

การประเมินประสิทธิภาพมาตรการจัดสัญญาณไฟควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษ

ด้วยแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

Performance Evaluation of Ramp Metering on Expressway

using Microscopic Traffic Simulation Model

ธนวัฒน์ โสภานันท์^{1,*} ทักษิณา กรไกร² และ ศิวัช ปัญญาชัยวัฒนากุล³

^{1,2,3} กองวิจัยและนวัตกรรม ฝ่ายดิจิทัล 1 การทางพิเศษแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: thanawat.exat97@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบขนส่งอัจฉริยะได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการจราจรและยกระดับความปลอดภัยบนทางพิเศษ การควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษด้วยสัญญาณไฟจราจร คือมาตรการหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาเพื่อลดปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางขึ้นทางพิเศษ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในการเดินทาง มาตรการนี้ช่วยควบคุมการปล่อยยานพาหนะจากทางเชื่อมเข้าสู่ทางสายหลักในอัตราที่เหมาะสม เพื่อให้กระแสการจราจรบนทางสายหลักมีความต่อเนื่องและลดการสูญเสียความเร็วให้น้อยที่สุด ส่งผลให้ถนนรองรับปริมาณยานพาหนะได้มากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้โครงสร้างพื้นฐานและประหยัดงบประมาณในระยะยาว งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค โดยใช้ซอฟต์แวร์ Aimsun Next เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านการจราจรของมาตรการจัดสัญญาณไฟควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษเปรียบเทียบกับไม่มีการควบคุม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า มาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางในรูปแบบต่าง ๆ ให้ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการให้บริการมีความเหมาะสม โดยมาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบปล่อยยานพาหนะหนึ่งคันต่อไฟเขียว เหมาะในช่วงที่ปริมาณจราจรบนทางหลักใกล้เต็มความจุที่ 7,348 ถึง 9,797 คันต่อชั่วโมง (-10% ถึง +20%) แม้จะส่งผลให้เกิดความล่าช้าบนทางเชื่อมมากขึ้นก็ตาม สำหรับรูปแบบไม่มีการควบคุมซึ่งเป็นมาตรการปัจจุบัน พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมาตรการอื่น ๆ ในช่วงที่ปริมาณจราจรต่ำกว่า 6,531 คันต่อชั่วโมง (-20%) ซึ่งผลของแบบจำลองสามารถนำไปปรับปรุงและประยุกต์ใช้กับสภาพพื้นที่จริงในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจราจรและอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ทางพิเศษ

คำสำคัญ: มาตรการจัดสัญญาณไฟควบคุมการเข้าใช้ทาง, แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค, เทคโนโลยีขนส่งอัจฉริยะ, ทางพิเศษ

Abstract

In the present day, Intelligent Transportation System (ITS) technologies have been widely implemented in various countries to enhance traffic management efficiency and improve safety on expressways. Ramp metering is one notable measure, developed to mitigate traffic congestion at expressway on-ramps, which is often a primary cause of travel delays. This measure facilitates the regulation of vehicle entry from ramps to the mainline at an optimal rate, ensuring continuous traffic flow and minimizing speed reductions on the mainline. Consequently, the road can accommodate a higher volume of vehicles, improving infrastructure utilization and achieving long-term cost savings. This research aims to develop a microscopic traffic simulation model using Aimsun Next software to evaluate the traffic performance of ramp metering compared to a “do nothing” scenario. The study results find that various ramp control measures affect service efficiency. The ramp metering measure using a “one vehicle per green” signal is most effective when mainline traffic volume approaches capacity, specifically in the range of 7,348 to 9,797 vehicles per hour (-10% to +20%). Although this measure may result in increased delays on the ramp, it significantly enhances mainline flow. Conversely, the “Do nothing” scenario—reflecting the current operational condition—is found to perform comparably to other strategies under low traffic volumes, particularly when volumes fall below 6,531 vehicles per hour (-20%). These results can be further refined and adapted for implementation in real scenarios, contributing to improved traffic flow and maximizing benefits for expressway users.

Keywords: Ramp Metering, Microscopic Traffic Simulation, Intelligent Transportation System (ITS), Expressway

1. บทนำ

การจราจรที่หนาแน่นบนทางพิเศษหรือทางหลวงพิเศษนับเป็นปัญหาที่สำคัญในหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย ซึ่งมีการขยายโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการในการเดินทางที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การขยายถนนหรือเพิ่มช่องทางจราจรเพียงอย่างเดียวอาจไม่ใช่วิธีที่มีประสิทธิภาพหรือยั่งยืนในระยะยาว ดังนั้น การนำเทคโนโลยีระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation Systems: ITS) มาใช้ในการจัดการจราจรจึงได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

มาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษด้วยสัญญาณไฟจราจร (Ramp Metering) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดที่เกิดขึ้นบริเวณทางขึ้นทางพิเศษหรือทางเชื่อมระหว่างถนนสายรองและถนนสายหลัก หลักการสำคัญของมาตรการนี้คือการควบคุมการปล่อยยานพาหนะจากทางเชื่อมเข้าสู่ทางหลักในอัตราที่เหมาะสม เพื่อให้การจราจรบนทางสายหลักสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง ลดการเกิดคอขวด (Bottleneck) และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทางพิเศษ

การศึกษาประสิทธิภาพของมาตรการ Ramp Metering สามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธี หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมคือการใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation Model) ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมของยานพาหนะแต่ละคันอย่างละเอียด และสามารถประเมินผลกระทบของมาตรการต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ที่เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการจำลองการจราจรในระดับจุลภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมาตรการ Ramp Metering ภายใต้สภาพการจราจรที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนามาตรการ Ramp Metering ให้เหมาะสมกับสภาพการจราจรในพื้นที่ศึกษา และสามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ที่มีลักษณะการจราจรที่คล้ายคลึงกันได้ในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษด้วยสัญญาณไฟจราจร (Ramp Metering)

มาตรการควบคุมนี้ทำงานด้วยการใช้สัญญาณไฟจราจร โดยอาศัยการสลับสัญญาณไฟเขียวและไฟแดงบนทางเชื่อม เพื่อควบคุมอัตราการปล่อยยานพาหนะเข้าสู่ทางหลักอย่างเหมาะสม โดยมีมาตรฐานระยะเวลารอบสัญญาณไฟ (Cycle Length) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 [1] กระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเกิดคอขวดบริเวณจุดเชื่อมต่อ โดยการกระจายกลุ่มรถขนาดใหญ่ให้แตกออกเป็นกลุ่มเล็ก ๆ และส่งเสริมความต่อเนื่องของการจราจรบนทางหลักให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เนื่องจากมาตรการนี้ถือเป็นวิธีการบริหารจัดการการไหลของการจราจรที่มีประสิทธิภาพ แต่อาจส่งผลให้ความจุของทางเชื่อมลดลง [2] มาตรการนี้มีข้อดีที่สำคัญคือสามารถลดความแออัดของการจราจรบนทางหลัก เพิ่มความต่อเนื่องของการจราจร ลดความล่าช้าในการเดินทาง และส่งเสริมความปลอดภัยโดยการลดอุบัติเหตุจากการรวมทาง (Merging) ที่ไม่มีการ

