การประเมินด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับรูปแบบการควบคุมทางแยกภายในสถานศึกษา

Energy and Environmental Assessment for Intersection Design Control in University Campus

ชญาดา รวิวรรณ[1] และ นพดล กรประเสริฐ[2,*]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่
**Corresponding author; E-mail address: r.chayadaa@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันปัญหาการจราจรติดขัดบนท้องถนนส่งผลให้เกิดการความสูญเสียพลังงานและผลกระทบทางด้านมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางแยกในเขตสถานศึกษาที่มีการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคลเป็นจำนวนมาก การออกแบบและควบคุมการจราจรบริเวณทางแยกที่เหมาะสม นอกจากจะช่วยให้สภาพการจราจรคล่องตัว ลดความล่าช้าในการเดินทางแล้ว ยังจะช่วยลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงและมลพิษทางอากาศ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับการออกแบบควบคุมทางแยกรูปแบบต่าง ๆ ภายในสถานศึกษา การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคและแบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศ สำหรับวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการเดินทางและมลภาวะทางอากาศของรูปแบบการควบคุมทางแยก 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร (2) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ (3) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ และ (4) ทางแยกรูปแบบวงเวียน ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้สภาพการจราจรเดียวกัน รูปแบบการควบคุมทางแยกต่าง ๆ จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านการใช้พลังงานและมลภาวะทางอากาศในปริมาณที่แตกต่างกัน การออกแบบควบคุมทางแยกที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งต่อผู้ใช้รถใช้ถนนและต่อชุมชนมหาวิทยาลัยที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: การจราจรติดขัด, พลังงาน, มลพิษทางอากาศ, แบบจำลองการจราจร

Abstract

Nowadays, traffic congestion contributes to energy depletion and air pollution problems. Specifically, in university communities where the share of private vehicle is high, the problem of traffic congestion generally occurs at intersections. Proper intersection design control can reduce traffic congestion, travel delays, and energy consumption and emission. The purpose of this study is to compare the energy and environmental efficiency of various intersection design control strategies within the university campus. This study applied the microscopic traffic simulation model and air emission model to analyze the energy consumption and emission associated with 4 intersection design control options including (1) unsignalized intersection; (2) signalized intersection with 2 signal phases; (3) signalized intersection with 4 signal phases; and (4) roundabout. The results showed that under the same traffic conditions intersection design control would affect energy consumption and emission differently. Therefore, selecting a proper intersection design control will result in sustainable benefits for both road users and university communities.

Keywords: Traffic Congestion, Energy, Emission, Traffic Simulation Model

1. บทนำ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นมหาวิทยาลัยชื่อดังทางภาคเหนือ มีเนื้อที่ประมาณ 2,000 ไร่ ปัจจุบันมีนักศึกษาและบุคลากรทั้งหมด 44,650 คน ซึ่งภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ยังมีโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ตั้งอยู่ด้วย จากจำนวนนักเรียน นักศึกษา บุคลากร และจำนวนผู้ที่สัญจรผ่านเข้ามาในมหาวิทยาลัยจำนวนมากนั้น ก่อให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดส่งผลให้เกิดความสูญเสียพลังงานและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยปัญหาการจราจรติดขัดส่วนใหญ่ภายในมหาวิทยาลัยจะเกิดบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ เนื่องจากเป็นเส้นทางหลักที่ใช้ในการเดินทางเข้า-ออกมหาวิทยาลัย และเชื่อมต่อกับสถานที่ต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ดังนั้น ทางแยกดังกล่าวควรมีการออกแบบและควบคุมการจราจรบริเวณทางแยกที่เหมาะสม เพื่อช่วยให้สภาพการจราจรคล่องตัว ลดความล่าช้าในการเดินทางแล้ว ช่วยลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงและมลพิษทางอากาศ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับการออกแบบควบคุมทางแยกรูปแบบต่าง ๆ ภายในสถานศึกษา โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคและ

แบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศ PTV VISSIM สำหรับวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการเดินทางและมลภาวะทางอากาศของรูปแบบการควบคุมทางแยกประเภทต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางการวางแผนและเสนอแนวทางการออกแบบควบคุมทางแยกที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งต่อผู้ใช้รถใช้ถนนและต่อชุมชนมหาวิทยาลัยที่ยั่งยืน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบจากการจราจรติดขัด

ปัญหาการจราจรติดขัด เป็นปัญหาที่สำคัญลำดับต้น ๆ ที่ทวีความรุนแรงมากเป็นลำดับ ตามอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจที่เพิ่มสูงขึ้น โดยผลกระทบที่เกิดจากการจราจรติดขัดนั้น ประกอบไปด้วย

