การประยุกต์ใช้วัฏจักรการขับขี่ ในการประเมินมลพิษระหว่างช่องเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสดและแบบอิเล็กทรอนิกส์: กรณีศึกษาทางยกระดับอุตราภิมุข

Application of Driving Cycle for Emission Assessment between Cash and Electronic Toll Collection Systems: A Case Study of the Utraphimuk Elevated Tollway

นพคุณ บุญกระพือ[1,*] ยศวัตน์ กมล[2] นพพล โพธิ์ชี[3] ศักดิ์ดา พรรณไวย[4] รัฐพงศ์ มีสิทธิ์[5] และ เหมันต์ ทิพย์ปัญญา[6]

[1,5,6] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
[2,3,4] บริษัท ทางยกระดับดอนเมือง จำกัด (มหาชน) กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: noppakun@eng.buu.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเก็บค่าผ่านทางบนทางยกระดับอุตราภิมุขแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบเงินสดและระบบอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการขับขี่ โดยเฉพาะการชะลอและเร่งความเร็ว ส่งผลให้ระดับการปล่อยมลพิษแตกต่างกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการดำเนินงานของทั้งสองระบบ โดยประยุกต์ใช้วัฏจักรการขับขี่กรุงเทพมหานครร่วมกับระบบ Camera Analytics ในการเก็บข้อมูล ณ ด่านเก็บค่าผ่านทาง 9 แห่งบนทางยกระดับอุตราภิมุข โดยใช้ความเร็วของรถเป็นตัวชี้วัดการคำนวณปริมาณมลพิษจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_X) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ภายใต้ทั้งสภาวะการจราจรติดขัด (Congested) และไม่ติดขัด (Uncongested) ผลการศึกษาพบว่า ระบบ ETC สามารถลดการปล่อยมลพิษได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยตลอดหนึ่งปี สามารถลด CO_2 ได้ 71.97 ตัน, CO ได้ 26.41 กิโลกรัม, NO_X ได้ 20.55 กิโลกรัม และ HC ได้ 2.41 กิโลกรัม ซึ่งเป็นผลจากการลดความถี่ของการหยุดและเร่งความเร็วบริเวณด่านฯ ในขณะที่ระบบเงินสดก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษสูงกว่า เนื่องจากรถต้องชะลอและหยุดเพื่อชำระค่าผ่านทาง งานวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของระบบ ETC ในการลดมลพิษทางอากาศในเขตเมือง และสนับสนุนการกำหนดนโยบายเพื่อลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนผ่านการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานการขนส่ง อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์เบนซินเท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดการจราจรที่มีอยู่ ณ ปัจจุบันยังไม่สามารถแยกประเภทการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้

คำสำคัญ: ทางยกระดับอุตราภิมุข, ระบบเก็บค่าผ่านทาง, วัฏจักรการขับขี่ในกรุงเทพมหานคร, มลพิษทางอากาศ

Abstract

Currently, toll collection technology on the Uttaraphimuk Elevated Tollway is divided into two systems: manual toll collection (MTC) and electronic toll collection (ETC), each of which influences driver behavior-particularly in deceleration and acceleration patterns-resulting in different levels of pollutant emissions. This study aims to assess the environmental impact of both systems by applying the Bangkok Driving Cycle in combination with a camera analytics system to collect vehicle speed data at nine toll plazas along the Uttaraphimuk Elevated Tollway. Vehicle speed was used as the key indicator to estimate emissions of carbon dioxide (CO_2), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_X), and hydrocarbons (HC) under both congested and uncongested traffic conditions. The results indicate that the ETC system significantly reduces emissions. Over the course of one year, it can reduce CO_2 by 71.97 tons, CO by 26.41 kilograms, NO_X by 20.55 kilograms, and HC by 2.41 kilograms. These reductions result from minimizing stop-and-go behavior near toll plazas. In contrast, the MTC system generates higher emissions due to the need for vehicles to decelerate and stop for toll payment. This study highlights the potential of the ETC system to reduce urban air pollution and support sustainable environmental policymaking through improved transportation infrastructure. However, the study focuses solely on gasoline-powered vehicles, as current traffic monitoring technologies cannot accurately distinguish between different vehicle fuel types.

Keywords: Utraphimuk elevated tollway, Toll collection system, Bangkok driving cycle, Air pollution

1. คำนำ

บริษัท ทางยกระดับดอนเมือง จำกัด (มหาชน) ได้รับสัมปทานจากกรมทางหลวง เพื่อให้บริการทางยกระดับอุตราภิมุข มีภารกิจในการพัฒนาคุณภาพและประสิทธิภาพทางยกระดับอุตราภิมุขให้มีความทันสมัย สะดวก รวดเร็ว และปลอดภัย สำหรับการเดินทาง ด้วยระบบจัดการที่มีประสิทธิภาพ และยึดมั่นในความรับผิดชอบต่อส่วนรวมเพื่อเป็นการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอนาคต

หนึ่งในแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนที่ทางบริษัทฯ ได้เล็งเห็นความสำคัญ คือ Tollway Green Way ที่จะเป็นการช่วยยกระดับสิ่งแวดล้อม โดยบริษัทได้ดำเนินการในการป้องกันและควบคุมมลพิษเพื่อให้ชุมชนและสังคมมีสุขภาพและชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น โดยในเบื้องต้นทางบริษัทได้มีการตรวจวัดปริมาณมลพิษที่บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางเป็นประจำและได้ดำเนินมาตรการต่าง ๆ เพื่อลดปริมาณของมลพิษลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเพื่อให้ทราบถึงผลประโยชน์ของทางยกระดับอุตราภิมุขในภาพรวมด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นบริษัทมีความตั้งใจที่ให้มีโครงการศึกษาผลประโยชน์ทางด้านการลดมลพิษจากการใช้ด่านเก็บค่า

ผ่านทางระบบอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) ขึ้น เพื่อนำผลการศึกษาไปเผยแพร่ต่อสังคมและนำไปใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของด่านเก็บค่าผ่านทางต่อไป

ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสดมักก่อให้เกิดความล่าช้าและการติดขัดบริเวณหน้าด่านเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณสูง ในขณะที่ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) สามารถลดความล่าช้าและเพิ่มความคล่องตัว ทำให้ปริมาณการปล่อย CO_2 ลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการลดลงของมลพิษยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณจราจร รูปแบบของด่านเก็บค่าผ่านทาง ฯลฯ นอกจากนี้ พฤติกรรมการขับขี่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับระดับการปล่อยมลพิษของยานพาหนะ โดยเฉพาะบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางซึ่งมักเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างฉับพลัน การเร่งและหยุดรถบ่อยครั้งนำไปสู่การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่มีประสิทธิภาพ และเพิ่มปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมา งานวิจัยของ Barth และ Boriboonsomsin [9] แสดงให้เห็นว่า สภาพการจราจรติดขัดและพฤติกรรมการขับแบบหยุด–เร่ง (Stop-and-go) มีผลต่อการปล่อย CO_2 และมลพิษอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับแนวทางของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (EPA) ที่ระบุว่าความเร็วรถและลักษณะการขับขี่ในแต่ละช่วง (เร่ง, ชะลอ, คงที่, หยุด) มีผลโดยตรงต่อมลพิษจากปลายท่อไอเสีย (Tailpipe emissions) ทั้ง CO, NO_x, HC และ PM ซึ่งแนวคิดเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นกรอบทฤษฎีของงานวิจัยนี้ เพื่อเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการขับขี่กับระดับการปล่อยมลพิษในระบบเก็บค่าผ่านทางแต่ละประเภท

