



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องมือในการเลือกประเภทสัญญาณไฟจราจร
สำหรับทางแยกเดี่ยว
(Development of Decision Making Tool for Choosing
Traffic Signal Controls for Isolated Intersection)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องมือในการเลือกประเภทสัญญาณไฟจราจร
สำหรับทางแยกเดี่ยว
(Development of Decision Making Tool for Choosing
Traffic Signal Controls for Isolated Intersection)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล ภู่บุงผาพันธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

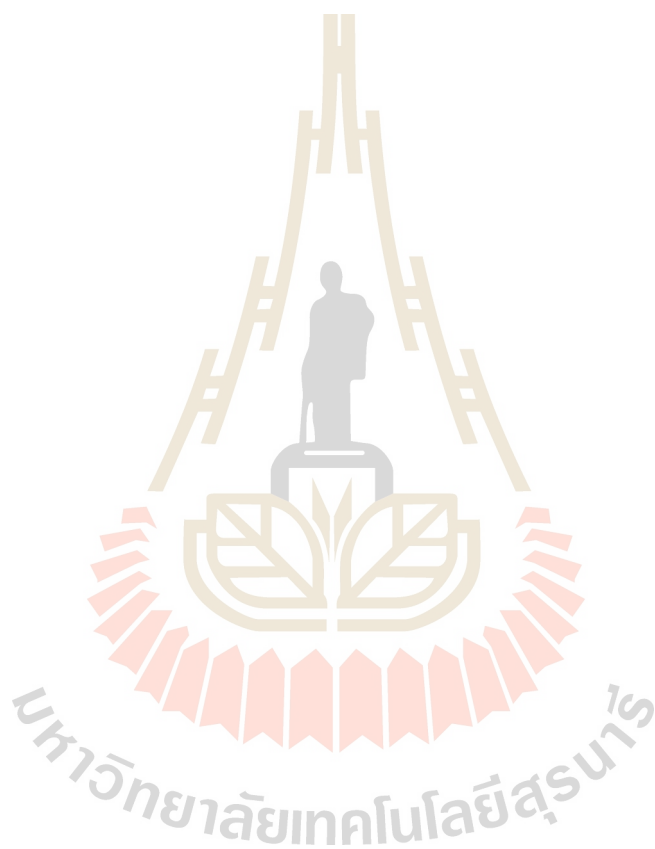
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัยโครงการเรื่อง การพัฒนาเครื่องมือในการเลือกประเภทสัญญาณไฟจราจรสำหรับทางแยกเดี่ยว ประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบคุณคุณคุณณิชาภัทร สิทธิคุณ ที่ช่วยดำเนินการติดต่อประสานงานให้โครงการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

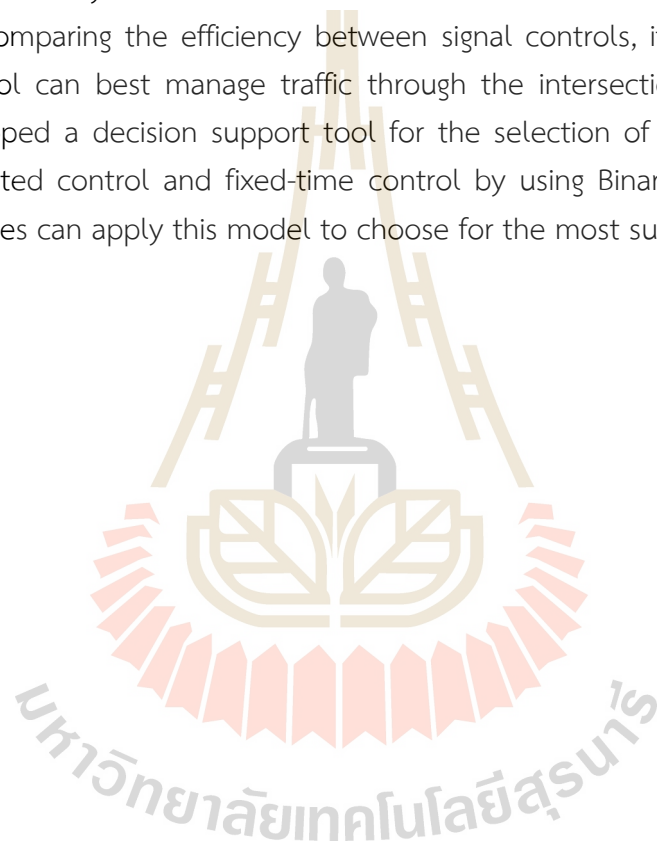


บทคัดย่อ

ในการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรสำหรับทางแยกเดี่ยวจะพิจารณาเลือกรูปแบบสัญญาณไฟที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับคุณลักษณะของทางแยกนั้นมากที่สุด ซึ่งต้องอาศัยการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจร ในปัจจุบันสามารถแบ่งลักษณะของสัญญาณไฟจราจรได้ 2 ลักษณะได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ และสัญญาณไฟจราจรแบบแปรเปลี่ยนตามปริมาณจราจร โดยจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของประสิทธิภาพตามความเหมาะสมของสภาพจราจร ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยปัจจัยหนึ่งที่น่าจะส่งผลได้แก่การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาประสิทธิภาพของรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน โดยผลการศึกษาพบว่าสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบเป็นรูปแบบที่สามารถตอบสนองต่อการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันมากที่สุด รองลงมาคือสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรและสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสัญญาณไฟจราจร สัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบยังเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการจัดการจราจรบริเวณทางแยกได้ดีที่สุด ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่างสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรกับสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ โดยใช้แบบจำลองการเลือกด้วยวิธีทางสถิติแบบ Binary Logistic Regression เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำไปประยุกต์ใช้สำหรับพิจารณาติดตั้งสัญญาณไฟจราจรต่อไป

Abstract

In order to install traffic signal control at isolated intersection, the signal control strategy that is the most efficient and well suits with intersection characteristics shall be considered. Currently, the traffic signal controls can be classified into two categories as fixed-time control and vehicle-actuated control. Its efficiency depends on several factors, one of which is the variation of hourly volume within a day. Therefore, this research focuses on studying the efficiency of traffic signal controls under varying hourly volume within a day. The study showed that the fully-actuated control can best response to the hourly volume within a day, followed by semi-actuated control and fixed-time control, respectively. In addition, when comparing the efficiency between signal controls, it was found that the fully-actuated control can best manage traffic through the intersection. Furthermore, this research has developed a decision support tool for the selection of traffic signal controls between semi-actuated control and fixed-time control by using Binary Logistic Regression. The related authorities can apply this model to choose for the most suitable signal control.



สารบัญ

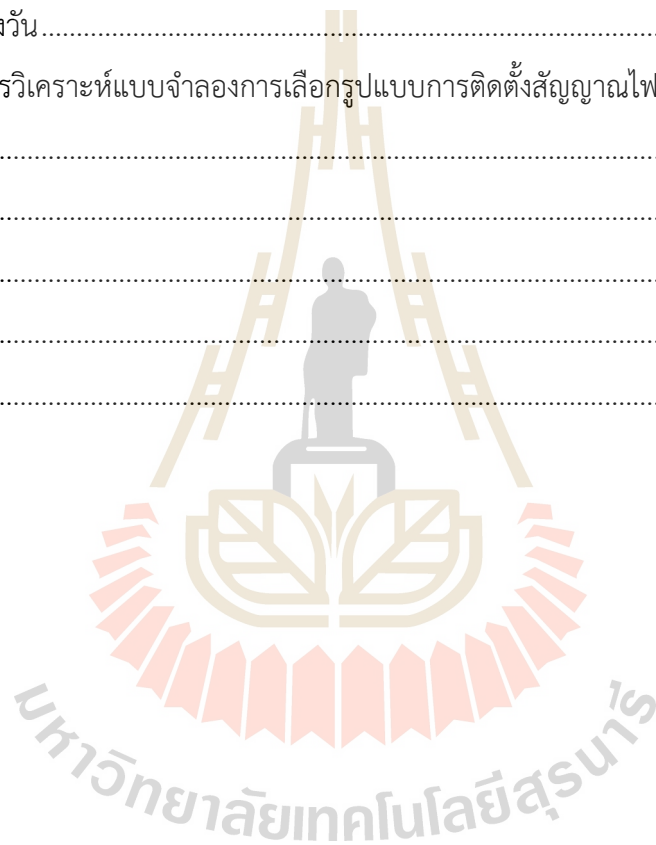
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สัญญาณไฟจราจร (Traffic signals).....	3
2.2 ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Traffic Signals Control).....	3
2.2.1 การควบคุมสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed or Pre-time Control).....	3
2.2.2 การควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร (Actuated Control).....	4
2.3 การออกแบบสัญญาณไฟจราจร	8
2.3.1 รอบเวลาสัญญาณไฟ (Signal Cycle)	8
2.3.2 เวลาล่าช้าของการเริ่มต้นและสุดท้าย (Start and End Lag Time).....	8
2.3.3 การสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่ (Movement Lost Time).....	9
2.3.4 การเคลื่อนที่วิกฤต (Critical Movement).....	9
2.3.5 เวลาสูญเสียเปล่าของทางแยก (Intersection Lost Time)	9
2.3.6 การออกแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Control)	10
2.3.7 การออกแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร (Actuated Control).....	10
2.4 โปรแกรมจำลองจราจร	11
2.4.1 โปรแกรมจำลองจราจรระดับจุลภาค	11
2.4.2 โปรแกรมจำลองจราจรระดับมหภาค	11
2.4.3 โปรแกรมจำลองจราจรระดับกึ่งจุลภาค.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis).....	13
2.5.1 รูปแบบสมการการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก	13
2.5.2 ข้อตกลงเบื้องต้นและข้อจำกัด.....	13
2.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล (Goodness of Fit).....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร	15
2.6.2 การศึกษาเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา.....	26
3.2 ข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา	26
3.2.1 ข้อมูลตัวอย่างทางแยก.....	26
3.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา.....	27
3.3 การจำลองจราจรและวิเคราะห์ผล.....	30
3.3.1 การจำลองจราจร	32
3.3.2 การวิเคราะห์ผล	32
3.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression).....	33
3.4.1 การกำหนดนิยามและรวบรวมตัวแปร	33
3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล	34
3.5 การสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร.....	34
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	35
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจร.....	35
4.1.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก..	35
4.1.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนน สายหลัก	39
4.1.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนน สายรอง.....	42
4.1.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรจากการแปรผันของปริมาณจราจร ในระหว่างวัน.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.5 การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนค่า Passage Time จาก 4 วินาที เป็น 3 วินาทีต่อ ประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก	47
4.2 แบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร	48
4.3 การสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผลการศึกษา	53
5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรภายใต้การ แปรผันของปริมาณ จราจรในระหว่างวัน	53
5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	64
ประวัติผู้วิจัย	80



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ระยะทางที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจนับจากเส้นหยุด..... 6
2.2	การศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร..... 19
2.3	การศึกษาเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร..... 21
3.1	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรจากการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 26
3.2	จังหวะสัญญาณไฟจราจรของทางแยก..... 28
3.3	จำนวนกรณีที่ใช้ในแบบจำลองจราจร..... 29
4.1	จำนวนของกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟที่เหมาะสม..... 49
4.2	ค่าสถิติ Negelkerke R Square..... 49
4.3	ตัวแปรที่มีผลต่อสมการทำนายในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟ..... 49



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงปริมาณจราจรกับช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวแต่ละจังหวะ.....	4
2.2 แสดงหลักการควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร	5
2.3 แสดงการปรับเวลาสัญญาณไฟเขียวเริ่มต้น	6
2.4 แสดงการปรับช่องว่างระหว่างยวดยานในหน่วยของเวลาที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อเปลี่ยนจังหวะสัญญาณไฟ	7
2.5 แสดงค่า Break-Even Delay และความยาวแถวคอย บนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรสายหลักและปริมาณจราจรสายรอง	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา.....	24
3.2 แสดงภาพสี่แยกสี่ทางที่โครงข่ายจากโปรแกรมจำลองจราจร Aimsun.....	25
3.3 แสดงการจัดการช่องจราจรสี่แยกสี่ทางจากโปรแกรมจำลองจราจร Aimsun.....	25
3.4 แสดงกราฟตัวอย่างการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน 5 กรณี	27
3.5 แสดงขั้นตอนการดำเนินการการจำลองจราจรและวิเคราะห์ผล	28
3.6 แสดงตารางตัวอย่างตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองจราจร	30
4.1 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5.....	36
4.2 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.6.....	37
4.3 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.7.....	37
4.4 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8.....	38
4.5 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9.....	38
4.6 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5.....	39
4.7 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.6.....	40
4.8 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.7.....	40
4.9 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8.....	41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9	41
4.11 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5	42
4.12 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.6	43
4.13 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.7	43
4.14 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8	44
4.15 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9	44
4.16 แสดงผลต่างระหว่างเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟ แบบกำหนดเวลาคงที่	45
4.17 แสดงผลต่างระหว่างเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟ แบบกึ่งตามปริมาณจราจร	46
4.18 แสดงผลต่างระหว่างเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟ แบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ	46
4.19 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9	47
4.20 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5	48
4.21 แสดงกราฟเครื่องมือสำหรับช่วยในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร	51
4.22 แสดงตัวอย่างการใช้กราฟเครื่องมือสำหรับช่วยในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

สัญญาณไฟจราจรเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ช่วยในการควบคุมจราจรบริเวณทางแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากปริมาณจราจรที่เพิ่มสูงขึ้นและการขยายตัวของโครงข่ายถนนตามการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ส่งผลให้ปัจจุบันมีการพัฒนารูปแบบสัญญาณไฟจราจรสำหรับทางแยกเดี่ยว เพื่อปรับใช้ให้มีความสอดคล้องกับสภาพจราจรและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันโดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ ได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Traffic Signal) และสัญญาณไฟจราจรแบบแปรเปลี่ยนตามปริมาณจราจร (Actuated Traffic Signal) ซึ่งการพิจารณาตัดสินใจเลือกรูปแบบหรือประเภทของสัญญาณไฟจราจรนั้นควรพิจารณาเลือกรูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยอาจทำการพิจารณาจากประสิทธิภาพในการลดความล่าช้าจากการหยุดที่บริเวณทางแยก อย่างไรก็ตามมีปัจจัยด้านสภาพจราจรและกายภาพหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจร เช่น ปริมาณจราจรบนถนนสายหลัก ปริมาณจราจรบนถนนสายรอง สัดส่วนของปริมาณรถเล็ก สัดส่วนของปริมาณรถขนาดใหญ่ ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เป็นต้น ซึ่งในอดีตโดยส่วนใหญ่แล้วการประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรจะพิจารณาเปรียบเทียบกันในช่วงกรอบเวลาที่ไม่นานมากนักอย่างละหนึ่งชั่วโมง เช่น ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็นที่มีสภาพจราจรหนาแน่น และนอกชั่วโมงเร่งด่วนที่มีปริมาณจราจรเบาบางลงมา

อย่างไรก็ตามการแปรผันของปริมาณจราจรระหว่างวันเป็นหนึ่งปัจจัยที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณจราจรมีการแปรผันอยู่ตลอดเวลา ทั้งบนถนนสายหลักและถนนสายรอง ทำให้การประเมินประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรเพียงในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนหรือนอกชั่วโมงเร่งด่วนอาจจะไม่สะท้อนถึงประสิทธิภาพโดยรวมของแต่ละรูปแบบสัญญาณไฟจราจรตลอดทั้งวันได้ ดังนั้นจึงควรมีการคำนึงถึงการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันเพื่อใช้ในการออกแบบสัญญาณไฟจราจรให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงผลของปัจจัยด้านการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันต่อประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจร 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Traffic Signal) สัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Traffic Signal) และสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Traffic Signal) และนำผลที่ได้มาพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบของสัญญาณไฟจราจรที่มีความเหมาะสมกับลักษณะการแปรผันของปริมาณจราจร ซึ่งจะช่วยให้ทำการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมสำหรับทางแยกนั้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ เพื่อเป็นกรอบแนวทางในการศึกษาไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยด้านการแปรผันของปริมาณจราจรระหว่างวันต่อประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรรูปแบบต่าง ๆ
2. พัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1. ทำการศึกษาโดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาพจราจรเป็นสำคัญ โดยจะกำหนดให้ลักษณะทางกายภาพของทางแยกมีสภาพคงที่ และจะพิจารณาเพียงกรณีของสี่แยกบนทางหลวงสายหลักตัดกับทางสายรอง ซึ่งในการศึกษานี้ได้คัดเลือกทางแยกตัวอย่างบริเวณแยกสี่ตา ตั้งอยู่ในตำบลสามเมือง อำเภอสีดา จังหวัดนครราชสีมา ลักษณะทางกายภาพเป็น 4 แยกเดี่ยวตัดกันระหว่างถนนหลวงหมายเลข 2 (ถนนมิตรภาพ) กับถนนเส้น 202 (ถนนนิเวศรัตน์) ถนนสายหลักมีจำนวน 4 ช่องจราจร ถนนสายรองมีจำนวน 2 ช่องจราจร
2. ศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณไฟจราจรทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Traffic Signal) สัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Traffic Signal) และสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Traffic Signal)
3. พิจารณปัจจัยด้านปริมาณจราจรในช่วงโมงเร่งด่วนบนถนนสายหลัก ปริมาณจราจรในช่วงโมงเร่งด่วนบนถนนสายรอง และระดับของการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยดังกล่าวให้ครอบคลุมช่วงที่เป็นไปได้ แล้วทำการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรโดยใช้แบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. การวัดประเมินประสิทธิภาพจะใช้ค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย (วินาที/คัน) เป็นตัวชี้วัด

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงผลของประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ จากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน
2. ทราบถึงรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมในกรณีต่าง ๆ ภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน
3. สามารถนำพารามิเตอร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับจากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันไปใช้ประกอบการพิจารณาเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรในอนาคตหรือนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเกณฑ์หรือมาตรฐานการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจะเริ่มจากการกล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย ระบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจร การออกแบบสัญญาณไฟจราจร โปรแกรมจำลองจราจร ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก รวมถึงการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 สัญญาณไฟจราจร (Traffic signals)

สัญญาณไฟจราจร เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ควบคุมการจราจรที่ใช้ควบคุมการจราจรบริเวณทาง แยกเพื่อให้ยานสามารถผ่านทางแยกได้อย่างคล่องตัว ลดจุดขัดแย้ง และป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ บริเวณทางแยก ปัจจุบันมีการกำหนดสีของดวงไฟเพื่อใช้เป็นเครื่องหมายบังคับจราจร 3 สี ได้แก่ สีแดง หมายถึงบังคับให้ยานทุกคันหยุด สีเหลืองหมายถึงเตือนให้ลดความเร็วหรือเตรียมที่จะเคลื่อนไป ข้างหน้าได้ และสีเขียวหมายถึงให้ยานแล่นผ่านไป

ต้นกำเนิดของสัญญาณไฟจราจรแห่งแรกของโลกเกิดขึ้นที่กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในปี 1868 โดย เจ.พี.ไนต์ วิศวกรชาวอังกฤษ ได้สร้างสัญญาณไฟจราจรขึ้นมาครั้งแรกจากการใช้ก๊าซ เป็นเชื้อเพลิงในการส่องสว่าง เพื่อใช้ควบคุมการสัญจรของรถม้าและคนเดินเท้าที่เดินผ่านไปผ่านมา บริเวณสี่แยกหน้ารัฐสภาของอังกฤษ ซึ่งในสมัยนั้นสัญญาณไฟจราจรมีเพียงไฟเขียวกับไฟแดงเท่านั้น จนกระทั่งในปี 1920 วิลเลียม พอตต์ตำรวจจราจรเมืองดีทรอยต์ รัฐมิชิแกนได้ออกแบบไฟสัญญาณ จราจรรูปแบบใหม่ขึ้นพร้อมกับเพิ่มไฟสีอำพัน (สีเหลือง) เข้าไปอีกหนึ่งสี เพื่อเป็นสัญญาณเตือนให้ ผู้ใช้พาหนะระวังและชะลอตัวก่อนที่จะหยุดหรือออกตัว

ต่อมาสัญญาณไฟจราจรแบบอัตโนมัติได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย การ์เรตต์ มอร์แกน ซึ่งนำมาใช้ ครั้งแรกในเมืองเคลฟแลนด์ รัฐโอไฮโอ ก่อนที่จะมีการใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก และวิวัฒนาการของ สัญญาณไฟจราจรได้ถูกพัฒนาต่อมาเรื่อย ๆ จนถึงในปี 1928 จึงเริ่มมีการใช้สัญญาณไฟจราจรชนิดที่ ระยะเวลารอบสัญญาณไฟเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณจราจร เพื่อควบคุมการจราจรบริเวณทางแยก ที่มีปริมาณจราจรไม่คงที่

2.2 ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Traffic Signals Control)

การควบคุมสัญญาณไฟจราจรมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของ Webster ในการควบคุมสัญญาณ ไฟจราจรในสภาพจราจรต่ำกว่าระดับอิ่มตัว (Undersaturation) หรือสภาพจราจรปกติ แต่ในปัจจุบัน ปริมาณจราจรส่วนใหญ่มีสภาพสูงกว่าระดับอิ่มตัว (Oversaturation) โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรให้มีความสอดคล้องกับสภาพจราจรและ ลักษณะทางกายภาพ โดยสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.2.1 การควบคุมสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed or Pre-time Control)

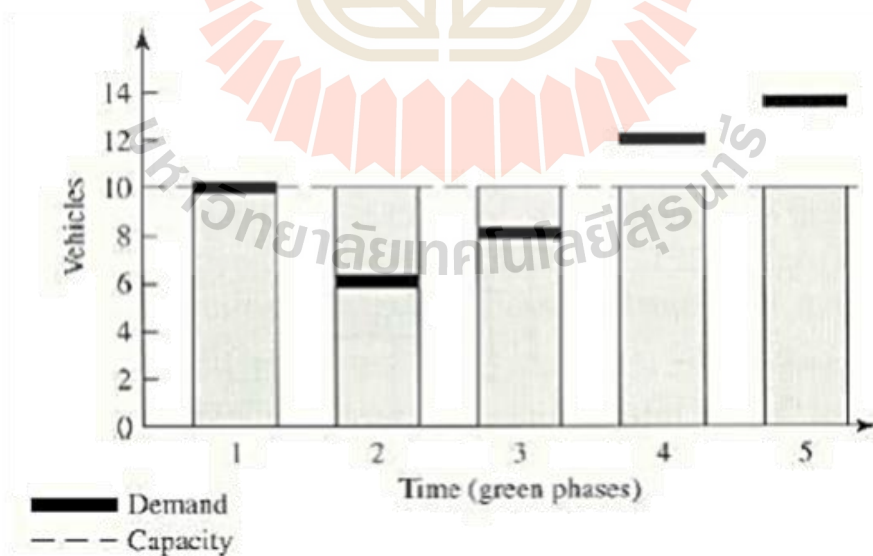
เป็นระบบควบคุมสัญญาณไฟที่ถูกออกแบบไว้ล่วงหน้าจากข้อมูลปริมาณจราจรเฉลี่ย ในอดีตมีความยาวรอบสัญญาณไฟและช่วงระยะเวลาสัญญาณไฟเขียวของแต่ละจังหวะสัญญาณไฟคงที่

ดังนั้นหากปริมาณจราจรมีการเปลี่ยนแปลง การควบคุมแบบกำหนดเวลาคงที่จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนสัญญาณไฟให้เข้ากับสภาพจราจรได้ จึงนิยมให้มีชุดการควบคุมสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่มากกว่า 1 ชุดหรือสัญญาณไฟจราจรหลายแผน (Multiple-time plan) เช่น แบ่งเป็นชุดการควบคุมในช่วงเวลาเช้า กลางวัน เย็นและหลังเที่ยงคืน เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณจราจรเฉลี่ยในแต่ละช่วงของวัน ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณสัญญาณไฟจราจรคือสมการที่มาจากทฤษฎีของเวปสเตอร์ (Webster, 1969) เหมาะสำหรับทางแยกเดี่ยวหรือทางแยกที่อยู่ห่างกันมาก การคำนวณตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าปริมาณจราจรที่เข้าสู่ทางแยกค่อนข้างคงที่และกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม (Stochastic) วัตถุประสงค์หลักการควบคุมคือทำให้ความล่าช้าที่ทางแยกให้ต่ำที่สุด (ปกาสิต จิรศักดิ์, 2549)

2.2.2 การควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร (Actuated Control)

เป็นระบบควบคุมสัญญาณไฟที่มีช่วงระยะเวลาของไฟเขียวไฟแดงในแต่ละขาของทางแยกเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการจราจรซึ่งมีการเชื่อมโยงระหว่างเครื่องตรวจนับปริมาณการจราจร (Detectors) กับจังหวะสัญญาณไฟจราจร โดยปกติแล้วระยะเวลาในแต่ละเฟสของสัญญาณไฟจะเริ่มต้นจากค่าไฟเขียวต่ำสุด (Minimum Green) และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมีรถยนต์เคลื่อนผ่านเครื่องตรวจนับปริมาณการจราจร ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระยะเวลาเฟสจะสั้นหรือยาวขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรทำให้การควบคุมมีความยืดหยุ่นและสามารถปรับเปลี่ยนให้เข้ากับสภาพจราจรในขณะนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความล่าช้าและแถวคอยบริเวณทางแยก

Roess et al. (2010) กล่าวถึงเมื่อปริมาณจราจรที่เข้าสู่ทางแยกในแต่ละจังหวะสัญญาณไฟมีปริมาณไม่คงที่แต่มีระยะเวลาไฟเขียวในแต่ละจังหวะสัญญาณไฟเท่ากัน ทำให้ในจังหวะสัญญาณไฟที่ 2 และ 3 ซึ่งมีปริมาณจราจรน้อย ไม่สามารถใช้ความจุจากสัญญาณไฟได้อย่างเต็มที่ส่งผลให้มีรถยนต์ค้างอยู่ในแถวคอยในจังหวะสัญญาณไฟที่ 4 และ 5 ทั้งหมด 6 คัน ซึ่งต่ำกว่าระดับความสามารถในการให้บริการที่ 50 คัน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงปริมาณจราจรกับช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวแต่ละจังหวะ
ที่มา : (Roess, Prassas และคณะ, 2010)

จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการพัฒนาระบบสัญญาณไฟจราจรที่สามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับปริมาณจราจรที่ตรวจวัดได้ซึ่ง ทวี วิชัยเมธาวิ (2545) ได้กล่าวถึงหลักการที่ใช้ควบคุม คือ การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวตามปริมาณจราจรหรือคนเดินเท้าที่ตรวจนับได้จากอุปกรณ์ตรวจนับ โดยที่ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวจะอยู่ภายในขอบเขตสูงสุด (Maximum Green Time) หรือต่ำสุด (Minimum Green Time) ตามที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และสามารถทำให้แถวคอยและความล่าช้าลดลงได้ การควบคุมแบบนี้เหมาะสำหรับทางแยกเดี่ยว ไม่ควรใช้กับทางแยกที่มีการเชื่อมต่อกัน เพราะการควบคุมนี้จะไม่สามารถควบคุมจุดเริ่มต้นของสัญญาณไฟเขียว (off-set) ระหว่างทางแยกได้

2.2.2.1 การควบคุมสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuate Signal)

