

การวิเคราะห์การไหลของจราจรที่สี่แยกไฟจราจรด้วยเทคนิค แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

กสิณ รังสิกรพุม¹

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 เมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

Received: 18 November 2019; Revised: 2 March 2020; Accepted: 10 March 2020

บทคัดย่อ

การใช้นโยบายของประเทศไทยและทั่วโลกในปัจจุบันมีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการจราจรบริเวณสี่แยกไฟแดงในชุมชนเมืองและบริเวณสถาบันการศึกษาที่มีผู้สัญจรอย่างคับคั่ง ทำให้การระบายรถยนต์ทำได้ยาก โดยการจัดการเวลาของสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมส่งผลต่อการจัดการการระบายการไหลของยานพาหนะ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาการจราจรโดยใช้โปรแกรม AnyLogic ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์แบบตัวแทนและใช้กรณีศึกษาที่แยกไฟแดงหน้าประตูทางออกของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลการเดินทางเฉลี่ยในช่วงเช้า (8:00-10:00) กลางวัน (11:00-13:00) และเย็น (16:00-18:00) และทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์สถานการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาการจราจรโดยวิเคราะห์ระยะเวลาการสัญจรในระบบความเร็วในการเดินทาง และ จำนวนการหยุดของรถ ซึ่งแบ่งเป็นสองรูปแบบการทดลองคือ 1) การจำลองระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรในแต่ละเส้นทางเพื่อหาระยะเวลาของสัญญาณไฟที่เหมาะสมที่สุด และ 2) การจำลองการลดจำนวนช่องทางการจราจรจากเส้นทางการจราจรหลัก เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการปิดถนนที่มีต่อเวลาสัญจรที่เพิ่มขึ้น โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่า การตั้งระยะเวลาสัญญาณไฟด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุดทำให้ค่าเฉลี่ยของเวลาในระบบอยู่ที่ 189.53 วินาที/คัน ความเร็วอยู่ที่ 11.48 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และจำนวนการหยุดของรถอยู่ที่ 2.48 ครั้งต่อคัน นอกจากนี้พบว่า การลดจำนวนช่องทางในเส้นทางหลักส่งผลให้ระยะเวลาในระบบเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ประมาณ 65% โดยผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปขยายผลเพื่อการจัดการจราจรอย่างเป็นระบบได้ในสถานการณ์อื่นๆ ต่อไป

คำสำคัญ: การวิเคราะห์การไหล, การจัดการจราจร, สี่แยกไฟแดง, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* Corresponding author. E-mail: kasinphd@gmail.com

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Analysis of Traffic Flow at a Red Light Intersection using Computer Simulation technique

Kasin Ransikarbum¹

Ubonratchathani University, 85 Mueang Si Khai, Warin
Chamrap District, Ubon Ratchathani, 34190

Received: 18 November 2019; Revised: 2 March 2020; Accepted: 10 March 2020

Abstract

Due to an increasing use of vehicles in major cities in Thailand and around the world, traffic congestion problems are increasing. In particular, traffic at the intersection nearby the urban community and educational institutions is congested by a number of commuters and passengers during the peak time, which causes the problem with flow management. Proper management and analysis of red lights at the intersection also affects the flow of vehicles. In this research, we aim to evaluate traffic problems at the intersection using the agent-based simulation software called AnyLogic. The case study is conducted at the main entrance in front of Ubonratchathani University. Initially, average data are collected during the peak hour in the morning (8:00-10:00), the afternoon (11:00-13:00), and the evening (16:00-18:00). Then, the designed experiments are conducted to test various hypothesized scenarios that affect traffic congestion in terms of the average time spent in the system, the average speed of the vehicles, and the average number of car stops. In particular, two designed experiments are conducted as follows: 1) the experiment to assess the best condition of the traffic light setting, in which the timing of traffic light in each direction is varied for each traffic direction; and 2) the experiment to test how reduced traffic lanes affect the travel time for commuters in the system. The analyzed results show that the best condition for the traffic light yields the average time of 189.53 seconds/car, the average speed of 11.48 kilometers per hour, and the average number of stops at 2.48 times/car. In addition, reduced traffic lanes in the main roads can affect the time spent in the system up to around 65%. It is expected that results from this study can be further applied and extended to other situations for effective traffic management.

Keywords: Flow analysis, Traffic management, Traffic-light intersection, Ubonratchathani University

* Corresponding author. E-mail: kasinphd@gmail.com

¹ Department of Industrial Engineering, Engineering faculty, Ubonratchathani University

1. บทนำ

ในปัจจุบัน พบว่ามีอัตราการใช้น้ำมันของประชาชนในประเทศไทยและทั่วโลกจำนวนมากขึ้น ทำให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดในหลายๆ แห่ง โดยปัญหาการจราจรเกิดจากจำนวนประชากรที่หนาแน่น มีการเดินทางเคลื่อนย้ายไปยังสถานที่ต่างๆ ซึ่งส่งผลเสียทำให้ผู้เดินทางต้องใช้เวลาอยู่บนท้องถนนมากขึ้น ประกอบกับชุมชนเมืองส่วนใหญ่มีลักษณะการเป็นศูนย์กลางทางด้านต่างๆ ทำให้มีการจราจรหนาแน่นบริเวณศูนย์กลางเมืองเนื่องจากเป็นที่รวมกิจกรรมต่างๆ ที่สำคัญ โดยการจัดการจราจรบริเวณสี่แยกไฟแดงถือเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่สำคัญ โดยเฉพาะบริเวณชุมชนและหน้าสถาบันการศึกษา ซึ่งในช่วงเวลาที่ต้องไปทำงานหรือช่วงเวลาเลิกงาน ทำให้มีปริมาณผู้คนใช้น้ำมันมากเป็นพิเศษ ดังนั้นการจัดการจราจรและการระบายรถจึงทำได้ยาก เกิดเป็นปัญหาการจราจร [1]-[2]

