



รายงานฉบับที่ วพ. ๓๒๔ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง
REPORT NO. RD 324 BUREAU OF ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT

การตั้งเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดผลกระทบมลพิษทางอากาศ

โดย

นายพลเทพ เลิศวรรณิช

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT
RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

การตั้งเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดผลกระทบมลพิษทางอากาศ

โดย

นาย พลเทพ เลิศวรรณิช

รายงานฉบับที่ วพ. ๓๒๔

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง
กรมทางหลวง

กุมภาพันธ์ ๒๕๖๘

ISSN 0125-8044

รายงานนี้เป็นความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

คำนำ

กรมทางหลวง เป็นหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบด้าน การวางแผน การออกแบบ การก่อสร้าง และ การบำรุงรักษาทางหลวงแผ่นดินทั่วประเทศไทย โดยมีพันธกิจทั้งในด้านการส่งเสริมความมีประสิทธิภาพของการขนส่งทางถนนและอำนวยความสะดวกแก่สาธารณะโดยพร้อมกัน

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยกเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศต่อหน่วยเวลาซึ่งจะช่วยบรรเทาปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรที่บริเวณทางแยกได้ โดยผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรให้มีความเหมาะสมกับสภาพการจราจรมากยิ่งขึ้นได้


(นายอภิรัฐ ไชยวงศ์น้อย)
อธิบดีกรมทางหลวง

บทคัดย่อ

ทางแยกสัญญาณไฟจราจรพบได้ทั่วไปบริเวณจุดตัดของทางหลวงแผ่นดิน หากมีจังหวะสัญญาณไฟจราจรที่ไม่เหมาะสมหรือไม่สอดคล้องกับสภาพการจราจรก็เป็นสาเหตุหลักของความล่าช้าในการเดินทางรวมทั้งการสูญเสียทรัพยากรน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้การตั้งค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่ไม่เหมาะสมยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศบริเวณทางแยกอีกด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ โดยพิจารณาผลกระทบการปล่อยมลพิษของรถยนต์ขณะทำงานในโหมด 1) ขณะเดินเครื่องเบา (Idling) 2) ขณะเร่งความเร็ว (Accelerating) 3) ขณะชะลอความเร็ว (Decelerating) และ 4) ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (Cruising) โดยพบว่าค่ารอบเวลา (Cycle Length) ที่ยาวนานขึ้นจะทำให้ความล่าช้าของกระแสจราจรต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้จำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาลดลง ดังนั้นค่าเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างความล่าช้าและจำนวนการหยุดของรถยนต์ จากนั้นประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้กับทางแยกที่มีปริมาณจราจรแตกต่างกัน โดยผลการทดลองพบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟที่ช่วยลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศลงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Webster (1958) ซึ่งเป็นวิธีที่มักใช้คำนวณกันทั่วไป วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบรรเทาปัญหามลพิษทางอากาศบริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจรได้

Disclaimer

The contents of this report reflect only the views of the authors. Who are responsible for the facts and the accuracy of the data presented herein only. The contents do not necessarily reflect the official views or policies of the Department of Highways, Thailand. This report does not constitute any standard, specification, or regulation.

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iv
1. บทนำ	1
2. วรรณกรรมทบทวน	3
3. การคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศสำหรับทางแยกเดี่ยว	13
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้า จำนวนหยุดบริเวณทางแยกและค่ารอบเวลาของสัญญาณไฟจราจร	13
3.2 การคำนวณปริมาณมลพิษทางอากาศเนื่องจากสัญญาณไฟจราจร	15
3.3 การคำนวณสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ	17
4. กรณีศึกษา	19
5. บทสรุปและแนวทางการวิจัยในอนาคต	24
เอกสารอ้างอิง	26

บทที่ 1

บทนำ

การจราจรติดขัดบริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจรเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งในด้านความล่าช้าในการเดินทาง และน้ำมันเชื้อเพลิงที่นับวันยังมีราคาสูงขึ้น กรมทางหลวงเป็นหน่วยงานที่ต้องดูแลทางหลวงแผ่นดินทั่วประเทศ ซึ่งมีทางแยกสัญญาณไฟจราจรประมาณ 2,200 ทางแยกอยู่ในความรับผิดชอบ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการออกแบบจังหวะสัญญาณไฟจราจรให้มีความเหมาะสม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการเดินทาง ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่าในเขตเมืองการจราจรติดขัดเป็นปัญหาสำคัญ ตามรายงานของ [Lee et al. (2019)] ภาคการขนส่งมีส่วนรับผิดชอบต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25% ของโลกโดยการขนส่งทางถนนมีส่วนรับผิดชอบต่อการปล่อยก๊าซ 75% ของการขนส่งทั้งหมด นอกจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแล้วการขนส่งยังก่อให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัด มลพิษทางเสียง และอุบัติเหตุทางถนนอีกด้วย การเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาส่งผลให้การใช้ยานยนต์เพิ่มขึ้น และส่งผลให้การครอบครองยานยนต์สองล้อและสี่ล้อเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในศูนย์กลางเมือง เมืองต่างๆในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกมีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 75% ของภูมิภาค ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของเมือง

ในเมืองสัญญาณไฟจราจรเป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมการจราจรเพื่อให้แน่ใจว่ารถยนต์และคนเดินถนนที่สวนทางกันสามารถข้ามผ่านได้อย่างปลอดภัย การจราจรติดขัดที่ทางแยกในเขตเมืองถือเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษหลัก ความรุนแรงของมลพิษจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อการจราจรติดขัดและเกิดการเคลื่อนตัวสลับหยุดนิ่งแบบบ่อยครั้งที่ทางแยก ซึ่งรถยนต์จะสลับการทำงานในโหมดต่างๆ (Operating Modes) เช่น การเดินเบา (Idling) เร่งความเร็ว (Accelerating) ลดความเร็ว (Decelerating) และวิ่งด้วยความเร็วคงที่ (Cruising) เมื่อปริมาณจราจรเพิ่มขึ้นการทำงานของสัญญาณไฟจึงมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ การควบคุมสัญญาณไฟที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดการจราจรติดขัด ในขณะที่การควบคุมสัญญาณไฟที่ไม่ดีอาจส่งผลให้เกิดการจราจรติดขัดและปัญหามลพิษทางอากาศอย่างรุนแรงที่จะตามมา

ปริมาณความต้องการการเดินทางหรือปริมาณจราจรขึ้นอยู่กับเวลา วัน ฤดูกาล สภาพอากาศ และสถานการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ เช่น อุบัติเหตุ เหตุการณ์พิเศษ หรือกิจกรรมการก่อสร้าง ปัจจุบันเมืองต่างๆ ในทวีปต่างๆ ได้นำระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรมาใช้ ซึ่งสามารถปรับแผนสัญญาณไฟให้เหมาะสมได้อย่างต่อเนื่องตามความปริมาณจราจรจริง นับตั้งแต่ ค.ศ. 1958 ซึ่ง [Webster (1958)] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณเวลาสัญญาณไฟ นักวิจัยด้านการจราจรได้พัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมสัญญาณไฟออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดความล่าช้าโดยรวมให้ต่ำที่สุด (Minimum Delay Objective) แต่จากการศึกษาจำนวนมาก อาทิ [Ma and Nakamura (2010)] [Coelho, Farias, and Rouphail (2005a) and (2005b)] และ [Qian et al. (2013)] พบว่าการออกแบบเวลาและจังหวะสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดการปล่อยมลพิษทางอากาศที่ต่ำที่สุด (Minimum Emission Objective) จะให้ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรแตกต่างจากการออกแบบสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดค่าล่าช้าโดยรวมให้ต่ำที่สุด ทั้งในแง่ของค่ารอบเวลา (Cycle Length) และค่าสัดส่วนของเฟส (Split) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานดังนี้

- เพื่อศึกษาและทบทวนวิธีการออกแบบจังหวะสัญญาณไฟจราจร
- เพื่อพัฒนาวิธีการคำนวณเวลาสัญญาณไฟจราจรที่สามารถช่วยลดการปล่อยมลพิษทางอากาศจากรถยนต์ สำหรับทางแยกเดี่ยว (Isolated Signalized Intersections)

โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

- ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาความล่าช้าบริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจร และการออกแบบจังหวะสัญญาณไฟจราจร
- พัฒนารูปแบบการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่สามารถช่วยลดการปล่อยมลพิษทางอากาศจากรถยนต์ (Emission-Control Signal Timing) สำหรับทางแยกเดี่ยว (Isolated Signalized Intersections)
- ทดลองกรณีศึกษาโดยการประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Traffic Simulation
- สรุปผลและเผยแพร่ผลการวิจัย

ในส่วนอื่นของรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง อาทิ บทความที่มีเนื้อหาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์ความล่าช้า และการควบคุมทางแยกสัญญาณไฟจราจรในลักษณะต่างๆ จะนำเสนอในบทที่ 2 สำหรับบทที่ 3 จะนำเสนอวิธีการคำนวณเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดการปล่อยมลพิษทางอากาศจากรถยนต์สำหรับทางแยกเดี่ยว ในบทที่ 4 จะประยุกต์ใช้วิธีการที่พัฒนาขึ้น โดยทดลองกับทางแยกเดี่ยวที่มีปริมาณจราจรต่างๆกัน และทำการเปรียบเทียบผลก่อน-หลังบนโปรแกรม Traffic Simulation บทสรุปและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไปในอนาคตได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 เป็นส่วนสุดท้าย

บทที่ 2

วรรณกรรมทบทวน

ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมและออกแบบสัญญาณไฟจราจร โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 พื้นฐานและเบื้องต้น

วัตถุประสงค์หลักในการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยก คือ เพื่อจัดการกระแสจราจรที่ติดขัดกันบริเวณทางแยกให้สามารถเดินทางผ่านไปได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพไม่เกิดความล่าช้าในการเดินทางโดยแยกกระแสจราจรให้ใช้พื้นที่ร่วมกันบริเวณทางแยกคนละช่วงเวลา จากประวัติพบว่าสัญญาณไฟจราจรตัวแรกถูกติดตั้งที่หน้ารัฐสภาของประเทศอังกฤษในปี 1868 หลังจากนั้นเป็นต้นมาเทคโนโลยีได้ถูกนำมาพัฒนาระบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรอย่างต่อเนื่อง การควบคุมสัญญาณไฟสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของวิธีการกำหนดสัญญาณไฟในแต่ละจังหวัดดังนี้

- การควบคุมแบบคงที่ (Fixed-time) : จังหวะสัญญาณไฟจะถูกเลือกจากรูปแบบของจังหวะสัญญาณไฟจราจรที่ได้ออกแบบไว้ล่วงหน้า โดยใช้ข้อมูลที่เก็บมาก่อนในอดีต ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการจราจร การควบคุมแบบคงที่ จะไม่สามารถปรับให้เหมาะสมกับสภาพการจราจร
- การควบคุมแบบตอบสนอง (Actuated Control) : การควบคุมแบบนี้ใช้การเชื่อมโยงระหว่างเครื่องตรวจจับปริมาณการจราจร (Detectors) และจังหวะสัญญาณไฟจราจร โดยปกติแล้วเฟสของจังหวะไฟจะเริ่มต้นจากค่าไฟเขียวต่ำสุด (Minimum Green) และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมีรถยนต์เคลื่อนมาที่เครื่องตรวจจับปริมาณการจราจร ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเฟสจะสั้นหรือยาวขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรว่ามีมากหรือน้อย
- การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ (Adaptive Control) การควบคุมแบบนี้จะคล้ายกับการควบคุมแบบตอบสนอง ตรงที่จังหวะสัญญาณไฟจราจรจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพการจราจรที่วัดจากเครื่องตรวจจับ ปริมาณการจราจร แต่สิ่งที่แตกต่างคือ การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติจะมีการคาดการณ์ในอนาคตว่าปริมาณการจราจรเป็นอย่างไรต่อไป จากนั้นก็คำนวณหาจังหวะสัญญาณไฟจราจรที่มีความเหมาะสมที่สุด