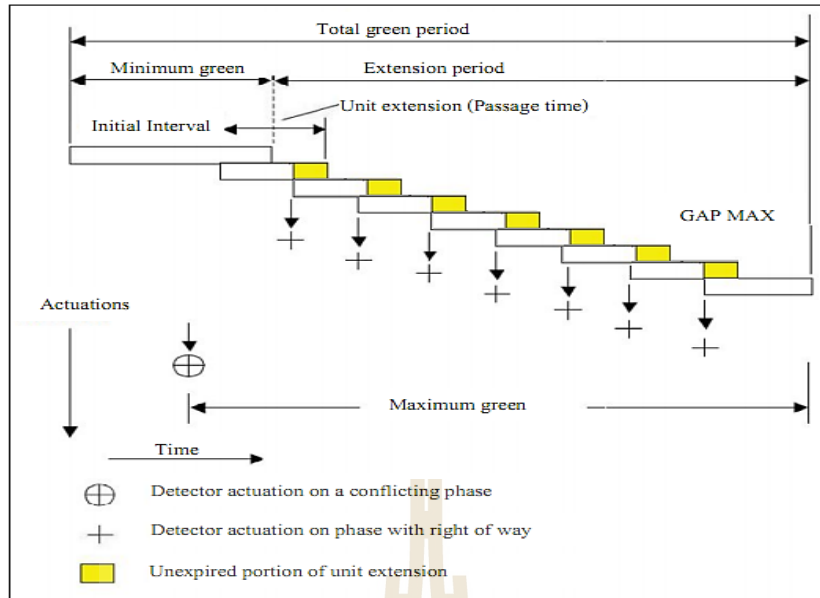
เป็นการควบคุมที่จะให้สัญญาณไฟเขียวแก่ถนนสายหลักที่มีปริมาณจราจรมากเป็นหลัก โดยมีอุปกรณ์ตรวจนับปริมาณจราจร (Detector) ติดตั้งบนถนนสายรอง และจะให้สัญญาณไฟเขียวแก่ถนนสายรองก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ตรวจนับที่ติดตั้งไว้ตรวจพบยวดยานที่กำลังเข้าสู่ทางแยก ระบบนี้จะทำการร้องขอสัญญาณไฟเขียวให้แก่ถนนสายรอง การควบคุมนี้มีข้อเสียในบางกรณีคือหากปริมาณจราจรบนถนนสายรองเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความล่าช้าบนถนนสายหลักสูงมาก การควบคุมนี้จึงมีประสิทธิภาพสูงเฉพาะกรณีที่ถนนสายรองมีปริมาณจราจรเบาบาง หรือเมื่อต้องการให้กลุ่มของยวดยานเคลื่อนที่ผ่านทางแยกบนถนนสายหลักที่มีปริมาณจราจรสูงในบางช่วงเวลาได้อย่างต่อเนื่อง เช่น ถนนสายหลักที่เชื่อมต่อกับทางเข้า-ออก ที่พักอาศัย สำนักงาน โรงเรียน เป็นต้น

2.2.2.2 การควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Control)

การควบคุมนี้จะมีหลักการทำงานคล้ายกับการควบคุมสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรแต่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจนับปริมาณจราจรทุกทิศทางและทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวตามปริมาณจราจรที่เข้าสู่ทางแยกทั้งถนนสายรองและสายหลัก ซึ่งจะมีควมยืดหยุ่นในการรองรับปริมาณจราจรมากกว่าการควบคุมสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร

ปฏิภาณ แก้ววิเชียร (2549) ได้กล่าวว่าการควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบควรใช้ควบคุมทางแยกเดี่ยว จะช่วยให้ความล่าช้าที่ทางแยกต่ำกว่าการควบคุมสัญญาณไฟจราจรคงที่ แต่อย่างไรก็ตามหากปริมาณจราจรเข้าใกล้ความสามารถในการให้บริการหรือระดับความอึดตัวเข้าใกล้ 1.0 จะทำให้ความล่าช้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าความล่าช้าจากการควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบคงที่

ในขั้นตอนการควบคุม ระบบจะทำการคำนวณรอบสัญญาณไฟเพื่อกำหนดระยะเวลาไฟเขียวต่ำสุด (Minimum Green Time) หากในระหว่างช่วงเวลาไฟเขียวต่ำสุดไม่มีการตรวจพบยวดยานและไม่มีการร้องขอสัญญาณไฟเขียวจากจังหวะสัญญาณไฟอื่น ระบบจะสิ้นสุดจังหวะสัญญาณไฟปัจจุบันและเปลี่ยนไปยังจังหวะสัญญาณไฟที่กำหนดไว้ตามลำดับ แต่หากมีการตรวจพบยวดยานในช่วงระยะห่างระหว่างกันของยวดยานต่อเวลา (Gap) 1-5 วินาที ระบบจะขยายจังหวะสัญญาณไฟเขียวออกไปเรื่อย ๆ (Vehicle Extension) ภายในระยะเวลาส่วนเพิ่มของช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว (Passage Time หรือ Unit-Extension) จนกระทั่งไม่มีการตรวจพบยวดยานหรือจนกว่าได้รับสัญญาณไฟเขียวสูงสุด (Maximum Green Time) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร
ที่มา : (Federal Highway Administration (FHWA), 2013)

2.2.2.3 การควบคุมโดยใช้ปริมาณจราจรและความหนาแน่นจราจร (Volume Density Control)

การควบคุมแบบนี้คล้ายกับการควบคุมแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ แต่เพิ่มความสามารถในการควบคุมโดยให้ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวในช่วงเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงได้ (Variable Initial Timing) และสามารถปรับลดช่องว่างระหว่างยวดยานในหน่วยของเวลาที่ใช้ในการพิจารณา เพื่อเปลี่ยนจังหวะสัญญาณไฟ (Gap Time) ทำให้การควบคุมสัญญาณไฟจราจรมีประสิทธิภาพดีขึ้น การควบคุมนี้มักใช้กับอุปกรณ์ตรวจจับแบบพื้นที่หรือแบบจุดที่ติดตั้งห่างจากทางแยกค่อนข้างมากและใช้กับถนนที่ยวดยานวิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ยมากกว่า 35 ไมล์ต่อชั่วโมง (มากกว่า 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ดังตารางที่ 2.1

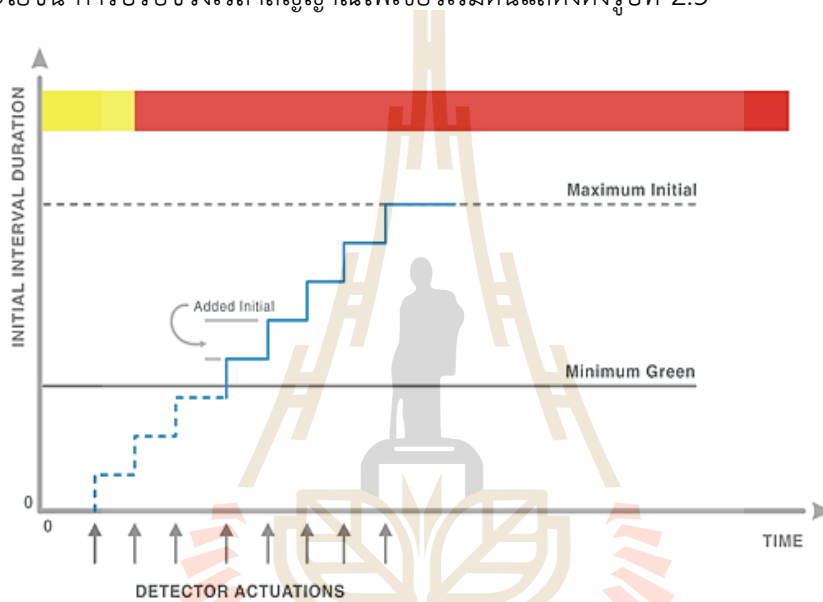
Approach Speed		Detector Set-Back (To front of loop)		Minimum Green	Passage Time
mph	kph	ft	m	sec	sec
15	24	40	12	8.0	3.0
20	32	60	18	10.0	3.0
25	40	80	24	12.0	3.0
30	48	100	30	14.0	3.5
35	56	135	41	18.0	3.5
40	64	170	52	22.0	3.5
45+	72+	Volume-density or multiple detectors recommended.			

Note: Volume-density could be considered at speeds of 35 mph (56 kph) or above.

[Used with permission of Institute of Transportation Engineers, from *Traffic Detector Handbook*, 2nd Ed., JHK & Associates, p. 67 and 69 Copyright © Institute of Transportation Engineers.]

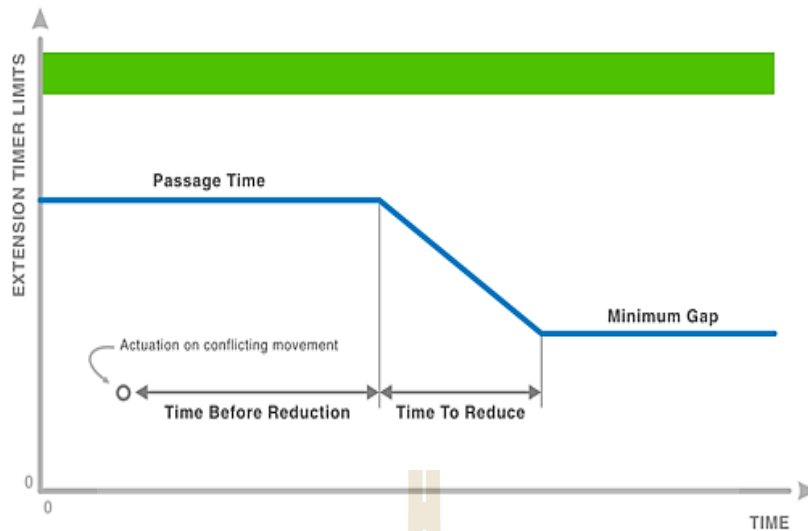
ตารางที่ 2.1 ระยะทางที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับจากเส้นหยุด
ที่มา : (McShane, Roess และ Prassas, 2010)

ขั้นตอนแรกของการควบคุมคือการกำหนดช่วงเวลาไฟเขียวเริ่มต้นน้อยที่สุด (ต่างจากการควบคุมตามปริมาณจราจร) ให้เท่ากับ 5-8 วินาทีและจะเพิ่มส่วนขยายของช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวให้เมื่อมีการตรวจพบยวดยานในระหว่างเวลาสัญญาณไฟเหลืองหรือช่วงเวลาสัญญาณไฟแดงก่อนหน้า แต่ส่วนขยายของช่วงเวลาไฟเขียวจะไม่เกินช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวเริ่มต้นมากที่สุดที่กำหนดไว้ซึ่งอาจกำหนดให้เท่ากับช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวน้อยที่สุดของการควบคุมตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ การให้ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวเริ่มต้นสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อแก้ไขแนวความคิดการควบคุมตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบที่มีข้อเสนอสมมติฐานว่า ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวน้อยที่สุดเป็นเวลาที่ยวดยานที่มีได้ทั้งหมดระหว่างเส้นหยุดและอุปกรณ์ตรวจนับใช้เคลื่อนที่ผ่านทางแยก แต่ในความเป็นจริงความยาวแถวคอยอาจไม่ถึงอุปกรณ์ตรวจนับ ทำให้สูญเสียเวลาสัญญาณไฟเขียวโดยเปล่าประโยชน์ การปรับช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการปรับเวลาสัญญาณไฟเขียวเริ่มต้น
ที่มา : (Federal Highway Administration (FHWA), 2013)

การปรับช่องว่างระหว่างยวดยานในหน่วยของเวลาที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อเปลี่ยนจังหวะสัญญาณไฟให้ลดลง มีแนวความคิดมาจากอุปกรณ์ตรวจนับที่ใช้มักติดตั้งไกลจากเส้นหยุดมาก ทำให้มีโอกาสมากที่จะขยายต่อส่วนเพิ่มของเวลาสัญญาณไฟเขียวส่งผลให้การควบคุมไม่มีประสิทธิภาพ จึงให้ลดส่วนเพิ่มของเวลาสัญญาณไฟเขียวเป็นช่องว่างระหว่างยวดยานในหน่วยของเวลาที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อเปลี่ยนจังหวะสัญญาณไฟที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้ ด้วยการกำหนดช่วงเวลาก่อนการลด (Time Before Reduction) และ ช่วงเวลาที่ใช้ลด (Time To Reduce) การทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการปรับช่องว่างระหว่างขบวนยานในหน่วยของเวลาที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อเปลี่ยน
จังหวะสัญญาณไฟ ที่มา : (Federal Highway Administration (FHWA), 2013)

2.3 การออกแบบสัญญาณไฟจราจร

2.3.1 รอบเวลาสัญญาณไฟ (Signal Cycle)

ลำดับเวลาจังหวะสัญญาณไฟช่วงเวลาที่ครบ 1 รอบของวงรอบเรียกว่า รอบเวลา
สัญญาณไฟ (c) ผลรวมของเวลาระหว่างไฟเขียวและเวลาแสดงไฟเขียวทุกเฟส คือรอบเวลาสัญญาณไฟ
(Cycle Time) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$c = \sum (I + G) \quad (2.1)$$

โดยที่	c	คือ	รอบเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)
	I	คือ	เวลาระหว่างไฟเขียว ได้แก่ เวลาแสดงไฟเหลือง และเวลาแสดงไฟแดงทุกด้าน (วินาที)
	G	คือ	เวลาแสดงไฟเขียว (วินาที)

2.3.2 เวลาล่าช้าของการเริ่มต้นและสุดท้าย (Start and End Lag Time)

Start Lag (a) คือ ผลรวมของเวลาช่วง Intergreen บวกกับเวลาที่สูญเสียช่วงเริ่มต้น

End Lag (b) คือ เวลาล่าช้าของการสิ้นสุด

$$Start\ Lag\ (a) = I + e\ e' \quad (2.2)$$

$$End\ Lag\ (b) = f\ f' \quad (2.3)$$

โดยที่	I	คือ	เวลาระหว่างไฟเขียว (วินาที)
	$e\ e'$	คือ	เวลาล่าช้าของการเริ่มต้น (วินาที)
	$f\ f'$	คือ	เวลาล่าช้าการสิ้นสุด (วินาที)

สำหรับเวลาระหว่างไฟเขียวของการเคลื่อนที่ คือ เวลาระหว่างไฟเขียวสองเฟสที่กำลังจะเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ โดยช่วงไฟเขียวประสิทธิภาพจะเริ่ม ($F_i + a$) และเวลาสิ้นสุดคือ ($F_k + b$) เมื่อ F_i และ F_k เป็นเวลาของการเปลี่ยนเฟส ซึ่งเริ่มต้นและหยุดตามลำดับ

2.3.3 การสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่ (Movement Lost Time)

การสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่คือ ผลต่างระหว่าง Start Lag Time กับ End Lag Time สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.4

$$\begin{aligned} l &= a - b \\ &= I + e e' - f f' \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยที่ l คือ เวลาสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่ (วินาที)
 $e e'$ คือ เวลาล่าช้าของการเริ่มต้น (วินาที)
 $f f'$ คือ เวลาล่าช้าการสิ้นสุด (วินาที)

จากการสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่ สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Movement Lost Time กับ Display Green Time (G) และเวลาไฟเขียวประสิทธิภาพ (g) ได้ดังสมการ 2.5

$$g + l = G + I \quad (2.5)$$

2.3.4 การเคลื่อนที่วิกฤต (Critical Movement)

เป็นการเคลื่อนที่ที่ใช้การคำนวณความจุและจังหวะสัญญาณไฟของทางแยกจากสมการ (2.1) การเคลื่อนที่วิกฤตได้อธิบายรอบสัญญาณไฟในรูปผลบวกเวลาไฟเขียวประสิทธิภาพและเวลาที่สูญเสียไปของการเคลื่อนที่ ในขณะที่การเคลื่อนที่วิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.6

$$c = \sum (g + l) \quad (2.6)$$

โดยที่ c คือ รอบเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)
 g คือ เวลาไฟเขียวประสิทธิภาพสำหรับการเคลื่อนที่วิกฤต (วินาที)
 l คือ เวลาสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนที่วิกฤต (วินาที)

2.3.5 เวลาสูญเสียเปล่าของทางแยก (Intersection Lost Time)

เวลาสูญเสียเปล่าของทางแยก (L) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.7

$$L = \sum l \quad (2.7)$$

โดยที่ L คือ เวลาสูญเสียเปล่าของทางแยก (วินาที)
 l คือ เวลาสูญเสียเปล่าของการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนที่วิกฤต (วินาที)

2.3.6 การออกแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Control)

ความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสม (Optimum Cycle Time) สามารถคำนวณได้จากสมการของเวปสเตอร์ (Webster, 1969)

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum \left(\frac{v}{s} \right)} \quad (2.8)$$

โดยที่	C_0	คือ	ความยาวรอบสัญญาณไฟที่เหมาะสม
	L	คือ	ผลรวมของเวลาที่สูญเสียบ (Lost time) สำหรับเฟสทั้งหมดในช่วงระยะเวลาของสัญญาณไฟเขียว (วินาที)
	$\left(\frac{v}{s} \right)$	คือ	อัตราส่วนของอัตราการไหลออกแบบที่อัตราการไหลอิมิตัวสำหรับวิธีการหรือช่องทางที่สำคัญในแต่ละเฟส

2.3.7 การออกแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร (Actuated Control)

ในขั้นตอนแรกของการควบคุมจะกำหนดช่วงเวลาไฟเขียวน้อยที่สุด (Minimum Green) โดยการคำนวณจากเวลาที่หยุดยานทั้งหมดที่มีได้ระหว่างเส้นหยุดกับอุปกรณ์ตรวจนับใช้เคลื่อนที่ผ่านทางแยก โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$G_{min} = l + \left[2 \times \text{integer} \left(\frac{d}{20} \right) \right] \quad (2.9)$$

โดยที่	G_{min}	คือ	ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวที่น้อยที่สุด (วินาที)
	d	คือ	ระยะทางระหว่างเส้นหยุดกับอุปกรณ์ตรวจนับ (ฟุต)
	20	คือ	ระยะห่างระหว่างหยุดยานที่จอดอยู่ในแนวแถวคอยนับจากกันชนหน้าของรถคันหน้าถึงกันชนหน้าของรถคันหลัง (ฟุต)
	l	คือ	เวลาที่หยุดยานคันแรกเริ่มเคลื่อนที่ภายหลังได้รับสัญญาณไฟเขียว (Start-up Time) (วินาที)
	2	คือ	ระยะห่างระหว่างยานพาหนะในหน่วยของเวลาในสภาพจราจรอิมิตัว (วินาที)

ส่วนเพิ่มของช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว (Passage Time) คือ เวลาที่ยอดยานใช้เดินทางจากอุปกรณ์ตรวจนับถึงเส้นหยุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P = \frac{d}{1.47S_{15}} \quad (2.10)$$

โดยที่	P	คือ	ส่วนเพิ่มของเวลาสัญญาณไฟเขียว (วินาที)
	d	คือ	ระยะทางจากอุปกรณ์ตรวจนับถึงเส้นหยุด (ฟุต)
	S_{15}	คือ	ความเร็วบนช่วงถนนที่ 15 เปอร์เซ็นต์เซ็นไทด์ (ไมล์ต่อชั่วโมง)

โดยปกติกำหนดให้ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวมากที่สุดเท่ากับ 1.25 ถึง 1.50 เท่าของช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวที่คำนวณจากการควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (Roess, Prassas และ คณะ, 2010)

2.4 โปรแกรมจำลองจราจร

การจำลองสภาพจราจรเป็นการจำลองสภาพจราจรจากสถานที่จริงหรือสถานการณ์ที่สมมติขึ้นโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า โปรแกรมจำลองจราจร ตัวอย่างการจำลอง เช่น การจำลองสภาพจราจรในเมือง การจำลองการควบคุมทางแยก เป็นต้น การจำลองสภาพจราจรมีข้อดีหลายประการ เช่น ช่วยประหยัดเวลาและงบประมาณที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบการจราจรมีความซับซ้อนมากทำให้สามารถศึกษาผลกระทบต่อการจราจร เมื่อเกิดอุบัติเหตุต่าง ๆ ที่ไม่สามารถสมมติให้เกิดขึ้นจริงในภาคสนามทำให้มองเห็นสภาพจราจรและปัญหาการจราจรโดยรวมอย่างเป็นระบบและสามารถคาดการณ์ปัญหาจราจรที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต การจำลองสภาพจราจรจึงสามารถใช้ทดสอบการควบคุมจราจรรูปแบบใหม่ ๆ และทดสอบซ้ำได้ตามที่ต้องการ นอกจากนี้การจำลองจะให้ค่าตัววัดประสิทธิภาพการจราจรโดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องไปจัดเก็บข้อมูลในสนาม อย่างไรก็ตามการจำลองสภาพจราจรก็มีข้อด้อยบางประการเช่น ต้องการใช้อุปกรณ์พื้นฐานจำนวนมาก ใช้เวลามากในการสร้างโครงข่ายถนนและแบบจำลองใช้เวลาและงบประมาณมากเพื่อปรับเทียบ (Calibration) และตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลอง แต่เนื่องจากข้อดีที่ได้รับจากการจำลองสภาพจราจรมีมากกว่าข้อด้อย และเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าในระยะยาว ทำให้การจำลองสภาพจราจรเพื่อวิเคราะห์และควบคุมการจราจรได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและมีใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน (ทวี วิชัยเมธาวิ 2545)

โปรแกรมจำลองการจราจรจำนวนมากที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถจำแนกตามลักษณะของการจำลองสภาพจราจรได้เป็น 3 ระดับคือระดับจุลภาค (Microscopic) ระดับมหภาค (Macroscopic) และระดับกึ่งจุลภาค (Meso-Scopic) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 โปรแกรมจำลองจราจรระดับจุลภาค

มักใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ตามกันของยวดยาน (Car-Following Model) และแบบจำลองการเปลี่ยนช่องจราจร (Lane-Changing Model) เป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของยวดยานแต่ละคัน การขับขีของยวดยานคันหน้าที่มีการเพิ่มความเร็ว ลดความเร็วและหยุด จะมีผลต่อการขับขีของยวดยานที่ขับตามมา แต่มักจะไม่มีคำนึงถึงพฤติกรรมการขับขีที่ได้รับผลกระทบมาจากพฤติกรรมการขับขีของยวดยานข้างเคียง(ยกเว้นกรณีของการแซงหรือเปลี่ยนช่องทาง)

2.4.2 โปรแกรมจำลองจราจรระดับมหภาค

ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (Speed) ความหนาแน่น (Density) และอัตราการไหล (Flow) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้จำลองกลุ่มยวดยานโดยมีสมมติฐานว่าการวิเคราะห์ค่าการจราจรหาได้จากการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรการจราจรมหภาคที่ไม่คำนึงถึงหรือพิจารณาถึงค่าการจราจรหรือพฤติกรรมของยานพาหนะแต่ละคัน

2.4.3 โปรแกรมจำลองจราจรระดับกึ่งจุลภาค

เป็นการนำเอาลักษณะการจำลองสภาพการจราจรทั้งระดับมหภาคและระดับจุลภาคมาผสมผสานกัน เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสื่อสารและคอมพิวเตอร์ที่มีอย่างต่อเนื่องทำให้

การพัฒนาโปรแกรมจำลองจราจรมีความก้าวหน้าและมีให้เลือกใช้จำนวนมาก แต่โปรแกรมที่มีความความยืดหยุ่นสูงในการนำไปประยุกต์ใช้และผ่านการตรวจสอบความถูกต้องพร้อมกันได้รับการยอมรับนั้นมีอยู่ไม่มากนัก ในงานวิจัยนี้จึงยกตัวอย่างโปรแกรมจำลองจราจรระดับจุลภาคที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลและโปรแกรมที่มีความสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองสภาพจราจรของงานวิจัยนี้ได้ ซึ่งประกอบไปด้วยโปรแกรม AIMSUN, CORSIM, DRACULA, PARAMICS และ VISSIM

2.4.3.1 โปรแกรม AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks)

พัฒนาโดย J. Barcelo และ J.L.Ferrer ที่มหาวิทยาลัยโพลีเทคนิคในแคว้นกาตาลัน (Polytechnic University of Catalunya) เมืองบาร์เซโลน่าประเทศสเปน ปี ค.ศ. 1994 เป็นแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคใช้จำลองสภาพจราจรบนโครงข่ายถนนในเมืองและระหว่างเมืองสามารถประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation System, ITS) ปัจจุบันมีการใช้โปรแกรม AIMSUN เชื่อมต่อกับระบบ SCOOT ในโครงการอุดหนุนการวิจัย DGVII

2.4.3.2 โปรแกรม CORSIM (Coridor Microscopic Simulation)

พัฒนาขึ้นโดย Federal Highway Administration ใน ปี ค.ศ. 1996 เป็นโปรแกรมจำลองจราจรระดับจุลภาค ประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อย FRESIM ใช้จำลองสภาพจราจรบนทางหลวง (Freeway) และ NETSIM ใช้จำลองสภาพจราจรในเมือง สามารถใช้จำลองการควบคุมสัญญาณไฟจราจรคงที่และสัญญาณไฟแบบปรับเปลี่ยนตามปริมาณจราจร แต่ไม่มีเครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณเพื่อให้การควบคุมทางแยกสัญญาณไฟที่ดีที่สุด

2.4.3.3 โปรแกรม DRACULA (Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Micro- simulation)

พัฒนาโดยสถาบันการศึกษาด้านการขนส่งของมหาวิทยาลัยลีดส์ (Institute for Transport Studies, University of Leeds) เป็นแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคใช้จัดเส้นทางการเดินทางในเมือง (Urban Traffic Assignment Model) ที่สามารถจำลองสภาพจราจรแต่ละวันได้ต่อเนื่องกันตลอด 24 ชั่วโมง ผู้ขับขี่แต่ละคนจะเลือกเส้นทางเดินทางตามสภาพจราจรและประสบการณ์ที่เรียนรู้จากแบบจำลองย่อย (Learning Sub-Model)

2.4.3.4 โปรแกรม PARAMICS (Parallel Micro Simulation)

พัฒนาขึ้นที่ศูนย์คอมพิวเตอร์ในเอดินบะระ (Edinburgh Parallel Computing Center) ประเทศสกอตแลนด์ ปี ค.ศ. 1992 เป็นโปรแกรมจำลองจราจรระดับจุลภาคใช้จำลองสภาพจราจรที่พิจารณาการขับขีของยานแต่ละคันในโครงข่ายถนนที่มีการจราจรแออัด สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจนโดยใช้สี สามารถใช้ทดสอบการแนะนำเส้นทาง (Route Guidance) การเลือกเส้นทางเดินทาง (Route Choice) และสามารถตรวจวัดผลภาวะที่เกิดขึ้นจากการจราจรได้

2.4.3.5 โปรแกรม VISSIM

พัฒนาโดย PTV System Software and Consulting GMBH ประเทศสาธารณรัฐเยอรมนี เป็นโปรแกรมระดับจุลภาคที่มีความยืดหยุ่นสูงใช้สำหรับจำลองสภาพจราจรในเมืองและการให้บริการระบบขนส่งมวลชน ใช้ประเมินทางเลือกด้านการจัดการจราจร สามารถ

รายงานค่าสถิติต่าง ๆ ได้เช่น รายละเอียดเวลาที่ใช้เดินทางและสถิติความล่าช้า สถิติความยาวแถวคอย รายละเอียดข้อมูลการจัดจังหวะควบคุมสัญญาณไฟจราจร การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับและการขอสัญญาณไฟเขียวจากยานพาหนะในระบบขนส่งมวลชน สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางเคลื่อนที่ได้ของยานกับเวลา (Time Space Diagram) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา (Speed Profile)

2.5 ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis)

นำชัย (2552) การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (1 ตัวแปร) และตัวแปรอิสระ (มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ตัวแปร) โดยที่ตัวแปรตาม (Y) มีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม เมื่อได้แบบแผนความสัมพันธ์ (สมการพยากรณ์) แล้วสามารถนำแบบแผนดังกล่าวไปใช้ประมาณค่ากลุ่มได้ โดยอาศัยความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. Binary Logistic Regression ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มที่มีค่าได้เพียง 2 ค่า (ตัวแปรทวิ) เช่น $Y=1$ ถ้าคนไข้มีการติดเชื้อ หรือ $Y=0$ ถ้าคนไข้ไม่มีการติดเชื้อ