ควบคุม อย่างไรก็ตาม มาตรการนี้มีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความจำเป็นในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการจราจรที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในด้านการติดตั้ง การดำเนินการ และการบำรุงรักษา นอกจากนี้ การควบคุมการจราจรด้วยสัญญาณไฟอาจส่งผลให้เกิดการจราจรติดขัดสะสมบนทางเชื่อมหากไม่ได้รับการบริหารจัดการที่เหมาะสม ทั้งนี้มาตรการควบคุมนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ ดังนี้

2.1.1 ยานพาหนะหนึ่งคันต่อไฟเขียว (One vehicle per green)

รูปแบบนี้อนุญาตให้ยานพาหนะเข้าสู่ทางพิเศษเพียงหนึ่งคันต่อหนึ่งรอบของสัญญาณไฟเขียว โดยระยะเวลาของสัญญาณไฟเขียวถูกกำหนดให้เพียงพอสำหรับยานพาหนะหนึ่งคันในการเคลื่อนผ่านเส้นหยุด (Stop line) ขณะที่ระยะเวลาของสัญญาณไฟแดงจะต้องยาวเพียงพอเพื่อให้ยานพาหนะคันถัดไปหยุดสนิทก่อนเริ่มเคลื่อนที่ต่อไป

2.1.2 ยานพาหนะหลายคันต่อไฟเขียว (Multiple vehicle per green)

รูปแบบนี้ หรือที่เรียกว่า Platoon Metering หรือ Bulk Metering อนุญาตให้ยานพาหนะจำนวนสองคันหรือมากกว่าเข้าสู่ทางพิเศษในแต่ละรอบของสัญญาณไฟเขียว วิธีการนี้สามารถเพิ่มอัตราการปล่อยยานพาหนะได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ความจุของทางเชื่อมลดลงอย่างมาก เนื่องจากต้องเพิ่มระยะเวลาของรอบสัญญาณไฟให้ยาวขึ้นเพื่อให้ยานพาหนะหลายคันสามารถเคลื่อนผ่านได้อย่างปลอดภัย

ตารางที่ 1 มาตรฐานระยะเวลารอบสัญญาณไฟที่มีการใช้งานในแคลิฟอร์เนีย

สัญญาณไฟ	รถหนึ่งคันต่อไฟเขียว		รถสองคันต่อไฟเขียว	
	(วินาที)		(วินาที)	
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	น้อยที่สุด	มากที่สุด
ไฟแดง	ทั่วไป 2.0, ไม่ต่ำกว่า 1.5	12.5	ทั่วไป 2.0, ไม่ต่ำกว่า 1.5	10.5
ไฟเหลือง	N/A	N/A	2.0	2.0
ไฟเขียว	1.4-2.0	2.5-3.5	1.4-2.0	2.5-3.5
รอบสัญญาณไฟ	4.0	15.0	6.0	15

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก California DOT [1]

2.2 แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation Model)

การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะแต่ละคันอย่างละเอียดบนโครงข่ายถนน โดยพิจารณาจากพฤติกรรมของผู้ขับขี่และประสิทธิภาพของยานพาหนะแต่ละประเภท การจำลองนี้ดำเนินการโดยการกำหนดรูปแบบโครงข่ายถนน นำเข้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะเสมือนจริง และกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะผ่านโครงข่ายดังกล่าว จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อประเมินประสิทธิภาพตามที่วางแผนไว้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับการจำลองสภาพการจราจรนี้ สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการจราจรได้ทั้งในเชิงเวลาและพื้นที่ ภายใต้สถานการณ์และรูปแบบการเดินทางที่แตกต่างกัน [3] โดยในการวิจัยนี้ได้ใช้

โปรแกรม Aimsun Next ที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านวิศวกรรมขนส่งและจราจร เพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงข่ายถนน ภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การจราจรในเขตเมือง ทางด่วน ทางแยก และการควบคุมสัญญาณไฟจราจร

Aimsun Next มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะในรายละเอียดระดับรายคัน (Microscopic Simulation) โดยพิจารณาพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ความเร็ว การเร่ง การเบรก การเปลี่ยนช่องทาง และการรวมทาง (merging) นอกจากนี้ยังสามารถจำลองการจัดการจราจร เช่น ระบบ Ramp Metering, ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร, และการจัดการจราจรบนทางพิเศษ ซอฟต์แวร์นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายถนนในด้านต่าง ๆ เช่น ความเร็วเฉลี่ย, อัตราการไหล, ความหนาแน่น, ระยะเวลาการเดินทาง และความล่าช้าในการเดินทาง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวางแผน ปรับปรุง และพัฒนาระบบการจราจรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [4]

2.3 การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation)

การตรวจสอบความถูกต้องเป็นกระบวนการสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าแบบจำลองที่ผ่านการเปรียบเทียบแล้วสามารถทำนายหรือจำลองสถานการณ์ใหม่ ๆ ได้อย่างแม่นยำ การตรวจสอบความถูกต้องที่มีมาตรฐานมักอาศัยเกณฑ์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลการจราจรจริง โดยหนึ่งในเกณฑ์ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายคือ ค่า Geoffrey E. Havers (GEH Statistic) ซึ่งเป็นตัววัดทางสถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณการจราจรและระยะเวลาในการเดินทางจากผลการจำลองกับข้อมูลจริงภายในช่วงเวลาหนึ่งชั่วโมง การใช้ค่า GEH ช่วยให้สามารถประเมินความถูกต้องของแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมั่นใจได้ว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมจราจรในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (1) ส่วนตัวแปรที่มีนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง เช่น ความยาวแถวคอย (Queue length) ความล่าช้า (Delay) ระยะเวลาการเดินทาง (Travel time) และ ความเร็ว (Speed) เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 [5] โดยในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองควรทำการประมวลผลหลายครั้งเพื่อความถูกต้องและสมเหตุสมผลของแบบจำลอง

$$GEH = \sqrt{\frac{2(Simulated - Observed)^2}{Simulated + Observed}} \quad (1)$$

โดย *Simulated* คือค่าที่ได้จากแบบจำลอง
Observed คือค่าที่ได้จากการสำรวจ

หลักเกณฑ์ในการพิจารณาค่าดัชนี GEH ได้แก่:

- ค่า GEH < 5 หมายถึง มีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง

- ค่า GEH ระหว่าง 5 - 10 อาจยอมรับได้ในบางกรณี โดยต้องพิจารณาเงื่อนไขเพิ่มเติม
- ค่า GEH > 10 แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างมากเกินไป ซึ่งอาจบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ต้องได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติม

ตารางที่ 2 เกณฑ์การเปรียบเทียบแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค

เกณฑ์และตัวแปร	เป้าหมาย
ปริมาณการจราจรต่อชั่วโมง (เปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบจำลองและการสำรวจภาคสนาม)	
ปริมาณจราจรแต่ละเส้นทาง	
ผลต่างไม่เกิน 15% สำหรับ 700 คัน < ปริมาณจราจร < 2,700 คัน	> 85%
ผลต่างไม่เกิน 100 คัน สำหรับ ปริมาณการจราจร < 700 คัน	> 85%
ผลต่างไม่เกิน 400 คัน สำหรับ ปริมาณการจราจร > 2,700 คัน	> 85%
รวมปริมาณจราจรทุกเส้นทาง	< 5%
เวลาเดินทาง (เปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบจำลองและการสำรวจภาคสนาม)	
เวลาการเดินทางบนโครงข่ายถนนต่างกันไม่เกิน 15% (หรือไม่เกิน 1 นาที) ของเส้นทาง	> 85%
การประเมินด้วยสายตา	
ความเร็วแยกในแต่ละเส้นทาง : กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Speed Flow อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อประเมินด้วยสายตา	ความพึงพอใจของผู้ประเมิน
คอขวด : แถวคอยอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้เมื่อประเมินด้วยสายตา	

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Wisconsin DOT [5]

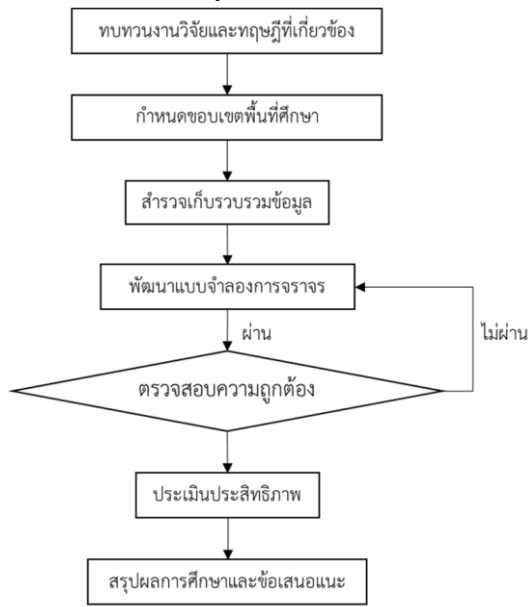
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมาตรการ Ramp Metering และการใช้งานแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค Gu, C., Zhou, T., & Wu, C. (2023) [6] ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงการควบคุมการจราจรที่ทางลาดขึ้นทางพิเศษ โดยใช้โมเดลการเรียนรู้เชิงลึกที่อิงกับ Koopman Operator ซึ่งเป็นแนวคิดที่ช่วยแปลงระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นระบบเชิงเส้นในมิติที่สูงขึ้น วิธีนี้ช่วยให้สามารถจำลองพฤติกรรมจราจรที่ซับซ้อนได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยทำการทดสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองจราจร Simulation of Urban Mobility (SUMO) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการปรับปรุงและเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลองในการควบคุมอัตราการไหลของยานพาหนะบริเวณทางลาดขึ้นทางพิเศษ นอกจากนี้ ศาสตราจารย์ (2560) [7] ได้มีการศึกษาการใช้ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางพิเศษ โดยเลือกพื้นที่ศึกษาที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่นและมีช่องจราจรจำกัดซึ่งกำหนดระยะเวลาไฟสัญญาณขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรที่ตรวจจับได้ตามตำแหน่งต่าง ๆ การศึกษาใช้ข้อมูลจากวิธี Floating Car ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลความเร็วและระยะเวลาเดินทางบนทางพิเศษ จากการทดลองที่ใช้การควบคุมสัญญาณไฟใน 3 ตำแหน่งหลัก ได้แก่ Mainline Detector, Queue Detector และ Merge Detector พบว่ารูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุดคือการกำหนดสัญญาณไฟตามสภาพจราจรจากทั้ง 3 ตำแหน่ง ซึ่งสามารถลดความล่าช้าในการเดินทางได้มากที่สุด อีกทั้งมาตรการนี้สามารถลดระยะเวลาการเดินทางและการติดขัดบนทางพิเศษและลดปริมาณรถติดสะสมได้สูงสุด 278.12 คัน-ชั่วโมง ทั้งยังมีข้อเสนอแนะในด้านการใช้ระบบควบคุมสัญญาณไฟที่ปรับตามสภาพจราจร

อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของทางพิเศษและลดปัญหาการจราจรติดขัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถตอบสนองต่อสภาพการจราจรที่เปลี่ยนแปลงได้ดียิ่งขึ้น

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ให้ถูกต้อง บทความนี้ได้ลำดับวิธีการดำเนินการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษานี้ ให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์บริเวณที่เกิดปัญหาคอขวดบนทางขึ้นทางพิเศษ โดยพื้นที่ที่เลือกศึกษา คือ ทางขึ้นจากด้านจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษโยธินพัฒนา ซึ่งตั้งอยู่ที่พิกัด 13.815254, 100.622712 ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเป็นส่วนหนึ่งของทางพิเศษฉลองรัชในทิศทางขาเข้าเมือง บริเวณดังกล่าวมักประสบปัญหาการจราจรติดขัดเนื่องจากการรวมทาง (Merging) ของยานพาหนะจากทางเชื่อม (Ramp) เข้าสู่ทางหลัก (Mainline) ซึ่งส่งผลต่อความต่อเนื่องและประสิทธิภาพของการจราจรบนทางพิเศษ

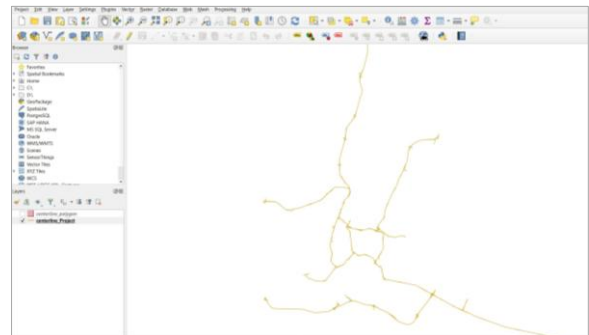


รูปที่ 2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณทางขึ้นทางพิเศษจากด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษโยธินพัฒนา

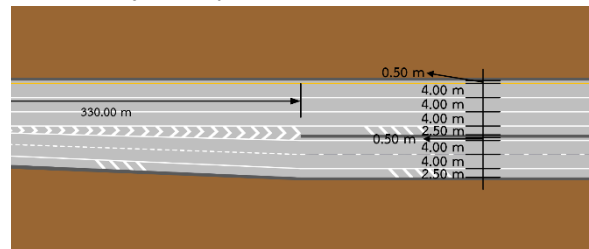
3.2 การสำรวจเก็บรวบรวมข้อมูล

3.2.1 การสำรวจข้อมูลลักษณะทางกายภาพ

ในการศึกษานี้ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลลักษณะทางกายภาพของทางพิเศษจากไฟล์ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Shapefile) ซึ่งจัดเก็บโดยการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สภาพพื้นที่จริงของโครงข่ายถนนบริเวณพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3 จากการสำรวจพบว่า ทางพิเศษฝั่งขาเข้าเมืองในพื้นที่ศึกษาประกอบด้วย ทางหลัก (Mainline) จำนวน 3 ช่องจราจร และ ทางเชื่อมขึ้นทางพิเศษ (Ramp) จำนวน 2 ช่องจราจร โดยแต่ละช่องจราจรมีความกว้าง 4.00 เมตร ไหล่ทางด้านขวามีความกว้าง 0.50 เมตร และไหล่ทางด้านซ้ายมีความกว้าง 2.50 เมตร รายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ข้อมูลเชิงพื้นที่ของโครงข่ายทางพิเศษ



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพถนน

3.2.2 การสำรวจข้อมูลการจราจร

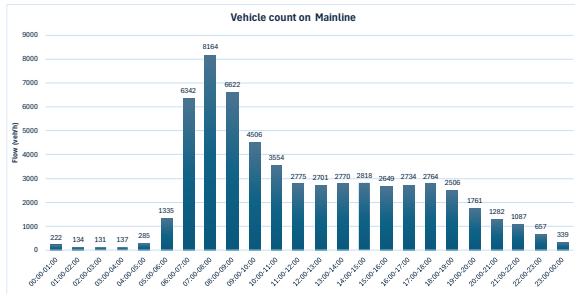
ในการศึกษานี้ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการจราจรจากอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพจราจร (Sensor) และกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ซึ่งติดตั้งในบริเวณพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเลือกใช้ข้อมูลในช่วงวันทำงาน (วันกลางสัปดาห์) เพื่อให้สะท้อนสภาพการจราจรในช่วงเวลาปกติอย่างแท้จริง



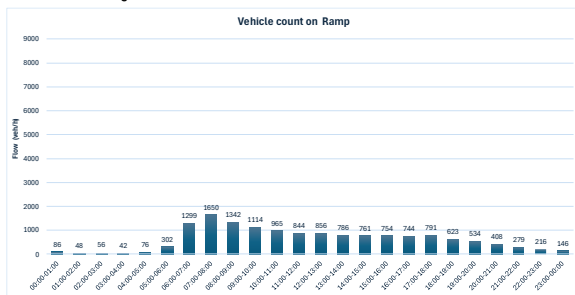
รูปที่ 5 ภาพจากกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV)

- ปริมาณจราจร (Traffic Volume)

จำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนผ่านจุดตรวจวัดในแต่ละช่วงเวลา จากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาเร่งด่วน (เวลา 07:00–08:00 น.) พบว่า บริเวณทางหลัก (Mainline) มีปริมาณยานพาหนะรวมทั้งสิ้น 8,164 คัน ขณะที่บริเวณทางเชื่อมขึ้นทางพิเศษ (Ramp) มีจำนวนยานพาหนะรวม 1,650 คัน ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



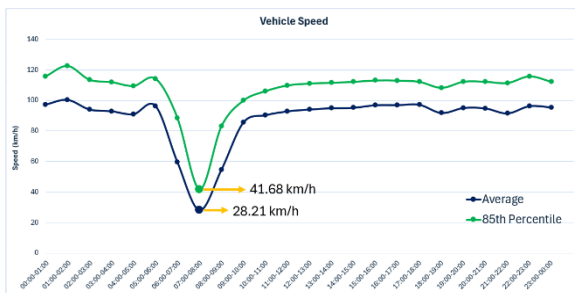
รูปที่ 6 ปริมาณจราจรบนทางหลัก (Mainline)



รูปที่ 7 ปริมาณจราจรบนทางเชื่อม (Ramp)

- ความเร็วของยานพาหนะ (Vehicle Speed)

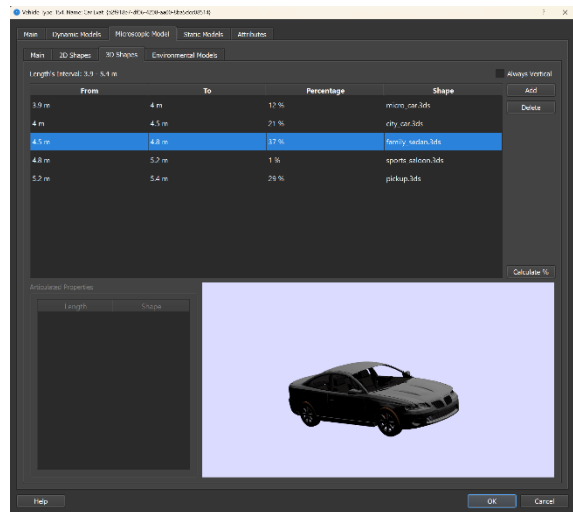
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ใช้เส้นทางบริเวณ พื้นที่ศึกษาบนทางพิเศษคลองรี จากข้อมูลในช่วงเวลาเร่งด่วน (เวลา 07:00–08:00 น.) ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ยานพาหนะที่วิ่งบนทางหลัก (Mainline) มีความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 28.21 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 (85th Percentile Speed) อยู่ที่ 41.68 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสะท้อนถึงระดับความหนาแน่นของการจราจรในช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 8 ความเร็วของยานพาหนะ

- สัดส่วนประเภทยานพาหนะ (Vehicle Composition)

สัดส่วนของยานพาหนะได้จากการนับจำนวนยานพาหนะที่วิ่งผ่านในช่วงเวลาที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่นที่สุด โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อจำแนกองค์ประกอบของประเภทพาหนะที่ใช้งานบนทางหลักและทางเชื่อม ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล รถแท็กซี่ รถตู้ และรถบรรทุก ผลการวิเคราะห์พบว่า ผู้ใช้ทางพิเศษส่วนใหญ่เป็นรถยนต์ส่วนบุคคล คิดเป็นร้อยละ 60.0 รองลงมาคือรถบรรทุก ร้อยละ 27.0 รถตู้ ร้อยละ 12.0 และรถแท็กซี่ ร้อยละ 2.0 นอกจากนี้ ยังได้มีการปรับขนาดของยานพาหนะในแบบจำลองให้สอดคล้องกับขนาดจริง เพื่อความแม่นยำในการจำลองสถานการณ์จราจร โดยรายละเอียดการจำแนกแสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 รายละเอียดในการปรับเทียบแบบจำลอง (ขนาดของยานพาหนะ)