- ผลกระทบต่อเวลาในการเดินทาง ความล่าช้าในการเดินทางเนื่องจากความแออัดของการจราจรเป็นผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้ถนนที่นำไปสู่การสูญเสียทางเศรษฐกิจโดยตรงกับผู้ใช้ถนน
- ผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความแออัดและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สภาพแวดล้อมแย่ลงเมื่อปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้น ยานพาหนะแต่ละคันใช้เวลานานบนถนนสร้างความร้อนและมลพิษทางอากาศมากขึ้นและก่อให้เกิดมลพิษทางเสียง
- จากการใช้พลังงานก่อให้เกิดมลพิษในบรรยากาศจากการใช้น้ำมันดังนี้ สารตะกั่วจากน้ำมันเบนซิน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ของไนโตรเจน ไฮโดรคาร์บอน และควันเสียที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ [1]
- ผลกระทบต่อปัญหาความปลอดภัย ความปลอดภัยคือการประนีประนอมของการเคลื่อนไหว เมื่อการจราจรมีความแออัดมากเพิ่มขึ้นย่อมส่งผลให้เกิดความเสี่ยงในด้านความปลอดภัยและการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน เนื่องจากปริมาณยานพาหนะที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการขัดแย้งของกระแสจราจรที่เพิ่มมากขึ้นตามมา ผลกระทบทางเศรษฐกิจ และการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการดำเนินชีวิตอีกด้วย

2.2 มลพิษทางอากาศ

ในบริเวณที่ใกล้ถนนที่มีการจราจรติดขัด จะมีปัญหามลพิษทางอากาศที่รุนแรงกว่าในบริเวณที่มีการจราจรคล่องตัว สารมลพิษที่ระบายเข้าสู่บรรยากาศที่เกิดจาก การคมนาคมขนส่ง มลพิษทางอากาที่เกิดจากยานพาหนะมีที่มาของจากส่วนใหญ่ ๆ คือ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ และการระเหยของเชื้อเพลิง มลพิษที่ถูกปล่อยออกมาในอากาศสวนใหญ่จะมาจากการระบบไอเสีย จากการผลไหม้ภายในเครื่องยนต์ที่ไม่สมบูรณ์ โดยมลพิษที่เกิดจากยานพาหนะที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงประกอบด้วย [2]

(1) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
(2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดร์ออกไซด์ (SO2)
(3) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx)
(4) ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SOx)
(5) ฝุ่นละออง (Suspended Particulate Matter : SPM)
(6) ควันดำและควันขาว

2.3 ลักษณะทางแยก

ทางแยกสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ ตามการควบคุมจราจร คือ ทางแยกแบบมีสัญญาณไฟ และทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟ [3]

2.3.1 ทางแยกแบบมีสัญญาณไฟจราจร

ความจำเป็นของการมีสัญญาณไฟจราจรบนทางแยกเนื่องจากช่วยลดอุบัติเหตุจากการลดจำนวนการตัดกันของกระแสจราจร เพิ่มความจุทางแยกจากการเพิ่มอัตราการไหลของกระแสจราจร ซึ่งรูปแบบการจัดสัญญาณไฟจราจรจะคำนึงถึงตัวแปรสำคัญ 4 ประการ คือ ความเร็ว (Speed), ความยาวรอบสัญญาณไฟ (Cycle Length), ระยะห่างระหว่างแยกติดสัญญาณไฟจราจร และประสิทธิภาพของรอบสัญญาณ (Efficiency of Progression) โดยทางแยกสัญญาณไฟสามารถแบ่งลักษณะทางแยกเพื่อใช้พิจารณาออกแบบสัญญาณไฟ ดังนี้

- ทางแยกเดี่ยว (Isolated Signal) : การออกแบบสัญญาณไฟบริเวณทางแยกเดี่ยวจะต้องพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ คือ รอบสัญญาณไฟ (Cycle Time), จังหวะสัญญาณ (Signal Phasing) และระยะเวลาไฟเขียว (Split)
- กลุ่มทางแยก (Signal Group) : ทางแยกในเมืองมักมีลักษณะกระจุกตัว ทำให้จำเป็นต้องจัดการร่วมกันเป็นกลุ่มสัญญาณ (Signal Group) เพื่อให้เกิดการต่อเนื่องของไฟกระแสจราจร (Progression) หรือลดโอกาสที่จะเกิดการติดขัดของทางแยก

2.3.2 ทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร

รูปแบบโดยทั่วไปของทางแยกลักษณะนี้ คือ การใช้ป้ายหยุด (Stop Sign) หรือป้ายให้ทาง (Yield Sign) เพื่อกำหนดทางหลักและทางรองให้แก่ผู้ขับขี่ในแต่ละทิศทางเคลื่อนที่ผ่านทางแยกได้อย่างปลอดภัย ในบางกรณีที่ไม่สามารถติดตั้งป้ายในตำแหน่งที่สังเกตได้ง่าย อาจใช้การทางสีบนผิวจราจรแทนได้

การออกแบบทางแยกให้ปลอดภัย ควรคำนึงถึงระยะการมองเห็นของผู้ขับขี่บนทางหลักและทางรอง โดยจะต้องสามารถมองเห็นซึ่งกันและกันเพื่อให้สามารถชะลอรถจนถึงหยุดเพื่อให้รถเคลื่อนผ่านจุดตัดไปได้อย่างปลอดภัย ในกรณีที่มีอาคารหรือสิ่งกีดขวางบริเวณใกล้ทางแยกที่ทำให้ผู้ขับขี่มองเห็นรถของรถที่เคลื่อนผ่านมาอีกฝั่งในระยะที่สั้นลง จะต้องยืดระยะจากผู้ขับขี่จนถึงจุดตัดทางแยกที่มองเห็นรถที่เคลื่อนผ่านมาอีกฝั่งโดยพ้นสิ่งกีดขวางไปแล้ว

2.4 สัญญาณไฟจราจร

สัญญาณไฟจราจร คือ เครื่องหมายจราจรที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะโดยการเปลี่ยนสีไฟ สัญญาณไฟจราจรทำหน้าที่ ดังต่อไปนี้

