดให้มีการวางกรวยยางตลอดแนวเป็นระยะทางกว่า 6 กม. จัดรถคุ้มครองที่มีไฟวับวาบบริเวณจุดเข้าจุดออกเพื่อให้สังเกตเห็นชัดเจน ได้เปิดใช้งานจริง ระหว่างเวลา 6.30-9.00 น. สรุปประเมินผลก่อนและหลังดำเนินการ 6.30 - 9.00 น. พบว่าระบายจราจรเฉลี่ยได้เพิ่มขึ้น 10.8% ระยะเวลาการเดินทางลดลงจาก15.7 นาที เหลือ 13.3 นาทีในช่องทางหลักเหลือ 8.3 นาที ในช่องจราจรสวนทาง คิดเป็นผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ 11.4 ล้านบาทต่อกิโลเมตรต่อปี หรือ 36 ล้านบาทต่อปี

คำสำคัญ: ช่องจราจรสวนทาง, ทางพิเศษฉลองรัช

Abstract

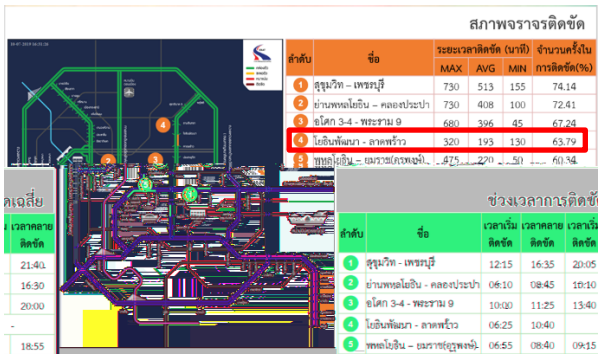
Due to traffic congestion on the Chalong Rat inbound expressway during rush hour in the morning, EXAT has daily average traffic volume of 1.9 million trips per day resulting in vehicles accumulation along Rama 9 Road to Ramindra Road. While the traffic was light in the opposite direction. EXAT started using reversible lane to decrease congestion on the inbound expressway from the Sta.12+100 to Sta.7+700. The problem must be resolved with reversible lane. From reviewed and researched the traffic volume to improved traffic operations. The research, inbound expressway has a capacity of approximately 7,849 vehicles per hour and 2,540 vehicles per hour for outbound, 76:24 as ratio, which is suitable for “Reversible Lane”, Its use is most applicable on multi-lane roadways with a directional imbalance. EXAT moved the exit from Sta.7+700 to Sta. 6+400 in order to pass beyond the Rama 9 Road which has high congestion. In accordance with the principles of Reversible Lane to mitigate peak period congestion, the barrier exiting has been improving from 20 meters to 35 meters which is the highest width that can be performed for Sta.12+100 and Sta. 6+400. The structure of exiting was constructed and redesigned to be slippery and easy to use including road signs at kilometer markers 500 and kilometer markers 1000. For the traffic safety, 6 road signs with variable message sign and matrix sign was designed to be LED light banner to warn the user in the outbound expressway then announced in the Government Gazette for Reversible Lane on the expressway. EXAT has lined the traffic cones along the road for over 6 kilometers and vehicles with flashing lights at the entry point for clear observation. This starts between 6.30 am to 9.00 am from the evaluation this method reduces the congestion and increases the level of service by flow up 10.8%, Travel time decreases from 15.7 min to 13.3 min. in mainline and 8.3 min. in reversible lanes. Economic benefit 11.4 million baht per kilometers per years or 36 million baht per year.

Keywords: Reversible Lane, Chalong Rat Expressway

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาการจราจรติดขัดบนทางพิเศษฉลองรัชขาเข้าเมืองในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) ให้บริการทางพิเศษ 1.9 ล้านเที่ยวต่อวัน โดยทางพิเศษฉลองรัช ปี 2559 (เดือน ม.ค. - ก.ค. 2559) 211,111 เที่ยว/วัน โดยมี V/C Ratio เท่ากับ 0.78 และปัจจุบันมีปริมาณจราจรเฉลี่ย 248,811 คัน/วัน (ข้อมูลประจำเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562) และมีปริมาณรถหนาแน่นในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าในทิศทางขาเข้าเมืองจึงเกิดเป็นแถวคอยสะสมตั้งแต่ทางลงถนนพระราม 9 ยาวไปถึงถนนรามอินทรา แต่ในทางกลับกันมีปริมาณจราจรเบาบางในช่องขาออก และได้มีการตรวจสอบสภาพการจราจรติดขัดข้อมูลสภาพการจราจรผ่าน EXAT Traffic พบว่ามีสภาพการจราจรติดขัดในช่วงเวลา 06:25 -10:40 น.แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 จุดติดขัดบนโครงข่ายทางพิเศษ

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อประเมินผลก่อนและหลังการดำเนินการบนทางพิเศษฉลองรัช

2) เพื่อศึกษาผลกระทบการจราจรในทิศทางตรงกันข้าม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ดำเนินการศึกษารวบรวมข้อมูลบนทางพิเศษฉลองรัชขาเข้าเมืองในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าพร้อมทั้งศึกษาผลกระทบการจราจรในทิศทางตรงกันข้าม พบว่าขาเข้ามีปริมาณการจราจร 7,849 คัน/ชม. ฝั่งขาออก มีปริมาณ 2,540 คัน/ชม. เป็นอัตราส่วนมากกว่า 70:30 ซึ่งเหมาะสมแก่การทำในทางทฤษฎี [1] หากมากกว่า 60:40 และมีแนวโน้มจะเข้าใกล้ร้อยละ 80 ในช่วงเวลาเร่งด่วน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินระบุตำแหน่งจุดติดขัดจากแผนที่รายงานสภาพการจราจร