ทั้งนี้ได้มีการประมาณค่าใช้จ่ายและความสูญเสียทางเศรษฐกิจที่เกิดจากการจราจรติดขัดในเมืองต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการจราจรติดขัดที่สูงที่สุดคือที่สหรัฐอเมริกาคิดเป็นมูลค่า 305 พันล้านดอลลาร์ในปี 2017 ซึ่งคำนวณจากค่าใช้จ่ายทางตรงของผู้ใช้น้ำมัน เช่น ค่าน้ำมันและเวลาที่สูญเสีย รวมถึงค่าใช้จ่ายทางอ้อม เช่น ค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียโอกาสในการทำธุรกิจ เป็นต้น โดยแม้จะมีการพยายามศึกษาและแก้ปัญหาการจราจรอย่างต่อเนื่อง แต่ด้วยลักษณะของปัญหาการจราจรที่มีความซับซ้อนและมีรายละเอียดเงื่อนไขมากมายตามแต่ละพื้นที่ ทำให้เป็นปัญหาที่แก้ไขได้ยาก โดยการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงเพื่อที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์และแก้ปัญหาการจราจรที่เกิดขึ้นที่เหมาะสมกับสถานการณ์ในแต่ละชุมชนที่มีการจราจรอย่างหนาแน่นเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการจราจรอย่างมีประสิทธิภาพและตรงจุดต่อไป [3]-[8]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโมเดลแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) โดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการจราจรในงานวิจัยนี้คือ AnyLogic [9] ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์ปัญหาการจราจร โดยข้อดีของโปรแกรม AnyLogic คือการเป็นโปรแกรมที่สามารถทำการจำลองสถานการณ์ได้แบบหลากหลายวิธีพร้อมกัน (Multi-Method Simulation) ในรูปแบบของการโมเดลแบบตัวแทน (Agent-Based Simulation - ABS) การโมเดลแบบเหตุการณ์จำกัด (Discrete Event Simulation - DES) และการโมเดลแบบระบบเคลื่อนไหว (System Dynamics - SD) [10-12] โดยข้อดีของการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์คือการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีความไม่แน่นอนมาเกี่ยวข้องได้ดี รวมถึงการใช้ภาพเคลื่อนไหว (Animation) เข้ามาช่วยในการตัดสินใจ ในขณะที่ข้อเสียเกี่ยวข้องกัเวลาในการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้เวลานานเมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [20-23]

ในส่วนของโปรแกรม AnyLogic เอง ได้มีการถูกนำมาใช้วิเคราะห์แบบจำลองในงานวิจัยที่หลากหลาย ทั้งในด้านการขนส่ง [13-14] การจัดการภัยพิบัติ [15-16] รวมถึงการวางแผนและการบริหารจัดการในระดับหน่วยงานต่างๆ [17-18] เช่น Ransikarbum และคณะ [13] ได้ทำการศึกษากระบวนการออกแบบถนนทางหลวงโดยวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคนขับรถ (agent) และสิ่งแวดล้อม (highway) โดยใช้โปรแกรม AnyLogic แบบ ABS นอกจากนี้ Joo และคณะ [15] ได้ทำการวิเคราะห์การจัดการเพลิงไหม้ในโกดังโดยศึกษารูปแบบการกระจายของไฟและการอพยพของผู้ใช้อาคาร (Agent) ในงานวิจัย ต่อมา Kim และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาการวางแผนการเปลี่ยนแปลงของประชากรในประเทศเกาหลีใต้ โดยใช้โปรแกรม AnyLogic ในการวิเคราะห์ปัญหาผู้สูงอายุที่มากขึ้นและภาวะการเกิดของเด็กที่น้อยลงอย่างเป็นระบบ เป็นต้น

2.2 ทฤษฎีทางด้านการควบคุมสัญญาณไฟจราจร

ในส่วนของการจัดการและควบคุมสัญญาณไฟจราจรบริเวณแยกจราจรต่างๆ เอง ได้มีการแบ่งรูปแบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเป็นสองส่วนหลักคือแบบการควบคุมคงที่ (Fixed-time) และแบบกระตุ้น (Actuated Control) ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่การใช้งานต่าง ๆ [38-39] โดยหลักการของแบบควบคุมคงที่เป็นการใช้ข้อมูลในอดีตเพื่อควบคุมสัญญาณไฟ โดยเลือกรูปแบบของสัญญาณไฟจราจรจากการที่ได้ออกแบบไว้ล่วงหน้า ซึ่งอาจมีการควบคุมที่แตกต่างกันตามช่วงเวลาของวัน เช่นช่วงเร่งด่วนตอนเช้าหรือตอนเย็น ในขณะที่หลักการควบคุมแบบกระตุ้น เป็นการเชื่อมโยงระหว่างเครื่องตรวจจับการจราจรกับจังหวะของสัญญาณไฟจราจร ทำให้การควบคุมจังหวะของสัญญาณไฟเป็นไปตามปริมาณจราจรที่มากหรือน้อย ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นอีกสามส่วนย่อย คือแบบกึ่งกระตุ้น (Semi-actuated control) แบบกระตุ้นเต็มที่ (Fully-actuated control) และแบบพิจารณาปริมาณและความหนาแน่น (Volume-density control) ซึ่งแตกต่างตามรูปแบบเส้นทางหลักเส้นทางรอง

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้เป็นการพิจารณากรณีศึกษาในลักษณะการควบคุมคงที่ จากการใช้ข้อมูลจราจรในการกำหนดระยะเวลาของสัญญาณไฟที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้ในลักษณะของแบบกระตุ้นได้เช่นกัน

2.3 แบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาจราจร

ได้มีทฤษฎีและงานวิจัยที่หลากหลายที่เป็นการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้โปรแกรมต่างๆ ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการจราจร โดยเป็นการบูรณาการในส่วนของวิศวกรรมระบบ (System Engineering) และวิศวกรรมจราจร (Traffic Engineering) ยกตัวอย่างเช่นทฤษฎีและโมเดลที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณช่วงเวลารอบของไฟแดง [34] ทฤษฎีทางด้านการโมเดลการเปลี่ยนแปลงและการรวมเลน [13, 35] รวมถึงเทคโนโลยีต่างๆ ของระบบสัญญาณไฟจราจร ทั้งแบบคงที่ (Fixed time signal control) แบบแปรผันตามการมีรถในระบบจราจร (Vehicle activated signal control) และแบบการเปลี่ยนตามปริมาณจราจรแบบปรับตัว (Adaptive signal control) [36-37] เป็นต้น

นอกจากนี้ในการศึกษาโดยวิเคราะห์หาค่าการปรับเวลาสัญญาณจราจรที่เหมาะสมที่สุดเอง ได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่หลากหลาย ทั้งในรูปแบบของการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [19, 32, 39-40] การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าที่ดีที่สุด [41] การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [42] และการใช้เครื่องมือทางด้านเมตาฮีริสติกส์ [42-43] นอกจากนี้ได้มีการเสนอรูปแบบการใช้เทคโนโลยีในลักษณะของระบบการจราจรและการขนส่งแบบฉลาด (Intelligent Transportation System : ITS) [44] ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อข้อมูลแบบทันเวลา (real time) ระหว่างรถยนต์กับรถยนต์ (Vehicle-Vehicle) และรถยนต์กับสิ่งก่อสร้าง (Vehicle-Infrastructure) เป็นต้น

