หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
การประยุกต์ใช้งานแบบจำลองการจัดการคิว

ที่ทางแยกใดๆ จะพบว่ามียวดยานจอดรอคอยสัญญาณไฟเขียวติดต่อกันเป็นคิว ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติของทุกทางแยก ในกรณีที่ปริมาณยวดยานที่ต้องการผ่านทางแยกมีค่าน้อย หรือในกรณีที่ทางแยกที่อยู่ถัดไปทางด้าน Upstream อยู่ห่างมากๆ ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงไม่รุนแรง เพียงแต่ทำให้ผู้ขับขี่ยวดยานต้องเสียเวลารอคอยนานขึ้นเท่านั้น แต่กรณีที่ทางแยกที่อยู่ถัดไปนั้นอยู่ใกล้กับทางแยกที่เรากำลังพิจารณาอยู่หรือปริมาณการจราจรเพิ่มมากขึ้น (เช่นในกรณีชั่วโมงเร่งด่วนเป็นต้น) คิวที่เกิดขึ้นจะติดยาวไปถึงบริเวณทางแยกถัดไป ทำให้ยวดยานในทิศทางอื่นของทางแยกนั้นไม่สามารถผ่านทางแยกไปได้ ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมิได้จำกัดอยู่ในทางแยกแรก แต่จะขยายตัวออกไปกระทบกับทางแยกถัดไปอีกด้วย การแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้จึงต้องเริ่มจากการควบคุมสัญญาณไฟให้ประสานสัมพันธ์กัน โดยมีหลักการที่สำคัญคือ ต้องไม่ให้เกิดคิวยาวมาจนปิดกั้นทางแยกถัดไป ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบการควบคุมสัญญาณไฟ โดยอาศัยทฤษฎีการเกิดคิวเป็นหลัก

หลักการควบคุมสัญญาณไฟให้มีการประสานสัมพันธ์กันระหว่างทางแยก จำเป็นต้องกำหนดค่ารอบเวลาที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมทางแยกวิกฤติ และต้องใช้ค่ารอบเวลานี้กับทางแยกที่อยู่รอบๆ เพื่อประสานสัมพันธ์สัญญาณไฟ แต่ค่ารอบเวลาเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่เพียงพอจำเป็นต้องมีการกำหนดค่า Offset ของสัญญาณไฟ เพื่อใช้กำหนดจังหวะในการเปิดสัญญาณไฟเขียวให้สัมพันธ์กับทางแยกวิกฤติอีกด้วย

6.1 การคำนวณค่ารอบเวลาของทางแยกวิกฤติ

การควบคุมสัญญาณไฟในสภาพการจราจรที่หนาแน่นนั้น แตกต่างจากวิธีการควบคุมในกรณีของสภาพการจราจรที่เบาบาง การคำนวณค่ารอบสัญญาณไฟคำนวณส่วนใหญ่นิยมคำนวณโดยใช้จากสูตรของ Webster ดังนี้

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - Y}$$

โดยที่ C_o = รอบเวลาสัญญาณไฟ หน่วย วินาที

L = ช่วงเวลาที่ต้องสูญเสียไป (Lost Time) หน่วย วินาที
Y = อัตราส่วนความต้องการใช้งานในหนึ่งรอบเวลาสัญญาณไฟ โดยทั่วไปใช้ไม่เกิน 0.85 แต่ต้องไม่เกิน 1.00

จากผลการสำรวจทางแยกที่มีสภาพการจราจรหนาแน่นในกรุงเทพมหานคร (9) พบว่าค่า Y ส่วนใหญ่มีค่าเกิน 1.00 จึงไม่สามารถคำนวณรอบเวลาสัญญาณไฟจากสูตรของ Webster ได้

ในการควบคุมในกรณีที่สภาพการจราจรหนาแน่นนั้น เน้นการความยาวคิวไม่ให้ยาวต่อเนื่องไปจนถึงทางแยกถัดไป (Upstream Intersection) เมื่อเกิดคิวของยวดยานขึ้นก็จะเกิดคลื่นหยุดของยวดยาน (Stopping Wave) เคลื่อนตัวไปทางด้าน Upstream เสมอ จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปริมาณยวดยานที่วิ่งเข้ามาหยุดท้ายคิว เมื่อเป็นเช่นนี้พฤติกรรมการเกิดคิวของยวดยานจึงขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วของคลื่นหยุด การออกแบบสัญญาณไฟเพื่อควบคุมการเกิดคิวในสภาพการจราจรที่หนาแน่น จึงต้องพิจารณาพฤติกรรมของ Stopping Wave เป็นตัวแปรหลัก

ตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วยคือ คลื่นการเคลื่อนตัว (Starting Wave) ความเร็วเฉลี่ยของยวดยาน และความยาวคิวสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น วิธีการคำนวณโดยอาศัยหลักการนี้มีสมมุติฐานที่สำคัญคือ

- คลื่นการเคลื่อนตัว (Starting Wave) และหยุด (Stopping Wave) มีไม่เกิน 1 คลื่นเท่านั้น โดยมีจุดเริ่มจากบริเวณทางแยก
- ความเร็วเฉลี่ยของยวดยาน ความเร็วคลื่นการหยุด (Stopping Wave Speed) และความเร็วคลื่นการเคลื่อนตัว (Starting Wave Speed) มีอัตราคงที่ภายในหนึ่งรอบเวลาสัญญาณไฟ
- ไม่พิจารณาผลกระทบจากช่วงเวลาที่สูญเสีย (Lost Time) และจังหวะเวลาสัญญาณไฟเหลือง
- ไม่มีความยาวคิวค้างบริเวณทางแยก เมื่อเริ่มต้นสัญญาณไฟแดง
- ความยาวของคิวที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบเวลาต้องไม่เกินความยาว ช่วงถนน

การคำนวณค่ารอบเวลาใช้วิธีการคำนวณจากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของยวดยานเพียงด้านหนึ่งของทางแยกเท่านั้น ซึ่งด้านนั้นเป็นด้านที่ทำให้เกิดปัญหาคิวที่มีแนวโน้มยาวไปปิดกั้นทางแยกถัดย้อนขึ้นไป แต่ต้องมีเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีมากกว่า 1 ด้านไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากหลักการออกแบบสัญญาณไฟด้วยวิธีนี้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเพียงด้านใดด้านหนึ่งของทางแยก

เนื่องจากหลักการออกแบบสัญญาณไฟด้วยวิธีนี้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเพียงด้านใดด้านหนึ่งของทางแยกเท่านั้น จากรูปที่ 6.1 กำหนดให้

D = ระยะทางระหว่างทางแยกที่กำลังพิจารณา (ทางแยกหมายเลข 1) กับทางแยกที่อยู่ถัดย้อนขึ้นไป (ทางแยกหมายเลข 2) มีหน่วยเป็นเมตร

Q = ความยาวคิวสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ มีหน่วยเป็นเมตร

C_{min} = ค่ารอบเวลาสัญญาณไฟต่ำสุดที่ยอมให้ยวดยานคันสุดท้ายของคิวยาว Q เมตร ผ่านทางแยกไปได้ มีหน่วยเป็นวินาที

V_{avg} = ความเร็วเฉลี่ยของยวดยาน ที่วิ่งจากสภาพหยุดนิ่งจนถึงบริเวณท้ายคิด และคงที่ต่อไปจนถึงทางแยก มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

V_{stop} = ความเร็วเฉลี่ยคลื่นหยุด (Stopping Wave Speed) ของยวดยานมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

V_{start} = ความเร็วเฉลี่ยคลื่นออกตัว (Starting Wave Speed) ของยวดยานมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที และมีค่ามากกว่า V_{stop}

R = ช่วงเวลาสัญญาณไฟแดง มีหน่วยเป็นวินาที

G = ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว มีหน่วยเป็นวินาที

t_1 = ช่วงเวลาตั้งแต่สิ้นสุดสัญญาณไฟแดงจนถึงจังหวะเวลาที่คลื่นออกตัว เคลื่อนตัวมาจนบรรจบคลื่นหยุดนิ่งพอดี มีหน่วยเป็นวินาที

$t_2 = G - t_1$

กำหนดให้ยวดยานคันสุดท้ายของคิวสามารถเคลื่อนตัวผ่านทางแยกไปได้พอดี ในจังหวะสิ้นสุดรอบเวลาสัญญาณไฟ ดังนั้นค่ารอบเวลาที่ได้จากการคำนวณจึงเป็นค่ารอบเวลาน้อยที่สุดที่สามารถปล่อยยวดยานที่จอดรอคอยในรอบเวลานั้น ผ่านไปหมดพอดี จากรูปที่ 6.1