(วิรภพ เมฆพฤกษาวงศ์, 2560) [2] ได้ทำการศึกษาการระบุตำแหน่งจุดติดขัดของโครงข่ายทางพิเศษเป็นการนำข้อมูลจากการรายงานสภาพจราจรแบบทันกาล (Real-Time) ซึ่งเป็นการรายงานสดจากเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรที่ไม่มีการบันทึกข้อมูลไว้นำมาพัฒนาต่อยอดเก็บเข้าฐานข้อมูลแล้วนำข้อมูลนั้นมาจัดอันดับและแสดงผลในรูปแบบเส้นสีสภาพจราจรอย่างง่าย (Schematic Map) พบว่าการประเมินผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จากแบบจำลองสภาพจราจรของเส้นสีเขียวและสีแดง พบว่าหากมีแนวทางการแก้ไขปัญหาจราจรให้สภาพจราจรเปลี่ยนจากเส้นสีแดงกลายเป็นสีเขียวได้ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางลงได้รวม 15,856 บาท/ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร โดยแบ่งเป็นมูลค่าประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้ยานพาหนะเท่ากับ 7,209 บาท/ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร และเป็นมูลค่าประหยัดระยะเวลาเดินทางเท่ากับ 8,647 บาท/ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร

2.2 การพัฒนา API เพื่อสร้างฐานข้อมูลสภาพการจราจรและการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับสรุปจุดติดขัดบนโครงข่ายทางพิเศษ

(อุดมโชค สุริยะจรัสแสง, 2562) [3] ได้ทำการพัฒนา API เพื่อสร้างฐานข้อมูลสภาพการจราจร เพื่อใช้บริการประชาชนในการรายงานสภาพจราจร เพื่อให้เป็นข้อมูลการวางแผนการเดินทาง ลดปัญหาการจราจรติดขัด การมีข้อมูลสภาพการจราจรจากหลายแหล่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เจ้าหน้าสามารถรายงานสภาพจราจรได้อย่างถูกต้องและเป็นปัจจุบัน (ธวัชชัย รักษาชาติ, 2563) [4] ได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับสรุปจุดติดขัดบนโครงข่ายทางพิเศษโดยใช้การประมวลผลทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยจัดอันดับรวมถึงหาช่วงเวลาติดขัดของจุดนั้นๆ เมื่อประมวลหาจุดติดขัดเป็นที่เรียบร้อยจึงนำจุดติดขัดนั้นมาแสดงออกเป็นแผนที่ความร้อน (Heat Map) เพื่อให้เจ้าหน้าที่จัดการจราจรรวมถึงผู้เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหาจราจรสามารถเข้าใจได้โดยง่ายและนำข้อมูลไปประกอบการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำค่านี้มาเพื่อจัดอันดับได้ทันทีที่เพียงการดึงข้อมูลออกมาแล้วทำการเรียงลำดับ (Sort) จากมากไปหาน้อยเพื่อหาจำนวนค่าการติดขัด 5 อันดับแรกของแต่ละประเภทการติดขัด เมื่อได้ 5 อันดับการติดขัดแล้วสามารถ นำเอา id ของจุดติดขัดไปหาช่วงเวลาของการติดขัดน้อยที่สุด ช่วงเวลาติดขัดมากที่สุด ช่วงเวลาติดขัดโดยเฉลี่ย และร้อยละการติดขัดของแต่ละจุดได้

2.3 ตัวชี้วัดที่ใช้กำหนดระดับการให้บริการของถนนแต่ละประเภท

โดยการพิจารณาตารางที่ 1 ประเภทของถนนสำหรับทางพิเศษจะพบว่าตัวชี้วัดที่ใช้ในการกำหนดระดับการให้บริการคือ ความหนาแน่นและความเร็ว ซึ่งความหนาแน่น Density Range (pc/km/ln) นี้ สามารถหามาจากความสัมพันธ์ ปริมาณจราจรชั่วโมงเร่งด่วนสูงสุด (pc/h/ln) และความเร็ว (km/h) [5]

ตารางที่ 1 ตัวชี้วัดที่ใช้กำหนดระดับการให้บริการของถนนแต่ละประเภท

ประเภทของถนน	ตัวชี้วัดที่ใช้กำหนด LOS
Two - lane highway	ความเร็ว (Speed), ร้อยละของเวลาที่ต้องขับตาม (percent time – spent - following)
Multilane highway	ความหนาแน่น (Density)
Freeway: Basic Segment	ความหนาแน่น (Density)
Freeway: Ramp	ความหนาแน่น (Density)
Freeway: Weaving	ความเร็ว (Speed)

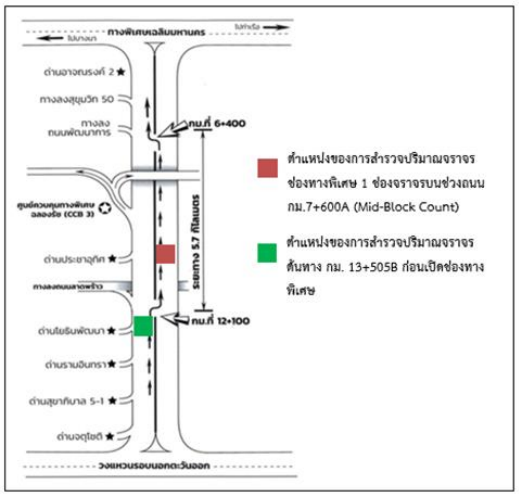
2.4 การเปิดช่องจราจรสวนทางช่วยระบายการจราจร (Reversible Traffic Lanes) [6]