(1) ควบคุมไม่ให้เกิดความขัดแย้งของการเคลื่อนที่ของจราจร
(2) เพื่อช่วยให้กระแสจราจรไหล่คล่องตัวมากขึ้น
(3) เพื่อควบคุมการจราจรบริเวณทางข้ามรถไฟและสะพานเปิด-ปิด

การพิจารณาติดตั้งสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยก จะพิจารณาจากปริมาณจราจรที่เข้าสู่ทางแยก จำนวนอุบัติเหตุ จำนวนคนข้ามถนน และโครงข่ายถนน ในกรณีที่พิจารณาจากจำนวนปริมาณการเข้าสู่ทางแยก จะพิจารณาจากเกณฑ์ในการติดตั้งสัญญาณไฟจารจร [4] ได้แก่

- ปริมาณจราจรในช่วงเร่งด่วนบนทางสายหลัก (รวม 2 ทิศทาง) เท่ากับ 900 คัน/ชั่วโมง หรือมากกว่า
- ปริมาณจราจรในช่วงเร่งด่วนบนทางสายรอง (ทิศทางที่มีปริมาณจราจรสูงกว่า) เท่ากับ 100 คัน/ชั่วโมง หรือมากกว่า

การคำนวณคำนวณรอบสัญญาณไฟจราจร (Cycle time) และการแบ่งจังหวะสัญญาณ (Signal split) ตามทาง Webster ได้เสนอแนะสมการที่ใช้ในการคำนวณค่ารอบสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดสามารถคำนวณได้ในสมการที่ (1)

——— (1)

โดยที่ C คือ รอบสัญญาณไฟที่เหมาะสมที่สุด (วินาที), Y คือ ค่าปริมาณจราจรต่อความจุวิกฤตทางแยก และ L คือ เวลาที่สูญเสียในหนึ่งรอบสัญญาณ ซึ่งรวมเวลาที่สูญเสียช่วงออกตัวของจังหวะไฟเขียว และเวลาช่วงไฟแดงและแดงบางส่วนที่ไม่ถูกใช้ในการเคลื่อนที่ของยวดยาน (วินาที) ท้ายที่สุด เมื่อได้ความยาวรอบสัญญาณที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการคำนวณความยามจังหวะสัญญาณให้กับแต่ละเฟส (Split) โดยใช้การจัดสรรตามสัดส่วนปริมาณจราจรต่อความจุของแต่ละทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน [5]

2.5 ทางแยกรูปแบบวงเวียน

วงเวียนเป็นรูปแบบหนึ่งของการจัดการการตัดกระแสจราจร โดยมีเป้าหมายในการลดจำนวนทิศทางของการตัดกระแสจราจร โดยการปรับทิศทางการเคลื่อนผ่านของยวดยานเป็นวงกลม ทำให้เกิดการตัดกันเพียงทิศทางเดียวในแต่ละจุด ส่งผลให้ อัตราการไหลของกระแสจราจรที่เคลื่อนผ่านทางแยกต่ำกว่าในกรณีที่ปริมาณจราจรที่เคลื่อนผ่านแยกไม่สูงนัก

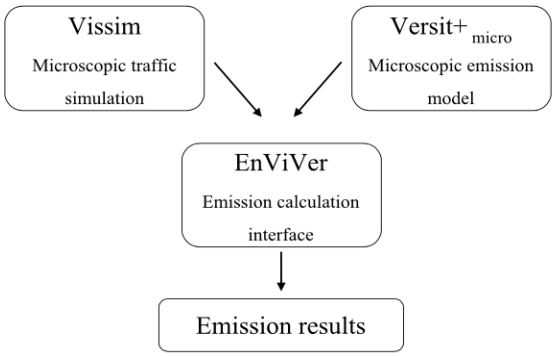
สถานการณ์ที่เหมาสมต่อการใช้วงเวียนมีดังต่อไปนี้

- มีความล่าช้าเกิดขึ้นบนถนนสารรองมาก
- ผลกระทบจากการใช้ระบบสัญญาณไฟจราจรทำให้เกิดความล่าช้ามากยิ่งขึ้น
-

ข้อมูลจาก โปรแกรมสร้างการจำลองการจราจรแบบต่อเนื่องเป็นช่วง (Discrete) ในทุก ๆ วินาที (Time Step) จากนั้นจึงทำการกำหนดสภาวะของสัญญาณไฟจราจรของวินาทีถัดไป แล้วส่งกลับข้อมูล ดังกล่าวนี้ไปยังโปรแกรมสร้างการจำลองสภาพการจราจรเพื่อใช้ในการสร้างภาพเคลื่อนไหว แบบต่อเนื่องของสภาพการจราจร และประเมินผลการจำลอง เช่น ความยาวแถวคอยภายในช่วงเวลาที่กำหนด

