การประเมินสภาพการจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดงเมื่อเปิดให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-lane Free Flow (M-Flow) โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค

Assessment of the Traffic Conditions of the Din Daeng Toll Plaza from Multi-Lane Free Flow (M-Flow) Toll System Implementation by using a Traffic Micro-Simulation Model

ธนุตม์ กล่อมระนก[1,*] นันทวรรณ พิทักษ์พานิช[2] และ เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร[3]

[1,2,3] กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310
**Corresponding author; E-mail address: engineering54@hotmail.com*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการทางพิเศษแห่งประเทศไทยอยู่ระหว่างการศึกษาและติดตั้งระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-Lane Free Flow (M-Flow) ให้ครอบคลุมโครงข่ายทางพิเศษ เพื่อลดปัญหาการติดขัดบริเวณหน้าด่านทางพิเศษ ซึ่งการเปิดให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและสภาพการจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ บทความนี้นำเสนอการประเมินสภาพการจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง และเปรียบเทียบผลกระทบด้านการจราจรทั้งก่อนและหลังปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษเพื่อรองรับการให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow ในปีที่ 1 ปีที่ 5 และปีที่ 10 ทั้งช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน ผ่านโปรแกรม Aimsun จากผลการศึกษาพบว่าการเปิดให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow ของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดงในปีที่ 1 ปีที่ 5 และปีที่ 10 ทั้งช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วนจะสามารถลดความล่าช้า แถวคอย และเวลาการเดินทางลงได้เมื่อสัดส่วนผู้ใช้งานระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนผู้ใช้งานระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow มีผลโดยตรงต่อการบริหารจัดการจำนวนช่องจราจรบริเวณทางออกของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ

คำสำคัญ: ด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ, ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow, แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค

Abstract

At present, the Expressway Authority of Thailand (EXAT) is studying and installing Multi-Lane Free Flow (M-Flow) toll collection system over the expressway network in order to reduce the problem of congestion in front of the toll plazas. The opening of the M-Flow will effected to in the physical characteristics and traffic conditions in front of the toll plazas. This paper presents an assessment of the traffic condition of the Din Daeng toll plaza when using M-Flow system and compare the traffic impact before and after improving the physical characteristics of the toll plaza to support the service of the M-Flow toll collection system in the 1st year, 5th year, and 10th year, both during peak and off-peak hours through the Aimsun program. The study found that the opening of the M-Flow toll collection system service at Din Daeng toll plaza in the 1st year, 5th year, and 10th year, both during peak and off-peak hours, can reduce delay time, queue length, and travel time when the proportion of users of the M-Flow toll collection system increases. In addition, the proportion of M-Flow's users directly affects to the number of traffic lane managements at the exits of the toll plazas.

Keywords: Toll Plazas, Multi-Lane Free Flow (M-Flow) Toll System, Traffic Micro-Simulation Model

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) ได้เปิดให้บริการระบบทางพิเศษในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยมีทางพิเศษแล้วทั้งสิ้น 8 สายทาง ได้แก่ ทางพิเศษเฉลิมมหานคร ทางพิเศษศรีรัชส่วน ทางพิเศษฉลองรัช ทางพิเศษบูรพาวิถี ทางพิเศษอุดรรัถยา ทางพิเศษสายบางนา-อาจณรงค์ ทางพิเศษกาญจนาภิเษก (บางพลี-สุขสวัสดิ์) และทางพิเศษประจิมรัถยา รวมระยะทาง 224.6 กิโลเมตร โดยในปีงบประมาณ 2565 มีปริมาณจราจรบนทางพิเศษเฉลี่ย 1,559,491 คันต่อวัน [1] โดยกทพ. มีระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษ 2 ระบบคือ ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบเงินสด (Manual Toll Collection; MTC) และระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection; ETC) หรือบัตรอัตโนมัติ (Easy Pass) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปีเนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ทำให้ กทพ. ประสบปัญญาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ

จากการที่กรมทางหลวง (ทล.) ได้ศึกษาความเหมาะสมของการพัฒนาระบบจัดเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติรูปแบบใหม่ เพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรอย่างมีประสิทธิภาพ พบว่าแนวทางการปรับปรุงระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น ทั้งในรูปแบบช่องทางเดี่ยว (Single Lane Free Flow; SLFF) และหลายช่องทาง (Multi-lane Free Flow; MLFF) เป็นแนวทางที่เหมาะสมมากที่สุดในการแก้ปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่าน ดังนั้น กทพ. จึงได้พัฒนาระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบไม่มีไม่กั้น และเชื่อมกันเป็นระบบ Single Platform กับ ทล. ซึ่งต่อมาถูกเรียกระบบร่วมกันนี้ว่า "ระบบ M-Flow" แต่อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพของด่านเก็บค่าผ่านทางของ ทล. และ กทพ. มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาและออกแบบกายภาพของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่มีอยู่เดิมเพื่อกำหนดตำแหน่งช่อง M-Flow ที่เหมาะสม และดำเนินการประเมิน

สภาพการจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษในแต่ละด่าน โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค เพื่อให้แน่ใจว่าระบบ M-Flow ดังกล่าว จะช่วยส่งเสริมสภาพการจราจร และแก้ไขปัญญาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษของ กทพ. ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาพการจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง เมื่อเปิดให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-lane Free Flow (M-Flow) โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค
2. เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการจราจรด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษอื่น ๆ เมื่อเปิดให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-lane Free Flow (M-Flow)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

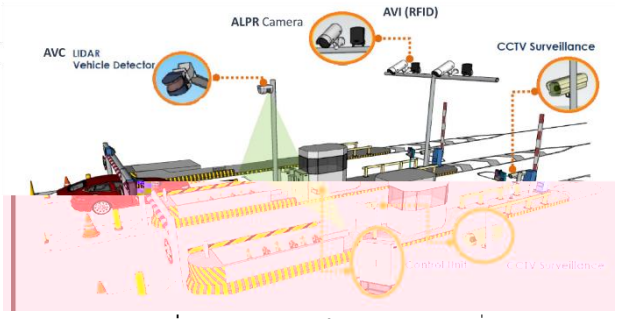
การวิจัยนี้เป็นการประเมินสภาพการจราจร และบริหารจัดการจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง เมื่อเปิดให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-lane Free Flow (M-Flow) โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

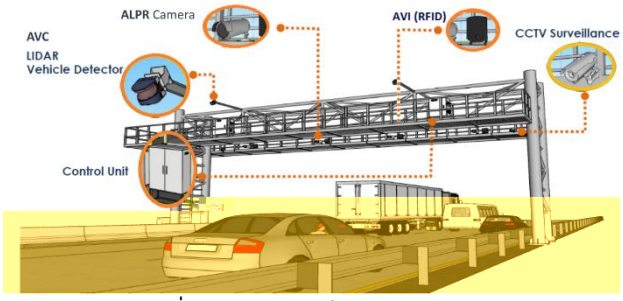
2.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow)

ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น หรือระบบ M-Flow เป็นระบบจัดเก็บค่าผ่านทางแบบใหม่ โดยนำเทคโนโลยี AI มาพัฒนาระบบจัดเก็บค่าผ่านทาง ด้วยระบบ Video Tolling และระบบตรวจจับป้ายทะเบียนรถอัตโนมัติ (Automated License Plate Recognition; ALPR) ร่วมกับระบบตรวจจับยานพาหนะอัตโนมัติ (Automatic Vehicle Identification; AVI) แบบ RFID (Radio Frequency Identification) เพื่อตรวจสอบยานพาหนะ และระบุตัวตนผู้ใช้ทาง ทำให้รถสามารถวิ่งผ่านด่านได้อย่างสะดวก คล่องตัว ไม่ต้องหยุดหรือชะลอรถ โดยระบบ M-Flow สามารถรองรับความเร็วได้ถึง 160 กม./ชม. และรองรับการใช้งานกับรถยนต์ทุกประเภทที่ได้รับอนุญาตให้วิ่งบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง และทางพิเศษ ทั้งรถยนต์ 4 ล้อ รถ 6 ล้อ และมากกว่า 6 ล้อขึ้นไป นอกจากนี้ยังอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ใช้บริการให้สามารถผ่านด่านโดยดำเนินการชำระค่าผ่านทางได้ภายหลังการใช้บริการ (Postpaid) [2-3]

สำหรับรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในระดับช่องทาง (Lane) ของระบบ M-Flow ในรูปแบบช่องทางเดี่ยว (Single Lane Free Flow; SLFF) และหลายช่องทาง (Multi-lane Free Flow; MLFF) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 ระบบ M-Flow ในรูปแบบช่องทางเดี่ยว (Single Lane Free Flow; SLFF)



รูปที่ 2 ระบบ M-Flow ในรูปแบบหลายช่องทาง (Multi-lane Free Flow; MLFF)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษในแต่ละรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าอัตราการให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบไม่มีไม้กั้น หรือระบบ M-Flow ในรูปแบบหลายช่องทาง (Multi-lane Free Flow; MLFF) สามารถให้บริการได้รวดเร็วกว่าระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบเงินสด (Manual Toll Collection; MTC) และระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection; ETC) ประมาณ 5 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ

ตารางที่ 1 อัตราการให้บริการระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษ [2-4]

รูปแบบระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษ	อัตราการให้บริการ (คันต่อชั่วโมง)
MTC	400
ETC	800
SLFF	1,200
MLFF	2,000