2. Multinomial Logistic Regression ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มที่มีค่ามากกว่า 2 ค่า เช่น $Y=0$ หมายถึงไม่เป็นโรคมะเร็ง $Y=1$ หมายถึงการเป็นโรคมะเร็ง ... $Y=4$ หมายถึงการเป็นมะเร็งขั้นสุดท้าย

2.5.1 รูปแบบสมการการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก

สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกสมการพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบการวิเคราะห์จะเป็นสมการแสดงความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ ที่สนใจ (Probability of Event)

$$\hat{Y}_i = \frac{e^u}{1 + e^u} \quad (2.11)$$

เมื่อ \hat{Y}_i คือ ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ

$$\text{โดยที่} \quad u = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (2.12)$$

และสามารถอยู่ในรูปเชิงเส้น (Linear Model) ได้เป็น

$$\ln \left[\frac{\hat{Y}}{1 - \hat{Y}} \right] = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (2.13)$$

เมื่อ β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient)

X_i คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)

2.5.2 ข้อตกลงเบื้องต้นและข้อจำกัด

ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถเป็นได้ทั้งตัวแปรเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยไม่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรตัวแบบการวิเคราะห์การถดถอย

โลจิสติก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกยังมีข้อตกลงเบื้องต้นที่คล้ายการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์บางประการได้แก่

- 1.) ตัวแปรอิสระต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (ไม่เกิดปัญหา Multicollinearity)
- 2.) หากจำนวน Case ในเหตุการณ์ที่สนใจมีน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถคำนวณพารามิเตอร์ในสมการพยากรณ์ได้
- 3.) ตัวแปรอิสระที่เป็นตัวแปรเชิงคุณภาพจะมีข้อจำกัดแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์สถิติไคสแควร์
- 4.) ข้อมูลที่เป็น Extreme Values ในตัวแปรอิสระที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณจะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์

2.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล (Goodness of Fit)

ศิริชัย กาญจนวาสี (2554) ในการตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดลกับข้อมูลเชิงประจักษ์ประกอบไปด้วย

2.5.3.1 Log Likelihood (-2LL)

พิจารณาได้จากค่าความน่าจะเป็น (Likelihood Value) ของโมเดล ซึ่งเท่ากับค่า $-2 \log \text{Likelihood}$ ($-2LL$) เหตุที่คูณ Log Likelihood ด้วย -2 เพื่อให้ค่าที่ได้มีการแจกแจงคล้าย Chi-Square สำหรับทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าค่า $-2LL$ มีค่าต่ำ แสดงว่าโมเดลสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ หากมีค่า 0 แสดงว่าโมเดลสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์อย่างสมบูรณ์ (ค่า Likelihood เป็น 1 ดังนั้น $-2LL$ จึงเป็น 0) ถ้าค่า $-2LL$ มีค่าสูงแสดงถึงความไม่สอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ในการทดสอบนัยสำคัญความสอดคล้องของโมเดล ใช้ Chi-Square Test สมมุติฐานศูนย์ที่ว่า H_0 : โมเดลสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์

2.5.3.2 Chi-Square (χ^2)

การทดสอบ Model Chi-Square ที่ $df = p$ (จำนวนตัวแปรทำนาย) เป็นการทดสอบสมมุติฐานที่ว่า H_0 : สัมประสิทธิ์ถดถอยแบบโลจิสติกทุกตัวมีค่าเท่ากับ 0

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \text{Not all } \beta_i = 0$$

ถ้าสถิติทดสอบ Chi-Square มีนัยสำคัญ แสดงว่า ชุดของตัวแปรทำนายสามารถร่วมกันทำนายโอกาสของการเกิดเหตุการณ์ ($Y=1$) ได้ด้วยความเชื่อมั่น $(1 - \alpha) \times 100\%$ (การแปลผลสถิติทดสอบ Chi-Square คล้ายกับสถิติทดสอบ F-Test สำหรับทดสอบสมมุติฐาน $H_0: R^2 = 0$ ใน Regression)

สำหรับค่า R^2 สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$R_{logit}^2 = \frac{-2 \log L_{NULL} - [2 \log L_{MODEL}]}{-2 \log L_{NULL}} \quad (2.14)$$

นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดลจากความถูกต้องของการทำนายว่าสมการสามารถทำนายการเกิดเหตุการณ์จากข้อมูลจริงได้ถูกต้องร้อยละเท่าใด

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร

Feng-Bor Lin และคณะ (1991) ศึกษาเรื่องประสิทธิภาพและองค์ประกอบของการควบคุมสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Control) ซึ่งในงานวิจัยได้มีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควบคุมสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Control) กับการควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Control) ทั้งในลักษณะทางกายภาพแบบสามแยกและสี่แยก รวมทั้งการพิจารณาเฟสสัญญาณไฟที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมแบบจำลองสภาพจราจรในการศึกษา จากนั้นนำมาพรีดิกกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้ารวมที่เพิ่มขึ้นกับเปอร์เซ็นต์อัตราการไหลในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ผลการศึกษาพบว่าความล่าช้าของการควบคุมสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรจะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของกระแสจราจรเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ รวมไปถึงการศึกษาความแตกต่างของความล่าช้าระหว่างสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรกับแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ และพบว่าในกรณีที่ปริมาณจราจรบนถนนสายรองน้อยจะมีความแตกต่างของความล่าช้าระหว่างการควบคุม 2 รูปแบบนี้น้อยมาก

Bradley W. (1993) ได้ทำการศึกษาถึงข้อดีข้อเสียและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ สัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรและสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ โดยแบ่งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ปกติเปรียบเทียบกับแบบที่เพิ่มเวลาคนเดินข้าม ทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองสภาพจราจร Traf-Netsim บนทางแยกเดี่ยว ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบมีความล่าช้ารวมน้อยกว่าสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร 14 เปอร์เซ็นต์ และสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ปกติที่บวกเวลาคนเดินข้ามมีความล่าช้ามากกว่าสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ปกติเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังเป็นเพียงจุดเริ่มต้น ไม่สามารถสรุปผลที่แม่นยำได้เนื่องจากปริมาณข้อมูลและจำนวนตัวอย่างยังไม่เพียงพอ

ทวี วิชัยเมธาวิ (2545) ศึกษาวิธีการควบคุมสัญญาณไฟที่มีประสิทธิภาพสำหรับสภาพจราจรอิมตัวและอิมตัวมาก โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค PARAMICS ที่มีตัวกลางติดต่อสื่อสารกับโปรแกรมประยุกต์ (Application Programming Interface, API) ทำการทดสอบบนถนนโครงข่ายแบบปิดที่มีลักษณะเป็นตาราง (Grid Network) มีระยะห่างระหว่างทางแยกเท่ากันจำนวน 2 โครงข่าย (ที่เกิดจากการตัดกันของถนนสายหลัก 2 สาย) โดยใช้หลักการปรับสัญญาณไฟจราจรให้สอดคล้องกับข้อมูลการจราจรแบบทันกาลและป้องกันการเกิดแถวคอยกีดขวางทางแยกต้นทาง ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพได้แก่ จำนวนรถที่ตกข้างในโครงข่าย จำนวนรถที่ออกจากโครงข่าย ความเร็วเฉลี่ย เวลาหยุดนิ่ง ระยะทางที่รถวิ่งบนโครงข่ายรวม (คัน-ชั่วโมง) และเวลาที่ใช้ในการเดินทาง ผลการศึกษาพบว่า ในสภาพจราจรอิมตัว วิธีควบคุมสัญญาณไฟแบบตอบสนองตามปริมาณจราจรโดยใช้ระดับความอิมตัวสูงสุดของแต่ละสัญญาณไฟจัดแบ่งช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการควบคุมสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ และในสภาพจราจรอิมตัวมาก วิธีควบคุมสัญญาณไฟแบบตอบสนองตามปริมาณจราจรโดยใช้ดัชนีความยาวแถวคอยสูงสุดจัดแบ่งช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีใช้ความยาวรอบสัญญาณไฟสั้นและใช้วิธีพื้นที่ว่างหลังแถวคอย

ปฏิภาณ แก้ววิเชียร (2549) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร (Vehicle-Actuated) เพื่อประเมินประสิทธิภาพก่อนและหลังการติดตั้งระบบสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกเดี่ยว มีลักษณะของทางแยกเป็นถนนสายหลักตัดกับถนนสายรอง และใช้ความล่าช้าจากการหยุดเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิผล เปรียบเทียบผลการศึกษาโดยใช้วิธีทางสถิติทดสอบความแตกต่างของความล่าช้าจากการหยุดเฉลี่ยแบบคู่ (Paired Observations) ที่ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05 ได้ผลการศึกษาจากการพิจารณาทุกช่วงเวลาพบว่า ความล่าช้าจากการหยุดเฉลี่ยรวมทุกขาที่ทางแยกมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการติดตั้งระบบสัญญาณไฟจราจร เมื่อพิจารณาแต่ละขบวนทางแยกพบว่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายหลักมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายรองมีค่าลดลงภายหลังการติดตั้งระบบสัญญาณไฟจราจร

พรชิตา งามะพันธ์ (2557) ศึกษาการจัดการจราจรบริเวณสามแยกบนถนนทางหลวงสายหลัก ซึ่งใช้ทางแยกหน้าทางเข้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นกรณีศึกษา มีลักษณะทางกายภาพเป็นสามแยก ถนนสายหลักเป็นถนนหลวงเส้น 304 ราชสีมา-ปักธงชัย ตัดกับถนนสายรองถนนมหาวิทยาลัย โดยทำการศึกษารูปแบบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองจราจร AIMSUN จำลองการควบคุมสัญญาณไฟจราจร 3 รูปแบบได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบคงที่หลายแผน (Multiple-Time Plan) สัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Control) และสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Full-Actuated Control) จากผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบทำให้การจัดการจราจรบริเวณทางแยกดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งวัดผลจากตัวชี้วัดประสิทธิผลเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองสัญญาณไฟจราจรทั้ง 3 รูปแบบได้แก่ ความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์บริเวณทางแยก เวลาเดินทางเฉลี่ย (วินาที/กิโลเมตร) เวลาเดินทางทั้งหมด (วินาที) ความล่าช้าเฉลี่ย (วินาที/กิโลเมตร) และเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุด (วินาที/กิโลเมตร)

สรุปผลการศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการศึกษาประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรพบว่ามีการศึกษาในเรื่องประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรที่หลากหลายเช่น รูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ สัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร และสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ มีทั้งลักษณะการศึกษานทางแยกเดี่ยวและบนโครงข่ายประสานงาน โดยในงานวิจัยได้มีการนำตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรมาใช้ในการประเมิน ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยจะสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรของงานวิจัยต่าง ๆ เทียบกับผลของงานวิจัยนี้ได้

2.6.2 การศึกษาเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

James C. และ Siamak A. (1996) ได้ศึกษาผลกระทบของการติดตั้งสัญญาณไฟและพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจว่าควรที่จะติดตั้งสัญญาณไฟจราจรที่บริเวณทางแยกหรือไม่ ในกรณีที่ทางแยกยังไม่เกณฑ์ของ MUTCD (Manual Uniform Traffic Control Devices) และ TxDOT ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาตัวชี้วัดในเรื่องลักษณะทางกายภาพและปริมาณจราจรได้แก่กรณีปริมาณจราจร 172 กรณี ลักษณะทางกายภาพ 8 กรณีและรูปแบบการแปรผันของปริมาณจราจรระหว่างวัน 24 ชั่วโมงทั้งหมด 12 รูปแบบ ทำการจำลองการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบ

Two-Way Stop, All-Way Stop และ Fully-Actuated Control จำลองบนโปรแกรมจำลองจราจร Traf-Netsim ใช้ความล่าช้ารวม, ความล่าช้าเนื่องจากการหยุด และจำนวนรถที่หยุดเป็นตัวชี้วัดประสิทธิผล ผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบ Two-Way Stop มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการจัดการจราจร รูปแบบ All-Way Stop มีประสิทธิภาพแย่งที่สุดในการจัดการจราจร ส่วน Fully-Actuated Control มีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 2 รูปแบบการควบคุมข้างต้น อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขเกี่ยวกับการทดสอบทางแยกที่ยังไม่เข้าเกณฑ์ของ MUTCD และ TxDOT และยังต้องมีการศึกษาปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งสัญญาณไฟเพิ่มเติมต่อไป

จากงานวิจัยของ James C. และ Siamak A. (1996) พบว่ามีความคล้ายคลึงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการควบคุมจราจรบริเวณทางแยก ระหว่างรูปแบบที่ไม่ติดตั้งสัญญาณไฟจราจรกับรูปแบบที่ติดตั้งสัญญาณไฟจราจร และมีตัวชี้วัดด้านปริมาณจราจรที่เหมือนกันได้แก่ รูปแบบการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน (Hourly Volume) ที่มีลักษณะการแปรผันแตกต่างกัน 12 รูปแบบ แต่จะมีความแตกต่างจากงานวิจัยนี้เล็กน้อยเกี่ยวกับการพิจารณาเลือกรูปแบบการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันที่ออกมาในรูปเชิงสัดส่วน

A. Skabardonis และคณะ (1998) ได้พัฒนาเครื่องมือสำหรับการเลือกรูปแบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรต่าง ๆ แบบประสานงานได้แก่ รูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ แบบกึ่งตามปริมาณจราจรและแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ ซึ่งได้ศึกษาจากตัวอย่างบนถนน 14 เส้นในเมืองต่าง ๆ ของสหรัฐอเมริกา รวม 209 ทางแยก โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจร NETSIM เพื่อประเมินผล และใช้วิธีแบ่งเกณฑ์การเลือกรูปแบบสัญญาณไฟจราจรจากตัวชี้วัด 4 ตัว ได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณจราจรต่อปริมาณการไหลล้มตัวบนถนนสายตรง (V/C) ใช้เกณฑ์แบ่งที่มากกว่า 0.8 และน้อยกว่า 0.8 ปริมาณรถเฉลี่ยบนถนนสายหลักใช้เกณฑ์แบ่งที่มากกว่า 20 เปอร์เซนต์ และน้อยกว่า 20 เปอร์เซนต์ จำนวนเฟสสัญญาณไฟจราจรใช้เกณฑ์แบ่งที่ 2 เฟส, 4 เฟส และ 8 เฟส อัตราส่วนของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักต่อปริมาณจราจรบนถนนสายตรง (R) ใช้เกณฑ์แบ่งที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.3 และมากกว่า 1.3 ซึ่งหลังจากที่มีการประเมินเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างรูปแบบสัญญาณไฟปัจจุบันและหลังการใช้เกณฑ์การเลือกติดตั้งสัญญาณไฟจราจรพบว่า 2 ตัวอย่างทางแยกที่นำมาประเมินสามารถลดความล่าช้าเฉลี่ยทั้งหมดได้ 42.37 % และ 24.05 % ตามลำดับ

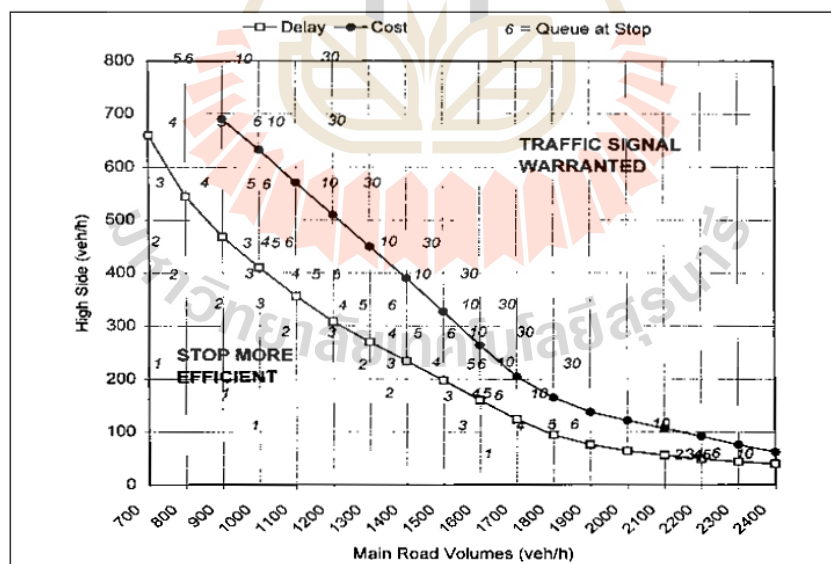
จากงานวิจัยของ A. Skabardonis และคณะ (1998) มีความใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์งานวิจัยนี้ในเรื่องการพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรโดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิจารณาเลือกรูปการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ แบบกึ่งตามปริมาณจราจร และแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ แต่จะแตกต่างกันในเรื่องการควบคุมที่เป็นลักษณะแบบประสานงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาทางแยกที่มีลักษณะเป็นทางแยกเดี่ยว สำหรับตัวชี้วัดด้านปริมาณจราจรที่น่าสนใจได้แก่ ปริมาณรถเฉลี่ย และอัตราส่วนของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักต่อปริมาณจราจรบนถนนสายตรง

Paul J. Carlson (1998) ศึกษาและประเมินประสิทธิภาพเกณฑ์การพิจารณาติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการพิจารณาเกณฑ์ต่าง ๆ ของ TxDOT, State DOTs และ City Engineers ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ศึกษามาตรฐานด้านวิศวกรรม

จรรยา มาประยุกต์เข้ากับเกณฑ์ที่ใช้ของ MUTCD (Manual Uniform Traffic Control Devices) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิจารณาเกี่ยวกับผลกระทบของรถขนาดใหญ่ ซึ่งได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วนที่มีปริมาณรถขนาดใหญ่ 20 เปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วนที่ไม่มีปริมาณรถขนาดใหญ่ โดยผลการศึกษาพบว่า ค่า (Elasticity) ของทั้งสองแบบมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของรถขนาดใหญ่ไม่มีผลกระทบต่อความล่าช้าของทางแยกในกรณีติดตั้งสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่

จากงานวิจัยของ Paul J. Carlson (1998) เป็นการศึกษาเกณฑ์การพิจารณาตัดสินใจที่จะติดตั้งเฉพาะรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่เพียงอย่างเดียว โดยแตกต่างกับงานวิจัยนี้ที่จะพิจารณารูปแบบสัญญาณไฟทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยมีตัวชี้วัดที่น่าสนใจคือ ผลกระทบจากเปอร์เซ็นต์ของรถขนาดใหญ่ ซึ่งอาจจะมีผลกระทบกับรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบอื่น ๆ เช่นกัน

Sampson, J.D. (1999) ศึกษาเกณฑ์ในการติดตั้งรูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรโดยใช้เกณฑ์ของความยาวแถวคอยเป็นตัวชี้วัด ศึกษาจากสี่แยกที่มีลักษณะเป็นทางแยกเดี่ยว โดยคัดเลือกรูปแบบการควบคุมทางแยกมา 2 รูปแบบได้แก่ Two-Way Stop และ Fully-Actuated Signal เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งการควบคุมที่ทางแยก ผู้วิจัยได้ใช้วิธีสร้างแบบจำลองสภาพจราจรด้วยโปรแกรม SIMTRA แล้วทดสอบแบบจำลองด้วยการแปรผันปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วนบนถนนสายหลักและถนนสายรอง เพื่อหาความยาวแถวคอยเฉลี่ยในหนึ่งชั่วโมง โดยกำหนดเกณฑ์การแบ่งระหว่างการควบคุม 2 รูปแบบด้วยค่าพารามิเตอร์ Break-Even ซึ่งเป็นจุดที่การควบคุมของทั้ง 2 รูปแบบมีค่าความล่าช้าเท่ากัน จากนั้นนำค่าความยาวแถวคอยเฉลี่ยและจุด Break-Even มาพร้อมกราฟเพื่อสร้างเกณฑ์ในการพิจารณา แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงค่า Break-Even Delay และความยาวแถวคอย บนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรสายหลักและปริมาณจราจรสายรอง ที่มา : (Sampson, J.D. ,1999)

จากผลการศึกษาพบว่าหลังจากพล็อตกราฟบนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรสายหลักและปริมาณจราจรสายรองแล้ว เส้นแบ่งระหว่าง 2 รูปแบบการควบคุมทางแยกซึ่งมีเส้น Break-Even ลากผ่านมีจำนวนแถวคอยเฉลี่ยอยู่ที่ 4 คัน ซึ่งประเมินได้ว่าหากความยาวแถวคอยเฉลี่ย

ที่ทางแยกมีมากกว่า 4 คัน การติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบ Fully-Actuated จะมีประสิทธิภาพดีกว่า การควบคุมทางแยกแบบ Two-Way Stop แต่หากความยาวแถวคอยเฉลี่ยน้อยกว่า 4 คัน การควบคุมทางแยกแบบ Two-Way Stop จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบ Fully-Actuated ซึ่งในกรณีความยาวแถวคอยมีมากกว่า 10 คันผู้วิจัยแนะนำให้ใช้เกณฑ์จากจุด Break-Even Cost ซึ่งรายละเอียดอยู่ในงานวิจัยของ Sampson, J.D. (1992) “Warrant for Traffic Signals”

จากงานวิจัยของ Sampson, J.D. (1999) มีความคล้ายคลึงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้โดยได้ศึกษาเครื่องมือที่ใช้สำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกลักษณะการควบคุมจราจรบริเวณทางแยก แต่จะแตกต่างกันในเรื่องรูปแบบการควบคุมจราจรที่ใช้พิจารณา อย่างไรก็ตามมีการศึกษาตัวชี้วัดด้านปริมาณจราจรที่น่าสนใจได้แก่ การแปรผันของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักและสายรอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยตรง รวมถึงวิธีการที่ใช้ในการแบ่งประสิทธิภาพการควบคุมทางแยกระหว่างสองรูปแบบเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้ง

Dražen (2004) ศึกษาและวิเคราะห์เกณฑ์ในการตัดสินใจที่จะติดตั้งรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ จากเกณฑ์ที่มีอยู่ของ MUTCD (Manual Uniform Traffic Control Devices) โดยใช้ Synchro Software เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งผู้วิจัยได้มีการจำแนกลักษณะทางกายภาพของทางแยกออกเป็นสามแยกและสี่แยก มีจำนวนเลนที่แตกต่างกัน รวมถึงวิเคราะห์การกระจายตัวของปริมาณจราจรที่ผ่านทางแยก แบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณจราจรในแต่ละทิศทางได้แก่ เปอร์เซ็นต์ปริมาณรถเลี้ยวซ้าย ตรง และเลี้ยวขวา โดยใช้ความล่าช้าเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ มีการวิเคราะห์ทั้งแบบไม่มีสัญญาณไฟจราจร สัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ และสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจร โดยผลการศึกษาพบว่า ความล่าช้าของแต่ละรูปแบบสัญญาณไฟมีความแตกต่างกันจากการจำแนกลักษณะทางกายภาพและการพิจารณาการกระจายทิศทางของปริมาณจราจร จึงได้เสนอ 3 ปัจจัยที่เกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจรที่มีอยู่ของ MUTCD ควรมีการพิจารณาเพิ่มเติมได้แก่ 1.) ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักและสายรองยังไม่มีมีการพิจารณาการกระจายตัวของปริมาณจราจรในแต่ละทิศทาง 2.) Warrant 2 และ 3 ซึ่งกล่าวถึงการใช้ปริมาณจราจรระหว่างวันบนถนนสายหลักและสายรอง 4 ชั่วโมง และปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วนบนถนนสายหลักและสายรองในการพิจารณา ยังไม่มีเกณฑ์ที่ใช้สำหรับพิจารณารูปแบบสามแยก 3.) เกณฑ์ที่ใช้ยังค่อนข้างพิจารณาบนภาพรวมทั้งโครงการยังไม่พิจารณาเจาะลึกลงรายละเอียดที่เฉพาะลงไป

จากงานวิจัยของ Dražen (2004) เป็นเพียงการศึกษาเพิ่มเติมจากเกณฑ์ที่มีอยู่ของ MUTCD โดยเน้นศึกษาไปที่การพิจารณาด้านลักษณะทางกายภาพ มีเพียงตัวชี้วัดเดียวที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านปริมาณจราจรคือ เปอร์เซ็นต์การกระจายของปริมาณจราจรในแต่ละทิศทาง ซึ่งส่งผลต่อความล่าช้าที่เกิดขึ้น เป็นอีกตัวชี้วัดที่น่าสนใจในการประเมินประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้

Xuesong และคณะ (2010) ศึกษาการประเมินเกณฑ์ที่จะตัดสินใจติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ ในหัวข้อการพิจารณาจากปริมาณจราจร 4 ชั่วโมง (Four-Hour-Volume Traffic Signal Warrant) ของ MUTCD (Manual Uniform Traffic Control Devices) ซึ่งผู้วิจัยได้ประยุกต์เงื่อนไขโดยใช้ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักและสายรองที่แตกต่างกัน 10 รูปแบบ จำนวนเลนที่แตกต่างกันบนถนนสายหลักและสายรอง 5 รูปแบบ เปอร์เซ็นต์ของรถขนาดใหญ่

3 รูปแบบ และสัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณรถจักรยานยนต์ 4 รูปแบบ จากนั้นทดสอบด้วยโปรแกรมแบบจำลองสภาพจราจร CORSIM เพื่อศึกษาความแตกต่างของแต่ละเงื่อนไขและผลกระทบจากตัวชี้วัดที่สนใจ ซึ่งผลการศึกษพบว่าเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของปริมาณรถจักรยานยนต์ทำให้เกิดความล่าช้าบนถนนสายรองที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในกรณีที่มีถนนสายหลักมีจำนวนเลนมากกว่าถนนสายรอง และความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์รถขนาดใหญ่พบว่าจะมีผลกระทบเฉพาะในกรณีของทางแยกที่ไม่มีสัญญาณไฟจราจรควบคุม ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำให้มีการพิจารณารูปแบบของจำนวนเลนและการกระจายตัวของปริมาณรถจักรยานยนต์เพิ่มเติมในเกณฑ์การพิจารณาติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่

จากงานวิจัยของ Xuesong และคณะ (2010) เป็นการประเมินเกณฑ์ที่จะตัดสินใจพิจารณาติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เพิ่มเติมจากของ MUTCD ซึ่งยังแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ต้องการพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจของรูปแบบสัญญาณไฟจราจร 3 รูปแบบ แต่มีตัวชี้วัดที่น่าสนใจหลายอย่างที่เกี่ยวข้อกับปริมาณจราจร ที่สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณารูปแบบสัญญาณไฟแบบอื่น ๆ ซึ่งจากผลการประเมินตัวชี้วัดด้านปริมาณจราจรบนถนนสายหลักและสายรอง และการกระจายตัวของปริมาณรถจักรยานยนต์ เป็นตัวชี้วัดที่ส่งผลต่อความล่าช้าของสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ ซึ่งในขณะเดียวกันเปอร์เซ็นต์รถขนาดใหญ่ก็อาจจะส่งผลต่อสัญญาณไฟรูปแบบอื่น ๆ

สรุปผลการศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการศึกษาเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า ผู้วิจัยส่วนใหญ่เลือกที่จะศึกษาเกณฑ์การตัดสินใจติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ โดยการศึกษาในกรณีเพิ่มเติมหรือใช้ข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่ของ MUTCD (Manual Uniform Traffic Control Devices) มีเพียงงานวิจัยบางส่วนที่ศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการควบคุมหรือรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามในเรื่องของปัจจัยและรูปแบบสัญญาณไฟที่ใช้ในการศึกษา ยังมีการศึกษาที่ค่อนข้างจำกัด เนื่องจากการวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟจราจรค่อนข้างมีความละเอียดอ่อนและซับซ้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็จะพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวข้อกับการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อที่น่าสนใจได้แก่ ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักและสายรอง ปริมาณรถจักรยานยนต์ ปริมาณรถขนาดใหญ่ และอัตราส่วนของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักต่อปริมาณจราจรบนถนนสายรอง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อ สามารถสรุปและจำแนกหัวข้อที่มีความสำคัญได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร และการศึกษาเกี่ยวกับเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อ แหล่งอ้างอิง รูปแบบสัญญาณไฟจราจร พารามิเตอร์ที่ศึกษา เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ และตัวชี้วัดประสิทธิผล ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร

แหล่งอ้างอิง (ปี)	รูปแบบสัญญาณไฟจราจร	พารามิเตอร์ที่ศึกษา	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	ตัวชี้วัดประสิทธิผล
Feng-Bor Lin และคณะ (1991)	- Semi-Actuated - Fully-Actuated (Isolate)	- ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน - ปริมาณจราจรบนถนนรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน - เปอร์เซ็นต่ออัตราการไหลอิมตัว - จำนวนเฟสสัญญาณไฟจราจร	N/A	- ความล่าช้าเฉลี่ย
Bradley W. (1993)	- Fixed-time - Semi-Actuated - Fully-Actuated (Isolate)	- ผลกระทบจากสัญญาณไฟคนเดินข้าม	TRAF-NETSIM	- ความล่าช้าเฉลี่ย
ทวี วิชัยเมธาวิ (2545)	- Fixed-time - Vehicle Actuated (Special Design) - Vehicle Actuated (Coordinate)	- ปรับสัญญาณไฟจราจรให้สอดคล้องกับข้อมูลการจราจรแบบทันที	แบบจำลองจราจร PARAMICS และโปรแกรม API	- จำนวนรถที่ตกค้างที่ในโครงข่าย - จำนวนรถที่ออกจากโครงข่าย - ความเร็วเฉลี่ย - ระยะทางที่รถวิ่งบนโครงข่าย
ปฎิภาณ แก้ววิเชียร (2549)	- None Traffic Control - Vehicle Actuated (Isolate)	- เปรียบเทียบความแตกต่างกันของความล่าช้าจากการหยุดเฉลี่ยแบบคู่ (Paired Observations)	N/A	- ความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย

ตารางที่ 2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจร (ต่อ)

แหล่งอ้างอิง (ปี)	รูปแบบสัญญาณไฟจราจร	พารามิเตอร์ที่ศึกษา	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	ตัวชี้วัดประสิทธิผล
พรทิศา งามะพันธ์ (2557)	- Fixed-time - Semi-Actuated - Fully-Actuated (Isolate)	- เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟ จราจร	AIMSUN	- ความล่าช้าเฉลี่ย - ความล่าช้าเนื่องจากการหยุด เฉลี่ย

ตารางที่ 2.3 การศึกษาเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

แหล่งอ้างอิง (ปี)	รูปแบบสัญญาณไฟจราจร	พารามิเตอร์ที่ศึกษา	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	ตัวชี้วัดประสิทธิผล
James C. และ Siamak A. (1996)	<ul style="list-style-type: none"> - Two-Way Stop - All-Way Stop - Fully-Actuated (Isolate) 	<ul style="list-style-type: none"> - ลักษณะทางกายภาพ 8 ตัวอย่าง - รูปแบบการแปรผันปริมาณจราจร 12 รูปแบบ - อุบัติเหตุ 	TRAF-NETSIM	<ul style="list-style-type: none"> - ความล่าช้าทั้งหมด - ความล่าช้าเนื่องจากการหยุด
A. Skabardonis และคณะ (1998)	<ul style="list-style-type: none"> - Fixed-time - Semi-Actuated - Fully-Actuated (Coordinate) 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราส่วนของปริมาณจราจรต่อปริมาณการไหลอ้อมตัวบนถนนสายรอง (V/c) - อัตราส่วนของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักต่อปริมาณจราจรบนถนนสายรอง (R) - เปอร์เซ็นต์รถเขียวบนถนนสายหลัก - จำนวนเฟสสัญญาณไฟจราจร 	NETSIM	<ul style="list-style-type: none"> - ความล่าช้าเฉลี่ย
Paul J. Carlson (1998)	<ul style="list-style-type: none"> - Fixed-time (Isolate) 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลกระทบของรถขนาดใหญ่ 0 %, 20% 	N/A	<ul style="list-style-type: none"> - ความล่าช้าเฉลี่ย
Sampson, J.D. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> - Two-Way Stop - Vehicle Actuated (Isolate) 	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน - ปริมาณจราจรบนถนนรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน - ความยาวแถวคอยสูงสุด 	SIMTRA	<ul style="list-style-type: none"> - ความล่าช้าเฉลี่ย

ตารางที่ 2.3 การศึกษาเกณฑ์การติดตั้งสัญญาณไฟจราจร (ต่อ)

แหล่งอ้างอิง (ปี)	รูปแบบสัญญาณไฟจราจร	พารามิเตอร์ที่ศึกษา	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	ตัวชี้วัดประสิทธิผล
Dražen (2004)	<ul style="list-style-type: none"> - None Traffic Control - Fixed-time - Semi-Actuated - Fully-Actuated (Isolate)	<ul style="list-style-type: none"> - ลักษณะทางกายภาพ 3 แยก, 4 แยก - เพอร์เซ็นต์รถเลี้ยวซ้าย ตรง เลี้ยวขวา 	Synchro Software	- ความล่าช้าเฉลี่ย
Xuesong และคณะ (2010)	<ul style="list-style-type: none"> - Fixed-time (Isolate)	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วน - ปริมาณจราจรบนถนนรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน - รูปแบบจำนวนเลน - สัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณรถเลี้ยวซ้าย ตรง เลี้ยวขวา - เพอร์เซ็นต์รถขนาดใหญ่ 5 %, 10%, 20% 	CORSIM	- ความล่าช้าเฉลี่ย

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้ได้แก่ ปริมาณจรรยาบรรณบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน ปริมาณจรรยาบรรณบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน สัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณรถเลี้ยว เพอร์เซ็นต์รถขนาดใหญ่ และลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษารูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน ผู้วิจัยจึงเลือกพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณจราจรเพียงอย่างเดียวซึ่งจะสรุปอยู่ในบทที่ 3



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินการศึกษาประกอบด้วย ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา การจำลองจราจรและวิเคราะห์ผลของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ การสร้างแบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรโดยใช้วิธีทางสถิติแบบ Logistic Regression และการสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินการแสดงดังนี้

1. ทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาประสิทธิภาพและเกณฑ์การติดตั้งของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร โปรแกรมจำลองจราจร และทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก
2. ดำเนินการรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทางแยก และการออกแบบข้อมูลเพื่อใช้ทดสอบแบบจำลองจราจร โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการนำเสนอของผู้วิจัย ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน
3. จำลองรูปแบบสัญญาณไฟจราจร 3 รูปแบบได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Traffic Signal) สัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Traffic Signal) และสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Traffic Signal) บนทางแยกตัวอย่างทั้งหมด 375 กรณีด้วยแบบจำลองจราจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun
4. วิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองจราจรโดยพิจารณาในแต่ละขาที่เข้าสู่ทางแยก
5. นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองจราจรในแต่ละกรณีมาใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีทางสถิติแบบ Logistic Regression
6. สร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก
7. สรุปผลการศึกษาและจัดทำข้อเสนอแนะ

3.2 ข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 ข้อมูลตัวอย่างทางแยก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (2557) ได้มีโครงการศึกษาแนวทางการปรับปรุงระบบสัญญาณไฟจราจรบนเส้นทางคมนาคมสายหลักเพื่อลดการใช้พลังงานในภาคขนส่ง ซึ่งผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากทางโครงการให้ใช้ข้อมูลตัวอย่างทางแยกที่ได้มีการสร้างแบบจำลองจราจรและเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองแล้วได้แก่ แยกสี่ตา ตั้งอยู่ในตำบลสามเมือง อำเภอสีดา

จังหวัดนครราชสีมา ลักษณะทางกายภาพเป็น 4 แยกเดี่ยวตัดกันระหว่างถนนหลวงหมายเลข 2 (ถนนมิตรภาพ) กับถนนเส้น 202 (ถนนนิเวศรัตน์) ถนนสายหลักมีจำนวน 4 ช่องจราจร ถนนสายรองมีจำนวน 2 ช่องจราจร แสดงรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 แสดงภาพสี่แยกสี่ตาทั้งโครงข่ายจากโปรแกรมจำลองจราจร Aimsun



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดการช่องจราจรสี่แยกสี่ตาจากโปรแกรมจำลองจราจร Aimsun

3.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาจะประกอบด้วย พารามิเตอร์จากการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพารามิเตอร์จากการนำเสนอซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1) พารามิเตอร์จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาประสิทธิภาพของรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวกับการแปรผันของปริมาณจราจรเพียงอย่างเดียว ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรหลายตัวที่ใช้ในการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาเช่น ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมทั้งสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน อัตราส่วนของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักต่อปริมาณจราจรบนถนนสายรอง สัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณรถเฉลี่ย และเปอร์เซ็นต์รถขนาดใหญ่ เป็นต้น (แสดงดังตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภทข้อมูล	ข้อมูลที่ใช้	หน่วยที่ใช้	แหล่งอ้างอิง
ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมทั้งสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน	400-1600	คันต่อชั่วโมง	Feng-Bor Lin และคณะ (1991) Sampson, J.D. (1999) Xuesong และคณะ (2010)
ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน	50-500	คันต่อชั่วโมง	Feng-Bor Lin และคณะ (1991) Sampson, J.D. (1999) Xuesong และคณะ (2010)
สัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณรถเฉลี่ย	10-40	เปอร์เซ็นต์	Dražen (2004) Xuesong และคณะ (2010)
เปอร์เซ็นต์ปริมาณรถขนาดใหญ่	0-20	เปอร์เซ็นต์	Paul J. Carlson (1998) Xuesong และคณะ (2010)
อัตราส่วนของปริมาณจราจรบนถนนสายหลักต่อปริมาณจราจรบนถนนสายรอง	> 1.3 < 1.3	-	A. Skabardonis (1998)

โดยผู้วิจัยได้เลือกพารามิเตอร์ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งมาจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 2 ตัวแปรได้แก่

- 1.) ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมทั้งสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน หมายถึงปริมาณจราจรที่เข้าสู่ทางแยกบนถนนสายหลักรวมทั้งสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน มีหน่วยเป็นคันต่อชั่วโมง กำหนดค่าที่ใช้ 5 กรณี ได้แก่ 400, 800, 1200, 1600 และ 2000 คันต่อชั่วโมง
- 2.) ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน หมายถึงปริมาณจราจรที่เข้าสู่ทางแยกบนถนนสายรองเฉพาะขาที่มีปริมาณจราจรสูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน มีหน่วยเป็น คันต่อชั่วโมง กำหนดค่าที่ใช้ 5 กรณี ได้แก่ 50, 150, 250, 350 และ 450 คันต่อชั่วโมง

ซึ่งค่าที่กำหนดขึ้นมาของทั้ง 2 พารามิเตอร์จัดอยู่ในช่วงของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยของ Feng-Bor Lin และคณะ (1991), Sampson, J.D. (1999) และ Xuesong และคณะ (2010) รวมทั้งอยู่ในช่วงของข้อมูลตามปริมาณจราจรที่สำรวจได้จริงของแยกสี่ดา (ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมทั้งสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน 1576 คันต่อชั่วโมง, ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน 397 คันต่อชั่วโมง) เหตุผลในการเลือกสองพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ง่ายต่อการสำรวจข้อมูลเมื่อต้องการนำไปประยุกต์ใช้จริง และเป็นพารามิเตอร์ที่งานวิจัยต่าง ๆ นิยมเลือกใช้เพื่อเป็นตัวแทนสำหรับการแปรผันของปริมาณจราจร ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีในข้อมูลตัวอย่างทางแยกเช่น สัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณรถเล็ก เพอร์เซ็นต์ปริมาณรถขนาดใหญ่ จะถูกกำหนดให้ใช้เป็นค่าคงที่ตามสัดส่วนปริมาณจราจรที่สำรวจได้จริงซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.3

3.2.2.2) พารามิเตอร์จากการนำเสนอ

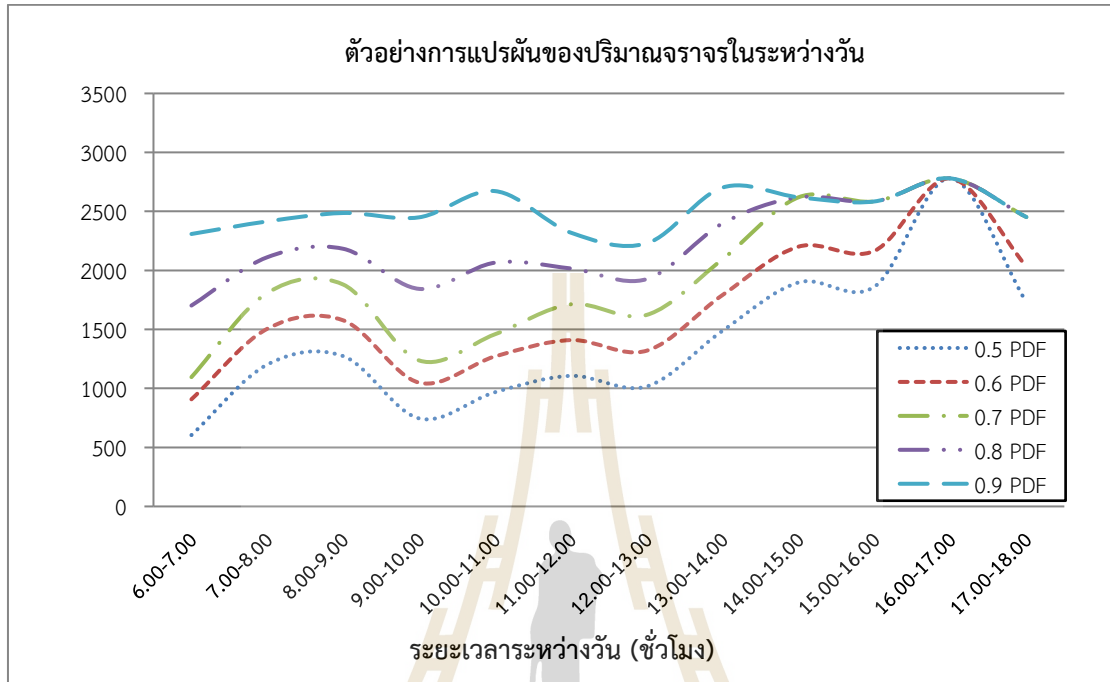
ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้มีการนำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายลักษณะการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันได้แก่ค่า Peak Day Factor ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณสัดส่วนระหว่างปริมาณจราจรรวมในระหว่างวันที่พิจารณาเทียบกับปริมาณจราจรรวมสูงสุดที่เป็นไปได้ในระหว่างวัน (แสดงดังสมการที่ 3.1) โดยค่า Peak Day Factor สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีปริมาณจราจรในระหว่างวันคงที่ทุกช่วงเวลา ซึ่งมีหลักการคล้ายกับค่า Peak Hour Factor ที่อธิบายถึงสัดส่วนระหว่างปริมาณจราจรรวมในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงเทียบกับปริมาณจราจรสูงสุดที่เป็นไปได้ใน 1 ชั่วโมง (ตัวอย่างการคำนวณปริมาณจราจรที่ใช้ในแบบจำลองอยู่ในภาคผนวก ก)

$$PDF = \frac{\text{Daily Volume}}{\text{Max. Hour Volume} \times N} \quad (3.1)$$

โดยที่ *Daily Volume* คือ ปริมาณจราจรรวมระหว่างวันที่พิจารณา (คัน / วัน)
Max. Hour Volume คือ ปริมาณจราจรของชั่วโมงที่สูงสุดระหว่างวัน (คัน / ชั่วโมง)
N คือ จำนวนช่วงเวลาย่อยในระหว่างวัน (ชั่วโมง)

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาช่วงเวลาในระหว่างวันทั้งหมด 12 ชั่วโมงติดต่อกัน ตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. และกำหนดรูปแบบการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันมีปริมาณ

จราจรช่วงชั่วโมงเร่งด่วน (Peak Hour Volume) อยู่ที่เวลา 16.00-17.00 น. โดยจะพิจารณาค่า Peak Day Factor ทั้งหมด 5 กรณีได้แก่ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรที่แปรผันในระหว่างวันได้อย่างชัดเจน ดังตัวอย่างการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน 5 กรณีในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟตัวอย่างการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน 5 กรณี

3.3 การจำลองจราจรและวิเคราะห์ผล

ในการจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun ข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ใช้จะมาจากข้อมูลตัวอย่างทางแยกและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตามหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ซึ่งในข้อมูลตัวอย่างทางแยกผู้วิจัยได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ให้ใช้เป็นค่าคงที่และเป็นไปตามลักษณะของสภาพจราจรที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพื่อต้องการทดสอบเฉพาะพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรที่ได้กำหนดไว้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) จังหวะสัญญาณไฟจราจร จังหวะสัญญาณไฟจราจรที่ใช้ในแบบจำลองจราจรเป็นจังหวะสัญญาณไฟที่ใช้จัดการจราจรของแยกสี่ตา แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จังหวะสัญญาณไฟจราจรของทางแยก (แยกสี่ตา)

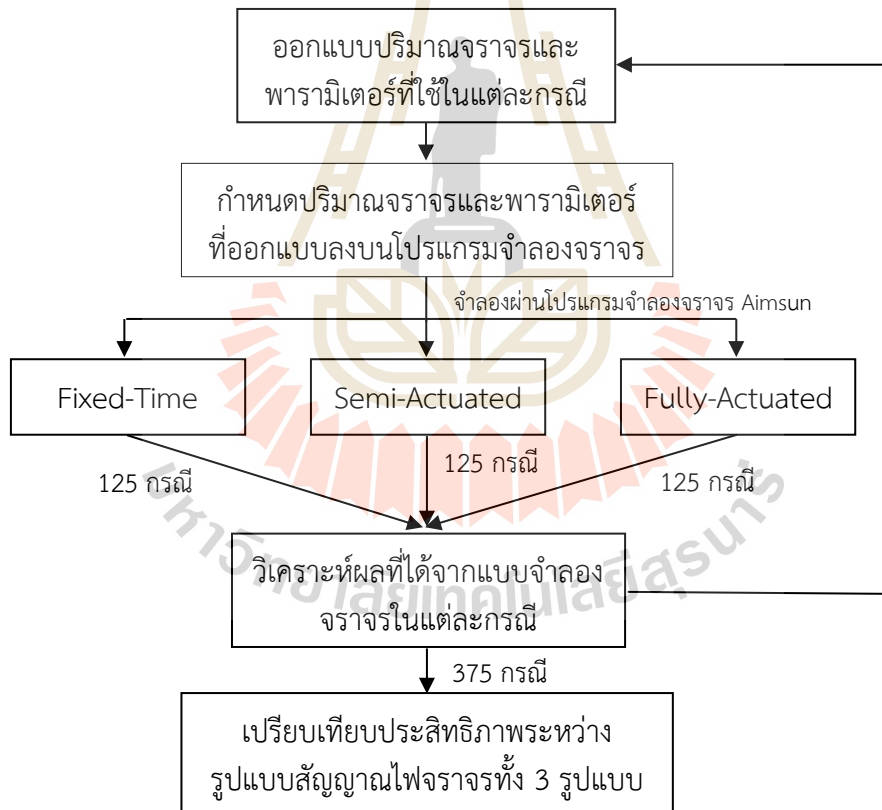
	A1 ขอนแก่น-โคราช	A2 สี่ตา	B1 ประทาย	B2 ขอนแก่น-โคราช
ทิศทาง (มุ่งหน้า)				

2.) *สัดส่วนปริมาณจราจรรวม* ข้อมูลสัดส่วนปริมาณจราจรของแยกสี่ตาที่ใช้ในการจำลอง เป็นปริมาณจราจรรวมในระหว่างวันทั้งหมด 12 ชั่วโมงติดต่อกัน ตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. โดยแบ่ง การวิเคราะห์ออกเป็นทุก ๆ 1 ชั่วโมง

3.) *สัดส่วนปริมาณรถเฉลี่ย* ในแบบจำลองจราจรได้มีการกำหนดปริมาณรถเฉลี่ยตามสัดส่วน ที่สำรวจได้จริงของแยกสี่ตา โดยแบ่งสัดส่วนปริมาณรถเฉลี่ยออกเป็น รถวิ่งตรง 80 เปอร์เซ็นต์ รถเลี้ยว ซ้าย 10 เปอร์เซ็นต์ และรถเลี้ยวขวา 10 เปอร์เซ็นต์

4.) *สัดส่วนของรถแต่ละประเภท* ในแบบจำลองจราจรได้มีการกำหนดปริมาณของรถแต่ละ ประเภทตามสัดส่วนที่สำรวจได้จริงของแยกสี่ตา โดยแบ่งสัดส่วนของรถออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล 70 เปอร์เซ็นต์, รถกระบะ 10 เปอร์เซ็นต์ และรถบรรทุก 20 เปอร์เซ็นต์

หลังจากได้ข้อมูลตัวอย่างทางแยกและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วจึงทำการออกแบบ ปริมาณจราจรและพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีที่จะใช้จำลองรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun และทำการวิเคราะห์ผลเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่างรูปแบบสัญญาณไฟจราจรทั้ง 3 รูปแบบ โดยอธิบายขั้นตอนการดำเนินการผ่าน Flow Chart แสดงดังรูปที่ 3.5 (ตัวอย่างการออกแบบปริมาณจราจรอยู่ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการดำเนินการจำลองจราจรและวิเคราะห์ผล

3.3.1 การจำลองจราจร

การศึกษานี้ได้ทำการจำลองรูปแบบสัญญาณไฟจราจรทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ สัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed Time Signal), สัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuate Signal) และสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Signal) จำลองผ่านแบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun ทั้งหมด 375 กรณี แบ่งออกเป็นรูปแบบการควบคุมสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ 125 กรณี สัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร 125 กรณี และสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ 125 กรณี ซึ่งในแต่ละกรณีจะมาจากการแปรผันค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตามหัวข้อ 3.2.2 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนกรณีที่ใช้ในแบบจำลองจราจร

รูปแบบสัญญาณไฟจราจร	จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา			จำนวนกรณีในแบบจำลอง
	ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักในช่วงโมงเร่งด่วน	ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน	Peak Day Factor	
Fixed-Time	5 ค่าได้แก่	5 ค่าได้แก่ 50,150,	5 ค่าได้แก่	125
Semi-Actuated	400,800, 1200,1600 และ 2000 คันต่อชั่วโมง	250,350 และ 450 คันต่อชั่วโมง	0.5,0.6,0.7,0.8 และ 0.9	125
Fully-Actuated				125

3.3.2 การวิเคราะห์ผล

ตัวชี้วัดประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun มีทั้งหมด 3 ประเภทได้แก่ อัตราการไหล (flow) หน่วยเป็น คัน/ชั่วโมง ความล่าช้าเนื่องจากการหยุด (sttime) หน่วยเป็น วินาที/กิโลเมตร และค่าความล่าช้าเฉลี่ย (dtime) หน่วยเป็น วินาที/กิโลเมตร แต่เนื่องจากค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองมาจากการคำนวณความแตกต่างระหว่าง Expected Travel Time เทียบกับ Travel Time จริงที่เกิดขึ้น ทำให้ผลที่ได้ไม่สะท้อนถึงความล่าช้าที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงไม่นำค่าความล่าช้าเฉลี่ยมาใช้พิจารณาเป็นตัวชี้วัดประสิทธิผล

ส่วนผลที่ได้จากแบบจำลองจราจรมีการแบ่งข้อมูลตัวชี้วัดประสิทธิผลออกเป็นข้อมูลในแต่ละขาและแยกข้อมูลตามประเภทรถที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งมีจำนวนมากและยากต่อการนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ ผลของความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนทั้งโครงข่าย (Sum) ผลของความล่าช้าเนื่องจากการหยุดบนถนนสายหลัก (Major) และผลของความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายรอง (Minor) ซึ่งได้มีการคำนวณความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย (คัน/วินาที) ขึ้นมาใหม่เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิผลสำหรับวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรรูปแบบต่าง ๆ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.6 (วิธีการคำนวณค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยอยู่ในภาคผนวก ก)

		fix-time		semi		full	
ขา	ประเภทรถ	flow	stime	flow	stime	flow	stime
นครราชสีมา	ทั้งหมด	222.90	53.90	851.80	22.30	852.00	23.29
	car	162.20	52.75	575.40	22.06	574.30	23.04
	truck	35.70	59.48	184.50	23.05	186.00	24.16
	pick up	25.10	53.45	92.20	22.27	91.80	23.06
บัวใหญ่	ทั้งหมด	222.90	53.90	223.40	58.31	224.00	38.75
	car	162.20	52.75	161.70	57.41	162.50	38.45
	truck	35.70	59.48	36.90	62.91	36.20	40.81
	pick up	25.10	53.45	25.00	57.35	25.20	37.82
ประทาย	ทั้งหมด	277.30	45.30	276.60	51.38	277.10	36.39
	car	188.00	44.86	187.80	51.17	187.80	35.61
	truck	63.40	46.65	63.00	52.31	64.80	38.65
	pick up	25.90	45.23	25.80	50.57	24.90	36.37
ขอนแก่น	ทั้งหมด	824.90	23.36	827.80	23.12	825.50	23.85
	car	570.20	23.50	570.90	23.28	569.80	23.74
	truck	170.60	22.29	171.00	21.75	170.70	24.07
	pick up	84.40	24.58	85.60	24.79	85.10	24.20
Major		22.91		22.70		23.57	
Minor		49.14		54.48		37.45	
Sum		28.94		29.99		26.76	

รูปที่ 3.6 แสดงตารางตัวอย่างตัวชี้วัดประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองจราจร

3.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression)

การสร้างแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกจะมาจากการนำตัวชี้วัดประสิทธิผล (ความล่าช้า เนื่องจากการหยุดเฉลี่ย) มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพระหว่างรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อพิจารณารูปแบบสัญญาณไฟที่มีค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยน้อยที่สุดของแต่ละกรณีมาเป็นตัวแทนที่ในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟกรณีนั้น ๆ ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรตาม (Y) ในสมการการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก และนำชุดข้อมูล (พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา) ที่ทำให้ค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยน้อยที่สุดในกรณีดังกล่าวนั้นมาเป็นตัวแปรอิสระ (X) โดยจะอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดในบทถัดไป

3.4.1 การกำหนดนิยามและรวบรวมตัวแปร

ตัวแปรตาม (Y) หมายถึง ค่าตัวแปรหุ่น (Dummy Variable) ของกลุ่มตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ การเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ และการเลือกรูปแบบติดตั้งสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร ซึ่งได้มาจากการประเมินประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรในแต่ละกรณี โดยการเลือกจะมาจากแบบที่มีค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยน้อยที่สุดสามารถกำหนดค่าตัวแปรตามได้ดังนี้

$Y = 0$ หมายถึง การเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่

$Y = 1$ หมายถึง การเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร

ตัวแปรอิสระ (X) หมายถึง ค่าตัวแปรเชิงปริมาณที่ได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ และทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน และค่า Peak Day Factor ซึ่งจะเป็นชุดข้อมูลที่ทำให้ค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเคลื่อนที่น้อยที่สุดในแต่ละกรณี โดยสามารถกำหนดค่าของตัวแปรอิสระได้ดังนี้

MAJOR	หมายถึง	ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน
MINOR	หมายถึง	ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน
PDF	หมายถึง	Peak Day Factor