2.7 แบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศ

แบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณมลพิษจากการจราจร สำหรับเครือข่ายถนน โดยการสร้างแบบการจราจรระดับจุลภาค PTV VISSIM ร่วมกับแบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศ EnViVer [9] ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณการปล่อยมลพิษทางอากาศที่สามารถคำนวณปริมาณของมลพิษออกมาในรูปของ CO2, NOx และ VOC [9] โดยโปรแกรม EnViVer ได้รับการพัฒนารูปแบบการปล่อยมลพิษมาจากโปรแกรม Versit + โดยใช้ข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากการปล่อยมลพิษของยานพาหนะมากกว่า 20,000 คัน การปล่อยมลพิษของยานพาหนะที่แตกต่างกันในสถานการณ์การจราจรแตกต่างกัน จะถูกนำไปวิเคราะห์และเรียบเรียงในฐานข้อมูล และคำนวณการปล่อยมลพิษการจำลองการจราจรกล้องจุลทรรศน์ตามข้อมูลความเร็ว (Speed profile) ของยานพาหนะแต่ละประเภท ที่ได้จากโปรแกรมแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค PTV VISSIM ซึ่งวิธีการทำงานของ EnViVer แสดงดังรูปที่ 1 [10]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณปริมาณมลพิษในอากาศของโปรแกรม EnViVer

การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจราจร (กรัม/ชั่วโมง) ในโปรแกรม EnViVer สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2)

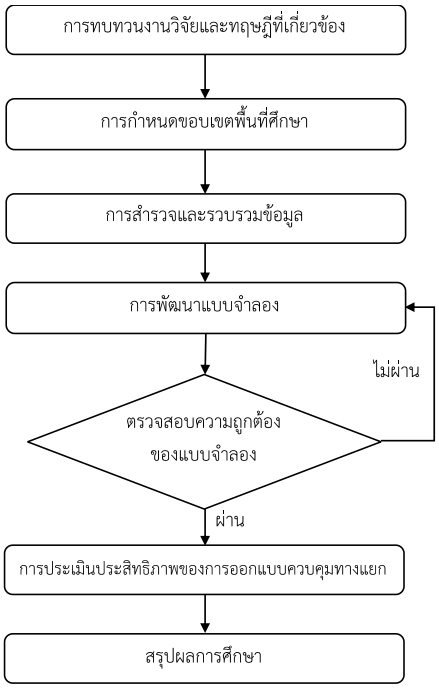
(2)

โดยที่ คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (กรัม/ชั่วโมง), คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (กรัม/กิโลเมตร), คือ ปริมาณจราจร (คัน/ชั่วโมง), คือ ความยาวถนน (กิโลเมตร), คือ มวลสารจำเพาะ, คือ ประเภทของยานพาหนะ, คือ ข้อมูลความเร็ว (Speed profile) *และ* คือ ลักษณะของถนน

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณมลพิษจากการจราจรสำหรับเครือข่ายถนนในเมืองของ New Borg El-Arab ประเทศอียิปต์ และทำการศึกษาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ใน Johanneberg, Gothenburg โดยการสร้างแบบการจราจรในโปรแกรม PTV VISSIM เพื่อจำลองการปล่อยมลพิษที่ได้จากแบบจำลองการปล่อยมลพิษ EnViVer ภายใน VISSIM ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีและการเป็นตัวแทนของข้อมูลแบบจำลองที่มี R2 สูง จึงเป็นไปได้ที่จะใช้โมเดลจำลองการจราจรเพื่อการวางแผนการจราจรสิ่งแวดล้อมสำหรับเครือข่ายถนนในเขตเมือง [11]

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

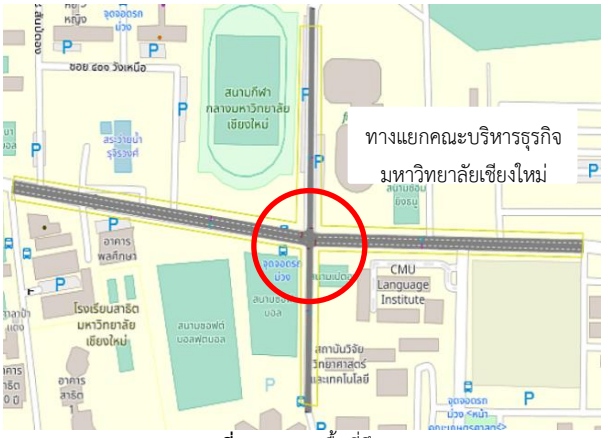
เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการจัดการทางแยกภายในสถานศึกษา ดังนั้นพื้นที่ศึกษาที่ดำเนินการศึกษาคือบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีเส้นทางสายหลักจากวงเวียนหอนาฬิกาไปยังประตูทางเข้ามหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ทิศตะวันตก-ตะวันออก) และเส้นทางสายรองจากสนามกีฬากลางมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ไปยังคณะบริหารธุรกิจ (ทิศเหนือ-ใต้) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

3.2 การสำรวจและรวบรวมข้อมูล

การสำรวจและรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ จะแบ่งการสำรวจข้อมูลเป็น 3 ส่วน ได้แก่

3.2.1 ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา

การสำรวจลักษณะทางกายภาพของบริเวณพื้นที่ศึกษา จะสามารถทราบถึงลักษณะทางกายภาพ ประกอบด้วย ความกว้างช่องจราจร จำนวนช่องจราจร ลักษณะเครื่องหมายจราจรบริเวณทางแยก และป้ายจราจร โดยบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จะประกอบด้วยเส้นทาง 2 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทางสายหลัก (เส้นทางทิศตะวันตก-ตะวันออก) และเส้นทางสายรอง (เส้นทางทิศเหนือ-ใต้) ถนนเส้นทางสาย มีลักษณะเป็นถนน 2 ช่องจราจร มีความกว้างช่องจราจรละ 3 เมตร และมีการติดตั้งสัญญาณไปจราจรบริเวณทางแยก ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยข้อมูลที่ได้จากการสำรวจลักษณะทางกายภาพจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองต่อไป