2.2 แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม Aimsun

แบบจำลองจราจรระดับจุลภาคเป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ [5] เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของรถแต่ละคันที่วิ่งบนโครงข่ายถนน โดยกำหนดกฎนิยามของพฤติกรรมการขับขี่ของรถ และประสิทธิภาพของรถแต่ละประเภท แบบจำลองจราจรระดับจุลภาคสามารถปฏิบัติการได้โดยการตั้งค่ารูปแบบโครงข่ายถนน การใส่ข้อมูลของรถที่เสมือนจริง การกำหนดแนวเส้นการเคลื่อนตัวของรถผ่านโครงข่ายถนน และทำการสรุปวิเคราะห์ผลของรถทั้งหมด เพื่อวัดประสิทธิภาพการจราจร และจัดทำนโยบายต่าง ๆ เพื่อแก้ไขต่อไป แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองจราจรระดับจุลภาคมีข้อจำกัด คือ ต้องใช้เวลามากในการสร้างแบบจำลองให้เสมือนจริง การใส่ข้อมูลที่ผิดพลาดเล็กน้อยอาจนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อนมาก ในปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองทางด้านการจราจรในระดับจุลภาคให้เลือกใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งแบบจำลองแต่ละแบบมีสมรรถนะในการจำลองเหตุการณ์ได้แตกต่างกัน การเลือกใช้งานจำเป็นจะต้องทำการประเมินถึงความเหมาะสมในการพัฒนาแบบจำลองให้น่าเชื่อถือ มีความยืดหยุ่น และให้ความถูกต้องเที่ยงตรงมากที่สุด ซึ่งโปรแกรมที่นิยมใช้งานกันมีหลากหลาย เช่น Aimsun NG CONTRAM CARFLO CORSIM HUTSIM INTEGRATION PARAMICS และ VISSIM เป็นต้น

โปรแกรม Aimsun NG [6] พัฒนาโดย J. Barcelo และ J.L. Ferrer ที่ the Polytechnic University of Catalunya ในเมือง Barcelona ปัจจุบันมีการพัฒนาต่อเนื่องและดูแลในเชิงการค้าโดย TSS–Transport Simulation Systems ซึ่งโปรแกรม Aimsun NG เป็นชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวางแผนการขนส่ง การจำลองการจราจรในระดับจุลภาค และการวิเคราะห์ข้อมูลการจราจรและความต้องการทางการจราจร โดยมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วนคือ

1. Aimsun Simulator สามารถจำลองสภาพการจราจรในเครือข่ายถนนได้หลายรูปแบบ เช่น ถนนในเมือง ทางด่วน (freeways) ทางหลวง (highways) ถนนวงแหวน และถนนที่มีการรวมกันของรูปแบบข้างต้น ซึ่งระบบสามารถแบ่งแยกชนิดของยานพาหนะ และผู้ขับขี่ได้โดยพฤติกรรมของยานพาหนะทุก ๆ คันในเครือข่ายถนนได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา

2. Aimsun Modeller ถูกออกแบบมาเพื่อให้นำไปใช้กับสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถนำเข้าและจัดการกับข้อมูลระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS, Geographic Information System) จากแหล่งข้อมูลหลาย ๆ แหล่งได้เช่น ESRI Tele Atlas และ NAVTEQ เป็นต้น

3. Aimsun Planner เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ความต้องการทางการจราจร โดยมีจุดประสงค์หลัก 2 ข้อคือ เพื่อสนับสนุนกระบวนการทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการคำนวณเมตริกการเดินทางต้นทาง-ปลายทาง (Origin-Destination Matrix) โดยวิเคราะห์ความต้องการทางการจราจรเพื่อการวางแผนการขนส่ง และทำแพล็ตฟอร์มการคำนวณสำหรับการจัดการของเมตริกการเดินทางต้นทาง-ปลายทางเพื่อสร้างข้อมูลเข้าสู่การจำลองในระดับจุลภาค

4. Aimsun Server เป็น Aimsun รุ่นที่ไม่มีส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI: Graphical User Interface) และสามารถเข้าถึงได้ผ่านทางเครือข่ายเมื่อมีความต้องการในการประมวลผลที่เร็วกว่าเวลาจริง เช่น เมื่ออยู่ในศูนย์ควบคุมกลางเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนการจัดการการจราจรก่อนที่จะมีการนำไปใช้จริง

จากองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน งานวิจัยนี้เลือกใช้ Simulator เพื่อสร้างแบบจำลอง โดยสามารถจำลองเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ สามารถจำลองรูปแบบของเครือข่ายได้หลากหลาย จำนวนยานพาหนะที่สามารถจำลองได้นั้นมีจำนวนมาก และสามารถใช้ในการวางแผนการจัดการจราจรได้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ธีรพจน์ ศิริไพโรจน์, เอกชัย สุมาลี และสุวิชาณ สุระบาล [7] ได้ศึกษาการแก้ไขปัญหาการติดขัดของกระแสจราจรบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 และหมายเลข 9 เนื่องจากความต้องการเดินทางบนทางหลวงพิเศษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณจราจรต่อความจุ (V/C) มากกว่า 1.0 ผ่านการใช้แบบจำลองสภาพจราจรเสมือนจริง จากผลการวิเคราะห์ด้านจราจรพบว่าหากนำระบบจัดเก็บค่าธรรมเนียมผ่านทางแบบ Multi-lane Free Flow มาใช้ที่ด่านลาดกระบังจะสามารถรักษาระดับการให้บริการที่ระดับ B จนถึงปี 2567 ซึ่งที่ระดับการให้บริการดังกล่าว จะทำให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางผ่านด่านเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำระบบดังกล่าวมาใช้ที่ด่านทับช้างจะทำให้ระดับการให้บริการจากระดับ F เปลี่ยนเป็นระดับ C ในปี 2567