3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจะบอกถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบสัญญาณไฟจราจรระหว่างรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่และรูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร โดยแบบจำลอง Binary Logistic Regression จะมีลักษณะดังนี้

$$P(Y = 1) = \frac{e^u}{1 + e^u} \quad (3.4)$$

โดยที่ $u = \beta_0 + \beta_1 MAJOR + \beta_2 MINOR + \beta_3 PDF \quad (3.5)$

เมื่อ	β_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์
	MAJOR	คือ	ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน
	MINOR	คือ	ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน
	PDF	คือ	Peak Day Factor

3.5 การสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

หลังจากสร้างแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกและได้สมการทำนายสำหรับการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ แล้ว จึงนำสมการทำนายที่ได้มาสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร โดยใช้วิธีการแทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการทำนาย เพื่อหาความน่าจะเป็นที่โอกาสในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีค่าความน่าจะเป็น (Probability) เท่ากับ 0.5 นำมาใช้เป็นตัวชี้วัดแบ่งระหว่างการตัดสินใจที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ โดยจะอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดในบทถัดไป

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลของการวิจัยจะแสดงในลักษณะการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรแต่ละรูปแบบที่แปรผันไปตามปริมาณจราจรในระหว่างวัน โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณไฟจราจรทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ สัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร และสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ การวิเคราะห์แบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรโดยใช้วิธีทางสถิติแบบ Binary Logistic Model และการสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจร

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์แบบจำลองจราจรทั้งหมด 375 กรณี จากตัวแปรปริมาณจราจรรวมสองทิศทางสูงสุดบนถนนสายหลัก 5 กรณี ปริมาณจราจรทิศทางที่มากที่สุดบนถนนสายรอง 5 กรณี ค่า Peak Day Factor 5 กรณี จำลองผ่านรูปแบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยใช้ค่าเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย (วินาทีต่อคัน) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิผล (ข้อมูลผลลัพธ์ทั้งหมดจากแบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun อยู่ในภาคผนวก ข) แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 5 ประเภทได้แก่

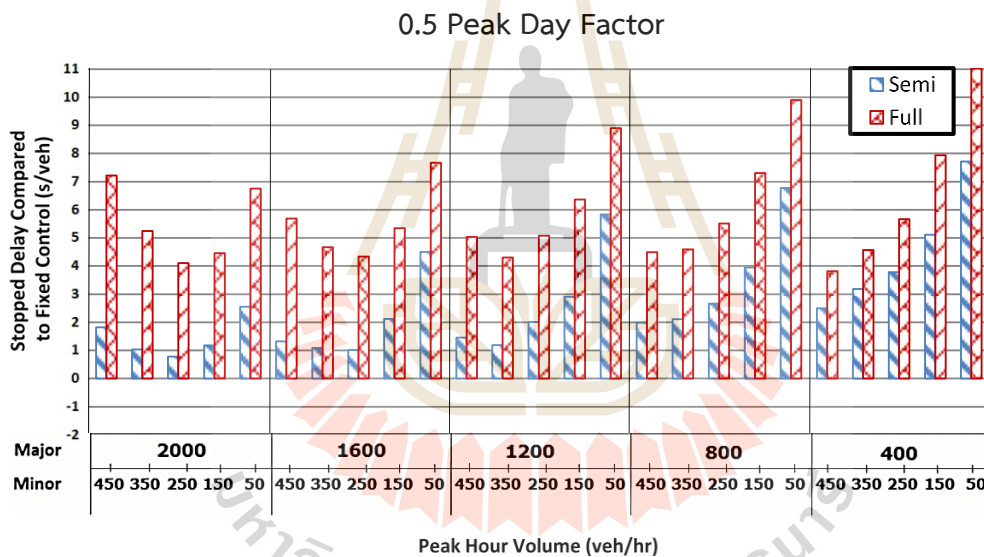
- 4.1.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก
- 4.1.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายหลัก
- 4.1.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายรอง
- 4.1.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรจากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน
- 4.1.5 การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนค่า Passage Time จาก 4 วินาที เป็น 3 วินาที ต่อประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก

4.1.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกกรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor ที่ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยกำหนดให้แกน X แสดงพารามิเตอร์ระหว่างปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนมีค่าระหว่าง 400 ถึง 2000 คันต่อชั่วโมงกับปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วนมีค่าระหว่าง 50 ถึง 450 และกำหนดให้แกน Y แสดงค่าความแตกต่างของความล่าช้าเนื่องจากการหยุดของรูปแบบสัญญาณไฟ Semi-Actuated และ Fully-Actuated เปรียบเทียบกับรูปแบบสัญญาณไฟ Fixed-Time ซึ่งพิจารณาจาก $Delay_{fixed} - Delay_{semi}$ และ $Delay_{fixed} - Delay_{full}$ ซึ่งค่าบวก

(+) แสดงถึงความล่าช้าของสัญญาณไฟแบบ Semi หรือ Full มีความล่าช้าเฉลี่ยน้อยกว่าสัญญาณไฟแบบ Fixed หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Fixed นั่นเอง ส่วนในกรณีที่ค่าในแกน Y เป็นลบ (-) หมายถึงสัญญาณไฟแบบ Fixed จะมีประสิทธิภาพดีกว่า และหากสัญญาณไฟจราจรแบบใดมีแท่งกราฟน้อยกว่า หรือติดลบเยอะกว่ารูปแบบอื่นก็จะหมายความว่าสัญญาณไฟรูปแบบนั้นมีประสิทธิภาพแย่มากที่สุด

จากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบมีแท่งกราฟเป็นบวกและสูงกว่ารูปแบบกึ่งตามปริมาณจราจรในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาพการแปรผันจราจรที่แปรผันสูงสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบจะมีประสิทธิภาพดีกว่ารูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบอื่น ๆ ในทุกกรณี สาเหตุเนื่องจากเมื่อปริมาณจราจรที่มีการแปรผันสูงมาก (ค่า PDF มีค่าน้อย) ทำให้มีความจำเป็นต้องมีการจัดการรูปแบบสัญญาณไฟอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณจราจรที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้กรณีปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรรมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนและปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน จะมีการเปลี่ยนแปลง รูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบก็ยังคงมีประสิทธิภาพดีที่สุดในทุกกรณี

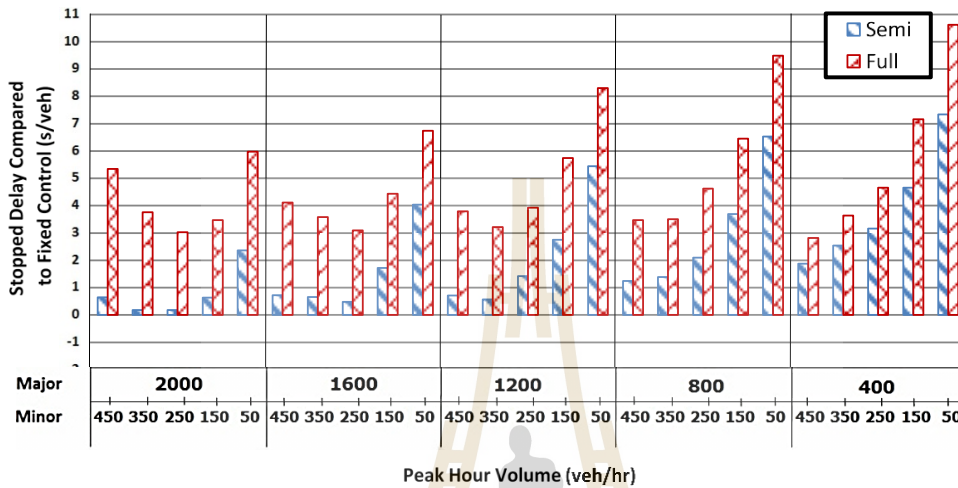


รูปที่ 4.1 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5

และเมื่อพิจารณาสภาพการแปรผันจราจรอื่น ๆ ซึ่งจะมีความแปรผันน้อยลง (ค่า PDF เพิ่มขึ้นจาก 0.6 ไปจนถึง 0.9) ดังแสดงในรูป 4.2-4.5 ตามลำดับ พบว่าความสูงของแท่งกราฟ Full และ Semi จะน้อยลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งในบางกรณีแท่งความสูงจะกลับทิศกลายเป็นติดลบ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ที่จะเริ่มดีขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรรมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนและปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วนเริ่มมีค่าสูงขึ้น สาเหตุเนื่องจากเมื่อปริมาณจราจรเริ่มมีความสม่ำเสมอและมีจำนวนเพิ่มขึ้น จะยิ่งทำให้มีความสอดคล้องกับรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวได้มีการคำนวณระยะเวลาสัญญาณไฟมาจากการนำปริมาณจราจรในช่วงโมงสูงสุดมาออกแบบ (สมการของ Webster) แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาทั้งโครงข่าย(ทุกขาของทางแยก) รูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ ก็ยังคงมีประสิทธิภาพดีที่สุดในทุกกรณี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bradley W. (1993) และ พรชิตา ถามะพันธ์ (2557) ที่เมื่อพิจารณาความล่าช้าโดยรวมของทั้งโครงข่ายทางแยกจะพบว่ารูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบจะมีประสิทธิภาพในการจัดการทางแยกได้ดีกว่าสัญญาณไฟรูปแบบอื่น ๆ

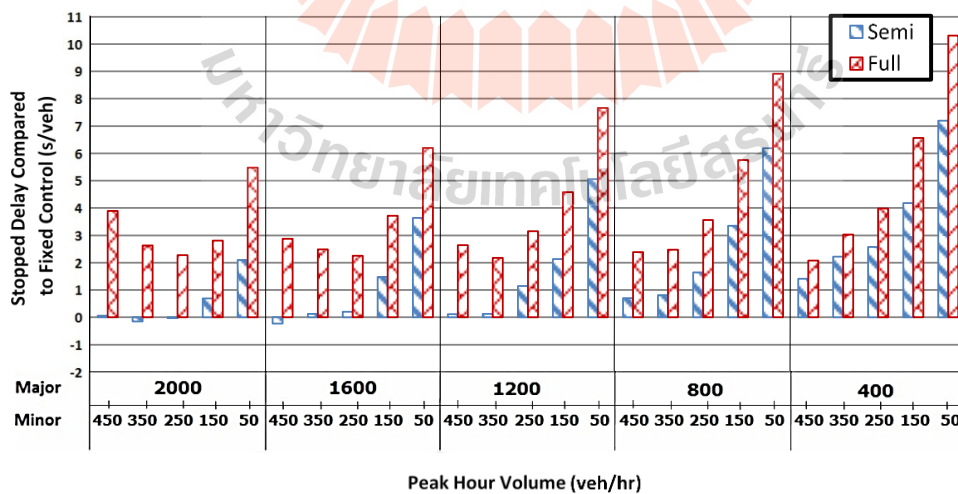
0.6 Peak Day Factor



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.6

ความสูงของแท่งกราฟจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5 อย่างไรก็ตามจะพบว่าแท่งกราฟยังมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าสัญญาณไฟแบบ Semi และ Full ยังมีประสิทธิภาพดีที่กว่าแบบ Fixed

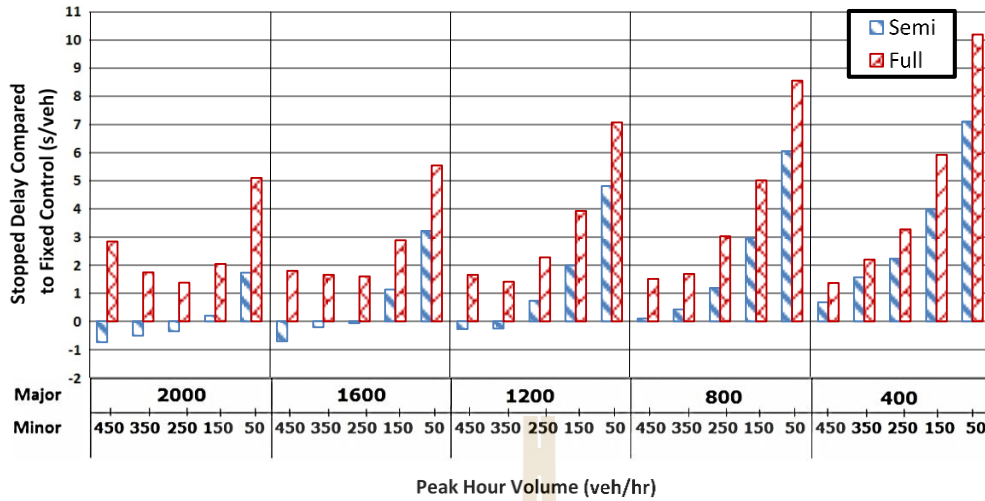
0.7 Peak Day Factor



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.7

ความสูงของแท่งกราฟ Semi บางกรณีเริ่มมีค่าติดลบแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาพจราจรที่เริ่มคงที่และมีปริมาณจราจรหนาแน่น สัญญาณไฟแบบ Fixed จะเริ่มมีประสิทธิภาพดีที่กว่าแบบ Semi

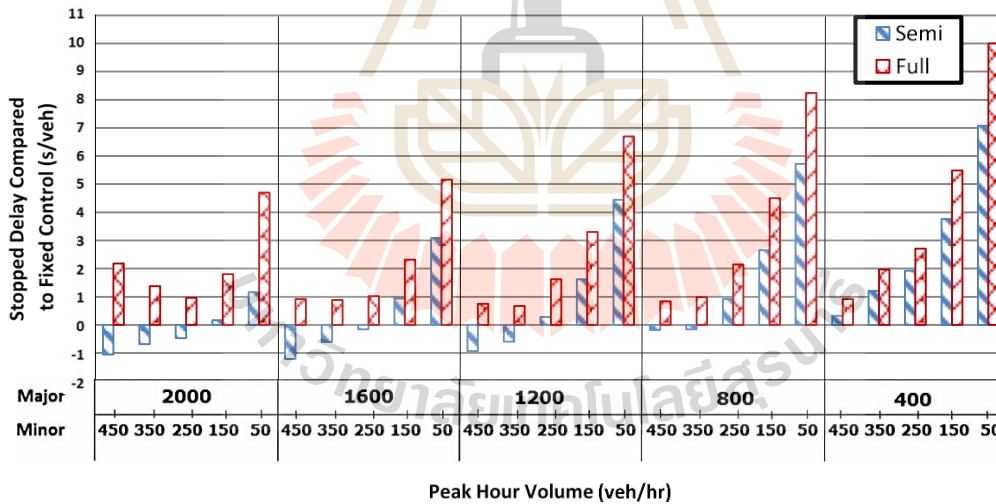
0.8 Peak Day Factor



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8

ความสูงของแท่งกราฟ Full และ Semi จะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6, และ 0.7 และในบางกรณีแท่งกราฟ Semi จะมีค่าติดลบเยอะขึ้น โดยเฉพาะภายใต้สภาพจราจรที่หนาแน่น

0.9 Peak Day Factor

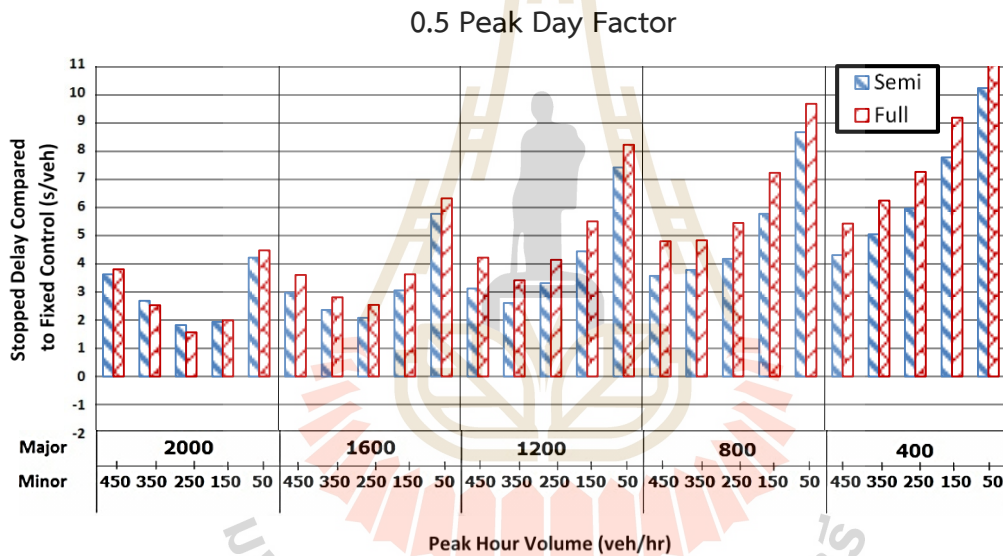


รูปที่ 4.5 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9

ความสูงของแท่งกราฟ Full และ Semi จะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 ในบางกรณีแท่งกราฟ Semi จะมีค่าติดลบมากขึ้น โดยเฉพาะภายใต้สภาพจราจรที่หนาแน่น

4.1.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายหลัก

รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายหลัก กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor ที่ 0.5 โดยแสดงผลของกราฟลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกทั้งโครงข่าย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบมีแท่งกราฟเป็นบวกและสูงกว่ารูปแบบกึ่งตามปริมาณจราจรเกือบทุกกรณีจะมีเฉพาะบางกรณีที่รูปแบบกึ่งตามปริมาณจราจรมีแท่งกราฟสูงกว่า (กรณีที่ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วนมีปริมาณสูงมาก ๆ ที่ 2000 คันต่อชั่วโมง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาพการแปรผันจราจรที่แปรผันสูง สัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบก็ยังคงเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่ารูปแบบสัญญาณไฟแบบอื่น ๆ เกือบทุกกรณี สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกทั้งโครงข่ายภายใต้สภาพการแปรผันจราจรที่แปรผันสูง

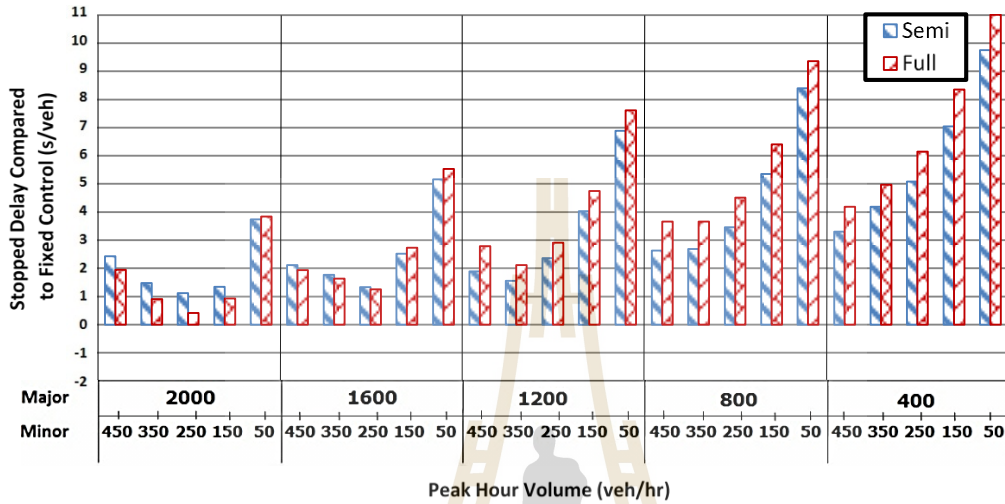


รูปที่ 4.6 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5

และเมื่อพิจารณาสภาพการแปรผันจราจรอื่น ๆ ซึ่งจะมีความแปรผันน้อยลง (ค่า PDF เพิ่มขึ้นจาก 0.6 ไปจนถึง 0.9) ดังแสดงในรูป 4.7-4.10 ตามลำดับ พบว่าความสูงของแท่งกราฟ Full และ Semi จะน้อยลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งแท่งความสูงกลับทิศกลายเป็นติดลบในบางกรณี แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรและแบบกำหนดเวลาคงที่จะเริ่มมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยเฉพาะกรณีภายใต้สภาพการแปรผันจราจรที่แปรผันสูง (ช่วง PDF ตั้งแต่ 0.7-0.9) และในช่วงที่มีปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วนสูง (ช่วง 1200-2000 คันต่อชั่วโมง) สาเหตุเนื่องจากรูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรเป็นรูปแบบที่มีคุณลักษณะที่ทำให้มีความสำคัญกับปริมาณจราจรบนถนนสายหลัก โดยกำหนดให้ถนนสายหลักได้รับไฟเขียวขั้นต่ำที่สามารถรองรับปริมาณจราจรในชั่วโมงสูงสุดได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายหลักมีปริมาณเพิ่มขึ้นและค่อนข้างสม่ำเสมอจะยิ่งทำให้ความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนน

สายหลักมีค่าลดลง ส่วนรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่เป็นรูปแบบที่สามารถจัดการกับสภาพจราจรที่มีปริมาณสูงและต่อเนื่องสม่ำเสมอได้ดี จากการนำปริมาณจราจรในช่วงโมงสูงสุดมาออกแบบ (สมการของ Webster) ทำให้รูปแบบสัญญาณไฟทั้ง 2 รูปแบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการจัดการกับสภาพจราจรที่มีปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนสูงและต่อเนื่องสม่ำเสมอ (กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายหลัก)

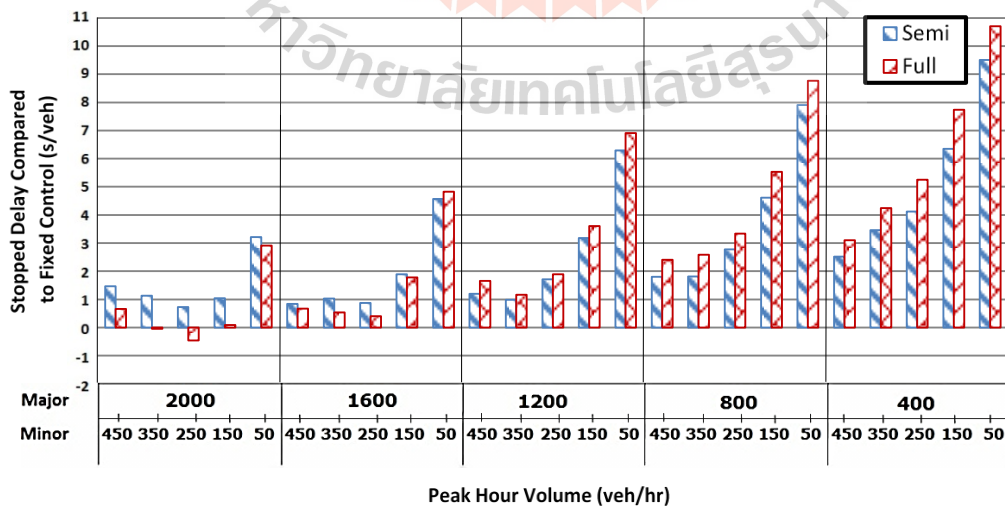
0.6 Peak Day Factor



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.6

ความสูงของแท่งกราฟจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5 อย่างไรก็ตามจะพบว่าแท่งกราฟยังมีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าสัญญาณไฟแบบ Semi และ Full ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Fixed และในกรณีที่ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนมีค่าสูง (1600-2000 คันต่อชั่วโมง) สัญญาณไฟแบบ Semi เริ่มมีประสิทธิภาพดีกว่าสัญญาณไฟรูปแบบอื่น

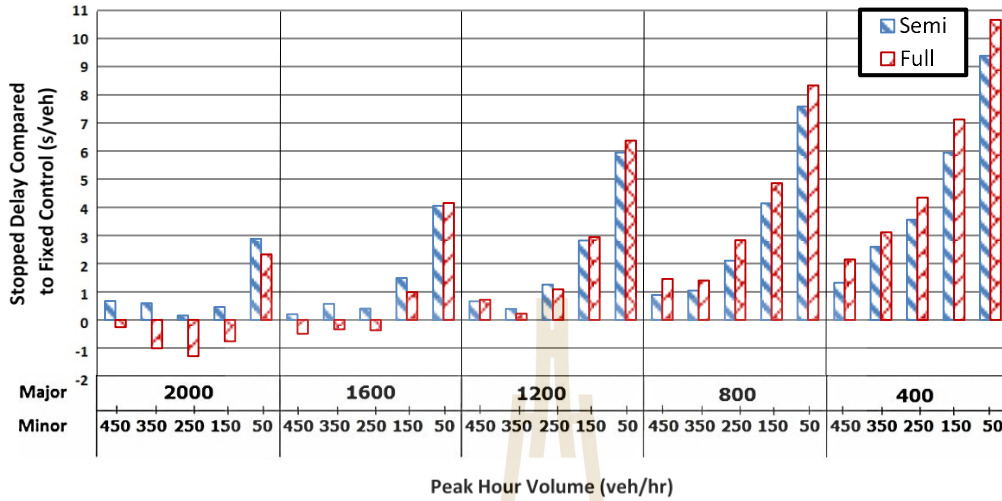
0.7 Peak Day Factor



รูปที่ 4.8 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.7

ความสูงของแท่งกราฟ Full บางกรณีเริ่มมีค่าติดลบแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาพจราจรที่เริ่มคงที่และมีปริมาณจราจรหนาแน่น สัญญาณไฟแบบ Fixed และ Semi จะเริ่มมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Full

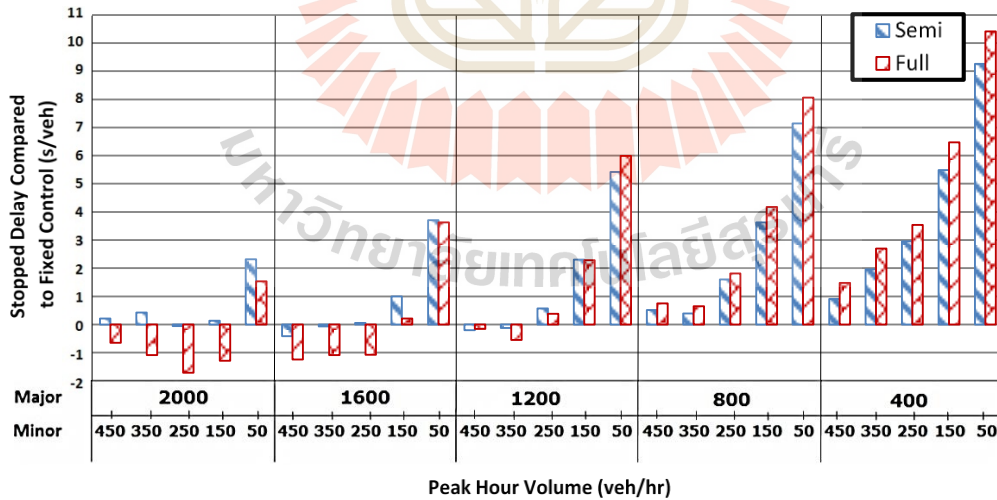
0.8 Peak Day Factor



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8

ความสูงของแท่งกราฟ Full และ Semi จะลดลงและแท่งกราฟ Full เริ่มติดลบมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6, และ 0.7 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่สภาพจราจรเริ่มมีความหนาแน่น สัญญาณไฟแบบ Semi จะเริ่มมีประสิทธิภาพดีกว่ารูปแบบสัญญาณไฟอื่น

0.9 Peak Day Factor



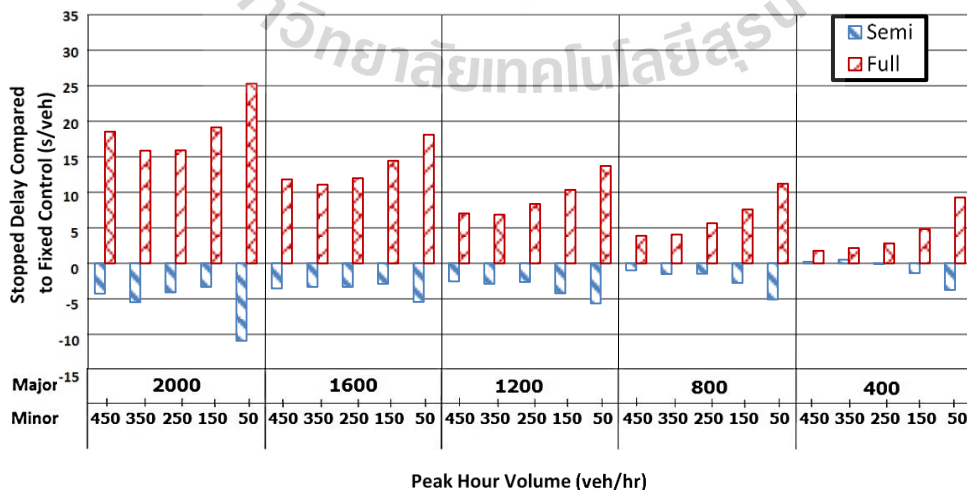
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายหลักที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9

