

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและผลกระทบจากการกำหนดขีดจำกัดความเร็วบนทางหลวงหลายช่องจราจรโดยใช้ แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

Effectiveness and Impact Analysis of Speed Limits Setting on Multilane Highways Using Microscopic Traffic Simulation Models

นายศุภศวัส สายงาม^{1,*} ผศ.ดร. นพดล กรประเสริฐ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

*Corresponding author; E-mail address: supasawat_s@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยได้กำหนดขีดจำกัดการใช้ความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงทางที่แตกต่างกัน โดยกำหนดอัตราความเร็วสูงสุดที่ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการกำหนดขีดจำกัดความเร็วของยานพาหนะในแต่ละช่องจราจรยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบด้านการจราจร พฤติกรรมการขับขี่ของยานพาหนะบนทางหลวง และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จากการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรที่แตกต่างกัน โดยอาศัยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม PTV Vissim

ผลการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการใช้ความเร็วมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 98.0 เป็น 101.2 กม./ชม. แต่มีการใช้ความเร็วของยานพาหนะรายคันที่ใกล้เคียงกันและเกาะกลุ่มกันมากขึ้น และผลการวิเคราะห์สัดส่วนยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนด พบว่าสัดส่วนยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนดโดยรวมลดลงร้อยละ 33.7 นอกจากนี้ยังพบว่าผลการกำหนดขีดจำกัดความเร็วเป็น 120 กม./ชม. มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโครงการประมาณ 50.22 ล้านบาท และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : B/C) มีค่า 1.36 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการกำหนดขีดจำกัดความเร็วเป็น 120 กม./ชม. ในพื้นที่ศึกษาที่มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนทั้งในด้านประสิทธิภาพของการจราจร ด้านพฤติกรรมผู้ขับขี่ และด้านเศรษฐศาสตร์

คำสำคัญ: การจำกัดความเร็ว, ประสิทธิภาพการจราจร, ผลกระทบด้านการจราจร, พฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่, ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Abstract

Currently, Thailand has set vary speed limits for vehicles on highways, with the maximum speed of 120 km/h. However, there is lack of the studies of setting speed limits impact for vehicles in each traffic lane

This study therefore focuses on studying and analyzing traffic impacts, driving behavior of vehicles on highways, and evaluating the economic value of setting speed limits for different traffic lanes by applying a micro-level traffic simulation model using the PTV Vissim program.

The study results found that speeding behavior tends to increase, with an average speed increasing from 98.0 to 101.2 km/h. However, the speed of each vehicle is closer and more clustered. The analysis of vehicles speed limit found that the proportion of vehicles that exceed the legal speed limit decreased by 33.7 percent. It was also found that setting the speed limit to 120 km/h had a net present value (NPV) of the project of approximately 50.22 million baht and a benefit-cost ratio (B/C) of 1.36, which can be concluded that setting the speed limit to 120 km/h in the study area is worthwhile investing in terms of traffic efficiency, driver behavior, and economics.

Keywords: Speed limit, Traffic efficiency, Traffic impact, Speeding behavior, Economic value

1. ความเป็นมา

ตามนโยบายประกาศเปิดใช้อัตราความเร็วของยานพาหนะจากความเร็วไม่เกิน 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วไม่เกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนถนนที่ได้มาตรฐานตามที่กฎกระทรวงกำหนด คือ ทางหลวงแผ่นดินหรือทางหลวงชนบทที่มีทางเดินรถ ซึ่งได้แบ่งช่องเดินรถในทิศทางเดียวกันไว้ตั้งแต่สองช่องเดินรถขึ้นไป มีเกาะกลางถนนแบบกำแพงและไม่มีจุดกลับรถเสมอระดับถนน [1]

โดยสายทางนำร่องที่ได้เปิดให้ผู้ขับขี่รถใช้ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นเส้นทางแรก คือ ทางหลวงหมายเลข 32 หรือถนนสายเอเชีย ช่วงหมวดทางหลวงบางปะอิน ถึงทางต่างระดับอ่างทอง บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 32 ช่วงอยุธยา – อ่างทอง ระหว่าง กม. 4+100 ถึง กม. 50+000 รวมระยะทาง 46 กิโลเมตร สำหรับรถยนต์ส่วนบุคคลไม่เกิน 7 ที่นั่ง ซึ่งถือเป็นระยะที่ 1 และต่อไปได้ประกาศเปิดใช้ในระยะที่ 2 ครอบคลุมเส้นทางในภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ เช่น ทางหลวงหมายเลข 32 ช่วง อ่างทอง - สิงห์บุรี ทางหลวงหมายเลข 1 ช่วงทางน้ำหนองแขม - นครสวรรค์ ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนบ่อทอง-มอระบก และทางหลวงหมายเลข 4 ช่วง เขาวัง-สระพระ เป็นต้น ระยะทางรวมประมาณ 260 กิโลเมตร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสภาพการจราจรและพฤติกรรมการขับขี่ ภายใต้การกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคซึ่งประกอบด้วย ความเร็ว การเปลี่ยนช่องจราจร ระยะห่างระหว่าง

ยานพาหนะ และความจุบนทางหลวงที่กำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อกำหนดการใช้ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การกำหนดใช้อัตราความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางหลวงหมายเลข 32 ได้บังคับใช้ตามกฎหมายที่กำหนดอัตราความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงแผ่นดินหรือทางหลวงชนบท