- พฤติกรรมจราจร (Driving Behavior)

การศึกษาพฤติกรรมจราจรในพื้นที่ศึกษา ครอบคลุมถึงลักษณะการแทรกตัวของยานพาหนะจากทางเชื่อมเข้าสู่ทางหลัก ลักษณะการให้ความร่วมมือเมื่อมีรถคันอื่นต้องการแทรกตัว (Cooperation) ลักษณะการเปลี่ยนช่องทางเดินรถ (Lane Changing) ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ (Headway) และพฤติกรรมจราจรบนไหล่ทาง (Shoulder Driving) โดยข้อมูลพฤติกรรมเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจราจรระดับจุลภาค อีกทั้งมีการกำหนดให้ผู้ใช้ทางมีพฤติกรรมเดินทางโดยใช้ไหล่ทางบนทางหลักและทางเชื่อม เพื่อให้แบบจำลองสามารถจำลองสภาพการจราจรได้อย่างใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากที่สุด ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของมาตรการบริหารจัดการจราจรในพื้นที่ศึกษา

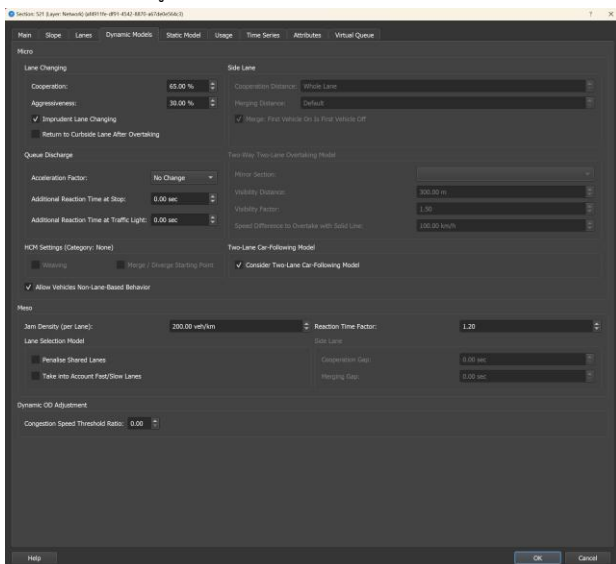
3.3 การพัฒนาแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองการจราจรในรูปแบบของการแทรกตัวของยานพาหนะจากทางเชื่อม (Ramp) เข้าสู่ทางหลัก (Mainline) บนทางพิเศษ ดำเนินการโดยนำข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามที่ผ่านการวิเคราะห์ในเบื้องต้นมาประยุกต์ใช้ภายในซอฟต์แวร์ Aimsun Next เพื่อสร้างแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค โดยภายในกระบวนการนี้จะมีการ

ปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจราจรจริงมากที่สุด ทั้งในด้านปริมาณจราจร ความเร็วของยานพาหนะ และพฤติกรรมการขับขี่

3.3.1 การพัฒนาแบบจำลองพื้นฐาน

การพัฒนาแบบจำลองการจราจรพื้นฐานเริ่มต้นจากการสร้างโครงข่ายถนนภายในโปรแกรม Aimsun Next โดยอ้างอิงข้อมูลลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายทางพิเศษจากไฟล์ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Shapefile) ของพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้ ข้อมูลการจราจรที่ได้จากการสำรวจบริเวณจุดขัดแย้ง เช่น ปริมาณจราจร ความเร็วของยานพาหนะ สัดส่วนประเภทของยานพาหนะ และพฤติกรรมการขับขี่ ได้ถูกนำมาใช้ประกอบในการปรับเทียบ (Calibration) แบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองสามารถสะท้อนสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างแม่นยำ โดยในกระบวนการตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง มีการกำหนดพฤติกรรมเปลี่ยนช่องทาง (Lane Changing) ให้ยานพาหนะบนทางหลักมีความร่วมมือในการยอมให้รถจากทางเชื่อมแทรกตัวในอัตราร้อยละ 65 กำหนดระยะห่างระหว่างยานพาหนะ (Headway) เท่ากับ 0.7 วินาที และระยะเวลาการตอบสนอง (Reaction Time) เท่ากับ 1.2 วินาที นอกจากนี้ ยังมีการตั้งเงื่อนไขให้ยานพาหนะบนทางหลักสามารถใช้ไหล่ทางได้เมื่ออัตราการไหลของจราจรเกินกว่า 5,000 คันต่อชั่วโมง และทางเชื่อมเกิน 1,200 คันต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 10 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายยานพาหนะในช่วงที่มีความแออัดสูง แบบจำลองที่ได้รับการปรับเทียบนี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของมาตรการจราจรในรูปแบบต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 10 รายละเอียดในการปรับเทียบแบบจำลอง (พฤติกรรมการขับขี่)

3.3.2 การพัฒนาแบบจำลองทางเลือก

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางเลือก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมการเข้าสู่ทางพิเศษบริเวณทางเชื่อม โดยกำหนดรูปแบบของมาตรการควบคุมสัญญาณไฟจราจรจำนวนทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ดังนี้

- (1) ไม่มีการควบคุม (Do Nothing) เป็นรูปแบบที่สะท้อนถึงสภาพการณ์ปัจจุบัน โดยไม่มีการควบคุมการเข้าสู่ทางหลัก ยานพาหนะจากทางเชื่อมจะต้องแทรกตัวเข้าสู่ทางหลักโดยไม่มีสัญญาณไฟช่วยควบคุม

โดยมีการปิดช่องจราจร 1 ช่องตามสภาพจริงที่เกิดขึ้น โดยการจัดการนี้ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มของยานพาหนะที่อาจก่อให้เกิดความแออัดบริเวณจุดขัดแย้งที่เป็นคอขวด ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตัวอย่างมาตรการแบบไม่มีการควบคุม (Do Nothing)

- (2) แบบควบคุมแบบปล่อยหนึ่งคันต่อสัญญาณไฟเขียว (One vehicle per green) รูปแบบนี้จะมีการควบคุมบริเวณทางเชื่อม โดยอนุญาตให้ยานพาหนะเข้าสู่ทางหลักหนึ่งคันต่อหนึ่งรอบของสัญญาณไฟเขียว โดยระยะเวลาของไฟเขียวถูกกำหนดให้เพียงพอสำหรับยานพาหนะหนึ่งคันในการเคลื่อนผ่านเส้นหยุด โดยควบคุมเป็นรูปแบบสัญญาณไฟคงที่ โดยมีรอบสัญญาณไฟ (Cycle Length) 4.5 วินาที ไฟเขียว (Green Time) 2.0 วินาที ไฟแดง (Red Time) 2.5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ตัวอย่างมาตรการแบบควบคุมแบบปล่อยหนึ่งคันต่อสัญญาณไฟเขียว (One vehicle per green)