ความสูงของแท่งกราฟ Full และ Semi จะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 ในบางกรณีภายใต้สภาพจราจรที่หนาแน่นกราฟ Semi จะเริ่มมีค่าติดลบและ Full จะมีค่าติดลบเยอะขึ้น แสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาพจราจรที่คงที่และมีปริมาณหนาแน่นรูปแบบ Fixed จะเริ่มมีประสิทธิภาพดีที่สุด

4.1.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายรอง

รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาเฉพาะขาที่อยู่บนถนนสายรองกรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor ที่ 0.5 โดยแสดงผลของกราฟลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกทั้งโครงข่าย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบมีประสิทธิภาพดีกว่าสัญญาณไฟรูปแบบอื่น ๆ ทุกกรณี สาเหตุเนื่องจากรูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบจะติดตั้งเครื่องตรวจจับยานพาหนะ (Detector) และมีระบบ Recall ทั้งบนถนนสายหลักและถนนสายรอง ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณไฟให้สอดคล้องกับปริมาณจราจรบนถนนสายรองได้ดีกว่าสัญญาณไฟรูปแบบอื่น ๆ ส่วนสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรเกือบทุกกรณีจะมีประสิทธิภาพต่อยกกว่าสัญญาณไฟแบบอื่น ๆ เนื่องจากรูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรให้ความสำคัญกับปริมาณจราจรบนถนนสายหลัก ทำให้ความล่าช้าบนถนนสายรองมีค่ามากกว่าสัญญาณไฟรูปแบบอื่น ๆ โดยเมื่อพิจารณาการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันที่เปลี่ยนแปลงโดยที่ค่า Peak Day Factor เพิ่มขึ้นจาก 0.6-0.9 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.15 จะเห็นได้ว่าส่งผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ เนื่องจากรูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร และแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบจะมีเครื่องตรวจจับยานพาหนะ (Detector) บนถนนสายรอง ซึ่งจะมีระบบ Recall เรียกสัญญาณไฟเขียวให้กลับไปยังถนนสายหลักเมื่อไม่มีรถบนถนนสายรองแล้ว ทำให้บนถนนสายรองเกิดความล่าช้าเนื่องจากการหยุดน้อยมากจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณจราจรอยู่ตลอดเวลา ส่วนรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ จะเกิดเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยเท่า ๆ กันไม่ว่าปริมาณจราจรจะมีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อย เนื่องจากรูปแบบดังกล่าวได้ถูกออกแบบระยะเวลาสัญญาณไฟจากการนำปริมาณจราจรสูงสุดในช่วงโมงเร่งด่วนมาใช้ในการคำนวณ (ในกรณีที่กำหนดปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนกับปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วนชุดเดียวกัน)

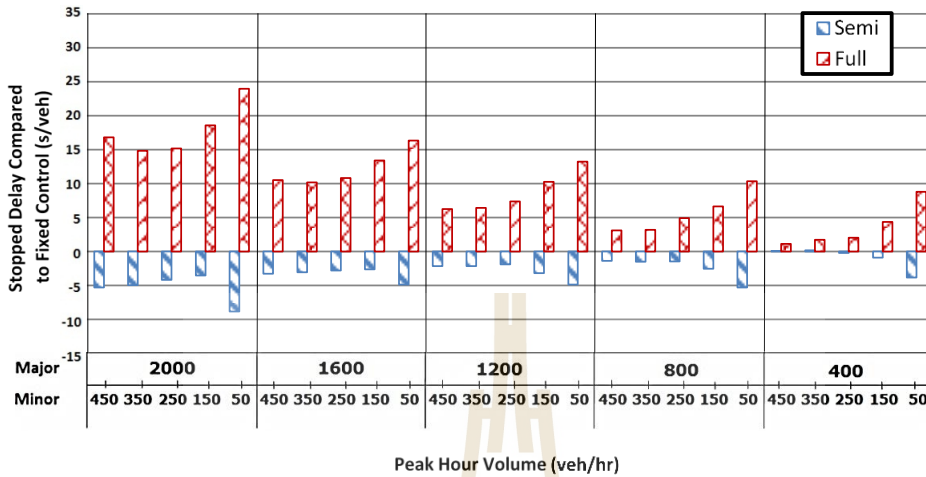
0.5 Peak Day Factor



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5

ความสูงของแท่งกราฟ Full จะมีค่าเป็นบวกมาก และแท่งกราฟ Semi จะมีค่าติดลบมากในสภาพจราจรที่มีปริมาณจราจรหนาแน่น แสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาพจราจรหนาแน่นรูปแบบ Full จะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และรูปแบบ Semi จะมีประสิทธิภาพแย่มากที่สุด

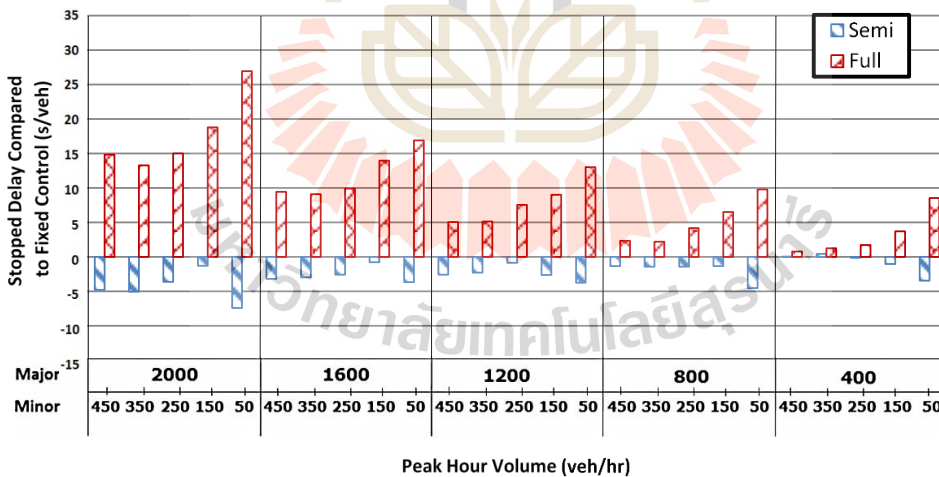
0.6 Peak Day Factor



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.6

ความสูงของแท่งกราฟ Full จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5 ส่วนแท่งกราฟ Semi เริ่มติดลบลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5

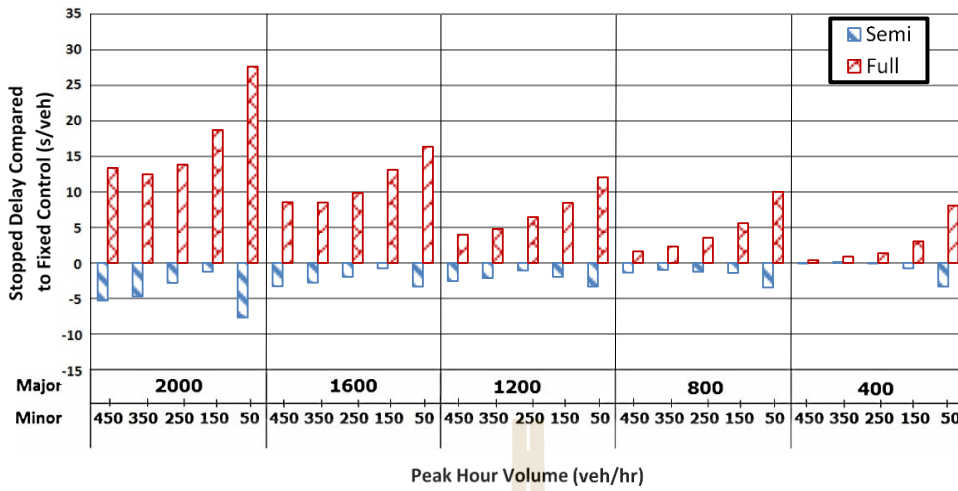
0.7 Peak Day Factor



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.7

ความสูงของแท่งกราฟ Full จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5 และ 0.6 (ยกเว้นกรณีที่มีปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนเท่ากับ 2000 คันต่อชั่วโมงและปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน 50 คันต่อชั่วโมง) แท่งกราฟ Full จะมีแนวโน้มสูงขึ้น สาเหตุเนื่องจากเมื่อปริมาณจราจรเริ่มคงที่และมีปริมาณจราจรบนถนนสายรองน้อยมาก ๆ จะยิ่งทำให้รูปแบบ Full สามารถจัดการกับปริมาณจราจรได้ดีกว่ารูปแบบอื่น เนื่องจากรูปแบบดังกล่าวจะติดตั้งเครื่องตรวจจับยานพาหนะ (Detector) ไว้ทั้งบนถนนสายหลักและถนนสายรอง ส่วนแท่งกราฟ Semi เริ่มติดลบลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5 และ 0.6

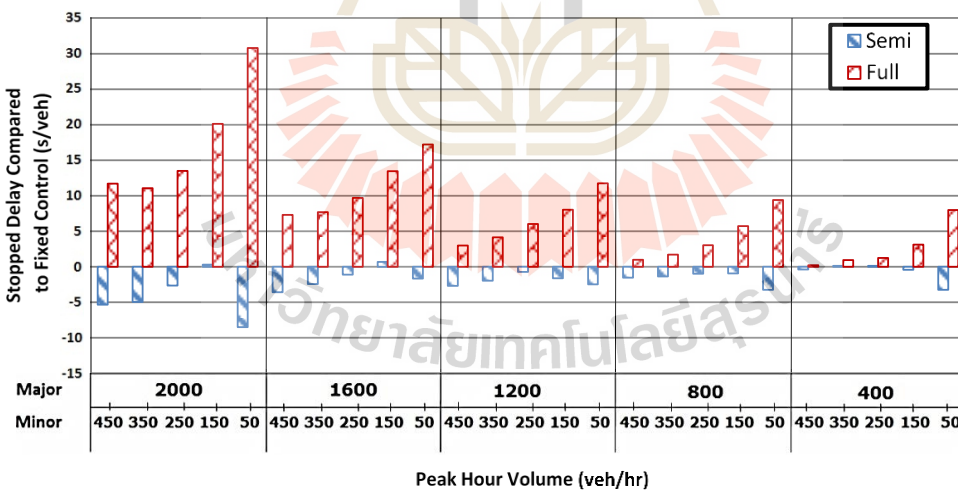
0.8 Peak Day Factor



รูปที่ 4.14 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8

ความสูงของแท่งกราฟ Full จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6 และ 0.7 (ยกเว้นกรณีที่ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรรมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วนเท่ากับ 2000 คันต่อชั่วโมงและปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน 50 คันต่อชั่วโมง) ส่วนแท่งกราฟ Semi เริ่มติดลบลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6 และ 0.7

0.9 Peak Day Factor



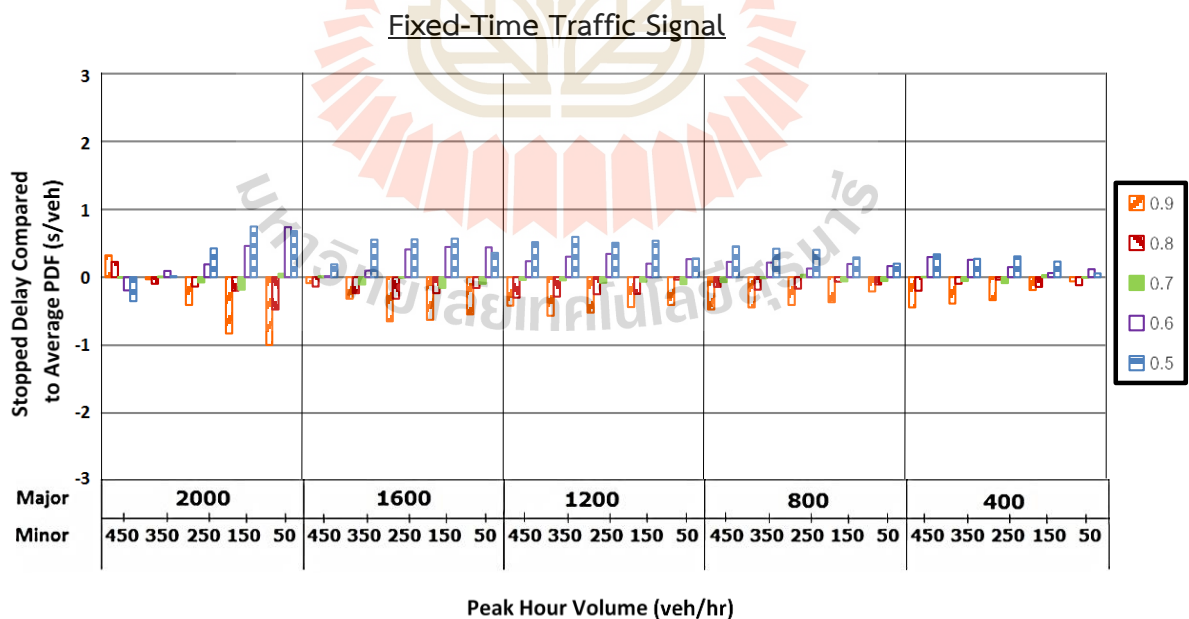
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยของถนนสายรองที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9

ความสูงของแท่งกราฟ Full จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 (ยกเว้นกรณีที่ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรรมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วนเท่ากับ 2000 คันต่อชั่วโมงและปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน 50 คันต่อชั่วโมง) ส่วนแท่งกราฟ Semi เริ่มติดลบลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี PDF = 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8

4.1.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรจากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรจากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน กำหนดให้แกน X แสดงพารามิเตอร์ระหว่างปริมาณจราจรบนถนนสายหลักกรรมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วนกับปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน และกำหนดให้แกน Y แสดงความล่าช้าเนื่องจากการหยุดโดยดูผลต่างระหว่างค่าเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยของแต่ละค่า Peak Day Factor เทียบกับค่าเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยรวมที่ได้จากทุกค่าของ Peak Day Factor ซึ่งพิจารณาจาก $Delay_{PDF} - Delay_{PDF(Avg)}$ โดยแสดงแยกกราฟของสัญญาณไฟแต่ละประเภทดังแสดงในรูปที่ 4.16-4.18 สำหรับกรณีสัญญาณไฟแบบ Fixed, Semi และ Full ตามลำดับ

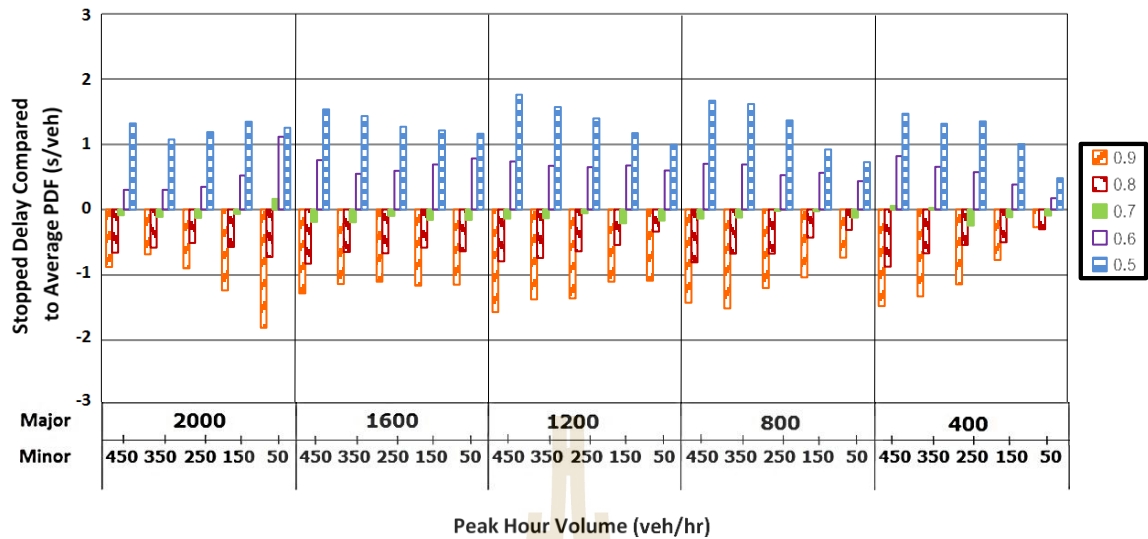
จากผลการวิเคราะห์พบว่า การแปรผันของปริมาณจราจรระหว่างวันมีผลกระทบต่อรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่น้อยที่สุด เนื่องจากมีค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดใกล้เคียงกันกับค่าเฉลี่ยมากไม่ว่าค่า PDF จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ส่วนรูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรมีค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดแตกต่างจากค่าเฉลี่ยสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณี Fixed จึงได้รับผลจากการแปรผันของปริมาณจราจรรองลงมา และรูปแบบสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปได้รับผลกระทบจากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันมากที่สุด จากค่าเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยที่มีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากขึ้นดัง ดังแสดงในรูปที่ 4.16-4.18 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรในระหว่างวันมากที่สุดเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่และแบบกึ่งตามปริมาณจราจร



รูปที่ 4.16 แสดงผลต่างระหว่างเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่

ความสูงของแท่งกราฟในแต่ละกรณีมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ารูปแบบ Fixed มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรในระหว่างวันเล็กน้อย

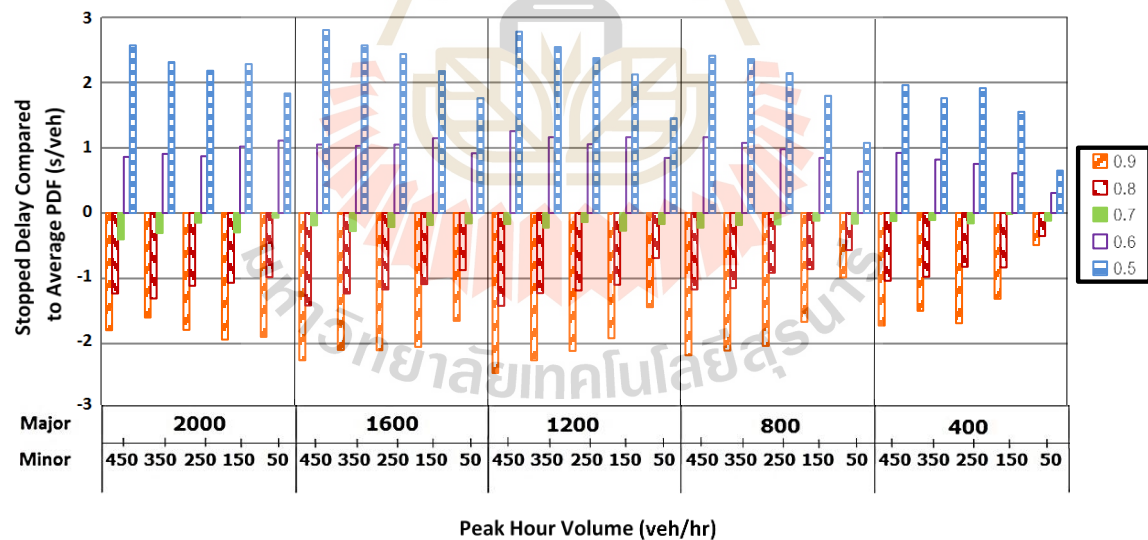
Semi-Actuated Traffic Signal



รูปที่ 4.17 แสดงผลต่างระหว่างเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร

ความสูงของแท่งกราฟในแต่ละกรณีมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ Fixed แสดงให้เห็นว่ารูปแบบ Semi มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรในระหว่างวันมากกว่ารูปแบบ Fixed

Fully-Actuated Traffic Signal



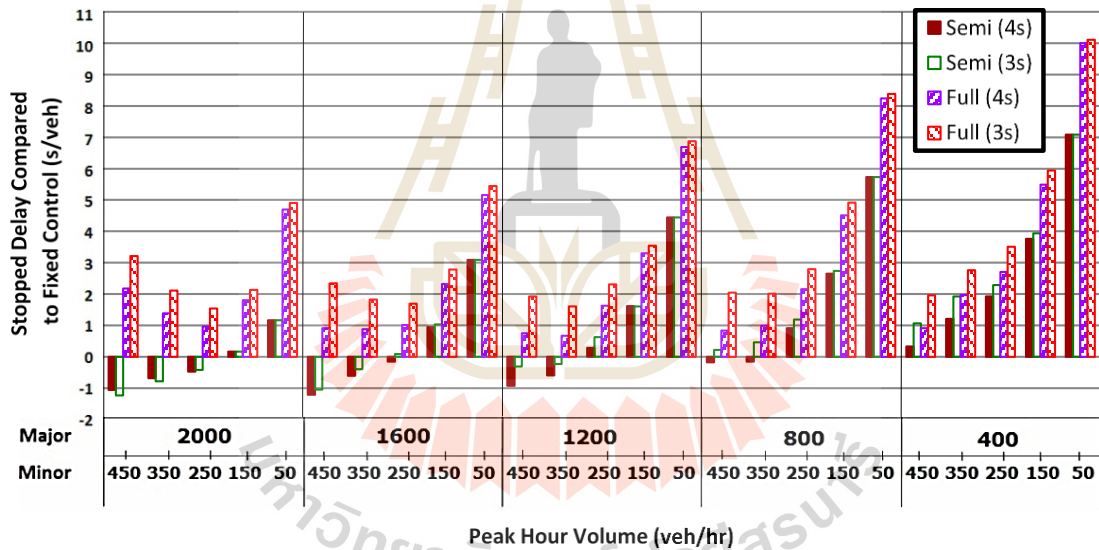
รูปที่ 4.18 แสดงผลต่างระหว่างเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ

ความสูงของแท่งกราฟในแต่ละกรณีมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ Fixed และ Semi แสดงให้เห็นว่ารูปแบบ Full มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรในระหว่างวันมากที่สุด

4.1.5 การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนค่า Passage Time จาก 4 วินาที เป็น 3 วินาทีต่อประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก

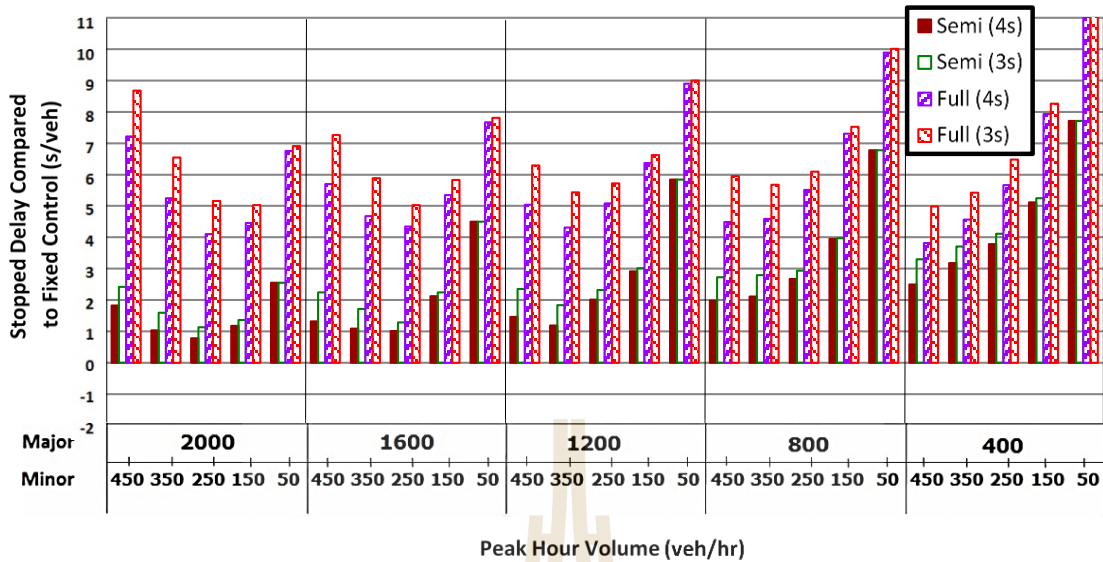
ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนค่า Passage Time จาก 4 วินาที เป็น 3 วินาทีต่อประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกทั้งโครงข่าย โดยแสดงผลของกราฟลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกทั้งโครงข่าย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรรูปแบบต่าง ๆ หลังจากเปลี่ยนแปลง Passage Time ไม่มีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสาเหตุที่ค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรและแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ เนื่องจากค่า Passage Time ที่เหมาะสมกับสภาพจราจรและลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกนี้อยู่ที่ประมาณ 3 วินาที ซึ่งเมื่อกำหนดค่าดังกล่าวที่ 4 วินาทีทำให้ต้องสูญเสียความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเพิ่มจากของฝั่งที่ยังติดไฟแดง โดยแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแบบจำลองเดิม (Passage Time 4 วินาที) กับตัวอย่างแบบจำลองใหม่ (Passage Time 3 วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

Passage Time 4 s & Passage Time 3 s (0.9 PDF)



รูปที่ 4.19 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.9

Passage Time 4 s & Passage Time 3 s (0.5 PDF)



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความล่าช้าเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัญญาณไฟแบบ Fixed-Time กรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.5

4.2 แบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun ซึ่งได้ออกมาในรูปแบบของตัวชี้วัดประสิทธิผลได้แก่ ค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย (คันต่อวินาที) ของแต่ละรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแล้ว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟบนถนนทั้งโครงข่ายระหว่าง 3 รูปแบบพบว่า รูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบมีค่าความล่าช้าเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยดีกว่ารูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบอื่น ๆ แต่จากผลของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่และแบบกึ่งตามปริมาณจราจรพบความแตกต่างด้านประสิทธิภาพตามการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน ซึ่งสามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่าง 2 รูปแบบนี้ได้ ประกอบกับในปัจจุบันหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาติดตั้งสัญญาณไฟจราจรเริ่มมักเลือกใช้รูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจรมากกว่าแบบตามปริมาณเต็มรูปแบบบริเวณทางแยกเดี่ยวเนื่องด้วยเหตุผลทางด้านงบประมาณ ทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะสร้างแบบจำลองสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่างรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่และแบบกึ่งตามปริมาณจราจรโดยใช้วิธีทางสถิติแบบ Binary Logistic Regression

สำหรับการประยุกต์ใช้วิธีทางสถิติแบบ Binary Logistic Regression ในการสร้างแบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่างสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่และแบบกึ่งตามปริมาณจราจร สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การกำหนดนิยามและรวบรวมตัวแปรและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการศึกษจากการประเมินประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟจราจร จำนวน 125 กรณี แบ่งออกเป็นรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาที่ร้อยละ 26.8 รูปแบบสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรร้อยละ 83.2 ดังตารางที่ 4.1 โดยจากการวิเคราะห์ผ่านความสัมพันธ์แบบ Logistic Regression Analysis โดยใช้โปรแกรม SPSS พบว่า

ตารางที่ 4.1 จำนวนของกลุ่มตัวอย่างจำแนกตามการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟที่เหมาะสม

รูปแบบสัญญาณไฟ	จำนวน	ร้อยละ (%)
Fixed-Time	21	26.8
Semi-Actuated	104	83.2
รวม	125	100

ตารางที่ 4.2 ค่าสถิติ Nagelkerke R Square

-2 Log Likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
33.618	0.471	0.790