ทั้งนี้ ในส่วนของการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับปัญหาทางด้านการจราจรเอง ได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมต่างๆ ที่หลากหลายในการนำมาสร้างแบบจำลอง เช่นการใช้โปรแกรม ProModel ในการวิเคราะห์คาบเวลาของสัญญาณไฟจราจร โดยการจำลองสถานการณ์จากกรณีศึกษาของมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย [19] การใช้โปรแกรม ProModel ในการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวสินค้าโดยพิจารณาแบบยานพาหนะที่หลากหลาย [31] การใช้โปรแกรม AnyLogic ในการวิเคราะห์สัญญาณไฟจราจรแบบปรับตัว (Adaptive Traffic Signal) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการจราจรที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณจราจรตลอดเวลา [32] การใช้โปรแกรม VisSim ร่วมกับ Messo ในการวิเคราะห์ปัญหาการจราจรในประเทศสวีเดนแบบระดับภาพรวมของเมือง และแบบละเอียดของสามแยกไฟแดง [33] เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม พบว่างานวิจัยที่เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาการจราจรในไทยยังมีจำกัด นอกจากนี้ยังขาดมุมมองในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเพิ่มหรือลดเลน โดยงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์แบบ ABS ร่วมกับการใช้ฟังก์ชัน Road Traffic Library ในการวิเคราะห์ปัญหา

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

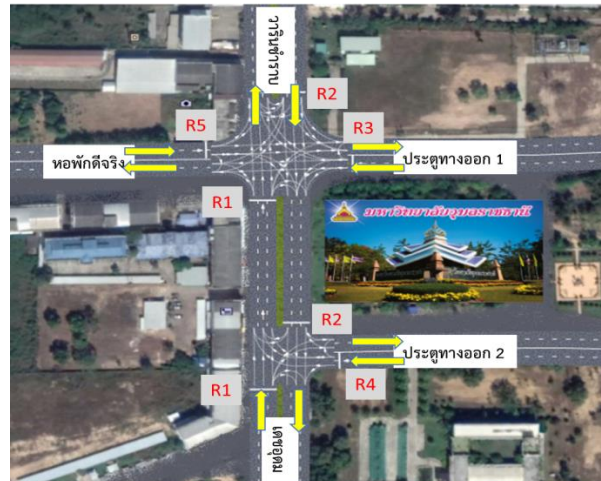
3.1 กรณีศึกษาและการเก็บข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยได้ทำแบบสำรวจและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้กรณีศึกษาบริเวณแยกไฟแดงหน้ามหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (รูปที่ 1) เพื่อเป็นการประเมินแนวทางที่เหมาะสมและการวิเคราะห์ถึงปัญหาการจราจรที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1 แสดง (บน) ประตู่ที่ 1 และ (ล่าง) ประตู่ที่ 2

โดยแสดงภาพรวมการจราจรบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย 2 แยกไฟแดงสำหรับประตูทางออกที่ 1 และประตูทางออกที่ 2 และมีลักษณะเป็นห้าเส้นทางการเดินทาง คือ (R1) เส้นทางเดชอุดม-วารินชำราบ; (R2) เส้นทางวารินชำราบ-เดชอุดม; (R3) เส้นทางจากประตูที่ 1; (R4) เส้นทางจากประตูที่ 2; และ (R5) เส้นทางจากหอพักตึกจริง โดยเส้นทางหลักคือ R1 และ R2 เป็นถนนฝั่งละ 3 เลน และมีเส้นทางรองที่เหลือเป็นถนนฝั่งละ 2 เลน



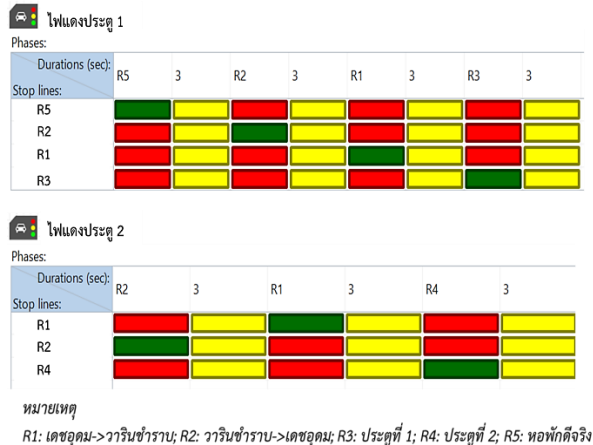
รูปที่ 2 แสดงภาพรวมของการจราจรหน้ามหาวิทยาลัย

โดยผลการเก็บข้อมูลความหนาแน่นรถแสดงในตารางที่ 1 โดยทำการเก็บข้อมูลจากการบันทึกวิดีโอการสัญจรในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2562 โดยทำการเก็บข้อมูลการสัญจรเฉลี่ยในช่วงเช้า (8:00-10:00) กลางวัน (11:00-13:00) และเย็น (16:00-18:00) แล้วทำการวิเคราะห์ผลความหนาแน่นสุทธิของการสัญจรของรถในแต่ละชั่วโมง ซึ่งพบว่าการจราจรในช่วงเวลาเย็นจะมีความหนาแน่นที่สุด

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนความหนาแน่นรถโดยเฉลี่ยต่อชั่วโมง

วัน/เวลา	เช้า	กลางวัน	เย็น	เฉลี่ย
จ	871	801	941	871
อ	919	801	960	893
พ	921	803	927	884
พ	899	826	907	877
ศ	889	1037	1085	1003
ส	764	768	796	776
อา	882	1055	1089	1009
เฉลี่ย	878	870	958	902

นอกจากนี้แสดงรูปแบบสัญญาณไฟที่ส่งผลต่อแต่ละช่องทางการเดินทางในรูปที่ 3 โดย R1 – R5 แสดงจุดควบคุมการหยุดของรถ (Stop Line) ตามเส้นทางการเดินทางจากเส้นทางหลักและเส้นทางรองที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 3 แสดงการจัดเฟสสัญญาณไฟในแต่ละช่องทาง สำหรับ (บน) สัญญาณไฟประตูที่ 1 และ (ล่าง) สัญญาณไฟประตูที่ 2