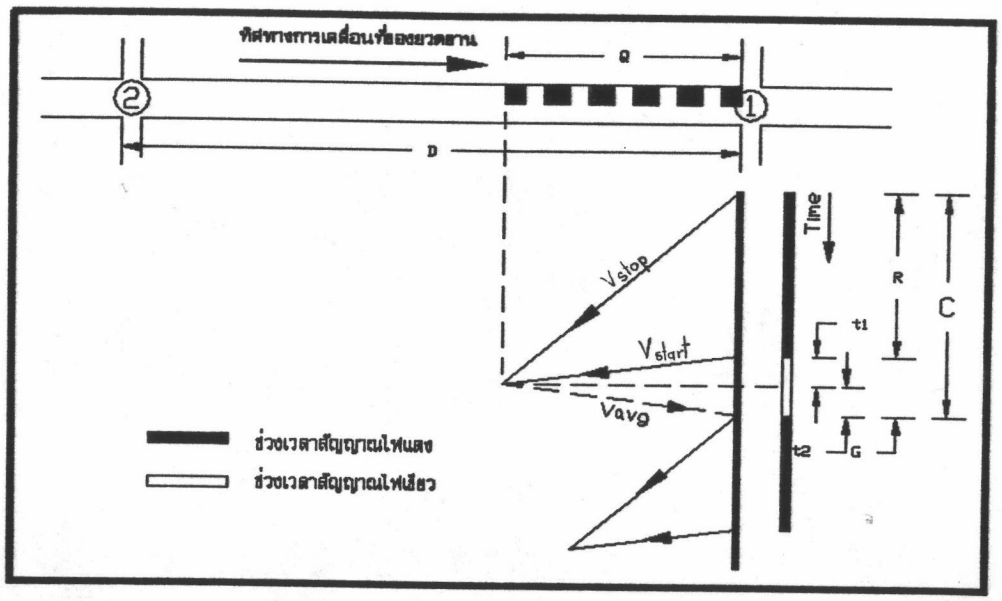
$$Q = V_{avg} \cdot t_2 \quad \text{..... (6.1)}$$

$$Q = V_{stop} \cdot (R + t_1) \quad \text{..... (6.2)}$$

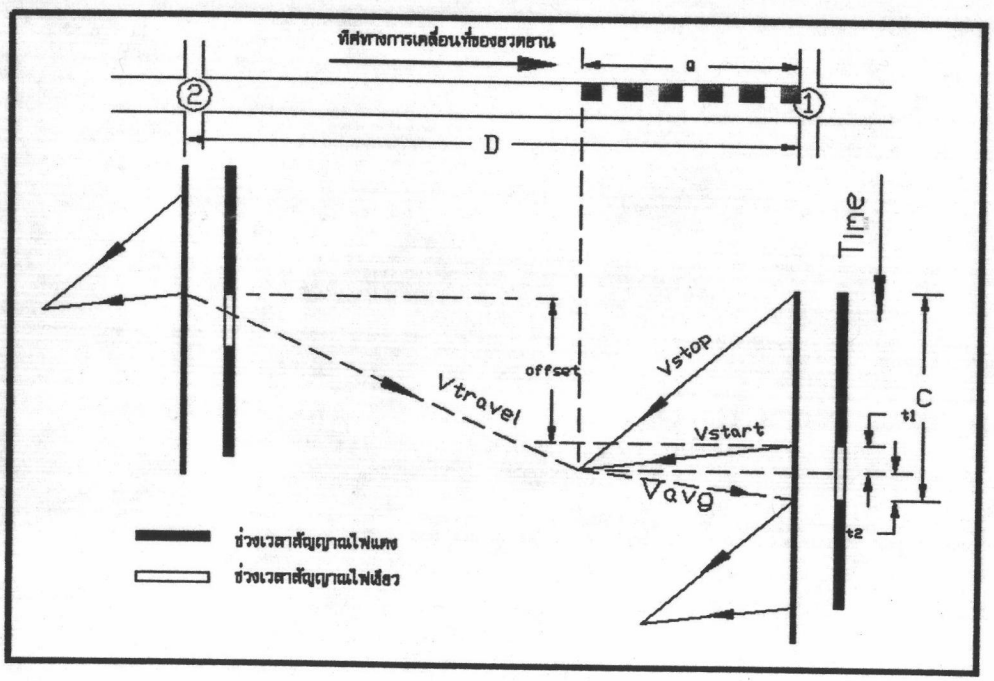
$$Q = V_{start} \cdot t_1 \quad \text{..... (6.3)}$$

$$C_{min} = R + G$$

รูปที่ 6.1 รูปประกอบการคำนวณรอบเวลาสัญญาณไฟ ในสภาพการจราจรหนาแน่น



รูปที่ 6.2 รูปประกอบการคำนวณการประสานสัมพันธ์สัญญาณไฟ ในสภาพการจราจรหนาแน่น



$$C_{min} = R + t_1 + t_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.4)$$

