



การเปรียบเทียบอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง
COMPARISON OF VEHICLE-DISCHARGING CAPACITY AT TOLL BOOTHS

พลเทพ เลิศวรวนิช

วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ กรมทางหลวง

Corresponding author, E Mail: ponla.le@doh.go.th

บทคัดย่อ

การจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดความล่าช้าและลดระดับการให้บริการแก่ผู้ใช้ทาง โดยเฉพาะรูปแบบการเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด แนวคิดหนึ่งที่มีการนำเสนอขึ้นมามีทดแทนรูปแบบบริการแบบปัจจุบันที่ตู้เก็บค่าผ่านทางให้บริการรถยนต์ทีละหนึ่งคัน (Single Service) คือการเพิ่มจำนวนเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางที่หน้าตู้เก็บค่าผ่านทาง เพื่อเพิ่มจำนวนรถยนต์ที่ได้รับบริการในคราวเดียวกัน เมื่อรถยนต์เหล่านี้ได้รับบริการแล้วเสร็จจึงให้เคลื่อนที่ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางไปด้วยกันและรถยนต์กลุ่มถัดไปจึงเคลื่อนที่เข้ามาเพื่อชำระค่าผ่านทางต่อไป (Tandem Service) บทความนี้ขอเสนอแนวคิดการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางทั้งสองรูปแบบ โดยใช้หลักวิศวกรรมจราจรและสถิติในการพิจารณา ซึ่งถ้าประสิทธิภาพของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางทั้งสองรูปแบบไม่แตกต่างกันจะพบว่า Tandem Service จะให้อัตราการระบายรถยนต์ได้สูงกว่า Single Service

คำสำคัญ: จราจรติดขัด; ด่านเก็บค่าผ่านทาง; อัตราการระบายรถยนต์

ABSTRACT

Traffic congestion at toll plazas on motorways or expressways are commonly experienced by road users. It incurs delays and reduction of level of service particularly at manual cash-toll collection booths. In place of a single service at a toll booth, the concept of a tandem service, which requires several toll collectors simultaneously collecting tolls in cash in front of a toll booth, is currently introduced and publicly discussed in order to increase vehicle-discharging capacity and relieve traffic congestion. This paper presents a vehicle-discharging capacity comparison between the single and the tandem services at toll booths. The proposed methodology is based on traffic engineering and statistics principles. Given the same distribution of service times of toll collectors for both single and tandem services, it is found that the tandem service has a higher vehicle-discharging capacity than the single service does.

KEYWORDS: Traffic Congestion; Toll Booth; Vehicle-Discharging Capacity

1. บทนำ

ทางหลวงพิเศษหรือทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง คือ ทางหลวงที่จัดหรือทำไว้เพื่อให้การจราจรผ่านได้ตลอดรวดเร็วเป็นพิเศษตามที่รัฐมนตรีประกาศ กำหนด และได้ลงทะเบียนไว้เป็นทางหลวงพิเศษโดยกรมทางหลวงเป็นผู้ดำเนินการก่อสร้างขยายบูรณะและบำรุงรักษา รวมทั้งควบคุมให้มีการเข้าออกได้เฉพาะ โดยทางเสริมที่เป็นส่วนหนึ่งของทางหลวงพิเศษตามที่กรมทางหลวงจัดทำขึ้นไว้เท่านั้น จากการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศส่งผลให้การคมนาคมขนส่งเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย การจราจรหนาแน่นติดขัดจึงพบเห็นได้ทั่วไปในเขตเมืองหรือบนถนนที่มีปริมาณจราจรสูง ทางหลวงพิเศษซึ่งมีการควบคุมทางเข้าออกจึงเป็นหนึ่งในนโยบายของรัฐบาลในการรับรองปริมาณการเดินทางขนส่งที่เพิ่มขึ้นทุกปี ปกติแล้วทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองมักมีการเก็บค่าผ่านทางสำหรับรถยนต์ที่ต้องการเข้ามาใช้บริการที่บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง ตัวอย่างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองที่มีการเก็บค่าผ่านทาง ได้แก่ ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 และทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก ดังนั้นความรวดเร็วในการเก็บค่าผ่านทางหรืออัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อสภาพการจราจรบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง ถ้าอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางสูงกว่าปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านด่านก็สามารถกล่าวได้ว่าด่านเก็บค่าผ่านทางไม่ใช่ตำแหน่งคอขวด (Bottleneck) ในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางต่ำกว่าปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านด่าน ตำแหน่งคอขวดก็จะอยู่ที่ด่านเก็บค่าผ่านทางนั่นเอง ซึ่งเป็นสิ่งที่หน่วยงานบริหารการจราจรไม่ต้องการ ปัจจุบันการเก็บค่าผ่านทางทำที่ตู้เก็บค่าผ่านทาง (Toll Booths) ซึ่งดำเนินการใน 2 ลักษณะ คือ 1) แบบจ่ายด้วยเงินสดในบทความนี้จะเรียกว่า Manual Toll Collection (MTC) และ 2) แบบจ่ายเงินล่วงหน้าผ่านระบบอิเล็กทรอนิกส์ในบทความนี้จะเรียกว่า Electronic Toll Collection (ETC) โดยบทความนี้จะพิจารณาวิเคราะห์เฉพาะแบบจ่ายด้วยเงินสดหรือ MTC เท่านั้น