2.2 การวิเคราะห์ความจุและความล่าช้าในการเดินทางบริเวณทางแยกสัญญาณไฟ

วัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์ความจุ คือ ต้องการทราบว่าจำนวนรถยนต์ที่มากที่สุดที่สามารถผ่านทางแยกสัญญาณไฟจราจรต่อหน่วยเวลาเป็นเท่าไร ในกรณีที่ เป็นโครงข่ายจราจรเช่นเดียวกันสิ่งที่เราต้องการทราบ คือ ปริมาณการจราจรมากที่สุดที่โครงข่ายสามารถรองรับได้เป็นเท่าไรในส่วนนี้จะอธิบายถึงหลักเบื้องต้นในการวิเคราะห์หาความจุของทางแยกสัญญาณไฟจราจร

ในการวิเคราะห์ความจุของทางแยกสัญญาณไฟจราจรจะต้องพิจารณา 1) ปริมาณจราจรแยกตามทิศทางและชนิดของยานพาหนะ, 2) สภาพทางเรขาคณิตของทางแยกและ 3) สภาพหรือลักษณะของสัญญาณไฟจราจร ซึ่งมีคำนิยามเบื้องต้นดังนี้คือ

- ค่ารอบเวลา (Cycle Length) : ช่วงเวลาทั้งหมดสำหรับแสดงจังหวะสัญญาณไฟจราจรจนครบทุกเฟส
- เฟส(Phase) : ส่วนของค่ารอบของเวลาที่แบ่งให้จราจรในแต่ละส่วนที่ได้รับสิทธิในการใช้ทาง(Right-of-way) พร้อมกับเคลื่อนที่ไป
- สัดส่วนของเฟส (Split) : สัดส่วนของไฟเขียวของแต่ละเฟสต่อค่ารอบของเวลา
- ค่าเวลาสูญเสีย (Lost Time) : ช่วงเวลาที่ทางแยกไม่ได้ถูกใช้ประโยชน์โดยจราจรซึ่งปกติคือช่วงที่เปลี่ยนเฟสและช่วงเริ่มต้นของเฟส ซึ่งรถยนต์บางส่วนต้องเสียเวลาในการเร่งและออกตัวจากสภาพหยุดนิ่งโดยส่วนนี้เรียกว่า (Start-up Lost Times)
- ค่าเหลื่อมเวลา (Offset) : ระยะเวลาที่แตกต่างของจังหวะเริ่มต้นของสัญญาณไฟเขียวของทางแยกที่อยู่ติดกัน
- อัตราไหลอิ่มตัว (Saturation Flow) : อัตราการไหลของจราจรที่สามารถเดินทางผ่านทางแยกได้ในลักษณะที่มีแถวคอยยาวต่อเนื่อง

2.2.1 การวิเคราะห์ความจุของทางแยก

ในการวิเคราะห์หาความจุของทางแยกจะพิจารณาจากกลุ่มของช่องจราจร เมื่อได้รับสัญญาณไฟเขียวแล้วสามารถเคลื่อนที่ไปได้พร้อมกันซึ่งเรียกว่า Lane Group โดยความจุของแต่ละกลุ่มช่องจราจรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_i = S_i \left(\frac{g_i}{C} \right)$$

โดยที่ C_i คือ ความจุของกลุ่มช่องจราจร “ i ”

S_i คือ อัตราการไหลอิ่มตัวของกลุ่มช่องจราจร “ i ”

g_i คือ ระยะเวลาไฟเขียวที่ใช้ประโยชน์ได้ของกลุ่มช่องจราจร “ i ”

C คือ ค่ารอบของเวลา

อัตราส่วนระหว่างปริมาณจราจรต่อความจุจะใช้ในการบ่งบอกถึงระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ของแต่ละกลุ่มช่องจราจร ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$X_i = \frac{V_i}{C_i} = \frac{V_i C}{S_i G_i}$$

โดยที่ X_i คือ ระดับความอิ่มตัวของกลุ่มช่องจราจร “ i ”

V_i คือ ปริมาณจราจรของกลุ่มช่องจราจร “ i ”

กลุ่มช่องจราจรจะถูกจำแนกเป็น 1) อยู่ต่ำกว่าระดับอิ่มตัว (Undersaturated) ถ้า X_i ต่ำกว่า 1.0 และ 2) สูงกว่าระดับอิ่มตัว (Oversaturated) ถ้า X_i สูงกว่า 1.0 โดยระดับความอิ่มตัวของทั้งทางแยกจะพิจารณาจาก

ระดับความอิ่มตัววิกฤต X_i ซึ่งจะพิจารณาจากกลุ่มช่องจราจรที่มีค่าอัตราส่วนปริมาณจราจรต่ออัตราการใช้เลนที่ต่ำสุดในแต่ละเฟส ในกรณีของทางแยกที่จราจรทิศเหนือและทิศใต้เคลื่อนที่พร้อมกันก็ให้พิจารณาอัตราส่วนดังกล่าวของกลุ่มช่องจราจรที่สูงกว่าดั่งนั้นในแต่ละเฟสหรือจังหวะสัญญาณไฟก็จะมีกลุ่มช่องจราจรที่มีระดับความอิ่มตัววิกฤตสำหรับระดับความอิ่มตัววิกฤตของทั้งทางแยก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$X_c = \sum \frac{V_i}{S_i} \left[\frac{C}{C-L} \right]$$

โดยที่

X_c คือ อัตราส่วนระดับความอิ่มตัววิกฤตของทางแยก

$\frac{V_i}{S_i}$ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณจราจรและอัตราการใช้เลนที่ต่ำสุดของกลุ่มช่องจราจร “i”

L คือ ค่าเวลาสูญเสีย

C คือ ค่ารอบของเวลา

ถ้าระดับความอิ่มตัววิกฤตของทางแยกน้อยกว่า 1.0 นั้นแสดงว่าทางแยกสามารถรองรับปริมาณการจราจรที่ต้องการผ่านทางแยกได้ตามค่ารอบของเวลาที่กำหนดไว้ ถ้าระดับความอิ่มตัววิกฤตของทางแยกสูงกว่า 1.0 นั้นหมายความว่าทางแยกอยู่ในสภาพสูงกว่าระดับอิ่มตัว (Oversaturated)

2.2.2 การคำนวณสัญญาณไฟจราจรของWebster

Webster ได้เสนอวิธีในการคำนวณหาความล่าช้าในการเดินทางผ่านทางแยก โดยใช้โปรแกรมแบบจำลองทางจราจร โดยมีสมมุติฐานว่าระดับความอิ่มตัวของทางแยกน้อยกว่า 1.0 และลักษณะการมาของจราจรเป็นแบบสุ่ม ซึ่งมีสูตรคำนวณความล่าช้าในการเดินทางดังนี้

$$d = \frac{k(1-\frac{g}{c})^2}{2[1-(\frac{g}{c})x]} + \frac{x^2}{2v(1-v^2)} - 0.65\left(\frac{c}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5(\frac{g}{c})}$$

โดยที่ d คือ ความล่าช้าในการเดินทางโดยเฉลี่ยของกลุ่มช่องจราจร

g คือ ระยะเวลาไฟเขียวที่ใช้ประโยชน์ได้ของกลุ่มช่องจราจร

x คือ ระดับความอิ่มตัวของกลุ่มช่องจราจร

c คือ ค่ารอบของเวลา

k คือ ค่าคงที่

เทอมแรกแสดงความล่าช้าเมื่อสภาพการมาเป็นลักษณะแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) เทอมที่สองคือความล่าช้าจากการมาแบบสุ่มของจราจร (Random Arrival) เทอมที่สามคือส่วนปรับแก้ที่คำนวณมาจาก Simulation สำหรับการคำนวณหาการรอบของเวลาที่เหมาะสมนั้น Webster ได้ให้สูตรไว้ดังนี้

$$Copt = \frac{1.5L + 5}{1 - X_c}$$

โดยที่ X_c คือ ระดับความอึดตัวของทางแยก

$Copt$ คือ ค่ารอบของเวลาที่เหมาะสม

L คือ ค่าเวลาสูญเสีย

ทั้งนี้ในบทความ Webster (1958) เมื่อคำนวณค่ารอบเวลาที่เหมาะสมที่สามไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา ในแต่ละเฟส ค่าสัดส่วนของเฟสจะคำนวณจากการแบ่งตามสัดส่วนของอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณจราจรและ อัตราการไหลอึดตัวของแต่ละจังหวะสัญญาณไฟ ซึ่งตามหลักการนี้จะทำให้ระดับความอึดตัวของทุกกลุ่มจราจรวิกฤตมีค่าเท่ากัน(Equalizing Degree of Saturation) สูตรดังกล่าวของ Webster (1958) นี้ใช้เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับวิธีการในการคำนวณอื่นๆ

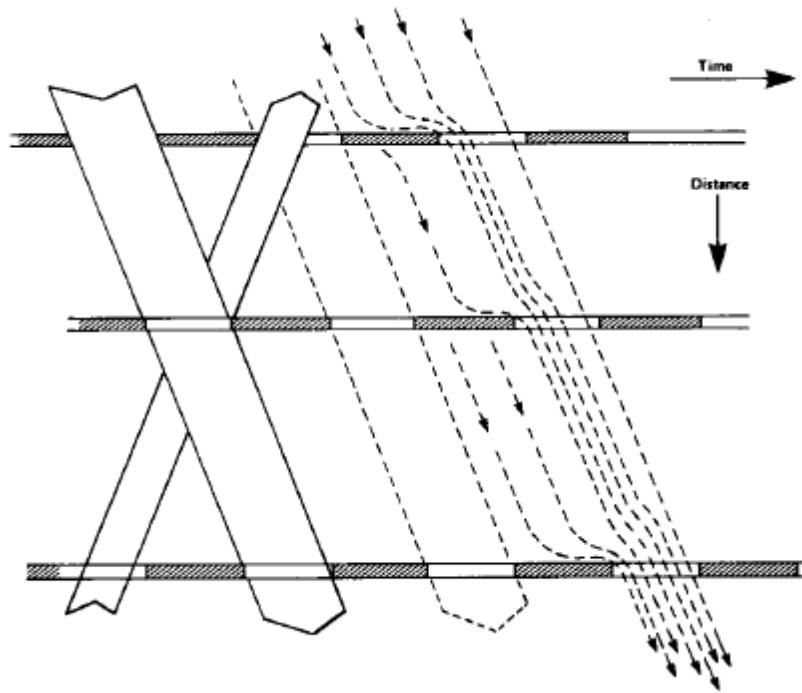
2.3 การควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบเป็นพื้นที่

ในโครงข่ายจราจรที่มีทางแยกสัญญาณไฟจราจรอยู่อย่างหนาแน่น การประสานทางแยก (Coordination) เข้าเป็นระบบจะมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโครงข่าย โดยปกติของรถยนต์เมื่อมีการเคลื่อนตัวออกจากแถวคอยที่ทางแยกออกมาเป็นกลุ่ม (Platoon) แล้วจะค่อยๆ กระจายตัวออกเป็นคันๆ เมื่อเคลื่อนตัวห่างออกไป ดังนั้นถ้าทางแยกสัญญาณไฟจราจรอยู่ใกล้กัน กลุ่มของรถยนต์ยังไม่กระจายตัวออกจากกัน เมื่อเคลื่อนตัวมาถึงแยกถัดไป การเคลื่อนตัวของกลุ่มรถยนต์ดังกล่าวนี้ผ่านหลายๆทางแยกจะเรียกว่า Progression ดังนั้นถ้ามีการประสานสัญญาณไฟจราจรของแต่ละทางแยกอย่างเหมาะสมแล้วก็จะทำให้ความล่าช้าในการเดินทางลดลงอย่างมากและทำให้การจราจรมีประสิทธิภาพมากขึ้น