ตามราชกิจจานุเบกษาได้ประกาศ กฎกระทรวง พ.ศ. 2564 ซึ่งใช้หลักการจากพระราชบัญญัติทางหลวง พ.ศ. 2535 โดยรัฐมนตรีว่าการกระทรวงคมนาคมออกกฎกระทรวงระบุถึงอัตราความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงชนบท โดยข้อกำหนดที่สำคัญในกฎกระทรวงนี้ ได้แก่ คำจำกัดความของ “เกาะกลางถนนแบบกำแพง” ซึ่งหมายถึงกำแพงที่ใช้แบ่งช่องการเดินรถในทิศทางตรงข้ามกัน ที่มีลักษณะทางกายภาพที่ชัดเจนและมั่นคง รวมถึงคำว่า “เครื่องหมายจราจร” ซึ่งหมายถึงสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้เพื่อกำหนดกฎการใช้ทางหลวง และคำว่า “ช่องเดินรถ” ที่หมายถึงการแบ่งช่องทางเดินรถให้ชัดเจน



รูปที่ 1 อัตราความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงแผ่นดิน
ที่มา: สำนักงานอำนวยความปลอดภัยกรมทางหลวง (2563)



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของทางหลวงที่กำหนดความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

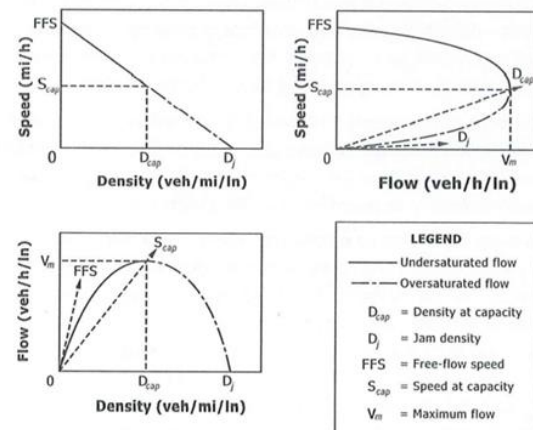
ที่มา: กรมทางหลวง (2563)

อย่างไรก็ตาม การกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรที่แตกต่างกันและปรับเปลี่ยนขีดจำกัดความเร็วเป็น 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบนทางหลวง ยังคงเป็นที่ถกเถียงถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการจราจรและความปลอดภัยของผู้ใช้รถใช้ถนน

2.2 ตัวแปรประเมินประสิทธิภาพด้านการจราจร

2.2.1 การไหลของกระแสจราจร (Traffic flow theory)

ความเร็ว (Speed) ความหนาแน่น (Density) และ ปริมาณการจราจร (Flow) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการศึกษาและวิเคราะห์ด้านการจราจรและขนส่ง เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันตามหลักของทฤษฎีการไหลของกระแสจราจร ได้ดังรูปที่ 3.



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความเร็ว และความหนาแน่น
ที่มา: Highway Capacity Manual (2016)

2.2.2 ความเร็ว (Speed)

ความเร็ว หมายถึง อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งมีวัดในหน่วยของระยะทางต่อเวลา เช่น กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) หรือ เมตรต่อวินาที (m/s) การวัดความเร็วจึงช่วยให้เราเข้าใจได้ว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือยานพาหนะเกิดขึ้น และสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพและความปลอดภัยในงานวิจัยหรือการวางแผนระบบขนส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.3 ช่วงห่าง (Headway)

ระยะห่างของช่วงเวลาระหว่างยานพาหนะทั้งสองคันที่ตามกันมาและผ่านตำแหน่งเดียวกัน โดยสังเกตจากเวลาที่ตำแหน่งอ้างอิงบนยานพาหนะคันที่หนึ่งและคันที่สอง

2.2.4 พฤติกรรมการขับขี่

ถนนทางหลวงหลายช่องจราจร มีรูปแบบการชนที่สำคัญ เช่น การชนท้าย (Rear-end) การชนด้านข้าง (Sideswipe) การชนมุมฉาก (Angle) การเสียหลักหลุดออกข้างทาง (Run-off) เป็นต้น การวิเคราะห์ผลกระทบด้านความปลอดภัยบนถนนทางหลวงหลายช่องจราจรแบบดั้งเดิมอาศัยข้อมูลสถิติอุบัติเหตุเป็นหลัก [3]

แต่ปัจจุบัน การวิเคราะห์พฤติกรรมเสี่ยงในการขับขี่ (Driving behavior) สามารถใช้เป็นดัชนีตัวแทนในการประเมินความปลอดภัยของผู้ใช้รถใช้ถนน งานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า พฤติกรรมการใช้ความเร็วสูง (Speeding behavior) เป็นสาเหตุหลักในการเกิดอุบัติเหตุการชนท้าย และการเสียหลักหลุดออกข้างทาง พฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจร (Lane change behavior) ที่ไม่เหมาะสม ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุการชนท้าย การชนด้านข้าง และการชนมุมฉาก [11]

2.3 แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค หมายถึง การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะรายคันแต่ละประเภทบนโครงข่ายถนน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะและประสิทธิภาพด้านการจราจรและความปลอดภัย โดยกำหนดตามพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ในยานพาหนะแต่ละประเภท โดยการตั้งค่ารูปแบบโครงข่ายถนนและใส่ข้อมูลของยานพาหนะที่เก็บได้จากข้อมูลภาคสนาม และกำหนดแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ผ่านโครงข่ายถนน เมื่อทำสิ่งที่กล่าวมาข้างต้นเสร็จแล้ว จึงทำการสรุปวิเคราะห์ผล เพื่อวัดประสิทธิภาพตามที่วางแผนไว้ เช่น ระดับการให้บริการ (Level of service) ความล่าช้าในการเดินทาง (Delay) เวลาการเดินทาง (Travel time) อีกทั้งแบบจำลองยังสามารถดูการเคลื่อนที่ตามกันของยานพาหนะ (Car-Following Model) การเปลี่ยนช่องจราจร (Lane-Changing Model) [15]