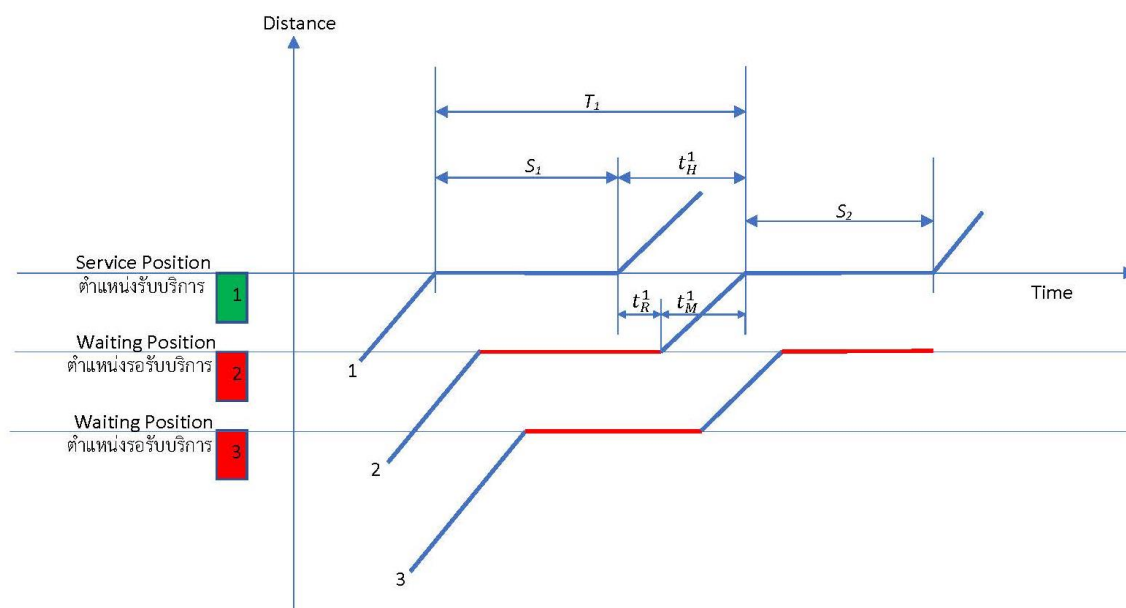
ในการเก็บค่าผ่านทางแบบ MTC เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางจะให้บริการในตู้เก็บค่าผ่านทาง (Toll Booths) เมื่อรถยนต์เข้ามาใช้บริการหยุดและจ่ายค่าผ่านทาง เจ้าหน้าที่จะเก็บเงิน ทอนเงินและให้ใบเสร็จ เมื่อดำเนินการแล้วเสร็จรถยนต์คันดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่ออกไป และรถยนต์คันถัดไปจะเคลื่อนเข้ามาที่ตู้เก็บค่าผ่านทางเพื่อชำระค่าผ่านทางต่อไป แต่ละตู้เก็บค่าผ่านทางจะให้บริการรถยนต์ได้ครั้งละหนึ่งคัน จึงเรียกว่า Single Service ความรวดเร็วในการให้บริการหรืออัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง จึงขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางใช้ในบริการรถยนต์แต่ละคันและระยะเวลาที่รถยนต์แต่ละคันใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้เก็บค่าผ่านทาง ถ้าอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางต่ำกว่าปริมาณการจราจรที่ต้องการผ่านด่าน ปัญหาการจราจรติดขัดสะสมหน้าด่านก็จะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ปัจจุบันช่วงเวลารุ่งเรืองเช้าและเย็น หรือวันหยุดนักขัตฤกษ์พบว่าด่านเก็บค่าผ่านทางหลายแห่งมีสภาพการจราจรติดขัดสะสมบริเวณหน้าด่าน จึงเป็นที่มาของการเสนอแนวคิดเพื่อเพิ่มอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง แนวคิดหนึ่งที่มีการนำเสนอขึ้นมาและมีการกล่าวถึงกันมาก คือ การเพิ่มจำนวนเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางที่หน้าตู้เก็บค่าผ่านทาง เพื่อเพิ่มจำนวนรถยนต์ที่ได้รับบริการในคราวเดียวกันอาจจะเป็น 5 – 10 คัน เมื่อรถยนต์เหล่านี้ได้รับบริการแล้วเสร็จจึงให้เคลื่อนที่ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางไปด้วยกันและรถยนต์กลุ่มถัดไปจึงเคลื่อนที่เข้ามาเพื่อชำระค่าผ่านทางต่อไป ซึ่งแต่ละตู้เก็บค่าผ่านทางจะให้บริการรถยนต์ได้มากกว่าหนึ่งคันขึ้นอยู่กับจำนวนเจ้าหน้าที่ที่รอบการอยู่นำตู้เก็บ

ค่าผ่านทางจึงเรียกว่า Tandem Service จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการศึกษาจำนวนหนึ่งได้นำเสนอสูตรการคำนวณอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางโดยใช้หลักการแถวคอย (Queueing Theory) อาทิ [4] Hall and Daganzo (1983) และ [5] Gu et al (2012) ซึ่งเป็นการนำเสนอในเชิงทฤษฎี