แทนค่า $R + t_1$ จากสมการ 6.2 ลงในสมการ 6.4 และ t_2 จากสมการ 6.1 ลงในสมการ 6.4 จะได้

$$C_{min} = \frac{Q}{V_{stop}} + \frac{Q}{V_{avg}}$$

$$= Q \cdot \left(\frac{1}{V_{stop}} + \frac{1}{V_{avg}} \right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า ค่ารอบเวลาต่ำสุดที่คำนวณได้จากสมการ 6.5 นั้น จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความยาวคิวสูงสุดที่สามารถปล่อยออกจากทางแยกได้ (Q) แต่จะผกผันกับความเร็วของคลื่นหยุด (V_{stop}) และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของยวดยาน (V_{avg}) ค่าสูงสุดของรอบเวลาที่คำนวณได้จะมีค่าไม่เกิน C_{max} โดยการแทนค่า Q ด้วย D ลงในสมการ 6.5

โดยที่ $C_{max} = D \cdot \left(\frac{1}{V_{stop}} + \frac{1}{V_{avg}} \right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.6)$

6.2 การคำนวณช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว

หลังจากได้ค่ารอบเวลาเพื่อใช้ในการประสานสัมพันธ์สัญญาณไฟแล้ว สิ่งสำคัญในลำดับต่อมาที่ต้องคำนวณคือ ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวที่เปิดให้แก่ด้านใดด้านหนึ่งของทางแยก จากรูปที่ 6.1

$$G = t_1 + t_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.7)$$

โดยที่ G เป็นค่าต่ำสุดของช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวที่สามารถปล่อยคิวของยวดยานที่ยาวไม่เกิน Q เมตร ผ่านทางแยกไปได้หมด

แทนค่า t_1 จากสมการที่ 6.3 และ t_2 จากสมการที่ 6.1 ลงในสมการที่ 6.7

จะได้

$$G = \frac{Q}{V_{start}} + \frac{Q}{V_{avg}}$$

$$= Q\left(\frac{1}{V_{start}} + \frac{1}{V_{avg}}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.8)$$

ค่าสูงสุดของ G มีค่าไม่เกิน G_{max} โดยที่

$$G_{max} = D \cdot \left(\frac{1}{V_{start}} + \frac{1}{V_{avg}}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.9)$$

ค่า G_{max} ต้องไม่เกินค่ารอบเวลาสัญญาณไฟหักด้วยเวลาสัญญาณไฟเขียวในจังหวะอื่นรวมกัน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 6.5 และสมการที่ 6.9 จะเห็นว่ามีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งต่างกันก็เพียง สมการที่ 6.5 ใช้ V_{stop} แต่สมการที่ 6.9 เป็น V_{start} เท่านั้น ดังนั้นค่ารอบเวลาจึงขึ้นอยู่กับความเร็วเฉลี่ยคลื่นหยุด (Stopping Wave Speed) ส่วนช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว จะขึ้นอยู่กับความเร็วเฉลี่ยคลื่นออกตัว (Starting Wave Speed) ซึ่งในสภาพปกติความเร็วเฉลี่ยของคลื่นหยุดจะขึ้นอยู่กับอัตราการเข้าสู่ทางแยกของยวดยาน และความเร็วเฉลี่ยคลื่นออกตัวขึ้นอยู่อัตราการเคลื่อนตัวออกจากทางแยกของยวดยาน โดยปกติค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นออกตัวจะสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นหยุด ค่ารอบเวลาสัญญาณไฟที่คำนวณได้จึงสูงกว่าช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวเสมอ ดังนั้นเงื่อนไขที่สำคัญในการคำนวณค่ารอบเวลาและช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวคือ ความเร็วเฉลี่ยของคลื่นหยุดต้องน้อยกว่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นออกตัว มิฉะนั้นจะทำให้ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวที่คำนวณได้จะมากกว่าค่ารอบเวลาสัญญาณไฟ

6.3 การคำนวณเวลาในการประสานสัมพันธ์ระหว่างทางแยก

เมื่อได้ค่ารอบเวลาของทางแยกวิกฤติแล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการควบคุมสัญญาณไฟให้สัมพันธ์กันระหว่างทางแยกวิกฤติกับทางแยกที่อยู่ถัดย้อนขึ้นไปทุกๆด้าน ค่ารอบเวลาที่ใช้กับทางแยกลุ่มนี้เป็นค่าเดียวกันกับทางแยกวิกฤติ จุดประสงค์ในการประสานสัมพันธ์ในสภาพการจราจรหนาแน่นก็เพื่อทำให้ยวดยานสามารถเคลื่อนตัวไปสู่ทางแยกวิกฤติ โดยไม่หยุดชะงัก