- (3) แบบควบคุมปล่อยสองคันต่อหนึ่งสัญญาณไฟเขียว (Two vehicles per green) รูปแบบนี้จะอนุญาตให้มีการปล่อยยานพาหนะจากทางเชื่อมเข้าสู่ทางหลักได้มากกว่าหนึ่งคันต่อรอบของสัญญาณไฟเขียว โดยระยะเวลาของสัญญาณไฟเขียวถูกกำหนดให้เพียงพอสำหรับยานพาหนะสองคันในการเคลื่อนผ่านเส้นหยุด โดยควบคุมเป็นรูปแบบสัญญาณไฟคงที่ โดยมีรอบสัญญาณไฟ (Cycle Length) 9.0 วินาที ไฟเขียว (Green Time) 2.5 วินาที ไฟแดง (Red Time) 6.5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ตัวอย่างมาตรการแบบควบคุมแบบปล่อยหนึ่งคันต่อสัญญาณไฟเขียว (One vehicle per green)

3.3.3 การกำหนดปริมาณจราจร

หลังจากการพัฒนาแบบจำลองทางเลือกของมาตรการควบคุมทั้ง 3 สถานการณ์ ได้มีการกำหนดปริมาณจราจรสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละมาตรการ โดยพิจารณายานพาหนะที่วิ่งบนทางหลัก (Mainline) และทางเชื่อม (Ramp) ภายใต้ระดับปริมาณจราจรที่แตกต่างกัน ทำการเพื่อนำไปวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis) ในขั้นตอนต่อไป โดยปริมาณจราจรของทางหลักยึดตามช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเช้า (เวลา 07:00–08:00 น.) ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณจราจรสูงสุดของวันเท่ากับ 8,164 คัน และได้ทำการเพิ่มปริมาณจราจรในแบบจำลองที่ระดับจนถึงระดับสูงสุดไม่เกิน +20% ของค่าจริง เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจุของถนนที่ไม่สามารถรองรับปริมาณยานพาหนะที่มากเกินไปได้อีกทั้งที่ระดับปริมาณจราจรต่ำกว่านี้ให้ผลการทดสอบที่ไม่มีความแตกต่างในการประเมินผ่านแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณจราจรของทางเชื่อมกำหนดให้คงที่อยู่ที่ 1,650 คัน เพื่อประเมินผลกระทบของการแทรกตัวเข้าสู่ทางหลักอย่างชัดเจน รายละเอียดของแต่ละระดับปริมาณจราจรแสดงไว้ใน ตารางที่ 3 ซึ่งช่วยในการพิจารณาว่าที่ระดับใดของปริมาณจราจรบนทางหลักจึงควรดำเนินการติดตั้งมาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษ

ตารางที่ 3 การกำหนดปริมาณจราจรในแบบจำลอง

ทางหลัก (Mainline)							
4,082	4,898	5,715	6,531	7,348	8,164	8,980	9,797
-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%
ทางเชื่อม (Ramp)							
1,650							

**สูงสุดไม่เกิน +20% เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจุของถนน

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับสภาพการจราจรจริงในพื้นที่ศึกษาหรือไม่ โดยใช้วิธีเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม ในการจำลองซ้ำได้ดำเนินการจำนวน 5 ครั้ง เพื่อสะท้อนความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่อาจเกิดจากความสุ่มของแบบจำลองจราจรเชิงจุลภาค โดยทั่วไปมีข้อเสนอแนะให้ทำการจำลองซ้ำ 3–10 ครั้ง ซึ่งจำนวน 5 ครั้ง ถือเป็นค่าที่เหมาะสมในการสร้างสมดุลระหว่างความแม่นยำของผลลัพธ์กับระยะเวลาและทรัพยากรที่ใช้ในการศึกษา [8] เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากมาตรการต่าง ๆ ในลำดับถัดไป ทั้งนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องผ่านเกณฑ์การประเมินหลัก ได้แก่

- ปริมาณจราจร (Traffic Volume): ตรวจสอบโดยใช้ค่า GEH Statistic ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบค่าปริมาณจราจรจากแบบจำลองกับพื้นที่จริง โดยแสดงผลวิเคราะห์ไว้ใน ตารางที่ 4
- ระยะเวลาการเดินทาง (Travel Time): ทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการเดินทางจากแบบจำลองกับค่าจริง โดยกำหนดเกณฑ์

ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ไม่เกิน 15% หรือไม่เกิน 1 นาที ทั้งนี้ ผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 5

- ความเร็วเฉลี่ย (Average Speed) และ ความยาวแถวคอย (Queue Length): พิจารณาให้อยู่ในเกณฑ์ที่สอดคล้องกับสภาพจริง โดยประเมินจากการสังเกตด้วยสายตาจากภาพกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) และผลจากแบบจำลอง

ตารางที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ปริมาณการเดินทาง

ครั้งที่	ประเภท	ปริมาณการเดินทาง (คัน/ชม.)		GEH	GEH < 5
		แบบจำลอง	พื้นที่จริง		
1	Main	7,967	8,164	2.19	ผ่าน
	Ramp	1,632	1,650	0.44	ผ่าน
2	Main	7,997	8,164	1.86	ผ่าน
	Ramp	1,671	1,650	0.52	ผ่าน
3	Main	7,910	8,164	2.83	ผ่าน
	Ramp	1,632	1,650	0.44	ผ่าน
4	Main	7,993	8,164	1.90	ผ่าน
	Ramp	1,593	1,650	1.42	ผ่าน
5	Main	8,077	8,164	0.97	ผ่าน
	Ramp	1,652	1,650	0.05	ผ่าน
เฉลี่ย	Main	7,989	8,164	1.95	ผ่าน
	Ramp	1,636	1,650	0.35	ผ่าน

ตารางที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ระยะเวลาการเดินทาง

ครั้งที่	ประเภท	ระยะเวลาการเดินทาง (วินาที)		ความแตกต่าง	ไม่เกินร้อยละ 15
		แบบจำลอง	พื้นที่จริง		
1	Main	173.2	191.4	9.5	ผ่าน
	Ramp	70.9	82.6	14.2	ผ่าน
2	Main	173.3	191.4	9.5	ผ่าน
	Ramp	72.4	82.6	12.3	ผ่าน
ครั้งที่	ประเภท	ระยะเวลาการเดินทาง (วินาที)		ความแตกต่าง	ไม่เกินร้อยละ 15
		แบบจำลอง	พื้นที่จริง		
3	Main	164.6	191.4	14.0	ผ่าน
	Ramp	71.7	82.6	13.2	ผ่าน
4	Main	165.9	191.4	13.3	ผ่าน
	Ramp	72.9	82.6	11.7	ผ่าน
5	Main	163.6	191.4	14.5	ผ่าน
	Ramp	71.7	82.6	13.2	ผ่าน
เฉลี่ย	Main	168.1	191.4	12.2	ผ่าน
	Ramp	71.9	82.6	12.9	ผ่าน