การกระจายของปริมาณการจราจรบนถนนเป็นตัวแปรหลักสำหรับการพิจารณาศักยภาพของการเปิดช่องจราจรสวนทางสำหรับช่วยระบายการจราจร ซึ่งการหาปริมาณจราจรนั้นควรนับจำนวนการจราจรในหลาย ๆ ช่วงของพื้นที่ถนนที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมหรือในกรณีที่จำเป็นต้องรักษาความจุในทิศทางรองเพื่อเพิ่มความสามารถของทิศทางที่มีการจราจรหนาแน่นและลดความแออัดโดยการยืมความจุเลนที่มีจากทิศทางอื่นมาช่วยลดความแออัดในช่วงเวลาเร่งด่วนหรือในกรณีมีเหตุการณ์พิเศษหรือเมื่อมีการก่อสร้างหรือกิจกรรมการบำรุงรักษาอยู่บนท้องถนน

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การสำรวจข้อมูลจราจร

ทำการสำรวจข้อมูลจราจรก่อนและหลังดำเนินการ ในช่วงเวลา 06:30 - 09:00 น. ก่อนวันเปิดทำการเมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน 2561 และหลังเปิดทำการเมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน 2561 โดยทำการสำรวจเป็นเวลา 5 วันทำการ (วันจันทร์ถึงวันศุกร์) จากอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพจราจร (Traffic Sensor) ที่สามารถเก็บข้อมูลปริมาณจราจร (Traffic Volume) จำแนกตามประเภทยานพาหนะ (Vehicle Classification) แบบรายคันแยกตามช่อง นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจนับปริมาณจราจรเพิ่มเติมบนช่วงถนน กม. 7+600A (Mid-Block Count) เพื่อหาปริมาณจราจรที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษ 1 ช่องจราจร ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (06.30 - 09.00 น.) แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงโยธินพัฒนาถึงลาดพร้าว ช่วงลาดพร้าวถึงประชาอุทิศ ช่วงประชาอุทิศถึงพระราม 9-2 และช่วงพระราม 9-2 ถึงพัฒนาการ ดังแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 จุดสำรวจข้อมูลจราจร

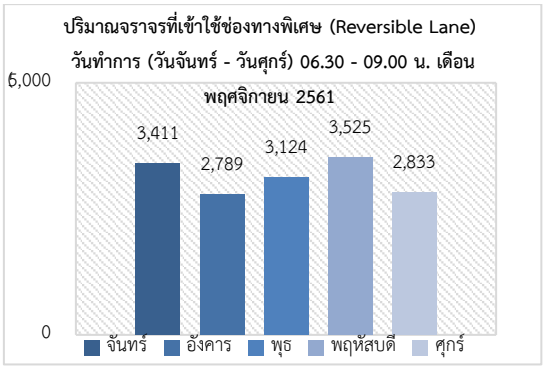
ตารางที่ 2 สรุปรายละเอียดจุดสำรวจข้อมูลจราจร

ประเภท	ช่วงถนน	ช่วงเวลา	วันสำรวจ
การสำรวจปริมาณจราจรบนช่วงถนน			
MB1	7+600A	เร่งด่วนเช้า (06.30 - 08.30 น.) เร่งด่วนเช้า (06.30 - 09.00 น.)	22 - 23 สิงหาคม 2561 (ช่วงทดลองเปิด) และ 26 - 30 พฤศจิกายน 2561
MB2	13+505B	เร่งด่วนเช้า (06.30 - 09.00 น.)	19 - 21 พฤศจิกายน 2561 และ 26 - 30 พฤศจิกายน 2561

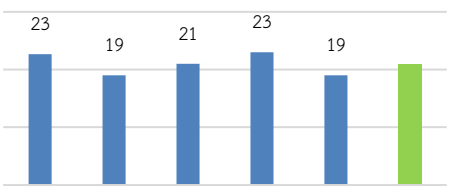
3.2 ผลปริมาณจราจรที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษวันทำการ

3.2.1 ร้อยละรถที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษเฉลี่ย

พบว่าหลังเปิดใช้ช่องทางพิเศษ (Reversible Lane) บนทางพิเศษฉลองรัช ทิศทางขาเข้าวันทำการ (วันจันทร์ - วันศุกร์) เดือนพฤศจิกายน 2561 มีปริมาณจราจรที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษสูงสุด 3,525 คัน ในวันพฤหัสบดี ช่วงเวลา 06.30 - 09.00 น. (1,625 คัน/ชม. ช่วงเวลา 07.30 - 08.30 น.) รองลงมา 3,411 คัน ในวันจันทร์ แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีร้อยละรถที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษสูงสุดในวันจันทร์และวันพฤหัสบดี และร้อยละรถที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษเฉลี่ย 5 วันทำการ เท่ากับ 21% แสดงดังรูปที่ 4



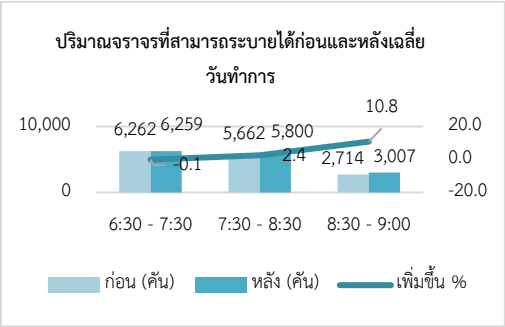
รูปที่ 3 ปริมาณจราจรที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษ (Reversible Lane)