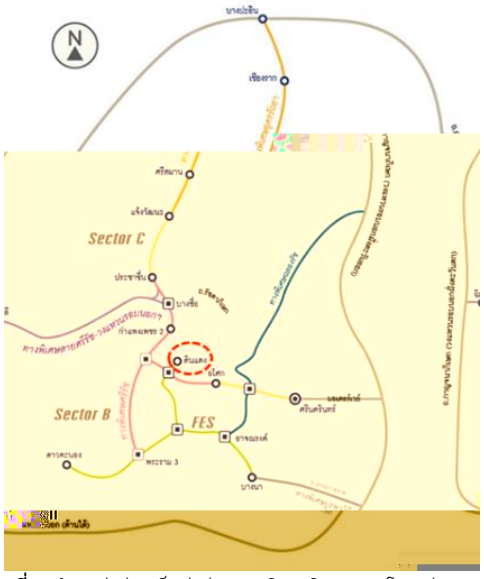
2. พรรณทิพา พันธ์ยิ้ม, ศิวัช ปัญญาชัยวัฒนากูล และเทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร [8] ได้ศึกษาการแก้ไขปัญหาการติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจตุโชติ ทางพิเศษฉลองรัช โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค AIMSUN เพื่อวิเคราะห์หาความเหมาะสมของการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ ให้สามารถรองรับช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น M-Flow และระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่มีอยู่เดิมทั้งช่องเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด และช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ (Easy Pass) รวมทั้งผลกระทบด้านจราจรต่าง ๆ จากผลลัพธ์ของแบบจำลองพบว่าควรจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง M-Flow จำนวน 2 ช่อง จะทำให้สภาพการจราจรหน้าด่านฯ คล่องตัวมากที่สุด และเพิ่มช่องทาง M-Flow ทีละ 1 ช่อง ภายหลังจากการให้บริการในปีที่ 3 และปีที่ 7 หรือมีสัดส่วนของผู้ใช้ระบบ M-Flow ร้อยละ 59 และ 76 เป็นต้นไป เพื่อประโยชน์สูงสุดแก่ผู้ใช้บริการทางพิเศษ

3. ธนาธร ธาราอุดม และ อำพล การุณสุนทวงษ์ [9] ได้ศึกษาการลดการติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางพัทยาของมอเตอร์เวย์สาย 7 โดยเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (7.00น.-8.00น.) เพื่อนำมาวิเคราะห์สภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม VISSIM โดยมีการกำหนดนโยบายเพิ่มช่องบริการอัตโนมัติ (M-Pass) ขึ้น 1 ช่องจราจรจากเดิม 2 ช่องจราจร และกำหนดเพิ่มจำนวนผู้ใช้ทางพิเศษที่จ่ายเงินแบบปกติ (เงินสด) เป็นวิธีการจ่ายเงินแบบอัตโนมัติ (M-Pass) เพิ่มจากจำนวนเดิม 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มช่องอัตโนมัติและการมีนโยบายสนับสนุนให้ผู้ใช้ทางพิเศษเปลี่ยนวิธีการจ่ายเงินแบบปกติเป็นแบบอัตโนมัติได้อย่างน้อย 10% สามารถลดความล่าช้าของของการให้บริการลงได้ 16 % และลดความยาวของแถวคอยรวมลงได้ 8% นอกจากนี้ยังสามารถแก้ปัญหาเรื่องความซับซ้อนในการบริการจัดการ และเงินงบประมาณที่น้อยกว่าระบบ M-Flow อีกด้วย

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา

การศึกษาครั้งนี้เลือกพื้นที่ศึกษาคือ ด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่เขตทางพิเศษเฉลิมมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดงบนโครงข่ายทางพิเศษ

3.2 การสำรวจด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ

การสำรวจด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ การสำรวจลักษณะทางกายภาพ และปริมาณจราจรขาเข้าด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษในช่วงเวลาเร่งด่วน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การสำรวจด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง

จากการสำรวจพบว่าด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดงเป็นด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษขนาดใหญ่ และมีปริมาณจราจรปานกลางกล่าวคือ จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางมากกว่า 8 ช่องจราจร แบ่งเป็นระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบเงินสด (Manual Toll Collection; MTC) จำนวน 7 ช่องจราจร และระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection; ETC) จำนวน 4 ช่องจราจร ส่งผลให้ค่าความจุโดยรวมของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดงเท่ากับ 6,000 คันต่อชั่วโมง และมีปริมาณจราจรอยู่ระหว่าง 3,000-5,000 คัน/ชั่วโมง ทำให้มีระดับการให้บริการ (Level of Service) อยู่ที่ระดับ C นอกจากนี้ด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดงมีสัดส่วนปริมาณผู้ใช้งานระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบเงินสดและแบบอัตโนมัติอยู่ที่ร้อยละ 55 และ 45 ตามลำดับ ความเร็วเฉลี่ยก่อนเข้าด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษเท่ากับ 63 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เวลาการให้บริการเฉลี่ยของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบเงินสดและแบบอัตโนมัติ

C

Ö ø Öïú0€P` ÷ß ó×€À• î Ö•ð• r ñ` îì Üó• ù

ท อก ' ⅔ป . ⅓ ระราม ผ่านทางห กห ร ปแบบ ร ป ซ

ยบ(อพ ด่านเก็บค ผ่านทางพิเศษจะ รวด

3.4.3 การปรับเทียบแบบจำลอง

เกณฑ์สำหรับการปรับเทียบแบบจำลองระดับจุลภาคให้มีความเสมือนกับสภาพจราจรจริงในการศึกษานี้ใช้เกณฑ์ของ Design Manual for Road and Bridge (DMRB) อ้างอิงเป็นเกณฑ์การปรับเทียบหลัก โดยมีการเปรียบเทียบปริมาณจราจร และความเร็วในการเดินทาง เนื่องจากเป็นเกณฑ์ที่ได้รับการยอมรับ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งการคำนวณค่า GEH [11] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

โดยที่ M = ค่าปริมาณจราจรจากแบบจำลอง
C = ค่าปริมาณจราจรจากข้อมูลสำรวจ

โดยทั่วไปการสร้างแบบจำลองการจราจรขั้นพื้นฐาน หากค่า GEH มีค่าน้อยกว่า 5.0 และความเร็วเฉลี่ยมีค่าความแตกต่าง ±20% จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสามารถนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนต่อไป สำหรับการศึกษานี้ค่า GEH แสดงในตารางที่ 2 และค่าความเร็วเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การปรับเทียบปริมาณจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วน และนอกเวลาเร่งด่วน

ช่วงเวลา	ช่องทาง	ประเภทรถ	ปริมาณจราจรเฉลี่ย (คันต่อชั่วโมง)		GEH (<5)
			จากสภาพจราจรจริง	จากแบบจำลอง	
เวลาเร่งด่วน	ETC	รถยนต์ 4 ล้อ	1,565	1,570	0.13
	MTC	รถยนต์ 4 ล้อ	1,785	1,791	0.14
	MTC	รถบรรทุก	63	64	0.13
นอกเวลาเร่งด่วน	ETC	รถยนต์ 4 ล้อ	1,237	1,243	0.17
	MTC	รถยนต์ 4 ล้อ	1,332	1,338	0.16
	MTC	รถบรรทุก	47	48	0.15

ตารางที่ 3 การปรับเทียบความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาเร่งด่วน และนอกเวลาเร่งด่วน

ช่วงเวลา	ช่องทาง	ประเภทรถ	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)		ความแตกต่าง (±20%)
			จากสภาพจราจรจริง	จากแบบจำลอง	
เวลาเร่งด่วน	ETC	รถยนต์ 4 ล้อ	67.71	67.65	0.09
	MTC	รถยนต์ 4 ล้อ	62.09	60.95	1.84
	MTC	รถบรรทุก	53.81	52.79	1.90
นอกเวลาเร่งด่วน	ETC	รถยนต์ 4 ล้อ	68.31	68.15	0.23
	MTC	รถยนต์ 4 ล้อ	63.83	62.62	1.90
	MTC	รถบรรทุก	55.79	55.17	1.11

3.4.4 สถานการณ์เพื่อการวิเคราะห์

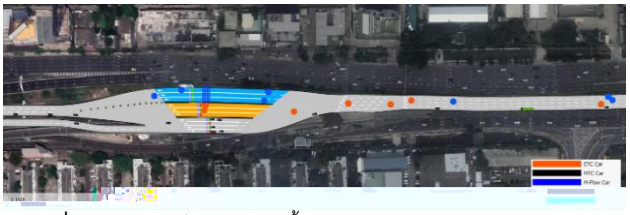
การศึกษานี้เป็นการพิจารณาสภาพการจราจรก่อนเข้าและออกจากด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง เมื่อมีการเปิดใช้งานระบบ M-Flow ในปี 2567 ตามสัดส่วนผู้ใช้ทางที่คาดว่าจะมาใช้ระบบ M-Flow ในปีที่ 1 ปีที่ 5 และปีที่ 10 ตามลำดับ กับรูปแบบด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษก่อนและหลังปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ ทั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน นอกจากนี้ยังมีวิเคราะห์สภาพการจราจรเมื่อมีการบริหารจัดการจราจรบริเวณทางออกที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งสถานการณ์ได้ดังนี้

1) กรณีใช้ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางที่มีอยู่ในปัจจุบัน (MTC และ ETC)



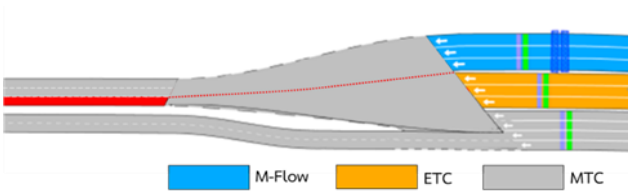
รูปที่ 9 ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางที่มีอยู่ในปัจจุบัน (MTC และ ETC)

2) กรณีใช้ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางทั้ง 3 รูปแบบ (MTC, ETC และ M-Flow)



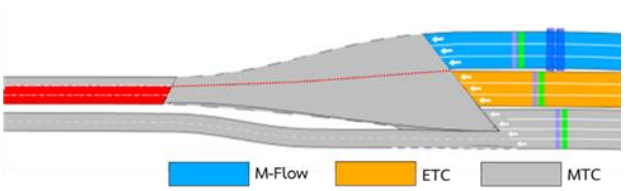
รูปที่ 10 ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางทั้ง 3 รูปแบบ (MTC, ETC และ M-Flow)

3) กรณีจำนวนช่องจราจรขาเข้าด่านสำหรับระบบ MTC และ ETC มี 7 ช่องจราจร และขาออกมี 1 ช่องจราจร และจำนวนช่องจราจรขาเข้าด่านสำหรับระบบ M-Flow มี 3 ช่องจราจร และขาออกมี 2 ช่องจราจร



รูปที่ 11 จำนวนช่องจราจรบริเวณทางออกของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ สำหรับ MTC และ ETC มี 1 ช่องจราจร และ M-Flow มี 2 ช่องจราจร

4) กรณีจำนวนช่องจราจรขาเข้าด่านสำหรับระบบ MTC และ ETC มี 7 ช่องจราจร และขาออกมี 2 ช่องจราจร และจำนวนช่องจราจรขาเข้าด่านสำหรับระบบ M-Flow มี 3 ช่องจราจร และขาออกมี 1 ช่องจราจร



รูปที่ 12 จำนวนช่องจราจรบริเวณทางออกของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษ สำหรับ MTC และ ETC มี 2 ช่องจราจร และ M-Flow มี 1 ช่องจราจร

3.4.5 ปริมาณจราจรที่ใช้ในแบบจำลอง

ปริมาณจราจรที่เป็นตัวแทนในการประเมินสภาพจราจรด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลาได้แก่ ช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน สำหรับการวิเคราะห์หาสัดส่วนผู้ใช้ทางที่เปลี่ยนมาใช้ระบบ M-Flow ได้ถูกคาดการณ์ปริมาณจราจรในปีที่ 1 ปีที่ 5 และปีที่ 10 ตามลำดับ จากอัตราการเติบโตของปริมาณจราจรต่อปีของทางพิเศษเฉลิมมหานครในช่วงปี 2554-2562 พบว่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 8.55 ต่อปี [1] และการคาดการณ์สัดส่วนปริมาณผู้ใช้ระบบ M-Flow [12] ในปีที่ 1 มีค่าร้อยละ 31.30 และจากข้อมูลอัตราการเพิ่มขึ้นของผู้ใช้งานระบบ Easy Pass ในช่วงปี 2554-2558 ซึ่งเป็น 5 ปีแรกของการเปิดใช้บริการระบบเพิ่มขึ้น

เฉลี่ยร้อยละ 4.7 ต่อปี และในช่วงปี 2559-2562 ซึ่งเป็นช่วงหลังจากเปิดบริการไปแล้ว 5 ปี เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.7 ต่อปี แต่อย่างไรก็ตามระบบ M-Flow เป็นระบบชำระค่าผ่านทางใหม่ที่ยังไม่เคยถูกใช้มาก่อนบนโครงข่ายทางพิเศษ ทำให้ผู้ใช้ทางไม่คุ้นเคยกับระบบดังกล่าว ดังนั้นเพื่อให้สถานการณ์ในช่วงเวลาต่าง ๆ มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น การศึกษาครั้งนี้จึงได้กำหนดขอบล่างและขอบบนของสัดส่วนผู้ใช้งาน M-Flow โดยปริมาณจราจรในแต่ละสถานการณ์ของปีที่ 1 ปีที่ 5 และปีที่ 10 ช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน [13] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ปริมาณจราจรด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง ช่วงเวลาเร่งด่วน (คัน/ชั่วโมง)

การชำระเงิน	ETC	MTC		M-Flow	
ประเภทรถ	รถยนต์ 4 ล้อ	รถยนต์ 4 ล้อ	รถบรรทุก	รถยนต์ 4 ล้อ	รถบรรทุก
กรณีไม่มีโครงการ					
ปีที่ 1	1,581	1,811	63	-	-
ปีที่ 5	2,195	2,515	88	-	-
ปีที่ 10	3,080	3,529	124	-	-
กรณีมีโครงการ					
ปีที่ 1					
M-Flow 20.00%	1,265	1,449	51	675	19

M-

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สภาพจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง ช่วงเวลาเร่งด่วน (ต่อ)

ผลลัพธ์	ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ความยาวแถวคอย (คัน)	เวลาการเดินทาง (วินาที/กิโลเมตร)
ปีที่ 10				
M-Flow 50.00%	199.0	36.2	155.2	213.08
M-Flow 58.64%	114.8	52.4	98.5	140.74
M-Flow 70.00%	20.1	62.8	4.5	59.72

การทดสอบประสิทธิภาพด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง นอกช่วงเวลาเร่งด่วน ทั้งก่อนปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ (กรณีไม่โครงการ) และหลังปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ (กรณีโครงการ) สำหรับประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow พบว่ากรณีไม่โครงการในช่วงเวลาดังกล่าว มีค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ค่อนข้างน้อย เนื่องด้วยปริมาณจราจรที่เบาบางกว่าช่วงเวลาเร่งด่วน ส่งผลให้กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงรูปแบบด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจะส่งผลให้ค่าความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 12.1 วินาที/คัน แต่อย่างไรก็ตามค่าความล่าช้ายังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปีเช่นเดียวกัน ซึ่งในปีที่ 10 จะมีค่าความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 16.9 วินาที/คัน แต่เมื่อมีการประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow จะส่งผลให้ค่าความล่าช้า เมื่อเทียบในช่วงปีเดียวกัน (ปีที่ 10) และมีสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ถึง 70% เหลือ 6.7 วินาที/คัน จากรูปแบบด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่มีเพียงระบบ MTC และ ETC ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์สภาพจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง นอกช่วงเวลาเร่งด่วน

ผลลัพธ์	ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ความยาวแถวคอย (คัน)	เวลาการเดินทาง (วินาที/กิโลเมตร)
กรณีไม่มีโครงการ				
ปีที่ 1	12.1	65.8	3.7	55.07
ปีที่ 5	14.0	64.1	6.2	56.66
ปีที่ 10	16.9	61.8	10.0	59.13
กรณีมีโครงการ				
ปีที่ 1				
M-Flow 20.00%	13.1	67.3	3.3	50.21
M-Flow 31.30%	9.2	71.4	2.5	51.64
M-Flow 40.00%	7.9	73.4	2.2	50.21
ปีที่ 5				
M-Flow 40.00%	27.8	62.3	4.9	67.16
M-Flow 50.13%	8.1	73.8	2.5	50.14
M-Flow 60.00%	6.5	75.9	1.9	48.41
ปีที่ 10				
M-Flow 50.00%	11.7	70.8	3.6	53.14
M-Flow 58.64%	7.9	74.4	2.7	49.58
M-Flow 70.00%	6.7	75.9	1.7	48.2

4.2 ผลการวิเคราะห์สภาพจราจรของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง (กรณีจำนวนช่องจราจรบริเวณทางออกของด่านฯ สำหรับช่อง MTC และ ETC มี 2 ช่องจราจร และช่อง M-Flow มี 1 ช่องจราจร)

การทดสอบประสิทธิภาพด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง ในช่วงเวลาเร่งด่วน ทั้งก่อนปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ (กรณีไม่โครงการ) และหลังปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ (กรณีโครงการ) สำหรับประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow พบว่ากรณีไม่มีโครงการจะส่งผลให้ค่าความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 15.4 วินาที/คัน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี ซึ่งในปีที่ 10 จะมีค่าความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 192.9 วินาที/คัน แต่เมื่อมีการประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow จะส่งผลให้ค่าความล่าช้า เมื่อเทียบในช่วงปีเดียวกัน (ปีที่ 10) และมีสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ถึง 70% เหลือ 20.1 วินาที/คัน จากรูปแบบด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่มีเพียงระบบ MTC และ ETC ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์สภาพจราจรของด่านฯ ดินแดง ช่วงเวลาเร่งด่วน

ผลลัพธ์	ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ความยาวแถวคอย (คัน)	เวลาการเดินทาง (วินาที/กิโลเมตร)
กรณีไม่มีโครงการ				
ปีที่ 1	15.4	63.1	7.3	57.96
ปีที่ 5	20.3	59.4	14.8	62.13
ปีที่ 10	192.9	21.6	95.8	209.93
กรณีมีโครงการ				
ปีที่ 1				
M-Flow 20.00%	13.3	66.8	5.4	50.80
M-Flow 31.30%	9.5	71.1	3.3	51.90
M-Flow 40.00%	8.6	72.6	3.1	50.80
ปีที่ 5				
M-Flow 40.00%	11.8	69.7	6.0	53.53
M-Flow 50.13%	9.3	72.3	3.8	51.11
M-Flow 60.00%	8.5	73.6	2.8	50.09
ปีที่ 10				
M-Flow 50.00%	199.0	36.2	155.2	213.08
M-Flow 58.64%	114.8	52.4	98.5	140.74
M-Flow 70.00%	20.1	62.8	4.5	59.72

การทดสอบประสิทธิภาพด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง นอกช่วงเวลาเร่งด่วน ทั้งก่อนปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ (กรณีไม่โครงการ) และหลังปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ (กรณีโครงการ) สำหรับประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow พบว่ากรณีไม่โครงการในช่วงเวลาดังกล่าว มีค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ค่อนข้างน้อย เนื่องด้วยปริมาณจราจรที่เบาบางกว่าช่วงเวลาเร่งด่วน ส่งผลให้กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงรูปแบบด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจะส่งผลให้ค่าความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 12.1 วินาที/คัน แต่อย่างไรก็ตามค่าความล่าช้ายังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปีเช่นเดียวกัน ซึ่งในปีที่ 10 จะมีค่าความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 16.9 วินาที/คัน แต่เมื่อมีการประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow จะส่งผลให้ค่าความล่าช้า เมื่อเทียบในช่วงปีเดียวกัน (ปีที่ 10) และมีสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ถึง 70% เหลือ 6.7 วินาที/คัน จากรูปแบบด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่มีเพียงระบบ MTC และ ETC ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์สภาพจราจรของด่านฯ ดินแดง นอกช่วงเวลาเร่งด่วน