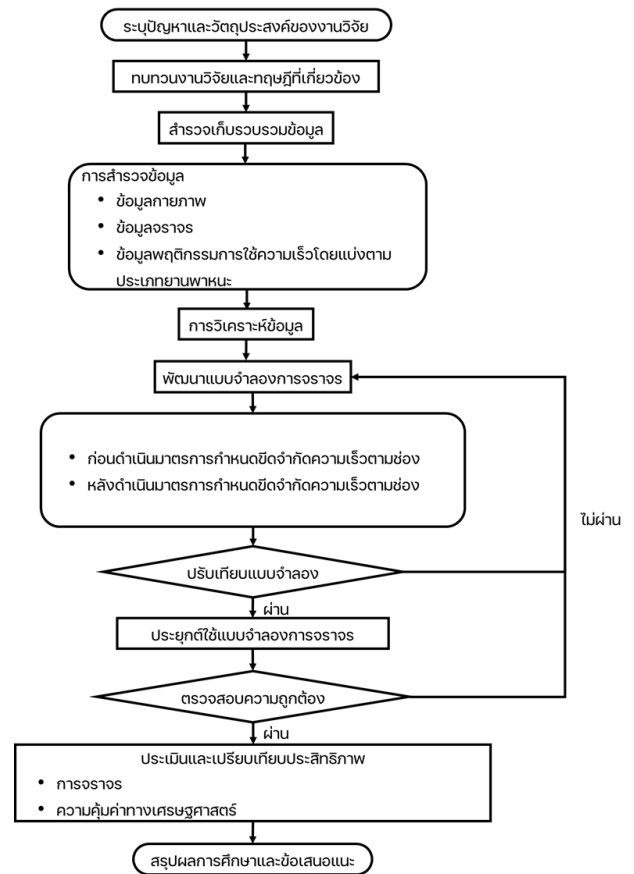
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศกับการจราจรในซอฟต์แวร์จำลองต่างๆ พบว่า แต่ละโปรแกรมมีความสามารถในการจำลองที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น การพิจารณาคุณสมบัติของซอฟต์แวร์ที่เหมาะสมต่อการนำมาศึกษา จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้โปรแกรมที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการจำลองสถานการณ์จราจร เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและความสามารถของฟังก์ชันการทำงานในแต่ละโปรแกรม [10] สรุปเปรียบเทียบการเลือกใช้งานในการวิเคราะห์ของโปรแกรมแบบจำลองต่าง ๆ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศเกี่ยวกับการเปรียบเทียบคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานของโปรแกรมที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [4,9,10] พบว่า

การเลือกใช้แบบจำลองจำเป็นต้องพิจารณาเป้าหมายของการศึกษา โดยเฉพาะประสิทธิภาพในการใช้ความเร็วของยานพาหนะประเภทต่างๆ และพฤติกรรมของผู้ขับขี่ เมื่อนำซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองจราจรระดับจุลภาคมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในงานวิศวกรรมขนส่งและสาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สภาพการจราจรพบว่า โปรแกรม PTV Vissim มีความสามารถที่ครอบคลุมและมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการนำไปใช้งาน โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ศักยภาพของซอฟต์แวร์และฟังก์ชันการทำงานในรูปแบบต่างๆ ถูกนำเสนอเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกใช้งาน [9]

3. ระเบียบวิธีวิจัย

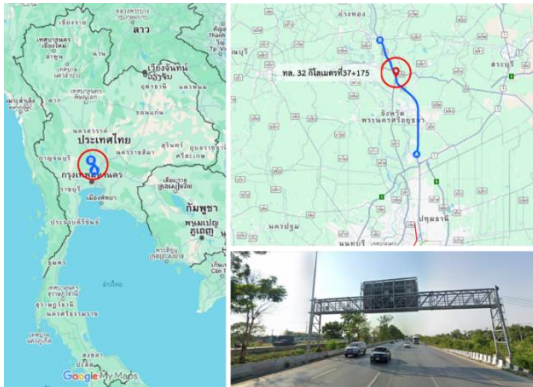
งานวิจัยนี้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 4 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การสำรวจรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาบนถนนทางหลวงหมายเลข 32 ช่วงอยุธยา-อ่างทอง ระหว่างกิโลเมตรที่ 4+100 ถึงกิโลเมตรที่ 50+000 เป็นพื้นที่ศึกษา โดยช่วงถนนดังกล่าวมี 4 ช่องจราจร ขนาดช่องละ 3.5 เมตร ไหล่ทางกว้าง 2.5 เมตร มีเกาะกลางแบบกำแพงคอนกรีต ไม่มีจุดกลับรถ และมีปริมาณจราจรเฉลี่ยวันละ 2,500 คัน โดยมีสัดส่วนรถบรรทุกประมาณร้อยละ 10 และมีการจัดหมวดหมู่ยานพาหนะแยกตามกลุ่มประเภทดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 5 จุดสำรวจทางหลวงหมายเลข 32 กิโลเมตรที่ 37+175

ตารางที่ 1 การจัดหมวดหมู่ยานพาหนะที่แยกในแต่ละประเภทยานพาหนะ

ยานพาหนะ	ประเภทรถ
รถจักรยานยนต์	รถจักรยาน, รถจักรยานยนต์ 2 ล้อ และ 3 ล้อ
รถยนต์ส่วนบุคคล	รถยนต์นั่งไม่เกิน 7 คน, รถยนต์นั่งเกิน 7 คน, รถบรรทุกเล็ก 4 ล้อ
รถบรรทุก	รถโดยสารขนาดเล็ก, รถโดยสารขนาดกลาง, รถบรรทุกกลาง 4 ล้อ, รถบรรทุกกลาง 6 ล้อ, รถโดยสารขนาดใหญ่, รถบรรทุก 10 ล้อ, รถบรรทุกพ่วง, รถบรรทุกกึ่งพ่วง