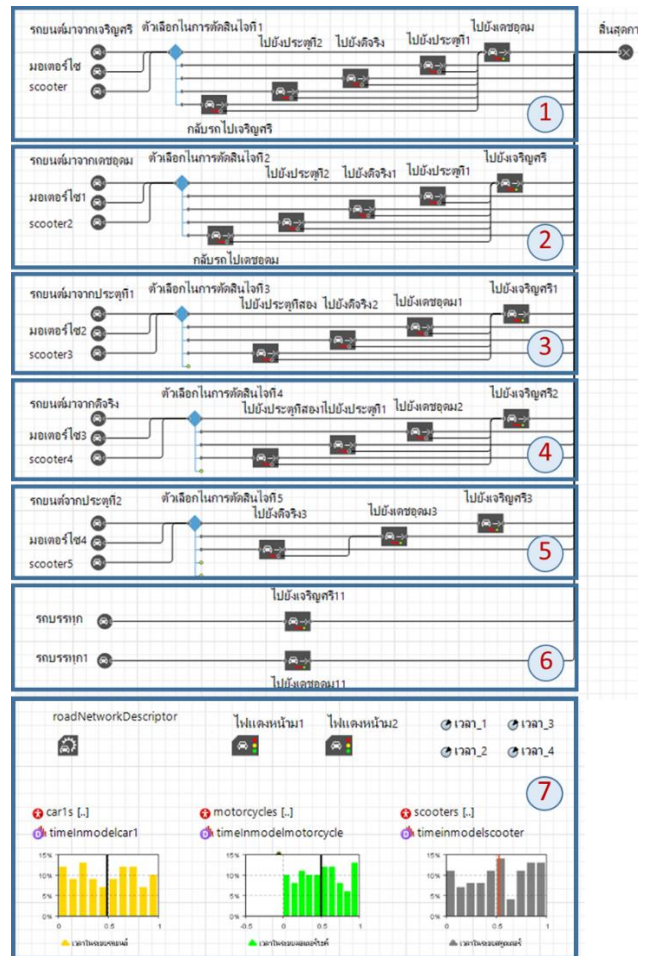
3.2 แบบจำลองการจราจรด้วยโปรแกรม AnyLogic

3.2.1 การพัฒนาแบบจำลอง (As-Is Model)

ขั้นตอนต่อมาเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับปัญหาการไหลของจราจรที่สี่แยกไฟแดง โดยใช้โปรแกรม AnyLogic ซึ่งแสดงภาพรวมของการโมเดลในรูปที่ 4 โดยแสดงส่วนประกอบของโมเดลตามเส้นทางการมาของการจราจร คือ 1) การไหลของจราจรจากเส้นทางมาจากวารินชำราบหรือทางตลาดเจริญศรี 2) การไหลของจราจรจากเส้นทางมาจากเดชอุดม 3) การไหลของจราจรจากเส้นทางมาจากประตูทางออกที่ 1 ของมหาวิทยาลัย 4) การไหลของจราจรจากเส้นทางมาจากหอพักตึกจริง และ 5) การไหลของจราจรจากประตูทางออกที่ 2 ของมหาวิทยาลัย โดยใช้การประมาณค่าความน่าจะเป็นในการเดินทางจากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

นอกจากนี้ ทำการเพิ่ม 6) การโมเดลสำหรับการมาของรถบรรทุกเป็นครั้งคราว ในเส้นทางหลักระหว่างตลาดเจริญศรีกับเดชอุดม และ 7) การโมเดลสัญญาณไฟจราจรสำหรับสองประตูทางออกของมหาวิทยาลัย และการเก็บ

ข้อมูลทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลเวลาเฉลี่ยในระบบ ความเร็วเฉลี่ยในระบบ และจำนวนรถหยุดโดยเฉลี่ยในระบบ

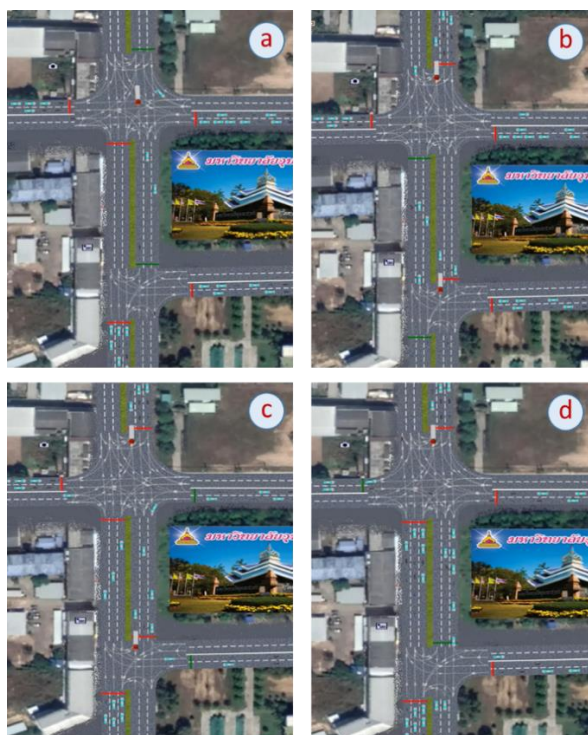


รูปที่ 4 แสดงการโมเดลแบบจำลองด้วยโปรแกรม AnyLogic

3.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Verification/Validation) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น [24-28] โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยวิเคราะห์การไหลของวิธีการโมเดล (Logical Flow) นอกจากนี้ Sargent [27] แนะนำว่าขั้นตอน Validation สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคแบบ Subjective เช่นการตรวจสอบพฤติกรรมของโมเดล หรือแบบ Objective เช่นการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโมเดลในแต่ละช่วงเวลา เพื่อให้แน่ใจว่ารถที่สัญจรไปมามีการใช้

เส้นทางต่างๆ ตามที่คาดหวัง และการเปิดหรือปิดสัญญาณไฟจราจร ส่งผลต่อรถที่สัญจรในแต่ละเส้นทางอย่างถูกต้องตามสถานการณ์ปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีสองสัญญาณไฟในแต่ละแยกการจราจรที่ทำงานอย่างสัมพันธ์กัน โดยรูปที่ 5 (a) แสดงการเปิดสัญญาณไฟเขียวในเส้นทางจากวารินชำราบไปเดชอุดม รูปที่ 5 (b) แสดงการเปิดสัญญาณไฟเขียวในเส้นทางจากเดชอุดมไปวารินชำราบ รูปที่ 5 (c) แสดงการเปิดสัญญาณไฟเขียวจากประตูทางออกของมหาวิทยาลัย และรูปที่ 5 (d) แสดงการเปิดสัญญาณไฟเขียวจากเส้นทางหอพักตึกจริง ตามลำดับ