รูปที่ 4 ร้อยละรถที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษ

3.2.1 ผลสภาพการจราจรบนเส้นทางก่อนและหลังเปิด

ทั้งนี้ก่อนการเปิดใช้อย่างเป็นทางการได้มีการทดลองเปิดช่องทางพิเศษแล้ว เมื่อวันที่ 22 - 23 สิงหาคม 2561 โดยมีรถที่เข้าใช้ช่องทางพิเศษได้มากสุด 1,577 คัน/ชม. จากการเปิดช่องทางพิเศษอย่างเป็นทางการ เมื่อวันจันทร์ที่ 26 พฤศจิกายน 2561 ได้ผลปริมาณจราจรที่สามารถระบายได้ก่อนและหลังเฉลี่ยวันทำการ (วันจันทร์ - วันศุกร์) เดือนพฤศจิกายน 2561 แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปริมาณจราจรที่สามารถระบายได้ก่อนและหลังเฉลี่ยวันทำการ (วันจันทร์ - วันศุกร์)

3.2.2 สภาพการจราจรติดขัดข้อมูลสภาพการจราจรผ่าน EXAT Traffic หลังการดำเนินมาตรการ

จากการศึกษางานวิจัยกระบวนการหาจุดติดขัด [4] ได้มีการแยกประเภทของจุดติดขัดและนับจำนวนการเกิดซ้ำของจุดนั้น ๆ ตลอดทั้งวันประมาณ 60 วันต่อไตรมาส เมื่อประมวลหาจุดติดขัดเป็นที่เรียบร้อย พบช่วงเวลาติดขัดของแต่ละจุด 5 อันดับ โดยการติดขัดและช่วงเวลาของการติดขัด เรียงจากน้อยที่สุดช่วงเวลาติดขัดมากที่สุด ช่วงเวลาติดขัดโดยเฉลี่ย และร้อยละการติดขัดของแต่ละจุดจะพบว่าจุดติดขัดได้หายไป หลังการเปิดช่องจราจรสวนทางเพื่อช่วยระบายรถ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ช่วงเวลาติดขัดของแต่ละจุด [4]

ลำดับ	ชื่อ	ระยะเวลาติดขัด (นาที)			จำนวนครั้งในการติดขัด (%)
		MAX	AVG	MIN	
1	เพชรบุรี – สุขุมวิท	845	551	240	96.67
2	อโศก 2 - อโศก 3-4	590	287	145	96.67
3	สุขุมวิท - พระราม 4	550	220	110	95.00
4	รัชดาภิเษก - บางซื่อ	535	242	130	93.33
5	อโศก 2 - พหลโยธิน	435	114	75	58.00

3.3 ระยะเวลาการเดินทางและความเร็วการเดินทางเฉลี่ยก่อนและหลัง

การสำรวจระยะเวลาการเดินทางเฉลี่ยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลการเดินทาง (GPS Data Logger) จากหัวเกาะทางขึ้นด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษโยธินพัฒนาถึงหัวเกาะทางลงถนนพัฒนาการ ระยะทางประมาณ 9.3 กม. โดยแบ่งออกเป็น 5 ช่วง ได้แก่ ช่วงโยธินพัฒนาถึงลาดพร้าว ช่วงลาดพร้าวถึงประชาอุทิศ ช่วงประชาอุทิศถึงพระราม 9-2 ช่วงพระราม 9-2 ถึงพัฒนาการ และช่วงโยธินพัฒนาถึงพัฒนาการ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการเดินทางเฉลี่ยก่อนและหลัง (หน่วย: นาที)

ช่วงถนน	ระยะเวลาการเดินทางเฉลี่ย		
	ก่อนเปิด*	หลังเปิดช่องทางหลัก**	หลังเปิดช่องทางพิเศษ**
โยธินพัฒนา - ลาดพร้าว	4.9	4.2	3.0
ลาดพร้าว - ประชาอุทิศ	6.0	5.3	2.2
ประชาอุทิศ - พระราม 9-2	2.6	1.8	1.0
พระราม 9-2 - พัฒนาการ	2.2	2.0	2.1
โยธินพัฒนา - พัฒนาการ	**15.7**	**13.3**	**8.3**

* สำรวจทุกวันจันทร์ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน 2561

** สำรวจทุกวันจันทร์ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2561 - มกราคม 2562

จากตารางที่ 4 พบว่า จากการเปิดใช้ช่องทางพิเศษ ทำให้ระยะเวลาการเดินทางเฉลี่ยช่วงบริเวณโยธินพัฒนาถึงพัฒนาการดีขึ้น ทั้งการใช้ช่องทางหลักและช่องทางพิเศษ โดยใช้เวลาเฉลี่ยลดลงจาก 15.7 นาที เป็น 13.3 นาที และ 8.3 นาที ตามลำดับ หรือใช้เวลาเฉลี่ยลดลงร้อยละ 15 และ 47 ตามลำดับ โดยเฉพาะการใช้ช่องทางพิเศษ

กทพ. มีการสำรวจความเร็วการเดินทางเฉลี่ยใช้ข้อมูลจาก อุปกรณ์บันทึกข้อมูลการเดินทาง (GPS Data Logger) จากหัวเกาะทางขึ้นด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษโยธินพัฒนาถึงหัวเกาะทางลงถนนพัฒนาการ ระยะทางประมาณ 9.3 กม. โดยแบ่งออกเป็น 5 ช่วง ได้แก่ ช่วงโยธินพัฒนาถึงลาดพร้าว ช่วงลาดพร้าวถึงประชาอุทิศ ช่วงประชาอุทิศถึงพระราม 9-2 ช่วงพระราม 9-2 ถึงพัฒนาการ และช่วงโยธินพัฒนาถึงพัฒนาการ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความเร็วการเดินทางเฉลี่ยหลังเปิดอย่างต่อเนื่อง (หน่วย: กม./ชม.)