ตารางที่ 2 ข้อมูลความเร็วจำแนกตามประเภทยานพาหนะ

ช่องจราจร	ความเร็ว (กม./ชม.)					
	ก่อนดำเนินการ			หลังดำเนินการ		
	$\bar{x}$	S.D	P85	$\bar{x}$	S.D	P85
รถจักรยานยนต์						
1	104.8	11.5	117	110.2	10.5	120
2	95.2	12.0	108	98.1	11.8	110
3	85.9	11.9	98	86.9	11.8	99
4	72.9	13.1	88	69.8	13.7	84
รถยนต์ส่วนบุคคล						
1	106.0	10.9	117	110.2	10.3	120
2	91.8	10.5	102	94.3	10.6	105
3	84.6	11.1	96	85.4	11.3	97
4	66.7	13.4	83	63.4	12.0	76
รถบรรทุก						
1	97.9	12.1	111	10.4	110.2	120
2	81.2	8.3	90	11.0	94.3	106

3	72.4	8.2	81	11.8	84.2	97
4	59.8	8.0	68	11.1	62.7	73

หมายเหตุ P85 คือ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์

3.2 การพัฒนาแบบจำลองจราจร

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค โดยใช้โปรแกรม PTV Vissim สำหรับการจำลองสภาพการจราจร และพฤติกรรมการขับขี่ โดยการพัฒนาแบบจำลองขึ้นพื้นฐาน โดยแบ่งเป็น 2 สถานการณ์ ดังต่อไปนี้

สถานการณ์ที่ 1 ก่อนดำเนินการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามมาตรการ มีการกำหนดขีดจำกัดความเร็ว 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทุกช่องจราจร

สถานการณ์ที่ 2 หลังดำเนินการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามมาตรการ มีการกำหนดความเร็วตามช่องจราจร ดังนี้

- ช่องจราจรที่ 4 กำหนดขีดจำกัดความเร็วที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ช่องจราจรที่ 3 กำหนดขีดจำกัดความเร็วที่ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ช่องจราจรที่ 2 กำหนดขีดจำกัดความเร็วที่ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ช่องจราจรที่ 1 กำหนดขีดจำกัดความเร็วที่ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

และความเร็วไม่ต่ำกว่า 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 6



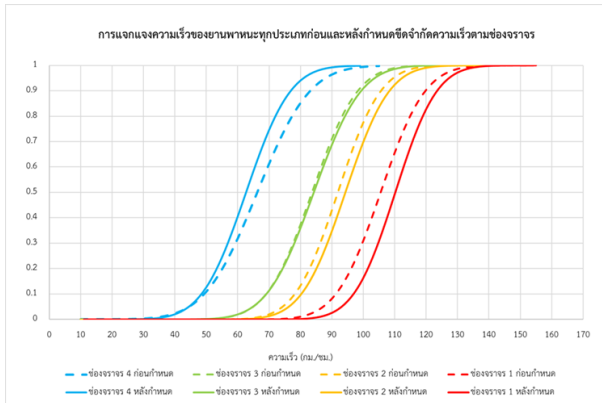
รูปที่ 6 การพัฒนาแบบจำลองการจราจรด้วยโปรแกรม PTV Vissim

4. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบผลกระทบของการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรที่แตกต่างกัน โดยจะเปรียบเทียบก่อนดำเนินการมาตรการและหลังดำเนินการ ผลการศึกษาออกเป็น 6 ส่วน

4.1 ผลวิเคราะห์การใช้ความเร็ว

ผลการวิเคราะห์ความเร็วภายหลังการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรและเพิ่มขีดจำกัดความเร็วเป็น 120 กม./ชม. พบว่า พฤติกรรมการใช้ความเร็วของผู้ขับขี่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วเฉลี่ยรวมเพิ่มจาก 98.0 เป็น 101.2 กม./ชม. และความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 เพิ่มจาก 83.7 เป็น 89.2 กม./ชม. ขณะเดียวกัน ความเร็วของรถแต่ละคันมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 12.2 เป็น 11.8 กม./ชม เมื่อแยกตามช่องจราจร ความเร็วเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 เพิ่มขึ้นในทุกช่องจราจรอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะช่องจราจรที่ 1 ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด ส่วนช่องจราจรที่ 4 มีการเพิ่มขึ้นของความเร็วมากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าก่อนการปรับเปลี่ยน.



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ความเร็ว

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ t (t Test) ของความเร็วยานพาหนะแต่ละประเภท

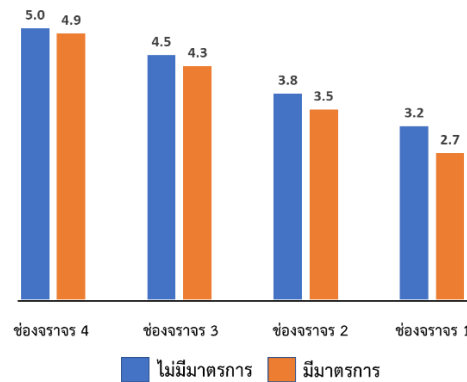
ประเภทยานพาหนะ		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่า t	t critical	P-value
		ก่อนดำเนินการ	หลังดำเนินการ			
รถจักรยานยนต์	ช่องจราจรที่ 4	13.1	13.7	28.469*	1.960	.000
	ช่องจราจรที่ 3	11.9	11.8	-6.910*	1.960	.000
	ช่องจราจรที่ 2	12.0	11.8	-17.685*	1.960	.000
	ช่องจราจรที่ 1	11.5	10.5	-52.377*	1.959	.000
รถยนต์ส่วนบุคคล	ช่องจราจรที่ 4	13.4	12.0	49.053*	1.960	.000
	ช่องจราจรที่ 3	11.1	11.3	-9.384*	1.959	.000
	ช่องจราจรที่ 2	10.5	10.6	-65.594*	1.959	.000
	ช่องจราจรที่ 1	10.9	10.3	-52.502*	1.959	.000
รถบรรทุก	ช่องจราจรที่ 4	8.0	8.2	3.811*	1.960	.000
	ช่องจราจรที่ 3	8.2	8.1	12.102*	1.960	.000
	ช่องจราจรที่ 2	8.3	8.9	2.480*	1.960	.013
	ช่องจราจรที่ 1	12.1	13.6	-1.676*	1.963	.094