รูปที่ 5 แสดงผลการ run แบบจำลองในแต่ละช่วงเวลา

นอกจากนี้ ได้ทำการสร้างแบบจำลองในรูปแบบสามมิติ (Animation) เพื่อความสมจริงและเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานสำหรับผู้กำหนดนโยบายและผู้ที่ทำการตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการทำแบบจำลองในรูปแบบสามมิติ (Animation) ของการจราจร

3.3 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์สถานการณ์ต่างๆ (What-If Model) โดยแบ่งเป็นสองรูปแบบการทดลองหลัก โดยการทดลองแรกเป็นการออกแบบการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลของการตั้งสัญญาณไฟแบบเท่ากันทุกเส้นทางและแบบที่แตกต่างกันตามเส้นทางหลัก (จากอำเภวารินชำราบและจากอำเภอเดชอุดม) และเส้นทางรอง รอง (ประตูทางออก 1 ทางออก 2 และหอพักตึกจริง) โดยแบ่งออกเป็น 6 สถานการณ์ย่อย (Scenarios) คือ (S1-S6) ที่ตั้งเวลาสัญญาณไฟจราจรเท่ากันในแต่ละเส้นทาง และอีก 6 สถานการณ์ย่อย (S7-S12) ที่ตั้งเวลาของสัญญาณไฟจราจรแตกต่างกันระหว่างเส้นทางหลักและเส้นทาง ดังแสดงในตารางที่ 2 หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาแบบการตั้งเวลาสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

ตารางที่ 2 แสดงการทดลองปรับเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)

รูปแบบ	R1	R2	R3	R4	R5
S1	10	10	10	10	10
S2	20	20	20	20	20
S3	30	30	30	30	30
S4	40	40	40	40	40
S5	50	50	50	50	50
S6	60	60	60	60	60
S7	60	60	10	10	10

S8	60	60	20	20	20
S9	50	50	10	10	10
S10	50	50	20	20	20
S11	40	40	10	10	10
S12	40	40	20	20	20

นอกจากนี้ การทดลองที่ สอง เป็นการจำลองผลกระทบจากการลดจำนวนช่องทางการจราจรจากเส้นทางการจราจรหลัก ซึ่งอาจเกิดจากการปรับปรุงถนน หรืออุบัติเหตุที่เกิดขึ้น โดยแบ่งเป็น 3 สถานการณ์ย่อย (S13-S15) ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยการทดลองที่ S13 เป็นการปิดถนน 1 ช่องทางสำหรับเส้นทางวารินชำราบไปเดชอุดม การทดลองที่ S14 เป็นการปิดถนน 1 ช่องทางสำหรับเส้นทางเดชอุดมไปวารินชำราบ และการทดลองที่ S15 เป็นการปิดถนนอย่างละ 1 ช่องทางสำหรับทั้งสองเส้นทางหลัก คือทั้งเส้นทางจากวารินชำราบไปเดชอุดม และเส้นทางจากเดชอุดมไปวารินชำราบ

ตารางที่ 3 แสดงการทดลองลดจำนวนช่องทางการจราจร

เส้นทาง	R1	R2	R3	R4	R5
ปัจจุบัน	3 เลน	3 เลน	2 เลน	2 เลน	2 เลน
S13	3 เลน	2 เลน	2 เลน	2 เลน	2 เลน
S14	2 เลน	3 เลน	2 เลน	2 เลน	2 เลน
S15	2 เลน	2 เลน	2 เลน	2 เลน	2 เลน

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์การปรับระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร

ผลการเปรียบเทียบการตั้งสัญญาณไฟแบบเท่ากันทุกเส้นทางและแบบแตกต่างกัน โดยทำการวิเคราะห์ผลระยะเวลาในระบบโดยเฉลี่ย ความเร็วรถโดยเฉลี่ย และจำนวนครั้งที่รถหยุดโดยเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 4 โดยแสดงผลการวิเคราะห์ผล 1 ชั่วโมงตามเวลาการสัญญาณในช่วงเช้า และทำการ run 100 รอบ (Iterations) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการตั้งค่าสัญญาณไฟจราจรที่เท่ากัน

ในทุกเส้นทาง (S1-S6) ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการสัญญาณในระบบมีแนวโน้มที่สูงกว่าการตั้งค่าสัญญาณไฟจราจรที่แตกต่างกันในแต่ละเส้นทาง (S7-S17) ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากปริมาณรถที่สัญญาณในเส้นทางหลักมีมากกว่ารถในเส้นทางรอง ดังนั้นการปรับสัญญาณไฟในทุกเส้นทางที่เท่ากันทำให้เกิดการใช้เวลาโดยรวมของรถในระบบที่สูงกว่า ทำให้การทำความเร็วโดยเฉลี่ยต่ำกว่า และจำนวนครั้งที่รถหยุดมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสัญญาณไฟแตกต่างกัน

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยระยะเวลาในระบบจากการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟ (วินาที/คัน)

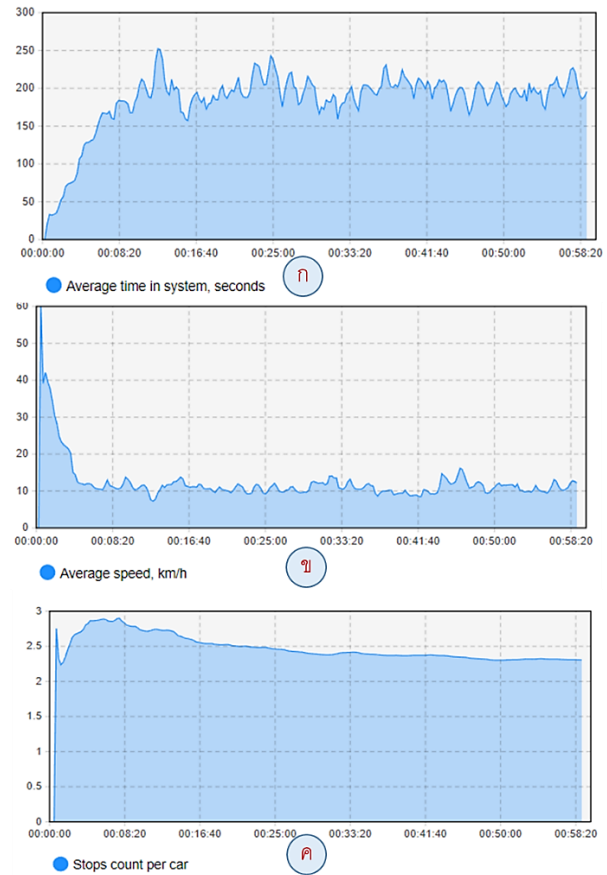
รูปแบบ	เวลาเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชม)	รถหยุดเฉลี่ย (ครั้ง/คัน)
S1	714.67	5.80	9.09
S2	804.90	5.64	8.84
S3	753.04	6.60	5.33
S4	895.58	5.78	7.55
S5	906.98	6.82	5.98
S6	491.99	8.06	5.05
S7	241.91	10.78	2.83
S8	560.59	8.29	4.05
S9	269.26	9.98	2.51
S10	713.26	7.07	5.00
S11	194.45	9.95	2.53
S12	423.89	7.18	3.95

นอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Variance – ANOVA) [29-30] ระหว่างการตั้งค่าสัญญาณไฟจราจรแบบเท่ากันในแต่ละเส้นทาง และการตั้งค่าที่แตกต่างกัน พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในระบบ (P-value = 0.006) ความเร็วเฉลี่ย (P-value = 0.008) และจำนวนครั้งในการหยุดรถโดยเฉลี่ย (P-value = 0.001) โดยใช้ค่าแอลฟาที่ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 5

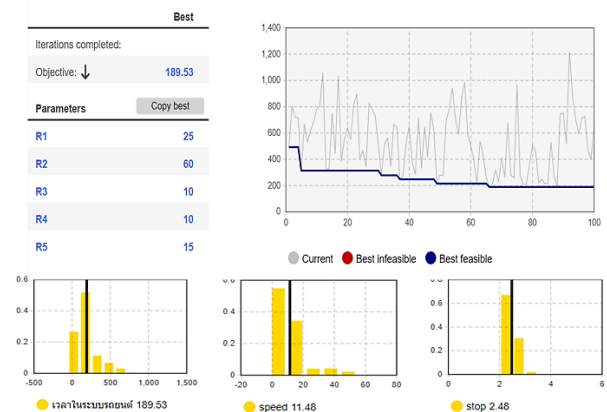
ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	SS	DF	MS	P-value
เวลาเฉลี่ยในระบบ				
B/W Grs	390169	1	390169	0.006
W/I Grs	324751	10	32475	
Total	714920	11		
ความเร็วเฉลี่ยในระบบ				
B/W Grs	17.64	1	17.64	0.008
W/I Grs	16.75	10	1.67	
Total	34.39	11		
รถหยุดเฉลี่ยในระบบ				
B/W Grs	39.49	1	39.49	0.001
W/I Grs	22.24	10	2.24	
Total	61.73	11		

ขั้นตอนต่อมา เป็นการวิเคราะห์หาค่าระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรที่ดีที่สุด (Optimization) โดยพิจารณา ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในระบบ โดยทำการวิเคราะห์ผล 100 รอบ (Iterations) ด้วยโปรแกรม Anylogic ซึ่งพบว่ารูปแบบ ระยะเวลาการตั้งค่าสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมที่สุดคือ (R1) เส้นทางเดชอุดม-วารินชำราบที่ 25 วินาที; (R2) เส้นทางวารินชำราบ-เดชอุดมที่ 60 วินาที; (R3) เส้นทางจาก ประตูที่ 1 ที่ 10 วินาที; (R4) เส้นทางจากประตูที่ 2 ที่ 10 วินาที; และ (R5) เส้นทางจากหอพักตึกจริงที่ 15 วินาที ตามลำดับ โดยแสดงผลการ run โปรแกรมจากการทำ Optimization สำหรับค่าเฉลี่ยของเวลาในระบบ ค่าความเร็วเฉลี่ย และจำนวนครั้งที่รถหยุดเฉลี่ย ในแต่ละช่วงเวลา ในรูปที่ 7 และแสดงผลการวิเคราะห์การทำ Optimization ในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุดของเวลาในระบบอยู่ที่ 189.53 วินาที/คัน ค่าความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 11.48 กิโลเมตร/ชั่วโมง และจำนวนครั้งที่รถหยุดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.48 ครั้ง/คัน ตามลำดับ



รูปที่ 7 แสดงผลจาก Optimization ในแต่ละช่วงเวลา ก) ค่าเฉลี่ยของเวลาในระบบ ข) ความเร็วเฉลี่ย และ ค) จำนวนครั้งที่รถหยุดเฉลี่ย



รูปที่ 8 แสดงการวิเคราะห์ Optimization ของเวลาสัญญาณไฟจราจร

4.2 ผลการวิเคราะห์การลดจำนวนช่องทางการจราจร

ในขั้นตอนต่อมา เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากการลดจำนวนช่องทางการจราจรตามเงื่อนไขในตารางที่ 3 (S13-S15) ซึ่งส่งผลให้ความจุและการรองรับรถยนต์ได้น้อยลง โดยใช้รูปแบบการตั้งค่าของสัญญาณไฟจราจรด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุดในช่วงที่ข้อมูได้แล้ว และทำการตั้งค่าอื่นๆ สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในลักษณะเดิม โดยผลการวิเคราะห์ระยะเวลาในระบบโดยเฉลี่ยเมื่อพิจารณาจำนวนรถที่เข้ามาในระบบเท่ากัน แสดงในตารางที่ 6 ซึ่งแสดงรูปแบบการลดเลนและผลความหนาแน่นของรถจากการ run สำหรับ S13 S14 และ S15 ในรูปที่ 9

ตารางที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ยระยะเวลาในระบบจากการปรับลด

จำนวนเลน (วินาที/คัน)

รูปแบบ	ปัจจุบัน	S13	S14	S15
เวลาเฉลี่ย	189.53	221.74	239.24	313.07
% เวลาที่เพิ่ม	-	16.99%	26.22%	65.18%



รูปที่ 9 แสดงการวิเคราะห์การลดช่องทางการจราจรสำหรับ ก) S13 แบบลดหนึ่งช่องทาง ข) S14 แบบลดหนึ่งช่องทาง และ ค) S15 แบบลดสองช่องทาง

ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบการปรับลดช่องทางในเส้นทางหลักระหว่างเส้นทางจากวารินชำราบไปเดชอุดม (S13) และเส้นทางจากเดชอุดมไปวารินชำราบ (S14) แล้ว พบว่าหากจำเป็นต้องทำการลดหนึ่งช่องทาง จะพบว่าการลดช่องทางในเส้นทางจากอำเภวารินชำราบไปเดชอุดม (S13) จะส่งผลกระทบต่อที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการลดช่องทางในเส้นทางจากอำเภเดชอุดมไปวารินชำราบ (S14) โดยระยะเวลาการสัญจรโดยเฉลี่ยที่เพิ่มมากขึ้นจาก S13 คิดเป็น 16.99% ส่วน S14 คิดเป็น 26.22% นอกจากนี้พบว่า การลดช่องทางทั้งสองฝั่งการเดินทาง (S15) จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเดินทางที่เพิ่มมากขึ้นคิดเป็น 65.18% ตามลำดับ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับปัญหาการจราจรบริเวณสี่แยกที่มีสัญญาณไฟจราจร โดยใช้กรณีศึกษาบริเวณประตูทางออกหน้ามหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ทั้งนี้ปัญหาการจราจรในกรณีศึกษานี้มีความซับซ้อนเนื่องจากมีประตูทางออกที่ต่อเนื่องกันสองประตู ซึ่งมีสัญญาณไฟจราจรสองสัญญาณไฟที่ต่อเนื่องกัน สำหรับแต่ละประตูทางออก นอกจากนี้ยังมีความซับซ้อนเนื่องจากมีช่องทางการเดินทางที่มาจากหลายช่องทาง ซึ่งมีจำนวนช่องทางการเดินทางที่ไม่เท่ากันสำหรับเส้นทางหลัก (ระหว่างอำเภวารินชำราบ และอำเภเดชอุดม) และเส้นทางรอง (การเดินทางจากแต่ละประตูทางออกของมหาวิทยาลัย และจากทางหอพักตึกจริง)

โดยผลการทดลองจากการปรับระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจร แสดงให้เห็นว่าการตั้งระยะเวลาสัญญาณไฟด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือเส้นทางเดชอุดม-วารินชำราบที่ 25 วินาที เส้นทางวารินชำราบ-เดชอุดมที่ 60 วินาที เส้นทางจากประตูทางออกที่ 1 ที่ 10 วินาที เส้นทางจากประตูทางออกที่ 2 ที่ 10 วินาที และเส้นทางจากหอพักตึกจริงที่ 15 วินาที ตามลำดับ โดยส่งผลให้ระยะเวลาในการเดินทางในระบบโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด นอกจากนี้ผลการจำลองการลดจำนวนช่องทางการจราจรจากเส้นทางจราจรหลัก เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการปิดถนนที่มีต่อเวลาสัญจรที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการลดช่องทางในเส้นทางจากอำเภ

วารินชำราบไปเดชอุดมจะส่งผลกระทบต่อที่น้อยกว่าการลดช่องทางในเส้นทางจากอำเภเดชอุดมไปวารินชำราบ

เป็นที่ชัดเจนว่าผลการวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปขยายผลเพื่อการจัดการจราจรอย่างเป็นระบบได้ในสถานการณ์อื่นๆ ต่อไป ทั้งนี้ทิศทางการงานวิจัยในอนาคตมีได้หลายรูปแบบ เช่นการวิเคราะห์การรอคอยของผู้สัญจรไปมา การเพิ่มการวิเคราะห์ในกรณีที่มีการแข่งหรือเปลี่ยนแปลงไปมาของผู้ที่สัญจร หรือการเชื่อมต่อเส้นทางเดินทางที่ยาวขึ้น เพื่อดูผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อไป หรือการวิเคราะห์โดยพิจารณาแยกตามรูปแบบขาเข้าและขาออกจากมหาวิทยาลัย นอกจากนี้เป็นที่น่าสนใจที่จะทำการสร้างแบบจำลองสัญญาณไฟจราจรและวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาในรูปแบบเทคโนโลยีการควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบต่างๆ เช่นการใช้รูปแบบการแปรผันตามการมีรถในระบบจราจร (Vehicle activated signal control) และรูปแบบการเปลี่ยนตามปริมาณจราจรแบบปรับตัว (Adaptive signal control) เป็นต้น โดยอาจทำการวิเคราะห์การจัดการสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi Actuated Signal Control) หรือแบบปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully Actuated Signal Control) ในอนาคตได้ต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] นิติ์โพ, “ปัญหาการจราจรในเขตเมืองหลวง,” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://nidapoll.nida.ac.th/>. [วันที่เข้าถึง 1 กันยายน 2561].
- [2] ณัฐกริช เปาอินทร์, “ทางออกของปัญหาการจราจรติดขัดในกรุงเทพมหานคร,” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.bangkokbiznews.com/>. [วันที่เข้าถึง 25 กุมภาพันธ์ 2562].
- [3] G. Duranton and M. A. Turner, “The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities,” *American Economic Review*, vol. 101, no. 2, pp. 2616-2652, 2011.
- [4] L. Zhao, Y. C. Lai, K. Park, and N. Ye, “Onset of traffic congestion in complex networks,” *Physical Review E*, vol. 71, no. 2, pp. 1-8, 2005.

- [5] K. Pyzyk, "Gridlock woes: Traffic congestion by the numbers," [Online]. Available: <https://www.smartcitiesdive.com/news/gridlock-woes-traffic-congestion-by-the-numbers/519959/>. [Accessed 25 February 2019].
- [6] N. Mueller, D. Rojas-Rueda, M. Salmon, D. Martinez, A. Ambros, C. Brand, and T. Götschi, "Health impact assessment of cycling network expansions in European cities," *Preventive Medicine.*, vol. 109, pp. 62-70, 2018.
- [7] A. Poolsawat, K. S. N. Ayutaya, and W. Pattara-Atikom, "Impact of intelligent traffic information system on congestion saving in Bangkok," in *2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications*, Lille, 2009.
- [8] K. Limapornwanitch, C. M. Montalbo Jr, K. Hokao, and A. Fukuda, "The implementation of traffic impact assessment in Southeast Asian cities: case studies of Thailand and the Philippines," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.*, vol. 6, pp. 4208-4223, 2005.
- [9] AnyLogic, [Online]. Available: <https://www.anylogic.com/>. [Accessed 25 February 2019].
- [10] C. Macal and M. North, "Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation," in *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Savannah, 2014.
- [11] P. Good and P. Perkins, "Simulation Software: Anylogic and Vensim," 2019
- [12] C. D. Pegden, "Advanced tutorial: overview of simulation world views," in *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Baltimore, 2010.
- [13] K. Ransikarbum, N. Kim, S. Ha, R. A. Wysk, and L. Rothrock, "A highway-driving system design viewpoint using an agent-based modeling of an affordance-based finite state automata," *IEEE Access.*, vol. 6, pp. 2193-2205, 2017.
- [14] G. Merkuryeva and V. Bolshakovs, "Vehicle schedule simulation with AnyLogic," in *2010 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Brisbane, 2010.
- [15] J. Joo, N. Kim, R. A. Wysk, R. A., L. Rothrock, Y. J. Son, Y. G. Oh, and S. Lee, "Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation," *Simulation Modelling Practice and Theory.*, vol. 32, pp. 99-115, 2013.
- [16] X. Wang, S. Chen, Y. Zhou, H. Peng, and Y. Cui, "Simulation on passenger evacuation under fire emergency in Metro station," in *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings*, Beijing, 2013.
- [17] J. Kim, K. Ransikarbum, N. Kim, and E. Paik, "Agent-based simulation modeling of low fertility trap hypothesis," in *Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, Banff, 2016.
- [18] N. Zhao and S. An, "Collaborative management of complex major construction projects: anylogic-based simulation modelling," *Discrete Dynamics in Nature and Society.*, 2016.
- [19] นคร ไชยวงศ์ศักดิ์ตา ประเวช อนันต์เอื้อ นิเวศ จินะบุญ, "การวิเคราะห์ค่าเวลาของสัญญาณไฟจราจร โดยการจำลองสถานการณ์ กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏ เชียงราย," *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, น. 63-74, 2560.