3.5 การประเมินประสิทธิภาพ

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษด้วยสัญญาณไฟ เพื่อตรวจสอบรูปแบบที่เหมาะสมกับสภาพการจราจรที่แตกต่างกันบริเวณจุดรวมทาง (Merging) ซึ่งเป็นจุดขัดแย้งระหว่างยานพาหนะจากทางเชื่อม (Ramp) และทางหลัก (Mainline) โดยพิจารณาจากตัวชี้วัดด้านความล่าช้า (Delay) ที่เกิดขึ้นในการเดินทางของยานพาหนะทั้งหมด เพื่อประเมินผลกระทบของแต่ละ

รูปแบบมาตรการ และสนับสนุนการตัดสินใจเลือกแนวทางการจัดการจราจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ทั้งนี้การกำหนดค่า Random Seed จึงถือเป็นสมมติฐานสำคัญที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกทำการจำลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง โดยใช้ค่า Random Seed ที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละสถานการณ์จะมี Random Seed เดียวกัน เพื่อสะท้อนถึงความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่เกิดจากองค์ประกอบของการสุ่ม และช่วยให้การประเมินประสิทธิภาพของมาตรการจราจรมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

4. ผลการศึกษา

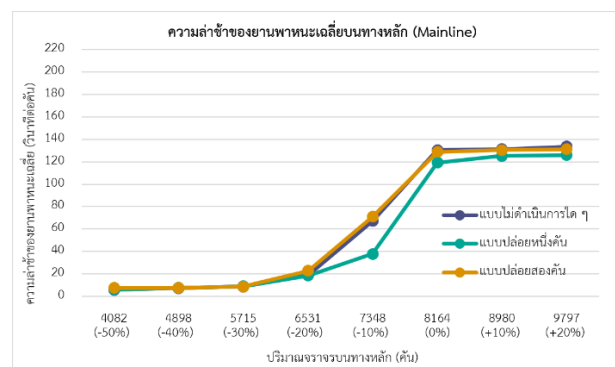
ผลจากการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมสัญญาณไฟจราจรในการเข้าใช้ทางพิเศษ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis) โดยพิจารณาผลลัพธ์ด้านความล่าช้า (Delay) ของยานพาหนะผ่านบริเวณจุดรวมทางบนทางหลักที่เกิดขึ้นจากการจำลองในสถานการณ์ที่มีปริมาณจราจรแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรการจัดการจราจรทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ ไม่มีการควบคุม, ปลอ่ยหนึ่งคันต่อไฟเขียว และปลอ่ยสองคันต่อไฟเขียว จากกราฟในรูปที่ 14 และข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่า บนทางหลัก (Mainline) มาตรการควบคุมแบบ ปลอ่ยรถหนึ่งคันต่อไฟเขียว เริ่มให้ผลค่าความล่าช้าต่ำกว่าสถานการณ์ไม่มีการควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ตั้งแต่ระดับปริมาณจราจร -10% เป็นต้นไป โดยผลที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (t-test) ระหว่างสองกรณีนี้ชี้ให้เห็นว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} < 0.05$) ที่ระดับ -20%: $p\text{-value} = 0.723$ และระดับ -10%: $p\text{-value} = 0.016$ ทั้งนี้ในช่วงจราจรตั้งแต่ระดับ -10% ถึง +20% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มาตรการควบคุมแบบ ปลอ่ยหนึ่งคันมีประสิทธิภาพในการลดความล่าช้าได้ดีกว่าในสถานการณ์ที่มีปริมาณจราจรปานกลางถึงหนาแน่น ขณะที่บนทางเชื่อม (Ramp) จากกราฟในรูปที่ 15 และข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่า มาตรการควบคุมสัญญาณไฟจราจรทั้งสองรูปแบบส่งผลให้เกิดความล่าช้าที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกรณี ปลอ่ยสองคันต่อไฟเขียว ซึ่งมีค่าความล่าช้าเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกช่วงของปริมาณจราจร เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการควบคุม

ตารางที่ 6 ความล่าช้าเฉลี่ยตามระดับปริมาณจราจร

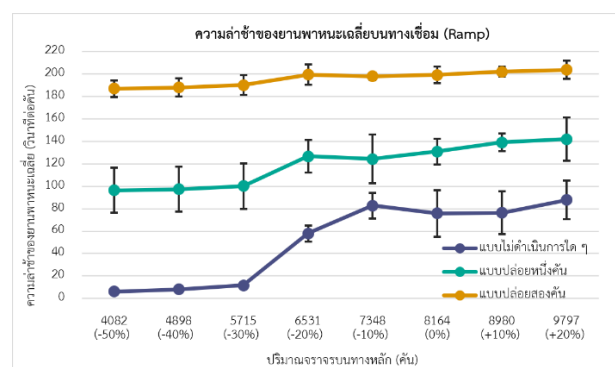
ประเภท	ร้อยละ	ปริมาณจราจร		ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาทีต่อคัน)		
		ทางหลัก (Mainline)	ทางเชื่อม (Ramp)	ไม่มีการควบคุม	ปลอ่ย 1 คัน	ปลอ่ย 2 คัน
ความล่าช้าในการเดินทางบนทางหลัก (Mainline)	-50%	4082	1650	5.74 (0.10)	6.12 (0.10)	7.43 (0.24)
	-40%	4898	1650	7.30 (0.22)	7.60 (0.17)	7.43 (0.27)
	-30%	5715	1650	8.78 (0.37)	8.89 (0.33)	8.78 (0.23)

ความล่าช้าในการเดินทางบนทางเชื่อม (Ramp)	-20%	6531	1650	18.88 (1.53)	18.49 (1.81)	22.89 (3.64)
	-10%	7348	1650	67.3 (5.65)	37.91 (2.46)	71.06 (6.40)
	0%	8164	1650	130.42 (2.59)	119.35 (3.25)	128.82 (1.45)
	+10%	8980	1650	131.22 (3.78)	125.25 (1.87)	130.49 (2.44)
	+20%	9797	1650	133.44 (3.10)	125.81 (0.53)	131.23 (2.86)
	-50%	4082	1650	6.07 (0.06)	96.51 (19.87)	187.13 (7.48)
	-40%	4898	1650	8.20 (0.42)	97.46 (19.88)	188.24 (8.18)
	-30%	5715	1650	11.65 (0.67)	100.23 (20.31)	190.17 (8.84)
	-20%	6531	1650	57.93 (7.18)	126.81 (14.52)	199.52 (9.14)
	-10%	7348	1650	82.74 (11.32)	124.33 (21.68)	198.06 (3.23)
	0%	8164	1650	75.78 (20.97)	131.06 (11.46)	199.33 (7.36)
	+10%	8980	1650	76.46 (18.95)	139.19 (7.75)	202.2 (4.47)
	+20%	9797	1650	87.81 (17.07)	142.05 (19.34)	203.94 (8.28)

**ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) หรือ SD



รูปที่ 14 ความล่าช้าเฉลี่ยบนทางหลักตามระดับปริมาณจราจรต่าง ๆ ในการจัดการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษ



รูปที่ 15 ความล่าช้าเฉลี่ยบนทางเชื่อมตามระดับปริมาณจราจรต่าง ๆ ในการจัดการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษ

5. สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่า จากการประเมินประสิทธิภาพด้านการจราจรโดยใช้ตัวชี้วัดด้านความล่าช้าในการเดินทาง ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงสถิติ (t-test) พบว่า มาตรการควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบปล่อยยานพาหนะหนึ่งคันต่อไฟเขียว (One vehicle per green) ช่วยลดความล่าช้าและเพิ่มความต่อเนื่องของการจราจรบนทางหลัก (Mainline) ได้อย่างมีประสิทธิภาพในหลายช่วงของปริมาณจราจร โดยทำให้กลุ่มยานพาหนะขนาดใหญ่จากทางเชื่อมถูกกระจายให้แทรกตัวเข้าสู่ทางหลักเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ซึ่งช่วยลดผลกระทบต่อการไหลของจราจรบนทางหลัก มาตรการนี้เหมาะสมในช่วงที่ปริมาณจราจรบนทางหลักใกล้เคียงความจุที่ 7,348 ถึง 9,797 คันต่อชั่วโมง (-10% ถึง +20%) แม้จะส่งผลให้เกิดความล่าช้าบนทางเชื่อม (Ramp) มากขึ้นก็ตาม สำหรับรูปแบบไม่มีการควบคุม (Do nothing) ซึ่งเป็นมาตรการปัจจุบัน พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมาตรการอื่น ๆ ในช่วงที่ปริมาณจราจรต่ำกว่า 6,531 คันต่อชั่วโมง (-20%) ขณะที่มาตรการควบคุมแบบปล่อยยานพาหนะสองคันต่อไฟเขียว (Two vehicle per green) ให้ผลดีขึ้นบนทางหลักเมื่อปริมาณจราจรสูงกว่าปัจจุบัน และอาจเหมาะสมกับบริเวณที่ทางเชื่อมมีปริมาณยานพาหนะมากกว่าเดิม เนื่องจากมาตรการแบบปล่อยยานพาหนะแบบเป็นกลุ่มหลายคันเหมาะสมกับช่วงเวลาที่ต้องการระบายยานพาหนะ

6. ข้อเสนอแนะ

นอกจากการประเมินประสิทธิภาพด้านการจราจรโดยใช้ตัวชี้วัดด้านความล่าช้าแล้ว ยังสามารถพิจารณาการประเมินผลในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน การลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากความล่าช้าในการเดินทาง รวมถึงความสามารถในการลดอุบัติเหตุจากการจัดการจราจรที่มีระเบียบมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงประโยชน์ในเชิงรูปธรรมของการพัฒนาระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางเชื่อมเข้าสู่ทางหลัก ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม หากมีการดำเนินการจริงตามแบบจำลองที่ศึกษาไว้ อันเป็นแนวทางสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในอนาคต ทั้งนี้การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานเนื่องจากมาตรการควบคุมข้างต้นอาจมีความเหมาะสมกว่าหากใช้ในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน เนื่องจากการศึกษานี้มุ่งเน้นในการลดความล่าช้าบนทางหลัก โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการจราจรบนทางเชื่อมอาจจะเป็นอุปสรรคต่อการนำมาตรการนี้ไปใช้ประโยชน์

อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้มาตรการควรคำนึงถึงความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพบนทางหลักและผลกระทบต่อการรอบริเวณทางเชื่อม เพื่อให้การใช้ทางพิเศษเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในทุกช่วงเวลา อันจะเป็นประโยชน์สูงสุดต่อผู้ใช้ทางพิเศษโดยรวมจึงควรมีการติดตามและประเมินสภาพจราจรอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งปรับใช้มาตรการควบคุมให้เหมาะสมกับช่วงเวลาหรือสภาพจราจรที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น การกำหนดช่วงเวลาการใช้งานของสัญญาณไฟ Ramp Metering แบบยืดหยุ่นตามปริมาณจราจรจริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการจราจรแบบเรียลไทม์

อีกทั้งการสื่อสารให้ผู้ใช้งานเข้าใจและให้ความร่วมมือก็เป็นปัจจัยสำคัญในการนำมาตรการไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในระยะยาว

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ พนักงาน ลูกจ้าง และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ทุกท่าน ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา แนะนำแนวคิด วิธีการสำรวจ ตรวจสอบ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนการให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยนี้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.นพคุณ บุญกระพือ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้มอบองค์ความรู้และสนับสนุนด้านวิชาการในการสร้างแบบจำลองจราจร ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประเมินปัญหาด้านการจราจรด้วยวิธีการจัดสัญญาณไฟควบคุมการเข้าใช้ทางพิเศษ ทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] California Department of Transportation (2011), California Manual on Uniform Traffic Control Devices. Sacramento, California.
- [2] Office of Operations, FHWA (2014). Ramp Metering: A Proven Cost-Effective Operational Strategy. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-HOP-14-020, pp. 1-32.
- [3] Rao, A. M. and Rao, K. R. (2015). Microscopic Simulation to Evaluation the Traffic Congestion Mitigation Strategies on Urban Arterials. European Transport.
- [4] J. Barceló and J. Casas (2002), Dynamic Network Simulation with AIMSUN, *International Symposium on Transport Simulation*, Yokohama.
- [5] Wisconsin Department of Transportation. (2002) "Freeway System Operational Assessment" Paramics Calibration and Validation Guidelines (Draft), Technical Report I-33, Wisconsin DOT, District 2, June 2002.
- [6] Gu, C., Zhou, T., & Wu, C. (2023). Deep Koopman Traffic Modeling for Freeway Ramp Metering. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(6), 6001-6012.
- [7] ศาสตราจารย์สุพรีดิ์, สอนณรงค์ สุอังคะ และ กาญจน์กรอง สุอังคะ (2560). การประเมินผลกระทบด้านการจราจรในการจัดระบบสัญญาณไฟจราจรควบคุมทางเข้า-ออกสายทางหลักของประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองจราจรระดับจุลภาค. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [8] Federal Highway Administration. (2019). Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software (FHWA-HRT-16-051). U.S. Department of Transportation

