

การจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ
แบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) บนทางพิเศษศรีรัช

TOLL LANE CONFIGURATION FOR M-FLOW ELECTRONIC TOLL
COLLECTION SYSTEM ON THE SI-RAT EXPRESSWAY

นริศรา วิเศษทอง¹ และ เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช²

¹นักศึกษา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาคาร 89 1518 ถนนประชาหาราญ์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800,
s6401081856080@email.kmutnb.ac.th

²อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาคาร 89 1518 ถนนประชาหาราญ์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800,
terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th

Naritsara Wisetthong¹ and Terdsak Rongviriyapanich²

¹Student, Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, Building 89, 1518 Pracharaj 1 Rd, Wong Sawang Area, Bangsue District,
Bangkok 10800, s6401081856080@email.kmutnb.ac.th

²Lecturer, Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, Building 89, 1518 Pracharaj 1 Rd, Wong Sawang Area, Bangsue District,
Bangkok 10800, terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดรูปแบบและจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางที่เหมาะสมกับ
สัดส่วนผู้ใช้บริการระบบ M-Flow ที่จะนำมาใช้ในอนาคต ควบคู่ไปกับระบบเดิม (MTC และ ETC)
ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค Aimsun ใน
การจำลองสภาพจราจร ณ ด้านเก็บค่าผ่านทางที่เป็นตัวแทน 3 แห่ง และกำหนดสถานการณ์
ทดสอบจาก 3 ตัวแปรหลัก ได้แก่ ตัวแปรสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ตัวแปรรูปแบบช่องเก็บ
ค่าผ่านทางพิเศษ และตัวแปรปริมาณจราจร โดยใช้ค่าความล่าช้าเฉลี่ยในการเดินทางเป็นตัวชี้วัด
ประสิทธิภาพการจราจร ผลการศึกษาพบว่า การกำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ
มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow หากสัดส่วนผู้ใช้ต่ำ การจัดให้มีช่อง M-Flow
มากเกินไปจะทำให้การใช้ประโยชน์ช่องเก็บค่าผ่านทางไม่เต็มประสิทธิภาพและส่งผลกระทบต่อ

ช่องทางเดิมที่จำนวนช่องลดลง (MTC และ ETC) ในทางตรงกันข้าม หากสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow สูง แต่จำนวนช่องไม่เพียงพอ จะก่อให้เกิดความแออัดและความล่าช้าในการเดินทาง ดังนั้น การปรับเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ให้สอดคล้องกับสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพโดยรวมของด่านเก็บค่าผ่านทาง งานวิจัยจึงได้เสนอหลักเกณฑ์ในการปรับเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ตามปริมาณจราจรรวมและสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ในแต่ละขนาดด่าน ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับด่านอื่น ๆ ของทางพิเศษศรีรัชได้ อาทิ ด่านพระราม 9 ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 60% ด่านบางซื่อ 2 ควรจัดให้มีช่อง M-Flow 1 และด่านอโศก 4 ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 28% และควรเพิ่มเป็น 3 ช่อง M-Flow เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกินกว่า 69% ผลลัพธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรักษาระดับการให้บริการและลดความล่าช้าในการเดินทางโดยรวมอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow, การจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ, ความจุด่าน

ABSTRACT

This research aims to determine the optimal toll lane configuration and number of toll lanes corresponding to the proportion of M-Flow users, integrated with existing systems (MTC and ETC), to maximize operational efficiency. The study employs the Aimsun microscopic traffic simulation model to simulate traffic conditions at three representative toll plazas, with test scenarios defined by three key variables: the proportion of M-Flow system users, the toll lane configuration layout, and the traffic volume. Average travel delay was utilized as the key performance indicator for traffic efficiency. The findings indicate that the determination of the optimal toll lane configuration is directly correlated with the M-Flow user proportion. If the user proportion is low, an excessive number of M-Flow lanes leads to underutilization and negatively impacts the capacity of the remaining conventional lanes. Conversely, if the M-Flow user proportion is high but the number of lanes is insufficient, it results in severe congestion and increased travel delay. The research concludes that incrementally adjusting the number of M-Flow lanes to correspond with the actual user proportion is a critical factor and proposes a criterion for this adjustment based on total traffic volume and the M-Flow user proportion for each plaza size. For instance, at Rama IX Toll Plaza, the number of M-Flow lanes should be increased from 1 to 2 when the M-Flow user proportion exceeds 60%. The Bang Sue 2 Toll Plaza should maintain 1 M-Flow lane, and the Asok 4 Toll Plaza

should increase M-Flow lanes from 1 to 2 when the proportion exceeds 28%, and further increase to 3 M-Flow lanes when the user proportion exceeds 69%. These results provide a practical guideline for optimizing toll lane configuration to effectively maintain the level of service and minimize overall travel delay.

KEYWORDS: M-Flow user proportion, toll lane configuration, toll plaza capacity

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงข่ายทางพิเศษในเขตกรุงเทพมหานครประสบปัญหาการจราจรติดขัด ซึ่งถือว่าเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข หนึ่งในปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทางคือ การจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทาง ซึ่งเกิดจากการชะลอตัวของรถเพื่อชำระค่าผ่านทาง ไม่ว่าจะเป็นระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (MTC) หรือระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (ETC)

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) จึงมีนโยบายในการนำระบบจัดเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น หรือ ระบบ M-Flow มาประยุกต์ใช้กับทางพิเศษ โดยใช้เทคโนโลยีการตรวจจับและบันทึกภาพป้ายทะเบียนยานพาหนะ เพื่อให้ผู้ใช้ทางสามารถขับผ่านด่านได้โดยไม่ต้องหยุดหรือชะลอความเร็ว ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางได้

การนำระบบ M-Flow มาใช้ในการจัดเก็บค่าผ่านทางบนทางพิเศษในเขตเมืองนั้นมีข้อจำกัดในด้านพื้นที่และลักษณะทางกายภาพ ทำให้ไม่สามารถขยายช่องทางเพิ่มเติมได้ จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนช่องเก็บค่าผ่านทางเดิมที่มีอยู่บางช่องให้เป็นระบบ M-Flow โดยยังคงระบบเก็บค่าผ่านทางเดิม (MTC และ ETC) ไว้ ซึ่งถือว่าเป็นประเด็นที่มีความท้าทายอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นการจัดรูปแบบที่มีลักษณะผสมผสาน (Mixed Mode) หากมีการจัดสรรช่องทาง M-Flow โดยไม่เหมาะสมและไม่สอดคล้องกับสัดส่วนผู้ใช้บริการ อาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ระบบเดิมที่ต้องเผชิญกับจำนวนช่องทางที่ลดลง หรือทำให้การใช้ช่องทาง M-Flow ไม่เต็มประสิทธิภาพ และนำไปสู่ปัญหาความล่าช้าในการเดินทางโดยรวมที่รุนแรงขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการกำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสัดส่วนผู้ใช้บริการระบบ M-Flow โดยมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรรวมและพฤติกรรมสัดส่วนการใช้ช่องทาง M-Flow เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบด่านเก็บค่าผ่านทางอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation) ในการจำลองสภาพจราจรบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางบนทางพิเศษศรีรัชในปัจจุบัน

ปัจจุบันบนทางพิเศษศรีรัชมีระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษ 2 ระบบ ได้แก่

2.1.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (Manual Toll Collection, MTC) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ใช้แรงงานของพนักงานปฏิบัติงาน โดยรถจะผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางได้ต้องชะลอและหยุดเพื่อชำระค่าผ่านทางให้กับพนักงาน [1]

2.1.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection, ETC) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการบริหารจัดการเก็บค่าผ่านทาง โดยมีอุปกรณ์มาติดตั้งที่กระจกหน้ารถสำหรับใช้เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณที่ติดตั้งในช่องเก็บค่าผ่านทางนั้น ๆ โดยระบบเก็บค่าผ่านทางนี้ไม่ต้องหยุดรถที่ช่องเก็บค่าผ่านทางเพียงแต่ชะลอความเร็ว [2]

2.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow)

ระบบ M-Flow เป็นการพัฒนาระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติระดับสูงด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลแบบ Video Tolling แทนการเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบระบบไม้กั้น ผู้ใช้บริการสามารถผ่านด่านได้สะดวก รวดเร็ว โดยอาศัยระบบการทำงานโดยการตรวจจับยานพาหนะ การอ่านป้ายทะเบียน รวมถึงการพัฒนาการตัดเงินค่าผ่านทาง [3] ระบบ M-Flow แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

2.2.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดียว (Single Lane Free Flow, SLFF) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ไม่มีการติดตั้งไม้กั้น (Barrier Gate) บริเวณช่องเก็บค่าผ่านทาง 1 ช่องทำให้ผู้ใช้ทางไม่ต้องชะลอความเร็วขณะผ่านช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรอไม้กั้นเปิด

2.2.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (Multi-Lane Free Flow, MLFF) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการจัดเก็บค่าผ่านทางบนโครงเหล็กคร่อมช่องจราจร (Gantry) แบบหลายช่องทาง ทำให้ผู้ใช้ทางไม่ต้องชะลอความเร็ว สามารถขับขึ้นได้ตามความเร็วอิสระ

2.3 อัตราการให้บริการของระบบเก็บค่าผ่านทาง

ระบบเก็บค่าผ่านทางในแต่ละรูปแบบมีอัตราการให้บริการที่แตกต่างกัน โดยระบบ M-Flow ที่เป็นรูปแบบ Multi-Lane Free Flow มีอัตราการระบายรถสูงถึง 2,000 คัน/ชั่วโมง/ช่องจราจร ซึ่งสูงกว่าระบบ MTC ถึง 5 เท่า และสูงกว่าระบบ ETC ถึง 2.5 เท่า สะท้อนให้เห็นถึงขีดความสามารถของระบบ M-Flow ในการรองรับปริมาณจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการให้บริการของระบบเก็บค่าผ่านทาง [3]

ระบบเก็บค่าผ่านทาง	อัตราการให้บริการ (คัน/ชม./ช่อง)
ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (MTC)	400
ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (ETC)	800
ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดียว (SLFF)	1,200
ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (MLFF)	2,000

2.4 การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมและการตัดสินใจเปลี่ยนแปลงไปใช้ระบบ M-Flow

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผู้ใช้ทางพิเศษต่อการใช้งานระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow บนโครงข่ายทางพิเศษ อาศัยข้อมูลแบบ Stated Preference (SP) นำไปสร้างแบบจำลองคาดการณ์ปริมาณผู้ใช้ระบบ M-Flow โดยอาศัยทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility Theory) แล้วเก็บข้อมูลพฤติกรรมทางเลือกมาประมาณพารามิเตอร์ของฟังก์ชันอรรถประโยชน์ [4]

ตารางที่ 2 สัดส่วนการยึดติดกับระบบเก็บค่าผ่านทาง (Captive)

Captive	MTC	ETC
Captive to Cash/Easy Pass	7.3%	28.0%
Probability of choosing M-Flow	38.5%	24.1%
Non-captive	54.2%	47.9%

ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 กลุ่มผู้ใช้รถทั่วไปที่ชำระค่าผ่านทางด้วยระบบ MTC มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้ระบบ M-Flow 38.5% ขณะที่กลุ่มผู้ใช้ระบบ ETC มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้ระบบ M-Flow 24.1% จะเห็นได้ว่ากลุ่มผู้ใช้ระบบ MTC มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้ระบบ M-Flow มากกว่ากลุ่มที่ใช้ ETC 14.4% เนื่องจากประหยัดเวลาในการผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง

2.5 การจำลองสภาพการจราจร

การวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Aimsun ในการจำลองสภาพจราจร สามารถจำลองในโครงข่ายถนนได้หลายรูปแบบ แบ่งแยกชนิดของยานพาหนะได้ โดยพฤติกรรมของยานพาหนะทุกคัน ในโครงข่ายถนนจะถูกจำลองอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาในการจำลอง มีพื้นฐานการจำลองมาจากทฤษฎีการเคลื่อนตัวตามกันของรถ (Car Following) การเปลี่ยนช่องจราจร (Lane Changing) และระยะระหว่างรถที่ยอมรับได้ (Gap Acceptance) [1]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2021 Panyim et al [3] ได้ศึกษาการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค Aimsun ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษและผลกระทบด้านต่าง ๆ บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจุดโชติ ทางพิเศษคลองรัช ผลการศึกษาพบว่า ปัจจุบันควรจัดให้มีช่อง M-Flow จำนวน 2 ช่อง ซึ่งทำให้สภาพการจราจรหน้าด่านคล่องตัวมากที่สุด และควรเพิ่มช่อง M-Flow ที่ละ 1 ช่อง ภายหลังจากปีที่ 3 และปีที่ 7 หรือเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 59 และ 76 ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2021 Indee and Pitaksringkarn [1] ได้ทำการวิเคราะห์ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบผสมผสาน โดยพัฒนาแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม Vissim เพื่อศึกษาพฤติกรรมของยานพาหนะที่ใช้บริการทางพิเศษบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง (พื้นราบ) ในสภาพการจราจรปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ในปี พ.ศ. 2570 ควรมีระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-Lane Free Flow (MLFF) จำนวน 9 ช่องจราจร ตำแหน่งติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษผสมผสานกับระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (MTC) จำนวน 2 ตู้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการและสามารถแก้ไขปัญหาจราจรได้

ในปี ค.ศ. 2022 Kreewong et al [5] ได้ศึกษาผลกระทบด้านการจราจรจากการเปิดให้บริการระบบจัดเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) ด้านสุขาภิบาล 5-2 ทางพิเศษคลองรัช โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรในการประเมินสภาพการจราจรที่มีและไม่มีโครงการ M-Flow ผลการศึกษาพบว่า การเปิดให้บริการระบบ M-Flow ช่วยลดความล่าช้าได้มากกว่ากรณีที่ไม่มีโครงการ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความล่าช้า พบว่า หากสัดส่วนผู้ใช้งานระบบ M-Flow เพิ่มขึ้น ความล่าช้าจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบ M-Flow มาใช้บนทางพิเศษ สามารถสรุปได้ว่าระบบดังกล่าวช่วยแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สภาพการจราจรคล่องตัวมากขึ้นและลดความล่าช้าในการเดินทางเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้ระบบ M-Flow นอกจากนี้ ยังพบว่าสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดค่าความล่าช้าโดยรวมของด่านเก็บค่าผ่านทางได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังคงเป็นการวิเคราะห์เฉพาะรายด่านและสถานการณ์เฉพาะเจาะจง โดยกำหนดสถานการณ์ในการวิเคราะห์จากปริมาณจราจรและสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ณ ปัจจุบันและปีอนาคตที่คาดการณ์ไว้เท่านั้น จึงยังขาดการวิเคราะห์เปรียบเทียบในหลายระดับของปริมาณจราจรและสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่หลากหลาย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อรองรับสถานการณ์การใช้งานที่แตกต่างกันได้ได้อย่างเหมาะสมในอนาคต

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาและการจัดกลุ่มด้านเก็บค่าผ่านทาง

การวิจัยนี้เลือกทางพิเศษศรีรัชเป็นพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจำนวนมากถึง 32 ด่าน จึงไม่สามารถทำการวิเคราะห์เชิงลึกในทุกด่านได้โดยตรง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องจัดกลุ่มด่านที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่อคัดเลือกด่านตัวแทนมาทำการจำลองและประเมินผลด้วยแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค โดยมีหลักเกณฑ์ในการจัดกลุ่มและการคัดเลือกตัวแทนดังนี้

3.1.1 หลักเกณฑ์การจัดกลุ่มตามจำนวนช่องทาง

ใช้จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางเป็นตัวแปรในการแบ่งขนาดด่านเก็บค่าผ่านทางออกเป็น 3 รูปแบบ [6] ดังนี้

- 1) ด่านขนาดเล็ก ซึ่งมีจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางน้อยกว่า 5 ช่อง
- 2) ด่านขนาดกลาง ซึ่งมีจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางอยู่ระหว่าง 5-8 ช่อง
- 3) ด่านขนาดใหญ่ ซึ่งมีจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางมากกว่า 8 ช่อง

3.1.2 หลักเกณฑ์การคัดเลือกด่านตัวแทน

การคัดเลือกด่านตัวแทนสำหรับการศึกษานี้ ได้กำหนดให้เลือกด่านเก็บค่าผ่านทางที่มีรูปแบบทางเรขาคณิตของด่านเป็นรูปร่างตัว I (I-Shape) ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของด่านเก็บค่าผ่านทางบนทางพิเศษศรีรัช เพื่อให้ด่านที่นำมาศึกษาสามารถสะท้อนลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการจัดช่องเก็บค่าผ่านทางของด่านในกลุ่มเดียวกันได้อย่างเหมาะสม

จากการพิจารณาตามหลักเกณฑ์ข้างต้น ได้คัดเลือกด่านตัวแทนจำนวน 3 แห่ง เพื่อใช้ในการจำลองสภาพจราจรและประเมินผลบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง ได้แก่ ด่านพระราม 9 (ด่านขนาดเล็ก) ด่านบางซื่อ 2 (ด่านขนาดกลาง) และด่านโอศุก 4 (ด่านขนาดใหญ่) โดยรูปที่ 1 แสดงลักษณะทางกายภาพและตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางของด่านตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากข้อมูลเชิงพื้นที่ของ Google Maps และถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างโครงข่ายถนนภายในแบบจำลองโดยอาศัยไฟล์ภาพถ่ายทางอากาศ (.jpeg) เป็นพื้นหลังสำหรับกำหนดจุดอ้างอิงและซ้อนทับเส้นทางให้สอดคล้องกับสภาพจริง



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางของด่านตัวอย่าง

3.2 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลภายในพื้นที่ศึกษา

3.2.1 ปริมาณจราจรปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลปริมาณจราจรที่ใช้ในการวิจัยนี้อ้างอิงจากฐานข้อมูลของบริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) โดยข้อมูลดังกล่าวจัดเก็บด้วยเทคโนโลยี Loop Detector บริเวณช่องเก็บค่าผ่านทาง ข้อมูลที่นำมาใช้เป็นปริมาณจราจรเฉลี่ยในช่วงเวลาเร่งด่วนของวันทำการ ประจำปี พ.ศ. 2566 ข้อมูลชุดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสภาพจราจร เพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณจราจรปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ชื่อด่าน	เวลา	MTC	ETC	รวม	สัดส่วน ETC
พระราม 9	17.00-18.00 น.	684	1,198	1,882	64%
บางซื่อ 2	06.00-07.00 น.	473	930	1,403	66%
อโศก 4	07.00-08.00 น.	1,925	3,460	5,385	64%

3.2.2 จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางและความจุด้านปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางและความจุด้านมีความสำคัญต่อการสร้างโครงข่ายถนนและการกำหนดสถานการณ์จำลอง เพื่อให้การวิเคราะห์มีความครอบคลุมสอดคล้องกับสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางและความจุด้านปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ชื่อด่าน	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง (ช่อง)			ความจุของด่าน (คัน/ชั่วโมง)		
	MTC	ETC	รวม	MTC	ETC	รวม
พระราม 9	2	2	4	800	1,600	2,400
บางซื่อ 2	4	2	6	1,600	1,600	3,200
อโศก 4	5	4	9	2,000	3,200	5,200

3.3 การกำหนดสถานการณ์เพื่อการวิเคราะห์

กำหนดสถานการณ์เพื่อการวิเคราะห์จาก 3 ตัวแปร ได้แก่ สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ และปริมาณจราจร โดยด่านพระราม 9 จำลอง 140 สถานการณ์ ด่านบางซื่อ 2 จำลอง 275 สถานการณ์ และด่านอโศก 4 จำลอง 275 สถานการณ์

3.3.1 สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow

กำหนดสถานการณ์ทดสอบจากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% และ 90% เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ให้ครอบคลุมทุกช่วงของการเปลี่ยนผ่านของระบบ ผลการเปรียบเทียบค่าความล่าช้าในแต่ละสัดส่วนจะช่วยระบุช่วงสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่เหมาะสม (Optimal Range) ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางน้อยที่สุดสำหรับแต่ละรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทาง

3.3.2 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ

กำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษโดยวางตำแหน่งช่อง M-Flow ไว้ทางขวาสุดของด่านแทนที่ช่อง ETC เดิม เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่รถสามารถเดินทางผ่านได้ใกล้เคียงกับการไหลอย่างอิสระ (Free Flow) มีการตัดกระแสจราจรกับระบบเดิมบริเวณหน้าด่านน้อย และมีความปลอดภัยกับพนักงานเก็บค่าผ่านทางมากที่สุด [6] จากนั้นได้ทำการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ที่ละ 1 ช่อง โดยสลับแทนที่ช่อง MTC และ ETC เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการลดจำนวนช่องของแต่ละระบบต่อค่าความล่าช้าในการเดินทางโดยรวม

สำหรับลักษณะการประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow จะพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของด่านเก็บค่าผ่านทาง โดยด่านพระราม 9 และด่านบางซื่อ 2 ใช้ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดียว (Single Lane Free Flow, SLFF) ส่วนด่านอโศก 4 ใช้ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (Multi-Lane Free Flow, MLFF) ด้วย ทั้งนี้ ในกรณีที่ใช้ระบบ MLFF จะมีการลด

จำนวนช่องจราจรลง 1 ช่อง เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของด่านให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยรายละเอียดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษแสดงดังตารางที่ 5-7

ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษในตารางที่ 5-7 มีความหมายดังนี้

M_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (Manual Toll Collection, MTC)

E_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection, ETC)

SF_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดี่ยว (Single Lane Free Flow, SLFF)

MF_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (Multi-Lane Free Flow, MLFF)

โดยที่ n หมายถึงหมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง

ตารางที่ 5 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษด่านพระราม 9

Types	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง	หมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง			
		1	2	3	4
Existing	2MTC, 2ETC	M_1	M_2	E_3	E_4
Case 1	1M-Flow, 2MTC, 1ETC	M_1	M_2	E_3	SF_4
Case 2	1M-Flow, 1MTC, 2ETC	M_1	E_2	E_3	SF_4
Case 3	2M-Flow, 1MTC, 1ETC	M_1	E_2	SF_3	SF_4

ตารางที่ 6 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษด่านบางซื่อ 2

Types	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง	หมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง					
		1	2	3	4	5	6
Existing	4MTC, 2ETC	M_1	M_2	M_3	M_4	E_5	E_6
Case 1	1M-Flow, 4MTC, 1ETC	M_1	M_2	M_3	M_4	E_5	SF_6
Case 2	1M-Flow, 3MTC, 2ETC	M_1	M_2	M_3	E_4	E_5	SF_6
Case 3	2M-Flow, 3MTC, 1ETC	M_1	M_2	M_3	E_4	SF_5	SF_6
Case 4	2M-Flow, 2MTC, 2ETC	M_1	M_2	E_3	E_4	SF_5	SF_6
Case 5	3M-Flow, 2MTC, 1ETC	M_1	M_2	E_3	SF_4	SF_5	SF_6
Case 6	3M-Flow, 1MTC, 2ETC	M_1	E_2	E_3	SF_4	SF_5	SF_6

ตารางที่ 7 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษด่านอโศก 4

Types	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง	หมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Existing	5MTC, 4ETC	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉
Case 1	1M-Flow, 5MTC, 3ETC	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	E ₆	E ₇	E ₈	SF ₉
Case 2	1M-Flow, 4MTC, 4ETC	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	SF ₉
Case 3	2M-Flow, 3MTC, 3ETC	M ₁	M ₂	M ₃	E ₄	E ₅	E ₆		MF ₈	MF ₉
Case 4	2M-Flow, 2MTC, 4ETC	M ₁	M ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆		MF ₈	MF ₉
Case 5	3M-Flow, 2MTC, 3ETC	M ₁	M ₂	E ₃	E ₄	E ₅		MF ₇	MF ₈	MF ₉
Case 6	3M-Flow, 1MTC, 4ETC	M ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅		MF ₇	MF ₈	MF ₉

3.3.3 ปริมาณจราจรที่ใช้ในแบบจำลอง

1) ปริมาณจราจรที่ใช้ในการทดสอบแบ่งตามความจุด้านในปัจจุบัน ได้แก่ 40%, 60%, 80%, 100% และ 120% ของความจุด้านแต่ละแห่ง การกำหนดช่วงปริมาณจราจรที่ครอบคลุมตั้งแต่ระดับต่ำกว่าความจุไปจนถึงสถานะเกินความจุ มีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อให้สามารถกำหนดเกณฑ์การจัดสรรช่องทางที่มีความยืดหยุ่นและรองรับสถานะจราจรที่แตกต่างกันได้ ในตารางที่ 8 แสดงปริมาณจราจรที่ 100% ของความจุด้านปัจจุบัน โดยด่านพระราม 9 มีความจุ 2,400 คัน/ชั่วโมง ด่านบางซื่อ 2 มีความจุ 3,200 คัน/ชั่วโมง และด่านอโศก 4 มีความจุ 5,200 คัน/ชั่วโมง ส่วนปริมาณจราจร ณ ความจุอื่น ๆ คำนวณโดยใช้ตัวคูณ 0.4, 0.6, 0.8, 1.2 ตามลำดับ

2) กำหนดให้สัดส่วนผู้ใช้ระบบอัตโนมัติ (ETC) คงที่ โดยด่านพระราม 9 เท่ากับ 64%, ด่านบางซื่อ 2 เท่ากับ 66% และด่านอโศก 4 เท่ากับ 64% สัดส่วนดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณปริมาณจราจรเริ่มต้นในระบบ MTC และ ETC ก่อนที่จะมีการจำลองเปลี่ยนผู้ใช้งานบางส่วนไปสู่ระบบ M-Flow

3) การกำหนดปริมาณผู้ใช้ M-Flow สมมติฐานว่ามีที่มาจากผู้ใช้ระบบเงินสด (MTC) 62% และผู้ใช้ระบบอัตโนมัติ (ETC) 38% โดยอ้างอิงจากข้อมูลแนวโน้มพฤติกรรมการเปลี่ยนผ่านของผู้ใช้ที่สังเคราะห์ไว้ในบทบทวนวรรณกรรม ทั้งนี้ ยังคงเหลือปริมาณผู้ใช้ MTC ไม่น้อยกว่า 10% เพื่อสะท้อนสภาพการดำเนินงานจริงของด่านเก็บค่าผ่านทางที่ยังคงเปิดให้บริการระบบ MTC

ตารางที่ 8 ปริมาณจราจรที่ 100% ของความจุด้านในปัจจุบัน

%	ด้านพระราม 9			ด้านบางซื่อ 2			ด้านอโศก 4		
	M-Flow	MTC	ETC	M-Flow	MTC	ETC	M-Flow	MTC	ETC
10%	240	725	1,435	320	882	1,998	520	1,539	3,141
20%	480	577	1,343	640	685	1,875	1,040	1,219	2,941
30%	720	429	1,251	960	488	1,752	1,560	899	2,741
40%	960	282	1,158	1,280	292	1,628	2,080	580	2,540
50%	1,200	134	1,066	1,600	108	1,492	2,600	260	2,340
60%	1,440	87	873	1,920	108	1,172	3,120	186	1,894
70%	1,680	87	633	2,240	108	852	3,640	186	1,374
80%	1,920	87	393	2,560	108	532	4,160	186	854
90%	2,160	87	153	2,880	108	212	4,680	186	334

3.4 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

3.4.1 การเปรียบเทียบปริมาณจราจร

การเปรียบเทียบแบบจำลองเป็นกระบวนการปรับค่าตัวแปรบางตัวในแบบจำลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงและผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งโดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาประมวลผล และนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลหตุภูมิหรือข้อมูลสำรวจ

แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคจะทำการปรับเทียบโดยอาศัยเกณฑ์ที่อ้างอิงตามมาตรฐานของ Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) จากการคำนวณค่า GEH [7] ดังสมการที่ 1 เนื่องจากเป็นเกณฑ์ในการปรับเทียบแบบจำลองระดับจุลภาคที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับสากล

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

โดยที่ M คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง และ C คือ ค่าอ้างอิงหรือข้อมูลสำรวจภาคสนาม

ในการสร้างแบบจำลองสภาพจราจร หากค่า GEH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5.0 ถือว่าผลจากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามอยู่ในเกณฑ์ดี สามารถใช้งานต่อไปได้ หากค่า GEH อยู่

ระหว่าง 5.0-10.0 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้ ส่วนค่า GEH มากกว่า 10.0 แสดงว่าแบบจำลองไม่สอดคล้องกับข้อมูลจริงและต้องปรับเทียบเพิ่มเติม

ตารางที่ 9 การปรับค่าตัวแปรในแบบจำลอง

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
Delay Metering: MTC	4.25 วินาที
Delay Metering: ETC	0.5 วินาที
Flow Metering: M-Flow, SLFF	1,200 คัน/ชั่วโมง
Flow Metering: M-Flow, MLFF	2,000 คัน/ชั่วโมง
รูปแบบการมาถึง	แบบไม่คงตัว (Exponential)

หลังจากดำเนินการปรับค่าตัวแปรภายในแบบจำลองดังตารางที่ 9 แล้วเสร็จ ได้นำผลลัพธ์มาคำนวณค่า GEH เพื่อประเมินความถูกต้องของอัตราการให้บริการของระบบเก็บค่าผ่านทางในแบบจำลองเทียบกับค่าอ้างอิงของ กทพ. ผลการปรับเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 10 พบว่าค่า GEH ของแต่ละระบบเก็บค่าผ่านทางมีค่าน้อยกว่า 5.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำ น่าเชื่อถือ และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนต่อไปได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบอัตราการให้บริการจากแบบจำลองและข้อมูลอ้างอิง

ระบบเก็บค่าผ่านทาง	อัตราการให้บริการ (คันต่อชั่วโมง)		GEH
	ค่าอ้างอิง	แบบจำลอง	
MTC	400	399	0.05
ETC	800	799	0.04
M-Flow (SLFF)	1,200	1,201	0.03
M-Flow (MLFF)	2,000	2,000	0.00

3.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ปริมาณจราจรต่อชั่วโมงในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณจราจรผ่านด่านจริงใน ปี พ.ศ. 2566 ของแต่ละด่าน รายละเอียดผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ชื่อด่าน	ระบบเก็บค่าผ่านทาง	ปริมาณจราจร (คัน/ชั่วโมง)		GEH
		ค่าจริง	แบบจำลอง	
ด่านพระราม 9	MTC	684	701	0.63
	ETC	1,198	1,190	0.24
ด่านบางซื่อ 2	MTC	473	472	0.06
	ETC	930	896	1.14
ด่านอโศก 4	MTC	1,925	1,956	0.70
	ETC	3,460	3,428	0.55

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาครั้งนี้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ($GEH < 5.0$) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Aimsun สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพระบบเก็บค่าผ่านทางได้

3.4.3 การเปรียบเทียบความยาวแถวคอย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเปรียบเทียบความยาวแถวคอยเฉพาะด่านที่มีปัญหาการจราจรเกินความจุ ได้แก่ ด่านอโศก 4 ซึ่งมีปริมาณจราจรชั่วโมงเร่งด่วน 5,385 คัน/ชั่วโมง หรือคิดเป็น 104% ของความจุด่านปัจจุบัน

เนื่องจากมีข้อจำกัดในการลงพื้นที่สำรวจภาคสนาม ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้ข้อมูลจาก Google Maps โดยอ้างอิงเส้นสีแดงซึ่งแสดงถึงสภาพการจราจรที่มีความเร็วต่ำในช่วงเวลาเร่งด่วน (07.00-08.00 น.) ดังรูปที่ 2 (ก) ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนถึงความหนาแน่นของการจราจรและถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งท้ายแถวว่ามีความยาวไปถึงจุดใด จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของแบบจำลอง Aimsun โดยพิจารณาตำแหน่งท้ายแถวว่าใกล้เคียงกันหรือไม่ หากพบว่ายังไม่สอดคล้องกัน จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการให้บริการ เวลาตอบสนองของผู้ขับฯ และระยะทางการรับรู้ของผู้ขับฯ จนกว่าแบบจำลองจะแสดงความยาวแถวคอยใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด

ผลการเปรียบเทียบความยาวแถวคอย พบว่าความยาวของแถวคอยที่ได้จากแบบจำลอง ดังรูปที่ 2 (ข) มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจาก Google Maps ซึ่งสะท้อนสภาพการจราจรจริงในช่วงเวลาที่ศึกษา และมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สภาพจราจรบริเวณด่านอโศก 4 ต่อไปได้



(ก) ความยาวแนวคอคอยจาก Google Maps



(ข) ความยาวแนวคอคอยภายในแบบจำลอง

รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบความยาวแนวคอคอย

4. ผลการศึกษาวิจัย

ผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพจราจรถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้าเฉลี่ยในการเดินทางและสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการจัดช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ โดยค่าความล่าช้าเฉลี่ยในแต่ละสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ได้จากผลการจำลองสภาพจราจรในแต่ละกรณี ส่วนการประมาณหาจุดตัดของกราฟความล่าช้า ซึ่งเป็นจุดที่แสดงสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ใช้วิธีการประมาณค่าระหว่างจุด (Linear Interpolation)

ผลการศึกษาของด้านเก็บค่าผ่านทางทั้ง 3 ขนาด พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณจราจรรวมเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนของผู้ใช้ระบบ M-Flow จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความล่าช้าเฉลี่ยในการเดินทาง โดยเมื่อสัดส่วนของผู้ใช้ระบบ M-Flow เพิ่มขึ้น ค่าความล่าช้าเฉลี่ยจะมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม หากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม จะทำให้เกิดความหนาแน่นบริเวณช่องทาง M-Flow และก่อให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงควรพิจารณาการปรับเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow ให้เหมาะสมกับปริมาณผู้ใช้ในแต่ละช่วง

สำหรับการจัดสรรช่องทาง M-Flow พบว่า ในกรณีที่ปริมาณจราจรรวมอยู่ในระดับต่ำประมาณ 40% ของความจุด้าน ด้านขนาดเล็กและด้านขนาดกลางสามารถจัดให้มีช่องทาง M-Flow เพียง 1 ช่อง ก็เพียงพอต่อการรองรับการใช้งาน ขณะที่ด้านขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีช่องทาง M-Flow จำนวน 2 ช่อง เนื่องจากมีปริมาณจราจรสูงกว่า และเมื่อพิจารณาที่ระดับปริมาณจราจรสูงขึ้น 100% ของความจุด้าน พบว่า ด้านขนาดเล็กควรจัดสรรช่องทาง M-Flow จำนวน 1-2 ช่อง ส่วนด้านขนาดกลางและด้านขนาดใหญ่ควรจัดสรรช่องทาง M-Flow จำนวน 1-3 ช่อง โดยด้านขนาดใหญ่ซึ่งรองรับปริมาณจราจรจำนวนมาก จำเป็นต้องเพิ่มช่องทาง M-Flow ตั้งแต่สัดส่วนผู้ใช้ระบบยังอยู่ในระดับต่ำ

4.1 ผลการศึกษาของด้านพระราม 9 (ด้านขนาดเล็ก)

ผลการศึกษาภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนช่อง M-Flow ที่เหมาะสม รวมถึงสัดส่วนของผู้ใช้ที่ควรพิจารณาในการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3

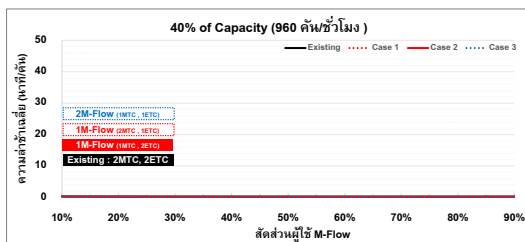
4.1.1 กรณีปริมาณจราจร 40% ของความจุด้านปัจจุบัน (960 คัน/ชม.) พบว่าการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง เนื่องจากปริมาณจราจรค่อนข้างน้อย

4.1.2 กรณีปริมาณจราจร 60% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,440 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 80% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 80% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)

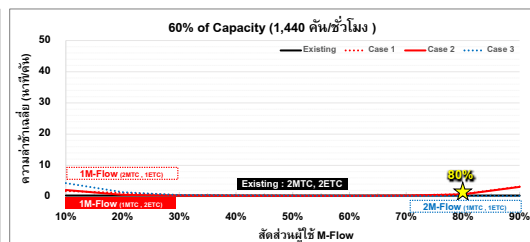
4.1.3 กรณีปริมาณจราจร 80% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,920 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 60% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 60% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)

4.1.4 กรณีปริมาณจราจร 100% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,400 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 56% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 56% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)

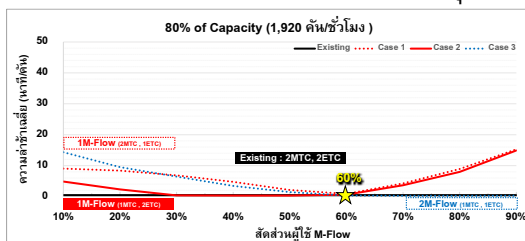
4.1.5 กรณีปริมาณจราจร 120% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,880 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 55% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 55% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)



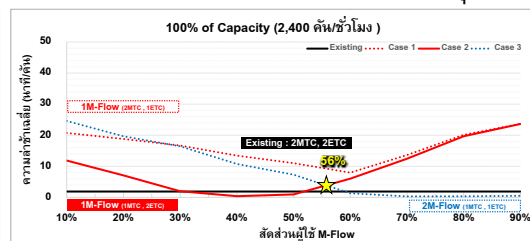
(ก) ปริมาณจราจร 40% ของความจุ



(ข) ปริมาณจราจร 60% ของความจุ

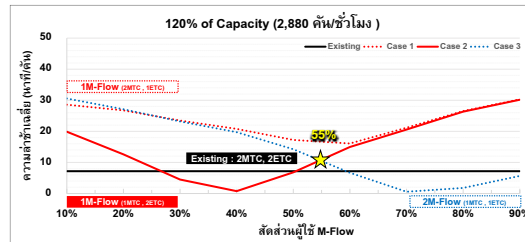


(ค) ปริมาณจราจร 80% ของความจุ



(ง) ปริมาณจราจร 100% ของความจุ

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านพระราม 9



(จ) ปริมาณจราจร 120% ของความจุ

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านพระราม 9 (ต่อ)

4.2 ผลการศึกษาของด้านบางข้อ 2 (ด้านขนาดกลาง)

ผลการศึกษาภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนช่อง M-Flow ที่เหมาะสม รวมถึงสัดส่วนของผู้ใช้ที่ควรพิจารณาในการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4

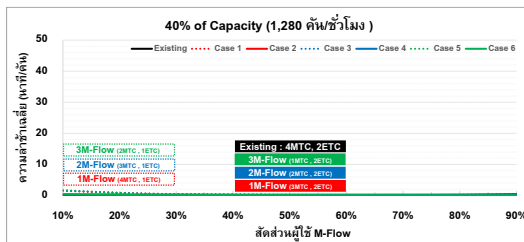
4.2.1 กรณีปริมาณจราจร 40% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,280 คัน/ชม.) พบว่ารูปแบบการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง Case 2, Case 4, Case 6 ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

4.2.2 กรณีปริมาณจราจร 60% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,920 คัน/ชม.) พบว่าควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

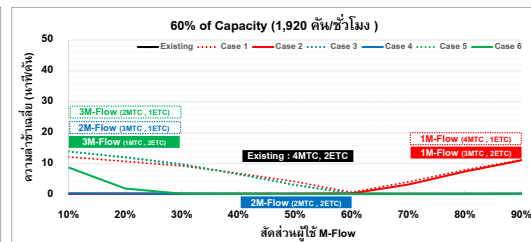
4.2.3 กรณีปริมาณจราจร 80% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,560 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 40% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (3MTC, 2ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 40% - 80% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 80% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 2ETC)

4.2.4 กรณีปริมาณจราจร 100% ของความจุด้านปัจจุบัน (3,200 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 30% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (3MTC, 2ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 30% - 60% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 60% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 2ETC)

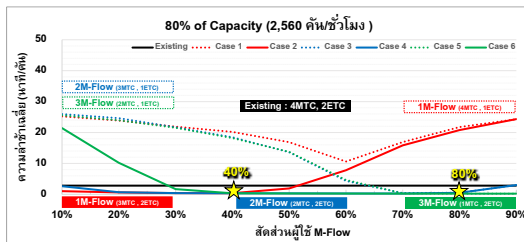
4.2.5 กรณีปริมาณจราจร 120% ของความจุด้านปัจจุบัน (3,840 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 30% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (3MTC, 2ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 30% - 50% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 50% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 2ETC)



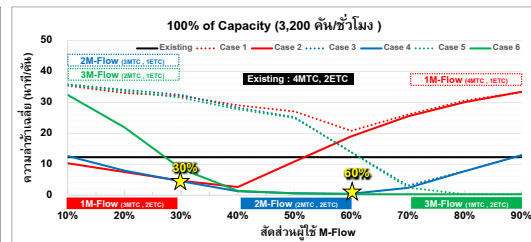
(ก) ปริมาณจราจร 40% ของความจุ



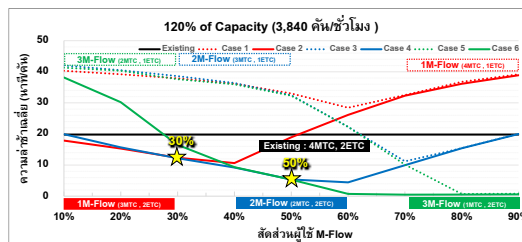
(ข) ปริมาณจราจร 60% ของความจุ



(ค) ปริมาณจราจร 80% ของความจุ



(ง) ปริมาณจราจร 100% ของความจุ



(จ) ปริมาณจราจร 120% ของความจุ

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านบางซื่อ 2

4.3 ผลการศึกษาของด้านไฮสโกล 4 (ด้านขนาดใหญ่)

ผลการศึกษาภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนช่อง M-Flow ที่เหมาะสม รวมถึงสัดส่วนของผู้ใช้ที่ควรพิจารณาในการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5

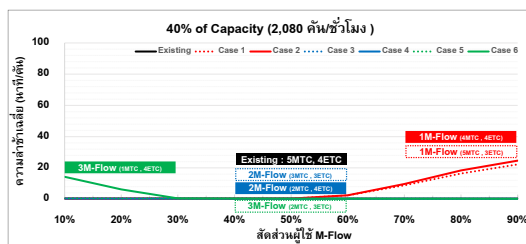
4.3.1 กรณีปริมาณจราจร 40% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,080 คัน/ชม.) พบว่ารูปแบบการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง Case 3, Case 4, Case 5 ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

4.3.2 กรณีปริมาณจราจร 60% ของความจุด้านปัจจุบัน (3,120 คัน/ชม.) พบว่าควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 2 ช่อง (3MTC, 3ETC) จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

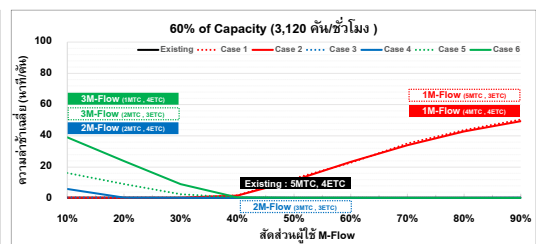
4.3.3 กรณีปริมาณจราจร 80% ของความจุด้านปัจจุบัน (4,160 คัน/ชม.) พบว่าควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 2 ช่อง (3MTC, 3ETC) จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

4.3.4 กรณีปริมาณจราจร 100% ของความจุด้านปัจจุบัน (5,200 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 28% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (4MTC, 4ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 28% - 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 4ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 4ETC)

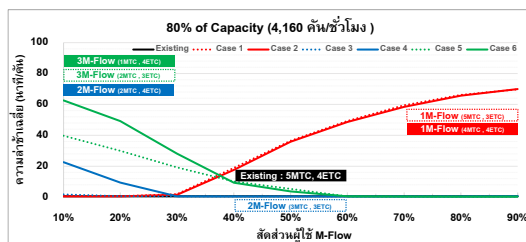
4.3.5 กรณีปริมาณจราจร 120% ของความจุด้านปัจจุบัน (6,240 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 28% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (4MTC, 4ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 28% - 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 4ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 4ETC)



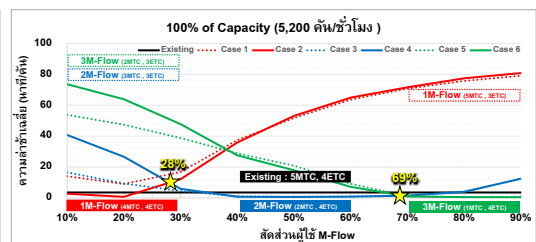
(ก) ปริมาณจราจร 40% ของความจุ



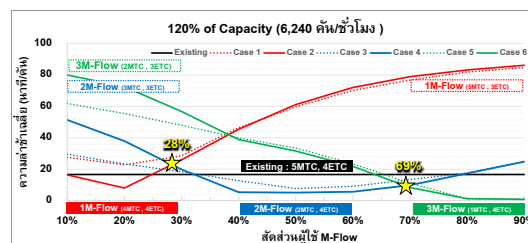
(ข) ปริมาณจราจร 60% ของความจุ



(ค) ปริมาณจราจร 80% ของความจุ



(ง) ปริมาณจราจร 100% ของความจุ



(จ) ปริมาณจราจร 120% ของความจุ

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านโศก 4

5. สรุปผล

ผลการศึกษาของด้านตัวแทนสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อรองรับระบบ M-Flow ของด้านอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ โดยเริ่มจากการจำแนกว่าด้านเป้าหมายอยู่ในกลุ่มขนาดเล็ก ขนาดกลาง หรือขนาดใหญ่ จากนั้นพิจารณาปริมาณจราจรรวมในปัจจุบัน เมื่อทราบทั้งขนาดของด้านและปริมาณการจราจรแล้ว จะสามารถกำหนดรูปแบบและจำนวนช่องทาง M-Flow ที่เหมาะสม รวมทั้งระบุเกณฑ์สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มจำนวนช่องทางได้

สำหรับแนวทางการประยุกต์ใช้ เช่น ด้านพระราม 9 ซึ่งมีปริมาณจราจร 1,882 คัน/ชั่วโมง (78% ของความจุด้าน) ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 60% ขณะที่ด้านบางซื่อ 2 ซึ่งมีปริมาณจราจร 1,403 คัน/ชั่วโมง (44% ของความจุด้าน) ควรจัดให้มีช่อง M-Flow จำนวน 1 ช่อง พร้อมคงช่อง ETC ไว้ 2 ช่อง เพื่อรองรับผู้ใช้ระบบเดิม ส่วนด้านอโศก 4 ซึ่งมีปริมาณจราจร 5,385 คัน/ชั่วโมง (104% ของความจุด้าน) ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 28% และควรเพิ่มเป็น 3 ช่อง M-Flow เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกินกว่า 69%

อย่างไรก็ตาม การดำเนินการเพิ่มระบบ M-Flow ควรพิจารณาด้านงบประมาณในการติดตั้ง และบำรุงรักษาระบบควบคู่กับการประเมินพฤติกรรมของผู้ใช้ทางพิเศษ เนื่องจากหากผู้ใช้ยังไม่ปรับตัวมาใช้ระบบใหม่มากนัก อาจส่งผลต่อความคุ้มค่าของการลงทุน ดังนั้น การจัดสรรช่องทาง M-Flow ควรศึกษาข้อมูลพฤติกรรมผู้ใช้ทางที่คาดว่าจะมาใช้ระบบ M-Flow ของแต่ละด้านร่วมด้วย เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

5.1 ด้านขนาดเล็ก

ด้านขนาดเล็ก (ช่องเก็บค่าผ่านทาง < 5 ช่อง) จะพิจารณาใช้ช่องทาง M-Flow 1-2 ช่อง โดยใช้ปริมาณจราจรระบบ M-Flow เป็นเกณฑ์ในการเพิ่มจำนวนช่องทาง ซึ่งสรุปผลไว้ในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เกณฑ์การเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow สำหรับด้านขนาดเล็ก

ปริมาณจราจรรวม ทุกระบบ (คัน/ชม.)	เกณฑ์ปริมาณจราจรระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มช่องทาง (คัน/ชม.)	จำนวนช่อง M-Flow
960	-	1 ช่อง
1,440	มากกว่า 1,152 (M-Flow 80%)	2 ช่อง
1,920	มากกว่า 1,152 (M-Flow 60%)	2 ช่อง
2,400	มากกว่า 1,344 (M-Flow 56%)	2 ช่อง
2,880	มากกว่า 1,584 (M-Flow 55%)	2 ช่อง

5.2 ด้านขนาดกลาง

ด้านขนาดกลาง (ช่องเก็บค่าผ่านทาง 5-8 ช่อง) จะพิจารณาใช้ช่องทาง M-Flow 1-3 ช่อง โดยใช้ปริมาณจราจรระบบ M-Flow เป็นเกณฑ์ในการเพิ่มจำนวนช่องทาง ซึ่งสรุปผลไว้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 เกณฑ์การเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow สำหรับด้านขนาดกลาง

ปริมาณจราจรรวม ทุกระบบ (คัน/ชม.)	เกณฑ์ปริมาณจราจรระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มช่องทาง (คัน/ชม.)	จำนวนช่อง M-Flow
1,280	-	1 ช่อง
1,920	-	2 ช่อง
2,560	ระหว่าง 1,024 - 2,048 (M-Flow 40% - 80%) มากกว่า 2,048 (M-Flow 80%)	2 ช่อง 3 ช่อง
3,200	ระหว่าง 960 - 1,920 (M-Flow 30% - 60%) มากกว่า 1,920 (M-Flow 60%)	2 ช่อง 3 ช่อง
3,840	ระหว่าง 1,152 - 1,920 (M-Flow 30% - 50%) มากกว่า 1,920 (M-Flow 50%)	2 ช่อง 3 ช่อง

5.3 ด้านขนาดใหญ่

ด้านขนาดใหญ่ (ช่องเก็บค่าผ่านทาง > 8 ช่อง) จะพิจารณาใช้ช่องทาง M-Flow 1-3 ช่อง โดยใช้ปริมาณจราจรระบบ M-Flow เป็นเกณฑ์ในการเพิ่มจำนวนช่องทาง ซึ่งสรุปผลไว้ในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 เกณฑ์การเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow สำหรับด้านขนาดใหญ่

ปริมาณจราจรรวม ทุกระบบ (คัน/ชม.)	เกณฑ์ปริมาณจราจรระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มช่องทาง (คัน/ชม.)	จำนวนช่อง M-Flow
2,080	-	2 ช่อง
3,120	-	2 ช่อง
4,160	-	2 ช่อง
5,200	ระหว่าง 1,456 - 3,588 (M-Flow 28% - 69%) มากกว่า 3,588 (M-Flow 69%)	2 ช่อง 3 ช่อง
6,240	ระหว่าง 1,747 - 4,306 (M-Flow 28% - 69%) มากกว่า 4,306 (M-Flow 69%)	2 ช่อง 3 ช่อง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพจำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนการสนับสนุนเครื่องมือและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง

References

- [1] Indee T, Pitaksringkarn J. Analyzing a mixed toll collection system using traffic microsimulation models: a case study of Din Daeng toll plaza. KMITL Engineering Journal 2021;38(1):1–14. (In Thai)
- [2] Su-angka K. The traffic evaluation of electronic toll collection system design in Thailand [Internet]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2013 [cited 2023 Jul 24]. Available from: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/4613>. (In Thai)
- [3] Punyim P, Panyachaiwattanakul S, Rattanapanyakorn T. Toll lane configuration for M-Flow electronic toll collection system. Proceedings of the 26th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2021 Jun 23–25; Rayong, Thailand. p. TRL-03-1-8. (In Thai)
- [4] Srisuwan S, Klomranok T, Kreewong T, Panyachaiwattanakul S, Rattanapanyakorn T. A study on changes in expressway user behavior for the use of the multi-lane free flow (M-Flow) toll system on the expressway network. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2022 Aug 24–26; Chiang Rai, Thailand. p. TRL-39-1-8. (In Thai)
- [5] Kreewong T, Klomranok T, Srisuwan S, Panyachaiwattanakul S, Rattanapanyakorn T. A study of the traffic impact on the opening of multi-lane free flow (M-Flow) on the Chalong Rat Expressway. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2022 Aug 24–26; Chiang Rai, Thailand. p. TRL22-1–8. (In Thai)
- [6] Klomranok T, Kreewong T, Srisuwan S, Pitakpanich N, Rattanapanyakorn T. Grouping factors and physical design concepts of toll plazas for supporting the multi-lane free flow (M-Flow) toll system on the Chalong Rat Expressway. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2022 Aug 24–26; Chiang Rai, Thailand. p. TRL11-1–9. (In Thai)

- [7] The Highways Agency. Design manual for roads and bridges. volume 12 traffic appraisal of roads schemes. section 2 traffic appraisal advice. part 1 traffic appraisal in urban areas [internet]. Birmingham, UK: The Highways Agency; 1996 [cited 2024 Oct 25]. Available from: <https://assets.highwaysengland.co.uk/roads/road-projects/a2-bean-ebbsfleet-junction-improvements/Orders/I.8+DMRB+Part+1+Traffic+Appraisal.pdf>.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นริศรา วิเศษทอง นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาคาร 89 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: s6401081856080@email.kmutnb.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมจราจรและวางแผนการขนส่ง



รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาคาร 89 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: การขนส่งในเขตเมืองและการขนส่งสินค้า

Article History:

Received: August 19, 2025

Revised: December 3, 2025

Accepted: December 4, 2025