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ

3.2.2 ข้อมูลปริมาณการจราจร

การรวบรวมข้อมูลจราจรของผู้ใช้ถนนจะรวบรวมโดยอาศัยข้อมูลปริมาณการจราจรรายชั่วโมงและสัดส่วนยานพาหนะบริเวณสี่แยกคณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak period) และช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำสุด (Off-peak period) ปริมาณการจราจรทั้งสองช่วงเวลาแสดงดังตารางที่

3.2.3 ข้อมูลสัญญาณไฟจราจร

ในปัจจุบันทางแยกคณะบริหารธุรกิจ เป็นทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร (4 จังหวะ) การสำรวจข้อมูลสัญญาณไฟจราจรจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยการจดบันทึกแยกระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรตามทิศทาง จากนั้นนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างแบบจำลองต่อไป

3.3 การพัฒนาแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคและแบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศ PTV VISSIM สำหรับวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับการออกแบบควบคุมทางแยกรูปแบบต่าง ๆ ภายในสถานศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยมีขั้นตอนดังนี้



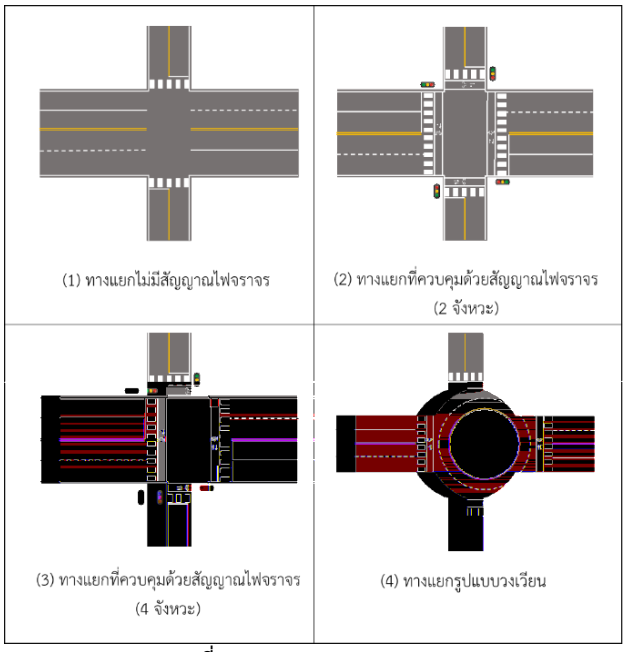
รูปที่ 5 การพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

3.3.1 การสร้างโครงข่าย

การสร้างโครงข่ายพื้นที่ศึกษาถือเป็นการเริ่มต้นสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง โดยนำข้อมูลลักษณะทางกายภาพที่ได้จากการสำรวจภาคสนามมาสร้างแบบทางแยกบริเวณที่ต้องการ

3.3.2 การสร้างรูปแบบการควบคุมทางแยกทางเลือก (Scenarios)

การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดรูปแบบการควบคุมทางแยกทางเลือกสำหรับในไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร (2) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ (3) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร 4 จังหวะ (รูปแบบปัจจุบัน) และ (4) ทางแยกรูปแบบวงเวียน ดังแสดงในรูปที่ 6 ประกอบด้วย



รูปที่ 6 รูปแบบการควบคุมทางแยก

(1) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร

แบบจำลองทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร เป็นทางแยกถนนสายหลัก 4 ช่องจราจร (เส้นทางทิศตะวันตก-ออก) ตัดกับถนนสายรอง 2 ช่องจราจร (เส้นทางทิศเหนือ-ใต้)

(2) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ

แบบจำลองทางแยกนี้ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ (2 Phase) ประกอบไปด้วย เฟส 1 ทิศตะวันตก-ตะวันออก และเฟส 2 ทิศเหนือ-ใต้

ระยะสัญญาณไฟจราจรสามารถคำนวณได้จากข้อมูลปริมาณการจราจร โดยใช้หลักการออกแบบสัญญาณไฟจราจร (Traffic Signal Design) ระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ

จังหวะสัญญาณไฟ (Signal Phase)	ระยะเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)		
	ไฟเขียว	ไฟเหลือง	ไฟแดง
Phase 1 ทิศตะวันตก-ตะวันออก	39	3	15
Phase 2 ทิศเหนือ-ใต้	12	3	45

(3) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ

แบบจำลองทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ (4 Phase) เป็นรูปแบบทางแยกที่ใช้สัญญาณไฟควบคุมอยู่ในปัจจุบัน

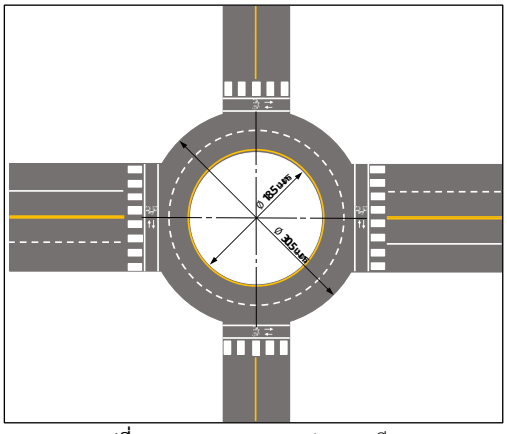
ระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรในแบบจำลองได้จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลสัญญาณไฟจราจร ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ

จังหวะสัญญาณไฟ (Phase)	ระยะเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)		
	ไฟเขียว	ไฟเหลือง	ไฟแดง
Phase 1 มุ่งหน้าทิศตะวันออก	29	3	80
Phase 2 มุ่งหน้าทิศตะวันตก	30	3	79
Phase 3 มุ่งหน้าทิศใต้	13	3	97
Phase 4 มุ่งหน้าทิศเหนือ	15	3	94

(4) ทางแยกรูปแบบวงเวียน

แบบจำลองทางแยกแบบวงเวียนในงานวิจัยนี้ เป็นวงเวียนขนาดกลาง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในมีขนาด 30.5 เมตร และ 18.5 เมตร ตามลำดับ ภายในวงเวียนมีช่องจราจรทั้งหมด 2 ช่องจราจร ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งขนาดของวงเวียนสามารถคำนวณได้จากข้อมูลปริมาณการจราจร ตามมาตรฐานในการติดตั้งวงเวียน



รูปที่ 7 ขนาดของทางแยกรูปแบบวงเวียน

3.3.3 การกำหนดปริมาณจราจร

นำข้อมูลปริมาณจราจรที่ได้จากการสำรวจใส่ในแบบจำลอง แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak period) และช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำสุด (Off-peak period) ดังแสดงในตารางที่ 4 นอกจากข้อมูลของปริมาณจราจรในแต่ละช่วงเวลาแล้ว ยังมีข้อมูลบางอย่างที่จำเป็นต้องกำหนดเข้าไปในแบบจำลอง ได้แก่ ปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ระบบ (Vehicle Input) สัดส่วนยานพาหนะในระบบ (Traffic Composition) สัดส่วนการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (Vehicle Route) และความเร็วของยานพาหนะ (Vehicle Speed) เป็นต้น

ตารางที่ 4 ปริมาณจราจรบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ

ปริมาณการจราจร (คัน/ชั่วโมง)	ทิศทาง			
	มุ่งหน้าทิศตะวันออก	มุ่งหน้าทิศตะวันตก	มุ่งหน้าทิศใต้	มุ่งหน้าทิศเหนือ
Peak period	1,292	1.104	208	232
Off-peak period	394	528	70	19

3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง คือ การตรวจสอบแบบจำลองให้มีสภาพการจราจรใกล้เคียงกับสภาพจริงมากเท่าไหร่ โดยการพิจารณาจากความล่าช้าในการเดินทาง ปริมาณจราจรบนช่วงถนน หรือปริมาณจราจรบริเวณทางแยก เป็นต้น จากนั้นจึงสามารถนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพสำหรับสถานการณ์อื่น ๆ ได้ในภายหลัง

3.4 การประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบการควบคุมทางแยก

การวิเคราะห์ประสิทธิของรูปแบบการควบคุมทางแยก เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของการควบคุมทางแยกทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร (2) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ (3) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ และ (4) ทางแยกรูปแบบวงเวียน โดยพิจารณาจากตัวชี้วัดด้านการเคลื่อนตัวและความล่าช้าในการเดินทาง ปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิง และปริมาณการปล่อยมลพิษทางอากาศ

3.5 สรุปผลการศึกษา

สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับการออกแบบควบคุมทางแยกรูปแบบต่าง ๆ พร้อมเสนอแนวทางการวางแผนและเสนอแนวทางการออกแบบควบคุมทางแยกที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งต่อผู้ใช้รถใช้ถนนและต่อชุมชนมหาวิทยาลัยที่ยั่งยืน

4. การประเมินประสิทธิภาพรูปแบบการควบคุมทางแยก

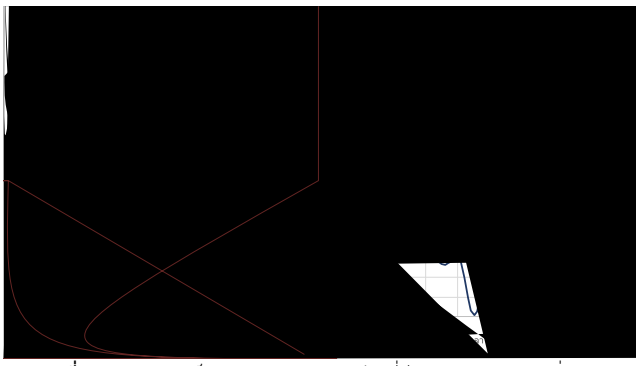
การประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบการควบคุมทางแยก เป็นการวิเคราะห์การจราจรจากการรูปแบบการควบคุมทางแยก 4 รูปแบบ (1) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร (2) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ (3) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ และ (4) ทางแยกรูปแบบวงเวียน ที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค โดยผลการประเมินการควบคุมทางแยกบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจในช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak period) และช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำสุด (Off-peak period) สามารถประเมินประสิทธิภาพได้จากดัชนี ๆ ดังนี้ข

4.1 ประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนตัวในการเดินทาง

จากผลการประเมินด้านการเคลื่อนตัว เป็นวิเคราะห์ความเร็วและความล่าช้าในการเดินทางของยานพาหนะทั้งหมดบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ เมื่อประเมินผลออกมาในรูปแบบของกราฟความเร็ว (Speed profile) ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเคลื่อนตัวผ่านทางแยก พบว่า ในช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak Period) รูปแบบการควบคุมทางแยกที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด คือ ทางแยกรูปแบบวงเวียน ในช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำสุด (Off-peak Period) รูปแบบการควบคุมทางแยกที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด คือ ทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร



รูปที่ 8 กราฟความเร็ว (Speed profile) ช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด



รูปที่ 9 กราฟความเร็ว (Speed profile) ช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำสุด

จากความสามารถในการเคลื่อนตัวผ่านทางแยกของแต่ละรูปแบบการควบคุมทางแยกส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางแตกต่างกัน ในช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak Period) ทางแยกรูปแบบวงเวียนเกิดความล่าช้าในการเดินทางน้อยที่สุด รองลงมา คือ ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ, ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ และทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร เมื่อวิเคราะห์ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของทางแยกรูปแบบวงเวียน เทียบกับทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟ (Base condition) พบว่า ทางแยกรูปแบบวงเวียนมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลง 83.14 % ซึ่งหมายความว่า ทางแยกรูปแบบวงเวียนมีประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนตัวในการเดินทางที่ดีกว่าทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร (Base condition) และในช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำสุด (Off-peak Period) ทางแยกทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจรเกิดความล่าช้าในการเดินทางน้อยที่สุด รองลงมา คือ ทางแยกรูปแบบวงเวียน, ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ และทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ ผลการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมทางแยกแต่ละรูปแบบ แสดงดัง ตารางที่ 5

4.2 ผลกระทบด้านมลพิษทางอากาศ (Emission)

ผลกระทบด้านมลพิษทางอากาศ (Emission) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณมลพิษในอากาศที่ยานพาหนะ จากการประเมินผลผ่านแบบจำลองการจราจร พบว่า ในช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด การควบคุมทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจารจร ส่งผลให้ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านทางแยกปล่อยมลพิษของปริมาณ CO, NOx และ VOC ในอากาศมากที่สุด รองลงมา

คือทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ, ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ และลำดับสุดท้ายคือ ทางแยกแบบวงเวียน และในช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำที่สุด พบว่า ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะการควบคุม ส่งผลให้ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านทางแยกปล่อยมลพิษของปริมาณ CO, NOx และ VOC ในอากาศมากที่สุด รองลงมาคือทางแยก ที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ, ทางแยกแบบวงเวียน และลำดับสุดท้ายคือ ทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร ผลการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมทางแยกแต่ละรูปแบบ แสดงดัง ตารางที่ 5

4.3 ผลกระทบการใช้พลังงานเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

การวิเคราะห์ปริมาณการเผาผลาญพลังงานจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของยานพาหนะบริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ จากแบบจำลองการจราจร พบว่า ปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงของยานพาหนะทั้งหมดบนทางแยกทั้ง 4 พบว่า ในช่วงที่มีปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak Period) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร ส่งผลให้ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านทางแยกมีปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุดมากที่สุด รองลงมาคือทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ, ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ และลำดับสุดท้ายคือ ทางแยกแบบวงเวียน และในช่วงที่มีปริมาณการจราจรต่ำที่สุด (Off-peak Period) พบว่า ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะการควบคุมส่งผลให้ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านทางแยกมีปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุดมากที่สุด รองลงมาคือทางแยก ที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ, ทางแยกแบบวงเวียน และ ทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจารจร ตามลำดับ ผลการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมทางแยกแต่ละรูปแบบ แสดงดัง ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบการควบคุมทางแยก

ดัชนี		รูปแบบการควบคุมทางแยก			
		ไม่มีสัญญาณไฟจราจร	สัญญาณไฟจราจรแบบ 2 จังหวะ	สัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ	วงเวียน
Peak period					
ปริมาณการจราจร (คัน)		2800	2807	2823	2826
ความล่าช้า (วินาที/คัน)		60.32	19.38	37.79	10.17
ปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/คัน)		3.390	1.835	2.078	1.689
ปริมาณการปล่อยมลพิษทางอากาศ (กรัม/คัน)	CO	0.660	0.357	0.404	0.329
	NOX	0.786	0.425	0.482	0.391
	VOC	0.049	0.026	0.030	0.024
Off-peak period					
ปริมาณการจราจร (คัน)		1019	1020	1028	1018
ความล่าช้า (วินาที/คัน)		1.27	6.28	31.27	1.31
ปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/คัน)		1.228	1.366	1.876	1.308
ปริมาณการปล่อยมลพิษทางอากาศ (กรัม/คัน)	CO	0.239	0.266	0.365	0.254
	NOX	0.285	0.317	0.435	0.303
	VOC	0.018	0.020	0.027	0.019

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการควบคุมทางแยก โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation Model) สร้างแบบจำลองการจราจรการควบคุมทางแยก 4 รูปแบบ ได้แก่ 1) ทางแยกไม่มีสัญญาณไฟจราจร (2) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร (2 จังหวะ) (3) ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร (4 จังหวะ) และ (4) ทางแยกรูปแบบวงเวียนซึ่งมีขอบเขตการศึกษาอยู่บริเวณทางแยกคณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผลของการศึกษาพบว่า ภายใต้สภาพการจราจรเดียวกัน รูปแบบการควบคุมทางแยกต่าง ๆ จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านการใช้พลังงานและมลภาวะทางอากาศในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนี้

- จากการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมทางแยกในกรณีที่ปริมาณการจราจรสูงสุด (Peak Period) พบว่า ทางแยกรูปแบบวงเวียน เป็นทางแยกที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและ

สิ่งแวดล้อมสูงที่สุด เนื่องจาก ทางแยกรูปแบบวงเวียนช่วยให้การจราจรมีความคล่องตัวมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการเดินทางและความล่าช้าน้อยลง อีกทั้งยังส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษในอากาศน้อยลงอีกด้วย ในทางกลับกัน ทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร กลับส่งผลให้มีการจราจรติดขัด เนื่องจากความคล่องตัวในการเดินทางผ่านทางแยกน้อยลง ปริมาณแถวคอยบริเวณทางแยกสูง ยานพาหนะไม่สามารถเคลื่อนตัวด้วยความเร็วที่ต่อเนื่อง จึงทำให้ระยะเวลาในการเดินทาง, ความล่าช้าในการเดินทาง, ปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษในอากาศมาขึ้นตามไปด้วย

- จากการประเมินประสิทธิภาพการควบคุมทางแยกในกรณีปริมาณการจราจรต่ำสุด (Off-peak Period) พบว่า ทางแยกแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสูงที่สุด ยานพาหนะสามารถเคลื่อนตัวผ่านทางแยกได้อย่างคล่องตัว เนื่องจากมีปริมาณการจราจรที่น้อย จึงสามารถเคลื่อนตัวผ่านทางแยกได้โดยไม่ต้องหยุดรอ ส่งผลให้ระยะเวลาในการเดินทาง, ความล่าช้า, ปริมาณการใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษในอากาศต่ำ ในทางกลับกัน ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบ 4 จังหวะ มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมต่ำที่สุด เนื่องจากต้องหยุดรอสัญญาณไฟที่มีระยะเวลานาน ส่งผลให้ยานพาหนะใช้พลังงานเชื้อเพลิงและปล่อยมลพิษทางอากาศปริมาณสูงที่สุดในการควบคุมทางแยกทั้ง 4 รูปแบบ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับการออกแบบควบคุมทางแยกรูปแบบต่าง ๆ ภายในสถานศึกษา โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคและแบบจำลองการปล่อยมลพิษทางอากาศ เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาผลการเปรียบเทียบในเชิงสัมพัทธ์ (Relative volume) จึงทำให้งานวิจัยนี่มีข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ ดังนี้

- การวิเคราะห์สถาพการจราจรในปัจจุบันโดยใช้แบบจำลองระดับจุลภาค จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลปริมาณปล่อยมลพิษในอากาศของยานพาหนะที่ได้จากการวัดค่าตามสภาพจริง เพื่อเปรียบเทียบแบบความคลาดเคลื่อนของผลการประเมินที่ได้จากแบบจำลอง
- งานวิจัยในอนาคตควรมีการวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของรูปแบบการควบคุมทางแยกแต่ละรูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบหาความคุ้มค่าในการลงทุนและเพื่อประกอบการตัดสินใจ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางวิศวกรรมขนส่งและเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐาน (Excellence Center in Infrastructure Technology and Transportation Engineering – ExCITE) ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลือในด้านวิชาการ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] พรวิวาห์ กีกก้อง. (2562). *ผลกระทบจากการใช้พลังงานต่อสิ่งแวดล้อมในกรณีการคมนาคมขนส่ง*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://sites.google.com/site/energyandenvironment00

[2] วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ และคณะ (2543) *มลพิษทางอากาศโยธา*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 4.

[3] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (2559). *คู่มือมาตรฐานด้านการจัดระบบการจราจร เรื่อง การจัดระบบการจราจร*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.otp.go.th

[4] กรรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม (2554). *คู่มือและมาตราฐานสัญญาณไฟจราจร*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.doh.go.th

[5] Federal Highway Administration (2017). Traffic Signal Timing Manual. Retrieved April 19, 2020 , from Website: https://ops.fhwa.dot.gov

[6] Federal Highway Administration (2010). *Roundabouts : An Informational Guide*. Cooperative Research Programs, pp.156-207.

[7] กรมทางหลวงชนบท สำนักส่งเสริการพัฒนาทางหลวงท้องถิ่น (2554). *การปรับปรุงลักษณะทางกายภาพทางหลวงท้องถิ่นในเขตเมือง*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.doh.go.th

[8] PTV GROUP (2015.). VISSIM User Manual. Retrieved April 18, 2020 , from Website: http://vision-traffic.ptvgroup.com

[9] Elkafoury, A., NEGM, A. M., Bady, M. F., & Hafezaly, M. (2015). *VISSIM based microscopic traffic emission prediction mode*l. Alexandria: University of Alexandria.

[10] Blomgren, M., Jungbjer, P. (2019). *Emission Modeling of electric urban transit*. Master's Thesis. Goteborg: Chalmers University of Technology.

[11] Mattias Blomgren and Paula Jungbjer. (2019). *Emissions modeling of electric urban transit Analysis of environmental effects of electric public transit in Johanneberg by using the software PTV Vissim and EnViVer*. Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.