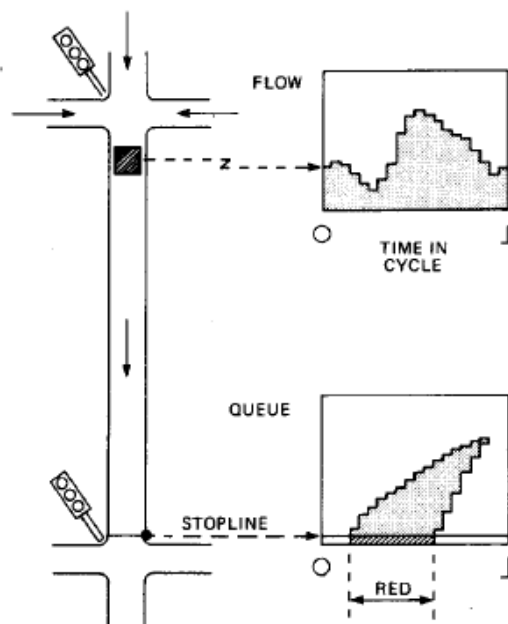
2.3.1 การควบคุมเป็นพื้นที่คงที่ (Fixed-time Control)

ในการประสานทางแยกสัญญาณไฟจราจรในโครงข่ายมีข้อกำหนดที่สำคัญคือทุกทางแยกที่จะทำการประสานจังหวะสัญญาณไฟจราจรต้องมีค่ารอบเวลาเท่ากัน (Common Cycle Length) ซึ่งนั่นแสดงว่าทางแยกที่ต้องใช้ค่ารอบของเวลาสูงที่สุด จะเป็นตัวกำหนดค่ารอบของเวลาของทางแยกอื่นๆที่เหลือทั้งหมดในโครงข่ายด้วย เมื่อทราบค่ารอบของเวลาแล้ว จังหวะและสัดส่วนของสัญญาณไฟจราจรแต่ละเฟสก็就会被คำนวณให้แต่ละทางแยก หลังจากนั้นค่าเหลื่อมของเวลา (offset) ก็จะถูกคำนวณเพื่อสามารถประสานการทำงานระหว่างทางแยกได้ วิธีการคำนวณสัญญาณไฟจราจรแบบประสานนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ

- Progression – based Method : มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ Bandwidth หรือช่วงเวลาไฟเขียวที่รถยนต์สามารถเคลื่อนผ่านทุกทางแยกโดยไม่ต้องหยุดรถเลย มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งโปรแกรมที่ใช้หลักการนี้ในการคำนวณ ได้แก่ MAXBAND , PASSER และ MULTIBAND
- Disutility – based Method : มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ disutility ในการเดินทาง เช่น ความล่าช้า และจำนวนการหยุดรถมีค่าน้อยที่สุด โปรแกรมที่ใช้หลักการนี้ในการคำนวณ ได้แก่ TRANSYT และ SYNCHRO



รูปที่ 2.1: Maximum Bandwidth Concept



รูปที่ 2.2: Cyclic Flow Profile of TRANSYT

2.3.2 การควบคุมเป็นพื้นที่แบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติ

ปริมาณการจราจรมักจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา วัน ฤดูกาล สภาพอากาศและเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด เช่น อุบัติเหตุ เหตุการณ์พิเศษหรือกิจกรรมการก่อสร้างทางถนน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จำเป็นต้องถูกรวมเข้าไป

พิจารณาโดยระบบการควบคุมเป็นพื้นที่แบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติเพื่อป้องกันการเกิดจุกคอขวดและความล่าช้าในการเดินทาง ซึ่งระบบการควบคุมเหล่านี้สามารถตรวจนับปริมาณการจราจรและคำนวณค่าจหนะสัญญาณไฟได้อย่างต่อเนื่อง

การควบคุมสัญญาณไฟจราจรเป็นพื้นที่แบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติสามารถจำแนกตามยุคได้ดังนี้ ยุคที่หนึ่ง การควบคุมสัญญาณไฟจราจรใช้ข้อมูลที่ได้เก็บไว้ในอดีตในการกำหนดจหนะสัญญาณไฟจราจรซึ่งได้คำนวณไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งจะเก็บไว้ในรูปแบบของแผนจหนะสัญญาณไฟจราจรโดยอาจจะมีอยู่หลายแผนตามช่วงเวลาและวันของสัปดาห์ จะเห็นได้ว่าการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเป็นพื้นที่ของระบบในยุคที่หนึ่งนี้ มีข้อจำกัดในแง่ความเหมาะสมของแผนเมื่อเทียบกับปริมาณการจราจรจริงเนื่องจากไม่ได้คำนวณจหนะสัญญาณไฟจากข้อมูลจริงในขณะนั้น อีกทั้งไม่มีการตรวจนับปริมาณจราจรจากเครื่องตรวจนับ สำหรับยุคที่สองของระบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเป็นพื้นที่นั้นจะคำนวณจหนะสัญญาณไฟจราจรแบบออนไลน์ (On-Line) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องตรวจนับ โดยจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของจหนะสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมกับสภาพการจราจรในขณะนั้นทุกๆ ห้านาที อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันให้ไม่เกิดความแปรปรวนของจราจร (Disturbance) จหนะสัญญาณไฟจราจรใหม่ที่คำนวณได้จะถูกนำไปใช้ทุกๆ สิบนาที สำหรับยุคที่สามของระบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเป็นพื้นที่นั้นจะคล้ายคลึงกับยุคที่สองแต่ข้อแตกต่างคือ ยุคที่สามจะมีการปรับเปลี่ยนจหนะสัญญาณไฟจราจรที่ถี่กว่าและยอมให้ค่ารอบของเวลาของความแตกต่างสำหรับแต่ละทางแยกในโครงข่าย ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างระบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเป็นพื้นที่มาพิจารณาดังนี้

MODERATO :

MODERATO ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่นโดยจะคำนวณจหนะสัญญาณไฟจราจรแบบ Real-time ใช้การคำนวณของสัดส่วนของจหนะ (Split) แทนที่จะใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณจราจรต่ออัตราการไหลอิมตัว MODERATO ใช้อัตราส่วนที่เรียกว่า Loading Ratio โดยคำนวณถึงทั้งปริมาณจราจรและความยาวของแถวคอยของกลุ่มช่องจราจรไปพร้อมกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

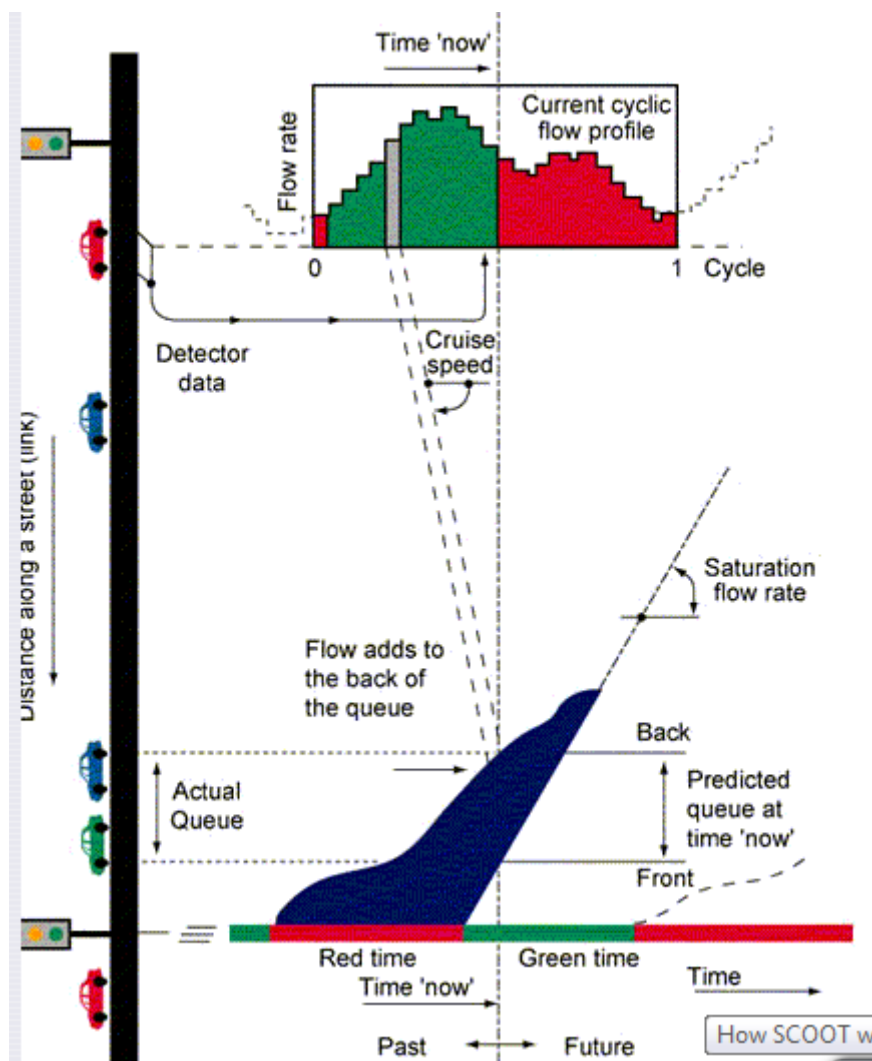
$$\rho_i = \frac{V_i + E_i}{S_i}$$

โดยที่ ρ_i คือ loading ratio ของกลุ่มช่องจราจร “ i ”
 V_i คือ ปริมาณการจราจรของกลุ่มช่องจราจร “ i ”
 E_i คือ จำนวนรถที่อยู่ในแถวคอยของกลุ่มช่องจราจร “ i ”
 S_i คือ อัตราไหลอิมตัวของกลุ่มช่องจราจร “ i ”

เมื่อนำเอาความยาวแถวคอยเข้ามารวมด้วย ดังนั้นสามารถคำนวณได้ทั้งสภาพการจราจรแบบต่ำกว่าอิมตัว (Undersaturated) และสูงกว่าอิมตัว (Oversaturated) โดยใช้วิธีการเดิมในการคำนวณสัดส่วนของเฟสสำหรับค่ารอบเวลาจะคำนวณได้จากสูตรของ Webster (1958) และค่าเหลื่อมของเวลาจะคำนวณจากแบบจำลอง TRANSYT

SCOOT :

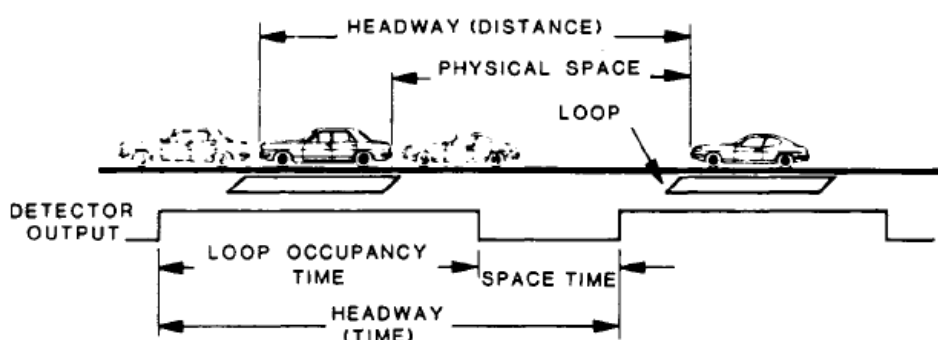
SCOOT (Split,Cycle,and Offset Optimization Techniue) ถูกพัฒนาขึ้นโดยประเทศอังกฤษ โดยเป็นระบบศูนย์รวมเพื่อคำนวณจังหวะสัญญาณไฟจราจรแบบออนไลน์ (On-Line) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มหรือลดค่าพารามิเตอร์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน การคำนวณจะทำการหาค่าสัดส่วนของเฟส ค่าเหลือเวลาและค่ารอบของเวลา ระบบจะพยากรณ์ลักษณะการเข้ามาของจราจรโดยพิจารณาข้อมูลที่เก็บจากเครื่องตรวจจับปริมาณจราจรที่ติดตั้งไว้ก่อนเข้าทางแยก ลักษณะการเข้ามาของจราจรจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับลักษณะการออกซึ่งผลต่างก็คือความล่าช้าในการเดินทางและความยาวแถวคอยรูปแบบดังกล่าวนี้จะคำนวณในรอบของจังหวะสัญญาณไฟจราจรสำหรับการคำนวณค่าสัดส่วนของเฟสนั้น SCOOT จะทดลองปรับค่าขึ้นหรือลงเพียงเล็กน้อยของทุกกลุ่มช่องจราจรแล้วหาว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงทำให้ความล่าช้าในการเดินทางของทั้งระบบดีขึ้น ในการคำนวณหาค่าเหลือเวลาใช้ cycle profile และ hill – climbing technique เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้เกิด progression ของการไหลของจราจรบนถนนสายหลักที่ต้องการประสานเชื่อมโยงทางแยก สำหรับค่ารอบของเวลาระบบจะปรับขึ้นถ้าทางแยกมีปริมาณจราจรมากกว่าความจุและปรับลดลงถ้ามีปริมาณจราจรต่ำกว่าความจุ