ผลการวิเคราะห์การทดสอบ t (t-test) โดยใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ทดสอบความเร็วบนพื้นที่ศึกษา พบว่า หลังการกำหนดมาตรการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรความเร็วของยานพาหนะแต่ละประเภทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากค่าการทดสอบ t ที่ได้จากการเปรียบเทียบความเร็วนี้มีค่าสูงกว่าค่า tวิกฤต (tc) เว้นแต่รถบรรทุกในช่องจราจรที่ 1 (ช่องจราจรขวาสุด) ที่ค่าการทดสอบ t นั้นมีค่าต่ำกว่าค่า t วิกฤต (tc) จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ ดังตารางที่ 3

4.2 ผลวิเคราะห์ระยะเวลาห่างระหว่างยานพาหนะ

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระยะเวลาระหว่างยานพาหนะ 2 คัน ที่เคลื่อนที่ตามกันมาในช่องจราจรเดียวกัน (Time Headway) ระหว่างมีและไม่มีมาตรการการ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาระหว่างยานพาหนะในแต่ละช่องจราจรบนพื้นที่ศึกษา พบว่า โดยที่ภายหลังการใช้มาตรการดังกล่าวทำให้ระยะเวลาระหว่างยานพาหนะในแต่ละช่องจราจรลดลงในอัตราที่แตกต่างกัน โดยที่ช่องจราจรที่ 4 จาก 5 วินาที เป็น 4.9 วินาที โดยลดลงร้อยละ 2 ช่องจราจรที่ 3 จาก 4.5 วินาที เป็น 4.3 วินาที ลดลงร้อยละ 4.4 ช่องจราจรที่ 2 จาก 3.8 วินาที

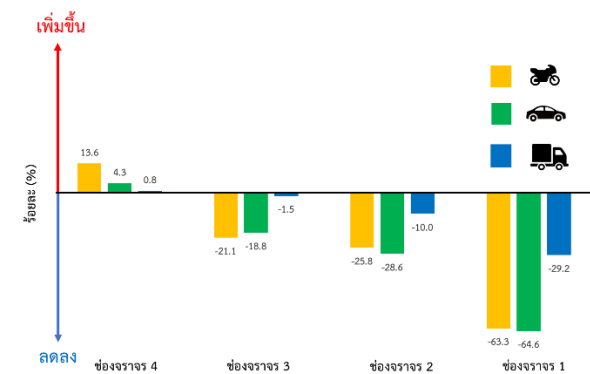
เป็น 3.5 วินาที ลดลงร้อยละ 7.9 และช่องจราจรที่ 1 (ขวาสุด) จาก 3.2 วินาที เป็น 2.7 วินาที ลดลง ร้อยละ 15.6 ทั้งนี้ระยะเวลาห่างของยานพาหนะในช่องจราจรซ้ายสุดจะมีค่าสูงที่สุด จากนั้นจะลดลงตามลำดับไปยังช่องจราจรขวาสุดที่มีระยะเวลาห่างระหว่างยานพาหนะต่ำที่สุด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาห่างของยานพาหนะระหว่างก่อนและหลังมีมาตรการ

4.3 ผลวิเคราะห์สัดส่วนยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนด

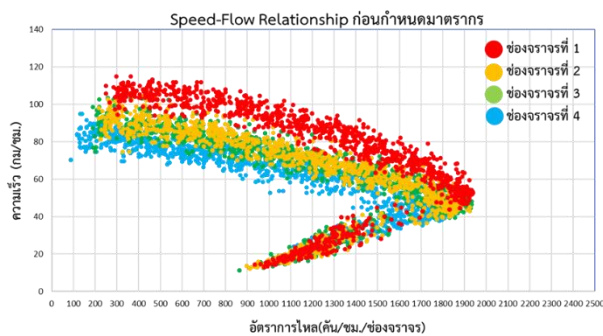
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนด พบว่า สัดส่วนยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนดโดยรวมลดลง ร้อยละ 33.7 โดยสัดส่วนการฝ่าฝืนในแต่ละช่องจราจรนั้นสามารถแสดงดังนี้ ในช่องจราจรที่ 1 (ช่องจราจรขวาสุด จากความเร็วกำหนดไม่เกิน 90 เป็น 120 กม./ชม.) และช่องจราจรที่ 2 (จากความเร็วกำหนดไม่เกิน 90 เป็น 100 กม./ชม.) โดยลดลงร้อยละ 64.2 และ 28.6 ซึ่งมีอัตราการใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนดลดลงอย่างมากในช่องจราจรที่มีการใช้ความเร็วสูง หรือช่องจราจรขวาสุด ในส่วนของช่องจราจรซ้ายสุด (จากความเร็วกำหนดไม่เกิน 90 เป็น 80 กม./ชม.) มีสัดส่วนการใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 3.9 เนื่องมาจากการที่ในช่องจราจร 2 ช่องตรงกลางและช่องจราจรขวาสุดมีการปรับขีดจำกัดความเร็วเพิ่มขึ้นซึ่งมีความเหมาะสมกับความเร็วที่ผู้ใช้เส้นทางใช้จริงทำให้สัดส่วนการฝ่าฝืนการใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายลดลง ดังรูปที่ 8



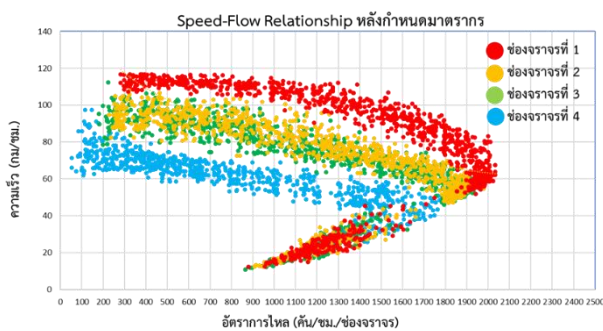
รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนด

4.4 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความจุของและการให้บริการ

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความจุของและการให้บริการ โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความเร็วของยานพาหนะแต่ละช่องจราจรก่อนและหลังดำเนินการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรพบว่า ภายหลังจากดำเนินการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร กระแสจราจรสามารถเคลื่อนตัวได้มากขึ้น เนื่องจากขีดจำกัดความเร็วที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในช่องจราจรที่ 1 หรือช่องจราจรขวาสุด ที่มีการปรับความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นความเร็วสูงสุด 120 กม/ชม. และไม่ต่ำกว่า 100 กม/ชม. โดยมีค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 1900 เป็น 2000 คัน/ชม./ช่องจราจร หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 และในส่วนช่องจราจรที่ 2 และช่องจราจรที่ 3 มีค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 1900 เป็น 2000 คัน/ชม./ช่องจราจร หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 ของอัตราการไหลสูงสุดก่อนดำเนินการ และในส่วนช่องจราจรที่ 4 หรือช่องจราจรซ้ายสุด อัตราการไหลของยานพาหนะยังคงใกล้เคียงกับช่วงเวลาก่อนดำเนินการโดยอยู่ที่ 1800 คัน/ชม./ช่องจราจร ดังรูปที่ 9 และ รูปที่ 10



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และความเร็วจากแบบจำลองจราจรก่อนดำเนินการ

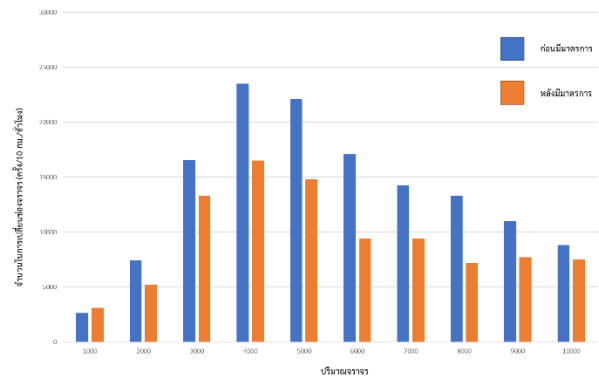


รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และความเร็ว จากแบบจำลองจราจรหลังดำเนินการ

4.5 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการเปลี่ยนช่องจราจร

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนช่องจราจรโดยใช้แบบจำลองการจราจรเพื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการดำเนินการ ภายใต้อัตราความหนาแน่นของจราจรในช่วง 1,000–10,000 คันต่อชั่วโมง พบว่าช่วงความหนาแน่นจราจรที่ 1,000 คัน/ชม. จำนวนของการเปลี่ยนช่องจราจรไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากความหนาแน่นของปริมาณจราจรยังค่อนข้างน้อย โดยก่อนดำเนินการอยู่ที่ 265 ครั้ง และหลังดำเนินการอยู่ที่ 310 ครั้ง สำหรับช่วง

ความหนาแน่นจราจรที่ 2,000 คัน/ชม. จำนวนของการเปลี่ยนช่องจราจรเริ่มมีความต่างมากขึ้น โดยก่อนดำเนินการอยู่ที่ 741 ครั้ง และหลังดำเนินการอยู่ที่ 524 ครั้ง สำหรับช่วงความหนาแน่นจราจรช่วง 3,000 – 8,000 คัน/ชม. พบว่า ก่อนดำเนินการจะมีการเปลี่ยนช่องจราจรที่มากกว่าหลังดำเนินการมีแนวโน้มคล้ายกับช่วง 2,000 คันต่อชั่วโมง กล่าวคือ ก่อนดำเนินการจะมีการเปลี่ยนช่องจราจรมากกว่าหลังดำเนินการ โดยช่วงที่มีจำนวนการเปลี่ยนช่องจราจรต่างกันมากที่สุดคือความหนาแน่นจราจรช่วง 6000 คัน/ชม. โดยหลังดำเนินการลดลงถึงร้อยละ 45 อย่างไรก็ตาม ในช่วงความหนาแน่นจราจร 9,000–10,000 คันต่อชั่วโมง จำนวนครั้งของการเปลี่ยนช่องจราจรมีความแตกต่างกันน้อยลง เนื่องจากปริมาณยานพาหนะถึงขีดจำกัดความสามารถในการรองรับของถนน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนยานพาหนะต่อการเปลี่ยนช่องจราจร

4.6 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินการปรับความเร็วจำกัดไม่เกิน 120 กม/ชม. บนทางหลวงหมายเลข 32 กิโลเมตรที่ 4+100 ถึงกิโลเมตรที่ 50+000 ในช่วงก่อนและหลังการบังคับใช้จากผลประโยชน์ของโครงการต่อค่าใช้จ่ายของโครงการ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวแปรในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปร	รายละเอียด
ผลประโยชน์ของโครงการ	- มูลค่าการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้ยานพาหนะของผู้ใช้ถนนเดิม (VOC) - ผลประโยชน์จากการประหยัดเวลาในการเดินทาง (VOT) - ผลประโยชน์จากการประหยัดมูลค่าความสูญเสียจากอุบัติเหตุบนถนน (ACC)
ค่าใช้จ่ายของโครงการ	- ต้นทุนในการดำเนินการ - ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงความปลอดภัย - ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงกายภาพ

ที่มา : โครงการศึกษาจัดทำมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายผู้ใช้ทาง (กรมทางหลวง, 2561)

ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการปรับความเร็วจำกัดไม่เกิน 120 กม/ชม. พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโครงการมีค่าประมาณ 50.22 ล้านบาท และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : B/C) มีค่า 1.36 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเหมาะสมแก่การลงทุน (หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายโครงการพิจารณาเฉพาะต้นทุนในการดำเนินการ)

5. อภิปรายผลและสรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของก่อนและหลังการกำหนดขีดจำกัดความเร็วแยกตามช่องจราจร โดยปรับเพิ่มขีดจำกัดความเร็วเป็น 120 กม./ชม. จากการเก็บข้อมูลทางกายภาพของถนน ปริมาณความหนาแน่นของจราจร และ พฤติกรรมการใช้ความเร็ว พบว่า กรณีหลังกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร มีแนวโน้มการใช้ความเร็วที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ โดยพิจารณาจากก่อนและหลังมีมาตรการในช่องจราจรที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยพฤติกรรมการใช้ความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยร้อยละ 4.4, 2.6 และ 0.7 ตามลำดับ เว้นแต่ช่องจราจรที่ 4 ที่มีความเร็วเฉลี่ยลดลง ร้อยละ 5.3

ระยะเวลาห่างระหว่างยานพาหนะ (Headway) โดยพิจารณาจากก่อนและหลังมีมาตรการ พบว่า ค่าเฉลี่ยระยะเวลาระหว่างยานพาหนะลดลงทุกช่องจราจร โดยที่ช่องจราจรที่ 1 ลดลงร้อยละ 2 ช่องจราจรที่ 2 ลดลงร้อยละ 4.4 ช่องจราจรที่ 3 ลดลงร้อยละ 7.9 และช่องจราจรที่ 4 ลดลงร้อยละ 15.6 เนื่องจากการปรับความเร็วให้มีอัตราสูงขึ้นในทุกช่องจราจร

สัดส่วนของยานพาหนะที่ใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนดเปรียบเทียบระหว่างช่วงเวลาก่อนและหลังการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร พบว่า ก่อนมีการปรับปรุงมาตรการดังกล่าว อัตราการฝ่าฝืนความเร็วอยู่ในระดับสูง โดยเฉพาะในช่องจราจรที่ 1 (ขวาสุด) ซึ่งมีอัตราการฝ่าฝืนของยานพาหนะทุกประเภทอยู่ที่ร้อยละ 89.1 ขณะที่ช่องจราจรที่ 4 (ซ้ายสุด) มีอัตราการฝ่าฝืนอยู่ที่ร้อยละ 4.5 ภายหลังการดำเนินการมาตรการกำหนดขีดจำกัดความเร็วที่ 120 กม./ชม. พบว่าอัตราการฝ่าฝืนลดลง โดยช่องจราจรที่ 1 มีอัตราการฝ่าฝืนลดลงร้อยละ 64.2 ช่องจราจรที่ 2 ลดลงร้อยละ 28.6 และช่องจราจรที่ 3 ลดลงร้อยละ 18.6 เนื่องจากการกำหนดขีดจำกัดความเร็วที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้ทางในสภาพแวดล้อมจริง เว้นที่ช่องจราจรที่ 4 พบว่าอัตราการฝ่าฝืนเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.9 เนื่องจากระบบรถที่ ซึ่งถูกกำหนดให้ใช้ความเร็วไม่เกิน 90 กม./ชม. ตามกฎหมาย ยังคงใช้ความเร็วในระดับเดิมเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีการฝ่าฝืนเพิ่มขึ้นในช่องจราจรดังกล่าว

จากการประเมินประสิทธิภาพของการกำหนดขีดจำกัดความเร็วแยกตามช่องจราจรและปรับเพิ่มขีดจำกัดความเร็วเป็น 120 กม./ชม. โดยใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค PTV Vissim ซึ่งพัฒนาแบบจำลองเป็น 2 สถานการณ์ ได้แก่ ก่อนดำเนินการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร (90 กม./ชม. เท่ากันทุกช่องจราจร) และหลังดำเนินการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร จำนวน 4 ช่องจราจรได้แก่ 120 (ขวาสุด) 100, 100 และ 80 กม./ชม. (ซ้ายสุด) ตามลำดับ พบว่า กรณีหลังกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร มีแนวโน้มพฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจรลดลง โดยพิจารณาจากจำนวนครั้งและอัตราการเปลี่ยนช่องจราจรของยานพาหนะทุกช่วงความหนาแน่นของจราจร โดยหลังดำเนินการตามมาตรการ ลดลงร้อยละ 30.4 และเมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนช่องจราจรรายคัน พบว่า หลังดำเนินการมาตรการ ยานพาหนะที่ทำการเปลี่ยนช่องจราจรจำนวน 1 และ 2 ครั้งนั้นมีสูงกว่า ก่อนดำเนินการมาตรการ ซึ่งส่งผลให้ผู้ขับขี่ยานพาหนะขับอยู่ในช่องจราจรเดิมมากขึ้น

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความจุและการให้บริการ พบว่ากรณีหลังกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจร กระแสจราจรมีความคล่องตัวมากขึ้น เนื่องจากขีดจำกัดความเร็วสูงขึ้น ค่าอัตราการไหลสูงสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 โดยเฉพาะในช่องจราจรที่ 1 หรือช่องจราจรขวาสุด ที่มีการปรับความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นความเร็วสูงสุด 120 กม./ชม. และไม่ต่ำกว่า 100 กม./ชม. โดยมีค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 และในส่วนช่องจราจรที่ 2 และช่องจราจรที่ 3 มีค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 ของอัตรา

การไหลสูงสุดก่อนดำเนินการ และในส่วนช่องจราจรที่ 4 หรือช่องจราจรซ้ายสุด อัตราการไหลของยานพาหนะยังคงใกล้เคียงกับช่วงเวลาก่อนดำเนินการ

ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการปรับความเร็วจำกัดไม่เกิน 120 กม./ชม. พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโครงการมีค่าประมาณ 50.22 ล้านบาท และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : B/C) มีค่า 1.36 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเหมาะสมแก่การลงทุน (หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายโครงการพิจารณาเฉพาะต้นทุนในการดำเนินการ)

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรการกำหนดขีดจำกัดความเร็วตามช่องจราจรที่แตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้ความเร็ว ระหว่างก่อนและหลังการนำมาตรการมาใช้ อย่างไรก็ตาม เพื่อนำผลการศึกษานี้ไปใช้ประโยชน์ในการกำหนดนโยบายหรือปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัยบนทางหลวงได้อย่างครอบคลุมจำเป็นต้องพิจารณาประเด็นอื่นๆ ได้แก่

1. พฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจร โดยพฤติกรรมการเปลี่ยนช่องของผู้ขับขี่ยังคงเป็นลักษณะการตัดสินใจเฉพาะรายบุคคล ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น การหลีกเลี่ยงช่องทางที่ชะลอตัว, การเลือกช่องทางว่าง หรือการเปลี่ยนช่องตามข้อบังคับของเส้นทาง ทั้งนี้ ควรมีการจัดทำแบบสอบถามเกี่ยวกับพฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจร เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกสำหรับนำไปพัฒนาแบบจำลองให้สะท้อนพฤติกรรมจริงของผู้ใช้ถนนได้แม่นยำยิ่งขึ้น

2. รูปแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา งานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ถนนมีลักษณะคงที่ และผู้ขับขี่ปฏิบัติตามข้อกำหนดอย่างเคร่งครัด ดังนั้นจึงควรพัฒนาแบบจำลองที่คำนึงถึงพฤติกรรมจริงของผู้ใช้ถนน และสภาพทางกายภาพที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น ทางเชื่อม หรือจุดกลับรถ

3. ผลกระทบด้านความปลอดภัยและอุบัติเหตุ การเปลี่ยนแปลงขีดจำกัดความเร็วอาจส่งผลต่อความถี่และความรุนแรงของอุบัติเหตุ โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเปลี่ยนช่องหรือเมื่อความเร็วระหว่างช่องมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยด้านโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวและเทคโนโลยีการขนส่ง (Green Infrastructure and Transportation Technology, GITT) ที่ให้การสนับสนุนด้านการดำเนินการวิจัยและให้คำปรึกษาด้านวิชาการ จนงานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฎกระทรวง. เรื่อง กำหนดอัตราความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงแผ่นดินหรือทางหลวงชนบทที่กำหนด. (2564, 10 มีนาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 138
- [2] กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2522) ออกตามความในพระราชบัญญัติจราจรทางบก พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยกฎกระทรวง ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2524). (2524). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งชาติ.
- [3] กระทรวงคมนาคม (2566). ปริมาณการจราจรบนทางหลวง ปี 2566

- [4] ชัยวัฒน์ ใหญ่บัก และ ประเมศวร์ เหลือเทพ (2558). การวิเคราะห์การจัดการจราจรของชุดทางแยกต่อเนื่อง กรณีศึกษาเทศบาลนครหาดใหญ่. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 8.
- [5] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.). (2559). โครงการจัดทำแผนพัฒนามาตรฐานด้านการจัดการจราจรในเมืองภูมิภาค เรื่องการจัดระบบจราจร. กระทรวงคมนาคม
- [6] สีนินาฏ โอจารย์ทิพย์ (2558). การศึกษาพฤติกรรมการใช้ความเร็วของผู้ใช้รถยนต์และรถบรรทุกเพื่อเสนอแนะการปรับความเร็วจำกัดให้มีความเหมาะสมบนถนนทางหลวงในสภาวะการไหลของจราจรแบบอิสระ. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20. วันที่ 15 มีนาคม 2562. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [7] เอกราช จันทน์ วิชัย, วินัย รัก สุนทร, & อาจารย์ ที่ปรึกษา. (2560). การ ประเมิน ประสิทธิภาพ ของ ป้าย บอก ความเร็ว บน ทางหลวง หมายเลข 32 (No. 137185). มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์.
- [8] Chandra, S., & Shukla, S. (2012). Overtaking behavior on divided highways under mixed traffic conditions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 43, 313-322.
- [9] Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). Traffic analysis toolbox, volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software (No. FHWA-HRT-04-040). United States. Federal Highway Administration. Office of Operations.
- [10] Florida Department of Transportation (FDOT). (2014). A Reference for Planning and Operation. Traffic Analysis Handbook. Systems Planning Office. Tallahassee. Florida. March 2014
- [11] Liu, M., & Shi, J. (2018). Exploring the Impact of Differentiated Per-Lane Speed Limits on Traffic Safety of Freeways with Considering the Compliance Rate. *Journal of Advanced Transportation*, 2018(1), 8368294.
- [12] Shi, J., & Liu, M. (2019). Impacts of differentiated per-lane speed limit on lane changing behaviour: A driving simulator-based study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 60, 93-104.
- [13] Soni, R., Vasudevan, V., & Dutta, B. (2020). Analysis of overtaking patterns of Indian drivers with data collected using a LiDAR. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 74, 139-150.
- [14] Soriguera, F., Martínez, I., Sala, M., & Menéndez, M. (2017). Effects of low speed limits on freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 257-274
- [15] Srikanth, S., Mehar, A., & Praveen, K. G. N. V. (2020). Simulation of traffic flow to analyze lane changes on multi-lane highways under non-lane discipline. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 48(2), 109-116.