ทำให้เกิดคลื่นหยุดขึ้นมา คลื่นหยุดนี้จะเคลื่อนตัวย้อนกระแสการจราจรขึ้นไป เป็นผลให้เกิดสภาพคิวขึ้นไปปิดกั้นทางแยกที่อยู่ถัดย้อนจากทางแยกวิกฤติขึ้นมา

วิธีการสร้างสูตรในการคำนวณค่าเวลาในการประสานสัมพันธ์ (Offset Time) มีสมมุติฐานเช่นเดียวกับการคำนวณค่ารอบเวลาและช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว สมมุติฐานที่เพิ่มขึ้นคือ ยวดยานคันแรกที่เคลื่อนตัวออกไปจากทางแยกที่อยู่ถัดย้อนขึ้นมาจากทางแยกวิกฤตินั้นสามารถเคลื่อนตัวไปยังทางแยกวิกฤติโดยไม่เกิดสภาพคลื่นหยุดขึ้น ยกเว้นการเคลื่อนตัวไปอยู่ในสภาพที่หยุดนิ่งเท่านั้น

กำหนดให้ V_{travel} = ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของยวดยานจากทางแยกถัดย้อนขึ้นมาไปสู่ท้ายคิว

Offset = ช่วงเวลาที่ใช้ในการประสานสัมพันธ์เป็นค่าต่ำสุดที่จะทำให้ยวดยานคันแรกเคลื่อนมาในจังหวะพอดีกับยวดยานคันสุดท้ายในคิวจากทางแยกวิกฤติเคลื่อนตัวจากสภาพหยุดนิ่ง

จากรูปที่ 6.2

$$D - Q = V_{travel} \cdot (Offset + t_1) \quad ..... \quad (6.10)$$

แทนค่า t_1 จากสมการที่ 6.3 ลงในสมการที่ 6.10 จะได้

$$D - Q = V_{travel} \cdot \left(Offset + \frac{Q}{V_{start}} \right)$$

$$D - Q = \frac{V_{travel}}{V_{start}} \cdot (Offset \cdot V_{start} + Q)$$

$$V_{start} \cdot D - V_{start} \cdot Q = (V_{travel} \cdot Offset \cdot V_{start}) + (V_{travel} \cdot Q)$$

$$V_{travel} \cdot V_{start} \cdot Offset = (V_{travel} \cdot Q) + (V_{start} \cdot Q) - (V_{start} \cdot D)$$

$$Offset = \frac{[\ (Q \cdot V_{travel}) + (Q \cdot V_{start}) - (V_{start} \cdot D)\ ]}{V_{travel} \cdot V_{start}} \quad .. \ (\ 6.11\ )$$

จะเห็นได้ว่า ช่วงเวลาการประสานสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับ ความยาวคิวของทางแยกวิกฤติ และระยะทางระหว่างทางแยกเป็นหลัก โดยที่ความยาวคิวที่ต้องการปล่อยให้ออกไปได้หมด (Q) มีค่าไม่เกินระยะทางระหว่างทางแยก การประสานสัมพันธ์เป็นการประสานสัมพันธ์ในทิศทางการจราจรทิศทางเดียวเท่านั้น

การนำไปใช้งาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ระบุทางแยกที่เป็นทางแยกวิกฤติ และทิศทางที่เกิดคิวยาวจนปิดกั้นทางแยกถัดขึ้นไป
- กำหนดความยาวคิวสูงสุด (Q) แล้วคำนวณรอบเวลาสัญญาณไฟต่ำสุด (C_{min}) จากสมการที่ 6.5 และรอบเวลาสูงสุด (C_{max}) จากสมการที่ 6.6
- คำนวณช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียวที่เปิดให้กับด้านที่มีปัญหาเรื่องคิว โดยใช้สมการ 6.8
- คำนวณจังหวะเวลาสัญญาณไฟเขียวในจังหวะอื่นๆที่เหลือ ถ้ามีไม่เพียงพอสามารถปรับรอบเวลาสัญญาณไฟเพิ่มได้ แต่ต้องไม่เกินค่า C_{max}
- คำนวณค่า Offset สำหรับการประสานสัมพันธ์ระหว่างทางแยกจากสมการที่ 6.11

ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ฉ.