รูปที่ 2.3: SCOOT System Concept

SCATS :

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศออสเตรเลีย โดยมีการทำงานเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1) คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง (Central Computer), 2) คอมพิวเตอร์ส่วนพื้นที่ (Regional Computer) และ 3) คอมพิวเตอร์ส่วนท้องถิ่น (Local Computer) ในการควบคุมโครงข่ายจราจร ระบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบนี้ใช้หลักการของระดับความอิ่มตัว (Degree of saturation) ในการคำนวณหาค่ารอบเวลาของเวลาและสัดส่วนของเฟสโดยจะทำการวัดระดับความอิ่มตัวของแต่ละกลุ่มช่องจราจร จากนั้นจะพยายามทำให้ระดับความอิ่มตัวของแต่ละกลุ่มช่องจราจรมีค่าเท่ากัน สำหรับค่าเหลื่อมเวลาจะพิจารณาจากข้อมูลในอดีตที่คำนวณไว้ก่อนหน้านี้ และทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในรอบของจังหวะสัญญาณไฟจราจร



รูปที่ 2.4: SCATS Degree of Saturation Estimation

2.4 การควบคุมสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดมลพิษทางอากาศ (Emission-Control Traffic Signal)

[Coelho, Farias and Rouphail (2005a) และ (2005b)] ศึกษาผลกระทบของสัญญาณไฟจราจร ควบคุมความเร็วต่อการปล่อยมลพิษ โดยคำนวณการปล่อยมลพิษจากอัตราการปล่อยมลพิษและเวลาที่ ยานพาหนะใช้ในแต่ละโหนดการทำงาน ได้แก่ การเร่งความเร็ว การชะลอความเร็ว การเดินเบา และการขับ ขึ้นด้วยความเร็วคงที่ปกติ พวกเขาพบว่ารูปแบบการควบคุมสัญญาณไฟที่ส่งผลให้ผู้ฝ่าฝืนความเร็วหยุดรถได้มาก ขึ้นยังส่งผลให้มีการปล่อยมลพิษสูงขึ้นด้วย

[Pandian, Gokhale and Ghoshal (2009)] ได้ทำการทบทวนเกี่ยวกับผลกระทบของการจราจร ยานพาหนะ และลักษณะของถนนต่อการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ พบว่าการปล่อยมลพิษใกล้ทางแยก ขึ้นอยู่กับความเร็วในการขับขึ้น อัตราการชะลอความเร็ว เวลาในการเดินเบาในแถวคอย อัตราการเร่งความเร็ว ความยาวของแถวคอย อัตราการไหลของการจราจร และสภาพแวดล้อม องค์ประกอบของยานพาหนะ

[Ma and Nakamura (2010)] ได้ตรวจสอบค่ารอบเวลา (Cycle Length) ของทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจรโดยพิจารณาจากมุมมองของการปล่อยมลพิษ โดยแบ่งการปล่อยมลพิษออกเป็นพื้นที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ชะลอความเร็ว เร่งความเร็ว และเดินเบา โดยการปล่อยมลพิษที่ทางแยกถูกจำลองเป็นฟังก์ชันของค่ารอบเวลา โดยจะคำนวณค่ารอบเวลาที่เหมาะสมที่สุดโดยการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันการปล่อยมลพิษที่ทางแยกเทียบกับค่ารอบเวลา ซึ่งพบว่าค่ารอบเวลาที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากการปล่อยมลพิษจะ

แตกต่างจากค่ารอบเวลาที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากการทำให้ความล่าช้าต่ำที่สุด และความแตกต่างของค่ารอบเวลาจากทั้งสองมุมมองนี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อการจราจรมีความเร็วสูงหรืออัตราส่วนของรถบรรทุกในกระแสจราจรสูง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นตัวบ่งชี้ได้อย่างดีว่าค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่คำนวณโดยวิธี [Webster (1958)] ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความล่าช้าจะไม่ใช้คำตอบที่เหมาะสมเสมอไปเมื่อต้องการลดการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ

[Lv and Zhang (2012)] ตรวจสอบผลกระทบของการประสานสัญญาณไฟจราจร (Signal Coordination) ต่อการปล่อยมลพิษจากการจราจรด้วยโปรแกรม Traffic Simulation พบว่าค่าเหลื่อมเวลา (Offset) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการปล่อยมลพิษ ความล่าช้า และจำนวนการหยุดของรถ โดยที่จำนวนการหยุดของรถมีความสัมพันธ์กับการปล่อยมลพิษมากกว่าความล่าช้า

[Lv, Zhang, and Zietsman (2013)] พบว่าเมื่อความล่าช้าเพิ่มขึ้น การปล่อยมลพิษจะเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นนั้นเพิ่มด้วยอัตราที่ลดลงและในที่สุดก็เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อค่ารอบเวลาเพิ่มขึ้น ความล่าช้าจะเพิ่มขึ้น แต่การปล่อยมลพิษลดลง การเพิ่มขึ้นของความล่าช้าเกิดจากเวลาเดินเบา (Idling Time) ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของเวลาเดินเบา (Idling Time) ต่อการปล่อยมลพิษทั้งหมดสามารถละเลยได้ เนื่องจากอัตราการปล่อยมลพิษจากการเร่งความเร็วจะมากกว่าอัตราการปล่อยมลพิษจากการเดินเบามาก

[Qian et al. (2013)] เสนอแบบจำลองการคำนวณสัญญาณไฟจราจรที่ลดการปล่อยมลพิษสำหรับทางแยกเดี่ยว โดยที่การปล่อยมลพิษนั้นประมาณจากเวลาที่ยานพาหนะใช้ในโหมดการทำงานที่แตกต่างกัน โดยความล่าช้าและจำนวนการหยุดของรถถูกคำนวณโดยใช้วิธีของ Webster (1958) จากนั้นแบบจำลองดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้กับทางแยกแห่งหนึ่งในเมืองเซินเจิ้น ประเทศจีน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของพวกเขาสามารถปรับปรุงความจุได้ แต่ไม่สามารถการปรับปรุงการปล่อยมลพิษและความล่าช้าลงได้

[Anyu et al. (2014)] นำเสนอวิธีการเปรียบเทียบแบบจำลอง AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) เพื่อทำนายการปล่อยมลพิษ พวกเขารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและความเร็วของยานพาหนะเพื่อสร้างแนวการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และใช้ข้อมูลดังกล่าวในการเปรียบเทียบแบบจำลองการจำลอง AIMSUN โดยใช้การวัด เช่น ความเร็วสูงสุดที่ต้องการ ความเร่งที่ต้องการสูงสุด และอัตราการชะลอ ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่เปรียบเทียบแล้วให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้เปรียบเทียบ

[Khalighi and Christofa (2015)] ได้พัฒนาการคำนวณสัญญาณไฟจราจรโดยใช้ร่วมกับแบบจำลอง AIMSUN โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดการปล่อยมลพิษ การปล่อยมลพิษจะประเมินจากเวลาที่ยานพาหนะใช้ในโหมดเร่งความเร็ว ชะลอความเร็ว เดินทางด้วยความเร็วคงที่ และเดินเบา ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของพวกเขาสามารถลดการปล่อยมลพิษและความล่าช้าได้

[Calle-Laguna et al. (2019)] นำแบบจำลอง INTEGRATION มาใช้ตรวจสอบผลกระทบของค่ารอบเวลาต่อความล่าช้า ระดับการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษ สมการค่ารอบเวลาที่เหมาะสมสำหรับความล่าช้าขั้นต่ำ การใช้เชื้อเพลิงขั้นต่ำ และการปล่อย CO₂ ขั้นต่ำ คำนวณได้โดยสร้างความสัมพันธ์ (Regression) การถดถอยระหว่างค่ารอบเวลา และอัตราส่วนของเวลาที่สูญเสียไปซึ่งเท่ากับหนึ่งลบด้วยอัตราส่วนการไหลวิกฤต (Critical Flow Ratio) โดยพบว่าวิธี [Webster (1958)] ให้ค่ารอบเวลาที่ยาวเกินไปเมื่ออัตราส่วนปริมาณการจราจรต่อความจุเกิน 50% ค่ารอบเวลาที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากการปล่อยมลพิษนั้นยาวกว่าความยาวรอบที่เหมาะสมสำหรับความล่าช้าของยานพาหนะสำหรับระดับความแออัดที่ต่ำกว่า ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่คำนวณโดยวิธี [Webster (1958)] ซึ่งมี

วัตถุประสงค์เพื่อลดความล่าช้าจะไม่ใช้คำตอบที่เหมาะสมเสมอไปเมื่อต้องการลดการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ

จากวรรณกรรมบทวนที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้:

- (1) โหมดการทำงาน (Operating Modes: Idling, Decelerating, Accelerating, Cruising) ของยานพาหนะที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการปล่อยมลพิษของยานพาหนะในลักษณะที่ต่างกัน
- (2) การปล่อยมลพิษของยานพาหนะสามารถลดลงได้ด้วยการควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ดีขึ้น
- (3) การกำหนดเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสมเพื่อลดความล่าช้าไม่เหมือนกับการกำหนดเวลาสัญญาณไฟที่ลดการปล่อยมลพิษให้ลดเหลือน้อยที่สุด

บทที่ 3

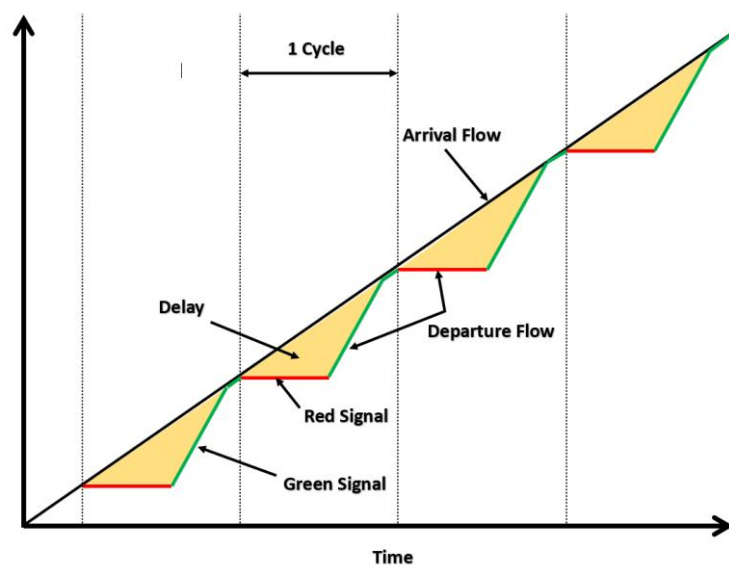
การคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจร

เพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศสำหรับทางแยกเดี่ยว

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดมลพิษทางอากาศสำหรับทางแยกเดี่ยว โดยจะนำเสนอในหัวข้อ 1) ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้า จำนวนหยุดบริเวณทางแยกและค่ารอบเวลาของสัญญาณไฟจราจร 2) การคำนวณปริมาณมลพิษทางอากาศเนื่องจากสัญญาณไฟจราจร 3) การคำนวณเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศเนื่องจากสัญญาณไฟจราจร โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้า จำนวนหยุดบริเวณทางแยกและค่ารอบเวลาของสัญญาณไฟจราจร

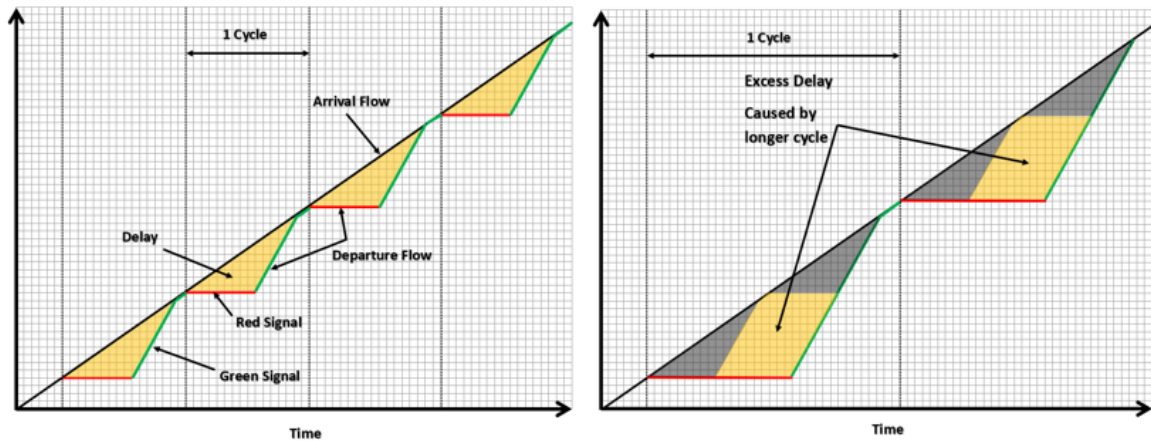
โดยปกติความล่าช้าที่ทางแยกสัญญาณไฟจราจรเมื่อพิจารณาเฉพาะ Uniform Delay จะสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านทางแยก (Arrival Curve) และ ปริมาณจราจรที่สามารถผ่านทางแยกได้ (Departure Curve) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1: ความล่าช้าของกระแสจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟจราจร

ซึ่งความล่าช้าในหนึ่งรอบเวลาคือพื้นที่ที่สีส้มในรูปที่ 3.1 หากมีการปรับเปลี่ยนค่ารอบเวลาใหม่โดยเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็นสองเท่าดังแสดงในรูปที่ 3.2

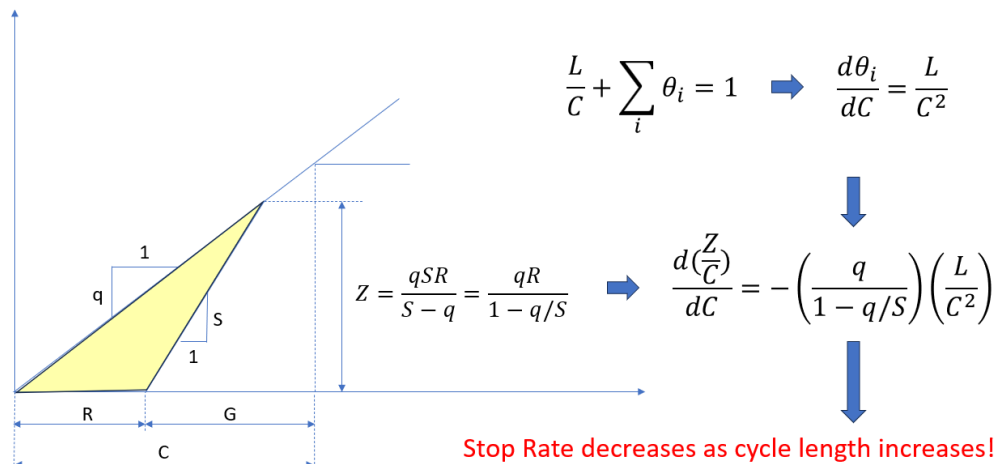
Effects of Long Cycle Length on Delay



รูปที่ 3.2: ผลของค่ารอบเวลาที่ยาวนานขึ้นต่อความล่าช้าต่อหน่วยเวลา

จะพบว่าความล่าช้าต่อเวลา (Delay per unit time) จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในรูปที่ 3.2 ความล่าช้าส่วนเพิ่มคือพื้นที่สีส้มในรูปด้านขวามือเอง เราสามารถกล่าวได้ว่าการทำให้ค่ารอบเวลา (Cycle Length) ยาวนานขึ้นจะมีผลทำให้ความล่าช้าต่อหน่วยเวลามีค่ามากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นในการควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความล่าช้าจึงไม่ควรมียาวนาน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการหยุดของรถยนต์ที่ผ่านทางแยกสัญญาณไฟจราจรกับค่ารอบของเวลานั้นก็สามารถพิจารณาได้จากกราฟที่แสดงปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านทางแยกและปริมาณจราจรที่สามารถผ่านทางแยกได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3: ผลของค่ารอบเวลาที่ยาวนานขึ้นต่อจำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลา

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าจำนวนการหยุดของรถยนต์ในหนึ่งรอบเวลามีค่าเท่ากับความสูงของรูปสามเหลี่ยมสีเหลือง โดยสามารถเขียนได้สมการที่ (3.1)

$$Z = \frac{qSR}{s-q} = \frac{qR}{1-q/s} \quad (3.1)$$

โดยที่ Z = จำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหนึ่งรอบเวลา

q = ปริมาณจราจรของกระแสจราจรที่ต้องการผ่านทางแยก (Arrival Rate)

S = อัตราการไหลอิ่มตัว (Saturation Flow Rate)

R = ระยะเวลาไฟแดง (Red Time)

หากเราพิจารณาความสัมพันธ์ของผลรวมค่าสัดส่วนของเฟส ค่าเวลาสูญเสีย (Lost Time) และ ค่ารอบเวลาของสัญญาณไฟจราจร ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.2) ซึ่งระบุว่าผลรวมของสัดส่วนของเฟสเมื่อรวมเข้ากับสัดส่วนของค่าเวลาสูญเสียในหนึ่งรอบสัญญาณจะต้องมีค่าเท่ากับหนึ่ง

$$\frac{L}{C} + \sum_i \theta_i = 1 \quad (3.2)$$

โดยที่ L = ค่าเวลาสูญเสีย (Lost Time) ในหนึ่งรอบสัญญาณ

C = ค่ารอบเวลา

θ_i = ค่าสัดส่วนของเฟสของกระแสจราจร “i”

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.1) และ (3.2) เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนการหยุดของรถยนต์ที่ผ่านทางแยกต่อหน่วยเวลาจะพบว่ามีค่าลบดังแสดงตามสมการที่ (3.3)

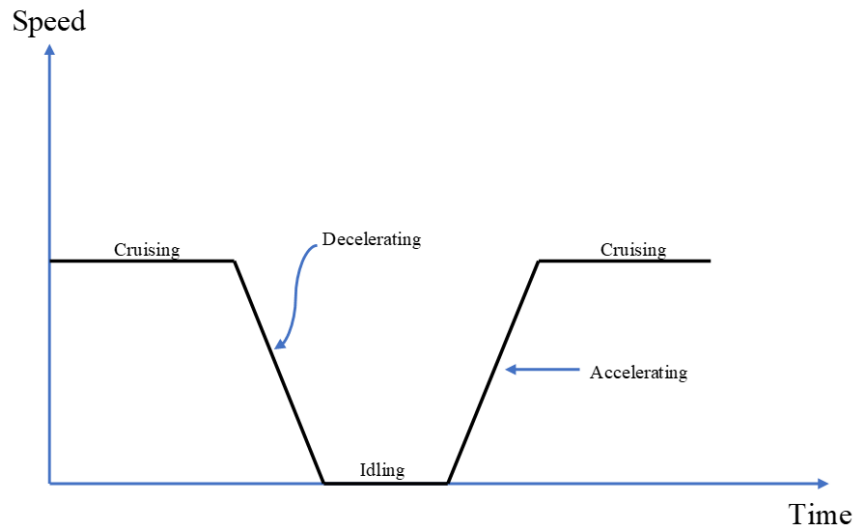
$$\frac{d(\frac{Z}{C})}{dC} = - \left(\frac{q}{1-q} \right) \left(\frac{L}{C^2} \right) \quad (3.3)$$

โดยที่ $\frac{d(\frac{Z}{C})}{dC}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนการหยุดของรถยนต์ที่ผ่านทางแยกต่อหน่วยเวลา

เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนการหยุดของรถยนต์ที่ผ่านทางแยกต่อหน่วยเวลามีค่าเป็นลบแสดงว่าหากมีค่ารอบเวลายาวนานขึ้นจะทำให้จำนวนการหยุดของรถยนต์ที่ผ่านทางแยกต่อหน่วยเวลาลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากเราต้องการที่จะลดความล่าช้าต่อหน่วยเวลาจะต้องลดค่ารอบเวลา แต่ตรงกันข้ามก็จะทำให้จำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาที่ผ่านทางแยกต้องเพิ่มขึ้น

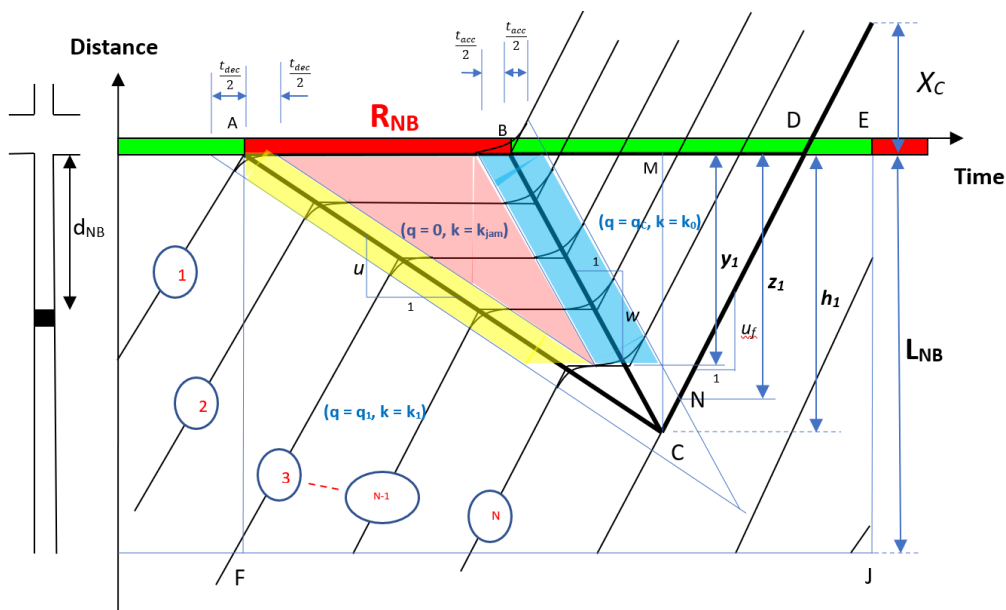
3.2 การคำนวณปริมาณมลพิษทางอากาศเนื่องจากสัญญาณไฟจราจร