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

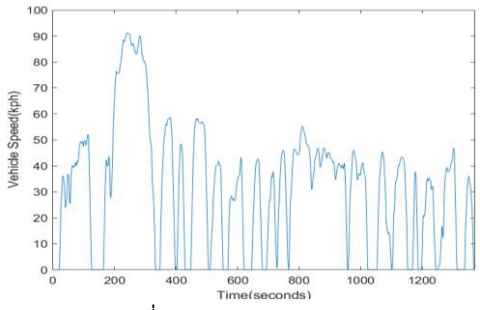
2.1 วัฏจักรการขับขี่ (Driving cycle)

วัฏจักรการขับขี่ (Driving Cycle) คือ ชุดข้อมูลความเร็วของยานพาหนะเมื่อเทียบกับเวลาถูกกำหนดโดยความเร็วเริ่มต้นและความเร็วสุดท้ายในแต่ละส่วนของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ความเร็วในการเข้าและออกจากการเดินทาง ความเร็วในการข้ามทางแยก ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแถว และเวลาหรือระยะทางในการเร่งความเร็วและการชะลอความเร็ว ใช้ในการประเมินการใช้พลังงานของยานพาหนะในวัฏจักรขับขี่ องค์ประกอบหลักของวัฏจักรการขับขี่ ได้แก่ 1) ความเร็วคงที่ (Cruise) 2) การลดความเร็ว (Deceleration) 3) หยุดนิ่ง (Idling) 4) การเร่งความเร็ว (Acceleration)

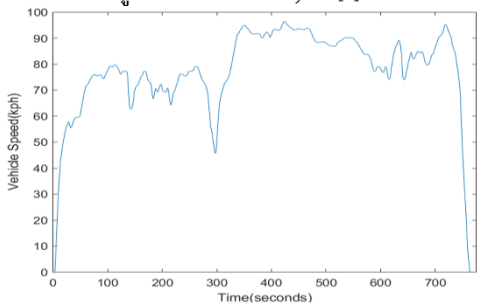
วัฏจักรการขับขี่มีมาตรฐานหลายประเภทซึ่งมักจะถูกกำหนดแตกต่างกันในแต่ละประเทศ ความแตกต่างเหล่านี้มักจะเกิดจากสภาพแวดล้อมในการขับขี่ที่แตกต่างกัน เช่น การจราจร สภาพถนน และสภาพอากาศในแต่ละประเทศ โดยวัฏจักรการขับขี่สามารถนำไปใช้หาค่าการปล่อยมลพิษของยานพาหนะ (Emission Rate) และ วัดอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption) [1]

2.1.1 รูปแบบการขับขี่มาตรฐานของ EPA (EPA Drive Cycles)

สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency: EPA) ได้กำหนดรูปแบบการขับขี่มาตรฐานที่ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการปล่อยมลพิษของยานพาหนะภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้ในห้องปฏิบัติการ รูปแบบการขับขี่ที่นิยมใช้มี 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) แสดงในรูปที่ 1 และ HWFET (Highway Fuel Economy Test) แสดงในรูปที่ 2 โดยรูปแบบ UDDS ใช้จำลองพฤติกรรมการขับขี่ในเขตเมือง ซึ่งมีลักษณะของการหยุดและออกตัวบ่อยครั้ง สะท้อนถึงสภาพการจราจรที่มีความหนาแน่น ความเร็วเฉลี่ยของการขับขี่ในรูปแบบนี้อยู่ที่ประมาณ 31.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ขณะที่ HWFET ใช้จำลองการขับขี่บนทางหลวงที่มีความเร็วคงที่มากกว่า โดยมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 77.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งช่วยประเมินสมรรถนะของยานพาหนะในสภาพการใช้งานต่อเนื่องและเร็วขึ้น [2]



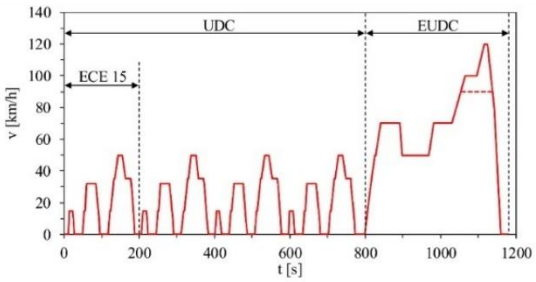
รูปที่ 1 UDDS drive cycle [2]



รูปที่ 2 HWFET drive cycle [2]

2.1.2 รูปแบบการขับขี่ NEDC (New European Driving Cycle)

รูปแบบการขับขี่แบบยุโรปใหม่ (NEDC) เป็นมาตรฐานที่ใช้ในสหภาพยุโรปมายาวนาน เพื่อทดสอบการปล่อยมลพิษและการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ โดย NEDC ประกอบด้วย 2 ช่วงหลัก ได้แก่ 1) Urban Driving Cycle (UDC) แทนสภาพการขับขี่ในเมือง และ 2) Extra Urban Driving Cycle (EUDC) แทนสภาพถนนชนบทหรือทางหลวง ช่วง UDC จะเกิดจากการทำซ้ำของรูปแบบ ECE-15 ซึ่งประกอบด้วยช่วงหยุดนิ่ง การเร่งความเร็วแบบคงที่ การขับคงที่ และการชะลอความเร็วแบบคงที่ รูปที่ 3 แสดง NEDC Drive Cycle [3]

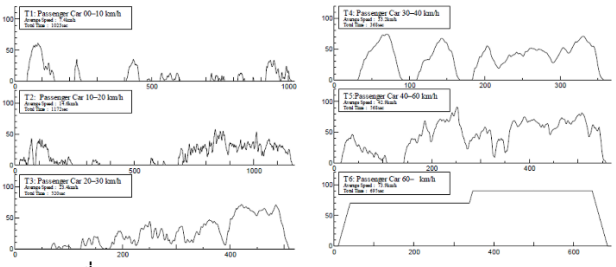


รูปที่ 3 NEDC Drive Cycle [3]

2.2 วัฏจักรการขับขี่ในกรุงเทพฯ (Bangkok Driving Cycle)

วัฏจักรการขับขี่ (Driving cycle) ในกรุงเทพฯ ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นโดยกรมควบคุมมลพิษ ในปี 2004 และได้ถูกนำไปใช้และอ้างอิงด้านการประเมินมลพิษเป็นจำนวนมาก โดยข้อมูลในการศึกษาพัฒนาวัฏจักรการขับขี่ในกรุงเทพฯ นั้น ได้มีการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลที่นำมาทดสอบ (Tested vehicles) เพื่อหาค่าอัตราการปล่อยมลพิษจำนวน 50 คัน มีการจดขึ้นทะเบียนระหว่าง ค.ศ. 1983–2004 มีการใช้เชื้อเพลิงทั้ง Gasoline CNG และ LPG และยังได้มีการทดสอบรถบรรทุกขนาดเล็ก (Light Duty truck) จำนวน 30 คัน (1988–2003) ที่มีการใช้เชื้อเพลิงดีเซล (Diesel) Bangkok

Driving Cycle สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ถูกจัดกลุ่มตามช่วงความเร็วเฉลี่ย T1-T6 ดังแสดงในรูปที่ 4 และตารางที่ 1 [4]



รูปที่ 4 Bangkok Driving Cycle for Passenger Car (T1-T6) [4]

ตารางที่ 1 การจัดกลุ่มความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ส่วนบุคคล [4]

รูปแบบการขับขี่	ช่วงความเร็วเฉลี่ย (km/h)	หมายเหตุ
T1	0-10	สภาพการจราจรติดขัด
T2	10-20	จราจรหนาแน่นระดับปานกลาง
T3	20-30	เขตเมืองทั่วไป
T4	30-40	ถนนสายรองหรือถนนโล่ง
T5	40-60	ถนนหลักที่มีจังหวะขับต่อเนื่องได้
T6	มากกว่า 60	ทางด่วนหรือถนนสายหลักในชั่วโมงที่ไม่เร่งด่วน