ช่วงถนน	ความเร็วการเดินทางเฉลี่ย		
	ก่อนเปิด*	หลังเปิดช่องทางหลัก**	หลังเปิดช่องทางพิเศษ**
โยธินพัฒนา - ลาดพร้าว	28.16	32.86	46.00
ลาดพร้าว - ประชาอุทิศ	29.00	32.83	79.09
ประชาอุทิศ - พระราม 9-2	32.31	46.67	84.00
พระราม 9-2 - พัฒนาการ	73.64	81.00	77.14
โยธินพัฒนา- พัฒนาการ	**35.54**	**41.95**	**67.23**

* สำรวจทุกวันจันทร์ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน 2561

** สำรวจทุกวันจันทร์ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2561 - มกราคม 2562

จากตารางที่ 5 พบว่า จากการเปิดใช้ช่องทางพิเศษทำให้ความเร็วการเดินทางเฉลี่ยช่วงบริเวณโยธินพัฒนาถึงพัฒนาการดีขึ้น ทั้งการใช้ช่องทางหลักและช่องทางพิเศษ โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยเพิ่ม เป็น 41.95 กม./ชม. และ 67.23 กม./ชม. หรือใช้ความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 และ 89 ตามลำดับ โดยเฉพาะการใช้ช่องทางพิเศษ

3.4 ผลกระทบการจราจรในทิศทางตรงกันข้ามและความหนาแน่น (Density) ของช่วงถนนตลอดแนวเส้นทาง

รูปที่ 6 เปรียบเทียบวันที่ทำการปิดและเปิดช่องจราจรสวนทาง

ระบบจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Transport System: ITS) มีการติดตั้ง Sensor ซึ่งตรวจวัดสภาพการจราจรบนทางพิเศษได้ในเชิงปริมาณ ได้แก่ ความเร็ว (Speed) อัตราการไหล (Flow Rate) และความหนาแน่นจราจร (Density) จากนั้นจึงแปลงค่าเหล่านี้เป็นสีที่สอดคล้องกับความรู้สึกนำไปแสดงใน Mobile Application “EXAT Traffic” โดยแต่ละสีมีความหมายในเชิงปริมาณเพื่อรายงานสภาพจราจร โดยมีเกณฑ์แบ่งออกเป็น 4 ระดับ แสดงดังตารางที่ 6 และจากการตรวจสอบสภาพการจราจร เพื่อเปรียบเทียบวันที่ทำการปิดและเปิดช่องจราจรสวนทาง พบว่า การจราจรในทิศทางฝั่งตรงข้ามช่วงที่ทำการเปิดสามารถใช้ความเร็วได้เช่นเดียวกันกับขณะปิดใช้งานแสดงดังรูปที่ 6

ตารางที่ 6 ระดับสภาพจราจรบนทางพิเศษในรูปแบบเส้นสี

ระดับ	เส้นสี	สภาพจราร	Level of Service	Density Range (pc/km/ln)	Speed Range (km/h)
1	เขียว	คล่องตัว	A-C	0-16	>70
2	ส้ม	เริ่มชะลอตัว	D-E	>16-28	>40-70
3	แดง	หนาแน่น	F	>28	>15-40
4	แดงเข้ม	ติดขัด-หยุดชั่วขณะ	F	>28	0-15

รูปที่ 7 เปรียบเทียบวันที่ทำการเปิดและปิดช่องจราจรสวนทางในรูปแบบของระดับสภาพจราจรบนทางพิเศษในรูปแบบเส้นสี

สามารถสรุปผลการวิเคราะห์สภาพการจราจรบนเส้นทางก่อนและหลังดำเนินมาตรการ (Before & After Analysis) ตลอดแนวเส้นทาง แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงโยธินพัฒนาถึงลาดพร้าว ช่วงลาดพร้าวถึงประชาอุทิศ ช่วงประชาอุทิศถึงพระราม 9-2 และช่วงพระราม 9-2 ถึงพัฒนาการ แสดงผลสภาพการจราจรบนเส้นทางก่อนและหลังเปิด (เฉลี่ย 3 วันทำการ) พบว่า ช่วงถนนโยธินถึงลาดพร้าว สภาพการจราจรดีขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลา 07.30 - 09.00 น. เปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีส้ม (การจราจรหนาแน่นเคลื่อนที่ช้าเป็นเริ่มมีการไหลแบบชะลอตัว) ช่วงถนนลาดพร้าวถึงประชาอุทิศ สภาพจราจรดีขึ้นจากสีส้มเป็นเขียว (การจราจรชะลอตัวเป็นคล่องตัว) ตั้งแต่ช่วงเวลา 07.00 - 08.00 น. และเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียวตั้งแต่ช่วงเวลา 08.00 - 09.00 น. (การจราจรหนาแน่นเคลื่อนที่ช้าเป็นการจราจรคล่องตัว) ถนนประชาอุทิศถึงพระราม 9-2 เปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว (การจราจรชะลอตัวเป็นคล่องตัว) ตั้งแต่ช่วงเวลา 07.00- 09.00 น. ทั้งนี้ เมื่อสิ้นสุดการปิดช่องจราจรสวนทาง ช่วงถนนพระราม 9-2 ถึงพัฒนาการสภาพการจราจรเหมือนเดิมคงที่ทั้งก่อนและหลังแสดงดังรูปที่ 7

จากการประเมินผลก่อนและหลังดำเนินมาตรการทำให้ได้ข้อสรุปว่าการเปิดช่องทางพิเศษ (Reversible Lane) บนทางพิเศษฉลองรัช ทิศทางเข้าเมืองในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า สามารถช่วยระบายการจราจรและอำนวยความสะดวกในการเดินทางแก่ผู้ใช้ทางพิเศษฉลองรัชในช่วงเวลาดังกล่าวได้

3.5 การประเมินผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ผลประโยชน์ที่ได้ประกอบด้วยผลประโยชน์ในด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถ (บาท/pcu/กม.) โดยประเมินจากผลต่างระหว่างมูลค่าของค่าใช้จ่ายในการใช้รถในกรณีก่อน

การคำนวณหาปริมาณทรัพยากรที่ถูกใช้หรืออัตราการสูญเสีย แล้วนำไปคูณกับค่าใช้จ่ายต่อหน่วยเพื่อหาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในหมวดต่างๆ ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Cost) ค่ายางรถยนต์ (Tyre Cost) ค่าน้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Cost) ค่าใช้จ่ายพนักงานประจำรถและการอำนวยการ (Crew Cost) ค่าอะไหล่ในการบำรุงรักษา (Maintenance Parts Cost) ค่าแรงงานในการบำรุงรักษา (Maintenance Labour Cost)

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้ยานพาหนะตามตารางที่ 7 จะแยกตามประเภทของยวดยาน ณ ความเร็วที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาคำนวณผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้ยวดยาน โดยในการศึกษานี้มีการประยุกต์ใช้ ราคาต่อหน่วยเข้ากับอัตราการสิ้นเปลืองต่างๆ เพื่อหาค่าใช้จ่ายในการใช้รถสำหรับยานพาหนะตัวแทน ณ ความเร็วเฉลี่ยต่างๆ ณ ปี พ.ศ. 2555 ที่ได้ผลการคำนวณของแต่ละหมวดในการใช้รถยนต์จากโปรแกรม HDM-4 [7] ส่วน Parameter ของปัจจัยด้านกายภาพ เป็นค่าที่ต้องวิเคราะห์มาจากข้อมูลทดสอบต่างๆ จากการวิจัยเฉพาะทาง โดยได้ประยุกต์ใช้ค่าตามการศึกษา Thailand Pavement Management System (TPMS) -Thailand Road User Model ของกรมทางหลวง พ.ศ. 2541 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่า Parameter ของปัจจัยด้านกายภาพ รายละเอียดการปรับปรุงตัวแปรของค่าใช้จ่ายในการใช้ยานพาหนะ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงตามลักษณะภูมิประเทศ สภาพจราจร และชนิดของยานพาหนะ ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถคำนวณ [7] ได้ดังแสดงสมการที่ (1)

$$Benefit_{voc\ saving}=(vkt)_{ก่อน} x\ (voc)_{ก่อน} - (vkt)_{หลัง} x\ (voc)_{หลัง} \quad (1)$$

โดยที่

Benefit (VOC Saving) = ผลประโยชน์จากการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถ (บาท)

VKT = ปริมาณรถ (คัน) ตามระยะทางการเดินทางรวมในพื้นที่ (pcu-กม.)

ทั้งนี้ก่อนการเปิดใช้จริงมีการทดลองและประเมินผลการเปิดเมื่อวันที่ 22 และ23 สิงหาคม 2561 พบว่า ก่อนการเปิดเท่ากับ 1,761 คัน /ชม/กม. หลังการเปิดเท่ากับ 1,955 คัน /ชม/กม. ตลอดช่วงเวลา 6.30-8.30 น. และดำเนินการเปิดอย่างต่อเนื่องอย่างเป็นทางการ ตั้งแต่ เวลา 06.30 - 09.30 น. (เฉพาะวันทำการ) เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน 2561 พบว่า ก่อนการเปิดเท่ากับ 1,464 คัน /ชม/กม. หลังการเปิดเฉลี่ย 5 วัน ทำการ เท่ากับ 1,508 คัน /ชม/กม. *VOC* = ค่าใช้จ่ายในการใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล (บาท/คัน-กิโลเมตร) ความเร็วเฉลี่ยก่อนเปิดเท่ากับ 13 กิโลเมตร/ชั่วโมง มีค่า VOC_{unit} เท่ากับ 14.37 บาท/คัน-กิโลเมตร และหลังการเปิดรถใช้ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 34 กิโลเมตร/ชั่วโมง มีค่า VOC_{unit} เท่ากับ 7.85 บาท/คัน-กิโลเมตร ตามลำดับ โดยค่าใช้จ่ายของรถทั้ง 9 ประเภท แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าใช้จ่ายในการใช้รถสำหรับยานพาหนะแต่ละประเภท ณ ปี พ.ศ. 2555 หน่วย: บาท/คัน-กิโลเมตร

ประเภทรถ	ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)					
	10	20	30	40	50	60
รถจักร-ยานยนต์ (MC)	2.83	1.56	1.18	1.02	0.97	0.98
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล (PC)	16.19	10.14	8.21	7.30	6.79	6.50
รถบรรทุกขนาดเล็ก (LT)	14.84	8.38	6.36	5.46	5.01	4.82
รถบรรทุกขนาดกลาง (MT)	24.33	14.16	10.97	9.52	8.76	8.40
รถบรรทุกขนาดใหญ่ (HT)	45.38	27.49	21.73	19.16	17.88	17.34
รถพ่วง (TR)	48.37	30.38	24.66	22.19	21.01	20.62
รถโดยสารขนาดเล็ก (LB)	28.48	15.44	11.23	9.22	8.10	7.45
รถโดยสารขนาดกลาง (MB)	35.69	19.52	14.32	11.85	10.48	9.70
รถโดยสารขนาดใหญ่ (HB)	57.75	33.46	25.51	21.71	19.60	18.39
ประเภทรถ	**ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)**					
	70	**80**	**90**	**100**	**110**	**120**
รถจักร-ยานยนต์ (MC)	1.03	1.12	1.25	1.43	1.65	1.94
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล (PC)	6.36	6.29	6.31	6.41	6.57	6.79
รถบรรทุกขนาดเล็ก (LT)	4.81	4.87	5.09	5.42	5.86	6.40
รถบรรทุกขนาดกลาง (MT)	8.29	8.34	8.58	8.95	9.47	10.11
รถบรรทุกขนาดใหญ่ (HT)	17.27	17.51	18.06	18.87	19.89	21.11
รถพ่วง (TR)	20.75	21.19	22.06	23.23	24.70	26.45
รถโดยสารขนาดใหญ่ (LB)	7.09	6.91	6.90	7.02	7.26	7.60
รถโดยสารขนาดกลาง (MB)	9.29	9.09	9.13	9.33	9.66	10.13

ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้รถประเภท รถยนต์ส่วนบุคคล มาใช้ในการอ้างอิง สำหรับการหาผลประโยชน์ทางด้าน เศรษฐศาสตร์เนื่องจากมีการเก็บความเร็วจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลการเดินทาง (GPS Data Logger) โดยตารางที่นำมาใช้อ้างอิงนั้น ใช้มูลค่าและค่าใช้จ่ายต่อหน่วยโดยอ้างอิงจากปี พ.ศ. 2555 มาใช้ในการคำนวณซึ่งเป็นข้อมูลจากฝ่ายสถิติการขนส่ง กองวิชาการและวางแผน กรมการขนส่งทางบก พบว่าจำนวนรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่จดทะเบียนทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2554 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 308,804 คัน [7] และผลประโยชน์ในด้านการประหยัดเวลาในการเดินทางได้จากการประเมินผลต่างระหว่างมูลค่าของเวลาในการเดินทางก่อนและหลัง โดยค่าเวลาในการใช้รถได้จากการนำค่าเวลาในการใช้รถคูณด้วยเวลารวมของระบบผู้ใช้ถนนเดินทาง (Vehicle Hours Travelled; VHT) Value of Time Saving (VOT Saving) [7] ดังสมการที่ (2)

$$\text{VOT Saving} = (\text{VHT}_{\text{หลัง}} \times \text{VOT}_{\text{unit}}) - (\text{VHT}_{\text{ก่อน}} \times \text{VOT}_{\text{unit}}) \quad (2)$$

โดยที่

VOT Saving = ผลประโยชน์จากการประหยัดเวลาในการเดินทาง (บาท)

VHT= ระยะเวลาในการเดินทาง (pcu-ชม.) โดยก่อนและหลังดำเนินการ

ระยะเวลาการเดินทางลดลงจาก 15.7 นาที เหลือ 13.3 นาที ในช่องทางหลักและเหลือ 8.3 นาที ในช่องจราจรสวนทาง หากคิดตลอดแนวสายทาง ก่อนการเปิดใช้เวลาในการเดินทาง 93,696 นาที หลังการเปิดใช้เวลาในการเดินทาง 70,226 นาทีประหยัดเวลาการเดินทาง 23,470 นาที / ชั่วโมง (เมื่อเปิดใช้ 2.5 ชม. ทุกวัน ทำให้ประหยัดเวลา 58,675 นาที: วัน)

จากการใช้มูลค่าเวลาเฉลี่ยต่อคัน-ชั่วโมง ของรถยนต์ส่วนบุคคลมีมูลค่าเวลาเฉลี่ย 218.90 บาทต่อคัน-ชั่วโมง (บาท/vehicle-ชม.) ตามตารางที่ 8 จำแนกตามประเภทของรถ นำไปคำนวณมูลค่าเวลาเฉลี่ยต่อคันรถยนต์นั่งส่วนบุคคล-ชั่วโมง (บาท /pcu-ชม.) โดยใช้ค่าตัวแปร PCU Factor ซึ่งมีมูลค่าเวลา (VOT_{unit}) ต่อคัน ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล-ชั่วโมง จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 115.91 บาท/ pcu-ชม. ราคา ณ ปี พ.ศ. 2555 ตามตารางที่ 9 [7]

ตารางที่ 8 มูลค่าเวลาเฉลี่ยต่อคัน-ชั่วโมง (บาท/vehicle-ชม.)

รถ	ผู้โดยสาร (1)	สัดส่วนการเดินทางเพื่อธุรกิจ (2)	มูลค่าเวลา		มูลค่าเวลาเฉลี่ยต่อคัน (5)=(1)x((2)x(3)+(1-(2))x(4))
			เพื่อธุรกิจ (3)	อื่นๆ (4)=(3)x25%	
รถจักรยานยนต์	1.24	47.05%	190.02	47.50	141.96
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	1.74	54.75%	190.02	47.50	218.90
รถโดยสารขนาดเล็ก	6.80	84.78%	125.19	31.30	754.14
รถโดยสารขนาดกลาง	12.85	89.22%	125.19	31.30	1,478.37
รถโดยสารขนาดใหญ่	28.52	44.38%	125.19	31.30	2,081.07
รถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ	1.62	36.62%	190.02	47.50	161.33

ตารางที่ 9 มูลค่าเวลาเฉลี่ยต่อคันรถยนต์นั่งส่วนบุคคล-ชั่วโมง(บาท/pcu-ชม.) ปี พ.ศ. 2555

รถ	PCU Factor (1)	Vehicle Composition		Vehicle. Composition (%) PCU Equivalent (4)	Weighted VOT (Bt./pcu-hour) (5)=(4)x มูลค่าเวลาเฉลี่ยต่อคัน
		Vehicle (%) (2)	PCU (3)=(1)x(2)		
รถจักรยานยนต์	0.33	14.81	0.05	4.82%	6.84
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	1.00	53.71	0.54	52.95%	115.91
รถโดยสารขนาดเล็ก	1.50	0.65	0.01	0.95%	7.20
รถโดยสารขนาดกลาง	1.50	0.28	0.00	0.42%	6.19
รถโดยสารขนาดใหญ่	2.10	1.03	0.02	2.14%	44.58
รถบรรทุก 4 ล้อ	1.00	22.48	0.22	22.16%	35.76
รถบรรทุก 6 ล้อ	2.10	2.01	0.04	4.17%	-
รถบรรทุก 10 ล้อ	2.50	2.60	0.06	6.40%	-
รถบรรทุกพ่วงและกึ่งพ่วง	2.50	2.43	0.06	5.98%	-

เมื่อแทนตัวแปรลงในสมการที่ (1) และ (2) จะเกิดผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถ Benefit (VOC Saving) รวมเท่ากับ 9,975 บาท/ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร และเป็นมูลค่าประหยัดระยะเวลาเดินทาง (VOT Saving) เท่ากับ 8,720 บาท/ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร

4. บทสรุป

จากการประเมินผลก่อนและหลังดำเนินมาตรการตลอดแนวเส้นทาง แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงโยธินพัฒนาถึงลาดพร้าว ช่วงลาดพร้าวถึงประชาอุทิศ ช่วงประชาอุทิศถึงพระราม 9-2 และช่วงพระราม 9-2 ถึงพัฒนาการ ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การเปิดช่องทางพิเศษ (Reversible Lane) บนทางพิเศษฉลองรัช ทิศทางเข้าเมือง ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า สามารถช่วยระบายการจราจรและอำนวยความสะดวกในการเดินทางแก่ผู้ใช้ทางพิเศษฉลองรัชในช่วงเวลาดังกล่าวได้ ระหว่างเวลา 6.30 - 9.00 น. สรุปประเมินผลก่อนและหลังดำเนินการ 6.30 - 9.00 น. พบว่าระบายจราจรเฉลี่ยได้เพิ่มขึ้น 10.8% ระยะเวลาการเดินทางลดลงจาก 15.7 นาที เหลือ 13.3 นาที ในช่องทางหลักและเหลือ 8.3 นาที ในช่องจราจรสวนทาง การประเมินผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถ Benefit (VOC Saving) 9,975 บาท/ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร และเป็นมูลค่าประหยัดระยะเวลาเดินทาง (VOT Saving) เท่ากับ 8,720 บาท/

ชั่วโมง/กิโลเมตร/ช่องจราจร ทั้งนี้การดำเนินการใช้เวลา 2.5 ชั่วโมงต่อวัน โดยคิดวันทำการหนึ่งปีเท่ากับ 248 วัน (ไม่รวมวันหยุด) สามารถประเมินเป็นประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์เท่ากับ 11.4 ล้านบาทต่อกิโลเมตรต่อปี หรือ 36 ล้านบาทต่อปี โดยงานวิจัยนี้ใช้มูลค่าและค่าใช้จ่ายต่อหน่วยโดยอ้างอิงจากปี พ.ศ. 2555 มาใช้ในการคำนวณ และพบว่าการเปิดช่องทางพิเศษ (Reversible Lane) จะเกิดประโยชน์สูงสุดและใช้ต่อเมื่อการจราจรช่วงที่เปิดนั้นมีความติดขัดหรือหยุดชั่วขณะระดับการให้บริการอยู่ในช่วงหนาแน่นหรือติดขัด ความสามารถในการใช้ความเร็วลดลงเสมือนการจราจรหยุดนิ่งในช่วงเวลาที่ทำการเปิด โดยมีสัดส่วนของปริมาณจราจรเป็นอัตราส่วนมากกว่า 70:30 และจำเป็นต้องมีกระบวนการบริหารจัดการช่องจราจรตลอดแนวเส้นทางเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้ทาง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากพนักงานในสังกัดกองวิจัยและพัฒนา รวมทั้งเจ้าหน้าที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยทุกท่านที่ให้ข้อมูลและสนับสนุนในงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, American Association of State Highway and Transportation Officials., Washington, D.C., 2011.

[2] วิรภพ เมฆพฤกษาวงศ์, เกื้อกูล เอี่ยมชูแสง, เอกรินทร์ เหลืองวิลัย และ ศักดิ์ดา พรรณไวย (2560). การประเมินระบุตำแหน่งจุดติดขัดจากแผนที่รายงานสภาพการจราจร. *การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 9*, เลย, 25-28 กรกฎาคม 2560.

[3] อุดมโชค สุริยะจรัสแสง, เอกรินทร์ เหลืองวิลัย และ เทพฤทธิ์ รัตน-ปัญญากร (2562). การพัฒนา API เพื่อสร้างฐานข้อมูลสภาพจราจร, *การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11*, อุบลราชธานี, 2562, หน้า 586-589.

[4] ธวัชชัย รักษาชาติ, พรรณทิพา พันธ์ยิ้ม และ เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (2563) การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับสรุปจุดติดขัดบนโครงข่ายทางพิเศษ. *การประชุมวิชาการ ECTI CARD - 2020 ครั้งที่ 12*, นครสวรรค์, 26-27 พฤษภาคม 2563, หน้า 383-386.

[5] Transportation Research Board, Framework for application of the HCM, Highway Capacity Manual (HCM 2000) . Transportation Research Board National Research, 2000.

[6] National Cooperative Highway Research Program. *Convertible Roadways and Lanes: Synthesis 340,* Washington, D.C., 2004.

[7] รายงานการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของทางพิเศษที่เปิดให้บริการแล้ว งานจ้างที่ปรึกษาเพื่อดำเนินงานศึกษาความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม เศรษฐกิจ การเงิน และผลกระทบสิ่งแวดล้อม ของโครงการทางพิเศษสายพระราม 3 – ดาวคะนอง – วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครด้านตะวันตก, มกราคม 2556.