ปริมาณมลพิษทางอากาศที่รถยนต์ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับผลรวมของระยะเวลาที่รถยนต์ทำงานในแต่ละโหมดควบคู่กับอัตราการปล่อยมลพิษต่อหน่วยเวลาที่รถยนต์ทำงานในโหมดนั้นๆ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถยนต์เข้าสู่ทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจรดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 รถยนต์เข้าใกล้ทางแยกด้วยความเร็วคงที่เมื่อสัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นไฟแดง รถยนต์จะชะลอความเร็ว หยุดสนิท และเข้าคิวรอ เมื่อสัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นสีเขียว รถยนต์จะเร่งความเร็วและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เพื่อออกจากทางแยก การศึกษาครั้งนี้แบ่งประเภทของการทำงานของยานพาหนะตามโหมดการเคลื่อนที่ (Cruising) การเดินเบา (Idling) การชะลอความเร็ว (Decelerating) และการเร่งความเร็ว (Accelerating) ตามข้อมูลความเร็วของยานพาหนะในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4: ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาของรถยนต์เคลื่อนที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟ

โหมดเหล่านี้แต่ละโหมดถือว่ามีอัตราการปล่อยมลพิษคงที่ต่อหน่วยเวลา (Fixed Emission Rate) ปริมาณการปล่อยมลพิษทั้งหมดที่เกิดจากการลดความเร็ว รอบเดินเบ การเร่งความเร็ว และการวิ่งด้วยความเร็วคงที่จะคำนวณได้โดยการคูณอัตราการปล่อยมลพิษคงที่ด้วยเวลาที่ใช้ในแต่ละโหมดแล้วจึงบวกรวมเข้าด้วยกัน ผลกระทบต่อการปล่อยมลพิษสุทธิจากการควบคุมทางแยกด้วยสัญญาณไฟจราจรคือความแตกต่างของปริมาณการปล่อยมลพิษที่ประมาณการไว้เมื่อมีสัญญาณไฟจราจรและไม่มีสัญญาณไฟจราจร หากพิจารณาจากรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงแนวการเดินทาง (Vehicle Trajectory) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง-เวลา (Time-Space Diagram) แล้วจะพบว่ามลพิษที่ปล่อยออกมาในช่วงที่รถยนต์วิ่งด้วยความเร็วคงที่จะมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีและไม่มีสัญญาณไฟจราจร โดยสีเหลืองแสดงช่วงที่รถยนต์กำลังชะลอความเร็ว สีฟ้าแสดงช่วงที่รถยนต์กำลังเร่งความเร็ว และส่วนสีชมพูแสดงช่วงรถยนต์กำลังเดินเบจอดอยู่



รูปที่ 3.5: แนวการเดินทางที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจร

ดังนั้นเราสามารถเขียนปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมาเนื่องจากสัญญาณไฟจราจรในหนึ่งรอบสัญญาณไฟได้ดังสมการที่ (3.4)

$$E = (e_{Idle})(Delay) + (e_{accel} + e_{decel})(Stop) \quad (3.4)$$

โดยที่ E = ปริมาณการปล่อยมลพิษต่อหนึ่งรอบสัญญาณไฟจราจร

e_{Idle} = อัตราการปล่อยมลพิษต่อหน่วยเวลาเมื่อรถยนต์เดินเบา

e_{Accel} = อัตราการปล่อยมลพิษต่อหนึ่งครั้งเมื่อรถยนต์เร่งความเร็ว

e_{Decel} = อัตราการปล่อยมลพิษต่อหนึ่งครั้งเมื่อรถยนต์ชะลอความเร็ว

$Delay$ = ความล่าช้าที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งรอบสัญญาณไฟจราจร

$Stop$ = จำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหนึ่งรอบสัญญาณไฟจราจร

3.3 การคำนวณสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ

ในส่วนนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศจากรถยนต์ โดยพิจารณาปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยเวลาซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.5)

$$Min \quad ZZ = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^N e_{Idle} \left\{ \frac{q_i C^2 (1-\theta_i)^2}{2(1-y_i)} + \frac{y_i^2 C}{2\theta_i(\theta_i - y_i)} + \left(\frac{e_{accel} + e_{decel}}{e_{Idle}} \right) \frac{q_i C (1-\theta_i)}{(1-y_i)} \right\} \quad (3.5)$$

$$St. \quad \frac{L}{C} + \sum_{i=1}^N \theta_i = 1 \quad (3.6)$$

$$\theta_i \geq y_i ; \quad \forall i \quad (3.7)$$

$$0 \leq \theta_i \leq 1 ; \quad \forall i \quad (3.8)$$

$$\frac{L}{1 - \sum_{i=1}^N y_i} \leq C \leq C_{max} \quad (3.9)$$

โดยที่ ZZ คือ อัตราการปล่อยมลพิษของทางแยกต่อหน่วยเวลา

q_i คือ ปริมาณจราจรของกระแสจราจร “ i ” หน่วยเป็น คันต่อวินาที

C คือ ค่ารอบเวลา หน่วยเป็น วินาที

θ_i คือ ค่าสัดส่วนของเฟสของกระแสจราจร “ i ”

y_i คือ อัตราส่วนการไหลของกระแสจราจร “ i ” เท่ากับ q_i/S_i

S_i คือ อัตราการไหลอิ่มตัวของกระแสจราจร “ i ” หน่วยเป็น คันต่อวินาที

L คือ ค่าเวลาสูญเสียต่อหนึ่งรอบสัญญาณไฟ หน่วยเป็น วินาที

C_{max} คือ ค่ารอบเวลามากที่สุด หน่วยเป็น วินาที

เทอมแรกในวงเล็บปีกกาของสมการที่ (3.5) คือ ความล่าช้าเมื่อสภาพการมาของรถยนต์เป็นลักษณะแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Delay) เทอมที่สองในวงเล็บปีกกาของสมการที่ (3.5) คือ ความล่าช้าจากการมาของรถยนต์เป็นแบบสุ่มของจราจร (Random Arrival) เทอมที่สามในวงเล็บปีกกาของสมการที่ (3.5) คือ จำนวนการหยุดของรถยนต์ที่ผ่านทางแยกต่อรอบสัญญาณ สมการที่ (3.6) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเฟสและค่าเวลาสูญเสียต่อรอบสัญญาณ สมการที่ (3.7) แสดงว่าความจุจะต้องไม่น้อยกว่าปริมาณจราจรของแต่ละเฟส สมการที่ (3.8) และ (3.9) แสดงขอบเขตบนและล่างของค่าสัดส่วนของแต่ละเฟสและค่ารอบเวลา เมื่อแก้สมการหาคำตอบจะได้ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่ทำให้อัตราการปล่อยมลพิษต่อหน่วยเวลามีค่าต่ำที่สุด มีสิ่งที่ควรพิจารณาเพิ่มในกรณีนี้ $\left(\frac{e_{accel} + e_{decel}}{e_{Idle}} \right) = 0$ หรือการไม่พิจารณาผลของจำนวนการหยุดของรถยนต์ ซึ่ง

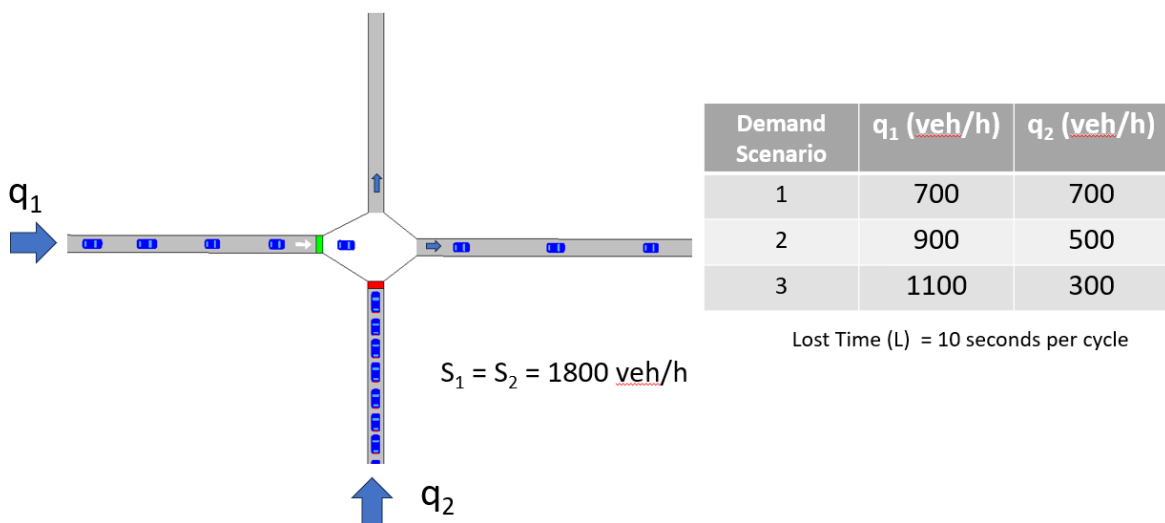
กรณีนี้ก็คือการทำให้ความล่าช้าต่ำที่สุดหรือคือวิธีการคำนวณค่าเวลาของสัญญาณไฟจราจรที่นำเสนอโดย Webster (1958) นั่นเอง

บทที่ 4 กรณีศึกษา

ในบทนี้จะพิจารณากรณีศึกษาโดยประยุกต์ใช้วิธีการที่พัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณเวลาจังหวะสัญญาณไฟจราจรสำหรับทางแยกเดี่ยวที่เกิดจากถนนเดินรถทางเดียวสองเส้นทางตัดกัน (Two One-way Street Crossing) โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรและตัวชี้วัดจราจร อาทิ ปริมาณมลพิษทางอากาศที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยเวลา ความล่าช้าของทางแยกต่อหน่วยเวลา และจำนวนการหยุดของรถที่ผ่านทางแยกต่อหน่วยเวลา จากผลการคำนวณด้วยวิธีความล่าช้าต่ำที่สุดหรือ Webster Method (1958) และวิธีที่ได้นำเสนอในรายงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการลดอัตราการปล่อยมลพิษต่อหน่วยเวลา ทั้งนี้ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดข้างต้นเมื่อนำค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรจากทั้งสองวิธีการคำนวณไปใช้บนโปรแกรม AIMSUN Traffic Simulation เพื่อพิจารณาว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถให้ค่าตัวชี้วัดได้อย่างเหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ข้อมูลกรณีศึกษา

ทางแยกที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาคือทางแยกที่เกิดจากถนนเดินรถทางเดียวสองเส้นทางตัดกัน (Two One-way Street Crossing) จึงมีสองเฟสสัญญาณคือ 1) ทิศทางตะวันตกไปตะวันออก และ 2) ทิศทางจากใต้ไปเหนือ โดยมีปริมาณจราจรสามรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.1



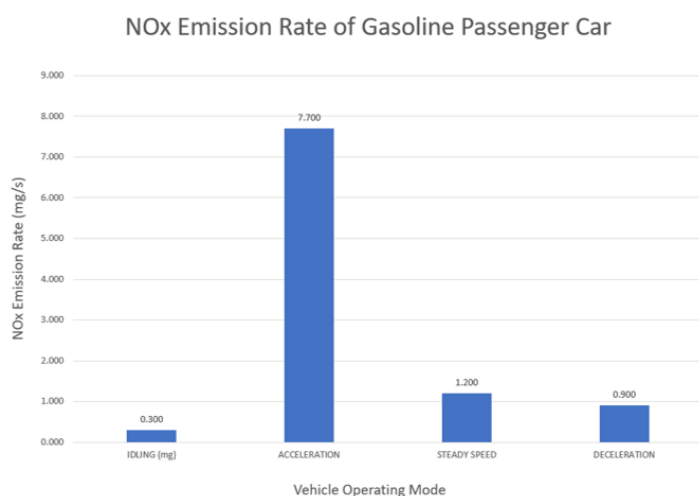
รูปที่ 4.1: ทางแยกกรณีศึกษาพร้อมด้วยปริมาณจราจรสามรูปแบบ