- [20] กลิน รัชสิกรรพม และวัฒนา จันทะโคตร,
“แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์แบบตัวแทนสำหรับ
วิเคราะห์การวางแผนอพยพจากเหตุฉุกเฉินเพลิงไหม้ใน
กรณีศึกษาอาคารเรียน,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, ปีที่ 28, ฉบับที่
10, 2563.
- [21] Y. Carson and A. Maria, “Simulation
optimization: methods and applications,” in
*Proceedings of the 29th Conference on Winter
Simulation*, Atlanta, 1997.
- [22] J. April, F. Glover, J. P. Kelly, and M. Laguna,
“Practical introduction to simulation
optimization,” in *Proceedings of the 35th
Conference on Winter Simulation: Driving
Innovation*, New Orleans, 2003.
- [23] A. T. Crooks and A. J. Heppenstall,
“Introduction to agent-based modelling,”
Agent-based Models of Geographical Systems,
pp. 85-105, 2012.
- [24] K. Ransikarbum, “A procedural validation for
Affordance-based Finite State Automata (FSA)
in Human-involved Complex Systems,” Master
Thesis, Penn State University, 2009.
- [25] K. Ransikarbum, N. Kim, R. A. Wysk, and L.
Rothrock, “Validation of affordance-based
finite state automata modeling,” in *IIE Annual
Conference*, Miami, 2009.
- [26] A. M. Law, “How to build valid and credible
simulation models,” in *Winter Simulation
Conference*, Miami, 2008.
- [27] R. G. Sargent and O. Balci, “History of
verification and validation of simulation
models,” in *Proceedings of the 2017 Winter
Simulation Conference*, Las Vegas, 2017.
- [28] G. S. Fishman, “Discrete-event simulation:
modeling, programming, and analysis,”
Springer Science & Business Media, 2013.
- [29] กลิน รัชสิกรรพม, เอกสารประกอบการสอนวิชา Six
Sigma for Engineering, 2562.
- [30] H. Y. Kim, “Analysis of variance (ANOVA)
comparing means of more than two groups,”
Restorative Dentistry & Endodontics., vol. 39,
no. 1, pp. 74-77, 2014.
- [31] A. Tan, R. Bowden, and Y. Zhang, “Virtual
simulation of statewide intermodal freight
traffic,” *Transportation Research Record.*,
vol. 1873, no. 1, pp. 53-63, 2004.
- [32] X. Li, A. J. Khattak, and A. G. Kohls, “Signal
phase timing impact on traffic delay and
queue length-an intersection case study,” in
2016 Winter Simulation Conference (WSC),
Arlington, 2016.
- [33] W. Burghout and J. Wahlstedt, “Hybrid traffic
simulation with adaptive signal control,”
Transportation Research Record., vol. 1999,
no. 1, pp. 191-197, 2007.
- [34] US Department of Transportation, “Signal
Timing,” [Online]. Available:
<https://ops.fhwa.dot.gov/>. [Accessed 25 February
2019].
- [35] P. Hidas, “Modelling lane changing and
merging in microscopic traffic simulation,”
*Transportation Research Part C: Emerging
Technologies.*, vol. 10, no. 5-6, pp. 351-371,
2002.
- [36] US Department of Transport, Traffic Detection
Handbook, 3rd Edition Volume I, US
Department of Transport, Publication No.
FHWA-HRT-06-108, 2006.
- [37] M. Lodes and R. F. Benekohal, “Safety
benefits of implementing adaptive signal
control technology: Survey result,” Illinois
Center for Transportation, Illinois, 2013.

- [38] รัฐพล ภูบุบผาพันธ์, “การประยุกต์ใช้ระบบสัญญาณไฟจราจรอัจฉริยะบริเวณสามแยกบนทางหลวงสายหลักที่มีปัญหาจราจรไม่สม่ำเสมอ : กรณีศึกษาสามแยกประตู 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,” รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557.
- [39] R. P. Roess, E. S. Prassas, and W. R. McShane, 3rd ed., *Traffic Engineering*, New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [40] P. Jing, H. Huang, and L. Chen, “An adaptive traffic signal control in a connected vehicle environment: A systematic review,” *Information.*, vol. 8, no.3, pp. 101, 2017.
- [41] P. Zhou, Z. Fang, H. Dong, J. Liu, and S. Pan, “Data analysis with multi-objective optimization algorithm: A study in smart traffic signal system,” in *2017 IEEE 15th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA)*, London, 2017.
- [42] J. Jin, X. Ma, and I. Kosonen, “A stochastic optimization framework for road traffic controls based on evolutionary algorithms and traffic simulation,” *Advances in Engineering Software.*, vol. 114, pp. 348-360, 2017.
- [43] A. Jovanović, M. Nikolić, and D. Teodorović, “Area-wide urban traffic control: A Bee Colony Optimization approach,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.*, vol. 77, pp. 329-350, 2017.
- [44] C. Wang, X. Li, X. Zhou, A. Wang, and N. Nedjah, “Soft computing in big data intelligent transportation systems,” *Applied Soft Computing.*, vol. 38, pp. 1099-1108, 2016.