ผลลัพธ์	ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ความยาวแถวคอย (คัน)	เวลาการเดินทาง (วินาที/กิโลเมตร)
กรณีไม่มีโครงการ				
ปีที่ 1	12.1	65.8	3.7	55.07
ปีที่ 5	14.0	64.1	6.2	56.66

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์สภาพจราจรของด่านฯ ดินแดง นอกช่วงเวลาเร่งด่วน (ต่อ)

ผลลัพธ์	ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ความยาวแถวคอย (คัน)	เวลาการเดินทาง (วินาที/กิโลเมตร)
ปีที่ 10	16.9	61.8	10.0	59.13
กรณีมีโครงการ				
ปีที่ 1				
M-Flow 20.00%	13.1	67.3	3.3	50.21
M-Flow 31.30%	9.2	71.4	2.5	51.64
M-Flow 40.00%	7.9	73.4	2.2	50.21
ปีที่ 5				
M-Flow 40.00%	27.8	62.3	4.9	67.16
M-Flow 50.13%	8.1	73.8	2.5	50.14
M-Flow 60.00%	6.5	75.9	1.9	48.41
ปีที่ 10				
M-Flow 50.00%	11.7	70.8	3.6	53.14
M-Flow 58.64%	7.9	74.4	2.7	49.58
M-Flow 70.00%	6.7	75.9	1.7	48.

[2] Zhang, B., Li, J., Zhang, M., Li, Q., Xue, J., Zhang, W., Gao,W., H, B. and Yu, X. (2013). *Multi-Lane Free Flow Electronic Toll Collection System Arranged on Side of Road*. Beijing Sutong Technology Co., Ltd., pp.1-16

[3] Ru, N., He, S., Zhou, W., Huang, R., Zhang, J. and Wu, R. (2015). *Multi-Lane Free Flow (MLFF) Electronic Toll Collection (ETC) Lane System and License Plate Identification Method*. Beijing Shenzhen Genvict Technologies Co., Ltd., pp.1-14

[4] การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (2558). *คู่มือการใช้บริการทางพิเศษ*. การทางพิเศษแห่งประเทศไทย.

[5] ITS, University of Leeds (GB) (2000). *SMARTEST: Final Report for Publication*.

[6] Transport Simulation Systems (2006). *AIMSUN' s Microsimulator User's Manual Version 5.1*.

[7] ธีรพจน์ ศิริไพโรจน์, เอกชัย สุมาลี และสุวิชาณ สุระบาล (2559). งานศึกษาด้านจราจรเพื่อจัดทำแผนแม่บทด้านการพัฒนาระบบจัดเก็บค่าธรรมเนียมบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง. *วิศวสาร วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, หน้า 109-120.

[8] พรรณทิพา พันธ์ยิ้ม, ศิวัช ปัญญาชัยวัฒนากูล และเทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (2564). การจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow). *การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*, 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า TRL-03-1-TRL-03-8.

[9] ธนาทร ธาราอุดม และ อำพล การุณสุนทวงษ์ (2564). การพัฒนาแบบจำลองจราจรระดับจุลภาคสำหรับด่านเก็บค่าผ่านทาง กรณีศึกษา ด่านพัทยามอเตอร์เวย์สาย 7. *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 18*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 8-9 ธันวาคม 2564, หน้า 400-410.

[10] ธนุตม์ กล่อมระนก, ธนพร กรีวงษ์, เสาวนี ศรีสุวรรณ, นันทวรรณ พิทักษ์พานิช และ เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (2565). การศึกษาปัจจัยการจัดกลุ่มและแนวคิดการออกแบบกายภาพของด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-Lane Free Flow (M-Flow) บนทางพิเศษฉลองรัช. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า TRL11-1-TRL11-9.

[11] National Highways (2021). Design manual for roads and bridges.

[12] เสาวนี ศรีสุวรรณ, ธนุตม์ กล่อมระนก, ธนพร กรีวงษ์, ศิวัช ปัญญาชัยวัฒนากูล และ เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (2565). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผู้ใช้ทางพิเศษต่อการใช้งานระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-Lane Free Flow (M-Flow) บนโครงข่ายทางพิเศษ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า TRL39-1-TRL39-8.

[13] ธนพร กรีวงษ์, ธนุตม์ กล่อมระนก, เสาวนี ศรีสุวรรณ, ศิวัช ปัญญาชัยวัฒนากูล และ เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร (2565). การศึกษาผลกระทบด้านจราจรจากการเปิดให้บริการระบบจัดเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) บนทางพิเศษฉลองรัช. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า TRL22-1-TRL22-8.