จากตารางที่ 4.2 ค่า -2 Log Likelihood มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ บ่งบอกถึงสมการหรือแบบจำลองที่สร้างขึ้น มีคุณภาพหรือกลมกลืนกับข้อมูลดี ค่า Cox & Snell R Square = 0.471 มีค่าไม่เข้าใกล้ 0 บ่งบอกถึงความกลมกลืนของแบบจำลองในแง่ของการเปรียบเทียบคุณภาพของแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับแบบจำลองที่แย่ที่สุดก็คือแบบจำลองว่าง (Null Model) ที่ไม่มีตัวแปรอิสระใด ๆ และค่า Nagelkerke R Square = 0.790 บ่งบอกถึงตัวแปรต้นต่าง ๆ สามารถอธิบายความแปรผันของการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรได้ร้อยละ 79

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรที่มีผลต่อสมการทำนายในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟ

ตัวแปร	β	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(β)
MAJOR	-0.005	0.001	12.045	1	0.001	0.995
MINOR	-0.023	0.006	12.947	1	0.000	0.977
PDF	-27.411	7.484	13.414	1	0.000	0.000
Constant	37.152	9.478	15.366	1	0.000	1.364E+16

จะได้สมการ Logistic Regression ดังต่อไปนี้

$$Y = 37.152 - 0.005MAJOR - 0.023MINOR - 27.411PDF \quad (4.1)$$

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 พบว่าตัวแปรทำนายทุกตัวมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) และมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ (ค่า $\beta < 0$) แสดงว่าปัจจัยทางด้านปริมาณจราจรเหล่านี้ช่วยเพิ่มโอกาสให้เลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาที่ได้แก่ปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วน (MAJOR) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ ($\beta = -0.005$) แสดงว่าเมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขา

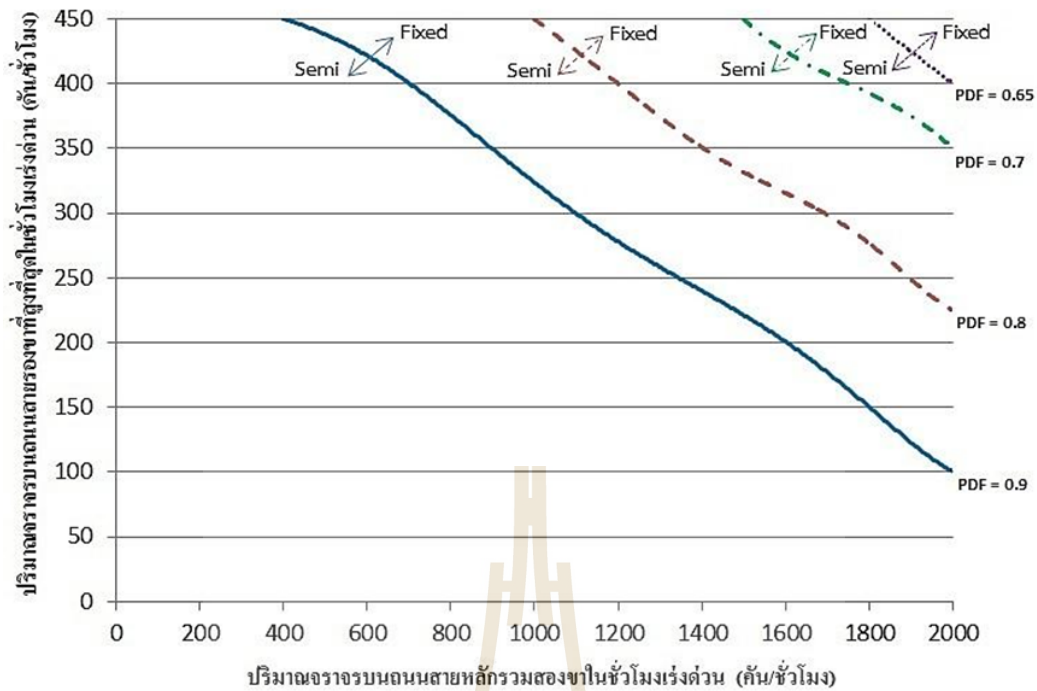
ในช่วงโมงเร่งด่วนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ออกาสในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2. ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน (MINOR) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ ($\beta = -0.023$) แสดงว่าเมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ออกาสในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3. Peak Day Factor (PDF) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ ($\beta = -27.411$) แสดงว่าจะส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ ($Y=0$) เมื่อ Peak Day Factor มีค่าเข้าใกล้ 1 (ปริมาณจราจรมีการแปรผันน้อย) และจะส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร ($Y=1$) เมื่อ Peak Day Factor มีค่าเข้าใกล้ 0 (ปริมาณจราจรมีการแปรผันมาก)

4.3 การสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

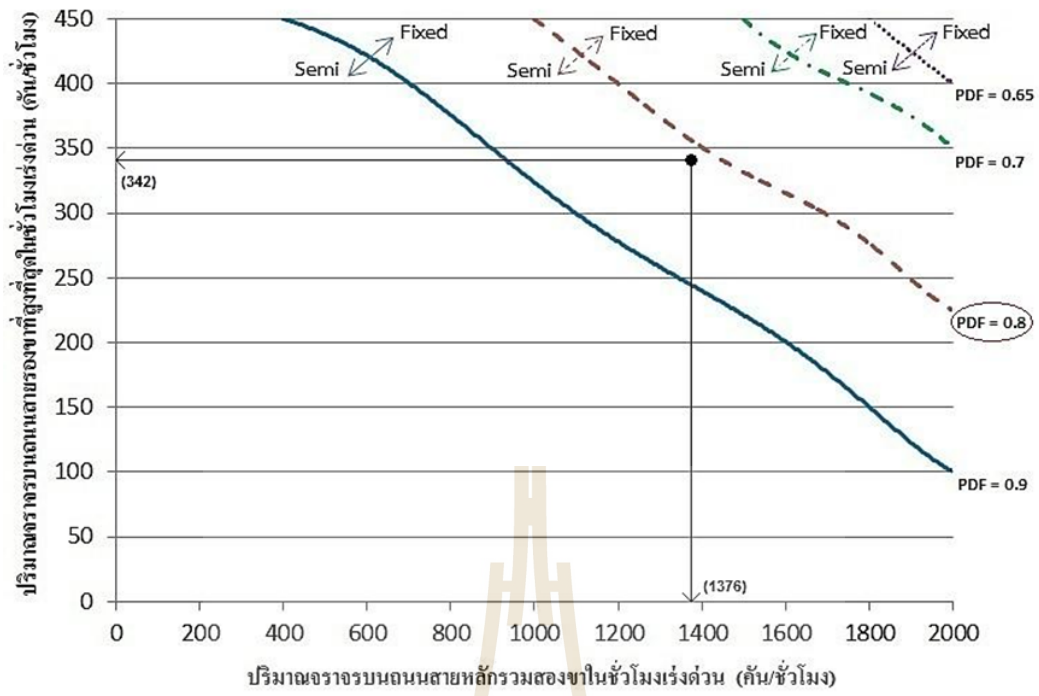
การสร้างเครื่องมือสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่างรูปแบบสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่กับแบบกึ่งตามปริมาณจราจรจะมาจากการนำเอาสมการทำนายที่ได้จากแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Binary Logistic Regression) มาแทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการแต่ละกรณี ซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วน (MAJOR) ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน (MINOR) และค่า Peak Day Factor (PDF) เพื่อหาความน่าจะเป็นที่รูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ ($Y=0$) และแบบกึ่งตามปริมาณจราจร ($Y=1$) จะมีโอกาสในการเลือกเท่ากัน ซึ่งมีค่าความน่าจะเป็น (Probability) เท่ากับ 0.5 มาใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อแบ่งเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่างสองรูปแบบ โดยหากค่าความน่าจะเป็นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 ($\text{Prob.} \leq 0.5$) แสดงว่าควรตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (ในกรณีที่โอกาสในการเลือกมีค่าเท่ากัน $\text{Prob.} = 0.5$ ควรตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ด้วยเหตุผลด้านเศรษฐศาสตร์) และหากค่าความน่าจะเป็นมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าควรตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร โดยสามารถสร้างเครื่องมือดังกล่าวได้ผ่านวิธีการสร้างกราฟโดยกำหนดให้แกน Y เป็นปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน หน่วยเป็น คันต่อชั่วโมง และแกน X เป็นปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วน หน่วยเป็น คันต่อชั่วโมง ซึ่งจะมีเส้นของแต่ละค่า Peak Day Factor เป็นตัวแบ่งระหว่างการตัดสินใจเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรระหว่างสองรูปแบบสำหรับกรณีต่างๆ ประกอบด้วยกรณี Peak Day Factor เท่ากับ 0.9, 0.8, 0.7 และ 0.65 ซึ่งมาจากการนำเอาแต่ละกรณีที่มีความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.5 มากำหนดจุดลงบนกราฟแล้วลากเส้นตัดผ่าน แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟเครื่องมือสำหรับช่วยในการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร

สำหรับเงื่อนไขและวิธีการใช้กราฟผู้ใช้จะต้องทราบข้อมูลปริมาณจราจรในระหว่างวันตั้งแต่ช่วงเวลา 6.00-18.00 น. เพื่อคำนวณหาค่า Peak Day Factor รวมทั้งปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน (คันต่อชั่วโมง) และปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน (คันต่อชั่วโมง) โดยวิธีการใช้เริ่มจากการพิจารณาค่า Peak Day Factor ของข้อมูลเพื่อเลือกเส้นกราฟที่จะใช้พิจารณาซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 4 เส้นได้แก่ PDF = 0.9, 0.8, 0.7 และ 0.65 จากนั้นพิจารณาปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน และปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วนโดยการกำหนดจุดลงบนกราฟ ซึ่งหากจุดดังกล่าวอยู่บริเวณใต้เส้น Peak Day Factor ที่พิจารณาแสดงว่าควรเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร และหากจุดอยู่บริเวณเหนือเส้น Peak Day Factor ที่พิจารณาแสดงว่าควรเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่

ตัวอย่างเช่นกรณีพิจารณาค่า Peak Day Factor = 0.8, ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในชั่วโมงเร่งด่วน 1,376 คันต่อชั่วโมง และปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในชั่วโมงเร่งด่วน 342 คันต่อชั่วโมง เมื่อกำหนดจุดลงบนกราฟจะเห็นว่าจุดดังกล่าวอยู่บริเวณใต้เส้น Peak Day Factor ที่พิจารณา แสดงว่าจากข้อมูลตัวอย่างปริมาณจราจรนี้ควรเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจร แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่างการใช้กราฟเครื่องมือสำหรับช่วยในการเลือกรูปแบบการติดตั้ง
สัญญาณไฟจราจร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะประกอบไปด้วยสรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจร ภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองการเลือกรูปแบบ การติดตั้งสัญญาณไฟจราจรและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ (Fixed-Time Traffic Signal) สัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร (Semi-Actuated Traffic Signal) และสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ (Fully-Actuated Traffic Signal) ภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน โดยแบ่งผลการวิเคราะห์ตามการพิจารณาในแต่ละขาที่เข้าสู่ทางแยก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรสรุปได้ว่า สัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบเป็นรูปแบบที่สามารถจัดการจราจรบริเวณทางแยกตัวอย่างภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันได้ดีที่สุดทุกกรณีเมื่อพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยก

2. สัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรเมื่อพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกสรุปได้ว่า ในกรณีที่มีปริมาณจราจรหนาแน่นและมีการแปรผันของปริมาณจราจรสูง สัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร เป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีรองลงมาจากสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ

3. สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรเมื่อพิจารณาทุกขาที่เข้าสู่ทางแยกสรุปได้ว่า ในกรณีที่มีปริมาณจราจรหนาแน่นและการแปรผันของปริมาณจราจรต่ำ สัญญาณไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีรองลงมาจากสัญญาณไฟจราจรแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ

สำหรับสรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัญญาณไฟจราจรจากการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันสามารถสรุปได้ว่า สัญญาณไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบเป็นรูปแบบที่สามารถตอบสนองต่อการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันมากที่สุด รองลงมาคือสัญญาณไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบ และสัญญาณไฟแบบกำหนดเวลาคงที่ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้อีกหนึ่งว่าปัจจัยด้านการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแบบต่าง ๆ

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจร

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาไฟจราจรทั้ง 3 รูปแบบ จะพบว่าสัญญาไฟแบบตามปริมาณจราจรเต็มรูปแบบจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเสมอไม่ว่าการแปรผันของปริมาณจราจรจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ดังนั้นจึงเป็นรูปแบบที่สมควรนำมาประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสองรูปแบบที่เหลือจะพบว่ารูปแบบใดจะมีประสิทธิภาพดีกว่านั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรบนถนนสายหลักและสายรองและลักษณะการแปรผันของปริมาณจราจรด้วย ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรระหว่างสัญญาไฟแบบกำหนดเวลาคงที่กับสัญญาไฟแบบกึ่งตามปริมาณจราจรโดยใช้วิธีสถิติแบบ Binary Logistic Regression ในการวิเคราะห์ สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วน จะส่งผลต่อโอกาสที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร เมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนมีปริมาณลดลง และจะส่งผลต่อโอกาสที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายหลักรวมสองขาในช่วงโมงเร่งด่วนเพิ่มขึ้น
2. ปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วน จะส่งผลต่อโอกาสที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร เมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วนมีปริมาณลดลง และจะส่งผลต่อโอกาสที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เมื่อปริมาณจราจรบนถนนสายรองขาที่สูงที่สุดในช่วงโมงเร่งด่วนเพิ่มขึ้น
3. Peak Day Factor จะส่งผลต่อโอกาสที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่เมื่อ Peak Day Factor มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่าเมื่อค่า Peak Day Factor เพิ่มขึ้น (ปริมาณจราจรในระหว่างวันมีการแปรผันต่ำ) จะยิ่งเพิ่มโอกาสให้มีการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกำหนดเวลาคงที่ และจะส่งผลต่อโอกาสที่จะเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจรเมื่อ Peak Day Factor มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่าเมื่อค่า Peak Day Factor ลดลง (ปริมาณจราจรในระหว่างวันมีการแปรผันสูง) จะยิ่งเพิ่มโอกาสให้มีการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรแบบกึ่งตามปริมาณจราจร

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจกงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพของรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรภายใต้การแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรเพียงอย่างเดียว ซึ่งถือว่ยังเป็นเพียงส่วนหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรูปแบบการติดตั้งสัญญาไฟจราจรที่สมบูรณ์ ดังนั้นผลที่ได้จึงอาจสะท้อนถึงประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาไฟจราจรได้เฉพาะในบางกรณี โดยยังมีปัจจัยอีกหลายด้านซึ่งสามารถศึกษาประกอบการพิจารณาาร่วมด้วย เช่น ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ปริมาณ

สัดส่วนรตเลี้ยว ปริมาณรตขนาดใหญ๋ เป็นต้น เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ทั้งนี้หากมีการพิจารณาศึกษาปัจจัยด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม อาจมีผลต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพรูปแบบสัญญาณไฟแบบต่าง ๆ รวมถึงผลที่จะได้จากแบบจำลองการเลือกรูปแบบการติดตั้งสัญญาณไฟจราจร ซึ่งยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมและพัฒนาแบบจำลองต่อไป



บรรณานุกรม

- Alexander, S., Robert, T. B., and Brian, R. G. (1998). Development and application of control strategies for signalized intersection in coordinated systems. Transportation Research Record 1634 (Paper No. 98-1271).
- Bradley, W. Y. (1993). Fully-actuated vs. semi-actuated traffic signal systems. Yarger Engineering.
- Dražen, C. (2004). An analysis of intersection traffic signal warrant, Promet-Traffic-Traffico. 2005 (17): 25-32
- Feng-Bor, L. (1991). Knowledge base on semi-actuated traffic-signal control. Journal of Transportation Engineering. 1991 (117): 398-417
- FHWA. (2009). Manual on uniform traffic control devices (2009 ed.). Federal Highway Administration.
- FHWA. (2013). Traffic signal timing manual [On-line]. Available: <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter5.htm>
- James, C. W., Siamak, A. A. (1996). Impacts of traffic signal installation at marginally warranted intersections. Research Report 1350-1F : FWHA/TX-94/1350-1F (pp. 182). Federal Highway Administration.
- Paul, J. C., H. Gene, H. Jr. (1998). Evaluation of potential traffic signal warrant considerations. Report 1350-1 : TX-99/3991-1 (pp. 184). Texas Department of Transportation.
- Roger, R. P., Prassas, E. S., McShane, W. R. (2011). Traffic engineering (4th edition). New Jersey: Pearson.
- Sampson, J.D. (1999). Queue-based traffic-signal warrant : the 40/60 warrant. Institute of Transportation Engineer Journal. 1999 (39): 30-36
- Webster, F. V. (1969). Traffic signal settings. Road research technical. 1969 (39). London: Department of Scientific and Industrial Research Road Research Laboratory.
- Xuesong, Z., Albert, G., David, S. (2010). Evaluation of design standards of four-hour-volume traffic signal warrant. Journal of The Transportation Research Forum. 2010 (49): 7-19
- ทวี วิชัยเมธาวิ. (2545). การพัฒนาวิธีการควบคุมสัญญาณไฟจราจรในสภาพจราจรอึมครึม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นำชัย ศุภฤกษ์ชัยกุล. (2552). การวิเคราะห์ Logistic Regression. สถาบันวิจัยพฤติกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ.
- ปกาสิต จิรศักดิ์. (2549). การศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ ณ ทางแยกสัญญาณไฟจราจรแบบแสดงเวลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปฎิภาณ แก้ววิเชียร. (2549). การศึกษาการควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกเดี่ยว กรณีศึกษา จังหวัดขอนแก่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พรชิตา ถามะพันธ์ (2557). การจัดการจราจรบริเวณสามแยกบนถนนหลวงสายหลัก กรณีสามแยกหน้าทางเข้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขา วิศวกรรมขนส่ง สำนัก วิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2557). โครงการศึกษาแนวทางการปรับปรุงระบบสัญญาณไฟจราจรบนเส้นทางคมนาคมสายหลัก เพื่อลดการใช้พลังงานในภาคขนส่ง. สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนัก วิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ศิริชัย กาญจนวาสี. (2554). การวิเคราะห์พระระดับ. พิมพ์ครั้งที่ 5. ภาควิชาวิจัยและจิตวิทยาการศึกษา คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

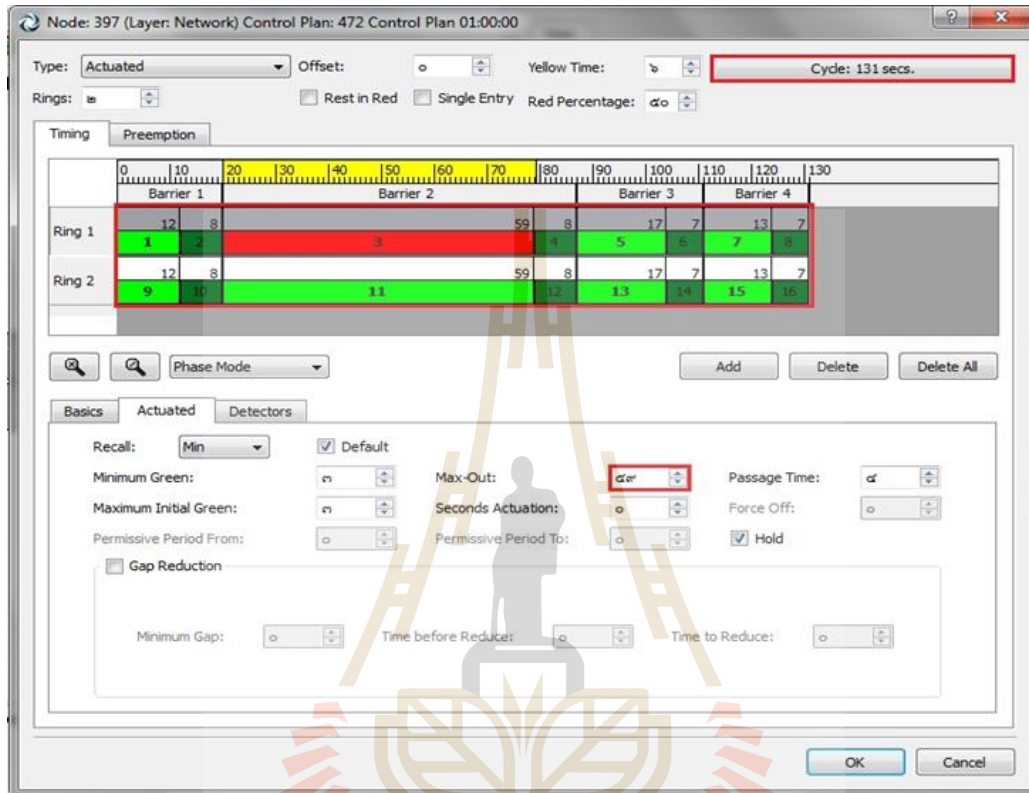


ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณจราจรที่ใช้ในแบบจำลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun ส่วนใหญ่ได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้มีค่าคงที่เพื่อต้องการทดสอบพารามิเตอร์เฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันของปริมาณจราจรในระหว่างวัน แต่จะมีพารามิเตอร์บางตัวที่ต้องมีการกำหนดค่าใหม่ตามการแปรผันของปริมาณจราจรซึ่งได้แก่ ระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร และช่วงเวลาไฟเขียวขยายสูงสุด (Max-Out) โดยจะได้จากการคำนวณตามทฤษฎีของ Webster ในแต่ละกรณี แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 แสดงพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามการแปรผันของปริมาณจราจรบนโปรแกรมจำลองจราจร Aimsun

ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดให้ใช้เป็นค่าคงที่

- Minimum Green (ระยะเวลาสัญญาณไฟเขียวต่ำสุด) = 3 วินาที
- Passage Time (ระยะเวลาไฟเขียวขยาย) = 4 วินาที
- Maximum Initial Green (ระยะเวลาสัญญาณไฟเขียวเริ่มต้นสูงสุด) = 3 วินาที

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณจราจรรวมระหว่างวันจากค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษา

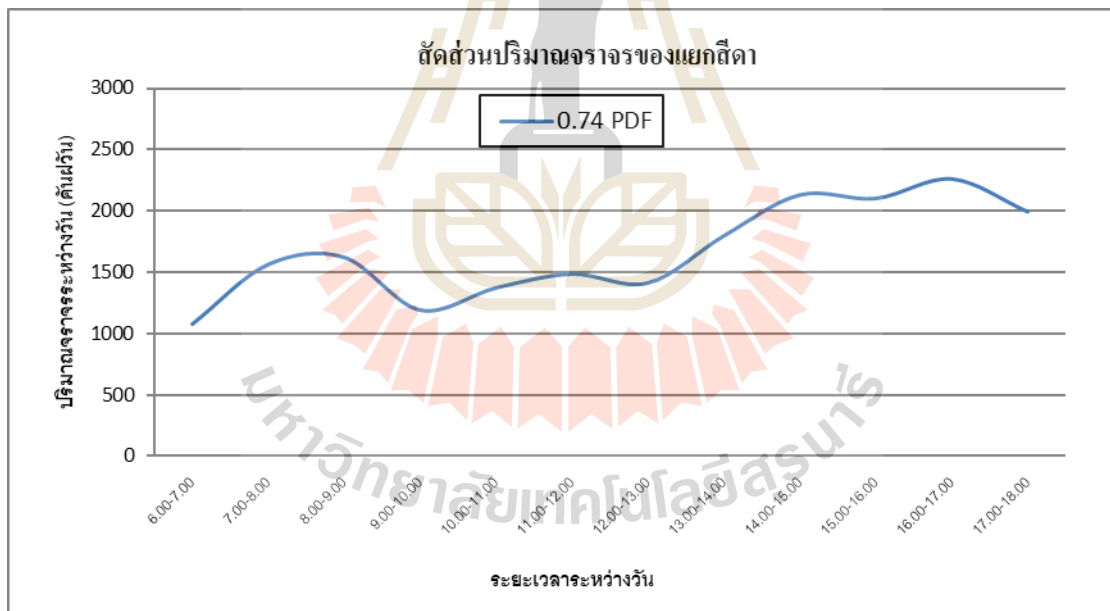
ในส่วนนี้จะอธิบายถึงที่มาของพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยได้นำเสนอขึ้นมาใหม่ซึ่งได้แก่ค่า Peak Day Factor และตัวอย่างการคำนวณปริมาณจราจรระหว่างวันเพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจะแสดงตัวอย่างการคำนวณ 1 ในกรณีที่ใช้ในการจำลองรูปแบบสัญญาณไฟจราจรได้แก่ กรณีปริมาณจราจรรวมสองทิศทางสูงสุดบนถนนสายหลักมีค่า 2000 คันต่อชั่วโมง ปริมาณจราจรทิศทางที่มากที่สุดบนถนนสายรอง 450 คันต่อชั่วโมง และค่า Peak Day Factor ที่ 0.5 PDF มีรายละเอียดดังนี้

$$PDF = \frac{\text{Daily Volume}}{\text{Max. Hour Volume} \times N} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 ตัวแปรที่ทราบค่าได้แก่ PDF มีค่าเท่ากับ 0.5, N (จำนวนช่วงเวลาย่อยระหว่างวัน) เท่ากับ 12 ชั่วโมง และค่า Max. Hour Volume (ปริมาณจราจรของชั่วโมงที่สูงสุดระหว่างวัน) ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณจราจรรวมสองทิศทางสูงสุดบนถนนสายหลักมีค่า 2000 คันต่อชั่วโมง และปริมาณจราจรทิศทางที่มากที่สุดบนถนนสายรอง 450 คันต่อชั่วโมง ซึ่งยังขาดปริมาณจราจรในทิศทางตรงกันข้ามบนถนนสายรอง ผู้วิจัยจึงใช้วิธีกำหนดปริมาณจราจรในทิศทางตรงกันข้ามจากการใช้สัดส่วนของปริมาณจราจรจริงคือ 57.7 ต่อ 42.3 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณจราจรในทิศทางตรงข้ามบนถนนสายรองในกรณีตัวอย่างนี้จะเท่ากับ 330 คันต่อชั่วโมง ดังแสดงในสมการ (ก.1)

$$\text{Daily Volume} = (2000 + (450 + 350)) \times 0.5 \times 12 \quad (ก.1)$$

จากสมการที่ (ก.1) จะได้ปริมาณจราจรรวมระหว่างวันที่ออกแบบเท่ากับ 16,679 คันต่อวัน ซึ่งจะนำไปกระจายในแต่ละชั่วโมง โดยหลักการที่ใช้กำหนดปริมาณจราจรในแต่ละชั่วโมงจะมาจากข้อมูลสัดส่วนปริมาณจราจรจริง เพื่อให้การกระจายปริมาณจราจรระหว่างวันที่ความคล้ายคลึงกับสภาพจราจรจริงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แสดงกราฟสัดส่วนปริมาณจราจรระหว่างวันของแยกสี่ตา

สำหรับการกระจายปริมาณจราจรในแต่ละชั่วโมงจะกำหนดให้ปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วน (Peak Hour) มีค่าคงที่ (ในกรณีที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลง Peak Hour Factor) ดังนั้นปริมาณจราจรรวมที่เหลืออีก 11 ชั่วโมงจะต้องมีการนำมาคำนวณใหม่ โดยวิธีคำนวณจะมาจากปริมาณจราจรรวมระหว่างวันที่พิจารณา (12 ชั่วโมง) ลบด้วยปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วน (1 ชั่วโมง) ดังสมการ (ก.2)