บทความนี้ขอนำเสนอบทวิเคราะห์อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางโดยนำเอาทางแนวการศึกษาของ [4] Hall and Daganzo (1983) มาประยุกต์ใช้ โดยเปรียบเทียบรูปแบบ Single Service กับ Tandem Service พร้อมเสนอว่าภายใต้เงื่อนไขใดที่รูปแบบการให้บริการ Single Service หรือ Tandem Service จะรวดเร็วกว่าอีกรูปแบบหนึ่ง โดยพิจารณาเฉพาะการจ่ายค่าผ่านทางแบบเงินสดหรือ MTC เท่านั้น สิ่งที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นแนวคิดส่วนตัวของผู้เขียนในเชิงทฤษฎีวิศวกรรมจราจรเท่านั้น โดยไม่รวมถึงข้อปฏิบัติหรือระเบียบอื่นใดที่อาจเกี่ยวข้องในการนำมาปฏิบัติจริง โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

2. อัตราการระบายรถยนต์แบบ MTC Single Service ที่ตู้เก็บค่าผ่านทาง

เมื่อรถยนต์วิ่งเข้าสู่ตู้เก็บค่าผ่านทางและหยุดเพื่อชำระค่าผ่านทาง เจ้าหน้าที่จะรับเงิน จ่ายใบเสร็จพร้อมเงินทอน เมื่อดำเนินการแล้วเสร็จรถยนต์คันดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่ออกไป และรถยนต์คันถัดไปเคลื่อนที่เข้ามารับบริการต่อไป จากขั้นตอนการให้บริการที่ตู้เก็บค่าผ่านทางที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนเป็นกราฟระยะทางกับเวลา (Time – Space Diagram) ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การให้บริการแบบ Single Service

จากรูปที่ 1 จะพบว่า ระยะเวลาตั้งแต่รถยนต์หมายเลข 1 เริ่มต้นได้รับบริการจากเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางจนกระทั่งรถยนต์หมายเลข 2 เริ่มต้นได้รับบริการเท่ากับระยะเวลาที่เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางใช้ในการรับเงินจากคนขับรถยนต์ จ่ายใบเสร็จและทอนเงินให้แก่คนขับ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่รถยนต์หยุดอยู่ที่ตำแหน่งรับบริการ (Service Position) หรือ s_1 หลังจากนั้นรถยนต์หมายเลข 1 ก็

จะเคลื่อนที่ออกไปและรถยนต์หมายเลข 2 เคลื่อนที่เข้ามาให้บริการแทนซึ่งระยะเวลาดังกล่าวนี้คือ t_H^1 ซึ่งเป็นผลรวมระหว่าง t_R^1 (Perception and Reaction Time) และ t_M^1 (Move-up Time) ของผู้ขับขีรถยนต์หมายเลข 2 ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งรูปแบบการให้บริการที่ผู้เก็บค่าผ่านทางก็จะซ้ำขั้นตอนตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นไปเรื่อยๆ ดังนั้นระยะเวลาในการบริการรถยนต์แต่ละคันจนกว่ารถยนต์คันถัดไปจะเริ่มได้รับบริการจะเท่ากับ

$$T_i = S_i + t_H^i = S_i + t_R^i + t_M^i \quad (1)$$

โดยที่

T_i = ระยะเวลารวมในการบริการรถยนต์คันที่ “i”

S_i = ระยะเวลาตั้งแต่รถยนต์คันที่ “i” เริ่มต้นได้รับบริการ จนกระทั่งเริ่มเคลื่อนออกจากผู้เก็บค่าผ่านทาง

t_R^i = ระยะเวลาในการสังเกตและตอบสนอง (Perception and Reaction Time) ของผู้ขับขีรถยนต์คันที่ “i + 1”

t_M^i = ระยะเวลาที่รถยนต์คันที่ “i + 1” เริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ผู้เก็บค่าผ่านทางจนกระทั่งหยุดได้รับบริการ (Move-up Time)

เนื่องจาก S_i ของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทาง t_R^i และ t_M^i ของผู้ขับขีรถยนต์แต่ละคันแตกต่างกันอันเป็นผลมาจากความซ้ำเร็วของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางในการทอนเงินและจ่ายใบเสร็จ และพฤติกรรมการขับขีของคนขับแต่ละคน ในการคำนวณอัตราการระบายรถยนต์แบบ Single Service ที่ผู้เก็บค่าผ่านทางจึงควรพิจารณาจากค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Expected Value) ของตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสมมุติว่า S_i แต่ละตัวเป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variables) ที่มีการกระจายแบบ Identically Independently Distributed (IID) กล่าวคือแต่ละค่า “i” มีการกระจายตัวด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากันแต่เป็นอิสระต่อกัน เช่นเดียว t_R^i ก็สมมุติว่าเป็นตัวแปรสุ่มแบบ IID และ t_M^i ก็สมมุติว่าเป็นตัวแปรสุ่มแบบ IID ดังนั้นค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการบริการรถยนต์แต่ละคันจะเท่ากับ

$$E(T) = E(S) + E(t_M^i) + E(t_R^i) \quad (2)$$

โดยที่

$E(T)$ = ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Expected Value) ของ T_i

$E(S)$ = ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Expected Value) ของ S_i

$E(t_M^i)$ = ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Expected Value) ของ t_M^i

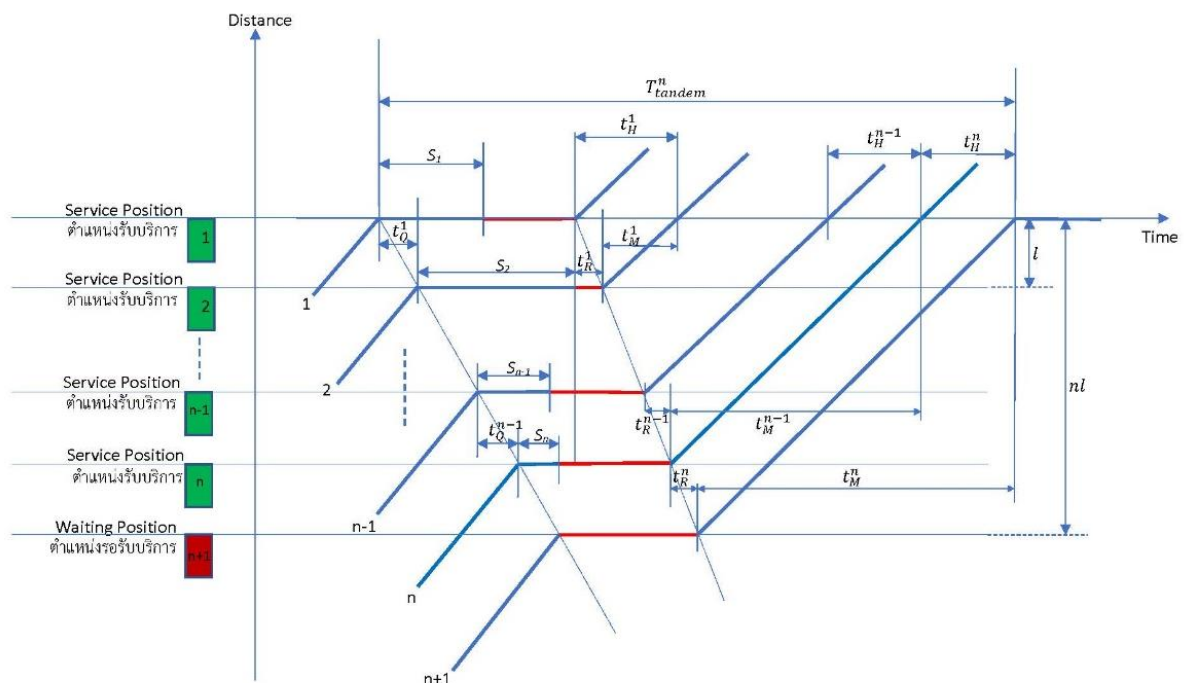
$E(t_R^i)$ = ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Expected Value) ของ t_R^i

สำหรับอัตราการระบายรถยนต์แบบ MTC Single Service ก็จะเท่ากับส่วนกลับของค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวังของระยะเวลาในการบริการรถยนต์แต่ละคันนั่นเอง

$$\therefore \text{CAPACITY}_{\text{single}} = \frac{1}{E(T)} = \frac{1}{E(S) + E(t_M^1) + E(t_R)} \quad (3)$$

3. อัตราการระบายรถยนต์แบบ MTC Tandem Service ที่ตู้เก็บค่าผ่านทาง

สำหรับการให้บริการแบบ MTC Tandem Service นี้สามารถดำเนินการแบบชั่วคราวได้โดยการเพิ่มเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางที่หน้าตู้เก็บค่าผ่านทาง เพื่อเพิ่มจำนวนรถยนต์ที่ให้บริการในคราวเดียวกัน เมื่อรถยนต์เหล่านี้ได้รับการแล้วเสร็จจึงให้เคลื่อนที่ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางไป (ทั้งนี้สมมุติให้รถยนต์ทุกคันในกลุ่มต้องรองจนกว่ารถยนต์ทุกคันจะได้รับการแล้วเสร็จจึงจะเคลื่อนที่ออกไปได้) และรถยนต์กลุ่มถัดไปจึงเคลื่อนที่เข้ามาเพื่อชำระค่าผ่านทางต่อไป จากขั้นตอนที่กล่าวไปข้างต้นนี้สามารถเขียนเป็นกราฟระหว่างระยะทางกับเวลา (Time-Space Diagram) ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การให้บริการแบบ Tandem Service

รูปที่ 2 เป็นการให้บริการรถยนต์ n คันแบบ Tandem Service เมื่อรถยนต์คันที่ 1 เข้ามาที่ตำแหน่งรับบริการ เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางก็จะดำเนินการเก็บค่าผ่านทาง ทอนเงิน และจ่ายใบเสร็จเป็นระยะเวลาเท่ากับ S_i แต่รถยนต์คันที่ 1 ยังไม่ได้เคลื่อนที่ออกไป รถยนต์คันที่ 2 ก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการลำดับถัดมาเช่นเดียวกันกับรถยนต์คันที่ 3, 4, ... จนถึงคันที่ n ซึ่งระยะเวลาที่รถยนต์แต่ละคันใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการในลำดับที่อยู่ติดกัน จะเท่ากับ t_Q^i เมื่อรถยนต์ทุกคันตั้งแต่คันที่ 1 ถึง n ได้รับการบริการจากเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางแล้วเสร็จ รถยนต์คันที่ 1 ก็จะเริ่มเคลื่อนที่ออกไป ต่อด้วยรถยนต์คันที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จนกระทั่งรถยนต์คันที่ n ออกจากด่านเก็บค่าผ่านทาง ซึ่งระยะเวลาในการเคลื่อนที่ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางของรถยนต์แต่ละคันคือ

t_H^j (Time Headway) และรถยนต์คันที่ $n+1$ มาจอดรอรับบริการจากเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทาง รูปแบบการให้บริการรถยนต์ n คัน ถัดไปก็จะเข้าขั้นตอนตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นไปเรื่อยๆ ดังนั้นระยะเวลาในการบริการรถยนต์ n คัน จะเท่ากับ

$$T_{\text{tandem}}^n = \text{MAX} \left\{ S_1 + t_H^1; t_Q^1 + S_2 + \sum_{j=1}^2 t_H^j; \dots; \sum_{i=1}^{n-1} t_Q^i + S_n + \sum_{j=1}^n t_H^j \right\} \quad (4)$$

โดยที่

T_{tandem}^n = ระยะเวลารวมในการให้บริการรถยนต์ n คัน แบบ Tandem Service

S_i = ระยะเวลาตั้งแต่รถยนต์คันที่ “ i ” เริ่มต้นได้รับการบริการจากเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางและพร้อมที่จะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งที่ได้รับบริการ

t_H^i = ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ด่านเก็บค่าผ่านทางของรถยนต์คันที่ “ i ” (Time Headway)

t_Q^i = ระยะเวลาที่รถยนต์คันที่ “ i ” เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการ จนกระทั่งรถยนต์คันที่ “ $i+1$ ” เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการลำดับถัดไป

ในการประมาณค่า T_{tandem}^n จากสมการที่ (4) ให้ประมาณจากค่ามากที่สุดคือ

$$T_{\text{tandem}}^n \approx \sum_{i=1}^{n-1} t_Q^i + \sum_{j=1}^n t_H^j + \text{MAX} \{ S_1, S_2, \dots, S_n \} \quad (5)$$

ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2 จะพบว่า $\sum_{j=1}^n t_H^j = t_M^n + \sum_{i=1}^n t_R^i$ โดยที่ t_M^n คือระยะเวลาที่รถยนต์คันที่ “ $n+1$ ” ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งรอรับบริการที่ “ $n+1$ ” มาหยุดรอรับบริการที่ตำแหน่งรับบริการที่ “ 1 ” ส่วน t_R^i คือระยะเวลาในการสังเกตและตอบสนอง (Perception and Reaction Time) ของผู้ขับขี่รถยนต์คันที่ “ $i+1$ ” สมการที่ (5) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$T_{\text{tandem}}^n \approx t_M^n + \sum_{i=1}^{n-1} t_Q^i + \sum_{j=1}^n t_R^j + \text{MAX} \{ S_1, S_2, \dots, S_n \} \quad (6)$$

เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ในส่วนที่กล่าวมาแล้ว S_i ของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทาง t_R^i และ t_M^i ของคนขับรถยนต์แต่ละคันย่อมแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความช้าเร็วของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางในการทอนเงินและจ่ายใบเสร็จ และพฤติกรรมการขับขี่ของคนขับแต่ละคน ในการคำนวณอัตราการระบายแบบ Tandem Service จึงควรพิจารณาจากค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวัง (Expected Value) ของตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสมมุติว่า S_i แต่ละตัวเป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variables) ที่มีการกระจายแบบ Identically Independently Distributed (IID) กล่าวคือแต่ละค่า “ i ” มีการกระจายตัวด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากันแต่เป็นอิสระต่อกัน เช่นเดียวกัน t_R^i ก็สมมุติว่าเป็นตัวแปรสุ่มแบบ IID และ t_M^n ก็สมมุติว่าเป็นตัวแปรสุ่ม ดังนั้นค่าเฉลี่ยของระยะเวลารวมในการบริการรถยนต์ n คันจะเท่ากับ

$$E(T_{tandem}^n) = E(t_M^n) + (n-1)E(t_Q) + nE(t_R) + E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\}) \quad (7)$$

สำหรับอัตราการระบายรถยนต์แบบ Tandem Service ก็จะเท่ากับ n คูณด้วยส่วนกลับของค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวังของระยะเวลารวมในการให้บริการรถยนต์ n คัน หรือเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \therefore \text{CAPACITY}_{tandem} &= \frac{n}{E(T_{tandem}^n)} \\ &= \frac{n}{E(t_M^n) + (n-1)E(t_Q) + nE(t_R) + E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\})} \end{aligned} \quad (8)$$

จากสมการที่ (7) และ (8) พบว่า $E(t_M^n)$ และ $E(t_Q)$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม t_M^n และ t_Q ตามลำดับ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากข้อมูล แต่ $E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\})$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม $\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ซึ่งยากมากในการเก็บค่า แต่สามารถคำนวณค่าได้ถ้าทราบการกระจายของตัวแปรสุ่ม S_i ตามหลักการทางสถิติ Extreme Value Distribution โดยกำหนดให้ S_i เป็นตัวแปรสุ่มแบบ IID. ที่มี Cumulative Distribution Function (CDF) เป็น $F_S(x)$ ดังนั้นตัวแปรสุ่ม

$Z = \max\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ก็จะมี Cumulative Distribution Function (CDF) ของ Z , $F_Z(x) = P[Z \leq x] = \{F_S(x)\}^n$ ลำดับต่อไปก็คือการคำนวณ $E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\})$ ที่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF_Z(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} nx \{F_S(x)\}^{n-1} dx \quad (9)$$

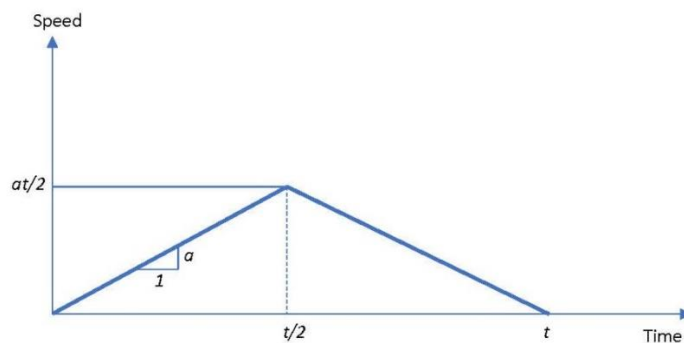
เมื่อได้ค่าดังกล่าวแล้วก็นำไปแทนค่าในสมการที่ (8) เพื่อคำนวณค่าอัตราการระบายรถยนต์แบบ Tandem Service ต่อไป

4. การเปรียบเทียบอัตราการระบายระหว่างแบบ Single Service และ Tandem Service

ในการเปรียบเทียบอัตราการระบายรถยนต์แบบ Single Service และ Tandem Service เราจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ อาทิ $E(t_R)$, $E(t_M^1)$, $E(t_M^n)$, $E(t_Q)$, $E(S)$ และ $E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\})$ เป็นต้น ในบทความนี้จะขอเสนอแนวคิดในการประมาณค่าตัวแปรเหล่านี้ดังนี้

- $E(t_R)$ คือค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการสังเกตและตอบสนอง (Perception and Reaction Time) ของผู้ขับขี่รถยนต์นั้น ในบทความทางวิชาหรือหนังสือวิศวกรรมงานทาง อาทิ [1] AASHTO (2018), [3] Mannering and Washburn (2013), และ [2] Findley et.al. (2016) ได้ให้ค่าโดยประมาณของ $E(t_R)$ ไว้ที่ 2.5 วินาทีด้วยกันทั้งสิ้น ในบทความนี้จะใช้ค่า 2.5 วินาทีในการคำนวณอัตราการระบายรถยนต์เช่นเดียวกัน

- b) $E(t_M^1)$ และ $E(t_M^n)$ คือค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่รถยนต์คันที่ “2” หรือคันที่ “n+1” ตามลำดับเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้เก็บค่าผ่านทางจนกระทั่งหยุดได้รับการบริการรูปที่ 1 และ 2 ประกอบ ในบทความนี้จะประมาณระยะเวลาดังกล่าวโดยใช้หลักกลศาสตร์ในการคำนวณ โดยสมมติให้รถยนต์เคลื่อนที่จากหยุดนิ่งด้วยอัตราเร่งคงที่และชะลอความเร็วจนหยุดนิ่งด้วยอัตราชะลอที่คงที่เช่นเดียวกันดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราเร่งและชะลอความเร็วของรถยนต์เมื่อเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งรับบริการ

- จากหลักกลศาสตร์ $E(t_M^1) = 2\sqrt{\frac{l}{a}}$ และ $E(t_M^n) = 2\sqrt{\frac{nl}{a}}$ โดยที่ l คือระยะทางจากหน้ารถยนต์ถึงหน้ารถยนต์ที่ได้รับการบริการสองคันที่อยู่ติดกัน (มีค่าประมาณ 7.5 เมตร) n คือจำนวนตำแหน่งรับบริการแบบ Tandem Service ดังรูปที่ 2 และ a คืออัตราเร่งและอัตราการชะลอความเร็วของรถยนต์ (มีค่าประมาณ 2.0 เมตรต่อวินาที²) ดังนั้น $E(t_M^1) = 3.87$ วินาที และ $E(t_M^n) = 3.87\sqrt{n}$ วินาที
- c) $E(t_Q)$ คือระยะเวลาที่รถยนต์คันที่ “r” เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการ จนกระทั่งรถยนต์คันที่ “i+1” เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการลำดับถัดไปตามรูปที่ 2 ในการวิเคราะห์หาค่า $E(t_Q)$ นั้นในทางวิศวกรรมจราจรถือว่าเป็นระยะเวลาที่ Backward wave speed (w) ใช้ในการเคลื่อนที่ย้อนกลับมาด้านหลังเมื่อแถวคอยยาวขึ้นเป็นระยะทางเท่ากับ ความยาวระหว่างหน้ารถยนต์สองคันที่อยู่ติดกันในแถวคอยหรือเท่ากับ l/w ตัวอย่างเช่นแถวคอยบริเวณแยกสัญญาณไฟจราจร บทความนี้ใช้สมมติฐานว่า $l = 7.5$ เมตร $w = 10$ กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้น $E(t_Q)$ จะมีค่าประมาณ 2.7 วินาที
- d) อย่างไรก็ตามควรพิจารณาผลในทางปฏิบัติว่าระยะเวลาที่เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางใช้ในการบริการรถยนต์แต่ละคัน (S) ของกรณี Single Service และ Tandem Service จะแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร ผู้เขียนมีความเห็นว่ากรณี Single Service เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางจะปฏิบัติงานตามปกติในตู้เก็บค่าผ่านทางสำหรับกรณี Tandem Service เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางจะมีจำนวนมากกว่า 1 คน ซึ่งถ้าเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางเหล่านั้นอยู่ในตู้เก็บค่าผ่านทาง (จำเป็นต้องมีการสร้างตู้เก็บค่าผ่านทางเพิ่มซ้อนจากที่มีอยู่เดิม) ระยะเวลาในการให้บริการเก็บค่าผ่านทาง ทอนเงิน และจ่ายใบเสร็จจะมีรูปแบบการกระจาย (Distribution) ที่ไม่แตกต่างจากกรณี Single Service แต่ถ้าเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางเหล่านั้นต้องออกมาปฏิบัติงาน

นอกตู้เก็บค่าผ่านทางแล้ว ระยะเวลาในการให้บริการเก็บค่าผ่านทาง ทอนเงิน และจ่ายใบเสร็จ (S_i) ของกรณี Tandem Service จะแตกต่างจากกรณี Single Service และมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่าด้วย เนื่องจากความยากลำบากในการปฏิบัติงานนอกตู้เก็บค่าผ่านทางอันเป็นผลมาจากสภาพการจราจรและสภาพอากาศเป็นต้น สำหรับบทความนี้ขอสมมุติว่า (S_i) ของทั้งกรณี Single Service และ Tandem Service มีรูปแบบการกระจาย (Distribution) ที่ไม่แตกต่างด้วยเหตุผลเพื่อเป็นการเปรียบเทียบรูปแบบการให้บริการมากกว่าประสิทธิภาพของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางตามสภาพแวดล้อมที่ต่างกันไป ดังนั้น $E(S)$ และ $E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\})$ ในบทความนี้ใช้สมมติฐานว่าตัวแปรสุ่ม S_i ของทั้ง Single Service และ Tandem Service มีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) ระหว่าง b และ c ($U(b, c)$) จากหลักสถิติศาสตร์ $E(S) = (b + c) / 2$ และ $E(\max\{S_1, S_2, \dots, S_n\}) = (nc + b) / (n + 1)$ ตามสมการที่ (9)

จากสมมติฐานและประเด็นการพิจารณาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางเปรียบเทียบระหว่าง Single Service และ Tandem Service ในกรณีที่ S_i มีการกระจายแบบ $U(3,5)$ วินาที สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางแบบ Tandem Service จะระบายได้สูงกว่าแบบ Single Service ขึ้นอยู่กับจำนวนเจ้าหน้าที่บริการใน Tandem ถ้ายังเพิ่มจำนวนเจ้าหน้าที่บริการใน Tandem อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางก็จะยิ่งสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความน่าจะเป็นที่ในระยะเวลาในการรอคอยจนกว่ารถยนต์คันสุดท้ายที่ได้รับบริการแล้วเสร็จในจำนวนรถยนต์ทั้งหมดจะยิ่งเพิ่มขึ้นถ้าจำนวนรถยนต์ในการบริการแบบ Tandem Service เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางระหว่าง Single Service และ Tandem Service เมื่อ $S_i \sim U(3,5)$ วินาที

จำนวนเจ้าหน้าที่ บริการใน Tandem (n)	Single Service Capacity (คัน/ชั่วโมง)	Tandem Service Capacity (คัน/ชั่วโมง)	$\frac{Tandem\ Service\ Capacity}{Single\ Service\ Capacity}$
1	347.06	347.06	1.00
2	347.06	411.18	1.18
3	347.06	447.98	1.29
4	347.06	472.97	1.36
5	347.06	491.44	1.42
6	347.06	505.84	1.46
7	347.06	517.49	1.49
8	347.06	527.16	1.52
9	347.06	535.37	1.54
10	347.06	542.45	1.56

ในกรณีที่ S_i หรือระยะเวลาที่เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางใช้ในการบริการรถยนต์แต่ละคันไม่ใช่ตัวแปรสุ่มแต่เป็นค่าคงที่ (Deterministic Scenario) เท่ากับ S สูตรที่ใช้ในการประมาณอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางจะมีความซับซ้อนลดลงดังนี้

- สำหรับรูปแบบการบริการแบบ Single Service:

$$CAPACITY_{single}^{Det} = \frac{1}{S + 2\sqrt{\frac{l}{a}} + E(t_R)} \quad (10)$$

- สำหรับรูปแบบการบริการแบบ Tandem Service:

$$CAPACITY_{tandem}^{Det} = \frac{n}{(n-1)E(t_Q) + 2\sqrt{\frac{nl}{a}} + nE(t_R) + S} \quad (11)$$

ซึ่งสมการที่ (10) และ (11) สามารถนำมาใช้ในการประมาณอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางได้อย่างรวดเร็ว

ตัวอย่างเช่นถ้า $E(t_Q) = 2.7$ วินาที $E(t_R) = 2.5$ วินาที $l = 7.5$ เมตร $a = 2.0$ เมตรต่อวินาที² และ $S = 4$ วินาที สามารถคำนวณอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางตามสมการที่ (10) และ (11) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางระหว่าง Single Service และ Tandem Service
เมื่อ $S = 4$ วินาที

จำนวนเจ้าหน้าที่ บริการใน Tandem (n)	Single Service Capacity (คัน/ชั่วโมง)	Tandem Service Capacity (คัน/ชั่วโมง)	$\frac{Tandem\ Service\ Capacity}{Single\ Service\ Capacity}$
1	347.06	347.06	1.00
2	347.06	419.16	1.21
3	347.06	457.47	1.32
4	347.06	482.48	1.39
5	347.06	500.55	1.44
6	347.06	514.45	1.48
7	347.06	525.58	1.51
8	347.06	534.77	1.54
9	347.06	542.54	1.56
10	347.06	549.22	1.58

เมื่อเปรียบเทียบตารางที่ 1 และ 2 พบว่าอัตราการระบายรถยนต์ในกรณี $S_i \sim U(3,5)$ วินาทีและกรณี $S = 4$ วินาที ค่อนข้างจะไม่แตกต่างกันเนื่องจากค่าเฉลี่ย $E(S) = 4$ วินาที และ $VAR(S) = 0.33$ วินาที² ในกรณี $S_i \sim U(3,5)$ แต่ถ้า $VAR(S)$ มีค่าสูงขึ้นอัตราการระบายรถยนต์ที่คำนวณตามสมการที่ (8) และ (10) จะแตกต่างกันมากขึ้นแน่นอน

ยังมีประเด็นคำถามที่ยังคงต้องวิเคราะห์ต่อไปคือกรณีใดบ้างที่อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางแบบ Single Service จะรวดเร็วกว่าแบบ Tandem Service (การวิเคราะห์นี้มีสมมติฐานว่าประสิทธิภาพของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางไม่แตกต่างกันทั้งรูปแบบ Single Service และ Tandem Service เพราะต้องการเปรียบเทียบรูปแบบการให้บริการมากกว่าประสิทธิภาพของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางที่สภาพแวดล้อมในการบริการต่างกัน) ซึ่งผู้เขียนขอพิจารณาในกรณีที่ S เป็นค่าคงที่โดยทำการเปรียบเทียบสมการที่ (10) และ (11) จะพบว่า Single Service จะรวดเร็วกว่า Tandem Service เมื่อเงื่อนไขตามข้างล่างเป็นจริง

$$S \leq E(t_0) - 2\sqrt{\frac{l}{a} \frac{(n-\sqrt{n})}{(n-1)}}; n \geq 2 \quad (12)$$

เงื่อนไขที่ (12) จะถูกต้องเมื่อระยะเวลาในการให้บริการของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทาง (S) มีค่าน้อยกว่าระยะเวลาที่รถยนต์คันที่ “ n ” เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการ จนกระทั่งรถยนต์คันที่ “ $i+1$ ” เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการลำดับถัดไป ($E(t_0)$) ลบด้วยระยะเวลาที่ผู้ขับขี่ที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งผ่านตู้เก็บค่าผ่านทางด้วยอัตราเร่ง a เป็นระยะทางเท่ากับ l คูณด้วยแฟกเตอร์

$\frac{(n-\sqrt{n})}{(n-1)}$ ในกรณีที่ $n=2$ อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางแบบ Single Service จะรวดเร็วกว่า Tandem Service เมื่อ

ระยะเวลาในการให้บริการของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทาง (S) น้อยกว่าระยะเวลาที่รถยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการ ($E(t_0)$) ลบด้วยหกสิบเปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาที่ผู้ขับขี่ที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งผ่านตู้เก็บค่าผ่านทาง ($2\sqrt{\frac{l}{a}}$) ซึ่งมีโอกาสน้อยมากๆ หรือเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางจะทำงานได้รวดเร็วมากๆ จึงอาจกล่าวได้ว่ารูปแบบ Tandem Service มีอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางได้รวดเร็วกว่ารูปแบบ Single Service ยกเว้นในกรณีที่ ($E(t_0)$) มีค่าสูงมากหรือรถยนต์แต่ละคันใช้เวลาในการเข้าสู่ตำแหน่งรับบริการเป็นเวลานาน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางดำนั่นเอง

5. บทสรุป

บทความนี้ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางด้วยเงินสดโดยพิจารณาแบบการให้บริการในสองลักษณะคือ 1) MTC Single Service และ 2) MTC Tandem Service โดยมีสมมติฐานว่าระยะเวลาในการให้บริการของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางในการรับเงิน ทองเงิน จ่ายใบเสร็จแก่ผู้ขับขี่หรือ Service Time ในรูปแบบการบริการทั้งสองลักษณะมีการกระจาย (Distribution) ไม่แตกต่างกัน (บทความนี้ต้องการเปรียบเทียบรูปแบบการให้บริการมากกว่าประสิทธิภาพของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางที่สภาพแวดล้อมในการบริการต่างกัน) จากผลการวิเคราะห์ด้วยหลักวิศวกรรมจราจรและสถิติพบว่ารูปแบบ MTC Tandem Service จะให้บริการได้รวดเร็วกว่ารูปแบบ MTC Single Service แต่อัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางแบบ MTC

Tandem Service จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนตามจำนวนเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรูปแบบการเก็บค่าผ่านทางแบบ Tandem Service จะถือว่าแล้วเสร็จเมื่อรถยนต์ทุกคันใน Tandem ได้รับการแล้วเสร็จ ถ้าพิจารณาจาก Service Time เจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางใน Tandem ที่ใช้ระยะเวลาานานที่สุดจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลา Service Time ของรถยนต์ทุกคันใน Tandem Service ในกรณีที่สมมติว่า Service Time เป็นค่าคงที่เท่ากัน (Deterministic Service Time) พบว่ารูปแบบ Tandem Service มีอัตราการระบายรถยนต์ผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางได้รวดเร็วกว่ารูปแบบ Single Service ยกเว้นในกรณีที่รถยนต์แต่ละคันใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งรับบริการเป็นเวลานานกว่า Service Time ของเจ้าหน้าที่เก็บค่าผ่านทางมาก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางตํานั่นเอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Washington, D.C., 2018.
- [2] Findley, D. J., Schroeder, B. J., Cunningham, C. M., and Brown, T. H. *Highway Engineering: Planning, Design, and Operations*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [3] Mannering, F. L., and Washburn, S. S., *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*, 5th Edition. John Wiley and Sons, 2013.
- [4] Hall, R. W., and Daganzo, C. F., Tandem Toll Booths for the Golden Gate Bridge. *Transportation Research Record*. 1983. Vol. 905. pp. 7-14.
- [5] Gu, W., Cassidy, M. J., and Li, Y., On the Capacity of Highway Checkpoints: Models for Unconventional Configurations. *Transportation Research Part B: Methodology*, 2012. Vol. 46. pp. 1308-1321