หากพิจารณารูปแบบของปริมาณจราจรทั้งสามฉากทัศน์แล้วจะพบว่าผลรวมเท่ากับ 1,400 คันต่อชั่วโมง ประกอบการมีค่าอัตราการไหลอิ่มตัว (Saturation Flow rate) เท่ากับ 1,800 คันต่อชั่วโมงเท่ากันทั้งสองทิศทาง และมีผลรวมของค่าเวลาสูญเสียในแต่ละรอบ (Lost Time) เท่ากับ 10 วินาที ดังนั้นค่ารอบเวลา (Cycle Length) ที่คำนวณด้วยวิธี Webster (1958) จะให้ค่าเท่ากันในทุกฉากทัศน์ซึ่งเท่ากับ $(1.5 \times 10 + 5) / (1 -$

1400/1800) = 90 วินาที แต่ค่าสัดส่วนของแต่ละเฟสจะแตกต่างกันออกไปตามสัดส่วนของปริมาณจราจรต่ออัตราการไหลอิมตัว (Flow Ratio)

4.2 การประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นคำนวณสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ

ในการศึกษานี้ผู้เขียนพิจารณามลพิษ NO_x เป็นตัวอย่าง ทั้งนี้วิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ได้กับทุกประเภทของมลพิษถ้าทราบอัตราการปล่อยต่อเวลาของรถยนต์แยกตามโหมดการทำงาน สำหรับกรณีศึกษาที่ใช้ NO_x โดยมีอัตราการปล่อยแยกตามโหมดการทำงานของเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง [Khalighi and Christofa (2015)]



$$e_{Idle} = 0.3 \text{ mg/s}$$

$$e_{Accel} = 34.65 \text{ mg/stop}$$

$$e_{Decel} = 0.405 \text{ mg/stop}$$

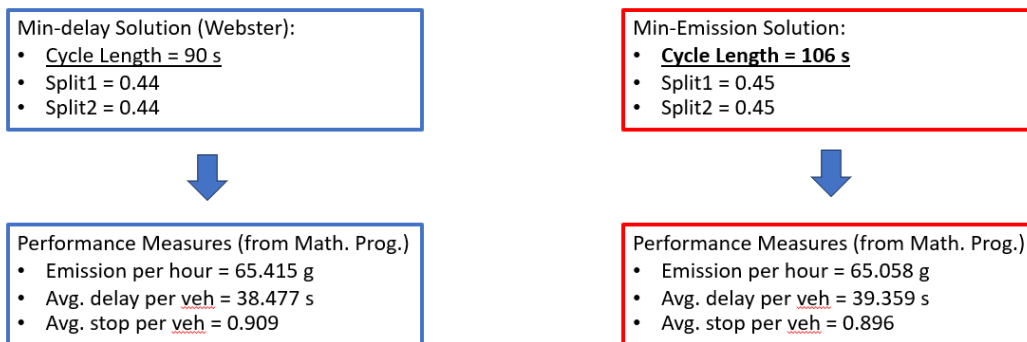
$$\frac{e_{Accel} + e_{Decel}}{e_{Idle}} = 129$$

รูปที่ 4.2: อัตราการปล่อยมลพิษ NO_x ของรถยนต์แยกตามโหมดการทำงาน

จากรูปที่ 4.2 พบว่าอัตราการปล่อย NO_x มีค่ามากที่สุดเมื่อรถยนต์กำลังเร่งความเร็ว ตามด้วยเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ส่วนอัตราการปล่อย NO_x มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเดินเครื่องเบา (Idling) เมื่อทำการคำนวณค่าอัตราการปล่อย NO_x เมื่อรถยนต์เร่งและชะลอความเร็วให้เป็นต่อครั้งจะได้ค่าตามรูปที่ 4.2 สำหรับอัตราส่วน $\frac{e_{Accel} + e_{Decel}}{e_{Idle}}$ มีค่าเท่ากับ 129 และจะนำมาใช้ในการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษในลำดับต่อไป

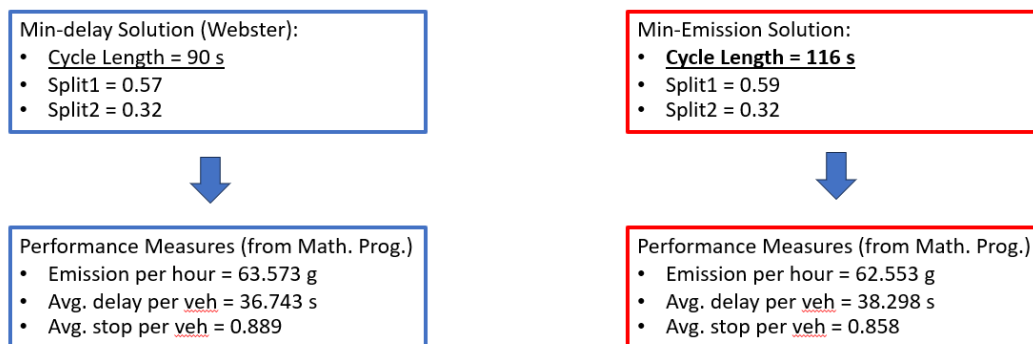
จากข้อมูลปริมาณจราจรทั้งสามฉากทัศน์และอัตราการปล่อย NO_x ที่นำเสนอข้างต้น นำมาคำนวณคำนวณสัญญาณไฟจราจรจะได้ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรและตัวชี้วัดด้านจราจรและปริมาณมลพิษ NO_x ที่ปล่อยออกมาแยกตามวิธีการคำนวณทั้งสองวิธีได้แก่ 1) วิธี Webster (1958) และ 2) วิธีการคำนวณที่นำเสนอในรายงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.3 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

Scenario 1: $q_1 = 700, q_2 = 700$



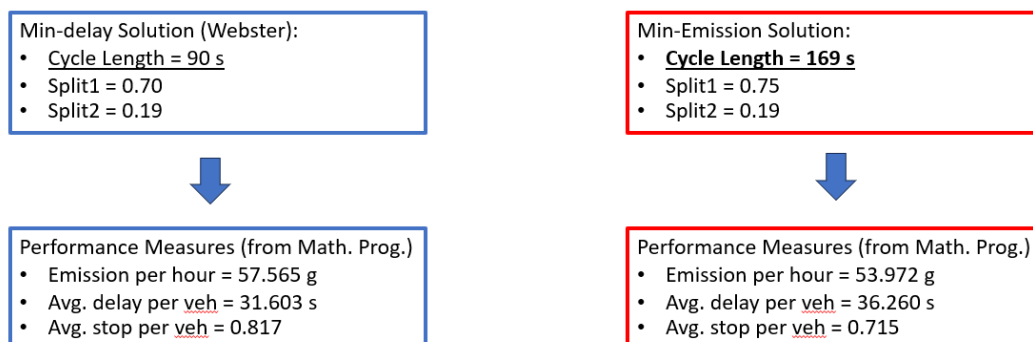
รูปที่ 4.3: ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรและตัวชี้วัดสำหรับปริมาณจราจร ($q_1 = 700$: $q_2 = 700$ คันต่อชั่วโมง)

Scenario 2: $q_1 = 900, q_2 = 500$



รูปที่ 4.4: ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรและตัวชี้วัดสำหรับปริมาณจราจร ($q_1 = 900$: $q_2 = 500$ คันต่อชั่วโมง)

Scenario 3: $q_1 = 1100, q_2 = 300$



รูปที่ 4.5: ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรและตัวชี้วัดสำหรับปริมาณจราจร ($q_1 = 1100$: $q_2 = 300$ คันต่อชั่วโมง)

จากผลการคำนวณพบว่าในทุกฉากทัศน์ภายใต้วิธี Webster (1958) ค่ารอบเวลา (Cycle Length) เท่ากับ 90 วินาทีเสมอเนื่องจากผลรวมอัตราส่วนปริมาณจราจรต่ออัตราการไหลอิ่มตัว (Sum of Flow Ratio) มีค่าเท่ากันในทุกฉากทัศน์ สำหรับค่ารอบเวลาภายใต้วิธีการคำนวณที่นำเสนอเพื่อลดอัตราการปล่อยพิษได้ค่ารอบเวลาสูงกว่า 90 วินาทีในทุกฉากทัศน์ โดยค่ารอบเวลาจะมีค่ามากยิ่งขึ้นเมื่อความแตกต่างของปริมาณจราจรจากสองทิศทางยิ่งเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะผลกระทบของจำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณจราจรจากสองทิศทางแตกต่างกันมาก ซึ่งค่ารอบเวลาที่ยาวขึ้นจะทำให้จำนวนการหยุดต่อหน่วยเวลาลดลงซึ่งส่งผลต่อการปล่อยมลพิษที่ลดลงจากจำนวนครั้งที่รถยนต์ต้องเร่งและชะลอความเร็ว ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อัตราการปล่อย NOx มีค่าสูงที่สุด

เมื่อพิจารณาค่าตัวชี้วัดด้านจราจรและปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมาทั้งสามฉากทัศน์จากวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรทั้งสองวิธีจะพบว่าในทุกฉากทัศน์ปริมาณมลพิษ NOx และจำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีค่าต่ำกว่าวิธี Webster (1958) เสมอ ในขณะที่ค่าความล่าช้าโดยเฉลี่ยของรถยนต์แต่ละคันจากวิธี Webster (1958) มีค่าต่ำกว่าวิธีการที่นำเสนอในทุกฉากทัศน์เช่นกัน ซึ่งก็สอดคล้องกับสมมติฐานของวิธี Webster (1958) ที่ต้องการคำตอบที่มีค่าความล่าช้าโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด

มาถึงจุดนี้อาจมีผู้อ่านบางท่านสงสัยว่าค่าตัวชี้วัดด้านจราจรและปริมาณมลพิษที่คำนวณได้ล้วนมาจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ผู้เขียนอ้างอิงจากเอกสารอ้างอิง Webster (1958) อาทิ ค่าความล่าช้า และจำนวนการหยุดของรถยนต์ สมการเหล่านี้จะมีความแม่นยำเพียงใด ผู้เขียนก็ต้องการทราบเช่นกันจึงทดลองนำค่าอัตราการปล่อยมลพิษ ปริมาณจราจร ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจร จากรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.5 มาจำลองบนโปรแกรม AIMSUN Traffic Simulation โดยในแต่ละฉากทัศน์ของปริมาณจราจรและค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรจะมีห้าครั้งของการจำลอง (5 Replications of Simulation) เพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบความแตกต่างของค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จาก AIMSUN Traffic Simulation เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจกล่าวได้ว่าสมการที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 มีความแม่นยำเพียงในการนำมาใช้คำนวณค่าตัวชี้และค่าเวลาสัญญาณไฟจราจร

ตารางที่ 4.1: ค่าตัวชี้วัดด้านจราจรและปริมาณมลพิษที่ได้จากจำลองบน AIMSUN Traffic Simulation

Performance Measures for $q_1 = 700, q_2 = 700$	Webster Timing		Proposed Method Timing	
	Estimated Method	Simulation (5 runs-Avg)	Estimated Method	Simulation (5 runs-Avg)
NOx Emission (g/hour)	65.415	65.1000	65.058	64.0340
Avg. Delay (seconds/veh)	38.477	38.6991	39.359	37.8387
Avg. Stop (stops/veh)	0.909	1.1460	0.896	1.0257

Performance Measures for $q_1 = 900, q_2 = 500$	Webster Timing		Proposed Method Timing	
	Estimated Method	Simulation (5 runs-Avg)	Estimated Method	Simulation (5 runs-Avg)
NOx Emission (g/hour)	63.573	63.9680	62.553	60.0180
Avg. Delay (seconds/veh)	36.743	36.3770	38.298	37.4447
Avg. Stop (stops/veh)	0.889	1.0628	0.858	0.9728

Performance Measures for $q_1 = 1100, q_2 = 300$	Webster Timing		Proposed Method Timing	
	Estimated Method	Simulation (5 runs-Avg)	Estimated Method	Simulation (5 runs-Avg)
NOx Emission (g/hour)	57.565	55.9040	53.972	52.4940
Avg. Delay (seconds/veh)	31.603	30.9441	36.26	34.9513
Avg. Stop (stops/veh)	0.817	0.8909	0.715	0.7337