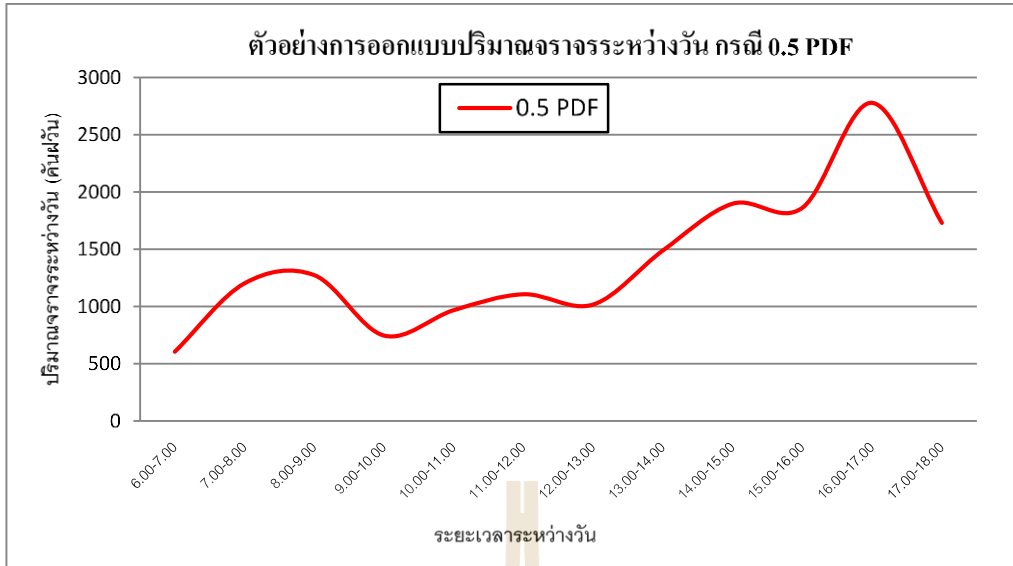
$$11 \text{ Hour Volume} = \text{Daily Volume (12 Hour)} - \text{Peak Hour Volume} \quad (ก.2)$$

หลังจากทราบปริมาณจราจรรวมที่เหลือ 11 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกระจายตามสัดส่วนของปริมาณจราจรจริง จะได้ปริมาณจราจรรวมเท่ากับ 24,618 คันต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณจราจรรวมที่ยังไม่เท่ากับปริมาณจราจรรวมที่ออกแบบไว้ (16,679 คันต่อวัน) จึงต้องนำผลต่างที่ได้ระหว่างปริมาณจราจรรวมระหว่างวันที่ออกแบบกับปริมาณจราจรรวมตามสัดส่วนจริงมาปรับแก้ โดยการนำค่าเฉลี่ยของผลต่างดังกล่าวไปปรับแก้ในแต่ละชั่วโมงจนกระทั่งปริมาณจราจรรวมระหว่างวันที่ทั้งสองเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ ก.3 ซึ่งอย่างไรก็ตามการปรับแก้อาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี

ช่วงเวลาระหว่างวัน	ปริมาณจราจรแต่ละชั่วโมง	ค่าปรับแก้	ปริมาณจราจรแต่ละชั่วโมง (ปรับแก้)
6.00-7.00 น.	1326	-722	604
7.00-8.00 น.	1924	-722	1202
8.00-9.00 น.	1995	-722	1274
9.00-10.00 น.	1467	-722	746
10.00-11.00 น.	1690	-722	968
11.00-12.00 น.	1828	-722	1107
12.00-13.00 น.	1739	-722	1017
13.00-14.00 น.	2211	-722	1490
14.00-15.00 น.	2620	-722	1899
15.00-16.00 น.	2585	-722	1863
16.00-17.00 น.	2780		2780
17.00-18.00 น.	2452	-722	1730
ปริมาณรวมตามสัดส่วนจริง	24618		
ปริมาณรวมที่ออกแบบ	16679		16679
ผลต่าง	-7939		
ค่าปรับแก้	-722		

รูปที่ ก.3 แสดงตารางตัวอย่างการปรับแก้ปริมาณจราจรแต่ละชั่วโมง

เมื่อได้ข้อมูลตัวอย่างที่ออกแบบแล้ว จะได้ลักษณะการกระจายตัวของปริมาณจราจรรวมดังรูป ก.4 ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองจราจรบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Aimsun ต่อไป



รูปที่ ก.4 แสดงกราฟตัวอย่างปริมาณจราจรระหว่างวันที่ออกแบบ กรณี 0.5 PDF

ตัวอย่างการคำนวณค่าเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย

จากหัวข้อ 3.3.2 จะแสดงตัวอย่างการคำนวณผลของเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายหลัก (Major) ผลของเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายรอง (Minor) ผลของเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนทั้งโครงข่าย (Sum) โดยใช้ผลของค่าเฉลี่ยรถทุกประเภทในการคำนวณดังสมการ ก.3, ก.4 และ ก.5

เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายหลัก (Major)

$$stime(Major) = \frac{(flow_{major1} \times stime_{major1}) + (flow_{major2} \times stime_{major2})}{flow_{major1} + flow_{major2}} \quad (ก.3)$$

โดยที่ $stime(Major)$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายหลัก	(วินาที/คัน)
$flow_{major1}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายหลักเส้นที่ 1	(คัน/ชั่วโมง)
$flow_{major2}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายหลักเส้นที่ 2	(คัน/ชั่วโมง)
$stime_{major1}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายหลักเส้นที่ 1	(วินาที/คัน)
$stime_{major2}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายหลักเส้นที่ 2	(วินาที/คัน)

เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายรอง (Minor)

$$stime(Minor) = \frac{(flow_{minor1} \times stime_{minor1}) + (flow_{minor2} \times stime_{minor2})}{flow_{minor1} + flow_{minor2}} \quad (ก.4)$$

โดยที่ $stime(Minor)$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนสายรอง	(วินาที/คัน)
$flow_{minor1}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายรองเส้นที่ 1	(คัน/ชั่วโมง)
$flow_{minor2}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายรองเส้นที่ 2	(คัน/ชั่วโมง)
$stime_{minor1}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายรองเส้นที่ 1	(วินาที/คัน)
$stime_{minor2}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายรองเส้นที่ 2	(วินาที/คัน)

เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนทั้งโครงข่าย (Sum)

$$stime(Sum) = \frac{(flow_{major1} \times stime_{major1}) + (flow_{major2} \times stime_{major2}) + (flow_{minor1} \times stime_{minor1}) + (flow_{minor2} \times stime_{minor2})}{flow_{major1} + flow_{major2} + flow_{minor1} + flow_{minor2}} \quad (ก.5)$$

โดยที่ $stime(Sum)$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ยบนถนนทั้งโครงข่าย	(วินาที/คัน)
$flow_{major1}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายหลักเส้นที่ 1	(คัน/ชั่วโมง)
$flow_{major2}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายหลักเส้นที่ 2	(คัน/ชั่วโมง)
$stime_{major1}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายหลักเส้นที่ 1	(วินาที/คัน)
$stime_{major2}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายหลักเส้นที่ 2	(วินาที/คัน)
$flow_{minor1}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายรองเส้นที่ 1	(คัน/ชั่วโมง)
$flow_{minor2}$	คือ อัตราการไหลของรถบนถนนสายรองเส้นที่ 2	(คัน/ชั่วโมง)
$stime_{minor1}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายรองเส้นที่ 1	(วินาที/คัน)
$stime_{minor2}$	คือ เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดบนถนนสายรองเส้นที่ 2	(วินาที/คัน)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลองจรรยาบรรณโปรแกรมคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายหลักกรณี PDF = 0.9

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.9	2000	450	22.91	22.70	23.57
0.9	2000	350	20.16	19.74	21.25
0.9	2000	250	16.82	16.88	18.53
0.9	2000	150	13.49	13.36	14.78
0.9	2000	50	11.43	9.12	9.90
0.9	1600	450	23.59	24.01	24.84
0.9	1600	350	20.82	20.89	21.92
0.9	1600	250	17.34	17.28	18.41
0.9	1600	150	14.37	13.38	14.16
0.9	1600	50	12.51	8.80	8.88
0.9	1200	450	24.63	24.84	24.78
0.9	1200	350	21.02	21.14	21.57
0.9	1200	250	18.12	17.55	17.74
0.9	1200	150	14.99	12.68	12.71
0.9	1200	50	13.51	8.10	7.53
0.9	800	450	24.82	24.30	24.07
0.9	800	350	21.84	21.45	21.19
0.9	800	250	18.75	17.15	16.93
0.9	800	150	15.91	12.29	11.74
0.9	800	50	14.03	6.88	5.97
0.9	400	450	24.80	23.90	23.33
0.9	400	350	22.82	20.86	20.12
0.9	400	250	20.36	17.40	16.82
0.9	400	150	17.64	12.15	11.17
0.9	400	50	14.99	5.74	4.58

ตารางที่ ข.2 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายหลักกรณี PDF = 0.8

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.8	2000	450	23.22	22.55	23.49
0.8	2000	350	20.29	19.71	21.30
0.8	2000	250	16.79	16.63	18.08
0.8	2000	150	13.40	12.95	14.17
0.8	2000	50	11.55	8.68	9.22
0.8	1600	450	23.78	23.58	24.27
0.8	1600	350	20.91	20.35	21.25
0.8	1600	250	17.26	16.86	17.64
0.8	1600	150	14.35	12.86	13.36
0.8	1600	50	12.37	8.32	8.21
0.8	1200	450	24.59	23.92	23.87
0.8	1200	350	20.92	20.54	20.70
0.8	1200	250	17.97	16.71	16.88
0.8	1200	150	14.87	12.05	11.92
0.8	1200	50	13.21	7.26	6.83
0.8	800	450	24.45	23.57	23.00
0.8	800	350	21.55	20.51	20.15
0.8	800	250	18.62	16.52	15.79
0.8	800	150	15.75	11.61	10.90
0.8	800	50	13.92	6.34	5.59
0.8	400	450	24.52	23.20	22.37
0.8	400	350	22.56	19.97	19.45
0.8	400	250	20.07	16.51	15.72
0.8	400	150	17.65	11.70	10.53
0.8	400	50	15.05	5.67	4.39

ตารางที่ ข.3 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายหลักกรณี PDF = 0.7

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.7	2000	450	23.48	22.02	22.82
0.7	2000	350	20.41	19.28	20.46
0.7	2000	250	16.82	16.10	17.28
0.7	2000	150	13.50	12.46	13.41
0.7	2000	50	11.40	8.19	8.50
0.7	1600	450	23.79	22.95	23.12
0.7	1600	350	20.84	19.81	20.30
0.7	1600	250	17.06	16.19	16.66
0.7	1600	150	14.17	12.27	12.38
0.7	1600	50	12.35	7.78	7.53
0.7	1200	450	24.32	23.13	22.67
0.7	1200	350	20.77	19.79	19.61
0.7	1200	250	17.67	15.96	15.78
0.7	1200	150	14.70	11.52	11.09
0.7	1200	50	13.23	6.94	6.32
0.7	800	450	24.43	22.63	22.02
0.7	800	350	21.57	19.76	18.99
0.7	800	250	18.31	15.54	14.98
0.7	800	150	15.69	11.08	10.16
0.7	800	50	13.95	6.04	5.18
0.7	400	450	24.38	21.86	21.28
0.7	400	350	22.46	19.00	18.22
0.7	400	250	20.15	16.04	14.90
0.7	400	150	17.44	11.09	9.70
0.7	400	50	14.84	5.33	4.13

ตารางที่ ข.4 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายหลักกรณี PDF = 0.6

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.6	2000	450	23.91	21.49	21.97
0.6	2000	350	20.35	18.87	19.44
0.6	2000	250	16.81	15.68	16.39
0.6	2000	150	13.18	11.83	12.25
0.6	2000	50	11.30	7.55	7.46
0.6	1600	450	23.95	21.83	22.01
0.6	1600	350	20.75	18.98	19.12
0.6	1600	250	16.69	15.36	15.44
0.6	1600	150	13.92	11.40	11.18
0.6	1600	50	12.11	6.95	6.58
0.6	1200	450	24.00	22.11	21.22
0.6	1200	350	20.40	18.84	18.28
0.6	1200	250	17.49	15.13	14.58
0.6	1200	150	14.53	10.49	9.78
0.6	1200	50	12.99	6.10	5.37
0.6	800	450	24.16	21.53	20.51
0.6	800	350	21.37	18.68	17.71
0.6	800	250	18.24	14.78	13.72
0.6	800	150	15.59	10.24	9.18
0.6	800	50	13.81	5.42	4.45
0.6	400	450	24.11	20.80	19.92
0.6	400	350	22.19	18.01	17.22
0.6	400	250	19.99	14.91	13.84
0.6	400	150	17.40	10.36	9.04
0.6	400	50	14.76	5.01	3.75

ตารางที่ ข.5 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายหลักกรณี PDF = 0.5

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.5	2000	450	24.15	20.52	20.33
0.5	2000	350	20.65	17.96	18.12
0.5	2000	250	16.69	14.86	15.12
0.5	2000	150	13.05	11.12	11.06
0.5	2000	50	11.22	7.00	6.74
0.5	1600	450	23.87	20.89	20.26
0.5	1600	350	20.38	18.01	17.57
0.5	1600	250	16.59	14.51	14.05
0.5	1600	150	13.81	10.76	10.18
0.5	1600	50	12.09	6.31	5.76
0.5	1200	450	23.91	20.79	19.70
0.5	1200	350	20.19	17.58	16.78
0.5	1200	250	17.39	14.07	13.24
0.5	1200	150	14.31	9.87	8.81
0.5	1200	50	13.04	5.62	4.81
0.5	800	450	23.86	20.28	19.06
0.5	800	350	21.14	17.36	16.30
0.5	800	250	17.92	13.74	12.46
0.5	800	150	15.46	9.68	8.22
0.5	800	50	13.69	5.01	3.99
0.5	400	450	24.04	19.73	18.61
0.5	400	350	22.18	17.13	15.94
0.5	400	250	19.75	13.78	12.48
0.5	400	150	17.27	9.49	8.07
0.5	400	50	14.76	4.51	3.34

ตารางที่ ข.6 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายรองกรณี PDF = 0.9

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.9	2000	450	49.14	54.48	37.45
0.9	2000	350	45.99	50.93	34.90
0.9	2000	250	45.69	48.32	32.21
0.9	2000	150	50.39	50.10	30.26
0.9	2000	50	61.07	69.56	30.28
0.9	1600	450	41.15	44.72	33.83
0.9	1600	350	38.87	41.31	31.18
0.9	1600	250	38.48	39.56	28.77
0.9	1600	150	40.38	39.69	26.92
0.9	1600	50	41.43	43.07	24.21
0.9	1200	450	33.73	36.42	30.75
0.9	1200	350	32.68	34.64	28.53
0.9	1200	250	32.05	32.76	26.04
0.9	1200	150	32.10	33.72	24.07
0.9	1200	50	32.24	34.70	20.47
0.9	800	450	28.22	29.73	27.22
0.9	800	350	27.28	28.64	25.56
0.9	800	250	26.47	27.43	23.42
0.9	800	150	26.84	27.77	21.12
0.9	800	50	26.94	30.18	17.52
0.9	400	450	23.86	24.24	23.63
0.9	400	350	22.97	22.84	22.04
0.9	400	250	22.08	21.96	20.82
0.9	400	150	21.70	22.10	18.58
0.9	400	50	23.03	26.26	15.02

ตารางที่ ข.7 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายรองกรณี PDF = 0.8

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.8	2000	450	48.74	54.03	35.37
0.8	2000	350	45.56	50.27	33.07
0.8	2000	250	44.38	47.21	30.54
0.8	2000	150	46.60	47.84	27.89
0.8	2000	50	54.87	62.52	27.23
0.8	1600	450	40.75	44.05	32.19
0.8	1600	350	38.17	40.92	29.66
0.8	1600	250	37.06	39.03	27.19
0.8	1600	150	38.22	38.97	25.09
0.8	1600	50	38.99	42.32	22.64
0.8	1200	450	33.38	35.94	29.40
0.8	1200	350	31.87	33.99	27.09
0.8	1200	250	31.25	32.32	24.79
0.8	1200	150	31.46	33.43	22.99
0.8	1200	50	31.35	34.67	19.29
0.8	800	450	27.97	29.32	26.33
0.8	800	350	27.10	28.09	24.77
0.8	800	250	25.93	27.17	22.38
0.8	800	150	25.98	27.39	20.38
0.8	800	50	26.74	30.21	16.73
0.8	400	450	23.67	23.76	23.28
0.8	400	350	22.63	22.52	21.73
0.8	400	250	21.77	21.85	20.40
0.8	400	150	21.53	22.27	18.50
0.8	400	50	22.85	26.18	14.79

ตารางที่ ข.8 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายรองกรณี PDF = 0.7

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.7	2000	450	48.71	53.47	33.89
0.7	2000	350	44.82	49.83	31.54
0.7	2000	250	43.82	47.41	28.79
0.7	2000	150	45.75	47.05	26.96
0.7	2000	50	51.98	59.38	25.03
0.7	1600	450	40.19	43.38	30.72
0.7	1600	350	37.71	40.66	28.62
0.7	1600	250	36.26	38.85	26.36
0.7	1600	150	38.44	39.21	24.47
0.7	1600	50	38.43	42.08	21.54
0.7	1200	450	33.10	35.66	28.04
0.7	1200	350	31.49	33.74	26.35
0.7	1200	250	31.46	32.32	23.89
0.7	1200	150	31.18	33.80	22.18
0.7	1200	50	31.60	35.34	18.58
0.7	800	450	27.76	29.10	25.42
0.7	800	350	26.49	27.91	24.26
0.7	800	250	25.98	27.39	21.79
0.7	800	150	26.17	27.51	19.65
0.7	800	50	26.18	30.69	16.40
0.7	400	450	23.38	23.33	22.58
0.7	400	350	22.67	22.24	21.39
0.7	400	250	21.75	21.87	20.01
0.7	400	150	21.44	22.47	17.70
0.7	400	50	23.27	26.73	14.72

ตารางที่ ข.9 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายรองกรณี PDF = 0.6

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.6	2000	450	48.12	53.40	31.33
0.6	2000	350	44.32	49.25	29.47
0.6	2000	250	42.21	46.38	27.03
0.6	2000	150	43.32	46.86	24.76
0.6	2000	50	46.71	55.52	22.75
0.6	1600	450	39.65	42.92	29.13
0.6	1600	350	37.05	40.08	26.88
0.6	1600	250	35.51	38.29	24.71
0.6	1600	150	36.02	38.63	22.59
0.6	1600	50	36.10	40.97	19.77
0.6	1200	450	32.90	35.05	26.66
0.6	1200	350	31.10	33.25	24.69
0.6	1200	250	30.20	32.10	22.82
0.6	1200	150	30.54	33.74	20.26
0.6	1200	50	30.45	35.30	17.23
0.6	800	450	27.42	28.76	24.31
0.6	800	350	26.23	27.71	23.02
0.6	800	250	25.80	27.25	20.87
0.6	800	150	25.47	28.01	18.85
0.6	800	50	25.70	31.00	15.37
0.6	400	450	23.06	22.95	21.94
0.6	400	350	22.30	22.10	20.56
0.6	400	250	21.42	21.64	19.39
0.6	400	150	21.42	22.30	17.06
0.6	400	50	22.96	26.80	14.18

ตารางที่ ข.10 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสายรองกรณี PDF = 0.5

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.5	2000	450	47.86	52.12	29.33
0.5	2000	350	43.66	49.12	27.81
0.5	2000	250	41.42	45.51	25.51
0.5	2000	150	42.23	45.56	23.08
0.5	2000	50	46.90	57.80	21.59
0.5	1600	450	39.16	42.70	27.37
0.5	1600	350	36.51	39.82	25.44
0.5	1600	250	35.43	38.76	23.47
0.5	1600	150	35.71	38.60	21.28
0.5	1600	50	36.62	42.03	18.51
0.5	1200	450	32.18	34.72	25.14
0.5	1200	350	30.65	33.52	23.78
0.5	1200	250	29.88	32.48	21.52
0.5	1200	150	29.68	33.91	19.35
0.5	1200	50	30.05	35.69	16.34
0.5	800	450	27.33	28.31	23.44
0.5	800	350	26.02	27.53	21.94
0.5	800	250	25.68	27.13	20.01
0.5	800	150	25.41	28.17	17.83
0.5	800	50	26.06	31.14	14.86
0.5	400	450	23.05	22.82	21.26
0.5	400	350	22.28	21.75	20.10
0.5	400	250	21.40	21.47	18.59
0.5	400	150	21.25	22.62	16.39
0.5	400	50	23.16	26.89	13.90

ตารางที่ ข.11 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนทั้งโครงข่ายกรณี PDF = 0.9

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.9	2000	450	28.94	29.99	26.76
0.9	2000	350	25.40	26.08	24.01
0.9	2000	250	21.90	22.37	20.94
0.9	2000	150	18.82	18.65	17.01
0.9	2000	50	16.80	15.63	12.10
0.9	1600	450	28.04	29.26	27.13
0.9	1600	350	24.89	25.50	24.01
0.9	1600	250	21.44	21.59	20.42
0.9	1600	150	18.48	17.54	16.17
0.9	1600	50	15.79	12.69	10.62
0.9	1200	450	27.26	28.19	26.51
0.9	1200	350	24.06	24.65	23.39
0.9	1200	250	21.19	20.91	19.57
0.9	1200	150	18.02	16.40	14.72
0.9	1200	50	15.80	11.36	9.11
0.9	800	450	26.00	26.18	25.17
0.9	800	350	23.54	23.69	22.55
0.9	800	250	20.83	19.91	18.67
0.9	800	150	18.23	15.58	13.73
0.9	800	50	15.80	10.07	7.55
0.9	400	450	24.38	24.05	23.46
0.9	400	350	22.88	21.68	20.91
0.9	400	250	20.99	19.06	18.28
0.9	400	150	18.84	15.08	13.35
0.9	400	50	16.40	9.31	6.40

ตารางที่ ข.12 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนสี่เลนจราจร PDF = 0.8

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.8	2000	450	29.03	29.77	26.20
0.8	2000	350	25.46	25.97	23.72
0.8	2000	250	21.63	21.98	20.26
0.8	2000	150	18.19	17.98	16.14
0.8	2000	50	16.28	14.55	11.19
0.8	1600	450	28.09	28.80	26.29
0.8	1600	350	24.80	25.01	23.14
0.8	1600	250	21.10	21.16	19.49
0.8	1600	150	18.09	16.96	15.20
0.8	1600	50	15.39	12.18	9.85
0.8	1200	450	27.13	27.41	25.48
0.8	1200	350	23.77	24.02	22.36
0.8	1200	250	20.92	20.19	18.64
0.8	1200	150	17.82	15.84	13.89
0.8	1200	50	15.42	10.61	8.36
0.8	800	450	25.67	25.57	24.16
0.8	800	350	23.28	22.86	21.60
0.8	800	250	20.58	19.39	17.55
0.8	800	150	17.93	14.97	12.92
0.8	800	50	15.70	9.64	7.13
0.8	400	450	24.14	23.45	22.78
0.8	400	350	22.59	21.02	20.39
0.8	400	250	20.69	18.45	17.42
0.8	400	150	18.79	14.81	12.87
0.8	400	50	16.45	9.34	6.26

ตารางที่ ข.13 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนทั้งโครงข่ายกรณี PDF = 0.7

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.7	2000	450	29.26	29.20	25.37
0.7	2000	350	25.35	25.51	22.72
0.7	2000	250	21.57	21.60	19.29
0.7	2000	150	18.18	17.48	15.37
0.7	2000	50	15.76	13.66	10.28
0.7	1600	450	27.94	28.16	25.06
0.7	1600	350	24.68	24.55	22.19
0.7	1600	250	20.79	20.59	18.54
0.7	1600	150	18.01	16.54	14.30
0.7	1600	50	15.33	11.70	9.13
0.7	1200	450	26.88	26.76	24.23
0.7	1200	350	23.54	23.41	21.35
0.7	1200	250	20.75	19.61	17.59
0.7	1200	150	17.64	15.51	13.07
0.7	1200	50	15.49	10.44	7.83
0.7	800	450	25.60	24.89	23.21
0.7	800	350	23.11	22.30	20.63
0.7	800	250	20.38	18.73	16.81
0.7	800	150	17.93	14.57	12.17
0.7	800	50	15.64	9.45	6.73
0.7	400	450	23.93	22.52	21.86
0.7	400	350	22.55	20.33	19.52
0.7	400	250	20.74	18.16	16.75
0.7	400	150	18.61	14.43	12.05
0.7	400	50	16.34	9.14	6.02

ตารางที่ ข.14 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนทั้งโครงข่ายกรณี PDF = 0.6

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.6	2000	450	29.45	28.81	24.11
0.6	2000	350	25.27	25.09	21.51
0.6	2000	250	21.30	21.12	18.27
0.6	2000	150	17.53	16.89	14.06
0.6	2000	50	15.07	12.71	9.09
0.6	1600	450	27.94	27.22	23.83
0.6	1600	350	24.47	23.81	20.88
0.6	1600	250	20.38	19.90	17.28
0.6	1600	150	17.41	15.68	12.97
0.6	1600	50	14.80	10.76	8.05
0.6	1200	450	26.60	25.88	22.80
0.6	1200	350	23.19	22.61	19.97
0.6	1200	250	20.32	18.90	16.40
0.6	1200	150	17.38	14.62	11.63
0.6	1200	50	15.12	9.67	6.82
0.6	800	450	25.30	24.05	21.83
0.6	800	350	22.88	21.49	19.37
0.6	800	250	20.29	18.18	15.66
0.6	800	150	17.67	13.98	11.21
0.6	800	50	15.43	8.90	5.93
0.6	400	450	23.64	21.76	20.82
0.6	400	350	22.24	19.70	18.59
0.6	400	250	20.50	17.34	15.84
0.6	400	150	18.58	13.93	11.43
0.6	400	50	16.21	8.87	5.60

ตารางที่ ข.15 ผลจากแบบจำลองจราจรบนถนนทั้งโครงข่ายกรณี PDF = 0.5

PDF	MAJOR (veh/hr)	MINOR (veh/hr)	Stopped Time Delay (veh/s)		
			Fix	Semi	Full
0.5	2000	450	29.61	27.79	22.40
0.5	2000	350	25.35	24.32	20.10
0.5	2000	250	21.07	20.29	16.97
0.5	2000	150	17.25	16.07	12.79
0.5	2000	50	15.12	12.57	8.37
0.5	1600	450	27.76	26.44	22.07
0.5	1600	350	24.02	22.93	19.35
0.5	1600	250	20.23	19.22	15.89
0.5	1600	150	17.29	15.17	11.94
0.5	1600	50	14.88	10.38	7.21
0.5	1200	450	26.32	24.86	21.28
0.5	1200	350	22.90	21.71	18.59
0.5	1200	250	20.16	18.16	15.08
0.5	1200	150	17.04	14.13	10.68
0.5	1200	50	15.11	9.28	6.21
0.5	800	450	25.07	23.09	20.58
0.5	800	350	22.68	20.57	18.09
0.5	800	250	20.01	17.35	14.50
0.5	800	150	17.57	13.63	10.26
0.5	800	50	15.39	8.61	5.49
0.5	400	450	23.60	21.11	19.78
0.5	400	350	22.22	19.04	17.65
0.5	400	250	20.34	16.56	14.68
0.5	400	150	18.42	13.31	10.48
0.5	400	50	16.28	8.56	5.26

ประวัติผู้วิจัย



Mr. Pueboobpaphan is an Assistant Professor at Suranaree University of Technology since 2010. He obtained PhD in Urban and Environmental Engineering (Transportation Engineering) from Hokkaido University, Japan in 2006. He spent two years during 2008 - 2010 as an Assistant Professor at Centre for Transport Studies, University of Twente, the Netherland. He has more than 15 years of professional experience in traffic engineering, transport planning, and logistics engineering. He has involved in many aspects of traffic engineering and transportation planning studies including public transit planning, transportation planning, planning and development of Intelligent Transport System (ITS), and feasibility study of several transportation projects.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี