

บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิศวกรรมจราจร

1.1 วิศวกรรมจราจร

โดยทั่วไปแล้ว เราทุกคนจะมีความรู้ทางด้านการจราจรไม่มากนักน้อย เพราะเราเดินทางไปอยู่เป็นประจำในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการขับรถส่วนตัว รถมอเตอร์ไซด์ การขี่จักรยาน การขึ้นรถโดยสารประจำทางหรือรถแท็กซี่ หรือการเดินทางไปยังจุดหมายปลายทางต่างๆ

วิศวกรรมจราจร คือศาสตร์ทางวิศวกรรมที่ใช้ในการบริหารจัดการการเดินทางของคน ตลอดจนการขนส่งสินค้า บนท้องถนนหรือทางหลวงสายต่างๆ ให้เป็นไปอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

“... phase of engineering which deals with the safe and efficient movement of people and goods on streets and highways.” (McShane and Roess, 1990)

โดยทั่วไป วิศวกรรมจราจร จะครอบคลุมองค์ประกอบหลายๆ ส่วน เช่น

1. การวางแผนโครงข่ายถนน และทางหลวงเพื่อรองรับการเดินทางของคน และขนส่งสินค้า
2. การออกแบบทางเรขาคณิต (Geometric design) ของท้องถนน
3. การจัดการและควบคุมการจราจร
4. ความปลอดภัยบนท้องถนน
5. การซ่อมแซมและปรับปรุงถนน และระบบควบคุมการจราจรต่างๆ
6. การดำเนินการจัดการระบบถนน และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ

ทั้งนี้ ก่อนที่จะทำการศึกษาวิศวกรรมจราจรนั้น มีข้อพิจารณาที่ควรกล่าวถึงอยู่สามประการ

1.1.1 การเดินทางของคนและการเดินทางของยานยนต์

วิศวกรรมจราจรมีวัตถุประสงค์ในการรองรับการเดินทางของคนเป็นหลัก ซึ่งการเคลื่อนที่ของยานยนต์ถือว่าเป็นเพียงองค์ประกอบหนึ่งเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลักนี้ เท่านั้น

นักศึกษาควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการขนส่งคนของระบบขนส่งรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นระบบทางด่วนพิเศษ ถนนสายหลักภายในเมือง ช่องทางเดินรถโดยสาร ระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดเบา (Light rail transit) หรือระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดหนัก (Heavy rail transit) ระบบขนส่งต่างๆ จะมีความจุ (Capacity) ในการรองรับการเดินทางของคนที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น ช่องทางจราจรบนทางด่วนพิเศษสามารถรองรับรถยนต์ส่วนตัวได้มากถึง 2,250 – 2,400 คันต่อชั่วโมงต่อช่องทาง (pcphpl) (Highway Capacity Manual) รถยนต์ส่วนตัวแต่ละคัน มีจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยประมาณ 1.2-1.3 คน ดังนั้น ทางด่วนพิเศษ ขนาด 3

ห้องจรรยา จะสามารถรองรับการเดินทางได้ประมาณ $2,400 \times 1.3 \times 3 = 9,360$ คนต่อชั่วโมง ภายในรถยนต์ 7,200 คัน

ถนนในเมือง ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม จะสามารถรองรับการเดินทางของรถยนต์ได้ 790 – 1,110 คันต่อชั่วโมงต่อช่องทาง ความจุจราจรต่ำกว่าทางด่วนพิเศษ เพราะว่าการเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางนั้น กระแสจราจรจะได้รับสัญญาณไฟแดงเป็นระยะๆ ยังผลให้ความจุจราจรของถนนในเมืองลดลงน้อยกว่าทางด่วนพิเศษ ถนนในเมืองขนาดกว้าง 3 ช่องทางจราจร จึงสามารถรองรับการเดินทางได้ ประมาณ $1,110 \times 1.3 \times 3 = 4,290$ คนต่อชั่วโมง ภายในรถยนต์จำนวน 3,330 คัน

รถโดยสารประจำทาง จะสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้เป็นจำนวนมาก มีที่นั่งรองรับผู้โดยสารได้ประมาณ 50 คน นอกจากนี้ยังมีที่ให้นั่งด้วย โดยสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้สูงสุด 80-100 คนต่อหนึ่งคันรถ สำหรับถนนในเมืองหนึ่งช่องทางที่จำกัดเฉพาะรถประจำทางเท่านั้น สามารถรองรับการเดินทางของรถโดยสารได้ประมาณ 100 คันต่อชั่วโมง (ในบางครั้งสำหรับสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมพบว่า สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้มากกว่านี้) สมมติว่ารถโดยสารแต่ละคันมีจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ย 80 คนต่อคัน ดังนั้น หนึ่งช่องทางจราจรสำหรับรถโดยสาร สามารถรองรับการเดินทางได้ $80 \times 100 = 8,000$ คนต่อชั่วโมงต่อช่องทาง สมมติว่าถนนในเมืองกว้าง 3 ช่องจราจร และกำหนดให้ทั้งสามช่องทางจราจรสำหรับรถโดยสารเท่านั้น ดังนั้น ถนนเส้นนั้นสามารถรองรับปริมาณการจราจรได้มากถึง $8,000 \times 3 = 24,000$ คันต่อชั่วโมง

ระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดเบา (Light rail transit) คือรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนบนราง โดยสามารถจัดให้วิ่งแยกจากการจราจรปกติ หรือวิ่งปะปนรวมกับยานพาหนะอย่างอื่นได้ด้วย กล่าวคือรางจะสร้างอยู่ในระดับเดียวกับพื้นผิวถนน อยู่ในช่องทางจราจรปกติ ยวดยานประเภทอื่นสามารถเข้ามาใช้ช่องทางดังกล่าวได้ในขณะไม่มีรถไฟฟ้าขนาดเบาวิ่งผ่านไป-มา แต่เมื่อมีรถไฟฟ้าวิ่งผ่านไป ยวดยานประเภทอื่นจะต้องออกจากช่องทางดังกล่าว และให้สิทธิพิเศษแก่รถรางไฟฟ้าขนาดเบาให้ผ่านไปก่อน จึงสามารถกลับมาใช้ช่องทางดังกล่าวได้ ระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดเบาโดยส่วนใหญ่จะให้บริการการเดินทางภายในเมือง โดยแต่ละขบวนจะมีผู้รถไฟฟ้าไม่เกิน 3 ตู้ เพื่อป้องกันการกีดขวางการจราจรของยวดยานประเภทอื่นบนท้องถนน โดยปกติแล้ว ระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดเบา สามารถขนส่งผู้โดยสารได้สูงสุดประมาณ 20,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง

ระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดหนัก (Heavy rail transit) คือรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนบนราง วิ่งในระบบรางคู่บนแนวเส้นทางเฉพาะซึ่งอาจจะเป็นโครงสร้างระดับดิน ใต้ดินหรือลอยฟ้าก็ได้ ระบบฯ ดังกล่าวจะมีความจุสูงมาก โดยปกติจะให้บริการเดินทางระหว่างเมือง ระหว่างชานเมืองไปสู่เมือง และภายในเมืองด้วย ผู้รถไฟฟ้าแต่ละคันจะมีน้ำหนักมากกว่า และสามารถจุผู้โดยสารได้มากกว่าระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดเบา แต่ละขบวนจะมีผู้รถไฟฟ้ามากกว่า 3 ตู้ เพื่อให้สามารถขนส่งผู้เดินทางได้ขบวนละหลายๆ ระบบรถไฟฟ้าลอยฟ้า BTS และ ระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA ในกรุงเทพมหานคร ก็จัดว่าเป็นระบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดหนัก โดยทั่วไประบบขนส่งรถไฟฟ้าขนาดหนัก สามารถขนส่งผู้โดยสารได้สูงสุดประมาณ 40,000 – 60,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง

จะเห็นได้ว่า ระบบขนส่งรูปแบบต่างๆ จะมีความสามารถในการรองรับการเดินทางของคน และ ยวดยาน ได้แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ วิศวกรจราจร จะต้องทำการออกแบบวางแผนระบบการขนส่งเพื่อให้ สามารถรองรับความต้องการการเดินทาง ได้อย่างเหมาะสมกับพื้นที่

1.1.2 การขนส่งสินค้า และการเดินทางของคน

นอกจากการเดินทางของคนแล้ว วิศวกรจราจรจะต้องให้ความสำคัญกับการขนส่งสินค้า (Good Movement) บนท้องถนนด้วย โดยปกติแล้ว คนทั่วไปมักจะคิดว่าท้องถนนต่างๆ นั้นมีไว้สำหรับรองรับการเดินทางของคนเป็นหลัก และมักจะคิดว่ารถบรรทุกนั้นเป็นตัวกีดขวางการจราจร ทำให้การจราจรไม่คล่องตัว ในความเป็นจริงแล้ว รถบรรทุกจะทำหน้าที่ขนส่งสินค้า ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้พื้นที่นั้นคงอยู่ได้ และยังเป็น ตัวกระตุ้นเศรษฐกิจของพื้นที่นั้นๆ ด้วย

หน้าที่หลักของรถบรรทุก คือการขนส่งวัสดุดิบ (Raw Material) เพื่อนำไปใช้ในการผลิตวัตถุดิบ และ ขนส่งผลิตภัณฑ์สำเร็จ (Finished product) เพื่อนำไปจำหน่ายต่อไป สำหรับภายในเมืองนั้น รถบรรทุกจะมีหน้าที่ ในการขนส่งอาหารเพื่อหล่อเลี้ยงประชากรภายในเมือง ให้บริการรับ-ส่งพัสดุและสินค้า จัดส่งและกระจายสิ่งของ เครื่องใช้ต่างๆ ให้บริการขนส่งสินค้าจากอุตสาหกรรมเบา และการขนถ่ายขยะและของเสีย เป็นต้น ซึ่งกิจกรรม เหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการส่งเสริมเศรษฐกิจภายในพื้นที่ เพราะฉะนั้น การวางแผนการขนส่ง ภายในเมือง จะต้องคำนึงถึงการขนส่งสินค้าด้วย

1.1.3 ยานพาหนะต่างๆ ในกระแสรถ

การเดินทางและขนส่งระหว่างเมืองและภายในเมืองจะประกอบด้วยการเดินทางหลายๆ รูปแบบระบบ ราง (รถไฟ) ทางอากาศ (เครื่องบิน) ทางถนน (รถยนต์) สำหรับเนื้อหาวิชานี้ จะให้เน้นพิจารณาการขนส่งบน ท้องถนนเป็นหลักเท่านั้น โดยเนื้อหาจะไม่ครอบคลุมถึงระบบรถไฟฟ้ายานพาหนะและขนาดหนัก

ผู้เดินทางสามารถเลือกรูปแบบการเดินทางได้หลายรูปแบบ เช่น

1. ยานพาหนะส่วนตัว
 - a. รถยนต์
 - b. มอเตอร์ไซด์
2. ขนส่งสาธารณะ (Public Transit)
 - a. รถประจำทาง
 - b. รถไฟฟ้าขนาดเบา
 - c. รถไฟฟ้าขนาดหนัก
3. รถรับจ้าง (Paratransit)
 - a. รถแท็กซี่
 - b. รถลีมูซีน (Limousines)
4. รถจักรยาน
5. เดินเท้า

1.2 ผลกระทบจากปัญหาสภาพการจราจรติดขัด

ปัจจุบัน กรุงเทพมหานครกำลังประสบปัญหาสภาพการจราจรติดขัดรุนแรง ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้รถใช้ถนนทั้งทางตรงและทางอ้อม ผลกระทบทางตรงได้แก่ การสูญเสียเวลาในการเดินทางเพิ่มมากขึ้น การสูญเสียค่าใช้จ่ายในการเดินทางเพิ่มสูงขึ้น และการเกิดอุบัติเหตุเพิ่มมากขึ้น

การสูญเสียเวลาในการเดินทาง

การสูญเสียค่าใช้จ่ายในการเดินทาง

การเกิดอุบัติเหตุ

ปัญหาทางอ้อม

ปัจจุบัน กรุงเทพมหานครกำลังประสบปัญหาสภาพการจราจรติดขัดรุนแรง ซึ่งได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน และก่อให้เกิดปัญหาความปลอดภัยบนท้องถนนในพื้นที่เป็นอย่างมาก เป็นที่ทราบกันดีว่าสภาพการจราจรติดขัดในเมืองทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชากรและความปลอดภัยบนท้องถนนในพื้นที่ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นปัญหาด้านมลพิษทางอากาศ อุบัติเหตุจากการจราจร ปัญหามลพิษทางเสียง สุขภาพจิต และคุณภาพชีวิต

1.2.1 มลพิษทางอากาศ

รถยนต์และรถมอเตอร์ไซด์ปล่อยควันพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายหลายประเภท เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฝุ่นละออง และสารที่ก่อให้เกิดโอโซน ประชาชนในเมืองที่สูดดมควันพิษเหล่านี้เป็นประจำ จะมีปัญหาด้านสุขภาพ เช่น ปัญหาระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจ และปัญหาปอดเสื่อมสภาพ เป็นต้น มลพิษในอากาศเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่ออัตราการตายและอัตราการเข้ารับรักษาตัวในโรงพยาบาลของประชาชนในเมืองนั้น ถึงแม้ว่ามลพิษทางอากาศเหล่านี้จะเกิดจากแหล่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรม การเผาฟืน และอื่น ๆ แต่การจราจรถือว่าเป็นแหล่งปล่อยมลพิษที่สำคัญมากที่สุดแหล่งหนึ่งในเขตชุมชนเมือง ประเทศในแถบทวีปยุโรปเหนือ พบว่าเกือบร้อยละ 100 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 75 ของไนโตรเจนออกไซด์ และ ร้อยละ 40 ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศในเขตชุมชนเมือง มาจากท่อไอเสียของยานยนต์บนท้องถนน [4]

สำหรับในประเทศไทย มลพิษทางอากาศที่เป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบันได้แก่ ฝุ่นรวม ฝุ่นขนาดเล็ก ก๊าซโอโซน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กรมควบคุมมลพิษเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่ตรวจสอบความรุนแรงของระดับมลพิษทางอากาศและเสียงทั่วประเทศ ได้ทำการสำรวจและตีพิมพ์ “รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย” เป็นประจำทุกปี ในปี พ.ศ. 2547 พบว่า ความเข้มข้นของฝุ่นขนาดเล็กเฉลี่ย 24 ชั่วโมงในเขตกรุงเทพมหานคร เท่ากับ 59.8 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร[5] ซึ่งเมื่อตรวจสอบความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นขนาดเล็กในอดีต พบว่าระดับความเข้มข้นได้เกินระดับมาตรฐานมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ยกเว้นเฉพาะปี พ.ศ. 2544 และปี พ.ศ. 2545 เท่านั้นที่

ระดับความเข้มข้นลดลงกว่ามาตรฐาน (สืบเนื่องมาจากผลกระทบทางวิกฤตเศรษฐกิจในปี พ.ศ. 2543) ในรายงานฉบับเดียวกันนี้ ได้ระบุว่า การจราจรเป็นสาเหตุหลักของปัญหาฝุ่นละอองในพื้นที่กรุงเทพมหานคร[6] สำหรับระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน เฉลี่ย 24 ชั่วโมงเกินกว่าระดับมาตรฐานบ้างเป็นครั้งคราว (0.25 เปอร์เซ็นต์) ส่วนระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีระดับสูงบริเวณริมถนนบางแห่งในกรุงเทพฯ

รายงานการศึกษาอย่างน้อย 4 ฉบับได้ยืนยันถึงปัญหาด้านสุขภาพที่มีผลมาจากมลพิษในอากาศในพื้นที่กรุงเทพมหานคร Pothikamjorn et al พบว่า ระดับความเข้มข้นของฝุ่นขนาดเล็ก (PM₁₀ - ฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบแอโรไดนามิกส์เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในชั้นบรรยากาศที่สูง ได้ก่อให้เกิดปัญหาการหยุดเรียนและค่ารักษาพยาบาลในเด็กนักเรียนในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ[6] นอกจากนี้ การศึกษาของ Vichit-Vadakan et al ก็ได้ยืนยันถึงปัญหาด้านสุขภาพในระบบทางเดินหายใจ ในผู้ใหญ่ เด็ก และนางพยาบาลในกรุงเทพฯ ว่ามีผลมาจากการได้รับฝุ่นรวมในปริมาณที่สูง[7] รายงานการศึกษายกฉบับหนึ่ง พบว่า ระหว่างปี พ.ศ. 2536 ถึง 2539 ซึ่งระดับความเข้มข้นของฝุ่นขนาดเล็กโดยเฉลี่ยต่อปีในกรุงเทพฯ อยู่ระหว่าง 60-85 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (สูงกว่าสถานการณ์ในปัจจุบันเล็กน้อย) ได้ก่อให้เกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร ประมาณ 4,000 – 5,500 รายต่อปี [8] ทั้งนี้ ไม่มีรายงานการคาดการณ์ผู้เสียชีวิตก่อนวัยอันควรจากฝุ่นขนาดเล็กตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา และรายงานการศึกษายกฉบับหนึ่งที่ดำเนินการศึกษาในปี พ.ศ. 2541 โดย Radian International[9] ระบุว่า ฝุ่นขนาดเล็กเป็นภัยคุกคามกรุงเทพฯ และคาดการณ์ว่าการลดลงของความเข้มข้นของฝุ่นขนาดเล็กในชั้นบรรยากาศเฉลี่ย 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อปีจะช่วยลด

- การเสียชีวิตก่อนวัยอันควร 700 – 2,000 ราย
- โรคทางเดินหายใจเรื้อรัง 3,000 – 9,300 ราย
- การเข้ารับรักษาโรคทางเดินหายใจและโรคหลอดเลือดหัวใจ 560 – 1,570 ราย
- การเจ็บป่วยอันเนื่องมาจากโรคทางเดินหายใจ จนไม่สามารถทำกิจกรรมตามปกติได้ 2.9 – 9.1 ล้านคน-วัน
- การเจ็บป่วยอันเนื่องมาจากการหายใจไม่สะดวกได้ 2.2 – 7.4 ล้านคน-วัน

นอกจากนี้ จากการค้นพบล่าสุดแสดงให้เห็นปัญหามลพิษในอากาศที่น่าเป็นห่วงมากยิ่งขึ้น การศึกษาของ Handy et al พบว่าระดับความเข้มข้นของมลพิษต่าง ๆ (เช่น ฝุ่น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และก๊าซโอโซน) ที่ตรวจวัดได้ภายในยานพาหนะที่ปิดกระจกติดแอร์ มีระดับสูงกว่าความเข้มข้นของมลพิษที่วัดได้บริเวณริมถนน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพการจราจรติดขัด [10] ทั้งนี้ระดับความเข้มข้นของมลพิษในยานพาหนะจะพบสูงมากเป็นพิเศษในรถโดยสารประจำทางปรับอากาศ และรถแท็กซี่ซึ่งขี้อุ่นบนท้องถนนตลอดทั้งวัน ดังนั้น ความเข้าใจที่ว่าผู้ขับขี่และผู้โดยสารในยานพาหนะจะไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาหมอกพิษทางอากาศมากนัก ก็จะไม่เป็นความจริงอีกต่อไปแล้ว

1.2.2 อุบัติเหตุจากการจราจร

ในแต่ละปี ประชาชนได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนเป็นจำนวนมาก ในปี พ.ศ. 2543 ประชากรทั่วโลกประมาณ 18 ล้านคนได้รับบาดเจ็บ และ 680,000 คนเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน ปัญหา

อุบัติเหตุทางถนน คาดว่า จะยังคงทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นในอนาคต ดังที่องค์การอนามัยโลกได้พยากรณ์ว่า ในปี พ.ศ. 2563 อุบัติเหตุทางถนนจะเป็นสาเหตุสำคัญอันดับสามที่ก่อให้เกิดปัญหาทางสุขภาพของประชากรโลก รองจากโรคหัวใจ และโรคมะเร็งลำไส้ [11]

สำหรับประเทศแถบเอเชียใต้ มีการพยากรณ์ว่าการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนจะเพิ่มขึ้นจาก 135,000 คนในปี พ.ศ. 2543 เป็น 330,000 คนในปี พ.ศ. 2563 หรือเพิ่มขึ้น ร้อยละ 144 จากปีปัจจุบัน [12]

ในประเทศไทย อุบัติเหตุบนท้องถนนเป็นสาเหตุหลักอันดับหนึ่งที่ทำให้ประชากรเสียชีวิตก่อนวัยอันควร มาเป็นเวลามากกว่า 10 ปีแล้ว อุบัติเหตุบนท้องถนนถูกจัดอยู่ในอันดับที่สองระหว่างปี พ.ศ. 2534 – 2539 ด้วยอัตราการเสียชีวิตประมาณ 48.5 – 74.7 รายต่อประชากร 100,000 คนต่อปี (เปรียบเทียบกับประเทศเยอรมนีที่มีอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุ 6,000 คนต่อปี โดยมีรถยนต์ทั้งหมด 45 ล้านคัน) สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทยร่วมกับกระทรวงสาธารณสุข ได้ประมาณการสูญเสียทางเศรษฐกิจอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุทางถนน ในปี พ.ศ. 2536 คิดเป็นมูลค่า 57,000 ล้านบาท จากการเสียชีวิต 12,000 ราย [13] ถึงแม้ว่าในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา จะมีการรณรงค์ในเรื่องความปลอดภัยทางถนนอย่างเข้มข้นจากหลายหน่วยงาน อุบัติเหตุทางถนนยังคงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้มีอัตราการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร ในประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2547 สำนักงานตำรวจแห่งชาติรายงานการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน 13,766 คนและบาดเจ็บ 94,164 คนทั่วประเทศ เฉพาะพื้นที่กรุงเทพมหานครจังหวัดเดียว มีผู้เสียชีวิต 815 คนและบาดเจ็บ 23,307 คนจากอุบัติเหตุบนท้องถนน มีการประเมินว่าการได้รับบาดเจ็บ 1 ครั้งจากอุบัติเหตุบนท้องถนน ต้องเสียค่าใช้จ่ายพยาบาลประมาณ 1,500 บาท ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงจำนวนผู้ได้รับบาดเจ็บจากอุบัติเหตุบนท้องถนนต่อปี แล้วพบว่าเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล [14]

1.2.3 มลพิษทางเสียง

เสียงไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดความรำคาญเท่านั้น แต่เสียงที่ดังระดับที่สูงมาก กลายเป็นมลพิษทางเสียง ก่อให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ ทำให้การสื่อสารไม่มีประสิทธิภาพ รบกวนการนอนหลับ รบกวนการปฏิบัติงาน และทำให้ระบบรับฟังเกิดปัญหา ขณะนี้ เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกว่า การจราจรเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดมลพิษทางเสียงในชุมชนเมืองที่สำคัญ ในประเทศแถบทวีปยุโรป พบว่า สัดส่วนของประชาชนที่ได้รับผลกระทบจากระดับเสียงที่เกินมาตรฐานตลอด 24 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากปี ร้อยละ 15 ในทศวรรษ 1980 เป็น ร้อยละ 26 ในทศวรรษ 1990 [4] ในเขตกรุงเทพฯ เอง ก็ตรวจพบระดับเสียงบริเวณริมถนนโดยเฉลี่ย 24 ชั่วโมง เกินกว่าระดับมาตรฐานเรื่อยมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542[5] ปัจจุบัน ยังไม่มีการศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพของคนกรุงเทพฯจากระดับเสียงที่เกินมาตรฐาน อย่างไรก็ตามจากปริมาณการจราจรในกรุงเทพฯปัจจุบันนั้น คาดว่า ผลกระทบอันเนื่องมาจากมลพิษทางเสียงต่อประชากรในชุมชนเมือง จะมีความรุนแรงไม่น้อยกว่าปัญหาที่พบในประเทศแถบทวีปยุโรป

1.2.4 มลพิษทางเสียง

การจราจรยังมีผลกระทบต่อสุขภาพจิตและคุณภาพชีวิต ในปัจจุบัน ผู้ขับขี่รถยนต์ในกรุงเทพมหานครประสบปัญหาสภาพการจราจรติดขัด สูญเสียเวลาในการเดินทางเป็นระยะเวลานาน ก่อให้เกิดความเครียด และอารมณ์เสียได้ นอกจากนี้ สภาพการจราจรยังแปรผันไปในแต่ละวัน บางวันสภาพการจราจรติดขัดมากเนื่องจาก

อุบัติเหตุหรือเหตุการณ์พิเศษต่างๆ ผู้ขับขี่ไม่สามารถทำนายเวลาการเดินทางได้ล่วงหน้าว่าจะใช้เวลาในการเดินทางเท่าใด บางครั้งประมาณเวลาผิด ยังผลให้ผู้ขับขี่และผู้โดยสารเกิดอาการเครียดในการไปถึงจุดหมายไม่ตรงตามเวลาที่นัดหมาย ผู้ที่ไปรอยังจุดหมายแล้วเอง ก็เกิดความเครียดอันเนื่องจากการรอเป็นระยะเวลานาน เหตุการณ์เหล่านี้ เป็นเหตุการณ์ปกติในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ทำให้ประชาชนเสียสุขภาพจิต คุณภาพชีวิตของคนในเมืองลดลง

นอกจากนี้ การใช้รถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ถือได้ว่าเป็นการเดินทางที่สะดวกที่สุดแบบหนึ่ง เนื่องจากเป็นการบริการตรงจากจุดต้นทางไปยังจุดหมายปลายทาง แต่ในทางกลับกัน จะลดโอกาสของคนในการออกกำลังกายในชีวิตประจำวัน เทคโนโลยีอื่น ๆ ที่ได้พัฒนาขึ้นมา เช่น ไร้มอเตอร์คอมพิวเตอร์และลิฟต์โดยสาร ต่างก็เพิ่มความสะดวกสบายให้แก่มนุษย์มากยิ่งขึ้น ทำให้มนุษย์ไม่ต้องเคลื่อนไหวหรือมีกิจกรรมทางกายภาพมากเช่นในอดีต ยังผลให้โรคอ้วนกลายเป็นปัญหาที่พบเห็นได้เป็นประจำในชุมชนเมือง

การเดินทางโดยการเดินหรือจักรยานถือได้ว่าเป็นการออกกำลังกายประจำวันที่ดี ส่วนการใช้ระบบขนส่งมวลชนนั้น แม้ว่าการเดินทางโดยส่วนใหญ่จะอยู่บนรถโดยสารประเภทต่าง ๆ แต่คนที่ใช้บริการขนส่งมวลชนยังคงต้องเดิน หรือจักรยานจากบ้านไปยังสถานีต้นทาง และจากสถานีปลายทางไปยังที่ทำงาน การเดินทางโดยระบบขนส่งมวลชนหรือการสัญจรแบบไร้เครื่องยนต์นี้ เป็นวิธีหนึ่งที่จะสนับสนุนการออกกำลังกาย Vuori and Oja (1998) และองค์การอนามัยโลกระบุว่าการทำกิจกรรมทางกายภาพ หรือการออกกำลังกายเป็นประจำ (ซึ่งรวมถึงการขี่จักรยานและการเดินระหว่างการเดินทางไปต่าง ๆ) ประมาณวันละ 30 นาที จะส่งผลให้เกิดผลประโยชน์ดังนี้ [15]

- ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจจุดตันได้ 50 เปอร์เซ็นต์
- ลดความเสี่ยงในการเจริญเติบโตได้ 50 เปอร์เซ็นต์
- ลดความเสี่ยงในการเป็นโรคอ้วน

ผลกระทบต่อสุขภาพและความปลอดภัยของประชากรจากการจราจรเหล่านี้ ได้ส่งผลให้คุณภาพชีวิตของประชาชนลดต่ำลงเป็นอย่างมาก และก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจมหาศาล ทุก ๆ ปี กรุงเทพฯ และประเทศไทยกำลังได้รับผลกระทบจากการขาดการวางแผนด้านการขนส่งที่เหมาะสมในอดีต ปริมาณรถยนต์จำนวนมากปล่อยก๊าซพิษซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายทางด้านระบบทางเดินหายใจและระบบการหมุนเวียนของโลหิต เป็นผลให้มีการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรและการเข้ารับรักษาในโรงพยาบาลโดยไร้เหตุ มลพิษทางเสียงทำให้เกิดปัญหาในการสื่อสาร การรบกวนการนอนหลับ และการรบกวนการทำงาน นอกจากนี้การจราจรยังเป็นสาเหตุสำคัญในการบาดเจ็บและสูญเสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนน อีกทั้งผู้ขับขี่และผู้โดยสารได้รับความเครียดจากการจราจรที่หยุดนิ่งระหว่างชั่วโมงเร่งด่วน สิ่งเหล่านี้รวมกันทำให้เกิดความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจและสังคม คิดเป็นจำนวนเงินมหาศาลทุกปี ดังนั้น ชุมชนเมืองขนาดใหญ่ในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศควรเรียนรู้จากประสบการณ์ของกรุงเทพฯ และหลีกเลี่ยงสถานการณ์ที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดเช่นเดียวกันนี้ อีก การพัฒนาระบบการขนส่ง ความปลอดภัยบนท้องถนนของเมือง ตลอดจนสุขภาพความเป็นอยู่ที่ดีของประชาชนนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก การวางแผนพัฒนาระบบขนส่งที่ดีและเหมาะสมนั้น นอกจากจะช่วยรองรับการเดินทางภายในพื้นที่ได้เป็นอย่างดีแล้ว ยังจะช่วยลดปัญหาอุบัติเหตุบนท้องถนนและปัญหาหมอกควัน สิ่งแวดล้อมอันเป็นผลกระทบที่เกี่ยวข้องตามมาได้อีกด้วย

ชุมชนเมืองใหญ่ ๆ บางแห่ง พบว่าเริ่มมีปัญหาด้านมลพิษทางอากาศบ้างแล้ว ผู้คนขนาดเล็กมีระดับความเข้มข้นสูงในจังหวัดสระบุรี เชียงใหม่ ลำปาง ชลบุรี ระยอง อุทยาและนครราชสีมา ในจังหวัดอยุธยา ชลบุรี ระยองและราชบุรี ตรวจพบว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนสูงกว่ามาตรฐาน ถึงแม้ว่าระดับความรุนแรงของมลภาวะทางอากาศยังไม่รุนแรงเทียบเท่ากับพื้นที่กรุงเทพมหานคร แต่ด้วยแนวโน้มการเจริญเติบโตในการใช้รถยนต์ในปัจจุบัน (จำนวนรถยนต์เพิ่มขึ้น 2 ล้านคันต่อปี) คาดว่ามลพิษทางอากาศ และมลพิษทางเสียงจะส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่ในเมืองเหล่านั้นมากยิ่งขึ้นในอนาคตอันใกล้ ส่งผลให้คุณภาพชีวิตต่ำลง มีสภาพไม่น่าอยู่อาศัย และอัตราการเสียชีวิตและการเจ็บไข้จากมลพิษทางอากาศและมลพิษทางเสียงจะเพิ่มสูงมากขึ้น

จากปัญหาดังที่กล่าวมาแล้ว วิศวกรจราจรมีหน้าที่ที่จะทำการวางแผน ออกแบบ ดำเนินการ และจัดการการเดินทางบนท้องถนน และทางหลวงเพื่อช่วยคลี่คลายสถานการณ์จราจรติดขัดวิกฤต หรือป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในบริเวณที่ยังไม่มีปัญหาติดขัด เพื่อลดผลกระทบทางด้านต่างๆ ตามมา ทั้งนี้ การวางแผนจะต้องได้รับความร่วมมือร่วมใจจากเจ้าหน้าที่หลายฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นรัฐบาลท้องถิ่น เจ้าหน้าที่ตำรวจจราจร นักวางแผนเมือง นักวิศวกรรมขนส่ง ผู้ประกอบการขนส่งสาธารณะ และผู้ประกอบการขนส่งสินค้า เพื่อให้การดำเนินการแก้ปัญหาสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

คำจำกัดความ

ระยะทางการเดินทาง (คัน-กิโลเมตร) – ในทางวิศวกรรมจราจร มักจะกล่าวถึงระยะทางการเดินทางรวมในระบบขนส่งใดๆ ในหน่วย คัน-กิโลเมตร ซึ่งก็คือผลรวมของการเดินทางของขบวนแต่ละคันในกระแสจราจรภายในระบบที่กำลังศึกษา ตัวอย่างเช่น ในระบบถนนในเมืองระบบหนึ่ง พบว่ามีจำนวนรถยนต์สัญจรไปมาในระบบเท่ากับ 100 คัน แต่ละคันก็จะมีระยะทางการเดินทางที่แตกต่างกันไป คำนวณโดยเฉลี่ยแล้ว แต่ละคันวิ่งประมาณ 5 กิโลเมตร ดังนั้นปริมาณการเดินทางรวมในระบบดังกล่าว จะเท่ากับ 100×5 คัน-กิโลเมตร

ในการวางแผนการขนส่งนั้น จะใช้วิธีการนี้ในการประมาณระยะทางการเดินทางอย่างคร่าวๆ โดยการนำปริมาณจราจรบนถนน (หน่วยเป็นคัน) คูณกับระยะทางของเส้นทางถนนดังกล่าว ก็ได้จะค่าระยะทางการเดินทางรวม ในหน่วยคัน-กิโลเมตร

Occupancy – จำนวนผู้เดินทางที่อยู่บนยานพาหนะ มีหน่วยเป็น คนต่อคัน ซึ่งในทางวิศวกรรมจราจร Occupancy ของรถยนต์จะนับรวมผู้ขับขี่และผู้โดยสารทั้งหมด เช่น สมมติว่ารถยนต์ที่สัญจรไปมา มีผู้ขับขี่ 1 คน และผู้โดยสาร 2 คน ก็จะถือได้ว่ารถยนต์คันนั้นมี Occupancy เท่ากับ 3 คน

ปัจจุบัน ได้มีการใช้คำ Occupancy กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น หลายคนคงเคยได้ยินคำว่า HOV Lane ซึ่งเป็นคำย่อมาจากคำว่า High Occupancy Vehicle Lane เป็นมาตรการในการจำกัดการเดินทาง นั่นคือ ช่องจราจรนั้นจะอนุญาตเฉพาะรถยนต์ที่มีจำนวนผู้เดินทางมากกว่า 1 คน ใช้สัญจรไป-มาเท่านั้น ส่วนรถยนต์ที่ไม่มีผู้โดยสาร มีเพียงผู้ขับขี่เพียง 1 คนเท่านั้น หรือที่เรียกว่า (Single Occupancy Vehicles) จะไม่อนุญาตให้ใช้ช่องจราจรดังกล่าวได้

แบบฝึกหัด

1. จากการศึกษาโครงการนโยบายจัดเก็บค่าที่จอดรถยนต์ในย่านธุรกิจ มีการสำรวจจำนวนผู้ที่อยู่ในรถยนต์ (Occupancy) ทั้ง “ก่อน” และ “หลัง” จากการดำเนินการมาตรการจัดเก็บค่าที่จอดรถยนต์ ได้ข้อมูลดังนี้

จำนวนผู้เดินทางใน ยานพาหนะ	ร้อยละของยวดยาน	
	ก่อนการใช้มาตรการ	หลังการใช้มาตรการ
1	55	40
2	35	40
3	10	20

ถ้าพบว่า ระยะทางการเดินทางเฉลี่ยของยวดยานแต่ละคัน และจำนวนผู้ที่เดินทางทั้ง “ก่อน” และ “หลัง” การใช้มาตรการมีค่าคงที่ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) จงคำนวณว่า หลังจากมีการใช้มาตรการจัดเก็บค่าที่จอดรถแล้ว ระยะทางการเดินทางรวมในระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด

2. จากการศึกษาถนนเส้นหนึ่ง ได้ข้อมูลสัดส่วนรถยนต์ที่มี Occupancy ต่างๆ กัน ดังนี้

ร้อยละของรถยนต์	จำนวนผู้เดินทางภายในรถยนต์
55	1
31	2
10	3
4	4 หรือ มากกว่า (สมมติว่าเฉลี่ยประมาณ 4.2 คน/คัน)

- จำนวนผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนตัวเพียงคนเดียว (โดยไม่มีผู้โดยสารอื่น) คิดเป็นร้อยละเท่าใดของผู้เดินทางทั้งหมด
 - จำนวนผู้เดินทางที่ไม่ได้ขับรถยนต์เอง โดยนั่งโดยสารไปกับรถยนต์ คิดเป็นสัดส่วนเท่าใด ของจำนวนผู้เดินทางทั้งหมด
3. จงคำนวณหาค่าระยะการเดินทาง หน่วยเป็น กิโลเมตร-คัน สำหรับระบบการขนส่งของเมืองจากรูปแบบ ก และ ข ตามตัวอย่างข้างล่าง พร้อมทั้งวิเคราะห์ว่าแผนการขนส่งแผนใด น่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่ากัน เพราะเหตุใด

โปรดสังเกตว่า ทั้ง 2 แผน ได้กำหนดให้มีจำนวนประชากรเท่ากัน นั่นคือมีประชากรรวม 40,000 คน แบ่งเป็นประชากรในเมือง 20,000 คน และนอกเมือง 20,000 คน แต่สัดส่วนของ occupancy ในยานพาหนะมีความแตกต่างกัน

	จำนวนผู้เดินทาง (คน)	เดินทางด้วยรถยนต์ที่ มี occupancy (คน/คัน) เท่ากับ	ระยะเวลาเดินทาง เฉลี่ย ต่อสัปดาห์ (ชม/สัปดาห์)
แผนการขนส่ง 1			
ในเมือง	10,000	1	100
	10,000	2	120
นอกเมือง	10,000	1	170
	10,000	2	200
แผนการขนส่ง 2			
ในเมือง	7,000	1	90
	13,000	2	110
นอกเมือง	5,000	1	150
	15,000	2	160

อ้างอิง

1. *Traffic Engineering*, W.R. McShane and R.P. Roess, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1990.
2. *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board, Washington D.C., 2000.
3. เทคโนโลยีการขนส่งสาธารณะในเมือง: ระบบขนส่งสาธารณะใน กทม. , ดร.นระ คมนามูล, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2547.
4. *Transport Environment and Health* (2000), World Health Organization (WHO) Regional Publications, European Series, No. 89.
5. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2547, กรมควบคุมมลพิษ
6. Pothikamjorn et al (2002), Impact of Particulate Air Pollutants on Allergic Diseases, Allergic Skin Reactivity and Lung Function, *Asian Pac J Allergy Immunol.* Jun 2002: 20(2), Pg. 77-83.
7. Vichit-Vadakan (2001), Air Pollution and Respiratory Symptoms: results from three panel studies in Bangkok, Thailand, *Environment Health Prospect.* June 2001, 109 (Suppl 3), Pg. 381-387.
8. Hagler Bailly Services, Inc. *Health Effects of Particulate Matter Air Pollution in Bangkok* (Executive Summary). A report prepared for Pollution Control

- Department, Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok, Thailand, 1998.
9. Radian International LLC. *Particulate Matter Abatement Strategy for the Bangkok Metropolitan Area*. A report prepared for Pollution Control Department, Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok, Thailand, 1998.
 10. Handy 2005, Correlation or causality between the built environment and travel behavior? *Transportation Research Part D*, November 2005, vol 10, n 6, pp 427-444.
 11. World Health Organization (WHO), *Global Health into a New Century*, Office of the Director-General, 9 April 1999, www.who.int
 12. World Health Organization (WHO), *World Report on Road Traffic Injury Prevention*, 2004, <http://www.worldbank.org/sar>
 13. รายงานกรอบแนวคิดและรูปแบบการดำเนินงานเพื่อการควบคุมและป้องกันอุบัติเหตุ จังหวัดขอนแก่น (2545) โดยศูนย์ความร่วมมือระหว่างองค์การอนามัยโลกและศูนย์อุบัติเหตุวิกฤตบำบัด โรงพยาบาลขอนแก่น
 14. วีระพันธ์ สุพรรณ ไชยมาตย์ และคณะ (2542) ระบบบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินในประเทศไทย ขอนแก่น ขอนแก่นการพิมพ์
 15. Vuori, I. & Oja, P. *Physical activity in transport: value for health*. Tampere, Urho Kaleva Kekkonen Institute, (1998)
 16. *Traffic and Highway Engineering*, Garber N.J. and L.A. Hoel, West Publishing Company, MA, 1992.

บทที่ 2 องค์ประกอบของระบบการจราจร

การจราจร เป็นระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน มีองค์ประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ผู้ใช้รถใช้ถนน (drivers) ยานพาหนะ (vehicles) ถนนหนทาง (roadways) และอุปกรณ์ควบคุมการจราจร (traffic controls) ซึ่งปัจจัยทั้งสี่นี้มีความเกี่ยวข้องเนื่องสัมพันธ์กันจนก่อให้เกิดเป็นสภาพการจราจร วิศวกรจราจรมีหน้าที่ทำให้ระบบการจราจรมีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจในองค์ประกอบทั้งสี่อย่างลึกซึ้ง เพื่อสามารถนำความรู้ดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบ วางแผน จัดการ ควบคุมระบบการจราจรได้อย่างเหมาะสมต่อไป

อย่างไรก็ตาม วิศวกรจราจรไม่สามารถควบคุมองค์ประกอบทั้งสี่ได้ทั้งหมด จากหน้าที่การปฏิบัติงานนั้น วิศวกรจราจร สามารถควบคุมองค์ประกอบทางด้านถนนหนทาง (roadways) และอุปกรณ์ควบคุมการจราจร (traffic controls) ได้อย่างเต็มที่ เพราะวิศวกรมีหน้าที่หลักโดยตรงในการออกแบบ ควบคุม บริหารจัดการท้องถนน และอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณไฟต่างๆ เพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดประสิทธิภาพและความปลอดภัยบนท้องถนนมากที่สุด ส่วนองค์ประกอบทางด้านผู้ใช้รถใช้ถนน (drivers) และสภาพยานพาหนะ (vehicles) นั้น วิศวกรจราจรจะไม่สามารถควบคุมได้มากนัก เพราะเราไม่สามารถบังคับให้แต่บุคคลมีพฤติกรรมเหมือนกัน หรือใช้ยานพาหนะที่มีสมรรถภาพเหมือนกัน จะทำได้ก็แค่จัดการควบคุมได้อย่างกว้างๆ เท่านั้น เช่น การออกกฎระเบียบเกี่ยวกับผู้ขับขี่ยานพาหนะ (อายุเกิน 18 ปี มีสายตาดี มีความรู้เรื่องกฎจราจร) และยานพาหนะที่จะใช้บนท้องถนน (สภาพใช้การได้ดี ไม่มีเสียงดัง ไม่ปล่อยควันพิษมากเกินไป) หรือจะเป็นการออกกฎระเบียบการขับขี่ (จำกัดความเร็ว ห้ามใช้โทรศัพท์มือถือขณะขับรถ) เป็นต้น

ในบทนี้ เราจะกล่าวถึงองค์ประกอบหลักทั้ง 4 ส่วน โดยเนื้อหาส่วนใหญ่ในบทนี้ จะเน้นไปที่องค์ประกอบที่ไม่สามารถควบคุมได้ นั่นคือ ผู้ใช้รถใช้ถนน และยานพาหนะ โดยละเอียด เพราะถึงแม้ว่าจะควบคุมไม่ได้ วิศวกรจราจรก็ต้องรู้ และเข้าใจถึงพฤติกรรมเหล่านี้เป็นอย่างดี เพื่อนำไปใช้พิจารณาประกอบการออกแบบควบคุมองค์ประกอบอีก 2 ส่วน คือ ถนนหนทาง และอุปกรณ์ควบคุมการจราจรได้อย่างเหมาะสมต่อไป สำหรับองค์ประกอบที่วิศวกรจราจรสามารถควบคุมได้นั้น มีเนื้อหามากมาย และจะกล่าวอธิบายในบทต่อไป

2.1 คุณลักษณะของผู้ใช้รถใช้ถนน

ผู้ใช้รถใช้ถนน คือคนที่เดินทางอยู่บนท้องถนนทุกคน ไม่ว่าจะเป็นผู้ขับขี่รถยนต์ (รถยนต์ รถมอเตอร์ไซค์ รถเมล์) ผู้โดยสาร ผู้ขี่จักรยาน คนเดินเท้า และคนพิการ ผู้ใช้รถใช้ถนนนี้เป็นองค์ประกอบของระบบจราจรที่มีความซับซ้อนมากที่สุด เพราะคนแต่ละคน มีความรู้สึนึกคิด ความรู้ ความพร้อม สภาพร่างกาย และอารมณ์แตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล และยิ่งแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลาอีกด้วย ด้วยความซับซ้อนของผู้ใช้รถใช้ถนนนี้เอง ทำให้ศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมจราจร แตกต่างจากวิศวกรรมสาขาอื่นๆ ทั้งเพราะ วิศวกรจราจรจะต้องออกแบบถนนหนทาง และอุปกรณ์ควบคุมสภาพการจราจรต่างๆ ให้ใช้งานได้อย่างเหมาะสมกับผู้ใช้รถใช้ถนนทุกคน ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ซึ่งจะต้องคำนึงบุคคลกลุ่มต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นผู้ใหญ่ เด็ก คนชรา คนพิการ และผู้ใช้รถใช้ถนนอื่นๆ ด้วย

คุณลักษณะของผู้ใช้รถใช้ถนนที่สำคัญบางตัว ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์วิศวกรรมจราจร ได้แก่ ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง (Perception and reaction time) และ visual acuity ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้สามารถทำการตรวจวัดได้ไม่ยากนัก สำหรับคุณลักษณะอื่นๆ เช่นความสมบูรณ์แข็งแรงของร่างกาย การได้ยิน ความเหนื่อยล้า และสภาพจิตใจ ก็มีผลต่อการตัดสินใจของผู้ใช้รถใช้ถนนเช่นกัน แต่ปัจจัยเหล่านี้ ทำการตรวจวัดได้ยาก จึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์มากนัก แม้กระนั้นก็ตาม วิศวกรจราจรจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณลักษณะเหล่านี้ ในการวางแผนและออกแบบระบบการจราจรด้วย

2.1.1 ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง (Perception and Reaction Time)

การขับขึ้นบนท้องถนน เป็นกระบวนการการรับรู้ทางสายตาและเสียงอย่างต่อเนื่องโดยผู้ขับขี่จะต้องคอยสนใจอยู่ตลอดเวลา และมีปฏิกิริยาตอบสนองอย่างทันท่วงที ถ้าวิเคราะห์กันอย่างละเอียดแล้ว การรับรู้และตอบสนองจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

การรับรู้ (Perception) - การรับรู้ว่ามีเหตุการณ์หนึ่งเกิดขึ้น

การเข้าใจหรือจำได้ (Intellection or identification) - ผู้ขับขี่จำได้ว่าเหตุการณ์นั้นคืออะไร จากการสะสมประสบการณ์ในอดีต

การตัดสินใจ (Decision or emotion) - ผู้ขับขี่วิเคราะห์หาวิธีการตอบสนองที่เหมาะสมกับเหตุการณ์นั้นๆ

ปฏิกิริยาตอบสนอง (Reaction or volition) - การดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งตามการตัดสินใจข้างต้น

ตัวอย่างเช่น ผู้ขับขี่กำลังขับรถยนต์มาถึงทางแยกสัญญาณไฟจราจรแห่งหนึ่ง ซึ่งเมื่อกำลังเข้ามาใกล้ทางแยกนั้น สัญญาณไฟได้เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง ผู้ขับขี่เริ่มต้นจากการรับรู้ นั่นคือการมองเห็นสัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง จำได้ว่าสัญญาณไฟสีแดงเป็นการให้สัญญาณหยุดรถ ณ เส้นหยุด เพื่อให้รถยนต์จากทางด้านอื่น ไปก่อน ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ขับขี่ได้สั่งสมประสบการณ์เรื่อยมา จากนั้นจึงทำการตัดสินใจที่จะชะลอความเร็วเพื่อหยุดรถ ณ เส้นหยุด เนื่องจากคาดว่าจะไม่สามารถข้ามทางแยกได้ทันการ จึงทำ ปฏิกิริยาตอบสนอง โดยการเหยียบเบรกเพื่อชะลอรถยนต์จนรถหยุดที่เส้นหยุด

ระยะเวลาตลอดกระบวนการสี่ขั้นตอนนี้ รวมกันเรียกว่าระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง หรือ ค่าเวลา PIEV (ตัวย่อของขั้นตอนทั้งสี่) ซึ่งค่านี้ได้นำไปใช้ในการออกแบบด้านวิศวกรรมจราจรมากมาย จากกรณีดังกล่าวข้างต้น จงสังเกตว่า ในขณะที่ผู้ขับขี่กำลังรับรู้และตอบสนองอยู่นั้น รถยนต์ก็ยังคงวิ่งต่อไปเรื่อยๆ ด้วยความเร็วคงที่ (เพราะกำลังรับรู้และตัดสินใจอยู่ แต่ยังไม่ได้เหยียบเบรกจริง) ซึ่งในกรณีที่ขูดขานใช้ความเร็วสูง หรือผู้ขับขี่บางกลุ่มที่มีเวลา PIEV มาก รถยนต์ก็ยังคงกล่าว ก็วิ่งเป็นระยะทางอีกไกลพอสมควร จนผู้ขับขี่ไม่สามารถหยุดรถได้ทันการ อาจจะก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ ระยะทางรวมทั้งรถยนต์กำลังวิ่งต่อเนื่องไปในขณะที่ผู้ขับขี่อยู่ในกระบวนการรับรู้และตอบสนองนั้น จะเรียกว่า ระยะทาง PIEV

โดยทั่วไป ระยะทาง PIEV (ในหน่วยเมตร) มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$d_p = \frac{1}{3.6} vt \quad (2-1)$$

โดยที่ d_p - ระยะทางการรับรู้และตอบสนอง (เมตร)

v – ความเร็วของขบวนขบวนขณะนั้น (กม./ชม.)

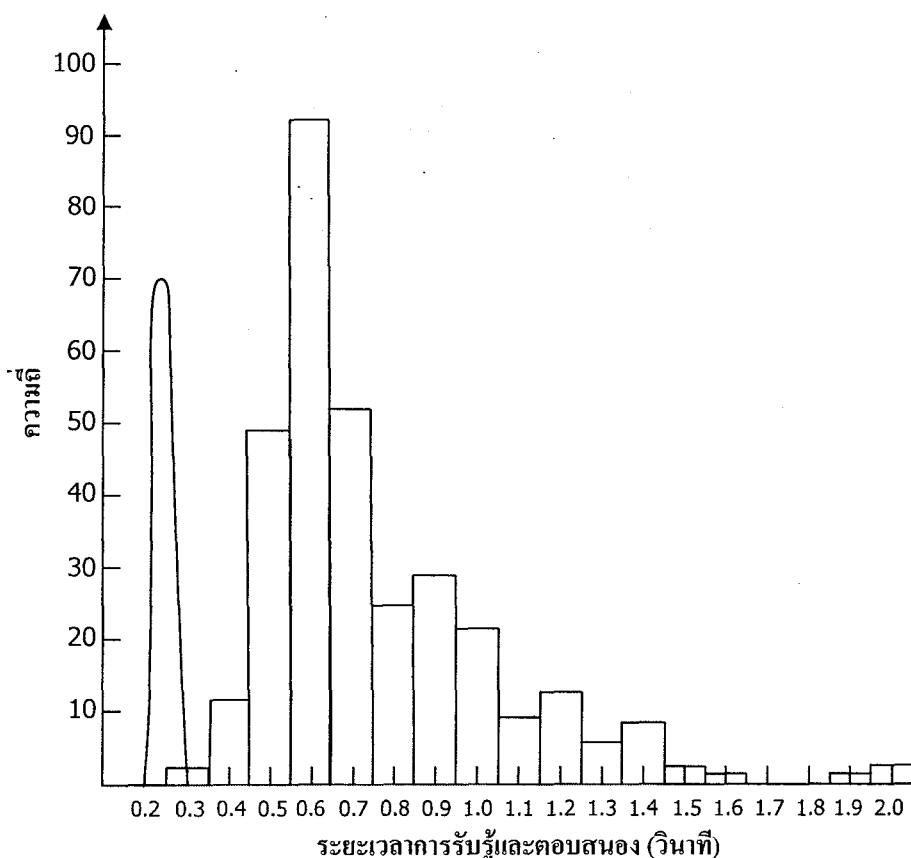
t – ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง หรือค่าเวลา PIEV (วินาที)

ตัวอย่างเช่น รถยนต์วิ่งด้วยความเร็ว 60 กม./ชม. เมื่อผู้ขับขี่เห็นว่าเกิดอุบัติเหตุข้างหน้า จำเป็นจะต้องชะลอรถอย่างสุดกำลัง ถ้าผู้ขับขี่คนนั้น มีค่าเวลา PIEV เท่ากับ 3.0 วินาที ระยะทางที่รถยนต์ยังคงเคลื่อนที่ต่อไปข้างหน้าในขณะที่ผู้ขับขี่กำลังอยู่ในกระบวนการรับรู้และตอบสนอง จะเท่ากับ

$$d_p = (60)(3.0)/3.6 = 50 \text{ เมตร}$$

ซึ่งเทียบเท่ากับระยะทางรวมของรถยนต์ 12 คันต่อกัน ทั้งนี้ ระยะทาง PIEV นี้ ยังไม่รวมถึงระยะทางที่ใช้ในการชะลอขบวนพาหนะจนหยุดนิ่งสนิท (หลังจากที่เริ่มเหยียบเบรกจริง)

ในสภาพการณ์จราจรจริง ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองของแต่ละบุคคลจะแตกต่างกันไป ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวจะเพิ่มสูงขึ้นสำหรับเหตุการณ์ที่มีความซับซ้อน รูปที่ 2.1 แสดงผลการศึกษาดูการวัดระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองในการเหยียบเบรกเพื่อชะลอรถยนต์ ของกลุ่มตัวอย่างผู้ขับขี่จำนวน 321 คน [2] จากการสำรวจพบว่าเวลา PIEV มีค่าแตกต่างกันไปตั้งแต่ 0.3 วินาที ไปจนถึง 2.0 วินาที โดยมีค่าเฉลี่ยกลาง (Median) เท่ากับ 0.66 วินาที โครงการศึกษาเดียวกันนี้ ก็ได้ลองทำการเปรียบเทียบเวลา PIEV ระหว่างเหตุการณ์ที่ผู้ขับขี่สามารถคาดเดาได้ว่าจะเกิดขึ้น กับเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้า พบว่าค่าเวลา PIEV สำหรับเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้า จะนานกว่าประมาณ 0.1 ถึง 0.3 วินาที



รูปที่ 2-1 การกระจายตัวของระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองในการเหยียบเบรกของตัวอย่างผู้ขับขี่ จำนวน 321 คน

โดยปกติแล้ว วิศวกรจราจรจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 (85th percentile) ของระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง ในการออกแบบทางด้านการจราจร ทั้งนี้ ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น

- อายุ
- ความล้า
- ความซับซ้อนของเหตุการณ์
- ความพิการทางกายภาพ
- การอยู่ในสภาพมีนเมา

จากในอดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่าการเมาสุรา เป็นสาเหตุหลักในการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน ทั้งนี้ เพราะผู้ดื่มสุราจนกระทั่งมีนเมานั้น นอกจากจะทำให้สายตาไม่สามารถมองเห็นสภาพการณ์บนท้องถนนได้อย่างชัดเจนแล้ว ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่างๆ ยังเพิ่มสูงขึ้น อาจเพิ่มมากขึ้นเป็น 3 เท่า จากสภาพการปกติ ดังนั้น จากสมการ (2-1) จะเห็นได้ว่ารถยนต์จะเคลื่อนที่ต่อไปในระยะทางที่เพิ่มขึ้นมากเป็นสามเท่า จนเป็นสาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ได้แนะนำให้ใช้ค่าเวลาการรับรู้และตอบสนอง (หรือ ค่า PIEV) เท่ากับ 2.5 วินาที ในการคำนวณระยะการเบรก หรือระยะการหยุดรถในสภาพการณ์ต่างๆ

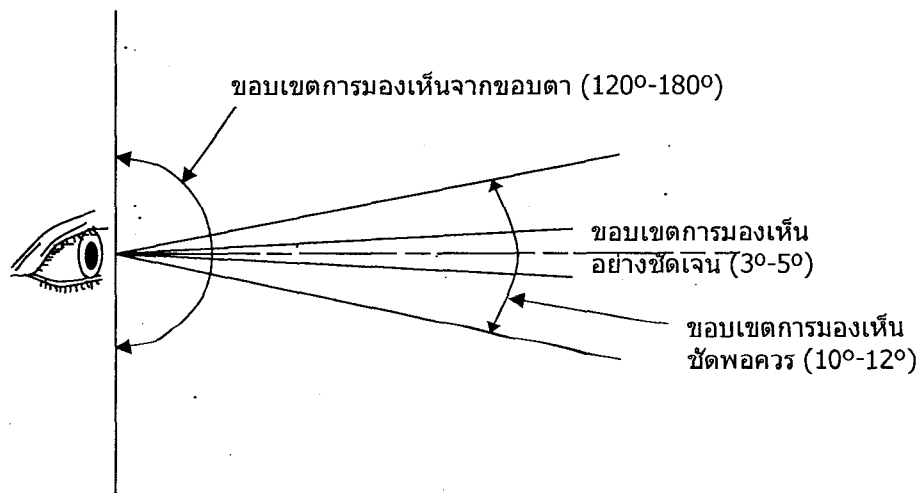
2.1.2 การมองเห็นและการขับขี่

เป็นที่ทราบกันดีว่า ผู้ขับขี่ต้องสามารถมองเห็นท้องถนนจึงสามารถขับขี่รถยนต์ได้ อย่างไรก็ตาม ที่ผ่านมามีการวิเคราะห์เกี่ยวกับรายละเอียดการขับขี่และ Visual Acuity กันมากขึ้น

โดยส่วนใหญ่ในปัจจุบัน การตรวจสอบสายตาในการสอบใบขับขี่ของกรมการขนส่งทางบก จะดำเนินการตรวจสอบเฉพาะความคมชัดในการมองวัตถุหนึ่ง เช่นการอ่านค่าตัวเลขขนาดต่างๆ จากโปสเตอร์ที่ติดบนฝาผนัง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว การมองวัตถุหนึ่ง จะมีผลต่อการขับขี้น้อยกว่าการมองเห็นรูปแบบอื่นๆ เช่น ความชัดเจนในการมองวัตถุเคลื่อนที่ (Dynamic visual acuity) การเห็นความใกล้ไกลของวัตถุ (Depth perception) การที่สายตากลับคืนสู่สภาพปกติหลังจากมองแสงจ้า (Glare recovery) และการมองเห็นวัตถุบริเวณขอบตา (Peripheral vision) เป็นต้น คุณลักษณะทางสายตาที่สำคัญเหล่านี้ ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยกันมากนัก ทั้งนี้ เพราะโดยปกติแล้ว คนส่วนใหญ่ที่มีปัญหาทางด้านสายตาเหล่านี้ จะตระหนักถึงความบกพร่องของตนเอง และทำการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเพื่อแก้ปัญหาในชีวิตประจำวันอยู่แล้ว เช่น ผู้ที่มีปัญหาทางด้านสายตาคลับคืนสู่สภาพปกติหลังจากมองแสงจ้า จะต้องใช้เวลาในการคืนสภาพ ก็จะขับขี่รถยนต์ช้าลง และเพิ่มความระมัดระวังในการขับขี่ในเวลากลางคืน

รูปที่ 2-2 แสดงขอบเขตการมองเห็นที่สำคัญสามประเภท ที่มีความสำคัญในการขับขี่ยานพาหนะ ประเภทแรกคือขอบเขตการมองเห็นอย่างชัดเจน (Field of clear or acute vision) ซึ่งจะครอบคลุมพื้นที่ประมาณ

3-5 องศาโดยรอบของแนวการมองของของตา (พื้นที่การมองเห็นจะมีลักษณะเป็น cone) ผู้ขับขี่สามารถอ่านตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ต่างๆ ในขอบเขตการมองเห็นนี้ได้อย่างชัดเจน ประเภทที่สองได้แก่ขอบเขตการมองเห็นชัดพอควร (Field of fairly clear vision) ซึ่งจะมีพื้นที่การมองเห็นกว้างกว่าการมองเห็นประเภทแรก นั่นคือครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 10 ถึง 12 องศาของแนวการมองของตา ภายในขอบเขตนี้ ผู้ขับขี่สามารถระบุได้ว่าวัตถุมีสีอะไรและมีรูปร่างอย่างไร แต่ไม่สามารถอ่านตัวอักษรได้ ส่วนประเภทสุดท้าย ได้แก่ขอบเขตการมองเห็นจากขอบตา (Field of peripheral vision) ซึ่งโดยปกติ จะครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 120-180 องศาจากศูนย์กลางจากแนวการมองของสายตาดำ ในขอบเขตการมองเห็นดังกล่าว ผู้ขับขี่ไม่สามารถบอกสีและรูปร่างของวัตถุได้ แต่สามารถรับรู้ถึงการเคลื่อนไหวของวัตถุในขอบเขตดังกล่าวได้



รูปที่ 2-2 ขอบเขตการมองเห็น

ขอบเขตการมองเห็นนี้ มีความสำคัญในการออกแบบติดตั้งป้ายจราจร สัญญาณไฟจราจร และอุปกรณ์ควบคุมการจราจรประเภทต่างๆ เช่นในการวางป้ายเตือนที่มีตัวอักษรกำกับอยู่ ก็ควรจะติดตั้งที่ผู้ขับขี่สามารถมองเห็นด้วยขอบเขตการมองเห็นอย่างชัดเจน หรือ 3-5 องศาจากศูนย์กลางตาดำ เพื่อให้ผู้สัญจรไปมาสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน โดยที่ไม่ต้องละสายตาท้องถนนเบื้องหน้า

สีและรูปร่างของวัตถุสามารถมองเห็นได้จากขอบเขตการมองเห็นอย่างชัดพอควร ซึ่งมีมุมมองกว้างขึ้น ดังนั้น ป้ายจราจรต่างๆ จึงได้ถูกออกแบบให้มีสี และรูปร่างที่เป็นมาตรฐาน เช่นป้ายหยุด จะมีพื้นสีแดงและมีรูปร่างแปดเหลี่ยม เป็นต้น

2.1.3 คุณลักษณะอื่นๆ ของผู้ขับขี่

การได้ยีนก็เป็นปัจจัยอันหนึ่งซึ่งช่วยให้การขับขี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัยมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาศีติอวัชตติเหตุในอดีต ก็ไม่มีการยืนยันว่าผู้ที่พิการทางหู จะมีสถิติอุบัติเหตุจราจรมากกว่าผู้

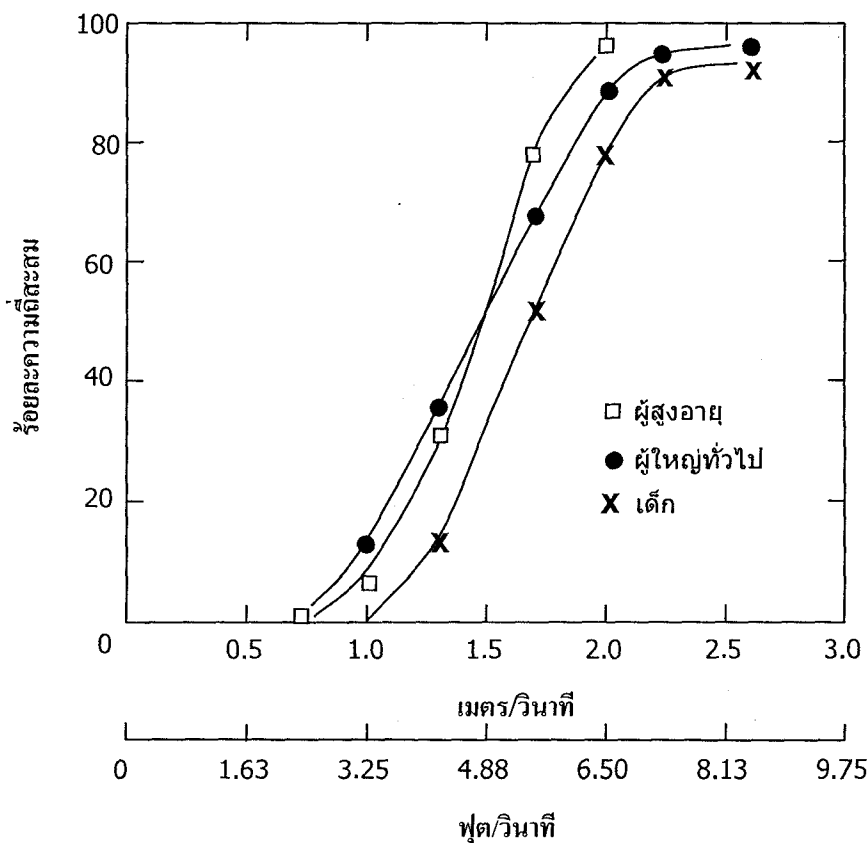
ซับซ้อนอื่นๆ ในปัจจุบันผู้พิการทุพพลภาพ ก็สามารถซับซ้อนยานพาหนะได้ โดยจะต้องมีการดัดแปลงสภาพรถยนต์ เพื่อให้เหมาะสมกับความพิการนั้นๆ ได้

ถึงแม้ว่า ทุกประเทศทั่วโลก จะกำหนดให้มีการสอบการขับขี่รถยนต์ก่อน จึงออกใบอนุญาตการขับขี่รถยนต์ได้ แต่ผู้ที่ได้รับใบอนุญาตบางคน ก็ไม่ได้ขับขี้อย่างถูกต้องปลอดภัย เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ทั้งๆ ที่ขับขี่มาเป็นเวลานานหลายปีแล้ว วิศวกรจราจร จะต้องทำการออกแบบโดยคำนึงถึงผู้ขับขี่เหล่านี้ด้วย จะต้องพยายามลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ และ/หรือพยายามหาวิธีการที่จะบรรเทาความรุนแรงของอุบัติเหตุ ในกรณีที่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้น

2.1.4 คุณลักษณะของคนเดินเท้า

ในการออกแบบระบบการจราจรนั้น วิศวกรจราจรจำเป็นต้องคำนึงถึงคนเดินเท้าด้วย ตัวอย่างเช่น คนเดินเท้าที่ต้องการข้ามถนนในบริเวณทางแยก จะต้องสามารถข้ามถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัย

ความเร็วในการเดินเท้าเป็นตัวแปรหลักตัวหนึ่งซึ่งใช้กันมาในทางวิศวกรรมจราจร ความเร็วในการเดินเท้าของแต่ละคน จะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ปัจจัย เช่น สมรรถนะ รูปร่าง อายุ ความแข็งแรง เพศ เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วการเดินเท้าที่สำรวจ ณ บริเวณทางแยก แสดงในรูปที่ 2-3 จะเห็นได้ว่าความเร็วเฉลี่ยในการเดินเท้าจะประมาณ 1.6 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 2-3 ความเร็วในการเดินเท้าที่สำรวจ ณ บริเวณทางแยก

ความเร็วในการเดินเท้ามีความสำคัญมากในการออกแบบการควบคุมสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยก สำหรับ ระยะเวลาสัญญาณไฟเขียว นั้น นอกจากจะต้องพยายามปล่อยรถยนต์ให้ผ่านทางแยกให้ได้แล้ว จะต้องนานเพียงพอให้คนเดินเท้าสามารถข้ามถนนไปถึงฝั่งตรงข้ามได้โดยปลอดภัยด้วย คนเดินเท้าต้องการข้ามถนนกว้าง 20 เมตร มีความเร็วในการเดินเท้าเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที จะต้องใช้เวลา 20 วินาที ในการข้ามถนน

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ การยอมรับช่องว่างในกระแสจราจร (Gap Acceptance) เพื่อการข้ามถนน ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความปลอดภัยของคนเดินเท้าในบริเวณทางม้าลายที่ไม่มีสัญญาณไฟจราจรควบคุม ถ้าสำรวจพบว่า สภาพการจราจรหนาแน่น ช่องว่างในกระแสจราจรมีไม่เพียงพอต่อการข้ามถนน ก็อาจจำเป็นต้องติดตั้งสัญญาณไฟจราจร หรือสร้างสะพานลอยคนข้ามในบริเวณนั้น

2.2 คุณลักษณะของยานพาหนะ

คุณลักษณะของยานพาหนะบนท้องถนนมีความแตกต่างกัน มีขนาดยานหลายๆ ประเภทซึ่งมีรูปร่างและสมรรถนะที่แตกต่างกันไป ตั้งแต่ขนาดเล็ก เช่นรถมอเตอร์ไซด์ เป็นรถเก๋งสี่ล้อ รถเก๋งอเนกประสงค์ รถกระบะ รถสองแถว จนไปถึงขนาดยานขนาดใหญ่ เช่นรถประจำทาง รถบรรทุก 6 ล้อ 10 ล้อ 18 ล้อ และรถพ่วง ดังนั้นวิศวกรจราจรจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ ในการออกแบบและจัดการระบบการจราจรบนท้องถนน

2.2.1 รูปร่างยานพาหนะมาตรฐาน (Design Vehicles)

ในประเทศสหรัฐอเมริกา American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ได้กำหนดมาตรฐานรูปร่างของขนาดยาน (Design vehicle) สำหรับยานพาหนะไว้ทั้งหมด 10 ประเภท สำหรับใช้ในการออกแบบคุณลักษณะทางเรขาคณิตของท้องถนน (Geometric Design) และโครงสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ เช่น ความกว้างช่องจราจร ความกว้างไหล่ทาง รัศมีของขอบทางและมุมถนน ระดับความสูงของโครงสร้างคร่อมช่องทางจราจรต่างๆ (Clearance heights) และองค์ประกอบอื่นๆ

ตารางที่ 2-1 แสดงขนาดและรูปร่างของขนาดยานมาตรฐาน 10 ประเภท ที่กำหนดโดย AASHTO ดังแสดงในตาราง จะเห็นได้ว่า ขนาดยานแต่ละประเภทก็จะมีคุณลักษณะความกว้าง ความสูง ความยาวและขนาดอื่นๆ ที่กำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบ ทั้งนี้ ในกระแสการจราจรจริง ยานพาหนะแต่ละประเภทก็มีรูปร่าง และขนาดแตกต่างกันอยู่บ้างเล็กน้อย รูปร่างของขนาดยานมาตรฐานที่กำหนดขึ้น ถือว่าเป็นตัวแทนของขนาดยานประเภทนั้นๆ สำหรับใช้ในการออกแบบเท่านั้น

ตารางที่ 2-1 ขนาดของยวดยานมาตรฐานที่ใช้สำหรับออกแบบ โดย AASHTO

ประเภทยวดยาน	สัญลักษณ์	ขนาด (ฟุต)				
		โดยรวม			เฉพาะส่วนที่ยื่น	
		ความสูง	ความกว้าง	ความยาว	ด้านหน้า	ด้านหลัง
รถยนต์ส่วนบุคคล	P	4.25	7	19	3	5
รถบรรทุก	SU	13.5	8.5	30	4	6
รถประจำทาง	BUS	13.5	8.5	40	7	8
รถประจำทางพ่วง	A-BUS	10.5	8.5	60	8.5	9.5
รถบรรทุก						
รถบรรทุกกึ่งพ่วง - กลาง	WB-40	13.5	8.5	50	4	6
รถบรรทุกกึ่งพ่วง - ใหญ่	WB-50	13.5	8.5	55	3	2
รถบรรทุกพ่วง	WB-60	13.5	8.5	65	2	3
ยวดยานสำหรับพักผ่อน						
รถแบบอยู่อาศัยได้	MH		8	30	4	6
รถพ่วงบ้านแคมป์	P/T		8	49	3	10
รถพ่วงเรือ	P/B		8	42	2	8

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งสำหรับการออกแบบการจราจรได้แก่ รัศมีวงเลี้ยวแคบที่สุด (Minimum turning radius) ของยานพาหนะ รูปที่ 2-4 แสดงการใช้พื้นที่ในการเลี้ยวแคบที่สุด (Minimum turning path) ของรถบรรทุกพ่วงประเภท WB-50 จะเห็นได้ว่าในการเลี้ยวรถนั้น ไม่ได้ใช้พื้นที่เป็นโค้งวงกลมธรรมดาเท่านั้น ล้อหลังของรถพ่วงจะเลี้ยวกินพื้นที่มากกว่าล้อหน้ามากพอสมควร ดังนั้นการออกแบบท้องถนน หรือโครงสร้างอื่นเพื่อรองรับการเดินทางของรถบรรทุกประเภทนี้ จะต้องจัดพื้นที่บริเวณจุดกลับรถ หรือจุดเลี้ยวต่างๆ อย่างเหมาะสม ตารางที่ 2-2 แสดงรัศมีวงเลี้ยวของยานพาหนะมาตรฐานของ AASHTO ทั้ง 10 ประเภท

ตารางที่ 2-2 รัศมีวงเลี้ยวแคบที่สุด ยวดยานมาตรฐานที่ใช้สำหรับออกแบบ โดย AASHTO

ประเภท ยวดยาน	รถยนต์ ส่วนบุคคล	รถบรรทุก	รถ ประจำ ทาง	รถ ประจำ ทาง พ่วง	รถ บรรทุก กึ่งพ่วง - กลาง	รถ บรรทุก กึ่งพ่วง - ใหญ่	รถ บรรทุก พ่วง	รถแบบ อยู่ อาศัย ได้	รถพ่วง บ้าน แคมป์	รถพ่วง เรือ
สัญลักษณ์	P	SU	BUS	A-BUS	WB-40	WB-50	WB-60	MH	P/T	P/B
รัศมีวงเลี้ยว แคบที่สุด (ฟุต)	24	42	42	38	40	45	45	42	24	24
รัศมีด้านใน แคบที่สุด (ฟุต)	15.3	28.4	23.2	21.0	19.9	19.8	22.5	28.4	5.5	10

2.2.2 อัตราการเร่งของยานพาหนะ

ยานพาหนะแต่ละประเภท จะมีขนาด น้ำหนักและกำลังขับเคลื่อนที่แตกต่างกันไป ทำให้มีสมรรถภาพ การเร่งความเร็วที่แตกต่างกันไป ซึ่งได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 อัตราการเร่งของยวดยานแต่ละประเภท

ยวดยาน	น้ำหนักสุทธิ (ปอนด์)	อัตราความเร็วสูงสุด		
		0-15 ไมล์/ชม.	จาก 40 ไมล์/ชม.	จาก 60 ไมล์/ชม.
รถยนต์ - ใหญ่	4,800	10.0	4.0	2.5
รถยนต์ - กลาง	4,000	8.0	4.0	2.0
รถคอมแพคต์	3,000	8.0	3.0	1.1
รถยนต์ - เล็ก	2,100	6.0	1.2	0.7
รถบีคอัพ	5,000	8.0	1.8	1.5
รถบรรทุก	12,000	2.0	0.6	0.6
รถบรรทุก - ใหญ่	45,000	2.0	0.4	-

จากตารางจะเห็นได้ว่า โดยทั่วไปแล้ว ยานพาหนะขณะที่กำลังใช้ความเร็วต่ำ สามารถเร่งความเร็วได้ ดีกว่าขณะที่กำลังใช้ความเร็วสูง และยานพาหนะที่มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาจะสามารถเร่งความเร็วได้ดีกว่า ยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ซึ่งคุณลักษณะนี้ มีผลต่อการออกแบบท้องถนนเป็นอย่างมาก เพราะค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณระยะทางที่สามารถหยุดรถได้โดยปลอดภัย โดยใช้สมการ

$$d_a = \frac{1}{7.2} at^2 \quad (2-2)$$

โดยที่ d_a – ระยะทางที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปขณะเร่งความเร็ว (เมตร)
 a – อัตราการเร่งความเร็ว (กม./ชม./วินาที)
 t – ระยะเวลาในการเร่งความเร็ว (วินาที)

จากตารางที่ 2-3 รถยนต์ส่วนตัวขนาดใหญ่ สามารถเร่งความเร็ว จากหยุดนิ่ง เป็น 24 กม./ชม. ได้ภายใน 1.5 วินาที ด้วยอัตราเร่ง 16 กม./ชม./วินาที ขณะที่รถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ จะต้องใช้เวลามากถึง 7.5 วินาที เพราะมีอัตราเร่งเพียง 3.2 กม./ชม./วินาที ระยะทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปในขณะที่เร่งความเร็ว จะเท่ากับ

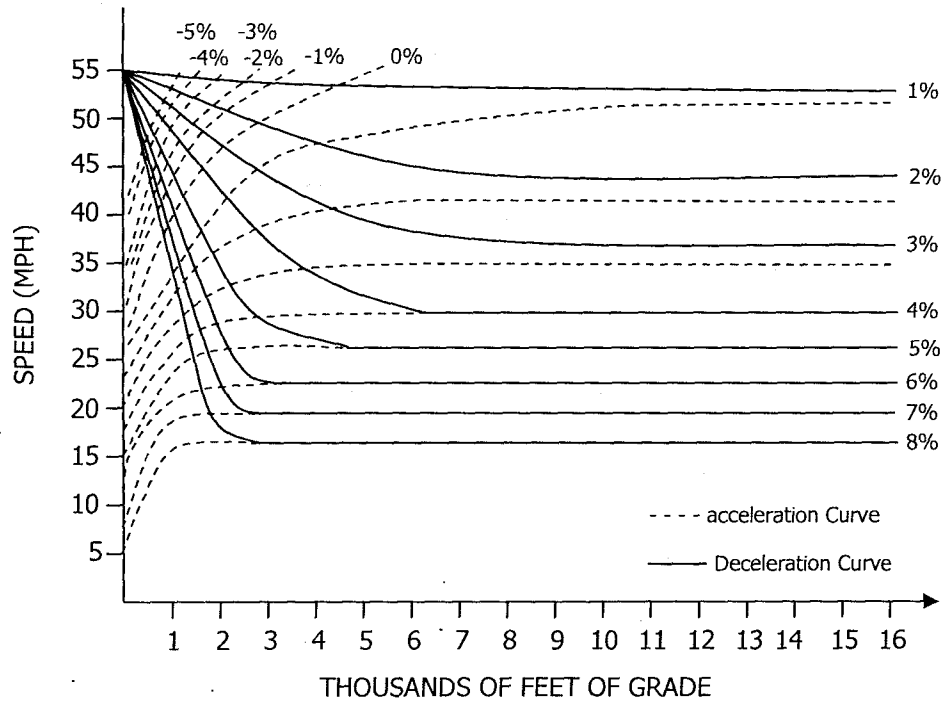
$$\text{รถยนต์ส่วนตัว} \quad d_a = 16(1.5)^2 / 7.2 = 5.0 \text{ เมตร}$$

$$\text{รถบรรทุกพ่วง} \quad d_a = 3.2(7.5)^2 / 7.2 = 25.0 \text{ เมตร}$$

จะเห็นว่า นอกจากจะต้องใช้เวลาในการเร่งความเร็วเป็นเวลานานกว่ารถยนต์ถึง 5 เท่าแล้ว รถบรรทุกพ่วงจำเป็นต้องใช้ระยะทางในการเร่งเร็วมากกว่ารถยนต์ส่วนตัวถึง 5 เท่าอีกด้วย ทั้งนี้ สมมติใช้อัตราเร่งสูงสุดตามสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยปรกติแล้ว ผู้ขับขี่ส่วนใหญ่จะมักไม่ค่อยใช้อัตราเร่งสูงสุดในชีวิตประจำวันเท่าใดนัก ดังนั้น ระยะที่คำนวณได้เบื้องต้นเป็นค่าที่น้อยไปสำหรับสภาพการจราจรจริง

ความแตกต่างในอัตราการเร่งสูงสุดของยานพาหนะแต่ละประเภท ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการจราจรในระบบลดต่ำลง ตัวอย่างเช่น รถบรรทุกขนาดใหญ่ ติครอสัญญาไฟจราจร ณ ทางแยกแห่งหนึ่ง เมื่อได้รับสัญญาณไฟเขียว ก็จะเร่งความเร็วได้ช้า ทำให้ขบวนรถประเภทอื่นที่ตามหลังมาเกิดความล่าช้าไปด้วย นอกจากนี้จะทำให้เกิดช่องว่างในกระแสจราจร ซึ่งไม่มีใครใช้ ยกเว้นมีขบวนรถที่ตามมาหลังสามารถแซงขึ้นหน้าได้ ปัญหาเหล่านี้ จะเพิ่มความรุนแรงขึ้นในบริเวณเส้นทางที่ขึ้นเขา ที่มีความลาดชันสูงมาก พบว่าเกิดปัญหาหลักพร้อมกัน 2 ประการได้แก่ หนึ่ง รถบรรทุกไม่สามารถเร่งความเร็วบนทางลาดชันได้มากนัก หรือไม่ได้เลยสอง รถบรรทุกไม่สามารถรักษาระดับความเร็วได้ บนทางลาดชัน เนื่องจากกำลังเครื่องยนต์ไม่เพียงพอในการรักษาระดับความเร็วได้ ส่งผลให้ความเร็วของรถบรรทุกค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนถึงระดับความเร็วคืบคลานขึ้นเขา (Crawl speed) ซึ่งก็คือความเร็วสูงสุดที่รถบรรทุกสามารถรักษาระดับความเร็วไว้ได้ในขณะขึ้นเขา ณ ระดับความลาดชันต่างๆ กัน ยิ่งถนนมีความลาดชันมากขึ้น ความเร็วคืบคลานขึ้นเขา ก็จะลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2-5 จะเห็นว่า ทางลาดชันขึ้นเขา ที่ความชัน 4 เปอร์เซ็นต์ รถบรรทุกจะมีความเร็วคืบคลานขึ้นเขาเท่ากับ 48.0 กม./ชม. ในขณะที่ทางลาดชัน 8 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วคืบคลานขึ้นเขา จะลดลงเหลือเพียง 25.6 กม./ชม.

ทั้งนี้ ถ้าถนนมีความลาดชันเป็นระยะทางยาวเพียงพอ ความเร็วของรถบรรทุกก็จะค่อยๆ ลดลงจนถึงระดับ ความเร็วคืบคลานขึ้นเขา ซึ่งก่อให้เกิดความล่าช้าแก่ขบวนรถอื่นที่ตามหลังมามากยิ่งขึ้น และช่องว่างในกระแสการจราจรที่เกิดจากรถบรรทุกเหล่านี้ ก็จะไม่ได้อุดหนุน ทำให้ประสิทธิภาพการจราจรโดยรวมลดต่ำลง



รูปที่ 2-5 อัตราการเร่งและอัตราการชะลอตัวของรถบรรทุกบนทางลาดชัน

2.2.3 การชะลอตัวของยานพาหนะ

การชะลอตัวของยานพาหนะถือเป็นคุณลักษณะของยานพาหนะที่มีความสำคัญมากที่สุด ในด้านการออกแบบท้องถนน และความปลอดภัยการจราจร ทั้งระยะเวลาและระยะทางที่จำเป็นต้องใช้ในการชะลอรถยนต์ จนหยุดนิ่งสนิท จะนำมาใช้ประกอบการออกแบบและปฏิบัติการของการจราจรในแทบทุกๆ ด้าน

ประสิทธิภาพในการชะลอตัวของยานพาหนะ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ประการ ได้แก่ ระบบเบรกของยานพาหนะ ชนิดและสภาพของยางรถยนต์ ตลอดจนประเภทและสภาพของพื้นผิวถนน โดยปกติ การคำนวณระยะทางที่จำเป็นต้องใช้ในการชะลอรถยนต์ จะใช้สมการ

$$d_b = \frac{v^2 - u^2}{254.0(f + g)} \quad (2-3)$$

โดยที่ d_b - ระยะทางที่รถยนต์เคลื่อนที่ไประหว่างการชะลอความเร็ว (เมตร)

v - ความเร็วเริ่มต้นก่อนการชะลอความเร็ว (กม./ชม.)

u - ความเร็วสุดท้ายหลังจากการชะลอความเร็ว (กม./ชม.)

f - ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการลื่นไถล (coefficient of skidding friction)

g - ความชันของถนน (เดซิมีอล)

ทั้งนี้ ระยะทางการชะลอรถยนต์ที่คำนวณได้จากสมการ (2-3) ข้างต้น นี้เป็นระยะทางในช่วงระหว่างการชะลอความเร็วหลังจากเริ่มเหยียบเบรกแล้วเท่านั้น จะไม่รวมถึงเวลารับรู้-ตอบสนอง ในกรณีที่ความชันเป็นแบบลงเขา ก็ให้ใส่ค่าความลาดชันพร้อมด้วยเครื่องหมายลบ ในกรณีที่ความชันเป็นแบบขึ้นเขา ก็ให้ใส่ค่าความลาดชันเป็นเครื่องหมายลบ จากรูปแบบของสมการ จะเป็นได้ว่าระยะทางที่ใช้ในการชะลอความเร็วจะเพิ่มสูงขึ้นในเส้นทางลงเขา (เพราะความลาดชันมีเครื่องหมายลบ) และจะสั้นลงในเส้นทางขึ้นเขา (ความลาดชันมีเครื่องหมายบวก)

ตัวอย่างการคำนวณ รถยนต์คันหนึ่งวิ่งด้วยความเร็ว 95 กม./ชม. บนถนนที่พื้นผิวมีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการลื่นไถล เท่ากับ 0.40 ถ้าเส้นทางถนนบริเวณนั้นอยู่ในพื้นที่ราบ (ความลาดชันเท่ากับ 0.0) จงคำนวณหาระยะทางที่จำเป็นต้องใช้ในการชะลอรถยนต์จนเหลือความเร็ว 48 กม./ชม. และจนกระทั่งหยุดนิ่งสนิท

$$d_b (\text{ลดความเร็วเหลือ } 48 \text{ กม./ชม.}) = (96^2 - 48^2) / [254 \times 0.40] = 68.0 \text{ เมตร}$$

$$d_b (\text{ลดความเร็วจนหยุดนิ่งสนิท}) = (96^2 - 0^2) / [254 \times 0.40] = 90.7 \text{ เมตร}$$

อนึ่ง ระยะทางที่จะใช้ในการชะลอความเร็วในช่วงความเร็วสูง จะมากกว่าระยะทางที่จะใช้ในการชะลอความเร็วในช่วงความเร็วต่ำ จากตัวอย่างข้างต้น การชะลอความเร็วจาก 95 กม./ชม. ถึง 48 กม./ชม. จะต้องใช้ระยะทาง 68.0 เมตร คิดเป็นสามเท่าของระยะทางที่จะใช้ในการชะลอความเร็วจาก 48 กม./ชม. จนหยุดนิ่งสนิท ($= 90.7 - 68.0 = 22.7$ เมตร) ในการออกแบบโดยส่วนใหญ่ นิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลบนพื้นผิวเปียก (ฝนตก) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าพื้นผิวแห้ง เพราะเป็นการเผื่อไว้สำหรับสภาพการณ์ฝนตก โดยค่าที่จะใช้จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85

ตารางที่ 2-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลที่นิยมใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะแปรผันตามชนิดของพื้นผิวถนน ความเร็วก่อนเริ่มชะลอความเร็ว สภาพของยางรถยนต์ และสภาพพื้นผิวถนนว่าแห้งหรือเปียก

ตารางที่ 2-4 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้งไถลที่ใช้ในการออกแบบ

ประเภทของพื้นผิว	พื้นผิวแห้ง		พื้นผิวเปียก ค่าออกแบบที่แนะนำ โดย AASHTO
	ยางใหม่ที่ได้มาตรฐาน	ยางที่เสื่อมสภาพแล้ว	
	ความเร็ว = 10 mph (17.7 km/h)		
Dry bit. conc.	0.74	0.61	-
Sand asphalt	0.75	0.66	-
Rock asphalt	0.78	0.73	-
Port. cem. conc.	0.76	0.68	-
	ความเร็ว = 20 mph (32.2 km/h)		
Dry bit. Conc.	0.76	0.60	0.40
Sand asphalt	0.75	0.57	0.40
Rock asphalt	0.76	0.65	0.40
Port. cem. conc.	0.73	0.50	0.40
	ความเร็ว = 30 mph (48.2 km/h)		
Dry bit. conc.	0.79	0.57	0.36
Sand asphalt	0.79	0.48	0.36
Rock asphalt	0.74	0.59	0.36
Port. cem. conc.	0.78	0.47	0.36
	ความเร็ว = 40 mph (64.4 km/h)		
Dry bit. conc.	0.75	0.48	0.33
Sand asphalt	0.75	0.39	0.33
Rock asphalt	0.74	0.50	0.33
Port. cem. conc.	0.76	0.33	0.33
ทุกพื้นผิว	ความเร็ว = 50 mph (80.5 km/h)		0.31
	ความเร็ว = 60 mph (96.5 km/h)		0.30
	ความเร็ว = 70 mph (112.6 km/h)		0.29
	ความเร็ว = 80 mph (128.7 km/h)		0.27

2.2.4 คุณลักษณะในการขับเคลื่อน

ในขณะที่ขดยานเคลื่อนที่นั้น จะมีแรงต้านทานภายนอกต่างๆ มาทำให้รถยนต์ช้าลง ได้แก่แรงต้านทานจากอากาศ (Air resistance) แรงต้านทานจากความลาดชัน (grade resistance) แรงต้านทานในการขับเคลื่อน (rolling resistance) แรงต้านทานจากการเข้าโค้ง (curve resistance) แรงต้านทานจากความต้านทานบนผิวถนน (friction resistance)

2.2.5 ตัวอย่างการคำนวณระยะทางการรับรู้และตอบสนอง และระยะทางการชะลอความเร็ว

ดังที่กล่าวมาแล้ว ระยะทางการชะลอรถยนต์ถือเป็นตัวแปรหลักในการออกแบบท้องถนน เพราะมีสำคัญทางด้านความปลอดภัย ขดยานจะต้องชะลอตัวได้ทันท่วงทีเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุ ระยะทางดังกล่าว จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ระยะทางการรับรู้และตอบสนอง ซึ่งเริ่มต้นจากการที่ผู้ขับขี่มองเห็นเหตุการณ์ข้างหน้า จนกระทั่งเริ่มเหยียบเบรก และระยะทางที่ใช้ในการชะลอความเร็วขดยานภายหลังจากการเหยียบเบรกแล้ว ดังนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

$$d_s = d_p + d_b$$

$$d_s = \frac{1}{3.6} vt + \frac{v^2 - u^2}{254.0(f + g)} \quad (2-4)$$

ระยะทางการหยุดอย่างปลอดภัย

โดยหลักการแล้ว การออกแบบท้องถนนนั้น จะต้องให้ผู้ขับขี่มีระยะการมองเห็นได้ไม่น้อยกว่าระยะการหยุดอย่างปลอดภัย ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ขับขี่ เมื่อพบเห็นสิ่งกีดขวางถนนข้างหน้า เช่นอุบัติเหตุ ของตกหล่น เป็นต้น ก็สามารถชะลอความเร็วขยวดยานได้อย่างทันท่วงที

สมมติว่าทางหลวงสายหนึ่ง มีความเร็วในการออกแบบเท่ากับ 100 กม./ชม. โดยพื้นผิวถนน ในขณะที่ฝนตก มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถล เท่ากับ 0.29 AASHTO แนะนำให้ใช้ค่าระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองเท่ากับ 2.5 วินาที ดังนั้น ระยะทางการหยุดอย่างปลอดภัย (Safe-stopping distance) จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} d_s &= \frac{1}{3.6} (100)(2.5) + \frac{100^2 - 0^2}{254.0(0.29 + 0)} \\ &= 69.4 + 135.8 = 205.1 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น ทางหลวงแห่งนี้ จะต้องออกแบบทางหลวงให้ผู้ขับขี่สามารถมองเห็น ไปข้างหน้าได้ไม่น้อยกว่า 205 เมตรตลอดเส้นทาง ถ้าไม่สามารถจัดระยะทางมองเห็นดังกล่าวได้ รถยนต์อาจจะชะลอความเร็วไม่ทันจนอาจเกิดอุบัติเหตุได้

ระยะเวลาการเปลี่ยนสัญญาณไฟ ทางแยก

โดยทั่วไป จะเห็นว่าในการเปลี่ยนสัญญาณไฟจราจรจากไฟเขียวเป็นไฟแดงนั้น จะต้องให้สัญญาณไฟเหลืองในระยะเวลาสั้นๆ ก่อนเสมอ ทั้งนี้ เพื่อให้ขยวดยานคันที่ไม่สามารถหยุดรถที่เส้นหยุดได้ทัน สามารถเร่งความเร็วให้ผ่านทางแยกได้อย่างปลอดภัย ก่อนที่สัญญาณไฟเขียวทางด้านอื่นๆ จะเริ่มต้น ถ้าไม่มีสัญญาณไฟเหลือง กล่าวคือ เปิดไฟเขียวให้ด้านอื่นไปทันที จะส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นมากมาย ดังนั้น จึงต้องมีการพิจารณาระยะเวลาการเปลี่ยนสัญญาณไฟ (Clearance interval) ในการออกแบบสัญญาณไฟจราจรด้วย

ในการวิเคราะห์ระยะเวลาการเปลี่ยนสัญญาณไฟจราจร (ช่วงเวลาสั้นๆ ที่แสดงสัญญาณไฟเหลืองและไฟแดงทุกด้าน) นั้น จะพิจารณาจากระยะทางการหยุดอย่างปลอดภัย ในขณะที่สัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดงนั้น ขยวดยานที่ยังคงอยู่ห่างจากทางแยกมาก ระยะห่างจากทางแยกมากกว่าระยะการหยุดอย่างปลอดภัยนั้น จะสามารถชะลอความเร็วและจอดหยุดนิ่งที่เส้นหยุดได้ทัน ส่วนขยวดยานที่กำลังเข้าสู่ทางแยก ระยะห่างจากทางแยกน้อยกว่าระยะการหยุดอย่างปลอดภัย จะไม่สามารถหยุดรถที่ทางแยกได้ทัน ดังนั้น วิศวกรจราจรจะต้องออกแบบสัญญาณไฟจราจรให้รถยนต์เหล่านี้ สามารถเคลื่อนตัวผ่านทางแยกได้อย่างปลอดภัย ก่อนที่จะเปิดสัญญาณไฟเขียวให้กับขาอื่นของทางแยก

สมมติว่า ทางแยกแห่งหนึ่งมีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนตัวผ่านแยก ประมาณ 50 กม./ชม. มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลเท่ากับ 0.45 และกำหนดให้ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองของผู้ขับขี่เท่ากับ 0.5 วินาที (โปรดสังเกตว่าจะกำหนดไว้น้อยกว่าปกติ เพราะการเปลี่ยนสัญญาณไฟจราจร ถือเป็นเหตุการณ์ที่ผู้ขับขี่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้า จึงมักเพิ่มความระมัดระวังในการขับขี่มากยิ่งขึ้น ยังผลให้ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองของผู้ขับขี่ลดลง) ดังนั้น ระยะทางการหยุดอย่างปลอดภัย (Safe-stopping distance) จะเท่ากับ

$$d_s = \frac{1}{3.6} (50)(0.5) + \frac{50^2 - 0^2}{254.0 (0.45 + 0)}$$

$$= 6.9 + 21.9 = 28.8 \text{ เมตร}$$

ในการผ่านทางแยกได้อย่างปลอดภัยนั้น รถยนต์จะต้องเดินทางเป็นระยะทางเท่ากับระยะทางการหยุดอย่างปลอดภัย รวมกับความกว้างของถนน และความยาวหนึ่งคันรถยนต์ (เพื่อให้ด้านหลังของรถยนต์พ้นทางแยก) ถ้าถนนดังกล่าวมีความกว้างเท่ากับ 20 เมตร และรถยนต์คันดังกล่าวมีความยาวประมาณ 6 เมตร รถยนต์คันดังกล่าวก็จะต้องเคลื่อนตัวเป็นระยะทาง $28.8 + 20.0 + (6.0/2) = 51.8$ เมตร จึงพ้นจากทางแยกอย่างสมบูรณ์ (จากนั้นจึงสามารถให้สัญญาณไฟเขียวแก่ขาอื่นของทางแยกได้) สมมติว่ารถยนต์คันดังกล่าวยังคงใช้ความเร็ว 50 กม./ชม. ขณะผ่านทางแยก ดังนั้นเวลาในการเคลียร์ทางแยก (Clearance time) จะเท่ากับ

$$\text{ระยะเวลา} = 51.8 \text{ เมตร} / [50 \text{ กม./ชม.} \times 0.278 \text{ (เมตร/วินาที)} / (\text{กม./ชม.})] = 3.73 \text{ วินาที}$$

ดังนั้นระยะเวลาที่แสดงสัญญาณไฟเหลือง ควรจะยาวประมาณ 3.9 วินาทีเพื่อให้รถยนต์ที่ไม่สามารถหยุดรถได้ทัน สามารถเคลื่อนตัวผ่านทางแยกได้อย่างปลอดภัย

การเลือกตำแหน่งติดตั้งป้ายจราจร

ในกรณีที่ต้องการติดตั้งป้ายเตือน “ด่านเก็บเงินข้างหน้า” บริเวณริมถนนเพื่อเป็นการบอกให้ผู้สัญจรไปมาหยุดรถเพื่อจ่ายค่าผ่านทาง สมมติกำหนดให้ขนาดของตัวอักษรของป้ายดังกล่าว สามารถมองเห็นได้ในระยะ 100 เมตร และความยาวแถวคอรถยนต์ที่จอดรอจ่ายค่าผ่านทางมีหางแถวยาวมากที่สุด เท่ากับ 50 เมตร ความเร็วเฉลี่ยที่วิ่งเข้าสู่บริเวณดังกล่าว เท่ากับ 100 กม./ชม. ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลเท่ากับ 0.35 และระยะเวลาการรับรู้และตอบสนองเท่ากับ 2.5 วินาที จงคำนวณว่าป้ายเตือนดังกล่าวควรติดตั้งก่อนถึงด่านเก็บค่าผ่านทางเป็นระยะทางเท่าใด

สำหรับกรณีนี้ ป้ายเตือนจะต้องติดตั้งก่อนถึงด่านเก็บค่าผ่านทาง โดยมีระยะการมองเห็นเพียงพอที่สามารถเบรกรถยนต์จนถึงจุดนี้สนิท ก่อนถึงแถวคอรถยนต์ที่จอดรอจ่ายค่าผ่านทาง

ระยะทางการหยุดอย่างปลอดภัย (Safe-stopping distance) จะเท่ากับ

$$d_s = \frac{1}{3.6} (100)(2.5) + \frac{100^2 - 0^2}{254.0(0.35 + 0)}$$

$$= 69.4 + 112.5 = 181.9 \text{ เมตร}$$

ความยาวแนวคอยรถยนต์จากด้านเก็บค่าผ่านทาง มีท้ายแถวยาวประมาณ 50 เมตร ดังนั้นจึงผู้ขับขี่ควรมองเห็นป้ายจราจรที่ระยะ $181.9 + 50.0 = 231.9$ เมตรก่อนถึงด้านเก็บเงิน แม้กระนั้นก็ตาม ป้ายดังกล่าวสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากระยะ 100 เมตร ดังนั้นป้ายเตือนควรจะทำารติดตั้งบริเวณ $231.9 - 100.0 = 131.9$ เมตร ก่อนถึงด้านเก็บเงิน

2.3 คุณลักษณะของถนน

2.3.1 ประเภทของถนน

ถนนและทางหลวงจะทำหน้าที่หลักสองประการ ได้แก่การจราจรที่สัญจรไปมา (Through Movement) และการเข้าถึงพื้นที่ข้างเคียง (Accessibility) หน้าที่ทั้งคู่มีความสำคัญในการเดินทางอย่างมาก เพราะการเดินทางในแต่ละครั้งจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบทั้งสอง โดยในบริเวณจุดเริ่มต้นการเดินทาง และบริเวณจุดปลายทาง การเดินทางจะต้องเข้า-ออกจากการใช้ประโยชน์ที่ดินริมถนนทั้งสิ้น ดังนั้น ในการเดินทางแต่ละครั้ง ถนนจะต้องทำหน้าที่การเข้าถึงพื้นที่ข้างเคียงได้ โดยจะต้องสามารถรองรับการเข้า-ออกจากรองข่ายถนนได้ ไม่ว่าจะเป็นการจอดรถริมถนน หรือทางเข้าสู่บริเวณที่จอดรถยนต์ภายในพื้นที่จุดหมายปลายทาง อย่างไรก็ตาม ความต้องการเข้า-ออกพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเป็นจำนวนมาก จะส่งผลกระทบต่อการเดินทางการจราจรที่สัญจรผ่านไป-มาในบริเวณนั้น

เมื่อเข้าสู่ระบบโครงข่ายถนนแล้ว ผู้ขับขี่จะพยายามหาเส้นทางที่จะไปยังจุดหมายปลายทางได้อย่างรวดเร็วที่สุด โดยพยายามเลือกใช้เส้นทางที่มีขนาดกว้างขวาง มีสภาพจราจรคล่องตัว ไม่ได้รับการกีดขวางจากการเข้า-ออกการใช้พื้นที่บริเวณใกล้เคียงมากนัก โดยผู้ขับขี่จะพยายามเลือกเส้นทางที่สามารถรองรับปริมาณจราจรได้จำนวนมาก และสามารถให้ความเร็วสูงได้ เมื่อขั้วรถยนต์มาในบริเวณจุดหมายปลายทางแล้ว ผู้ขับขี่ก็ค่อยกลับไปใช้เส้นทางที่จะให้การเข้าถึงพื้นที่ปลายทางได้

โครงข่ายถนนก็มีการแยกประเภทตามระดับการให้บริการจราจรที่สัญจรไปมา (Through movement) และระดับการให้บริการการเข้าถึงพื้นที่ข้างเคียง (Accessibility) ซึ่งโดยปกติจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

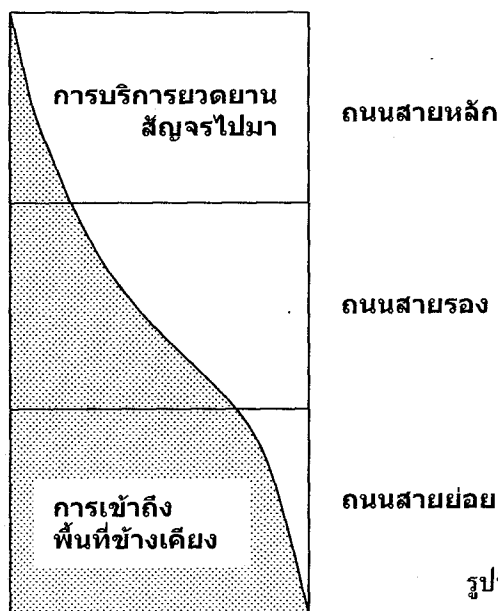
ทางด่วนพิเศษ (Freeways) มีหน้าที่ให้บริการการเดินทางของการจราจรที่สัญจรผ่านไปมาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้รถยนต์เข้า-ออกจากการใช้ประโยชน์ที่ดินข้างเคียงใดๆ ทั้งสิ้น การเข้า-ออกจากระบบทางด่วนพิเศษนี้จะต้องผ่านจุดขึ้น-ลงที่จัดไว้ให้เท่านั้น ซึ่งจุดขึ้น-ลงแต่ละจุดจะมีระยะห่างกันพอสมควร (โดยปกติจะห่างกันตั้งแต่ 2-3 กิโลเมตรขึ้นไป) ทั้งนี้เพื่อลดการรบกวนกระแสจราจรบนโครงข่ายทางด่วนพิเศษ ส่งผลให้กระแสจราจรบนทางด่วนพิเศษสามารถใช้ความเร็วสูงมากได้ อีกทั้งยังสามารถรองรับปริมาณจราจรที่ผ่านไปได้มาก ตัวอย่างเช่น ระบบทางด่วนพิเศษในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

ถนนสายหลัก (Arterials) มีหน้าที่หลักคือการรองรับการเดินทางของการจราจรที่สัญจรไปมาเป็นหลัก และให้บริการการเข้าถึงพื้นที่ข้างเคียงอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โครงสร้างทางกายภาพและอุปกรณ์ควบคุมการจราจรต่างๆ จะถูกออกแบบเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรที่สัญจรผ่านไปมาได้จำนวนมาก และสามารถให้ความเร็วสูงได้ ตัวอย่างเช่น ถนนพหลโยธินในเขตกรุงเทพมหานคร และถนนมิตรภาพในเขตเทศบาลนครราชสีมา เป็นต้น ถนนสายหลักยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทย่อย ได้แก่ประเภทที่จำกัดการเข้าถึงที่ดินข้างเคียง (Limited access facilities) ประเภทถนนสายหลักที่สำคัญ (Major arterials) และประเภทถนนสายหลักทั่วไป (Minor arterials)

ถนนสายรอง (Collectors) เป็นถนนที่ให้บริการการเดินทางทั้งสองแบบ คือกระแสจราจรที่สัญจรผ่านไปมาและการเข้าถึงพื้นที่ข้างเคียง อย่างใกล้เคียงกัน กระแสจราจรที่สัญจรสามารถใช้เส้นทางดังกล่าวได้แต่มีประสิทธิภาพการเดินทางไม่สูงมากนัก เช่น ไม่สามารถให้ความเร็วสูงได้ หรืออาจจะถูกรบกวนโดยรถยนต์ที่ต้องการเข้าถึงพื้นที่ข้างเคียงเป็นระยะๆ การเดินทางที่ใช้ถนนประเภทนี้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นประเภทการเดินทางระยะสั้นๆ ที่ไม่จำเป็นจะต้องไปใช้ระบบทางด่วนพิเศษ หรือถนนสายหลักอื่นๆ ตัวอย่างของถนนประเภทนี้ ได้แก่ซอยเสนานิคมในพื้นที่กรุงเทพมหานคร หรือ ถนน xxx ในเขตเทศบาลนครราชสีมา ถนนสายรองนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทย่อย ได้แก่ประเภทถนนสายรองที่สำคัญ (Major collectors) และประเภทถนนสายรองทั่วไป (Minor collectors)

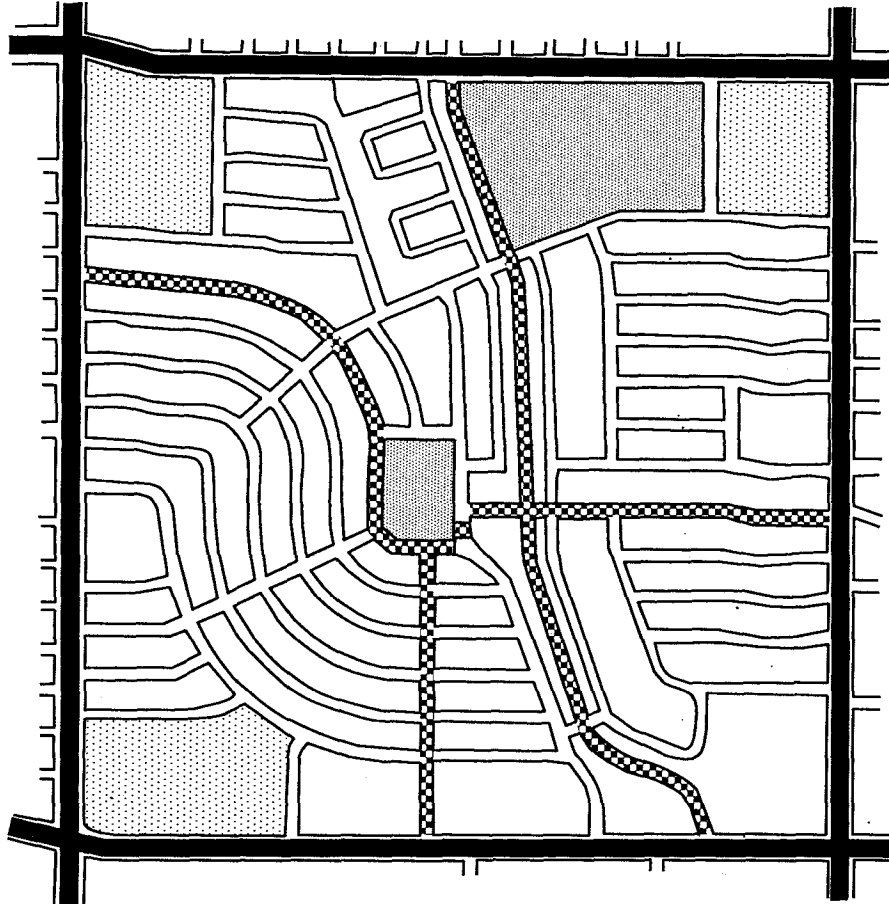
ถนนสายย่อย (Local streets) เป็นถนนที่มีหน้าที่สำหรับการเข้าถึงที่ดินข้างเคียงเป็นหลัก ซึ่งการใช้เส้นทางดังกล่าวในการสัญจรผ่านไปยังพื้นที่อื่นจะเป็นไปด้วยความยากลำบาก เพราะการออกแบบเส้นทางและอุปกรณ์การควบคุมต่างๆ ไม่เอื้ออำนวยต่อการสัญจรไปมา ตัวอย่างเช่นตรอกซอยที่เข้ามาในบริเวณหมู่บ้าน หรือถนนที่เป็นทางตัน เป็นต้น ถนนสายย่อยจะแยกออกเป็นประเภทย่อยๆ ตามการใช้ที่ดินในพื้นที่ใกล้เคียง เช่นประเภทที่อยู่อาศัย ประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และประเภทพาณิชยกรรม เป็นต้น

รูปที่ 2-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างถนนแต่ละประเภท พร้อมกับหน้าที่หลักของถนน ทั้งนี้ การแบ่งประเภทของเส้นทางจริงจะไม่มีขอบเขตการแบ่งที่ชัดเจนนัก จะเป็นหน้าที่ของวิศวกรจราจรที่จะทำการตัดสินใจแยกประเภท จากสภาพการณ์จริง








รูปที่ 2-5 ประเภทของถนน และหน้าที่หลัก

การแยกประเภทของถนนนั้น จะเป็นการกำหนดหน้าที่ของถนน ตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนก่อสร้าง ทั้งนี้ วิศวกรจราจรจึงจะสามารถออกแบบ โครงสร้างกายภาพและอุปกรณ์ควบคุมการจราจร (เช่น โคมไฟจราจร และโค้งแฉกของแนวสายทาง ความกว้างของถนน สัญญาณไฟจราจร เป็นต้น) บนถนนเหล่านั้นได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ มาตรการต่างๆ เช่นการควบคุมการจอดรถริมถนน การตั้งค่าจำกัดความเร็ว ก็จะต้องคำนึงถึงประเภทของถนนเป็นหลักด้วย



LEGEN

	ถนนสายหลัก		ถนนสายรอง
	พื้นที่พาณิชยกรรม		สวนสาธารณะ
	ถนนสายย่อย		

รูปที่ 2-7 แสดงตัวอย่างการแยกประเภทโครงข่ายถนน

2.4 อุปกรณ์ควบคุมการจราจร

องค์ประกอบที่สี่ของระบบการจราจรคืออุปกรณ์ควบคุมการจราจร ซึ่งถือว่าเป็นการสื่อสารกฎหมาย และข้อบังคับการจราจรไปยังผู้ใช้รถใช้ถนน โดยผ่านอุปกรณ์ 3 ประเภทได้แก่

- การทาสีตีเส้น (Markings)
- ป้ายจราจร (Signs)
- สัญญาณไฟจราจร (Signals)

อุปกรณ์เหล่านี้ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการให้บริการของถนน จึงต้องออกแบบให้มีความชัดเจน ง่ายต่อความเข้าใจ และเรียกร้องให้ผู้ขับขี่ทั่วไปสนใจและเชื่อฟัง โดยการใช้สี รูปร่าง และรูปแบบมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะเมื่อผู้ขับขี่ได้พบเห็นบ่อยครั้งเข้า ก็จะมี ความเข้าใจและปฏิบัติตามได้อย่างง่ายดาย ตัวอย่างเช่น ป้ายหยุด หรือป้ายเตือนทางรถไฟ จะใช้สีและรูปร่างที่มีความโดดเด่น ผู้พบเห็นสามารถจดจำป้ายได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องอ่านข้อความบนป้าย ป้ายแนะนำเส้นทางหรือจุดปลายทางจะนิยมใช้พื้นสีฟ้า ผู้ขับขี่ที่ไม่ทราบเส้นทางก็จะพยายามหาป้ายรูปร่างสีเหลี่ยม ที่มีพื้นสีฟ้า เพื่อหาเส้นทางที่ควรใช้เพื่อไปยังจุดปลายทาง สำหรับสัญญาณไฟจราจรนั้น ผู้ขับขี่จะทราบว่าตำแหน่งสัญญาณไฟสีแดงจะอยู่เหนือสัญญาณไฟสีเหลือง ซึ่งอยู่เหนือสัญญาณไฟสีเขียวอีกที ผู้ที่มีตามอดสีก็สามารถมองเห็นสัญญาณไฟได้โดยไม่สับสน

ในองค์ประกอบทั้งสี่ของกระแสรถจราจรนั้น อุปกรณ์ควบคุมการจราจรจะมีลักษณะพิเศษแตกต่างจากองค์ประกอบอื่น ที่วิศวกรสามารถทำการแก้ไข ปรับปรุง เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ควบคุมการจราจรได้ง่ายที่สุด องค์ประกอบอื่นๆ เช่นผู้ใช้รถใช้ถนน หรือ ยานพาหนะที่เข้ามาใช้โครงข่ายถนน ไม่สามารถควบคุมได้ หรือถ้าควบคุมได้ก็ทำได้น้อยมาก สำหรับโครงสร้างกายภาพถนนนั้น เมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ง่ายนัก และการแก้ไข ปรับปรุงส่วนใหญ่จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นอุปกรณ์ควบคุมการจราจรจะเป็นองค์ประกอบที่แก้ไขได้ง่ายที่สุด

การทาสีตีเส้นนั้น สีจะจางลงไปตามกาลเวลา หรืออาจจะมีการปรับเปลี่ยนแบ่งช่องจราจรใหม่ จึงจำเป็นต้องมีการทาสีตีเส้นใหม่อยู่เป็นประจำ สัญญาณไฟจราจรเองก็จะต้องมีการปรับเปลี่ยนจังหวะและรอบสัญญาณไฟจราจรอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรองรับความต้องการการเดินทางที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ป้ายจราจรต่างๆ อาจจะมีการปรับเปลี่ยนเมื่อมีสภาพเก่าสีไม่สด หรือปรับเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของโครงข่ายถนน หรือพื้นที่บริเวณนั้น

อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ควบคุมการจราจรนี้ เป็นเพียงการให้ข้อมูลแก่ผู้ขับขี่ โดยที่ตัวมันเองไม่สามารถบังคับให้ผู้ขับขี่ทำตามข้อกำหนดที่วางไว้ได้ เช่นผู้ขับขี่บางคนก็ฝ่าฝืนสัญญาณไฟแดง บางคนก็จอดรถในที่ห้ามจอด ดังนั้น เพื่อให้อุปกรณ์ควบคุมการจราจรมีประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นจะต้องมีการควบคุมการฝ่าฝืนอยู่อย่างสม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น ขอความร่วมมือจากตำรวจจราจรในการสอดส่องดูแลพฤติกรรมรถที่ผิดกฎหมาย และเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ทั้งนี้ มาตรการหนึ่งคือการกำหนดบทลงโทษผู้ฝ่าฝืนในขั้นรุนแรง ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรามมิให้ผู้ใช้รถใช้ถนนกระทำความผิด เพราะถูกตรวจสอบพบแม้เป็นครั้งแรกที่กระทำความผิด ก็จะถูกลงโทษขั้นรุนแรง อีกมาตรการหนึ่งคือการประยุกต์ใช้ระบบการขนส่งและจราจรอัจฉริยะ (ITS) ต่างๆ มาช่วยตรวจการ

การกระทำผิด แทนที่การใช้กำลังเจ้าหน้าที่ตำรวจ ตัวอย่างเช่น ระบบกล้องตรวจจับการฝ่าฝืนสัญญาณไฟแดงอัตโนมัติ และระบบกล้องตรวจจับการขับขีด้วยความเร็วสูง เป็นต้น

Reading Assignment

แบบฝึกหัด

1. ผู้ขับขี่คนหนึ่ง กำลังขับเคลื่อนรถยนต์ด้วยความเร็ว 60 กม./ชม. เข้าโค้งในแนวราบ มองเห็นรถบรรทุกเกิดอุบัติเหตุขวางทางอยู่ข้างหน้า ที่ระยะห่างออกไปประมาณ 150 เมตร สมมติค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานการเคลื่อนไถลเท่ากับ 0.4 ถ้าผู้ขับขี่คันดังกล่าว จะลดความเร็วอย่างสุดความสามารถ จงคำนวณว่ารถยนต์ดังกล่าวจะวิ่งไปชนรถบรรทุกด้วยความเร็วเท่าใด โดยกำหนดให้ค่า PIEV เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 วินาที จง plot กราฟแสดงผลระยะทางที่จำเป็นจะต้องใช้ในการหยุดรถ กับระยะเวลารับรู้และตอบสนอง (perception – reaction time) โดยกำหนดให้ค่าเวลา PIEV มีค่าตั้งแต่ 0.5 ถึง 5.0 วินาที พร้อมทั้งอธิบายว่าเหตุใด กราฟจึงเป็นเช่นนั้น
2. รถยนต์คันหนึ่งวิ่งชนต้นไม้ที่ความเร็วประมาณ 55 กม./ชม. จากการตรวจสอบสถานที่เกิดอุบัติเหตุ พบว่ามีร่องรอยล้อรถยนต์ไหลครูดถนนอันเนื่องมาจากการชะลอตัวอย่างกะทันหัน เป็นระยะทาง 30 เมตร บนพื้นผิวแห้ง ($f = 0.45$) และอีก 75 เมตรบนไหล่ทางที่ปกคลุมด้วยหิม่าก่อนถึงต้นไม้ ถ้าช่วงถนนดังกล่าวมีความลาดชันลงเขา 3% จงคำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้นของขวยยานดังกล่าว (ก่อนเริ่มเหยียบเบรก)
3. ผู้ขับขี่ขวยยานจำเป็นจะต้องชะลอรถจาก 100 กม./ชม. เป็น 60 กม./ชม. เพื่อเข้าโค้งบนทางหลวงชนบทแห่งหนึ่ง สมมติว่าป้ายเตือน “ระวังทางโค้งและชะลอรถข้างหน้า” มีระยะการมองเห็นเท่ากับ 35 เมตร จงคำนวณหาตำแหน่งที่ตั้งป้ายเตือนดังกล่าวก่อนถึงโค้ง เพื่อให้ขวยยานชะลอรถยนต์ได้อย่างปลอดภัยก่อนเข้าโค้ง สมมติว่า ค่า $f = 0.30$ $g = 0.0\%$ และ เวลารับรู้และตอบสนองของคนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.0 วินาที
4. ให้ทำการสำรวจข้อมูลความเร็วในการเดินของ
 - a. นักศึกษาชาย 50 คน
 - b. นักศึกษาหญิง 50 คน
 - c. เจ้าหน้าที่/อาจารย์ชาย 20 คน
 - d. เจ้าหน้าที่/อาจารย์หญิง 20 คน

บนเส้นทางที่กำหนดให้ พร้อมวาดกราฟร้อยละความถี่สะสม พร้อมทั้งคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 และ 85 ของแต่ละกลุ่ม

References

Chapter 1

1. *Traffic Engineering*, W.R. McShane and R.P. Roess, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1990.
2. Johansson and Rumlal (1971), "Driver Brake Reaction Times." **Human Factors**, Vol 13, No. 1.
3. *Traffic and Highway Engineering*, Garber N.J. and L.A. Hoel, West Publishing Company, MA, 1992.

บทที่ 3 คุณลักษณะของกระแสดจราจร

จากบทที่ 2 ที่ผ่านมา เราได้พูดถึงองค์ประกอบหลักสี่องค์ประกอบในระบบการจราจร ซึ่งประกอบด้วย ผู้ใช้รถใช้ถนน ยานพาหนะ ท้องถนน และอุปกรณ์ควบคุมการจราจรต่างๆ ศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมจราจรนั้น จะมีคุณลักษณะพิเศษที่แตกต่างออกไปจากศาสตร์วิศวกรรมสาขาอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การไหลของน้ำในท่อหรือคูน้ำจะมีพฤติกรรมการไหลที่สามารถคาดเดา และวิเคราะห์หาคำนวณได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยใช้หลักการไฮดรอลิก และกลศาสตร์การไหล ในขณะที่ กระแสดจราจรจะมีลักษณะคล้ายกับการไหลตัวของน้ำในท่อ แต่ในความเป็นจริง สภาพกระแสดจราจรจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ และช่วงเวลา ปรากฏการณ์กระแสดจราจร ไม่สามารถบอกได้ล่วงหน้าว่าจะเกิดอะไรขึ้นล่วงหน้า ทั้งนี้เหตุผลหลักก็เพราะ ผู้ใช้รถใช้ถนน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในสี่ที่มีพฤติกรรมที่ซับซ้อน เป็นตัวแปรสำคัญอย่างยิ่งต่อสภาพกระแสดจราจร อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของคน ก็ยังคงสามารถทำนายได้บ้าง ถึงแม้จะไม่ถูกต้องแน่นอนทุกครั้ง แต่จะมีพฤติกรรมปกติที่บุคคลโดยทั่วไปจะทำดำเนินการ ตัวอย่างเช่นผู้ขับขี่บนถนนที่ตั้งป้ายจำกัดความเร็วไว้ที่ 60 กม./ชม. ก็จะพบว่ารถยนต์โดยส่วนใหญ่จะวิ่งด้วยความเร็ว 45-65 กม./ชม. แต่ก็จะมีรถยนต์บางคันที่ใช้ความเร็วเพียง 20 กม./ชม. หรือบางคันก็ใช้ความเร็วมากถึง 80 กม./ชม. เพราะฉะนั้น สภาพกระแสดจราจรจึงสามารถทำนายและวิเคราะห์ได้คร่าวๆ

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณลักษณะของกระแสดจราจร จำเป็นจะต้องทราบถึงการแบ่งประเภทของโครงสร้างระบบขนส่งก่อน โครงสร้างระบบขนส่ง (Transport Facilities) ได้แก่ ทางหลวง ถนนในเมือง ทางด่วนพิเศษ ระบบขนส่งสาธารณะ ช่องทางจักรยาน และทางเดินเท้า หรือระบบการขนส่งรูปแบบอื่นที่สามารถรองรับการเดินทางของคน หรือสินค้าได้ โครงสร้างระบบขนส่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

- โครงสร้างประเภทที่มีการไหลจราจรแบบต่อเนื่อง (Uninterrupted-flow facilities)
- โครงสร้างประเภทที่มีการไหลจราจรแบบไม่ต่อเนื่อง (Interrupted-flow facilities)

โครงสร้างประเภทที่มีการไหลจราจรแบบต่อเนื่อง (Uninterrupted-flow facilities) ก็คือโครงสร้างระบบจราจรที่กระแสดจราจรสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมการจราจรต่างๆ คอยรบกวนหรือหยุดกระแสดจราจรเป็นระยะๆ ตัวอย่างเช่นระบบทางด่วนพิเศษในกรุงเทพมหานคร หรือ ทางหลวงแผ่นดินในพื้นที่ห่างไกลเมือง ที่มีการจำกัดการเข้า-ออกสู่พื้นที่ข้างเคียง ซึ่งโครงสร้างประเภทนี้ จะไม่มีสัญญาณไฟจราจรหรือป้าย “หยุด” หรือป้าย “ให้ทาง” หรือทางแยกต่างๆ ซึ่งเป็นตัวที่จะคอยรบกวนกระแสดจราจร สำหรับกระแสดจราจรบนโครงสร้างประเภทนี้ จะเป็นผลลัพธ์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานแต่ละคัน (vehicle interaction) บนท้องถนน (ซึ่งมีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน) ภายใต้สภาวะแวดล้อมหนึ่ง โปรดสังเกตว่าถึงแม้ว่า ขณะที่ปริมาณรถยนต์เพิ่มขึ้นสูงมาก จนเกิดสภาพการจราจรติดขัดบนโครงสร้างประเภทนี้ ก็ยังคงถือว่าสภาพการจราจรติดขัดนั้น เนื่องมาจากการปฏิสัมพันธ์ของยานเพียงอย่างเดียว ไม่ได้เกิดจากอุปกรณ์ควบคุมการจราจรแต่อย่างใด ดังนั้น ถึงแม้ว่ามีสภาพการจราจรติดขัดบนโครงสร้างประเภทนี้ ก็ยังคงจัดให้เป็นประเภทที่มีการไหลจราจรแบบต่อเนื่อง อยู่นั่นเอง

โครงสร้างประเภทที่มีการไหลจราจรแบบไม่ต่อเนื่อง (Interrupted-flow facilities) เป็นโครงสร้างระบบจราจรที่มีอุปกรณ์ควบคุมการจราจรประเภทต่างๆ เช่น สัญญาณไฟจราจร ป้าย “หยุด” และป้าย “ให้ทาง” หรือทางแยก หรือทางเข้า-ออกบริเวณจากการใช้ประโยชน์ที่ดินริมถนน เป็นต้น ซึ่งจะรบกวนหรือหยุดกระแสจราจรเป็นระยะๆ ตัวอย่างเช่นถนนสายประธานภายในเมือง ทางหลวงในบริเวณพื้นที่ชุมชน ระบบขนส่งสาธารณะ ช่องทางจักรยาน และทางเดินเท้า เป็นต้น กระแสจราจรบนโครงสร้างประเภทนี้ นอกจากจะเป็นผลลัพธ์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานแต่ละคัน (vehicle interaction) แล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ควบคุมการจราจร เช่น จังหวะสัญญาณไฟจราจรด้วย

ตัวแปรกระแสจราจรสามารถแบ่งออกได้แบบมหภาค (Macroscopic) ซึ่งจะอธิบายภาพรวมของสภาพการจราจร และแบบจุลภาค (microscopic) ซึ่งจะอธิบายพฤติกรรมของยานแต่ละคันในกระแสจราจร

3.1 ตัวแปรกระแสจราจรแบบมหภาค

ตัวแปรกระแสจราจรแบบมหภาคมี 3 ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่

- ปริมาณจราจร (volume) หรืออัตราการไหลจราจร (rate of flow)
- ความเร็ว (traffic speed)
- ความหนาแน่น (density)

3.1.1 ปริมาณจราจร (Volume)

ปริมาณจราจร คือจำนวนยานที่เคลื่อนตัวผ่านจุดสำรวจจุดหนึ่งบนท้องถนน ในช่วงเวลาที่กำหนด วิธีการสำรวจอย่างง่าย ก็คือการส่งเจ้าหน้าที่สนามไปประจำจุดสำรวจแห่งหนึ่งบนท้องถนน และทำการนับจำนวนยานที่ผ่านมา ในช่วงเวลาหนึ่งเช่น 15 นาที หนึ่งชั่วโมง หรือ 24 ชั่วโมง เป็นต้น ปริมาณจราจรโดยส่วนใหญ่จะมีหน่วยเป็น คันต่อหนึ่งหน่วยเวลา เช่น คัน/ชั่วโมง คัน/วัน เป็นต้น

ปริมาณจราจรต่อวัน (Daily Volumes)

ปริมาณจราจรต่อวัน นิยมใช้สำหรับการวางแผน และการตรวจสอบแนวโน้มการใช้เส้นทางถนนหรือทางหลวง มีหน่วยเป็น คัน/วัน โดยปกติ ค่าปริมาณการจราจรต่อวัน จะไม่แสดงแบบแยกทิศทาง จะเป็นผลรวมปริมาณยานในสองทิศทางรวมกัน มีวิธีการแสดงค่าหลายๆ รูปแบบ ที่นิยมกัน ได้แก่

ปริมาณจราจรต่อวันเฉลี่ยตลอดปี (Average annual daily traffic - AADT) คือค่าปริมาณการจราจร 24 ชั่วโมง ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ที่คำนวณจากการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณการจราจรที่รวบรวมไว้ตลอดปี หรือก็คือจำนวนยานพาหนะทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านจุดสำรวจตลอดทั้งปีหารด้วย 365 วัน นั่นเอง

ปริมาณจราจรในวันเปิดทำการเฉลี่ยตลอดปี (Average annual weekday traffic - AAWT) คือค่าปริมาณการจราจร 24 ชั่วโมง ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ที่คำนวณจากการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณจราจรในวันทำการ (วันจันทร์-ศุกร์ ไม่รวมวันหยุดนักขัตฤกษ์) ที่รวบรวมไว้ในช่วงเวลาหนึ่งปี ค่าปริมาณจราจรนี้ ส่วนใหญ่จะใช้กับพื้นที่บริเวณที่มีปริมาณจราจรในวันเสาร์-อาทิตย์ ไม่สูงนัก ทั้งนี้ เพราะการใช้ค่าปริมาณจราจรในวันเปิดทำการเฉลี่ยตลอดปี ซึ่งรวมข้อมูลทั้งวันทำการและวันเสาร์-อาทิตย์นั้น จะค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการรวมข้อมูลในวันหยุดด้วย วิธีการคำนวณก็คือการนำจำนวนรถยนต์ที่วิ่งผ่านจุดดังกล่าวในวันเปิดทำการตลอดทั้งปีหารด้วยจำนวนวันเปิดทำการในปีดังกล่าว

ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวัน (Average daily traffic - ADT) คือค่าปริมาณการจราจร 24 ชั่วโมง ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ที่คำนวณจากการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณจราจรที่รวบรวมไว้มากกว่า 1 วัน ตั้งแต่ 2 วันขึ้นไปจนเป็นสัปดาห์ หรือเดือนก็ได้ แต่ระยะการสำรวจจะต้องน้อยกว่า 1 ปี สำหรับการใช้นั้น ค่า ADT จะแสดงปริมาณการจราจรเฉลี่ยตลอดปี ส่วนค่า ADT จะแสดงค่าปริมาณจราจรเฉลี่ยตลอดครึ่งปี ต่อฤดูกาล ต่อเดือน หรือต่อสัปดาห์ก็ได้

ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันทำการ (Average weekday traffic - AWT) คือค่าปริมาณการจราจร 24 ชั่วโมง ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ที่คำนวณจากการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณจราจรในวันทำการ (วันจันทร์-ศุกร์ ไม่รวมวันหยุดนักขัตฤกษ์) ที่รวบรวมไว้มากกว่า 1 วัน แต่น้อยกว่า 1 ปี เช่นอาจจะเป็นสัปดาห์ เดือน หรือต่อฤดูกาลก็ได้

ตัวอย่างการคำนวณ : ณ จุดสำรวจแห่งหนึ่ง มีการนับปริมาณการจราจรในปีหนึ่งตลอดทั้งปี ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-1 ด้านล่าง การคำนวณค่า ADT และ AWT จะทำให้ไว้สำหรับแต่ละเดือน ตัวอย่างเช่นในเดือนมกราคมมี 31 วัน สำรวจพบว่ามีรถยนต์ทั้งหมด จำนวน 425,000 คันวิ่งผ่านจุดสำรวจ ดังนั้นค่า ADT สำหรับเดือนมกราคม เท่ากับ $425,000 / 31$ คือ 13,710 คัน/วัน ถ้าพิจารณาเฉพาะวันทำการพบว่า เดือนมกราคมมีวันทำการทั้งหมด 22 วัน และมีจำนวนรถยนต์ผ่านจุดสำรวจในวันทำการทั้งหมด 353,600 คัน ดังนั้น ค่า AWT สำหรับเดือนมกราคม เท่ากับ 16,073 คันต่อวัน การคำนวณค่า ADT และ AWT สำหรับเดือนอื่นๆ ก็สามารถใช่วิธีการเดียวกัน ดังผลแสดงในตาราง ทั้งนี้ ผู้อ่าน อาจจะนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณข้อมูล ADT และ AWT ไปคำนวณสำหรับแต่ละฤดูกาล หรือแต่ละไตรมาส ก็ได้

สำหรับค่า AAWT สามารถคำนวณได้โดย นำจำนวนรถยนต์ที่ผ่าน ณ จุดสำรวจตลอดหนึ่งปีหารด้วย 365 วัน ในกรณีนี้เท่ากับ $4933000 / 365$ วัน เท่ากับ 13515 คันต่อวัน ส่วนค่า AAWT ก็คำนวณโดยใช้วิธีคล้ายกัน แต่จะรวมเฉพาะวันทำการเท่านั้น ได้เท่ากับ 16,189 คัน/วัน

ตารางที่ 3-1 การคำนวณปริมาณจราจรต่อวันรูปแบบต่างๆ

เดือน	จำนวนวันทั้งหมด	จำนวนวันทำการ	ปริมาณการจราจรทั้งหมด	ปริมาณการจราจรในวันทำการ	ค่า ADT	ค่า AWT
มกราคม	31	22	425,000	353,600	13,710	16,073
กุมภาพันธ์	28	20	410,000	374,000	14,643	18,700
มีนาคม	31	22	395,000	314,500	12,742	14,295
เมษายน	30	22	365,000	295,800	12,167	13,445
พฤษภาคม	31	21	374,000	299,200	12,065	14,248
มิถุนายน	30	22	432,000	362,100	14,400	16,459
กรกฎาคม	31	23	445,000	374,000	14,355	16,261
สิงหาคม	31	21	441,000	368,900	14,226	17,567
กันยายน	30	22	420,000	360,400	14,000	16,382
ตุลาคม	31	22	395,000	338,300	12,742	15,377
พฤศจิกายน	30	21	400,000	382,500	13,333	18,214
ธันวาคม	31	22	431,000	385,900	13,903	17,541
รวม	365	260	4,933,000	4,209,200	13,515	16,189

จะเห็นได้ว่าในถนนสำรวจเส้นดังกล่าว มีค่า AWT สูงกว่าค่า ADT ก็แสดงให้เห็นว่าปริมาณจราจรในช่วงวันหยุด จะน้อยกว่าปริมาณการจราจรในช่วงวันทำการ จึงทำให้ค่า ADT มีค่าลดลง ต่ำกว่าค่า AWT โดยปรกติถนนในเมืองส่วนใหญ่ จะมีสภาพการเป็นเช่นนี้ ในทางกลับกัน ในเมืองท่องเที่ยว หรือสถานที่พักผ่อนหย่อนใจนั้น จะมีปริมาณการจราจรเข้ามามากในช่วงสุดสัปดาห์ ดังนั้นปริมาณการจราจรในช่วงวันหยุดบนท้องถนนในบริเวณนี้ จะมากกว่าปริมาณการจราจรในช่วงวันทำการ ในพื้นที่เช่นนี้ ท้องถนนโดยส่วนใหญ่ จะมีค่า ADT สูงกว่า ค่า AWT

ปริมาณจราจรต่อชั่วโมง (Hourly Volumes)

ความต้องการในการเดินทางมีความแปรผันอย่างมากภายใน 24 ชั่วโมง โดยจะมีปริมาณความต้องการเดินทางสูงสุดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น (Morning and evening peak hours) ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบการขนส่งต่างๆ วิศวกรจะให้ความสนใจกับปริมาณจราจรในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนนี้เป็นพิเศษ (ในขณะที่ใช้ข้อมูลปริมาณการจราจรต่อวัน สำหรับการวางแผนโครงข่ายคมนาคมขนส่งในอนาคต แต่จะไม่นำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบ) ข้อมูลปริมาณการจราจรรายชั่วโมง มีหน่วยเป็นคันต่อชั่วโมง และจะแสดงแบบแยกทิศทาง ไม่ใช่แบบสองทิศทางรวมกันดังเช่นข้อมูลปริมาณการจราจรรายวัน ตัวอย่างเช่น ถนนมิตรภาพระหว่าง 4:00 – 5:00 น. มีปริมาณการจราจรในทิศทางขาเข้า (มุ่งตะวันออก) จำนวน 500 คัน/ชั่วโมง และในทิศทางขาออก (มุ่งตะวันตก) จำนวน 750 คัน/ชั่วโมง เป็นต้น

ปริมาณการจราจรในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน มีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบและวิเคราะห์สภาพการจราจรบนถนนและทางหลวง โครงสร้างระบบการจราจรเหล่านี้ จะต้องถูกออกแบบให้สามารถรองรับปริมาณจราจรช่วงชั่วโมงเร่งด่วนให้ได้ ทั้งนี้ ถนนในเมืองโดยปกติ จะมีปริมาณการจราจรขาเข้าเมือง จำนวนมากในช่วงเช้า และจำนวนขวยดานในทิศทางขาออกมีปริมาณน้อย ในทางกลับกัน ช่วงเย็นจะมีปริมาณการจราจรขาออกเมือง จำนวนมาก ส่วนขาเข้าจะมีไม่มากนัก ดังนั้นการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงความต้องการการเดินทางแบบแยกทิศทาง เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรทั้งช่วงเร่งด่วนเช้า และเร่งด่วนเย็นได้

ในการออกแบบถนนนั้น เราสามารถประมาณการปริมาณจราจรต่อชั่วโมง จากข้อมูลพยากรณ์ปริมาณการจราจรต่อวัน ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$DDHV = AADT \times K \times D \quad (3-1)$$

โดยที่ $DDHV$ – ปริมาณจราจรต่อวันสำหรับการใช้ในการออกแบบ ในทิศทางที่สนใจ (คัน/ชม.)

$AAADT$ – ปริมาณจราจรต่อวันเฉลี่ยตลอดปี (คัน/วัน)

K – สัดส่วนของปริมาณจราจรช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ต่อปริมาณจราจรต่อวัน (จุดทศนิยม)

D – สัดส่วนของปริมาณจราจรที่วิ่งในทิศทางที่สนใจ ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน (จุดทศนิยม)

เพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบ จะนิยมใช้ค่า K ที่คิดมาจากชั่วโมงที่มีปริมาณจราจรมากที่สุดเป็นอันดับที่ 30 ของปี หากด้วย $AAADT$ อีกนัยหนึ่งก็คือ จะทำการออกแบบให้ถนน สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้ เกือบทั้งปี โดยไม่มีปัญหาการจราจรติดขัด แต่จะยอมให้เกิดการติดขัดขึ้นได้บ้างเล็กน้อย เช่น 30 ชั่วโมงในหนึ่งปี ทั้งนี้เพราะว่าการออกแบบโดยใช้ค่าปริมาณการจราจรมากที่สุด มาใช้ จะเสียค่าใช้จ่ายประมาณสูงมากเกินความจำเป็น ปริมาณจราจรมากที่สุดเป็นอันดับที่ 30 ของปี นิยมใช้กับการออกแบบทางหลวงในเขตชนบท สำหรับในเขตเมือง นิยมใช้ค่าปริมาณการจราจรมากที่สุดเป็นอันดับที่ 50 ของปี

ค่า K และ D จะคำนวณจากการสำรวจข้อมูลจริงในพื้นที่ศึกษา หรือจากพื้นที่อื่นๆ วิเคราะห์แล้วคิดว่าน่าจะมีสภาพการจราจร ตลอดจนความแปรผันต่างๆ ใกล้เคียงกัน ตารางที่ 3-2 แสดงขอบเขตของค่า K และ D ที่นิยมใช้กันในประเทศสหรัฐอเมริกา

ลักษณะพื้นที่	ขอบเขตของตัวแปรโดยทั่วไป	
	ตัวแปร K	ตัวแปร D
ย่านชนบท	0.15-0.25	0.65-0.80
ย่านชานเมือง	0.12-0.15	0.55-0.65
ย่านในเมือง		
- ถนนรัศมีสู่ใจกลางเมือง	0.07-0.12	0.55-0.60
- ถนนวงแหวน	0.07-0.12	0.50-0.55

ตัวอย่างการคำนวณ สมมติว่าในการออกแบบทางหลวงที่จะก่อสร้างขึ้นใหม่สายหนึ่งในย่านชนบท มีการคาดการณ์ว่าในอีก 20 ปีข้างหน้า ถนนที่จะก่อสร้างขึ้นใหม่นี้ จะมีปริมาณจราจรต่อวันเฉลี่ยตลอดปี (AADT) เท่ากับ 25,000 คันต่อวัน จากการสำรวจข้อมูลบนถนนที่มีลักษณะคล้ายกันภายในเดียวกัน พบว่าปริมาณจราจรในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน คิดเป็นร้อยละ 25 ของค่า AADT และสัดส่วนของทิศทางการไหลของทิศทางสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 65 ดังนั้น ปริมาณการจราจรรายชั่วโมงที่จะใช้ในการออกแบบถนนสายที่จะก่อสร้างขึ้นใหม่นี้ สามารถคำนวณดังนี้

$$DDHV = AADT \times K \times D$$

$$= 25,000 \times 0.25 \times 0.65 = 4,062 \text{ คันต่อชั่วโมง (ในทิศทางเร่งด่วน)}$$

การคำนวณนี้ ใช้สมมติฐานที่ว่าค่า K และ D จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในอนาคต อย่างไรก็ตาม ถ้าคาดว่าย่านดังกล่าวจะมีการพัฒนาขึ้นจนกลายเป็นย่านชานเมือง ค่า K และ D ที่ใช้ก็จะมีเปลี่ยนแปลงไป (ใช้ค่าใหม่ตามตารางที่ 3-2) ปริมาณการจราจรรายชั่วโมงที่จะใช้ในการออกแบบถนนสายที่จะก่อสร้างขึ้นใหม่นี้ ก็จะเท่ากับ

$$DDHV = 25,000 \times 0.15 \times 0.60 = 2,250 \text{ คันต่อชั่วโมง (ในทิศทางเร่งด่วน)}$$

จากการคำนวณเบื้องต้น จะเห็นได้ว่าการพยากรณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตนั้น จะต้องใช้สมมติฐานต่างๆ มากมาย ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจริงในอนาคต หรือไม่ก็ได้ นอกจากปริมาณจะเปลี่ยนแปลงในอนาคต คุณลักษณะต่างๆ ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงไป การคำนวณส่วนใหญ่จะใช้สมมติฐานว่าคุณลักษณะของสภาพการจราจรจะไม่เปลี่ยนแปลงในอนาคต แต่ท้ายที่สุดก็อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้

ปริมาณจราจรภายในหนึ่งชั่วโมง และอัตราการไหล (Subhourly volumes and rates of flow)

นอกจากค่าปริมาณจราจรต่อชั่วโมงที่นิยมใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์การจราจรแล้ว โดยปกติวิศวกรจราจรจะต้องพิจารณาถึงความแปรผันของความต้องการการเดินทางภายในหนึ่งชั่วโมงด้วย มิฉะนั้นแล้วถนนที่ออกแบบไว้ อาจจะสามารถรองรับปริมาณจราจรในชั่วโมงเร่งด่วนได้ก็จริง แต่ความต้องการการเดินทางในช่วงสั้นๆ ของชั่วโมงนั้น อาจจะสูงเกินความจุของถนน ก่อให้เกิดปัญหาจราจรติดขัดได้เช่นกัน

อัตราการไหล (Rate of flow) คือปริมาณจราจรต่อชั่วโมง (คัน/ชั่วโมง) ที่ถูกขยายมาจากปริมาณจราจรที่สำรวจภายในเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง ตัวอย่างเช่น สมมติว่าการสำรวจ ณ จุดๆ หนึ่งบนทางหลวง พบว่ามีจำนวนรถยนต์ 25 คัน ผ่านมาในเวลา 5 นาที ดังนั้น อัตราการไหลที่ถูกขยายจากการสำรวจดังกล่าว ก็จะเท่ากับ $25 \text{ คัน} \times 60 \text{ นาที} / 5 \text{ นาที} = 300 \text{ คัน/ชม}$. ถ้ามีการนับจำนวนรถยนต์เป็นเวลา 15 นาที ได้ 78 คัน อัตราการไหลจราจรที่ถูกขยายจากการสำรวจดังกล่าว ก็จะเท่ากับ $78 \text{ คัน} \times 60 \text{ นาที} / 15 \text{ นาที} = 312 \text{ คัน/ชม}$. โดยส่วนใหญ่ ค่าอัตราการไหลจะคำนวณจากการสำรวจจราจรในช่วงเวลา 15 นาที

สมมติว่าดำเนินการสำรวจครบ 1 ชั่วโมง จะได้จำนวนรถยนต์ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ในตารางดังกล่าวยังแสดงค่าอัตราการไหลสำหรับแต่ละช่วงเวลา 15 นาทีด้วย

ตารางที่ 3-3 ปริมาณการจราจรต่อชั่วโมง และอัตราการไหล

ช่วงเวลา	จำนวนรถยนต์ที่ตรวจนับได้ (คัน)	อัตราการไหลที่คำนวณได้สำหรับแต่ละช่วงเวลา
7:00 – 7:15 น.	78	312
7:15 – 7:30 น.	85	340
7:30 – 7:45 น.	96	384
7:45 – 8:00 น.	79	316
รวม	338	-

จะเห็นได้ว่าปริมาณจราจรต่อชั่วโมง คือจำนวนรถยนต์ที่สำรวจได้จริงในสนาม ตลอด 1 ชั่วโมงเต็มเท่ากับ 338 คัน/ชม. ส่วนอัตราการไหลจราจรที่คำนวณจากค่าที่สำรวจในช่วง 15 นาทีแต่ละช่วง จะมีการแปรผันกันไปมาใน 1 ชั่วโมง โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 312 คัน/ชม. ในช่วงเวลาระหว่าง 7:00 – 7:15 น. และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 384 คัน/ชม. ในช่วงเวลาระหว่าง 7:30 – 7:45 น. ค่าที่สูงที่สุดนี้ นิยมเรียกว่า อัตราการไหลสูงสุด (Peak flow rate) คือค่าอัตราการไหลที่ค่าสูงที่สุดภายในหนึ่งชั่วโมง โปรดสังเกตว่าในช่วงเวลา 15 นาทีที่เกิดอัตราการไหลสูงสุดนั้น ความต้องการการเดินทาง (384 คัน/ชม.) จะมีค่าสูงกว่าความต้องการเดินทางเฉลี่ยต่อชั่วโมง (338 คัน/ชม.) ในแง่ของสภาพการจราจรนั้น ถ้าถนนมีการออกแบบเพื่อรองรับปริมาณจราจรต่อชั่วโมง (338 คัน/ชม.) ถนนเส้นดังกล่าวก็จะมีปัญหาความต้องการการเดินทางเกินความจุ ในช่วงเวลา 7:30 – 7:45 น. ทำให้เกิดสภาพการจราจรติดขัดได้ สภาพการจราจรติดขัดจะมีคุณลักษณะที่ซับซ้อน เข้าใจได้ยาก และโดยปกติจะก่อให้เกิดการติดขัดต่อเนื่องยาวนานกว่าช่วงเวลา 15 นาทีนั้น ดังนั้น การวิเคราะห์สภาพการจราจร โดยส่วนใหญ่จะใช้ข้อมูลอัตราการไหลสูงสุดในหนึ่งชั่วโมง แทนปริมาณจราจรรายชั่วโมง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรต่อชั่วโมง กับอัตราการไหลสูงสุดในชั่วโมง จะเป็นค่าที่นิยมเรียกในทางวิศวกรรมจราจรว่า ค่าแฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน (Peak hour factor - PHF) ซึ่งมีสมการคำนวณ ดังนี้

$$PHF = \frac{V}{4 \times v_{15}} \quad (3-2)$$

โดยที่ PHF – แฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน

V – ปริมาณจราจรต่อชั่วโมง (คัน/ชั่วโมง)

v_{15} – จำนวนยวดยานในช่วง 15 นาทีสูงสุดที่นับได้ในหนึ่งชั่วโมง (คัน/15นาที)

จากตารางที่ 3-3 ข้างต้น จะคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน ได้เท่ากับ $338 / (4 \times 96) = 0.88$

แฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.0 ซึ่งจะเกิดในกรณีที่ปริมาณจราจรมีความคงที่สม่ำเสมอภายในหนึ่งชั่วโมงโดยสมบูรณ์ กล่าวคือในแต่ละช่วงเวลา 15 นาที จะมีนับจำนวนยวดยานได้เท่ากันพอดีทั้งสี่คาบ ค่าต่ำที่สุดของ แฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน คือ 0.25 ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่ยวดยานเข้ามาใช้ถนนเส้นนั้นในช่วงเวลา 15 นาทีเท่านั้น และไม่มียวดยานเข้ามาเลยในอีก 45 นาทีที่เหลือ กล่าวคือจำนวนยวดยานที่นับได้ใน 3 คาบ คาบละ 15 นาที จะได้เท่ากับ 0 คัน โดยทั่วไป แฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วนจะมีค่าระหว่าง 0.70 และ 0.98 ซึ่ง Highway Capacity Manual 2000 ได้แนะนำให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน เท่ากับ 0.88 สำหรับย่านนอกเมือง และเท่ากับ 0.92 สำหรับยานในเมือง โปรดสังเกตว่า แฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วนนี้ ถ้ามีค่าสูง (เข้าใกล้ 1.0) แสดงว่าความต้องการการเดินทางภายในหนึ่งชั่วโมงค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ ไม่แปรผันกันมากนัก ถ้ามีค่าต่ำ (เข้าใกล้ 0.25) แสดงว่าความต้องการการเดินทางในหนึ่งชั่วโมงสำรวจนั้น มีความแปรผันสูงมาก

3.1.2 ความเร็ว (Speed) และเวลาการเดินทาง (Travel time)

ความเร็วจราจร (Traffic speed) คืออัตราความเร็วในการเคลื่อนที่มีหน่วยเป็น ระยะทางต่อหนึ่งหน่วยเวลา ที่นิยมใช้ในประเทศไทย คือ กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือเมตรต่อวินาที ความเร็วจราจรสามารถบ่งบอกสภาพการจราจรได้ว่ามีความคล่องตัวหรือมีสภาพติดขัดมากน้อยเพียงใด ความเร็วของยวดยานหนึ่งคัน สามารถหาได้จากระยะทางที่ยวดยานคันนั้น เคลื่อนที่ไปได้ภายในหนึ่งหน่วยเวลา โดยใช้สมการ

$$S = \frac{d}{t} \quad (3-3)$$

โดยที่ S – ความเร็วของยวดยาน (กิโลเมตร/ชั่วโมง หรือ เมตร/วินาที)

d – ระยะทางที่ยวดยานเคลื่อนที่ไป (กิโลเมตร หรือ เมตร)

t – ระยะเวลาที่ยวดยานเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทาง d (ชั่วโมง หรือ วินาที)

ในกระแสรถจักรยานยนต์แต่ละคันก็จะใช้ความเร็วที่แตกต่างกันไป เพราะฉะนั้นกระแสรถจักรยานยนต์จะมีการกระจายตัวของความเร็วของรถจักรยานยนต์แต่ละคัน ซึ่งสามารถใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยในการแสดงภาพรวมคุณลักษณะของกระแสรถจักรยานยนต์นั้นๆ ได้

ความเร็วเฉลี่ย (Mean speed)

ความเร็วเฉลี่ยการจราจร เป็นข้อมูลที่สามารถสะท้อนให้เห็นถึงภาพรวมสภาพการจราจรบนถนนสายหนึ่งได้ โดยถนนที่มีปริมาณรถจักรยานยนต์ไม่มากนัก สภาพการจราจรคล่องตัว ความเร็วจราจรเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้จะมีค่าสูง ส่วนถนนที่มีจำนวนรถจักรยานยนต์มาก สภาพการจราจรติดขัด ความเร็วจราจรที่ตรวจวัดได้ก็จะมีค่าต่ำ ทั้งนี้ความเร็วเฉลี่ยมีวิธีการคำนวณอยู่ 2 วิธี คือ

- **ความเร็วจราจรเฉลี่ย (Time Mean Speed - TMS)** คือค่าเฉลี่ยของความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (spot speed) ของรถจักรยานยนต์ที่สัญจรผ่านไป-มา ณ จุดสำรวจจุดหนึ่ง ภายในช่วงเวลาที่กำหนด สำหรับวิธีการเก็บข้อมูลประเภทนี้ ผู้ทำการสำรวจ 1 คนจะไปประจำจุดสำรวจบริเวณริมถนน แล้วทำการบันทึกข้อมูลความเร็วของรถจักรยานยนต์แต่ละคัน ณ ขณะที่ผ่านจุดสำรวจนั้น จากนั้นจึงนำค่าความเร็วของรถจักรยานยนต์ที่วัดได้ทั้งหมด มาทำการหาค่าเฉลี่ยโดยปกติ ดังสมการ (3-4) ก็จะได้ค่าความเร็วจราจรเฉลี่ยได้

$$TMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3-4)$$

โดย n คือจำนวนรถจักรยานยนต์ที่ผ่าน ณ จุดสำรวจ

v_i คือความเร็วของรถจักรยานยนต์ i ขณะผ่านจุดสำรวจ

- **ความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง (Space Mean Speed - SMS)** คือความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานยนต์ทุกคันที่วิ่งอยู่ภายในช่วงถนนหนึ่ง ในระยะเวลาที่กำหนด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิก (Harmonic) ของความเร็วรถจักรยานยนต์ที่สัญจรผ่านไป-มา ณ จุดสำรวจในช่วงเวลาที่กำหนด สำหรับวิธีการเก็บข้อมูลประเภทนี้ โดยปกติจะต้องมีผู้ทำการสำรวจ จำนวน 2 คน เพื่อคอยตรวจสอบดูว่ารถจักรยานยนต์แต่ละคันที่ผ่านเข้ามา ใช้เวลาเท่าไรในการเดินทางผ่านช่วงถนนที่ทำการสำรวจ (ซึ่งทราบระยะทางที่แน่นอน) จากนั้นนำเวลาการเดินทางผ่านช่วงถนนของรถจักรยานยนต์แต่ละคันที่บันทึกได้ มาเข้าสมการ (2) ก็จะได้ค่าความเร็วประเภท SMS ความเร็วแบบ SMS นี้ เป็นความเร็วเฉลี่ยที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมจราจร

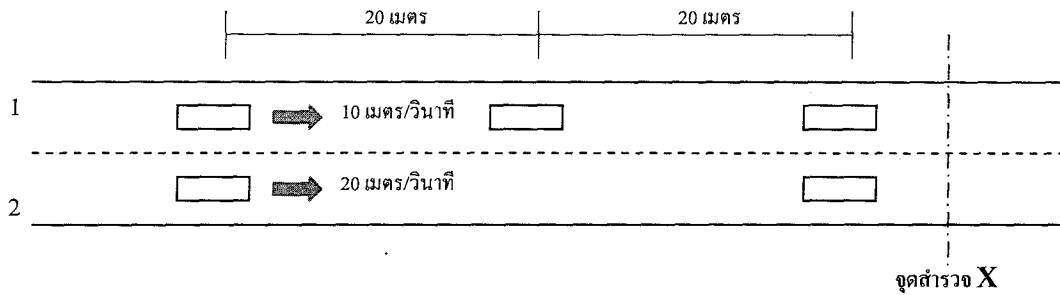
$$SMS = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (3-5)$$

โดย n คือจำนวนรถจักรยานยนต์ที่ผ่าน ณ จุดสำรวจ

L คือระยะทางของช่วงถนนที่ทำการสำรวจ

t_i คือเวลาที่รถจักรยานยนต์ i ใช้ในการเดินทางผ่านช่วงถนนสำรวจ

โดยหลักการแล้ว ค่าความเร็วเฉลี่ย จะทำการวัดความเร็วของขบวนทุกคันขณะที่ผ่านจุดสำรวจจุดหนึ่ง แต่ค่าความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง จะทำการวัดความเร็วของขบวนทุกคันภายในช่วงถนนหนึ่ง รูปที่ 3-1 แสดงความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแบบนี้



รูปที่ 3-1 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ย กับค่าความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง

จากรูปที่ 3-1 บนช่องจราจรที่ 1 ขบวนแต่ละคันขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 10 เมตร/วินาที ด้วยระยะห่างระหว่างคันเท่ากันทุกคัน ที่ระยะ 20 เมตร เพราะฉะนั้น บนช่องจราจรนี้ ขบวนจะผ่านจุดสำรวจ X ทุก ๆ 20/10 หรือ 2.0 วินาที สำหรับการจราจรบน ช่องจราจรที่ 2 นั้น ใช้ความเร็วที่สูงขึ้น แต่ละคันใช้ความเร็วที่สูงเป็นสองเท่าของความเร็วบนช่องจราจรที่ 1 นั่นคือ 20 เมตร/วินาที มีระยะห่างระหว่างคันเท่ากับ 40 เมตร ดังนั้น ผู้สำรวจที่จุด X ก็จะพบว่าช่องทางนี้ มีขบวนผ่านมาทุก ๆ 40/20 หรือ 2.0 วินาที เช่นเดียวกัน ดังนั้น ผู้สำรวจ จะพบว่า มีขบวนบนช่องทางที่ 1 และช่องทางที่ 2 ผ่านมาเป็นจำนวนที่เท่ากัน ดังนั้น ในการคำนวณความเร็วจราจรเฉลี่ย ก็จะมีจำนวนขบวนที่ใช้ความเร็ว 10 เมตร/วินาที เท่ากับจำนวนขบวนที่ใช้ความเร็ว 20 เมตร/วินาที ดังนั้น

$$TMS = \frac{10 + 20}{2} = 15.0 \text{ เมตร/วินาที}$$

สำหรับการวิเคราะห์หาความเร็วจราจรเฉลี่ยของระยะทาง จะต้องพิจารณาจำนวนขบวนที่อยู่บนช่วงถนน ดังแสดงในรูปที่ 3-1 จำนวนขบวนบนช่องจราจรที่ 1 เป็นสองเท่าของจำนวนขบวนบนช่องจราจรที่ 2 ถ้ากระแสดงจราจรยังคงสม่ำเสมอเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ การคำนวณความเร็วจราจรเฉลี่ยของระยะทาง ก็จะมีจำนวนขบวนที่ใช้ความเร็ว 10 เมตร/วินาที เป็นสองเท่าของจำนวนขบวนที่ใช้ความเร็ว 20 เมตร/วินาที ดังนั้น

$$SMS = \frac{2(10) + 20}{3} = 13.3 \text{ เมตร/วินาที}$$

ค่าความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง จะให้น้ำหนักกับขบวนที่ใช้ความเร็วต่ำเป็นพิเศษ เพราะขบวนเหล่านี้ จะต้องใช้เวลามากกว่าในการวิ่งผ่านช่วงถนนที่ทำการสำรวจได้ ในขณะที่ขบวนที่ใช้ความเร็วสูงนั้น จะใช้เวลาสั้นกว่าในการวิ่งผ่านช่วงถนนที่ทำการสำรวจได้ เช่น ขบวนแต่ละคันในช่องจราจรที่ 1 จะต้องใช้เวลาในการเดินทางผ่านช่วงถนนสำรวจเป็นสองเท่าของขบวนในช่องจราจรที่ 2 ดังนั้นค่าความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วจราจรเฉลี่ยปกติเสมอ ในทางวิศวกรรมจราจร จะใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยของระยะทางมากกว่า

ตารางที่ 3-4 แสดงข้อมูลการสำรวจความเร็วของขบวนรถ 6 คัน และการคำนวณความเร็วเฉลี่ยปกติ และความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง

ขบวนรถคันที่	ระยะทาง (เมตร)	ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที)	การคำนวณ ความเร็วของขบวนรถ
1	100	10	10.0
2	100	12	8.3
3	100	15	6.7
4	100	9	11.1
5	100	11	9.1
6	100	7	14.3
รวม	600	64	59.5
ค่าเฉลี่ย	100	9.4	9.9

จากตารางข้างต้น ความเร็วจราจรเฉลี่ยก็จะเท่ากับ 59.5/6 หรือ 9.9 เมตร/วินาที ส่วนความเร็วจราจรเฉลี่ยของระยะทาง จะเท่ากับ 100/10.7 หรือ 9.4 เมตร/วินาที

ดังนั้นการสำรวจความเร็วจราจรบนโครงข่ายถนนของกรุงเทพมหานคร เหมาะที่จะใช้ค่าความเร็วแบบ SMS มากกว่าแบบ TMS

ความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง และความเร็วเฉลี่ยในช่วงเคลื่อนที่

ความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง (Average travel speed) และความเร็วเฉลี่ยในขณะที่เคลื่อนที่ (average running speed) เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยของระยะทาง สองประเภทที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมจราจร ค่าทั้งคู่มีหลักการคำนวณที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันตรงที่เลือกใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่ต่างกัน

เวลาในการเดินทางรวม (Travel time) คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินทางในช่วงถนนที่ทำการสำรวจ ซึ่งจะรวมถึงเวลาที่ขบวนรถกำลังเคลื่อนที่อยู่ และเวลาที่ขบวนรถกำลังจอด (เช่นจอดติดสัญญาณไฟแดง) ด้วย ส่วนเวลาขณะเคลื่อนที่ (Running time) คือเวลาในการเดินทาง เฉพาะในขณะที่ขบวนรถกำลังเคลื่อนที่เท่านั้น ไม่รวมความล่าช้าอันเกิดจากการหยุดต่างๆ ตลอดเส้นทาง ดังนั้น

$$\text{Travel time} = \text{เวลาขณะขบวนรถเคลื่อนที่} + \text{เวลาขณะที่ขบวนรถจอดหยุดนิ่ง}$$

$$\text{Running time} = \text{เวลาขณะขบวนรถเคลื่อนที่}$$

ค่าความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง จะคำนวณจากระยะทางที่ยวดยานเคลื่อนที่ในช่วงถนนที่ทำการสำรวจหารด้วยระยะเวลาในการเดินทางรวม . ส่วนความเร็วเฉลี่ยในขณะที่เคลื่อนที่ จะคำนวณโดยนำระยะทางที่ยวดยานเคลื่อนที่ในช่วงถนนที่ทำการสำรวจ หารด้วยเวลาที่กำลังเคลื่อนที่ ดังสมการ

$$\boxed{\text{travel speed} = \frac{\text{distance}}{\text{travel time}}} \quad (3-6)$$

$$\boxed{\text{running speed} = \frac{\text{distance}}{\text{running time}}} \quad (3-7)$$

ตัวอย่างการคำนวณ: การสำรวจความเร็วบนท้องถนนแห่งหนึ่ง มีช่วงถนนระยะทาง 5.2 กิโลเมตร จากการสำรวจพบว่า การเดินทางเคลื่อนที่ผ่านช่วงถนนดังกล่าว จะใช้เวลารวมโดยเฉลี่ยประมาณ 5 นาที ซึ่งจะเสียเวลาประมาณ 1 นาทีจอดติดสัญญาณไฟแดงอยู่ ดังนั้น ค่าความเร็วเฉลี่ยในการเดินทางรวม จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{travel speed} &= \frac{5.2 \text{ km}}{5 \text{ min}} \times 60 \text{ min/hr} \\ &= 62.4 \text{ กม./ชม.} \end{aligned}$$

และค่าความเร็วเฉลี่ยในขณะที่เคลื่อนที่ จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{running speed} &= \frac{5.2 \text{ km}}{(5 \text{ min} - 1 \text{ min})} \times 60 \text{ min/hr} \\ &= 78.0 \text{ กม./ชม.} \end{aligned}$$

โปรดสังเกตว่าจากสมการข้างต้น ค่าความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง จะมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วเฉลี่ยในขณะที่เสมอ ยกเว้นในกรณีเดียวที่ตลอดช่วงการสำรวจ ยวดยานไม่มีการหยุดจอดเลย ซึ่งในกรณีนี้ ระยะเวลาการเดินทางรวม และระยะเวลาขณะเคลื่อนที่ จะมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้ค่าความเร็วเฉลี่ยทั้งสองมีค่าเท่ากัน

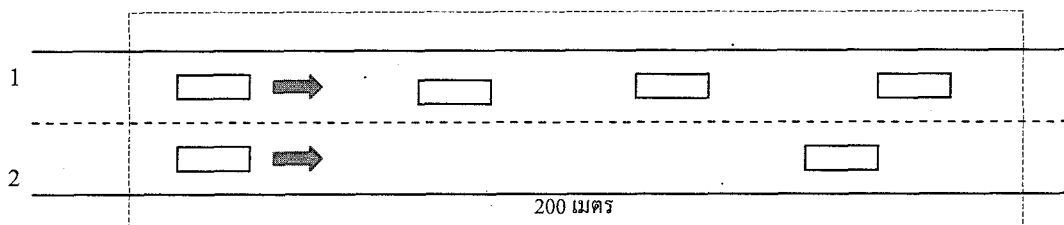
ความเร็วดำเนินการ และความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์

ความเร็วดำเนินการ (Operating speed) คือความเร็วปลอดภัยสูงสุด ที่ยานสามารถวิ่งไปบนท้องถนนได้อย่างปลอดภัย และจะต้องต่ำกว่าค่าความเร็วออกแบบ (Design speed) สำหรับช่วงถนนนั้นๆ ค่าความเร็วดำเนินการนั้น ทำการสำรวจได้ค่อนข้างลำบาก จำเป็นจะต้องส่งเจ้าหน้าที่ไปลงจบบรรยากาศบนท้องถนนจริง อีกทั้งการขับจะขึ้นอยู่กับการพิจารณาของเจ้าหน้าที่สำรวจแต่ละคน ว่าความเร็วดำเนินการเป็นเท่าใด

ความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile speed) ก็นิยมนำมาใช้ในการอธิบายคุณลักษณะของกระแสจราจร และนำมาใช้ในการออกแบบการจำกัดความเร็ว (Speed limit) บนท้องถนน ความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ จะเป็นค่าความเร็วสูงในระดับที่สัดส่วนของยานบนท้องถนนใช้ความเร็วต่ำกว่าค่านี้ ตัวอย่างเช่น ความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 ของถนนเส้นหนึ่งเท่ากับ 65 กม./ชม. ก็หมายความว่าร้อยละ 85 ของยานบนถนนสายนั้น จะใช้ความเร็วต่ำกว่า 65 กม./ชม. หรือความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของถนนอีกเส้นหนึ่งเท่ากับ 55 กม./ชม. ก็หมายความว่าร้อยละ 50 ของยานบนถนนสายนั้น จะใช้ความเร็วต่ำกว่า 55 กม./ชม. เป็นต้น ทั้งนี้ในวิศวกรรมจราจร นิยมใช้ค่าความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 เป็นขอบเขตความเร็วระดับสูงที่นิยมใช้บนท้องถนนดังกล่าว ส่วนความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 15 นิยมใช้เป็นขอบเขตความเร็วระดับต่ำที่นิยมใช้บนท้องถนนดังกล่าว

3.1.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density) คือจำนวนยานที่อยู่ในช่วงถนนที่ทำการสำรวจ มีหน่วยเป็นคัน/กม. หรือ คัน/กม./ช่องทาง วิธีการสำรวจความหนาแน่นโดยตรง จะต้องทำการถ่ายภาพช่วงถนนที่ทำการสำรวจ จากมุมสูง อาจจะเป็นอาคารสูง หรือจากเฮลิคอปเตอร์ก็ได้ จากนั้นก็นำภาพถ่ายที่ได้มานับจำนวนยานที่เคลื่อนที่ภายในช่วงถนนสำรวจ ดังแสดงในรูปที่ 3-2 สมมติว่าช่วงถนนที่จะทำการสำรวจ มีสองช่องทางจราจรในทิศทางมุ่งตะวันออก ระยะทางเท่ากับ 200 เมตร และภาพที่บันทึกไว้ มียานจำนวน 6 คัน ดังนั้น ช่วงถนนที่ทำการสำรวจดังกล่าว จะมีความหนาแน่นจราจร เท่ากับ $6 \text{ คัน} \times 1000 \text{ เมตร/กม.} / 200 \text{ เมตร}$ หรือ 30 คัน/กม. ทั้งนี้อาจจะคิดต่อช่องทาง ได้เท่ากับ $30 \text{ คัน/กม.} / 2 \text{ ช่องทาง}$ หรือ $15 \text{ คัน/กม./ช่องทาง}$ เป็นต้น



รูปที่ 3-2 ตัวอย่างการสำรวจความหนาแน่นของกระแสจราจร

อย่างไรก็ตามความหนาแน่นนี้ ไม่นิยมที่จะตรวจวัด โดยตรงในสนาม ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดในการเลือกจุดสำรวจที่มีมุมมองกว้าง อาจจะเป็นตึกสูง หรือเช่นเฮลิคอปเตอร์ เป็นต้น ดังนั้น จึงนิยมคำนวณค่าความหนาแน่น จากข้อมูลอัตราการไหล และข้อมูลความเร็วที่สำรวจได้ในสนาม ซึ่งมีความสัมพันธ์สมการ 3-8

$$\text{Density} = \frac{\text{Flow rate}}{\text{Speed}} \quad (3-9)$$

$$\text{Flow rate} = \text{Speed} \times \text{Density} \quad (3-10)$$

โดย **Flow Rate** คืออัตราการไหล (คัน/ชม.)

Speed คือความเร็ว (กม./ชม.)

Density คือความหนาแน่น (คัน/กม.)

ตัวอย่างการคำนวณ: กระแสจราจรหนึ่ง มีอัตราการไหลเท่ากับ 500 คัน/ชม. และมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 45 กม/ชม. ดังนั้น ความหนาแน่นจราจร สามารถคำนวณโดยใช้สมการ 3-9 ได้เท่ากับ

$$\text{Density} = \frac{500\text{vph}}{45\text{kph}} = 11.1 \text{ คัน/กม.}$$

ความหนาแน่นจราจรนี้ ถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดในวิศวกรรมจราจร เพราะตัวแปรนี้สามารถบ่งบอกได้ถึงความต้องการการเดินทางโดยตรง และบอกถึงสภาพการจราจรว่ามีสภาพคล่องตัวหรือติดขัดได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ค่าความหนาแน่นยังสื่อถึงความสะดวกสบายในการขับเคลื่อนบนกระแสจราจรนั้น เช่นถ้าถนนมีความหนาแน่นมาก แสดงว่ามีปริมาณรถค่อนข้างเยอะ สภาพการจราจรติดขัด ผู้ขับขี่ไม่สามารถขับเคลื่อนขยควยานได้คล่องตัวนัก ในขณะที่ถนนที่มีความหนาแน่นน้อย ก็จะแสดงว่าปริมาณการจราจรบนท้องถนนมีน้อย ทำให้ผู้ขับขี่สามารถขับเคลื่อนขยควยานได้อย่างคล่องตัว

อัตราการไหล ความเร็ว และความหนาแน่น ถือว่าเป็นตัวแปรการจราจรระดับมหภาค ซึ่งแต่ละตัวจะสามารถแสดงภาพรวมสภาพการจราจรที่กำลังศึกษาได้ดี นอกจากนี้ ยังมีตัวแปรการจราจรระดับจุลภาคที่น่าสนใจอีก สองตัวได้แก่ ระยะทางระหว่างขยควยาน และระยะห่างระหว่างขยควยาน

3.2 ตัวแปรกระแสจราจรแบบจุลภาค

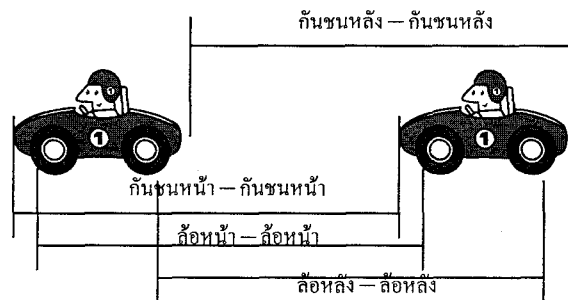
ตัวแปรกระแสจราจรแบบจุลภาคมี 3 ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่

- ระยะทางระหว่างขยควยาน (spacing)
- ความเร็ว (individual speed)

- ระยะเวลาระหว่างขบวน (headway)

3.2.1 ระยะทางระหว่างขบวน

ระยะทางระหว่างขบวน (Spacing) คือระยะทางระหว่างขบวนสองคันที่วิ่งตามหลังกันมา มีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งจะต้องวัดจากจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่งบนขบวน ไม่ว่าจะ เป็นกันชนหน้า ล้อหน้า ล้อหลัง หรือกันชนหลังก็ได้ แต่จะต้องอ้างอิงจากจุดเดียวกันบนรถขบวนทั้งสอง (ดูรูปที่ 3-3)



รูปที่ 3-3 การวัดระยะทางระหว่างขบวน สามารถวัดจากจุดอ้างอิงบนรถขบวนจุดใดก็ได้ แต่จะต้องอ้างอิงที่จุดเดียวกันบนรถขบวน

ระยะทางระหว่างขบวนนั้นมีหน่วยเป็น เมตร ในการสำรวจขบวนในกระแสรถหลายคัน แล้วนำมาเฉลี่ย ก็จะได้ค่าระยะทางระหว่างขบวนเฉลี่ย มีหน่วยเป็นเมตรต่อคัน ซึ่งค่านี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นจราจรได้ ดังสมการ

$$density = \frac{1000}{average\ spacing} \quad (3-11)$$

โดย **Density** คือความหนาแน่น (คัน/กม.)

Average Spacing คือค่าเฉลี่ยระยะทางระหว่างขบวนในกระแสรถ (เมตร/คัน)

3.2.2 ความเร็วของขบวน

สำหรับความเร็วของขบวนแต่ละคันนั้น เป็นคุณลักษณะพื้นฐานที่ทุกคนเข้าใจมาแล้ว เป็นตัวแปรที่แสดงถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ มีหน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2.3 ระยะห่างระหว่างขบวน

ระยะเวลาระหว่างขบวน (Headway) คือระยะเวลาระหว่างขบวนสองคันที่วิ่งตามหลังกันมา ขณะผ่านจุดสำรวจ มีหน่วยเป็นวินาที โดยจะต้องทำการวัด ณ จุดอ้างอิงเดียวกันบนรถยนต์ทั้งสอง

สำหรับระยะห่างระหว่างขบวนนั้นมีหน่วยเป็น วินาที ในการสำรวจขบวนในกระแสรถหลายคัน แล้วนำมาเฉลี่ย ก็จะได้ค่าระยะห่างระหว่างขบวนเฉลี่ย มีหน่วยเป็นวินาทีต่อคัน ซึ่งค่านี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าอัตราการไหลจราจรได้ ดังสมการ

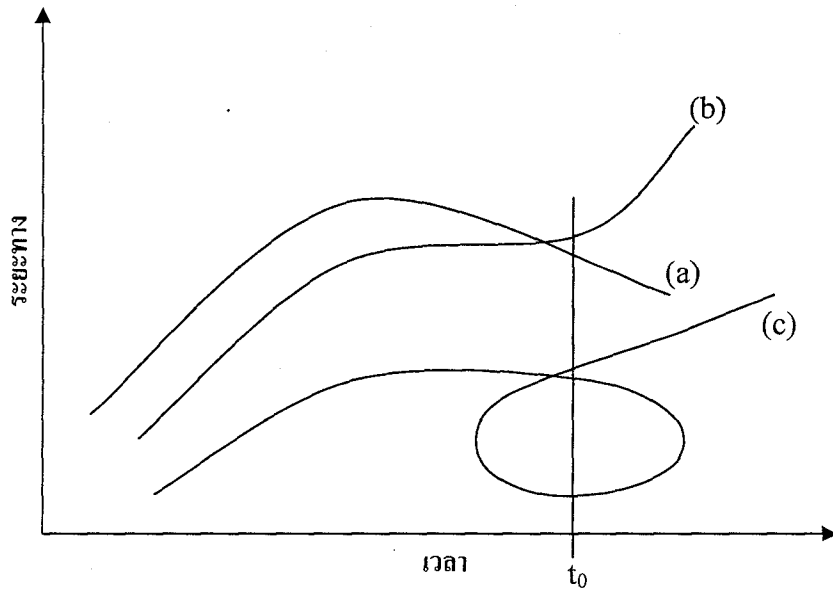
$$\text{flow rate} = \frac{3600}{\text{average headway}} \quad (3-12)$$

โดย Flow rate คืออัตราการไหลจราจร (คัน/ชม.)

Average Headway คือค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างขบวนในกระแสรถ (วินาที/คัน)

3.3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวน

กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวน (Time-Space Diagram) เป็นไดอะแกรมแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนบนกราฟ 2 มิติ มีแกนแนวนอน (แกน X) แสดงเวลา ส่วนแกนแนวตั้ง (แกน Y) แสดงระยะทางที่เคลื่อนที่ไป เส้นแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนแต่ละคัน จะเรียกว่า trajectory ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.3 เส้นนี้ จะแสดงตำแหน่งของขบวนซึ่งเคลื่อนที่ไปบนเส้นทาง ณ เวลาต่างๆ จากรูป เส้น A แสดงให้เห็นว่าขบวนได้เคลื่อนตัวไปข้างหน้า ในช่วงแรก จากนั้น ค่อยๆ วิ่งช้าลง จนในที่สุดวิ่งย้อนกลับทิศทางเดิม ส่วนเส้น B แสดงการเคลื่อนที่ของขบวนไปข้างหน้า จากนั้นจึงชะลอความเร็วเล็กน้อย และในที่สุดก็เร่งความเร็วไปข้างหน้าต่อไป สำหรับกราฟ C นั้น ดูอย่างผิวเผินก็เป็นเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนประเภทหนึ่ง แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่ใช่ เพราะมีลักษณะเป็นวงหรือวกกลับ กล่าวคือ ณ บางช่วงเวลา (เช่น t_0) เส้นแสดงการเคลื่อนที่ที่จะแสดงตำแหน่งของขบวนคันเดียวกันถึงสองแห่ง ซึ่งไม่สามารถเป็นจริงได้ กราฟแสดงตำแหน่งของขบวนที่ถูกต้อนั้น ในแต่ละช่วงเวลา (t) จะต้องแสดงตำแหน่งของขบวน (x) เพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น ไม่สามารถมีลักษณะเป็นวงกลม หรือวกกลับได้



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขวดยาน

จากหลักการของวิชาฟิสิกส์เบื้องต้น ความชัน ณ จุดใดจุดหนึ่งบนเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของขวดยาน จะแสดงความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของขวดยานคั่นนั้น ณ เวลา t มีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลา (เมตร/วินาที หรือ กม./ชม.) ในแง่ทฤษฎี ความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง ก็คืออนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของระยะทาง ตามเวลา แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (6-1)$$

โดยที่ x - ระยะทางการเคลื่อนที่ของขวดยาน
 t - ระยะเวลา

อัตราเร่งของขวดยาน คืออนุพันธ์ลำดับที่สองของระยะทางต่อเวลา มีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลายกกำลังสอง (เมตร/วินาที² หรือ กม./ชม.²) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} \quad (6-2)$$

นั่นคือ ในช่วงที่เส้นการเคลื่อนที่ของขวดยาน (trajectory) มีความชันสูงนั้น ขวดยานคั่นดังกล่าวจะมีความเร็วสูง ส่วนช่วงที่เส้นการเคลื่อนที่ของขวดยานมีความชันต่ำนั้น ขวดยานจะมีความเร็วต่ำ ถ้าช่วงใดเส้นการเคลื่อนที่ขนานกับแกนแนวนอน ก็หมายถึงรถจอดหยุดนิ่งอยู่กับที่ ในขณะที่การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง แสดงว่าความเร็วของขวดยานมีค่าคงที่ ไม่มีอัตราเร่ง หรืออัตราเร่งเท่ากับศูนย์ ช่วงการเคลื่อนที่ที่เป็นส่วนโค้ง

หงายขึ้น (concave upward) จะแสดงว่าขบวนการกำลังเร่งความเร็ว อัตราเร่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก สำหรับช่วงการเคลื่อนที่ที่เป็นส่วนเว้าคว่ำลง (concave downward) หมายถึง ขบวนการกำลังชะลอความเร็ว อัตราเร่งจะมีเครื่องหมายเป็นลบ หรือที่เรียกว่าอัตราหน่วงนั่นเอง

ทั้งนี้ กราฟแสดงการเคลื่อนที่ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์การจราจรบนท้องถนน เครื่องบิน หรือรถไฟ ก็ได้ ตัวอย่างเช่น

1. วิเคราะห์หาระยะเวลาการเดินทางของรถประจำทางระหว่างป้ายจอด 2 แห่ง โดยกำหนดอัตราเร่งสูงสุด อัตราหน่วงสูงสุด ความเร็วในการเดินทางสูงสุด และระยะทางระหว่างป้ายจอดทั้งสองแห่ง
2. วิเคราะห์ความเร็วเริ่มต้นของขบวนการ จากร่องรอยการลื่นไถลของล้อ และความเร็วขณะเกิดอุบัติเหตุ โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และลักษณะทางเรขาคณิตของถนน
3. ประมาณค่าระยะทางของรันเวย์ และตำแหน่งทางออกของแท็กซี่เวย์ โดยกำหนดข้อมูลความเร็วเริ่มต้นก่อนลงจอด อัตราหน่วงสูงสุด ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระยะทางที่จะต้องใช้ในการชะลอตัวเพื่อให้ลดความเร็วที่ต้องการได้
4. คำนวณระยะเวลาการเดินทางของรถไฟ ในการเดินทางผ่านช่วงภูมิประเทศเป็นภูเขา หุบเขาสูง โดยใช้ข้อมูลอัตรากำลังของเครื่องยนต์ และแนวเส้นทางและระดับความสูงต่ำในแนวเส้นทาง

3.3.1 การพัฒนากราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนการ

โดยปกติ วิศวกรจราจรสนใจพิจารณากระแสจราจร หรือสภาพการเคลื่อนที่ของรถยนต์เป็นกลุ่มมากกว่าที่จะสนใจการเคลื่อนที่ของขบวนการแต่ละคัน การพัฒนากราฟแสดงขบวนการ และความเข้าใจในกราฟดังกล่าว มีความจำเป็นมากสำหรับวิศวกรจราจร ทั้งนี้เพราะกราฟเหล่านี้ จะใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ขั้นสูงต่อไป กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนการ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบปัญหาสภาพการจราจรปัจจุบัน เพราะกราฟได้แสดงข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของขบวนการ ตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ ไว้อย่างครบถ้วน

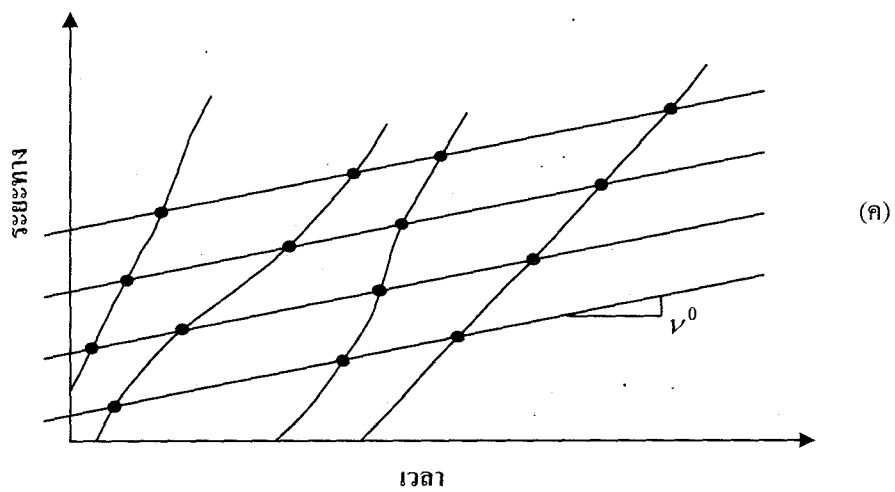
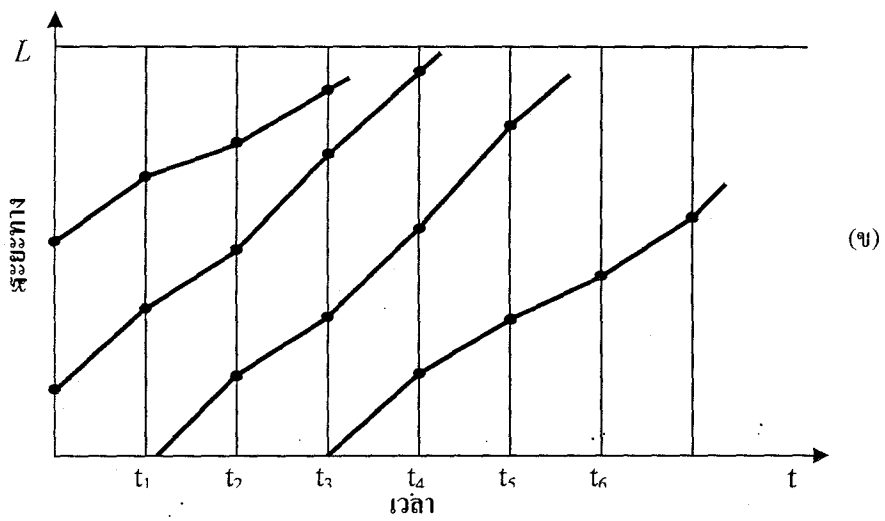
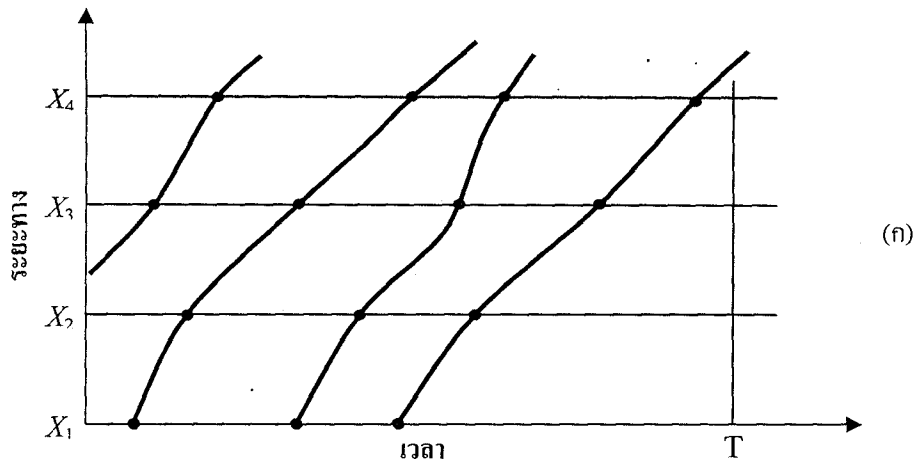
ตัวอย่างกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนการในกระแสจราจร ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 จากรูปดังกล่าว เส้นการเคลื่อนที่แต่ละเส้น จะแสดงถึงการเคลื่อนที่ของขบวนการแต่ละคัน ในช่วงเวลาศึกษา โดยปกติ กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนการ จะแกะรอยการเคลื่อนที่ของขบวนการ ในหนึ่งช่องจราจร ดังนั้น ขบวนการแต่ละคัน จะไม่แซงกัน จึงไม่เส้นการเคลื่อนที่ที่ตัดกัน สำหรับการวิเคราะห์พิเศษ อาจจะมีเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนการตัดกันได้ นั่นหมายถึง ขบวนการคันที่ตามหลังมา เร่งความเร็วขึ้นแซงขบวนการคันหน้าที่ขับช้ากว่าไป

การพัฒนากราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนการในกระแสจราจรนั้น ทำได้หลายวิธีเช่น การขับรถยนต์ ติดตามการเคลื่อนที่ของขบวนการแต่ละคันในกระแสจราจร จากนั้นจึงนำมาแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่บนกราฟ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ค่อนข้างสิ้นเปลือง ต้องใช้เจ้าหน้าที่จำนวนมาก และมีค่าใช้จ่ายทางด้านน้ำมันเชื้อเพลิงสูง

นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การส่งเจ้าหน้าที่สนาม ไปยืน ณ ตำแหน่งต่างๆ บนท้องถนน และทำการตรวจวัดเวลาที่ขบวนรถแต่ละคันผ่านมาถึงจุดที่ตนเองประจำอยู่ โดยจะต้องมีการบันทึกข้อมูลของขบวนรถ เช่น ทะเบียนรถ สีรถ เป็นต้น และเวลาที่ขบวนรถนั้นมาถึง เมื่อรวบรวมข้อมูลแล้วเสร็จ ก็นำเสนอบนกราฟ โดย 1) กำหนดจุดบนกราฟแสดงเวลาที่ขบวนรถแต่ละคันมายังจุดสำรวจต่างๆ จากนั้น 2) จึงลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุด ก็จะได้กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนรถในกระแสรถจรได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) ภาพดังกล่าว สมมติว่ามีสถานีสำรวจทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ x_1, x_2, x_3 และ x_4 อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะมีข้อเสียที่การเคลื่อนที่ของขบวนรถระหว่างสถานีสำรวจ (การลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุด) จะเป็นการประมาณการ เพราะไม่สามารถทราบการใช้ความเร็วในช่วงดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตาม มีวิธีแก้ไข ก็คือการสุ่มสะกดรอยขบวนรถบางคันในกระแสรถจรร่วมด้วย เพื่อให้ทราบการเคลื่อนที่ของขบวนรถอย่างน้อยหนึ่งคันที่แน่นอน การเคลื่อนที่ของขบวนรถคันอื่น ก็สามารถแกะรอยของขบวนรถคันดังกล่าวได้

การพัฒนากราฟอีกหนึ่งวิธีคือการถ่ายภาพทางอากาศ ที่สามารถมองเห็นครอบคลุมช่วงถนนที่จะทำการสำรวจ โดยจะต้องมีการถ่ายภาพหลายๆ ครั้ง เพื่อตรวจสอบจุดตำแหน่งของขบวนรถแต่ละคัน ณ เวลาต่างๆ ตัวอย่างแสดงใน รูปที่ 3.4 (ข) ซึ่งดำเนินการบันทึกภาพสภาพการจราจร จากมุมสูง จำนวน 6 ครั้ง ที่เวลา t_1 ถึง t_6 ตามลำดับ เมื่อรวบรวมข้อมูลแล้วเสร็จ ก็นำเสนอบนกราฟ โดย 1) กำหนดจุดบนกราฟแสดงตำแหน่งของขบวนรถแต่ละคัน ณ เวลาต่างๆ (จาก t_1 ถึง t_6) จากนั้น 2) จึงลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุด ก็จะได้กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนรถในกระแสรถจรได้

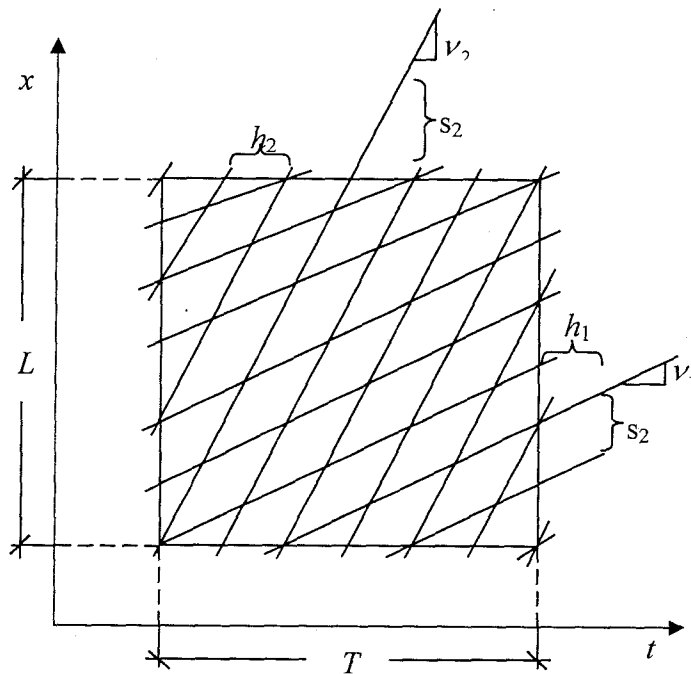
นอกจากนี้ ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือ เจ้าหน้าที่ภาคสนาม จะจับขบวนรถสำรวจด้วยความเร็วที่แตกต่างจากกระแสรถจรปกติ บนช่องทางเฉพาะ (อาจจะใช้ความเร็วที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่ากระแสรถจรปกติก็ได้ แต่เจ้าหน้าที่สำรวจแต่ละคนควรใช้ความเร็วในการสำรวจที่เท่ากัน) เจ้าหน้าที่ จะทำการบันทึกข้อมูลขบวนรถแต่ละคันในกระแสรถจร พร้อมทั้งเวลาและตำแหน่งช่วงถนนที่แซงรถของเจ้าหน้าที่สำรวจ (หรือถูกแซงก็ได้) หลังจากการสำรวจเสร็จสิ้นแล้ว จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาทำกำหนดจุดตำแหน่งของขบวนรถบนกราฟ และลากเส้นต่อเชื่อมเช่นปกติ ตัวอย่างการดำเนินการด้วยวิธีนี้ แสดงในรูปที่ 3.4 (ค) จากภาพดังกล่าว แสดงให้เห็นว่ามีขบวนรถที่ใช้ในการสำรวจ 4 คัน (นับจำนวนเส้นทแยงมุม) แต่ละคันวิ่งด้วยความเร็วเท่ากับ v_0



รูปที่ 3.4 วิธีการสร้างกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวน

3.3.2 การหาค่าตัวแปรด้านการจราจรจากกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยาน

การวิเคราะห์กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยานมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญดังนี้ เส้นตรงในแนวนอน (ขนานกับแกน X) ที่ตัดผ่านกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยาน จะแสดงเวลาที่ยานต่างๆ ขับมาถึงยังสถานีสำรวจนั้นๆ ส่วนเส้นตรงในแนวตั้ง (ขนานกับแกน Y) จะแสดงถึงตำแหน่งของยานต่างๆ ในกระแสรถจร ณ เวลานั้นๆ อนึ่ง ตัวแปรทางการจราจรแบบจุลภาคสามารถหาได้จากกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยาน เช่น ระยะทางระหว่างยาน (spacing) สามารถวัดระยะห่างในแนวตั้งของยานสองคันที่ขับเคลื่อนตามกันมา มีหน่วยเป็นเมตร ส่วนระยะเวลาระหว่างยาน (headway) สามารถวัดระยะห่างในแนวราบของยานสองคันที่ขับเคลื่อนตามกัน มีหน่วยเป็น วินาที (ดูรูปที่ 3.5) ส่วนค่าความเร็วของยานแต่ละคันนั้น ก็คือความชันของเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของยานคันนั้นๆ นั่นเอง



รูปที่ 3.5 วิธีการอ่านค่าตัวแปรด้านการจราจร จากกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยาน

ตัวแปรทางการจราจรแบบมหภาค มีอยู่ 3 ตัวแปร ประกอบด้วยความเร็วเฉลี่ยจราจร (speed) การไหลจราจร (flow) และความหนาแน่น (density) ตัวแปรเหล่านี้ ก็สามารถอ่านได้โดยตรงจากกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยานเช่นเดียวกัน การไหลจราจร คือจำนวนยานที่เคลื่อนที่ผ่านจุดๆ หนึ่งบนท้องถนน (สมมติว่าเป็น m คัน) ในช่วงเวลาที่กำหนด (สมมติว่าเป็น T ชั่วโมง) ดังนั้น การไหลจราจร (q) จะเท่ากับ m/T คันต่อชั่วโมง จากรูปที่ 3.4 (ก) จะเห็นได้ว่าภายในช่วงเวลา T มียานผ่านสถานี x_3 เท่ากับ 4 คัน ดังนั้นการไหลจราจรจึงเท่ากับ $4/T$ เป็นต้น

ความหนาแน่น คือจำนวนยวดยาน (สมมติว่าเป็น n คัน) ต่อระยะทางของช่วงถนนที่ทำการสำรวจ (สมมติว่าเป็น L กิโลเมตร) ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ดังนั้น ความหนาแน่น (k) จะเท่ากับ n/L คัน/กิโลเมตร จากรูปที่ 3.4 (ข) จะเห็นได้ว่า มียวดยานจำนวน 3 คันเคลื่อนที่อยู่ภายใน ช่วงถนนความยาว L กม. ณ เวลา t_4 ดังนั้นความหนาแน่น จึงเท่ากับ $3/L$ เป็นต้น

ความเร็วเฉลี่ยจราจร มีวิธีการคำนวณด้วยกัน 2 วิธีคือ ค่าเฉลี่ยความเร็วปกติ (time mean speed) และค่าเฉลี่ยความเร็วแบบระยะทาง (space mean speed) สำหรับค่าเฉลี่ยความเร็วปกติ ก็คือค่าเฉลี่ยความเร็วของยวดยานหลายๆ คัน ขณะที่กำลังวิ่งผ่านจุดสำรวจ ในรูปที่ 3.4 (ก) สมมติว่าทำการสำรวจ ณ จุด x_2 มียวดยานผ่านมาจำนวน 3 คันในช่วงเวลา T ซึ่งมีความเร็วขณะผ่านจุดสำรวจ x_2 เท่ากับ v_1, v_2 และ v_3 ตามลำดับ ดังนั้น ค่าความเร็วเฉลี่ยการจราจร จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของ v_1, v_2 และ v_3 นั่นเอง สำหรับค่าความเร็วเฉลี่ยแบบระยะทางนั้นคือค่าเฉลี่ยของยวดยานแต่ละคัน ที่อยู่ภายในช่วงถนนที่ทำการศึกษา ในรูปที่ 1.3 ข) สมมติว่าทำการสำรวจบนช่วงถนน L ณ เวลา t_1 มียวดยานเคลื่อนตัวอยู่บนช่วงถนน 3 คัน แต่ละคันกำลังใช้ความเร็ว ณ เวลา t_1 เท่ากับ u_1, u_2 และ u_3 ตามลำดับ ดังนั้น ค่าความเร็วเฉลี่ยแบบระยะทาง จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของ u_1, u_2 และ u_3 นั่นเอง

แบบฝึกหัด

1. การสำรวจปริมาณจราจรบนทางหลวงสายหนึ่ง ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางข้างล่าง จงคำนวณหา ก) ปริมาณจราจรรายชั่วโมง (Hourly Volume) ข) อัตราการไหลสูงสุด (peak rate of flow) สำหรับช่วงทุกๆ 5 นาที (5-minute period) ค) อัตราการไหลสูงสุด สำหรับช่วงทุกๆ 15 นาที (15-minute period) และ ง) แฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วน (peak hour factor) ที่คำนวณสำหรับช่วงทุกๆ 15 นาที

เวลา	จำนวนยวดยาน (คัน)
7:00 – 7:05 น.	912
7:05 – 7:10 น.	855
7:10 – 7:15 น.	963
7:15 – 7:20 น.	966
7:20 – 7:25 น.	923
7:25 – 7:30 น.	978
7:30 – 7:35 น.	1032
7:35 – 7:40 น.	999
7:40 – 7:45 น.	1015
7:45 – 7:50 น.	989
7:50 – 7:55 น.	965

7:55 – 8:00 น.	949
----------------	-----

- สมมติว่าปริมาณจราจรที่วัดได้จากขาหนึ่งของทางแยก เท่ากับ 655 คันต่อชั่วโมง จงวาดกราฟแสดงค่าอัตราการไหลสูงสุด สำหรับค่าแฟกเตอร์ชั่วโมงเร่งด่วนสมมติจาก 1.00 ถึง 0.70 ตามลำดับ
- การสำรวจเวลาในการเดินทาง โดยใช้วิธี License Plate Survey ในการวัดระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง ในช่วงถนนแห่งหนึ่ง ระยะทาง 3.2 กิโลเมตร จงคำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ยระยะทาง (Space Mean Speed) และ ค่าความเร็วเฉลี่ย (Time Mean Speed) และจงแสดงเหตุว่าทำไมค่า Space Mean Speed จะต่ำกว่าค่า Time Mean Speed.

คันที่	เวลาในการเดินทาง (นาที)
1	2.6
2	2.4
3	2.5
4	2.7
5	2.8
6	2.5

- ในกระแสจราจรหนึ่ง พบว่ามีระยะเวลาระหว่างขบวนแต่ละคันเฉลี่ย (Average headway) เท่ากับ 2.2 วินาที และความเร็วเฉลี่ย เท่ากับ 90 กม./ชม. จงคำนวณหาค่าความหนาแน่น (Density) และค่าอัตราการไหลจราจรของกระแสจราจรนั้น
- บนถนนแห่งหนึ่ง มีค่าความเร็วเฉลี่ยระยะทาง เท่ากับ 65 กม./ชม. และมีปริมาณจราจรเท่ากับ 1650 คัน/ชม. จงคำนวณหาความหนาแน่น
- นักศึกษาได้ทำการสำรวจ การเคลื่อนตัวของแถวคอยบริเวณทางแยก ขณะได้สัญญาณไฟจราจรเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียว บันทึกเวลาที่ขบวนแต่ละคันวิ่งผ่านเส้นหยุด ได้ดังแสดงในตารางข้างล่าง จงคำนวณหา ก) ระยะเวลาระหว่างขบวนที่จุดอิมตัว (Saturation Headway) ข) อัตราการไหลอิมตัว และ ค) ระยะเวลาสูญเสียในช่วงแรกของรอบจังหวะสัญญาณไฟเขียว (Start-up lost time)

คันที่	เวลาในการเดินทาง (นาที)
1	2.5
2	2.4
3	2.2

4	2.0
5	1.9
6	1.9
7	1.9
8	1.9
9	1.9

7. ค่าปริมาณจราจรรายวันเฉลี่ยตลอดปี (AADT) ของทางหลวงแห่งหนึ่ง เท่ากับ 15,515 คัน/วัน ถ้าทางหลวงดังกล่าวเป็นประเภทถนนรัศมีภายในเมือง จงประมาณค่าปริมาณการจราจรในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน บนทางหลวงดังกล่าว
8. จงแสดงรูปความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว-ความหนาแน่น ความเร็ว-การไหล และความหนาแน่น-การไหล สำหรับกระแสจราจรแบบไหลต่อเนื่อง (Uninterrupted-flow) จงแสดงค่าเหล่านี้บนกราฟ ก) ความจุจราจร ข) พื้นที่บริเวณที่มีการไหลแบบสม่ำเสมอ และแบบไม่สม่ำเสมอ ค) ความเร็ววิกฤต และความหนาแน่นวิกฤต และ ง) ความหนาแน่นขณะรถติดขัด และ จ) ความเร็วการไหลอิสระ
9. ให้จัดการทำรูปแสดงกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของรถยนต์ บนช่องทางกลางบนถนนหน้ามหาวิทยาลัย ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน เป็นระยะเวลา 30 นาที
10. สมมติ ว่ามีช่องแคบแห่งหนึ่งมีทางน้ำหน้าตัดแคบ ระยะทาง 19 กิโลเมตร บริเวณช่องแคบดังกล่าว มีความกว้างเพียงพอสำหรับเรือลำใหญ่ เพียงหนึ่งลำเท่านั้น เรือไม่สามารถสวนทางกันได้ อย่างไรก็ตาม เจ้าหน้าที่เห็นว่าช่องแคบดังกล่าว มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจในพื้นที่อย่างสูง และเห็นว่ามีเรือขนาดใหญ่จำนวนมากเข้ามาใช้ช่องแคบดังกล่าว จึงได้มีการขยายหน้าตัดของช่องแคบ บริเวณกึ่งกลางของช่องแคบ ทั้งนี้ เพื่อให้เรือใหญ่สามารถจอดพักรอ เพื่อให้เรือที่สวนกันมาสามารถไปได้เช่นกัน โดยที่ไม่จำเป็นต้องคอยกันที่ต้นทาง-ปลายทางเช่นในอดีต ถ้าเรือขนาดใหญ่สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วเฉลี่ย เท่ากับ 6 กม./ชม.

บทที่ 4 แบบจำลองการไหลจราจร

ตัวแปรจราจรพื้นฐานแบบมหภาค 3 ตัว ได้แก่ อัตราการไหล ความเร็ว และความหนาแน่นจราจร มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้โดยใช้กราฟและสมการทางคณิตศาสตร์ ในบทนี้ จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามโดยละเอียด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผน ออกแบบ และการควบคุมจัดการกระแสนจราจรได้อย่างเหมาะสมต่อไป

4.1 การไหลของกระแสจราจรเบื้องต้น

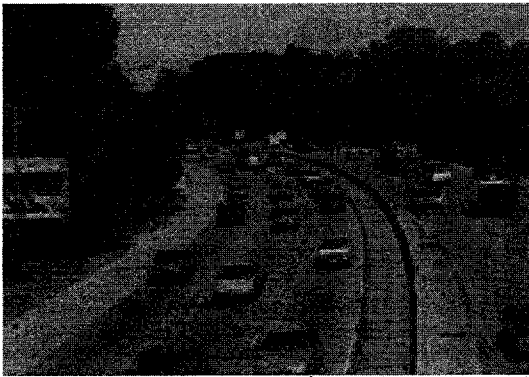
บนท้องถนนทั่วไป จะมีสภาพการจราจรแตกต่างกันไปในแต่ละชั่วโมง โดยทั่วไป จะมีความต้องการเดินทางปริมาณสูงในช่วงเช้าจนถึงหัวค่ำ ในขณะที่ความต้องการการเดินทางลดลงในช่วงกลางคืนจนถึงเช้ามืด ดังนั้น ในแต่ละวัน บนถนนแต่ละเส้น จะมีสภาพการจราจรที่แตกต่างกันไป รูปที่ 4.1 แสดงสภาพการจราจรระดับต่างๆ กัน โดยเริ่มตั้งแต่ รูปที่ 4.1 ก แสดงสภาพการจราจรที่ปริมาณรถยนต์สัญจรไปมาน้อยมาก และปริมาณจราจรค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ในภาพ 4.1 ข) ค) และ ง) ตามลำดับ จนกระทั่งมีสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่งดังแสดงในภาพ จ) สำหรับสภาพการจราจรหนึ่งๆ นั้น สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรทางด้านจราจรแบบมหภาค 3 ตัวคือ อัตราการไหล ความเร็วจราจร และความหนาแน่นจราจร ซึ่งทั้งสามตัวแปรมีความเกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน

สภาพการไหลของกระแสจราจรบนถนนสายใดสายหนึ่ง ตั้งแต่สภาพการจราจรเบาบางจนถึงสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟ 3 ตัว ดังรูปที่ 4.2 ประกอบด้วย

- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่น
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหล
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความหนาแน่น



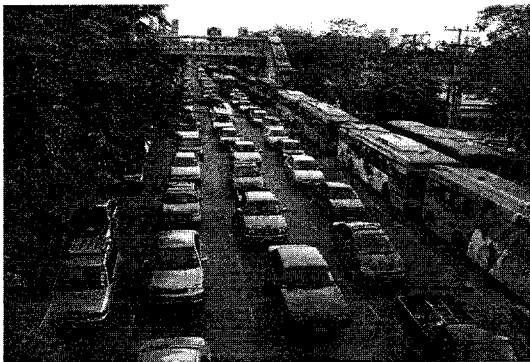
ข) สภาพการจราจรเริ่มหนาแน่นแต่ยังคงคล่องตัว
(ระหว่างจุด A และจุด B ในรูปที่ 4.2)



ค) สภาพการจราจรที่ระดับความจุ
(ระหว่างจุด B ในรูปที่ 4.2)

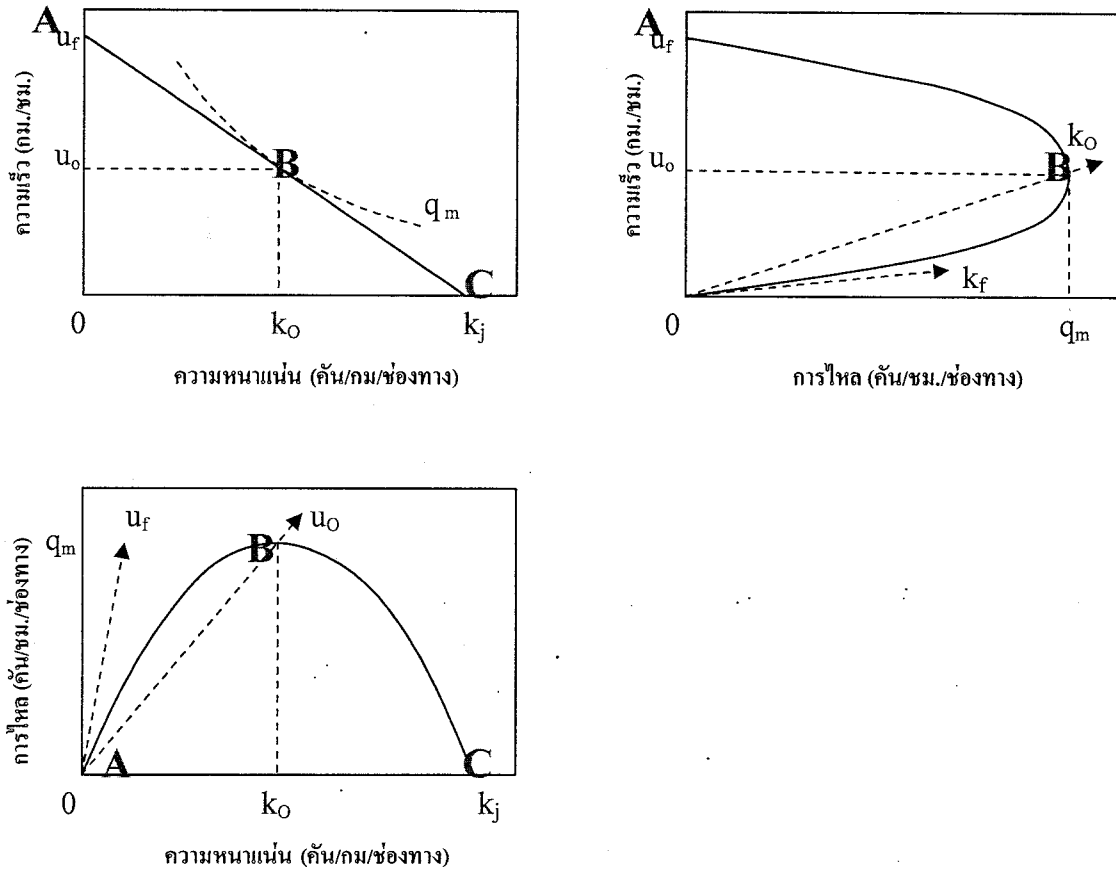


ง) สภาพการจราจรติดขัดหนาแน่นเริ่มชะลอ
(ระหว่างจุด B และ C ในรูปที่ 4.2)



จ) สภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง
(จุด C ในรูปที่ 4.2)

รูปที่ 4.1 สภาพการจราจรระดับต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการไหลกระแสจราจร (ระดับพื้นฐาน)

รูปที่ 4-2 แสดงรูปแบบความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างตัวแปรทั้งสาม สำหรับโครงสร้างประเภทที่มีการไหลจราจรแบบต่อเนื่อง (Uninterrupted-flow facilities) กราฟดังกล่าวแสดงสภาพการจราจรที่ระดับต่างๆ กัน ตั้งแต่สภาพการจราจรเบาบาง ไปจนกระทั่งมีสภาพจราจรติดขัดหยุดนิ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์หาค่าลักษณะของกระแสจราจรบนเส้นทางต่างๆ จะพบว่าความสัมพันธ์จะมีรูปร่างลักษณะคล้ายกับที่แสดงใน รูปที่ 4-2 นี้ จะมีความแตกต่างกันบ้าง ก็เฉพาะรายละเอียดปลีกย่อยเท่านั้น

อันดับแรก ลองมาพิจารณาถึงสภาพการจราจรที่ไม่มีมีการไหล หรือ การไหลเท่ากับ 0 คัน/ชม ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในสองกรณี กรณีแรกคือในสภาพการจราจรเบาบางมาก มียานยนต์จราจรไปมาน้อยมากในช่วงเวลานั้น (รูปที่ 4.1 ก) พบเห็นได้ในช่วงเวลาหลังเที่ยงคืนจนถึงก่อนรุ่งสางตามท้องถนนในจังหวัดต่างๆ สภาพการจราจรดังกล่าวความหนาแน่นจราจร จะเท่ากับศูนย์เนื่องจากไม่มียานยนต์ผ่านไปมาบนช่วงถนน ในทางทฤษฎีความเร็วจราจรในสภาพการณ์เช่นนี้ จะเรียกว่าความเร็วการไหลอิสระ (Free Flow Speed, u_f) นั่นคือ ถ้ามียานยนต์คันหนึ่งบังเอิญผ่านมาในช่วงเวลาดังกล่าว ก็จะสามารถใช้ความเร็วได้อย่างเต็มที่ตามที่ผู้ขับขี่ต้องการ เพราะไม่มียานยนต์คันอื่นบนถนนมาคอยรบกวน สภาพการณ์ดังกล่าวนี้ จะแสดงโดยจุด A บนกราฟทั้งสาม นั่นคือ การไหลและความหนาแน่นมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนความเร็วจราจรมีค่าเท่ากับความเร็วการไหลอิสระ

สำหรับสภาพที่ไม่มีมีการไหล (หรือการไหลเท่ากับศูนย์) อีกกรณีหนึ่งนั้น จะเกิดขึ้นในสภาพการจราจรหนาแน่นมากที่สุด จนมีสภาพติดขัดหยุดนิ่ง ยวดยานไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ (รูปที่ 4-1 จ) พบเห็นได้บ่อยครั้งบนท้องถนนในกรุงเทพฯ ในช่วงเวลาเร่งด่วน หรือในช่วงที่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นกีดขวางการจราจรบริเวณปลายน้ำ ดังนั้นการไหลในสภาพดังกล่าวจึงเท่ากับศูนย์ ในสภาพการณ์เช่นนี้ จะพบว่าความหนาแน่นจราจรจะมีค่ามาก เนื่องจากยวดยานแต่ละคันจอดหยุดนิ่ง โดยเว้นระยะห่างระหว่างคันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในทางทฤษฎี ความหนาแน่นในสภาพการณ์เช่นนี้ จะเรียกว่า ความหนาแน่นในสภาพติดขัด (Jam Density - k_j) ซึ่งจะเป็นความหนาแน่นสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้สำหรับถนนนั้น และมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นในสภาพการจราจรอื่นๆ ส่วนความเร็วจราจรในสภาพดังกล่าวจะเท่ากับศูนย์ เนื่องจากยวดยานทุกคันหยุดนิ่ง สภาพการณ์นี้ แสดงโดยจุด C บนกราฟทั้งสาม ซึ่งทั้งอัตราการไหลและความเร็ว จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนความหนาแน่น จะมีค่าสูงสุด เท่ากับความหนาแน่นในสภาพติดขัด

สำหรับสภาพการจราจรอื่นๆ จะแปรผันอยู่ในช่วงระหว่างสภาพการจราจรเบาบางมาก (จุด A) กับสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง (จุด C) จากสภาพการจราจรเบาบาง (จุด A) เมื่อเริ่มมียวดยานสัญจรผ่านไปมา ก็จะพบว่าอัตราการไหลจราจรจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ความเร็วจราจรค่อยๆ ลดต่ำลง ทั้งนี้เพราะจำนวนยวดยานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างยวดยานในสภาพการจราจร ทำให้ยานพาหนะแต่ละคัน ไม่สามารถใช้ความเร็วได้เต็มที่ (รูปที่ 4-1 ข) ต้องคอยระวังยวดยานที่อยู่ด้านหน้าและด้านข้าง ยังมีปริมาณยวดยานเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าความเร็วจราจรจะค่อยๆ ลดลง

สภาพการจราจรที่มีปริมาณจราจรเพิ่มมากขึ้นนั้น จะส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งซึ่งเรียกว่าจุดอัตราการไหลสูงสุด (Maximum flow, q_m) เป็นจุดที่ถนนถึงสภาพเต็มความจุ (capacity) นั่นคือ สภาพการณ์ที่ถนนจะสามารถรองรับปริมาณจราจรได้มากที่สุดนั่นเอง ความเร็วในสภาพการณ์เช่นนี้ จะ เป็นความเร็วที่รถยนต์ทุกคันสามารถขับเคลื่อนต่อเนื่องกันตามกันไปได้โดยไม่ต้องชะลอความเร็วมากนัก (รูปที่ 4-1 ค) ความเร็วดังกล่าวเรียกว่าความเร็วที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Speed, u_o) ส่วนความหนาแน่นในสภาพการณ์เช่นนี้จะเรียกว่าความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Density, k_o) สภาพการณ์นี้ แสดงโดยจุด B บนกราฟทั้งสามของรูปที่ 4-2

เมื่อความต้องการเดินทางเพิ่มสูงมากขึ้นเกินกว่าความจุของท้องถนน จะพบว่ากระแสจราจรเริ่มมีสภาพติดขัด ถ้าทำการตรวจนับจำนวนยวดยานที่ผ่านถนน (อัตราการไหล) ในสภาพการณ์ดังกล่าว จะพบว่าอัตราการไหลจะค่อยๆ ลดต่ำลง (ถึงแม้ว่าความต้องการการเดินทางมาก แต่ยวดยานบางคันยังติดค้างสะสมอยู่ในระบบ ไม่สามารถเคลื่อนผ่านไป) การจราจรสามารถเคลื่อนตัวได้แต่สลับกับหยุดนิ่งเป็นระยะๆ ดังนั้น ความเร็วจราจรในสภาพการณ์ดังกล่าว จึงยังคงค่อยๆ ลดต่ำลง สำหรับความหนาแน่นจราจรนั้น กลับพบว่ามีความสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะยวดยานแต่ละคันใช้ความเร็วต่ำ จึงไม่ต้องเว้นระยะห่างระหว่างยวดยานมากนัก ดังนั้น ความหนาแน่นจราจร จะค่อยๆ สูงขึ้น จนกระทั่งไปถึงจุดความหนาแน่นสูงสุดที่ C ซึ่งเป็นจุดที่มีสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง

จากกราฟทั้งสาม เราสามารถแบ่งสภาพการจราจรทั้งหมดได้เป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ ช่วงแรกเริ่มตั้งแต่สภาพการจราจรเบาบางที่สุด ไปจนถึงสภาพการจราจรเต็มความจุ (จาก A ถึง B) จะเรียกสภาพการณ์จราจรในช่วงนี้ว่า ช่วงที่การไหลมีความเสถียร (Stable Flow) หรือ สภาพการจราจรคล่องตัว ไม่มีการติดขัดของกระแสการจราจร ยวดยานทุกคันที่ผ่านเข้ามาในระบบ สามารถเคลื่อนตัวผ่านไปได้อย่างไม่เสียเวลานานนัก ส่วนช่วงที่สอง เริ่มตั้งแต่สภาพการจราจรเต็มความจุไปจนถึงสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง (จาก B ถึง C) จะเรียกว่า ช่วงที่การไหล

ไม่เสถียร (Unstable Flow) หรือสภาพการจราจรติดขัด ยวดยานที่ผ่านเข้ามาในระบบบางส่วน จะยังคงติดค้างอยู่ในระบบ สภาพการณ์เช่นนี้ จะพบในกรณีที่ยวดยานเคลื่อนตัวช้าๆ จนไปถึงสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง ในปัจจุบัน การศึกษาต่างๆ ได้สามารถวิเคราะห์สภาพการจราจรในช่วงสภาพเสถียรได้ค่อนข้างถูกต้องและแม่นยำ อย่างไรก็ตาม สภาพการจราจรในช่วงไม่เสถียรนั้น พบว่ามีความซับซ้อน และความไม่แน่นอนสูงมาก ปัจจุบันก็ยังคงมีการศึกษาวิจัยสภาพการจราจรในช่วงไม่เสถียรอย่างกว้างขวาง โดยใช้การปรับปรุงแบบจำลองเดิม หรือใช้แบบจำลองใหม่ๆ

สภาพการณ์ที่มีการไหลเต็มความจุ (จุด B) บนกราฟทั้งสาม เป็นจุดสูงสุดของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็ว-การไหล และของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการไหล-ความหนาแน่น สภาพการณ์นี้จะไม่มีความเสถียร นั่นคือ ถ้ามีสิ่งใดมารบกวนกระแสจราจรเพียงเล็กน้อย ไม่ว่าจะเป็นการที่มียวดยานอีกคันเข้ามาในระบบ หรือการเหยียบเบรกของรถคันหนึ่งในกระแสจราจร ก็จะส่งผลกระทบต่อกระแสจราจร กลายเป็นสภาพการจราจรติดขัดได้ทันทีในช่วงเวลาอันสั้น ดังนั้นโดยทั่วไป วิศวกรจราจร จะพยายามออกแบบระบบการขนส่งต่างๆ ให้สามารถรองรับความต้องการการเดินทางโดยที่อยู่ในช่วงเสถียร ก่อนที่จะถึงสภาพเต็มความจุ มิฉะนั้น ถนนเส้นนั้น ก็จะเกิดสภาพการจราจรติดขัดได้ง่าย

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามข้างต้น จะเห็นว่า ทำไมวิศวกรจราจรจึงไม่นิยมใช้อัตราการไหลจราจร มาเป็นตัวชี้วัดสภาพการจราจรบนท้องถนน ทั้งนี้เพราะ ณ อัตราการไหลระดับหนึ่ง จะแสดงถึงสภาพการจราจรได้สองแบบ (นั่นคือถ้าลองลากเส้นตรงตั้งฉากจากแกนแสดงการไหลจราจร ขึ้นไปจะตัดเส้นกราฟกระแสจราจรสองจุด) จุดหนึ่งจะอยู่ในช่วงสภาพการจราจรเสถียร (สภาพการจราจรเคลื่อนตัวได้ดี) และจุดที่สองจะอยู่ในช่วงสภาพการจราจรไม่เสถียร (สภาพการจราจรติดขัด) ซึ่งถ้านำค่าอัตราการไหลจราจรที่ตรวจวัดได้มาพิจารณาเพียงตัวเดียว ก็จะไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าสภาพการจราจรจะอยู่ในช่วงเสถียร หรือช่วงไม่เสถียร ดังนั้น โดยส่วนใหญ่ วิศวกรจราจรจะนิยมใช้ค่าตัวแปรความเร็ว หรือความหนาแน่น เป็นตัวบ่งบอกสภาพการจราจรแทน เพราะตัวแปรเหล่านี้ จะสามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าถนนมีสภาพการจราจรเช่นใด (นั่นคือถ้าลองลากเส้นตรงตั้งฉากจากแกนแสดงความเร็ว หรือความหนาแน่นจราจร ขึ้นไปจะตัดเส้นกราฟกระแสจราจรเพียงจุดเดียว) สามารถทราบได้แน่ชัดว่าสภาพการจราจรนั้น อยู่ในช่วงคล่องตัวหรือช่วงติดขัด

หนึ่ง สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามอย่างง่าย คือ

$$u = \frac{q}{k} \tag{4-1}$$

- โดยที่ u – ความเร็วจราจร (กม./ชม.)
- q – อัตราการไหล (คัน/ชม./ช่องทาง)
- k – ความหนาแน่น (คัน/กม./ช่องทาง)

นั่นคือ ความเร็วจราจรเท่ากับ การไหล หารด้วย ความหนาแน่น ดังนั้น จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหล-ความหนาแน่น (กราฟล่างซ้ายของรูปที่ 4.2) เราสามารถหาค่าความเร็วจราจรได้ในสภาพการณ์ต่างๆ ได้ โดยการหาความชันของเส้นตรงที่ลากจากจุด (origin) ไปยังสภาพการจราจรนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ความชันของเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้น จุด O ไปยังจุด B (หรือ q_m หารด้วย k_0) ก็คือความเร็ว

จราจรในสภาพการจราจรที่อัตราการไหลสูงสุด ความชันของเส้นตรงที่ลากเชื่อมระหว่าง จุด O ไปยังจุด C (หรือ ศูนย์หารด้วย k_j) ก็จะเท่ากับความเร็วในสภาพการจราจรติดขัด ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับความเร็วของสภาพการจราจรต่างๆ นั้นก็สามารถหาได้โดยวิธีเดียวกัน นั่นคือการหาความชันของเส้นตรงที่ลากเชื่อมระหว่าง จุด O ไปยังสภาพการจราจรนั้นๆ อนึ่ง ในการหาความเร็วการไหลอิสระ (u_f) ที่เกิดขึ้นในขณะที่สภาพการจราจรเบาบางมากๆ นั้น ก็สามารถวิเคราะห์ได้จากความชันของเส้นสัมผัส ณ ตำแหน่ง O (เส้น OA) นั่นเอง

สำหรับความชันบนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-การไหล (กราฟบนขวาของรูปที่ 4.1) ก็จะแสดงถึงความหนาแน่นของสภาพการจราจรต่างๆ เช่นความชันของเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้น จุด O ไปยังจุด B ก็คือความหนาแน่นในสภาพการจราจรที่อัตราการไหลสูงสุด หรือที่เรียกว่าความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด เป็นต้น

4.2 แบบจำลองกระแสจราจรเบื้องต้น

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์เบื้องต้น เราสามารถเขียนสมการอย่างง่ายเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละคู่ได้ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-ความหนาแน่น (Speed and Density)

จากกราฟซ้ายบนของรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นจราจรสามารถแสดงอย่างง่ายเป็นแบบเส้นตรง (ซึ่งในความเป็นจริง อาจจะไม่ใช่เส้นตรงอย่างสมบูรณ์) ความสัมพันธ์สามารถแสดงได้โดยใช้สมการเส้นตรง

$$u = u_f - \left(\frac{u_f}{k_j} \right) k \quad (4-2)$$

จากสมการดังกล่าว แสดงว่าความเร็วสภาพการจราจรจะมีค่าเข้าใกล้ ความเร็วการไหลอิสระ (Free Flow Speed, u_f) เมื่อความหนาแน่นจราจรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่ความหนาแน่นจราจรเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วจราจรจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงจุดอัตราการไหลสูงสุด (q_m) เมื่อความหนาแน่นมีค่าเท่ากับความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด (k_j) และความเร็วมีค่าเท่ากับความเร็วที่เหมาะสมที่สุด (u_0) เมื่อความหนาแน่นจราจรยังคงสูงขึ้นต่อไปอีก ความเร็วจราจรก็จะลดลงต่อไป จนกระทั่งความหนาแน่นมีค่าเข้าใกล้ความหนาแน่นในสภาพติดขัด (k_c) ความเร็วก็จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ความสัมพันธ์ระหว่างการไหล-ความหนาแน่น (Flow and Density)

จากกราฟซ้ายล่างของรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างการไหลและความหนาแน่นจะมีรูปแบบเป็นโค้งคว่ำ ในการหาสมการแสดงความสัมพันธ์นั้น จะเริ่มจากสมการ 4-1 ซึ่งนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$q = uk \quad (4-3)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า อัตราการไหล จะเท่ากับผลคูณระหว่างความเร็วของสภาพการจราจร กับ ความหนาแน่นจราจรในขณะนั้น ตัวอย่างเช่น การสำรวจทางหลวงแห่งหนึ่งบนช่วงถนนระยะทาง 1 กิโลเมตร พบว่ามีความหนาแน่นจราจรเท่ากับ 3 คันต่อกิโลเมตร และความเร็วจราจรเท่ากับ 80 กม./ชม. ดังนั้น จะมีอัตราการไหลเท่ากับ $3 \times 80 = 240$ คัน/กม.

เมื่อแทนค่าความเร็ว (u) ในสมการ 4-3 ด้วยสมการ 4-2 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลกับความหนาแน่นในรูปพาราโบลา

$$q = u_f k - \left(\frac{u_f}{k_j} \right) k^2 \quad (4-4)$$

จากสมการดังกล่าว แสดงว่าเมื่อความหนาแน่นจราจรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ การไหลจราจรจะมีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์ด้วย ในขณะที่ความหนาแน่นจราจรเพิ่มสูงขึ้น การไหลจราจรจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดอัตราการไหลสูงสุด (q_m) ความหนาแน่นจะมีค่าเหมาะสมที่สุด (k_0) เมื่อความหนาแน่นจราจรยังคงสูงขึ้นต่อไป หลังจากผ่านจุดเหมาะสมที่สุดไปแล้ว พบว่าอัตราการไหลกลับค่อยๆ ลดต่ำลง จนกระทั่งความหนาแน่นมีค่าเข้าใกล้ความหนาแน่นในสภาพติดขัด (k_j) อัตราการไหลก็จะเข้าใกล้ศูนย์

ณ สภาพการจราจรที่มีความหนาแน่นจราจรเหมาะสมที่สุด ($k = k_0$) นั้น เป็นจุดสูงสุดของกราฟก่อนที่จะโค้งลง ความชันของกราฟกระแสจราจร ณ จุดดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $dq/dk = 0$ นั่นเอง ดังนั้นเมื่อหาอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสมการที่ 4-4 และแทนค่า ($k = k_0$) จะได้

$$0 = u_f - \left(\frac{u_f}{k_j} \right) 2k_0$$

$$k_0 = \frac{k_j}{2} \quad (4-5)$$

ซึ่งก็หมายความว่าความหนาแน่นจราจร ณ สภาพเหมาะสมที่สุด (k_0) มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นในสภาพติดขัด (k_j) อย่างไรก็ตาม โปรดจงสังเกตว่า คุณลักษณะนี้จะเป็นจริง ต่อเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นเป็นแบบเส้นตรงเท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-การไหลจราจร (Speed and Flow)

จากกราฟขบวนของรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความเร็วและการไหลจราจร จะมีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลา ในการหาสมการแสดงความสัมพันธ์นั้น ทำได้โดยแทนค่าความหนาแน่น (k) ในสมการ 4-2 ด้วยสมการ 4-3 ($k = q/u$) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับการไหลจราจร ได้ดังนี้

$$u = u_f - \left(\frac{u_f}{k_j} \right) \frac{q}{u} \quad (4-6)$$

แก้สมการหาค่า q ที่เป็นฟังก์ชันของ u ได้เท่ากับ

$$q = \frac{k_j}{u_f} (u_f u - u^2) \quad (4-7)$$

ส่วนโค้งด้านบนของกราฟจะแสดงสภาพการจราจรในสภาพจราจรคล่องตัว ส่วนโค้งด้านล่างของกราฟจะแสดงสภาพการจราจรในสภาพจราจรติดขัด สำหรับภายใต้สภาพจราจรคล่องตัวนั้น ความเร็วจราจรจะค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งมาถึงจุดอัตราการไหลสูงสุด (q_m) เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ว จะพบว่าความเร็วจะยังคงลดลงเรื่อยๆ และอัตราการไหลก็ค่อยๆ ลดลงด้วย จนกระทั่งมาถึงสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง

ณ สภาพการจราจรที่มีอัตราการไหลสูงสุด ($q = q_m$) นั้น ความเร็วจราจรจะมีค่าเท่ากับความเร็วที่เหมาะสมที่สุด ($u = u_0$) เมื่อแทนค่าทั้งสองลงในสมการ 4-7 จะได้

$$q_m = \frac{k_j}{u_f} (u_f u_0 - u_0^2)$$

เมื่อแทนค่า $q_m = u_0 k_0$ และค่า $k_j = 2 k_0$ ลงในสมการข้างบน ก็จะได้

$$u_0 k_0 = \frac{2k_0}{u_f} (u_f u_0 - u_0^2)$$

แก้สมการหาค่า u_0 จะได้

$$u_0 = \frac{u_f}{2} \quad (4-8)$$

นั่นคือ ความเร็วที่เหมาะสมที่สุด (u_0) จะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความเร็วการไหลอิสระ (u_f)

จากสมการ 4-5 และ 4-8 สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลสูงสุด (q_m) ได้ดังนี้

$$q_m = u_0 k_0$$

$$q_m = \left(\frac{u_f}{2}\right) \left(\frac{k_j}{2}\right)$$

$$q_m = \frac{u_f k_j}{4} \quad (4-9)$$

ทั้งนี้ จะต้องคำนึงเสมอว่า สมการ 4-5, 4-8 และ 4-9 นั้น พัฒนาจากสมมติฐานที่ว่า ความเร็วจราจรกับความหนาแน่นจราจรมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่ได้พัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1934 ต่อมาได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยคุณลักษณะกระแสจราจรอย่างกว้างขวาง และมีการนำเสนอแบบจำลองรูปแบบต่างๆ ที่สามารถอธิบายคุณลักษณะกระแสจราจร ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.3 แบบจำลองกระแสจราจรรูปแบบต่างๆ

ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา ได้มีผู้เสนอแบบจำลองอธิบายคุณลักษณะสภาพการไหลจราจรอยู่เป็นจำนวนมาก ในสมัยแรกแบบจำลองส่วนใหญ่จะเป็นแบบจำลองเดี่ยวที่สามารถอธิบายสภาพการจราจรตั้งแต่สภาพเบาบาง ไปจนถึงสภาพติดขัดหนาแน่น หรือที่เรียกว่า **Single-regime model** ในสมัยต่อมาได้เริ่มมีการคิดค้นพัฒนาแบบจำลองประเภท **multiregime** ขึ้นมา นั่นคือเป็น ชุดแบบจำลอง ที่ประกอบด้วยแบบจำลองมากกว่าหนึ่งตัว ส่วนใหญ่ นิยมประเภทที่มีแบบจำลองจำนวน 2 สมการ ตัวหนึ่งใช้สำหรับอธิบายสภาพการจราจรในช่วงสภาพจราจรเบาบาง และอีกตัวหนึ่งใช้สำหรับอธิบายสภาพการจราจรติดขัด

4.3.1 แบบจำลอง Single-regime

แบบจำลองประเภท **single-regime** อันแรก คิดค้น โดย Greenshields ในปี ค.ศ. 1934 จากการศึกษาสภาพการจราจรจากภาพถ่ายทางอากาศ Greenshields ได้สรุปว่าความเร็วและความหนาแน่นจราจรมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ซึ่งสมการต่างๆ ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อ 4.2 ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าว จำเป็นจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์สองตัว นั่นคือ ความเร็วการไหลอิสระ และความหนาแน่นในสภาพติดขัด เพื่อนำไปแทนค่าในสมการ ค่าความเร็วการไหลอิสระนี้ สามารถตรวจวัดได้ค่อนข้างง่ายจากท้องถนนจริง ซึ่งโดยปกติแล้ว จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างความเร็วจำกัด (speed limit) กับ ความเร็วที่ใช้ในการออกแบบถนน (design speed) แต่การตรวจวัดความหนาแน่นในสภาพติดขัด พบว่าค่อนข้างลำบาก ถนนและทางหลวงบางเส้นทาง จะไม่พบว่ามีสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่งเลยหรือเกิดขึ้นน้อยมาก เพราะปริมาณจราจรไม่สูงเพียงพอ อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นนี้ น่าจะอยู่ในช่วงระหว่าง 115 ถึง 155 คันต่อกิโลเมตรต่อช่องทาง นอกจากนี้ แบบจำลองนี้ยังมีปัญหาที่ความหนาแน่นเหมาะสมที่สุด (optimum density) ที่วิเคราะห์จากหัวข้อที่แล้วว่ามีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นในสภาพติดขัด แต่ที่วัดได้บนท้องถนนโดยส่วนใหญ่จะมีค่าระหว่าง 25 ถึง 45 คันต่อกิโลเมตรต่อช่องทาง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณโดยสมการค่อนข้างมาก

ต่อมา Greenberg ได้นำเสนอแบบจำลองประเภท single-regime ขึ้นมา ซึ่งจากการสำรวจสภาพการจราจรในอุโมงค์รถยนต์แห่งหนึ่ง ได้ข้อสรุปว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นไม่น่าจะเป็นแบบเส้นตรง Greenberg จึงได้ลองเสนอแบบจำลองที่ประยุกต์หลักการ Hydrodynamic ขึ้นมา ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$u = u_0 \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (4-10)$$

การประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Greenberg จำเป็นจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว นั่นคือ ความเร็วที่เหมาะสม (u_0) และความหนาแน่นในสภาพติดขัด (k_j) ดังที่กล่าวมาแล้วการตรวจวัดความหนาแน่นในสภาพติดขัดในสนามค่อนข้างมีปัญหา เพราะถนนบางเส้น ไม่เคยเกิดสภาพการจราจรติดขัดเลย หรือเกิดขึ้นน้อยมาก นอกจากนี้ ค่าความเร็วที่เหมาะสม จะตรวจวัดได้ยากกว่าการตรวจสอบความเร็วการไหลอิสระ (บางทีนิยมการประมาณการณ่ง่าย โดยกำหนดให้ความเร็วที่เหมาะสม มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความเร็วที่ใช้ในการออกแบบถนน) นอกจากนี้ แบบจำลองของ Greenberg ยังมีปัญหาที่จะคำนวณหาความเร็วการไหลอิสระได้เป็นอินฟินิตี้ ซึ่งไม่ถูกต้อง ต่อมา Edie ได้ค้นพบปัญหาเหล่านี้ จึงได้พัฒนาแบบจำลองประเภท multiregime โดยใช้แบบจำลองของ Greenberg อธิบายคุณลักษณะกระแสจราจรในสภาพติดขัด (ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป)

แบบจำลองประเภท Single-regime ลำดับที่สาม นำเสนอโดย Underwood จากการศึกษาในรัฐคอนเนคติกัต ในประเทศสหรัฐอเมริกา Underwood ได้สนใจวิเคราะห์สภาพการจราจรเบาบาง และค้นพบว่าแบบจำลองของ Greenberg มีปัญหาในการคำนวณหาความเร็วการไหลอิสระได้เป็นอินฟินิตี้ ซึ่งไม่ถูกต้อง จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นจราจรดังนี้

$$u = u_f e^{\left(\frac{k}{k_0}\right)} \quad (4-11)$$

จะเห็นได้ว่า การประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Underwood จำเป็นจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ความเร็วการไหลอิสระ (u_f) และความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด (k_0) ซึ่งดำเนินการตรวจวัดได้ค่อนข้างยาก ส่วนค่าความเร็วการไหลอิสระนั้น สามารถตรวจวัดได้ค่อนข้างง่าย ปัญหาของแบบจำลอง underwood นี้คือเมื่อนำมาวิเคราะห์แล้ว ค่าความเร็วจราจรจะไม่มีโอกาสที่จะเป็นศูนย์ ยกเว้นเมื่อความหนาแน่นในสภาพติดขัดจะมีค่าเป็นอินฟินิตี้ ซึ่งเมื่อ Edie ได้เห็นข้อจำกัดของแบบจำลอง Underwood นี้ จึงได้นำไปพัฒนาร่วมกับแบบจำลอง Greenberg จึงกลายเป็นแบบจำลองประเภท multiregime โดยใช้แบบจำลองของ Underwood ในการอธิบายคุณลักษณะกระแสจราจรในสภาพคล่องตัว

แบบจำลองประเภท single-regime ลำดับที่สี่ ได้คิดค้นโดยกลุ่มนักวิจัยของมหาวิทยาลัย Northwestern ซึ่งลงความเห็นไว้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นน่าจะเป็นรูปโค้งตัว S (หรือ S-curve) และควรมีรูปแบบสมการดังนี้

$$u = u_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2} \quad (4-12)$$

การประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Northwestern นี้จำเป็นจะต้องทราบข้อมูล ความเร็วการไหลอิสระ และความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งดังที่กล่าวมาแล้ว การตรวจวัดความหนาแน่นที่เหมาะสม ดำเนินการสำรวจค่อนข้างยาก ส่วนค่าความเร็วการไหลอิสระ สามารถตรวจวัดได้ค่อนข้างง่าย ข้อจำกัดของแบบจำลองนี้ คือเมื่อนำมาวิเคราะห์แล้ว ค่าความเร็วจราจรจะไม่มีโอกาสที่จะเป็นศูนย์ ยกเว้นเมื่อความหนาแน่นในสภาพติดขัดจะมีค่าเป็นอินฟินิตี้

การพัฒนาแบบจำลอง Single-regime ในลำดับต่อมาส่วนใหญ่เป็นการใส่พารามิเตอร์เพิ่มเข้ามาในแบบจำลองที่เสนอมานี้แล้ว เพื่อให้แบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลายๆ กรณี ตัวอย่างเช่น Drew ได้พัฒนาปรับปรุงแบบจำลองของ Greenshields โดยใส่พารามิเตอร์ n ดังนี้

$$u = u_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^{\frac{n+1}{2}} \right] \quad (4-13)$$

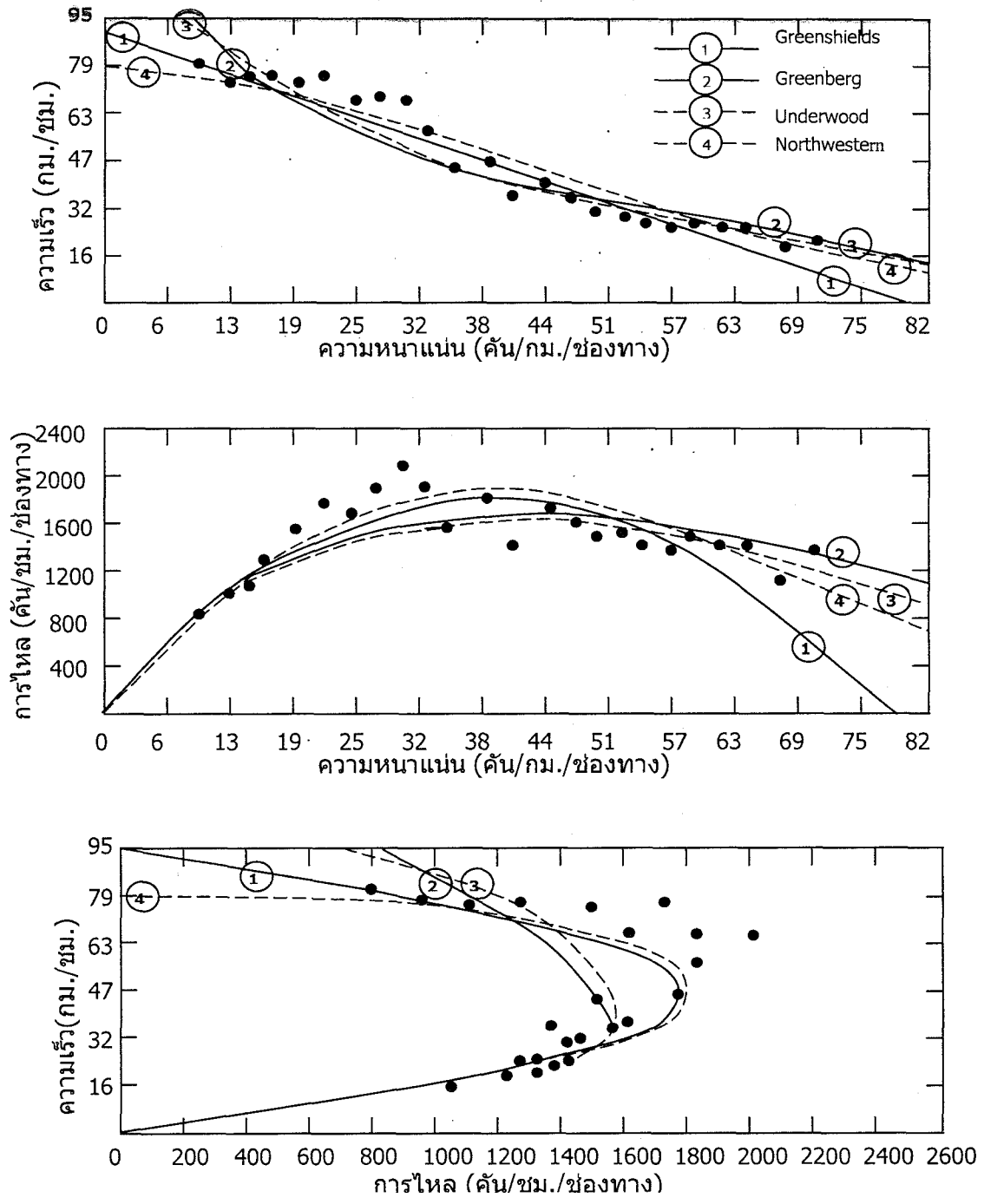
ซึ่งเมื่อกำหนดให้ n มีค่าเท่ากับ 1 ก็จะกลายเป็นแบบจำลองของ Greenshields อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการลองเปลี่ยนค่า n เป็นค่าต่างๆ แล้วก็จะได้แบบจำลองรูปแบบแตกต่างกันไป Drew ได้แนะนำให้ใช้ค่า n ที่มีค่าระหว่าง -1 ถึง +1 โดยถ้า $n = +1$ จะเรียกว่าแบบจำลองเส้นตรงของ Greenshields ถ้า $n = 0$ จะเรียกว่าแบบจำลองพาราโบลา และถ้า $n = -1$ ก็จะเรียกว่าแบบจำลอง Exponential

Pipes and Munjal ได้ใช้วิธีคล้ายกับ Drew โดยเพิ่มพารามิเตอร์เข้าในแบบจำลองเพื่อให้ใช้ได้กับหลายสถานการณ์มากยิ่งขึ้น และรูปแบบเป็นดังนี้

$$u = u_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^n \right] \quad (4-14)$$

ซึ่งถ้าแทนค่า $n = 1$ ลงในสมการ 4-14 ก็จะกลายเป็นแบบจำลองของ Greenshields

เมื่อนำแบบจำลองสี่ตัวแรกมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการอธิบายกระแสการไหลจราจร กับสภาพการจราจรที่สำรวจได้จริงในสนาม ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 ความสามารถอธิบายคุณลักษณะกระแสจราจรของแบบจำลอง single-regime

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ในช่วงความหนาแน่นต่ำ (จากศูนย์ถึง 32 คัน/กม./ช่องทาง) แบบจำลอง Greenberg และ Underwood จะประมาณค่าความเร็วจราจรเกินความจริง สำหรับในช่วงความหนาแน่นปานกลาง (ระหว่าง 32 คัน/กม./ช่องทาง ถึง 96 คัน/กม./ช่องทาง) แบบจำลองทั้งสองนี้จะคำนวณค่าความเร็วและอัตราการไหลที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากความจุจราจรของถนนจะเกิดขึ้นในช่วงความหนาแน่นดังกล่าว สำหรับในช่วงความหนาแน่นสูง (ระหว่าง 96 คัน/กม./ช่องทาง ถึง 144 คัน/กม./ช่องทาง) แบบจำลองทั้งสองก็สามารถจำลองกระแสจราจรได้ค่อนข้างดี ในช่วงความหนาแน่นสูงมาก (ตั้งแต่ 144 คัน/กม./ช่องทางขึ้นไป) แบบจำลอง Greenshields จะเริ่มให้ค่าผิดไปจากความเป็นจริง อัตราการไหล และความหนาแน่นจะมีค่าเข้าใกล้ ศูนย์

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง single-regime ต่างๆ

พารามิเตอร์การไหล	ช่วงข้อมูล	แบบจำลอง single-regime			
		Green-shields	Green-berg	Under-wood	North-western
การไหลสูงสุด (q_m)	1800-2000	1800	1565	1590	1810
ความเร็วการไหลอิสระ (u_f)	50-55	57	∞	75	49
ความเร็วที่เหมาะสม (u_o)	28-38	29	23	28	30
ความหนาแน่นติดขัด (k_j)	185-250	125	185	∞	∞
ความหนาแน่นที่เหมาะสม (k_o)	48-65	62	68	57	61
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	—	4.7	5.4	5.0	4.6

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบตัวแปรทางด้านจราจรจากการสำรวจจริงในสนาม กับข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองต่างๆ พบว่าแบบจำลองทุกประเภทจะวิเคราะห์ค่าอัตราการไหลสูงสุด ได้ต่ำกว่าค่าที่สำรวจได้จริงในสนาม โดยที่แบบจำลอง Greenberg และ Underwood จะให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริงมาก แบบจำลองของ Greenberg จะประมาณความเร็วเหมาะสมที่สุด (optimum speed) ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนแบบจำลอง Greenshields จะคำนวณความหนาแน่นในสภาพติดขัด (jam density) ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในขณะที่แบบจำลอง Underwood และ Northwestern จะวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นในสภาพติดขัดได้เท่ากับอินฟินิตี้ แบบจำลอง Greenberg จะประมาณค่าความหนาแน่นเหมาะสมที่สุด ได้สูงเกินความเป็นจริง จากการทดสอบความแปรปรวนพบว่าแบบจำลอง Northwestern จะมีความแปรปรวนน้อยที่สุด ส่วนแบบจำลอง Greenberg จะมีความแปรปรวนมากที่สุด

4.3.2 แบบจำลอง Multiregime

แบบจำลองประเภท multiregime อันแรก นำเสนอในปี ค.ศ. 1961 โดย Edie ซึ่งเป็นคนสังเกตเห็นว่าแบบจำลองประเภท single-regime ไม่สามารถอธิบายสภาพการจราจรตั้งแต่เบาจนถึงติดขัดหนาแน่นได้ถูกต้องทั้งหมด แบบจำลองที่ Edie เสนอคือการนำแบบจำลอง Underwood (สมการ 4-10) มาใช้อธิบายกระแสจราจรในช่วงสภาพการจราจรเบา และนำแบบจำลอง Greenberg (สมการ 4-11) มาใช้อธิบายคุณลักษณะของกระแสจราจรในช่วงสภาพการจราจรติดขัด

ต่อมา มหาวิทยาลัย Northwestern ก็ได้นำเสนอแบบจำลอง multiregime เพิ่มขึ้นอีกสามตัว ดังแสดงในรายการที่ 2 ถึง 4 ในตารางที่ 4.2 แบบจำลองอันแรก ที่มหาวิทยาลัย Northwestern นำเสนอคือ การใช้แบบจำลอง Greenfields (สมการ 4-2) มาใช้สำหรับทั้งสภาพการจราจรคล่องตัว และสภาพการจราจรติดขัดหนาแน่น แต่จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แตกต่างกัน แบบจำลองอันที่สอง เสนอให้ใช้แบบจำลองความเร็วคงที่ สำหรับสภาพการจราจรคล่องตัว และใช้แบบจำลอง Greenberg (สมการ 4.10) สำหรับสภาพการจราจรติดขัด ส่วนแบบจำลองอันสุดท้าย เสนอให้แบ่งช่วงวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงสภาพการจราจรเบา ช่วงสภาพการจราจรติดขัด และช่วงรอยต่อระหว่างสภาพการจราจรเบาและติดขัด ซึ่งจะมีแบบจำลองแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ปัญหาอย่างหนึ่งคือการแบ่งเขตสภาพการจราจรเบา กับสภาพจราจรหนาแน่น ซึ่งมหาวิทยาลัย Northwestern ได้ลองวิเคราะห์หาโดยใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ Quandt ผลการวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองทั้งสี่ประเภทได้แสดงในตารางที่ 4.2 ด้วย

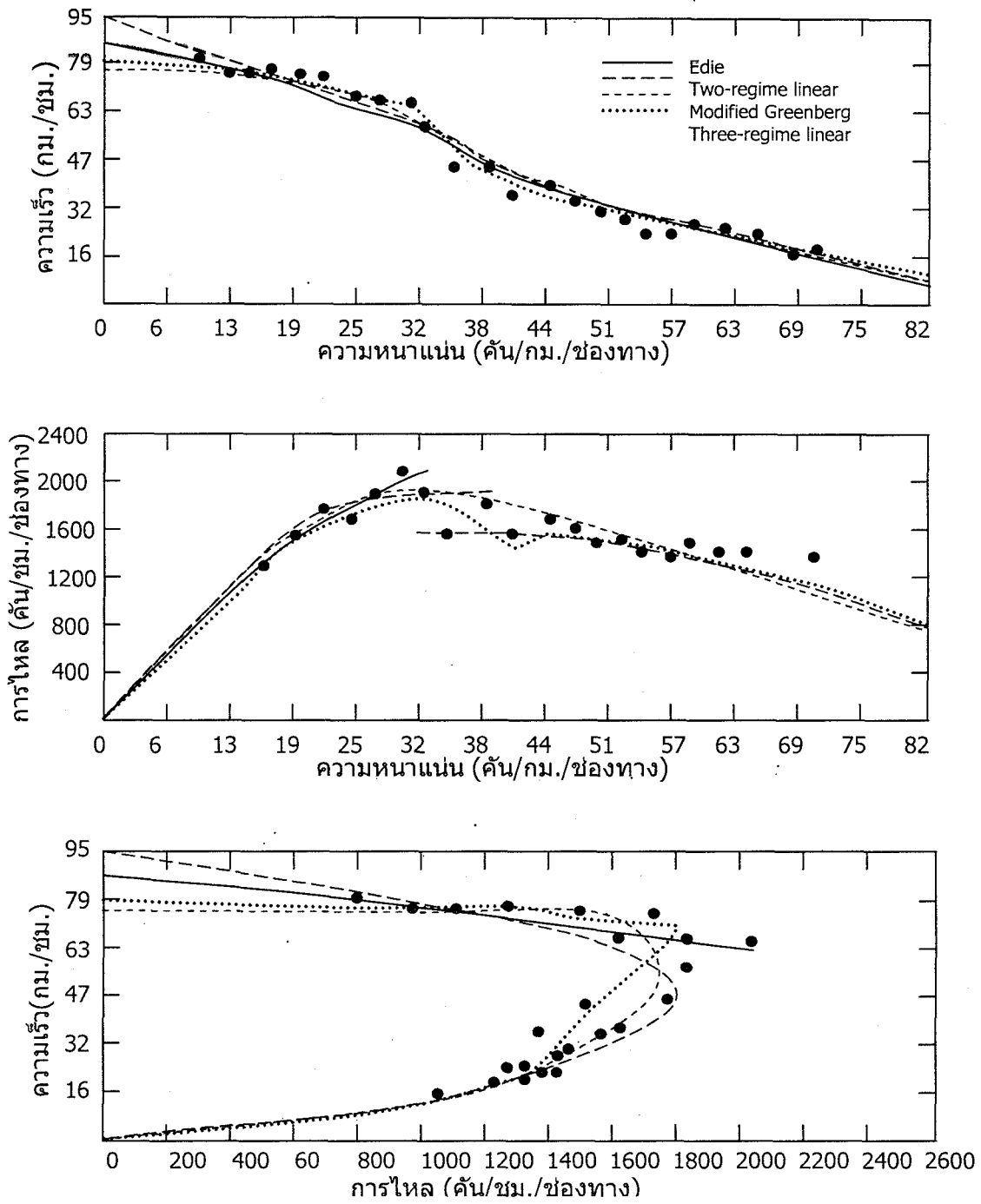
ตารางที่ 4.2 แบบจำลอง multiregime ประเภทต่างๆ

แบบจำลอง Multi-regime	สภาพการไหลอิสระ	สภาพระหว่างเปลี่ยนแปลง	สภาพการไหลติดขัด
Edie	$u = 54.9e^{-k/163.9}$ ($k \leq 50$)	—	$u = 26.8 \ln\left(\frac{162.5}{k}\right)$ ($k \leq 50$)
Two-regime linear	$u = 60.9 - 0.515k$ ($k \leq 65$)	—	$u = 40 - 0.265k$ ($k \leq 65$)
Modified Greenberg	$u = 48$ ($k \leq 35$)	—	$u = 32 \ln\left(\frac{145.5}{k}\right)$ ($k \leq 35$)
Three-regime linear	$u = 50 - 0.098k$ ($k \leq 40$)	$u = 81.4 - 0.913k$ ($40 \leq k \leq 65$)	$u = 40.0 - 0.265k$ ($k \leq 65$)

เมื่อนำแบบจำลอง multiregime ทั้งสี่ตัวมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการอธิบายกระแสการไหลจราจร กับสภาพการจราจรที่สำรวจได้จริงในสนาม ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง multiregime ต่างๆ

พารามิเตอร์การไหล	ช่วงข้อมูล	แบบจำลอง Multi-Regime			
		Edie	Two-Regime Linear	Modified Greenberg	Three-Regime Linear
การไหลสูงสุด (q_m)	1850-2000	2052	1800	1760	1815
ความเร็วการไหลอิสระ (u_f)	50-55	55	61	48	50
ความเร็วที่เหมาะสม (u_o)	28-38	40	30	33	41
ความหนาแน่นติดขัด (k_j)	185-250	162	151	146	151
ความหนาแน่นที่เหมาะสม (k_o)	48-65	50	59	54	45
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	—	3.6	4.2	3.9	3.6



รูปที่ 4.4 ความสามารถอธิบายคุณลักษณะกระแสจราจรของแบบจำลอง multiregime

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง multiregime ทำนายคุณสมบัติกระแสจราจรได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ดีกว่าแบบจำลอง single-regime ทุกตัว ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบตัวแปรทางด้านจราจรจากการสำรวจจริงในสนาม กับข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง multiregime ต่างๆ พบว่าแบบจำลอง Edie จะให้ค่าอัตราการไหลสูงสุด เกินกว่าที่สำรวจได้จริง แต่แบบจำลองอีกสามตัวที่นำเสนอโดยมหาวิทยาลัย Northwestern จะวิเคราะห์ค่าอัตราการไหลสูงสุด ได้ต่ำกว่าค่าที่สำรวจได้จริงในสนาม แบบจำลองประเภทเส้นตรง (ลำดับที่สองในตารางที่ 4.2) ที่เสนอโดย Northwestern จะประมาณความเร็วการไหลอิสระ (free-flow speed) ได้เกินกว่าความเป็นจริง ส่วนแบบจำลอง Modified Greenshields (ลำดับที่สามในตารางที่ 4.2) จะคำนวณความเร็วการไหลอิสระ (free-flow speed) ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง แบบจำลอง multiregime ทั้งสี่ จะคำนวณค่าความเร็วที่เหมาะสมที่สุด (optimum speed) ได้เกินจากค่าที่สำรวจได้จริงเล็กน้อย แต่จะคำนวณความหนาแน่นในสภาพติดขัด (jam density) ได้ต่ำกว่าความเป็นจริงมาก จากการทดสอบความแปรปรวนพบว่าแบบจำลอง multiregime จะมีระดับความแปรปรวนน้อยกว่าแบบจำลองประเภท single-regime โดยที่แบบจำลอง Edie และแบบจำลอง 3 ช่วง (ลำดับสุดท้ายในตารางที่ 4.2) จะมีความแปรปรวนน้อยที่สุด

4.4 แบบจำลองแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า

แบบจำลองแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า มีความสำคัญในการวางแผน ออกแบบ และควบคุมทางเดินเท้าที่มีปริมาณการเดินเท้าสูง เช่นที่หอประชุม โรงหนัง สนามแข่งกีฬา หรือจะเป็นสถานขนส่งมวลชนขนาดใหญ่เองก็ตาม พฤติกรรมเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า จะมีคล้ายคลึงกับกระแสจราจรบนท้องถนน แต่จะมีความแตกต่างหลักอยู่ 2 ประการ คือ ตัวเลขแสดงคุณลักษณะการไหล และการใช้ความกว้างของทางเท้า ในการกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ ตัวเลขแสดงคุณลักษณะการไหลของคนเดินเท้า ไม่ว่าจะในพื้นที่ครอบคลุมต่อหน่วย ระยะห่างระหว่างคนเดินเท้า ความเร็วการเดิน ต่างๆ เหล่านี้ จะมีค่าน้อยกว่าคุณลักษณะของกระแสจราจร อีกกรณีหนึ่งคือในขณะที่ถนนจะมีการแบ่งขอบเขตของจราจรอย่างชัดเจน ทางเท้าจะไม่มีกำหนดช่องทาง และสภาพการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามแต่ละช่วงเวลา และปริมาณความต้องการการเดินเท้าในขณะนั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคนเดินเท้านั้น จะต้องมีการกำหนดตัวแปร และหน่วยต่างๆ (ซึ่งจะแตกต่างไปจากสภาพการจราจรของขบวนยานบ้าง) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สำหรับกระแสจราจรของขบวนกับกระแสการเคลื่อนตัวของคนเดินเท้า

คุณลักษณะของการไหล	หน่วยวัด	
	กระแสจราจร	กระแสการเดินเท้า
การไหล	คัน/ชม/ช่องทาง (q)	คน/นาที/ความกว้างทาง เท้า 1 เมตร (v)
ความเร็ว	กม/ชม (u)	ม./นาที (s)
ความหนาแน่น	คัน/กม/ช่องทาง (k)	คน/ตร.ม. (D)
พื้นที่	ระยะเมตร/คัน (สำหรับแต่ ละช่องทาง) (h_d)	ตร.ม./คน (M)

การไหลของคนเดินเท้า (pedestrian flow) จะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่าง ความเร็วและความหนาแน่น ดังสมการ

$$v = S \times D \quad (4-15)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของคนบนทางเท้า (คน/ตร.ม.) ตำรวจจริงในสนามได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้ พื้นที่ (Space, M) ซึ่งก็คือส่วนกลับของค่าความหนาแน่น มาใช้แทน ดังสมการ

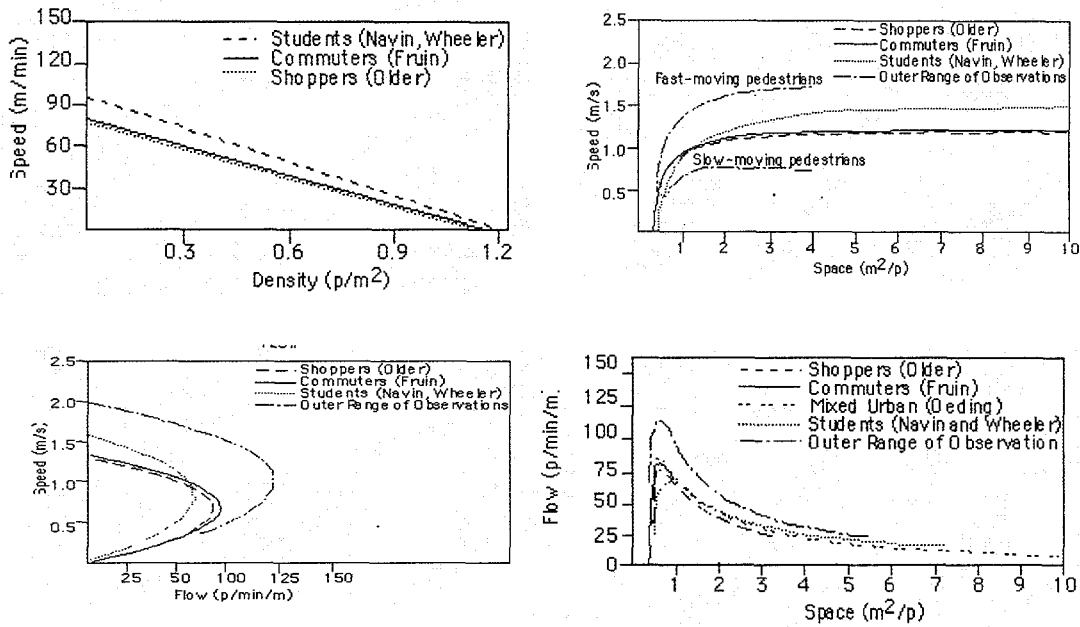
$$v = \frac{S}{M} \quad (4-16)$$

โดยที่ v = การไหล (คน/นาที/ความกว้างทางเท้า 1 เมตร)

S = ความเร็ว (เมตร/วินาที)

M = พื้นที่ (ตร.ม./คน)

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคนเดินเท้าโดยส่วนใหญ่ จะใช้สมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นจะเป็นแบบเส้นตรง แต่จะใช้สมการเส้นตรงสำหรับกลุ่มคนต่างๆ แตกต่างกันไป ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-ความหนาแน่น ความเร็ว-พื้นที่ การไหล-พื้นที่ และความเร็ว-การไหล ที่สำรวจได้ และเป็นตัวอย่างอ้างอิงใน Highway Capacity Manual 2000 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความจุการเดินเท้ามีค่าเท่ากับ 100 คน/นาที/ความกว้างทางเท้า 1 เมตร สำหรับการเดินเท้าไปทำงาน หรือไปจับจ่ายซื้อของ ส่วนกลุ่มนักเรียนจะมีความจุการเดินเท้าน้อยกว่า หรือประมาณ 65-70 คน/นาที/ความกว้างทางเท้า 1 เมตร



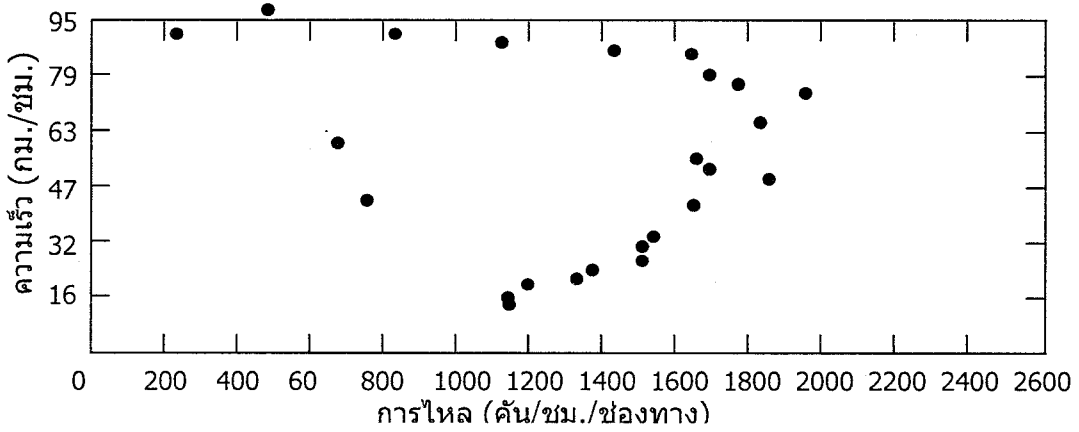
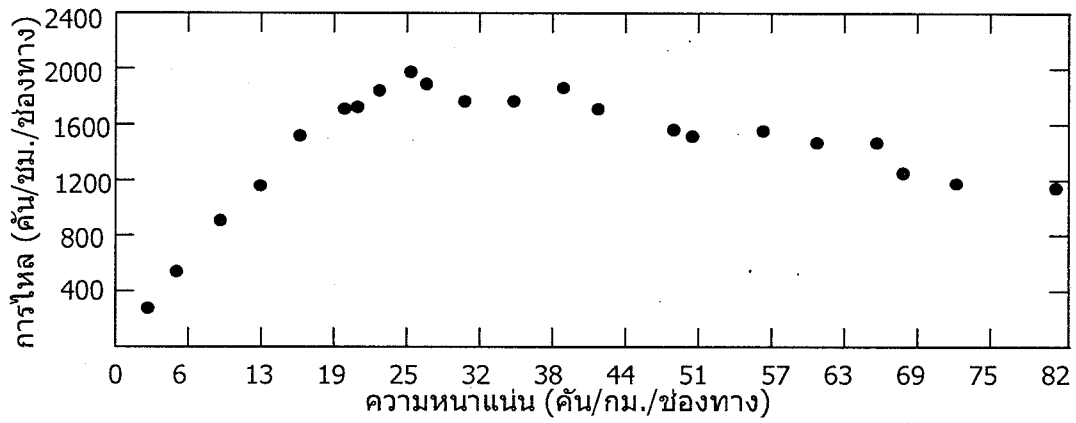
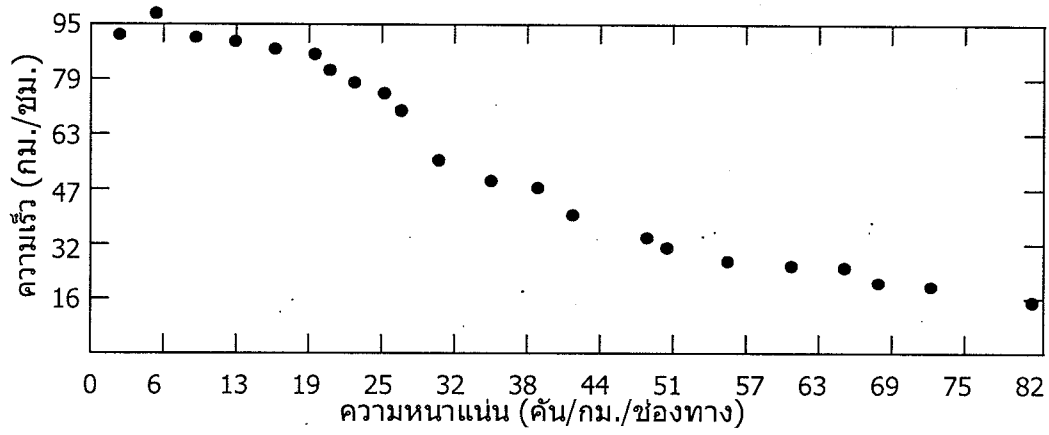
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของคนเดินเท้า

ที่มา: Highway Capacity Manual, 2000.

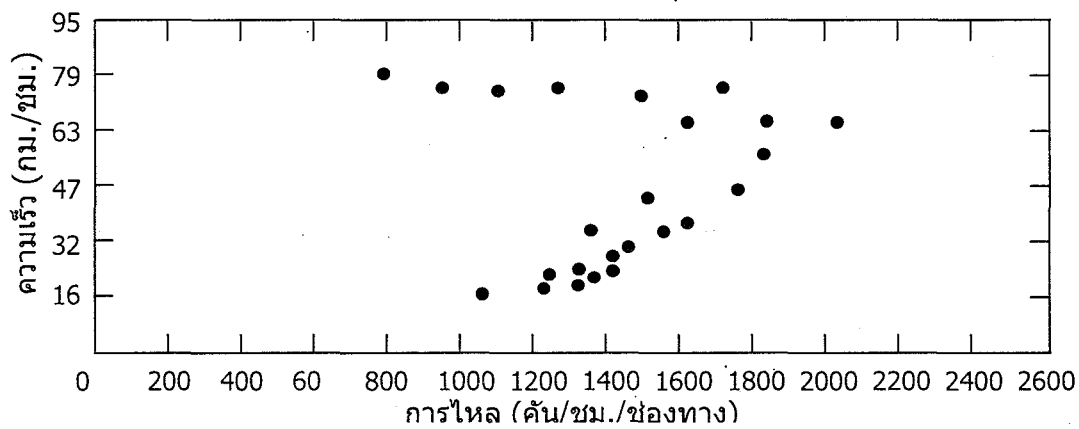
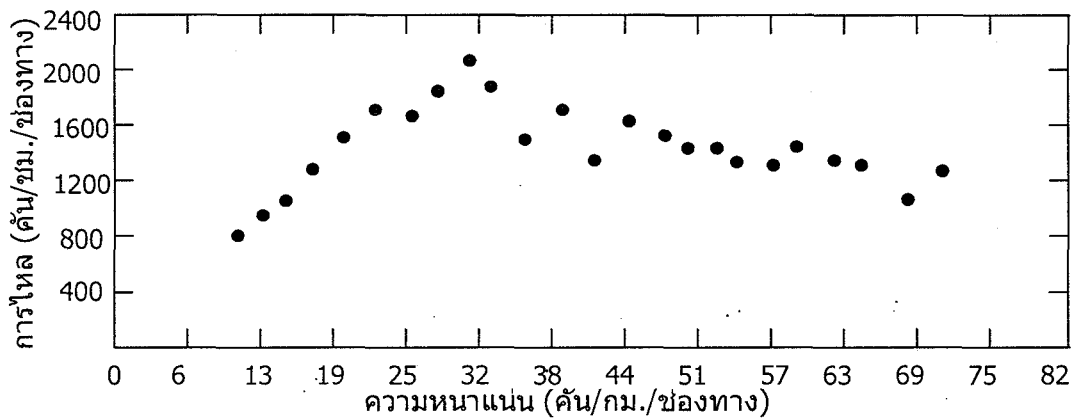
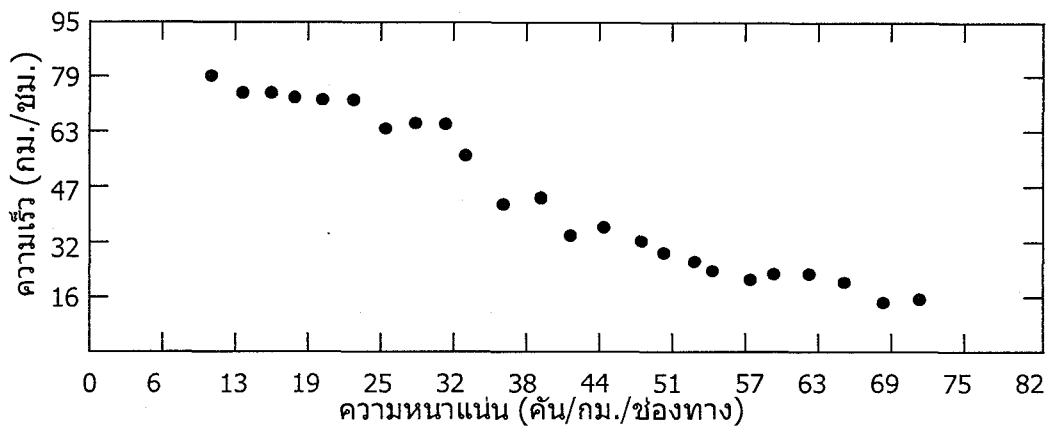
ปัจจุบัน ได้มีการศึกษาวิจัยมากมายที่มุ่งเน้นการพัฒนาและการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของคนเดินเท้า ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการเดินเท้าเช่นความกว้างทางเดิน ความชัน และคุณลักษณะของคนเดินเท้า

แบบฝึกหัด

1. จากข้อมูลคุณลักษณะกระแสรถราที่สำรวจได้บนถนนสองสาย ที่กำหนดให้ด้านล่าง <Figure 10.3 และ 10.4 of AD May>
 - a. จงอธิบายความเหมือนและความแตกต่างระหว่างคุณลักษณะกระแสรถราบนถนนทั้งสอง
 - b. หาค่าตัวแปรด้านจราจรต่างๆ อันประกอบด้วย u_p, u_o, k_o, k_j และ q_m ของถนนทั้งสองสาย



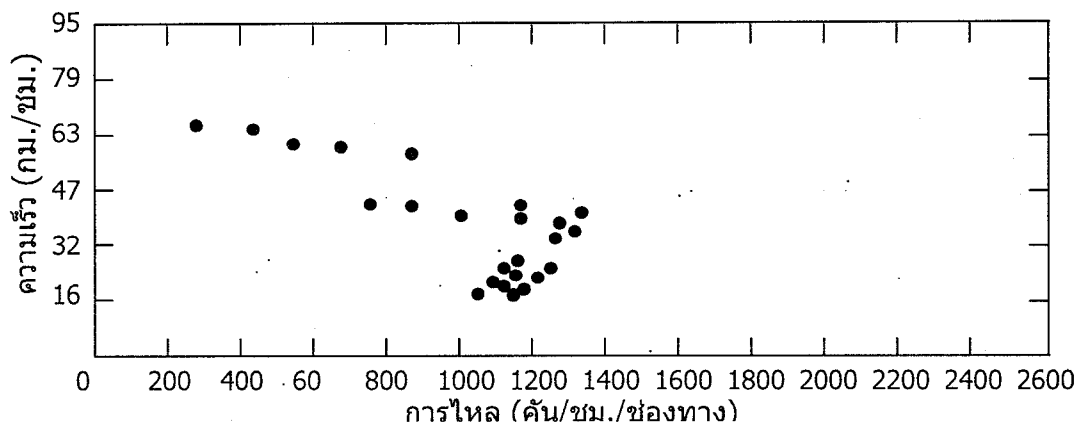
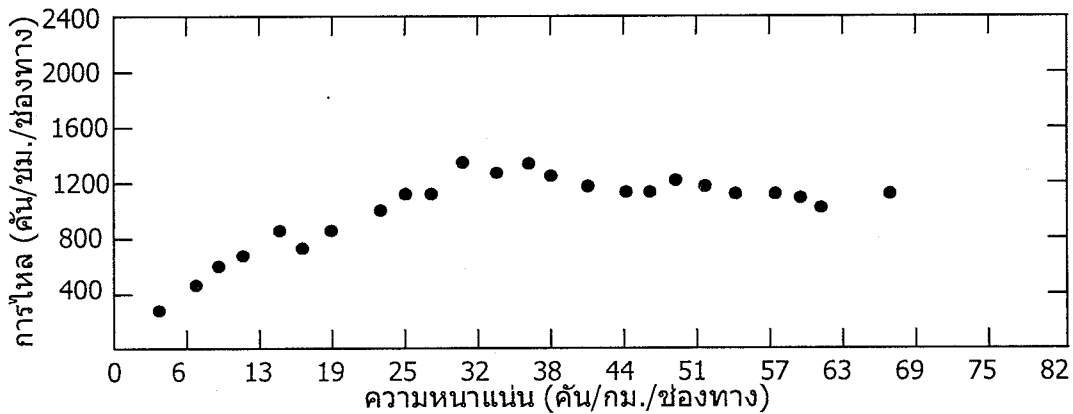
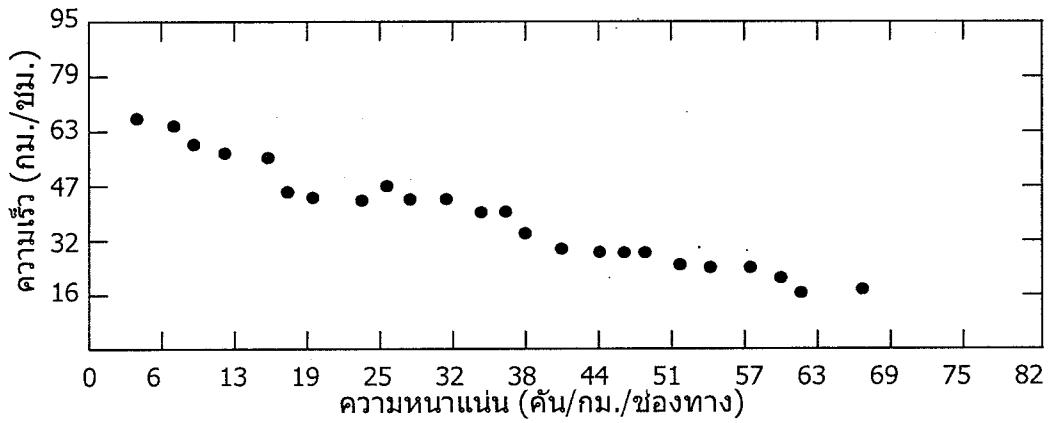
ข้อมูลการไหลที่สำรวจได้จากทางด่วนพิเศษแห่งหนึ่ง



ข้อมูลการไหลที่สำรวจได้จากทางหลวงแห่งหนึ่ง (ความเร็วจำกัด 80 กม/ชม)

2. ข้อมูลคุณลักษณะกระแสจราจรที่กำหนดให้ <Figure 10.5 of AD May> เป็นข้อมูลที่สำรวจได้จาก
กระแสจราจรในอุโมงค์แห่งหนึ่ง

- a. จงวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ด้านจราจรต่างๆ ของกระแสจราจรนี้ ประกอบด้วย n_p , n_o , k_o , k_j
และ q_m
- b. สมมติว่าความเร็วจราจรกับความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง จงลากเส้นกราฟ
อธิบายคุณลักษณะกระแสจราจรบนกราฟทั้งสาม



3. จากข้อมูลคุณลักษณะกระแสจราจรที่กำหนดให้ในข้อ 2 และค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากข้อ 2 a)
 - a. จงแทนค่าเพื่อหาแบบจำลอง Greenfield, Greenberg, Underwood และ Northwestern
 - b. จง plot แบบจำลองทั้งสองลงบนกราฟ (คล้ายกับการ plot ใน รูปที่ 4.3)
 - c. จงวิเคราะห์ว่าแบบจำลองตัวแต่ละตัว สามารถแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลจริงได้ดีที่สุด

4. จากข้อมูลในข้อ 2 และ 3 จงวิเคราะห์หา
 - a. อัตราส่วนระหว่าง optimum speed กับ free-flow speed
 - b. อัตราส่วนระหว่าง optimum density กับ jam density
 สำหรับแบบจำลองทั้งสองนี้ หนึ่งค่าเหล่านี้สามารถนำไปใช้ช่วยในการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูลที่สำรวจมาได้

5. กำหนดให้กระแสจราจรบนถนนสายหนึ่ง มีความเร็วที่เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 40 ไมล์/ชม. และความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 50 คัน/ไมล์/ช่องทาง
 - a. จงแทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ลงในแบบจำลอง Greenfield, Greenberg, Underwood และ Northwestern
 - b. จง plot แบบจำลองทั้งสองลงบนกราฟ (คล้ายกับการ plot ใน รูปที่ 4.3)

บรรณานุกรม

1. Adolf D May
2. HCM
3. B.D. Greenshields, A Study in Highway Capacity, Highway Research Board, Proceedings, Vol. 14, 1935, p. 458.
4. H. Greenberg, An Analysis of Traffic Flow, Operations Research, Vol. 7, 1959, pp. 78-85.
5. J.S. Drake, J.L. Schofer, and A.D. May Jr., A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses, in Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Proceedings, Elsevier North Holland, Inc., New York, 1967.
6. R.T. Underwood, Speed, Volume and Density Relationships. Quality and Theory of Traffic Flow, Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven, Conn., 1961, pp. 141-188.
7. Donald R. Drew, Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968, Chapter 12.

8. L.A. Pipes, Car-Following Models and the Fundamental Diagram of Road Traffic, *Transportation Research*, Vol. 1, No. 1, 1967, pp. 21-29.

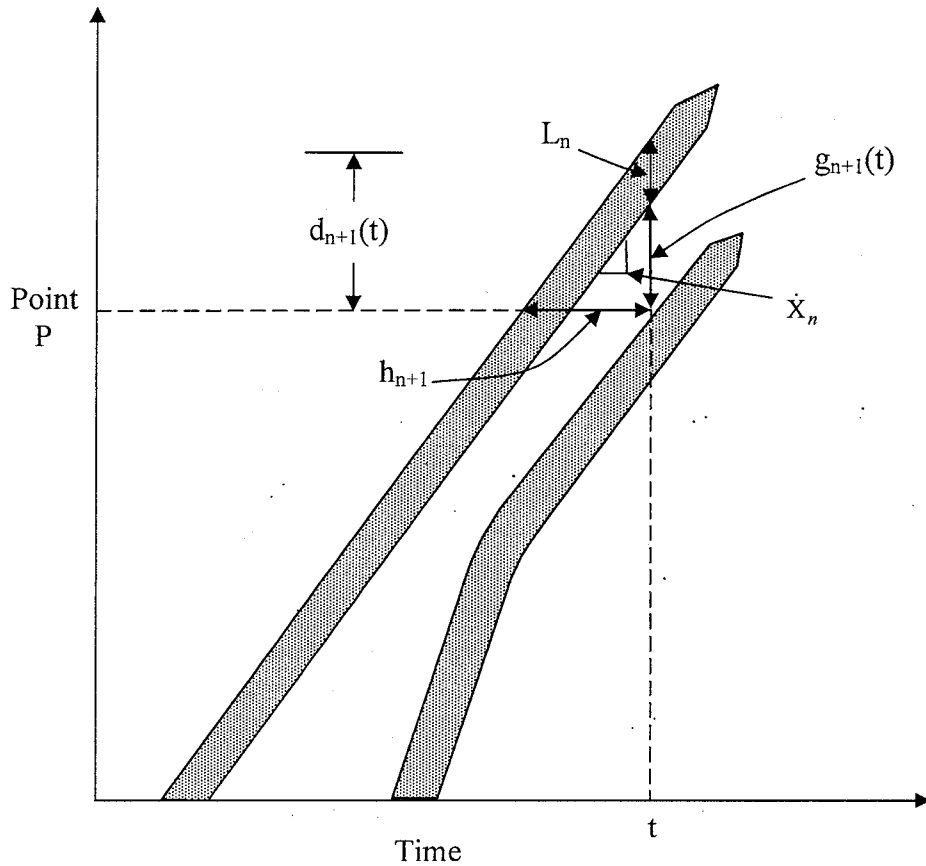
บทที่ 5 ทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกัน

ในกระแสจราจร ยวดยานแต่ละคันจะขับเคลื่อนร่วมกับยวดยานคันอื่นบนท้องถนน โดยเว้นระยะห่างจากยวดยานคันหน้าตามความเหมาะสม เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนได้อย่างปลอดภัย เมื่อรถยนต์คันหน้าชะลอตัวหรือหยุดรถ ผู้ขับขี่ก็สามารถชะลอหรือหยุดรถได้ทันทั่วทั้งที่ก่อนที่จะชน ทั้งนี้ ระยะห่างระหว่างยวดยานนี้ จะขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน เช่นความเร็วของยวดยาน สภาพความพร้อมของยวดยานและผู้ขับขี่ ทักษะวิสัย เป็นต้น

ระยะห่างระหว่างยวดยาน (spacing) ในทางวิศวกรรมจราจร นำมาใช้เป็นตัวชี้วัดระดับการให้บริการของท้องถนน ในสภาพการจราจรคล่องตัวนั้น ยวดยานแต่ละคันจะมีระยะห่างระหว่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากมียวดยานน้อย ยวดยานแต่ละคัน สามารถขับเคลื่อนได้โดยสะดวก สามารถใช้ความเร็วที่ต้องการได้เต็มที่ หรือสามารถเปลี่ยนช่องทางได้ตามใจชอบ ซึ่งสภาพดังกล่าวถือว่าเป็นระดับการให้บริการดี เมื่อมียวดยานในกระแสจราจรมากยิ่งขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างยวดยานค่อยๆ ลดลง ผู้ขับขี่จะต้องใช้ความตั้งใจในการขับขี่มากยิ่งขึ้น ยวดยานแต่ละคันไม่สามารถขับเคลื่อนตามที่ต้องการหรือไม่สามารถเปลี่ยนช่องทางได้สะดวกนัก ซึ่งแสดงถึงสภาพการจราจรหนาแน่น สำหรับสภาพการจราจรติดขัด จนเกิดแถวคอยนั้น จะพบว่ายวดยานแต่ละคันในแถวคอยจะมีระยะห่างระหว่างกันน้อยมาก อาจจะเว้นระยะเพียง 50 ซม. ถึง 1 เมตรระหว่างยวดยาน สภาพการณ์นี้ การให้บริการของท้องถนน ถือว่าเป็นระดับที่แย่ที่สุด ยวดยานแต่ละคันต่างหยุดนิ่ง ความเร็วจราจรเท่ากับศูนย์ อัตราการไหลก็เป็นที่ศูนย์ ในขณะที่ความหนาแน่นมีค่าสูงที่สุด หรือที่เรียกว่า ความหนาแน่นขณะติดขัดหยุดนิ่ง (jam density)

5.1 คุณลักษณะของระยะห่างระหว่างยวดยาน

ในทางวิศวกรรมจราจร ระยะห่างระหว่างยวดยาน (spacing) คือระยะระหว่างยวดยานสองคันที่ขับเคลื่อนตามกันในแนวทิศทางการเคลื่อนที่ โดยการวัดจะต้องวัดจากจุดอ้างอิงเดียวกันบนยวดยาน ตัวอย่างเช่น วัดระยะทางจากกันชนหน้าของยวดยานคันหนึ่ง ไปยังกันชนหน้าของยวดยานคันที่ตามลงมา หรืออาจจะอ้างอิงจากเพลาล้อหน้า เพลาล้อหลัง หรือกันชนหลังก็ได้ แต่ยวดยานทั้งสอง จะต้องวัดจากจุดอ้างอิงเดียวกัน (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.2 ตัวแปรทางด้านจราจรแบบมหภาค) จะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างยวดยานนั้น จะประกอบด้วย 2 องค์ประกอบย่อย ได้แก่ ความยาวของยวดยานคันหน้า และระยะห่างกันชน (วัดจากกันชนหลังของยวดยานคันหน้า กับกันชนหน้าของยวดยานคันที่ตามมา) (gap) ดังแสดงใน รูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 คุณลักษณะของระยะห่างระหว่างยานสองคัน .

ระยะห่างระหว่างยาน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$d_{n+1}(t) = L_n + g_{n+1}(t) \quad (5-1)$$

โดยที่ $d_{n+1}(t)$ – ระยะห่างของยาน n+1 ณ เวลา t (เมตร)

L_n – ความยาวของยาน n (เมตร)

$g_{n+1}(t)$ – ช่องว่างระหว่างยาน n และ n+1 ณ เวลา t (เมตร)

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าจะมีตัวแปรสองตัวที่สามารถใช้แสดงระยะระหว่างยาน ได้แก่ ระยะห่างระหว่างยาน (spacing) และระยะระหว่างกันชน (Gap) ในทางวิศวกรรมจราจร มักจะนิยมใช้ค่าระยะห่างระหว่างยาน ในการวิเคราะห์ที่คำนวณมากกว่าระยะระหว่างกันชน ทั้งนี้ เพราะค่าระยะห่างระหว่างยาน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับตัวแปรกระแสรวมมหภาคที่สำคัญที่สุดอันหนึ่ง คือ ความหนาแน่นจราจร (density)

เมื่อดำเนินการสำรวจข้อมูลระยะห่างระหว่างขบวนรถหลายๆ คู่ในกระแสรถจร และมาทำการหารเฉลี่ยปกติ ก็จะได้ตัวแปรที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างขบวนรถในกระแสรถจร ดังสมการ

$$\bar{d} = \frac{\sum_{n=1}^N d_n}{N} \quad (5-2)$$

โดยที่ d_n - ระยะห่างระหว่างขบวนรถแต่ละคู่ (เมตร)
 N - จำนวนข้อมูลที่ทำการศึกษา

ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นจราจร ดังสมการ

$$k = \frac{1000}{\bar{d}} \quad (5.3)$$

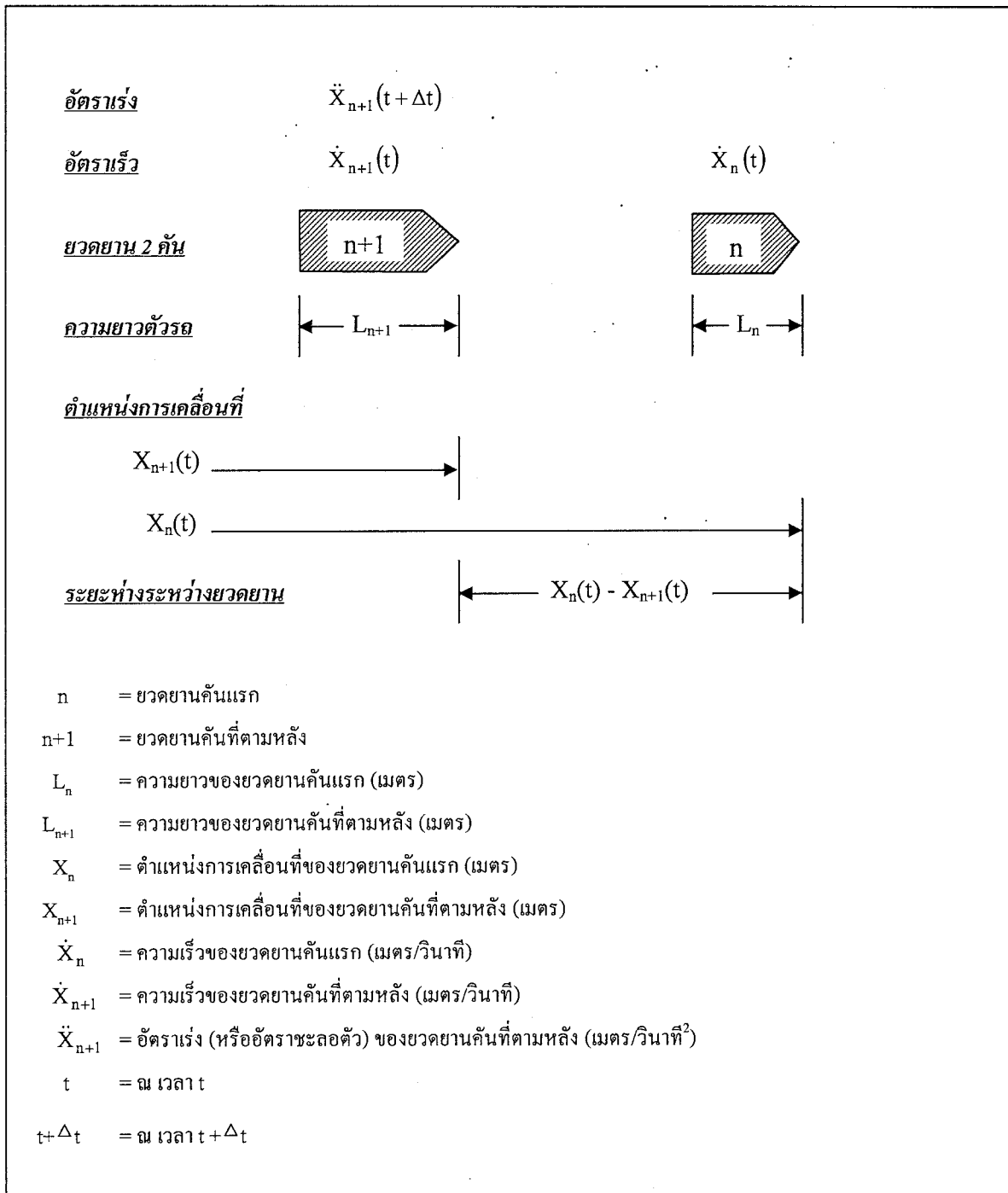
โดยที่ k - ความหนาแน่นจราจร (คัน/กม.)
 $1,000$ - ค่าคงที่สำหรับแปลงหน่วยระยะทางจากเมตรเป็นกิโลเมตร
 \bar{d} - ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างขบวนรถ ในกระแสรถจร (เมตร/คัน)

5.2 ทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกัน

ทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกัน (Car Following Theory) ของขบวนรถ เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการขับเคลื่อนของขบวนรถคู่หนึ่งที่ขับตามกันมา ทฤษฎีเหล่านี้ ได้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1950 และได้มีนักวิจัยหลายๆ ท่านได้นำเสนอทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกันของขบวนรถต่างๆ กันอยู่พอสมควร ในบทเรียนนี้ จะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่น่าสนใจ 3 ทฤษฎี ได้แก่ Pipes, Forbes และ General Motor

5.2.1 คำจำกัดความและสัญลักษณ์ต่างๆ

คำจำกัดความและสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกันของขบวนรถ แสดงใน รูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 คำจำกัดความและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกัน

รูปที่ 5.2 แสดงขบวนรถสองคันที่ขับเคลื่อนตามกันมา โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา ขบวนรถ n เป็นขบวนรถคันหน้า มีความยาวขบวนรถเท่ากับ L_n ในขณะที่ขบวนรถ $n+1$ ขับเคลื่อนตามหลังมา มีความยาวขบวนรถเท่ากับ L_{n+1} ตำแหน่งระยะทาง ความเร็ว และอัตราเร่ง แสดงโดยใช้สัญลักษณ์ x (เมตร) \dot{x} (เมตร/วินาที) \ddot{x} (เมตร/วินาที²) ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงมีการเติมท้ายด้วย t อนึ่ง ภาพดังกล่าวมีข้อสังเกตดังนี้

1. อัตราเร่ง (อัตราชะลอตัว) ของยวดยานคันหลัง \dot{x}_{n+1} จะถือว่าเกิดขึ้นที่เวลา $t + \Delta t$ ทั้งนี้ เพราะยวดยานคันที่ตามหลัง จะใช้เวลาในการแสดงปฏิกิริยาตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของยวดยานคันหน้า
2. ระยะห่างระหว่างยวดยานทั้งสอง จะแสดงโดยใช้สัญลักษณ์ $[x_n(t) - x_{n+1}(t)]$
3. ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างยวดยานทั้งสอง จะแสดงโดยใช้สัญลักษณ์ $[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$ ซึ่ง ถ้าความเร็วสัมพัทธ์ มีเครื่องหมายเป็นบวก ก็หมายความว่ายวดยานคันแรก มีความเร็วสูงกว่ายวดยานคันที่ตามหลัง ดังนั้น ระยะห่างระหว่างยวดยานทั้งสองจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในกรณีที่ความเร็วสัมพัทธ์มีเครื่องหมายเป็นลบ จะแสดงว่ายวดยานคันแรก มีความเร็วต่ำกว่ายวดยานคันที่ตามหลังมา ดังนั้น ระยะห่างระหว่างยวดยานทั้งสอง จะค่อยๆ ลดลง
4. อัตราเร่งของยวดยานคันที่ตามหลัง จะแสดงโดยใช้สัญลักษณ์ $[\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]$ ซึ่งถ้ามีเครื่องหมายบวก แสดงว่ายวดยานคันหลังกำลังเร่งความเร็วขึ้น ในขณะที่เป็นลบ จะแสดงว่ายวดยานคันหลังกำลังชะลอความเร็วลง

5.2.2 ทฤษฎีของ Pipes

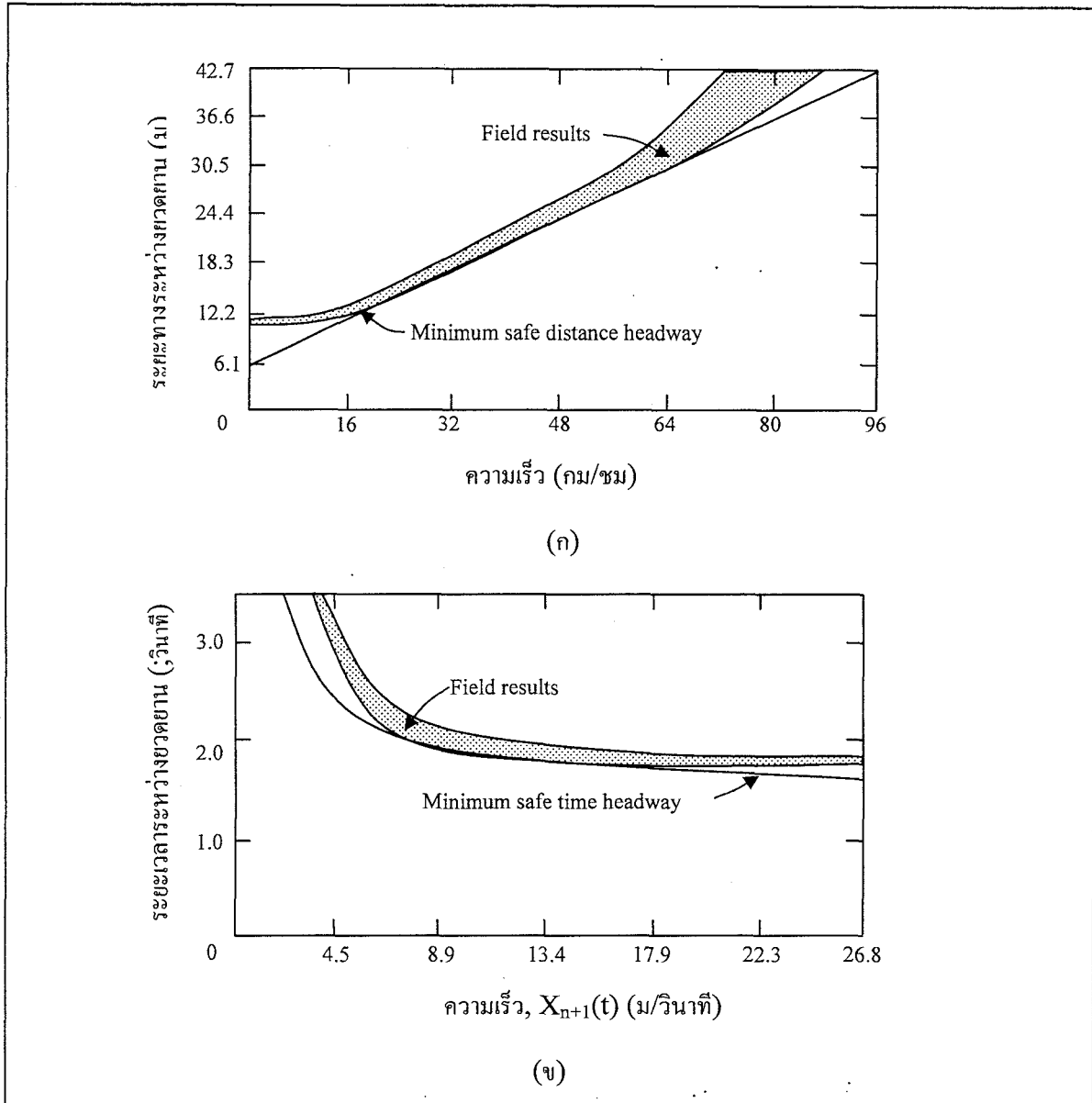
ทฤษฎีของ Pipes ได้อธิบายการเคลื่อนตัวของยวดยานในกระแสจราจร ตามกฎการขับขี่ของรัฐแคลิฟอร์เนีย (California Motor Vehicle Code) ซึ่ง ได้บัญญัติไว้ว่า “หลังง่ายๆ ในการขับขี่ยวดยานบนท้องถนน ก็คือ การเว้นระยะห่างจากยวดยานคันหน้า จะต้องไม่น้อยกว่าความยาวหนึ่งคันรถ สำหรับความเร็วทุกๆ 16 กม./ชม.” (Pipes 1953) นั่นคือ ถ้าขับรถด้วยความเร็วเท่ากับ 32 กม./ชม. ให้เว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (gap) เป็นระยะทางเท่ากับ สองเท่าของความยาวตัวรถ หรือ ถ้าขับรถด้วยความเร็วเท่ากับ 80 กม./ชม. ให้เว้นระยะห่างจากรถคันหน้าเท่ากับ ห้าเท่าของความยาวตัวรถ เป็นต้น จากข้อบัญญัติดังกล่าว สามารถเขียนสมการของระยะห่างระหว่างตัวรถ ให้เป็นฟังก์ชันของความเร็วรถยนต์ได้ดังนี้

$$d_{MIN} = [x_n(t) - x_{n+1}(t)]_{MIN} = L_n \left[\frac{(3.6)\dot{x}_{n+1}(t)}{(16)} \right] + L_n \quad (5-4)$$

สมมติว่า ยวดยานแต่ละคันมีความยาวตัวรถเฉลี่ย ประมาณ 6 เมตร ดังนั้น สมการ 5.4 สามารถจะเป็น

$$d_{MIN} = [x_n(t) - x_{n+1}(t)]_{MIN} = 1.35[\dot{x}_{n+1}(t)] + 6 \quad (5-5)$$

จากสมการดังกล่าว สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างยวดยานที่ปลอดภัย (safe spacing) สำหรับความเร็วต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ค่าระยะห่างระหว่างขบวนน้อยที่สุด จากทฤษฎีของ Pipes

ระยะเวลาระหว่างขบวน (Headway) คือระยะเวลาระหว่างขบวนสองคันที่เคลื่อนตัวผ่าน ณ จุดๆ หนึ่ง ซึ่งสามารถวัดจากจุดอ้างอิงใดๆ บนรถก็ได้ แต่จะต้องเป็นจุดเดียวกันบนรถทั้งสอง ระยะเวลาระหว่างขบวนมีหน่วยเป็นวินาที ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางระหว่างขบวน และระยะเวลาระหว่างขบวนเป็นดังสมการ (5-6)

$$d_{n+1} = h_{n+1}(\dot{x}_{n+1}) \quad (5-6)$$

โดยที่ d_{n+1} - ระยะห่างระหว่างขบวนแต่ละคู่ (เมตร)
 h_{n+1} - ระยะเวลาระหว่างขบวนแต่ละคู่ (วินาที)
 \dot{x}_{n+1} - ความเร็วของขบวน n+1 (เมตร/วินาที)

จากสมการ (5-4) และ (5-6) สามารถหาสมการคำนวณระยะเวลาระหว่างขบวนที่ปลอดภัยได้ ดังนี้

$$h_{MIN} = 1.35 + \frac{6}{[\dot{x}_{n+1}(t)]} \quad (5-7)$$

จากสมการดังกล่าว ก็สามารถคำนวณระยะเวลาระหว่างขบวนที่ปลอดภัย (safe spacing) สำหรับความเร็วต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ข

ทฤษฎีของ Pipes แสดงให้เห็นว่า ระยะทางระหว่างขบวนที่ปลอดภัยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเร็วของขบวน ส่วนระยะเวลาระหว่างขบวนที่ปลอดภัย มีความแปรผกผันกับความเร็วของขบวน และจะมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 1.36 วินาที เมื่อความเร็วของขบวนเพิ่มสูงขึ้นไปสู่ อินฟินิตี้ (∞)

ในรูปที่ 5.3 ได้แสดงข้อมูลระยะห่าง และระยะเวลาระหว่างขบวนที่สำรวจได้จริงในสนาม เป็นแถบแรงเงาเพื่อเปรียบเทียบกับสมการขับเคลื่อนตามกันของ Pipes พบว่า ทั้งค่าระยะห่างระหว่างขบวน (ภาพ 5.3 ก) และค่าระยะเวลาระหว่างขบวน (ภาพ 5.3 ข) ทฤษฎีของ Pipes สามารถอธิบายการขับเคลื่อนตามกันได้ค่อนข้างดี ในช่วงความเร็วระหว่าง 24 กม./ชม. กับ 56 กม./ชม. จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากสมการจะใกล้เคียงกับข้อมูลที่สำรวจได้จริงในสนามในช่วงดังกล่าว โดยมีค่าต่ำกว่าค่าที่สำรวจได้จริงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีของ Pipes จะไม่สามารถอธิบายการขับเคลื่อนตามกันได้ถูกต้องนักในช่วงความเร็วต่ำกว่า 24 กม./ชม. และช่วงความเร็วสูงกว่า 56 กม./ชม.

ในการสมมติว่าขบวนแต่ละคันมีความยาวตัวรถ เพิ่มขึ้นเป็น 6.3 ถึง 6.6 เมตร พบว่าทฤษฎีของ Pipes จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าทฤษฎี Pipes เป็นทฤษฎีที่มีหลักการง่าย ๆ แต่จะเห็นได้ว่าสามารถอธิบายการขับเคลื่อนตามกันของขบวนได้ค่อนข้างดี

5.2.3 ทฤษฎีของ Forbes

ทฤษฎีของ Forbes ได้อธิบายการขับเคลื่อนตามกันของขบวนในกระแสรางจร โดยคำนึงถึงระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนอง (reaction time) ของผู้ขับขี่ขบวนคันที่ตามหลัง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการรับรู้ถึงเหตุการณ์เบื้องหน้า และตัดสินใจชะลอขบวนพาหนะ จนกระทั่งเริ่มต้นเหยียบเบรคเพื่อชะลอรถยนต์ (Forbes *et al* 1958, Forbes 1963, Forbes and Simson, 1968) ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่ จำเป็นจะต้องเว้นช่องว่างอย่างเพียงพอ ให้ระยะเวลาระหว่างขบวน (Headway) จะต้องไม่น้อยกว่าระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนองเสมอ ดังนั้น ระยะเวลาระหว่างขบวนที่ขับเคลื่อนตามกันที่น้อยที่สุด จะต้องเท่ากับผลรวมระหว่างระยะเวลา

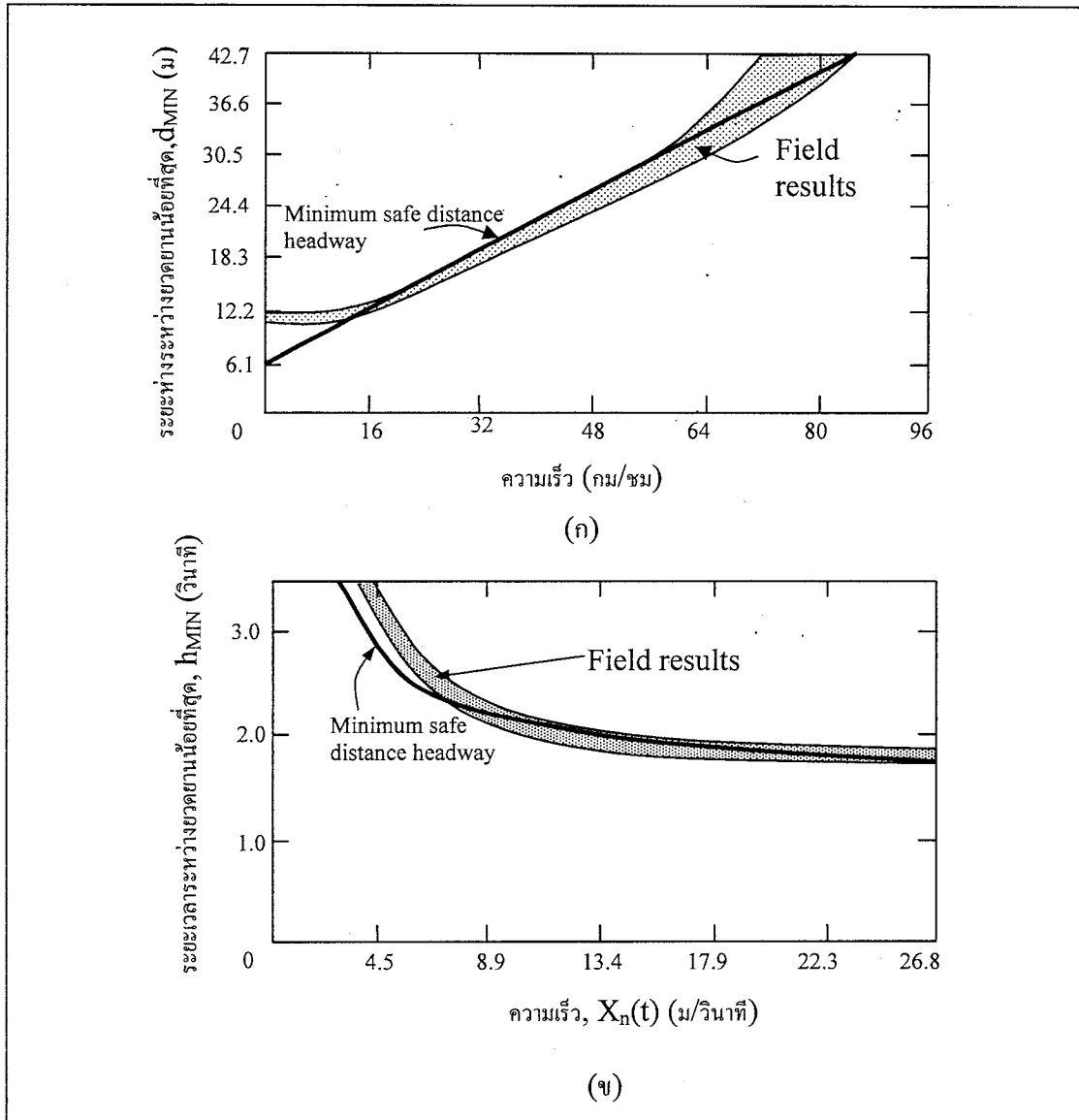
ปฏิกิริยาตอบสนอง กับเวลาที่ขดขานคั่นหน้าเคลื่อนที่เป็นระยะเท่ากับความยาวตัวรถ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$h_{MIN} = \Delta t + \frac{L_n}{[\dot{x}_n(t)]} \quad (5-8)$$

Forbes ได้ทำการสำรวจข้อมูลระยะเวลาระหว่างขดขานที่ขับเคลื่อนตามกัน พบว่าข้อมูลมีความแปรผันสูงมาก ขึ้นอยู่กับผู้ขับขี่และพื้นที่สำรวจ ระยะเวลาระหว่างขดขานแปรอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 วินาที สมมติว่าระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนองเท่ากับ 1.5 วินาที และขดขานแต่ละคันมีความยาวตัวรถเท่ากับ 6 เมตร สมการ (5-8) สามารถเขียนได้เป็น

$$h_{MIN} = 1.5 + \frac{6}{[\dot{x}_n(t)]} \quad (5-9)$$

จากสมการดังกล่าว สามารถนำไปวาดเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ปลอดภัย สำหรับความเร็วระดับต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ค่าระยะห่างระหว่างขบวนน้อยที่สุด จากทฤษฎีของ Forbes

จากสมการ (5-9) สามารถแปลงเป็นสมการหาค่าระยะห่างระหว่างขบวนที่ปลอดภัย ได้ดังนี้

$$d_{MIN} = 1.5[\dot{x}_n(t)] + 6 \tag{5-10}$$

สมการ (5-10) สามารถนำไปหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางระหว่างขบวนที่ปลอดภัย สำหรับความเร็วระดับต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ก

จะเห็น ได้จากรูปที่ 5.4 ว่า ทฤษฎีของ Forbes ได้อธิบายการขับเคลื่อนตามกันของขบวนไว้คล้ายกับ ทฤษฎีของ Pipes นั่นคือ ระยะห่างระหว่างขบวนที่ขับเคลื่อนตามกัน จะเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วที่มากขึ้น เมื่อ เปรียบเทียบกับข้อมูลระยะห่างระหว่างขบวนที่สำรวจ ได้จริงในสนาม พบว่า ทฤษฎีของ Forbes สามารถอธิบาย

การขับเคลื่อนตามกันของขบวนการได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเร็วจาก 16 กม./ชม. ถึง 64 กม./ชม. อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีของ Forbes ก็ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้อย่างถูกต้องมากนักในช่วงความเร็วต่ำมาก ๆ หรือที่ความเร็วสูงมาก ๆ (เช่นเดียวกับทฤษฎีของ Pipes)

5.2.4 ทฤษฎีของ General Motors

กลุ่มนักวิจัยของ General Motors ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการขับเคลื่อนตามกันอย่างละเอียด และได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นมา 5 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะมีแนวคิดพื้นฐานเหมือนกันดังนี้

การตอบสนอง = $f(\text{ความอ่อนไหว, สิ่งกระตุ้น})$

การตอบสนอง (response) จะแสดงอยู่ในรูปของอัตราเร่งความเร็ว (หรืออัตราชะลอความเร็ว) ของขบวนการคันที่ตามหลัง หรือ $[\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]$ สิ่งกระตุ้น (stimuli) แสดงในรูปของความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างขบวนการสองคันที่ขับเคลื่อนตามกันมา หรือ $[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$ ส่วนความอ่อนไหว (sensitivity) นั้น จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปในแต่ละทฤษฎี

แบบจำลองแรก สมมติว่าความอ่อนไหวมีค่าคงที่ จะมีรูปแบบสมการต่อไปนี้

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \alpha[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (5-11)$$

ซึ่งสิ่งกระตุ้น $[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$ สามารถมีเครื่องหมายเป็นบวก ลบ หรือศูนย์ก็ได้ ซึ่งแสดงถึงสภาพการเร่งความเร็ว การชะลอความเร็ว และการใช้ความเร็วคงที่ ตามลำดับ นั่นคือ

$$\text{ถ้า } \dot{x}_n(t) > \dot{x}_{n+1}(t) \text{ แล้ว } \ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) \text{ จะมีเครื่องหมายเป็นบวก} \quad (5-12)$$

$$\text{ถ้า } \dot{x}_n(t) < \dot{x}_{n+1}(t) \text{ แล้ว } \ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) \text{ จะมีเครื่องหมายเป็นลบ} \quad (5-13)$$

$$\text{ถ้า } \dot{x}_n(t) = \dot{x}_{n+1}(t) \text{ แล้ว } \ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) \text{ จะมีเครื่องหมายเป็นบวก} \quad (5-14)$$

นักวิจัยของ General Motor ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลในสภาวะการขับขี่จริง เพื่อวิเคราะห์หาค่าตัวแทนที่เหมาะสม สำหรับค่า ระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนอง (Δt) และความอ่อนไหว (α) ในการทดลองนั้น นักวิจัยทำการติดตั้งเชือกพร้อมรถ เชื่อมระหว่างรถยนต์ทั้งสองคัน ผู้ขับขี่รถยนต์คันแรก ทำการขับขบวนการตามรูปแบบการขับขี่ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ส่วนผู้ขับขี่รถยนต์ที่ตามหลังมา จะไม่ทราบถึงรูปแบบการขับขี่ที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า มีหน้าที่ขับขบวนการตามหลังขบวนการคันแรก โดยให้เว้นระยะห่างอย่างปลอดภัยตลอดการขับขี่ ตารางที่ 5.1 สรุปค่าระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนอง (Δt) และความอ่อนไหว (α) ที่สำรวจได้จากผลการทดลอง อนึ่ง ค่าความอ่อนไหว มีหน่วยเป็น 1/วินาที

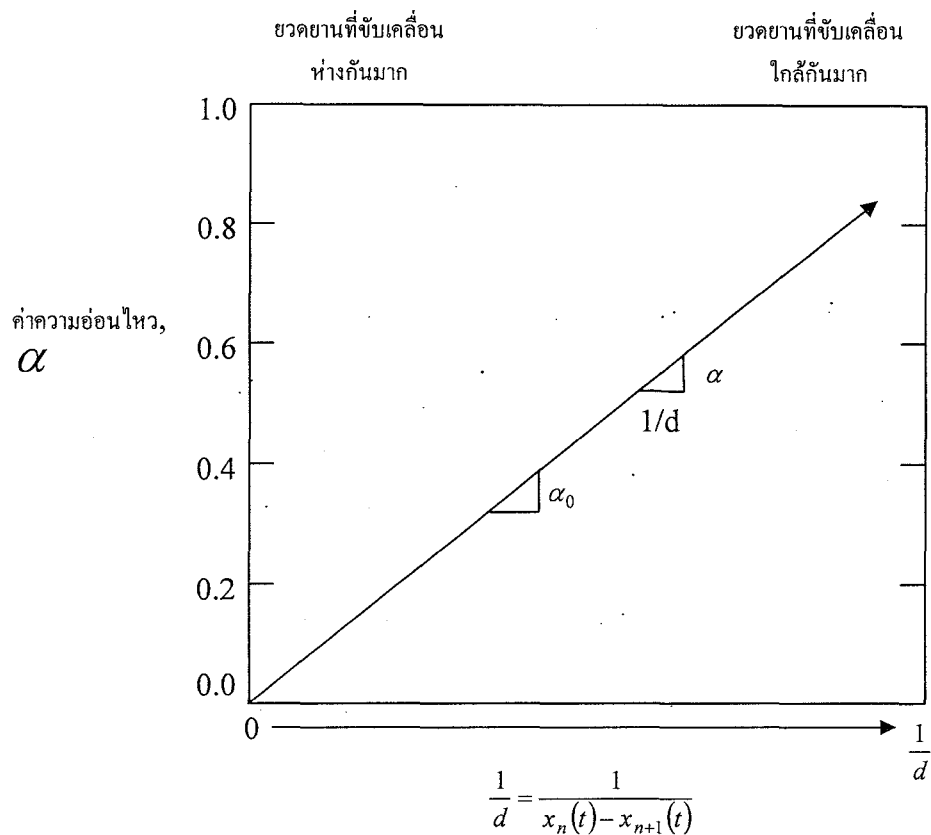
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง General Motors ชุดแรก

ค่าพารามิเตอร์	ระยะเวลาปฏิกริยาตอบสนอง (Δt) (วินาที)	ความอ่อนไหว (α) (1/วินาที)
ค่าต่ำสุด	1.0	0.17
ค่าเฉลี่ย	1.55	0.37
ค่าสูงสุด	2.2	0.74

จากการทดลอง พบว่าค่าความอ่อนไหวมีความแปรผันมาก (อยู่ในช่วงระหว่าง 0.17 ถึง 0.74) ส่งผลให้นักวิจัยได้นำค่า ระยะห่างระหว่างขดขาน มาใช้อธิบายค่าความอ่อนไหว จึงได้แบบจำลอง General Motors ชุดที่สอง ซึ่งจะกำหนดให้ค่าความอ่อนไหว มีสองสถานะ นั่นคือ ในกรณีที่ขดขานสองคันเคลื่อนตัวใกล้กัน ก็ควรจะใช้ค่าอ่อนไหวค่าหนึ่ง α_1 ส่วนในกรณีที่ขดขานสองคันมีระยะห่างค่อนข้างมาก ก็จะใช้ค่าอ่อนไหวอีกค่าหนึ่ง คือ α_2 ดังนั้น แบบจำลองของ General Motors ชุดที่สอง จะมีรูปแบบดังนี้

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \{\alpha_1 \text{ or } \alpha_2\} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (5-15)$$

อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองดังกล่าว พบว่ามีปัญหาในการเลือกค่าความอ่อนไหวทั้งสอง และปัญหาความไม่ต่อเนื่อง ณ สถานะที่กำลังเปลี่ยนแปลงจากค่าความอ่อนไหวหนึ่งไปยังค่าความอ่อนไหวอีกตัวหนึ่ง ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองชุดที่ 3 ขึ้น โดยกำหนดให้ ค่าความอ่อนไหวเป็นฟังก์ชันแปรผกผันของระยะห่างระหว่างขดขาน จากการทดลองพบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความอ่อนไหวและอัตราส่วนผกผันของระยะห่างระหว่างขดขาน มีรูปแบบเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ค่าความอ่อนไหว เป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างขบวนการ ในแบบจำลองของ General Motors

ความชันของเส้นตรงที่แสดงในรูปที่ 5.5 ก็คือค่าความอ่อนไหว α_0 ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง α_0 , d และ α เป็นดังนี้

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{1/d} = \alpha d \tag{5-16}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{d} = \frac{\alpha_0}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} \tag{5-17}$$

ดังนั้น แทนค่า α จากสมการ (5-17) ในสมการ (5-11) ก็จะได้รูปแบบจำลองการเคลื่อนตัวตามกันชุดที่สามของ General Motors ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha_0}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \tag{5-18}$$

จะเห็นได้ว่าค่าความอ่อนไหว α จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ α_0 และ ระยะห่างระหว่างยวดยาน $[x_n(t) - x_{n+1}(t)]$ ในขณะที่ยวดยานสองคันเคลื่อนตัวเข้าใกล้กัน ค่าความอ่อนไหวจะปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือผู้ขับขี่คันที่ตามหลังมาจะต้องเพิ่มความระมัดระวังในการขับขี่ ดันตัวอยู่ตลอดเวลา และจะต้องปฏิบัติกริยาตอบสนองในระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น ในขณะที่ยวดยานสองคันเคลื่อนตัวห่างกันมาก ค่าความอ่อนไหวจะน้อยลง นั่นคือผู้ขับขี่คันที่ตามหลังมาจะไม่ต้องใช้ความระมัดระวังในการขับขี่มากนัก และมีระยะเวลาในการปฏิบัติกริยาตอบสนองค่อนข้างนาน อนึ่งค่าคงที่ α_0 จะมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที ตารางที่ 5.2 สรุปค่าระยะเวลา ปฏิกริยาตอบสนอง (Δt) และค่าความอ่อนไหว (α) สำหรับแบบจำลอง General Motors ลำดับที่ 3 ที่สำรวจได้จากกรทดลอง

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง General Motors ชุดที่สาม

ค่าพารามิเตอร์	ระยะเวลาปฏิกริยาตอบสนอง (Δt) (วินาที)	ความอ่อนไหว (α_0) (เมตร/วินาที)
สนามทดลองของ General Motors	1.5	12.3
อุโมงค์ฮอลแลนด์	1.4	8.2
อุโมงค์ลินคอร์น	1.2	9.1

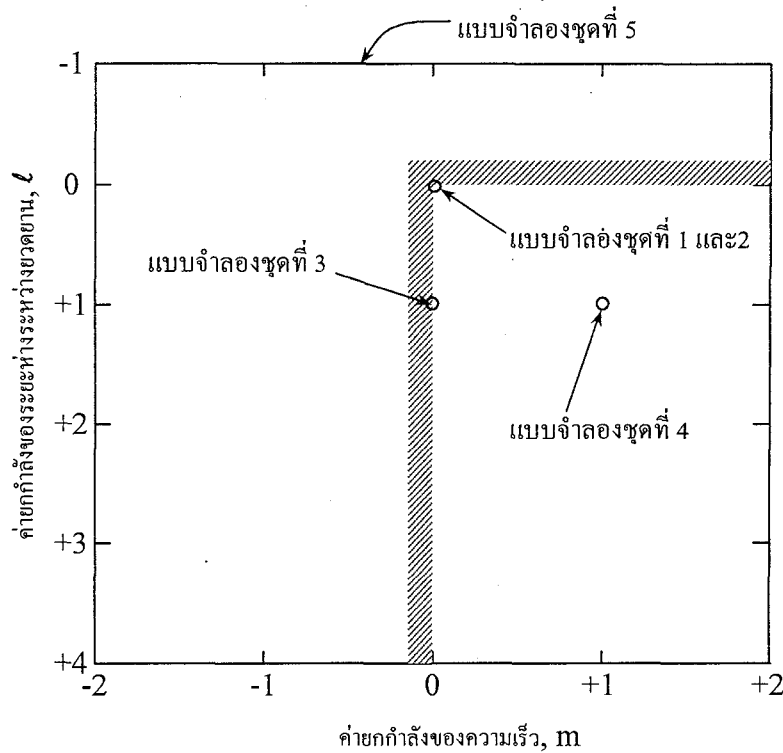
สำหรับแบบจำลองของ General Motors ชุดที่ 4 นั้น ได้มีการนำความเร็วของยวดยานคันที่ตามหลังเข้ามาเป็นตัวแปรหนึ่งของความอ่อนไหวด้วย ทั้งนี้เพราะในสถานการณ์จริงนั้น ถ้าความเร็วของยวดยานเพิ่มขึ้น ผู้ขับขี่จะต้องเพิ่มความระมัดระวังในการขับขี่มากยิ่งขึ้น ดังนั้น ค่าความอ่อนไหวควรจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น ค่าความอ่อนไหว จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสามตัว ได้แก่ ค่าคงที่ α' , ระยะห่างระหว่างยวดยาน $[x_n(t) - x_{n+1}(t)]$ และความเร็วของยวดยานคันที่ตามหลัง $[\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]$ แบบจำลองชุดที่ 4 จะมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha' [\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (5-19)$$

สำหรับแบบจำลองชุดที่ห้าของ General Motors นั้น ได้มีการพยายามทำให้แบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้ในเหตุการณ์ต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น นั่นคือ มีการใส่เลขยกกำลังให้แก่ ค่าระยะห่างระหว่างยวดยาน $[x_n(t) - x_{n+1}(t)]$ และความเร็วของยวดยานคันที่ตามหลัง $[\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]$ ซึ่งการใส่เลขยกกำลังนี้ สามารถปรับปรุงให้แบบจำลอง สามารถอธิบายพฤติกรรมกรขับขี่ได้ถูกต้อง และหลากหลายมากยิ่งขึ้น ดังนั้นแบบจำลองชุดที่ 5 มีรูปแบบดังนี้

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha_{l,m} [\dot{x}_{n+1}(t + \Delta t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (5-20)$$

ซึ่งแบบจำลอง (5-20) เป็นแบบจำลองสุดท้ายของแบบจำลองตระกูล General Motors ทั้งนี้ โปรดสังเกตว่าแบบจำลองอื่นๆ ทั้งสี่ชุดเบื้องต้น ต่างก็เป็นกรณีพิเศษของแบบจำลองชุดที่ห้านี้ทั้งนั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.6 แกนแนวราบแสดงค่ายกกำลังของความเร็ว (m) ในขณะที่แกนแนวตั้งเป็นค่ายกกำลังของระยะห่างระหว่างขดขานทั้งสอง (l) แบบจำลองที่หนึ่ง และสองก็จะแสดงโดยจุดที่มีค่า m และ l เท่ากับศูนย์ ขณะที่แบบจำลองที่สามและที่สี่ แสดงโดยจุด (m = 0, l = 1) และจุด (m = 1, l = 1) ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองที่ห้า สามารถจะเป็นจะได้ก็ได้บนกราฟ



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองชุดที่ 5 กับแบบจำลองชุดอื่นๆ

5.3 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการเคลื่อนตัวตามกัน

ในหัวข้อนี้ จะยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการขับเคลื่อนตามกันอย่างง่าย ๆ ซึ่งพัฒนาปรับปรุงจากผลงานของนักวิจัยจาก General Motors (Herman *et al*, 1959) และจาก Gerlough และ Huber (1975) ในสถานการณ์หนึ่ง มีขบวนสองคันขับเคลื่อนตามกันมา จนกระทั่งมาจอดติดสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกแห่งหนึ่ง ขณะหยุดรถ ระยะห่างระหว่างขบวนเท่ากับ 7.6 เมตร จากนั้นขบวนคันแรกมีพฤติกรรมการขับเคลื่อนดังต่อไปนี้ หลังจากได้รับสัญญาณไฟเขียวแล้ว ขบวนคันแรกได้เพิ่มความเร็วขึ้นด้วยอัตราเร่งคงที่ 1 เมตร/วินาที² จนกระทั่งความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 15 เมตร/วินาที จากนั้นวิ่งด้วยความเร็วคงที่ที่ 15 เมตร/วินาทีต่อไปเป็นระยะเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดความเร็วลงด้วยอัตราเร่งคงที่ที่ 1.5 เมตร/วินาที² จนกระทั่งหยุดนิ่งสนิทอีกครั้งหนึ่ง ผู้ขับขี่ขบวนอีกหนึ่งคัน ถูกสั่งให้ขับตามรถยนต์คันแรก ด้วยระยะห่างที่ปลอดภัยตลอดเวลา วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์นี้ เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวตามกันของขบวนทั้งสองตลอดช่วงเวลาการขับเคลื่อนที่กำหนดไว้เบื้องต้น

ขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์คือ การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของขบวนคันแรก ที่กำหนดการเคลื่อนที่อย่างชัดเจน ในขั้นตอนที่สอง จึงทำการวิเคราะห์ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถยนต์คันที่สอง ตามแนวการเคลื่อนที่ของขบวนคันแรก โดยใช้ทฤษฎีการเคลื่อนตัวตามกัน

ความเร็วของรถยนต์คันแรก ณ ช่วงเวลาใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{x}_1(t+T) = \dot{x}_1(t) + \left[\frac{\ddot{x}_1(t) + \ddot{x}_1(t+T)}{2} \right] T \quad (5-21)$$

ในการวิเคราะห์นี้ ได้แบ่งเวลาการวิเคราะห์ออกเป็นช่วงๆ ช่วงละ 1 วินาที ดังนั้น ค่า T จึงเท่ากับ 1 วินาที นอกจากนี้ อัตราการเร่งของขบวนคันแรก จะมีค่าคงที่ในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้น (สมการ 5-21) สามารถทำให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้ดังนี้

$$\dot{x}_1(t+1) = \dot{x}_1(t) + \ddot{x}_1 \quad (5-22)$$

ระยะทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์คันแรก สามารถเขียนในรูปสมการเต็มได้

$$x_1(t+T) = x_1(t) + \dot{x}_1(t)T + \left[\frac{\ddot{x}_1(t) + \ddot{x}_1(t+T)}{2} \right] \frac{T^2}{2} \quad (5-23)$$

ซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูปง่ายคล้ายสมการความเร็วได้

$$x_1(t+T) = x_1(t) + \dot{x}_1(t) + \frac{\ddot{x}_1}{2} \quad (5-24)$$

ความเร็ว และตำแหน่งของขบวนทุกๆ 1 วินาที คำนวณจากสมการ (5-22) และ (5-24) แสดงในคอลัมน์ที่ 3 และ 4 ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของขบวนรถจากแบบจำลองการขับเคลื่อนตามกัน

(1)	รถยนต์คันแรก			รถยนต์ที่ตามมาหลัง			ความคับคั่ง	
เวลา	อัตราเร่ง (\ddot{x}_1)	ความเร็ว (\dot{x}_1)	ระยะทาง (x_1)	อัตราเร่ง (\ddot{x}_2)	ความเร็ว (\dot{x}_2)	ระยะทาง (x_2)	ความเร็ว ($\dot{x}_1 - \dot{x}_2$)	ระยะทาง ($x_1 - x_2$)
0	0	0	0	0.0	0.0	-7.0	0.0	7.0
1	1	1	0.5	0.0	0.0	-7.0	1.0	7.5
2	1	2	2	0.5	0.3	-6.9	1.8	8.9
3	1	3	4.5	0.9	0.9	-6.3	2.1	10.8
4	1	4	8	1.03	1.9	-4.9	2.1	12.9
5	1	5	12.5	1.1	2.9	-2.5	2.1	15.0
6	1	6	18	1.03	4.0	1.0	2.0	17.0
7	1	7	24.5	1.01	5.0	5.5	2.0	19.0
8	1	8	32	1.00	6.0	11.0	2.0	21.0
9	1	9	40.5	1.0	7.0	17.5	2.0	23.0
10	1	10	50	1.0	8.0	25.0	2.0	25.0
11	1	11	60.5	1.0	9.0	33.5	2.0	27.0
12	1	12	72	1.0	10.0	43.0	2.0	29.0
13	1	13	84.5	1.0	11.0	53.5	2.0	31.0
14	1	14	98	1.0	12.0	65.0	2.0	33.0
15	1	15	112.5	1.0	13.0	77.5	2.0	35.0
16	0	15	127.5	1.0	14.0	91.0	1.0	36.5
17	0	15	142.5	0.5	14.8	105.4	0.2	37.1
18	0	15	157.5	0.1	15.1	120.3	-0.1	37.2
19	0	15	172.5	0.0	15.1	135.4	-0.1	37.1
20	0	15	187.5	-0.1	15.1	150.5	-0.1	37.0
21	0	15	202.5	0.0	15.0	165.5	0.0	37.0
22	0	15	217.5	0.0	15.0	180.5	0.0	37.0
23	0	15	232.5	0.0	15.0	195.5	0.0	37.0
24	0	15	247.5	0.0	15.0	210.5	0.0	37.0
25	0	15	262.5	0.0	15.0	225.5	0.0	37.0
26	-1.5	13.5	276.75	0.0	15.0	240.5	-1.5	36.3
27	-1.5	12	289.5	-0.7	14.6	255.3	-2.6	34.2
28	-1.5	10.5	300.75	-1.3	13.6	269.4	-3.1	31.3
29	-1.5	9	310.5	-1.5	12.2	282.3	-3.2	28.2
30	-1.5	7.5	318.75	-1.6	10.6	293.7	-3.1	25.1
31	-1.5	6	325.5	-1.5	9.0	303.5	-3.0	22.0
32	-1.5	4.5	330.75	-1.5	7.5	311.8	-3.0	19.0
33	-1.5	3	334.5	-1.5	6.0	318.5	-3.0	16.0
34	-1.5	1.5	336.75	-1.5	4.5	323.8	-3.0	13.0
35	0	0	337.5	-1.5	3.0	327.5	-3.0	10.0
36	0	0	337.5	-1.5	1.5	329.7	-1.5	7.8
37	0	0	337.5	-0.7	0.4	330.7	-0.4	6.8
38	0	0	337.5	-0.2	-0.1	330.8	0.1	6.7
39	0	0	337.5	0.0	-0.2	330.7	0.2	6.8
40	0	0	337.5	0.1	-0.1	330.6	0.1	6.9
41	0	0	337.5	0.0	0.0	330.5	0.0	7.0

จะเห็นว่ารถยนต์คันแรกใช้เวลา 15 วินาที ในการเร่งจากหยุดนิ่ง จนความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 15 เมตร/วินาที โดยใช้ระยะทางทั้งหมด 112.5 เมตร จากนั้นจึงวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 15 เมตร/วินาที เป็นระยะเวลา 10 วินาที ทำให้เคลื่อนที่เป็นระยะทางอีก 150 เมตร จากนั้น จึงเริ่มชะลอตัวด้วยอัตราเร่งคงที่ เป็นเวลา อีก 10 วินาที รถยนต์จึงจอดนิ่งสนิทอีกครั้ง รวมระยะทางวิ่งทั้งหมดตั้งแต่เริ่มวิ่งจนกระทั่งหยุดรถ เป็นระยะทางทั้งหมด 337.5 เมตร ใช้เวลาทั้งหมด 35 วินาที

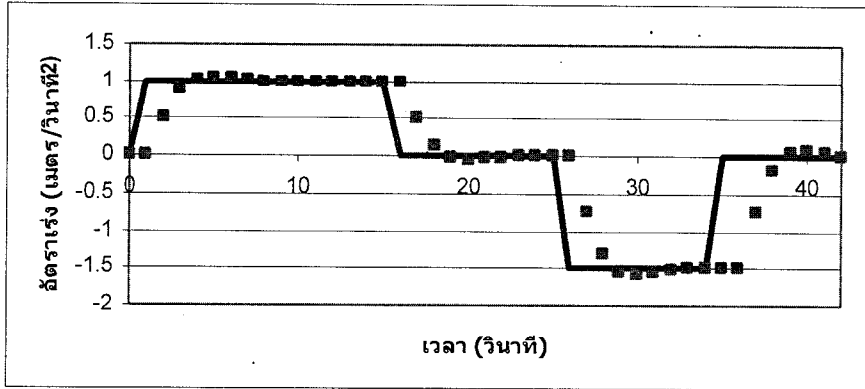
ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของรถยนต์คันที่ตามหลังนั้น จำเป็นจะต้องใช้สมการในการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 สมการ สมการแรกเป็น สมการของ General Motors (5-11) คือ

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \alpha [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (5-25)$$

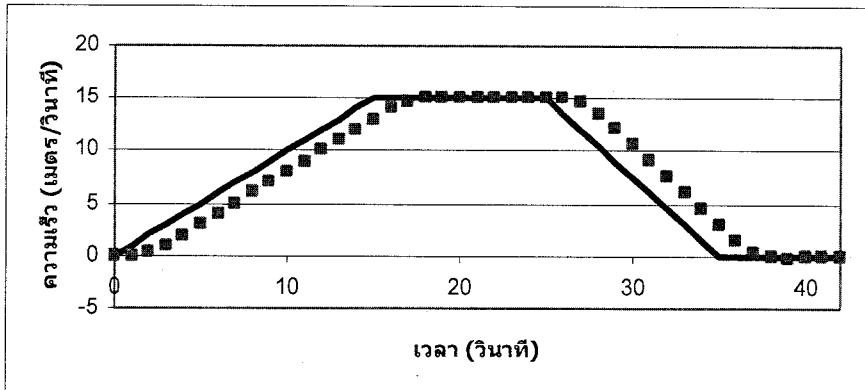
การใช้สมการดังกล่าว จำเป็นจะต้องเลือกแทนค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวได้แก่ ระยะเวลาปฏิริยาตอบสนอง (Δt) และความอ่อนไหว (α) ตารางที่ 5.1 ได้แนะนำให้ใช้ค่าระยะเวลาปฏิริยาตอบสนอง ในช่วงระหว่าง 1.0 ถึง 2.2 วินาที และค่าความอ่อนไหวในช่วงประมาณ 0.17 ถึง 0.74 สำหรับการคำนวณในตัวอย่างนี้ เลือกใช้ค่าระยะเวลาปฏิริยาตอบสนอง เท่ากับ 1.0 วินาที และค่าความอ่อนไหว เท่ากับ 0.5 นอกจากนี้ ขวดยาน n คือ ขวดยานคันที่ 1 นั่นคือ $n = 1$ ดังนั้นสมการ (5-25) สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นได้ดังนี้

$$\ddot{x}_2(t + 1) = 0.5[\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)] \quad (5-26)$$

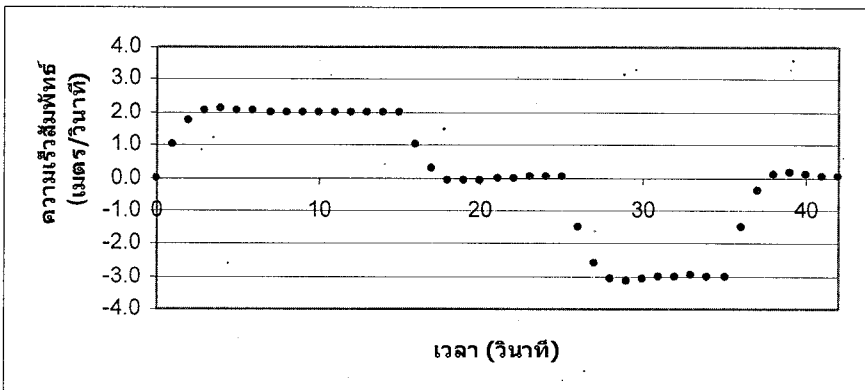
จากสมการข้างต้น จึงสามารถวิเคราะห์หาอัตราเร่งของขวดยานคันที่ตามหลังได้ทุกๆ ช่วงเวลา ถ้าทราบความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างขวดยานทั้งสองคันในวินาทีก่อนหน้านั้นได้ ความเร็วของขวดยานคันที่สอง สามารถคำนวณได้จากสมการ (5-21) หรือ (5-22) ส่วนตำแหน่งระยะทางการเคลื่อนที่ของขวดยานคันที่สอง ก็สามารถคำนวณได้จากสมการ (5-23) หรือ (5-24) ผลการคำนวณความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่งระยะทางของรถยนต์คันที่ตามหลังมาดังแสดงในคอลัมน์ 5-7 ในตารางที่ 5.3 ส่วนคอลัมน์ที่ 8 และ 9 แสดงความเร็วสัมพัทธ์ และระยะห่างสัมพัทธ์ระหว่างขวดยานทั้งสองตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงอัตราความเร่ง ความเร็ว ความเร็วสัมพัทธ์ และระยะทางสัมพัทธ์ ในช่วงเวลาการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 5.7



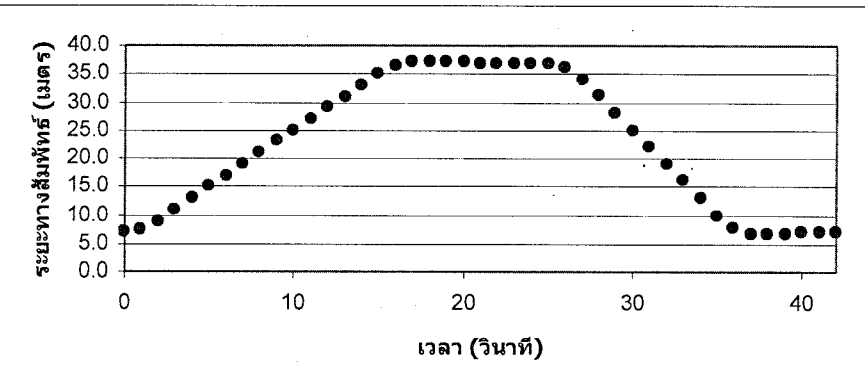
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.7 การเคลื่อนที่ของขั้วคานตามกัน

จากรูปที่ 5.7 (ก) จะเห็นได้ว่าหลังจากรถยนต์คันแรกได้ออกตัวไปแล้ว รถยนต์คันที่สองจะค่อยๆ เร่งตัวเพิ่มขึ้นตามรถยนต์คันที่สอง จนอัตราเร่งสูงเกินกว่าอัตราเร่งของรถยนต์คันแรกในช่วงวินาทีที่ 4 ถึง 7 จากนั้นอัตราเร่งของรถทั้งสองจะเท่ากันและคงที่ ในช่วงการใช้ความเร็วคงที่ และช่วงชะลอตัวก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน นั่นคือ รถยนต์คันแรกจะเริ่มก่อนเป็นระยะเวลาหนึ่ง ก่อนที่รถยนต์คันที่สองจึงเริ่มมีปฏิริยาตอบสนอง จนอัตราการเร่งหรือชะลอตัวมากกว่ารถยนต์คันแรกเป็นช่วงเวลานั้นๆ จากนั้นจึงใช้มีอัตราเร่งเท่ากัน นั่นเป็นเวลาสำหรับผู้ขับขี่ของรถคันที่ตามหลังต้องใช้ในการปรับแก้การขับขี่ของตัวเองให้เข้ากับรถยนต์คันหน้านั้นเอง เวลาเร่งตัวหรือชะลอตัวก็จะดำเนินการช้ากว่ารถยนต์คันหน้า เมื่อพยายามเร่งตัวหรือชะลอตัวอยู่นั้น ส่วนใหญ่ก็จะเร่งตัว หรือชะลอมากกว่ารถยนต์คันหน้าเป็นระยะเวลาเล็กน้อย จากนั้นจึงปรับตัวให้เข้ากับรถยนต์คันหน้าได้อย่างเหมาะสม รูปที่ 5.7 (ข) แสดงให้เห็นว่า ความเร็วของขบวนคันที่สอง จะค่อยๆ ตามรถยนต์คันหน้า ตลอดการเดินทาง ซึ่งจะมีระยะห่างกันอยู่ประมาณ 2-3 วินาที รูปที่ 5.7 (ค) แสดงให้เห็นว่าความเร็วสัมพัทธ์ของขบวนทั้งสอง ในช่วงเร่งตัว มีค่าเกือบคงที่ ประมาณ 2.0 เมตร/วินาที ในขณะที่ความเร็วสัมพัทธ์ในช่วงชะลอตัว ก็มีค่าคงที่ประมาณ 3.0 เมตร/วินาที

รูปที่ 5.7 (ง) เป็นรูปที่สำคัญ ซึ่งมีสองนัยยะ ได้แก่ 1) รถยนต์คันที่สอง ได้เว้นระยะห่างจากรถยนต์คันแรกอย่างปลอดภัยตลอดเวลาการเดินทางหรือไม่ และ 2) ค่าความจุการจราจรที่แท้จริงได้บรรลุหรือไม่ จากรูปจะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างรถยนต์ทั้งสองค่อนข้างคงที่ และเพียงพอตลอดเวลา สำหรับในช่วงการใช้ความเร็วคงที่นั้น พบว่า ค่าระยะห่างระหว่างขบวนมีค่าคงที่ที่ 37 เมตร/คัน ซึ่งคิดเป็นค่าความจุการจราจรของถนนได้เท่ากับ 27 คัน/กม. และอัตราการไหลเท่ากับ 1450 คัน/ชม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความจุมาตรฐาน 1,900 คัน/ชม. อยู่พอสมควร แสดงให้เห็นว่า สมการการเคลื่อนตัวตามกัน กับค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในตัวอย่างนี้ ให้ค่าการเคลื่อนตัวตามกันด้วยระยะที่สมดุล และปลอดภัยเพียงพอ แต่ปรากฏว่าให้ค่าความจุการจราจรที่ต่ำกว่าความเป็นจริงพอสมควร ในหัวข้อต่อไปจะมีรายละเอียดเกี่ยวกับการใช้สมการ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และผลสืบเนื่องในการให้ค่าระยะห่างระหว่างขบวนและความจุการจราจร

5.4 ความเสถียรของการจราจร

พิจารณาขบวนคันหนึ่ง ผู้ขับขี่มีการตอบสนองค่อนข้างช้า (ใช้ระยะเวลาปฏิริยาตอบสนองยาวนานมาก) และเมื่อตอบสนองแล้ว มีปฏิริยาเกินความเหมาะสม (เช่น ใช้อัตราเร่ง หรืออัตราชะลอความเร็วมาก) พฤติกรรมเหล่านี้ จะเรียกว่า “ไม่เสถียร” (unstable) เกิดขึ้นจากการขับขี่ที่มีระยะเวลาปฏิริยาตอบสนองยาวนาน และการตอบสนองมีความอ่อนไหวสูงมาก สำหรับผู้ขับขี่ที่มีความตั้งใจในการขับขี่ ตามหลังขบวนคันหน้าอย่างระมัดระวัง และไม่เหยียบคันเร่งหรือเหยียบเบรคอย่างรุนแรงนัก ใช้ระยะเวลาปฏิริยาตอบสนองสั้น และการตอบสนองไม่มีความอ่อนไหวมากนัก จะเรียกพฤติกรรมการขับขี่ดังกล่าวว่า “เสถียร” (stable) ในทางวิศวกรรมจราจร ได้ใช้ค่าผลคูณระหว่าง ระยะเวลาปฏิริยาตอบสนอง กับ ระดับความอ่อนไหวเป็นการบ่งบอกพฤติกรรมการขับขี่ เช่น สำหรับผู้ขับขี่ที่มีระยะเวลาปฏิริยาตอบสนองยาวนาน และความอ่อนไหวในการขับขี่มาก ผลคูณที่ได้ก็จะมีค่ามาก แสดงถึงสภาวะการณ์ที่ไม่เสถียร ในทางกลับกัน ระยะเวลาปฏิริยาตอบสนองสั้น และความอ่อนไหวในการขับขี่ต่ำ ผลคูณที่ได้ก็จะมีค่าต่ำ แสดงถึงสภาวะการณ์ที่มีความเสถียรสูง

สำหรับขบวนคันหนึ่งที่ผู้ขับขี่มีพฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย และไม่เสถียร อาจจะไม่เกิดอุบัติเหตุขึ้นกับตนเอง แต่อาจจะส่งผลให้ขบวนคันอื่นๆ ที่ตามหลังมาเกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ เนื่องจากความไม่

เสถียร ค่อยๆ ทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น ความเสถียรของการจราจร จะขึ้นอยู่กับสองปัจจัย ได้แก่ ค่าตัวแปรการเคลื่อนตัวตามกัน (คือ Δt และ α) และจำนวนขบวนที่กำลังขับเคลื่อนตามกันในกระแสจราจร

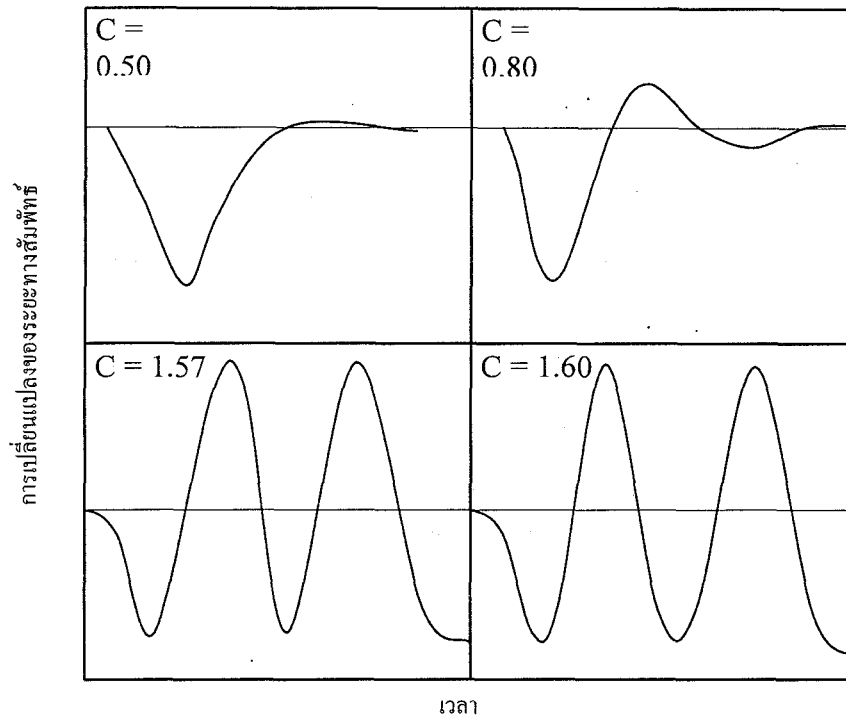
นักวิจัยของ General Motors ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความเสถียรของการจราจร ซึ่งได้จำแนกความเสถียรออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความเสถียรแบบ local และความเสถียรแบบ asymptotic ความเสถียรแบบ local จะคำนึงถึงการเคลื่อนตัวตามกันของขบวนสองคันเท่านั้น ส่วนความเสถียรแบบ asymptotic จะพิจารณาถึงการเคลื่อนตัวตามกันของขบวนหลายๆ คันในกระแสจราจร ความเสถียรทั้งสองประเภทจะขึ้นอยู่กับค่า C ซึ่งเป็นผลคูณระหว่าง ระยะเวลาปฏิกริยาตอบสนอง (Δt) กับความอ่อนไหว (α) ดังสมการ

$$C = \alpha(\Delta t) \quad (5-27)$$

ความเสถียรแบบท้องถิ่น (local stability) จะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ nonoscillatory, damped oscillatory และ increased oscillatory. ระดับ nonoscillatory บ่งบอกถึงพฤติกรรมการขับขี่ที่มีความเสถียรมากจนไม่เกิดภาวะแกว่งใดๆ ขึ้นเลย ส่วน damped oscillatory คือพฤติกรรมการขับขี่ที่เกิดภาวะแกว่งขึ้นบ้าง แต่ภาวะแกว่งจะสลายตัวไปในที่สุด และการจราจรกลับคืนสู่สภาวะเสถียร สำหรับระดับ increased oscillatory นั้น บ่งบอกถึงพฤติกรรมการขับขี่ที่ภาวะแกว่งก่อตัวขึ้น และทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ ตารางที่ 5.4 สรุปรายละเอียดขอบเขตของค่า C สำหรับความเสถียรระดับต่างๆ และรูปที่ 5.8 แสดงลักษณะการเกิดภาวะแกว่งตัวในกระแสจราจร สำหรับค่า C ระดับต่างๆ

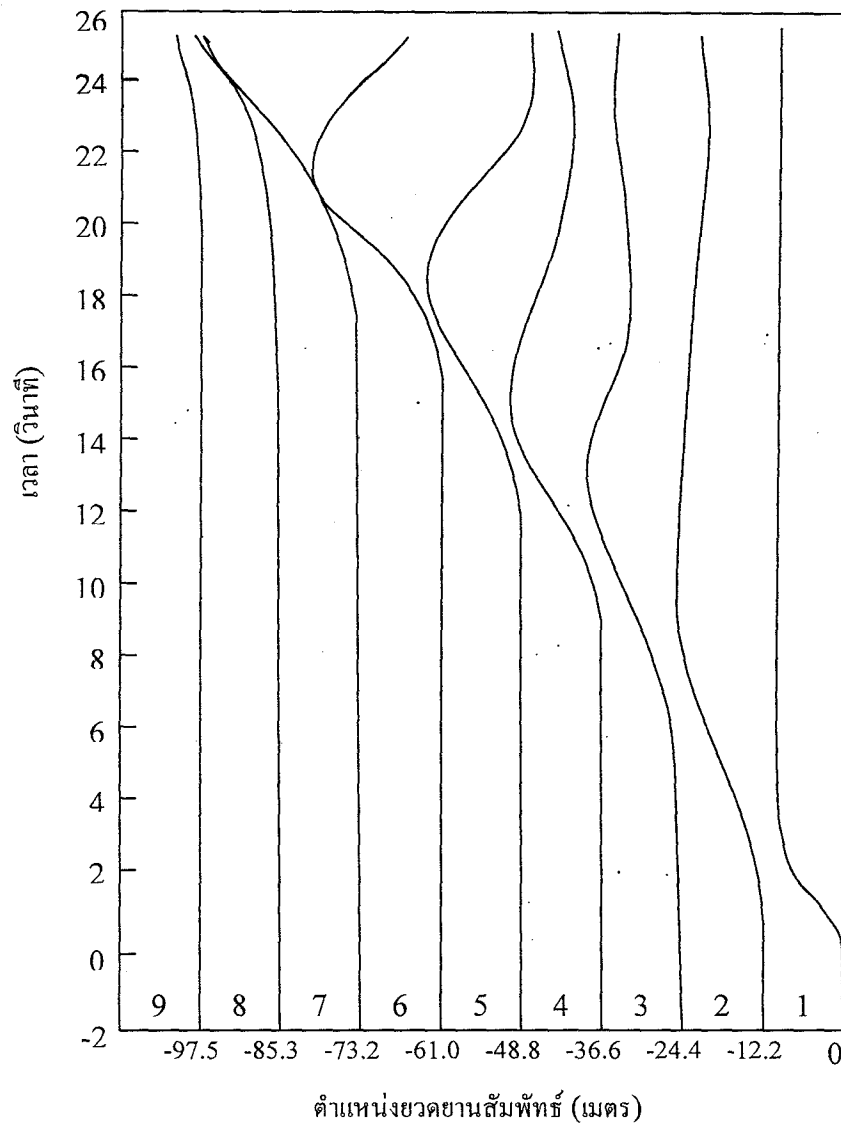
ตารางที่ 5.4 ขอบเขตของความเสถียรแบบ local และ แบบ asymptotic ในระดับต่างๆ

C Value [$C = \alpha(\Delta t)$]	Local Stability	Asymptotic Stability
0.0 (0.37)	Nonoscillatory	Damped oscillatory
0.5 (0.50)	Damped oscillatory	
1.0		Increased oscillatory
1.5 (1.57)	Increased oscillatory	
2.0		Increased oscillatory



รูปที่ 5.8 ความเสถียรแบบ Local ตามฟังก์ชันของค่า C

ความเสถียรแบบ asymptotic จะแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ damped oscillatory และ increased oscillatory. ระดับ damped oscillatory คือพฤติกรรมการขับเคลื่อนที่เกิดภาวะแกว่งขึ้นบ้าง แต่ภาวะแกว่งจะสลายตัวไปในที่สุด การจราจรกลับสู่สถานะเสถียร ในสภาพการณ์นี้ จะไม่มีขบวนการเกิดอุบัติเหตุชนกับขบวนการคันหน้า ส่วนระดับ increased oscillatory นั้น บ่งบอกถึงพฤติกรรมการขับเคลื่อนที่ภาวะแกว่งก่อตัวขึ้น และทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย จนในที่สุด จะมีขบวนการในกระแสนจราจรที่เกิดอุบัติเหตุชนกัน ซึ่งอาจจะไม่ใช่คันที่สอง แต่อาจจะเป็นคันที่ 6 หรือ 7 ดังแสดงในรูปที่ 5.9 รายละเอียดขอบเขตของค่า C สำหรับความเสถียรแบบ Asymptotic ระดับต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.4

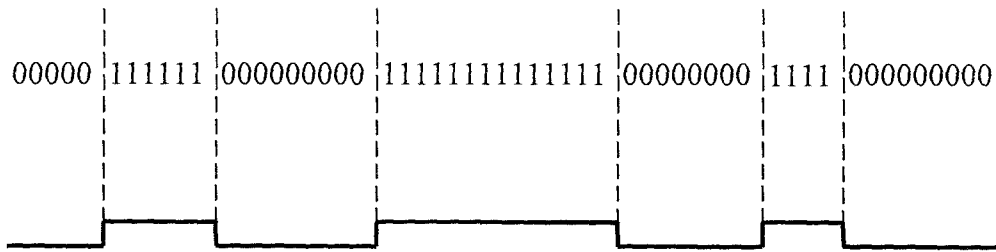


รูปที่ 5.9 ตัวอย่างของความไม่เสถียรแบบ Asymptotic

5.5 การสำรวจโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพการจราจรแบบอัตโนมัติ

ในปัจจุบัน อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพการจราจรแบบอัตโนมัติ ที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ได้แก่ อุปกรณ์ ประเภท presense-type ซึ่งมีหน้าที่ตรวจจับการมาถึงและการจากไปของขบวนยานในบริเวณจุดติดตั้งอุปกรณ์ เมื่อขบวนยานได้ผ่านมาถึง อุปกรณ์ตรวจนับจะถูกกระตุ้นขึ้น และยังคงถูกกระตุ้นเช่นนั้นจนกว่าขบวนยานคันดังกล่าวจะผ่านเลยไป ในขณะที่ไม่มีขบวนยานอยู่ในพื้นที่การตรวจวัดนั้น อุปกรณ์ตรวจนับจะอยู่ในสถานะ “ปิด” หรือให้สัญญาณ 0 (ดูรูปที่ 5.10) ส่วนในขณะที่ขบวนยานผ่านเข้ามาในพื้นที่การตรวจวัดนั้น อุปกรณ์ตรวจนับจะอยู่ในสถานะ “เปิด” หรือให้สัญญาณ 1

ระยะเวลาที่อุปกรณ์ตรวจจับถูกกระตุ้นขณะที่ยวดยานผ่านมานั้น (หรือภาษาเทคนิคเรียกว่า คำสั่ง “เปิด”) จะเรียกว่า vehicle occupancy time ซึ่งเป็นเวลาที่ยวดยานคันดังกล่าวใช้ในการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง เท่ากับความยาวรถ รวมกับระยะพื้นที่การตรวจวัด (detection zone - ซึ่งระยะนี้ ไม่จำเป็นจะต้องเท่ากับความยาว ทางกายภาพของอุปกรณ์ตรวจนับ) ค่า vehicle occupancy time จะเป็นฟังก์ชันของ ความเร็วยวดยาน ความยาว ของยวดยาน และความยาวของพื้นที่ตรวจนับ สำหรับช่วงเวลาที่อุปกรณ์ตรวจจับอยู่ในสถานะ ปิด ก็คือ ระยะเวลาช่องว่างระหว่างยวดยาน (time gap) ในหน่วยวินาที



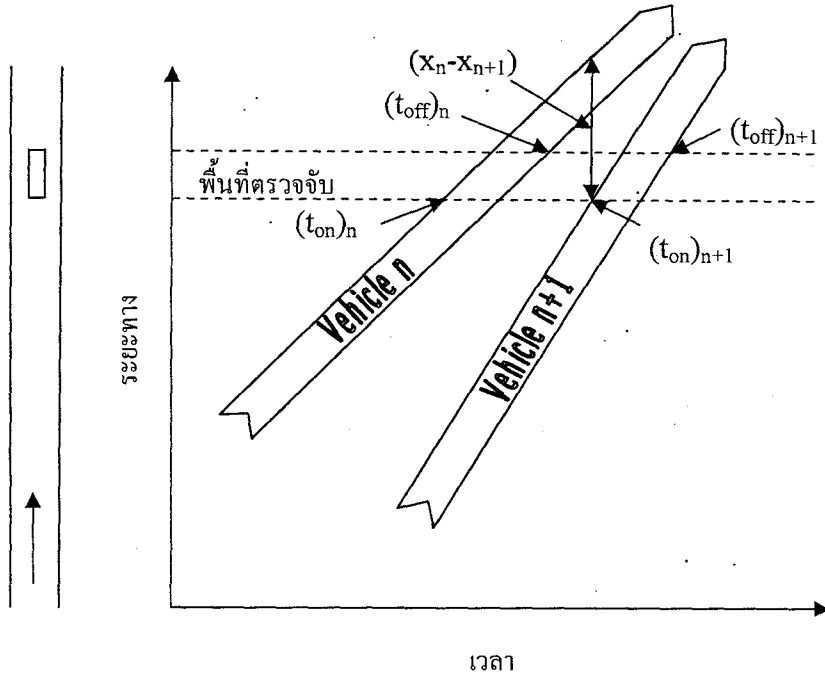
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างผลการบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ตรวจนับจราจรประเภท presence-type

5.5.1 การสำรวจโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดียว (Single Detector)

ลักษณะการดำเนินงานของอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดียว แสดงในรูปที่ 5.11 การคำนวณหาค่า ระยะเวลาระหว่างยวดยาน (time headway) จะคำนวณได้จาก

$$h_{n+1} = (t_{on})_{n+1} - (t_{on})_n \quad (5-28)$$

โดยที่ h_{n+1} - ระยะเวลาระหว่างยวดยาน (วินาที)
 t_{on} - เวลาที่ยวดยานผ่านมาถึง (วินาที)



รูปที่ 5.11 ยวดยานวิ่งผ่านอุปกรณ์ตรวจนับประเภทเดียว

ค่า vehicle occupancy time สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$(t_{occ})_n = (t_{off})_n - (t_{on})_n \tag{5-29}$$

$$(t_{occ})_{n+1} = (t_{off})_{n+1} - (t_{on})_{n+1} \tag{5-30}$$

โดยที่ t_{occ} - ระยะเวลาที่ยวดยานกำลังอยู่ในพื้นที่ตรวจวัด (วินาที)

ดังที่กล่าวมาแล้ว ค่า vehicle occupancy time เป็นฟังก์ชันของความเร็วยวดยาน ความยาวรถ และความยาวของพื้นที่ตรวจวัด ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{x}_n = \frac{L_n + L_D}{(t_{occ})_n} \tag{5-31}$$

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{L_{n+1} + L_D}{(t_{occ})_{n+1}} \tag{5-32}$$

โดยที่ \dot{x}_n, \dot{x}_{n+1} - ความเร็วของยวดยาน (เมตร/วินาที)

L_n, L_{n+1} - ความยาวของยวดยาน (เมตร)

L_D – ความยาวของพื้นที่ตรวจนับ (เมตร)

โดยปกติ พื้นที่ตรวจวัดจะมีความยาวคงที่ ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบได้ ณ บริเวณที่ทำการติดตั้งจริง สมมติกำหนดให้ขบวนแต่ละคันที่ผ่านไปมาในกระแสนจราจรมีความยาวใกล้เคียงกัน สมการคำนวณความเร็วของขบวนก็จะอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น คือ

$$\dot{x}_n = \frac{K}{(t_{occ})_n} \quad (5-33)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{K}{(t_{occ})_{n+1}} \quad (5-34)$$

โดยที่ K – เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับผลรวมของความยาวขบวนและความยาวพื้นที่ตรวจวัด มีหน่วยเป็นเมตร

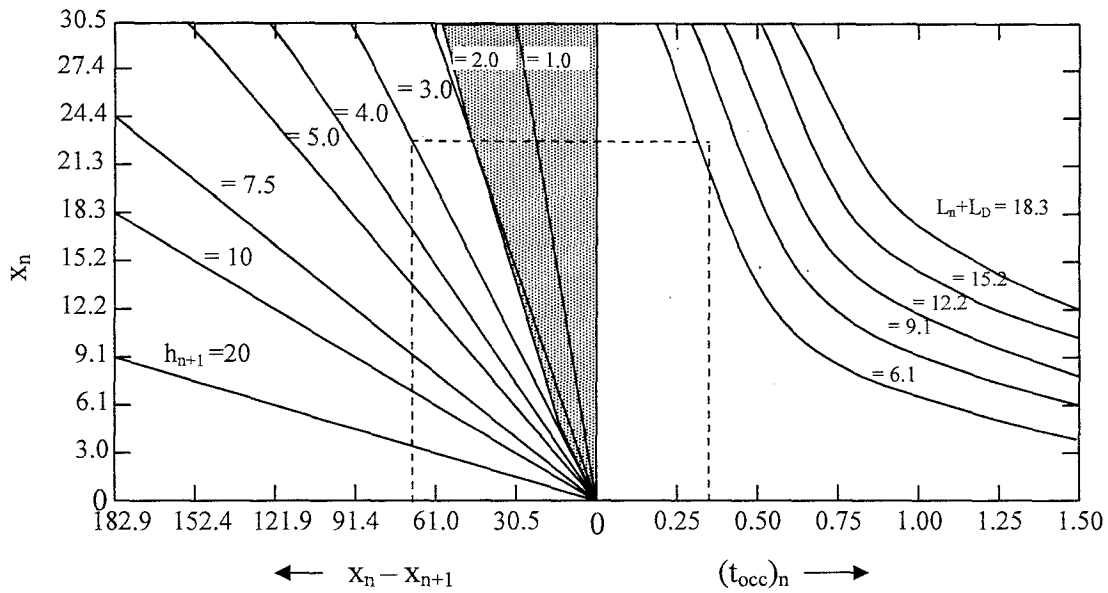
จากรูปที่ 5.11 ค่าระยะห่างระหว่างขบวน (spacing) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$\dot{x}_n = \frac{x_n - x_{n+1}}{h_{n+1}} \quad (5-35)$$

$$x_n - x_{n+1} = (\dot{x}_n)(h_{n+1}) \quad (5-36)$$

ความแม่นยำในการประมาณการณ์ จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการประมาณความยาวเฉลี่ยของขบวนในกระแสนจราจร และสมมติฐานที่ว่าขบวนแต่ละคันใช้ความเร็วคงที่ขณะที่เคลื่อนตัวผ่านพื้นที่ตรวจวัด

ดังนั้น จึงเห็นได้ว่าอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดี่ยว สามารถวิเคราะห์ค่า vehicle occupancy time ระยะเวลาระหว่างขบวนแต่ละคัน (headway) ความเร็วของขบวน และระยะห่างระหว่างขบวน (spacing) ได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 ในการใช้กราฟดังกล่าว เมื่อทราบ 1) ระยะเวลาที่ขบวนอยู่ในพื้นที่ตรวจนับ (t_{occ}) 2) ระยะเวลาของขบวนคันดังกล่าวกับขบวนคันถัดไป (headway) ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้สามารถวัดได้โดยตรงจากอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดี่ยว และ 3) ค่า $L_n + L_d$ ซึ่งก็คือค่าประมาณผลรวมของความยาวขบวน กับความยาวพื้นที่ตรวจวัด แล้วก็สามารถวิเคราะห์หาความเร็วของขบวน และระยะห่างระหว่างขบวนได้ ตัวอย่างเช่น สมมติการตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์ตรวจนับ พบว่าค่า t_{occ} ของขบวน n เท่ากับ 0.34 วินาที และระยะเวลาระหว่างขบวน n กับขบวน $n+1$ พบว่าเท่ากับ 3.0 วินาที สมมติว่าค่า $L_n + L_d$ ตรวจวัดได้เท่ากับ 7.6 เมตร จากกราฟในรูปที่ 5.12 สามารถลากเส้นเชื่อมจุดต่างๆ (ตามที่แสดงในรูป) ได้ความเร็วของขบวน n เท่ากับ 22.4 เมตร/วินาที และระยะห่างระหว่างขบวนเท่ากับ 67.1 เมตร พื้นที่ที่แรเงาในรูปที่ 5.13 แสดงถึงการจับคู่ที่ไม่ปลอดภัย (จับขบวนใกล้เคียงกันมากเกินไป)



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจุดภาคต่างๆ สำหรับอุปกรณ์ตรวจนับแบบเดี่ยว

นอกจากนี้ ข้อมูลดังกล่าวยังสามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลจราจร ได้โดยใช้สมการ (5-37) หรือ (5-38) ก็ได้

$$q = \frac{3600}{\left[\frac{1}{N-1} \right] \sum_{n=n+1}^N h_n} \tag{5-37}$$

$$q = \frac{\sum_{t=0}^T \delta}{T} \tag{5-38}$$

โดยที่ δ - การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในอุปกรณ์ตรวจวัด จากสถานะ "0" เป็นสถานะ "1"
 T - ช่วงเวลาที่ทำการสำรวจ (ชั่วโมง)

ความเร็วเฉลี่ยของกระแสจราจร (time mean speed) คำนวณโดยใช้สมการ

$$\bar{x} = \frac{\sum_{n=1}^N \dot{x}_n}{N} = \frac{K}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (t_{occ})_n} \tag{5-39}$$

จากนั้น จึงสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นได้จากข้อมูลอัตราการไหล และความเร็วเฉลี่ย โดยใช้สมการ

$$k = \frac{q}{\mu} = \frac{q}{\bar{x}} \quad (5-40)$$

โดยที่ k – ความหนาแน่น (คัน/กิโลเมตร)

μ – ความเร็วเฉลี่ยระยะทาง (space mean speed) ของกระแสจราจร (กิโลเมตร/ชั่วโมง)

อนึ่งในสมการ (5-40) ได้ใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยปกติ (time mean speed - \bar{x}) แทนค่า μ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ

และสมการสุดท้าย ใช้สำหรับคำนวณค่า percent occupancy time ซึ่งเป็นค่าที่สามารถใช้เป็นตัวแทนค่าความหนาแน่นจราจรได้ด้วย เป็นค่าที่บ่งบอกถึงร้อยละของเวลาที่มียานยนต์อยู่ในพื้นที่ตรวจนับ ซึ่งถ้า percent occupancy time มีค่าสูง ก็จะแสดงว่ามียานยนต์จราจรไปมาจำนวนมาก หรือความหนาแน่นสูงนั่นเอง สำหรับกรณีที่ percent occupancy time มีค่าต่ำ แสดงว่ามียานยนต์จราจรไปมาจำนวนน้อย หรือความหนาแน่นต่ำ สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า percent occupancy time คือ

$$\%OCC = \frac{\sum_{n=0}^N (t_{occ})_n}{T} \times 100 \quad (5-41)$$

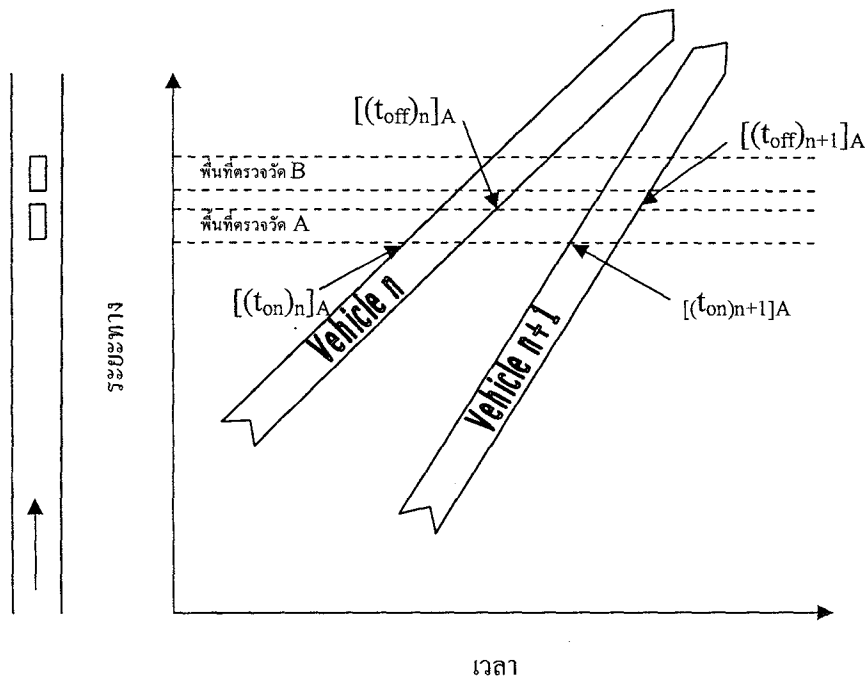
โดยที่ $\%OCC$ – percent occupancy time

N – จำนวนยานยนต์ที่ผ่านไปมาในช่วงเวลาสำรวจ T

T – ช่วงเวลาสำรวจ T

5.5.2 การสำรวจโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทคู่ (Dual Detector)

อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทคู่ เป็นอุปกรณ์ที่มีพื้นที่ตรวจวัด จำนวนสองจุดที่ตั้งในบริเวณใกล้เคียงกัน พื้นที่ตรวจวัดทั้งสอง จะวางเรียงกันในแนวเดียวกับทิศทางการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งทราบระยะห่างที่แน่นอน สัญลักษณะของตัวแปรต่างๆ จะเหมือนกับอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดี่ยวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่จะมีตัวห้อย A และ B เพื่อบ่งบอกถึงพื้นที่ตรวจวัดตัวแรก และตัวที่สอง ตามลำดับ ตัวอย่างอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ อุปกรณ์การตรวจวัดแบบขดลวดเหนี่ยวนำประเภทคู่ (Dual-Loop Detector) หรืออุปกรณ์แสงอินฟราเรดบางโมเดล เป็นต้น ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้ คือสามารถคำนวณค่าความเร็วของยานยนต์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ การคำนวณไม่จำเป็นต้องอาศัยค่าสมมติฐานเกี่ยวกับความยาวตัวรถ ดังเช่นอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดี่ยว



รูปที่ 5.13 ยวดยานวิ่งผ่านอุปกรณ์ตรวจนับประเภทคู่

การวิเคราะห์ค่าระยะเวลาระหว่างยวดยาน และ vehicle occupancy time นั้นสามารถคำนวณได้ดังเช่น อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดียว ในหัวข้อ 5.5.1 สำหรับความเร็วของยวดยานแต่ละคัน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{x}_n = \frac{D}{[(t_{on})_n]_B - [(t_{on})_n]_A} \tag{5-42}$$

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{D}{[(t_{on})_{n+1}]_B - [(t_{on})_{n+1}]_A} \tag{5-43}$$

โดยที่ D - ระยะห่างระหว่างพื้นที่ตรวจวัด A และพื้นที่ตรวจวัด B (เมตร)

ข้อมูลความเร็วที่คำนวณได้ ก็สามารถวิเคราะห์ความยาวของยวดยานคันดังกล่าวได้โดยใช้สมการ

$$[L_n]_A = \dot{x}_n [(t_{occ})_n]_A - [L_D]_A \tag{5-44}$$

หรือ

$$[L_n]_B = \dot{x}_n [(t_{occ})_n]_B - [L_D]_B \tag{5-45}$$

$$[L_{n+1}]_A = \dot{x}_{n+1} [(t_{occ})_{n+1}]_A - [L_D]_A \quad (5-46)$$

หรือ

$$[L_{n+1}]_B = \dot{x}_{n+1} [(t_{occ})_{n+1}]_B - [L_D]_B \quad (5-47)$$

ค่าระยะห่างระหว่างขบวน (spacing) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$x_n - x_{n+1} = (\dot{x}_n)(h_{n+1})_A \quad (5-48)$$

หรือ

$$x_n - x_{n+1} = (\dot{x}_n)(h_{n+1})_B \quad (5-49)$$

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหล ความเร็วเฉลี่ยกระแสจราจร และความหนาแน่น สามารถคำนวณได้ดังเช่นอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเดียว ที่นำเสนอไปแล้วในหัวข้อ 5.5.1 โดยสรุปแล้ว อุปกรณ์ตรวจนับจราจรประเภทคู่หนึ่ง สามารถตรวจวัดค่าความเร็วของขบวน และระยะห่างระหว่างขบวนได้ถูกต้องแม่นยำกว่าอุปกรณ์ตรวจนับจราจรประเภทเดียว เพราะจะทำการวัดความเร็วโดยตรงจากอุปกรณ์ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยสมมติฐานเกี่ยวกับความยาวขบวน

แบบฝึกหัด

1. สมมติว่ามีขบวนรถสองคันขับเคลื่อนตามกัน ด้วยความเร็วเริ่มต้นเท่ากัน คือ 15 เมตร/วินาที และมีระยะห่างระหว่างขบวนรถ (Spacing) เท่ากับ 35 เมตร จากนั้นขบวนรถคันแรกจึงเริ่มชะลอความเร็วลงด้วยอัตรา 1 เมตร/วินาที² จนกระทั่งรถจอดหยุดนิ่ง กำหนดให้ใช้แบบจำลอง General Motors ชุดที่ 1 พร้อมทั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับผู้ขับขี่ 3 ประเภท

ผู้ขับขี่	ระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนอง (Δt) (วินาที)	ความอ่อนไหว (α_0) (เมตร/วินาที)
1	1.0	0.17
2	1.55	0.37
3	2.2	0.74

- ก. จากข้อมูลระยะเวลาปฏิกิริยาตอบสนอง และค่าความอ่อนไหว ของผู้ขับขี่แต่ละประเภท จงวิเคราะห์ว่าผู้ขับขี่แต่ละคนจะส่งผลให้เกิดความเสถียรแบบท้องถิ่นอยู่ระดับใดบ้าง พร้อมทั้งอธิบายถึงคุณลักษณะความเสถียรระดับต่างๆ พอเป็นสังเขป
 - ข. จงคำนวณ (คล้ายตารางที่ 5.3) และลากเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนรถทั้งสอง (คล้ายรูปที่ 5.7) (โดยเริ่มตั้งแต่ก่อนที่ขบวนรถคันแรกเริ่มเหยียบเบรค จนกระทั่งขบวนรถทั้งสองคันจอดหยุดนิ่ง) สำหรับผู้ขับขี่ทั้งสามประเภท จงวิเคราะห์ว่าเส้น trajectory ที่วิเคราะห์ได้ มีลักษณะคล้ายกับที่อธิบายไว้ในข้อ ก หรือไม่
2. ขบวนรถ 2 คันขับเคลื่อนตามกันด้วยความเร็วคงที่ วิ่งผ่านอุปกรณ์ตรวจนับจราจรแบบเดียว ซึ่งมีพื้นที่การตรวจวัด (Detection Zone) ยาวประมาณ 1.8 เมตร ข้อมูลเวลา “เปิด” (t_{on}) และเวลา “ปิด” (t_{off}) สำหรับขบวนรถทั้งสอง สรุปไว้ในตารางด้านล่าง

ขบวนรถ	เวลาเปิด (t_{on})	เวลาปิด (t_{off})
1	16	27
2	141	154

จงคำนวณหาค่าตัวแปรทางด้านจราจรแบบมหภาคและจุลภาคทั้งหมดที่สามารถหาได้ ทั้งนี้ สมมติให้ความยาวขบวนรถเท่ากับ 5 เมตร จงวิเคราะห์โดยใช้ monograph (รูปที่ 5.12) และสมการทั้งหลายที่ให้ไว้ในหัวข้อ 5.5.1 พร้อมทั้งวาดกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนรถ (คล้ายรูปที่ 5.11) ด้วย

3. ขบวนรถ 2 คันขับเคลื่อนตามกัน วิ่งผ่านอุปกรณ์ตรวจนับจราจรประเภทชุดคู่ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 2 ชุด แต่ละชุดมีพื้นที่การตรวจวัด (Detection Zone) ยาวประมาณ 1.8 เมตร พื้นที่

ตรวจวัดทั้งสองมีระยะห่างเท่ากับ 6.1 เมตร ข้อมูลเวลา “เปิด” (t_{on}) และเวลา “ปิด” (t_{off}) สำหรับ ยวดยานทั้งสอง ที่ตรวจพบ โดยอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละตัว สรุปไว้ในตารางด้านล่าง

ยวดยาน	detector	เวลาเปิด (t_{on})	เวลาปิด (t_{off})
1	A	16	27
	B	25	36
2	A	141	154
	B	149	163

จงคำนวณหาค่าตัวแปรทางด้านจรรยาแบบมหภาคและจุลภาคทั้งหมดที่สามารถหาได้ พร้อมทั้งวาด กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของยวดยาน (คล้ายรูปที่ 5.13) ด้วย อยากทราบว่ายวดยานทั้งสองกำลังเร่ง ความเร็วหรือชะลอความเร็วขณะวิ่งผ่านอุปกรณ์ตรวจนับประเภทชุดคู่นี้

บรรณานุกรม

1. *Traffic Flow Fundamentals*, A.D. May, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1990.
2. Pipes L.A. (1953), *An Operational Analysis of Traffic Dynamics*, **Journal of Applied Physics**, Vol. 24, No. 3, pp. 274-287.
3. Forbes T.W., H.J. Zagorski, E.L. Holshouser and W.A. Deterline (1958), *Measurement of Driver Reactions to Tunnel Conditions*, Highway Research Board, *Proceedings*, Vol. 37, pp. 345-357.
4. Forbes T.W. (1963), *Human Factor Considerations in Traffic Flow Theory*, Highway Research Board, Record 15, HRB, Washington DC, pp. 60-66.
5. Forbes T.W. and M.E. Simpson (1968), *Driver and Vehicle Response in Freeway Deceleration Waves*, **Transportation Science**, Vol. 2, No. 1, pp. 77-104.
6. Herman R., E.W. Montroll, R. Potts and R.W. Rothery (1959), *Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car-Following*, **Operations Research**, Vol. 1, No. 7, pp. 89-106.
7. Gerlough D.L. and M.J. Huber (1975), *Traffic Flow Theory – A Monograph*, Transportation Research Board, Special Report 165, TRB, Washington DC, Chapter 6.

บทที่ 6 การวิเคราะห์แถวคอย

6.1 บทนำ

แถวคอย (queue) ในกระแสรถราจะเกิดขึ้นเมื่อความต้องการในการเดินทาง มีปริมาณสูงกว่าความจุของถนนหรือระบบการจราจร แถวคอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือแถวคอยประเภทอยู่กับที่ (stationary queue) เช่นแถวคอยจากการติดสัญญาณไฟแดงที่บริเวณทางแยก หรือแถวคอยที่เกิดจากการรอจ่ายค่าทางด่วน ณ บริเวณเก็บค่าผ่านทาง หรือแถวคอยจากอุบัติเหตุที่กีดขวางช่องจราจร อีกประเภทหนึ่งคือแถวคอยประเภทเคลื่อนที่ (moving queue) เช่นแถวคอยอันเนื่องมาจากรถบรรทุกพ่วงเคลื่อนตัวช้าขณะขึ้นเขาบนทางหลวง 2 ช่องจราจร ทำให้เกิดแถวคอยของขบวนรถประเภทอื่นตามหลังรถบรรทุกดังกล่าว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแถวคอยดังกล่าวไม่ได้หยุดนิ่ง แต่จะเคลื่อนที่ตามหลังรถบรรทุกอยู่ทุกขณะ ในการเกิดแถวคอยประเภทอยู่กับที่นั้น ยานพาหนะในแถวคอยจะต้องหยุดหรือหยุดเป็นระยะๆ ทำให้เกิดความล่าช้าในการเดินทาง ส่วนแถวคอยประเภทเคลื่อนที่ก็เช่นเดียวกัน ยานพาหนะในแถวคอยไม่สามารถใช้ความเร็วที่ต้องการได้ ต้องเสียเวลาขับรถตามหลังขบวนที่ช้ากว่า ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางเช่นกัน

ในการวิเคราะห์แถวคอยนั้น วิศวกรจราจรจะต้องใช้ข้อมูล ดังต่อไปนี้

- อัตราการมาถึงเฉลี่ย (mean arrival value)
- การกระจายตัวของเวลามาถึงของขบวนรถ (arrival distribution)
- อัตราการให้บริการเฉลี่ย (mean service value)
- การกระจายตัวของเวลาให้บริการ (service distribution)
- หลักการปล่อยขบวนรถออกจากแถวคอย (queue discipline)

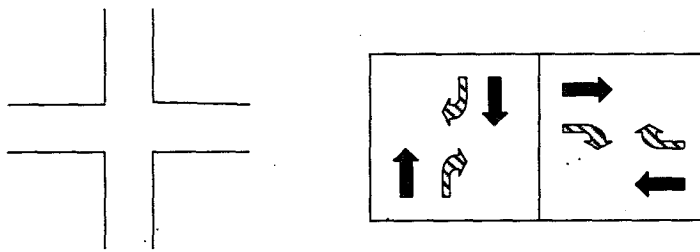
อัตราการมาถึงเฉลี่ย และอัตราการให้บริการ นิยมใช้ในรูปแบบอัตราไหล ซึ่งมีหน่วยเป็น คัน/ชม. ส่วนการกระจายตัวของเวลามาถึงของขบวนรถ และของเวลาให้บริการ อาจจะเป็นในรูปแบบการกระจายตัวแบบ deterministic หรือ probabilistic ก็ได้ สำหรับหลักการปล่อยแถวคอยนั้น มีใช้กันอยู่หลายประเภทด้วยกัน ที่นิยมกันมากที่สุดได้แก่ ระบบเข้าก่อน-ออกก่อน (first in-first out – FIFO) นั่นคือรถยนต์จะได้รับบริการตามการมาถึง คันที่มาถึงก่อนจะได้รับบริการก่อน ส่วนคันที่มาถึงทีหลัง ก็จะได้รับบริการทีหลัง ตัวอย่างเช่นการเข้าคิวจ่ายค่าผ่านทางที่ด่านเก็บเงิน ผู้ที่มาถึงก่อนจะเข้าคิว และได้จ่ายค่าธรรมเนียมก่อน ผู้ที่มาถึงทีหลังก็ต้องรอในแถวคอยจนถึงคิวตนเอง นอกจากระบบ FIFO แล้ว ก็ยังมีระบบเข้าก่อน-ออกหลัง (first in-last out – FILO) ที่เห็นกันอยู่เป็นประจำในการขึ้นลิฟต์ เพราะผู้ที่ขึ้นก่อนจะต้องเข้าไปข้างในสุด เพื่อให้ผู้อื่นเข้ามาใช้ได้ด้วย ในการออกจากลิฟต์นั้น จะต้องออกที่ประตูเดิมซึ่งจะต้องให้ผู้ที่อยู่บริเวณด้านหน้าประตู (เข้าลิฟต์ทีหลัง) ออกไปก่อน ผู้ที่อยู่ด้านใน (เข้าลิฟต์ก่อน) จึงจะสามารถออกได้ นอกจากนี้ ยังมีอีกระบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า ระบบการให้บริการแบบสุ่ม (served in random order – SIRO) ซึ่งไม่ค่อยมีให้เห็นในชีวิตประจำวันมากนัก ในระบบนี้ จะเรียกผู้ให้บริการแถวคอยที่อยู่ในแถวคอยโดยไม่คำนึงถึงลำดับการมาถึงของขบวนรถ

การวิเคราะห์แถวคอยมีทั้งแบบ deterministic และ probabilistic ในบทนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการวิเคราะห์แบบ deterministic โดยละเอียด เพราะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการเรียนรู้การวิเคราะห์แถวคอย ผู้ที่สนใจวิธีการวิเคราะห์แถวคอยแบบ probabilistic ควรไปศึกษาความรู้เพิ่มเติมจากหนังสือ Traffic Flow Fundamentals ของ Adolf D. May

6.2 การวิเคราะห์แถวคอย

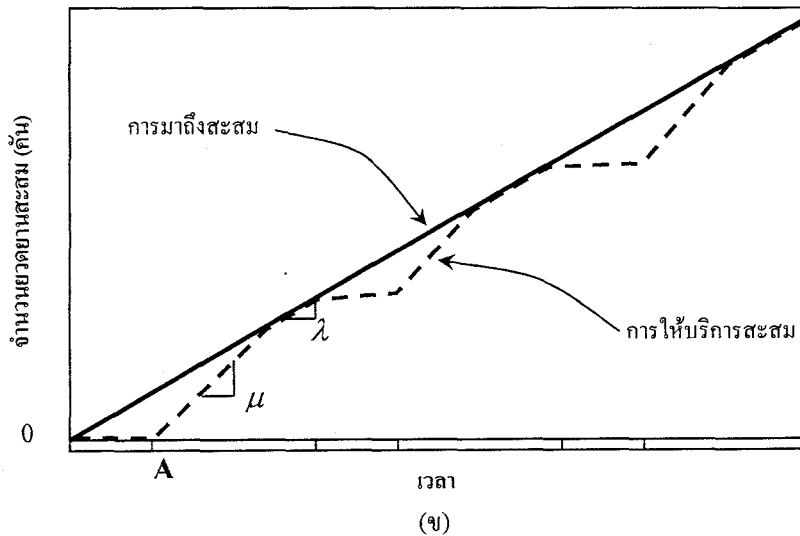
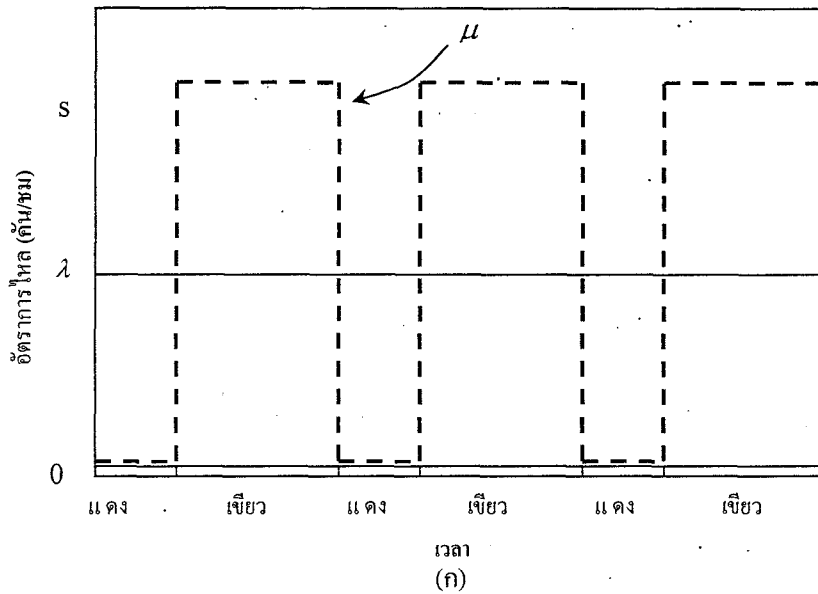
ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์แถวคอย โดยใช้ตัวอย่างของการเกิดแถวคอยบริเวณทางแยกสัญญาณไฟกำลังติดสัญญาณไฟแดง ทั้งนี้เพราะผู้อ่านส่วนใหญ่ จะคุ้นเคยกับเหตุการณ์เหล่านี้มาเป็นอย่างดี

สมมติสถานการณ์ที่สี่แยกแห่งหนึ่ง ซึ่งมีการให้จังหวะสัญญาณไฟจราจร แบบ 2 จังหวะ นั่นคือจังหวะแรก จะให้ด้านที่มุ่งเหนือ และมุ่งใต้ไปพร้อมกัน และจังหวะที่สอง จะให้ด้านมุ่งตะวันออก และมุ่งตะวันตกไปพร้อมกัน ถือว่าครบหนึ่งรอบสัญญาณไฟ จากนั้นจึงกลับไปเริ่มที่จังหวะสัญญาณไฟแรกอีกครั้ง ทั้งนี้ จะสมมติว่าปริมาณการจราจรที่ผ่านเข้ามา ไม่เกินความจุของทางแยก นั่นคือ เมื่อด้านใดได้รับสัญญาณไฟเขียว จะสามารถปล่อยขบวนยานในแถวคอยได้ทั้งหมด โดยที่ไม่มีขบวนติดค้างต้องรอจังหวะสัญญาณไฟเขียวอีกรอบหนึ่ง



รูปที่ 6-1 รูปทางแยก และสัญญาณไฟจราจร

การวิเคราะห์ความยาวแถวคอยสำหรับทางด้านหนึ่งของทางแยก แสดงใน รูปที่ 6-2 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย อัตราการมาถึง (arrival rate - λ) ซึ่งแสดงในหน่วยคัน/ชม. กำหนดว่ามีค่าคงที่สม่ำเสมอ ตลอดช่วงเวลาวิเคราะห์ ส่วนอัตราการให้บริการ (service rate - μ) นั้น จะมีความแปรผันอยู่ระหว่างค่าศูนย์ กับค่าอัตราการไหลอิมตัว จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อได้รับสัญญาณไฟแดง และมีค่ามากกว่าศูนย์ และไม่สูงกว่าอัตราการไหลอิมตัว (saturation flow rate) ขณะที่ได้รับสัญญาณไฟเขียว อนึ่ง “อัตราการให้บริการจะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลอิมตัวในกรณีที่มีแถวคอยเกิดขึ้นเท่านั้น ส่วนในกรณีที่ไม่มีแถวคอยเกิดขึ้น อัตราการให้บริการจะมีค่าเท่ากับอัตราการมาถึง” สมมติว่าในกรณีศึกษาที่เราพิจารณาการจราจรบนขาใดขาหนึ่งของทางแยก และสมมติว่าใช้หลักการการปล่อยแถวคอย แบบระบบเข้าก่อน-ออกก่อน (FIFO)



รูปที่ 6-2 การวิเคราะห์แถวคอยที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจร

รูปที่ 6-2 (ข) แสดงรูปการสะสมตัวของขวยานตามระยะเวลา ซึ่งก็คือ พื้นที่ใต้กราฟสะสมของรูปที่ 6-2 (ก) นั่นเอง กล่าวคือ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง เส้นการมาถึงของรูปที่ 6-2 (ข) จะแสดงถึงพื้นที่ใต้กราฟสะสมของอัตราการมาถึงจากรูปที่ 6-2 (ก) ส่วนเส้นการให้บริการจะแสดงพื้นที่ใต้กราฟของอัตราการให้บริการ หรืออีกนัยหนึ่ง ความชันของเส้นต่างๆ บนรูปที่ 6-2 (ข) จะเท่ากับอัตราการไหลแสดงในรูปที่ 6-2 (ก) ในช่วงเริ่มต้นของการวิเคราะห์ ($t = 0$) การสะสมตัวของขวยานจะเริ่มต้นจากศูนย์ และสะสมต่อเนื่องไปตามเวลาที่เดินไปเรื่อยๆ

ในช่วงที่ได้รับสัญญาณไฟแดง ขวยานทุกคันต้องหยุดรอสัญญาณไฟที่ทางแยก ไม่สามารถฝ่าไฟแดงได้ อัตราการให้บริการในขณะนั้น จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจำนวนขวยานที่ผ่านทางแยกก็ยังคงเป็นศูนย์ตลอดเวลาที่ ได้รับสัญญาณไฟแดง อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาดังกล่าว ยังคงมีขวยานวิ่งเข้ามาในบริเวณทางแยกด้วยอัตราการมาถึง λ คั่นต่อชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง และสะสมตัวกลายเป็นแถวคอยขึ้น ในระหว่างที่ได้รับสัญญาณไฟแดงนี้ (จุด 0

- A ในรูปที่ 6.2 (ข) จะเห็นได้ว่าเส้นแสดงขบวนมาถึงสะสม (arrivals) ได้เริ่มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราคงที่เท่ากับ λ ขณะที่เส้นแสดงขบวนที่ให้บริการสะสม (departure) จะเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา ทันทีที่สัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นสีเขียว เมื่อมีแถวคอยสะสมตัวอยู่นั้น อัตราการให้บริการของทางแยกจะเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น μ คันต่อชั่วโมงทันที และอัตราการให้บริการจะยังคงที่เท่ากับ μ ตลอดที่แถวคอยยังสลายตัวไปไม่หมด หลังจากที่แถวคอยได้สลายตัวไปแล้วนั้นอัตราการให้บริการจะลดระดับลงจาก μ เหลือเท่ากับ อัตราการมาถึงในขณะนั้น ซึ่งในที่นี้คือ λ คันต่อชั่วโมงเท่านั้น จนกระทั่งเมื่อสัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดงอีกครั้ง ก็จะมีการสะสมของแถวคอยขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เกิดขึ้นอย่างนี้เป็นประจำทุกรอบสัญญาณไฟ

จากรูปที่ 6-2 (ข) จะเห็นว่ามิรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมเกิดขึ้น ซึ่งมีเส้นแสดงขบวนมาถึงสะสมอยู่ด้านบน และมีเส้นแสดงขบวนที่ให้บริการสะสม อยู่ทางด้านล่างทั้งสองด้าน รูปร่างสามเหลี่ยมที่เกิดขึ้นนี้ แสดงถึงการสะสมและการสลายตัวของแถวคอย ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ 5 ตัว ได้แก่

ระยะเวลาการเกิดแถวคอย (time duration of queue) - t_q

จำนวนของขบวนที่สะสมอยู่ในแถวคอย (number of vehicle experiencing queue) - N_q

ความยาวแถวคอย (queue length) - Q

ความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนแต่ละคัน (individual delay) - d

ความล่าช้ารวมที่เกิดขึ้นในระบบ (TD)

ระยะเวลาการเกิดแถวคอย (t_q) ก็คือความยาวของ “สามเหลี่ยม” ที่วัดในแนวนอนกับแกนเวลา (แกน X) จากภาพจะเห็นได้ว่าความยาวแถวคอยเริ่มก่อตัวขึ้น เมื่อได้รับสัญญาณไฟแดง และจะไปสิ้นสุดหลังจากที่ด้านนั้นได้รับสัญญาณไฟเขียวแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งแถวคอยสลายตัวไป ค่านี้มีหน่วยเป็นวินาที และมีขอบเขตระหว่างระยะสัญญาณไฟแดง กับรอบสัญญาณไฟ (ระยะสัญญาณไฟแดงและไฟเขียวรวมกัน) นอกจากระยะเวลาการเกิดแถวคอย (t_q) แล้วยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถบอกถึงสภาพการติดขัดของทางแยกได้ นั่นคือ สัดส่วนของเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น (Pt_q) ซึ่งมีสมการการวิเคราะห์ดังนี้

$$\lambda t_q = \mu(t_d - r)$$

$$\lambda t_q = \mu t_q - \mu r$$

$$t_q (\mu - \lambda) = \mu r$$

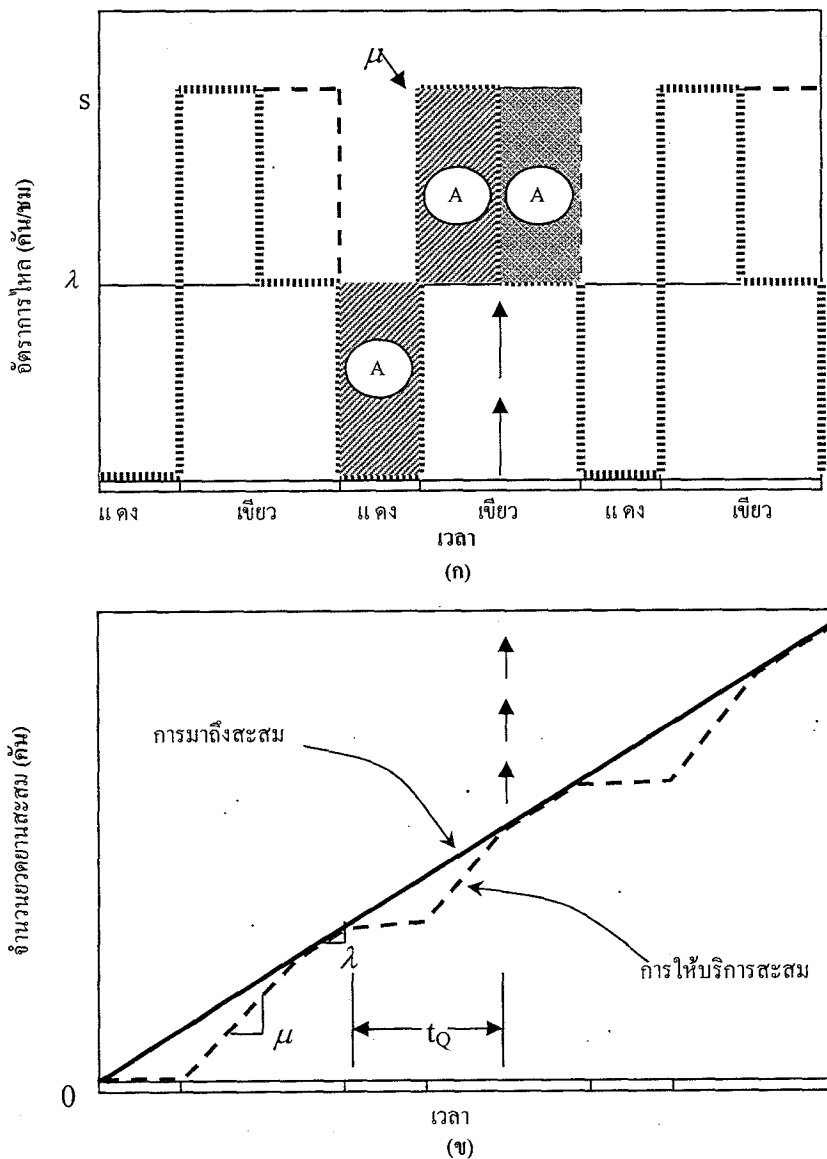
$$t_q = \frac{\mu r}{(\mu - \lambda)} \quad (6-1)$$

$$Pt_q = \frac{\mu r}{(\mu - \lambda)} \quad (6-2)$$

โดยที่ λ - อัตราการมาถึงเฉลี่ย (คัน/ชม.)

- μ - อัตราการให้บริการเฉลี่ย (คัน/ชม.)
- t_0 - ระยะเวลาการเกิดแถวคอย (วินาที)
- r - ระยะเวลาสัญญาณไฟแดงประสิทธิผล (วินาที)
- C - ระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร (วินาที)
- Pt_0 - สัดส่วนของเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น

ระยะเวลาการเกิดแถวคอย จะช่วยให้วิศวกรจราจรเข้าใจสภาพการก่อตัวและการสลายตัวของแถวคอย และช่วยในการประเมินระดับความอึดตัวของด้านที่กำลังวิเคราะห์อยู่ รูปที่ 6-3 จะคล้ายกับรูปที่ 6-2 แต่จะมีข้อมูลที่มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 6-3 การวิเคราะห์แถวคอยที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจรอย่างละเอียด

ขณะที่แถวคอยสลายตัวไปในรอบสัญญาณไฟที่สอง ในรูป 6-3 (ข) นั้น เมื่อลากเส้นสมมติต่อขึ้นไปทีรูป (ก) จะพบว่าพื้นที่ที่แรเงาไว้สามพื้นที่ด้วยกัน พื้นที่ใต้กราฟ A1 จะแสดงถึงจำนวนขบวนที่สะสมในช่วงสัญญาณไฟแดง ส่วนพื้นที่ใต้กราฟ A2 จะแสดงถึงจำนวนขบวนที่ค่อยๆ สลายตัวออกจากแถวคอย เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเกิดแถวคอยแล้ว อัตราการให้บริการจะลดลงมาเท่ากับอัตราการมาถึง และช่วงนี้จะไม่ปรากฏว่ามีแถวคอยเกิดขึ้น เพราะขบวนที่เข้ามาถึงในช่วงนี้ จะได้รับการบริการในทันที ไม่มีความล่าช้าเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ A3 นี้ น่าสนใจมาก เป็นพื้นที่ที่สมมติที่แสดงถึงจำนวนขบวนที่สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยที่สัญญาณไฟยังสามารถรองรับได้โดยไม่มีปัญหาแถวคอยสะสมตัวมากเกินไป (จนส่งผลให้ท้ายแถวต้องติดสัญญาณไฟจราจรมากกว่าหนึ่งรอบ)

จำนวนของขบวนที่สะสมอยู่ในแถวคอย ก็คือความสูงของสามเหลี่ยมที่วัดในแนวตั้งฉากกับแกนเวลา (แกน X) ขบวนที่มาถึงคันแรกในแถวคอย หลังจากทีสัญญาณไฟจราจรเพิ่งเปลี่ยนเป็นสีแดงจะเกิดความล่าช้า (delay) สูงที่สุด เพราะต้องติดรอสัญญาณไฟเป็นเวลานาน ขบวนคันต่อๆ มา ก็จะเกิดความล่าช้าจากการหยุดจอดรอในแถวคอย ลดลงมาเป็นลำดับ จำนวนของขบวนที่สะสมอยู่ในแถวคอยมีหน่วยเป็นคัน และมีขอบเขตอยู่ระหว่างค่า λr และ λC นอกจากค่า N_Q แล้ว ก็ยังมีตัวแปรอีกสองตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์แถวคอย ได้แก่ จำนวนขบวนที่เข้ามาทั้งหมดในแต่ละรอบสัญญาณไฟ (N) และสัดส่วนของขบวนที่ติดในแถวคอย (PN_Q) สมการที่ใช้ในการคำนวณตัวแปรเหล่านี้ มีดังนี้

$$N_Q = \frac{\lambda t_Q}{3600} \quad (6-3)$$

$$N = \frac{\lambda C}{3600} \quad (6-4)$$

$$PN_Q = \frac{100 t_Q}{C} \quad (6-5)$$

โดยที่ N_Q – จำนวนของขบวนที่สะสมอยู่ในแถวคอย (คัน)

N – จำนวนขบวนที่เข้ามาทั้งหมดในแต่ละรอบสัญญาณไฟ (คัน)

PN_Q – สัดส่วนของขบวนที่ติดในแถวคอย

ความยาวของแถวคอย ก็คือ ระยะความสูงภายในสามเหลี่ยมที่วัดในแนวตั้งฉากกับแกนเวลา (แกน X) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยขณะที่สัญญาณไฟได้เริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดง แถวคอยจะค่อยๆ เริ่มสะสมตัวยาวขึ้นเรื่อยๆ (สังเกตจากความสูงของสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เดินไป) จนมาถึงขณะที่สัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียว (หรือเวลาสิ้นสุดสัญญาณไฟแดง) จำนวนขบวนที่สะสมในแถวคอย จะมีจำนวนมากที่สุด จากนั้น แถวคอยก็จะค่อยๆ ลดลง (สังเกตจากความสูงของสามเหลี่ยมค่อยๆ ลดลง) จนสลายตัวไปในที่สุด และจะเกิดการสะสมตัวของแถวคอยขึ้นอีกครั้งเมื่อได้รับสัญญาณไฟแดงในรอบถัดไป เป็นเช่นนี้อยู่เรื่อยๆ สำหรับความยาวแถวคอยนั้น จะมีตัวแปร 3 ตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์แถวคอย นั่นคือ ความยาวแถวคอยสูงสุด (maximum queue length – Q_m) ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอยในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น (average queue length while queue is

present - Q_{qa}) และค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอย (average queue length - Q_m) ซึ่งทั้งสามตัวแปรสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_m = \frac{\lambda r}{3600} \quad (6-6)$$

$$Q_{qa} = \frac{Q_M}{2} = \frac{\lambda r}{7200} \quad (6-7)$$

$$Q_a = \frac{Q_m t_Q}{2C} \quad (6-8)$$

โดยที่ Q_m - ความยาวแถวคอยสูงสุด (คัน)

Q_{qa} - ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอยในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น (คัน)

Q_a - ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอย (คัน)

ความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนแต่ละคัน (วินาที) ก็คือระยะความกว้างภายในสามเหลี่ยมที่วัดในแนวนอนกับแกนเวลา (แกน X) ซึ่งจะแตกต่างกันไปในขบวนแต่ละคัน จากภาพจะเห็นได้ว่า ขบวนคันแรกของแถวคอยจะเกิดความล่าช้ามากที่สุด ขณะที่ขบวนคันต่อไป จะค่อยๆ มีความล่าช้าลดลงไปเรื่อยๆ จนในที่สุดแถวคอยจะสลายตัวไป ขบวนที่มาถึงทางแยกหลังจากนี้ ก็จะไม่เกิดความล่าช้าขึ้นแต่อย่างใด จนกระทั่งเมื่อสัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นสีแดงอีกครั้งหนึ่ง ขบวนคันแรกที่มาถึงคันแรก ก็จะต้องจอดรอสัญญาณไฟที่เส้นหยุดและเกิดความล่าช้ามากที่สุด ขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการวิเคราะห์ความล่าช้าในแถวคอย จะใช้ตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ ความล่าช้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขบวนแต่ละคัน (d_M) ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น (d_{Qa}) และค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนในระบบ (d_a) ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$d_M = r \quad (6-9)$$

$$d_{Qa} = \frac{r}{2} \quad (6-10)$$

$$d_a = \frac{r t_Q}{2C} \quad (6-11)$$

โดยที่ d_M - ความล่าช้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขบวนแต่ละคัน (วินาที)

d_{Qa} - ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น (วินาที)

d_a - ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนในระบบ (วินาที)

ความล่าช้ารวมที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบสัญญาณไฟ คือพื้นที่รวมทั้งหมดภายในสามเหลี่ยม มีหน่วยเป็นคัน-วินาที สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการใดในสามสมการนี้ได้

$$TD = \frac{r N_Q}{2} \quad (6-12)$$

$$TD = \frac{t_q Q_M}{2} \quad (6-13)$$

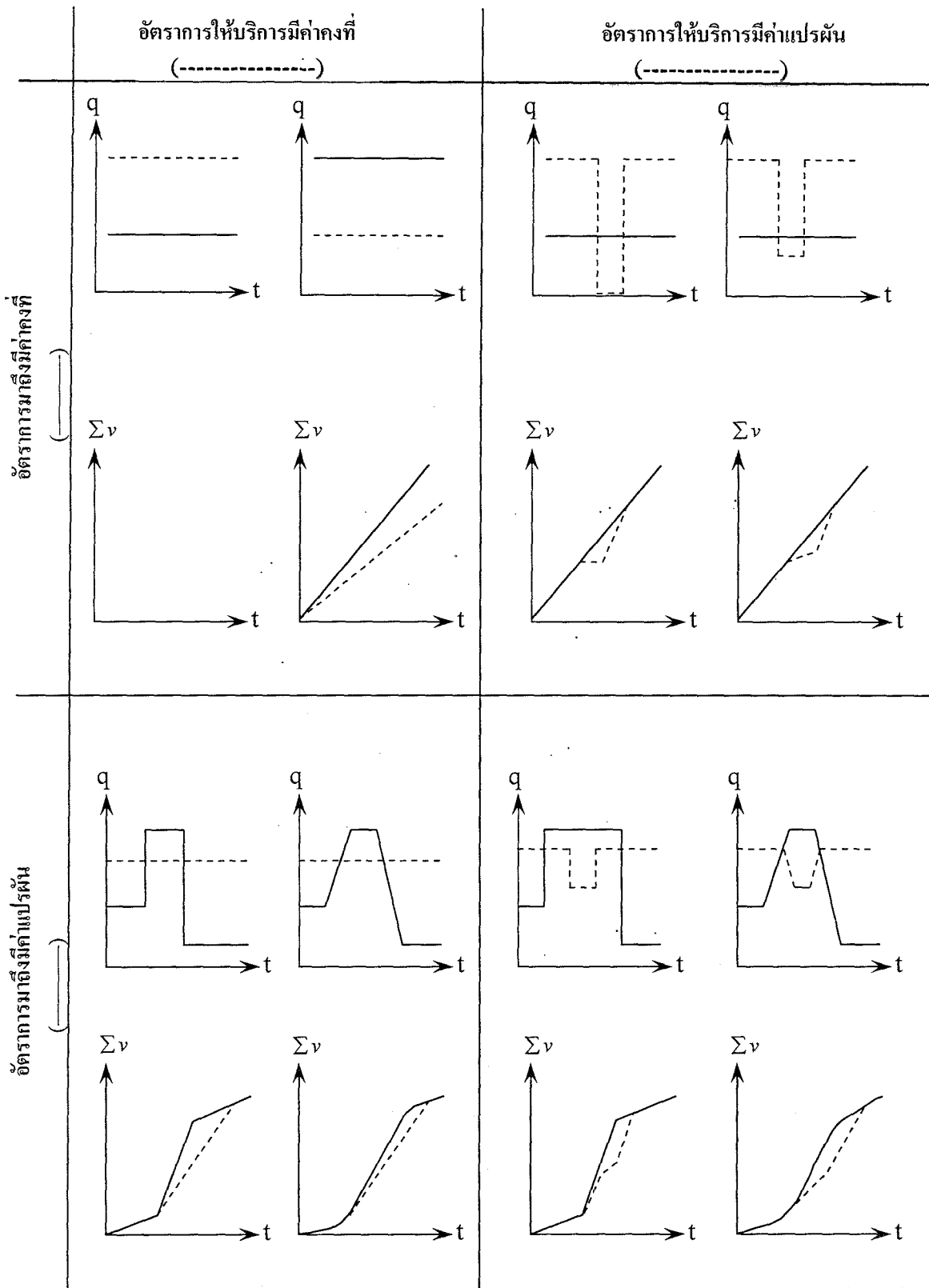
$$TD = d_a N \quad (6-14)$$

โดยที่ TD – ความล่าช้ารวม (คัน-วินาที)

6.3 การเกิดแถวคอยรูปแบบต่างๆ

การเกิดแถวคอย มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ตามลักษณะการแปรผันของอัตราการมาถึง และอัตราการให้บริการ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์แถวคอยบริเวณทางแยกในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นการวิเคราะห์แบบอัตราการมาถึงมีค่าคงที่ และอัตราการให้บริการมีค่าแปรผันตามเวลา

รูปที่ 12-4 แสดงรูปแบบการเกิดแถวคอยต่างๆ 8 แบบ ซึ่งสามารถรวมได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ กลุ่มแรก (4 รูปแบบทางมุมบนซ้าย) เป็นกลุ่มที่อัตราการมาถึง และอัตราการให้บริการมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แบบแรกคือสถานการณ์ที่อัตราการให้บริการมีค่าสูงกว่าอัตราการมาถึง ยวดยานทุกคันที่มาถึงจะได้รับบริการทันที โดยไม่มีความล่าช้าเกิดขึ้น สถานการณ์ดังกล่าวจะไม่มีแถวคอยเกิดขึ้น ในขณะที่แบบที่สอง มีอัตราการให้บริการน้อยกว่าอัตราการมาถึง ในสถานการณ์เช่นนี้ แถวคอยจะสะสมตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุด โดยความยาวแถวคอย จะเท่ากับผลคูณระหว่างระยะเวลา กับ ผลต่างระหว่างอัตราการมาถึงและอัตราการให้บริการ



รูปที่ 6-4 การวิเคราะห์แถวคอยแบบ deterministic รูปแบบต่างๆ

กลุ่มที่สอง (มุมบนขวา) เป็นประเภทที่มีอัตราการมาถึงแบบคงที่ ขณะที่อัตราการให้บริการมีความแปรผันตามเวลา ในสภาพเช่น จะมีบางช่วงเวลาที่อัตราการให้บริการต่ำกว่าอัตราการมาถึง (แถวคอยสะสมตัว) และบางช่วงเวลาที่อัตราการให้บริการสูงกว่าอัตราการมาถึง (แถวคอยสลายตัว) รูปทางซ้ายมือ จะแสดงเหตุการณ์คล้ายกับการจ่อรอสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกตั้งที่อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนรูปทางขวามือ จะแสดงสภาพการณ์ขณะเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งเป็นเหตุให้อัตราการให้บริการของถนนลดลงชั่วขณะ แต่จะไม่ลดลงถึงศูนย์

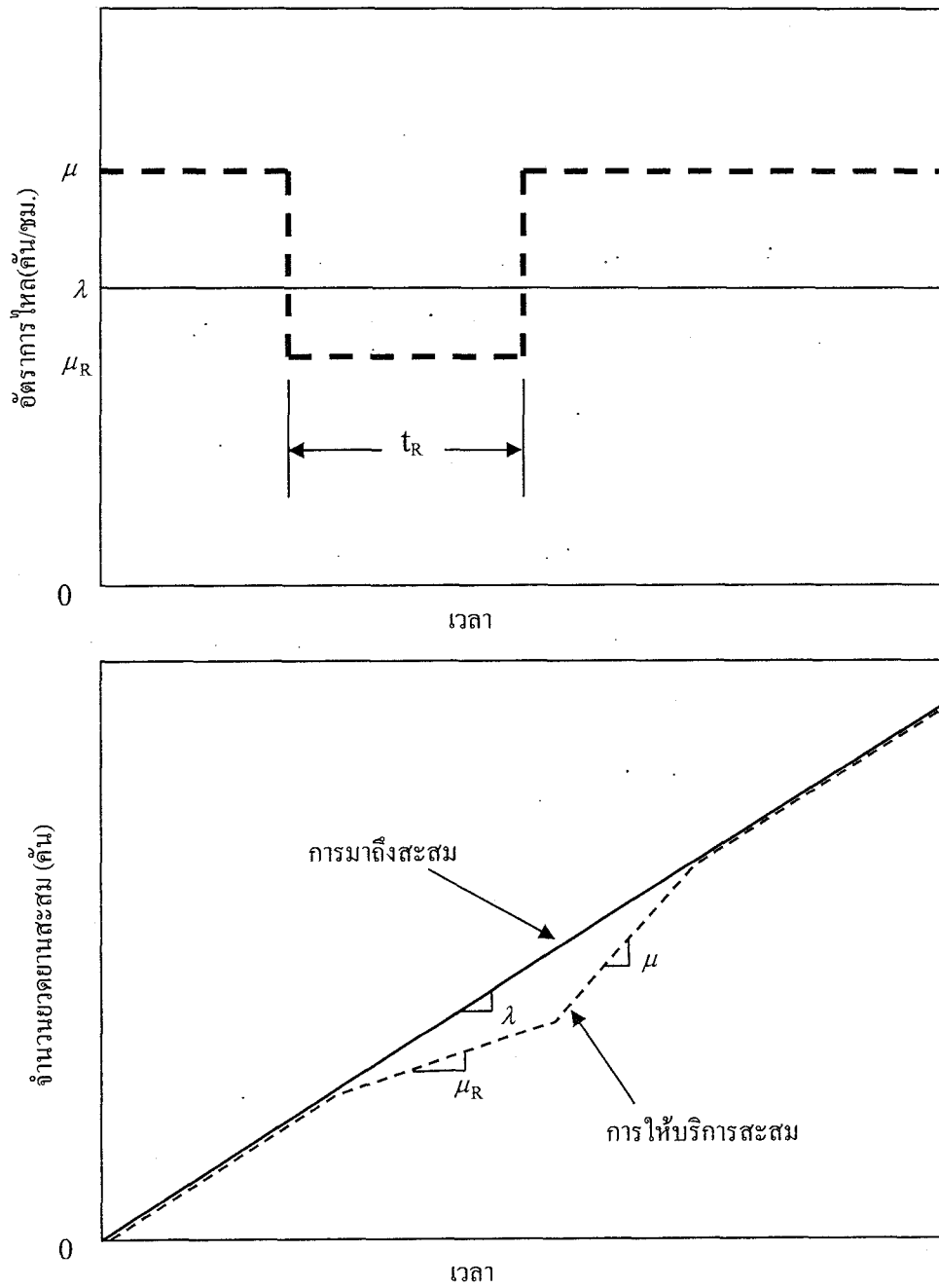
กลุ่มที่สาม (มุมล่างซ้าย) เป็นประเภทที่อัตราการมาถึงมีความแปรผันตามเวลา ขณะที่อัตราการให้บริการมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ในการสะสมและสลายตัวของความยาวแถวคอยนั้น อัตราการมาถึงจะต้องสูงกว่าอัตราการให้บริการในบางช่วงเวลา (แถวคอยสะสมตัว) ในขณะที่บางช่วงเวลา อัตราการมาถึงจะน้อยกว่าอัตราการให้บริการ (แถวคอยสลายตัว) ในภาพได้จำลองสถานการณ์ 2 แบบ นั่นคือการเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงเป็นแบบขั้นบันได และการเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงแบบต่อเนื่อง

กลุ่มสุดท้าย (มุมล่างขวา) เป็นประเภทที่อัตราการมาถึง และอัตราการให้บริการมีความแปรผันตามเวลาทั้งคู่ ในการสะสมและสลายตัวของความยาวแถวคอย อัตราการมาถึงจะต้องสูงกว่าอัตราการให้บริการในบางช่วงเวลา (แถวคอยสะสมตัว) และมีบางช่วงเวลาที่อัตราการมาถึง น้อยกว่าอัตราการให้บริการ (แถวคอยสลายตัว) ในภาพได้จำลองสถานการณ์ 2 แบบ นั่นคือประเภทที่การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงและอัตราการให้บริการเป็นแบบขั้นบันได และประเภทที่การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงและอัตราการให้บริการเป็นแบบต่อเนื่อง

6.4 การเกิดแถวคอยในกรณีที่อัตราการให้บริการแปรผันตามเวลา

การเกิดแถวคอย ในกรณีที่อัตราการให้บริการแปรผันตามเวลา จะพบเห็นได้ทั่วไปในกรณีเช่นที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟ หรือที่บริเวณจุดตัดระหว่างถนนกับทางรถไฟ ซึ่งจะมีการหยุดรถยนต์เพื่อให้ขบวนรถไฟผ่านเป็นระยะๆ หรือ จะเป็นการเกิดอุบัติเหตุกีดขวางช่องทางจราจร เป็นต้น การเกิดแถวคอยเหล่านี้ ยังสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กรณีที่เกิดขึ้นเป็นประจำสม่ำเสมอ เช่นการเปิดสัญญาณไฟเขียว-ไฟแดงที่ทางแยกสัญญาณไฟ และกรณีที่ไม่ได้เกิดขึ้นเป็นประจำ เช่น การหยุดการจราจรบนท้องถนนเพื่อให้ขบวนรถไฟผ่านไปก่อน หรือการเกิดอุบัติเหตุ สำหรับหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงกรณีการเกิดอุบัติเหตุ . .

รูปที่ 6-5 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแถวคอยอันเนื่องมาจากมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นบนท้องถนน ในตัวอย่างนี้ สมมติว่าอัตราการมาถึงมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาการวิเคราะห์เท่ากับ λ คันต่อชั่วโมง ในสภาพเหตุการณ์ปกติ ถนนดังกล่าวจะมีอัตราการให้บริการเท่ากับ μ คันต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่า λ (อัตราการมาถึง) จึงไม่มีแถวคอยเกิดขึ้นในสภาพปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีอุบัติเหตุเกิดขึ้น กีดขวางพื้นที่ผิวการจราจร ถนนในบริเวณดังกล่าวก็จะมีอัตราการให้บริการที่ลดลง เหลือเท่ากับ μ_R คันต่อชั่วโมง เท่านั้น ซึ่ง μ_R นี้มีค่าน้อยกว่าค่า λ คันต่อชั่วโมง ยังผลให้แถวคอยสะสมตัวขึ้น เมื่อเจ้าหน้าที่จัดการกับอุบัติเหตุและเคลียร์พื้นที่เสร็จสิ้น ถนนก็จะกลับสู่สภาพปกติ นั่นคือ มีอัตราการให้บริการเท่ากับ μ คันต่อชั่วโมงดังเดิม และแถวคอยที่เกิดขึ้นจะค่อยๆ สลายตัวในที่สุด สมมติว่าเจ้าหน้าที่ใช้เวลาในการจัดการกับอุบัติเหตุเท่ากับ t_R ชั่วโมง และให้ใช้หลักการการปล่อยแถวคอยก็คือแบบเข้าก่อน-ออกก่อน (FIFO) การวิเคราะห์จะเป็นดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 การวิเคราะห์แถวคอยจากการเกิดอุบัติเหตุ

รูปที่ 6-5 (ข) แสดงภาพการสะสมตัวของขวยยานในบริเวณดังกล่าว จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกที่สภาพการณ์ปรกตินั้น อัตราการให้บริการมีค่าสูงกว่าอัตราการมาถึงของขวยยาน ดังนั้น จึงไม่เกิดแถวคอยขึ้น ขวยยานที่ผ่านเข้ามาในระบบ จะสามารถเคลื่อนตัวผ่านออกไปได้ทั้งหมด อนึ่ง โปรดสังเกตรว่า ในกรณีที่อัตราการมาถึงของขวยยานต่ำกว่าอัตราการให้บริการสูงสุดนั้น อัตราการให้บริการจริงในขณะนั้น จะลดลงเหลือเท่ากับอัตราการมาถึงเท่านั้น ในภาพ จะเห็นว่า เส้นการมาถึงสะสม กับเส้นการให้บริการสะสม จะทับกันอยู่ในช่วงแรก ก่อนการเกิดอุบัติเหตุ

เมื่อมีอุบัติเหตุเกิดขึ้น อัตราการให้บริการของถนน ลดลงเหลือเท่ากับ μ_R (สังเกตดูว่าเส้นการให้บริการมีความชันลดลง) ในขณะที่อัตราการมาถึงของขวยยานยังคงมีค่าคงที่ เท่ากับ λ คัน/ชั่วโมงซึ่งมีค่าสูงกว่า μ_R ช่วงนี้ แถวคอยจะเริ่มสะสมตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะถนนไม่สามารถรองรับความต้องการการเดินทางได้อย่างเพียงพอ เมื่อเวลา t_R ผ่านไป เจ้าหน้าที่เคลียร์อุบัติเหตุเสร็จเรียบร้อยแล้ว อัตราการให้บริการของถนนก็กลับคืนสู่สภาพปกติ อย่างไรก็ตามในขณะนั้น มีแถวคอยเกิดขึ้นอยู่ ดังนั้นอัตราการให้บริการจึงมีเพิ่มขึ้นเป็นค่าสูงสุด ซึ่งเท่ากับ μ คันต่อชั่วโมง (สังเกตดูว่าความชันของเส้นการให้บริการมีความชันมากขึ้น) จะเห็นได้ว่า ในช่วงดังกล่าวแถวคอยจะค่อยๆ เริ่มสลายตัว จนกระทั่งเมื่อเส้นการให้บริการสะสม ตัดกับเส้นการมาถึงสะสม แถวคอยที่เกิดขึ้นก็จะสลายตัวหมดสิ้น เหตุการณ์ก็จะกลับกลายเป็นเหมือนช่วงเริ่มต้นก่อนเกิดอุบัติเหตุ เหตุการณ์เช่นนี้ สามารถอธิบายสภาพเหตุการณ์จริง ที่หลังจากเคลียร์พื้นที่อุบัติเหตุแล้ว การจราจรก็จะยังคงติดขัดต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากจะต้องพยายามจัดการกับแถวคอยรถยนต์ที่ติดสะสมก่อนที่เหตุการณ์จะกลับสู่สภาพการณ์ปรกติ

จะเห็นว่า มีรูปสามเหลี่ยมเกิดขึ้นจาก เส้นการมาถึงสะสมเป็นขอบด้านบน และเส้นการให้บริการสะสมเป็นขอบด้านล่าง 2 ด้าน การคำนวณตัวแปรต่างๆ ในการวิเคราะห์แถวคอย แสดงในตารางที่ 6-1 ซึ่งจะแสดงการคำนวณในสองกรณี ได้แก่ การเกิดแถวคอยที่ทางแยกสัญญาณไฟจราจร และการเกิดอุบัติเหตุ อนึ่ง โปรดระวังเรื่องหน่วย เพราะทั้งสองกรณี จะใช้หน่วยเวลาที่แตกต่างกัน กล่าวคือสำหรับสัญญาณไฟจราจร จะใช้หน่วยเท่ากับวินาที และ คัน-วินาที ส่วนกรณีการเกิดอุบัติเหตุ จะใช้หน่วยเท่ากับนาทีก่อน หรือคัน-ชั่วโมง

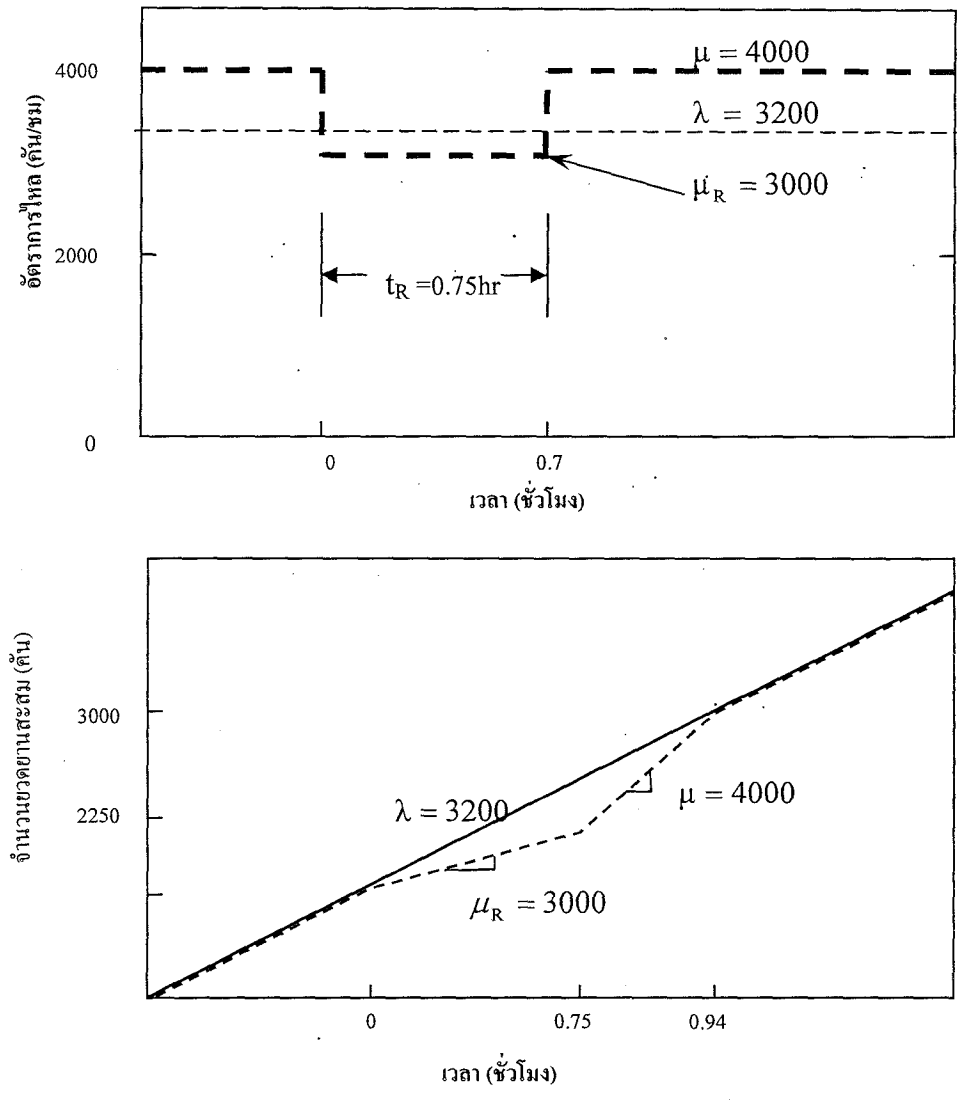
ตารางที่ 6-1 สมการวิเคราะห์การเกิดแถวคอย ใน 2 กรณี สำหรับทางแยกสัญญาณไฟ และสำหรับการเกิดอุบัติเหตุ

พารามิเตอร์	ทางแยก สัญญาณไฟ	กรณี อุบัติเหตุ
ระยะเวลาการเกิดแถวคอย, t_Q (วินาที หรือ ชั่วโมง) ^a	$\frac{\mu r}{\mu - \lambda}$	$\frac{t_R(\mu - \mu_R)}{\mu - \lambda}$
สัดส่วนของเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น, Pt_Q (ร้อยละ)	$\frac{100t_Q}{C}$	—
จำนวนของขบวนที่สะสมอยู่ในแถวคอย, N_Q (คัน)	$\frac{\lambda t_Q}{3600}$	λt_Q
จำนวนขบวนที่เข้ามาทั้งหมดในแต่ละรอบสัญญาณไฟ, N (คัน)	$\frac{\lambda t_Q}{3600}$	—
สัดส่วนของขบวนที่ติดในแถวคอย, PN_Q (ร้อยละ)	$\frac{100t_Q}{C}$	—
ความยาวแถวคอยสูงสุด (คัน), Q_M (คัน)	$\frac{\lambda r}{3600}$	$t_R(\lambda - \mu_R)$
ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอยในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น, \bar{Q}_Q (คัน)	$\frac{\lambda r}{7200C}$	$\frac{t_R(\lambda - \mu_R)}{2}$
ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอย, \bar{Q} (คัน)	$\frac{\lambda r t_Q}{7200C}$	—
ความล่าช้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขบวนแต่ละคัน, d_M (วินาที หรือ นาที) ^a	r	$\frac{60t_R(\lambda - \mu_R)}{\lambda}$
ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น, \bar{d}_Q (วินาที หรือ นาที) ^a	$\frac{r}{2}$	$\frac{30t_R(\lambda - \mu_R)}{\lambda}$
ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับขบวนในระบบ, \bar{d} (วินาที)	$\frac{r t_Q}{2C}$	—
ความล่าช้ารวมที่เกิดขึ้น, TD (คัน-วินาที หรือ คัน-ชั่วโมง) ^a	$\frac{r t_Q \lambda}{2}$	$\frac{t_R t_Q (\lambda - \mu_R)}{2}$

^a ใช้หน่วยเวลาเป็น วินาที สำหรับทางแยกสัญญาณไฟ และ เป็นนาที หรือ ชั่วโมง สำหรับกรณีเกิดอุบัติเหตุ

ตัวอย่างการคำนวณ: ทางหลวงสายหนึ่ง ขนาดกว้าง 4 ช่องจราจร (2 ช่องจราจรต่อทิศทาง) มีความจุจราจรประมาณ 4,000 คัน/ชั่วโมง ในแต่ละทิศทาง โดยปกติแล้ว ในช่วงเวลากลางวัน ความต้องการการเดินทางบนทางหลวงสายนี้ คิดเป็นร้อยละ 80 ของความจุของทางหลวง พบว่าทางหลวงดังกล่าวเกิดอุบัติเหตุกีดขวางช่องจราจรอยู่เป็นประจำ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้ว อุบัติเหตุแต่ละครั้ง จะส่งผลให้ความจุของทางหลวงดังกล่าวลดลงเหลือเพียง

3,000 คันชม. และใช้เวลาประมาณ 45 นาที ในการเคลียร์พื้นที่ เนื่องจากอุบัติเหตุได้เกิดขึ้นเป็นประจำ ส่งผลให้เกิดสภาพการจราจรติดขัดอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาความล่าช้าในการเดินทาง ปัญหามลพิษ และปัญหาการสิ้นเปลืองน้ำมันโดยใช่เหตุ ซึ่งมีความคิดริเริ่มโครงการหน่วยกู้ภัยพิเศษขึ้นมา ซึ่งโครงการดังกล่าวจะช่วยลดระยะเวลาการเคลียร์พื้นที่ลง จากเดิมประมาณ 45 นาที เหลือเพียง 15-30 นาทีเท่านั้น โครงการดังกล่าวจะช่วยบรรเทาสภาพการจราจรติดขัด และลดการเสียเวลาความล่าช้าอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุ ตารางที่ 6-2 สรุปผลการคำนวณการจัดการปัญหาสภาพการจราจรดังกล่าว สำหรับ ระยะ t_R เท่ากับ 15 นาที 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าหลังจากดำเนินโครงการหน่วยกู้ภัยเฉพาะพิเศษแล้ว จะช่วยให้ลดการสูญเสียเวลาในการเดินทางโดยใช่เหตุลงได้ มากกว่าร้อยละ 50



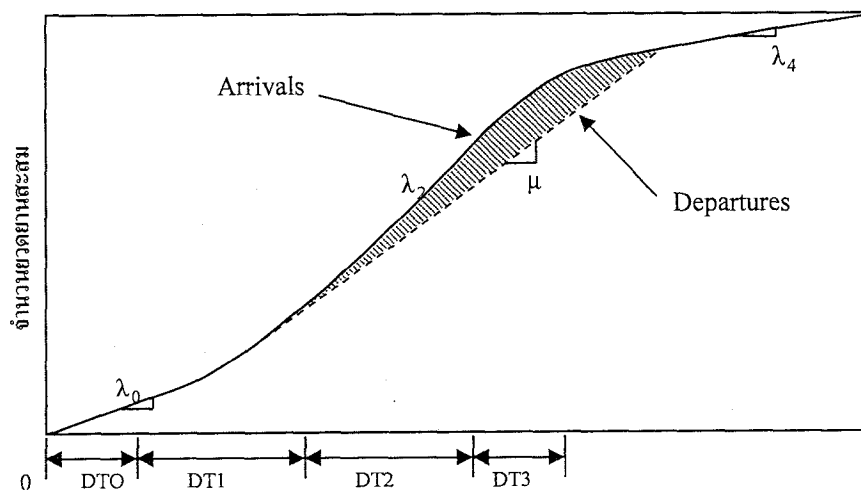
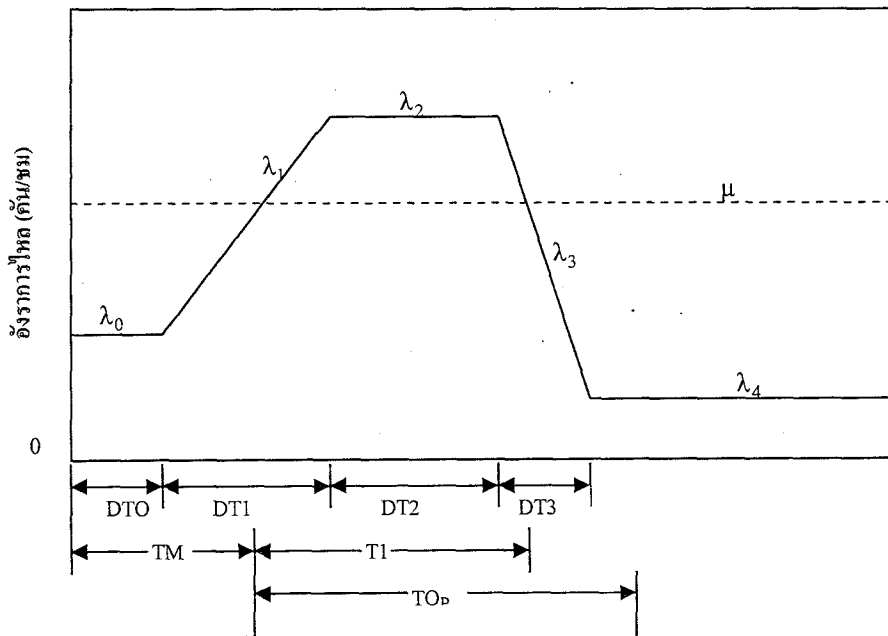
รูปที่ 6-6 การวิเคราะห์แถวคอยสำหรับการเกิดอุบัติเหตุ (ตัวอย่าง)

ตารางที่ 6-2 การคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแถวคอย (ตัวอย่าง)

พารามิเตอร์ การวิเคราะห์แถวคอย	สมการ	สมการที่ แทนค่าแล้ว	การวิเคราะห์ความอ่อนไหว			
			$t_R=0.25$	$t_R=0.50$	$t_R=0.75$	$t_R=1.00$
ระยะเวลาการเกิดแถวคอย, t_Q (ชั่วโมง)	$\frac{t_R(\mu - \mu_R)}{\mu - \lambda}$	$1.25t_R$	0.31	0.63	0.94	1.25
จำนวนของขบวนที่สะสมอยู่ใน แถวคอย, N_Q (คัน)	λt_Q	$3200 t_R$	1000	2000	3000	4000
ความยาวแถวคอยสูงสุด, Q_M (คัน)	$t_R(\lambda - \mu_R)$	$200 t_R$	50	100	150	200
ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอยในช่วงเวลาที่มี แถวคอยเกิดขึ้น, \bar{Q}_Q (คัน)	$\frac{t_R(\lambda - \mu_R)}{2}$	$100 t_R$	25	50	75	100
ความล่าช้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขบวน แต่ละคัน, d_M (นาที)	$\frac{60t_R(\lambda - \mu_R)}{\lambda}$	$3.75 t_R$	0.94	1.88	2.81	3.75
ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับ ขบวนในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น, \bar{d}_Q (นาที)	$\frac{30t_R(\lambda - \mu_R)}{\lambda}$	$1.875 t_R$	0.5	0.9	1.4	1.9
ความล่าช้ารวมที่เกิดขึ้น, TD (คัน-ชั่วโมง)	$\frac{t_R t_Q(\lambda - \mu_R)}{2}$	$125t_R^2$	8	31	70	125

6.5 กรณีการเกิดแถวคอยแบบอัตราการมาถึงแปรผันตามเวลา

การเกิดแถวคอย ในกรณีที่อัตราการมาถึงแปรผันตามเวลา จะพบเห็นได้ทั่วไปในกรณีเช่นที่บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ซึ่งอัตราการให้บริการจะมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ในขณะที่อัตราการมาถึงของขบวนจะเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา รูปที่ 6-6 แสดงการวิเคราะห์สภาพการณ์การเกิดแถวคอยประเภทนี้ ในตัวอย่างนี้ สมมติว่าอัตราการให้บริการมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาการวิเคราะห์ เท่ากับ μ คันต่อชั่วโมง ในขณะที่อัตราการมาถึงมีความแปรผัน โดยมีบางช่วงเวลาที่ปริมาณจราจรมากกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ดังแสดงในภาพ อัตราการมาถึงจะแปรผันจากค่า λ_0 ในช่วงแรก DT0 ต่อมาในช่วงเวลา DT1 อัตราการมาถึงจะค่อยๆ เพิ่มตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีอัตราสูงสุดเท่ากับ λ_2 และจะคงสภาพนี้ต่อไปเป็นระยะเวลา DT2 จากนั้น ในช่วงเวลา DT3 อัตราการมาถึงจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอัตราดังกล่าวมีค่าลดลงเหลือเพียง λ_4 และคงสภาพดังกล่าวต่อไป



รูปที่ 6-7 การวิเคราะห์แถวคอยสำหรับกรณีที่อัตราการมาถึงแปรผันตามเวลา

จากสภาพการณ์ดังกล่าว สามารถจัดทำรูปแสดงการสะสมตัวของความยาวแถวคอย ได้ดังแสดงในรูปที่ 6-7 (ข) โปรดสังเกตว่า ขณะที่ค่าอัตราการมาถึงมีค่าคงที่ (ในรูป ก) เส้นแสดงการมาถึงสะสม (ในรูปข) จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันตามปกติ แต่ขณะที่อัตราการมาถึงที่เพิ่มขึ้น (ช่วงเวลา DT1 ในรูป ก) และขณะที่อัตราการมาถึงที่ลดลง (ช่วงเวลา DT3 ในรูป ก) เส้นแสดงการมาถึงสะสม (ในรูปข) จะเป็นรูปโค้ง

จากตัวอย่างดังกล่าว จะมีสูตรการคำนวณระยะเวลาที่อัตราการมาถึงเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอัตราการให้บริการ TM และระยะเวลาที่อัตราการมาถึงสูงกว่าอัตราการให้บริการ TI

$$TM = DT0 + DT1 \left(\frac{\mu - \lambda_0}{\lambda_2 - \lambda_0} \right) \quad (6-15)$$

$$TI = DT1 \left(\frac{\lambda_2 - \mu}{\lambda_2 - \lambda_0} \right) + DT2 + DT3 \left(\frac{\mu - \lambda_2}{\lambda_4 - \lambda_2} \right) \quad (6-16)$$

สำหรับการคำนวณช่วงระยะเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น TQ_p มีสองกรณี นั่นคือถ้าแถวคอยสลายตัวภายในช่วงเวลา DT3 จะต้องใช้สมการ

$$TQ_p = TI + \left[\left(\frac{\lambda_2 - \mu}{\lambda_2 - \lambda_0} \right) (TI + DT2) \right]^{0.5} \quad (6-17)$$

แต่ถ้าแถวคอยสลายตัวภายหลังจากช่วงเวลา DT3 ผ่านไปแล้ว จะต้องใช้สมการ

$$TQ_N = \frac{TI}{2} \left(\frac{\lambda_2 - \mu}{\mu - \lambda_4} + 2 \right) + \frac{DT2}{2} \left(\frac{\lambda_2 - \mu}{\mu - \lambda_4} \right) + \frac{DT3}{2} \left(\frac{\lambda_4 - \mu}{\lambda_4 - \lambda_2} \right) \quad (6-18)$$

สำหรับจำนวนขบวนที่ได้รับผลกระทบ (เกิดความล่าช้า) เนื่องจากปัญหาแถวคอยดังกล่าวจะคำนวณได้จาก สมการ

$$N_Q = \mu(TQ) \quad (6-19)$$

ค่าความล่าช้ารวม TD ในหน่วย คัน-ชั่วโมง ได้แรงแจไว้ในรูปที่ 6-7 ข ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$TQ = \int_0^{TQ} [\lambda(T) - \mu(T)] dT \quad (6-20)$$

ซึ่งจะเป็นอินทิเกรตจากช่วงเวลา DT0 ถึง DT3 ถ้าแถวคอยสลายตัวภายในช่วงเวลา DT3 สมการคำนวณค่า TD ดังกล่าวจะเท่ากับ

$$TD_P = \frac{\lambda_4 - \lambda_2}{6} \left(\frac{1}{DT3} \right) [TQ_P - DT1(k) - DT2]^3$$

$$+ \frac{\lambda_2 - \mu}{2} [TQ_P - DT1(k)]^2 + \frac{\lambda_2 - \mu}{2} DT1(k) \left[TQ_P - \frac{2}{3} DT1(k) \right]$$
(6-21)

ถ้าแถวคอยสลายตัวหลังจากช่วงเวลา DT3 ไปแล้ว สมการคำนวณค่า TD ดังกล่าวจะเท่ากับ

$$TD_N = \frac{\lambda_4 - \lambda_2}{2} \left[\begin{aligned} &DT3 \left(\frac{1}{3} DT3 + DT2 + DT1(k) + TQ_N \right) \\ &+ DT2(DT2 + 2(DT1)k - 2(TQ_N)) \end{aligned} \right]$$

$$+ \frac{\lambda_4 - \mu}{2} [(DT1)^2(k)^2 + (TQ_N)^2] - \frac{\lambda_4 - 2\mu}{2} [DT1(k)TQ_N]$$

$$+ \frac{\lambda_2 - \mu}{2} \left[DT1(k)T \left(Q_N - \frac{2}{3} DT1(k) \right) \right]$$
(6-22)

โดยที่ $k = \left(\frac{\lambda_2 - \mu}{\lambda - \lambda_0} \right)$

ความยาวแถวคอยสูงสุด (Q_M) จะเกิดขึ้น ณ จุดสิ้นสุดของ TI และสามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$Q_M = \int_0^{TI} [\lambda(T) - \mu(T)] dT$$
(6-23)

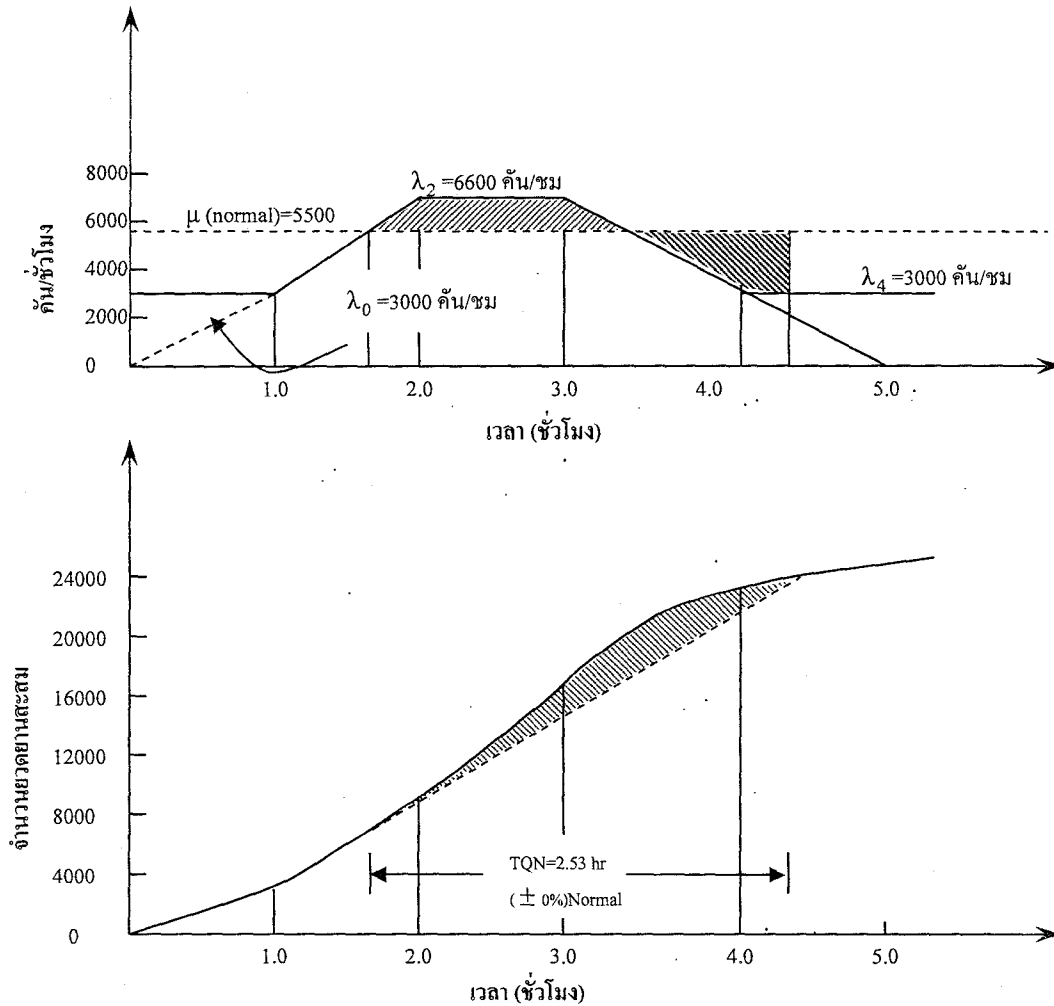
$$Q_M = \frac{\lambda_2 - \mu}{2} (TI + DT2)$$
(6-24)

ค่าเฉลี่ยความยาวแถวคอยในช่วงเวลาที่มีแถวคอยเกิดขึ้น (\bar{Q}_Q) สามารถคำนวณได้จากความล่าช้ารวมที่เกิดขึ้น (TD) กับ ระยะเวลาที่เกิดแถวคอย (TQ) ตามสมการ

$$\bar{Q}_Q = \frac{TD}{TQ}$$
(6-25)

จะเห็นว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแถวคอย ในกรณีที่อัตราการมาถึงของขบวนแปรผันตามเวลา มีรูปสมการที่ค่อนข้างซับซ้อน ทำให้การคำนวณมีโอกาสผิดพลาดสูงมาก ดังนั้น จึงขอแนะนำให้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสมการเหล่านี้ เพื่อสำหรับช่วยในการคำนวณ

ตัวอย่างสถานการณ์ คือ ทางด่วนพิเศษแห่งหนึ่งมีความจุ 5500 คันต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ได้เกิดปัญหาสภาพการจราจรติดขัดขึ้นเป็นประจำทุกวัน ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ความต้องการการเดินทางปกติของทั้งวันประมาณ 3000 คันต่อชั่วโมง แต่ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น จะมีความต้องการสูงถึง 6600 คันต่อชั่วโมง ซึ่งความต้องการการเดินทางสูงนี้ จะคงอยู่ประมาณ 1 ชั่วโมงในแต่ละวัน การเปลี่ยนแปลงความต้องการการเดินทางจะเริ่มประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนชั่วโมงเร่งด่วน ซึ่งอัตราการมาถึงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 3000 คัน/ชม. เป็น 6600 คัน/ชม. และเช่นเดียวกัน หลังจากชั่วโมงเร่งด่วนแล้ว อัตราการมาถึงจะค่อยๆ ลดลงจาก 6600 คัน/ชม. เป็น 3000 คัน/ชม. โดยใช้เวลาระมาณ 1 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์การเกิดแถวคอยสำหรับตัวอย่างนี้ แสดงดังรูปที่ 6-8

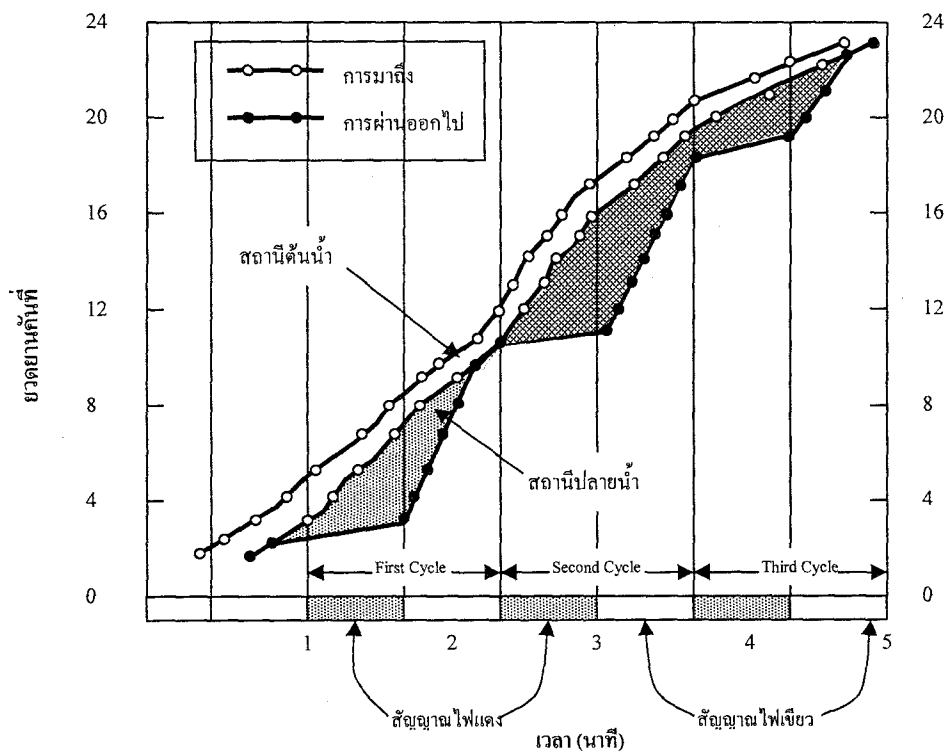


รูปที่ 6-8 การวิเคราะห์แถวคอยสำหรับกรณีชั่วโมงเร่งด่วนบนทางด่วนพิเศษ (ตัวอย่าง)

6.6 การวิเคราะห์แถวคอยแบบจุลภาค

การวิเคราะห์แถวคอยแบบ deterministic สามารถดำเนินการแบบจุลภาคก็ได้ (microscopic) โดยการวิเคราะห์แบบนี้ จะต้องติดตามตรวจสอบเวลาที่ขบวนแต่ละคันมาถึงระบบ และเวลาที่ออกจากระบบ ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างกรณีการคิดสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยก

ในการสำรวจการเกิดแถวคอยบริเวณทางแยก ดำเนินการโดยการกำหนดจุดสำรวจสองจุดในบริเวณใกล้เคียงทางแยก และทำการจดบันทึกหมายเลขทะเบียนของขบวนรถทุกคัน พร้อมทั้งเวลาที่ขบวนเหล่านั้นวิ่งผ่านสถานีทั้งสอง โดยสถานีแรก จะตั้งอยู่ก่อนถึงทางแยกเล็กน้อย และสถานีที่สอง จะตรวจสอบการวิ่งผ่านเส้นหยุดของสัญญาณไฟจราจร เวลาที่รถยนต์ในกระแสจราจรวิ่งผ่านสถานีทั้งสอง แสดงในรูปที่ 6-9 เนื่องจากสถานีทั้งสองอยู่ห่างจากกัน (ในที่นี้ประมาณ 10 วินาที) ดังนั้น จะต้องมีกราฟเส้นแสดงการมาถึงของขบวนรถไปทางขวา 10 วินาที เพื่อให้การวิเคราะห์แถวคอยเป็นไปอย่างถูกต้อง พื้นที่แรเงาในรูปที่ 6-9 จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยได้



รูปที่ 6-9 การวิเคราะห์แถวคอยแบบจุลภาค สำหรับทางแยกสัญญาณไฟ

พื้นที่แรงจลน์แรก มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม คล้ายกับกรณีการวิเคราะห์การเกิดแฉกคอยบริเวณทางแยกสัญญาณไฟในหัวข้อ 6.2 ยวดยานคันที่ 3, 4 และ 5 มาถึงทางแยกในช่วงจังหวะสัญญาณไฟแดง จึงเกิดความล่าช้าขึ้น ส่วนยวดยานคันที่ 6, 7 และ 8 มาถึงในจังหวะสัญญาณไฟเขียว แต่จะเกิดความล่าช้าบ้างเล็กน้อยอันเนื่องมาจากแฉกคอยที่ยังสลายหมดไป ยวดยานคันที่ 9 และ 10 มาถึงในจังหวะสัญญาณไฟเขียว ภายหลังจากแฉกคอยสลายตัวหมดแล้ว จึงไม่มีความล่าช้าเกิดขึ้น ค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการเกิดแฉกคอยนี้ สรุปใน ตารางที่ 6-3

ตารางที่ 6-3 การคำนวณพารามิเตอร์การเกิดแฉกคอย ณ ทางแยกสัญญาณไฟ (ตัวอย่าง)

พารามิเตอร์การเกิดแฉกคอย	รอบสัญญาณไฟ ที่ 1	รอบสัญญาณไฟ ที่ 2 และ 3 รวมกัน
ระยะเวลาการเกิดแฉกคอย, t_0 (วินาที)	64	130
สัดส่วนของเวลาที่มีแฉกคอยเกิดขึ้น, Pt_0 (ร้อยละ)	80	81
จำนวนของยวดยานที่สะสมอยู่ในแฉกคอย, N_0 (คัน)	6	12
จำนวนยวดยานที่เข้ามาทั้งหมดในแต่ละรอบสัญญาณไฟ, N (คัน)	8	13
สัดส่วนของยวดยานที่ติดในแฉกคอย, PN_0 (ร้อยละ)	75	92
ความยาวแฉกคอยสูงสุด (คัน), Q_M (คัน)	3	6
ค่าเฉลี่ยความยาวแฉกคอยในช่วงเวลาที่มีแฉกคอยเกิดขึ้น, \bar{Q}_0 (คัน)	2.0	3.2
ค่าเฉลี่ยความยาวแฉกคอย, \bar{Q} (คัน)	1.5	3
ความล่าช้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับยวดยานแต่ละคัน, d_M (วินาที)	37	46
ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับยวดยานในช่วงเวลาที่มีแฉกคอยเกิดขึ้น, \bar{d}_0 (วินาที)	19.2	27.6
ค่าเฉลี่ยของความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับยวดยานในระบบ, \bar{d} (วินาที)	14.4	25.5
ความล่าช้ารวมที่เกิดขึ้น, TD (คัน-วินาที)	1.9	5.5

พื้นที่แรงแทงที่สอง จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมสองรูปที่ซ้อนกันอยู่ ทั้งนี้เพราะรอบสัญญาณ ไฟที่ สองที่แถวคอยสะสมจนกระทั่งไม่สามารถเคลื่อนออกจากทางแยกได้ในรอบสัญญาณไฟเขียว ขวดยานบางส่วน จำเป็นจะต้องรอรอบสัญญาณไฟเขียวถัดไป ขวดยานคันที่ 11 ถึง 15 มาถึงในจังหวะสัญญาณไฟแดง จึงจะต้องรอ ในแถวคอย เกิดความล่าช้าขึ้น ขวดยานคันที่ 16 ถึง 18 มาถึงทางแยกในจังหวะสัญญาณไฟเขียว แต่เกิดความล่าช้า บ้างเนื่องจากแถวคอยที่ทางแยกยังสลายตัวไม่หมด ส่วนขวดยานคันที่ 19 นี้ จะประสบความล่าช้ามากที่สุด ทั้งนี้ เพราะมาถึงยังทางแยก ณ รอบสัญญาณไฟที่สอง แต่ไม่สามารถเคลื่อนผ่านทางแยกได้จนกระทั่งรอบสัญญาณไฟ เขียวต่อมา ขวดยานคันที่ 20 และ 21 มาถึงในจังหวะสัญญาณไฟแดง จึงจะต้องรอในแถวคอย เกิดความล่าช้าขึ้น ส่วนขวดยานคันที่ 22 มาถึงทางแยกในจังหวะสัญญาณไฟเขียว แต่เกิดความล่าช้าบ้างเนื่องจากแถวคอยที่ทางแยกยัง สลายตัวไม่หมด ในขณะที่ขวดยานคันที่ 23 มาถึงในจังหวะสัญญาณไฟเขียว ภายหลังจากแถวคอยสลายตัว หมดแล้ว จึงไม่มีความล่าช้าเกิดขึ้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแถวคอยในรอบสัญญาณ ไฟที่ 2 และ 3 รวมกันดัง แสดงในตารางที่ 6-3

แบบฝึกหัด

- อธิบายหลักการการปล่อยแถวคอยที่มีอยู่ทั้งสามรูปแบบ พร้อมยกตัวอย่างการปล่อยแถวคอยทั้งสามที่พบ เห็นในชีวิตประจำวัน
- รูปที่ 6-4 ได้แสดงถึงรูปแบบการเกิดแถวคอยต่างๆ 8 แบบ ซึ่งสามารถรวมได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ จงอธิบาย คุณสมบัติของการเกิดแถวคอยแต่ละรูปแบบ พร้อมทั้งยกตัวอย่างสถานการณ์ประกอบ (อย่างน้อย 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งแบบ)
- จงวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การเกิดแถวคอยต่างๆ โดยใช้ สมการ 6-1 ถึงสมการ 6-14 และวาดกราฟคล้าย กับรูปที่ 6-3 สำหรับสถานการณ์ที่สมมติขึ้นดังนี้
 - ขวดยานมาถึงทางแยกสัญญาณไฟ ด้วยอัตราการมาถึงคงที่ เท่ากับ 600 คันต่อชั่วโมง
 - ในช่วงสัญญาณไฟเขียว ทางแยกจะมีอัตราการให้บริการสูงสุดเท่ากับ 1,800 คันต่อชั่วโมง
 - ระบบการปล่อยแถวคอยเป็นแบบ FIFO
 - รอบสัญญาณไฟ 80 วินาที โดยมีระยะเวลาไฟเขียวประสิทธิผลเท่ากับ 60 วินาที
- ทางหลวงสายหนึ่ง ขนาดกว้าง 6 ช่องจราจร (3 ช่องจราจรต่อทิศทาง) มีความจุจราจรประมาณ 6,000 คัน/ ชั่วโมง ในแต่ละทิศทาง สมมติ ความต้องการการเดินทางบนทางหลวงสายนี้ คิดเป็นร้อยละ 75 ของความ จุของทางหลวง วันหนึ่ง ได้เกิดอุบัติเหตุบนทางหลวง กีดขวางช่องจราจร ส่งผลให้ความจุของทางหลวง ดังกล่าวลดลงเหลือเพียง 3,000 คันชม. และเจ้าหน้าที่ใช้เวลาประมาณ 60 นาที ในการเคลียร์พื้นที่ จง คำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเกิดแถวคอยต่างๆ ทั้งหมดสำหรับสถานการณ์นี้

5. ทางด่วนพิเศษแห่งนี้มีความจุ 5,500 คันต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ได้เกิดปัญหาสภาพการจราจรติดขัดขึ้นเป็นประจำทุกวันในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ความต้องการการเดินทางโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวัน ประมาณ 4,500 คันต่อชั่วโมง ยกเว้นในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น (16:00-17:00 น.) ที่มีปริมาณการเดินทางเพิ่มสูงขึ้นเป็น 7,000 คันต่อชั่วโมง ซึ่งความต้องการการเดินทางสูงนี้ จะคงอยู่ประมาณ 1 ชั่วโมงในแต่ละวัน การเปลี่ยนแปลงความต้องการการเดินทางจะเริ่มประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนชั่วโมงเร่งด่วน (ตั้งแต่ 15:00 น.) ซึ่งอัตรากรรมมาถึงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 4,500 คัน/ชม. เป็น 7,000 คัน/ชม. (ณ เวลา 16:00 น.) และเช่นเดียวกัน หลังจากชั่วโมงเร่งด่วนแล้ว อัตรากรรมมาถึงจะค่อยๆ ลดลงจาก 7,000 คัน/ชม. (ณ เวลา 17:00 น.) เป็น 4,500 คัน/ชม. (ณ เวลา 18:00 น.) โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จงวิเคราะห์การเกิดแฉวคอยดังกล่าว โดยคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเกิดแฉวคอยทั้งหมด พร้อมทั้งวาดกราฟแสดงผลคล้าย รูปที่ 6-8

References

Chapter 1

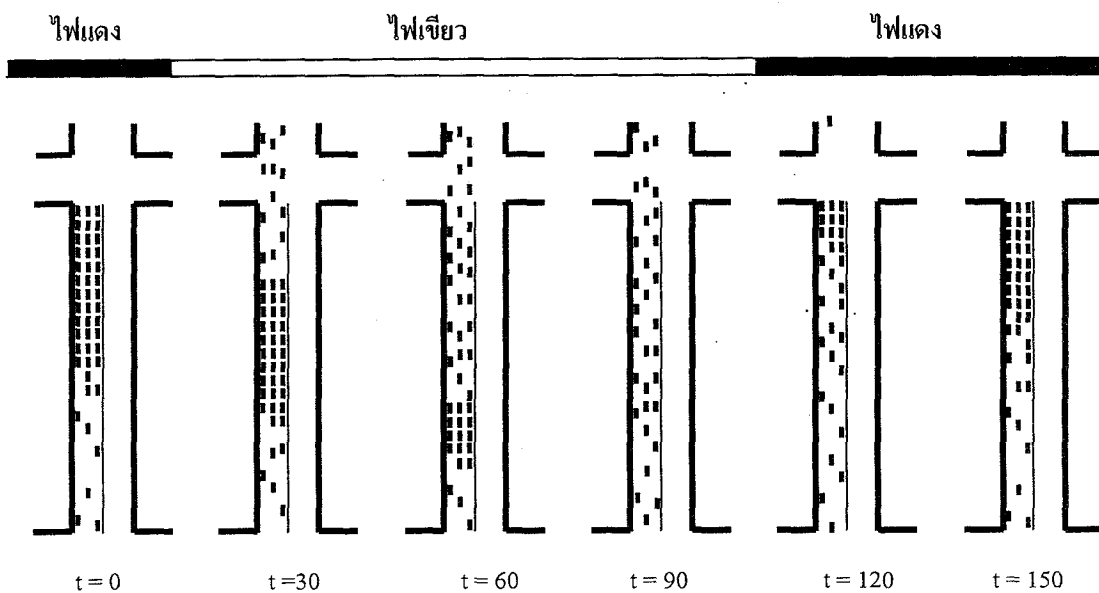
1. *Traffic Engineering*, W.R. McShane and R.P. Roess, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1990.
2. *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board, Washington D.C., 2000.

บทที่ 7 การวิเคราะห์ shock wave

7.1 แผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นจราจร

แผนที่เส้นแสดงความหนาแน่น (Density Contour Map) นิยมนำมาใช้ในการศึกษาสภาพการจราจรบนโครงสร้างการขนส่งต่างๆ ทั้งประเภทที่มีการไหลจราจรแบบต่อเนื่อง (Uninterrupted-flow facilities) เช่น ทางหลวงแผ่นดินระหว่างเมือง หรือทางด่วนพิเศษ และประเภทที่มีการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (Interrupted-flow facilities) เช่น ถนนในเมืองหรือทางแยกสัญญาณไฟ แผนที่นี้เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับใช้ประกอบการวิเคราะห์ Shock wave ที่เป็นหัวใจสำคัญของบทนี้ แผนที่นี้จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจราจรบนถนนช่วงหนึ่ง ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา โดยทั่วไปจะเป็นกราฟสองมิติ โดยมีแนวตั้ง (แกน Y) แสดงช่วงถนนที่ทำการวิเคราะห์ และแนวนอน (แกน X) แสดงระยะเวลาที่ทำการสำรวจ

สำหรับสภาพการจราจรบนท้องถนนจริงนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาด้วยปัจจัยต่างๆ ตัวอย่างเช่น สภาพการจราจรบริเวณทางแยกสัญญาณไฟแห่งหนึ่ง จะมีสัญญาณไฟจราจรเป็นตัวควบคุมจัดการการจราจร ซึ่งสัญญาณไฟจะสลับไปมาระหว่างสัญญาณไฟเขียวกับไฟแดง ถ้าดำเนินการสำรวจสภาพการจราจรบนช่วงถนนใกล้กับทางแยกสัญญาณไฟจราจร ซ้ำกันหลายๆ ครั้ง ก็จะพบว่า ช่วงถนนดังกล่าว จะมีสภาพการจราจรแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 7-1



รูปที่ 7.1 สภาพการจราจรบริเวณทางแยกสัญญาณไฟ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

จากภาพด้านบน สมมติว่าศึกษาช่วงถนนแห่งหนึ่งซึ่งทางด้านปลายน้ำเป็นทางแยกสัญญาณไฟ ศึกษาวิเคราะห์สภาพการจราจรในทิศทางมุ่งเหนือ เป็นระยะเวลา 150 วินาที โดยทำการบันทึกภาพสภาพการจราจรบน

ช่วงถนดดังกล่าว จากมุมสูง ทุกๆ 30 วินาที ณ เวลา $t=0$ นั้น พบว่าการจราจรในทิศมุ่งเหนือได้รับสัญญาณไฟแดงมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว จึงเกิดแถวคอยของรถยนต์ขึ้นหลังเส้นหยุด เป็นระยะประมาณครึ่งหนึ่งของช่วงถนดที่ทำการศึกษา เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที สัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนเป็นไฟเขียว รถยนต์ที่อยู่ในแถวคอยเริ่มเคลื่อนตัวผ่านทางแยกออกไป ณ เวลา $t=30$ วินาที หลังจากที่ได้รับสัญญาณไฟเขียวมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว พบว่ารถยนต์คันที่ติดอยู่ในแถวคอยลำดับแรกได้เคลื่อนตัวผ่านทางแยกไปแล้ว แต่ท้ายแถวคอยยังคงสลายตัวไม่หมด ในขณะที่มีรถยนต์จากแยกคั่นน้ำเข้ามาติดสะสมในแถวคอยเพิ่มเติมเล็กน้อย จากนั้นทางแยกยังคงได้รับสัญญาณไฟเขียวต่อไป ส่งผลให้แถวคอยสะสมของรถยนต์ค่อยๆ สั้นลงไปเรื่อยๆ ($t=60$ วินาที) จนในที่สุด ณ เวลา $t=90$ วินาที พบว่าแถวคอยสลายตัวหมดแล้ว ต่อมา ณ เวลา $t=105$ วินาที สัญญาณไฟจราจรได้เปลี่ยนจากไฟเขียวเป็นไฟแดง จึงพบว่ามีแถวคอยเริ่มสะสมตัวขึ้นหลังเส้นหยุด ณ เวลา $t=120$ วินาที และแถวคอยมีความยาวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา $t=150$ วินาที

ณ เวลา $t=0$ วินาทีนั้น จะพบว่าช่วงถนดที่ดำเนินการศึกษา มีสภาพการจราจร 3 สถานะด้วยกัน คือ 1) ทางด้านปลายน้ำของเส้นหยุด จะมีสภาพโล่ง ไม่มีรถยนต์ใดๆ เคลื่อนตัวผ่านมา เนื่องจากการจราจรจากคั่นน้ำทั้งหมดโดนกักไว้โดยสัญญาณไฟแดง 2) จากเส้นหยุดถึงประมาณกึ่งกลางช่วงถนด จะพบว่ามีรถหนาแน่นจราจรสูงมาก เพราะเป็นพื้นที่ที่มีแถวคอยเกิดขึ้น รถยนต์แต่ละคันในแถวคอยจอดชิดกันมาก 3) จากกึ่งกลางช่วงถนดไปจนถึงทางแยกคั่นน้ำ พบว่าการจราจรมีสภาพการจราจรเบาบาง นั่นคือมีความต้องการการเดินทางเข้าสู่ทางแยกเรื่อยๆ แต่ด้วยอัตราที่ไม่สูงนัก

ณ เวลาถัดมา $t=30$ วินาที เป็นช่วงเวลาที่ได้รับสัญญาณไฟเขียวมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว พบว่ามีสภาพการจราจร 3 สถานะเช่นเดียวกัน 1) ทางด้านปลายน้ำของเส้นหยุดบริเวณทางแยก มาจนถึงแถวคอย พบว่ามีสภาพการจราจรเบาหนาแน่นปานกลาง กลุ่มรถยนต์ที่ติดติดอยู่ในลำดับต้นๆ ของแถวคอยก็ค่อยๆ เคลื่อนตัวผ่านทางแยกไป 2) ในบริเวณที่เป็นแถวคอย จะพบว่า พื้นที่นี้มีสภาพการจราจรหนาแน่นสูง 3) ด้านหลังของแถวคอยไปจนถึงแยกคั่นน้ำ พบว่ามีสภาพการจราจรเบาบาง (คล้ายกับสถานการณ์ ณ เวลา $t=0$ วินาที)

ณ เวลา $t=60$ วินาที พบว่ามี 3 สถานะคล้ายกับเวลา $t=30$ วินาที แต่ช่วงถนดที่มีสภาพการจราจรปานกลาง ติดขัด และคล่องตัว จะมีการเปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ ความยาวช่วงถนดที่มีความหนาแน่นจราจรสูง (เกิดเป็นแถวคอย) จะมีระยะทางสั้นลง ส่วน ณ เวลา $t=90$ วินาทีนั้น พบว่าแถวคอยสลายตัวหมด จึงไม่พบว่ามีสภาพการจราจรแบบติดขัดหนาแน่นอีกต่อไป ดังนั้น ช่วงเวลาดังกล่าว จึงมีสภาพการจราจรอยู่ 2 สถานะเท่านั้น นั่นคือ สภาพการจราจรปานกลาง (บริเวณปลายน้ำ) และสภาพการจราจรแบบคล่องตัว (บริเวณคั่นน้ำ)

สำหรับเวลา $t=120$ และ 150 วินาทีนั้น เป็นภาพเหตุการณ์หลังจากที่ทางแยกได้เปลี่ยนสัญญาณไฟจราจรจากไฟเขียวเป็นแดงอีกครั้ง ทำให้มีแถวคอยเกิดขึ้น และกำลังสะสมตัวยาวขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลา สัญญาณไฟแดงที่ได้รับ สภาพการจราจรในช่วงเวลาทั้งสองนี้ ก็จะมีอยู่ 3 สถานะ คล้ายกับ สภาพการจราจรในช่วงเวลา $t=0$ นั่นคือ ทางด้านปลายน้ำของเส้นหยุดบริเวณทางแยกจะมีสภาพโล่ง ไม่มีปริมาณจราจร จากเส้นหยุดมาทางปลายน้ำ จะพบว่าจะเกิดแถวคอยขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวมีความหนาแน่นจราจรสูงมาก สำหรับทางด้านท้ายของแถวคอยยาว ไปจนถึงทางแยกคั่นน้ำ พบว่าการจราจรมีสภาพการจราจรเบาบาง คือมีความต้องการการเดินทางเข้าสู่ทางแยก

วิศวกรจราจร นิยมจำลองลำดับภาพเหตุการณ์ดังกล่าวเป็น แผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นจราจร ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพการจราจรบนช่วงถนดได้ตลอดช่วงเวลาวิเคราะห์ ได้อย่างชัดเจน พร้อมทั้ง

สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สถานการณ์จราจรบนช่วงถนนดังกล่าวได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว วิธีการจัดทำแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่น ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ 1) การสำรวจข้อมูล และ 2) การวิเคราะห์ข้อมูล แต่ละกระบวนการ มีลำดับขั้นตอนคร่าวๆ ดังนี้

การสำรวจข้อมูลในสนาม

1. กำหนดช่วงถนน (ที่มีระยะทางแน่นอน) ตลอดจนระยะเวลาที่จะทำการวิเคราะห์
2. ดำเนินการสำรวจข้อมูลความหนาแน่นบนช่วงถนนที่กำลังศึกษา โดยอาจจะใช้วิธีการ
 - a. ถ่ายภาพนิ่งสภาพการจราจรบนช่วงถนน จากมุมสูงที่ระยะเวลาต่างๆ
 - b. ให้เจ้าหน้าที่สนามหลายๆ คน ทำการสำรวจข้อมูลความหนาแน่น ณ จุดสำรวจต่างๆ บนช่วงถนน เป็นระยะๆ เช่น ทุกๆ 15 วินาที 30 วินาที 1 นาที 15 นาที หรือครึ่งชั่วโมง ตลอดช่วงเวลาสำรวจ
 ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จะนำมาหาค่าความหนาแน่นจราจรบนช่วงถนน ณ เวลาต่างๆ

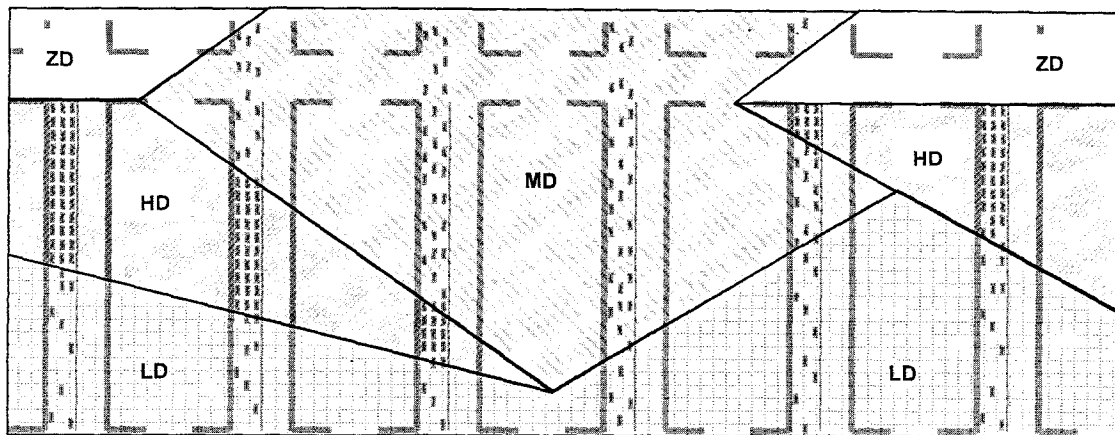
การวิเคราะห์ข้อมูล

3. นำข้อมูลความหนาแน่นที่สำรวจได้มาแสดงในแผนที่ ที่มีแกนตั้งแสดงช่วงถนนที่ทำการสำรวจ และแกนนอนแสดงช่วงเวลาทำการสำรวจ โดยจะต้องลงจุดข้อมูลความหนาแน่นให้ถูกต้องตามตำแหน่งบนช่วงถนน และเวลาที่สำรวจได้
4. ลากเส้น contour ซึ่งเป็นเส้นแสดงระดับความหนาแน่นคงที่ (ลักษณะคล้ายกับเส้น contour แสดงความชันบนแผนที่ภูมิประเทศ) บนข้อมูลที่สำรวจมาได้ หรือลากเส้น contour ที่ขอบเขตความหนาแน่นระดับเดียวกัน

ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นจราจร ตัวอย่างการทำแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นสำหรับทางแยกสัญญาณไฟจราจร ตามตัวอย่างข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 7.2

รูปที่ 7.2 (ก) แสดงวิธีการแบ่งขอบเขตความหนาแน่นที่ระดับต่างๆ โดยในที่นี้ จะแบ่งออกเป็น 4 ระดับง่ายๆ ประกอบด้วยระดับความหนาแน่นที่เป็นศูนย์ ระดับความหนาแน่นต่ำ ระดับความหนาแน่นปานกลาง และระดับความหนาแน่นสูงมาก ซึ่งการแบ่งขอบเขตความหนาแน่นนี้ พัฒนามาจากชุดภาพบันทึกสภาพจราจรจากมุมสูง ณ ช่วงเวลาต่างกันั้นนั่นเอง

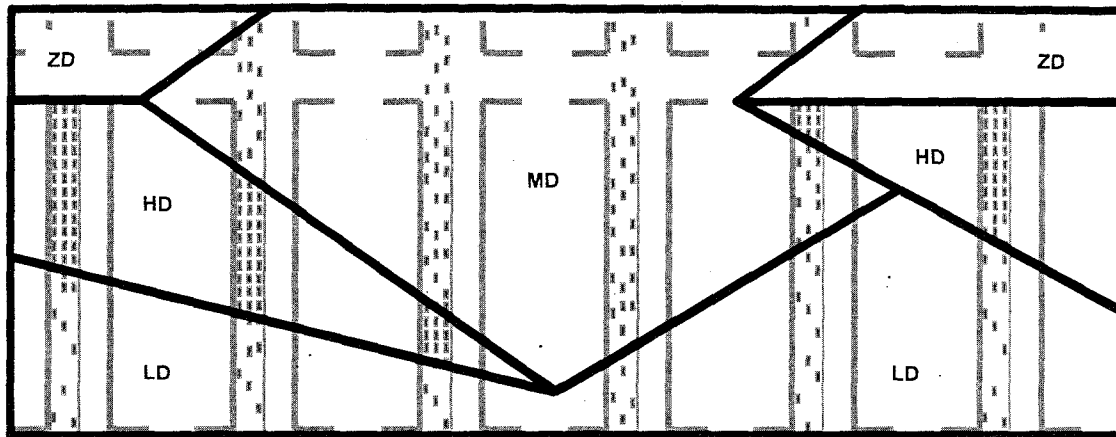
โดยปรกติแล้ว แผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นจราจร จะใช้เฉพาะเส้นแสดงขอบเขตความหนาแน่นจราจรระดับต่างๆ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 7.2 (ข)



ZD - ความหนาแน่นเท่ากับศูนย์
 LD - ความหนาแน่นต่ำ
 MD - ความหนาแน่นปานกลาง
 HD - ความหนาแน่นสูง

t = 60 t = 90 t = 120 t = 150

(ก)



t = 0 t = 30 t = 60 t = 90 t = 120 t = 150

(ข)

รูปที่ 7.2 การจัดทำแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นจรวด

รูปที่ 7.3 แสดงตัวอย่างของแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นจราจร สำหรับทางหลวงแห่งหนึ่ง ซึ่งได้ทำการสำรวจตั้งแต่เวลา xxx จนกระทั่ง xxx สามารถอธิบายสภาพการจราจรได้คร่าวๆ ดังนี้

1. ช่วงถนนดังกล่าวจะมีสภาพการจราจรคล่องตัวตลอดช่วงถนน ก่อนเวลา xxx น. และภายหลังจากเวลา zz
2. สภาพการจราจรติดขัด จะเกิดขึ้นเป็นระยะทางประมาณ xxx เมตร เริ่มต้น ประมาณ xxx ถึง xxx
3. สภาพการจราจรหนาแน่นเริ่มต้นขึ้นบนช่วงถนน B เมื่อความต้องการการเดินทางในช่วงถนน B เพิ่มสูงใกล้เคียงกับความจุของช่วงถนน ณ เวลา 4:00 น. และอีก 15 นาทีต่อมา พบว่า ช่วงถนน C มีสภาพการจราจรติดขัด ซึ่งเกิดจากปัญหาสภาพคอขวด (Bottleneck) จนกระทั่งเวลา 4:45 นาทีต่อมา ปรากฏว่าสภาพการจราจรได้ติดขัดต่อเนื่องยาวเป็นระยะทางมากกว่า 2 กิโลเมตร (ครอบคลุมช่วงถนน B, C, และ D)
4. ในช่วงเวลาจาก 5:15 น. ถึง 5:45 น. พบปรากฏการณ์พิเศษที่เรียกว่า แถวคอยแบบเคลื่อนที่ (Moving Queue) โดยสภาพปัญหาการจราจรติดขัด ได้ค่อยๆ เคลื่อนตัวไปทางด้านปลายน้ำ (downstream) จากจุด 2 ไปยังจุดที่ 1 ปรากฏการณ์นี้ จะพบเห็นได้เป็นประจำในบริเวณที่เป็นทางลาดชันขึ้นเขา และมีรถบรรทุกใช้เส้นทางดังกล่าวเยอะ รถบรรทุกเหล่านี้ สามารถใช้ความเร็วได้ต่ำขณะที่วิ่งขึ้นเขา ยังผลให้เกิดแถวคอยของการจราจรที่ขยับเข้ามาตามหลังมา ทำให้เกิดสภาพการจราจรติดขัดด้านหลังของขบวนรถบรรทุก เหตุการณ์เช่นนี้ พบเห็นได้เป็นประจำ เช่นทางหลวงหมายเลข 2 ช่วงขึ้นเขาที่ อ.แก่งคอย เป็นต้น

สภาพการจราจรติดขัด บนแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่น โดยปกติ จะเป็นลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งแนวเส้นด้านข้างแต่ละเส้น จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจราจรอย่างกะทันหัน (ระหว่างสภาพการจราจรคล่องตัว กับสภาพการจราจรติดขัด) ผู้ขับขี่บนท้องถนน ขับเคลื่อนผ่านเส้นดังกล่าว จะรับรู้ได้ถึง การเปลี่ยนแปลงของสภาพการจราจรอย่างฉับพลัน เส้นดังกล่าวนี้เองที่เรียกว่า Shock wave ในรูปที่ 7.3 สามเหลี่ยม A ได้แสดงถึง shock wave ที่สำคัญ 3 ประเภท ได้แก่

Backward forming shockwave เป็นเส้น shock wave ที่แสดงถึงการก่อตัวของสภาพการจราจรติดขัด โดยมุ่งหน้าไปยังต้นน้ำ เป็นสภาพการณ์ปกติที่พบเห็นได้ทั่วไป กล่าวคือเมื่อเกิดปัญหาคอขวด และกำลังส่งผลให้เกิดสภาพการจราจรติดขัดนั้น สภาพการจราจรติดขัดจะค่อยๆ ลุกลมรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ จากจุดที่เป็นปัญหาคอขวดไปทางต้นน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 7.3

Forward recovery shockwave เป็นเส้น shock wave ที่แสดงถึงการคลี่คลายตัวของสภาพการจราจรติดขัดโดยมุ่งหน้าไปทางปลายน้ำ ทั้งนี้ ภายหลังจากที่ช่วงหัวโมงเร่งคว้นผ่านไปแล้ว ความต้องการการเดินทางจะค่อยๆ ลดลง จนสภาพการจราจรค่อยๆ คลี่คลายตัวขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้พื้นที่ที่เกิดสภาพการจราจรติดขัดค่อยๆ ลดลงตามเวลา ซึ่งปรากฏการณ์นี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.3 เช่นกัน

Frontal stationary shockwave เป็นเส้น shockwave ที่แสดงถึงส่วนหน้าของการเกิดการจรรจาดัด ซึ่งโดยปกติจะอยู่กับที่ สม่ำเสมอ ไม่เคลื่อนย้ายไป-มา จึงแสดงให้เห็นเป็นเส้นตรงในแนวราบ จะเกิดขึ้น ณ บริเวณที่เป็นปัญหาของระบบ (ดูรูปที่ 7.3)

จะเห็นว่าแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่น จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นบนช่วงถนน ตลอดช่วงเวลาทำการวิเคราะห์อย่างชัดเจน วิศวกรจราจรสามารถมองเห็นภาพรวมสภาพเหตุการณ์ต่างๆ จากแผนที่ได้เป็นอย่างดี

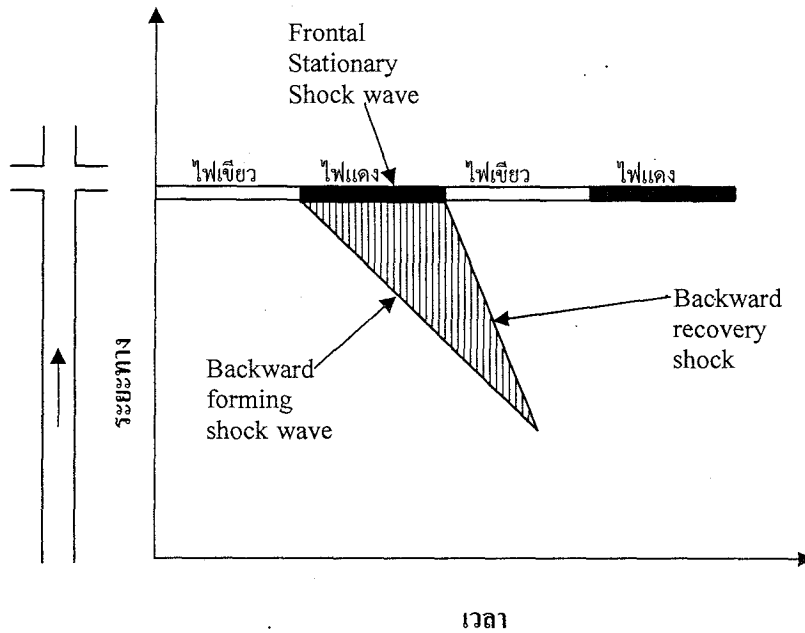
7.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ shock wave

คงที่อธิบายไว้แล้วในเบื้องต้น *shock wave* ก็คือเส้นที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจราจร อย่างฉับพลัน นั่นคือจากสภาพการจราจรเบาบาง ไปเป็น สภาพการจราจรติดขัด หรือ จากสภาพการจราจรติดขัด เป็น สภาพการจราจรเบาบางก็ได้ โดยปกติจะทำการวิเคราะห์ shock wave บนแผนที่เส้นแสดงความหนาแน่นที่อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 7.1 ในหัวข้อนี้ จะอธิบายถึงลักษณะการเกิด shock wave ที่พบเห็นในชีวิตประจำวัน 2 เหตุการณ์โดยละเอียด ประกอบด้วยการเกิด shock wave ที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟ และการเกิด shock wave ที่บริเวณคอขวดบนทางหลวง

7.2.1 การเกิด shock wave ที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟ

ลักษณะการเกิด shock wave ที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟ สามารถอธิบายได้จาก รูปที่ 7.4 ในสภาพการณ์นี้ สมมติว่าความต้องการการเดินทางมีอัตราการไหลเข้าคงที่ และมีปริมาณไม่มากนัก กล่าวคือรอบสัญญาณไฟเขียวแต่ละรอบนั้น สามารถปล่อยขบวนที่ติดอยู่ในแถวคอยได้ทั้งหมด ไม่มีขบวนตกค้างที่ต้องรอไปจนถึงสัญญาณไฟเขียวถัดไป ปรากฏการณ์ shock wave จะเกิดขึ้นขณะที่ได้รับสัญญาณไฟแดง ผู้ขับขี่ขบวนที่กำลังเคลื่อนตัวเข้าสู่ทางแยก จะรับรู้ได้ถึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจราจร โดยฉับพลัน นั่นคือ จากการขับขี่ด้วยความเร็วปานกลาง จะต้องชะลอรถ จนกระทั่ง “หยุด” เพื่อต่อท้ายแถวคอย ในขณะที่มีขบวนเคลื่อนตัวเข้าสู่ทางแยกเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แถวคอยก็จะค่อยๆ ก่อตัวยาวมากยิ่งขึ้น เป็นลักษณะของ shockwave ประเภท Backward forming ในทันทีที่ได้รับสัญญาณไฟเขียว พบว่าจะเกิด shock wave ขึ้นอีกตัวหนึ่ง นั่นคือ shock wave ประเภท Backward recovery เมื่อผู้ขับขี่ผ่านบริเวณนี้ ก็จะรับรู้ได้ถึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจราจรโดยฉับพลัน นั่นคือ จากการ “หยุด” รถรอคอยสัญญาณไฟ เปลี่ยนเป็นการค่อยๆ เร่งความเร็วผ่านทางแยกเพื่อมุ่งหน้าไปยังจุดหมายปลายทางต่อไป shock wave ตัวแรก เรียกว่า forming shock wave เพราะขณะที่เวลาผ่านไป การพัฒนา (propagation) ของ shock wave ทำให้สภาพการจราจรติดขัด (หรือความยาวแถวคอย) มากขึ้นเรื่อยๆ ส่วน shock wave ตัวที่สองเรียกว่า recovery shock wave เพราะขณะที่เวลาผ่านไป การพัฒนาของ shock wave ทำให้สภาพการจราจรติดขัดลดลง สำหรับสภาพการณ์นี้ ก็จะมี shock wave อีกหนึ่งตัว ที่เรียกว่า frontal stationary shock wave เกิดขึ้นที่เส้นหยุดบริเวณสัญญาณไฟ ซึ่งในกรณีนี้ shock wave ไม่มีเคลื่อนที่ (จึงมีลักษณะเส้นตรงในแนวราบ) frontal shockwave นี้ โดยปกติจะแสดงถึง

ขอบเขตปลายน้ำ (downstream edge) ของสภาพการจราจรติดขัด เมื่อขบวนยานขับผ่านจากเส้นขอบเขตนี้ไป สภาพการจราจรจะมีสภาพคล่องตัว



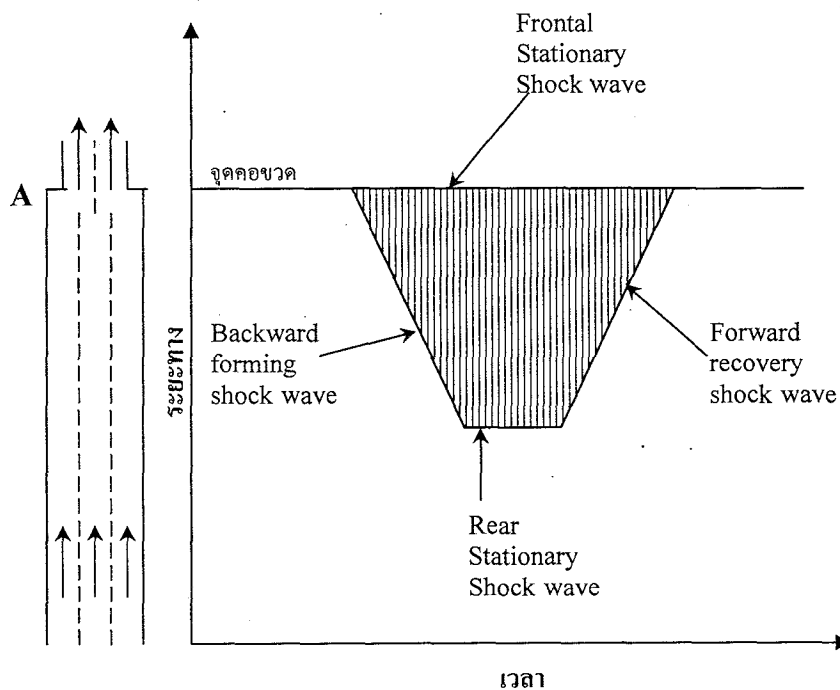
รูปที่ 7.4 ปรากฏการณ์การเกิด shock wave ที่บริเวณทางแยกสัญญาณไฟ

7.2.2 การเกิด shock wave ที่บริเวณจุดคอขวดบนทางหลวง

ตัวอย่างนี้ จะพบเห็นได้ทั่วไปในบริเวณที่จำนวนช่องจราจรบริเวณปลายน้ำ มีจำนวนน้อยกว่าจำนวนช่องจราจรบริเวณต้นน้ำ เกิดเป็นสภาพคอขวดขึ้น เช่นบริเวณจุดเชื่อมต่อของทางด่วนพิเศษสองสาย หรือบริเวณคอสะพานซึ่งสะพานมีจำนวนช่องจราจรน้อยกว่าเส้นทางถนนทั่วไป ซึ่งสภาพคอขวดเหล่านี้ จะเกิดปรากฏการณ์ shock wave ขึ้นเป็นประจำ นอกจากนี้ การเกิดอุบัติเหตุกีดขวางช่องจราจร หรือการปิดช่องจราจรบางช่องเพื่อซ่อมแซมบำรุงรักษาถนน ก็จะมีผลให้เกิดปรากฏการณ์ shock wave เช่นเดียวกัน แต่เหตุการณ์เหล่านี้จะไม่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเช่นสองกรณีแรก

ปรากฏการณ์ shock wave ที่บริเวณคอขวดนี้ สามารถอธิบายโดยใช้ รูปที่ 7.5 สมมติทางหลวงสายหนึ่ง มีความกว้าง 3 ช่องจราจรต่อทิศทางมาโดยตลอดจนกระทั่งถึงจุด A ซึ่งความกว้างลดลง เหลือเพียง 2 ช่องจราจรต่อทิศทางเท่านั้น บริเวณนี้ถือได้ว่าเป็นจุดคอขวดที่จะก่อให้เกิดปัญหาสภาพการจราจรติดขัดได้ง่าย ในช่วงกลางวัน ความต้องการการเดินทางไม่สูงมากนัก ช่องจราจรเพียง 2 ช่อง ก็สามารถรองรับได้โดยเพียงพอ จึงไม่เกิดปัญหาสภาพการจราจรติดขัดในบริเวณนี้แต่อย่างไร ในขณะที่ช่วงเลิกงาน ความต้องการการเดินทางบนทางหลวงสายนี้ เพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งเวลา T_1 ที่ความต้องการการเดินทางเพิ่มสูงขึ้นจนเกินความจุของจุดคอขวด (2 ช่องจราจร) ก็จะเห็นว่า มีสภาพการจราจรติดขัดเกิดขึ้น และค่อยๆ ก่อตัวเพิ่มมากขึ้นทุกขณะ ในช่วงระหว่างเวลา $T_1 - T_2$ มี shock wave ประเภท Backward forming เกิดขึ้น ผู้ขับขี่ที่ขับเคลื่อนรถยนต์ผ่านเส้นนี้ จะต้องชะลอความเร็วลง เพื่อมาต่อท้ายแถวคอยที่เคลื่อนตัวไปช้าๆ เนื่องจากสภาพการจราจรติดขัดบริเวณคอขวดที่ปลายน้ำ

จากนั้น สมมติว่าความต้องการการเดินทางในช่วงเวลา $T2 - T3$ ปรับตัวลดลงเหลือเท่ากับความเร็วของจุดคอขวด จะพบว่าในช่วงเวลานี้ ความยาวแถวคอย (หรือสภาพการจราจรติดขัด) จะมีระยะค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเพิ่ม หรือ ลดลงแต่อย่างใด แสดงโดยเส้น shock wave ที่เป็นเส้นตรงในแนวราบ ขนานกับแกนเวลา shock wave ประเภทนี้ เรียกว่า Rear Stationary ภายหลังจากช่วงเวลา $T3$ ไปแล้ว ความต้องการการเดินทางจะลดลง จนกระทั่งมีค่าต่ำกว่าความเร็วของจุดคอขวด ดังนั้นในช่วงเวลานี้ สภาพการจราจรติดขัด จะค่อยๆ สลายตัว เกิดเป็น shock wave อีกหนึ่งตัวที่เรียกว่า Forward recovery shock wave ในเหตุการณ์นี้ จะพบว่ามี Frontal stationary shock wave ด้วย เป็นเส้นตรงที่เกิดขึ้นบริเวณจุดคอขวด (ในภาพ) และมีแนวขนานกับแกนเวลา อนึ่ง จุดตัดระหว่าง Frontal stationary shock wave กับ Backward forming shock wave เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดสภาพการจราจรติดขัด ในขณะที่จุดตัดระหว่าง Frontal stationary shock wave กับ Forward recovery shock wave เป็นจุดสิ้นสุดการเกิดสภาพการจราจรติดขัด



รูปที่ 7.5 ปรากฏการณ์การเกิด shock wave ที่บริเวณจุดคอขวดบนทางหลวงในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน

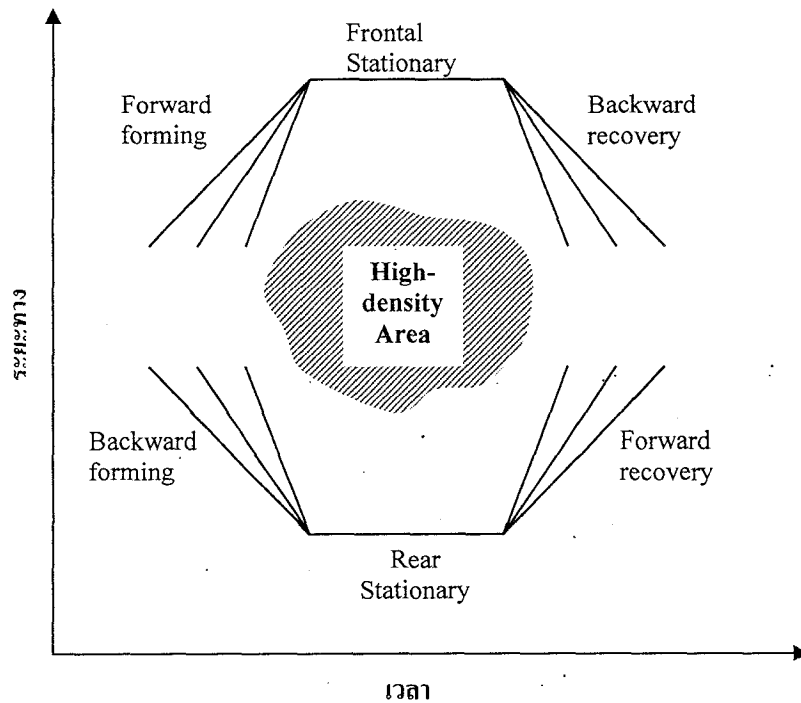
สำหรับสถานการณ์จริงในชีวิตประจำวันนั้น จะพบว่าปรากฏการณ์การเกิด shock wave มีความซับซ้อนมากกว่าตัวอย่างที่กล่าวไปแล้วมากนัก ทั้งนี้เพราะตัวอย่างที่กล่าวมานี้ ได้มีการกำหนดสถานการณ์ต่างๆ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย ตัวอย่างสมมติฐานที่ใช้ก็คือ มีจุดคอขวดหนึ่งจุดเท่านั้น ความต้องการการเดินทางในแต่ละช่วงเวลามีรูปแบบอย่างง่าย และบางช่วงมีค่าคงที่ เป็นต้น

7.3 ประเภทของ shock wave

Shock wave สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภทด้วยกัน ประกอบด้วย

1. frontal stationary
2. rear stationary
3. backward forming
4. forward forming
5. backward recovery
6. forward recovery

ลักษณะของการเกิด shock wave ทั้ง 6 ประเภท แสดงใน รูปที่ 7.6 ในรูปดังกล่าว จะมีสภาพการจราจรติดขัดที่บริเวณใจกลาง ซึ่งล้อมรอบโดยเส้น shock wave ประเภทต่างๆ ด้านนอกของเส้น shock wave จะเป็นสภาพการจราจรแบบคล่องตัว โปรดสังเกตว่า shock wave จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพการจราจร (หรือความหนาแน่นการจราจร) อย่างฉับพลัน ทั้งนี้ การอธิบาย shock wave รูปแบบต่างๆ จะเริ่มต้นจาก shock wave ประเภทที่พบเห็นได้มากที่สุด จนกระทั่ง ประเภทสุดท้าย จะเป็นประเภทที่ไม่พบเห็นบ่อยนัก



รูปที่ 7.6 การแบ่งประเภทของ shock wave

Shock wave ประเภท Frontal stationary มักจะเกิดขึ้นบริเวณจุดคอขวด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาสภาพการจราจรติดขัดเนื่องจากความต้องการการเดินทาง สูงกว่าความจุจราจรของบริเวณนั้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ อาจเกิดขึ้นเป็นประจำทุกวัน เช่น ในกรณี จุดเชื่อมของทางหลวงสายหลักสองสายทาง หรือบริเวณที่มีจำนวนช่องทางจราจรลดลง หรืออาจจะเกิดขึ้นแบบไม่เป็นประจำ เช่น ในกรณี การเกิดอุบัติเหตุกีดขวางช่องจราจร หรือการปิดช่องจราจรเพื่อปรับปรุงซ่อมแซม เป็นต้น คำว่า Frontal แสดงถึงขอบเขตทางด้านปลายน้ำของสภาพการณ์จราจรติดขัด (หรืออีกนัยหนึ่งจุดเริ่มต้นของการติดขัด) สภาพการณ์จราจรทางด้านปลายน้ำของ

frontal shock wave นี้ มีความหนาแน่นน้อย สภาพคล่องตัว ขณะที่สภาพการจราจรทางด้านเหนือน้ำ จะมีความหนาแน่นมาก สภาพติดขัด ผู้ขับขี่ในกระแสจราจร เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเส้น shock wave นี้ จะรู้สึกได้ถึงที่กำลังขับผ่านสภาพการจราจรติดขัดมา เข้าสู่ช่วงสภาพการจราจรแบบคล่องตัว สามารถใช้ความเร็วเพิ่มขึ้นได้

Stationary shock wave คือ shock wave ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ประจำอยู่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแน่นอน ตัวอย่างการเกิด Frontal stationary shock wave ดังแสดงในรูปที่ 7.4-7.5

Shock wave ประเภท backward forming จะเกิดขึ้นเมื่อสภาพการจราจรติดขัดเริ่มก่อตัวขึ้น เนื่องจากความต้องการการเดินทางสูงกว่าความจุจราจร ณ บริเวณคอขวด คำว่า Backward หมายถึงการเคลื่อนตัวของ shock wave ในทิศทางสวนกับการจราจร หรือมีการพัฒนาตัวเองไปทางด้านต้นน้ำ ส่วนคำว่า Forming หมายถึงการก่อตัวของสภาพการจราจรติดขัด ซึ่งค่อยๆ สะสมตัว มีระยะทางยาวขึ้นไปทางด้านต้นน้ำ ทางด้านซ้ายมือของเส้น shock wave ประเภท backward forming นี้ จะมีความหนาแน่นต่ำ สภาพการจราจรคล่องตัว ส่วนทางด้านขวามือของเส้นนี้ จะมีความหนาแน่นสูง สภาพการจราจรติดขัด ในสภาพการณ์บนท้องถนนจริง ผู้ขับขี่ที่ผ่านมาถึง shock wave นี้ จะรับรู้ความเปลี่ยนแปลงของสภาพการจราจรโดยฉับพลัน จากเดิมสภาพการจราจรคล่องตัว สามารถใช้ความเร็วได้สูง เปลี่ยนมาเป็นสภาพการจราจรติดขัด ต้องชะลอความเร็วลง ใช้ความเร็วต่ำ หรืออาจจะต้องหยุดรถต่อท้ายแถวคอย ตัวอย่างการเกิด shock wave ประเภทนี้ แสดงให้เห็นในรูปที่ 7.4-7.5

หนึ่ง ความชันของเส้น shock wave จะแสดงถึงความเร็วในการพัฒนาตัวเองของ shock wave ยิ่งมีความชันมากเท่าไร ก็แสดงว่า ความเร็วในการก่อตัวของสภาพการณ์จราจรติดขัดยิ่งมีมากขึ้นเท่านั้น ถ้าความเร็วในการพัฒนา shock wave สูง (เส้นมีความชันมาก) ปัญหาสภาพการจราจรติดขัดเนื่องจากจุดคอขวดดังกล่าว จะขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในกรณีความเร็วในการพัฒนา shock wave ต่ำ (หรือเส้นมีความชันน้อย) ก็แสดงว่า ความเร็วในการก่อตัวของสภาพการณ์จราจรติดขัดไม่สูงมากนัก นั่นคือปัญหาสภาพการจราจรติดขัดเนื่องจากจุดคอขวดดังกล่าว จะค่อยๆ ส่งผลผลกระทบต่อการจราจรต้นน้ำ ไม่ได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว

Shock wave ประเภท forward recovery จะเกิดขึ้นเมื่อการจราจรมีสภาพติดขัดแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง และกำลังจะเริ่มสลายตัว อันเนื่องมาจากความต้องการการเดินทางได้ปรับตัวลดลง จนมีค่าต่ำกว่าความจุจราจร ณ บริเวณคอขวด ระยะทางการติดขัดจะค่อยๆ หดสั้นลง คำว่า Forward หมายถึงการเคลื่อนตัวของ shock wave ที่มีทิศทางเดียวกับการจราจร หรือมีการพัฒนาตัวเองไปทางด้านปลายน้ำ ส่วนคำว่า Recovery หมายถึงการสลายตัวของสภาพการจราจรติดขัด ระยะทางที่ได้รับผลกระทบจะค่อยๆ หดสั้นลง ทางด้านซ้ายมือของเส้น shock wave ประเภทนี้ จะมีความหนาแน่นสูง สภาพการจราจรติดขัด ส่วนทางด้านขวามือของเส้นนี้ จะมีความหนาแน่นต่ำ สภาพการจราจรคล่องตัว ในสภาพการณ์บนท้องถนนจริง ผู้ขับขี่ที่ผ่านมาถึง shock wave นี้ จะรับรู้ความเปลี่ยนแปลงของสภาพการจราจรโดยฉับพลัน จากเดิมสภาพการจราจรติดขัด ต้องใช้ความเร็วต่ำ หรืออาจจะต้องหยุดรถ เปลี่ยนมาเป็นสภาพการจราจรคล่องตัว สามารถใช้ความเร็วได้สูง ตัวอย่างการเกิด shock wave ประเภท backward forming แสดงให้เห็นในรูปที่ 7.5

หนึ่ง ความชันของ shock wave ก็ จะแสดงถึงความเร็วในการพัฒนาตัวเองของ shock wave ยิ่งมีความชันมากเท่าไร ก็แสดงว่าความเร็วในการสลายตัวของสภาพการณ์จราจรติดขัดยิ่งมีมากขึ้นเท่านั้น นั่นคือ สำหรับ shock wave ที่มีความชันมาก ปัญหาสภาพการจราจรติดขัดเนื่องจากจุดคอขวด ได้สลายตัวอย่างรวดเร็ว สำหรับ shock wave ที่มีความชันน้อย ก็แสดงว่าความเร็วใน

การสลายตัวของสภาพการณ์จราจรติดขัดค่อนข้างช้า นั่นคือปัญหาสภาพการจราจรติดขัดเนื่องจากจุดคอขวด จะค่อยๆ สลายตัวไปอย่างช้าๆ

Shock wave ประเภท rear stationary จะเกิดขึ้นในกรณีที่ต้องการการเดินทาง มีค่าเท่ากับความเร็วจราจร ณ บริเวณจุดคอขวด เป็นระยะเวลาหนึ่ง คำว่า rear แสดงถึงขอบเขตทางด้านต้นน้ำของสภาพการณ์จราจรติดขัด สภาพการณ์จราจรทางด้านปลายน้ำของ shock wave ประเภทนี้ จะมีความหนาแน่นมาก หรือสภาพติดขัด ในขณะที่ทางด้านเหนือน้ำ จะมีความหนาแน่นน้อยหรือสภาพคล่องตัว Stationary shock wave คือ shock wave ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ประจำอยู่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแน่นอน ตัวอย่างการเกิด shock wave ประเภท rear stationary ดังแสดงในรูปที่ 7.5

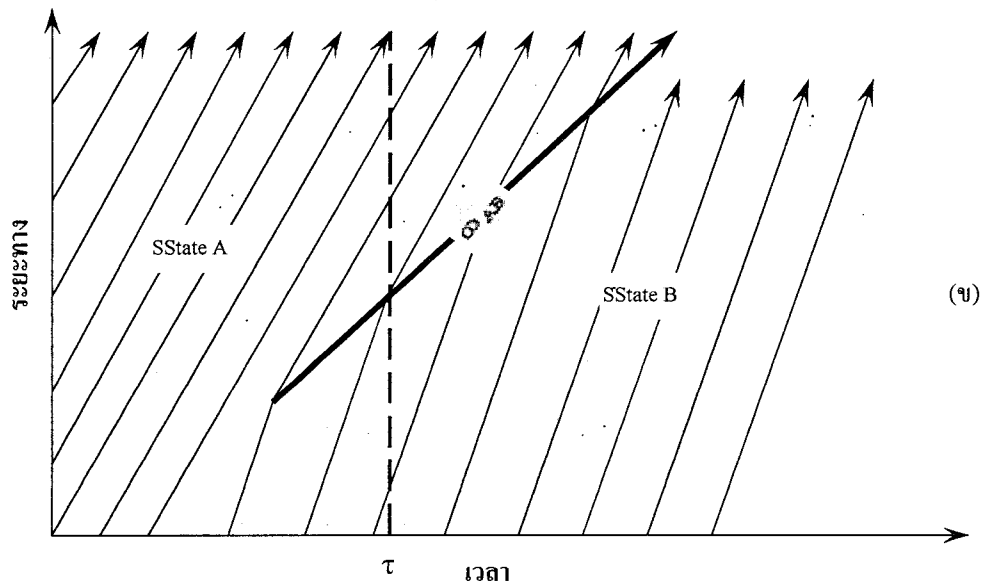
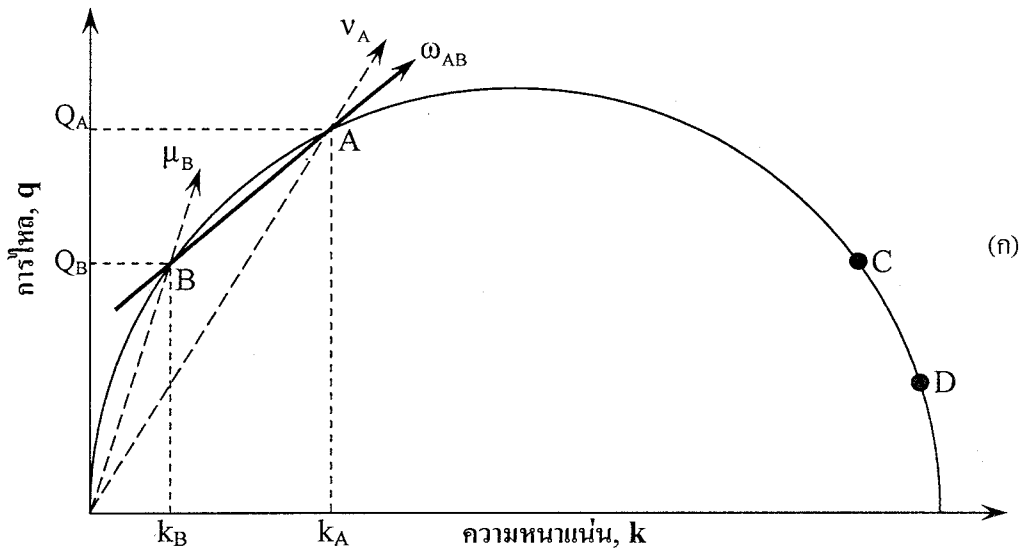
Shock wave ประเภท backward recovery จะเกิดขึ้นเมื่อการจราจรมีสภาพติดขัดแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง และกำลังจะเริ่มสลายตัวลง อันเนื่องมาจากความความจุจราจร ณ บริเวณคอขวด ได้ปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่ามากกว่าความต้องการการเดินทาง คำว่า Backward หมายถึงการเคลื่อนตัวของ shock wave ที่มีทิศสวนทางกับการจราจร หรือมีการพัฒนาตัวเองไปทางด้านต้นน้ำ ส่วนคำว่า Recovery หมายถึงการสลายตัวของสภาพการจราจรติดขัด ระยะทางที่ได้รับผลกระทบจะค่อยๆ หดสั้นลงไปทางด้านต้นน้ำ ทางด้านซ้ายมือของเส้น Forward recovery shock wave นี้ จะมีความหนาแน่นสูง สภาพการจราจรติดขัด ส่วนทางด้านขวามือของเส้นนี้ จะมีความหนาแน่นต่ำ สภาพการจราจรคล่องตัว ตัวอย่างการเกิด shock wave ประเภท backward recovery แสดงให้เห็นในรูปที่ 7.4 หรือไม่ว่าจะเป็นการเปิดช่องทางจราจรหลังจากเคลียร์อุบัติเหตุเสร็จแล้ว หรือการเปิดช่องทางหลังจากปิดช่องทางจราจรบางช่องเพื่อซ่อมบำรุง

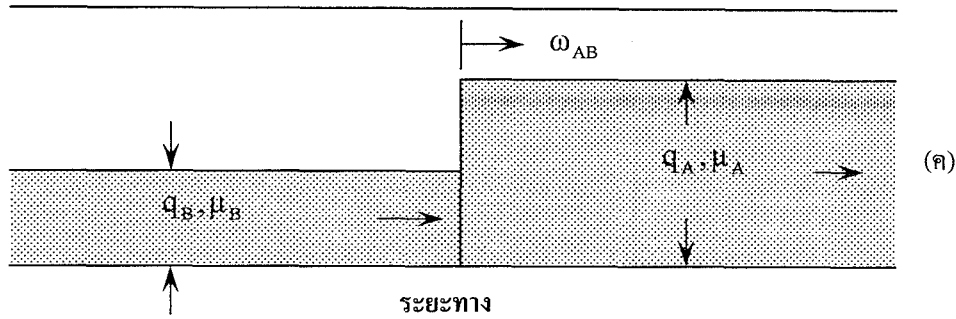
Shock wave ประเภทสุดท้าย คือ ประเภท forward forming มักจะไม่ค่อยได้พบเห็นได้บ่อยนักในชีวิตประจำวัน คำว่า Forward หมายถึงการเคลื่อนตัวของ shock wave ที่มีทิศทางเดียวกับการจราจร หรือมีการพัฒนาตัวเองไปทางด้านปลายน้ำ ส่วนคำว่า Forming หมายถึงการก่อตัวของสภาพการจราจรติดขัด ซึ่งค่อยๆ สะสมตัว มีระยะทางยาวขึ้นไปทางด้านปลายน้ำ ทางด้านซ้ายมือของเส้น shock wave ประเภทนี้ จะมีความหนาแน่นต่ำ สภาพการจราจรคล่องตัว ส่วนทางด้านขวามือของเส้นนี้ จะมีความหนาแน่นสูง สภาพการจราจรติดขัด ตัวอย่างการเกิด Shock wave ประเภท backward forming ได้แก่ ที่บริเวณเส้นทางขึ้นเขาที่มีความชันสูงมากๆ และมีปริมาณรถบรรทุกจำนวนมาก เนื่องจากรถบรรทุกเหล่านี้ มีน้ำหนักมากจึงไม่สามารถเร่งตัว หรือใช้ความเร็วได้เต็มที่ขณะขึ้นเขา ยวดยานประเภทอื่นที่ตามหลังมาก็ไม่สามารถแซงขึ้นหน้าได้ ก่อให้เกิดแถวคอยของยวดยานที่เคลื่อนตัวไปช้าๆ ตามหลังรถบรรทุกขึ้นเขา ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า “คอขวดเคลื่อนที่” (Moving Bottleneck) ซึ่งขอบเขตด้านหน้า (frontal) ของสภาพการจราจรติดขัดมีลักษณะเคลื่อนที่ตลอดเวลา ไปในทิศทางเดียวกับการจราจร

7.4 การวิเคราะห์ shock wave

7.4.1 โครงสร้างที่มีการไหลจรรจบเป็นแบบต่อเนื่อง - กรณีที่ 1

ในการวิเคราะห์ Shock wave ของโครงสร้างประเภทที่มีการไหลจรรจบเป็นแบบต่อเนื่องนั้น โดยปกติจะเริ่มต้นโดยการพิจารณา กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การไหลและความหนาแน่น (flow-density curve) ของเส้นทางนั้น ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 7.7 (ก) สมมติว่าทางหลวงเส้นหนึ่ง มีสภาพการจราจรในช่วงปลายน้ำเป็นแบบสถานะ A (นั่นคือ มีความหนาแน่นเท่ากับ k_A อัตราการไหลเท่ากับ q_A และความเร็วจราจรเท่ากับ u_A - ความเร็วคือความชันของเส้นสัมผัสจุด A) ส่วนในช่วงต้นน้ำ พบว่า มีสภาพการจราจรเป็นแบบสถานะ B (นั่นคือ มีความหนาแน่นเท่ากับ k_B อัตราการไหลเท่ากับ q_B และความเร็วจราจรเท่ากับ u_B) ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า ความเร็วจราจรสูงกว่า และสภาพการจราจรคล่องตัวมาก จะเห็นได้ว่า ความเร็วเฉลี่ยของขบวนช่วงต้นน้ำนั้น จะสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของขบวนช่วงปลายน้ำ ดังนั้น ในที่สุด ขบวนในสถานะ B จะเคลื่อนตัวมาทัน ขบวนที่มีสถานะ A ที่อยู่ปลายน้ำ ดังกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของขบวนใน รูปที่ 7.7 (ข)





รูปที่ 7.7 การวิเคราะห์ shock wave เบื้องต้น

อนึ่ง ในการวิเคราะห์นั้น จะต้องแสดงความเร็วของขบวนการแต่ละคันใน รูปที่ 7.7 (ข) ให้มีความชัน เท่ากับความเร็วจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลและความหนาแน่น รูปที่ 7.7 (ก) เส้นตรงหนาที่ แสดงขอบเขตระหว่างสถานะ A และ B (หรือเส้นที่แสดงตำแหน่งที่ขบวนการในสถานะ B ที่มีความเร็วสูงกว่า ได้ ตามขบวนการในสถานะ A ที่มีความเร็วต่ำกว่าได้ทันที) นี้เองคือเส้นแสดง Shock Wave (w_{AB} - shock wave ระหว่าง สถานะ A และ B) เมื่อขบวนการคันใดเคลื่อนตัวมาถึงเส้น Shock Wave นี้ ก็จะประสบถึงการเปลี่ยนแปลงของ ความหนาแน่นจรวดอย่างฉับพลัน และจะต้องชะลอความเร็วลงเพื่อขับเคลื่อนไปในกระแสรจาดในสถานะ A ที่มีความเร็วต่ำกว่าได้อย่างปลอดภัย

รูปที่ 7.7 (ค) แสดงทางหลวงช่วงหนึ่งที่มีความกว้างแตกต่างกัน ส่งผลให้มีสภาพการจราจรสอง สถานะได้แก่ สถานะ A และ B อย่างไรก็ตาม ในรูปดังกล่าว ได้แสดงถึงความเร็วจำนวน 3 ตัวด้วยกัน คือ ความเร็วเฉลี่ยของขบวนการในสถานะ A (u_A) ความเร็วเฉลี่ยของขบวนการในสถานะ B (u_B) และ ความเร็วของ Shock wave ระหว่างสถานะ A กับ B (w_{AB}) ทั้งนี้ ความเร็วของ shock wave อาจจะเป็นแบบ forward (มีทิศทางการพัฒนาตัวเองไปในทิศทางเดียวกับการจราจร - มุ่งปลายทาง) หรือ แบบ backward (มีทิศทางการพัฒนาตัวเองไปในทิศทางสวนการจราจร - มุ่งต้นน้ำ) ก็ได้ อนึ่ง การคำนวณให้กำหนดว่า shock wave ที่มีทิศทางมุ่ง ปลายทาง มีเครื่องหมายเป็นบวกเสมอ เพื่อป้องกันการสับสน ทั้งนี้ ถ้าวิเคราะห์แล้ว shock wave เคลื่อนที่มุ่งไป ทางต้นน้ำ ก็จะมีเครื่องหมายเป็นลบ โดยอัตโนมัติ

พิจารณา ขอบเขตของ shock wave จำนวนขบวนการที่กำลังออกจากสถานะ B (N_B) จะต้องเท่ากับ จำนวนขบวนการที่กำลังเข้าสู่สถานะ A (N_A) เพราะขบวนการจะไม่มีการสูญหายหรือเพิ่มขึ้นระหว่างทาง ความเร็ว สัมพัทธ์ของขบวนการในสถานะ B เทียบกับความเร็วของ Shock wave จะเท่ากับ $(u_B - w_{AB})$ ส่วนความเร็วสัมพัทธ์ ของขบวนการในสถานะ A เทียบกับความเร็วของ Shock wave จะเท่ากับ $(u_A - w_{AB})$ ดังนั้น จำนวนขบวนการ N_B และ N_A สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$N_B = q_B t = (u_B - w_{AB}) k_B t \quad (7-1)$$

$$N_A = q_A t = (u_A - w_{AB}) k_A t \quad (7-2)$$

เนื่องจาก $N_B = N_A$ ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์สูตรคำนวณค่าความเร็วของ Shock Wave ได้ดังนี้

$$(u_B - w_{AB}) k_B t = (u_A - w_{AB}) k_A t \quad (7-3)$$

$$w_{AB} = \frac{q_A - q_B}{k_A - k_B} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad (7-4)$$

จากสมการ (7-4) จะเห็นว่า ความเร็ว Shock wave จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล (Δq) หารด้วยการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (Δk) ระหว่างสถานะทั้งสอง มีหน่วยเป็น กม./ชม. อนึ่ง ความเร็ว Shock wave นี้สามารถวิเคราะห์ได้จาก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความหนาแน่น ได้โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 7.7 (ก) ซึ่งก็คือความชันของเส้นที่ลากเชื่อมระหว่างสถานะ A และสถานะ B นั่นเอง จากภาพดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ค่า q_A และ k_A มีค่าสูงกว่าค่า q_B และ k_B ตามลำดับ ดังนั้นค่าความเร็ว Shock wave จึงมีเครื่องหมายเป็นบวก (เส้น Shock wave ทำมุมเอียงขึ้น) ดังนั้น Shock wave นี้จะเป็นประเภท forward-moving หรือเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกับการจราจร

จากนั้น ลองพิจารณา Shock wave ที่เกิดขึ้นระหว่างสถานะ B และ C (ดูรูปที่ 7.7 (ก)) ในกรณีนี้ จะพบว่า q_B จะมีค่าเท่ากับ q_C ดังนั้น จากสมการ (7-4) ความเร็วของ Shock wave จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งแสดงโดยเส้นเชื่อมต่อระหว่าง จุด B และ จุด C เป็นเส้นแนวนอนไม่มีความชัน สภาพการณ์เช่นนี้ จึงเกิด shock wave ประเภทที่เป็น stationary

ต่อมา ลองพิจารณา shock wave ที่เกิดขึ้นระหว่างสถานะ B และ D ในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่า ค่า q_B สูงกว่าค่า q_D ในขณะที่ ค่า k_B ต่ำกว่าค่า k_D ดังนั้นความเร็ว Shock wave จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือ Shock wave ได้พัฒนาตัวเองขึ้นไปในทิศทางที่สวนกับการจราจร หรือมุ่งทางด้านนี้ จากรูปที่ 7.7 (ก) ก็จะทำให้เห็นว่าเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุด B และ D. จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นลบ (ทำมุมเอียงลง) สภาพการณ์ Shock wave แบบนี้ จะเรียกว่า backward-moving หรือพัฒนาตัวเองไปในทิศทางที่สวนกับการจราจร

7.4.2 โครงสร้างที่มีการไหลจราจรเป็นแบบต่อเนื่อง – กรณีที่ 2

ในกรณีนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ Shock wave บนโครงสร้างที่มีการไหลจราจรแบบต่อเนื่องอีกกรณีหนึ่ง ซึ่งเป็นทางหลวงที่มีความชันสูง ซึ่งเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งเข้ามาในกระแสจราจร จะเคลื่อนตัวได้ช้าๆ เนื่องจากกำลังของเครื่องยนต์ไม่เพียงพอ ก่อให้เกิดความล่าช้าแก่รถยนต์คันอื่นๆ ในกระแสจราจร เพราะไม่สามารถเคลื่อนตัวแซงขึ้นหน้ารถบรรทุกดังกล่าวได้ การวิเคราะห์นี้ จำเป็นจะต้องใช้ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความหนาแน่น (flow-density curve) ของเส้นทางนั้น ดังแสดงในรูปที่ 7.8 (ก)

จากรูปที่ 7.8 (ข) จะเห็นว่า ก่อนที่รถบรรทุกจะเข้ามาในกระแสรถจร สภาพการจราจรโดยทั่วไปมีสภาพเป็นปกติ หรืออยู่ในสถานะ A เมื่อเวลา t_1 ได้มีรถบรรทุกคันหนึ่งเข้าสู่กระแสรถจร และสามารถใช้ความเร็วในช่วงขึ้นเขานี้ ได้เท่ากับ U_B เท่านั้น ส่งผลให้ขบวนต่างๆ ที่อยู่ด้านหลังรถบรรทุกไม่สามารถใช้ความเร็วได้เต็มที่ การจราจรที่ตามหลังรถบรรทุก กลายสภาพเป็นสถานะ B. ส่วนด้านหน้าของรถบรรทุกนั้น การจราจรจะกลายสภาพเป็นสถานะ D จากรูปที่ 7.8 (ข) จะเห็นได้ว่า ได้เกิด Shock Wave ขึ้นสามตัว ณ เวลา t_1 เมื่อมีรถบรรทุกวิ่งเข้ามาในกระแสรถจร ประกอบด้วย w_{AD} , w_{AB} และ w_{DB} โปรดสังเกตว่า w_{DB} นี้จะมีค่าเท่ากับค่าความเร็วของรถบรรทุก U_B นั่นเอง

ณ เวลา t_2 รถบรรทุกคันดังกล่าวได้ออกจากทางหลวงดังกล่าว ส่งผลให้ขบวนที่ขับเคลื่อนตามมาด้านหลัง สามารถใช้ความเร็วได้สูงขึ้น สภาพการจราจรของขบวนด้านหลังรถบรรทุกดังกล่าว ได้กลายสภาพเป็นสถานะ C หรือสภาพเต็มความจุจราจร จะเห็นได้ว่า เกิดมี Shock wave ขึ้นมาอีก 2 ตัว ณ ตำแหน่งที่รถบรรทุกออกจากระบบ ได้แก่ w_{DC} และ w_{BC} โดยที่ w_{DC} เป็น Shock wave ประเภท forward-moving ส่วน w_{BC} เป็น Shock wave ประเภท backward-moving

ณ เวลา t_3 Shock wave w_{BC} และ w_{AB} ชนกัน ส่งผลให้เกิดเป็น Shock wave ตัวใหม่ขึ้นมา คือ w_{AC} แสดงถึงขอบเขตการไหลระหว่างสถานะ A และ C ซึ่ง Shock wave ตัวนี้เป็นประเภท forward-moving โปรดสังเกตว่าการเกิด w_{AC} นี้ ทำให้ Shock wave สองตัวแรก คือ w_{BC} และ w_{AB} สิ้นสุดลง

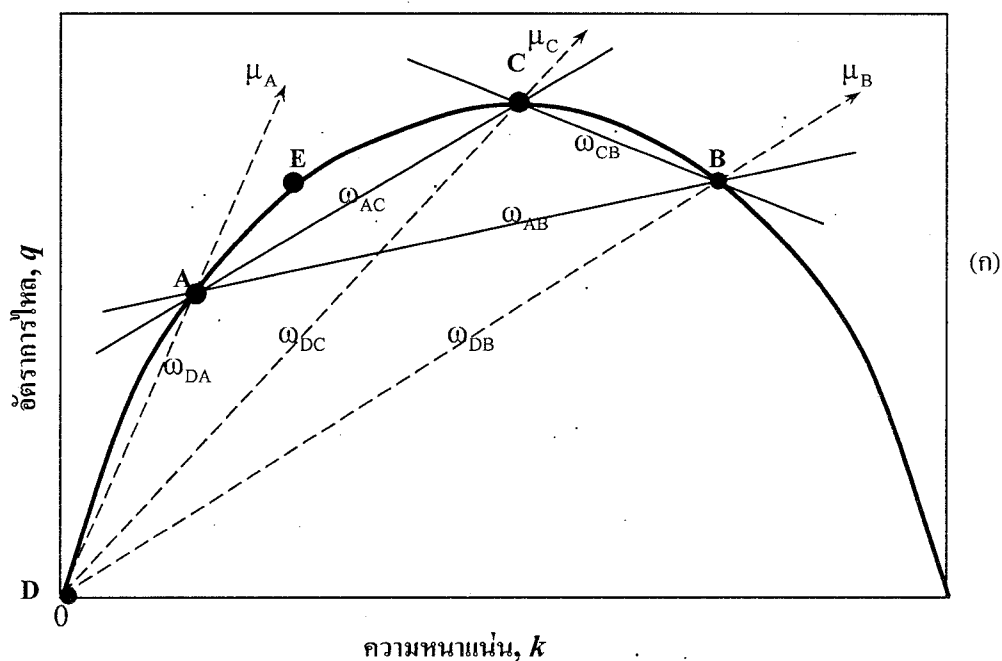
รูปที่ 7.8 (ข) แสดงการเคลื่อนตัวของขบวนแต่ละคันในกระแสรถจร ตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่า เหตุการณ์รถบรรทุกเข้าสู่กระแสรถจรบนทางขึ้นเขานี้ ได้ก่อให้เกิด Shock wave ขึ้นมาทั้งหมด 6 ตัว ประกอบด้วย Shock wave ประเภท forward-moving จำนวน 5 ตัว และ ประเภท backward-moving จำนวน 1 ตัว รถบรรทุกคันดังกล่าว ไม่เพียงจะส่งผลกระทบต่อกระแสรถจรในระหว่างที่รถบรรทุกอยู่ในกระแสรถจรเท่านั้น แต่จะส่งผลกระทบต่อกระแสรถจรหลังจากที่รถบรรทุกออกจากระบบไปแล้วระยะหนึ่งด้วย (ระหว่าง t_2 ถึง t_3) ลองสังเกตการเคลื่อนที่ของขบวนคันที่แรงด้วยดีเทานั้น เมื่อขบวนคันดังกล่าวเคลื่อนตัวผ่านบริเวณที่รถบรรทุกวิ่งเข้ามาในระบบนั้น รถบรรทุกคันดังกล่าวกำลังวิ่งออกจากระบบพอดี ขบวนคันดังกล่าวจำเป็นต้องชะลอความเร็วลง เท่ากับความเร็วรถบรรทุก U_B เป็นช่วงเวลาหนึ่ง โดยที่ผู้ขับขี่ไม่สามารถทราบได้ว่าเหตุใดกระแสรถจรจึงชะลอความเร็วลง หลังจากนั้น ไม่นานกระแสรถจรก็ได้เร่งความเร็วขึ้นเล็กน้อย แต่ก็ยังไม่เร็วเท่ากับความเร็วเริ่มต้นของขบวนคันดังกล่าว กล่าวโดยสรุปคือ ผู้ขับขี่ขบวนคันนี้ได้ประสบเหตุการณ์จราจรติดขัดเป็นระยะเวลาหนึ่ง (หลังจากที่รถบรรทุกได้เลี้ยวออกจากระบบแล้ว) โดยที่ไม่ทราบสาเหตุของการจราจรติดขัดที่แท้จริง

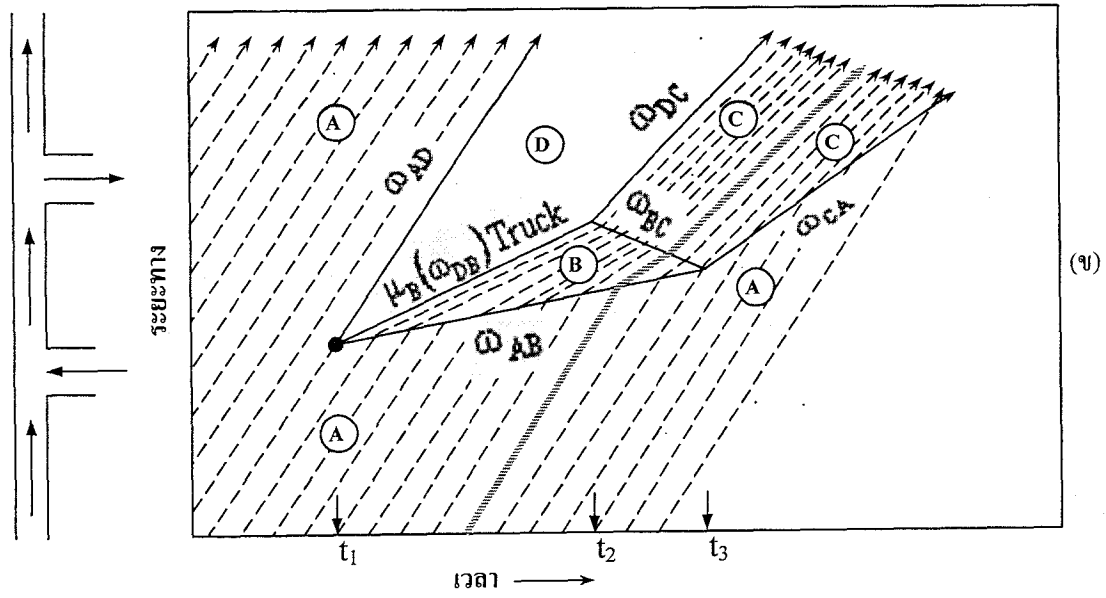
ลองจินตนาการภาพเหตุการณ์จำลอง สามเหตุการณ์ต่อไปนี้ เหตุการณ์แรก สมมติว่าสถานะการไหล B, C และ D ยังคงเหมือนเดิม แต่ที่สถานะ A เปลี่ยนแปลงไประหว่างจุด D (สภาพการจราจรคล่องตัวมาก) และ C (สภาพการจราจรเต็มความจุจราจร) ดังแสดงในรูปที่ 7.8 (ก) ในกรณีที่ สถานะ A มีสภาพการจราจรคล่องตัวมาก (เข้าใกล้สถานะ D) เส้น Shock wave w_{AB} จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของรถบรรทุก U_B สถานะการไหล B และ C จะมีพื้นที่ลดลงอย่างมาก นั่นคือ เมื่อทางหลวงเส้นดังกล่าวมีปริมาณขบวนน้อยนั้น รถบรรทุกคันดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสรถจรบนทางหลวงมากนัก

ในกรณีที่สอง สมมติว่า สถานะ A มีสภาพการจราจรเข้าใกล้สถานะ E จะพบว่าอัตราการไหลของสถานะ A และสถานะ B จะมีค่าเท่ากัน ($q_A = q_B$) สำหรับกรณีนี้ w_{AB} จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ w_{AB} เป็น

Shock wave ประเภท stationary อยู่ในตำแหน่งที่รถบรรทุกเคลื่อนเข้ามาในระบบ และคงอยู่ในตำแหน่งเดิมโดยไม่เคลื่อนที่ไปไหน สถานะการไหล B และ C จะมีพื้นที่เพิ่มขึ้นจากที่แสดงใน รูปที่ 7.8 (ข)

ในกรณีถัดมา ถ้าสถานะ A มีสภาพการจราจรเข้าใกล้สถานะ C พบว่า w_{AB} จะกลายเป็น Shock wave ประเภท backward-moving ส่วน w_{CA} จะยังคงเป็น Shock wave ประเภท forward-moving อยู่ แต่ความเร็วของ Shock wave จะลดลงต่ำกว่าที่แสดงใน รูปที่ 7.8 (ข) สถานะการไหล B และ C จะมีพื้นที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นจากกรณีที่สองอีก สำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุดนั้น เกิดขึ้นในกรณีที่กระแสนจราจร ก่อนที่รถบรรทุกจะเข้ามาสู่ระบบ มีสภาพเต็มความจุจราจร (สถานะ C) อยู่แล้ว ในกรณีนี้ w_{AB} และ w_{BC} กลายเป็น Shock wave แบบ backward-moving ที่มีความเร็วเท่ากันพอดี ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว สภาพการจราจรติดขัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถบรรทุกใช้ความเร็วต่ำ จะคงอยู่ตลอดกาล





รูปที่ 7.8 การวิเคราะห์ shock wave สำหรับทางหลวงในกรณีที่มีรถบรรทุกวิ่งเข้ากีดขวางการจราจร

7.4.3 โครงสร้างที่มีการไหลจากรอบไม่ต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ Shock wave สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่มีการไหลจากรอบไม่ต่อเนื่อง เช่น บริเวณทางแยกสัญญาณไฟจราจร ได้เช่นเดียวกัน การวิเคราะห์จะช่วยให้เราเข้าใจสภาพการจราจรได้ดียิ่งขึ้น และตอบข้อสงสัยต่างๆ ได้ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์หาความยาวแถวคอยของขบวนรถที่กำลังรอสัญญาณไฟเขียวขาว เพื่อตรวจสอบว่าแถวคอยจะมีความยาวเกิน storage bay หรือไม่ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการกีดขวางการจราจรของขบวนรถตรง หรือการตรวจสอบว่าความยาวแถวคอยจากทางแยกหนึ่ง จะสะสมตัวจนมีระยะทางยาวจนกีดขวางการจราจรบนทางแยกต้นน้ำถัดไปหรือไม่ เป็นต้น การวิเคราะห์ Shock wave ที่บริเวณทางแยกนั้น คล้ายกับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการจราจรแบบต่อเนื่อง นั่นคือ จำเป็นจะต้องทราบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับความหนาแน่น ซึ่งจะเป็นกราฟที่สามารถอ้างอิงในการวิเคราะห์ได้ นอกจากนี้ จำเป็นจะต้องทราบถึงปริมาณการจราจรที่มุ่งเข้าสู่ทางแยก รูปที่ 7.9 (ก) แสดงความกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความหนาแน่น ส่วนรูปที่ 7.9 (ข) เป็น Space-time diagram ที่สามารถเลือกสเกลที่เหมาะสม สามารถแสดงความเร็วได้อย่างถูกต้อง และตรงกันทั้งรูป (ก) และ (ข)

ช่วงเวลาจาก t_0 ถึง t_1 นั้น ได้รับสัญญาณไฟเขียว ดังนั้น ขบวนรถต่างๆ สามารถเคลื่อนที่ผ่านทางแยกได้ โดยมีสถานะ A (k_A , q_A และ u_A) การเคลื่อนที่ของขบวนรถแต่ละคัน แสดงโดยเส้นประในรูปที่ 7.9 (ข) จนกระทั่ง ณ เวลา t_1 สัญญาณไฟได้เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง ดังนั้นสภาพการจราจรบริเวณเส้นหยุดทางด้านต้นน้ำ จะมีสถานะเปลี่ยนเป็น B ในขณะที่สภาพการจราจรบริเวณเส้นหยุดทางด้านปลายน้ำ ก็จะมีสถานะเปลี่ยนไปเป็น D

ณ เวลา t_1 ที่บริเวณเส้นหยุดนี้ มี Shock wave เกิดขึ้นทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่

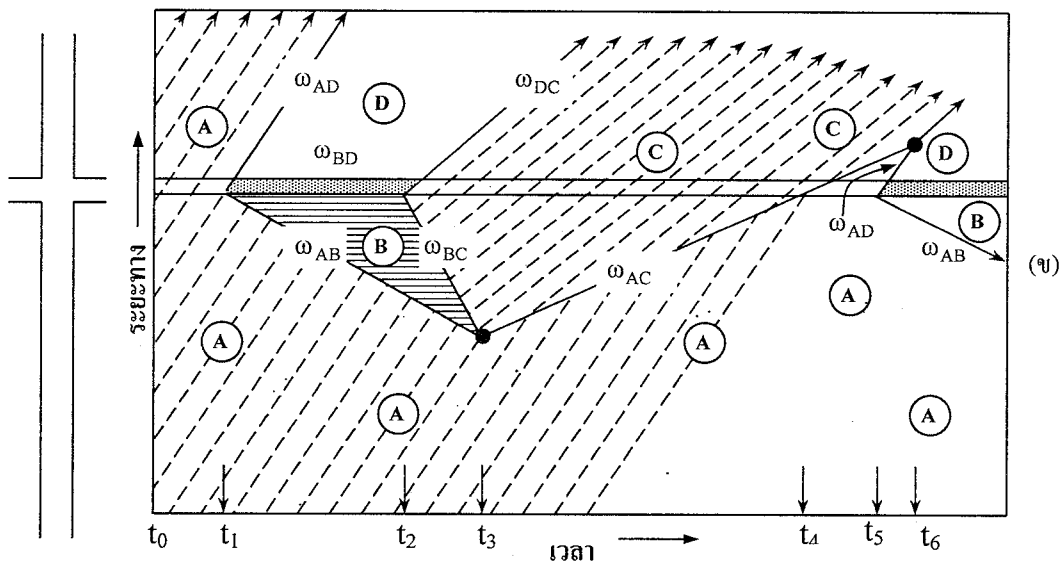
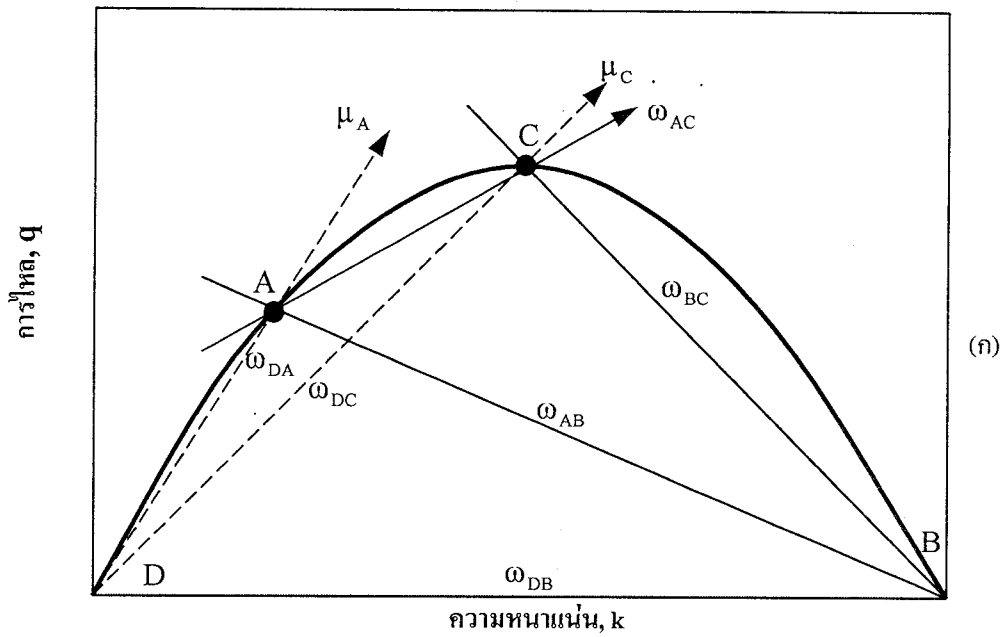
- w_{AD} เป็น Forward-moving shock wave
- w_{DB} เป็น Frontal stationary shock wave และ
- w_{AB} เป็น Backward-moving shock wave

ความเร็วของ Shock wave เหล่านี้ สามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความหนาแน่น หรือใช้สมการต่อไปนี้ก็ได้

$$w_{DA} = \frac{q_D - q_A}{k_D - k_A} = +u_A \quad (7-5)$$

$$w_{DB} = \frac{q_D - q_B}{k_D - k_B} = 0 \quad (7-6)$$

$$w_{AB} = \frac{q_A - q_B}{k_A - k_B} = -\frac{q_A}{k_B - k_A} \quad (7-7)$$



รูปที่ 7.9 การวิเคราะห์ shock wave สำหรับทางแยกสัญญาณไฟจราจร

สถานะจราจร A, B และ D จะคงอยู่ต่อไปจนกระทั่งเวลา t_2 เมื่อสัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียวอีกครั้งหนึ่ง สภาพการจราจรสถานะใหม่ (สถานะ C) ได้เกิดขึ้น ที่บริเวณเส้นหยุด โดยอัตราการไหลได้เปลี่ยนสภาพจาก 0 เป็นถึงระดับอิ่มตัว ส่งผลให้เกิด Shock wave เพิ่มขึ้นอีกสองตัว ได้แก่ w_{DC} และ w_{BC} ขณะเดียวกันก็เป็นจุดสิ้นสุดของ Shock wave w_{DB} ความเร็วของ Shock wave สองตัวที่เกิดขึ้นใหม่นี้ สามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความหนาแน่น หรือใช้สมการต่อไปนี้

$$w_{DC} = \frac{q_D - q_C}{k_D - k_C} = +u_C \tag{7-8}$$

$$w_{BC} = \frac{q_B - q_C}{k_B - k_C} = -\frac{q_C}{k_B - k_C} \quad (7-9)$$

สถานะจลาจลทั้งสี่ คือ D, C, B และ A จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง w_{AB} ตัดกับ w_{BC} ณ เวลา t_3 ดังรูป ช่วงเวลาจาก t_2 ถึง t_3 สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 7-10

$$t_3 - t_2 = r \left(\frac{w_{AB}}{w_{BC} - w_{AB}} \right) \quad (7-10)$$

โดยที่ r เป็นช่วงเวลาสัญญาณไฟแดงประสิทธิภาพ (effective red time interval) ตำแหน่งที่แถวคอยสลายตัวหมดที่เวลา t_3 สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_M = \frac{r}{3600} \left(\frac{w_{BC} w_{AB}}{w_{BC} - w_{AB}} \right) \quad (7-11)$$

ณ เวลา t_3 มี Shock wave w_{AC} ตัวใหม่เกิดขึ้น ในขณะที่ Shock wave สองตัวได้สิ้นสุดลง ได้แก่ w_{AB} และ w_{BC} สำหรับ Shock wave w_{AC} ที่เกิดขึ้นใหม่นี้ สามารถวิเคราะห์ได้จากรูปที่ 7.9 (ก) หรือสมการต่อไปนี้

$$w_{AC} = \frac{q_A - q_C}{k_A - k_C} \quad (7-12)$$

ณ เวลา t_4 นั้น Shock wave w_{AC} จะวิ่งข้ามเส้นหยุดที่บริเวณทางแยก ซึ่งทำให้อัตราการไหลที่บริเวณจุดนี้ จะลดลงจากอัตราการไหลอิมตัว เหลือเท่ากับอัตราการไหลเข้าของสถานะ A (q_A) ช่วงเวลาจากสัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนเป็นสีเขียว จนกระทั่งอัตราการไหลอิมตัวสิ้นสุดลง ($t_4 - t_2$) สามารถคำนวณได้จาก

$$t_4 - t_2 = \frac{r(w_{AB})}{w_{BC} - w_{AB}} \left(\frac{w_{BC}}{w_{AC}} + 1 \right) \quad (7-13)$$

ณ เวลา t_4 เมื่อสัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนกลับเป็นสีแดง รูปแบบการเกิด Shock wave ก็จะเกิดขึ้นซ้ำคล้ายกับกระบวนการที่อธิบายไว้แล้ว

แบบฝึกหัด

- จากการศึกษาโครงการนโยบายจัดเก็บค่าที่จอดรถยนต์ในย่านธุรกิจ โดยทำการสำรวจจำนวนผู้โดยสารรวมทั้งผู้ขับขี่ (occupancy) ในรถยนต์ส่วนตัว แต่ละคัน ทั้งก่อนและหลังจากการดำเนินการมาตรการ พบว่า

จำนวนผู้โดยสารในยานพาหนะ	ร้อยละของยวดยาน	
	ก่อนการใช้มาตรการ	หลังการใช้มาตรการ
1	55	40
2	35	40
3	10	20

ถ้าพบว่า ระยะทางการเดินทางเฉลี่ยของยวดยานแต่ละคัน และจำนวนผู้เดินทางทั้งหมดไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงคำนวณว่า หลังจากมีการใช้มาตรการจัดเก็บค่าที่จอดรถแล้ว ระยะทางการเดินทางรวมเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด

- สมมติว่าจำนวนผู้โดยสารในรถยนต์ (vehicle occupancy) บนถนนเส้นหนึ่ง ดังนี้

ร้อยละของรถยนต์	จำนวนผู้เดินทางภายในรถยนต์
55	1
31	2
10	3
4	4 หรือ มากกว่า (สมมติว่าเฉลี่ยประมาณ 4.2 คน/คัน)

รถยนต์ที่มีผู้โดยสารเพียง 1 คน เป็นร้อยละเท่าใด จำนวนผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนตัวเพียงคนเดียว (โดยไม่มีผู้โดยสารอื่น) คิดเป็นร้อยละเท่าใดของผู้เดินทางทั้งหมด จำนวนผู้เดินทางที่ไม่ได้ขับรถยนต์เอง โดยนั่งโดยสารไปกับรถยนต์ คิดเป็นสัดส่วนเท่าใด ของจำนวนผู้เดินทางทั้งหมด

- จงคำนวณหาค่าระยะทางการเดินทางเฉลี่ย หน่วยเป็น กิโลเมตร-คัน สำหรับแผนการขนส่งของเมือง 2 แผน พร้อมทั้งวิเคราะห์ว่าแผนการขนส่งแผนใดมีประสิทธิภาพมากกว่ากัน เพราะอะไร

	จำนวนผู้เดินทาง	จำนวนผู้เดินทาง	ระยะการเดินทาง
--	-----------------	-----------------	----------------

	ทั้งหมด	ภายในรถยนต์	เฉลี่ย ต่อสัปดาห์ (กม/คัน)
แผนการขนส่ง 1			
ในเมือง	10,000	1	100
	10,000	2	120
นอกเมือง	10,000	1	170
	10,000	2	200
แผนการขนส่ง 2			
ในเมือง	7,000	1	90
	13,000	2	110
นอกเมือง	5,000	1	150
	15,000	2	160

References

Chapter 1

1. *Traffic Engineering*, W.R. McShane and R.P. Roess, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1990.
2. *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board, Washington D.C., 2000.
3. เทคโนโลยีการขนส่งสาธารณะในเมือง: ระบบขนส่งสาธารณะใน กทม. , ดร.นระ คมนามูล, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2547.
4. *Transport Environment and Health* (2000), World Health Organization (WHO) Regional Publications, European Series, No. 89.
5. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2547, กรมควบคุมมลพิษ
6. Pothikamjorn et al (2002), Impact of Particulate Air Pollutants on Allergic Diseases, Allergic Skin Reactivity and Lung Function, *Asian Pac J Allergy Immunol.* Jun 2002: 20(2), Pg. 77-83.
7. Vichit-Vadakan (2001), Air Pollution and Respiratory Symptoms: results from three panel studies in Bangkok, Thailand, *Environment Health Prospect.* June 2001, 109 (Suppl 3), Pg. 381-387.
8. Hagler Bailly Services, Inc. *Health Effects of Particulate Matter Air Pollution in Bangkok* (Executive Summary). A report prepared for Pollution Control

- Department, Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok, Thailand, 1998.
9. Radian International LLC. *Particulate Matter Abatement Strategy for the Bangkok Metropolitan Area. A report prepared for Pollution Control Department, Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok, Thailand, 1998.*
 10. Handy 2005, Correlation or causality between the built environment and travel behavior? *Transportation Research Part D*, November 2005, vol 10, n 6, pp 427-444.
 11. World Health Organization (WHO), Global Health into a New Century, Office of the Director-General, 9 April 1999, www.who.int
 12. World Health Organization (WHO), World Report on Road Traffic Injury Prevention, 2004, <http://www.worldbank.org/sar>
 13. รายงานกรอบแนวคิดและรูปแบบการดำเนินงานเพื่อการควบคุมและป้องกันอุบัติเหตุ จังหวัดขอนแก่น (2545) โดยศูนย์ความร่วมมือระหว่างองค์การอนามัยโลกและศูนย์อุบัติเหตุวิกฤตบำบัด โรงพยาบาลขอนแก่น
 14. วีระพันธ์ สุพรรณไชยมาตย์ และคณะ (2542) ระบบบริการทางการแพทย์ฉุกเฉินในประเทศไทย ขอนแก่น ขอนแก่นการพิมพ์
 15. Vuori, I. & Oja, P. *Physical activity in transport: value for health.* Tampere, Urho Kaleva Kekkonen Institute, (1998)
 16. *Traffic and Highway Engineering*, Garber N.J. and L.A. Hoel, West Publishing Company, MA, 1992.