2.3 ระบบเก็บค่าผ่านทางของทางยกระดับอุตราภิมุขในปัจจุบัน

ปัจจุบันทางยกระดับอุตราภิมุขได้มีระบบการเก็บค่าผ่านทาง 2 ระบบ ได้แก่

2.3.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (Manual Toll Collection; MTC) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่ผู้ใช้ทางจำเป็นต้องจอดยานพาหนะให้หยุดนิ่ง เพื่อชำระเงินสดให้กับพนักงานในตู้เก็บค่าผ่านทาง

2.3.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection; ETC) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่ผู้ใช้ทางชะลอความเร็วของยานพาหนะจนเกือบหยุดนิ่งเพื่อชำระเงินผ่าน Easy Pass ซึ่งเป็นระบบการชำระเงินแบบอัตโนมัติ

2.4 มลพิษจากยานยนต์ (Vehicle emissions)

รถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นแหล่งสำคัญของมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะมลพิษที่ปล่อยออกจากท่อไอเสียระหว่างกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (tailpipe emissions) แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ ก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้โดยตรง ก๊าซเหล่านี้มีส่วนสำคัญในการเพิ่มภาวะโลกร้อน มลพิษอีกกลุ่มหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์โดยตรง ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เป็นพิษเมื่อสูดดมในปริมาณมาก ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) ที่สามารถเข้าสู่ปอดและระบบไหลเวียนโลหิต ไฮโดรคาร์บอน (HC) ซึ่งบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ปริมาณการปล่อยมลพิษเหล่านี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ประเภทของเชื้อเพลิง เทคโนโลยีของเครื่องยนต์ ความเร็วในการขับขี่ พฤติกรรมการขับขี่ และสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะในสภาพการจราจรที่ติดขัด การเร่งและเบรกบ่อยครั้งส่งผลให้การปล่อยมลพิษสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [5]

รูปที่ 5 การเกิดมลพิษจากรถยนต์ [5]

2.5 Camera Analytics System

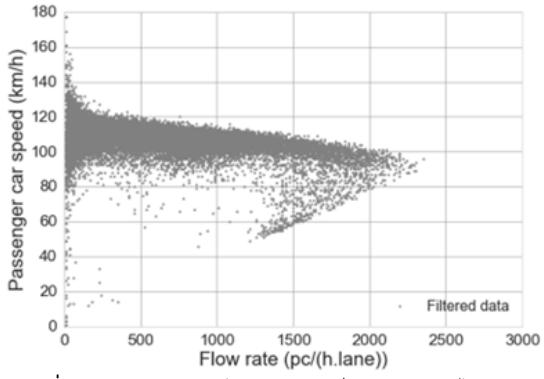
Camlytics เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์วิดีโอจากกล้องวงจรปิด (Camera Analytics System) และอุปกรณ์บันทึกวิดีโออื่น ๆ โดยเน้นการตรวจจับกิจกรรม การนับจำนวนคน ยานพาหนะ หรือวัตถุต่าง ๆ ในพื้นที่ที่มีการติดตั้งกล้อง รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างซอฟต์แวร์ Camlytics [6]

รูปที่ 6 ตัวอย่างการใช้ซอฟต์แวร์ Camlytics

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหล (Speed and Flow) มีลักษณะเป็นกราฟพาราโบลาตะแคงซ้าย กราฟสามารถแบ่งครึ่งได้ 2 ส่วน ส่วนบนเรียกว่าส่วนไม่ติดขัด (Un congestion) เมื่อค่าอัตราการไหลน้อย ความเร็วจะเข้าใกล้ความเร็วอิสระ (Free flow speed, u_f) เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความเร็วจะลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้น จนถึงค่าอัตราการไหลสูงสุด (Maximum flow, q_{max}) ซึ่งเป็นจุดวกกลับของกราฟ ส่วนล่างเรียกว่าส่วนติดขัด (Congestion) เป็นส่วนที่ความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเป็นศูนย์ [7]

จากการศึกษาของ Oliveira, G.M. de และ Cunha, A.L. [8] ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 7

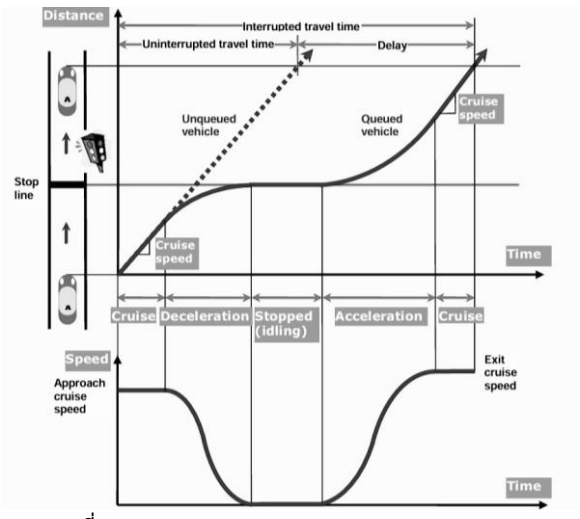


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหล [8]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Barth และ Boriboonsomsin [9] ได้ศึกษาผลกระทบของการจราจรติดขัดต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยใช้แบบจำลองการปล่อยเชิงจุลภาค (Comprehensive Modal Emissions Model – CMEM) ร่วมกับข้อมูลการขับขี่จริงที่เก็บจาก GPS ของยานพาหนะในเขตแคลิฟอร์เนียตอนใต้ ผลการศึกษาพบว่าการจราจรที่มีความเร็วเฉลี่ยต่ำกว่าประมาณ 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นลักษณะของสภาพติดขัดทั่วไป ส่งผลให้การปล่อย CO_2 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้เสนอแนวทางลดการปล่อยมลพิษจากภาคขนส่งผ่าน 3 กลยุทธ์หลัก ได้แก่ 1) การบรรเทาความแออัด เช่น การใช้ระบบ ramp metering 2) การจัดการความเร็วให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และ 3) การทำให้การจราจรไหลลื่น เช่น การลดพฤติกรรมหยุด–เร่งบ่อยครั้งซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษหลัก จากการจำลองพบว่า หากสามารถทำให้การจราจรไหลลื่นขึ้นได้จริง อาจช่วยลดการปล่อย CO_2 ได้สูงสุดถึง 45% ในบางช่วงความเร็ว โดยเฉพาะในสภาพที่มีความหนาแน่นสูง งานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่า การจัดการจราจรอย่างเหมาะสมสามารถมีบทบาทสำคัญในการลดการปล่อยมลพิษจากยานยนต์ในระยะสั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Akçelik, R. and Besley, M. [10] พัฒนารูปแบบการคำนวณต้นทุนการดำเนินงาน การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษของยานพาหนะโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาในซอฟต์แวร์ SIDRA และ MOTION ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพจราจรและประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมในระบบขนส่งในระดับจุลภาค (microscopic) และมหภาค (macroscopic) แบบจำลอง SIDRA ใช้โครงสร้างแบบ 4 โหมด (เร่ง ชะลอ วิ่งคงที่ และหยุดนิ่ง) ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษจากข้อมูลของรูปแบบการจราจรที่แตกต่างกัน ขณะที่ MOTION ใช้แบบจำลองเชิงเวลาจริง (instantaneous model) ซึ่งสามารถจำลองการขับขี่ตาม driving cycle ที่เก็บจากข้อมูลจริง เช่น จาก GPS โมเดลนี้รวมพารามิเตอร์ของรถ พารามิเตอร์ของถนนและการจราจร รวมถึงพารามิเตอร์ต้นทุน เช่น ราคาน้ำมัน รายได้เฉลี่ย และมูลค่าของเวลา โดยครอบคลุมทั้งรถยนต์ขนาดเล็กและใหญ่ ผลลัพธ์ของโมเดลสามารถนำมาใช้ประเมินค่าใช้จ่ายในการเดินทาง การปล่อย CO_2, CO, HC และ NO_x รวมถึงค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอย่างละเอียดในแต่ละช่วงการขับขี่



รูปที่ 8 Drive cycle during a stop at traffic signals [10]

Olga V. Lozhkina และ Vladimir N. Lozhkin [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ของรถยนต์ส่วนบุคคลประเภทเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล ภายใต้สภาพการใช้งานจริง โดยใช้ระบบวัดไอเสียแบบติดตั้งบนรถ (on-board monitoring) ทำการทดสอบบนถนนในเมืองเซนต์ปีเตอร์สเบิร์ก ประเทศรัสเซีย โดยศึกษาอิทธิพลของความเร็วรถยนต์ เทคโนโลยีเครื่องยนต์ และประเภทของเครื่องยนต์ต่ออัตราการปล่อย NO_x รถยนต์ตัวอย่างประกอบด้วยรถเบนซิน 13 คัน (ตั้งแต่ Pre-Euro 1 ถึง Euro 5) และรถดีเซล 3 คัน (Euro 3–4) ผลการศึกษาพบว่ารถเบนซินที่ไม่มีระบบแปลงไอเสีย (pre-Euro 1) ปล่อย NO_x สูงสุด (0.5–2.5 g/km) ขณะที่รถเบนซิน Euro 5 ปล่อยน้อยที่สุด (0.002–0.043 g/km) โดยพบแนวโน้มว่าการปล่อย NO_x เป็นกราฟทรงพาราโบลา มีค่าสูงสุดที่ความเร็วต่ำ (<20 km/h) และสูง (>100 km/h) รถดีเซล Euro 3–4 ปล่อย NO_x สูงกว่ารถเบนซินในระดับเดียวกันถึง 17–29 เท่า และไม่สามารถผ่านมาตรฐาน NO_x ภายใต้สภาพการขับขี่จริงได้ ความเร็วที่ให้การปล่อย NO_x ต่ำสุดอยู่ในช่วง 30–65 km/h การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่สามารถสะท้อนสภาพจริงของการขับขี่ได้อย่างครบถ้วน และการปล่อย NO_x ภายใต้สภาพการใช้งานจริงยังคงสูง โดยเฉพาะในรถดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเทคโนโลยีเพิ่มเติมเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในอนาคต

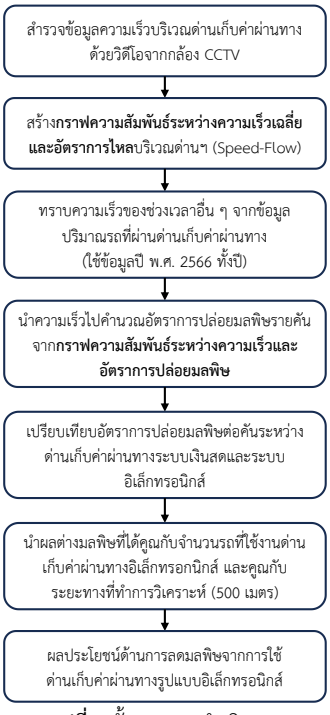
Sirithian และคณะ [12] ได้พัฒนาค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) ของรถยนต์ขนาดเล็ก (Light-Duty Vehicles: LDVs) จำแนกตามประเภทเชื้อเพลิงและความเร็วในการขับขี่ โดยใช้เครื่องไดนาโมมิเตอร์แบบแชสซีในห้องปฏิบัติการปล่อยมลพิษยานยนต์ และใช้รูปแบบการขับขี่ในกรุงเทพมหานครในการควบคุมสภาพการขับขี่ ผลการวิจัยพบว่า รถยนต์เบนซิน (LDG) มีค่าการปล่อย CO_2 และ CH_4 เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 232.25 g/km และ 9.50 mg/km ตามลำดับ ขณะที่รถยนต์ดีเซล (LDD) มีค่าการปล่อย CO_2 เฉลี่ยสูงกว่ารถยนต์เบนซิน (182.53 g/km เทียบกับ 171.01 g/km) แต่มีค่าการปล่อย CH_4 ต่ำกว่า (2.21 mg/km เทียบกับ 3.02 mg/km) นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วที่ต่ำลงส่งผลให้เกิดการปล่อย CO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มากขึ้นและอัตราการประหยัดน้ำมันที่ลดลง ผลการศึกษายังพบว่า CO_2 ที่ปล่อยจาก LDVs คิดเป็น 99.96% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม ค่าปัจจัยการปล่อยที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้สนับสนุนนโยบายการลดก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะ CO_2 และ CH_4 จากยานพาหนะ และเป็นฐานข้อมูลในการจัดการระบบขนส่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษานี้เริ่มต้นจากการสำรวจความเร็วของรถรายคันที่ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางระบบเงินสดและระบบอิเล็กทรอนิกส์บนทางยกระดับอุตราภิมุข ในวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ.2566 เวลา 05.00-22.00 น. ด้วยซอฟต์แวร์ Camlytics จากนั้นนำความเร็วที่สำรวจได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหล (speed-flow) ผลจากการสร้างกราฟนี้จะทำให้สามารถทราบค่าความเร็วของช่วงเวลาอื่น ๆ ได้จากข้อมูลปริมาณรถผ่านด่านฯ และนำเอาความเร็วที่ได้ไปคำนวณอัตราการปล่อยมลพิษรายคัน จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราการปล่อยมลพิษระหว่างด่านฯ ระบบเงินสดและระบบอิเล็กทรอนิกส์ หากอัตราการปล่อยมลพิษของด่านฯ ระบบอิเล็กทรอนิกส์น้อยกว่า ผลต่างมลพิษที่ได้จะถูกนำไปคูณกับจำนวนรถที่ใช้งานด่านฯ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นผลประโยชน์ทางด้านการ

ลดมลพิษจากการใช้งานด่านเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 9 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 พื้นที่ศึกษา

ทางยกระดับอุตราภิมุข (ดอนเมืองโทล์ลเวย์) เป็นทางยกระดับช่วงดินแดงถึงอนุสรณ์สถาน ตั้งอยู่เหนือถนนหมายเลข 31 วิภาวดี-รังสิต มีความยาวรวมประมาณ 21 กิโลเมตร ประกอบด้วยด่านเก็บค่าผ่านทางหลักทั้งหมด 9 แห่ง ดังรูปที่ 10 อย่างไรก็ตามด่านเก็บค่าผ่านทางหลักบางแห่งมีการแบ่งออกเป็นด่านฯ ย่อย ส่งผลให้มีจำนวนด่านฯ รวมทั้งสิ้น 16 แห่ง ในปัจจุบันมีระบบจัดเก็บค่าผ่านทาง 2 ระบบ ได้แก่ ระบบเงินสด (MTC) และระบบอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) จำนวนช่องชำระเงินของด่านเก็บค่าผ่านทางต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2

3.3 การสำรวจความเร็วบริเวณพื้นที่ด่านเก็บค่าผ่านทาง

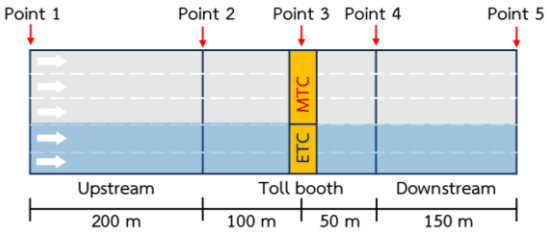
การขับขี่ผ่านบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางสามารถแบ่งได้เป็น 5 ช่วง ได้แก่ 1) ช่วงความเร็วปกติ 2) ช่วงชะลอความเร็ว 3) ช่วงหยุดเพื่อชำระเงินสำหรับช่องเงินสดและช่วงชะลอความเร็วเพื่อรอไม้กั้นเปิดสำหรับช่องอิเล็กทรอนิกส์ 4) ช่วงเร่งความเร็วหลังจากการชำระค่าผ่านทาง และ 5) ช่วงเร่งความเร็วกลับเป็นปกติ ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้ง 5 ช่วงที่ได้กล่าวมาจะถูกทำการสำรวจความเร็วและนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นความเร็วเฉลี่ยผ่านด่านฯ โดยทำการแยกระหว่างด่านฯ ระบบเงินสดและด่านฯ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระยะทางที่ทำการสำรวจความเร็วมีความยาวประมาณ 500 เมตร การสำรวจความเร็วในช่วงที่ 2 และ 4 จะใช้ซอฟต์แวร์ Camlytics ในการวัดความเร็วจากวิดีโอที่ได้จากกล้อง CCTV ที่ติดตั้งบริเวณด่านฯ โดยในช่วงที่ 2 จะใช้ข้อมูลสำรวจจากกล้องที่ติดตั้งบริเวณหน้าด่านฯ และช่วงที่ 4 จะใช้ข้อมูลสำรวจจากกล้องที่ติดตั้งบริเวณหลังด่านฯ ดังแสดงในรูปที่ 12 ในส่วนของช่วงอื่น ๆ จะเป็นการกำหนดความเร็วที่ใกล้เคียงกับสภาพจริง เนื่องจากข้อจำกัดด้านการสำรวจ รายละเอียดดังแสดงดังตารางที่ 3

รูปที่ 10 Don Muang Tollway Schematic map

ตารางที่ 2 จำนวนช่องทางชำระเงินของด่านเก็บค่าผ่านทางต่าง ๆ

ด่าน	ประเภท	จำนวนช่องชำระเงิน	
		เงินสด (a)	อิเล็กทรอนิกส์ (b)
ดินแดง 1	Mid-block	4	2
ดินแดง 2	Mid-block	2	2
สุทธิสาร	On ramp	2	1
ลาดพร้าวขาออก	On ramp	2	2
ลาดพร้าวขาเข้า	On ramp	1	2
รัชดาภิเษก 1	On ramp	2	1
รัชดาภิเษก 2	On ramp	2	1
บางเขน	On ramp	1	1
แจ้งวัฒนะ 1	On ramp	2	1
แจ้งวัฒนะ 2	On ramp	1	1
หลักสี่ขาออก	On ramp	1	1
หลักสี่ขาเข้า	On ramp	3	1
ดอนเมือง 1	Mid-block	3	2
ดอนเมือง 2	Mid-block	3	2
อนุสรณ์สถาน 1	Mid-block	3	2
อนุสรณ์สถาน 2	Mid-block	4	1

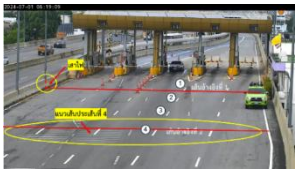
(a) อัตราการให้บริการสูงสุดของช่องเงินสดเท่ากับ 350-400 คัน/ชั่วโมง
(b) อัตราการให้บริการสูงสุดของช่อง ETC เท่ากับ 800-900 คัน/ชั่วโมง



รูปที่ 11 การแบ่งพื้นที่สำรวจความเร็วบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง

ตารางที่ 3 การกำหนดความเร็วในแต่ละตำแหน่ง

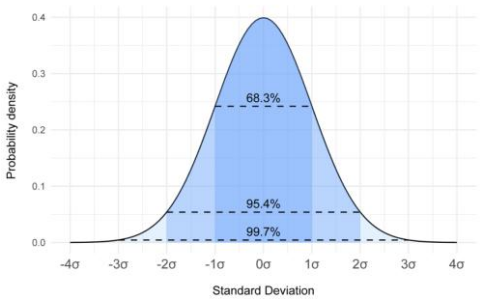
ตำแหน่ง	ระยะห่างจากช่องเก็บค่าผ่านทาง (m)	ความเร็ว (km/h)
1	300	80
2	100	ข้อมูลจาก Software Camlytics (กล้องหน้าด่าน)
3	พื้นที่ช่องเก็บค่าผ่านทาง	เงินสด = 0 อิเล็กทรอนิกส์ = 25
4	50	ข้อมูลจาก Software Camlytics (กล้องหลังด่าน)
5	200	80



รูปที่ 12 ตัวอย่างภาพจากกล้อง CCTV ที่ติดตั้งบริเวณหน้าด่าน (ซ้าย) และหลังด่าน (ขวา)

การสำรวจความเร็วโดยใช้ข้อมูลวิดีโอจากกล้อง CCTV ต้องใช้ทรัพยากรอย่างมาก ผู้วิจัยจึงเลือกสำรวจความเร็วในช่วงเวลา 05.00 – 22.00 น. ของวันที่ 1 กรกฎาคม 2567 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ครอบคลุมการใช้ถนนส่วนใหญ่ของผู้คน จากนั้นจะนำข้อมูลความเร็วที่สำรวจได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยและปริมาณจราจรที่เข้าด่านฯ (speed-flow) เพื่อใช้ในการประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยของช่วงเวลาอื่น ๆ โดยใช้ข้อมูลปริมาณจราจรผ่านด่านฯ เป็นหลัก

การสำรวจความเร็วด้วยซอฟต์แวร์ Camlytics พบว่ามีข้อมูลความเร็วที่ไม่สมเหตุสมผลปรากฏขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำความสะอาดข้อมูล (Cleaning data) โดยใช้ค่าข้อมูลทางสถิติคือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) มาใช้ในการขจัดข้อมูลที่มีคลาดเคลื่อนมากจากค่าเฉลี่ย โดยใช้ค่า 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (3σ) เป็นค่าขอบเขตข้อมูลที่จะครอบคลุมข้อมูลความเร็ว 99.7% ที่ถูกนำมาใช้งาน ค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่า 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะถูกลบทิ้งเพื่อความถูกต้องข้อมูล รูปที่ 13 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 13 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [13]

3.4 การสร้างกราฟความเร็วและอัตราการไหลบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง

จากข้อจำกัดทางด้านการสำรวจความเร็วดังที่กล่าวมาแล้ว การใช้ข้อมูลความเร็วช่วงเวลา 05.00–22.00 น. ของวันที่ 1 กรกฎาคม 2567 ในการสร้างกราฟความเร็วและปริมาณจราจร (speed-flow) บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง โดยใช้ข้อมูลแบบรายชั่วโมงอาจทำให้ได้ทำจำนวนข้อมูลที่น้อยเกินไป ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์ข้อมูลราย 10 นาที เพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลที่มากขึ้น โดยข้อมูลปริมาณจราจรราย 10 นาทีนี้จะถูกแปลงเป็นรายชั่วโมงเพื่อให้อยู่ในรูปของอัตราการไหล (คัน/ชั่วโมง)

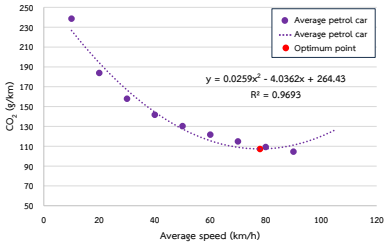
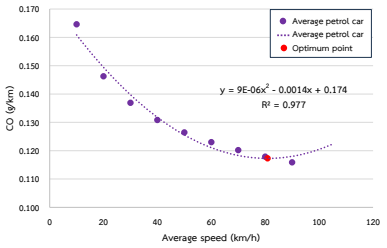
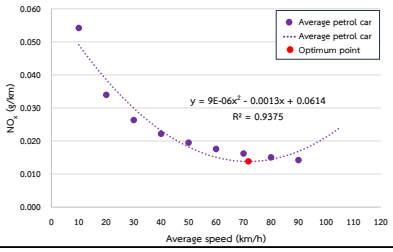
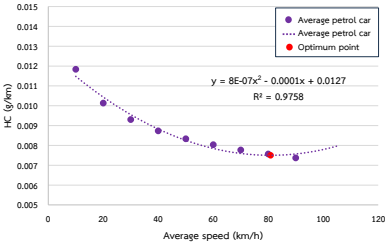
หลังจากได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหลแล้ว จะทำให้สามารถทราบความเร็วบริเวณด่านฯ จากข้อมูลปริมาณจราจรที่ใช้งานด่านฯ ได้

3.5 การสร้างกราฟอัตราการปล่อยมลพิษและความเร็วเฉลี่ย

ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลอัตราการปล่อยมลพิษรายคันที่ความเร็วเฉลี่ยต่าง ๆ ของรถที่จดทะเบียนในปี 2004-2011 หรือในระดับมาตรฐานยูโร 3 ซึ่งเป็นข้อมูลล่าสุดจากกรมควบคุมมลพิษ (ข้อมูล ณ ปี พ.ศ. 2567) สำหรับรถในระดับมาตรฐานยูโร 4 และยูโร 5 ยังอยู่ในขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตได้ จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาพัฒนาเป็นกราฟอัตราการปล่อยมลพิษและความเร็วเฉลี่ยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยมลพิษเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นความสัมพันธ์แบบพาราโบลา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Olga V. Lozhkina [8] โดยกราฟอัตราการปล่อยมลพิษและความเร็วเฉลี่ยที่ได้พัฒนาขึ้นจะมุ่งเน้นไปที่มลพิษ 4 ตัวสำคัญ ได้แก่ 1) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 3) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และ 4) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) รายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 4

ข้อมูลจากกราฟทำให้ทราบถึงอัตราการปล่อยมลพิษชนิดต่าง ๆ จากการใช้ความเร็วที่สำรวจได้ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบอัตราการปล่อยมลพิษระหว่างด่านเก็บค่าผ่านทางระบบเงินสดและอิเล็กทรอนิกส์ การเปรียบเทียบอัตราการปล่อยมลพิษดังกล่าวจะได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของผลต่างของปริมาณมลพิษต่อคันหรือเรียกว่า Emission Factor มีหน่วยเป็น กรัม/กิโลเมตร/คัน การจะทราบปริมาณมลพิษได้ต้องนำ Emission Factor ดังกล่าวคูณเข้ากับจำนวนรถที่ใช้งานด่านฯ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และคูณระยะทางที่ทำการศึกษา (500 เมตร)

ตารางที่ 4 กราฟอัตราการปล่อยมลพิษและความเร็วเฉลี่ยต่อคัน

มลพิษ	กราฟอัตราการปล่อยมลพิษและความเร็วเฉลี่ย (ต่อคัน)
CO_2	
CO	
NO_x	
HC	

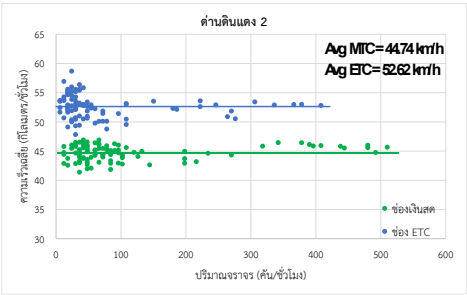
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการสร้างกราฟความเร็วและอัตราการไหลผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง

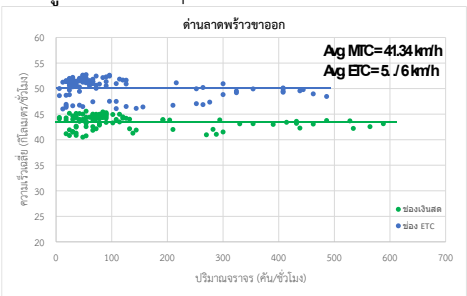
จากการสร้างกราฟความเร็วและอัตราการไหล (Speed-Flow) บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง พบว่ากราฟแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) กราฟเส้นตรง ซึ่งสะท้อนว่าด่านฯ มีปริมาณรถน้อยและยังไม่เข้าสู่ภาวะติดขัด (Un-congestion) ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 โดยความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาต่าง ๆ ค่อนข้างคงที่ และ 2) กราฟที่โค้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความเร็วสูง (ไม่มีการติดขัด) และช่วงความเร็วต่ำ (เกิดการจราจรติดขัด) ดังแสดงในรูปที่ 16 สภาพการราจรติดขัด (Congestion) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสัดส่วนของปริมาณจราจรเทียบกับความจุในการให้บริการของด่านฯ (v/c) สูงกว่า 0.9 จึงจะเริ่มเกิดแถวคอยขึ้นหรือเกิดสภาวะการติดขัด

จากการวิเคราะห์พบว่า ด่านฯ ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มแรกที่มีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง มีเพียงด่านหลักสี่ขาเข้าและด่านดอนเมือง ซึ่งมีปริมาณรถมากในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าของวันธรรมดาและเกิดการจราจรติดขัดอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับด่านทั้งสองนี้ ผู้วิจัยจึงพิจารณาใช้ค่าความเร็วต่ำในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าเพื่อสะท้อนสภาพการจราจรจริง ส่วนในด่านอื่น ๆ จากสถิติข้อมูลปริมาณจราจรเข้าด่านทั้งปี พ.ศ.2566 ที่ผ่านมาแม้ในช่วงเร่งด่วนปริมาณรถยังไม่เกินอัตราการให้บริการสูงสุด จึงสรุปได้ว่าไม่เกิดภาวะการติดขัดที่ด่านเหล่านี้ อย่างไรก็ตาม หากพบว่าด่านใดเกิดการติดขัดในอนาคต ผู้วิจัยสามารถสำรวจข้อมูลความเร็วเพิ่มเติมในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการวิเคราะห์

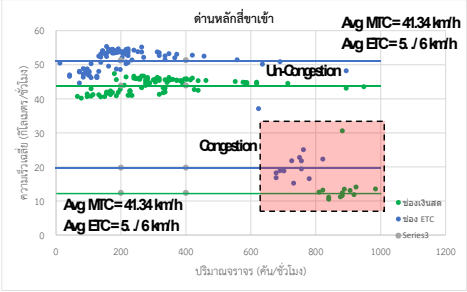
สำหรับกราฟเส้นตรงจะใช้ค่าเฉลี่ยความเร็วของทุกจุดเป็นตัวแทนของด่านนั้น ส่วนกราฟที่มีทั้งช่วงติดขัดและไม่ติดขัดจะเฉลี่ยความเร็วของแต่ละช่วงแยกกันเพื่อใช้เป็นตัวแทนความเร็วเฉลี่ยในแต่ละสภาพการจราจร โดยความเร็วเฉลี่ยของด่านต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 5



รูปที่ 14 กราฟ Speed-Flow ของด่านดินแดง 2



รูปที่ 15 กราฟ Speed-Flow ของด่านลาดพร้าวขาออก



รูปที่ 16 กราฟ Speed-Flow ของด่านหลักสี่ขาเข้า

ตารางที่ 5 ผลการสำรวจความเร็วเฉลี่ยบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางต่าง ๆ

ด่าน	เงื่อนไข	ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	
		เงินสด	อิเล็กทรอนิกส์
ดินแดง 1	Un-congestion	46.23	52.06
ดินแดง 2	Un-congestion	44.74	52.62
สุทธิสาร	Un-congestion	44.04	52.06
ลาดพร้าวขาออก	Un-congestion	43.56	50.18
ลาดพร้าวขาเข้า	Un-congestion	45.40	52.62
รัชดาภิเษก 1	Un-congestion	39.84	44.41
รัชดาภิเษก 2	Un-congestion	41.84	47.71
บางเขน	Un-congestion	42.22	50.06
แจ้งวัฒนะ 1	Un-congestion	44.05	49.84
แจ้งวัฒนะ 2	Un-congestion	43.24	51.45
หลักสี่ขาออก	Un-congestion	40.32	46.05
หลักสี่ขาเข้า	Un-congestion	43.90	51.34
	Congestion	12.40	19.82
ดอนเมือง 1+2 *	Un-congestion	45.68	52.38
	Congestion	22.11	26.65
อนุสรณ์สถาน 1	Un-congestion	48.13	55.22
อนุสรณ์สถาน 2	Un-congestion	22.11	26.65

** เกิดปัญหาการติดขัดในช่วงเร่งด่วนเช้าประกอบกับมีลักษณะเป็นด่านฯ รูปแบบ Mid-block มีระยะห่างกันประมาณ 150 ม. จึงพิจารณาวิเคราะห์รวมทั้ง 2 ด่านฯ*

4.2 ผลการวิเคราะห์อัตราการปล่อยมลพิษ

ตารางที่ 6 แสดงอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่อคันของรถยนต์ ที่ได้จากการนำความเร็วเฉลี่ยบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางไปคำนวณผ่านสมการจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการปล่อยมลพิษ ของทั้งด่านฯ ระบบเงินและระบบอิเล็กทรอนิกส์ พบว่า ด่านฯ ระบบเงินสดมีอัตราการปล่อย CO_2 มากกว่าด่านฯ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ 7.88% โดยเฉลี่ยทุกด่านฯ ส่วนอัตราการปล่อยมลพิษชนิดอื่น ๆ (CO, NO_x, HC) มีผลลัพธ์เช่นเดียวกับ CO_2

ผลต่างของอัตราการปล่อยมลพิษชนิดต่าง ๆ ต่อคัน (ระบบเงินสดลบด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์) จะถูกนำไปคูณกับจำนวนรถที่ใช้บริการด่านฯ อิเล็กทรอนิกส์ และคูณเข้ากับระยะทางที่ทำการวิเคราะห์ (500 เมตร) ผลการคำนวณที่ได้จะเป็นมวลของมลพิษต่าง ๆ ที่ด่านเก็บค่าผ่านทางระบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถลดมลพิษลงไปได้เมื่อเทียบกับด่านฯ ระบบเงินสด

4.3 ปริมาณรถที่ใช้ด่านเก็บค่าผ่านทางในปี พ.ศ. 2566

ผลการสำรวจปริมาณรถที่ใช้บริการด่านเก็บค่าผ่านทางต่าง ๆ ในปี พ.ศ. 2566 ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 อัตราการปล่อย CO_2 ต่อคันของรถยนต์ (g/km/veh)

ด่าน	เงื่อนไข	อัตราการปล่อย CO_2 (g/km/veh)		
		เงินสด	อิเล็กทรอนิกส์	ผลต่าง
ดินแดง 1	Un-congestion	133.19	124.50	8.69
ดินแดง 2	Un-congestion	135.69	123.76	11.93
สุทธิสาร	Un-congestion	136.91	124.50	12.41
ลาดพร้าวขาออก	Un-congestion	137.76	127.11	10.65
ลาดพร้าวขาเข้า	Un-congestion	134.57	127.00	7.57
รัชดาภิเษก 1	Un-congestion	144.74	136.26	8.48

รัชดาภิเษก 2	Un-congestion	140.90	130.82	10.08
บางเขน	Un-congestion	140.19	127.28	12.91
แจ้งวัฒนะ 1	Un-congestion	136.89	127.60	9.29
แจ้งวัฒนะ 2	Un-congestion	138.33	125.33	13.00
หลักสี่ขาออก	Un-congestion	143.80	133.49	10.31
หลักสี่ขาเข้า	Un-congestion	137.16	125.48	11.68
	Congestion	218.36	194.61	23.75
ดอนเมือง 1+2*	Un-congestion	134.10	124.07	10.03
	Congestion	187.85	175.26	12.59
อนุสรณ์สถาน 1	Un-congestion	130.16	120.53	9.63
อนุสรณ์สถาน 2	Un-congestion	134.28	123.03	11.25

** เกิดปัญหาการติดขัดในช่วงเร่งด่วนเช้าประกอบกับมีลักษณะเป็นด่านฯ รูปแบบ Mid-block มีระยะห่างกันประมาณ 150 ม. จึงพิจารณาวิเคราะห์รวมทั้ง 2 ด่านฯ*

ตารางที่ 7 ปริมาณรถที่ใช้บริการด่านเก็บค่าผ่านทางต่าง ๆ

ด่าน	จำนวนรถที่ใช้บริการ* (คัน)	
	เงินสด	อิเล็กทรอนิกส์
ดินแดง 1	3,641,963	3,023,017
ดินแดง 2	622,525	293,297
สุทธิสาร	552,659	415,769
ลาดพร้าวขาออก	739,821	529,992
ลาดพร้าวขาเข้า	216,733	344,889
รัชดาภิเษก 1	680,555	441,729
รัชดาภิเษก 2	405,975	331,520
บางเขน	326,496	255,849
แจ้งวัฒนะ 1	676,813	750,823
แจ้งวัฒนะ 2	117,150	155,397
หลักสี่ขาออก	292,953	241,496
หลักสี่ขาเข้า	2,040,183	1,383,312
ดอนเมือง 1	3,289,283	2,424,537
ดอนเมือง 2	766,159	151,357
อนุสรณ์สถาน 1	1,200,649	912,283
อนุสรณ์สถาน 2	3,085,771	2,080,303
รวม	18,655,688	13,735,570

** อ้างอิงจากข้อมูลปริมาณจราจรผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางบนทางยกระดับอุตราภิมุขปี พ.ศ. 2566*

4.4 ผลประโยชน์ด้านมลพิษจากการใช้ด่านเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์

ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลปริมาณจราจรผ่านด่านของปีพ.ศ. 2566 ในการคำนวณผลประโยชน์ทางด้านการลดมลพิษจากการใช้ด่านเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) โดยเป็นการเปรียบเทียบอัตราการปล่อยมลพิษระหว่างช่องทางเงินสดและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ ณ ปัจจุบันของแต่ละด่านเก็บค่าผ่านทาง เพื่อประเมินผลประโยชน์ด้านการลดมลพิษจากการใช้ช่องทางชำระเงินรูปแบบ ETC ในปัจจุบัน โดยได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลประโยชน์ด้านการลดมลพิษจากด่านเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์

ด่าน	ผลประโยชน์ด้านการลดมลพิษ (kg/year)			
	CO_2	CO	NO_x	HC
ดินแดง 1	13,134.3	4.85	3.68	0.44
ดินแดง 2	1,750.2	0.65	0.49	0.06
สุทธิสาร	2,579.6	0.95	0.73	0.09
ลาดพร้าวขาออก	2,821.5	1.04	0.81	0.09
ลาดพร้าวขาเข้า	1,338.1	0.49	0.38	0.05
รัชดาภิเษก 1	1,871.5	0.68	0.55	0.06
รัชดาภิเษก 2	1,670.5	0.61	0.49	0.06
บางเขน	1,651.0	0.60	0.48	0.06
แจ้งวัฒนะ 1	3,487.5	1.28	1.00	0.12
แจ้งวัฒนะ 2	1,010.3	0.37	0.29	0.03
หลักสี่ขาออก	1,244.9	0.45	0.37	0.04
หลักสี่ขาเข้า	9,795.9	3.54	2.91	0.32
ดอนเมือง 1+2*	13,513.6	4.94	3.90	0.45
อนุสรณ์สถาน 1	4,396.5	1.64	1.20	0.15
อนุสรณ์สถาน 2	11,703.7	4.33	3.28	0.40
รวม	71,969.0	26.41	20.55	2.41

** เกิดปัญหาการติดขัดในช่วงเร่งด่วนเช้าประกอบกับมีลักษณะเป็นด่านฯ รูปแบบ Mid-block มีระยะห่างกันประมาณ 150 ม. จึงพิจารณาวิเคราะห์รวมทั้ง 2 ด่านฯ*

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการประเมินปริมาณมลพิษที่เปรียบเทียบระหว่างด่านเก็บค่าผ่านทางรูปแบบเงินสดและรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) โดยใช้ความเร็วของยานพาหนะเป็นตัวชี้วัด พบว่า การใช้ระบบ ETC สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้ถึง 71.97 ตันต่อปี ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลดลง 26.4 กิโลกรัมต่อปี ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ลดลง 20.5 กิโลกรัมต่อปี และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ลดลง 2.4 กิโลกรัมต่อปี ผลการลดมลพิษดังกล่าวเป็นผลมาจากความเร็วเฉลี่ยที่สูงกว่าในบริเวณด่านฯ ของระบบ ETC รวมถึงอัตราการเบรกและการเร่งความเร็วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบเงินสด ซึ่งส่งผลให้เกิดการปล่อยมลพิษน้อยลงตามมา ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Barth and Boriboonsomsin [9] ที่ชี้ว่าการลดช่วงเวลาหยุด-เริ่มขณะขับขี่จะสามารถลดการปล่อย CO_2 และ NO_x ได้อย่างมีนัยสำคัญ

กล่าวโดยสรุป การประยุกต์ใช้ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจราจรบริเวณหน้าด่าน แต่ยังมีศักยภาพในการลดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับระบบจัดเก็บแบบเงินสด

5.1 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะของการศึกษา

การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline) เท่านั้น โดยยังไม่ครอบคลุมรถยนต์ดีเซลและรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลการจำแนกประเภทของยานพาหนะและเชื้อเพลิงจากอุปกรณ์ตรวจวัดการจราจรที่มีอยู่ในปัจจุบันบนทางยกระดับอุตราภิมุขและถนนวิภาวดี ซึ่งยังไม่สามารถแยกแยะประเภทเชื้อเพลิงของยานพาหนะได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น การศึกษาในอนาคตควรพิจารณาการพัฒนาเครื่องมือหรือวิธีการที่สามารถจำแนกประเภทเชื้อเพลิงได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อให้การประเมินผลกระทบด้านมลพิษครอบคลุมยิ่งขึ้น

แม้ว่าการสำรวจข้อมูลความเร็วบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางในการศึกษานี้จะดำเนินการในช่วงเวลา 05.00–22.00 น. ของวันจันทร์ที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 แต่มีความเพียงพอและครอบคลุมพฤติกรรมของด่านเก็บค่าผ่านทางส่วนใหญ่ที่สภาวะ Un-congested นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบปริมาณจราจรเข้าด่านฯ ตลอดทั้งปี ซึ่งมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของด่านฯ ที่มีสภาวะ Congestion ที่คาดว่าสามารถใช้เป็นตัวแทนเบื้องต้นในการวิเคราะห์แนวโน้มการปล่อยมลพิษได้ อย่างไรก็ตามในด่านที่มีปริมาณ

จราจรมากหรือเกิดสภาวะ Congestion การมีปริมาณข้อมูลมากขึ้นจะช่วยให้กราฟ Speed-flow มีความสมบูรณ์และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ผลการศึกษานี้นับเป็นหนึ่งในการศึกษาที่ชี้ให้เห็นถึงบทบาทของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานระบบเก็บค่าผ่านทางที่ส่งผลต่อการลดมลพิษ โดยเฉพาะระบบเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) ที่ไม่เพียงช่วยลดปัญหาการจราจรบริเวณหน้าด่าน แต่ยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในด่านที่มีปริมาณจราจรหนาแน่น ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นเอกสารเชิงวิชาการเพื่อสนับสนุนการวางแผนปรับเปลี่ยนระบบเก็บค่าผ่านทางจากระบบเงินสดไปสู่ระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั้งบนทางยกระดับอุตราภิมุขและทางพิเศษอื่น ๆ อย่างเป็นระบบ อีกทั้งยังสามารถแบ่งปันผลการศึกษาและข้อมูลการวิเคราะห์ไปยังกรมควบคุมมลพิษเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการจัดทำนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม และพัฒนาแนวทางการลดมลพิษจากยานพาหนะในเขตเมืองอย่างยั่งยืน รวมถึงสามารถต่อยอดสู่การใช้ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบ Open Road Toll ได้ในอนาคต เช่นเดียวกับที่มีการใช้งานแล้วในประเทศออสเตรเลีย สิงคโปร์ และสหรัฐอเมริกา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมควบคุมมลพิษที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลอัตราการปล่อยมลพิษที่ความเร็วเฉลี่ยต่าง ๆ ของยานพาหนะ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Islameka, M., Budiman, B. A., Juangsa, F. B., and Aziz, M. (2023). Energy management systems for battery electric vehicles. In Emerging trends in energy storage systems and industrial applications. *Elsevier*, pp.113–150.

[2] Brown, W. and Liu, Y. (2021). Modeling and simulation of an electric vehicle with independent rear motors to estimate the fuel economy during EPA drive cycles. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 13(1), pp.46–52.

[3] Lasocki, J. (2021). The WLTC vs NEDC: A case study on the impacts of driving cycle on engine performance and fuel consumption. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(3), pp.9071–9081.

[4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Japan Transport Cooperation Association. (2004). *Summary of the CDM study report on F.Y. 2003: Study to promote CDM projects in transport sector in order to resolve global environmental problem (Bangkok Metropolitan Area case)*. Bangkok, Thailand, November 2004.

[5] Metcalfe, J. (2023). *Effect of speed on emissions and air quality: Summary report*. Emission Impossible Ltd., Report prepared for Waka Kotahi NZ Transport Agency and Auckland Transport, September 2023.

[6] Camlytics. (2025). *Camlytics video analytics software*. Available from: https://camlytics.com [Accessed: 3 April 2025].

[7] Mathew, T. V. (2023). *Traffic stream models. Lecture Notes in Transportation Systems Engineering*. Indian Institute of Technology Bombay, India.

[8] Oliveira, G.M. de and Cunha, A.L. (2019). *A calibration method structured on Bayesian inference of the HCM speed-flow relationship for freeways and multilane highways and a temporal analysis of traffic behavior*. Preprint, August 2019.

[9] Barth, M. and Boriboonsomsin, K. (2008). *Real-world CO_2 impacts of traffic congestion*. University of California Transportation Center, Research Report submitted for publication in Transportation Research Record, March 2008.

[10] Akçelik, R. and Besley, M. (2003). Operating cost, fuel consumption, and emission models in SIDRA and MOTION. *The 25th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2003)*, University of South Australia, Adelaide, Australia, 3–5 December 2003.

[11] Lozhkina, O.V. and Lozhkin, V.N. (2016). Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, pp.251–264.

[12] Sirithian, D., Thanatrakolsri, P. and Pongpan, S. (2022). CO_2 and CH_4 emission factors from light-duty vehicles by fuel types in Thailand. *Atmosphere*, 13(10), Article no.1588.

[13] Koffaree Sulong. (2023). *Standard deviation in SPC: What is it and how is it used*. [Accessed: 3 April 2025].