บทที่ 5

บทสรุปและงานวิจัยในอนาคต

การติดตั้งสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยกมีวัตถุประสงค์ เพื่อควบคุมกระแสจราจรที่ตัดกันให้มีความปลอดภัยและสะดวกในการเดินทางผ่านทางแยก อย่างไรก็ตามหากใช้จังหวะสัญญาณไฟจราจรที่ไม่เหมาะสมย่อมส่งผลเสียต่อความล่าช้าในการเดินทาง หรือต้องใช้เวลาในการเดินทางผ่านทางแยก ปัจจุบันการจราจรติดขัดเป็นปัญหาสำคัญและเป็นต้นเหตุการปล่อยมลพิษทางอากาศด้วย ความรุนแรงของมลพิษจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อการจราจรติดขัดมากและเกิดการเคลื่อนตัวของรถยนต์แบบสลับหยุดนิ่งแบบบ่อยครั้งที่ทางแยก ซึ่งรถยนต์จะสลับการทำงานในโหมดต่างๆ (Operating Modes) เช่น การเดินเบา (Idling) เร่งความเร็ว (Accelerating) ลดความเร็ว (Decelerating) และวิ่งด้วยความเร็วคงที่ (Cruising) เมื่อปริมาณจราจรเพิ่มขึ้นการทำงานของสัญญาณไฟจึงมีความสำคัญมาก การควบคุมสัญญาณไฟที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดการจราจรติดขัด ในขณะที่การควบคุมสัญญาณไฟที่ไม่ดีอาจส่งผลให้เกิดการจราจรติดขัดและปัญหามลพิษทางอากาศอย่างรุนแรงที่จะตามมาอย่างแน่นอน

ในงานวิจัยนี้ได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจังหวะสัญญาณไฟจราจร ซึ่งใช้หลักการ Equalizing degree of saturation หรือวิธี Webster (1958) รวมทั้งการควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบเป็นพื้นที่ด้วยระบบต่างๆ รวมทั้งงานวิจัยที่นำเสนอการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่พิจารณามลพิษทางอากาศเป็นวัตถุประสงค์ ซึ่งผลจากวรรณกรรมทบทวนพบว่า 1) โหมดการทำงาน (Operating Modes: Idling, Decelerating, Accelerating, Cruising) ของรถยนต์ที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการปล่อยมลพิษของยานพาหนะในลักษณะที่แตกต่างกัน 2) การปล่อยมลพิษของยานพาหนะสามารถลดลงได้ด้วยการควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ดีขึ้น และ 3) การกำหนดเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสมเพื่อลดความล่าช้าไม่เหมือนกับการกำหนดเวลาสัญญาณไฟที่ลดการปล่อยมลพิษให้ลดเหลือน้อยที่สุด

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยพิษทางอากาศจากการจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟจราจรแบบเดียวเมื่อปริมาณจราจรต่ำว่าความจุ และพิจารณากรณีศึกษาที่มีปริมาณจราจรแตกต่างกันในสามฉากทัศน์ ซึ่งพบว่าค่ารอบเวลา (Cycle Length) ที่ยาวขึ้นจะทำให้จำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาลดลง แต่จะทำให้ค่าความล่าช้าโดยเฉลี่ยของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมจึงต้องเป็นค่าที่สมดุลระหว่างความล่าช้าและจำนวนการหยุดของรถยนต์ เนื่องจากอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศของรถยนต์ขึ้นอยู่กับโหมดการทำงานของรถยนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าวิธี คำนวณค่าสัญญาณไฟของ Webster (1958) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานจะไม่สามารถให้ค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมได้ในทุกกรณีของปริมาณจราจร ซึ่งหลังจากการทำงานวิจัยนี้จนแล้วเสร็จทำให้ได้บทสรุปของงานวิจัยดังนี้

- วิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่เน้นการทำให้ค่าความล่าช้าลดลงจะให้คำตอบที่แตกต่างจากการคำนวณที่มุ่งเน้นการทำให้อัตราการปล่อยมลพิษลดลง
- เมื่อปริมาณจราจรในแต่ละทิศทางมีความแตกต่างมากขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของคำตอบจากทั้งสองวิธียิ่งมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าทางแยกที่เกิดจากการตัดกันของถนนที่มีปริมาณจราจรแตกต่าง

กันมากๆควรเป็นตำแหน่งที่ต้องพิจารณาออกแบบค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่มุ่งเน้นการลดมลพิษมากเป็นพิเศษ

- วิธีคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรของ Webster (1958) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ใช่วิธีการออกแบบเพื่อลดมลพิษที่ทางแยกสัญญาณไฟจราจร
- วิธีการที่นำเสนอในบทความนี้เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้คำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรเมื่อคำนึงถึงผลของการปล่อยมลพิษทางอากาศจากจราจรได้

สำหรับงานวิจัยในอนาคตเพื่อพัฒนาการวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณไฟจราจรบนทางหลวงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้แก่

- พัฒนาวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่พิจารณาผลกระทบของรถยนต์ไฟฟ้าที่เข้ามาร่วมกับรถยนต์ใช้น้ำมันปกติ
- ศึกษาปัญหาการอพยพในกรณีเกิดอุบัติเหตุ (Evacuation Problem) ร่วมกับการออกแบบจังหวะสัญญาณไฟจราจร
- พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นจากวิธีการที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อเผยแพร่ให้หน่วยงานอื่นได้นำเอาวิธีการนี้ไปใช้ในการออกแบบสัญญาณไฟจราจรต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Robertson, D. I., TRANSYT method for Area Traffic Control. Traffic Engineering and Controls, Vol. 10, 1969, pp. 276 – 281.
2. Anya, A. R., Roupail, N. M., Frey, H. C., Schroeder, B., 2014. Application of AIMSUN Microsimulation Model to Estimate Emissions on Signalized Arterial Corridor. Transportation Research Record, Vol. 2428, pp. 75 – 86.
3. Asano, M., Nakajima, A., Horiguchi, R., Oneyama, H., Kuwahara, M., 2003. Traffic Signal Control Algorithm Based on Queuing Model Using its Sensing Technologies. Proceedings of the 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, CD-ROM.
4. Calle-Laguna, A. J, Du, J., Rakha, H. A., 2019. Computing Optimum Traffic Signal Cycle Length Considering Vehicle Delay and Fuel Consumption. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Vol. 3, pp. 1 – 9.
5. Coelho, M. C., Farias, T. L., Roupail, N. M., 2005. A methodology for modeling and measuring traffic and emission performance of speed control traffic signals. Atmospheric Environment, Vol. 39, pp. 2367 – 2376.
6. Coelho, M. C., Farias, T. L., Roupail, N. M., 2005. Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions. Transportation Research Part D, Vol. 10, pp. 323 – 340.
7. Gartner, N. H., 1983. OPAC: A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control. Transportation Research Record, Vol. 906, pp. 75-84.
8. Grote, M., Williams, I., Preston, J., Kemp, S., 2018. A practical model for predicting road traffic carbon dioxide emissions using Inductive Loop Detector data. Transportation Research Part D, Vol. 63, pp. 809 – 825.
9. Hunt, P. B., Robertson, D. I., Winto, R.I., 1981. SCOOT- A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Laboratory Report 1014, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K.
10. Khalighi, F., Christofa, E., 2015. Emission-Based Signal Timing Optimization for Isolated Intersections. Transportation Research Record, Vol. 2487, pp. 1 – 14.
11. Koshi, M., 1972. On-Line Feedback Control of Offsets for Area Control of Traffic. Proceedings of the 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow & Transportation, edited by G. F. Newell, New York: Elsevier, pp.269-280.
12. Koshi, M., 1989. Cycle Time Optimization in Traffic Signal Coordination. Transportation Research Part A, Vol. 23, No. 1, pp. 29-34.
13. Kou, W., Chen, X., Yu, L., Gong, H., 2018. Multiobjective optimization model of intersection signal timing considering emissions based on field data: A case study of Beijing. Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 68, No. 8, pp. 836 – 848.

14. Lee, C., Carvalho, R., Ma, J., So, J., Huang, J., 2019. Using Smart Transport Technologies to Mitigate Greenhouse Gas Emissions from the Transport Sector in Asia and the Pacific. Technical Report, ESCAP, United Nations, Bangkok.
15. Lv, J., Zhang, Y., Zietsman, J., 2013. Investigating Emission Reduction Benefit from Intersection Signal Optimization. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 17 No. 3, pp. 200 – 209.
16. Lv, J., Zhang, Y., 2012. Effect of signal coordination on traffic emission. *Transportation Research Part D*, Vol. 17, pp. 149 – 153.
17. Ma, X., Jin, J., Lei, W., 2014. Multi-criteria analysis of optimal signal plans using microscopic traffic models. *Transportation Research Part D*, Vol. 32, pp. 1 – 14.
18. Ma, D., Nakamura, H., 2010. Cycle Length Optimization at Isolated Intersections from the Viewpoint of Emission. *Proceedings of the 7th International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS)*, Kunming, China.
19. Ni, D., 2015. *Traffic Flow Theory*. Butterworth-Heinemann.
20. Olszewski, P., 1993. Overall delay, stopped delay, and stops at signalized intersections. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 119, No. 6, pp. 835 – 852.
21. Pandian, S., Gokhale, S., Ghoshal, A. K., 2009. Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections. *Transportation Research Part D*, Vol. 14, pp. 180 – 196.
22. Qian, R., Lun, Z., Wenchen, Y., Meng, Z., 2013. A traffic emission-saving signal timing model for urban isolated intersections. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol. 96, pp. 2404 – 2413.
23. Sims, A. G., Dobinson, K. W., 1980. The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 29, Issue 2, pp. 130 – 137.
24. Tang, K., Boltze, M., Nakamura, H., Tian, Z., 2019. *Global Practices on Road Traffic Signal Control*. Elsevier.
25. Unal, A., Rouphail, N. M., Frey, H. C., 2003. Effect of Arterial Signalization and Level of Service on Measured Vehicle Emissions. *Transportation Research Record*, Vol. 1842, pp. 47 – 56.
26. Webster, F., 1958. *Traffic Signal Setting*. Road research technical paper, Great Britain Road Research Laboratory.

รายงานฉบับที่ : วพ. ๓๒๔ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
ผู้เขียน : นายพลเทพ เลิศวรรณิช
ชื่อเรื่อง : การตั้งเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดผลกระทบมลพิษทางอากาศ

บทคัดย่อ : ทางแยกสัญญาณไฟจราจรพบได้ทั่วไปบริเวณจุดตัดของทางหลวงแผ่นดิน หากมีจังหวะสัญญาณไฟจราจรที่ไม่เหมาะสมหรือไม่สอดคล้องกับสภาพการจราจรก็เป็นสาเหตุหลักของความล่าช้าในการเดินทางรวมทั้งการสูญเสียทรัพยากรน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้การตั้งค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรที่ไม่เหมาะสมยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศบริเวณทางแยกอีกด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟจราจรเพื่อลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศ โดยพิจารณาผลกระทบการปล่อยมลพิษของรถยนต์ขณะทำงานในโหมด 1) ขณะเดินเครื่องเบา (Idling) 2) ขณะเร่งความเร็ว (Accelerating) 3) ขณะชะลอความเร็ว (Decelerating) และ 4) ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (Cruising) โดยพบว่าค่ารอบเวลา (Cycle Length) ที่ยาวนานขึ้นจะทำให้ความล่าช้าของกระแสจราจรต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้จำนวนการหยุดของรถยนต์ต่อหน่วยเวลาลดลง ดังนั้นค่าเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างความล่าช้าและจำนวนการหยุดของรถยนต์ จากนั้นประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้กับทางแยกที่มีปริมาณจราจรแตกต่างกัน โดยผลการทดลองพบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าเวลาสัญญาณไฟที่ช่วยลดอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศลงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Webster (1958) ซึ่งเป็นวิธีที่มักใช้คำนวณกันทั่วไป วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบรรเทาปัญหามลพิษทางอากาศบริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจรได้