

การพัฒนาวิธีการทำนายสภาพการจราจรติดขัดแบบทันกาล



นายกิตติพงษ์ หิริโด้ปะ

ศูนย์วิทยพัทยาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF REAL-TIME TRAFFIC CONGESTION  
PREDICTION METHOD



Mr. Kittipong Hi-ri-o-tappa

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาวิธีการทำนายสภาพการจราจรติดขัดแบบทันกาล

โดย

นายกิตติพงษ์ หิริโอดัปปะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐา ปานงาม

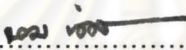
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. สรวิต นฤปิติ


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

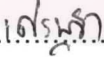
ดร. วสันต์ ภัทรธริคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

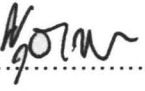
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถวิทย์ สุดแสง)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐา ปานงาม)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สรวิต นฤปิติ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. วสันต์ ภัทรธริคม)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ศุภกร สิทธิไชย)

กิตติพงษ์ หิริโอดีปะ : การพัฒนาวิธีการทำนายสภาพการจราจรติดขัดแบบทันกาล.  
(DEVELOPMENT OF REAL-TIME TRAFFIC CONGESTION PREDICTION  
METHOD.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.เศรษฐา ปานงาม, อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.สรวิศ นฤปิติ, ดร.วสันต์ ภัทรอริคม, 162 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาและเลือกอัลกอริทึมใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อ  
การค้นหารูปแบบการจราจรที่จะนำไปสู่สภาพการติดขัดและสามารถทำนายล่วงหน้าระยะสั้น  
จากข้อมูลการจราจรแบบอนุกรมเวลาในระดับจุลภาค (Microscopic) โดยมีการใช้ข้อมูลจริง  
จากกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งบนทางด่วนและทางหลวงสายหลัก และข้อมูลที่จำลองขึ้นเพื่อ  
เลียนแบบข้อมูลจริงในสถานการณ์เดียวกันตามแบบจำลองพฤติกรรมจราจรของกิปส์  
(Gipps) [3] งานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมไดนามิกไทม์วาร์ปิง (Dynamic Time Warping -  
DTW) เพื่อใช้ในการจำแนกรูปแบบการจราจรซึ่งเป็นอัลกอริทึมทางอนุกรมเวลาที่ใช้ข้อมูล  
สอนน้อยกว่าอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องและมีคุณสมบัติในการจำแนกข้อมูลอนุกรมเวลา  
ที่มีความซับซ้อนและให้ความถูกต้องสูง ในงานวิจัยนี้จะวัดประสิทธิภาพอัลกอริทึมไดนามิก  
ไทม์วาร์ปิงเทียบกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องแบบเบย์ (Bayesian) ที่มีการพัฒนา  
ใช้อยู่ในปัจจุบัน [4] โดยใช้ความเร็ว, โมเมนต์ที่สองของความเร็ว และปริมาณการจราจรเป็น  
ตัวแปรชี้วัด (Figure) ในการศึกษา ซึ่งจะพบว่า อัลกอริทึมอนุกรมเวลาไดนามิกไทม์วาร์ปิงได้  
ให้ผลลัพธ์เทียบเท่ากับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องแบบเบย์ ทั้งการตรวจพบ (DR) และ  
ระยะเวลาการตรวจพบ (MTTD) แต่ใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่าประมาณ 20 เท่า ซึ่งถือ  
เป็นต้นทุนการคำนวณประมาณ 5% ในขณะที่การเรียนรู้แบบเบย์ใช้ต้นทุนการคำนวณ  
ประมาณ 0.01% เมื่อเทียบกับระยะเวลาการตรวจพบ แต่หากมีการจำกัดรูปแบบการค้นหาแบบ  
Sakoe-Chiba Band จะสามารถเพิ่มความถูกต้องได้ประมาณ 10% และประสิทธิภาพในการ  
ค้นหาได้เร็วขึ้นมากโดยลดต้นทุนการคำนวณเมื่อเทียบกับระยะเวลาการตรวจพบลงเหลือ 3%  
และให้ค่าการรายงานผิดพลาด (FAR) ที่น้อยกว่าการเรียนรู้แบบเบย์ประมาณ 50%

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต...กิตติพงษ์ หิริโอดีปะ.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก...เศรษฐา ปานงาม.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม...สรวิศ นฤปิติ.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....วสันต์ ภัทรอริคม.....

## 5170550821 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : CONGESTION PRECURSOR / TRAFFIC FLOW MANAGEMENT / DYNAMIC TIME WARPING / BAYESIAN

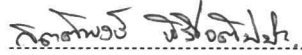
KITTIPONG HI-RI-O-TAPPA : DEVELOPMENT OF REAL-TIME TRAFFIC CONGESTION PREDICTION METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF SETHA PAN-NGUM, Ph.D, THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SORAWIT NARUPITI, Ph.D., WASAN PATTHARA-ATIKOM, Ph.D., 162 pp.

The objective of this study is to develop a new automated short-term congested traffic detection algorithm that detects traffic patterns leading to congestion in microscopic traffic variables from both data of real world situations and simulation following the study of Gripps [3] car following model. The new approach algorithm, namely Dynamic Time Warping, is difference from traditional artificial intelligent algorithms that require a huge training dataset to satisfy the accuracy. The Dynamic Time Warping has much ability to classification in very complex time series but requires smaller training dataset with yielding high accuracy in result. The performance of the proposed algorithm DTW is assessed using a Bayesian algorithm with microscopic traffic simulation environment and real-world data. The result shows that DTW algorithm has comparable performance to Bayesian algorithm with using the standard deviation of speed as algorithm figure to detect and precursors traffic congestion pattern. DTW is 20 times of processor consumption as using as Bayesian however, the processing time is about 5% of MTTD that not much effect on algorithm performance. The modified DTW using Sakoe-Chiba Band is increasing 10% in its accuracy and decreasing processor consumption into 3% of MTTD and yields the 50% lower FAR than Bayesian

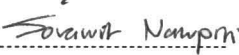
Department : Computer Engineering .....


Field of Study : Computer Engineering .....

Academic Year : 2010 .....

Student's Signature  .....

Advisor's Signature  .....

Co-Advisor's Signature  .....

Co-Advisor's Signature  .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐา ปานงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำ เสนอแนะข้อคิดเห็นและแนวทางในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง ต่อรองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำใน ส่วนของความรู้ในแขนงวิชาวิศวกรรมขนส่ง และอนุญาตให้ใช้งานโปรแกรม AIMSUN ซึ่งเป็น ลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมขนส่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นอกจากนี้ยังได้สนับสนุนค่าใช้จ่าย ในการทำวิจัย และการนำเสนอผลงานประชุมวิชาการ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วสันต์ ภัทรอริคม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมวิทยานิพนธ์อีกท่านที่เป็นผู้จุดประกายทำให้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้ ขึ้นมาได้ อีกทั้งยังจัดเตรียมข้อมูลดิบสภาพการจราจรที่จำเป็นต้องใช้ในงาน และคอยดูแลให้ คำแนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดงานวิจัย และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโขภระสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาทุนสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือ ดูแล ประสานงานทางด้านทุนการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ตั้งแต่ปริญญาตรี จนผู้วิจัยจบการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิวงค์ สุชาโต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถ วิทย์ สุดแสง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น และ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ประ สติธิประสาทความรู้อันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย

กราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การส่งเสริมสนับสนุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยอย่างดียิ่งตลอด มาขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยและความช่วยเหลือในด้าน ต่างๆ โดยเฉพาะพี่สุทธิพงษ์ รัชชพงษ์ ที่ช่วยเริ่มต้นหัวข้องานวิจัยและเป็นที่ปรึกษางานวิจัยอย่างดี มาโดยตลอด และพี่ปิติ โรจนวัชรณสินธุ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำความรู้ทางด้านการจราจรเป็นอย่างมาก

ท้ายสุดนี้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก โครงการพัฒนา อัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ และนอกจากนี้ผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนไปทำวิจัยในต่างประเทศจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ไปทำงานวิจัยชิ้นนี้ ณ ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็น อย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจหรือเกี่ยวข้องทั่วไป และหากมีข้อผิดพลาด ประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฐ
สารบัญรูปภาพ .....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ .....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1.1 ทฤษฎีทางคอมพิวเตอร์ .....	4
2.1.1.1 การจำแนกตัวอย่าง .....	4
2.1.1.2 อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง .....	7
2.1.1.3 อัลกอริทึมไดนามิกไทม์วอร์ปปีง .....	11
2.1.1.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วอร์ปปีง .....	13
2.1.1.5 การสอบทานความถูกต้องแบบไขว้ .....	14
2.1.2 ทฤษฎีทางการจราจรขนส่ง .....	17
2.1.2.1 การจัดการจราจรติดขัดและอุบัติเหตุ .....	17
2.1.2.2 การวิเคราะห์เพื่อค้นหาและตรวจสอบการจราจรติดขัด .....	18
2.1.2.3 การประเมินผลประสิทธิภาพของอัลกอริทึม .....	21
2.1.3 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์สถิติ .....	21
2.1.3.1 การทดสอบสมมติฐาน .....	21
2.1.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานในงานวิจัย .....	22

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.1.3.3	หลักเกณฑ์ในการตั้งสมมติฐาน..... 23
2.1.3.4	การกำหนดนัยสำคัญหรือระดับความผิดพลาดในการทดสอบ..... 23
2.1.3.5	ประเภทของการทดสอบสมมติฐานและตัวอย่างค่าวิกฤตของ แต่ละประเภท ..... 24
2.1.3.6	การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากร ( $\mu$ ) ..... 25
2.1.3.7	การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างค่าเฉลี่ย ของสองประชากร ( $\mu_1 - \mu_2$ ) ..... 26
2.1.3.8	ความรู้พื้นฐานของอนุกรมเวลา..... 30
2.2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 31
2.2.1	การศึกษาเพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัด..... 31
2.2.1.1	การวิเคราะห์ออกแบบทางโครงสร้างพื้นฐาน ..... 32
2.2.1.2	การวิเคราะห์ปริมาณการจราจร..... 32
2.2.1.3	อัลกอริทึมเพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัด..... 32
2.2.2	การศึกษาเพื่อทำนายสภาพการจราจรติดขัด..... 35
บทที่ 3	การวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล ..... 37
3.1	ข้อมูลดิบสภาพการจราจรจริง ..... 37
3.1.1	การเก็บรวบรวมและรายละเอียดของข้อมูล..... 37
3.1.1.1	ตำแหน่งกล้องวงจรปิด ..... 38
3.1.1.2	ลักษณะทางกายภาพของถนนที่ทำการศึกษា..... 39
3.1.1.3	ลักษณะข้อมูลดิบเบื้องต้น..... 39
3.1.1.4	ประเภทข้อมูลจากกล้องวงจรปิด..... 44
3.2	การเข้าถึงและรวบรวมข้อมูลดิบ ..... 45
3.3	การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น..... 46
3.3.1	การจัดเรียงข้อมูล..... 46
3.3.2	การปรับเรียบข้อมูล..... 46
3.4	ดำเนินการจัดกลุ่มข้อมูลดิบ ..... 47
3.4.1	การหาจราจรติดขัดขั้นต้นจากภาพถ่าย..... 48
3.4.2	บันทึกข้อมูลการจราจรติดขัด ..... 48



สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.4.3 การคำนวณค่าขีดแบ่งเพื่อใช้จำแนกการจราจรติดขัดอย่างละเอียด.....	48
3.4.3.1 คำนวณความเร็วเฉลี่ย.....	49
3.4.3.2 คำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	49
3.4.3.1 อ้างอิงการกระจายปกติ.....	49
3.4.3.4 วัดการกระจายตัวของความเร็ว.....	49
3.4.3.5 วัดการกระจายตัวของระยะห่างระหว่างรถที่เข้าสู่กล้องวงจรปิด.....	56
3.4.3.6 วัดการกระจายตัวของปริมาณการจราจร.....	59
3.4.3.7 การกำหนดค่าขีดแบ่งข้อมูลสำหรับการจราจรปกติ.....	60
3.5 ข้อมูลจากการจำลองสภาพการจราจร.....	69
3.5.1 กำหนดตัวแปรที่ใช้จำลองสภาพการจราจรจริง.....	70
3.5.1.1 ปริมาณรถยนต์ที่เข้าสู่ระบบการจำลอง.....	70
3.5.1.2 แบบจำลองการเคลื่อนตัวของรถ.....	70
3.5.1.3 ลักษณะทางกายภาพ.....	70
3.5.2 ข้อมูลที่ได้จากการจำลอง.....	72
บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาแบบจำลองเพื่อค้นหาและทำนายสภาพการจราจรติดขัด.....	77
4.1 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่จะนำไปสู่สภาพการจราจรติดขัด.....	78
4.1.1 ตัวแทนตัวแปรที่ให้ความสนใจเพื่อใช้สำหรับอัลกอริทึม.....	78
4.1.2 ประยุกต์ใช้สถิติทดสอบแบบทีเพื่อทดสอบความแตกต่างของตัวแปรชี้วัด.....	78
4.1.3 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ.....	79
4.1.3.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ.....	79
4.1.3.2 ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบ.....	79
4.1.4 ผลการทดสอบ.....	79
4.1.5 สรุปผลการทดสอบคะแนนที่.....	82
4.2 การประมวลข้อมูลเบื้องต้น.....	82
4.2.1 การปรับเรียบข้อมูลและการประมาณค่าที่ขาดหาย.....	82
4.2.2 การวัดค่าตัวแปรชี้วัด และเงื่อนไขในการเริ่มต้นและสิ้นสุดแบบจำลอง.....	83
4.2.2.1 การวิเคราะห์ตัวแปรความเร็วเฉลี่ยการจราจร.....	87
4.2.2.2 การออกแบบอัลกอริทึมเริ่มต้นและสิ้นสุดสำหรับความเร็วเฉลี่ย.....	91

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.2.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยการจราจร.....	94
4.2.2.4 การออกแบบอัลกอริทึมเริ่มต้นและสิ้นสุดสำหรับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	97
4.3 กระบวนการพัฒนาแบบจำลองไดนามิกโหมวาร์ปปีง .....	101
4.3.1 การทำงานของอัลกอริทึม .....	102
4.3.1.1 เตรียมค่าตัวแปร.....	102
4.3.1.2 วิเคราะห์หาเส้นทางเดินต่ำที่สุด.....	102
4.3.1.3 สิ้นสุดกระบวนการวิเคราะห์.....	102
4.3.2 ขั้นตอนการฝึกฝนระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด .....	102
4.3.2.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาฝึกฝน.....	102
4.3.2.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ.....	103
4.3.2.3 การสร้างรูปแบบอ้างอิง.....	103
4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด .....	103
4.3.3.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบ .....	104
4.3.3.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ .....	104
4.3.3.3 การทดสอบความคล้ายคลึง .....	104
4.3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพอัลกอริทึมด้วยการจำกัดพื้นที่การเคลื่อนที่.....	104
4.3.5 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองไดนามิกโหมวาร์ปปีงในการทำงานจริง.....	107
4.4 กระบวนการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเบย์ .....	107
4.4.1 การทำงานของอัลกอริทึม .....	107
4.4.1.1 เตรียมค่าตัวแปร.....	107
4.4.1.2 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นตามทฤษฎีของเบย์.....	109
4.4.2 ขั้นตอนการฝึกฝนระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด .....	110
4.4.2.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาฝึกฝน .....	111
4.4.2.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ .....	111
4.4.2.3 การสร้างรูปแบบอ้างอิง.....	111
4.4.3 ขั้นตอนการทดสอบระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด.....	112
4.4.3.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบ.....	112

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.4.3.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ .....	112
4.4.3.3 การทดสอบความคล้ายคลึง.....	112
4.5 อัลกอริทึมตัดสินใจ .....	112
4.5.1 การตัดสินใจจากค่าตัวแปรเพียงตัว .....	112
4.5.2 การตัดสินใจจากจากค่าตัวแปรหลายตัว .....	113
บทที่ 5 การทดลอง และการวิเคราะห์ผลข้อมูล .....	114
5.1 เครื่องมือที่ใช้ทดลองในการวิจัย .....	114
5.1.1 ฮาร์ดแวร์ .....	114
5.1.2 ซอร์ฟแวร์ .....	114
5.2 การทดสอบการปรับเรียบข้อมูล .....	114
5.2.1 ผลการทดสอบ.....	115
5.2.2 สรุปผลการทดสอบ.....	117
5.3 การฝึกฝนอัลกอริทึม .....	118
5.3.1 การฝึกฝนอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีง .....	118
5.3.2 การฝึกฝนอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ .....	118
5.3.2.1 การวิเคราะห์หาความรู้ก่อนหน้าตามงานวิจัยของ Oh <i>et al</i> .....	118
5.3.2.2 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการจราจรติดขัด ตามสมการของเบย์ .....	128
5.4 การสอบทานความถูกต้องแบบไขว้.....	129
5.4.1 การสอบทานข้อมูลแบบ K-fold .....	129
5.4.2 การสอบทานข้อมูลแบบ Leave-one-out.....	130
5.5 การทดสอบการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหนึ่งตัว .....	130
5.5.1 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีง.....	131
5.5.1.1 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีงปกติ .....	131
5.5.1.2 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีงจำกัดขอบเขต .....	132
5.5.2 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ .....	134
5.6 การทดสอบการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหลายตัว .....	135
5.6.1 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีง .....	136

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.6.1.1 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกวิโทมวาร์ปึงปกติ .....	136
5.6.1.2 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกวิโทมวาร์ปึงจำกัดขอบเขต .....	136
5.6.2 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ .....	137
5.7 สรุปผลและวิเคราะห์การทดลองของการเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึม .....	137
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	140
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	140
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย .....	143
6.3 ข้อเสนอแนะ .....	144
รายการอ้างอิง .....	145
ภาคผนวก .....	147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	162

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.2.1.3	สรุปรประสิทธิภาพอัลกอริทึม ..... 35
ตารางที่ 3.1.1.3-1	ตัวอย่างข้อมูลอย่างละเอียด ..... 45
ตารางที่ 3.1.1.3-2	ตัวอย่างข้อมูลเฉลี่ยทุก 3 นาที ..... 45
ตารางที่ 4.1.4-1	ผลการทดสอบค่าทางสถิติด้วยคะแนนที่ทิศทางขาเข้า ..... 80
ตารางที่ 4.1.4-2	ผลสรุปคะแนนที่ ช่องการจราจรขาเข้า..... 80
ตารางที่ 4.1.4-3	ผลการทดสอบค่าทางสถิติด้วยคะแนนที่ทิศทางขาออก..... 81
ตารางที่ 4.1.4-4	ผลสรุปคะแนนที่ ช่องการจราจรขาออก ..... 81
ตารางที่ 4.2.1-1	การปรับเรียบแบบทันกาล..... 83
ตารางที่ 4.2.1-1	สรุปค่าการกระจายของความเร็วเฉลี่ย ..... 88
ตารางที่ 4.2.2-1	สรุปค่าการกระจายตัวส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของความเร็วเฉลี่ย..... 95
ตารางที่ 4.3.1-1	การเก็บรูปแบบอ้างอิง.....103
ตารางที่ 5.2.1-1	ผลสรุปคะแนนที่ ช่องการจราจรขาออก.....117
ตารางที่ 5.3-1	รูปแบบอ้างอิงความเร็วเฉลี่ยจากข้อมูลจริงทิศทางขาเข้า.....119
ตารางที่ 5.3-2	รูปแบบอ้างอิงความเร็วเฉลี่ยจากข้อมูลจริงทิศทางขาออก.....120
ตารางที่ 5.3-3	รูปแบบอ้างอิงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย จากข้อมูลจริงทิศทางขาเข้า .....121
ตารางที่ 5.3-4	รูปแบบอ้างอิงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย จากข้อมูลจริงทิศทางขาออก.....122
ตารางที่ 5.5.1.1-1	ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า .....131
ตารางที่ 5.5.1.1-2	ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาออก .....131
ตารางที่ 5.5.1.1-3	ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....132
ตารางที่ 5.5.1.1-4	ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2.....132
ตารางที่ 5.5.1.1-5	ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....132
ตารางที่ 5.5.1.1-6	ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2.....132
ตารางที่ 5.5.1.1-7	ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร .....132
ตารางที่ 5.5.1.2-1	ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า.....133
ตารางที่ 5.5.1.2-2	ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาออก.....133
ตารางที่ 5.5.1.2-3	ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....133

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 5.5.1.2-4 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 .....	133
ตารางที่ 5.5.1.2-5 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....	133
ตารางที่ 5.5.1.2-6 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 .....	134
ตารางที่ 5.5.1.2-7 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร .....	134
ตารางที่ 5.5.2-1 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า .....	134
ตารางที่ 5.5.2-2 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาออก .....	134
ตารางที่ 5.5.2-3 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....	134
ตารางที่ 5.5.2-4 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 .....	135
ตารางที่ 5.5.2-5 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....	135
ตารางที่ 5.5.2-6 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 .....	135
ตารางที่ 5.5.2-7 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร .....	135
ตารางที่ 5.6.1.1-1 แสดงผลการจำแนกข้อมูลด้วย 2 ตัวแปร .....	136
ตารางที่ 5.6.1.2-1 แสดงผลการจำแนกข้อมูลด้วย 2 ตัวแปร .....	136
ตารางที่ 5.4.2-1 แสดงผลการจำแนกข้อมูลด้วย 2 ตัวแปร .....	137

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1.1.3-1 ตัวอย่าง Warping Path .....	11
รูปที่ 2.1.1.4-1 แสดงการจำกัดขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band และการจำกัดขอบเขตแบบ Itakura Parallelogram .....	13
รูปที่ 2.1.1.4-2 แสดงการทำงานจำกัดขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band.....	14
รูปที่ 2.1.1.5-1 แสดงการทำงานของ Random Subsampling .....	15
รูปที่ 2.1.1.5-2 แสดงการทำงานของ Random Subsampling .....	15
รูปที่ 2.1.1.5-3 แสดงการทำงานของ Leave-one-out .....	16
รูปที่ 2.1.2-2 การสะสมตัวของรถเมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้น.....	18
รูปที่ 2.2.1-1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่จะทำให้เกิดอุบัติเหตุ.....	19
รูปที่ 2.2.1.3-1 ทิศทางการจราจร.....	33
รูปที่ 3.1.1.1-1 ตำแหน่งกล้องวงจรปิดบนถนนคลองหลวง และ ตำแหน่งกล้องวงจรปิดบนทางด่วนดาวคะนองจำนวน 11 ตัว.....	38
รูปที่ 3.1.1.2-1 ภาพจากกล้องที่ได้จากถนนคลองหลวง.....	39
รูปที่ 3.1.1.3-1 ภาพจากกล้องที่ได้จากทางด่วนดาวคะนอง .....	40
รูปที่ 3.1.1.3-2 ภาพจากกล้องที่ได้จากทางด่วนดาวคะนอง (ต่อ) .....	41
รูปที่ 3.1.1.3-3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องแต่ละตัว.....	41
รูปที่ 3.1.1.3-4 ปริมาณการจราจรในแต่ละวัน.....	42
รูปที่ 3.1.1.3-5 ปริมาณการจราจรในแต่ละวัน.....	42
รูปที่ 3.1.1.3-6 แสดงการกระจายตัวของปริมาณการจราจรในแต่ละวัน .....	42
รูปที่ 3.1.1.3-7 ปริมาณการจราจรในแต่ละวันของกลุ่ม 1.....	43
รูปที่ 3.1.1.3-8 ปริมาณการจราจรในแต่ละวันของกลุ่ม 2.....	43
รูปที่ 3.1.1.3-9 ขอบเขตการทำงานของกล้องวงจรปิด.....	44
รูปที่ 3.3.2-1 การปรับเรียบข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (เส้นสีดำ).....	47
รูปที่ 3.4-1 การสร้างฐานข้อมูลการติดขัดสำหรับใช้ในงานวิจัย.....	47
รูปที่ 3.4.1-1 ตำแหน่งข้อมูลทั้ง 4 ประเภท .....	48
รูปที่ 3.4.3.3-1 การกระจายปกติตามส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	49
รูปที่ 3.4.3.4-1 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติเข้า.....	50

รูปที่ 3.4.3.4-2	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติขาออก.....	50
รูปที่ 3.4.3.4-3	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT02 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ.....	51
รูปที่ 3.4.3.4-4	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT03 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ.....	51
รูปที่ 3.4.3.4-5	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT07 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ.....	52
รูปที่ 3.4.3.4-6	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT09 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ.....	52
รูปที่ 3.4.3.4-7	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT10 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ.....	53
รูปที่ 3.4.3.4-8	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรติดขัดขาเข้า.....	54
รูปที่ 3.4.3.4-9	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรติดขัดขาออก .....	54
รูปที่ 3.4.3.4-10	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT02 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติขาเข้า .....	55
รูปที่ 3.4.3.4-11	การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT03 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติขาเข้า .....	55
รูปที่ 3.4.3.5-1	การกระจายตัว Headway ถนนคลองหลวง จากข้อมูลทั้ง 6 เดือน ทิศทางการจราจรขาเข้า.....	56
รูปที่ 3.4.3.5-2	การกระจายตัว Headway ถนนคลองหลวง จากข้อมูลทั้ง 6 เดือน ทิศทางการจราจรขาออก .....	56
รูปที่ 3.4.3.5-3	การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT02 (Group-I) .....	57
รูปที่ 3.4.3.5-4	การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT03 (Group-I) .....	57
รูปที่ 3.4.3.5-5	การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT07 (Group-II) .....	58



## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปรภาพ	หน้า
รูปรภาพที่ 3.4.3.5-6 การกระจายตัว Headway ทางคว่นดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT09 (Group-II) .....	58
รูปรภาพที่ 3.4.3.5-7 การกระจายตัว Headway ทางคว่นดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT10 (Group-II) .....	58
รูปรภาพที่ 3.4.3.6-1 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรถนนคลองหลวง ทิศทางขาออกกรุงเทพ.....	59
รูปรภาพที่ 3.4.3.6-2 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรถนนคลองหลวง ทิศทางขาเข้ากรุงเทพ .....	59
รูปรภาพที่ 3.4.3.6-3 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรทางคว่นดาวคะนอง กลุ่มที่ 1 .....	60
รูปรภาพที่ 3.4.3.6-4 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรทางคว่นดาวคะนอง กลุ่มที่ 2 .....	60
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-1 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วต่ำถนนคลองหลวง ขาเข้าเพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป .....	63
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-2 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วต่ำถนนคลองหลวง ขาออกเพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป.....	63
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-3 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางคว่นดาวคะนอง กล้อง EXAT02 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป.....	64
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-4 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางคว่นดาวคะนอง กล้อง EXAT03 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป.....	64
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-5 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางคว่นดาวคะนอง กล้อง EXAT07 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป.....	65
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-6 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางคว่นดาวคะนอง กล้อง EXAT09 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป.....	65
รูปรภาพที่ 3.4.3.7-7 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางคว่นดาวคะนอง กล้อง EXAT10 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป.....	66
รูปรภาพที่ 3.5.1-1 การติดตั้ง Loop Detector เพื่อจำลอง CCTV .....	71
รูปรภาพที่ 3.5.1-2 การจำลองอุบัติเหตุ .....	71
รูปรภาพที่ 3.5.1-3 การจำลองอุบัติเหตุใน โปรแกรม Aimsun .....	72
รูปรภาพที่ 3.5.2-1 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้าช่องทางซ้าย .....	73

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 3.5.2-2 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้าช่องทางกลาง .....	73
รูปที่ 3.5.2-3 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้าช่องทางขวา .....	74
รูปที่ 3.5.2-4 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกช่องทางซ้าย .....	74
รูปที่ 3.5.2-5 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกช่องทางกลาง .....	74
รูปที่ 3.5.2-6 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกช่องทางขวา .....	75
รูปที่ 3.5.2-7 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้ารวมสามช่องทาง .....	75
รูปที่ 3.5.2-8 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกรวมสามช่องทาง .....	76
รูปที่ 4-1 แบบจำลองการค้นหาและทำนายสภาพการจราจรติดขัด.....	77
รูปที่ 4.2.2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเร็ว (Speed) ความหนาแน่น (Density) และอัตราการเคลื่อนตัว (Flow) ตามทฤษฎีการจราจร.....	84
รูปที่ 4.2.2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัว.....	85
รูปที่ 4.2.2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวทิศทางขาเข้า.....	86
รูปที่ 4.2.2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวทิศทางขาออก .....	86
รูปที่ 4.2.2.1-1 แสดงเงื่อนไขในการเริ่มทำงานของแบบจำลอง .....	87
รูปที่ 4.2.1-2 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้า .....	88
รูปที่ 4.2.1-3 การกระจายความเร็วทิศทางขาออก.....	89
รูปที่ 4.2.2-4 แสดงแผนภาพลำดับงานการทำงานของอัลกอริทึมเริ่มต้นแบบจำลอง .....	91
รูปที่ 4.2.2-5 แสดงการทำงานจริงของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้ .....	93
รูปที่ 4.2.2-1 เงื่อนไขในการเริ่มทำงานของแบบจำลอง .....	94
รูปที่ 4.2.2-2 การกระจายส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วทิศทางขาเข้า .....	96
รูปที่ 4.2.2-3 การกระจายส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วทิศทางขาออก.....	96
รูปที่ 4.2.2-3 การทำงานของอัลกอริทึม.....	98
รูปที่ 4.2.2-5 การทำงานของอัลกอริทึมเก็บข้อมูลอย่างละเอียด .....	100
รูปที่ 4.3-1 การทำงานของอัลกอริทึมไดว์นามิกซ์โทมัวร์บ์ปึงอย่างละเอียด.....	101
รูปที่ 4.3.4-1 การจำกัดของเหตุการณ์เคลื่อนที่ในการค้นหาเส้นทางเดินที่สั้นที่สุด .....	105
รูปที่ 4.3.4-2 การจำกัดของเหตุการณ์เคลื่อนที่ในการค้นหาเส้นทางเดินที่สั้นที่สุด .....	105
รูปที่ 4.3.4-3 การทำงานของอัลกอริทึมไดว์นามิกซ์โทมัวร์บ์ปึงแบบจำกัดขอบเขต .....	106
รูปที่ 4.4-1 การทำงานของอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์.....	108

รูปที่ 4.4.2-1	เงื่อนไขในการกำหนดค่าขีดแบ่ง.....	111
รูปที่ 5.2.1-1	ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่ไม่มีการปรับเรียบ.....	115
รูปที่ 5.2.1-2	ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย.....	116
รูปที่ 5.2.1-3	ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล .....	116
รูปที่ 5.2.1-4	ข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยที่ไม่มีการปรับเรียบ .....	116
รูปที่ 5.2.1-5	ข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียบ ด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย .....	116
รูปที่ 5.2.1-6	ข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียบ ด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล .....	117
รูปที่ 5.3.2.1-1	การประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาเข้า .....	123
รูปที่ 5.3.2.1-2	การประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาออก .....	123
รูปที่ 5.3.2.1-3	การประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาเข้า.....	124
รูปที่ 5.3.2.1-4	การประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาออก.....	124
รูปที่ 5.3.2.1-5	การประมาณความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล ทางคว้นดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....	125
รูปที่ 5.3.2.1-6	การประมาณความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล ทางคว้นดาวคะนองกลุ่มที่ 2 .....	125
รูปที่ 5.3.2.1-7	การประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล ทางคว้นดาวคะนองกลุ่มที่ 1 .....	126
รูปที่ 5.3.2.1-8	การประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล ทางคว้นดาวคะนองกลุ่มที่ 2 .....	126
รูปที่ 5.3.2.1-9	การกระจายเกาส์เซียนทิศทางขาเข้า .....	127
รูปที่ 5.3.2.1-10	แสดงการกระจายเกาส์เซียนทิศทางขาออก.....	127
รูปที่ 5.3.2.2-1	ความเร็วของวันที่ 7 ธันวาคม ทิศทางขาเข้า .....	128
รูปที่ 5.3.2.2-2	ความน่าจะเป็นของการจรวดติดขัดที่คำนวณได้ .....	129
รูปที่ 5.4.1-1	แสดงการแบ่งกลุ่มข้อมูลและการทดลอง .....	130

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากกรุงเทพมหานครประสบปัญหาสภาพการจราจรติดขัด ดังเช่นมหานครขนาดใหญ่ทั่วโลกโดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน ซึ่งหากคิดเป็นค่าความเสียหายทางธุรกิจของประเทศไทยแล้วจะเป็นมูลค่านับแสนล้านบาท [1] ทำให้เกิดงานวิจัยจำนวนมากเพื่อศึกษาสาเหตุวิเคราะห์หาแนวโน้ม เพื่อทำนายสภาพการจราจรจะติดขัดในถนนเส้นใด ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่ที่นิยมในทศวรรษที่ผ่านมา จะใช้ข้อมูลที่มีการเก็บด้วยมือ หรืออุปกรณ์ต่างๆ ย้อนหลังเป็นเวลาหนึ่งเดือนถึงหลายสิบปี [2,3,4,5] นำมาวิเคราะห์หาข้อสรุปให้เรียบร้อย และนำข้อสรุปเหล่านั้นไปประยุกต์ปฏิบัติจริงต่อไป ซึ่งการศึกษาในลักษณะนี้ เป็นการศึกษาแบบ ย้อนหลัง (Off-line) แล้วค่อยนำผลที่วิเคราะห์ได้ไปปฏิบัติในอนาคต ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลมีความก้าวหน้าไปมาก ทำให้สามารถเข้าถึงชุดข้อมูลการจราจรแบบ Real-time จึงเกิดการศึกษาสภาพการจราจรในรูปแบบใหม่ขึ้นมา นั่นคือพัฒนาระบบการทำนายสภาพการจราจรล่วงหน้าออกไปแบบทันที (Real-time) โดยใช้การศึกษาชุดข้อมูลเก่า และพัฒนาแบบจำลองแบบต่างๆ เมื่อชุดข้อมูลที่ได้รับเข้ามาในปัจจุบันนั้น นำไปประมวลตามแบบจำลองที่ต้องการศึกษาแล้วผลที่ได้มีความสอดคล้องกับสภาพการจราจรชนิดใด ก็ทำนายว่าเหตุการณ์สภาพการจราจรที่กำลังจะเกิดขึ้น น่าจะเป็นไปตามแบบข้อมูลชนิดนั้น การวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาสภาพการจราจรที่ดำเนินไปสู่การติดขัด เพื่อที่จะพัฒนาแบบจำลองที่สามารถทำนายการจราจรที่ติดขัดได้ล่วงหน้า โดยอาศัยชุดข้อมูลที่รับเข้ามาอย่างทันที และสามารถประเมินช่วงระยะเวลาดังกล่าวอย่างหายบได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพัฒนาและเปรียบเทียบวิธีการค้นหาสภาพการจราจรติดขัด และทำนายล่วงหน้าระยะสั้น จากข้อมูลความเร็วของรถยนต์ อัตราเคลื่อนตัว ที่ผ่านกล้องวงจรปิดบนถนนทางด่วนและทางหลวงสายหลัก ให้ได้ผลการติดขัด และประมาณเวลาล่วงหน้าระยะสั้นได้

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากกล้องวงจรปิด ซึ่งให้ค่าตัวแปรออกมาเป็น อัตราการเคลื่อนตัว (flow rate) ความเร็ว (Speed) เรียบร้อยแล้ว
2. งานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อหาเหตุปัจจัย หรือตัวแปรซึ่งจะนำไปสู่การจราจรที่ติดขัด โดยมิได้ระบุสาเหตุชัดเจนว่าเหตุการณ์นั้นเป็นเหตุการณ์ชนิด เช่น อุบัติเหตุ ฝนตก เป็นต้น

3. ถนนที่ใช้ในการศึกษาเป็นถนนสายหลัก ได้แก่ ทางด่วน (Freeway) ทางหลวง (Highway)

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เครื่องมือที่ใช้ในการจำลอง และออกแบบการวิจัย
2. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรมที่นำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง (Model)
3. สร้างฐานข้อมูลเหตุการณ์สภาพการจราจรที่ผิดปกติ
4. พัฒนาแบบจำลองตามทฤษฎีงานวิจัยที่อ้างอิงหลายๆ แบบ
5. ทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้
6. พัฒนาจำลองใหม่ให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีมากที่สุด
7. สรุปผลการพัฒนาแบบจำลอง
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเปรียบเทียบวิธีการและทราบค่าตัวแปรชี้วัดที่บ่งบอกสภาพการจราจรกำลังดำเนินไปสู่การติดขัดหรือคลายตัว และทำนายช่วงระยะเวลาดังกล่าวว่าจะเกิดขึ้นนานเท่าไร โดยใช้ข้อมูลจากกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งอยู่บนถนนสายหลักต่างๆ ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งจะทำให้สามารถแก้ไขปัญหา การจราจร ได้อย่างทันเหตุการณ์ และสามารถหลีกเลี่ยงเส้นทางและช่วงเวลาที่มีการจราจรติดขัด

#### 1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

1.6.1 “DEVELOPMENT OF REAL-TIME SHORT-TERM TRAFFIC CONGESTION PREDICTION METHOD” โดย กิตติพงษ์ หิริโอด์ปปะ, เศรษฐา ปานงาม, สรวิศ นฤปิติ และวสันต์ ภัทรอริคม ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ First International Conference of Thai Society for Transportation & Traffic Studies - "Future of Human Mobility" (TSTS 2010) ณ โรงแรมเมโทรโพล ภูเก็ต ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 22-23 มกราคม พ.ศ. 2553

1.6.2 “DEVELOPMENT OF REAL-TIME SHORT-TERM TRAFFIC CONGESTION DETECTION AND PREDICTION METHOD” โดย กิตติพงษ์ หิริโอด์ปปะ, เศรษฐา ปานงาม, สรวิศ นฤปิติ และวสันต์ ภัทรอริคม ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ 14th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE14) ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง เชียงราย ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 23-26 มีนาคม พ.ศ. 2553

- 1.6.3 “A NOVEL APPROACH OF DYNAMIC TIME WARPING FOR TRAFFIC CONGESTION DETECTION AND SHORT-TERM PREDICTION” โดย กิตติพงษ์ หิริโอดีป๊ะ, เศรษฐา ปานงาม, สรวิศ นฤปิติ และวสันต์ ภัทรอริคม ในงานมหกรรมประชุมวิชาการทางการจราจรอัจฉริยะนานาชาติ (ITS World Congress 2010) ณ เมืองกุซัน ประเทศเกาหลีใต้ ระหว่างวันที่ 25-29 ตุลาคม พ.ศ. 2553



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีความรู้ที่เกี่ยวข้องกันสามสาขาวิชาหลัก คือ ความรู้ทางคอมพิวเตอร์ ความรู้ทางการจราจรขนส่ง (Transportation) และความรู้ทางด้านสถิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 ทฤษฎีทางคอมพิวเตอร์

ความรู้พื้นฐานสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาการจำแนกตัวอย่างเพื่อนำมาจำแนกสภาพการจราจรแบบต่างๆ และการศึกษาการอนุกรมเวลาเพื่อพิจารณาวิเคราะห์รูปแบบสภาพการจราจรที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาตามทฤษฎีอนุกรมเวลา

###### 2.1.1.1 การจำแนกตัวอย่าง (Pattern Classification) [6]

การจำแนกตัวอย่างเป็นงานประเภทเป็นศาสตร์ของการศึกษาปัญญาประดิษฐ์ ในสาขาการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อใช้จำแนกชุดข้อมูลที่สนใจออกจากกัน โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) แบบต่างๆ มาประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างในชุดข้อมูลสอน (training set) ที่ใช้ จะมีคุณลักษณะสำคัญเพื่อบอกค่าประเภทของตัวอย่างนั้น ซึ่งเรียกค่าคุณลักษณะนี้ว่า ฉลากบอกประเภท (class label) ซึ่งจะถูกนำไปสอนให้ตัวจำแนกประเภท หรือ Classifier เรียนรู้ และผลลัพธ์ที่ได้คือแบบจำลอง (Model) ที่สร้างขึ้นมา เพื่อใช้จำแนกประเภทข้อมูลหรือตัวอย่างใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ซึ่งกระบวนการจำแนกตัวอย่างสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการหลัก คือ

1. การเตรียมข้อมูล (Data Preparation) เป็นขั้นตอนสำคัญก่อนการจำแนกประเภทซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสำเร็จในการจำแนกครั้งนั้นๆ เนื่องจากข้อมูลจริงที่ได้มานั้นจะมีความสกปรก กล่าวคือ

- ข้อมูลไม่สมบูรณ์ (Incomplete) คือ ค่าคุณลักษณะขาดหาย หรือขาดคุณลักษณะที่ต้องการ มีแต่ข้อมูลโดยรวม
- ข้อมูลรบกวน (Noisy) คือ ค่าของข้อมูลผิดพลาดไปจากความเป็นจริง (Errors) เนื่องจากการเก็บข้อมูลที่ผิดพลาด ตลอดจนโดนผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง หรือเกิดค่าแปลกแยกขึ้น (outlier) ซึ่งมักเป็นค่าถูกต้องแต่มีค่าสูงหรือต่ำเกินขอบเขตความสนใจไปมาก
- ข้อมูลไม่มีความสอดคล้องกัน คือ ข้อมูลชนิดเดียวกัน แต่เก็บมาคนละมาตรฐาน เช่น การตั้งชื่อต่างกัน ใช้ค่าแทนข้อมูลที่แตกต่างกัน

เทคนิคการเตรียมข้อมูลประเภทต่างๆ จะช่วยเพิ่มคุณภาพของข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้การประมวลผลข้อมูลมีความแม่นยำ ประสิทธิภาพ และความเร็วในการจำแนกประเภทข้อมูลเพิ่มขึ้น เทคนิคที่ใช้เตรียมข้อมูลให้พร้อมก่อนที่จะทำการจำแนกประเภทข้อมูล ได้แก่

**1.1 การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning)** เพื่อการตัดทิ้งระเบียบซ้ำซ้อน (duplicated records) การจัดการข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ การปรองดองความไม่สอดคล้อง และที่สำคัญคือ การจัดการกับข้อมูลที่สูญหาย และลดข้อมูลรบกวน (Noise) หรือข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Outlier)

**1.1.1 การจัดการข้อมูลขาดหายหรือข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์** มักพบเสมอว่าชุดข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์ เกิดการขาดหายหรือสูญหาย ซึ่งมีสาเหตุปัจจัยค่อนข้างหลากหลาย เช่น ความผิดพลาดของผู้เก็บข้อมูล อุปกรณ์เก็บข้อมูลชำรุด การส่งข้อมูลผิดพลาด เป็นต้น การจัดการข้อมูลขาดหายจึงเลือกทำได้หลายวิธี ขึ้นกับเทคนิคและความสมบูรณ์ของชุดข้อมูล ส่วนที่เหลือ กล่าวคือ

- การตัดทิ้งตัวอย่างที่มีข้อมูลสูญหาย มักใช้กับงานจำแนกตัวอย่างมากที่สุด (Classification) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ฉลากบอกรูปแบบ (class label) ของตัวอย่างขาดหาย หรือค่าคุณลักษณะขาดหายเป็นจำนวนมาก
- ใช้ค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะเพื่อเติมค่าข้อมูลที่ขาดหาย มักใช้ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่จัดอยู่ในประเภทเดียวกัน เพื่อเติมค่าข้อมูลที่ขาดหายไป
- คำนวณหาค่าความเป็นไปได้มากที่สุด ซึ่งมีอยู่หลายเทคนิคให้เลือกใช้ เช่น จากค่าความถดถอย (regression) การอนุมาน โดยใช้สูตรของเบย์ และการใช้ต้นไม้ตัดสินใจช่วยทำนาย

**1.1.2 การจัดการข้อมูลรบกวน** ซึ่งชุดข้อมูลที่ศึกษามีลักษณะความผิดพลาดแบบสุ่ม หรือความคลาดเคลื่อนจากการวัด สาเหตุความผิดพลาดอาจเนื่องมาจาก อุปกรณ์เก็บรวบรวมข้อมูลผิดพลาด ปัญหาจากการบันทึกหรือป้อนค่าข้อมูล อันเนื่องมาจากมนุษย์หรือคอมพิวเตอร์ ปัญหาการส่งข้อมูล และโดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อจำกัดทางเทคโนโลยีการวัด การจัดการข้อมูลรบกวนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีบินนิง (Binning Method) วิธีการจัดกลุ่ม (Clustering) วิธีความถดถอย (Regression) วิธีการตรวจสอบค่าที่น่าสงสัยด้วยคนและคอมพิวเตอร์ร่วมกัน และวิธีที่จะ



นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ การปรับเรียบโดยใช้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ ซึ่งได้ให้ผลที่ดีที่สุดสำหรับข้อมูลการจราจร [7] ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อความรู้ทางสถิติ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้ความรู้ทางสถิติมาประยุกต์ใช้งาน

**1.2 การบูรณาการข้อมูล (Relevance Analysis)** คือ การรวมข้อมูลจากแหล่งเก็บต่างๆ มาไว้ที่เดียวกัน เพื่อช่วยกำจัดคุณลักษณะที่ซ้ำซ้อน หรือไม่เกี่ยวข้องออกไป และเพิ่มความเร็วในการทำเหมืองข้อมูล

**1.3 การแปลงข้อมูล (Transformation)** ได้แก่ การนอร์มอล-ไลซ์ข้อมูล (Normalization) เพื่อให้ข้อมูลอยู่ในช่วงที่กำหนด หรือการทำข้อมูลให้อยู่ในรูปนัยทั่วไป (Generalization) และเทคนิคที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ การปรับเรียบ (Smoothing) โดยใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (Moving Average)

## 2. การสร้างแบบจำลอง (Model Construction)

- เลือกเซตของตัวอย่างมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งถูกเรียกว่า ชุดข้อมูลสอน โดยทั่วไปมักเลือกใช้ตัวอย่างที่ดี เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องสูง
- ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะมีคุณลักษณะหนึ่ง (Attribute) ซึ่งบอกค่าประเภทที่กำหนดไว้ล่วงหน้าเรียบร้อยแล้ว
- แบบจำลองที่สร้างขึ้น จะแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้การจำแนกประเภทในรูปแบบแบบจำลองการตัดสินใจของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ กฎการจำแนกประเภท (Classification rules) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Trees) หรือสมการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ (Mathematical Equation)

## 3. การทดสอบและประมาณค่าความแม่นยำ

เพื่อการจำแนกประเภทตัวอย่างที่ต้องการ และแม่นยำ ก่อนอื่นจะต้องมีการประมาณค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของแบบจำลองที่ได้เสียก่อนการนำไปใช้งาน ได้แก่

- เปรียบเทียบค่าผลตอบกลับประเภทที่ทราบล่วงหน้าของตัวอย่างในชุดทดสอบ (Test set) กับค่าผลลัพธ์การจำแนกประเภทที่ได้จากแบบจำลอง
- อัตราความแม่นยำ (Accuracy Rate) คำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์ผลการจำแนกประเภทได้อย่างถูกต้อง จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น
- ชุดข้อมูลทดสอบจะต้องเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อข้อมูลชุดสอน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความพอดีจนเกินไปของชุดข้อมูลสอน (Over fitting)

4. การนำแบบจำลองไปใช้งาน (Model Usage) และสรุปผลลัพธ์ที่ได้ (Conclusions)  
นำข้อมูลที่ต้องการจะศึกษาเข้าแบบจำลอง และนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผล  
เพื่อการนำไปใช้งานต่อไป

#### 2.1.1.2 อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Algorithm)

เนื่องจากการจำแนกตัวอย่างได้นำอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องมาประยุกต์ใช้งาน  
จึงจะขอก้าวถึงรายละเอียดและชนิดของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ที่มีเทคนิคแตกต่างกัน  
ออกไป เพื่อให้เหมาะกับงานในแต่ละประเภท

อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง จัดแบ่งได้ตามลักษณะผลลัพธ์ โดยทั่วไปแล้วจะแบ่ง  
ได้เป็น 3 ประเภท [6] ได้แก่ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน และการเรียนรู้  
แบบเสริมกำลัง

- การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) ผู้สอนจะจัดเตรียมผลตอบประเภท  
ของข้อมูลสอนแต่ละชุดที่ หรือกล่าวเป็นนัยได้ว่าผู้สอนทราบค่าประเภทของตัวอย่าง  
ในชุดข้อมูลสอนล่วงหน้า การจำแนกประเภท (classification) ถือเป็นตัวอย่างที่ดีของ  
การเรียนรู้ชนิดนี้
- การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการ  
จัดกลุ่ม (clustering) การเรียนรู้ประเภทนี้จะตรงข้ามกับการเรียนรู้แบบมีผู้สอน คือ ไม่  
มีผู้สอนที่แท้จริง ข้อมูลชุดสอนจะไม่มีกระบวนการผลลัพธ์หรือผลตอบประเภทไว้  
ล่วงหน้า ตัวเรียนรู้จะพยายามเรียนรู้เพื่อระบุประเภทหรือกลุ่มที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล  
ตัวอย่างที่รู้จักกันดีของการเรียนรู้ชนิดนี้คือ การจัดกลุ่ม
- การเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (reinforcement learning or learning with a critic) การ  
เรียนรู้ของตัวจำแนกประเภทชนิดนี้ จะไม่ต้องการผลตอบประเภทไว้ล่วงหน้า แต่  
จะใช้ผลป้อนกลับ (feedback) ที่ได้จากผู้สอนเพื่อบอกสิ่งที่อัลกอริทึมได้ตัดสินใจทำไป  
ว่าเป็นการตัดสินใจถูกหรือผิดเท่านั้น ซึ่งเปรียบเสมือนอาจารย์ที่ตรวจข้อสอบปรนัย  
ของนักเรียนที่บอกแต่เพียงว่าข้อสอบแต่ละข้อผิดหรือถูกและได้คะแนนเท่าไร โดยไม่  
มีการชี้แจงว่าผิดอย่างไร ควรแก้ไขอย่างไร การให้ผลป้อนกลับสู่อัลกอริทึมนิยมให้ค่า  
เป็นคะแนนเลขฐานสองหลักเดียว คือ 0 กับ 1 ซึ่งอาจเป็นค่าอื่นได้ตามที่ผู้พัฒนา  
ต้องการเพื่อเป็นแนวทางในการเรียนรู้ของอัลกอริทึมต่อไป

ต่อไปนี้จะกล่าวถึง อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ประเภทต่างๆ ที่มีการนำมา  
ประยุกต์ใช้งานในด้านการวิศวกรรมการจราจร

### 2.1.1.2.1 การเรียนรู้แบบเบย์ [7,8]

การเรียนรู้แบบเบย์ (Bayesian Learning) เป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอน โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นทางด้านสถิติเข้ามาช่วย ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของเบย์ (Bayes theorem) เพื่อต้องการสร้างโมเดลที่อยู่ในรูปของความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นค่าที่บันทึกได้จากการสังเกต จากนั้นนำโมเดลมาหาว่าสมมติฐานใดถูกต้องที่สุดโดยใช้ความน่าจะเป็นเข้ามาช่วย นอกจากนี้การเรียนรู้แบบเบย์นั้นสามารถใช้ข้อมูลหรือความรู้ก่อนหน้า (prior knowledge) เข้ามาช่วยในการเรียนรู้ได้ด้วย ความรู้ก่อนหน้าหมายถึงความรู้ที่มีเกี่ยวกับสมมติฐานแต่ละตัวก่อนที่จะเก็บข้อมูล เมื่อใช้งานจะนำความน่าจะเป็นของข้อมูลที่เก็บได้มาปรับสมมติฐานซ้ำอีกครั้ง

### 2.1.1.2.2 ทฤษฎีของเบย์ (Bayes theorem)

จากทฤษฎีทางสถิติของเบย์ กล่าวว่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ A โดยมีเงื่อนไขว่าเหตุการณ์ B ได้เกิดขึ้นแล้ว หรือความน่าจะเป็นของ A เมื่อรู้ B เขียนแทนด้วย  $P(A|B)$  เมื่อกำหนดให้ A,B เป็นเหตุการณ์ใดๆ สามารถคำนวณได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นของ B เมื่อรู้ A กับความน่าจะเป็นของ A หาคด้วยความน่าจะเป็นของ B ซึ่งเรียก  $P(A)$  ว่าเป็นความน่าจะเป็นก่อน (prior probability) และเรียก  $P(A|B)$  ว่าเป็นความน่าจะเป็นภายหลัง (posterior probability) ความน่าจะเป็นก่อนเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลเบื้องต้น ส่วนความน่าจะเป็นภายหลังเป็นค่าความน่าจะเป็นก่อนที่ถูกปรับด้วยข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad \dots\dots\dots(2.1.1.2-1)$$

ทฤษฎีของเบย์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องได้กล่าวคือ สิ่งที่น่าสนใจก็เมื่อมีชุดข้อมูลหรือเซตของตัวอย่างสอน D จะต้องการหาค่าความน่าจะเป็นที่สมมติฐาน (h) ที่สนใจว่ามีโอกาสจะเกิดขึ้นเท่าไร ก็สามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีของเบย์ในการคำนวณได้ดังนี้

$$P(h|D) = \frac{P(D|h)P(h)}{P(D)} \quad \dots\dots\dots(2.1.1.2-2)$$

เมื่อกำหนดให้  $P(h)$  คือความน่าจะเป็นก่อน (prior probability) ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่สมมติฐาน h จะเป็นจริงโดยที่ยังไม่ได้ดูข้อมูลตัวอย่างสอน ส่วน  $P(h|D)$  เป็นความน่าจะเป็นภายหลัง (posterior probability) ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่สมมติฐาน h จะเป็นจริงโดยมีเงื่อนไขว่า D เป็นจริง (เห็นข้อมูลตัวอย่างสอน D แล้ว) ซึ่งต้องการคำนวณ

ความน่าจะเป็นชนิดนี้ ซึ่งมักจะหาไม่ได้โดยตรง แต่เมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีของเบส์ จะสามารถคำนวณความน่าจะเป็นนี้ได้ง่ายขึ้น

### 2.1.1.2.3 ตัวจำแนกประเภทเบส์อย่างง่าย

ตัวจำแนกประเภทเบส์อย่างง่าย (Naive Bayes Classifier) เป็นตัวจำแนกประเภทที่ที่ประยุกต์ให้ใช้งานทฤษฎีของเบส์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งกำหนดให้คุณสมบัติ (Attribute) ของตัวอย่างไม่ขึ้นต่อกัน เหมาะสำหรับกรณีของเซตตัวอย่างที่มีจำนวนมาก ยากต่อการคำนวณความน่าจะเป็นได้ทั้งหมด

สมมติให้  $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$  เป็นคุณสมบัติของตัวอย่าง จะได้ว่าค่า (ประเภท) ที่น่าจะเป็นที่สุดของตัวอย่าง  $x$  โดยที่  $a_i$  ในสมการเป็นค่าของคุณสมบัติ  $A_i(V)$  เป็นเซตของประเภทหรือค่าที่เป็นไปได้ของ  $x$  ซึ่งจะได้สมการ

$$\begin{aligned} v_{MAP} &= \underset{v_j \in V}{\operatorname{argmax}} P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \\ &= \underset{v_j \in V}{\operatorname{argmax}} \frac{P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) P(v_j)}{P(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)} \quad \dots(2.1.1.2-3) \\ &= \underset{v_j \in V}{\operatorname{argmax}} P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) P(v_j) \quad \dots(2.1.1.2-4) \end{aligned}$$

สมการที่ (2.1.2-4) แสดงการหาประเภทที่ดีที่สุดของตัวอย่าง  $x$  แต่จะพบว่าสมการนี้ยากต่อการนำไปใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีจำนวนคุณสมบัติ ( $a_i$ ) จำนวนมาก เนื่องจากการคำนวณค่าของ  $P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$  ทำให้ยากลำบากมากเพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือในเชิงสถิติ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าให้คุณสมบัติ  $a_i$  แต่ละตัวของตัวอย่างมีค่าที่เป็นไปได้ 10 ค่า และคุณสมบัติทั้งหมดมี 10 ตัว จะได้ว่ามีลำดับ  $a_1, a_2, \dots, a_n$  ที่เป็นไปได้ทั้งสิ้นเท่ากับ  $10^{10}$  รูปแบบ ซึ่งหมายถึงว่าต้องหาตัวอย่างทั้งสิ้น  $10^{10}$  ตัว จึงจะมีโอกาสพบรูปแบบหนึ่งๆ ของ  $a_1, a_2, \dots, a_n$  สักหนึ่งครั้งโดยประมาณ ดังนั้นถ้าต้องการให้ค่า  $P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$  มีความน่าเชื่อถือเชิงสถิติ ต้องการตัวอย่างมากกว่า  $10^{10}$  ตัวอย่างหลายเท่า ซึ่งการที่จะหาตัวอย่างจำนวนมากขนาดนั้นแทบจะหาไม่ได้จริงในทางปฏิบัติ จึงต้องการโมเดลที่จะคำนวณ  $P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$  ให้ได้ในเชิงปฏิบัติ นั่นคือ สมมติฐานของตัวจำแนกประเภทเบส์อย่างง่าย จะกำหนดให้คุณสมบัติแต่ละตัวเป็นอิสระจากคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งทำให้สามารถเขียนแทนค่าของ  $P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$  ด้วยผลคูณของค่าความน่าจะเป็นด้านล่างนี้ที่หาค่าได้ง่ายขึ้น

$$P(v_j | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = \prod_{i=1}^n P(a_i | v_j) \quad \dots\dots\dots(2.1.1.2-5)$$

โดยที่  $\Pi$  หมายถึงการนำค่า  $P(a_i|v_j)$  ทั้งหมดมาคูณกัน สูตรนี้ถ้าใช้กฎลูกโซ่มาคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่ด้านซ้ายของสูตรจะได้เท่ากับ  $P(a_1|v_j) \times P(a_2|a_1, v_j) \times P(a_3|a_2, a_1, v_j) \times \dots \times P(a_n|a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_1, v_j)$  ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นทางด้านซ้ายของสมการจะเท่ากับผลคูณค่าความน่าจะเป็นทางด้านขวาที่ต่อเมื่อคุณสมบัติ  $a_1, a_2, \dots, a_n$  ไม่ขึ้นต่อกัน เช่น ความเร็ว (Speed) ไม่ขึ้นกับปริมาณการจราจร (Flow) ฯลฯ แต่ในความเป็นจริงแล้วคุณสมบัติดังกล่าวมักจะมีความสัมพันธ์กัน เช่น ความเร็วจะขึ้นกับปริมาณการจราจร เพราะถ้าปริมาณการจราจรสูงจะทำให้ความเร็วลดต่ำลงไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการใช้สมมติฐานความไม่ขึ้นต่อกัน (conditional independence assumption) นี้จะช่วยให้อ่านค่าความน่าจะเป็นในสูตรที่ (2.1.2-5) ได้ง่ายขึ้นมาก เพราะค่าความน่าจะเป็นของ  $a_i$  เมื่อรู้  $v_j$  หาได้ง่ายกว่า เช่นถ้าจะหารถเก๋ง ที่ความเร็วเกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ขับรถในเวลากลางคืน แล้วจะเกิดอุบัติเหตุหรือไม่ เมื่อเอาไปหาดูในฐานข้อมูล อาจจะมีโอกาสพบข้อมูลที่มีค่าครบทั้ง 4 ค่านี้้น้อยมากๆ หรือต้องใช้ตัวอย่างจำนวนมากมายมหาศาลถึงจะพบข้อมูลที่มีค่าครบตรงที่ต้องการ แต่ถ้าแยกคุณสมบัติออกจากกัน เช่นรถเก๋ง ที่เป็นตัวอย่างเกิดอุบัติเหตุ (บวก) หรือรถที่ความเร็วเกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นที่เกิดอุบัติเหตุ ทำให้ใช้ตัวอย่างไม่มากและได้คำตอบ ถึงแม้ว่าคำตอบที่ได้ อาจจะไม่ถูกต้องสมบูรณ์แต่จากผลการใช้งานที่ผ่านมา ก็พบว่าทำงานได้ดีในทางปฏิบัติ ดังนั้นจะได้ว่าตัวจำแนกประเภทแบบเบสอย่างง่ายคือ

$$v_{NB} = \underset{v_j \in V}{\operatorname{argmax}} P(v_j) \times \prod_{i=1}^n P(a_i|v_j) \quad \dots\dots\dots(2.1.1.2-6)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้เบสอย่างง่ายดังนี้

#### Algorithm: Naïve-Bayes

##### • Naive\_Bayes\_Learn(examples)

FOR EACH target value  $v$  DO

$$\bar{P}(v_j) \leftarrow \text{estimate } P(v_j)$$

FOR EACH attribute value  $a$  of each attribute DO

$$\bar{P}(a_j|v_j) \leftarrow \text{estimate } P(a_j|v_j)$$

##### • Classify\_New\_Example(x)

$$v_{NB} = \underset{v_j \in V}{\operatorname{argmax}} P(v_j) \times \prod_{i=1}^n P(a_i|v_j)$$

**2.1.1.3 อัลกอริทึมไดนามิกไทม์วอร์ปิง (Classical Dynamic Time Warping)**

อัลกอริทึมนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อวัดความเหมือนหรือคล้ายคลึงของข้อมูลอนุกรมเวลา ซึ่งยอมให้มีความผันแปรทางด้านเวลา และความเร็ว โดยมีการนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานด้วยการวิเคราะห์เสียงพูด (Speech Recognition) และการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing) โดยมีการทำงานของอัลกอริทึมดังต่อไปนี้

กำหนดให้  $Q$  และ  $C$  เป็นข้อมูล Time Series ที่มีความยาว  $n$  และ  $m$  ตามลำดับ

$$Q = q_1, q_2, q_3, \dots, q_n \quad \dots\dots\dots(2.1.1.3-1)$$

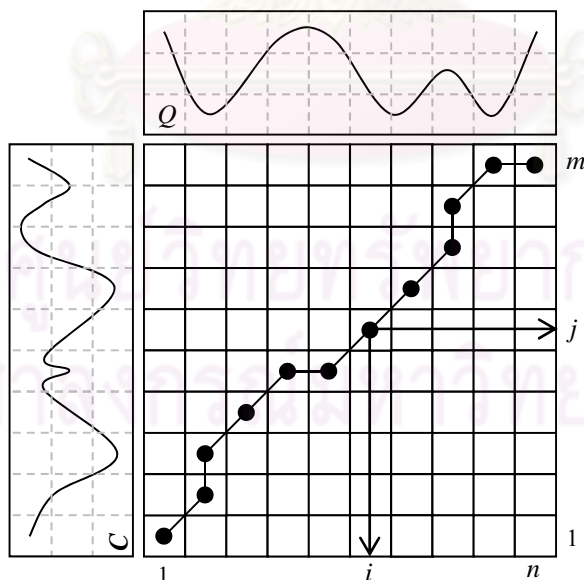
$$C = c_1, c_2, c_3, \dots, c_m \quad \dots\dots\dots(2.1.1.3-2)$$

เพื่อที่จะคำนวณความคล้ายคลึงระหว่าง 2 ข้อมูลอนุกรมเวลา (Time Series) นี้ อัลกอริทึมจะสร้างเมตริกขนาด  $n$  คูณ  $m$  โดยที่สมาชิกในเมตริกในคู่ลำดับ  $(i^{th}, j^{th})$  สามารถคำนวณได้จากระยะห่างระหว่าง 2 จุด  $(d(q_i, c_j))$  ของข้อมูลอนุกรมเวลา  $Q$  ของสมาชิกตัวที่  $q_i$  และข้อมูลอนุกรมเวลา  $C$  ของสมาชิกตัวที่  $c_j$

ซึ่งปกติแล้วการวัดระยะทางมักใช้การวัดแบบยูคลิด (Euclidean distance)

$$d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2 \quad \dots\dots\dots(2.1.1.3-3)$$

ทุกสมาชิกของเมตริก  $(i, j)$  จะหมายถึงการเรียงตัวระหว่างจุด  $q_i$  และจุด  $c_j$  ซึ่งได้แสดงดังภาพที่ 2.1.1.4-1



รูปที่ 2.1.1.3-1 ตัวอย่าง Warping Path

เมื่อสร้างเมตริกของระยะห่างระหว่างข้อมูลอนุกรมเวลาทั้ง 2 เรียบร้อยแล้ว (Q,C) ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสร้างทางเดิน หรือ Warping path, W ในเมตริกที่ได้ ซึ่งจะประกอบไป

ด้วยทางเดินย่อยๆ ได้แก่  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_K$  ตั้งแต่จุดเริ่มต้น ( $w_1$ ) ไปจนถึงจุดสิ้นสุด ( $w_K$ ) โดยมีเงื่อนไขการสร้างทางเดินดังต่อไปนี้

**1. เงื่อนไขจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด (Boundary conditions)**

โดยกำหนดให้จุดเริ่มต้นของเส้นทางเดิน  $w_1$  คือ สมาชิกของเมตริก (1,1) และจุดสิ้นสุดของทางเดิน ( $w_K$ ) คือ จุด (m,n) ซึ่งจะทำให้เส้นทางเดินมีการเคลื่อนที่ไปตามแนวทะแยงมุมของเมตริก

**2. เงื่อนไขความต่อเนื่อง (Continuity)**

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้ } w_k &= (a,b) \\ w_{k-1} &= (a',b') \\ \text{เงื่อนไข } a-a' &\leq 1 \\ b-b' &\leq 1 \end{aligned}$$

เงื่อนไขนี้จะทำให้เส้นทางเดินมีความต่อเนื่อง และจำกัดจำนวน Step การเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งมักจะเป็นการเคลื่อนที่ไปยังเซลล์ถัดไปที่อยู่ติดกัน และรวมถึงการเคลื่อนที่ในแนวทะแยงด้วย

**3. เงื่อนไขโมนोटอนิก (Monotonicity)**

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้ } w_k &= (a,b) \\ w_{k-1} &= (a',b') \\ \text{เงื่อนไข } a-a' &\geq 1 \\ b-b' &\geq 1 \end{aligned}$$

เงื่อนไขนี้จะมีการบังคับให้การเดินทางของเส้นทางมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไม่มีการวกกลับมาซ้ำทางเดิม

เนื่องจากทางเดินที่สามารถเป็นไปได้อาจมีหลายทางที่สอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมจะสนใจและเลือกเส้นทางเดินที่สั้นที่สุด ดังสมการ 2.1.1.4-4

$$DTW(Q, C) = \min \left\{ \sqrt{\sum_{k=1}^K w_k} / K \dots\dots\dots(2.1.1.3-4) \right.$$

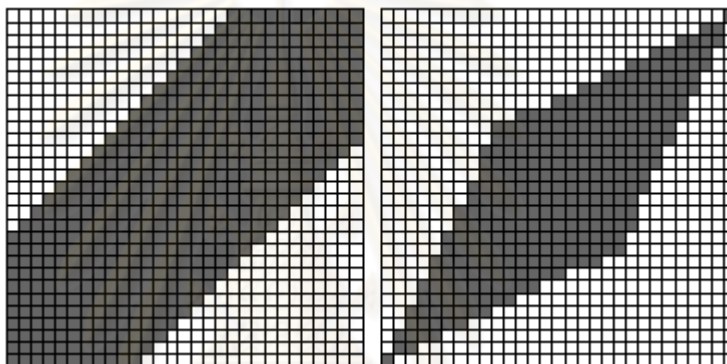
เพื่อความสะดวก สามารถใช้เทคนิค Dynamic Programming เพื่อคำนวณ cost ของระยะทาง โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูป  $\gamma(i, j)$  แทนระยะทาง  $d(q_i, c_j)$

$$\gamma(i, j) = d(q_i, c_j) + \min\{\gamma(i - 1, j - 1), \gamma(i - 1, j), \gamma(i, j - 1)\}$$

2.1.1.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วาร์ปิง

(Modification of Dynamic Time Warping)

เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วาร์ปิงมีประสิทธิภาพและความถูกต้องค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากลักษณะการประมวลผลของอัลกอริทึมในแบบ  $O(N^2)$  ที่ภาระการประมวลผลขึ้นตรงกับชุดข้อมูลตามสมการเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งถ้าหากว่าในอนาคตเมื่อมีตัวอย่างสอนจำนวนมากขึ้นแล้ว อัลกอริทึมจะต้องทำงานเพิ่มขึ้นอย่างเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัย เพื่อหาวิธีการลดภาระการประมวลผลของอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วาร์ปิง ซึ่งวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในปัจจุบันซึ่งได้แก่ การจำกัดขอบล่างแบบ Sakoe-Chiba Band [9] และการจำกัดขอบล่างแบบ Itakura Parallelogram [10]



รูปที่ 2.1.1.4-1 แสดงการจำกัดขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band (ซ้าย) และการจำกัดขอบเขตแบบ Itakura Parallelogram (ขวา)

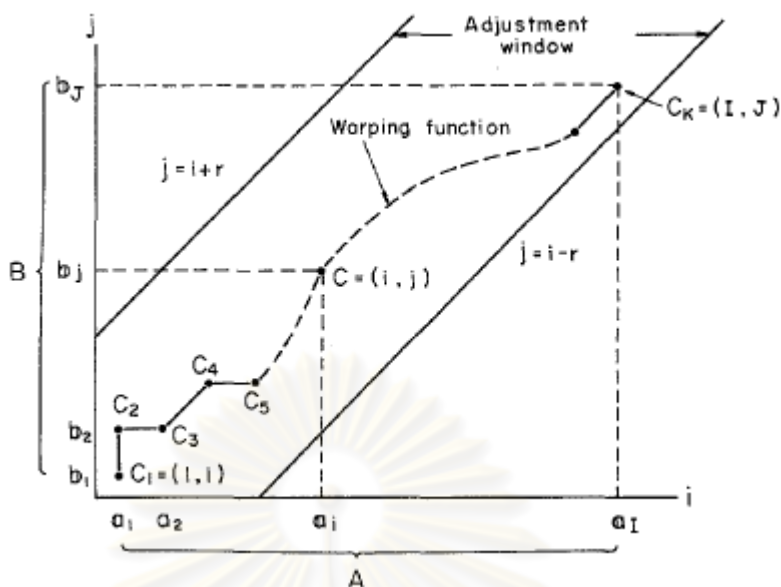
การจำกัดขอบล่างมีหลักการทำงานกล่าวคือ บังคับการค้นหาต้นทุนที่สั้นที่สุดระหว่างคู่ของข้อมูลอนุกรมเวลาที่นำมาเปรียบเทียบ ให้อยู่ในขอบเขตที่จำกัดไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.1.1.4-1 โดยการค้นหาจะอยู่ในพื้นที่สี่เหลี่ยมเท่านั้นไม่ใช้การค้นหาทั้งเมตริกเหมือนอัลกอริทึมต้นแบบ ซึ่งการจำกัดขอบเขตทั้ง 2 แบบ ที่ได้รับความนิยม มีหลักการทำงานที่เหมือนกันต่างกันเพียงแต่การจำกัดขอบเขตแบบ Itakura ที่จะมีการบังคับการค้นหาให้อยู่ในขอบเขตที่แคบกว่าตามรูปที่ 2.1.1.4-1 ขวา แต่มีข้อจำกัดการใช้งานที่ต้องมีความยาวข้อมูลอนุกรมเวลาที่คงที่จึงจะให้ประสิทธิภาพการจำแนกในสูงสุด [10] แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลสภาพการจราจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความยาวที่ไม่คง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การจำกัดขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band ซึ่งได้นำเสนอการประยุกต์อัลกอริทึมไดนามิกไทม์วาร์ปิงไว้ดังนี้

กำหนดให้ A, B เป็นข้อมูลอนุกรมเวลาที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกัน

$$A = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n] \quad \dots\dots\dots(2.1.1.4-1)$$

$$B = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_n] \quad \dots\dots\dots(2.1.1.4-2)$$





รูปที่ 2.1.1.4-2 แสดงการทำงานจำกัดขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band

เมื่อกำหนดให้  $F$  เป็นเส้นทางเดินที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดระหว่างข้อมูลอนุกรมเวลาทั้ง 2 ที่ยังอยู่ในขอบเขตของเส้นตรง  $j = i+r$  และ  $j = i-r$  โดยที่  $r$  คือค่าคงที่ที่กำหนดเพื่อปรับความกว้างของขอบเขต ดังนั้น

$$F = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_k] \dots\dots\dots(2.1.1.4-3)$$

ซึ่งยังคงหาระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างสองอนุกรมเวลาได้จากสมการที่ 2.1.1.3-4 แต่ Sakoe-Chiba Band ได้เพิ่มเงื่อนไขหน้าต่างการปรับตัว (Adjustment Window) จากเดิมที่มีเพียง 3 เงื่อนไข ได้แก่ เงื่อนไขการเริ่มต้นและสิ้นสุด เงื่อนไขโมโนโทนิค และเงื่อนไขความต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ เพื่อให้การค้นหาเส้นทางหรือต้นทุนที่ต่ำที่สุดอยู่เฉพาะในขอบเขตที่กำหนดเท่านั้น กล่าวคือ

$$|i_k - j_k| \leq r \dots\dots\dots(2.1.1.4-4)$$

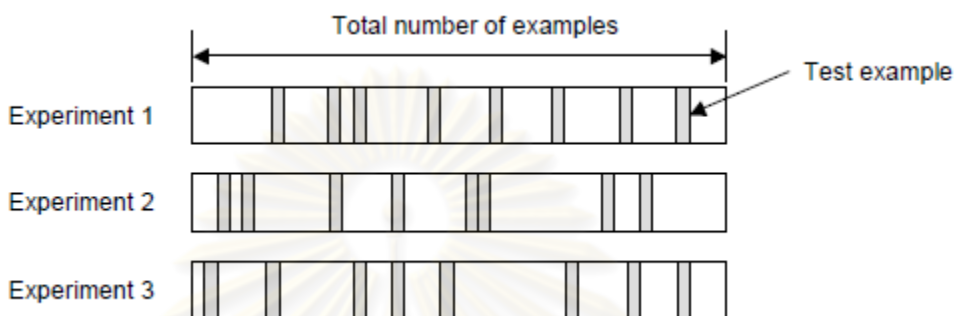
โดยที่  $r$  คือค่าคงที่ที่กำหนดโดยผู้นำไปใช้งาน แปรเปลี่ยนไปตามลักษณะของข้อมูลอนุกรมเวลานั้นๆ

**2.1.1.5 การสอบทานความถูกต้องแบบไขว้ (Cross Validations) [6,7]**

เนื่องจากข้อจำกัดของปริมาณข้อมูลที่น่ามาใช้สำหรับการจำแนกประเภทจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ เทคนิคการสอบทานข้อมูลแบบไขว้ (Cross Validation) จึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำแนกประเภทจากข้อมูลที่มีอยู่จำกัด โดยประยุกต์ใช้เทคนิคทางสถิติเพื่อลดค่าความผิดพลาดจากการสุ่มลง ซึ่งในปัจจุบันมีเทคนิคที่ได้รับความนิยมอยู่หลายเทคนิคด้วยกันกล่าวคือ

**2.1.1.5.1. การสุ่มตัวอย่างย่อย (Random Subsampling)**

ในการสุ่มตัวอย่างย่อย ข้อมูลที่สนใจจำนวน K ชุด จะถูกเลือกออกมาเพื่อทำการทดสอบ (testing set) และข้อมูลที่เหลือจากการถูกเลือกจะเป็นข้อมูลที่ใช้สอน (training set) โดยจะมีการกำหนดจำนวนครั้งที่สุ่มไว้ก่อนล่วงหน้าตามความต้องการของผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 2.1.1.4 -1 แสดงการกำหนดตัวอย่างการสุ่มไว้ที่ 3 ครั้ง ไม่เหมือนกัน



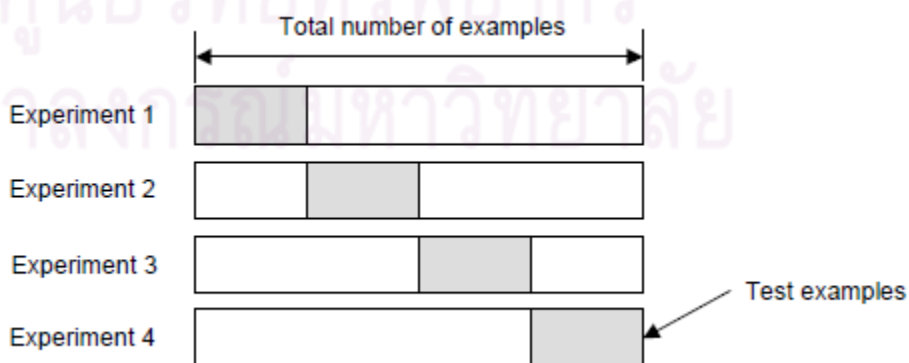
รูปที่ 2.1.1.5-1 แสดงการทำงานของ Random Subsampling

โดยค่าความผิดพลาดจากการสุ่มหาได้จากผลรวมตัวอย่างที่จำแนกผิดพลาดทั้งหมดจากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

$$\text{ความผิดพลาดในการจำแนก} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad \dots\dots\dots(2.1.1.5-1)$$

**2.1.1.5.2. K-Fold**

ในการสอบทานข้อมูลแบบ K-Fold จะแบ่งการทดสอบออกเป็น K การทดลอง (K Experiment) และในแต่ละการทดสอบ K จะแบ่งข้อมูลออกเป็นจำนวน K ชุดย่อยๆ โดยนำข้อมูลลำดับที่ K มาใช้เป็นข้อมูลทดสอบ และใช้ข้อมูล K-1 ชุดที่เหลือ มาเป็นตัวอย่างสอนดังแสดงในรูปที่ 2.1.1.4-2

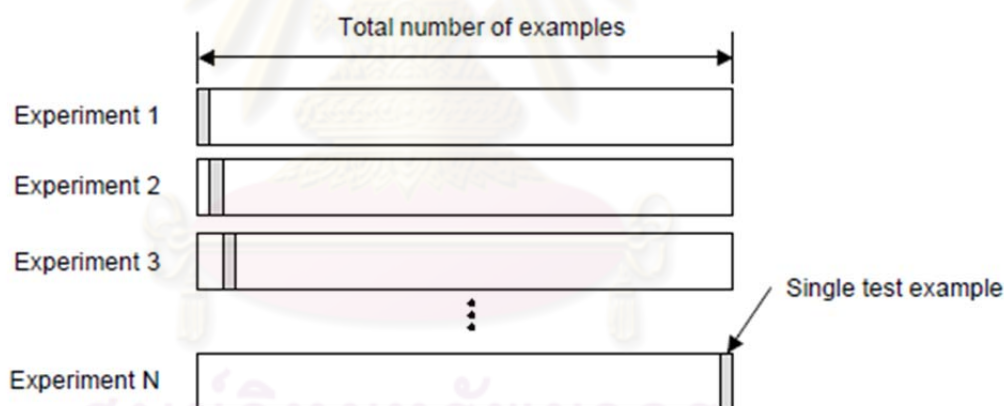


รูปที่ 2.1.1.5-2 แสดงการทำงานของ Random Subsampling

จะเห็นได้ว่าการทดสอบข้อมูลแบบ K-fold นั้น มีลักษณะคล้ายกับการสุ่มตัวอย่างย่อย แต่มีการจัดระบบระเบียบของข้อมูลที่จะถูกนำไปสอนและทดสอบ จึงทำให้ข้อมูลทุกตัวจะเป็นทั้งตัวอย่างสอนและตัวทดสอบทั้งคู่ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการใช้ค่า  $K=3$  จะลดความผิดพลาดจากการสุ่มและให้ค่าความถูกต้องสูงในระดับที่ยอมรับได้ และสำหรับในกรณีที่มีข้อมูลสอนที่ไม่มากจนเกินไปมักจะใช้ค่า  $K=10$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมโดยให้ระดับความถูกต้องสูงมากและใช้เวลาในการประมวลผลไม่มากจนเกินระดับที่รับได้ [7] ซึ่งค่าความผิดพลาดจากการสุ่มหาได้จากผลรวมตัวอย่างที่จำแนกผิดพลาดทั้งหมดจากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด ดังสมการ 2.1.1.5-1

### 2.1.1.5.3. Leave-one-out

การสอบทานนี้ถือได้ว่าเป็นรูปแบบหนึ่งของการสอบทานแบบ K-Fold โดยมีการกำหนดค่า  $K$  เท่ากับจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด กล่าวคือ ถ้ามีข้อมูลทั้งหมด  $N$  ชุดข้อมูลจะมีการทดสอบทั้งหมด  $N$  การทดลอง ( $N$  Experiment) ในแต่ละการทดสอบจะใช้ชุดข้อมูลทดสอบ (Testing Set) ลำดับที่  $N$  เพียงตัวเดียว และข้อมูลที่เหลือ  $N-1$  จะถูกใช้เป็นข้อมูลสอน (Training Set)



รูปที่ 2.1.1.5-3 แสดงการทำงานของ Leave-one-out

การทดสอบนี้ถึงแม้จะลดความผิดพลาดจากการสุ่มได้มากที่สุด แต่เนื่องด้วยต้องการการประมวลผลสูง จึงมักนิยมใช้ในการทดลองที่ชุดข้อมูลทั้งหมดมีจำนวนน้อย หรือมีทรัพยากรคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ชุดข้อมูล (Data Set) สภาพการจราจรติดขัดต้นแบบ มีประมาณ 20 ตัวอย่าง ทั้งสองแหล่งข้อมูล (ถนนคลองหลวง และทางด่วนดาวคะนอง) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การทดสอบแบบ Leave-one-out ในการสอบทานความถูกต้องของผลลัพธ์ ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนไม่มากและเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีประสิทธิภาพเพียงพอในการ

ประมวลผลชุดข้อมูลดังกล่าว ซึ่งค่าความผิดพลาดจากการสุ่มหาได้จากผลรวมตัวอย่างที่  
จำแนกผิดพลาดทั้งหมดจากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด ดังสมการ 2.1.1.5-1

## 2.1.2 ทฤษฎีทางการจราจรขนส่ง[11]

การจราจรติดขัด (Traffic Congestion) คือ เงื่อนไขที่มีความเร็วเฉลี่ยบนโครงข่ายหรือ  
เส้นทางถนนต่ำกว่าความเร็วที่ควรจะเป็นบนโครงข่ายถนนเส้นนั้นๆ ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการ  
เดินทาง และแถวคอยเพิ่มสูงขึ้น จนไม่เป็นที่น่าพอใจของผู้ใช้ถนน สาเหตุของการเกิดการจราจร  
ติดขัดสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 รูปแบบ

- **การจราจรติดขัดแบบไม่มีรูปแบบ (Non-Recurrent)** หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอุบัติเหตุการณ์  
(incident) คือ เหตุการณ์ใดๆ ก็ตามที่เกิดขึ้นโดยฉับพลันบนท้องถนน โดยไม่อาจคาดเดาได้  
ล่วงหน้า ส่งผลให้การจราจรเกิดการชะลอตัวจนถึงติดขัด เหตุการณ์เหล่านี้ได้แก่ อุบัติเหตุ ฝนตก  
หนัก คนหรือสัตว์กรีดขวางช่องทางจราจร ซึ่งอาจกล่าวโดยสรุปว่าเหตุการณ์ใดๆ ก็ตามส่งผลให้  
กระแสการจราจรไม่เป็นไปตามสภาวะที่ควรจะเป็น

- **การจราจรติดขัดแบบมีรูปแบบ (Recurrent)** เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปแบบ  
เกิดจากความต้องการในการใช้ถนน (Flow) มากกว่าความจุที่ถนนจะสามารถรับได้ ซึ่งมีรูปแบบ  
การเกิดขึ้นเป็นประจำรายวัน เช่น เวลาเริ่มและเลิกงาน รายสัปดาห์ เช่น วันศุกร์หลังเลิกงาน หรือ  
รายปี เช่น วันหยุดยาวปีใหม่และสงกรานต์ เป็นต้น

### 2.1.2.1 การจัดการจราจรติดขัดและอุบัติเหตุการณ์

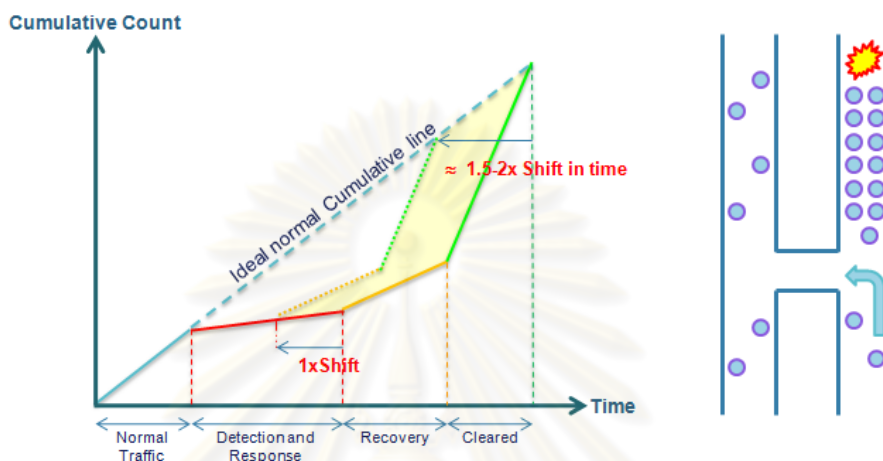
การจัดการอุบัติเหตุการณ์ (Non-Recurrent Management) และการจัดการจราจรติดขัด  
แบบมีรูปแบบ (Recurrent Management) มีลักษณะเหมือนกันทุกประการจะต่างกันเพียง  
อุบัติเหตุการณ์จะมีกระบวนการเคลียร์ผิวทางจราจรเพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากผู้เข้าไปปฏิบัติหน้าที่  
เพื่อช่วยเหลือผู้บาดเจ็บเท่านั้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวรวมไว้ด้วยกันและขอเรียกว่า  
การจัดการจราจรติดขัด ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการ 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) การค้นหาและตรวจสอบ
- 2) การตอบสนองต่อการจราจรติดขัด
- 3) การจัดการสถานที่ที่มีการจราจรติดขัด
- 4) การเคลียร์ผิวทางจราจร (สำหรับการจัดการอุบัติเหตุการณ์)
- 5) การแจ้งข่าวสู่ผู้ใช้รถใช้ถนน

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การค้นหาและตรวจสอบการจราจร  
ติดขัดเท่านั้น ส่วนที่เหลือจะอยู่นอกเหนือขอบเขตที่งานวิจัยนี้สนใจ

### 2.1.2.2 การวิเคราะห์เพื่อค้นหาและตรวจสอบการจราจรติดขัด [12]

เป้าหมายหลักสำคัญของการจัดการจราจรติดขัดและ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุบัติเหตุการก็คือ การที่สามารถตรวจพบตำแหน่งที่มีการจราจรติดขัดให้ได้โดยเร็วที่สุด เพื่อให้สามารถจัดการได้อย่างทันท่วงที ซึ่งจะให้เห็นดังรูปที่ 2.1.2.2-1



รูปที่ 2.1.2.2-1 การสะสมตัวของรถเมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้น[12]

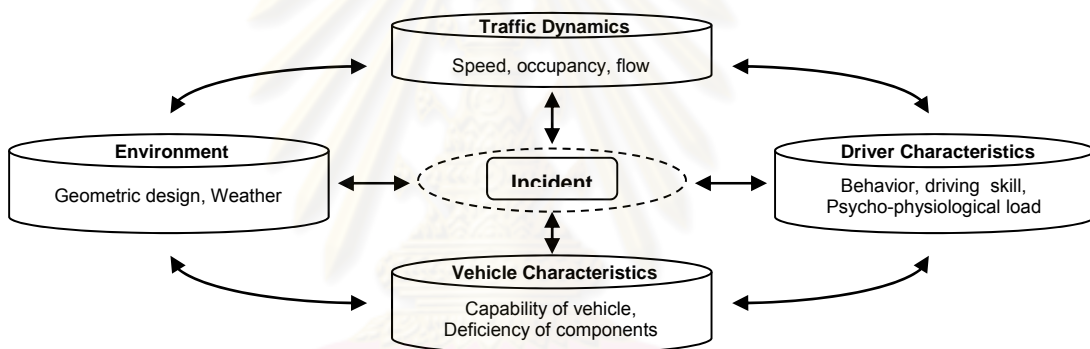
จากรูปที่ 2.1.2.2-1 (ซ้าย) จะเห็นได้ว่าถ้าหากลดระยะเวลาในการค้นหา และระบุตำแหน่งของการจราจรติดขัดได้ 1 หน่วยเวลา จะสามารถทำให้การจราจรเข้าสู่สภาพปกติลดลง 1.5-2 หน่วยเวลาได้ นอกจากนี้หากรับรู้การจราจรติดได้อย่างรวดเร็ว จะสามารถแจ้งผู้ใช้ถนนให้หลีกเลี่ยงเส้นทางไปใช้ทางอื่นทำให้การจราจรคลายตัว ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้นไปอีก ดังเช่นภาพที่ 2.1.2.2-1 (ขวา) หากพบการติดขัดและแจ้งผู้ใช้ถนนได้ทัน ในขณะที่ท้ายแถวยังไม่แยก ทำให้สามารถจัดการเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงถนนเส้นดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จะเห็นได้ว่า หากสามารถลดเวลาในการค้นหาสภาพการจราจรติดขัดได้ จะมีประโยชน์ต่อการจัดการจราจร ในทุกๆ ด้าน แต่ที่สำคัญในกระบวนการนี้คือ การตรวจสอบ (Verification) ว่ามีการเกิดการจราจรติดขัดบริเวณดังกล่าว ซึ่งกระบวนการค้นหาและตรวจสอบดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.2.1 การศึกษาสาเหตุที่นำไปสู่การจราจรติดขัด

สาเหตุปัจจัยหลักในการเกิดการจราจรติดขัด อุบัติการณ์ และหรืออุบัติเหตุบนทางหลวง สามารถแบ่งได้เป็นสี่ประเภทได้แก่ สภาพแวดล้อม สภาพการจราจร ยานพาหนะและผู้ขับขี่ ในรูปภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักสี่ประเภทนี้

- **เงื่อนไขการจราจรในขณะนั้น (Traffic Dynamic)** ได้แก่ ความเร็ว การเคลื่อน และ ปริมาณรถยนต์ที่วิ่งอยู่บนถนนเส้นนั้นๆ ว่าเป็นอย่างไร ถ้ามีรถมาก โอกาสที่จะเกิด อุบัติการณ์ก็มีมากเช่นกัน
- **ลักษณะและพฤติกรรมผู้ขับ (Driver Characteristic)** ว่ามีความพร้อม สติสัมปชัญญะ ทักษะ ความชำนาญ ในการควบคุมยานพาหนะได้ดีเพียงไร
- **ลักษณะของยานพาหนะ (Vehicle Characteristics)** มีความพร้อมในการนำมาใช้งาน มากน้อยเพียงไร การจราจรที่มีรถเก่ามาวิ่งจำนวนมากจะส่งผลให้โอกาสเกิด อุบัติการณ์ก็มีมากขึ้นตามลำดับ
- **สภาพแวดล้อม/ทัศนวิสัย (Environment)** เช่น สภาพบรรยากาศที่มีฝนตก มักจะมี อุบัติการณ์เกิดขึ้น การออกแบบ โครงสร้างผิวทางที่ต้องปลอดภัยจะช่วยลดการเกิด อุบัติการณ์ขึ้นได้



รูปที่ 2.2.1-1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่จะทำให้เกิดอุบัติเหตุ [4]

2.1.2.2.2 **ค้นหาตัวแปรชี้วัดแทนการจราจรติดขัด (Congestion Indicator)**

ตัวแปรชี้วัด Precursor คือตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงค่าไปก่อนตัวแปรอื่นๆ ที่สนใจ โดยจะสามารถใช้ตัวแปรนี้เพื่อบ่งบอกหรือทำนายตัวแปรอื่นที่มักจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ Precursor เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเหล่านี้จะสามารถระบุรูปแบบหรือพฤติกรรมกระแสการจราจรได้ ซึ่งงานวิจัยในปัจจุบันที่ศึกษาเรื่องการทำนายอุบัติเหตุที่น่าจะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ [4] ได้มีการประยุกต์ใช้หลักการของ Precursor เพื่อใช้ในการทำนายอย่างกว้างขวาง ที่สำคัญคือการใช้ Precursor ตัวต่างๆ ให้เหมาะกับงานวิจัยมากที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **ปริมาณการจราจร (Traffic Volume)** คือ จำนวนรถที่อยู่ในช่วงถนนที่พิจารณาเป็นตัวแปรที่มีการใช้กันอย่างแพร่จากอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมักใช้ในการหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับความบ่อยครั้งในการเกิดอุบัติเหตุและมีนัยสำคัญทางสถิติค่อนข้างสูง



- 2) การตรวจสอบจากกล้องวงจรปิด CCTV เป็นวิธีที่มีการประสานการจราจรอัจฉริยะ (ITS) โดยมีการนำเทคโนโลยีกล้องวงจรปิดมาช่วยมองหาจราจรที่ติดขัด ซึ่งยังคงมีใช้กันอย่างจำกัดในประเทศ แต่ค่อนข้างแพร่หลายมากในต่างประเทศ และในงานวิจัยนี้ ได้วิธีพิสูจน์ชนิดนี้เช่นเดียวกัน

### 2.1.2.3 การประเมินผลประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

เพื่อเป็นมาตรฐานในการทำงานวิจัยด้านอัลกอริทึมที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาพการจราจร มักจะใช้ค่าชี้วัด 3 ตัวได้แก่

- 1) False Alarm Rate (FAR) เป็นค่าที่ระบุว่ามีการแจ้งว่ามีการจราจรติดขัด แต่จริงๆ แล้วไม่มีการจราจรติดขัด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.1.2.3-1

$$FAR = \frac{\text{Number of Alarms not in Specified Duration}}{\text{Total Number of Alarms}}$$

- 2) Detection Rate (DR) เป็นค่าประเมินที่ค้นพบการติดขัด จากจำนวนการติดขัดจริงทั้งหมดที่มีอยู่ในช่วงเวลาดังกล่าว

$$DR = \frac{\text{Number of Congestion Cases Detected}}{\text{Total Number of Cases}}$$

- 3) Mean Time to Detect (MTTD) เป็นค่าเวลาที่สามารถค้นหาการจราจรติดขัดจากการติดขัดจริง

$$MTTD = \frac{\sum \text{Delay of True Alarms}}{\text{Total Number of True Alarms}}$$

โดยต้องหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Optimal of Values) ที่เพื่อให้ได้ค่าการพบการจราจรติดขัด (DR) ที่สูงที่สุด ค่าการค้นหาผิดพลาด (FAR) ที่ต่ำที่สุด และระยะเวลาในการค้นเจอค่าที่ถูกต้องด้วย

## 2.1.3 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์สถิติ

### 2.1.3.1 การทดสอบสมมติฐาน

ในงานวิจัยทุกงานวิจัยจะมีสมมติฐานของนักวิจัยซึ่งเป็นการเชื่อของนักวิจัยที่คาดว่า จะเป็น เช่น ผมเชื่อว่า การที่ฝนตกจะทำให้รถติด เป็นต้น ซึ่งสมมติฐานที่คาดไว้นี้จะเป็นจริงหรือไม่ก็ได้ การทดสอบสมมติฐานของงานวิจัย เป็นการทดสอบหรือตรวจสอบความเชื่อของ



นักวิจัยว่าเป็นไปตามที่ได้คาดการณ์ไว้หรือไม่ โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ เพื่อมาทดสอบความเชื่อดังกล่าว

ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติจะต้องตั้งสมมติฐานของ 2 ชนิด คู่กันทุกครั้งที่ของการทดสอบ กล่าวคือ

1. สมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์  $H_0$
2. สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์  $H_a$  หรือ  $H_1$

บางครั้ง  $H_0$  อาจเรียกว่าสมมติฐานหลัก และเรียก  $H_1$  ว่าสมมติฐานรอง และทั้งคู่จะต้องตรงข้ามกันเสมอ เช่น หากต้องทราบว่าการจราจรจะติดขัดบนถนนพญาไทบริเวณหน้าจุฬาฯ ช่วงถนนเริ่มตั้งแต่สี่แยกสามย่าน จนถึงสี่แยกสยาม เมื่อฝนตกเป็นเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง จะสามารถเขียนได้ดังนี้

กำหนดให้  $\mu$  = เหตุการณ์ที่ฝนตกบนถนนพญาไทบริเวณหน้าจุฬาฯ

$$H_0 : \mu \leq 2 \text{ ชั่วโมง}$$

$$H_1 : \mu > 2 \text{ ชั่วโมง}$$

### 2.1.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานในงานวิจัย

การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบความเชื่อของผู้วิจัย มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานที่ต้องการเพื่อทดสอบของงานวิจัย โดยกำหนดสมมติฐานว่าง ( $H_0$ ) และสมมติฐานแย้ง  $H_1$  ตามหลักเกณฑ์ทางสถิติ
2. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ (Level of Significance) หรือค่าความผิดพลาดที่ผู้วิจัยจะยอมรับได้
3. กำหนดสถิติที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งต้องเลือก สถิติที่เหมาะสมกับสมมติฐานในข้อแรก ซึ่งมีหลากหลายวิธี แต่จะขอกกล่าวถึงการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

3.1 ทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยประชากร โดยใช้ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง ( $\bar{X}$ ) เป็นสถิติทดสอบเมื่อมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ก. ประชากรมีการแจกแจงแบบปกติ หรือตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ( $n \geq 30$ ) ซึ่งจะเป็นทดสอบที่ง่ายที่สุด และเพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติจะปรับ  $\bar{X}$  เป็นสถิติทดสอบ Z (Z-score)
- ข. ประชากรมีการแจกแจงแบบปกติ ตัวอย่างมีขนาดเล็ก ( $n < 30$ ) และไม่ทราบค่า  $\sigma^2$  จะปรับ เป็นสถิติทดสอบ t (Student's t-test)

3.2 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร ( $\mu_1 - \mu_2$ ) เป็นการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของลักษณะที่สนใจของทั้ง 2 ประชากรว่าแตกต่างกันหรือไม่

4. คำนวณค่าทางสถิติที่ได้เลือกไว้
5. คำนวณค่าวิกฤต (Critical value) หรือเขตปฏิเสธสมมติฐาน เพื่อการสรุปผลการทดสอบ ซึ่งค่าวิกฤตเป็นค่าแบ่งเขตในการที่จะสรุปว่าสิ่งที่ผู้วิจัยคาดเป็นจริงหรือไม่
6. สรุปผลการทดสอบ โดยนำค่าสถิติที่คำนวณได้มาเทียบกับค่าวิกฤต

### 2.1.3.3 หลักเกณฑ์ในการตั้งสมมติฐาน

การพิจารณาว่าควรจะนำความเชื่อหรือสิ่งที่คาดไว้ใส่ในสมมติฐานว่าง  $H_0$  หรือสมมติฐานแย้ง ( $H_1$ ) นั้น มีเกณฑ์ในการพิจารณาโดยสรุปดังนี้

- ถ้าสิ่งที่คาดไว้มีเครื่องหมายเท่ากับ อยู่ด้วยให้ใส่ไว้ใน  $H_0$  และสมมติฐาน  $H_1$  จะอยู่ในทิศตรงกันข้ามกับทิศ  $H_0$  เสมอ
- ถ้าสิ่งที่คาดไว้ไม่มีเครื่องหมายเท่ากับ นั่นคือมีเครื่องหมายมากกว่า น้อยกว่า หรือไม่เท่ากับ อยู่ด้วยให้ใส่ไว้ใน  $H_1$  และสมมติฐาน  $H_1$  จะอยู่ในทิศตรงกันข้ามกับทิศ  $H_0$  เสมอ

เหตุผลที่นำสิ่งที่คาดไว้ใน  $H_0$  เมื่อสิ่งที่คาดไว้มีเครื่องหมายเท่ากับอยู่ด้วย เนื่องจากจะมีการนำค่าที่มีเครื่องหมายเท่ากับนั้นไปคำนวณหาค่าสถิติทดสอบ เพื่อสรุปว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธ  $H_0$

### 2.1.3.4 การกำหนดนัยสำคัญหรือระดับความผิดพลาดในการทดสอบ

ในการทดสอบสมมติฐานในงานวิจัยนั้น มักจะมีความผิดพลาดแฝงอยู่เสมอ โดยคำว่า “ความผิดพลาด” ในที่นี้ หมายถึงความผิดพลาดเนื่องจากการใช้ข้อมูลตัวอย่างมาสรุปผลการทดสอบสมมติฐานเพื่ออ้างอิงถึงกลุ่มประชากรที่สนใจ มักมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดบุคคล เครื่องมือวัดไม่สามารถวัดค่าข้อมูลที่ต้องการศึกษาได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพียงพอ ข้อมูลขาดหาย ฯลฯ ความผิดพลาดในการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

#### 1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error)

เป็นความผิดพลาดเนื่องจากผู้วิจัยสรุปว่าสมมติฐานหลักไม่เป็นจริง (ปฏิเสธ  $H_0$ ) ทั้งๆ ที่ความจริงนั้น สมมติฐานหลักเป็นจริง

$$\alpha = P(\text{ปฏิเสธ } H_0 / \text{โดยที่ } H_0 \text{ เป็นจริง}) \quad \dots\dots\dots (2.3.4-1)$$

เรียก  $\alpha$  ว่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

#### 2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error)

เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการที่ผู้วิจัยยอมรับว่า  $H_0$  เป็นจริง โดยที่ในความเป็นจริงนั้น จะต้องปฏิเสธ  $H_0$

$$\beta = P(\text{ยอมรับ } H_0 / \text{โดยที่ } H_0 \text{ เป็นเท็จ}) \quad \dots\dots\dots (2.3.4-2)$$

โดยทั่วไปนักวิจัยจะต้องทำให้ความผิดพลาดทั้งคู่ที่น้อยที่สุด แต่เนื่องตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์แบบเป็นปฏิภาคกัน นั่นคือ ถ้าพยายามลด  $\alpha$  จะทำให้  $\beta$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าพยายามจะลดให้ได้ทั้งคู่จะต้องพยายามเพิ่มตัวอย่างให้มากขึ้น หรือเพิ่มความถูกต้องของตัวอย่างให้มากขึ้น ถ้าไม่อาจทำได้ต้องเลือกความสำคัญของตัวแปรใดจะส่งผลกระทบต่องานวิจัยสูงที่สุด ดังตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ต้องการแก้ไขการจราจรติดขัดบริเวณถนนพระราม 1 มีสมมติฐานดังนี้

$H_0$ : การจราจรติดขัดหน้าถนนพระราม 1 ไม่ขึ้นกับศูนย์การค้าสยามพารากอน

$H_1$ : การจราจรติดขัดหน้าถนนพระราม 1 ขึ้นกับศูนย์การค้าสยามพารากอน

- ความผิดพลาดประเภทที่ 1 คือ ผู้วิจัยปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับว่าการจราจรติดขัดหน้าถนนพระราม 1 ขึ้นกับศูนย์การค้าสยามพารากอน จึงปรับปรุงให้ศูนย์การค้าสยามพารากอนจัดการเดินทางเข้าออกไปทางด้านถนนพญาไทแทน แต่จริงๆ แล้วไม่ขึ้นกับศูนย์การค้าสยามพารากอน ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเลือกผิด ก็มีได้ส่งผลเสียต่อการแก้ไขปัญหาการจราจร เมื่อมองแต่มุมมองงานวิจัยแต่เพียงอย่างเดียว
- ความผิดพลาดประเภทที่ 2 คือ ยอมรับสมมติฐานหลัก หรือการจราจรติดขัดหน้าถนนพระราม 1 ไม่ขึ้นกับศูนย์การค้าสยามพารากอน ทั้งๆ ที่ศูนย์การค้าสยามพารากอนมีผลกระทบโดยตรงกับการติดขัด ซึ่งจะส่งผลกระทบทางลบในงานวิจัยอย่างมาก  
ดังนั้นในตัวอย่างงานวิจัยนี้จึงต้องพยายามลดความผิดพลาดประเภทที่ 2 ถึงแม้จะเพิ่มความผิดพลาดประเภทที่ 1 ก็ไม่ส่งผลกระทบต่องานวิจัยขึ้นนี้มากเท่าไร หากมองในมุมมองนักวิจัยเพื่อที่จะแก้ปัญหาแต่เพียงอย่างเดียว แต่ถ้าปัจจัยภายนอกมีผลกระทบมาก เช่น การให้ศูนย์การค้าสยามพารากอน จัดทางเดินรถเสียใหม่ไปทางด้านถนนพญาไท อาจทำให้ถนนพญาไทติดขัดจนส่งผลกระทบอื่นๆ ตามมา ทั้งนี้ต้องประเมินทางเลือกที่ดีที่สุดประกอบการตัดสินใจ

### 2.1.3.5 ประเภทของการทดสอบสมมติฐานและตัวอย่างค่าวิกฤตของแต่ละประเภท

การทดสอบสมมติฐานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การทดสอบสมมติฐานแบบด้านเดียว

การพิจารณาว่า การทดสอบใดเป็นการทดสอบด้านเดียว ถ้าต้องการทดสอบสมมติฐานในกรณีที่  $H_1$  มีการทดสอบเกี่ยวกับค่าจำนวนมากกว่า ( $>$ ) ไม่น้อยกว่า ( $\geq$ ) น้อยกว่า ( $<$ ) หรือไม่มากกว่า ( $\leq$ ) หรือกล่าวโดยสรุปได้ว่าเป็นการทดสอบที่มีเครื่องหมาย “ $>$ ” หรือ “ $<$ ” จะเป็นการทดสอบสมมติฐานทางเดียว เช่น

ผู้วิจัยคาดว่าเวลาที่ถ้าฝนตกเกิน 1 ชั่วโมงจะเกิดการจราจรติดขัด

$H_0$  : เวลาที่เกิดการจราจรติดขัดเมื่อฝนตก  $\geq 1$  ชั่วโมง

$H_1$  : เวลาที่เกิดการจราจรติดขัดเมื่อฝนตก  $< 1$  ชั่วโมง

- การทดสอบสมมติฐานแบบ 2 ด้าน

การทดสอบสมมติฐานหรือความเชื่อที่ต้องการว่า “เท่ากับ” หรือ “ไม่เท่ากับ” ค่าคงที่ หรือความเชื่ออื่นค่าหนึ่ง ซึ่งจะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้ โดยในการทดสอบจะให้  $H_1$  มีเครื่องหมายไม่เท่ากับอยู่เสมอ หรืออาจกล่าวโดยง่ายได้ว่าเป็นการทดสอบสมมติฐาน ในกรณีที่  $H_1$  มีเครื่องหมาย “ $\neq$ ” จะถือเป็นการทดสอบ 2 ด้าน เช่น

ผู้วิจัยคาดว่าเวลาที่เกิดการจราจรติดขัดมากที่สุด คือ 17.30 น.

$H_0$  เวลาที่เกิดการจราจรติดขัดมากที่สุด = 17.30

$H_1$  เวลาที่เกิดการจราจรติดขัดมากที่สุด  $\neq 17.30$

หรือ ผู้วิจัยคาดว่าความเร็วเฉลี่ยของถนนเส้นพญาไทในตอนกลางวัน (6.00 น. - 18.00 น.) ไม่เท่ากับตอนกลางคืน (18.00 น. - 6.00 น.)

$H_0$  ความเร็วเฉลี่ยในตอนกลางวัน = ตอนกลางคืน

$H_1$  ความเร็วเฉลี่ยในตอนกลางวัน  $\neq$  ตอนกลางคืน

การทดสอบสมมติฐานในลักษณะนี้จะเหมือนกับการทดสอบสมมติฐานด้านเดียว เพียงแต่เป็นต้องทดสอบทั้งแบบของการทดสอบสมมติฐานด้านเดียว

### 2.1.3.6 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากร ( $\mu$ )

#### 2.1.3.6.1. ประชากรมีการแจกแจงปกติ และทราบค่าความแปรปรวนของประชากร

ถ้าลักษณะของประชากรที่สนใจมีการแจกแจงแบบปกติ และทราบค่า  $\sigma^2$  จะสามารถจำแนกข้อมูลโดยใช้สถิติทดสอบคะแนน Z (Z-Score) แทนค่าเฉลี่ยได้ โดยที่

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots(2.3.6-1)$$

ซึ่งสามารถสร้างเขตปฏิเสธได้โดยขึ้นอยู่กับว่าเป็นสมมติฐานทางเดียวหรือสองทางซึ่งโดยสรุปดังนี้

#### 2.1.3.6.2. ประชากรมีการแจกแจงแบบใดๆ และขนาดตัวอย่างมีขนาดใหญ่

เมื่อประชากรมีการแจกแจงแบบใดๆ ก็ตาม กล่าวคือ อาจจะมีการแจกแจงปกติหรือไม่ก็ได้ และขนาดกลุ่มตัวอย่างมีขนาดใหญ่ไม่น้อยกว่า 30 ( $n \geq 30$ ) จากทฤษฎีลิมิตเข้าสู่ส่วนกลางสามารถสรุปได้ว่า  $\bar{X}$  จะมีการแจกแจง

โดยประมาณแบบปกติ ดังนั้นจึงสามารถใช้สถิติทดสอบคะแนน  $Z$  ได้ และเขตการปฏิเสธของทั้ง 2 กรณีจะเหมือนกับตารางที่ 2.3.6-1

#### ก. เมื่อทราบความแปรปรวนของประชากร

ในกรณีที่ทราบความแปรปรวนของประชากร ( $\sigma^2$ ) จะสามารถใช้สถิติทดสอบ  $Z$  ได้ทันที ตามสมการ 2.3.6-1

#### ข. เมื่อไม่ทราบความแปรปรวนของประชากร

ในกรณีที่ไม่ทราบความแปรปรวนของประชากร ( $\sigma^2$ ) ซึ่งมักเป็นกรณีทั่วไปและพบเห็นได้บ่อย จะต้องทำการประมาณค่าความแปรปรวนของประชากรด้วยค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง  $S^2$  แล้วจึงจะสามารถใช้สถิติทดสอบ  $Z$  ได้ ทำให้สมการ 2.3.6-1 กลายเป็น

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \quad \dots\dots(2.3.6-2)$$

#### 2.1.3.6.3. ประชากรมีการแจกแจงปกติ และไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร และตัวอย่างมีขนาดเล็ก

ในกรณีที่ทราบว่าประชากรที่สนใจมีการแจกแจงปกติ แต่ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร ( $\sigma^2$ ) และตัวอย่างมีขนาดน้อยกว่า 30 ( $n < 30$ ) จึงต้องประมาณค่าความแปรปรวนของประชากรด้วยค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง ( $S^2$ ) ซึ่งส่งผลให้ตัวสถิติตามสมการ 2.3.6-2 คือ  $\frac{\bar{x} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$  เมื่อ  $n < 30$  จะเปลี่ยนจากการแจกแจงแบบ  $Z$  เป็นแบบ  $t$  ที่องศาอิสระ  $n-1$  ดังนั้น ทำให้ได้สถิติทดสอบ.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \quad \dots\dots(2.3.6-3)$$

ซึ่งจะสามารถสร้างเขตปฏิเสธได้โดยขึ้นอยู่กับว่าเป็นสมมติฐานทางเดียวหรือสองทางซึ่งโดยสรุปดังนี้

#### 2.1.3.7 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร ( $\mu_1 - \mu_2$ )

เป็นการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของลักษณะที่สนใจของ 2 ประชากรว่าแตกต่างกันหรือไม่ โดยใช้ตัวอย่าง 2 ชุด สุ่มจากประชากรทั้ง 2 อย่างเป็นอิสระกัน

กำหนดให้  $n_1$  : เป็นขนาดตัวอย่างที่สุ่มจากประชากรที่ 1

$n_2$  : เป็นขนาดตัวอย่างที่สุ่มจากประชากรที่ 2

$\bar{X}_1$  : เป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่สุ่มจากประชากรที่ 1

$\bar{X}_2$  : เป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่สุ่มจากประชากรที่ 2

$S_1^2$  : ค่าความแปรปรวนที่สุ่มจากประชากรที่ 1

$S_2^2$  : ค่าความแปรปรวนที่สุ่มจากประชากรที่ 2

$\mu_1$  : เป็นค่าเฉลี่ยของประชากรที่ 1

$\mu_2$  : เป็นค่าเฉลี่ยของประชากรที่ 2

$\sigma_1$  : เป็นค่าความแปรปรวนของประชากรที่ 1

$\sigma_2$  : เป็นค่าความแปรปรวนของประชากรที่ 2

โดย  $n_1$  และ  $n_2$  จะมีขนาดเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ตัวอย่างการทดสอบสมมติฐานในลักษณะนี้ได้แก่ ต้องการเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของถนนพญาไทกับถนนอังรีดูนังต์เท่ากันหรือไม่ หรือในบางกรณี อาจต้องการทราบว่าค่าเฉลี่ยของประชากรหนึ่งมากกว่าอีกประชากรหนึ่งอย่างน้อย  $d_0$  หน่วย เช่น ต้องการเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของถนนพญาไทว่าน้อยกว่าถนนอังรีดูนังต์อยู่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ในการทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 ประชากร พิจารณาได้ตามประเภทของสมมติฐาน กล่าวคือ การทดสอบสมมติฐานข้างเดียว หรือการทดสอบสมมติฐาน 2 ข้าง

#### - การทดสอบแบบข้างเดียว

แบบที่ 1  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 > d_0$

แบบที่ 2  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < d_0$

โดยที่  $d_0$  เป็นค่าคงที่อาจจะมีความเป็นบวก ลบ หรือศูนย์ก็ได้ ซึ่งถ้า  $d_0 = 0$  จะทำให้แบบที่ 1 และแบบที่ 2 กลายเป็น

แบบที่ 1  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$  หรือ  $\mu_1 = \mu_2$

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 > 0$  หรือ  $\mu_1 > \mu_2$

แบบที่ 2  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$  หรือ  $\mu_1 = \mu_2$

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < 0$  หรือ  $\mu_1 < \mu_2$

#### - การทดสอบแบบสองข้าง

$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$  หรือ  $\mu_1 = \mu_2$  เมื่อ  $d_0 = 0$

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq d_0$  หรือ  $\mu_1 \neq \mu_2$  เมื่อ  $d_0 = 0$

### 2.1.3.7.1. ประชากรมีการแจกแจงปกติ และทราบค่าความแปรปรวนของประชากร

หากทราบว่าประชากรทั้งสองกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ และทราบค่าความแปรปรวนของประชากรทั้งสองแล้ว จะสามารถเปลี่ยนสถิติทดสอบ  $\bar{X}$  ให้เป็นค่าสถิติทดสอบ  $Z$  ตามสมการ 2.3.5-1 จะได้ว่า

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \mu_{\bar{x}_1, \bar{x}_2}}{(\sigma / \sqrt{n})_{\bar{x}_1, \bar{x}_2}} \quad \dots\dots\dots(2.3.7-1)$$

เนื่องจากประชากรทั้งสองกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ และการสุ่มตัวอย่างจากประชากรทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น

$$\mu_{\bar{x}_1, \bar{x}_2} = \mu_1 - \mu_2 \quad \dots\dots\dots(2.3.7-2)$$

$$\sigma_{\bar{x}_1, \bar{x}_2}^2 = \sigma_1^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2 \quad \dots\dots\dots(2.3.7-3)$$

และภายใต้สมมติฐาน  $H_0$  :  $\mu_1 - \mu_2 = d_0$  ดังนั้นจะได้สถิติทดสอบ

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{\sqrt{\sigma_1^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2}} \quad \dots\dots\dots (2.3.7-4)$$

### 2.1.3.7.2. ประชากรทั้งสองกลุ่มมีการแจกแจงแบบใดๆ และขนาดตัวอย่างมีขนาดใหญ่

กรณีที่ประชากรทั้งสองมีการแจกแจงแบบใด ๆ เช่น ประชากรที่หนึ่งอาจมีการแจกแจงแบบปกติ แต่ประชากรที่สองมีการแจกแจงแบบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่แบบปกติ การสุ่มตัวอย่างจากแต่ละประชากรเป็นอิสระกัน โดยที่  $n_1 \geq 30$  และ  $n_2 \geq 30$  แล้ว จากทฤษฎีลิมิตสู่ส่วนกลางจะได้  $\bar{x}_1$  และ  $\bar{x}_2$  ต่างก็มีการแจกแจงโดยประมาณแบบปกติ ซึ่งทำให้  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$  มีการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย  $\mu_1 - \mu_2$  และค่าแปรปรวน  $\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$  ดังนั้นสถิติทดสอบคือ  $Z$  โดยแยกเป็น 2 กรณีดังนี้

#### ก. ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร ( $\sigma_1^2$ และ $\sigma_2^2$ )

เมื่อทราบค่าแปรปรวน  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  จะใช้สถิติทดสอบ  $Z$  ดังสมการ 2.3.7-4

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{\sqrt{\sigma_1^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2}} \quad \dots\dots\dots(2.3.7-5)$$

ส่วนเขตปฏิเสธจะเหมือนกับตารางที่ 2.3.7-1 ขึ้นอยู่กับว่าเป็นการทดสอบแบบข้างเดียวหรือสองข้างเช่นเคย

ข. ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร

เมื่อไม่ทราบค่าแปรปรวน  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  จะประมาณ  $\sigma_1^2$  ด้วย  $S_1^2$  และประมาณ  $\sigma_2^2$  ด้วย  $S_2^2$  ทำให้สถิติทดสอบ  $Z$  จากสมการ 2.3.7-5 กลายเป็น

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} \quad \dots\dots\dots(2.3.7-6)$$

ส่วนเขตปฏิเสธจะเหมือนกับตารางที่ 2.3.7-1 ขึ้นอยู่กับว่าเป็นการทดสอบแบบข้างเดียวหรือสองข้างเช่นเคย

2.1.3.7.3. ประชากรทั้งสองมีการแจกแจงปกติ และไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร และตัวอย่างมีขนาดเล็ก

ถ้าประชากรทั้งสอง มีการแจกแจงแบบปกติหรือใกล้เคียงแบบปกติ แต่  $n_1 < 30$  หรือ  $n_2 < 30$  และไม่ทราบค่าความแปรปรวน  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

ก. ไม่ทราบค่าความแปรปรวน  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  ทราบเพียงแต่ว่า  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวน  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  มีค่าเท่าใด แต่ทราบว่ามีความเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ( $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ) นั่นคือ  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_p^2$  จึงประมาณ  $\sigma_p^2$  ด้วย  $s_p^2$  โดยที่

$$\begin{aligned} s_p^2 &= \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2} \\ &= \frac{\sum(x_{1i} - \bar{x}_1)^2 + \sum(x_{2i} - \bar{x}_2)^2}{n_1+n_2-2} \quad \dots\dots\dots(2.3.7-7) \end{aligned}$$

จะทำให้ค่า  $\frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$  จะมีการแจกแจงแบบ  $t$  ที่องศาอิสระ

$n_1 + n_2 - 2$  และเนื่องจาก สมมติฐาน  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$

จะได้ตัวสถิติทดสอบ คือ

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad \dots\dots\dots(2.3.7-8)$$

ข. ไม่ทราบค่าความแปรปรวน  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  แต่ทราบว่า  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

เมื่อไม่ทราบว่า  $\sigma_1^2$  และ  $\sigma_2^2$  มีค่าเท่าใด ทราบเพียงแต่ว่าไม่เท่ากัน ( $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ ) จึงต้องประมาณค่า  $\sigma_1^2$  ด้วย  $s_1^2$  และประมาณ  $\sigma_2^2$  ด้วย  $s_2^2$



จะทำให้ค่า  $\frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}}$  จะมีการแจกแจงแบบที่ ที่องศาอิสระ  $v$

โดยที่ ค่า  $v$  คำนวณจาก

$$v = \frac{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{(n_1-1)} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{(n_2-1)}} \quad \dots\dots\dots(2.3.7-9)$$

ดังนั้นตัวสถิติทดสอบ คือ

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} \quad \text{ที่องศาอิสระ } v$$

.....(2.3.7-10)

### 2.1.3.8 ความรู้พื้นฐานของอนุกรมเวลา (Time Series)

ข้อมูลอนุกรมเวลา (Time Series Data) คือ ข้อมูลที่เกิดขึ้นในเวลาที่มีระยะห่างเท่าๆ กัน และต่อเนื่องกัน ดังนั้น ข้อมูลอนุกรมเวลาจึงเป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยหน่วยของเวลา อาจจะเป็น วินาที นาที ชั่วโมง วัน หรือปี แล้วแต่ลักษณะของข้อมูล

การวิเคราะห์อนุกรมเวลา คือ การศึกษาหารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และนำรูปแบบนั้นมาวิเคราะห์เพื่อพยากรณ์ค่าของตัวแปรนั้นในอนาคต

การพยากรณ์อนุกรมเวลา คือ การพยายามทำนายค่าของตัวแปรต่อไปในอนาคตเป็นช่วงเวลายาวออกไปตามที่ต้องการ โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์อนุกรมเวลา ซึ่งมีอยู่มากมายหลากหลายเทคนิค แต่ผู้วิจัยจะขอกล่าวถึงเทคนิค ขอบเขตบน ขอบเขตล่างที่นำมาใช้กับงานวิจัยนี้

#### ส่วนประกอบของอนุกรมเวลา

1. ค่าแนวโน้ม (Long Term Trend : T) ค่าแนวโน้มเป็นการแสดงถึงการเคลื่อนไหวหรือเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในระยะยาว เช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย หรือ ปริมาณการนำเข้าน้ำมันดิบ เป็นต้น
2. ค่าการผันแปรตามฤดูกาล (Seasonal Variation : S) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันในรอบ 1 ปี จนกลายเป็นแบบแผนเดียวกัน เช่น ผลผลิตข้าวจะสูงในช่วงไตรมาสแรกของปี, ยอดขายของห้างสรรพสินค้าจะสูง

ในช่วงปลายปี, เป็นต้น ในการวิเคราะห์การผันแปรตามฤดูกาลนี้จะวัดออกมาในรูปของดัชนีฤดูกาล(Seasonal Index)

3. ค่าการผันแปรตามวัฏจักร (Cyclical Variation: C) หมายถึงการเคลื่อนไหวที่เป็นไปตามวัฏจักร(เช่นวัฏจักรธุรกิจ) ซึ่งการเคลื่อนไหวตามวัฏจักรนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการผันแปรตามฤดูกาล แต่จะมีระยะเวลาที่ยาวนานกว่า
4. การผันแปรเนื่องจากเหตุการณ์ไม่ปกติ (Irregular Variation: I) การผันแปรชนิดนี้ไม่แน่นอน ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า เช่น ภัยธรรมชาติ, สงคราม, การนัดหยุดงาน, เป็นต้น

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเพื่อค้นหา วิเคราะห์ และระบุสภาพการจราจรติดขัด เป็นงานวิจัยที่สาขาวิศวกรรมขนส่งอัจฉริยะได้ให้ความสนใจอย่างมาก และมีได้มีการศึกษามาอย่างยาวนานนับสิบปี ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทหลัก

### 2.2.1 การศึกษาเพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัด (Congestion Detection)

การศึกษาทางด้านนี้จะสนใจหาตำแหน่งทั้งทางเวลาและสถานที่ ที่ทำให้เกิดการจราจรติดขัด โดยในปัจจุบันงานศึกษาวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การค้นหาอุบัติเหตุหรือ Incident Detection ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการจราจรติดขัดแบบไม่มีรูปแบบ (Non-Recurrent) ส่วนการค้นหาสภาพการจราจรติดขัดแบบมีรูปแบบก็ได้รับความสนใจลดน้อยลงไป แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาเพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัด เป็นพื้นฐานความรู้สำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายการจราจรติดขัดล่วงหน้าระยะสั้น

#### 2.2.1.1 การวิเคราะห์ออกแบบทางโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Approach Method)

งานวิจัยนี้ได้รับความนิยมอย่างสูงในช่วงเริ่มต้นการศึกษา (ประมาณปี 1960-1990) เพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัดและอุบัติเหตุ [13,21] เนื่องจากข้อจำกัดทางซึ่งการได้มาของข้อมูลดิบในการศึกษาจะใช้ข้อมูลเก่าย้อนหลังเป็นรายสัปดาห์ รายเดือน หรือรายปี และคู่มือตำแหน่งของถนน และช่วงเวลาที่มีการจราจรติดขัด และ/หรือ อุบัติเหตุ จากนั้นนำข้อมูลมาทำสถิติวิเคราะห์ถึงสาเหตุ และดำเนินการแก้ไข โดยจะเน้นทางต่อขยายโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ทางด่วน ขยายผิวทางจราจรเพื่อรองรับปริมาณรถที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับการติดขัดแบบมีรูปแบบ (recurrent) หรือแก้ไขด้านการออกแบบความปลอดภัยเพื่อลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุหรืออุบัติเหตุ (non-recurrent) ให้ได้มากที่สุด แต่เนื่องจากปริมาณข้อมูลมีจำนวนมาก และยังไม่มียุคเทคโนโลยีรองรับงานวิจัย ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูล และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปปฏิบัติเป็นไปอย่างล่าช้า และต้องการค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวแม้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์หาสภาพการจราจรติดขัด แต่วิธีการดังกล่าวค่อนข้างจะเก่า และไม่เหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้กับกรุงเทพมหานคร เนื่องจากเป็นไปได้ยากที่จะมีการสร้างถนนเพิ่มหรือขยายผิวช่องทางจราจร ผู้วิจัยจึงไม่ขอกล่าวถึงในงานวิจัยนี้

### 2.2.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณการจราจร (Traffic Flow Analysis)

การวิเคราะห์ปริมาณการจราจร จะมีการศึกษาข้อมูลของสภาพการจราจรย้อน เช่นเดียวกับประเภทแรก แต่เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่ทำให้สามารถเข้าถึงและวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเครื่องมือหรืออุปกรณ์อัตโนมัติที่มีการพัฒนาขึ้น เพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นต่อการศึกษาวิจัย เช่น Loop-Detector, Vehicle Sensor ฯลฯ ทำให้ข้อมูลดิบที่ได้จะมีความคงตัวสูง (High Consistency) ไม่มีปัจจัยในเรื่องความผิดพลาดในตัวบุคคลอีกต่อไป การประยุกต์ใช้งานสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานประมวลผลข้อมูลแบบ Real-time ซึ่งงานวิจัยประเภทนี้ กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงในช่วงสิบปีที่ผ่านมา และมีแนวทางการวิจัยที่หลากหลาย แต่จะกล่าวถึงเพียงส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ นั่นคือ การประมวลผลเพื่อหาสภาพการจราจรติดขัด โดยใช้อัลกอริทึมทางคอมพิวเตอร์

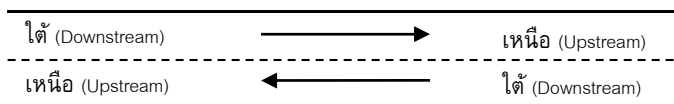
### 2.2.1.3 อัลกอริทึมเพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัด (Detection Algorithm) [14,15]

เนื่องจากการความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและศาสตร์ทางคอมพิวเตอร์ งานทางด้าน การจราจรขนส่งจึงได้ประยุกต์ใช้ศาสตร์การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และศาสตร์ทางสถิติ มาใช้ในการค้นหา ระบุ วิเคราะห์ ตลอดจนทำนายอุบัติเหตุการณ์ (Incident) ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.2.1.3.1 อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree Algorithms)

ในช่วงต้นของการศึกษาอุบัติเหตุ อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ เป็นอัลกอริทึมแรกๆ ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา ต้นไม้ตัดสินใจ [17] จัดเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมการเทียบเคียง (Comparative Algorithms) ซึ่งถูกออกแบบเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่วัดได้จากจราจร (เช่น ปริมาณการจราจร – volume, ระยะเวลาการครอบครองถนน – occupancy หรือความเร็ว – speed) กับ ค่าขีดแบ่ง (threshold) ที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยจะส่งค่าแจ้งหรือผลลัพธ์ว่าเกิดอุบัติเหตุขึ้นเมื่อค่าตัวแปรที่ได้รับเข้ามา (Input Parameter) มีค่าเกินค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้ อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจนี้ได้มีการร่วมกันพัฒนาขึ้นมาประมาณกลางทศวรรษ 1970 โดยมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มและกระจายไปอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในการค้นหาอุบัติเหตุและมักถูกเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า California algorithms ซึ่งตั้งอยู่บนหลักการที่ว่า อุบัติเหตุจะเกิดขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตรา

การครอบครองถนน (Occupancy) ด้านเหนือ (Upstream) อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมกันกับ อัตราการครอบครองถนนที่ลดลงทางด้านใต้



รูปที่ 2.2.1.3-1 ทิศทางการจราจร

ด้วยหลักการนี้ยังไม่ได้สะท้อนถึงหลักความเป็นจริงแต่อย่างใด และจะแสดงผลการเกิดอุบัติเหตุได้เฉพาะเหตุการณ์ที่เลยจากช่วงถนนที่กำลังพิจารณาเท่านั้น เช่น หากเกิดอุบัติเหตุตรงการของช่วงถนนที่กำลังพิจารณาแล้ว อัตราการครอบครองถนนทางด้านเหนือจะลดลงในขณะที่ทางด้านใต้จะเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจจึงให้ค่าความถูกต้องแม่นยำน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมประเภทอื่น [14] เนื่องด้วยการสร้างเงื่อนไขหรือกิ่งของต้นไม้ตัดสินใจให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจริงจำนวนมาก ทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้กับสถานที่อื่นๆ (Over-fitting Dataset) ซึ่งจะต้องมีการปรับแต่งค่าตัวแปรต่างๆ จำนวนมาก

### 2.2.1.3.2 อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์

อัลกอริทึมนี้ประยุกต์ใช้ความต่างกันของอัตราการครอบครองช่วงถนน (Occupancy) ระหว่าง 2 อุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งคล้ายกับอัลกอริทึมแคลิฟอร์เนีย แต่ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางสถิติของเบย์ เพื่อคำนวณผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุขึ้นมา ซึ่งต่างจากต้นไม้ตัดสินใจของอัลกอริทึมแคลิฟอร์เนียที่จะให้ผลลัพธ์ออกมาทันที ในปี 2006, Zhang และ Taylor [18] ได้พัฒนาโดยเลือกตัวแปรต่างๆ (Parameter) ที่ขึ้นกับ (Dependent) อุบัติการณ์ และได้ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเทียบเคียงกับช่างานประสาทเทียม แต่ให้ค่าการค้นเจอผิดพลาดที่ต่ำกว่า

### 2.2.1.3.3 อัลกอริทึมข่ายงานประสาทเทียม (Artificial neural network)

อัลกอริทึมข่ายงานประสาทเทียมที่ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านการจราจรขนส่ง คือ การพัฒนาข่ายงานประสาทเทียมหลายชั้น (Multi-Layer feed Forward neural network - MLF) โดยพัฒนาเพื่อปรับปรุงใช้อัลกอริทึมการแพร่กระจายย้อนกลับเพื่อเรียนรู้ค่าเวกเตอร์น้ำหนักสำหรับข่ายงานนี้ และการประยุกต์ใช้การกระจายความน่าจะเป็นในข่ายงานประสาทเทียม ได้แก่ Probability neural network

(PNN) และ constructive probability neural network (CPNN) ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถค้นหาอุบัติการณ์อย่างอัตโนมัติโดยใช้ข้อมูลการจราจรจากทางด่วน และได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำสูงมาก [14] ซึ่งถือเป็นจุดเด่นหลักของอัลกอริทึมชนิดนี้ และจุดเด่นอีกประการคือมีความยืดหยุ่นสูงสามารถย้ายไปใช้งานในถนนเส้นอื่นที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยปรับปรุงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ด้วยความซับซ้อนในการพัฒนาอัลกอริทึมที่ต้องพิจารณาจำนวนของชั้นซ่อน (Hidden Layer) และค่าตัวปรับน้ำหนักที่เหมาะสม โดยการสอนด้วยอัลกอริทึมการแพร่กระจายย้อน (Back propagation training) ให้มีความถูกต้องแม่นยำสูงจะใช้เวลาานพอสมควร ซึ่งเป็นจุดด้อยหลักที่สำคัญของอัลกอริทึมนี้ นอกเหนือจากนั้น ความแม่นยำของอัลกอริทึมจะขึ้นกับข้อมูลตัวอย่างสอนที่มีความถูกต้อง และไม่มีข้อมูลผิดพลาดที่มากเกินไป จึงเหมาะสำหรับถนนที่มีโครงข่ายไม่ซับซ้อนมาก และมีอุปกรณ์ที่ตรวจนับการจราจรที่แม่นยำ เช่น Loop-Detector

#### 2.2.1.3.4 อัลกอริทึม Support Vector Machine

ในปี 2003 Cheu et al. [14] ได้ประยุกต์ใช้ Support Vector Machine (SVM) เพื่อการค้นหาอุบัติการณ์โดยใช้ข้อมูล 2 ส่วน คือ ข้อมูลจากทางด่วน I-880 ที่แคลิฟอร์เนีย และข้อมูลจากการจำลองขึ้นมา และพัฒนาแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลทั้งคู่แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับรายงานประสาทเทียม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า SVM มีความถูกต้องแม่นยำในการจำแนกประเภทอุบัติการณ์ สูงกว่ารายงานประสาทเทียมค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียประการสำคัญ คือ การนำไปพัฒนาใช้งานค่อนข้างยาก โดยเฉพาะฟังก์ชันก่แกน (Kernel function) และค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องอาศัยการทดลองสุ่มค่า จนได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ และเช่นเดียวกับอัลกอริทึมรายงานประสาทเทียม ความแม่นยำของอัลกอริทึมจะขึ้นกับข้อมูลตัวอย่างสอนที่มีความถูกต้อง และไม่มีข้อมูลผิดพลาดที่มากเกินไป เนื่องด้วยความยากดังกล่าวทำให้ ยังไม่มีงานวิจัยใหม่เกิดขึ้นที่ใช้อัลกอริทึม SVM ในการจำแนกอุบัติการณ์

จากอัลกอริทึมทั้ง 4 ประเภทที่ได้รับความนิยมอย่างสูงจะสามารถสรุป จุดเด่นจุดด้อยได้ตามตาราง 2.2.1.3 ต่อไปนี้ [14]

ตารางที่ 2.2.1.3 สรุปประสิทธิภาพอัลกอริทึม [14]

อัลกอริทึม	ข้อดี	ข้อเสีย	ภาพรวม
<b>California Algorithm (Decision Tree)</b>	1. Detection rate ปานกลาง ( $\approx 50\%$ ) 2. ง่ายต่อการนำไปใช้งาน	1. False alarm สูง 2. ยากต่อการ Calibrate 3. ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลข้อมูลมาก	บางครั้งเชื่อถือได้ บางครั้งเชื่อถือไม่ได้
<b>Bayesian</b>	1. Detection rate สูงมาก ( $\approx 80-100\%$ ) 2. ง่ายต่อการนำไปใช้งาน 3. ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลข้อมูลน้อย	1. ต้องการข้อมูลสอนเป็นจำนวนมาก 2. ต้องมีการเซตค่า threshold ที่เหมาะสม	มีความน่าเชื่อถือสูงหากข้อมูลสอนมีมากพอ
<b>Neural network</b>	1. Detection rate สูงมาก ( $\approx 80-100\%$ ) 2. ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลข้อมูลน้อย	1. ต้องการข้อมูลสอนเป็นจำนวนมาก 2. ยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนหากมีการเพิ่มความรู้ ต้องใช้เวลาสอนใหม่เป็นเวลานานมาก	มีความน่าเชื่อถือสูงหากข้อมูลสอนมีมากพอ
<b>Support Vector Machine</b>	1. Detection rate สูงมาก ( $\approx 90-100\%$ )	1. ต้องการข้อมูลสอนเป็นจำนวนมาก 2. ยากในการใช้งานเนื่องจากต้องเซตค่า threshold ที่เหมาะสมจำนวนมาก	มีความน่าเชื่อถือสูงมากหากมีการเซตค่าตัวแปรที่เหมาะสม

### 2.2.2 การศึกษาเพื่อทำนายสภาพการจราจรติดขัด (Congestion Prediction)

แนวทางนี้ส่วนใหญ่จะมีพื้นฐานมาจากการศึกษาเพื่อค้นหาสภาพการจราจรติดขัด โดยมีการประยุกต์ศาสตร์ทางด้านสถิติ เช่น ARIMA(X), Kalman Filter เป็นต้น และศาสตร์ทางด้านการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกระแสการจราจรแบบทันกาล(Real-time) กับเหตุการณ์อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจริง หรือเหตุการณ์ที่คาดว่าจะนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งจะมีการทำนายเหตุการณ์ล่วงหน้าที่จะเกิดขึ้นก่อน 10-15 นาที งานวิจัยในแนวทางนี้ยังคงค่อนข้างใหม่มากและในปัจจุบันยังไม่มีผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยมากนัก งานวิจัยที่เกิดขึ้น จะเจาะจงศึกษาลงไปเฉพาะการทำนายหรือคาดการณ์โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของ

อุบัติเหตุที่เท่านั้น (Accidents are the subset of the Incident) ซึ่งอุบัติเหตุก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสภาพการจราจรที่ขัด ต่อไปผู้วิจัยจะขอล่าวจานวิจัยที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 2 งานวิจัย ได้แก่

**2.2.2.1 Lee et al. (16)** ได้พัฒนา log-linear model โดยใช้ตัวแปร (figure indicator) ชนิดต่างๆ ในการทำนายอุบัติเหตุ ซึ่งผู้วิจัยพบว่า ความแปรปรวนของความเร็วแต่ละเลน และความหนาแน่นของสภาพการจราจร มีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งจะนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ และนอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าความแปรปรวนของความเร็วของการข้ามเลน ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และผู้วิจัยแนะนำให้เลือกใช้ขนาดของหน้าต่างค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (moving average window) ให้มีขนาดเหมาะสมกับตัวแปร (indicator) แต่ละประเภทด้วย

**2.2.2.2 Oh et al.[4]** พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว (Standard Deviation of Speed - SDS) ทุกๆ 5 นาที ก่อนจะเกิดอุบัติเหตุเป็นตัวชี้วัดที่ดีที่สุด ที่จะแบ่งแยกเหตุการณ์ปกติ (normal conditions) กับเหตุการณ์ที่กำลังดำเนินการไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ (disruptive conditions) โดยใช้ข้อมูลของ Loop-Detector ที่ติดตั้งบนทางด่วนสาย I-880 ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ซึ่งผู้วิจัยได้นำส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วมาสร้างความสัมพันธ์ในการเรียนรู้ของเบย์ และพัฒนาฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Functions - PDF) เพื่อที่จะประมาณค่าเงื่อนไขสภาพการจราจรในปัจจุบันว่าเป็นเหตุการณ์ปกติ หรือเหตุการณ์ที่กำลังดำเนินการไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ งานวิจัยนี้ได้สรุปว่าความผันแปรของความเร็วในลดลง จะลดความน่าจะเป็นของการเกิดอุบัติเหตุบนทางด่วนลง

งานวิจัยดังกล่าวถือเป็นต้นแบบที่ดี และประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องแบบเบย์ที่ให้ผลค่อนข้างดีมากในการทดลองแบบปิด [4] ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่างานวิจัยนี้ใช้เพียงแค่ตัวแปรตัวเดียวนั้นคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว ในการวัดค่าของข้อมูลการจราจรเพื่อที่จะทำนายอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมการฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) จะเห็นว่าไม่มีการพัฒนาให้รองรับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณการจราจร กระแสการจราจร เป็นต้น ซึ่งโดยปกติแล้วปัจจัยในการเกิดอุบัติเหตุไม่ได้ขึ้นกับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งแต่เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.2.1-1 จึงมีข้อสังเกตว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ที่จะเลือกตัวแปรเพียงตัวเดียวในการตัดสินใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการจราจรติดขัด จะขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีกมากมาย

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น

#### บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลดิบที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียด โดยแสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งของจุดเก็บข้อมูล เครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูล ตลอดจนการประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นเพื่อกำจัดข้อมูลที่ไม่ต้องการออกไป และจากนั้นจะเข้าสู่การวิเคราะห์เพื่อให้นิยามสำหรับการแบ่งแยกข้อมูล การจรรยาปกติและการจรรยาติคขัด

#### 3.1 ข้อมูลดิบสภาพการจราจรจริง

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลสี่ชุด ได้แก่ ข้อมูลดิบจากสภาพการจราจรจริง บนถนนคลองหลวงทั้ง 2 ทิศทางการจราจร ข้อมูลที่ได้จากการจำลองสภาพการจราจรโดยโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร AIMSUN ซึ่งได้มีการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ให้เหมือนกับสภาพแวดล้อม และลักษณะทางกายภาพจากถนนคลองหลวง และข้อมูลดิบสภาพการจราจรจริงบนทางด่วน ดาวคะนอง ซึ่งแบ่งเป็นสองกลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ กล้อง EXAT02, EXAT03 และ กลุ่มที่ 2 ได้แก่ EXAT07, EXAT09, EXAT10 ทั้งนี้การแบ่งอ้างอิงจาก ตารางที่ 3 ในภาคผนวก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการติดขัดของกล้องกลุ่มแรก EXAT02, EXAT03 และกลุ่มที่สอง EXAT07, EXAT09, EXAT10 อย่างชัดเจน นั่นคือ ในกรณีของกล้องกลุ่มแรกเป็นข้อมูลก่อนขึ้นสะพานพระรามเก้า การติดขัดจะเริ่มจากกล้อง EXAT03 ซึ่งมีทางร่วมก่อนขึ้นสะพานพระรามเก้า (สามารถดูรูปที่ 3.1.1-1) แล้วการติดขัดจึงเริ่มเข้าสู่กล้องในลำดับต่อมา ซึ่งคือ EXAT02 ส่วนในกรณีกล้องกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลหลังจากลงสะพานพระรามเก้า โดยการติดขัดจะเริ่มจากทางแยกเพื่อออกจากเส้นทางด่วนในกล้อง EXAT 10 แล้วการติดขัดจึงเริ่มเข้าสู่กล้องในลำดับต่อมา ซึ่งคือ EXAT09 และ EXAT07 ตามลำดับ

##### 3.1.1 การเก็บรวบรวมและรายละเอียดของข้อมูล

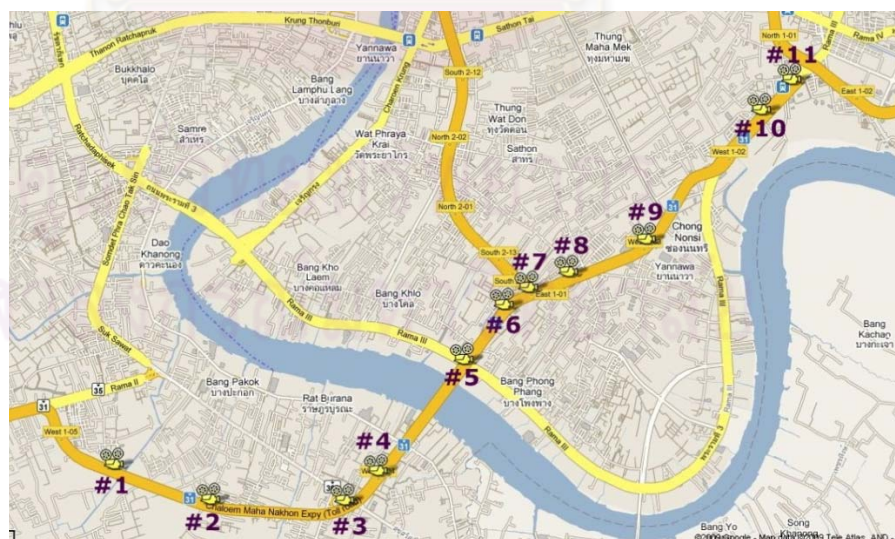
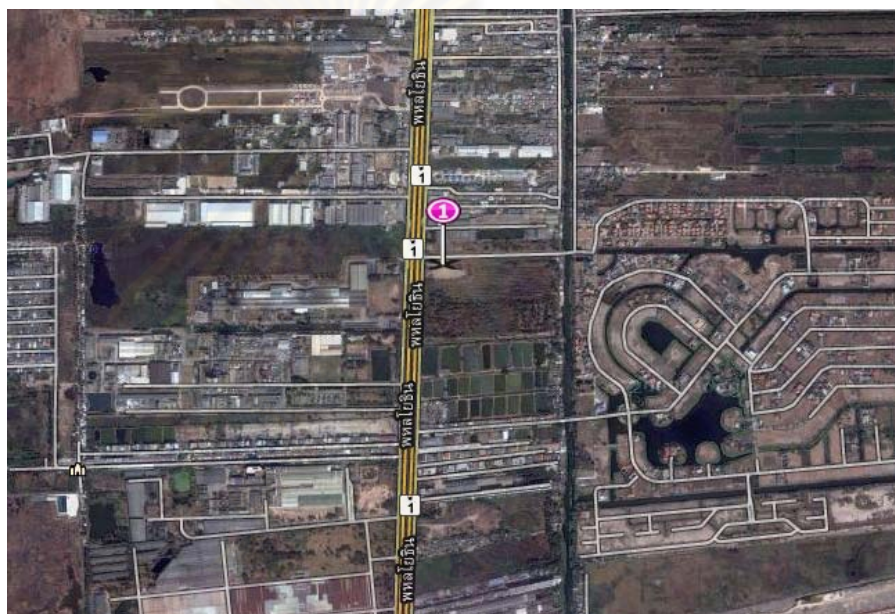
ข้อมูลดิบสภาพการจราจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลในรูปแบบกล้องวงจรปิด (CCTV) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีและอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ซึ่งมีการติดตั้งกล้องวงจรปิดอยู่บนทางด่วน และถนนสายหลักต่างๆ ทั่วกรุงเทพมหานคร สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้กล้องวงจรปิดที่ติดตั้งที่คลองหลวง เนื่องจากตำแหน่งที่ตั้ง (Location) กล้องวงจรปิดอยู่บนทางหลวงระหว่างเมืองทางตรงยาวประมาณ 10 กิโลเมตร (ประมาณ 5 กิโลเมตรก่อนติดตั้งกล้อง และ 5 กิโลเมตรหลังติดตั้งกล้อง) และทางด่วนดาวคะนอง ที่เป็นทางด่วนตรงยาวประมาณ 7 กิโลเมตร ซึ่งเหมาะแก่การ



ศึกษาวิจัยอย่างมากเนื่องจากไม่มีปัจจัยภายนอกอื่นที่อยู่นอกเหนือการศึกษามารบกวน เช่น สัญญาณไฟจราจร ทางร่วม และ/หรือทางแยก เป็นต้น

### 3.1.1.1 ตำแหน่งกล้องวงจรปิด

ถูกติดตั้งอยู่บนยอดเสาของป้ายแสดงราคาน้ำมันของสถานีบริการน้ำมัน ปตท. สาขาคลองหลวง ซึ่งอยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 15 เมตร ริมทางหลวงสายพหลโยธิน บริเวณใกล้เคียงกับมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต รูปที่ 3.1.1-1 และ 3.1.1-2 (ซ้าย) แสดงตำแหน่งที่ตั้งกล้องวงจรปิด และตัวอย่างภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิด



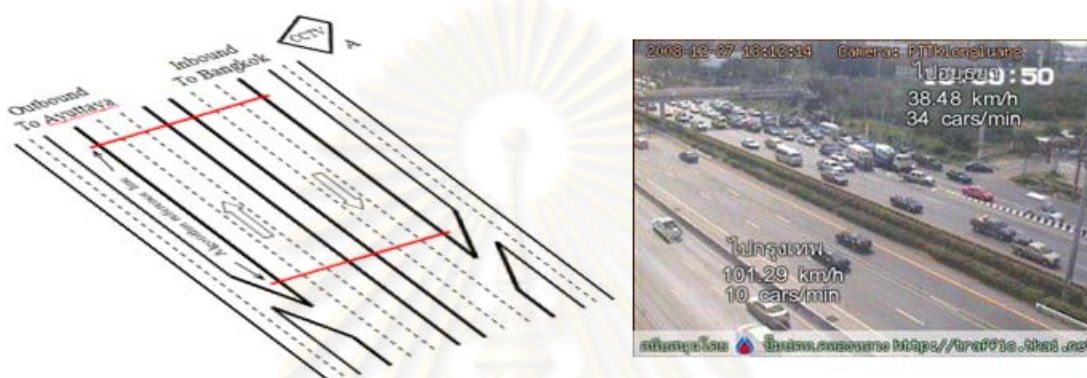
รูปที่ 3.1.1.1-1 ตำแหน่งกล้องวงจรปิดบนถนนคลองหลวง (วงกลม) (บน)

ตำแหน่งกล้องวงจรปิดบนทางด่วนดาวคะนองจำนวน 11 ตัว (ล่าง)

### 3.1.1.2 ลักษณะทางกายภาพของถนนที่ทำการศึกษา

#### ก. ถนนคลองหลวง

เป็นทางหลวงเชื่อมระหว่างเมือง มีทิศทางการสัญจรทิศละ 3 ช่องทางการจราจร ดังรูปที่ 3.1.1-2 ซ้าย โดยตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องวงจรปิดเป็นถนนทางตรงยาวประมาณ 5 กิโลเมตร ไม่มีทางแยกและสัญญาณไฟจราจรที่หยุดการเคลื่อนตัวของการจราจร ที่เป็นจุดที่มีการติดตั้งกล้องพอดี



รูปที่ 3.1.1.2-1 ภาพจากกล้องที่ได้จากถนนคลองหลวง

#### ข. ทางด่วนดาวคะนอง

เป็นทางด่วนที่ขึ้นสะพานพระราม 9 ทางด้านฝั่งชนและลงทางด้านฝั่งพระนคร โดยจะมีกล้องวงจรปิดติดตั้งทุกระยะที่มีทางร่วม ดังรูปที่ 3.1.1-1 ล่าง ซึ่งห่างโดยประมาณกล้องละ 1 กิโลเมตร ไม่มีทางแยกและสัญญาณไฟจราจรที่หยุดการเคลื่อนตัวของการจราจร โดย ณ ช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูลเพื่อใช้งานวิจัยนี้มีกล้องที่ใช้ได้ทั้งสิ้นจำนวน 7 ตัว จาก 11 ตัว ได้แก่ EXAT2, EXAT3, EXAT5, EXAT6, EXAT7, EXAT9, EXAT10

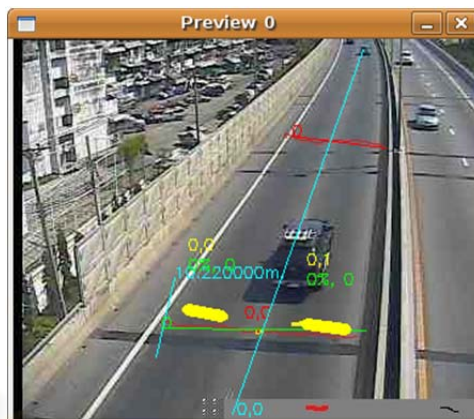
### 3.1.1.3 ลักษณะข้อมูลดิบเบื้องต้น

#### ก. ถนนคลองหลวง

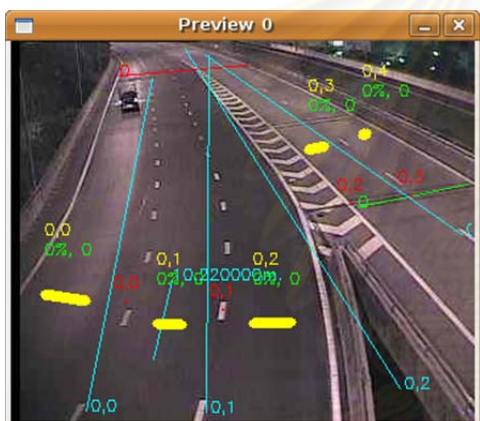
กล้องวงจรปิดที่ได้ทำการศึกษานบนถนนเส้นนี้จะมีการเก็บบันทึกข้อมูลเริ่มตั้งแต่เวลา 6.00 น. ถึง 18.00 น. ของทุกวัน โดยงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 9 สิงหาคม 2551 ถึงวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2552 รวมทั้งสิ้น 6 เดือน โดยในช่วงระหว่างนี้มีวันที่กล้องใช้งานไม่ได้ 2 วันคือ วันที่ 26 มกราคม 2552 และวันที่ 27 มกราคม 2552 และกลับมาใช้งานได้ใหม่ในวันที่ 28 มกราคม 2552 เวลา 10.17 น. ซึ่งมีปริมาณการจราจรดังรูปที่ 3.1.1-4 และ 3.1.1-5



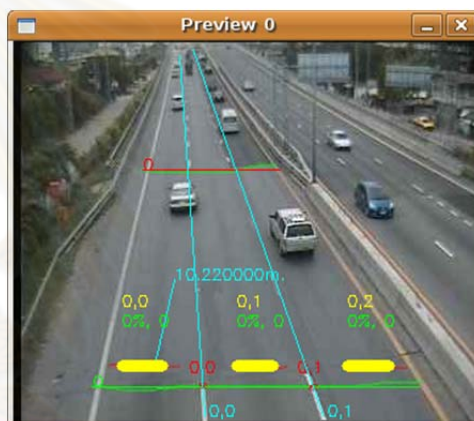
EXAT 01  
(ไม่ทำงานในช่วงเวลาที่ศึกษา)



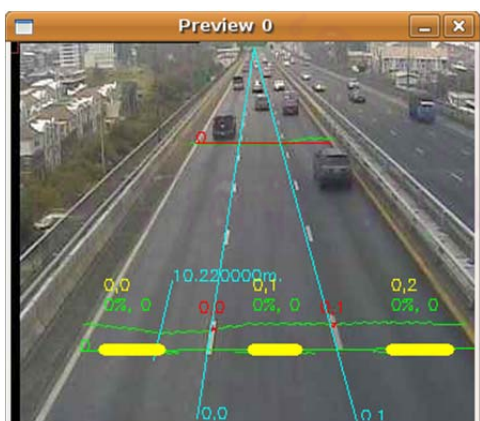
EXAT 02  
(Group-I)



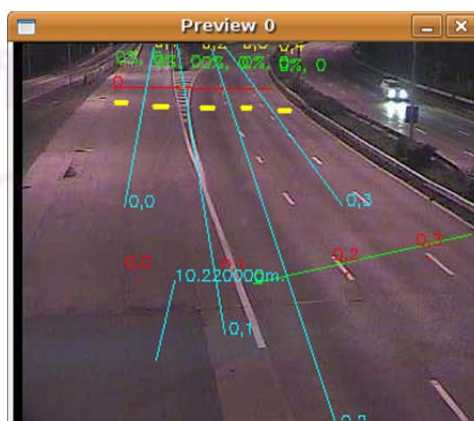
EXAT 03  
(Group-I)



EXAT 04  
(ไม่ทำงานในช่วงเวลาที่ศึกษา)

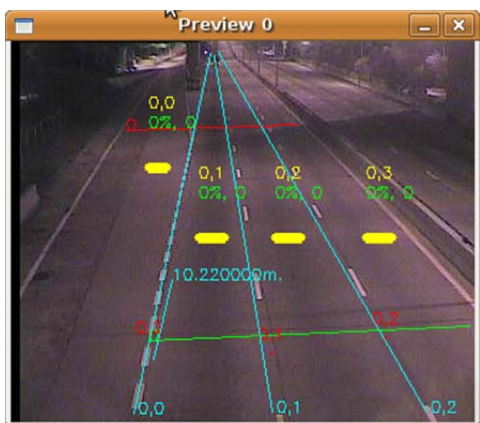


EXAT 05

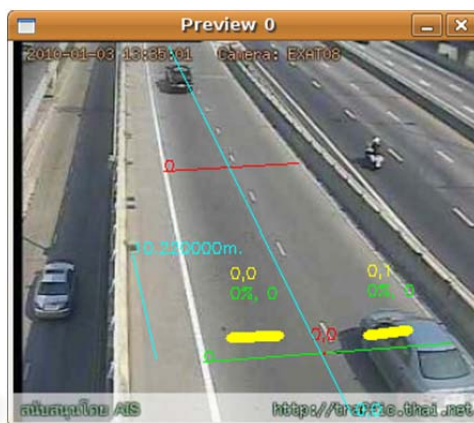


EXAT 06

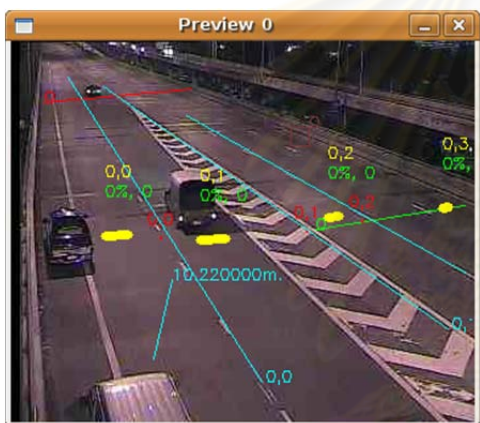
รูปที่ 3.1.1.3-1 ภาพจากกล้องที่ได้จากทางด่วนดาวคะนอง



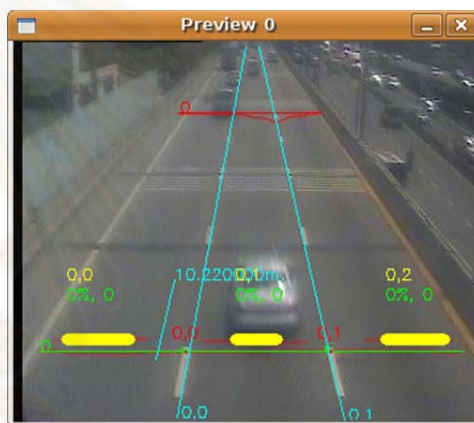
EXAT 07  
(Group-II)



EXAT 08  
(ไม่ทำงานในช่วงเวลาที่ศึกษา)

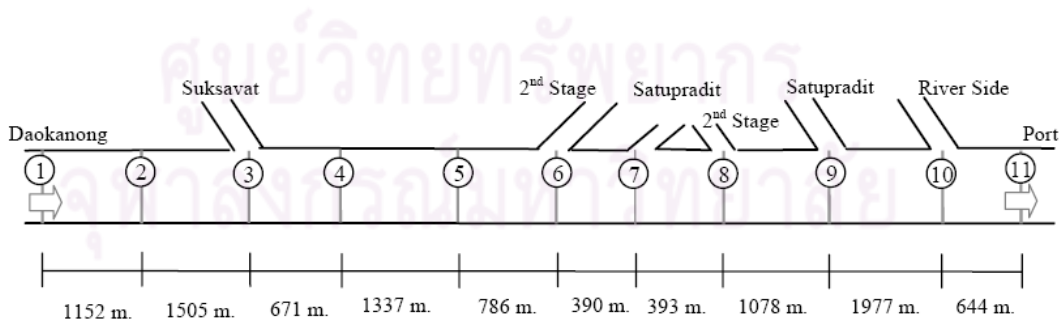


EXAT 09  
(Group-II)



EXAT 10  
(Group-II)

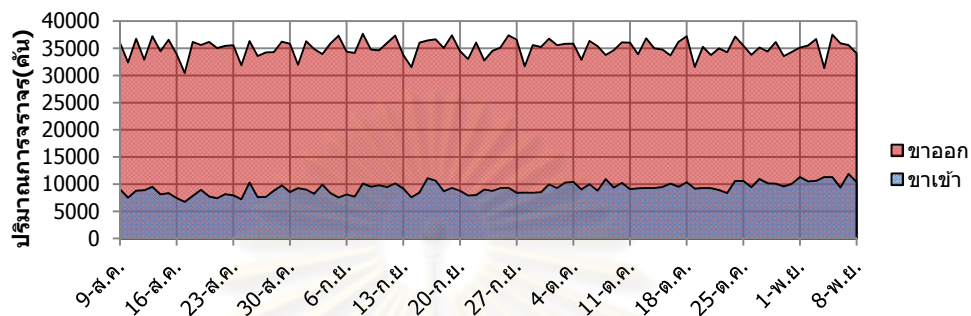
รูปที่ 3.1.1.3-2 ภาพจากกล้องที่ได้จากทางด่วนดาวคะนอง (ต่อ)



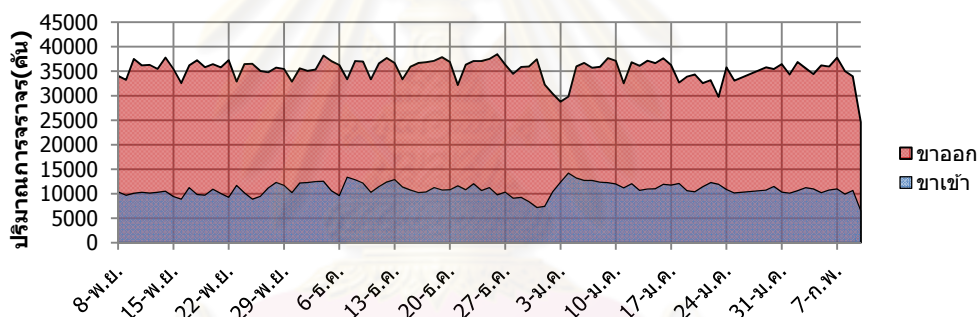
รูปที่ 3.1.1.3-3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องแต่ละตัว

การกระจายตัวของข้อมูลสภาพการจราจรตั้งรูปที่ 3.1.1.3-4 ถึง 3.1.1.3-6 โดยข้อมูลในช่วง เวลาที่งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษา มีค่าเฉลี่ยต่อวันและส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนี้

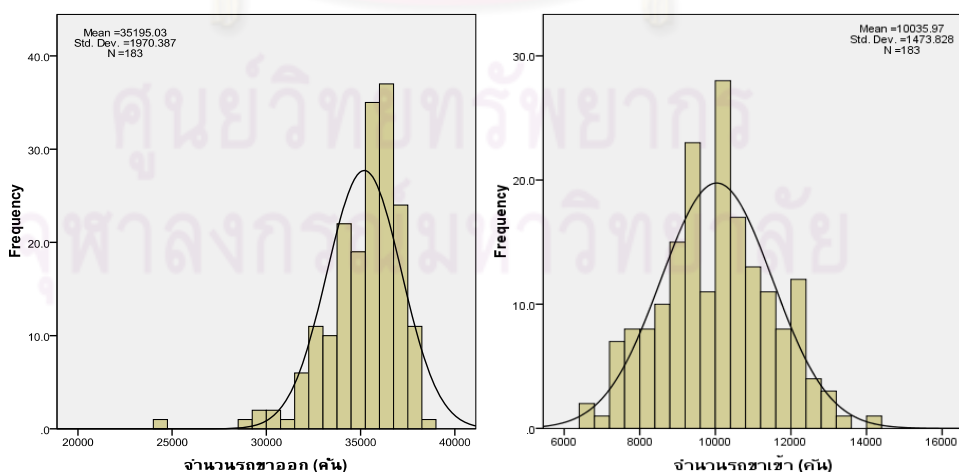
- ค่าเฉลี่ยการจราจรขาออกเท่ากับ 35,195 คันต่อวัน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการจราจรขาออกเท่ากับ 1,970 คัน
- ค่าเฉลี่ยการจราจรขาเข้าเท่ากับ 10,035 คันต่อวัน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการจราจรขาออกเท่ากับ 1,474 คัน



รูปที่ 3.1.1.3-4 ปริมาณการจราจรในแต่ละวัน



รูปที่ 3.1.1.3-5 ปริมาณการจราจรในแต่ละวัน



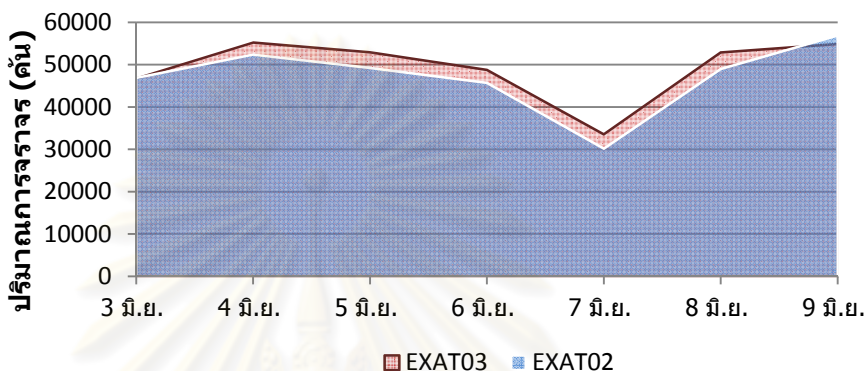
รูปที่ 3.1.1.3-6 แสดงการกระจายตัวของปริมาณการจราจรในแต่ละวัน

ซ้าย : การจราจรขาออกกรุงเทพฯ

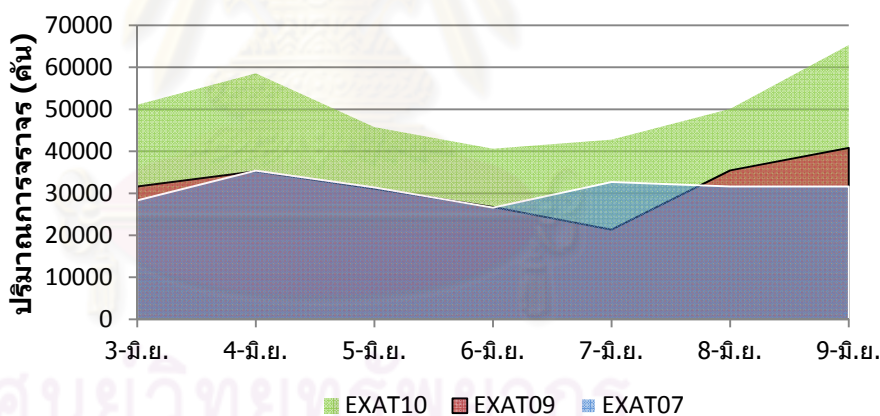
ขวา : การจราจรขาเข้ากรุงเทพฯ

**ข. ทางด่วนดาวคะนอง**

กล้องวงจรปิดทั้ง 7 ตัว ที่ได้ทำการศึกษายานถนนเส้นนี้จะมีการเก็บบันทึกข้อมูลเริ่มตั้งแต่เวลา 0.00 น. ถึง 24.00 น. ของทุกวัน โดยงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 3 มิถุนายน 2553 ถึงวันที่ 9 มิถุนายน 2553 รวมทั้งสิ้น 7 วัน เป็นทางด่วนที่ขึ้นสะพานพระราม 9 ด้านฝั่งธนบุรี



รูปที่ 3.1.1.3-7 ปริมาณการจราจรในแต่ละวันของกล้องกลุ่ม 1



รูปที่ 3.1.1.3-8 ปริมาณการจราจรในแต่ละวันของกล้องกลุ่ม 2

การกระจายตัวของข้อมูลสภาพการจราจรดังรูปที่ 3.1.1.3-7 และรูปที่ 3.1.1.3-8 โดยข้อมูลในช่วง เวลาที่งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษา มีค่าเฉลี่ยต่อวันและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนี้

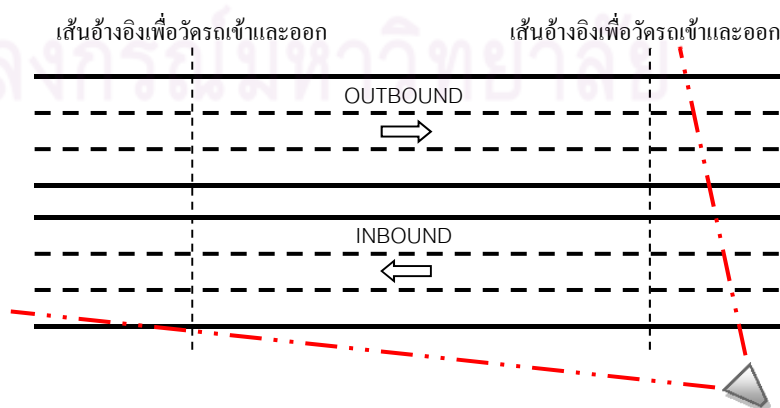
- ค่าเฉลี่ยการจราจรจากกล้อง EXAT 2 เท่ากับ 47,171 คันต่อวัน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกล้อง EXAT 2 เท่ากับ 8,379 คัน
- ค่าเฉลี่ยการจราจรจากกล้อง EXAT 3 เฉพาะช่องทางหลัก [3,4] เท่ากับ 49,281 คันต่อวัน

- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกล้อง EXAT 3 เฉพาะช่องทางหลัก [3,4] เท่ากับ 7,618 คัน
- ค่าเฉลี่ยการจราจรจากกล้อง EXAT 7 เฉพาะช่องทางหลัก [1,2,3] เท่ากับ 31,085 คันต่อวัน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกล้อง EXAT 7 เฉพาะช่องทางหลัก [1,2,3] เท่ากับ 2,876 คัน
- ค่าเฉลี่ยการจราจรจากกล้อง EXAT 9 เฉพาะช่องทางหลัก [2,3] เท่ากับ 31,758 คันต่อวัน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกล้อง EXAT 9 เฉพาะช่องทางหลัก [2,3] เท่ากับ 6,349 คัน
- ค่าเฉลี่ยการจราจรจากกล้อง EXAT 10 เฉพาะช่องทางหลัก [2,3] เท่ากับ 50,610 คันต่อวัน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกล้อง EXAT 10 เฉพาะช่องทางหลัก [2,3] เท่ากับ 8,800 คัน

#### 3.1.1.4 ประเภทข้อมูลจากกล้องวงจรปิด

ข้อมูลจากกล้องวงจรปิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีการประมวลผลและให้ข้อมูลดิบออกมา 2 ประเภท ได้แก่

- **ข้อมูลดิบปฐมภูมิ** ได้มาจากการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing) ด้วยชุดประมวลผลขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่กับกล้องวงจรปิด ทำงานโดยสร้างเส้นอ้างอิงจำลองในภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิด (เส้นประในรูปที่ 3.1.1-6) และบันทึกเวลาที่รถแต่ละคันวิ่งเข้าและออกจากเส้นอ้างอิงในหน่วยระดับเวลาเป็นวินาที พร้อมทั้งความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้จากระยะเวลาที่รถอยู่ในเส้นอ้างอิงนั้น



รูปที่ 3.1.1.3-9 ขอบเขตการทำงานของกล้องวงจรปิด

ตารางที่ 3.1.1.3-1 ตัวอย่างข้อมูลอย่างละเอียด

รถคันที่	ความเร็วเฉลี่ย	เวลาเข้าเส้นอ้างอิง	เวลาออกเส้นอ้างอิง
1	69.52	60001	60005
2	124.08	60003	60005
3	68.63	60003	60007
⋮			
37218	65.03	175954	175956

- ข้อมูลดิบทุกขุมมิ ได้มาจากการนำข้อมูลปฐมภูมิมาประมวลผลให้ความเร็วเฉลี่ย (Average Speed) และปริมาณการจราจร (Flow) พร้อมทั้งเก็บภาพ (Snapshot) สดท้าย ณ ขณะนั้น ทุกๆ 3 นาที ซึ่งให้ภาพการจราจรจริงในขณะนั้นที่เป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากทำให้ผู้วิจัยทราบว่า สภาพการจราจรที่แท้จริงในขณะนั้นเป็นอย่างไร เช่น มีฝนตก เกิดอุบัติเหตุ เป็นต้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวไม่สามารถหาได้จากข้อมูลตัวเลข

ตารางที่ 3.1.1.3-2 ตัวอย่างข้อมูลเฉลี่ยทุก 3 นาที

2009-09-09 10:52:50;1252468783;PTTKlongluang;ToAyuthaya;61.54 km/h;47 cars/min
2009-09-09 10:52:50;1252468783;PTTKlongluang;ToBangkok;106.98 km/h;10 cars/min
2009-09-09 10:55:50;1252468946;PTTKlongluang;ToAyuthaya;113.61 km/h;45 cars/min
2009-09-09 10:55:50;1252468946;PTTKlongluang;ToBangkok;111.87 km/h;9 cars/min

### 3.2 การเข้าถึงและรวบรวมข้อมูลดิบ

ข้อมูลดิบที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ถูกเก็บที่เครื่อง Server ของ NECTEC ที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ซึ่งสามารถเข้าถึงข้อมูลได้โดยตรงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งสามารถขอรหัสเพื่อเข้าสู่ระบบได้จากเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบ โดยข้อมูลดิบแบบทุกขุมมิและรูปภาพที่ถูกบันทึกไว้ทุกๆ 3 นาที สามารถดาวน์โหลดได้โดยตรงจากที่อยู่ดังแสดงด้านล่าง โดยการเข้าไปเลือกในชั้นโพลเดอร์ของกล่องที่ต้องการ ซึ่งไฟล์ข้อมูลการจราจรรวมจะถูกบีบอัดในสกุลของ TAR.GZ และถูกแยกเก็บไว้ในโพลเดอร์ ปี เดือน และวันตามลำดับ ส่วนไฟล์รูปภาพจะถูกบีบอัดในสกุลของ JPEG และแยกเก็บไว้ในโพลเดอร์ ปี เดือน และวันเช่นกัน ส่วนข้อมูลแบบปฐมภูมิสามารถไปขอได้ที่เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบฝ่าย NTL ที่ NECTEC

- ข้อมูลรูปภาพที่ลิงค์ “<http://main.traffic.thai.net/sensorinput/cam/>”
- ข้อมูลทุกขุมมิที่ลิงค์ “<http://main.traffic.thai.net/sensorinput/archive/>”

นอกจากกล่องคลอกลงทำงานวิจัยนี้ใช้แล้ว ยังมีกล่องที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งสามารถเช็คสถานะของกล่องตัวอื่นๆ ทั้งหมดที่ทาง NECTEC มีอยู่ได้ที่ “<http://main.traffic.thai.net/camera/>”



### 3.3 การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น (Data Preprocessing)

การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นเป็นขั้นตอนกรรมวิธีในการจัดเตรียมข้อมูลจากข้อมูลดิบที่ได้จากกล้องวงจรปิดที่จับภาพการจราจร เพื่อใช้ในการประมวลผลต่อไป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.1 เนื่องจากอาจจะเกิดความผิดพลาด และข้อจำกัดของตัวกล้องเก็บข้อมูลเอง เช่น มีคนบินผ่าน แล้วกล้องเข้าใจผิด ทำให้ได้ความเร็วที่สูงเกินความเป็นจริง หรือรถบางคันมีการขับเร็วกว่าปกติมากเช่น 180 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ไม่ต้องการ และจะสร้างความสับสนให้กับการเรียนรู้และการตัดสินใจของอัลกอริทึมอย่างมาก

#### 3.3.1 การจัดเรียงข้อมูล (Data Sorting)

เนื่องจากลักษณะการทำงานของประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิด มีส่วนประกอบหลายส่วน ได้แก่ ประมวลผลภาพ ส่งข้อมูลกลับมายังศูนย์เซิร์ฟเวอร์หลัก และบันทึกข้อมูลลงหน่วยเก็บข้อมูล ซึ่งอาจมีการล่าช้า (Delay) ทำให้ข้อมูลไม่มีการเรียงตามลำดับเวลาเกิดขึ้นได้ และมีปรากฏให้เห็นจริงในชุดข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รับ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดเรียงข้อมูลดิบตามเวลาเข้าสู่การประมวลผลที่แท้จริงขอรถแต่ละคัน ดังตารางที่ 3.3.1-2 จะจัดเรียงข้อมูลทั้งหมดตามคอลัมน์ที่ 3 (เวลาเข้าเส้นอ้างอิงเป็นต้น)

#### 3.3.2 การปรับเรียบข้อมูล (Data Smoothing)

จากผลลัพธ์ที่ดีมากของอัลกอริทึม DELOS [19] ที่ใช้ในการปรับเรียบสำหรับข้อมูลการจราจรเพื่อใช้สำหรับอัลกอริทึมการค้นหาค่าผิดปกติ (Incident Detection Algorithm) งานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเทคนิคการปรับเรียบแบบค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (Moving Average) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

##### ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential Moving Average)

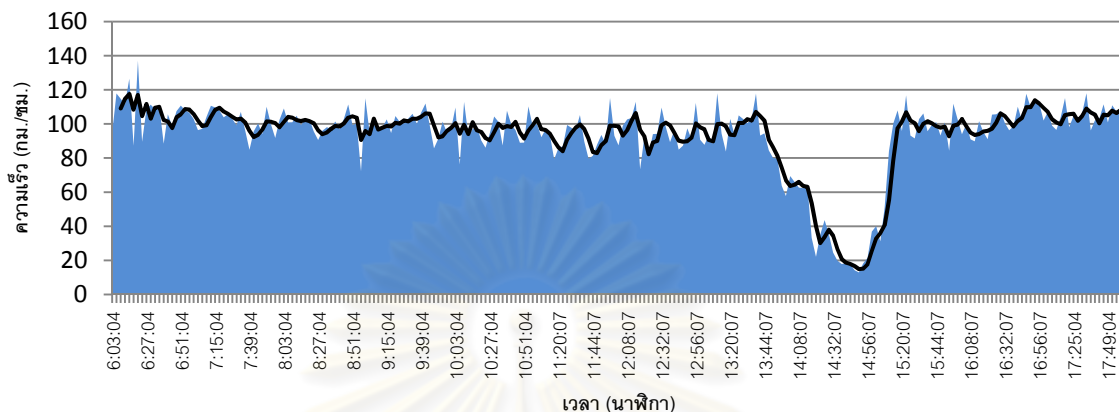
เนื่องจากลักษณะเด่นในการคำนวณการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ที่จะทำให้น้ำหนักความสำคัญกับข้อมูลตัวใกล้ที่สุดมีความสำคัญมากที่สุด และรองลงไปตามสมการยกกำลังในข้อมูลตัวถัดๆ ไป ทำให้เห็นแนวโน้มของข้อมูลที่จะเกิดขึ้นระยะสั้นอย่างเด่นชัดกว่าค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบธรรมดา ที่ให้ความสำคัญกับข้อมูลทุกตัวเท่ากันในการคำนวณ เพราะงานวิจัยนี้เป็นการประมวลผลข้อมูลแบบทันเวลา และต้องการตรวจพบการเปลี่ยนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการปรับเรียบดังสมการ 3.3.2-1

$$S_i(t) = \alpha X_t + \alpha(1-\alpha)X_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 X_{t-2} \dots \dots \dots (3.3.2-1)$$

$$\text{หรือ } S_i(t) = \sum_{a=0}^n \alpha(1-\alpha)^a X_{t-a} \dots \dots \dots (3.3.2-1)$$

ตามงานวิจัย [19] จะใช้ช่วงการปรับเรียบที่ 5 ค่า หรือ (n=4 เนื่องจากค่า n มีค่าเริ่มต้นที่ 0) แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล จะพบว่าให้ค่าการปรับเรียบที่ดีที่สุดสำหรับข้อมูลสภาพการจราจรที่จะ

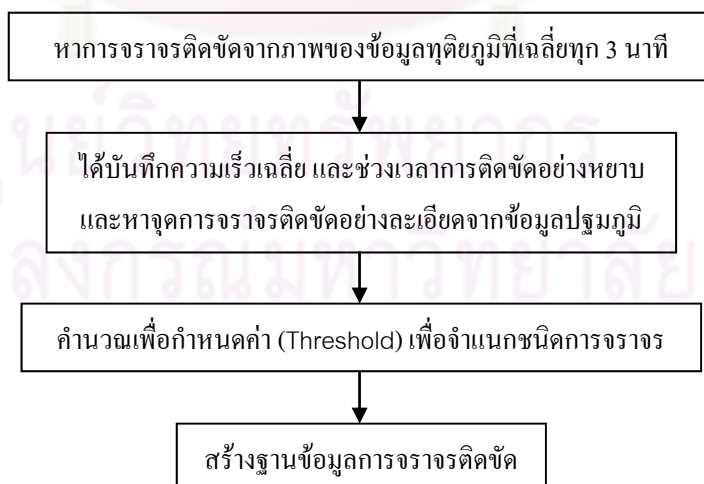
นำไปประมวลผลด้วยอัลกอริทึมทางคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงใช้การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล ด้วยค่า  $n=4$  ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ภาพที่ 3.3.2-2 แสดงข้อมูลภายหลังจากถูกปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แล้ว



รูปที่ 3.3.2-1 การปรับเรียบข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (เส้นสีดำ)

### 3.4 ดำเนินการจัดกลุ่มข้อมูลดิบ

ข้อมูลดิบสภาพการจราจรที่รวบรวมใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิย้อนหลังตั้งแต่วันที่ 8 สิงหาคม 2551 ถึงวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2552 (ข้อมูลแบบทุติยภูมิ สามารถดาวน์โหลดได้โดยตรงจากลิงค์ด้านบน ถึงปัจจุบัน ส่วนข้อมูลปฐมภูมิต้องขอกับทาง NECTEC อีกทีหนึ่ง) เมื่อรวบรวมข้อมูลสภาพการจราจรทั้งสองชุดได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการพิจารณาแยกแยะข้อมูลสภาพการจราจรที่มีรายละเอียดภาพที่ 3.4.1-1

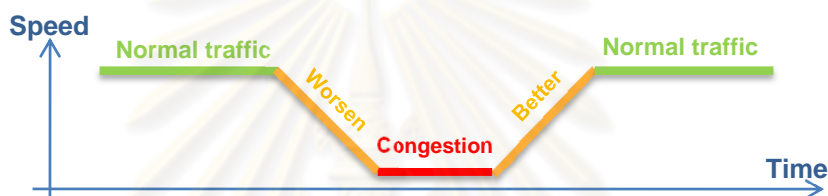


รูปที่ 3.4-1 การสร้างฐานข้อมูลการติดขัดสำหรับใช้ในงานวิจัย

### 3.4.1 การหาจรรยาบรรณติดขัดขั้นต้นจากภาพถ่าย

ในขั้นต้นผู้วิจัยได้เลือกวิธีพิจารณาหาการจราจรติดขัดจากภาพถ่ายการจราจรจริงที่มีการบันทึกไว้ทุก 3 นาทีของข้อมูลปฐมภูมิ โดยการมองจากภาพแล้วบันทึกข้อมูลสภาพการจราจรในทุกๆ 3 นาที เพื่อหารายละเอียดของข้อมูลดิบอย่างคร่าว และจำแนกสภาพการจราจรชนิดต่างๆ ออกเป็น 4 ชนิด เพื่อบันทึกช่วงเวลาดังกล่าวไว้ได้แก่

- ก. การจราจรเคลื่อนตัวปกติ (Normal)
- ข. การจราจรติดขัด (Congestion)
- ค. การจราจรช่วงการเปลี่ยนแปลงไปสู่การติดขัด (Worsen Transient)
- ง. การจราจรช่วงการเปลี่ยนแปลงไปสู่การคลายตัว (Better Transient)



รูปที่ 3.4.1-1 ตำแหน่งข้อมูลทั้ง 4 ประเภท

### 3.4.2 บันทึกข้อมูลการจราจรติดขัด

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจในข้อมูลส่วนของการจราจรช่วงการเปลี่ยนแปลงไปสู่การติดขัด (Worsen Transient) เพื่อนำไปใช้ทำนายสภาพการจราจรที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ หากพบรูปแบบเดิมซ้ำๆ อีก แต่อย่างไรก็ตาม จะต้องหาจุดที่มีการจราจรติดขัดก่อน และจุดที่มีการจราจรเคลื่อนตัวปกติ มาเปรียบเทียบเพื่อหาการจราจรช่วงการเปลี่ยนแปลง ส่วนการจราจรช่วงการเปลี่ยนแปลงไปสู่การคลายตัวจะยังไม่สนใจในงานวิจัยชิ้นนี้

เมื่อได้เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของการจราจรติดขัดอย่างหายจากข้อมูลทุติยภูมิแล้ว จึงดำเนินการค้นหาจุดเริ่มต้นของการติดขัดอย่างละเอียดในข้อมูลปฐมภูมิอีกทีหนึ่ง โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่มีแนวโน้มลดลงจากการจราจรปกติ จากนั้นจึงบันทึกไว้ในฐานข้อมูลการจราจรติดขัด ซึ่งมีการติดขัด 19 ครั้ง ในช่องทางขาเข้า และมีการติดขัด 19 ครั้งในช่องทางจราจรขาออก เช่นกัน ซึ่งฐานข้อมูลใ้ที่อยู่ในภาคผนวก

### 3.4.3 การคำนวณค่าขีดแบ่งเพื่อใช้จำแนกการจราจรติดขัดอย่างละเอียด

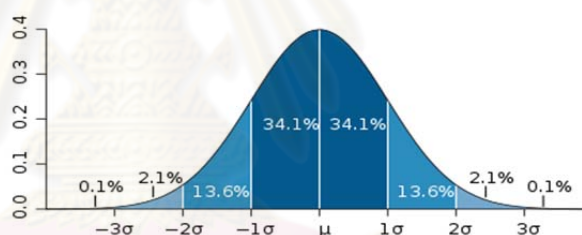
เมื่อได้กลุ่มฐานข้อมูลที่มีการจราจรติดขัด และฐานข้อมูลการจราจรปกติเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถแยกแยะข้อมูลการจราจรติดขัดและการจราจรปกติออกจากกันได้อย่างอัตโนมัติ แต่เนื่องด้วยถนนแต่ละเส้นมีความเร็วที่การจราจรติดขัดและการจราจรปกติไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพและการใช้งานที่มีวัตถุประสงค์แตกต่างกัน

เช่น ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะถือเป็นการจราจรปกติที่ถนนพญาไท แต่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะถือเป็นการจราจรที่ค่อนข้างจะติดขัดบนทางด่วนสายมอเตอร์เวย์ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องสร้างค่ากำหนด (Threshold) ขึ้นมาเพื่อจำแนกการจราจรทั้ง 2 ชนิด ที่เหมาะสมกับถนนเส้นพหลโยธิน-คลองหลวงที่กำลังศึกษาอยู่ โดยจากหัวข้อ 3.4.1 จะได้ข้อมูลการจราจรทั้ง 4 ประเภทเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินคำนวณค่าทางสถิติดังนี้

### 3.4.3.1 จำนวนความเร็วเฉลี่ย ของการจราจรปกติ และการจราจรติดขัด

### 3.4.3.2 จำนวนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของการจราจรปกติ และการจราจรติดขัด

### 3.4.3.3 อ้างอิงการกระจายปกติ จากทฤษฎีลิมิตเข้าสู่ส่วนกลาง (Central Limit Theorem) เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีจำนวนมากกว่า 100 ตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในแต่ละวันมีประมาณ 35,000 ตัวอย่าง สำหรับทิศทางมุ่งหน้าไปอยุธยา และประมาณ 10,000 ตัวอย่างสำหรับทิศทางมุ่งหน้าสู่กรุงเทพฯ) จึงสามารถประมาณได้ว่าการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งตัวอย่างส่วนใหญ่ประมาณ 68% จะอยู่ในช่วง $\pm 1SD$



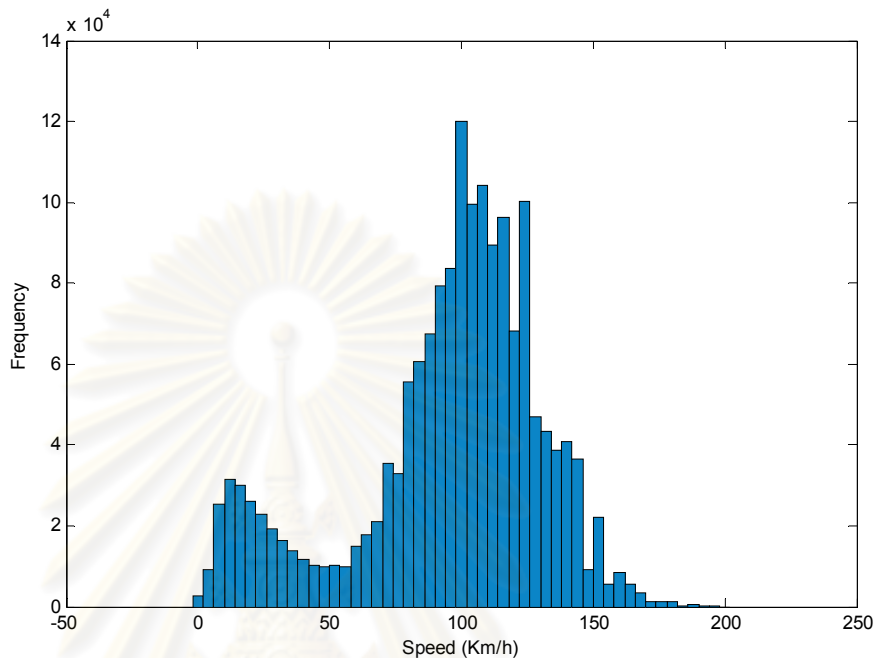
รูปที่ 3.4.3.3-1 การกระจายปกติตามส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

### 3.4.3.4 วัดการกระจายตัวของความเร็ว สำหรับกลุ่มตัวอย่างของวันที่มีการจราจรปกติ และวันที่มีการจราจรติดขัด เพื่อใช้กำหนดค่าขีดแบ่ง

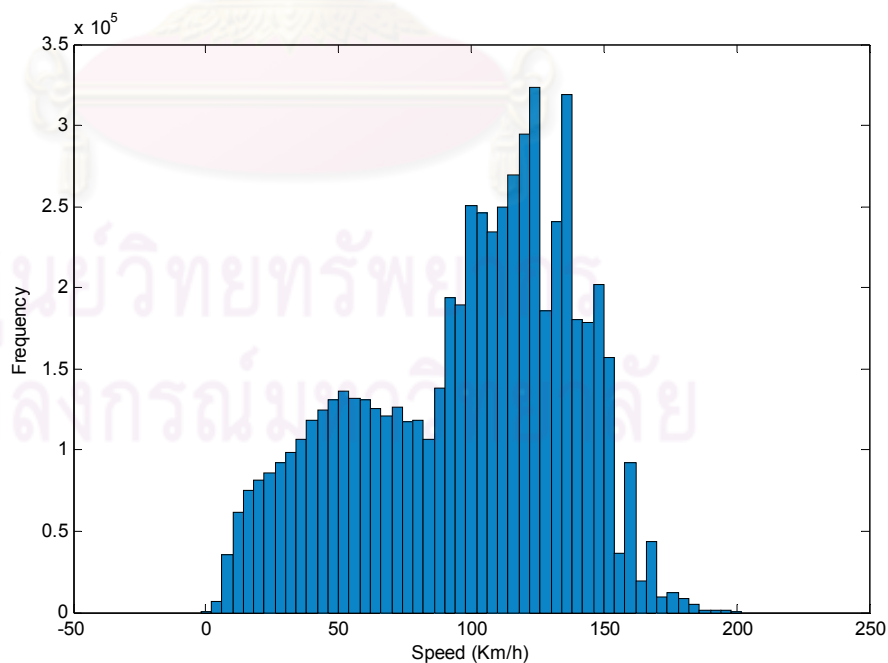
#### ก. วันที่มีการจราจรปกติ

การกระจายตัวในแต่ละวันมีลักษณะดังภาพที่ 3.4.3-2 ถึง 3.4.3-5 ซึ่งแสดงการกระจายตัวในวันที่ 9 กันยายน 2551 ของกึ่งคลองหลวง และวันที่ 3 มิถุนายน 2553 ของทางด่วนดาวคะนอง (ส่วนในวันอื่นๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน) ซึ่งในกึ่งคลองหลวงจะเห็นได้ว่า ถึงแม้ในวันที่ไม่มีการจราจรติดขัดเลย จะมีการกระจายตัวของความเร็วแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มความเร็วสูง และกลุ่มความเร็วต่ำแยกกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อมูลการจราจรที่เก็บมานั้นจะเป็นข้อมูลรวมทั้ง 3 เลน ซึ่งรวมเลนที่มีความเร็วช้าที่สุดในเลนซ้ายมือสุด จึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวดังกล่าว ในส่วนของทางด่วนดาวคะนองที่ข้อมูลมีการแยกเลนโดยผู้วิจัยเลือกเลนในช่องทางหลักพบว่า

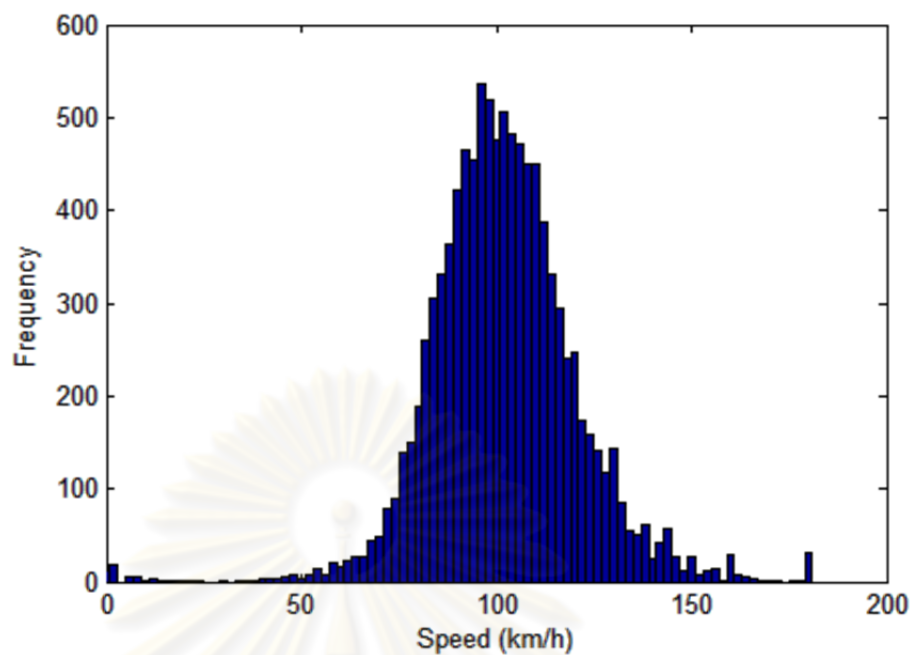
มีข้อมูลความเร็วต่ำมารบกวนน้อยมาก และเมื่อรวมประชากรวันที่มีการจราจรปกติทั้งหมด (6 เดือน สำหรับถนนคลองหลวง และ 1 สัปดาห์ สำหรับทางด่วนดาวคะนอง) จะได้การกระจายตัวดังรูปที่ 3.4.3-10 ถึงรูปที่ 3.4.3-15



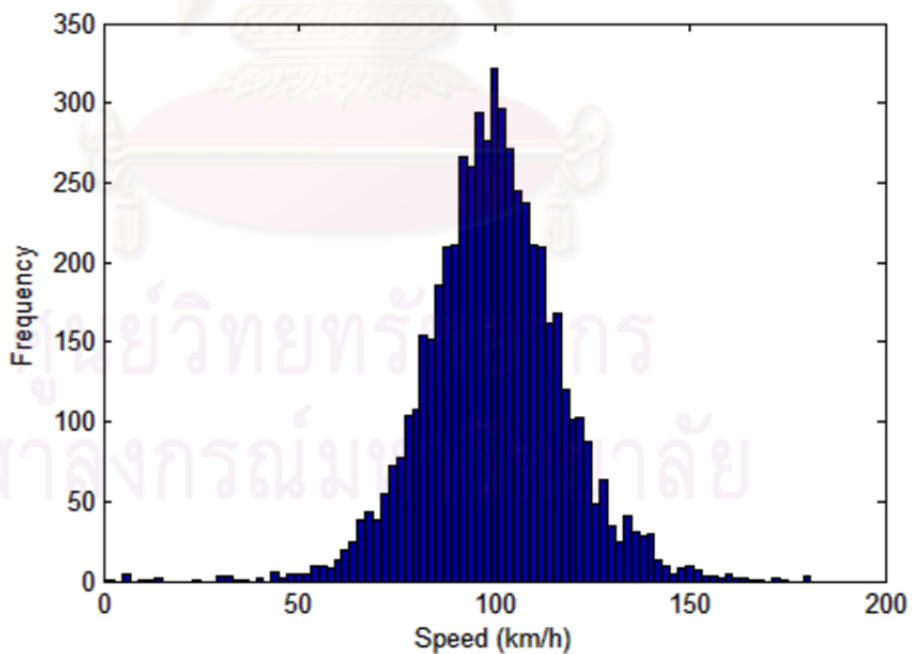
รูปที่ 3.4.3.4-1 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง  
ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติเช้า



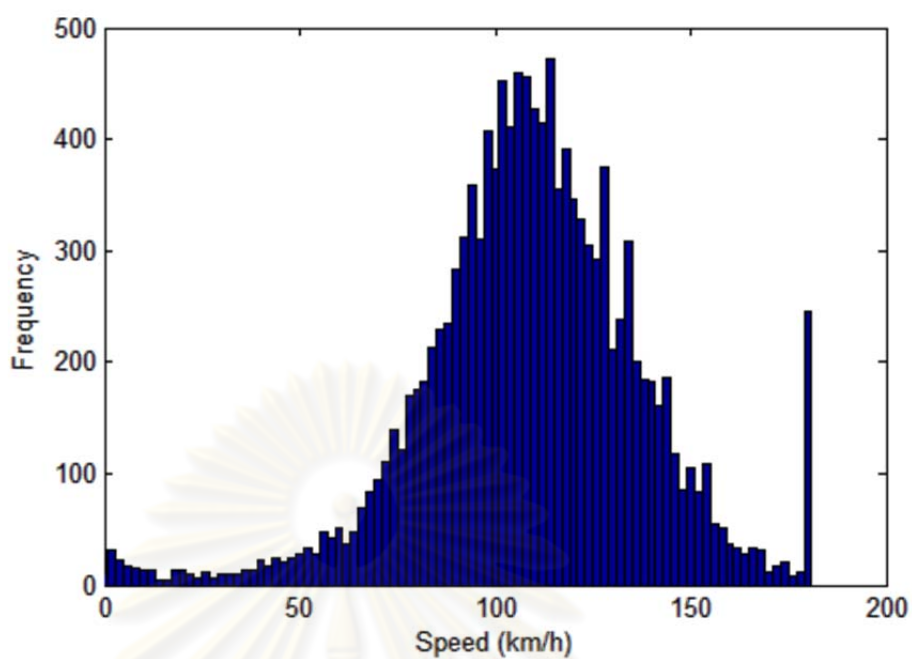
รูปที่ 3.4.3.4-2 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง  
ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติออก



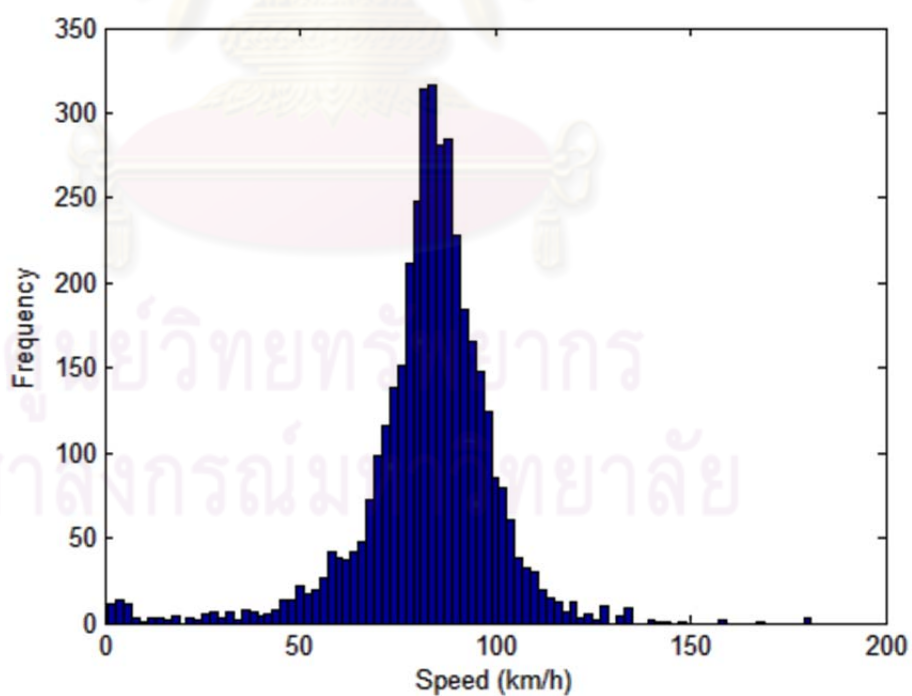
รูปที่ 3.4.3.4-3 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT02 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ



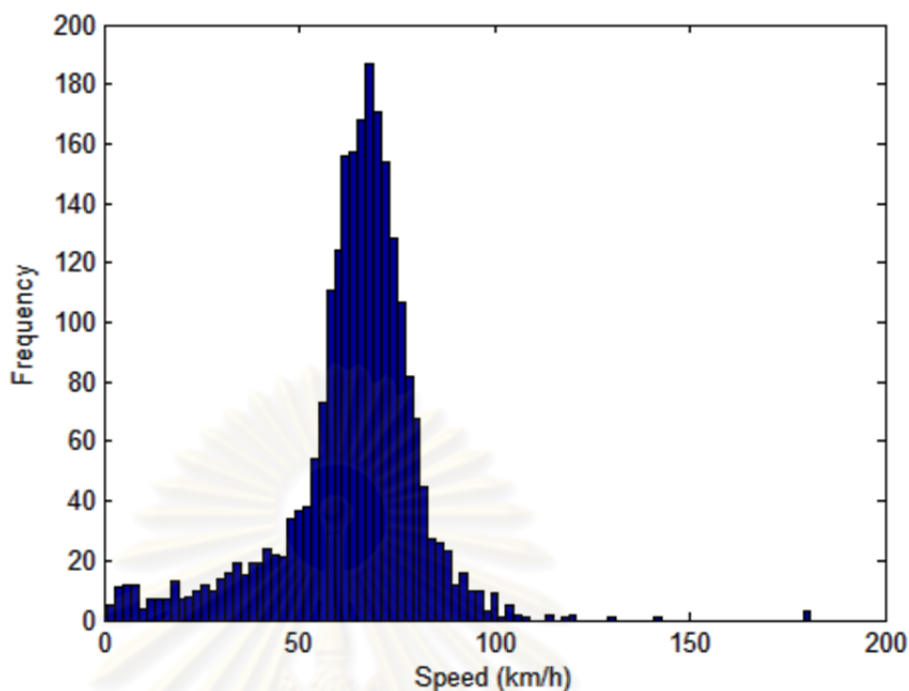
รูปที่ 3.4.3.4-4 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT03 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ



รูปที่ 3.4.3.4-5 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT07 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ



รูปที่ 3.4.3.4-6 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT09 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ

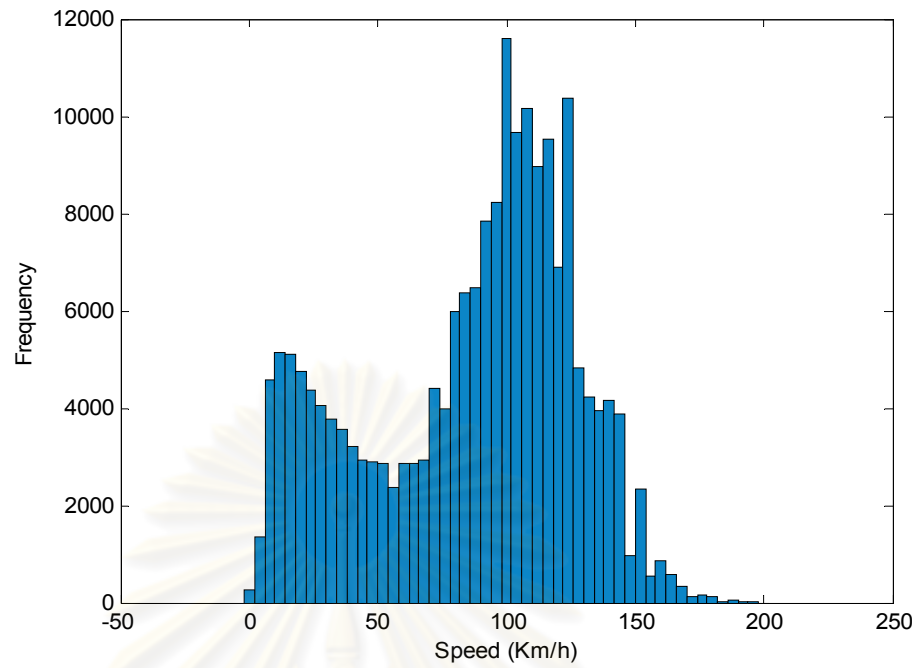


รูปที่ 3.4.3.4-7 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT10 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติ

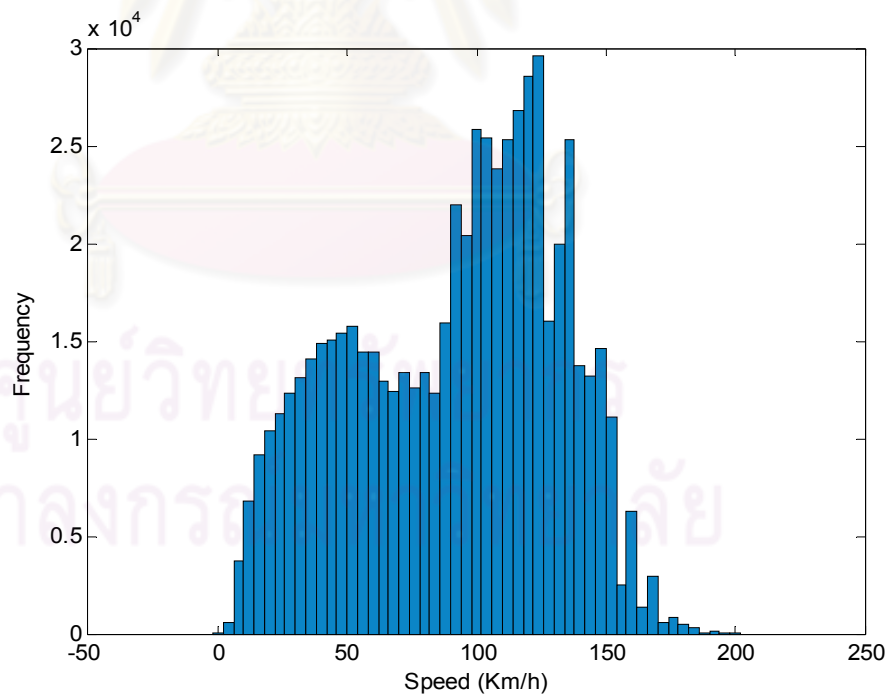
#### ข. วันที่มีการจราจรติดขัด

การกระจายตัวในแต่ละวันมีลักษณะดังรูปที่ 3.4.3-4 และ 3.4.3-5 ซึ่งแสดงการกระจายตัวในวันที่ 31 ตุลาคม 2551 เนื่องจากมีการติดขัดทั้ง 2 ทิศทางการจราจรพร้อมกัน (ขาเข้าสู่กรุงเทพและขาออกมุ่งหน้าสู่อุทยา) จะพบว่าการกระจายตัวในกลุ่มความเร็วสูงยังปกติ ส่วนกลุ่มความเร็วต่ำจะเบี่ยงไปทางขวามากขึ้นเนื่องมาจากการจราจรติดขัดและผลกระทบจากการเก็บข้อมูลมา 3 เลน พร้อมกันดังที่กล่าวในเบื้องต้นแล้วและเมื่อรวมประชากรเฉพาะวันที่มีการจราจรติดขัดจากข้อมูลทั้งหมด 6 เดือน จะได้การกระจายตัวดังรูปที่ 3.4.3-8 และ 3.4.3-9

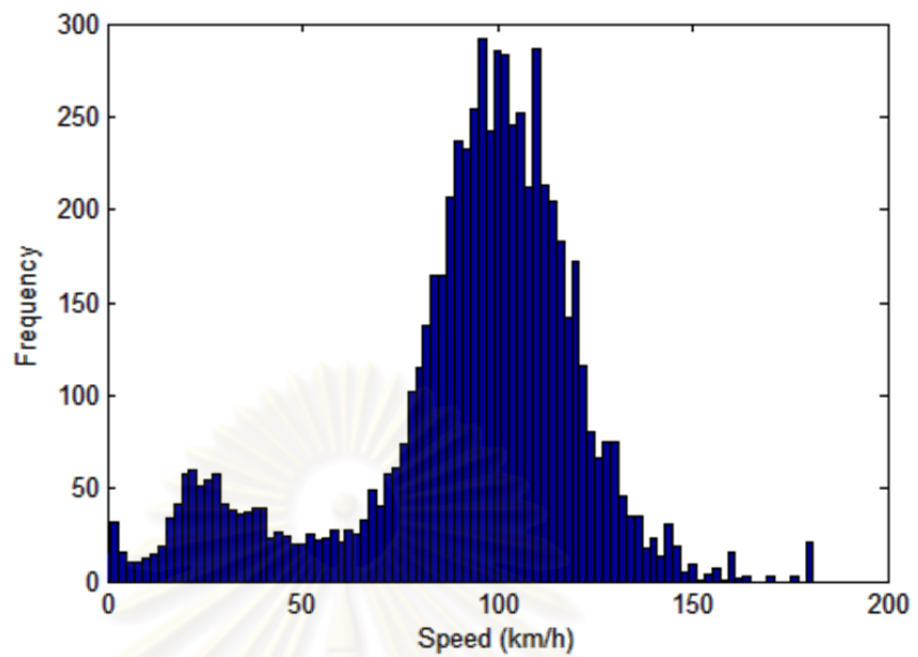




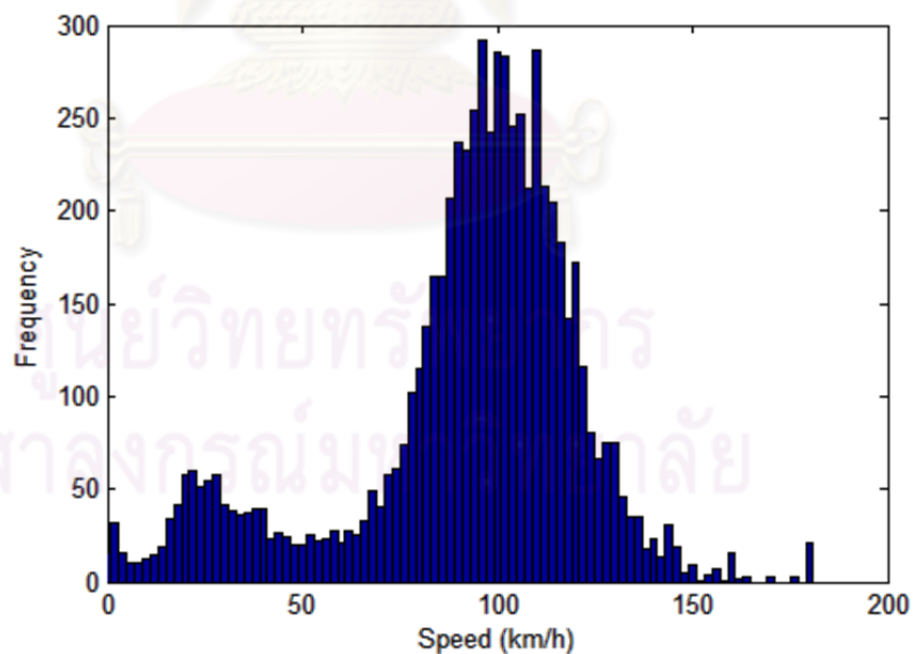
รูปที่ 3.4.3.4-8 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรติดขัดขาเข้า



รูปที่ 3.4.3.4-9 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างถนนคลองหลวง ทั้ง 6 เดือน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรติดขัดขาออก

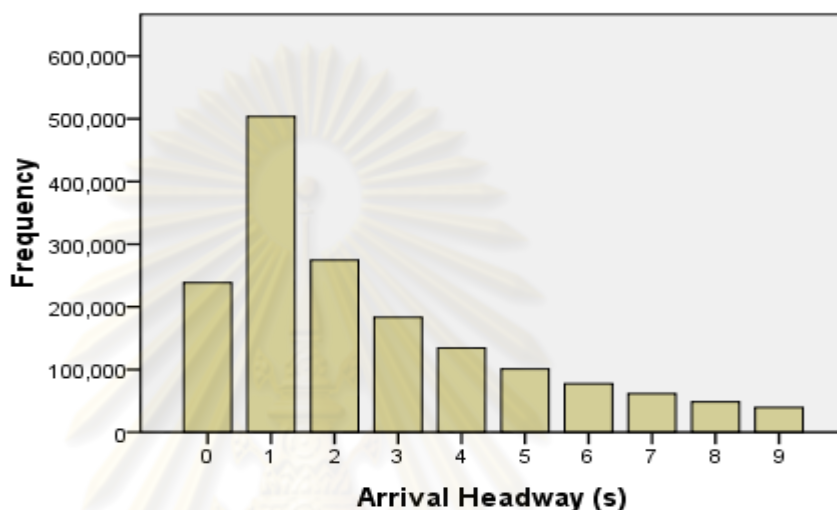


รูปที่ 3.4.3.4-10 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กิโลง EXAT02 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติเช้า

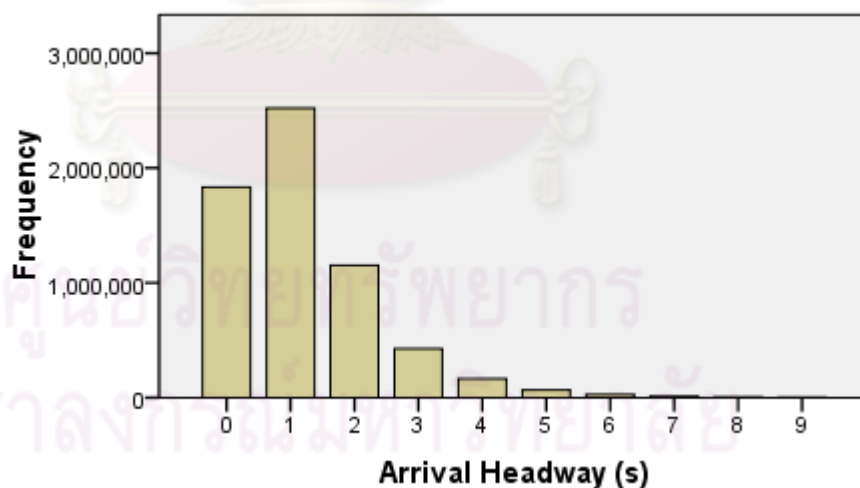


รูปที่ 3.4.3.4-11 การกระจายความเร็วของกลุ่มตัวอย่างทางด่วนดาวคะนอง  
กิโลง EXAT03 ทั้ง 7 วัน โดยเลือกเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติเช้า

3.4.3.5 วัดการกระจายตัวของระยะห่างระหว่างรถที่เข้าสู่กล้องวงจรปิด (Arrival Time Headway) เพื่อใช้กำหนดรูปแบบการเข้าสู่ระบบของแต่ละคันในแบบจำลอง โดยนำมาสร้างแผนภาพการกระจายตัวทั้ง 2 ทิศทางการจราจร แยกตั้งแสดงความถี่ และแกนนอนแสดงระยะห่างระหว่างรถที่เข้าสู่กล้องวงจรปิดมีหน่วยเป็นวินาที

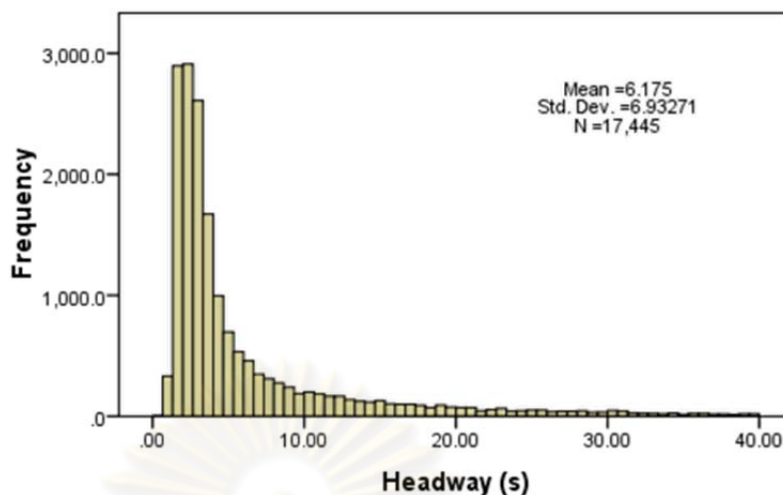


รูปที่ 3.4.3.5-1 การกระจายตัว Headway ถนนคลองหลวง จากข้อมูลทั้ง 6 เดือน ทิศทางการจราจรขาเข้า

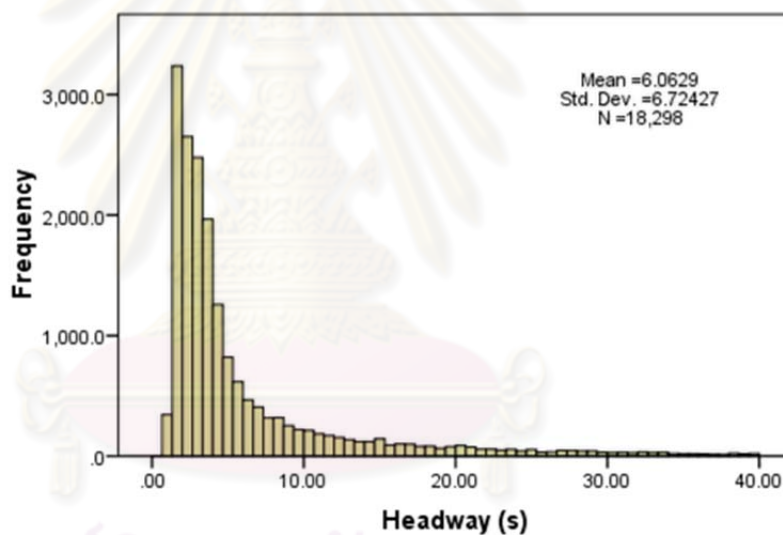


รูปที่ 3.4.3.5-2 การกระจายตัว Headway ถนนคลองหลวง จากข้อมูลทั้ง 6 เดือน ทิศทางการจราจรขาออก

เมื่อทดสอบด้วยสถิติ Komolgorov-Smirnov พบว่ามีการแจกแจงเป็นแบบ Exponential อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างรถแต่ละคันที่ 2.88 วินาที สำหรับถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า และ 1.20 วินาที สำหรับทิศทางการจราจรขาออก

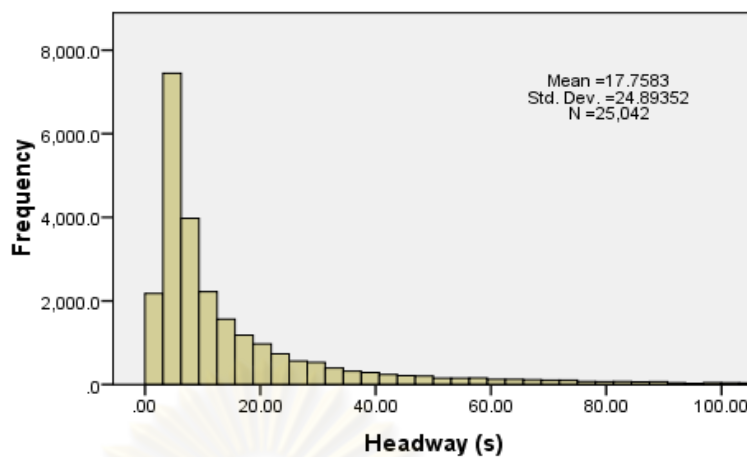


รูปที่ 3.4.3.5-3 การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT02 (Group-I)

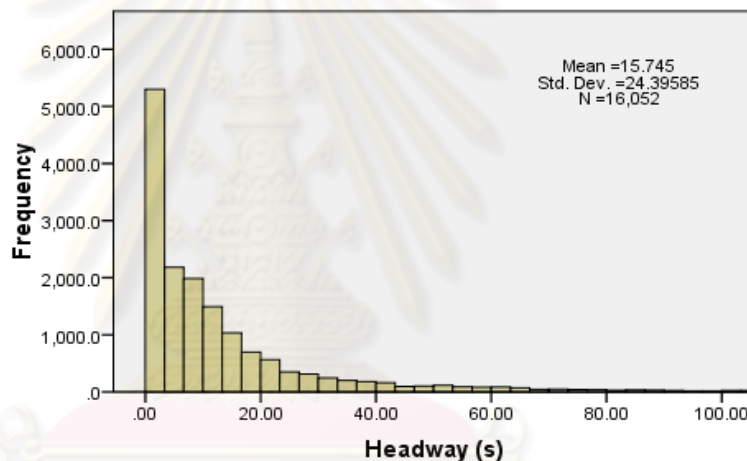


รูปที่ 3.4.3.5-4 การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT03 (Group-I)

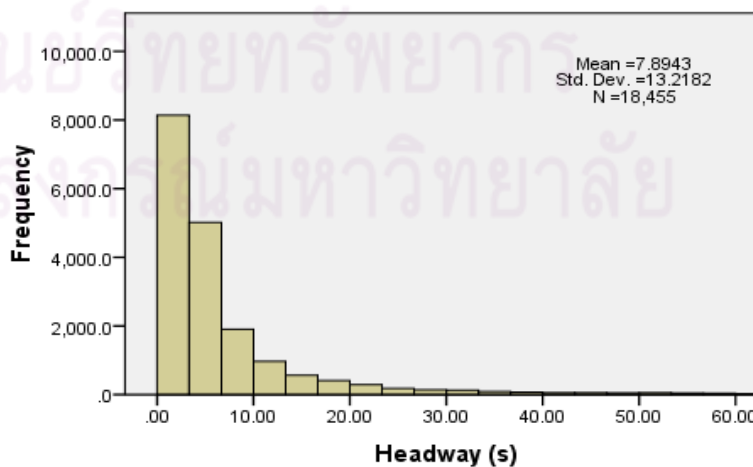
สำหรับทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 เมื่อนำไปทดสอบด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov พบว่าการแจกแจงเป็นแบบ Exponential อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างรถแต่ละคันที่ 6.18 วินาที และ 6.06 วินาที สำหรับกล้อง EXAT2 และกล้อง EXAT3 และ 17.75 วินาที 15.75 วินาที และ 13.22 วินาที สำหรับกล้อง EXAT7 กล้อง EXAT9 และกล้อง EXAT10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4.3.5-5 การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT07 (Group-II)

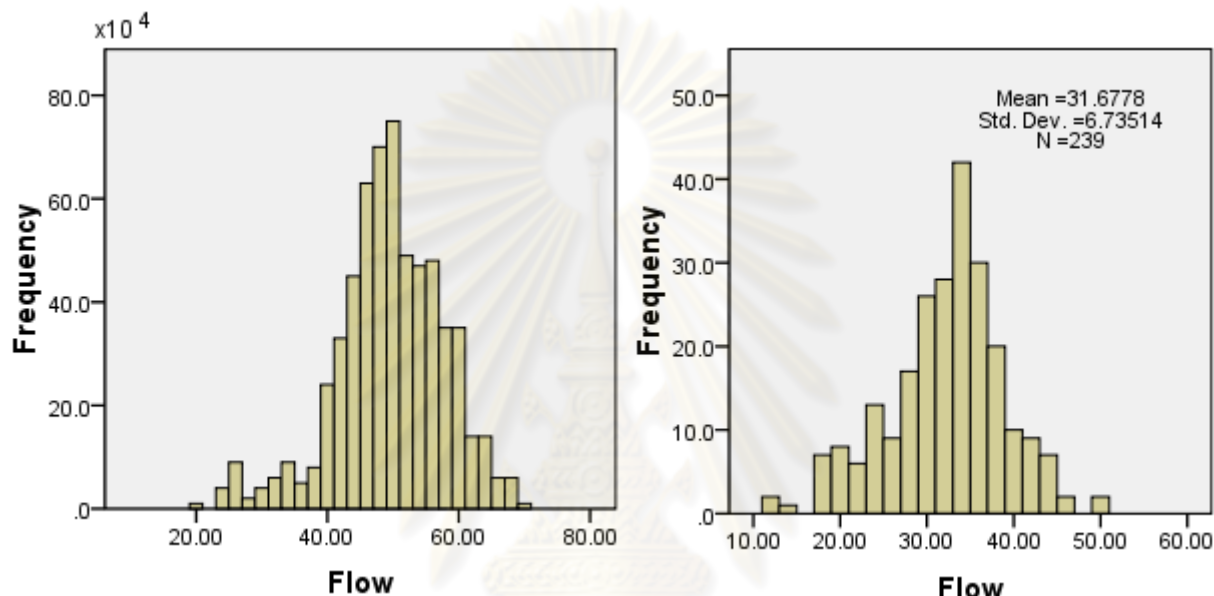


รูปที่ 3.4.3.5-6 การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT09 (Group-II)



รูปที่ 3.4.3.5-7 การกระจายตัว Headway ทางด่วนดาวคะนอง จากข้อมูล 7 วัน กล้อง EXAT10 (Group-II)

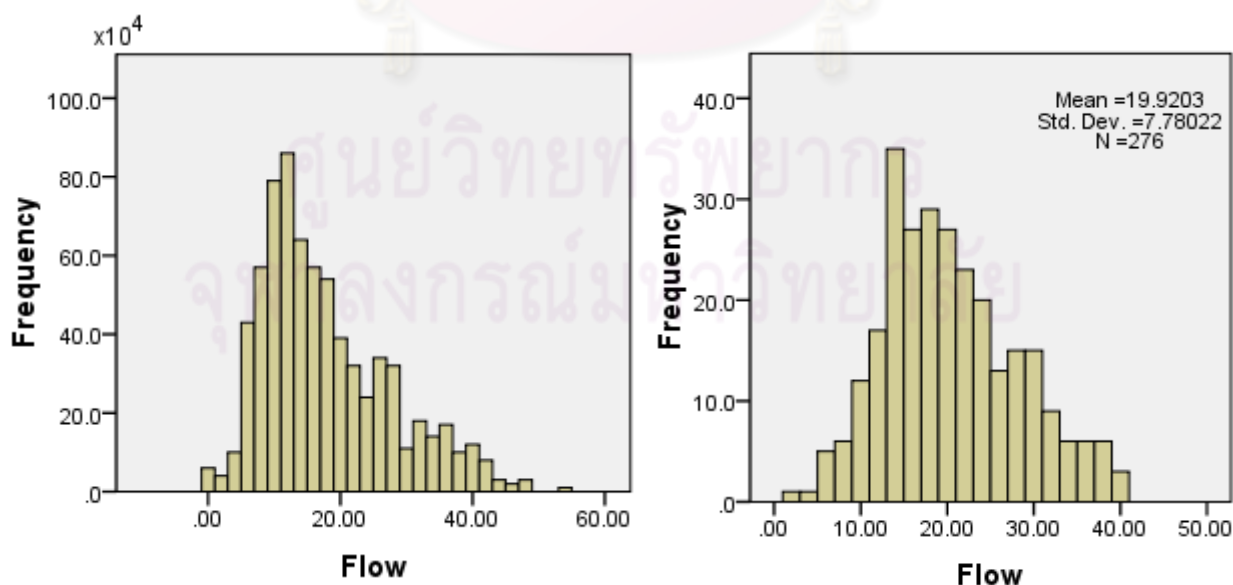
**3.4.3.6** วัดการกระจายตัวของปริมาณการจราจร (Flow) เพื่อที่จะได้ใช้สถิติทดสอบที่เหมาะสมในการวัดความแตกต่างของตัวแปร ในสภาพการจราจรปกติ และสภาพการจราจรติดขัด โดยปริมาณการจราจรนี้จะมีการวัดในมิติของเวลา เช่น ปริมาณการจราจรทุก 15 นาที เป็นต้น และในการวัดการกระจายตัวครั้งนี้จะใช้ปริมาณการจราจรทุก 3 นาที ซึ่งแบ่งเป็นการกระจายตัวในช่วงการจราจรปกติ และการกระจายตัวในช่วงการจราจรติดขัดดังรูปที่ 3.4.3-20 ถึง 3.4.3-23



ซ้าย : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรปกติ

ขวา : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรติดขัด

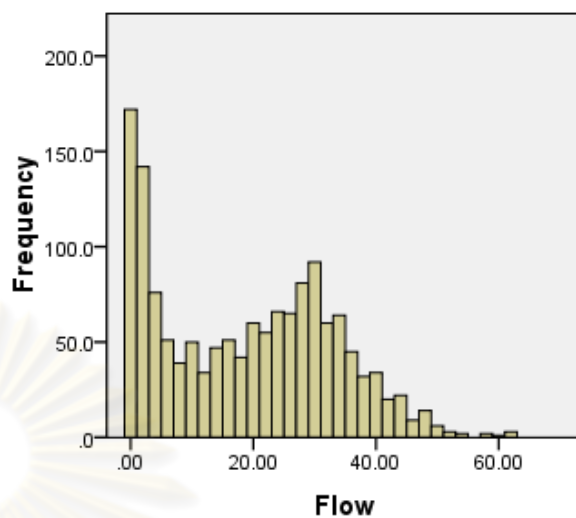
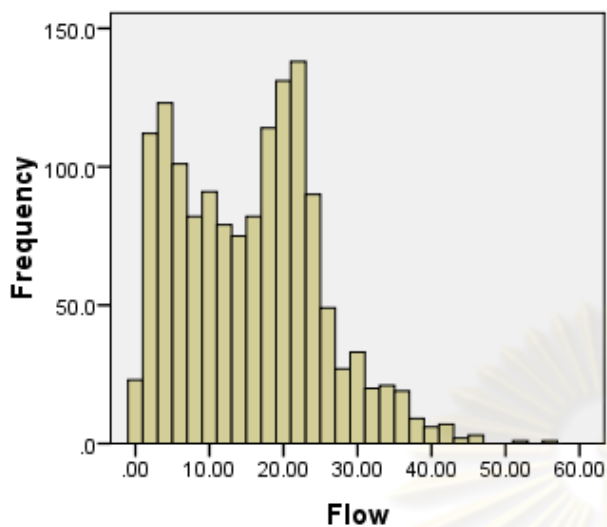
รูปที่ 3.4.3.6-1 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรถนนคลองหลวงที่สททางขาออกกรุงเทพ



ซ้าย : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรปกติ

ขวา : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรติดขัด

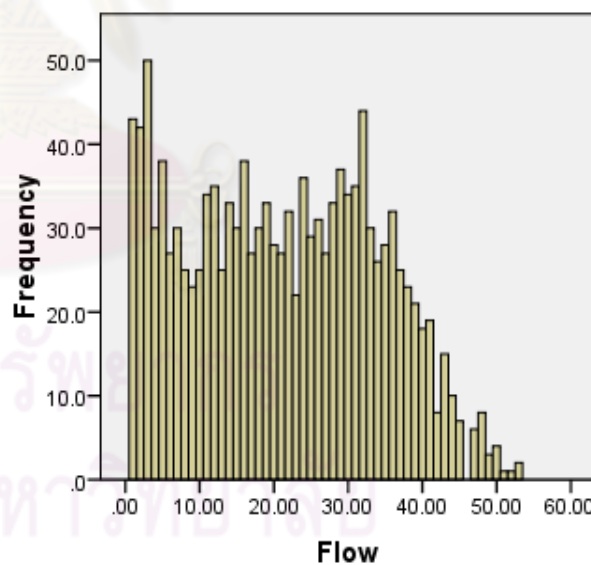
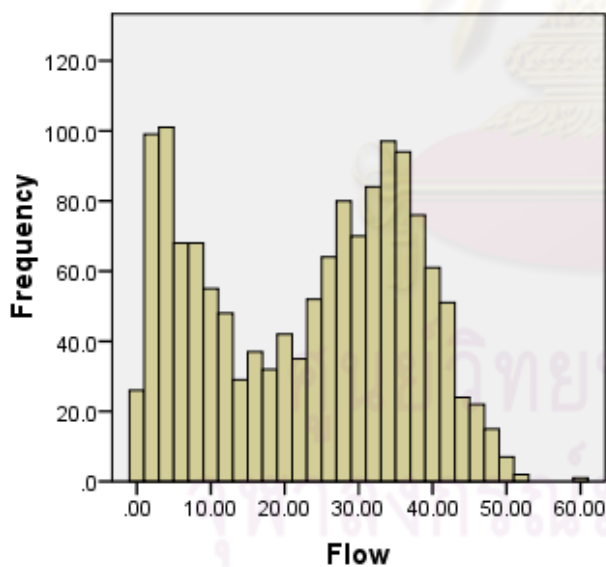
รูปที่ 3.4.3.6-2 แสดงการกระจายตัวของปริมาณการจราจรถนนคลองหลวงที่สททางขาเข้ากรุงเทพ



ซ้าย : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรปกติ

ขวา : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรติดขัด

รูปที่ 3.4.3.6-3 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรทางด่วนดาวคะนอง กลุ่มที่ 1



ซ้าย : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรปกติ

ขวา : การกระจายตัวเมื่อสภาพการจราจรติดขัด

รูปที่ 3.4.3.6-4 การกระจายตัวของปริมาณการจราจรทางด่วนดาวคะนอง กลุ่มที่ 2

**3.4.3.7 การกำหนดค่าขีดแบ่งข้อมูลสำหรับการจราจรปกติ (Threshold for Normal Traffic)** เพื่อให้เครื่องสามารถเรียนรู้รูปแบบ (Pattern) ได้โดยอัตโนมัติ จึงจำเป็นต้องสร้างค่าขีดแบ่งเพื่อจำแนกชุดข้อมูล โดยเริ่มจากการจราจรปกติก่อน

และจึงค่อยดำเนินการต่อหาคข้อมูลการจราจรติดขัด แต่เนื่องจากลักษณะข้อมูลที่ได้รับมาเป็นข้อมูลรวมทั้ง 3 ช่องทางการจราจรพร้อมกัน ทำให้ข้อมูลความเร็วมีการแยกกลุ่มกันอย่างชัดเจนตามช่องทางการจราจรช้า และช่องทางการจราจรเร็ว ดังจะเห็นได้ชัดในรูปที่ 3.4.3-2 และ 3.4.3-3 ซึ่งเป็นวันที่ไม่มีการจราจรติดขัด แต่ยังคงมีกลุ่มของความเร็วต่ำซึ่งมีการแจกแจงใกล้เคียงปกติ และเมื่อรวมเฉพาะวันที่มีการจราจรปกติตลอดทั้ง 6 เดือน การแจกแจงก็ยังคงแบ่งเป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.4.3-10

#### ก. การกำจัดข้อมูลความเร็วต่ำ

เนื่องจากหาคข้อมูลความเร็วต่ำเป็นหาคข้อมูลที่ไม่สนใจ และอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อกระบวนการเรียนรู้และจำแนกได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ หาคข้อมูลความเร็วต่ำ และหาคข้อมูลความเร็วสูง และกำจัดหาคข้อมูลความเร็วต่ำออกไป โดยการใชการพยากรณ์ย้อนกลับ จากฟังก์ชันความน่าจะเป็นของความหนาแน่น (Probability Density Function) จากค่าความหนาแน่นสูงสุดของกลุ่มหาคข้อมูลความเร็วสูง ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องสูงสุด จะพิจารณากำจัดหาคข้อมูลแยกแต่ละกล้อง เนื่องจากหาคข้อมูลที่ได้จากกล้องแต่ละตัวอาจมีลักษณะที่แตกต่างกันได้แก่ กล้องคลองหลวงทิศทางขาเข้า กล้องคลองหลวงทิศทางขาออก กล้องทางด่วนดาวคะนอง EXAT02 EXAT03 EXAT07 EXAT09 EXAT10 รวมทั้งสิ้น 7 หาคข้อมูล

ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่า จุดที่มีการเชื่อมต่อระหว่างช่องทางการจราจรความเร็วต่ำ และช่องทางการจราจรความเร็วสูง คือ

##### ถนนคลองหลวง

- ทิศทางขาเข้ากรุงเทพมหานครที่ 50.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ทิศทางขาออกกรุงเทพมหานครที่ 81.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

##### ทางด่วนดาวคะนอง

- EXAT02 ที่ 49.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- EXAT03 ที่ 47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- EXAT07 ที่ 49 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- EXAT09 ที่ 47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- EXAT10 ที่ 31 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



เมื่อทำการทำนาย โดยใช้ Statistics Toolbox ของ MATLAB และกำจัดข้อมูลในช่องการจราจรความเร็วต่ำออกไป จะให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังต่อไปนี้

**ถนนคลองหลวงทิศทางขาเข้ากรุงเทพมหานคร**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 106.79 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 22.60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ถนนคลองหลวงทิศทางขาออกกรุงเทพมหานคร**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 120.89 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 21.39 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT02**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 102.03 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 18.03 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT03**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 97.75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 18.15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT07**

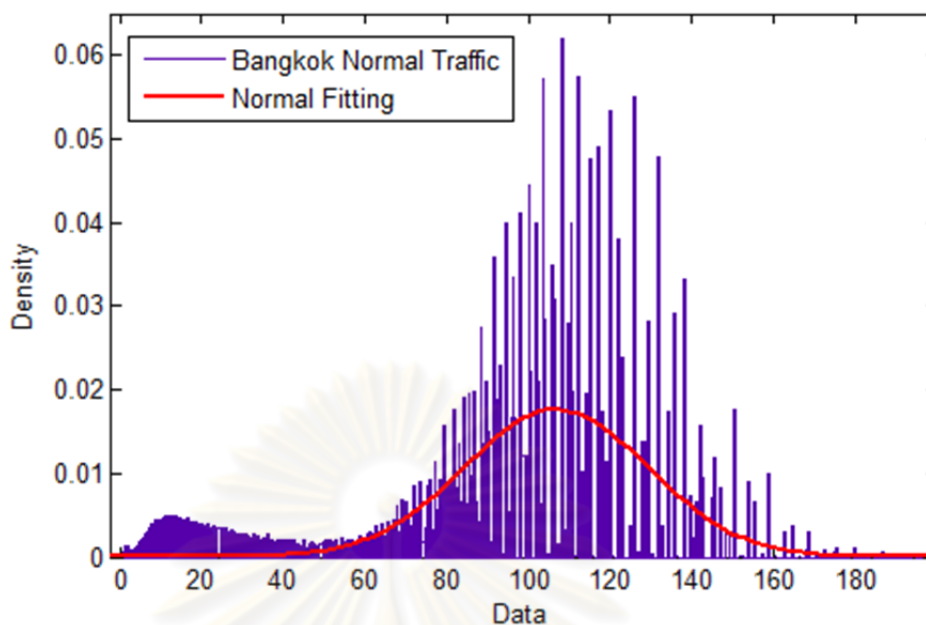
- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 110.12 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 22.97 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT09**

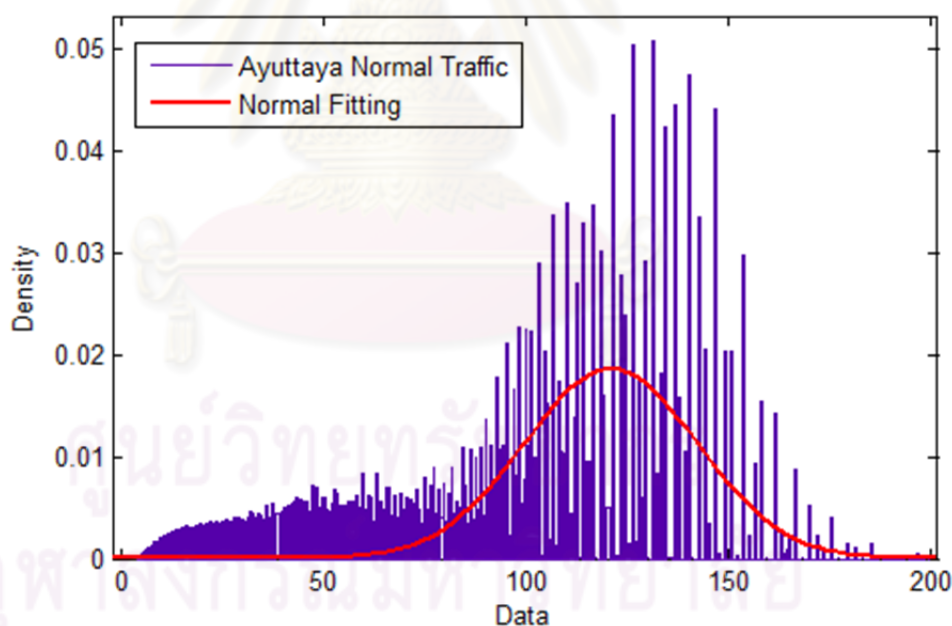
- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 85.08 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12.96 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนอง กล้อง EXAT10**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 66.41 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 13.40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

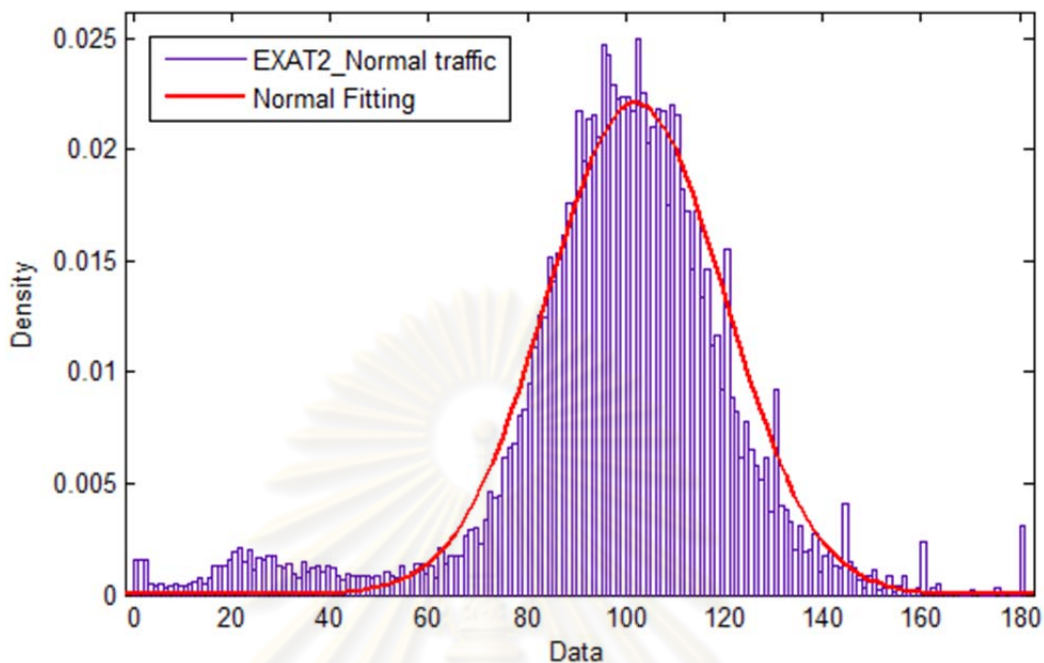


รูปที่ 3.4.3.7-1 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วต่ำถนนคลองหลวง  
ขาเข้าเพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป

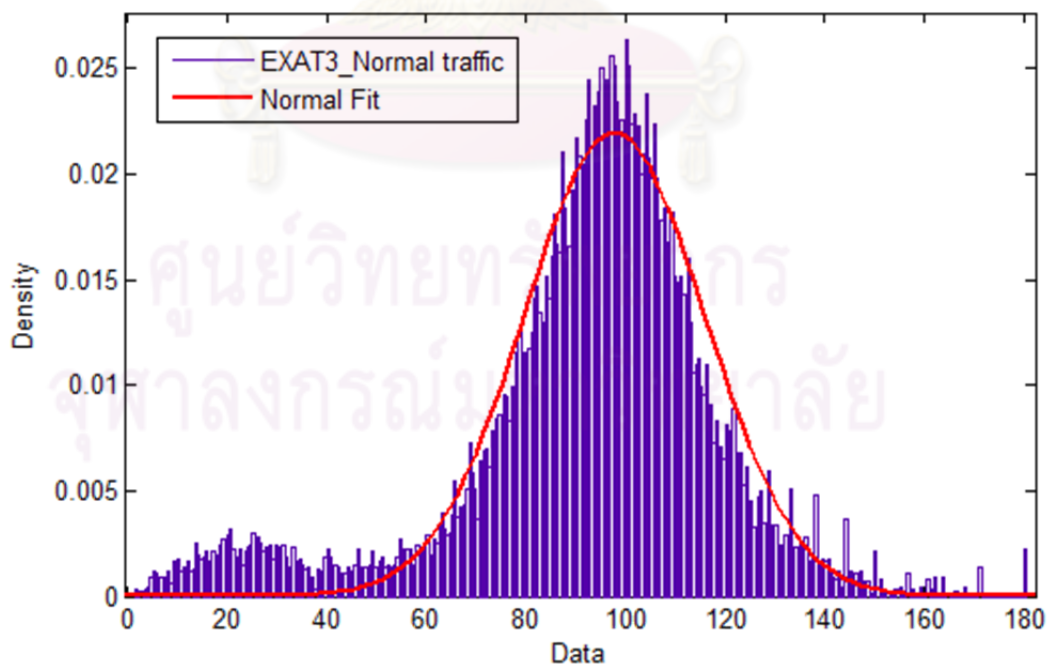


รูปที่ 3.4.3.7-2 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วต่ำถนนคลองหลวง  
ขาออกเพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป

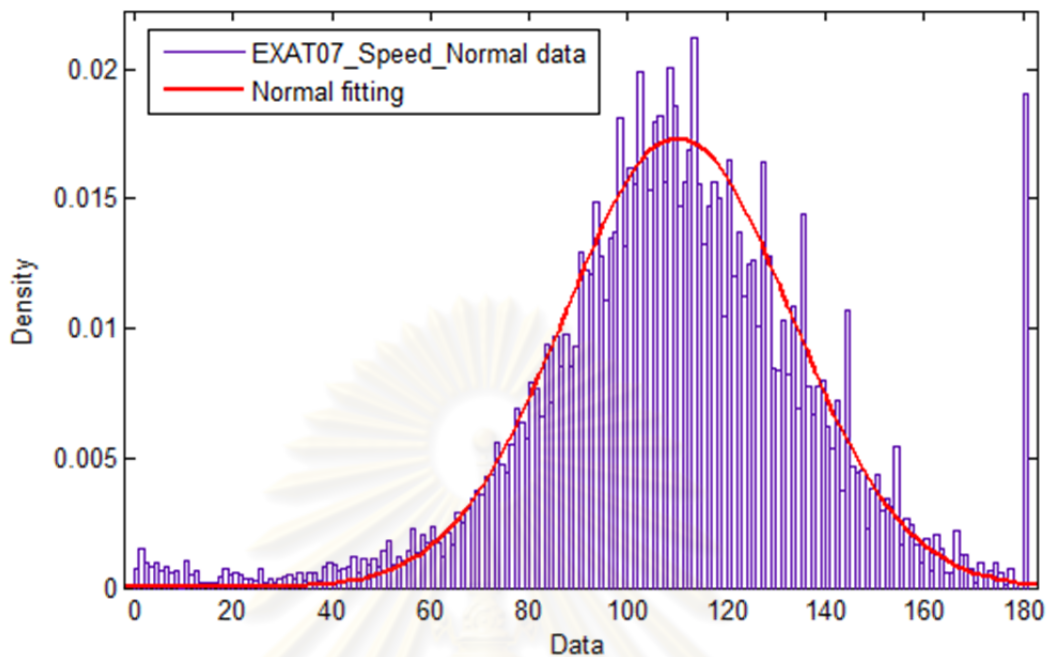
เมื่อทดสอบชุดข้อมูลขาเข้ากรุงเทพ ด้วยสถิติ Komolgorov-Smirnov พบว่าการแจกแจงเป็นแบบ Normal อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น (Confidential) 95%



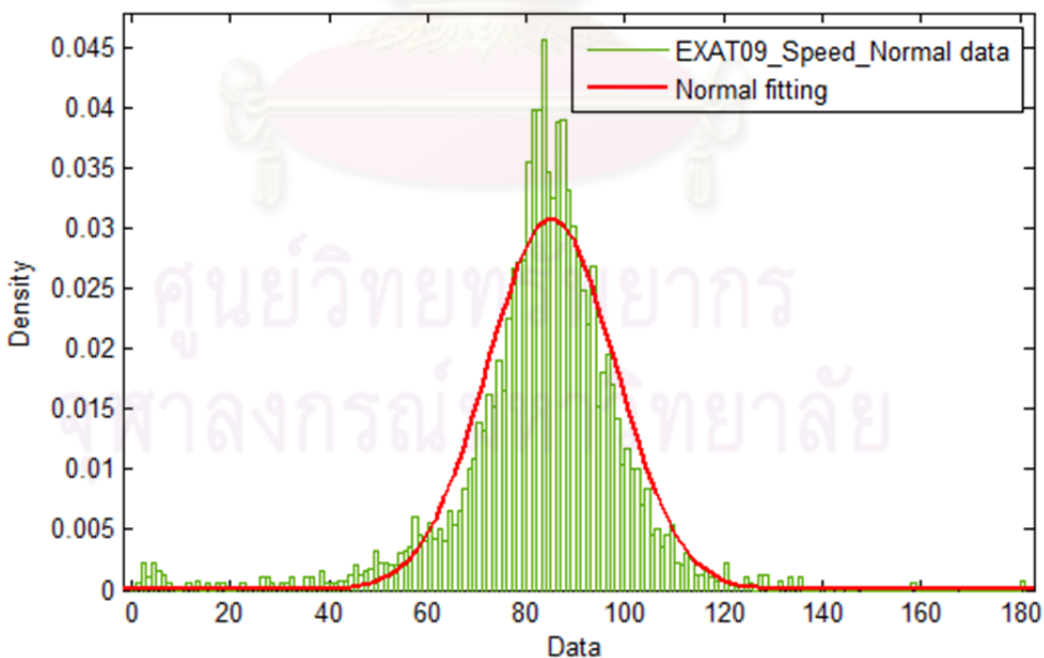
รูปที่ 3.4.3.7-3 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT02 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป



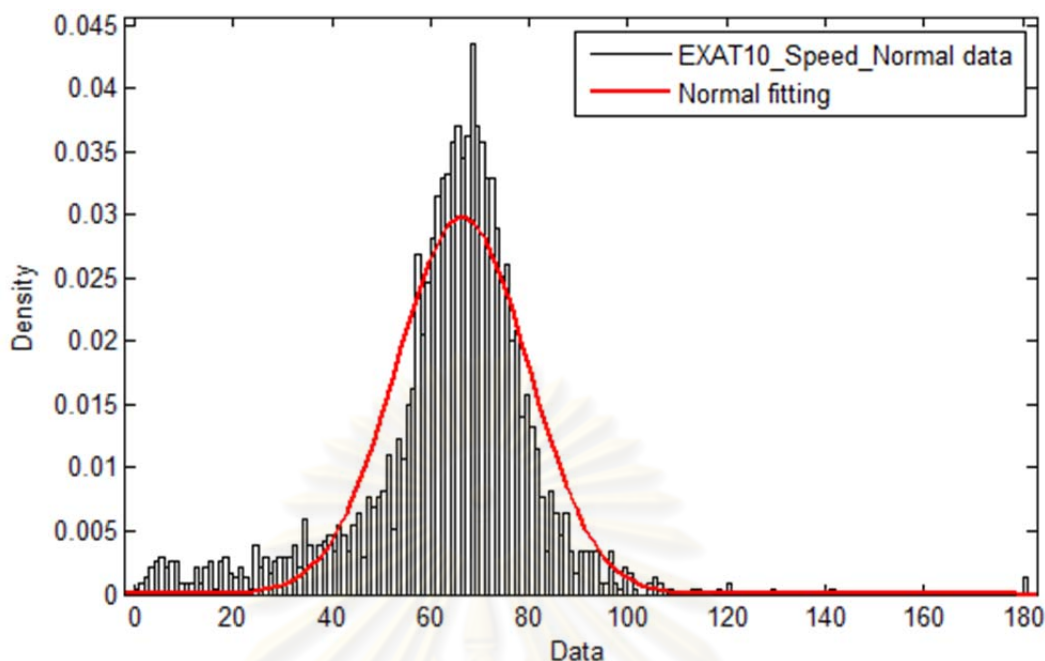
รูปที่ 3.4.3.7-4 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT03 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป



รูปที่ 3.4.3.7-5 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT07 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป



รูปที่ 3.4.3.7-6 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT09 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป



รูปที่ 3.4.3.7-7 การทำนายเพื่อกำจัดข้อมูลความเร็วทางด่วนดาวคะนอง  
กล้อง EXAT10 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของเครื่องและจำแนกต่อไป

#### ข. กำหนดค่าขีดแบ่งเพื่อเลือกชุดข้อมูลการจราจรปกติ

อ้างอิงทฤษฎีลิมิตเข้าสู่ส่วนกลาง (Central Limit Theorem) เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีจำนวนมากว่า 100 ตัวอย่าง ซึ่งในที่นี้มีประมาณกว่า 1,600,000 ตัวอย่าง สำหรับถนนคลองหลวง และ 100,000 ตัวอย่างของทางด่วนดาวคะนอง จึงประมาณว่ากลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 เดือนที่ใช้ในงานวิจัยมีการกระจายตัวประมาณได้ว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ จากนั้นจึงจัดให้ข้อมูลในช่วง  $\pm 1SD$  จากค่าเฉลี่ย (Mean) ของการจราจรปกติและการจราจรติดขัดเป็นการจราจรปกติและการจราจรติดขัดตามลำดับซึ่งจะได้ กลุ่มชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการเรียนและจำแนกประเภทดังต่อไปนี้

กำหนดให้  $x$  เป็นข้อมูลในช่วงที่ต้องการ

- ถนนคลองหลวงช่องจราจรฝั่งขาเข้า กลุ่มข้อมูลการจราจรปกติคือ  

$$83.69 < x < 129.39 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-1)$$
- ถนนคลองหลวงช่องจราจรฝั่งขาออก กลุ่มข้อมูลการจราจรปกติคือ  

$$99.50 < x < 142.28 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-2)$$
- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่ม 1 มีชุดข้อมูลการจราจรปกติคือ  

$$84.00 < x < 120.06 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-3)$$

- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่ม 2 มีชุดข้อมูลการจราจรปกติคือ

$$62.07 < x < 119.38 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-4)$$

7) กำหนดค่าขีดแบ่งข้อมูลสำหรับการจราจรติดขัด (Threshold for Congestion Traffic) เมื่อได้ค่าขีดแบ่งข้อมูลสำหรับการจราจรปกติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะมีการคำนวณหาชุดข้อมูลการจราจรติดขัดเช่นเดียวกับค่าขีดแบ่งสำหรับข้อมูลการจราจรปกติ โดยการคำนวณค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในขณะที่มีการจราจรติดขัด

ก. คำนวณเพื่อหาค่าขีดแบ่ง จากหัวข้อ 3.4.3-2 จะได้ จำนวนการจราจรติดขัดในทิศทางขาเข้ากรุงเทพจำนวน 19 ครั้ง ขาออกกรุงเทพจำนวน 19 ครั้ง จากถนนคลองหลวง และทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 จำนวน 5 ครั้ง และ 18 ครั้ง ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าดังต่อไปนี้

**ถนนคลองหลวงทิศทางขาเข้ากรุงเทพมหานคร**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 29.56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.91 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ถนนคลองหลวงทิศทางขาออกกรุงเทพมหานคร**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 27.82 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนองฝั่งกลุ่มที่ 1 (Group I)**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 12.18 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

**ทางด่วนดาวคะนองฝั่งกลุ่มที่ 2 (Group II)**

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 7.21 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.64 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ข. กำหนดค่าขีดแบ่ง กำหนดให้ ค่า +1SD จากค่า Mean เป็นการจราจรติดขัด จะได้ กลุ่มชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการเรียนและจำแนกประเภทดังต่อไปนี้

กำหนดให้  $x$  เป็นข้อมูลในช่วงที่ต้องการ

- ถนนคลองหลวง ฝั่งขาเข้ากรุงเทพ กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 38.47 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-5)$$

- ถนนคลองหลวง ฝั่งขาออกกรุงเทพ กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 35.20 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-6)$$

- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 16.53 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-7)$$

- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 12.85 \quad \dots\dots\dots (3.4.3-8)$$

จากสมการที่ 3.4.3-5 ถึง 3.4.3-8 สามารถทำให้อยู่ในรูปของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ยของการจราจรปกติจะได้อีกต่อไปนี้

กำหนดให้

$y_n$  เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการจราจรปกติ

$\sigma_n$  เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการจราจรปกติ

$\bar{x}_n$  เป็นค่าเฉลี่ยการจราจรปกติ

$\bar{y}_n$  เป็นค่าเฉลี่ยการจราจรติดขัด

$n$  1 = ถนนคลองหลวงช่องทางขาเข้า

2 = ถนนคลองหลวงช่องทางขาออก

3 = ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

4 = ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

สำหรับถนนคลองหลวงช่องทางจราจรขาเข้า จะได้

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{\bar{x}_1 - \bar{y}_1}{\sigma_1} \quad \dots\dots\dots (3.4.3-9) \\ &= 3.02 \\ &\approx 3 \end{aligned}$$

สำหรับถนนคลองหลวงช่องทางจราจรขาออก จะได้

$$\begin{aligned} y_2 &= \frac{\bar{x}_2 - \bar{y}_2}{\sigma_2} \quad \dots\dots\dots (3.4.3-10) \\ &= 4.01 \\ &\approx 4 \end{aligned}$$

สำหรับทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 จะได้

$$\begin{aligned} y_3 &= \frac{\bar{x}_3 - \bar{y}_3}{\sigma_3} \quad \dots\dots\dots (3.4.3-11) \\ &= 4.02 \\ &\approx 4 \end{aligned}$$

สำหรับทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 จะได้

$$\begin{aligned}
 y_4 &= \frac{\bar{x}_2 - \bar{y}_2}{\sigma_2} && \dots\dots\dots (3.4.3-12) \\
 &= 3.49 \\
 &\approx 3.5
 \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการ 3.4.3-5 ถึง 3.4.3-8 ได้ใหม่ดังนี้

- ช่องจราจรฝั่งขาเข้ากรุงเทพ กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 3SD_{\text{Normal Traffic}} \dots\dots\dots (3.4.3-13)$$

- ช่องจราจรฝั่งขาออกกรุงเทพ กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 4SD_{\text{Normal Traffic}} \dots\dots\dots (3.4.3-14)$$

- ช่องจราจรฝั่งขาออกกรุงเทพ กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 4SD_{\text{Normal Traffic}} \dots\dots\dots (3.4.3-15)$$

- ช่องจราจรฝั่งขาออกกรุงเทพ กลุ่มข้อมูลการจราจรติดขัดคือ

$$x \leq 3.5SD_{\text{Normal Traffic}} \dots\dots\dots (3.4.3-16)$$

8) สร้างฐานข้อมูลการจราจรจริง เมื่อได้ข้อมูลครบถ้วนเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการสร้างฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการวิจัยต่อไป ซึ่งประกอบด้วย เวลาที่มีการจราจรติดขัด, ความเร็วในขณะนั้น ซึ่งสามารถเข้าไปดูฐานข้อมูลได้ที่แผ่นซีดีแนบ

### 3.5 ข้อมูลจากการจำลองสภาพการจราจร (Simulation Data)

เนื่องจากข้อมูลดิบจากสภาพการจราจรจริงอาจจะมีค่าหรือปัจจัยภายนอกที่ควบคุมไม่ได้จนส่งผลกระทบต่อค่าตัวแปรชีวิตที่ใช้ในงานวิจัย ดังนั้นจึงเลือกศึกษาข้อมูลจากโปรแกรมจากการจำลองควบคู่กันไป โดยกำหนดสภาวะแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับสภาพการจราจรจริง เพื่อดูผลกระทบต่อตัวแปรชีวิตเหล่านั้นเมื่อเกิดการจราจรติดขัด อย่างไรก็ตามข้อมูลจากการจำลองจะนำมาพิจารณาเพื่อแนวทางเทียบกับข้อมูลจริงเท่านั้น ไม่ได้นำมาใช้กำหนดแนวทางวิจัยให้เป็นไปตามข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองแต่อย่างใด เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการนำไปใช้จำแนกข้อมูลที่มาจากสภาพการจราจรจริง ซึ่งได้ใช้โปรแกรม Aimsun Simulation 6 Professional เป็นโปรแกรมจำลองข้อมูลสภาพการจราจร ที่ได้ถูกพัฒนาโดย J. Barcelo และ J.L. Ferrer ที่ The Polytechnic University of Catalunya ในเมือง Barcelona ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและจัดจำหน่ายในเชิงการค้าโดยบริษัท Transport Simulation Systems (TSS) [20] และได้มีการใช้งานในมหาวิทยาลัยชั้นนำทั่วโลก



### 3.5.1 กำหนดตัวแปรที่ใช้จำลองสภาพการจราจรจริง

ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกการจำลองสภาพการจราจรบนทางหลวงคลองหลวงแบบจุลภาค (Microscopic Simulation) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของรถยนต์แต่ละคัน และค่าต่างๆ ทั้ง 2 ทิศทางการจราจร อย่างละเอียด นั่นคือ ทิศทางขาเข้ากรุงเทพมหานคร และทิศทางขาออกมุ่งหน้าสู่จังหวัดอยุธยา และมีการกำหนดค่าอื่นๆ ให้เหมาะสมกับสภาพการจราจรจริงดังต่อไปนี้

#### 3.5.1.1 ปริมาณรถยนต์ที่เข้าสู่ระบบการจำลอง

กำหนดให้จำนวนรถที่เข้าสู่ระบบเท่ากับค่าเฉลี่ยของปริมาณรถขาเข้าและขาออกจากกรุงเทพฯ จากข้อมูลจริงในช่วง 6 เดือน ที่ได้มาใช้ในการวิจัย โดย

- กำหนดจำนวนรถในทิศทางขาเข้ากรุงเทพฯ เท่ากับ 10,035 คัน
- กำหนดจำนวนรถในทิศทางขาออกกรุงเทพฯ เท่ากับ 35,195 คัน

นอกจากนี้ในหัวข้อ 3.4.3.5 จะพบว่ารูปแบบการเคลื่อนตัวของรถที่เข้าสู่กล้องวงจรปิดเป็นแบบ Exponentials จึงกำหนดให้การเคลื่อนตัวของรถที่เข้าสู่แบบจำลอง (Arrival) เป็นแบบ Exponentials ใน โปรแกรม Aimsun

#### 3.5.1.2 แบบจำลองการเคลื่อนตัวของรถ

เนื่องจากถนนคลองหลวงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นทางหลวง (Highway) ซึ่งจากงานวิจัยแบบจำลองของ Gipps [3] พบว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ตามกันของรถแต่ละคัน (Car Following Model) แบบ Minimum Headway มีความเหมาะสมและเสมือนจริงมากที่สุดสำหรับการเคลื่อนตัวบนทางหลวง จึงกำหนดการเคลื่อนตัวเป็นแบบ Minimum Headway ใน โปรแกรมจำลองสภาพการจราจร

#### 3.5.1.3 ลักษณะทางกายภาพ (Physical Address)

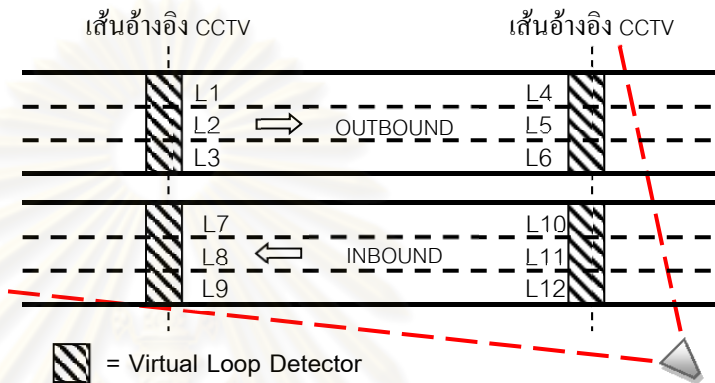
เพื่อให้เกิดความเหมือนจริงมากที่สุด ได้กำหนดลักษณะทางกายภาพของถนนที่นำมาจำลองให้ลักษณะเหมือนของจริงมากที่สุด

##### ก. ลักษณะทางกายภาพของถนน กำหนดดังนี้

- จำนวนช่องทางการจราจร 3 ช่องทางการจราจร ในแต่ละทิศทางสัญจร
- ความยาว 7,500 เมตร โดยไม่มีทางเข้าออก โดยมีตำแหน่งติดตั้งกล้องวงจรปิดเสมือนที่จุดกึ่งกลาง เพื่อวัดรถที่ไหลเข้าและออกจากระบบ
- ความเร็วสูงสุดที่ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามข้อกำหนดของกฎหมายไทยบนทางหลวง
- รูปแบบถนนเป็นทางหลวง Highway
- ความจุถนนที่ 6,300 คันต่อชั่วโมง

**ข. ตำแหน่งตัวตรวจจับ (Detectors)**

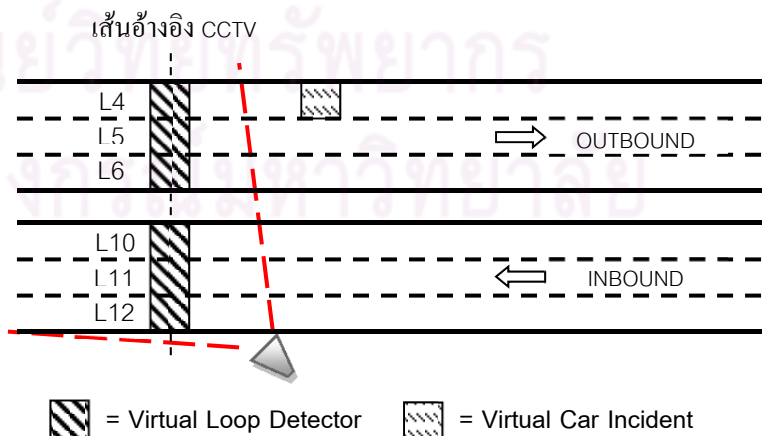
- ติดตั้ง Loop Detector จำนวน 2 ตัว ต่อ 1 ช่องทางการจราจร บนตำแหน่งที่เซ็นเซอร์ ของกล้องวงจรปิด ทำการตรวจจับรถเข้า และออก จากภาพ รวมทั้งสิ้น 12 ตัว ดังรูปที่ 3.4.1-1
- กำหนดความเร็วในการตรวจจับทุกๆ 0.05 วินาที ซึ่งจะเท่ากับความเร็วในการตรวจจับของกล้องวงจรปิดที่ 20 ภาพต่อวินาที (frame/second)



รูปที่ 3.5.1-1 การติดตั้ง Loop Detector เพื่อจำลอง CCTV

**ค. การจำลองสภาพการจราจรติดขัด**

การจำลองปิดช่องทางการจราจร โดยการจำลองรถยนต์ 1 คันให้หยุดนิ่งในหนึ่ง หรือ 2 ช่องทางการจราจรเลียนแบบการติดขัดจริงตามฐานข้อมูลการจราจรติดขัด ดังภาพที่ 3.5.1-2 และภาพ 3.5.1-3 แสดงการจำลองการติดขัดจากอุบัติเหตุในวันที่ 27 ธันวาคม 2551



รูปที่ 3.5.1-2 การจำลองอุบัติเหตุ



รูปที่ 3.5.1-3 การจำลองอุบัติเหตุใน โปรแกรม Aimsun

### 3.5.2 ข้อมูลที่ได้จากการจำลอง

เมื่อได้ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรม Aimsun ให้เหมือนสภาพการจราจรจริงบนถนน คลองหลวงเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการจำลองสภาพการจราจรจริง ซึ่งได้ข้อมูลที่มีการกระจาย ตัวดังรูปที่ 3.5.2-1 และ 3.5.2-2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าทางสถิติได้ดังนี้

#### ทิศทางขาเข้ากรุงเทพมหานคร

##### ช่องทางซ้ายสุด (ช่องทางช้า)

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 105.97 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 9.06 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

##### ช่องทางกลาง

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 112.66 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.95 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

##### ช่องทางขวา (ช่องทางเร็ว)

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 114.21 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.61 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

##### เฉลี่ยรวม 3 ช่องทาง

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 109.32 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 9.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

#### ทิศทางขาออกกรุงเทพมหานคร

##### ช่องทางซ้ายสุด (ช่องทางช้า)

- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 102.37 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.23 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

### ช่องทางกลาง

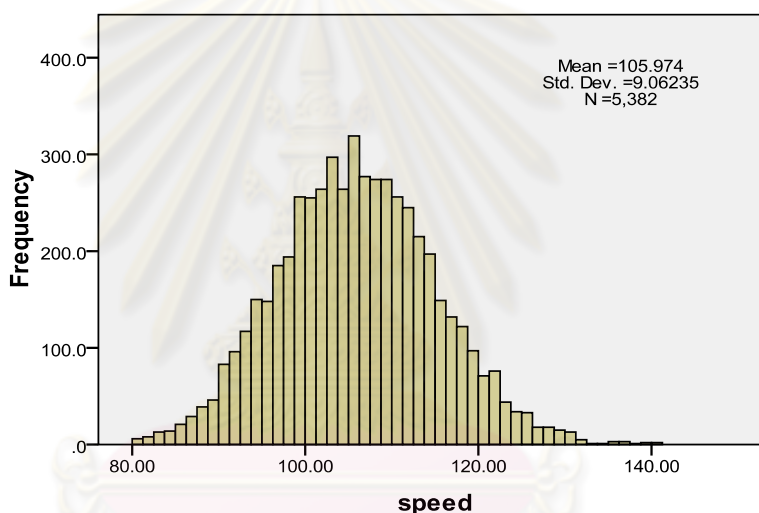
- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 108.66 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.79 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

### ช่องทางขวา (ช่องทางเร็ว)

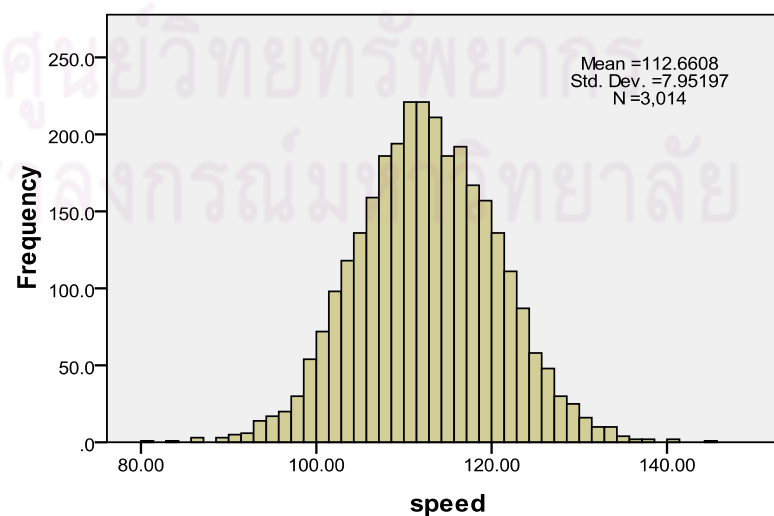
- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 113.47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

### เฉลี่ยรวม 3 ช่องทาง

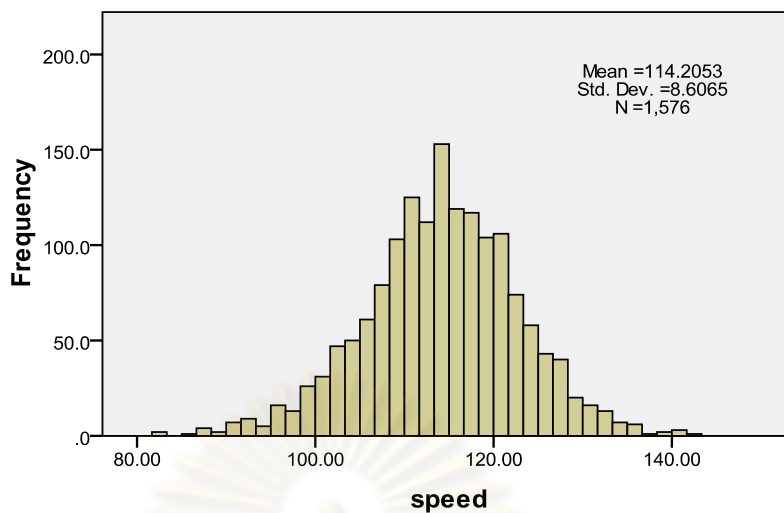
- ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 107.02 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.27 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



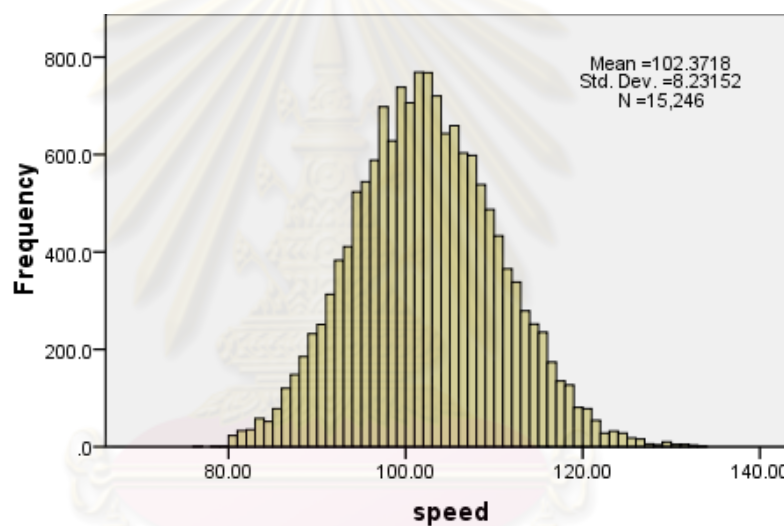
รูปที่ 3.5.2-1 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้าช่องทางซ้าย



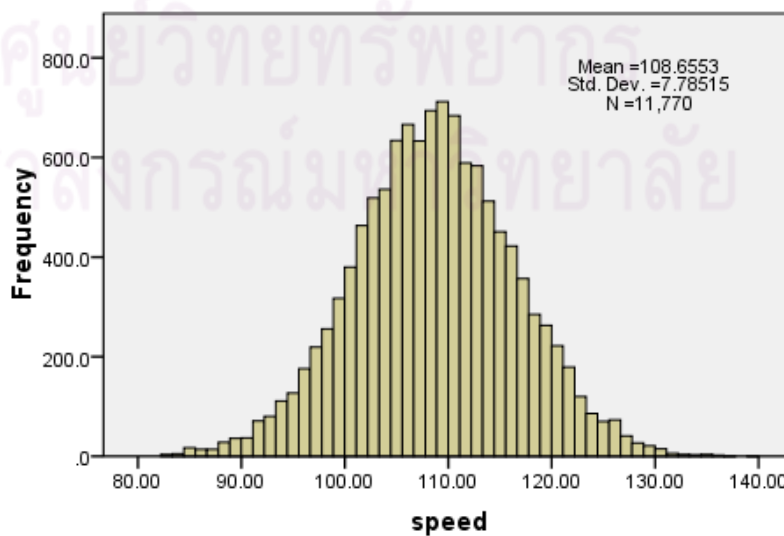
รูปที่ 3.5.2-2 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้าช่องทางกลาง



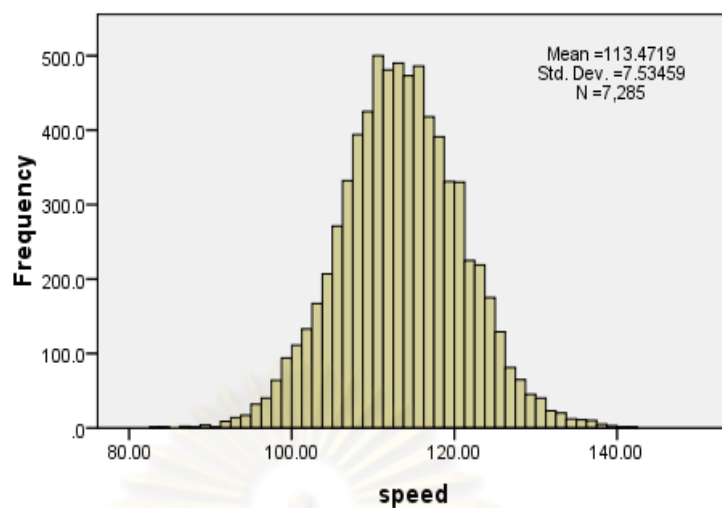
รูปที่ 3.5.2-3 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้าช่องทางขวา



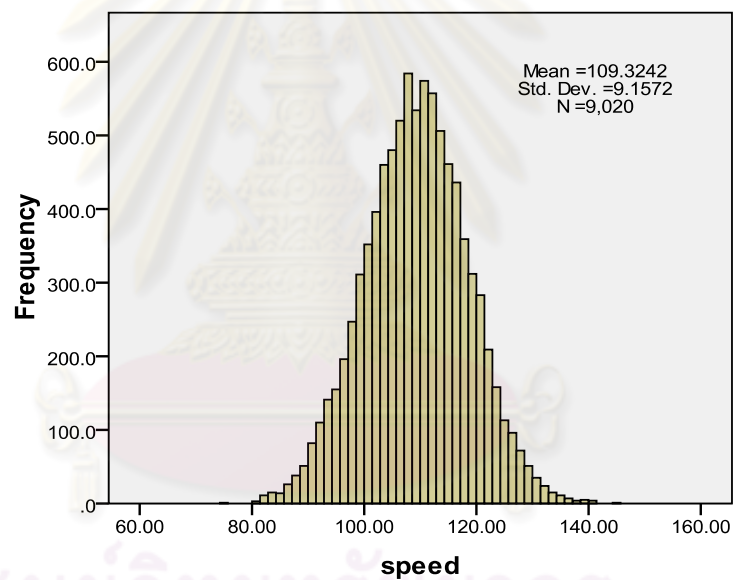
รูปที่ 3.5.2-4 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกช่องทางซ้าย



รูปที่ 3.5.2-5 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกช่องทางกลาง

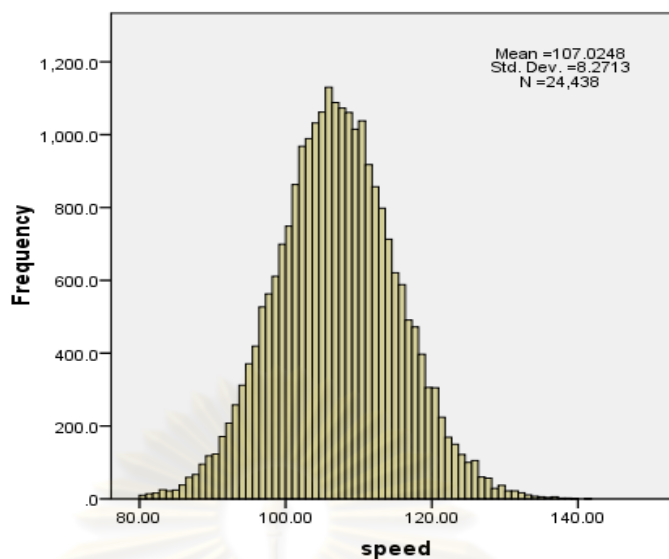


รูปที่ 3.5.2-6 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกช่องทางขวา



รูปที่ 3.5.2-7 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้ารวมสามช่องทาง

ศูนย์วิจัยจราจร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5.2-8 การกระจายความเร็วทิศทางขาออกรวมสามช่องทาง

เมื่อทดสอบชุดข้อมูลที่ได้จากการจำลองทั้งขาเข้าและขาออกกรุงเทพ ด้วยสถิติ Komolgorov-Smirnov พบว่ามีการแจกแจงเป็นแบบ Normal อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น (Confidential) 95%

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

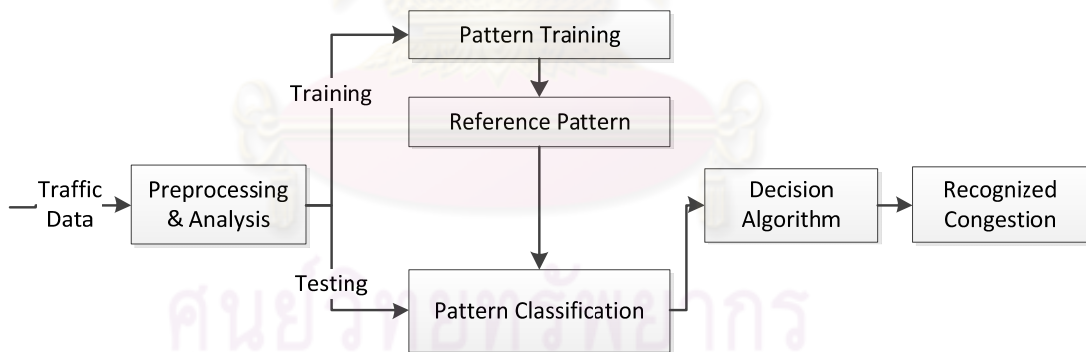
## บทที่ 4

### การออกแบบและพัฒนาแบบจำลองเพื่อค้นหาและทำนายสภาพการจราจรติดขัด

#### บทนำ

กระบวนการพัฒนาแบบจำลองเพื่อค้นหาและทำนายสภาพการจราจรติดขัดในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะประกอบไปด้วยอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วาร์ปิง ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยเสนอ และอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเทียบเคียง โดยทั้งสองอัลกอริทึมจะอาศัยการฝึกฝน (Training) เพื่อรู้จำรูปแบบอ้างอิง (Reference Patterns) จากข้อมูลสภาพการจราจรที่มีการติดขัดจริง เพื่อไว้ใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลการจราจรใหม่ที่ยังไม่ทราบรูปแบบ และจะใช้รูปแบบอ้างอิงที่ใกล้เคียงที่สุด ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลการจราจรเหล่านั้น ซึ่งขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลอง ผู้วิจัยจะขอแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การประมวลข้อมูลเบื้องต้น (Data Preprocessing)
2. การจำแนกรูปแบบ (Pattern Classification) หรือ การทดสอบความคล้ายคลึงกันของรูปแบบ (Pattern Similarity Testing)
3. กระบวนการตัดสินใจ (Decision Algorithm)



รูปที่ 4-1 แบบจำลองการค้นหาและทำนายสภาพการจราจรติดขัด

แบบจำลองเพื่อค้นหาและทำนายสภาพการจราจรติดขัด แสดงได้ดังรูปที่ 4-1 ซึ่งเทคนิคการประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นได้ถูกกล่าวไว้บ้างแล้วในบทที่ 3 เพื่อกำจัดข้อมูลที่ไม่อยู่ในขอบเขตสนใจของงานวิจัยนี้ออกไป และในบทนี้จะกล่าวถึงการประมวลผลข้อมูลที่เหลือในส่วนของ การปรับเรียบข้อมูลแล้วจึงนำข้อมูลประมวลผลค่าตัวแปรชี้วัด จากนั้นจึงกล่าวถึงการรู้จำแบบจำลองเพื่อสร้างรูปแบบที่ใช้อ้างอิง ตามด้วยจำแนกและทำนายข้อมูลการจราจรติดขัดด้วยอัลกอริทึมทั้ง 2 ชนิดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์ ได้ถูกพัฒนาให้คล้ายคลึงกับอัลกอริทึมต้นแบบในงานวิจัยของ Oh et al. [4] เพื่อใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับอัลกอริทึม



ไดนามิกซ์-ไทม์วาร์ปิง (Dynamic Time Warping) อัลกอริทึมทางอนุกรมเวลาที่ผู้วิจัยเสนอ โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการจะแตกต่างกันตามลักษณะเฉพาะทางอัลกอริทึมเอง

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดการทำงานของแต่ละอัลกอริทึม ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการวิเคราะห์และคัดเลือกตัวแปรชี้วัด (Algorithm Indicator หรือ Algorithm Feature) สำหรับอัลกอริทึมทั้งคู่ก่อน ในหัวข้อ 4.1 และจึงกล่าวถึงรายละเอียดการทำงานของอัลกอริทึมในหัวข้อถัดไป

#### 4.1 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่จะนำไปสู่สภาพการจราจรติดขัด

ก่อนที่จะกล่าวถึงการพัฒนาอัลกอริทึมทางคอมพิวเตอร์เพื่อจำแนกสภาพการจราจรติดขัด จำเป็นต้องวิเคราะห์หาตัวแปรที่เปลี่ยนไปอย่างชัดเจน เมื่อสภาพการจราจรมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพการจราจรปกติดำเนินไปสู่การจราจรติดขัด เพื่อนำไปใช้สร้างรูปแบบอ้างอิง (Reference Pattern) ต่อไป

##### 4.1.1 ตัวแทนตัวแปรที่ให้ความสนใจเพื่อใช้สำหรับอัลกอริทึม (Candidate Indicator)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจข้อมูลสภาพการจราจรช่วงการเปลี่ยนแปลงไปสู่การติดขัด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.4.1 มีตัวแปรชี้วัดที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจ ได้แก่

- ความเร็วเฉลี่ย (Speed)
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย (SD of Speed)
- ปริมาณการจราจร (Flow)
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณการจราจร

สำหรับตัวแปรระยะห่างระหว่างรถ (Headway) ไม่สามารถหาได้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลที่วิเคราะห์รวมทั้ง 3 เลนพร้อมกัน จึงทำไม่ได้ให้ระยะห่างระหว่างรถคันหน้าต่อคันหลังที่แท้จริงตามนิยาม ถึงแม้จะถูกคัดแยกชุดข้อมูลความเร็วตัวออกไปแล้วในหัวข้อ 3.4.3.7-ก ก็ยังไม่สามารถระบุช่องทางที่แท้จริงของรถแต่ละคันได้ และยังมีงานวิจัยของ Lee et al. [23] ที่สนับสนุนว่าระยะห่างระหว่างรถไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างช่วงการเปลี่ยนแปลงจากการจราจรปกติไปสู่การจราจรติดขัด โดยรายละเอียดของตัวแปรแต่ละประเภทได้ถูกกล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.1.2.2.1

##### 4.1.2 ประยุกต์ใช้สถิติทดสอบแบบทีเพื่อทดสอบความแตกต่างของตัวแปรชี้วัด

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการทดสอบค่าที่เปลี่ยนไปของตัวแปรชี้วัดเพื่อหาความแตกต่างระหว่างสภาพการจราจรปกติ และสภาพการจราจรติดขัดด้วยวิธีทางสถิติ โดยการอ้างอิงจากทฤษฎีลิมิตเข้าสู่ส่วนกลาง (Central limit theorem) [23] ที่กล่าวไว้ว่า “ไม่ว่าประชากรมีการกระจายแบบใดๆ ก็ตาม ตัวอย่างขนาด  $n$  ตัวที่สุ่มจากกลุ่มประชากรนั้น มีการกระจายตัวใกล้เคียงปกติมากขึ้นเมื่อขนาดของตัวอย่าง  $n$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และถ้า  $n \geq 30$  แล้ว การแจกแจงของกลุ่มตัวอย่างสามารถประมาณได้ด้วยการแจกแจงปกติ” ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้การทดสอบ

ความแตกต่างกันของข้อมูลแบบมีพารามิเตอร์ด้วยคะแนนแจกแจงแบบที หรือ Student's t Test ซึ่งใช้ทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่มีการกระจายตัวแบบปกติได้เลย

#### 4.1.3 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลในช่วงเวลาการจราจรที่กำลังดำเนินไปสู่การจราจรติดขัด เปรียบเทียบกับข้อมูลในช่วงเวลาการจราจรปกติ โดยประกอบด้วยชุดข้อมูลดังต่อไปนี้

##### 4.1.3.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

เพื่อที่จะได้ชุดข้อมูลที่มีลักษณะหรือปัจจัยภายนอกอื่นที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกันมากที่สุด ผู้วิจัยจะคำนวณค่าทางสถิติหากในช่วงเวลาดังกล่าวที่กำหนดดังต่อไปนี้

- ช่วงเวลา 15 นาที ก่อนและหลังจากการจราจรติดขัด
- ช่วงเวลาเดียวกัน ก่อนและหลัง 1 วันจากการจราจรติดขัด
- ช่วงเวลาเดียวกัน ก่อนและหลัง 1 สัปดาห์จากการจราจรติดขัด

โดยมีเงื่อนไขให้มีการคำนวณค่าทางสถิติเมื่อช่วงเวลาดังกล่าวมีการจราจรปกติ แต่ถ้าหากช่วงเวลาดังกล่าวมีการจราจรติดขัด หรือกำลังดำเนินการไปสู่การจราจรติดขัดแล้ว จะละเว้นการคำนวณค่าทางสถิติของช่วงเวลานั้น เมื่อคำนวณครบทุกช่วงเวลาแล้ว จึงเลือกใช้ค่าทางสถิติที่แย่ที่สุด (Worst Case) หรือค่าคะแนนที่น้อยที่สุด ซึ่งแสดงความแตกต่างกันน้อยที่สุดมาเป็นตัวแทนของตัวแปรนั้น

##### 4.1.3.2 ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบ (Interval)

จากข้อมูลปฐมภูมิที่ผู้วิจัยได้รับมาเป็นข้อมูลการจราจรที่ละเอียดมากในระดับรายคัน ทำให้สามารถหาช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบแต่ละตัวแปรได้ ซึ่งจะเลือกใช้ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ซึ่งได้แก่ 1-นาที 3-นาที และ 5-นาที ตามอัลกอริทึมที่ใช้งานจริงในกล้องวงจรปิด (CCTV) ของ NECTEC อยู่ในปัจจุบัน สำหรับการนำไปเปรียบเทียบ

#### 4.1.4 ผลการทดสอบ

ผลการคำนวณค่าทางสถิติด้วยคะแนนที่ได้แสดงไว้อย่างละเอียดในตารางที่ 4.1.4-1 โดยหัวตารางแสดงช่วงเวลา ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ และค่าเฉลี่ยของคะแนนของแต่ละทิศทางการจราจรที่ทดสอบเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.3.1 โดยในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าเชื่อมั่นทางสถิติที่ 95% ซึ่งเป็นระดับความเชื่อมั่นที่มีความสำคัญสูงและใช้ในการทดสอบโดยทั่วไป ซึ่งส่งผลให้ค่า P-Value ที่แสดงในหัวตาราง Candidate ที่เป็นค่าสัมบูรณ์ของระดับนัยสำคัญทางสถิติ ต้องต่ำกว่า 0.05 จึงจะบ่งบอกว่าค่าทางสถิติที่คำนวณได้นั้นมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.1.4-1 ผลการทดสอบค่าทางสถิติด้วยคะแนนที่ทิศทางขาเข้า

Interval	Candidates		Mean of t-Test Score					
			15-Minute		1-Day		1-Week	
			Before	After	Before	After	Before	After
1-Minute	Mean	Speed	<u>4.93</u>	4.99	4.99	4.87	5.22	5.42
		P-Value	$5 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$
		Flow	-0.86	-0.95	<u>-0.83</u>	-1.23	-1.62	-1.63
		P-Value	0.41	0.52	<u>0.75</u>	0.43	0.55	0.56
	SD	Speed	<u>3.77</u>	3.78	3.92	4.12	4.24	4.29
		P-Value	$8 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$
3-Minute	Mean	Speed	3.01	2.89	2.54	<u>2.31</u>	3.52	3.65
		P-Value	0.02	0.03	0.02	<u>0.03</u>	0.03	0.03
		Flow	-0.90	-0.85	<u>-0.62</u>	-0.66	-1.51	-1.50
		P-Value	0.54	0.52	<u>0.55</u>	0.56	0.65	0.69
	SD	Speed	<u>2.01</u>	2.02	2.15	2.34	2.95	2.40
		P-Value	<u>0.04</u>	0.05	0.06	0.06	0.08	0.09
5-Minute	Mean	Speed	2.95	2.76	<u>2.57</u>	2.87	2.89	2.85
		P-Value	0.012	0.022	<u>0.032</u>	0.022	0.01	0.01
		Flow	-0.50	0.54	<u>-0.43</u>	-0.65	-0.59	-0.70
		P-Value	0.20	0.40	<u>0.69</u>	0.52	0.58	0.65
	SD	Speed	2.01	<u>1.99</u>	2.26	2.10	1.95	1.92
		P-Value	0.09	<u>0.11</u>	0.059	0.052	0.04	0.04

ค่าคะแนนที่มีค่าน้อยที่สุดดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1.3.1 สำหรับทิศทางขาเข้าจะถูกเลือกเป็นตัวแทนของตัวแปรนั้นของแต่ละช่วงเวลา ซึ่งได้สรุปไว้แล้วในตารางที่ 4.1.4-2

ตารางที่ 4.1.4-2 ผลสรุปคะแนนที่ ช่องการจราจรขาเข้า

Candidates	Speed		Flow
	Mean	SD	Mean
1-Min	<u>4.93</u>	<u>3.77</u>	-0.83
3-Min	3.40	2.01	-0.63
5-Min	2.57	1.99	-0.43

ตารางที่ 4.1.4-3 ผลการทดสอบค่าทางสถิติด้วยคะแนนที่ทิศทางขาออก

Interval	Candidates		Mean of t-Test Score					
			15-Minute		1-Day		1-Week	
			Before	After	Before	After	Before	After
1-Minute	Mean	Speed	3.93	4.99	4.99	4.87	5.22	5.42
		P-Value	$4 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$
		Flow	-0.79	-0.95	-0.83	-1.23	-1.62	-1.63
		P-Value	0.49	0.52	0.75	0.43	0.55	0.56
	SD	Speed	3.54	3.78	3.92	4.12	4.24	4.29
		P-Value	$8 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$
3-Minute	Mean	Speed	3.01	2.89	2.54	2.10	3.52	3.65
		P-Value	0.02	0.03	0.02	0.05	0.03	0.03
		Flow	-0.68	-0.75	-0.64	-0.66	-0.79	-1.06
		P-Value	0.09	0.11	0.41	0.12	0.55	0.009
	SD	Speed	2.11	2.22	3.03	2.89	3.01	2.89
		P-Value	0.05	0.06	0.10	0.04	0.05	0.05
5-Minute	Mean	Speed	2.52	2.23	1.88	1.95	2.01	2.23
		P-Value	0.02	0.01	0.03	0.009	0.01	0.02
		Flow	-0.75	-0.98	-0.74	-0.75	-0.78	-0.85
		P-Value	0.40	0.25	0.50	0.35	0.52	0.24
	SD	Speed	1.89	1.79	1.87	1.90	1.95	1.98
		P-Value	0.04	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05

ดังเช่นข้อมูลทิศทางขาเข้าค่าคะแนนที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับทิศทางขาออกจะถูกเลือกเป็นตัวแทนของตัวแปรนั้นของแต่ละช่วงเวลา ซึ่งได้สรุปไว้แล้วในตารางที่ 4.1.4-4

ตารางที่ 4.1.4-4 ผลสรุปคะแนนที่ ช่องการจราจรขาออก

Candidates	Speed		Flow
	Mean	SD	Mean
1-Min	3.93	3.57	-0.79
3-Min	2.10	2.09	-0.64
5-Min	1.88	1.79	-0.74

#### 4.1.5 สรุปผลการทดสอบคะแนนที่

จากผลการคำนวณค่าคะแนนที่แสดงในตารางด้านบนจะเห็นว่า ค่าคะแนนที่คำนวณได้จากทั้งสองทิศทางการจราจรมีค่าที่สอดคล้องกัน นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของความเร็ว (Mean) ของการจราจรที่กำลังดำเนินการไปสู่การจราจรติดขัดมีความแตกต่างกับการจราจรปกติมากที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อพิจารณาประกอบกับค่า P-Value และรองลงมาคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว (SD of Speed) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน ส่วนปริมาณการจราจร (Flow) จะมีค่าคะแนนที่ที่น้อยที่สุด และค่าคะแนนที่ที่คำนวณได้นั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาตามช่วงเวลาแล้วจะพบว่า เมื่อช่วงเวลาที่ใช้ลดลง ค่าความแตกต่างทางสถิติจะมีค่ามากขึ้น และในส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วจะมีมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวแปรที่ให้ความแตกต่างกันของการจราจรที่ดำเนินไปสู่การติดขัดและการจราจรปกติมากที่สุดซึ่งก็คือ

- ค่าเฉลี่ยของความเร็ว (Mean Speed)
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว (SD of Speed)

ที่ช่วงเวลาการคำนวณ (Interval) 1 นาที

#### 4.2 การประมวลข้อมูลเบื้องต้น (Data Preprocessing)

ขั้นตอนนี้เป็นเตรียมข้อมูลให้มีความพร้อมและเหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการนำไปใช้งานต่อไป

##### 4.2.1 การปรับเรียบข้อมูลและการประมาณค่าที่ขาดหาย

เนื่องจากข้อมูลการจราจรมีความแปรปรวนมากและบางครั้งก็อาจมีการหยุดทำงานไปบ้างจึงทำให้ข้อมูลขาดหายไป จึงจำเป็นต้องปรับเรียบข้อมูลและประมาณค่าที่ขาดไปก่อนที่นำมาใช้ในการรู้จำรูปแบบอ้างอิง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 การปรับเรียบแบบ Exponential ได้ถูกเลือกมาใช้ ที่ช่วงการปรับเรียบเท่ากับ 5 ค่า โดยใช้เทคนิคการปรับเรียบแบบทันกาล [19] ซึ่งมีการทำงานดังต่อไปนี้

จากตาราง 4.2.1-1 กำหนดให้มีการรับข้อมูลป้อนมาทุกเวลาที่กำหนด โดยเริ่มตั้งแต่วเวลา  $T_1$  ที่มีค่าข้อมูล  $V_1$  และเป็นเช่นนี้เรื่อยๆ จนถึงค่า  $T_n$  ในการปรับเรียบข้อมูลแบบทันกาลสำหรับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การปรับเรียบ 5 ลำดับด้วยกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยจะเริ่มดำเนินการข้อมูลในลำดับที่ 5 เป็นต้นไป นั่นคือ จะเริ่มการปรับเรียบข้อมูลครั้งแรกเมื่อมีข้อมูลครบ 5 ตัว นั่นคือ ที่ตำแหน่ง  $T_5$  และกำหนดให้ข้อมูลที่ปรับเรียบแล้ว เป็นตัวแปร  $S_n$  ดังนั้นจากสมการ 3.3.2-1 จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{นั่นคือ } S_5 &= \alpha V_5 + \alpha(1-\alpha)V_4 + \alpha(1-\alpha)^2 V_3 + \\
 &\quad \alpha(1-\alpha)^3 V_2 + \alpha(1-\alpha)^4 V_1 \\
 \text{หรือ } S_6 &= \alpha V_6 + \alpha(1-\alpha)V_5 + \alpha(1-\alpha)^2 V_4 + \\
 &\quad \alpha(1-\alpha)^3 V_3 + \alpha(1-\alpha)^4 V_2 \\
 \text{ดังนั้น } S_n &= \sum_{n,a=0}^{n-4,a=4} \alpha(1-\alpha)^a V_n \quad \dots\dots\dots(4.2.1-1)
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.2.1-1 แสดงการปรับเรียบแบบทันกาล

Time	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	...	T <sub>n</sub>
Data	V1	V2	V3	V4	V5	V6	Null	V8	...	V <sub>n</sub>
Smooth					S5	S6	S7	S8	...	S <sub>n</sub>

แต่ถ้าข้อมูลเกิดสูญหายไปเนื่องจากกล้องหยุดทำงาน หรือไม่มีรถเคลื่อนที่เข้าสู่กล้องเลยดังเช่นตำแหน่ง T7 ดังนั้นก่อนการปรับเรียบ จำเป็นที่จะต้องประมาณค่าที่ขาดหายไป และเนื่องจากการปรับเรียบจะได้ใช้ช่วงการเรียบ (Span) 5 ค่าล่วงหน้า ดังนั้นจึงใช้ข้อมูล 5 ค่าเฉลี่ยข้อมูลก่อนหน้าที่ใกล้ที่สุด ดังนั้น

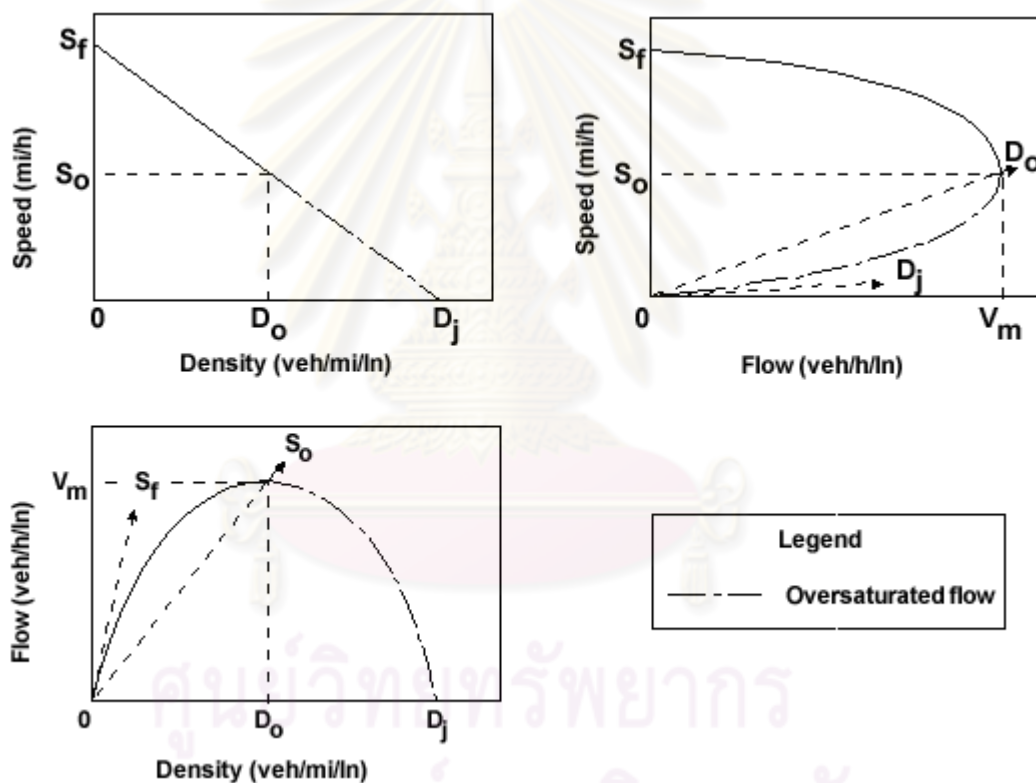
$$V_{\text{Missing}} = \frac{\sum_{i=1}^5 \text{Nearest}(V_i)}{5} \quad \dots\dots\dots(4.2.1-2)$$

เมื่อประมาณค่าที่ขาดหายไปด้วยค่าเฉลี่ย 5 ค่าที่ใกล้ที่สุดเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการปรับเรียบตามสมการ (4.2.1-1) ต่อไป

#### 4.2.2 การวัดค่าตัวแปรชี้วัด และเงื่อนไขในการเริ่มต้นและสิ้นสุดแบบจำลอง (Feature Measurement & Triggering Algorithm)

การที่ให้แบบจำลองประมวลผลข้อมูลเพื่อหาการจราจรติดขัดตลอดเวลานั้น จะเป็นการสิ้นเปลืองการทรัพยากรของระบบ และทำให้ความถูกต้องของผลลัพธ์จากการประมวลผลเช่นนี้ลดน้อยลง [14,15] ทั้งนี้เนื่องมาจากแบบจำลองได้ให้ความสนใจในข้อมูลที่ไม่ต้องการมากเกินไป อีกทั้งยังไม่มีควมจำเป็นที่ต้องประมวลผลข้อมูลชุดนั้นอีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงที่สุด จึงกำหนดเงื่อนไขในการเริ่มต้นประมวลผลแบบจำลองตามลักษณะตัวแปรที่ใช้จำแนกสภาพการจราจร (Precursors) ที่ได้จากหัวข้อ 4.1 ไว้ดังนี้ โดยมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการเคลื่อนตัวของจราจร (Traffic Flow Theory) โดยจะพิจารณาจากรูปที่ 4.2.2-1 ในแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเร็ว (Speed) กับ

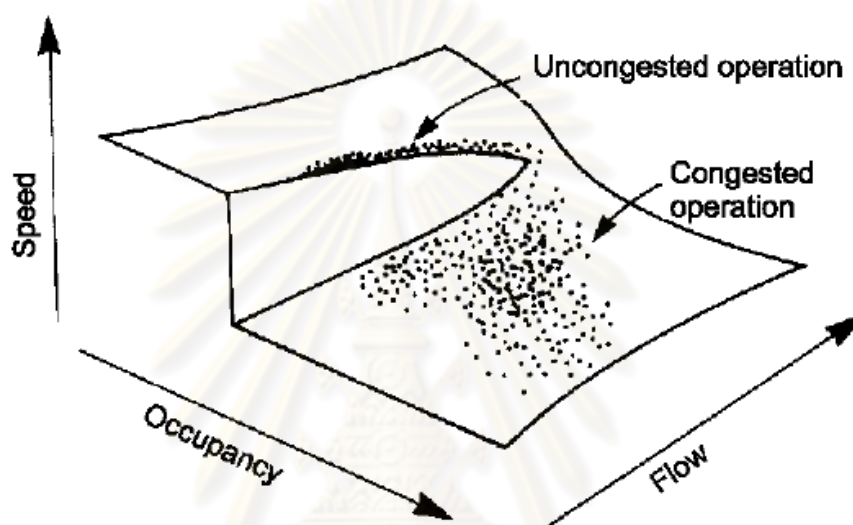
ความหนาแน่น (Density) ที่แปรผกผันกัน กล่าวคือ ถ้ารถยนต์ที่ใช้บริการวิ่งด้วยความเร็วที่สูงขึ้น จะทำให้สามารถให้บริการของถนนเส้นนั้น (Density) ลดน้อยลงส่งผลให้ปริมาณการเคลื่อนตัว (Flow) ลดน้อยลงไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการตอบสนองของคน (Reaction Time) คงที่ จึงทำให้ต้องใช้ระยะห่างระหว่างรถ (Headway) ที่มากขึ้นเมื่อมีความเร็วสูงขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเร็ว (Speed) กับอัตราการเคลื่อนตัว (Flow) จะมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งพาราโบลา โดยมีอัตราการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ตำแหน่ง  $D_0$  ซึ่งให้ค่าความเร็วที่  $S_0$  และอัตราการเคลื่อนตัวที่  $V_{Max}$  โดยที่อัตราการเคลื่อนตัวใดๆ ที่ต่ำกว่า  $V_{Max}$  จะสามารถหาความเร็วได้ 2 ค่า ได้แก่ ความเร็วสูงซึ่งเป็นความเร็วของการจราจรเคลื่อนตัวอิสระหรือไม่มีการจราจรติดขัด และความเร็วต่ำซึ่งเป็นความเร็วของการจราจรติดขัด



รูปที่ 4.2.2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเร็ว (Speed) ความหนาแน่น (Density) และอัตราการเคลื่อนตัว (Flow) ตามทฤษฎีการจราจร[11]

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรนี้โดยเฉพาะจะพบว่า ความสัมพันธ์เป็นในลักษณะ Empirical Equation ซึ่งประกอบด้วยพหุนามเชิงซ้อนหลายพจน์ และแตกต่างกันไปตามถนนแต่ละเส้น แต่ยังคงมีลักษณะของความสัมพันธ์คล้ายเส้นโค้งพาราโบลา โดยที่ความเร็วเฉลี่ยสูงกว่าตำแหน่ง  $S_0$  จะเป็นความเร็วอิสระของการจราจรปกติไม่มีการติดขัดซึ่งการกระจายตัวของความเร็วของรถแต่ละคันจะค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน และมีการกระจายสูงขึ้น

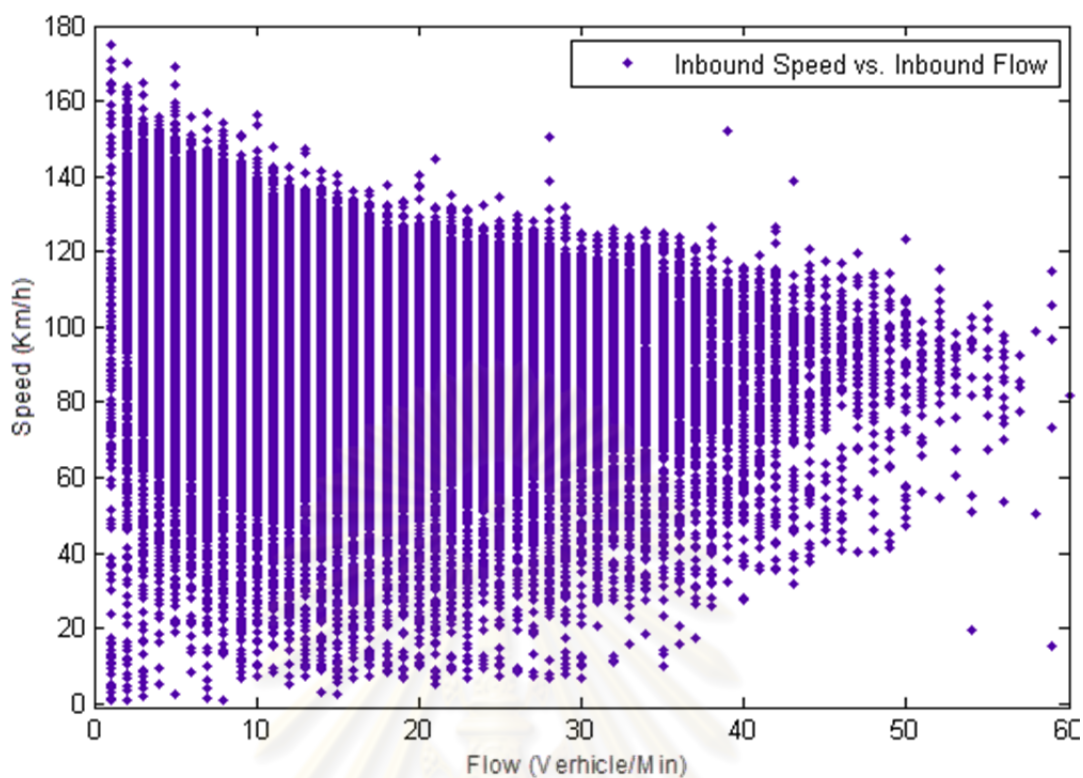
อย่างมากที่บริเวณใกล้จุดที่อัตราการเคลื่อนตัวสูงสุด ( $V_{Max}$ ) เมื่อความเร็วเฉลี่ยลดต่ำกว่าตำแหน่ง  $S_0$  หรือ  $V_{Max}$  จะเป็นความเร็วของการจราจรที่เริ่มเคลื่อนตัวช้าลงเข้าสู่การติดขัด ซึ่งการกระจายตัวของความเร็วของรถแต่ละคันจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นมากเมื่อความเร็วลดลงใกล้ตำแหน่งศูนย์หรือตำแหน่งที่มีการจราจรติดขัด (Traffic Jam) เกิดขึ้น ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.2.2-2 พื้นผิวการกระจายตัวจะค่อนข้างเป็นระนาบขนานแกน X ที่ใกล้กับตำแหน่งความเร็วสูงสุด และตำแหน่งความเร็วต่ำสุด



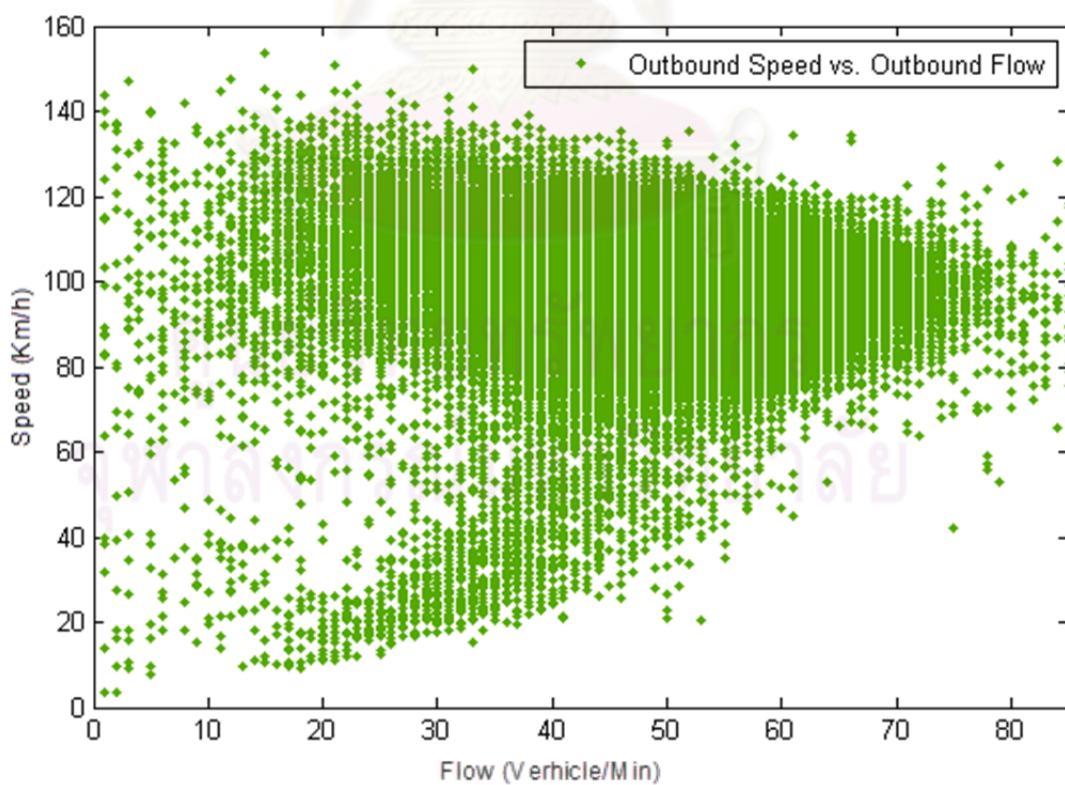
รูปที่ 4.2.2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัว

จากทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวที่สามารถแยกสภาพการจราจรติดขัดออกจากจราจรปกติได้ที่ตำแหน่งอัตราการเคลื่อนตัวสูงสุด ดังนั้นจะประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ลักษณะดังกล่าวเป็นแนวทางสำหรับอัลกอริทึมเริ่มต้นการทำงาน (Triggering Algorithm) กล่าวคือ ประยุกต์ใช้ตำแหน่ง  $S_0$  สำหรับอัลกอริทึมเริ่มต้นของตัวแปรชี้วัดความเร็วเฉลี่ยและประยุกต์ใช้ลักษณะของการกระจายตัวของความเร็วซึ่งบ่งบอกถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการจราจรติดขัดสำหรับอัลกอริทึมเริ่มต้นของตัวแปรชี้วัดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย และเมื่อนำข้อมูลดิบสภาพการจราจรที่ผู้วิจัยใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวตามทฤษฎีการเคลื่อนตัวของจราจรของถนนคลองหลวงจะได้ดังรูปที่ 4.2.2-3 และ 4.2.2-4





รูปที่ 4.2.2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวทิศทางขาเข้า



รูปที่ 4.2.2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวทิศทางขาออก

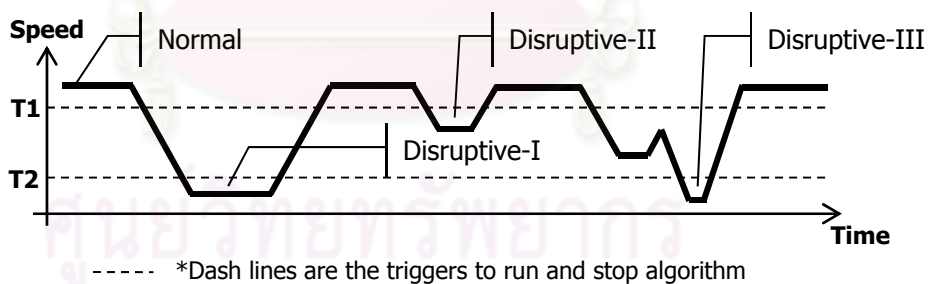
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการเคลื่อนตัวของทางด่วนดาวคะนอง สามารถดูได้จากภาคผนวก ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของข้อมูลดิบที่ใช้ จะมีลักษณะตรงตามทฤษฎี การเคลื่อนตัวของสภาพการจราจร แต่เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างมากจึงเป็นการยากที่คำนวณเพื่อหาสมการดังกล่าว ดังนั้นจึงจะใช้วิธีการทางสถิติสร้างรูปแบบการกระจายตัวและฟังก์ชันความน่าจะเป็นของข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่าขีดแบ่งดังจะได้กล่าวต่อไป

#### 4.2.2.1 การวิเคราะห์ตัวแปรความเร็วเฉลี่ยการจราจร

ในตัวแปรความเร็วเฉลี่ย (Speed) ได้กำหนดเงื่อนไข (Trigger) ในการเริ่มต้นการทำงานของแบบจำลองไว้ที่จุด T1 และ T2 ดังได้แสดงในรูปที่ 4.2.1-1 โดยตำแหน่งของ T1 และ T2 จะคำนวณจากค่าทางสถิติดังต่อไปนี้

- |          |                |  |
|----------|----------------|--|
| กำหนดให้ | Normal         | แสดงความเร็วเฉลี่ยปกติเมื่อไม่มีการจราจรติดขัด   |
|          | Disruptive-I   | เป็นจุดที่มีการจราจรติดขัด มีความเร็วเฉลี่ยลดลงชัดเจน  |
|          | Disruptive-II  | มีการลดลงของความเร็วเฉลี่ยแต่ไม่มีการจราจรติดขัด   |
|          | Disruptive-III | มีการลดลงของความเร็วเฉลี่ยแต่มีการเพิ่มสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้นก่อนจะลดลงเข้าสู่การจราจรติดขัด |



รูปที่ 4.2.2.1-1 แสดงเงื่อนไขในการเริ่มทำงานของแบบจำลอง

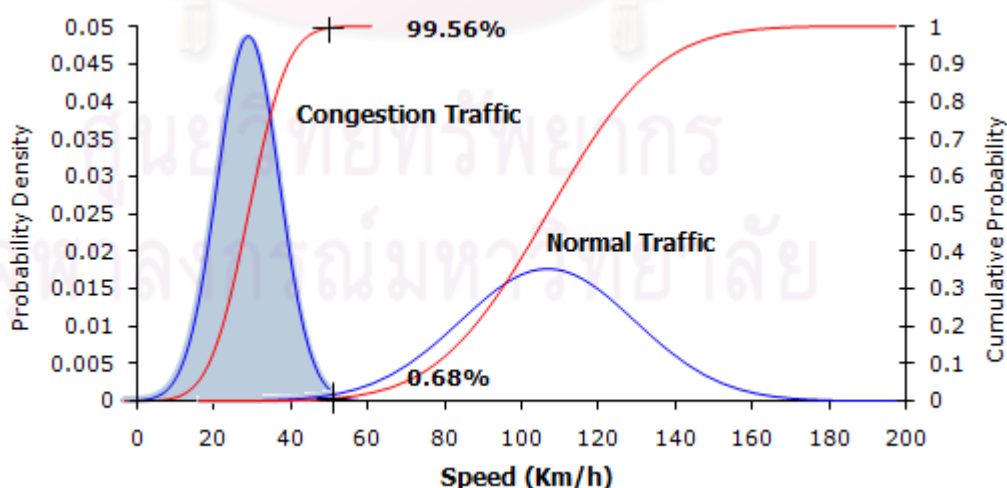
จากการวิเคราะห์ข้อมูลในบทที่ 3 สามารถสรุปค่าทางสถิติของการกระจายตัวแยกตามทิศทางการจราจรได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2.1-1 สรุปค่าการกระจายของความเร็วเฉลี่ย

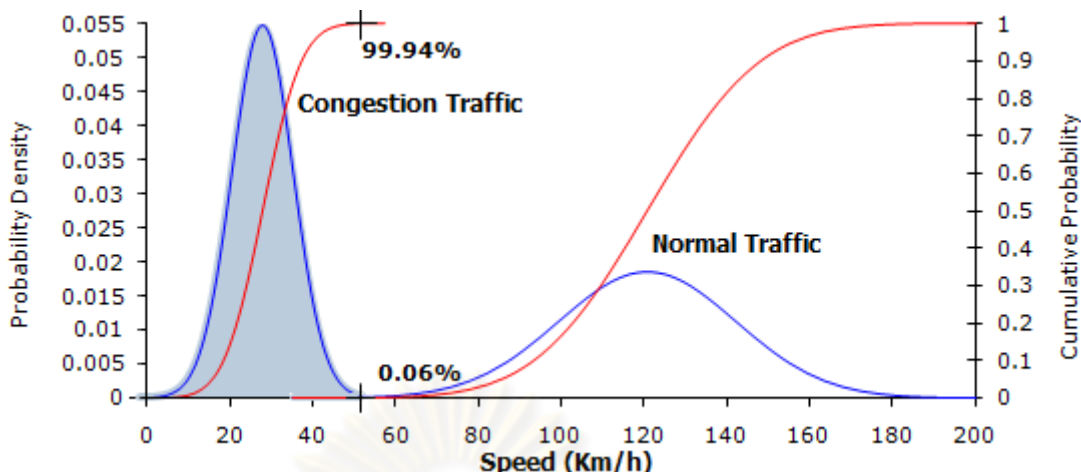
ทิศทาง	ค่าการกระจาย	การจราจรปกติ	การจราจรติดขัด
ขาเข้า	Mean	106.79	29.56
	SD	22.60	8.91
ขาออก	Mean	120.89	27.82
	SD	21.39	7.30

### ก. การวิเคราะห์หาตำแหน่งของ T1

ตำแหน่ง T1 เป็นจุดเริ่มต้นให้มีการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.3 ทราบแล้วว่าการจราจรปกติ ความเร็วเฉลี่ยจะมีการกระจายปกติ ซึ่งจากตาราง 4.2.1-1 สามารถสร้างแผนภาพการกระจายตัวได้ดังรูปที่ 4.2.1-2 และ 4.2.1-3 โดยจะสามารถคำนวณหาจุดตัดระหว่างการกระจายทั้งสองได้ดังภาพด้านล่าง เพื่อใช้เป็นค่า T1 เนื่องจากเป็นจุดความน่าจะเป็นวิกฤต (Critical Point) ระหว่างการจราจรปกติกับการจราจรติดขัด กล่าวคือ ถ้าความเร็วมากกว่าจุดวิกฤต ความเร็วดังกล่าวมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นการจราจรปกติมากกว่าการจราจรติดขัด ในทางกลับกันถ้าความเร็วน้อยกว่าจุดวิกฤต ความเร็วดังกล่าวมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นการจราจรติดขัดมากกว่าการจราจรปกติ โดยเส้นสีฟ้าแสดงความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือความถี่ (Frequency) ส่วนเส้นสีแดงแสดงความน่าจะเป็นสะสมหรือความถี่สะสม



รูปที่ 4.2.1-2 การกระจายความเร็วทิศทางขาเข้า



รูปที่ 4.2.1-3 การกระจายความเร็วทิศทางขาออก

กำหนดให้ X แทนค่า SD หนึ่งหน่วยสมมติ (Unit SD) ดังนั้นที่จุดตัดของการกระจาย

$$\begin{aligned}
 \text{ทิศทางขาเข้า ; } 106.79 - 22.60X &= 29.56 + 8.91X \\
 X &= \frac{106.76 - 29.56}{22.60 + 8.91} \\
 &= 2.45 \\
 \text{จะได้จุดตัดที่ความเร็ว} &= 106.76 - 22.60(2.45) \\
 &= 51.39 \text{ Km/h} \\
 \text{หรือ} &= -2.45SD_{\text{Normal Traffic}} \dots\dots(4.2.1-1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ทิศทางขาออก ; } 120.89 - 21.39X &= 27.82 + 7.30X \\
 X &= \frac{120.89 - 27.82}{21.39 + 7.30} \\
 &= 3.24 \\
 \text{จะได้จุดตัดที่ความเร็ว} &= 120.89 - 21.39(3.24) \\
 &= 51.58 \text{ Km/h} \\
 \text{หรือ} &= -3.24SD_{\text{Normal Traffic}} \dots\dots(4.2.1-2)
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \text{ทิศทางการจราจรขาเข้า} & \quad T1 = -2.45SD_{\text{Normal Traffic}} \\
 \text{ทิศทางการจราจรขาออก} & \quad T1 = -3.24SD_{\text{Normal Traffic}}
 \end{aligned}$$

ข. การวิเคราะห์หาตำแหน่งของ T2

สำหรับตัวแปรชี้วัดความเร็วเฉลี่ยมีค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่าย และพบได้บ่อยครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วจนมีระดับต่ำกว่าค่า T1 เพียงเล็กน้อย และ

กลับเพิ่มขึ้นไปสู่ความเร็วเฉลี่ยปกติ ดังนั้นเพื่อประหยัดทรัพยากรการประมวลผล ข้อมูลที่ไม่จำเป็น ผู้วิจัยจึงได้กำหนดค่า T2 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับขอบเขตการ จำแนกสภาพการจราจรปกติออกจากการจราจรติดขัด กล่าวคือ จะนำข้อมูลไป ประมวลผลหากจุดต่ำสุดหรือความเร็วเฉลี่ยต่ำสุดมีค่าต่ำกว่าค่าขีดแบ่ง T2 แต่ถ้า หากความเร็วเฉลี่ยไม่ลดลงต่ำกว่าจุดนี้ จะไม่นำข้อมูลที่เก็บไปประมวลผล (Early abandon) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตำแหน่งของ 1xSD ของค่าเฉลี่ย ความเร็วช่วงเวลาที่มีการจราจรติดขัดหรือขอบเขตการจำแนกว่าเป็นการจราจร ติดขัดในหัวข้อ 3.4.3.7 ซึ่งจากสมการ 3.4.3-7 และ 3.4.3-8 จะได้ค่า T2 ดังต่อไปนี้

$$\text{ทิศทางการจราจรขาเข้าใช้ค่า} \quad T2 = -3SD_{\text{Normal Traffic}}$$

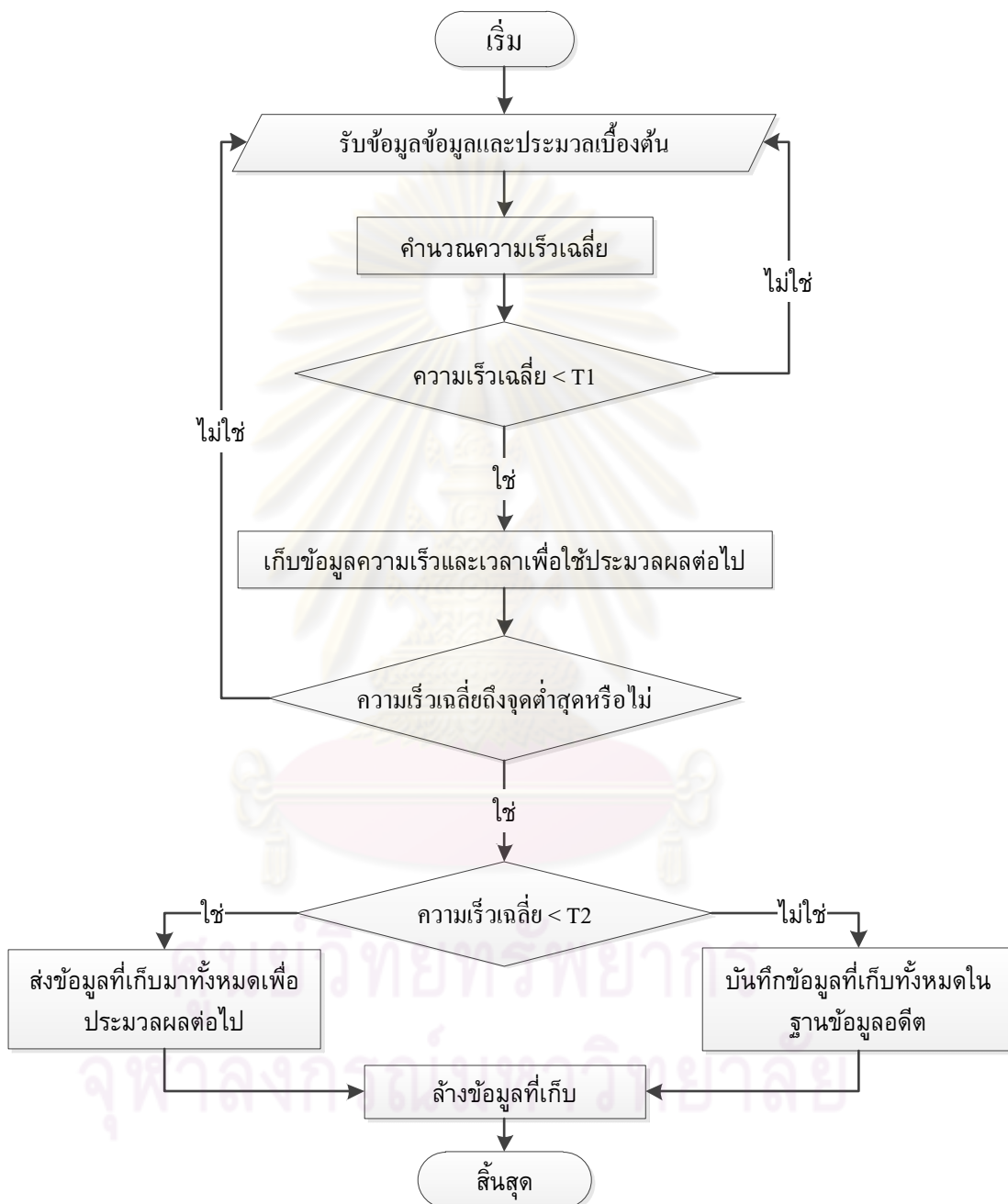
$$\text{ทิศทางการจราจรขาออก} \quad T2 = -4SD_{\text{Normal Traffic}}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.2.2 การออกแบบอัลกอริทึมเริ่มต้นและสิ้นสุดสำหรับความเร็วเฉลี่ย

เมื่อได้ตำแหน่งของ T1 และ T2 แล้ว จะออกแบบการทำงานของอัลกอริทึมให้มีความสามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการ ดังแสดงในแผนผังลำดับงานต่อไปนี้



รูปที่ 4.2.2-4 แสดงแผนภาพลำดับงานการทำงานของอัลกอริทึมเริ่มต้นแบบจำลอง

#### กรณีที่ 1 เกิดการจราจรติดขัด

ลักษณะของกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.1-1 ที่ตำแหน่ง Disruptive-I โดยความเร็วเฉลี่ยจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดต่ำสุด ที่มีระดับต่ำกว่า T2 ซึ่ง

เป็นระดับที่บ่งบอกว่ามีการจลาจลติดขัด จะออกแบบให้อัลกอริทึมมีการทำงานดังต่อไปนี้

- ความเร็วเฉลี่ยลดลงจากความเร็วปกติถึงระดับ T1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บ่งบอกให้อัลกอริทึมเริ่มเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป
- อัลกอริทึมจะตรวจสอบหาตำแหน่งที่มีความเร็วต่ำสุด
- ความเร็วเฉลี่ยยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนเลยระดับ T2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บ่งบอกให้อัลกอริทึมนำข้อมูลไปประมวลผลหรือไม่
- เมื่อความเร็วถึงจุดต่ำที่สุด ข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมด จะถูกนำไปประมวลผลตามแต่และอัลกอริทึม ซึ่งได้แก่อัลกอริทึมไดนามิกไทม์วอร์ปปีง และการเรียนรู้แบบเบย์

### กรณีที่ 2 ความเร็วเฉลี่ยลดลงแต่ไม่เกิดการจลาจลติดขัด

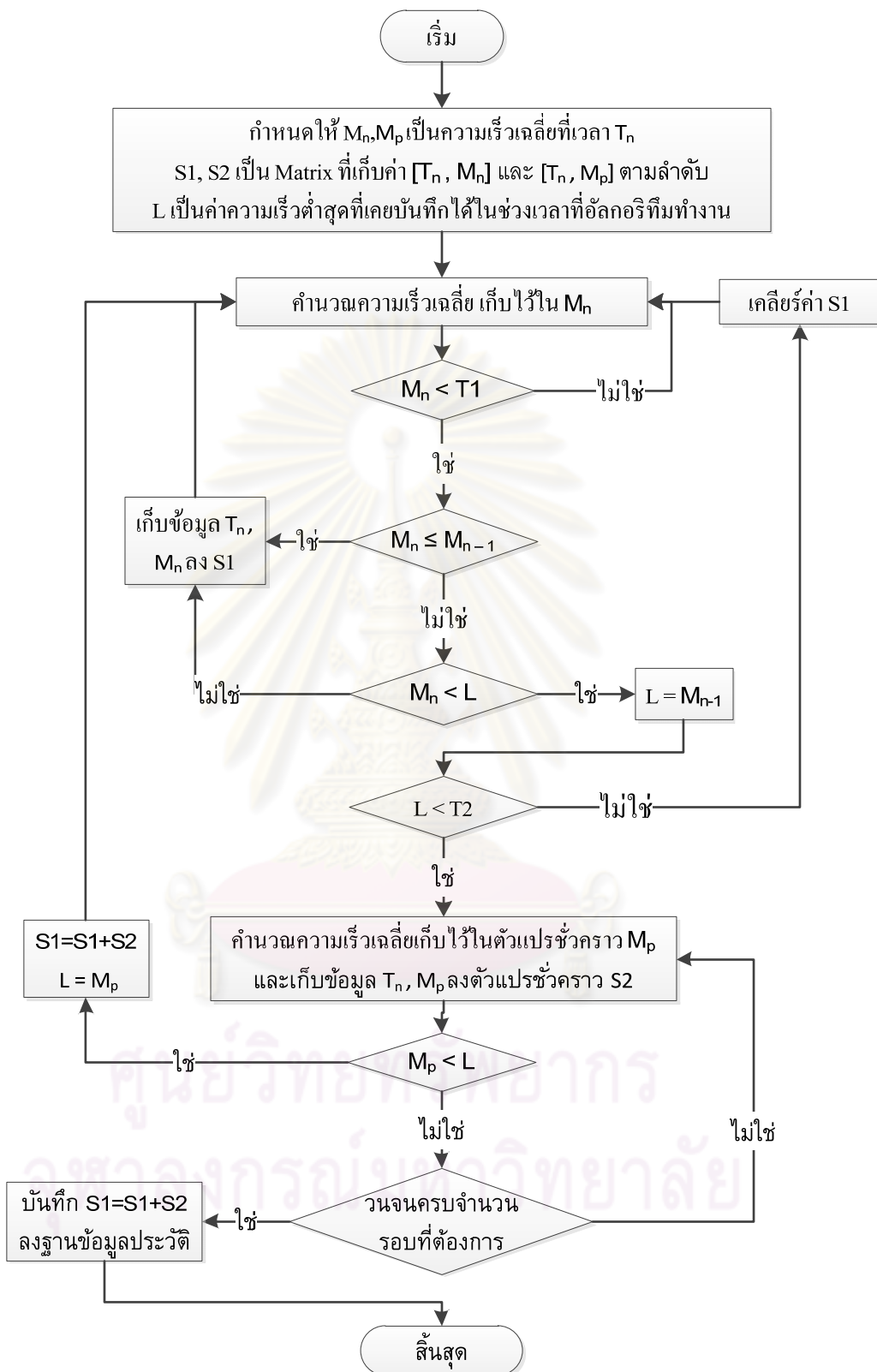
ลักษณะของกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.1-1 ที่ตำแหน่ง Disruptive-II โดยความเร็วเฉลี่ยลดลงจนถึงจุดต่ำสุด แต่ไม่ถึงระดับการจลาจลติดขัด T2 จะออกแบบให้อัลกอริทึมมีการทำงานดังต่อไปนี้

- ความเร็วเฉลี่ยลดลงจากความเร็วปกติถึงระดับ T1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บ่งบอกให้แบบจำลองเริ่มเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป
- ความเร็วเฉลี่ยลดลง แต่ยังไม่ถึงถึงระดับ T2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บ่งบอกให้อัลกอริทึมนำข้อมูลไปประมวลผลหรือไม่ ก็กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งแสดงในตำแหน่ง Disruptive-II
- เมื่อความเร็วเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอัลกอริทึมจะยุติการเก็บข้อมูล
- ละเว้นข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมด และไม่นำไปประมวลผล

### กรณีที่ 3 เกิดการจลาจลติดขัดแต่ความเร็วเฉลี่ยลดลงไม่ต่อเนื่อง

ลักษณะของกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.1-1 ที่ตำแหน่ง Disruptive-III โดยความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่องต่ำกว่าระดับ T1 แต่กลับเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่สูงกว่าระดับ T1 และลดลงเป็นเช่นไปเรื่อยจนลดถึงระดับต่ำสุดที่ตำแหน่งต่ำกว่า T2 ที่มีการจลาจลติดขัด จะออกแบบให้อัลกอริทึมมีการทำงานเพื่อให้สามารถจำแนกการจลาจลติดขัดรูปแบบนี้ได้ดังต่อไปนี้

- ความเร็วเฉลี่ยลดลงจากความเร็วปกติถึงระดับ T1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บ่งบอกให้แบบจำลองเริ่มเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป



รูปที่ 4.2.2-5 แสดงการทำงานจริงของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้

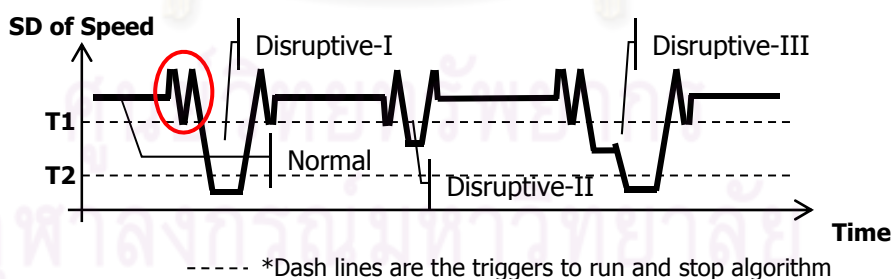


- ความเร็วเฉลี่ยลดลง แต่ยังไม่ถึงถึงระดับ T2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้อัลกอริทึมนำข้อมูลไปประมวลหรือไม่ ก็กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งแสดงในตำแหน่ง Disruptive-III
- อัลกอริทึมจะตรวจสอบต่อไปข้างตามแกนเวลา เท่ากับจำนวนครั้งที่ต้องการเพื่อดูว่าความเร็วมีแนวโน้มลดลงหรือเพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ใช้ตรวจสอบจะค่าเฉลี่ยมากที่สุดที่เกิดการติดขัดแบบนี้เกิดขึ้น ซึ่งเท่ากับ 7 นาที
- หากความเร็วเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอีกครั้ง ให้หาจุดต่ำสุดอีกครั้ง และนำข้อมูลทั้งหมดไปประมวลผล
- แต่ถ้าหากครบกำหนด 7 นาทีแล้วยังไม่มีแนวโน้มลดลง จะบันทึกข้อมูลที่เก็บมาทั้งหมดลงฐานข้อมูลประวัติ (History Database) เพื่อเก็บไว้ใช้ประโยชน์ในอนาคต และสิ้นสุดการคำนวณ

อัลกอริทึมที่ครอบคลุมทั้ง 3 กรณีสามารถเขียนได้ดังแบบภาพลำดับงานที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2.1-5

#### 4.2.2.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยการจราจร

ในตัวแปรส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย (SD of Speed) การทำงานของอัลกอริทึมจะเป็นเช่นเดียวกับตัวแปรความเร็วเฉลี่ยข้างต้น โดยได้กำหนดเงื่อนไข (Trigger) ในการเริ่มต้นอัลกอริทึมไว้ที่จุด T1 และ T2 ดังได้แสดงในรูปที่ 4.2.2-1 โดยมีการทำงานของอัลกอริทึมดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2.2-1 แสดงเงื่อนไขในการเริ่มทำงานของแบบจำลอง

- |          |              |  |
|----------|--------------|--|
| กำหนดให้ | Normal       | แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยปกติเมื่อไม่มีการจราจรติดขัด                        |
|          | Disruptive-I | เป็นจุดที่มีการจราจรติดขัด ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน |

Disruptive-II มีการเปลี่ยนแปลงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  
ความเร็วเฉลี่ยแต่ไม่มีการจราจรติดขัด

Disruptive-III มีการเปลี่ยนแปลงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  
ความเร็วเฉลี่ยแต่ไม่มีการจราจรติดขัด

สามารถสรุปค่าทางสถิติของการกระจายตัวแยกตามทิศทางการจราจรได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2.2-1 สรุปค่าการกระจายตัวส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของความเร็วเฉลี่ย

ทิศทาง	ค่าการกระจาย	การจราจรปกติ	การจราจรติดขัด
ขาเข้า	Mean	34.14	11.14
	SD	8.12	4.52
ขาออก	Mean	42.16	6.44
	SD	9.18	3.04

#### ก. การวิเคราะห์หาตำแหน่งของ T1

ตำแหน่ง T1 เป็นจุดเริ่มต้นให้มีการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในแบบจำลอง  
เนื่องจากบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.3 ทราบแล้วว่าการจราจรปกติ ความเร็วเฉลี่ยจะมี  
การกระจายปกติ ส่งผลให้ผลจากการคำนวณข้อมูลชุดนี้มีการกระจายตัวปกติด้วย  
ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.2.2-2 และตาราง 4.2.2-1 สรุปผลการคำนวณการกระจายตัว  
ทางสถิติของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย โดยจะสามารถคำนวณหา  
จุดตัดระหว่างการกระจายทั้งสองได้เช่นเดียวกับ T1 ของความเร็วเฉลี่ย โดยเส้นสี  
ฟ้าแสดงความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือความถี่ (Frequency) ส่วนเส้นสี  
แดงแสดงความน่าจะเป็นสะสมหรือความถี่สะสม

กำหนดให้ X แทนค่า SD หนึ่งหน่วยสมมติ (Unit SD) ดังนั้นที่จุดตัดของการกระจาย  
สำหรับทิศการจราจรขาเข้า ;

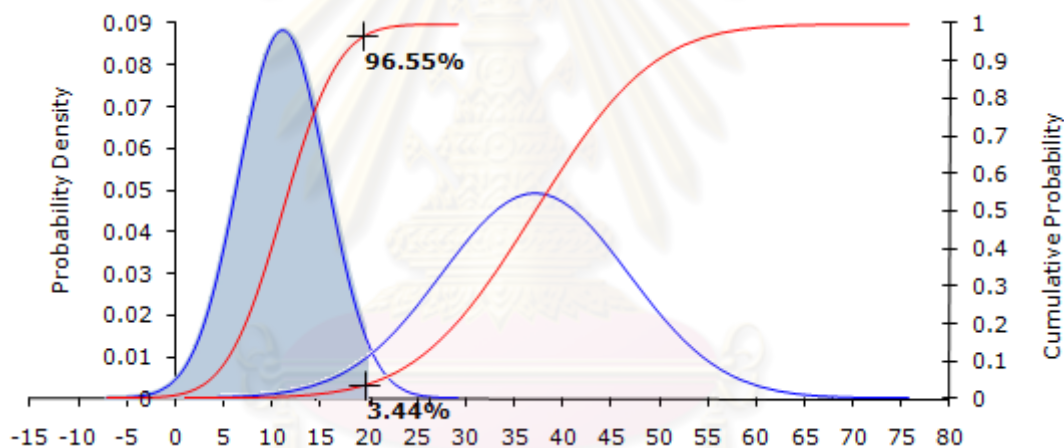
$$\begin{aligned}
 34.14 - 8.12X &= 11.14 + 4.52X \\
 X &= \frac{34.14 - 11.14}{8.12 + 4.52} \\
 &= 1.82 \\
 \text{จะได้จุดตัดที่ความเร็ว} &= 34.14 - 8.12(1.82) \\
 &= 19.36 \text{ Km/h} \\
 \text{หรือ} &= -1.82SD_{SD \text{ of Normal Traffic}} \dots\dots(4.2.2-1)
 \end{aligned}$$

สำหรับทิศทางการจราจรขาออก ;

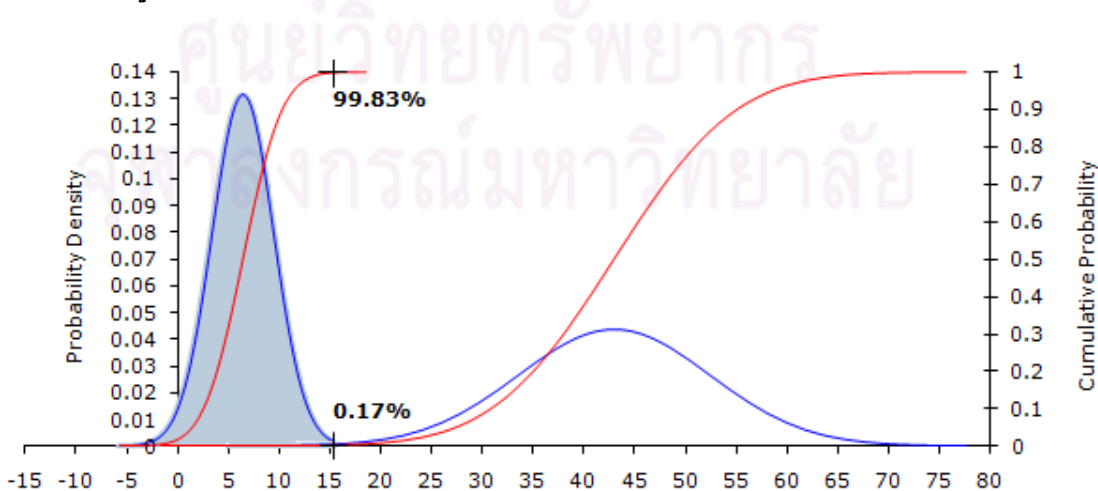
$$\begin{aligned}
 42.16 - 9.18X &= 6.44 + 3.04X \\
 X &= \frac{42.16 - 6.44}{9.18 + 3.04} \\
 &= 2.92 \\
 \text{จะได้จุดตัดที่ความเร็ว} &= 42.16 - 9.18(2.92) \\
 &= 15.35 \text{ Km/h} \\
 \text{หรือ} &= -2.92SD_{SD \text{ of Normal Traffic}} \dots\dots(4.2.2-2)
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

ทิศทางการจราจรขาเข้าใช้ค่า **T1 = -1.82SD<sub>Normal Traffic</sub>**  
 ทิศทางการจราจรขาออก **T1 = -2.92SD<sub>Normal Traffic</sub>**



รูปที่ 4.2.2-2 การกระจายส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วทิศทางการจราจรขาเข้า



รูปที่ 4.2.2-3 การกระจายส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วทิศทางการจราจรขาออก

## ข. การวิเคราะห์หาตำแหน่งของ T2

สำหรับการคำนวณตำแหน่ง T2 จะมีลักษณะเช่นเดียวกันตัวแปรชีวิตความเร็วเฉลี่ยกล่าวคือ เมื่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยลดลงจนถึงจุดต่ำสุดที่ต่ำกว่าค่าขีดแบ่ง T2 จะมีการนำข้อมูลไปประมวลผล และหากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยต่ำสุด ไม่ลดลงต่ำกว่าจุดนี้ จะไม่นำข้อมูลที่เก็บนั้นไปประมวลผล (Early abandon) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตำแหน่งของ  $1 \times \text{SD}$  ของค่าเฉลี่ยความเร็วช่วงเวลาที่มีการจราจรติดขัด หรือก็คือขอบเขตการจำแนกข้อมูลว่าเป็นการจราจรติดขัดในหัวข้อ 3.4.3.7 ซึ่งจากสมการ (3.4.3-7) และ (3.4.3-8) จะได้ค่า T2 ดังต่อไปนี้

$$\text{ทิศทางการจราจรขาเข้าใช้ค่า} \quad T2 = -3.38SD_{\text{Normal Traffic}}$$

$$\text{ทิศทางการจราจรขาออกใช้ค่า} \quad T2 = -3.56SD_{\text{Normal Traffic}}$$

### 4.2.2.4 การออกแบบอัลกอริทึมเริ่มต้นและสิ้นสุดสำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

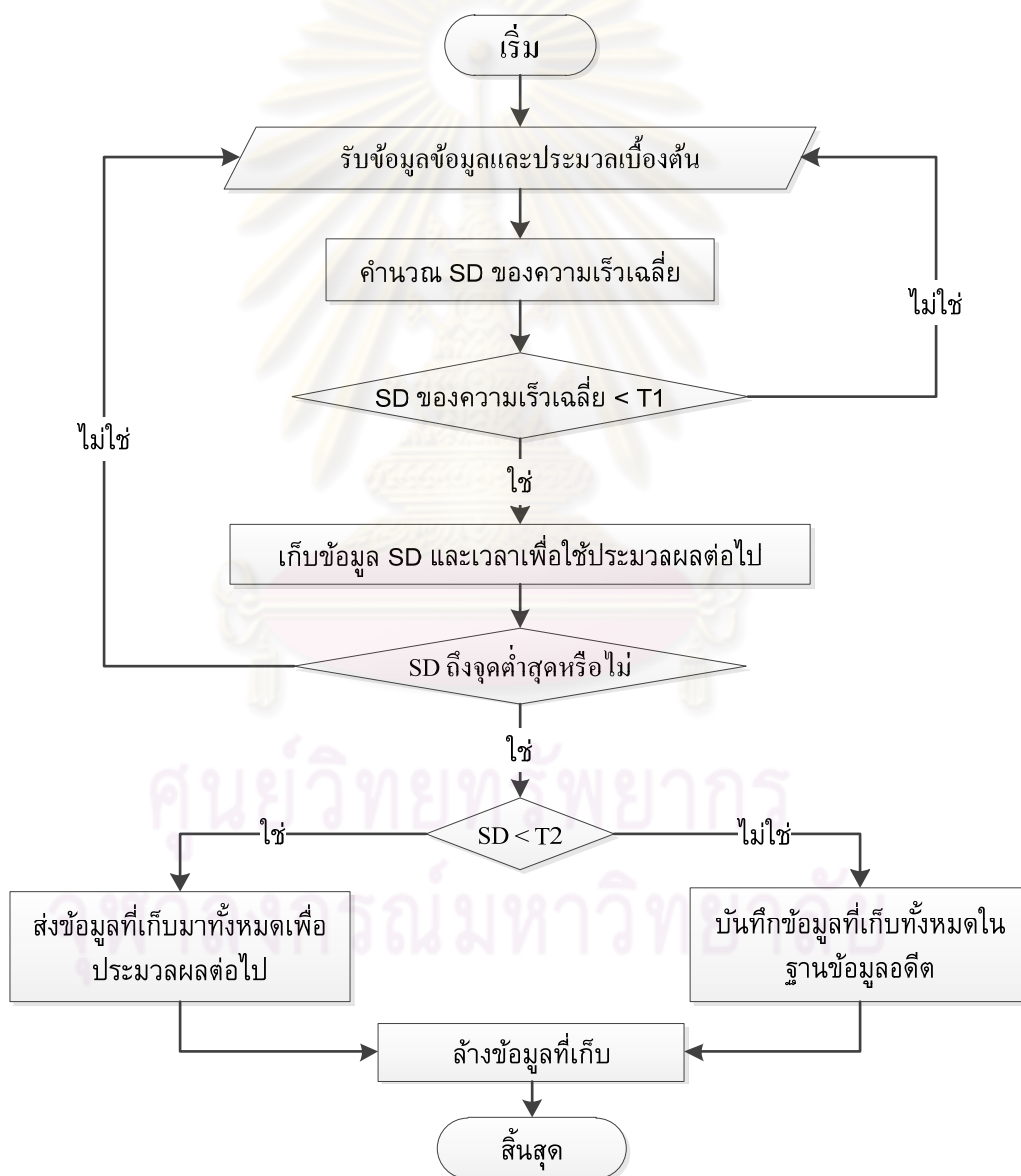
เนื่องจากลักษณะรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงก่อนจะมีการจราจรติดขัดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.2.2-1 มีลักษณะเหมือนตัวแปรของความเร็วเฉลี่ย จะแตกต่างกันตรงที่ก่อนจะมีการจราจรติดขัดนั้น ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วจะมีค่าที่แปรปรวนค่อนข้างสูงก่อนที่ลดลงอย่างรวดเร็วตามที่ได้อธิบายในงานวิจัยที่ [4] และ [24] แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น ข้อมูลดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง อีกทั้งข้อมูลที่ได้รับเป็นข้อมูลที่รวมทุกช่องทางการจราจรเข้าด้วยกันทำให้การเพิ่มการตรวจหาความแปรปรวนที่เปลี่ยนไป (ตำแหน่งที่มีการรวมกลสมิแดงในรูปที่ 4.2.2-1) จะทำการตรวจพบได้ยากและไม่สะท้อนถึงค่าที่แท้จริง ที่ต้องการข้อมูลแยกในแต่ละช่องทางการจราจร ดังนั้นอัลกอริทึมนี้ใช้การตรวจสอบการลดลงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเลย แทนที่จะรวมการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วไว้ด้วย

เมื่อได้ตำแหน่งของ T1 และ T2 แล้ว จะออกแบบการทำงานของอัลกอริทึมให้มีความสามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการ ซึ่งดังแสดงในแผนผังลำดับงานรูปที่ 4.2.2-1 และรูปที่ 4.2.2-2 ซึ่งอธิบายการทำงานของอัลกอริทึมได้ดังนี้

#### กรณีที่ 1 การจราจรติดขัด

ลักษณะของกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.2-1 ที่ตำแหน่ง Disruptive-I โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยจะมีลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดต่ำสุด ที่มีระดับต่ำกว่า T2 ที่บ่งบอกว่ามีการจราจรติดขัด อัลกอริทึมมีการทำงานดังต่อไปนี้

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยลดลงจากปกติถึงระดับ T1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้อัลกอริทึมเริ่มเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผล
- อัลกอริทึมจะตรวจสอบหาตำแหน่งที่มีความเร็วต่ำสุด
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนเลยระดับ T2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้อัลกอริทึมนำข้อมูลไปประมวลผลหรือ
- เมื่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถึงจุดต่ำสุด ข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมด จะถูกนำไปประมวลผลตามแต่และอัลกอริทึม



รูปที่ 4.2.2-3 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม

### กรณีที่ 2 ความเร็วเฉลี่ยลดลงแต่ไม่เกิดการจราจรติดขัด

ลักษณะของกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.2-1 ที่ตำแหน่ง Disruptive-II โดยความเร็วเฉลี่ยลดลงจนถึงจุดต่ำสุด แต่ไม่ถึงระดับการจราจรติดขัด T2 จะออกแบบให้อัลกอริทึมมีการทำงานดังต่อไปนี้

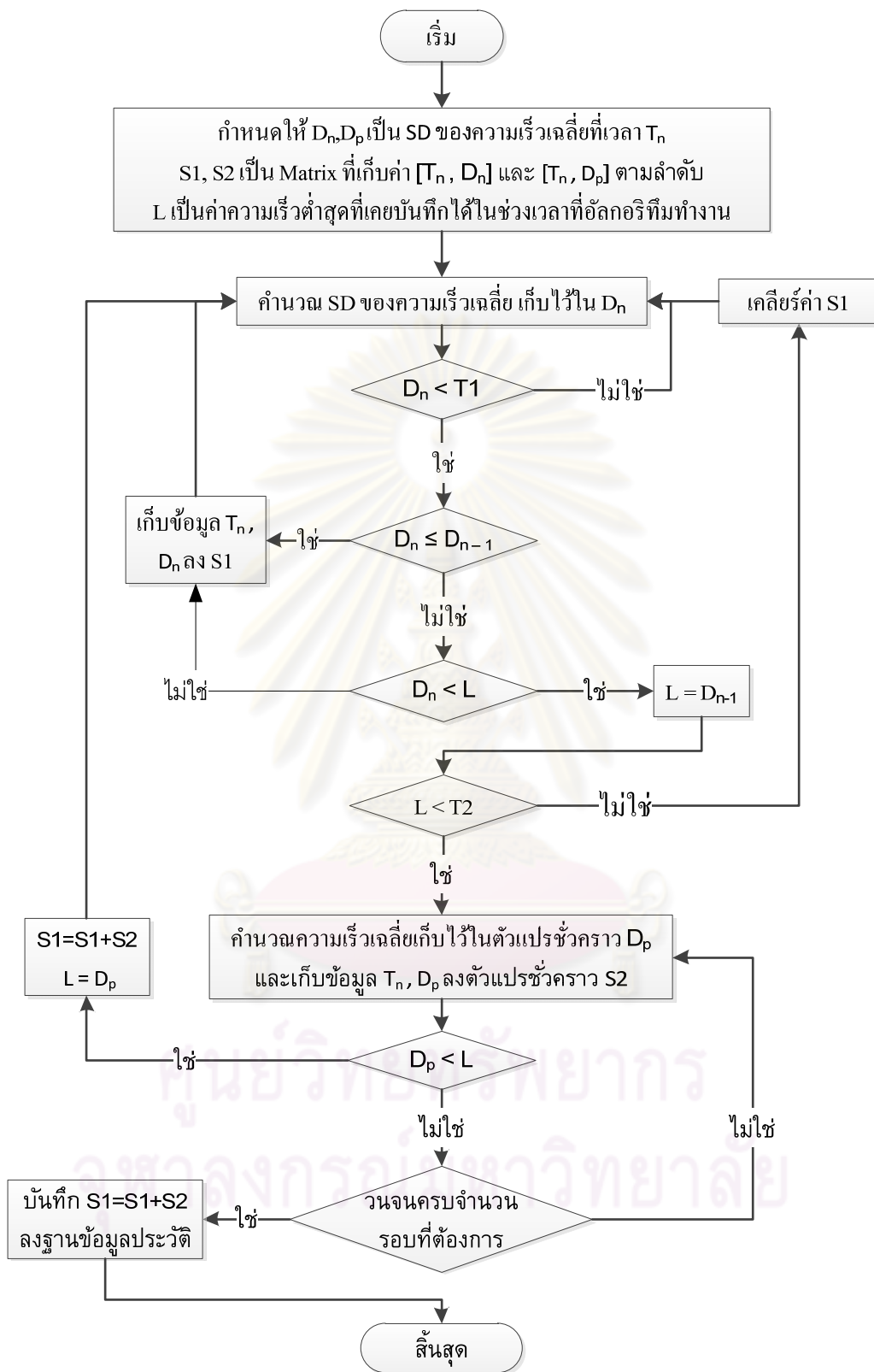
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยลดลงจากเร็วปกติถึงระดับ T1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้แบบจำลองเริ่มเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยลดลง แต่ยังไม่ถึงระดับ T2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้อัลกอริทึมนำข้อมูลไปประมวลหรือไม่ ก็กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งแสดงในตำแหน่ง Disruptive-II
- เมื่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอัลกอริทึมจะยุติการเก็บข้อมูล
- ละเว้นข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมด และไม่นำไปประมวลผล

### กรณีที่ 3 การจราจรติดขัดแต่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงไม่ต่อเนื่อง

ลักษณะของกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2.2-1 ที่ตำแหน่ง Disruptive-III โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่องต่ำกว่าระดับ T1 แต่กลับเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่สูงกว่าระดับ T1 และลดลงเป็นเช่นไปเรื่อยจนลดถึงระดับต่ำสุดที่ตำแหน่งต่ำกว่า T2 ที่มีการจราจรติดขัด จะออกแบบให้อัลกอริทึมมีการทำงานเพื่อให้สามารถจำแนกการจราจรติดขัดรูปแบบนี้ได้ดังต่อไปนี้

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยลดลงจากปกติถึงระดับ T1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้แบบจำลองเริ่มเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยลดลง แต่ยังไม่ถึงถึงระดับ T2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่บอกให้อัลกอริทึมนำข้อมูลไปประมวลหรือไม่ ก็กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งแสดงในตำแหน่ง Disruptive-III
- อัลกอริทึมจะตรวจสอบต่อไปข้างตามแกนเวลา เท่ากับจำนวนครั้งที่ต้องการเพื่อดูข้อมูลว่ามีแนวโน้มลดลงหรือเพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ใช้จะมีค่าเฉลี่ยมากที่สุดที่เกิดการติดขัดแบบนี้เกิดขึ้น ซึ่งเท่ากับ 7 นาที หากความเร็วเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอีกครั้ง ให้หาจุดต่ำสุดอีกครั้ง หากมีค่าลดต่ำกว่า T2 จะนำข้อมูลทั้งหมดไปประมวลผล แต่ถ้าหากครบกำหนด 7 นาทีแล้วยังไม่มีแนวโน้มลดลงต่ำกว่า T2 จะบันทึกข้อมูลที่เก็บมาทั้งหมดลงฐานข้อมูลประวัติ (History Database) เพื่อเก็บไว้ใช้ประโยชน์ในอนาคต

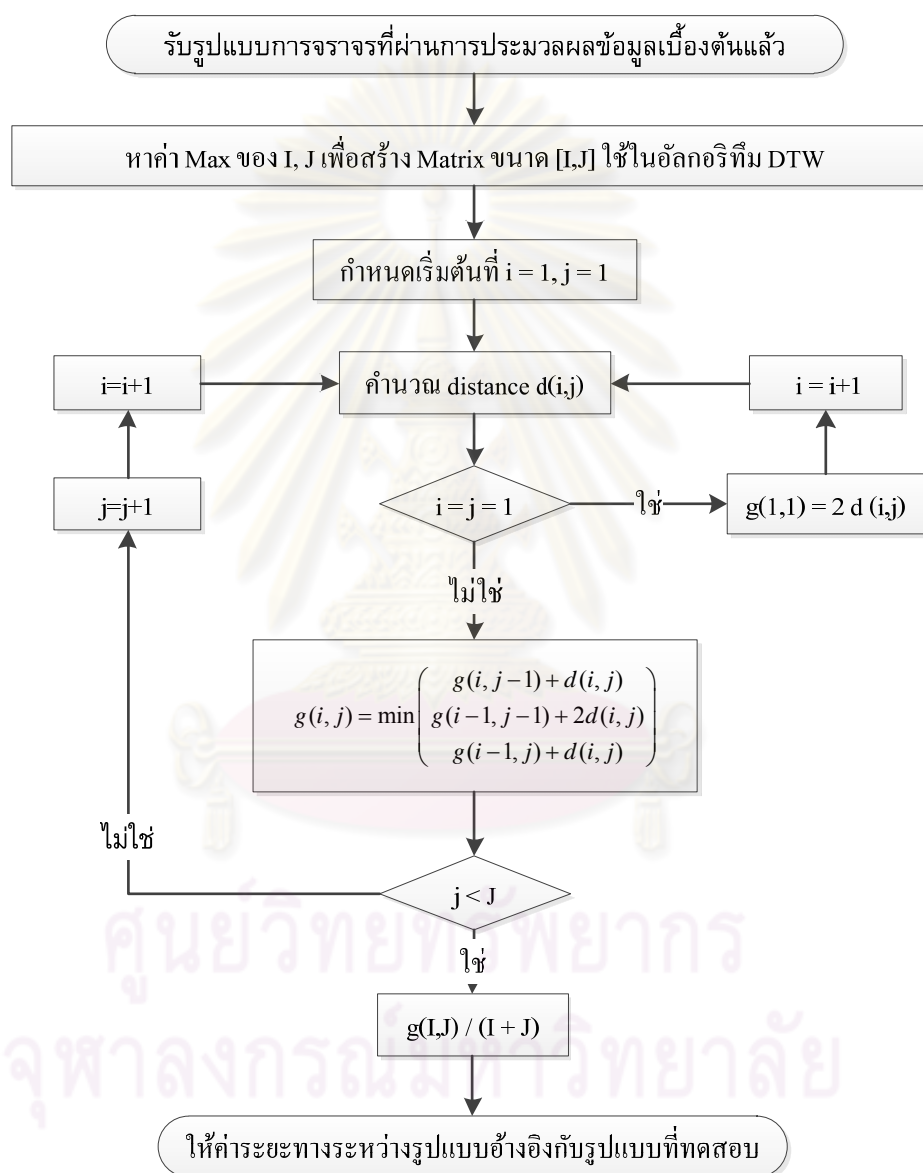
อัลกอริทึมที่ครอบคลุมทั้ง 3 กรณีสามารถเขียนได้ดังแผนภาพลำดับงานในรูปที่ 4.2.1-5



รูปที่ 4.2.2-5 แสดงการทำงานของอัลกอริทึมเก็บข้อมูลอย่างละเอียด

#### 4.3 กระบวนการพัฒนาแบบจำลองไดนามิกโทมัวร์ปิง

อัลกอริทึมไดนามิกโทมัวร์ปิงเป็นอัลกอริทึมทางอนุกรมเวลา โดยมีการทำงานของอัลกอริทึมดังกล่าวไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.1.1.4 ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาเพื่อใช้จำแนกรูปแบบสภาพการจราจรด้วยโปรแกรมภาษา MATLAB ซึ่งมีรายละเอียดของโค้ดอยู่ในแผ่นซีดี และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบผังลำดับงานได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3-1 การทำงานของอัลกอริทึมไดนามิกโทมัวร์ปิงอย่างละเอียด

สำหรับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองไดนามิกโทมัวร์ปิงเพื่อใช้จำแนก (Classification) สภาพการจราจรติด จะแบ่ง 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การฝึกฝน (Training) แบบจำลองให้รู้จำสภาพ



การจรรยาบรรณและการทดสอบ (Testing) แบบจำลอง เพื่อวัดประสิทธิภาพการรู้จำสภาพการจรรยาบรรณ โดยมีการทำงานดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การทำงานของอัลกอริทึม

##### 4.3.1.1 เตรียมค่าตัวแปร

ในการทำงานเพื่อจำแนกสภาพการจรรยาบรรณ จะเริ่มจากรับข้อมูลลักษณะสำคัญ (Feature) แยกตามแต่ละประเภทได้แก่ ความเร็วเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ที่ได้ผ่านการประมวลผลเบื้องต้นเรียบร้อยแล้ว และนำมาวิเคราะห์หาจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของรูปแบบที่นำมาจำแนก เพื่อสร้างเมตริกหารหว่างรูปแบบอ้างอิงกับรูปแบบที่นำมาจำแนก

##### 4.3.1.2 วิเคราะห์หาเส้นทางเดินต่ำที่สุด

ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการค้นหาเส้นทางเดินที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดระหว่างรูปแบบอ้างอิงกับรูปแบบที่นำมาจำแนก

##### 4.3.1.3 สิ้นสุดกระบวนการวิเคราะห์

เมื่อค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้แล้ว อัลกอริทึมจะให้ผลลัพธ์ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างรูปแบบอ้างอิงกับรูปแบบที่นำมาจำแนกนั้น

#### 4.3.2 ขั้นตอนการฝึกฝนระบบรู้จำสภาพการจรรยาบรรณ

ในขั้นตอนการฝึกฝนแบบจำลองเพื่อให้รู้จำลักษณะการจรรยาบรรณจะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ ดังต่อไปนี้

##### 4.3.2.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาฝึกฝน

ข้อมูลที่จะนำมาฝึกฝนนั้นจะประกอบด้วยชุดข้อมูล 2 ชนิด ได้แก่

###### ก. ข้อมูลจริงจากสภาพการจราจร

- ข้อมูลจากการจราจรติดขัด จะถูกเลือกอย่างสุ่มด้วยอัตราส่วน 60% จากชุดข้อมูลการจราจรติดขัดทั้งสองทิศทางการจราจร
- ข้อมูลจากการจราจรปกติ ที่มีลักษณะคล้ายการจราจรติดขัด ซึ่งจะถูกลเลือกอย่างสุ่มด้วยอัตราส่วน 60% จากชุดข้อมูลการจราจรติดขัดทั้งสองทิศทางการจราจร

###### ข. ข้อมูลรูปแบบที่กำหนดไว้ตามงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาไว้แล้วในบทที่ 2 ที่ผู้วิจัยได้ทบทวนงานวิจัย ที่มีการสรุปถึงลักษณะของตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนไปอย่างมีรูปแบบ เมื่อกำลังจะเกิดการจราจรติดขัด

**หมายเหตุ** ในส่วนของข้อมูลจริงจากการจราจรปกติ ที่ไม่ถูกนำมาใช้ฝึกฝน เนื่องจากชุดข้อมูลการจราจรปกติได้ถูกจำแนกโดยอัลกอริทึมเริ่มต้นแบบจำลอง ในหัวข้อ 4.2.2 ไว้แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องมาจำแนกข้อมูลชุดนี้อีก โดยคำเรียกชื่อข้อมูลมีคำจำกัดความดังต่อไปนี้

**ชุดข้อมูลการจราจรปกติ** คือ ข้อมูลที่มีความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยอยู่ในระดับปกติ โดยไม่ถูกอัลกอริทึมเริ่มต้นแบบจำลอง จำแนกว่ากำลังจะเกิดการจราจรติดขัด นั่นคือถ้าพิจารณาจากรูปที่ 4.2.1-1 และ 4.2.2-1 ค่าของข้อมูลยังแกว่งไม่ต่ำไปกว่าขอบเขต T1 ซึ่งอยู่กรณี Normal

**ชุดข้อมูลการจราจรปกติ ที่มีลักษณะคล้ายการจราจรติดขัด** คือ ข้อมูลที่มีความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่า T1 แต่ยังไม่ถึง T2 และกลับสู่การจราจรปกติดั้งเดิม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2.1-1 และ 4.2.2-1 จะเป็นกรณี Disruptive-II

#### 4.3.2.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ

ชุดข้อมูลที่ได้รับเลือกในหัวข้อข้างต้น จะถูกนำมาคำนวณค่าลักษณะสำคัญ (Feature) ที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งได้แก่ ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย เพื่อใช้ในการสร้างรูปแบบอ้างอิงต่อไป ซึ่งข้อมูลชุดนี้ได้ผ่านกระบวนการประมวลผลเบื้องต้น ได้แก่ การปรับเรียบ และการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของข้อมูลมาเรียบร้อยแล้ว

#### 4.3.2.3 การสร้างรูปแบบอ้างอิง

เนื่องจากลักษณะเฉพาะของอัลกอริทึมไดนามิกซ์โทมวาร์ปปีงที่มีการปรับบรรทัดฐานเชิงเวลาอยู่ในตัวเองอยู่แล้ว จึงสามารถนำข้อมูลที่ผ่านการคำนวณค่าลักษณะสำคัญแล้ว มาใช้สร้างรูปแบบอ้างอิงได้เลย โดยสร้างรูปแบบอ้างอิงให้อยู่ในรูปค่าของลักษณะสำคัญตามเวลาดังตารางที่ 4.3.1-1

ตารางที่ 4.3.1-1 การเก็บรูปแบบอ้างอิง

Time	T1	T2	T3	T4	...	T <sub>n</sub>
Smoothness Data	S1	S2	S3	S4	...	S <sub>n</sub>

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด

ในขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองเพื่อจำแนกข้อมูลที่ไม่ทราบรูปแบบ จะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ ซึ่งคล้ายกับขั้นตอนการฝึกฝน ดังต่อไปนี้

#### 4.3.3.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบ

กลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบอัลกอริทึมนั้น จะเป็นข้อมูลที่ทราบชนิด (Type) อยู่แล้ว นั่นคือ เป็นข้อมูลการจราจรติดขัด หรือเป็นข้อมูลการจราจรปกติ โดยข้อมูลการจราจรติดขัดจะได้มาจาก ชุดข้อมูลการจราจรติดขัดที่เหลืออีก 40% ที่ถูกนำไปใช้ฝึกฝนก่อนหน้านี้อีก ส่วนข้อมูลการจราจรปกติ จะถูกนำมาทดสอบด้วยจำนวนชุดที่เท่ากับการจราจรติดขัด

#### 4.3.3.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ

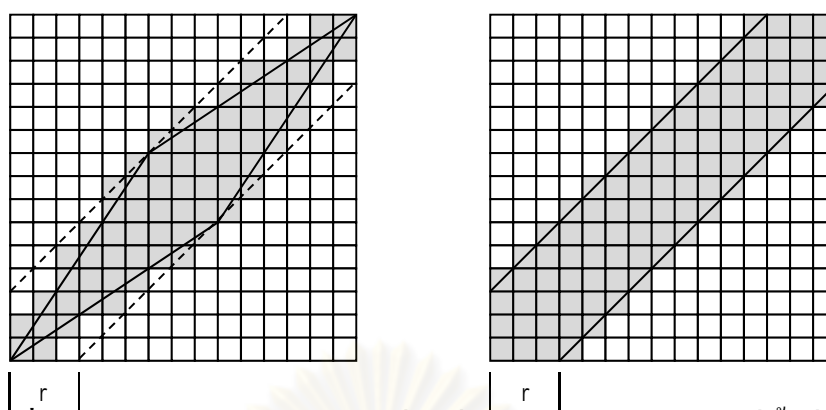
ชุดข้อมูลที่ได้รับเลือก จะถูกนำมาคำนวณค่าลักษณะสำคัญ (Feature) เหมือนชุดข้อมูลเพื่อนำไปฝึกฝนทุกประการ โดยคำนวณค่าที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งได้แก่ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย เพื่อใช้เปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิงต่อไป ซึ่งข้อมูลชุดนี้ได้ผ่านกระบวนการประมวลผลเบื้องต้น ได้แก่ การปรับเรียบ และการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของข้อมูลมาเรียบร้อยแล้ว ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้า

#### 4.3.3.3 การทดสอบความคล้ายคลึง

จะนำแบบทดสอบที่ได้จากหัวข้อข้างต้นไปเปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิง (Reference Pattern) ที่ได้เตรียมไว้จากการฝึกฝนอัลกอริทึมทุกรูปแบบอ้างอิงที่มีอยู่ และคำนวณหาค่าระยะทาง (Distance) ตามสมการที่ (2.1.1.4-4) เพื่อค้นหาเส้นทางเดิน (Path) ที่มีต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุดหรือเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างรูปแบบที่นำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิงในแต่ละรูปแบบ

#### 4.3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพอัลกอริทึมด้วยการจำกัดพื้นที่การเคลื่อนที่

เนื่องจากลักษณะการทำงานของอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วอร์ปิงเองที่จะมีการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างรูปแบบที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งถ้าหากรูปแบบทั้ง 2 มีความยาวมาก จะส่งผลกระทบต่อตรงกับความเร็วในการค้นหาเส้นทาง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อเพิ่มความเร็วในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยผู้วิจัยจะขอกล่าวถึงการจำกัดการเคลื่อนที่ที่ได้รับความนิยมสูงสุด [3] ได้แก่ การจำกัดการเคลื่อนที่แบบ Sakoe-Chiba Band และ Itakura Parallelogram ดังได้แสดงดังรูปที่ 4.3.4-1 ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Ratanamahatana C. and Keogh E. [26] ซึ่งกล่าวไว้ว่า การจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ของการค้นหาเส้นทางเดินจะช่วยให้กระบวนการค้นหาที่มีความแม่นยำมากขึ้นและรวดเร็วขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องทำการปรับเทียบบรรทัดฐาน (Normalize) เติงเวลาหรือความยาวของรูปแบบทั้ง 2 ให้เท่ากันเสียก่อน

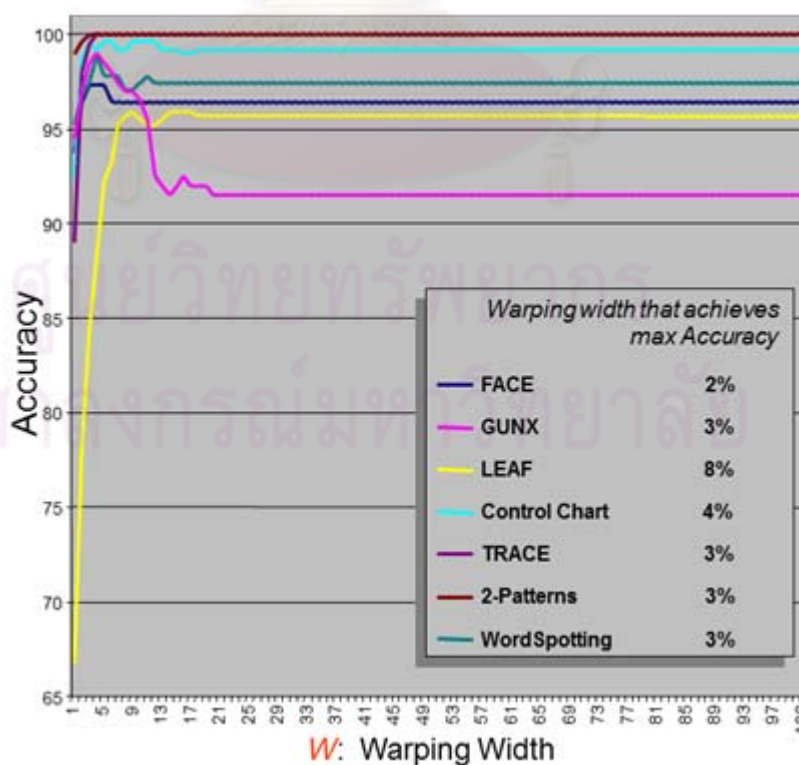


รูปที่ 4.3.4-1 การจำกัดของเขตการเคลื่อนที่ในการค้นหาเส้นทางเดินที่สั้นที่สุด

ซ้าย : ขอบเขตแบบ Itakura Parallelogram

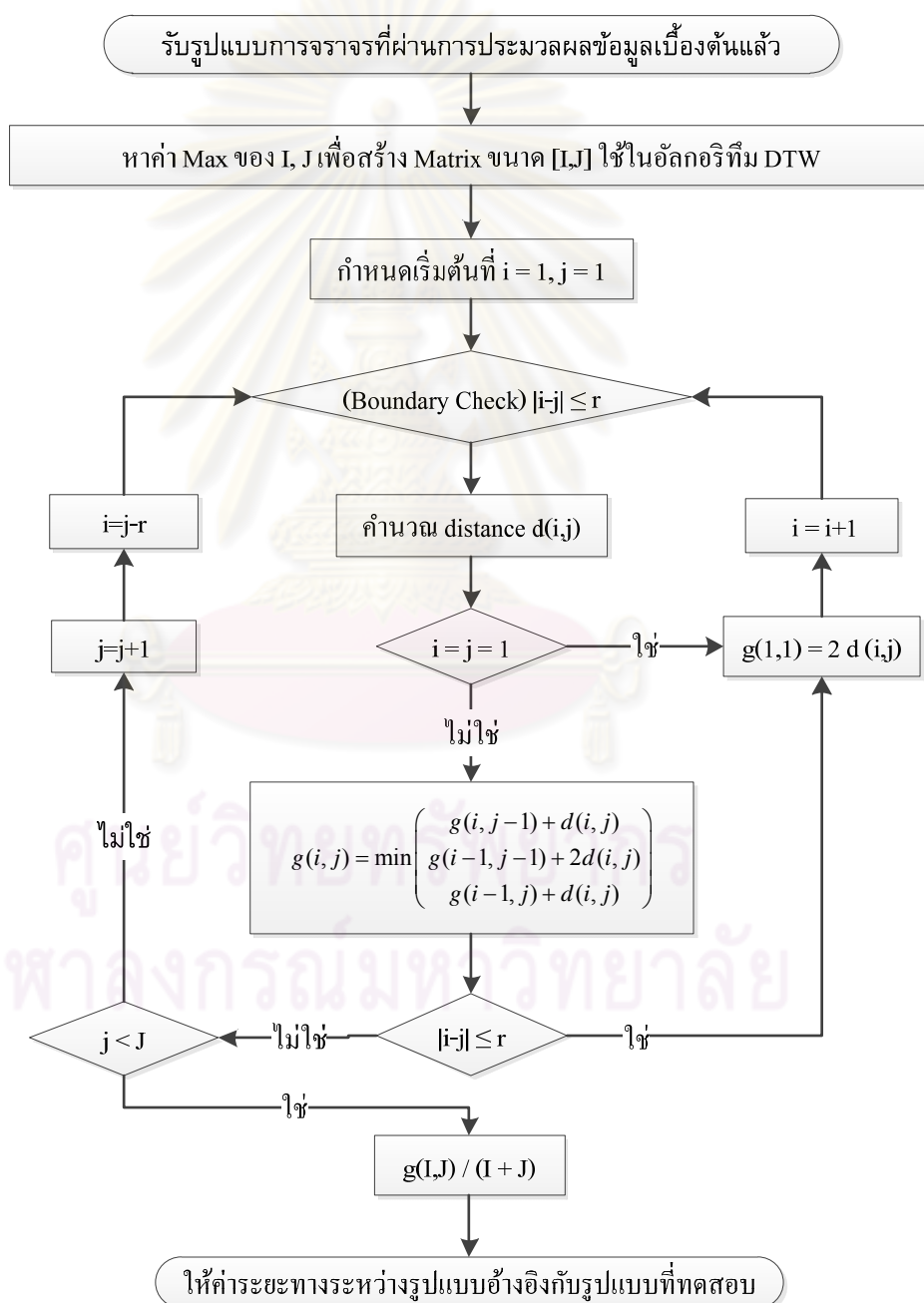
ขวา : ขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band

จากการจำกัดขอบเขตทั้งสอง 2 แบบ การจำกัดแบบ Itakura Parallelogram จะได้รับความนิยมอย่างสูงสุดในการใช้การวิเคราะห์เสียงพูดที่มีความซับซ้อนและสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างมาก แต่ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างดีและความเร็วที่เพิ่มขึ้นแต่มีข้อจำกัดที่จะต้องทราบความยาวที่อยู่ในช่วงที่แน่นอนของรูปแบบที่จะนำมาจำแนก ส่วนการจำกัดขอบเขตแบบ Sakoe-Chiba Band ไม่ส่งผลด้านความเร็วอย่างเด่นชัดเท่าแบบแรก แต่มีผลด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของให้มีความแม่นยำและถูกต้องยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.3.4-2 แสดงการจำกัดของเขตการเคลื่อนที่ในการค้นหาเส้นทางเดินที่สั้นที่สุด [25]

จากรูปที่ 4.3.4-2 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Ratanamahatana C. and Keogh E. [25] ได้ทำการทดลองกับข้อมูลอนุกรมเวลาจำนวนมาก จะพบว่า ขนาดของความกว้างของหน้าต่างจะช่วยเพิ่มความถูกต้องสูงที่สุดในการรู้จำจาก 65% ถึงเกือบ 100% ของรูปแบบข้อมูลชนิดต่างของช่วงความกว้างประมาณ 2-3% ของความยาวรูปแบบที่นำมาจำแนก และสำหรับการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงกันของ 2 สองรูปแบบจะพบว่าช่วงความกว้างของหน้าต่างที่ 3% จะให้ค่าความถูกต้องและแม่นยำสูงที่สุด



รูปที่ 4.3.4-3 แสดงการทำงานของอัลกอริทึมไดว์นามิกซ์ไทม์วาร์ปแบบจำกัดขอบเขต

ดังนั้นวิธานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การจำกัดขอบเขต (Lower Boundary) แบบ Sakoe-Chiba Band เนื่องจากความยาวของรูปแบบของลักษณะสภาพการจราจรติดขัดที่ไม่แน่นอน จึงตัดแปลงอัลกอริทึมไดนามิกโทมัวร์ปึงต้นแบบเล็กน้อยเพื่อบังคับให้การค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเท่านั้น โดยกำหนดให้ R แทนความกว้างของหน้าต่างขอบเขต (Boundary Windows) ที่ 3% ของความยาวรูปแบบที่นำมาทดสอบ ซึ่งสามารถเขียนแผนผังลำดับงานได้ดังรูปที่ 4.3.4-3

#### 4.3.5 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองไดนามิกโทมัวร์ปึงในการทำงานจริง

สำหรับการนำอัลกอริทึมไปใช้จำแนกสภาพการจราจรจริง จะเหมือนขั้นตอนในการทดสอบอัลกอริทึมทุกประการ แต่จะมีส่วนเพิ่มเติมในขั้นตอนการตัดสินใจในการจำแนกแบบจำลอง โดยจะเพิ่มเงื่อนไขในการเก็บบันทึกข้อมูลที่เสร็จจากการจำแนกในแต่ละครั้ง ไว้เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และสอนอัลกอริทึมให้มีความแม่นยำต่อไปในอนาคต

### 4.4 กระบวนการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเบย์

อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์เป็นอัลกอริทึมทางการเรียนรู้ของเครื่อง ดังที่ได้กล่าวการทำงานไว้อย่างละเอียดที่บทที่ 2 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกพัฒนาอัลกอริทึมตามงานวิจัยของ Oh et al [4] เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมไดนามิกโทมัวร์ปึง ด้วยโปรแกรมภาษา MATLAB ซึ่งมีรายละเอียดของโค้ดอยู่ในแผ่นซีดี และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบผังลำดับงานได้ดังรูปที่ 4.4-1

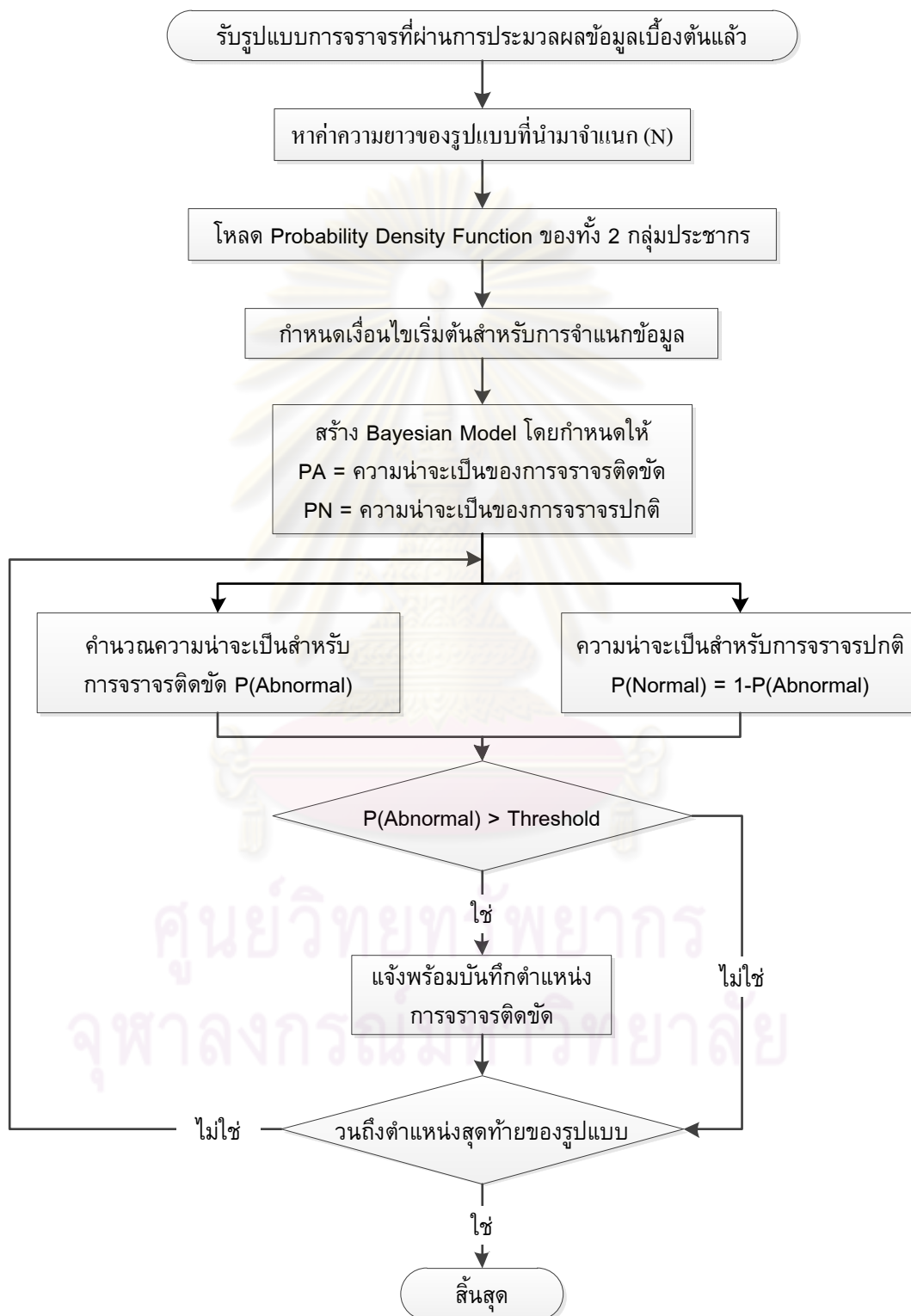
สำหรับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเบย์เพื่อใช้จำแนก (Classification) สภาพการจราจรติดขัด เหมือนแบบจำลองไดนามิกโทมัวร์ปึงทุกประการแต่อาจจะแตกต่างกันในรายละเอียดของการฝึกฝน ซึ่งจะแบ่ง 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การฝึกฝน (Training) แบบจำลองให้รู้จำสภาพการจราจรติดขัด และการทดสอบ (Testing) แบบจำลอง เพื่อวัดประสิทธิภาพการรู้จำสภาพการจราจรติดขัด โดยมีการทำงานดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 การทำงานของอัลกอริทึม

##### 4.4.1.1 เตรียมค่าตัวแปร

ในการเตรียมค่าตัวแปรสำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์จะแตกต่างกับอัลกอริทึมไดนามิกโทมัวร์ปึง กล่าวคือ จะมีการรับค่าและจำแนกตัวแปรในรูปแบบเวกเตอร์ โดยกำหนดให้  $X' = [x_1, x_2, \dots, x_p]$  เป็นชุดข้อมูลที่ต้องการนำมาทดสอบ และ  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของความหนาแน่นของประชากรการจราจรปกติและการจราจรติดขัดตามลำดับ และในกระบวนการจำแนกกำหนดให้สภาพการจราจรปกติและสภาพการจราจรติดขัดโดยสัญลักษณ์  $\pi_1$  และ  $\pi_2$  ตามลำดับ

และจากหัวข้อ 2.1.3.4 เพื่อให้การจำแนกมีความผิดพลาดน้อยที่สุดจึงจะกำหนดนิยาม  $\pi_1$  และ  $\pi_2$  ให้อยู่ในช่วงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4-1 แสดงการทำงานของอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์

$$\pi_1 : \frac{f_1(x)}{f_2(x)} \geq \left( \frac{\text{cost}(1|2)}{\text{cost}(2|1)} \right) \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \quad \dots\dots\dots(4.4.1.1-1)$$

$$\pi_2 : \frac{f_1(x)}{f_2(x)} < \left( \frac{\text{cost}(1|2)}{\text{cost}(2|1)} \right) \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \quad \dots\dots\dots(4.4.1.1-2)$$

โดยที่ cost (ij) คือ ต้นทุนความผิดพลาดจากการจำแนกประชากรผิดเป็น  $\pi_i$  ใดๆ ที่ในความเป็นจริง จะต้องถูกจำแนกให้เป็นประชากร  $\pi_j$  และ  $p_i$  คือ ความน่าจะเป็นก่อนหน้า (Prior Probability) ของประชากร  $\pi_i$

#### 4.4.1.2 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นตามทฤษฎีของเบย์

ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการคำนวณความน่าจะเป็นตามทฤษฎีของเบย์ที่ได้กล่าวอย่างละเอียดแล้วในหัวข้อ 2.1.1.1.1 โดยจากสมการ (2.1.2-2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความน่าจะเป็นภายหลัง (posterior probability) เพื่อคำนวณความน่าจะเป็นของสภาพการจราจรติดขัด โดยกำหนดให้  $x_0$  ในสมการเป็นประชากรที่มีค่าความน่าจะเป็นมากที่สุดด้วย  $P(p_1 / X_0)$  ซึ่งจะเขียนความน่าจะเป็นภายหลังได้ดังนี้

$$P(p_1 | x_0) = \frac{P(x_0 | p_1)}{P(x_0)}$$

จากกฎความสัมพัทธ์ของผลรวมของความน่าจะเป็นจะได้

$$P(p_1 | x_0) = \frac{P(x_0 | p_1)P(p_1)}{P(x_0 | p_1)P(p_1) + P(x_0 | p_2)P(p_2)}$$

จะแทนความน่าจะเป็นก่อนหน้า  $P(p_1)$  ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function - PDF) ของการจราจรปกติ  $f_1$  และการจราจรติดขัด  $f_2$  ตามลำดับ ทำให้

$$P(p_1 | x_0) = \frac{P(x_0 | p_1)f_1(x_0)}{P(x_0 | p_1)f_1(x_0) + P(x_0 | p_2)f_2(x_0)} \quad \dots\dots\dots(4.4.1.2-1)$$

โดยคุณสมบัติผลรวมของความน่าจะเป็นเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$P(p_2 | x_0) = 1 - P(p_1 | x_0) \quad \dots\dots\dots(4.4.1.2-2)$$



สำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) ที่จำเป็นต้องใช้ในสมการ 4.4.1.2-1 ( $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ) ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้กระจายตัวทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากความแตกต่างของการกระจายตัวของข้อมูลดิบที่นำมาใช้ได้แก่

- การกระจายตัวแบบมีพารามิเตอร์ (Parametric Distribution) กล่าวคือ การกระจายตัวของประชากรที่สามารถประมาณได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ซึ่งจากบทที่ 3 พบแล้วว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติทั้งกลุ่มประชากรการจราจรปกติ กลุ่มประชากรการจราจรติดขัด ดังนั้น จึงเลือกใช้การกระจายตัวเกาส์เซียน (Gaussian Distribution) เป็นตัวแทนในการกระจายตัวของความน่าจะเป็นชนิดนี้
- การกระจายตัวแบบไร้พารามิเตอร์ (Nonparametric Distribution) ที่ได้ถูกเสนอในงานวิจัยของ Oh et al [4] เนื่องจากข้อมูลดิบที่ผู้วิจัยใช้ไม่สามารถอธิบายการกระจายตัวได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ จึงเสนอคุณสมบัติในการปรับเรียบของฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel Function) ด้วยฟังก์ชัน Kernel Density Estimator -  $\hat{f}_h(x)$  เพื่อประมาณการกระจายตัวประชากร และเนื่องจากคุณสมบัติของของผลรวมฟังก์ชัน  $\hat{f}_h(x)$  รอบขอบเขตทั้งหมดเท่ากับ 1 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(u) du = 1$$

$$\text{และ } \hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right)$$

โดยกำหนดให้ฟังก์ชัน  $K(x)$  เป็นฟังก์ชันเคอร์เนล และ  $h$  เป็นช่วงความกว้างในการปรับเรียบ (Bandwidth) และเนื่องจากมีฟังก์ชันเคอร์เนลหลากหลายชนิด จึงเลือกใช้ฟังก์ชันเคอร์เนลแบบพาราโบลา (Parabolic Shape) ตามงานวิจัย [4] ซึ่งมักถูกเรียกในชื่อ Epanechnikov kernel function โดยมีการกำหนดค่าดังต่อไปนี้

$$K(u) = \begin{cases} 1.5(1 - u^2) & \text{if } |u| \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

#### 4.4.2 ขั้นตอนการฝึกฝนระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด

ในขั้นตอนการฝึกฝนแบบจำลองเพื่อให้รู้จำลักษณะการจราจรติดขัดจะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ ซึ่งเหมือนกับการสอนอัลกอริทึมไดนามิกไทม์วอร์ปปีงดังต่อไปนี้

#### 4.4.2.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาฝึกฝน

ข้อมูลที่จะนำมาฝึกฝนนั้นจะประกอบด้วยชุดข้อมูล 2 ชนิด ได้แก่

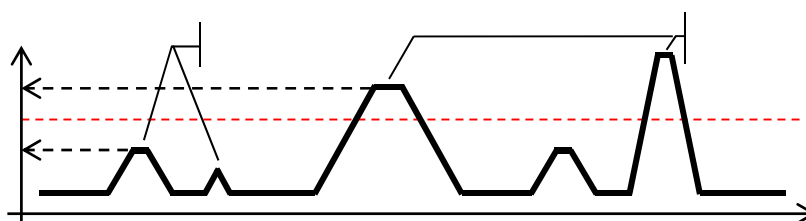
- ก. ข้อมูลจริงจากสภาพการจราจร
  - ข้อมูลจากการจราจรติดขัด จะถูกเลือกอย่างสุ่มด้วยอัตราส่วน 60% จากชุดข้อมูลการจราจรติดขัดทั้ง 2 ทิศทางการจราจร
  - ข้อมูลจากการจราจรปกติ ที่มีลักษณะคล้ายการจราจรติดขัด ซึ่งจะถูกลเลือกอย่างสุ่มด้วยอัตราส่วน 60% จากชุดข้อมูลการจราจรติดขัดทั้ง 2 ทิศทางการจราจร
- ง. ข้อมูลรูปแบบที่กำหนดไว้ตามงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาไว้แล้วในบทที่ 2 ที่ผู้วิจัยได้ทบทวนงานวิจัย ที่มีการสรุปถึงลักษณะของตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนไปอย่างมีรูปแบบ เมื่อกำลังจะเกิดการจราจรติดขัด

#### 4.4.2.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ

ชุดข้อมูลที่ได้รับเลือกในหัวข้อข้างต้น จะถูกนำมาคำนวณค่าลักษณะสำคัญ (Feature) ที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งได้แก่ ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย เพื่อใช้ในการสร้างรูปแบบอ้างอิงต่อไป ซึ่งข้อมูลชุดนี้ได้ผ่านกระบวนการประมวลผลเบื้องต้น ได้แก่ การปรับเรียบ และการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของข้อมูลมาเรียบร้อยแล้ว

#### 4.4.2.3 การสร้างรูปแบบอ้างอิง

สำหรับการเรียนรู้แบบเบย์ในการฝึกฝนนั้นจะนำตัวอย่างข้อมูลที่ถูกติดฉลากไว้แล้วมาคำนวณความน่าจะเป็นที่จะเกิดการจราจรติดขัด จากนั้นจะสร้างค่า Threshold ที่เหมาะสมเพื่อจำแนกสภาพการจราจรติดขัดออกจากการจราจรปกติโดย คำนวณค่ากึ่งกลางจากค่าความแตกต่างของความน่าจะเป็นสูงสุดของการจราจรติดปกติและความน่าจะเป็นต่ำสุดของการจราจรติดขัด



รูปที่ 4.4.2-1 เงื่อนไขในการกำหนดค่าขีดแบ่ง

#### 4.4.3 ขั้นตอนการทดสอบระบบรู้จำสภาพการจราจรติดขัด

ในขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองเพื่อจำแนกข้อมูลที่ไม่ทราบรูปแบบ จะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ ซึ่งคล้ายกับขั้นตอนการฝึกฝน ดังต่อไปนี้

##### 4.4.3.1 การเลือกกลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบ

กลุ่มข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบอัลกอริทึมนั้น จะเป็นข้อมูลที่ทราบชนิด (Type) อยู่แล้ว นั่นคือ เป็นข้อมูลการจราจรติดขัด หรือเป็นข้อมูลการจราจรปกติ โดยข้อมูลการจราจรติดขัดจะได้มาจาก ชุดข้อมูลการจราจรติดขัดที่เหลืออีก 40% ที่ถูกนำไปใช้ฝึกฝนก่อนหน้าแล้ว ส่วนข้อมูลการจราจรปกติ จะถูกนำมาทดสอบด้วยจำนวนชุดที่เท่ากับการจราจรติดขัด

##### 4.4.3.2 การวัดและวิเคราะห์ค่าลักษณะสำคัญ

ชุดข้อมูลที่ได้รับเลือก จะถูกนำมาคำนวณค่าลักษณะสำคัญ (Feature) เหมือนชุดข้อมูลนำไปฝึกฝนทุกประการ โดยคำนวณค่าที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งได้แก่ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย เพื่อใช้เปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิงต่อไป ซึ่งข้อมูลชุดนี้ได้ผ่านกระบวนการประมวลผลเบื้องต้น ได้แก่ การปรับเรียบ และการหาจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของข้อมูลมาเรียบร้อยแล้ว ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้า

##### 4.4.3.3 การทดสอบความคล้ายคลึง

แบบทดสอบที่ได้จากหัวข้อข้างต้นจะถูกนำไปคำนวณความน่าจะเป็นตามสมการของเบย์ โดยถ้าหาความน่าจะเป็นเกิดค่า Thredhdhoid ที่กำหนดไว้ จะถือว่าเป็นการจราจรติดขัด

#### 4.5 อัลกอริทึมตัดสินใจ (Decision Algorithm)

ในการออกแบบอัลกอริทึมการตัดสินใจ เพื่อจำแนกรูปแบบว่าเป็นการจราจรชนิดใดนั้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาแยกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 การตัดสินใจจากค่าตัวแปรเพียงตัวเดียว

การออกแบบการตัดสินใจมีลักษณะนี้คล้ายแนวทางของงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม นั่นคือใช้แค่ตัวแปรเพียงตัวเดียว ได้แก่ ความเร็วเฉลี่ย หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ในการตัดสินใจจำแนกว่าสภาพการจราจรนั้นติดขัดหรือไม่ เมื่อกำหนดให้  $X_i$  แทนตัวแปรตัว  $i$  ที่สนใจ และ  $Y$  แทนผลลัพธ์ที่ได้ในการจำแนก จะได้

$$Y = X_i \dots\dots\dots(4.5.1-1)$$

#### 4.5.2 การตัดสินใจจากจากค่าตัวแปรหลายตัว

เนื่องจากการใช้ตัวแปรเดียวในการตัดสินใจจำแนกข้อมูลว่าเป็นการจราจรติดขัดหรือไม่นั้น อาจจะไม่มีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอ ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะข้อมูลของสภาพการจราจรเองที่มีปัจจัยภายนอกจำนวนมากที่ไม่สามารถทำนายหรือควบคุมได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ตัวแปรหลายตัวที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างแน่นอนเมื่อเกิดการจราจรติดขัดนั้นจะสามารถทำให้การทำนายถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ในการจำแนกการจราจรติดขัด ซึ่งถึงคุณสมบัติของตัวแปรในหัวข้อก่อนหน้าแล้วว่า ถ้าหากเกิดการจราจรติดขัดขึ้น ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย จะมีการเปลี่ยนแปลงในทางลดลงทั้งคู่ ซึ่งกล่าวได้ว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย แปรผันตามความเร็วเฉลี่ย และเนื่องจากข้อมูลดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่มากพอที่จะแบ่งน้ำหนักได้ว่า ตัวแปรตัวหนึ่งจะมีอิทธิพลเหนือกว่าตัวแปรอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอใช้การให้น้ำหนักที่เท่ากันทั้ง 2 ตัวแปร เมื่อกำหนดให้  $X_i$  แทนตัวแปรตัวที่  $i$  และ  $Y$  แทนผลลัพธ์ได้ในการจำแนก (ซึ่งเป็นระยะทางสำหรับอัลกอริทึมไควนาติกซ์ไทม์วาร์ปปีง และเป็นความน่าจะเป็นในการจราจรติดขัดสำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Y = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad \dots\dots\dots(4.5.2-1)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การทดลอง และการวิเคราะห์ผลข้อมูล

#### 5.1 เครื่องมือที่ใช้ทดลองในการวิจัย

##### 5.1.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพาส่วนบุคคล ใช้ในขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมและดำเนินการวิจัย
- 2) เครื่องคอมพิวเตอร์ Server Dell รุ่น R200 ใช้สำหรับ Benchmark อัลกอริทึมในขั้นตอนการประเมินผลงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้
  - ตัวประมวลผล (CPU) Intel XEON x3220 2.33Ghz
  - RAM 4 Gb PC6700
  - Hard disk ขนาด 320 Gb ความเร็ว 7200rpm

##### 5.1.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

- 1) ระบบปฏิบัติการที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย
  - Microsoft Windows XP SP3 Professional
- 2) วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล
  - Microsoft Excel 2007 Enterprise Edition
  - SPSS Statistics 17.0
  - MATLAB R2010a
- 3) สร้างข้อมูลจำลอง
  - Aimsun 6.1 Professional (Licensed Department of Transportation, Chula)
  - Paramic 5 (Licensed Department of Transportation, Chula)
  - Microsoft Visual Studio 2008 Enterprise Edition

#### 5.2 การทดสอบการปรับเรียบข้อมูล

เนื่องจากลักษณะข้อมูลดิบสภาพการจราจรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อมูลรบกวนค่อนข้างมาก ดังนั้นการนำข้อมูลดิบมาใช้โดยไม่ขจัดข้อมูลรบกวนจึงไม่เหมาะสมนัก และดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3.2 ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การปรับเรียบแบบค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ (Moving Average) ที่ถูกนำเสนอโดยงานวิจัย [19] โดยกล่าวว่าเทคนิคค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลได้จะสามารถปรับเรียบข้อมูลได้สะท้อนค่าความจริงมากที่สุด ซึ่งจุดประสงค์ในการทดสอบ

นี้เพื่อหาค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างสภาพการจราจรติดขัดและสภาพการจราจรปกติ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับเรียบ โดยจะมีการทดสอบดังนี้

#### ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

- ข้อมูลค่าเฉลี่ยของความเร็วช่วงเวลา 1 นาทีโดยไม่มี การปรับเรียบ กับข้อมูลที่ถูกปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบง่าย และแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล
- ข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของความเร็วช่วงเวลา 1 นาทีโดยไม่มี การปรับเรียบ กับข้อมูลที่ถูกปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบง่าย และแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

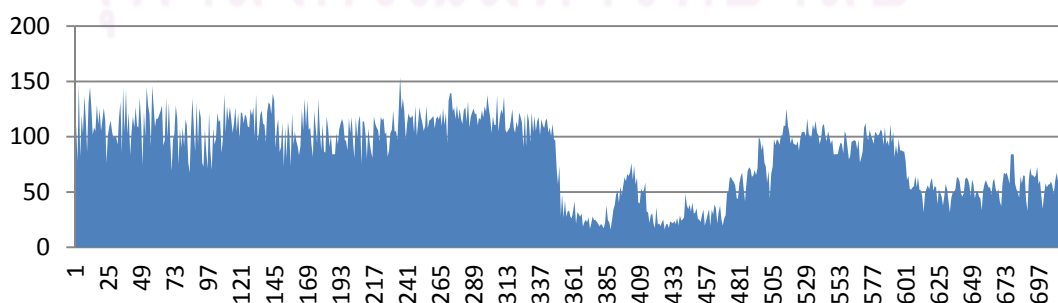
#### สถิติทดสอบ

- ค่าผลต่างคะแนนที (t-Test)
- ค่าความเชื่อมั่น (Confidential Value) 95%

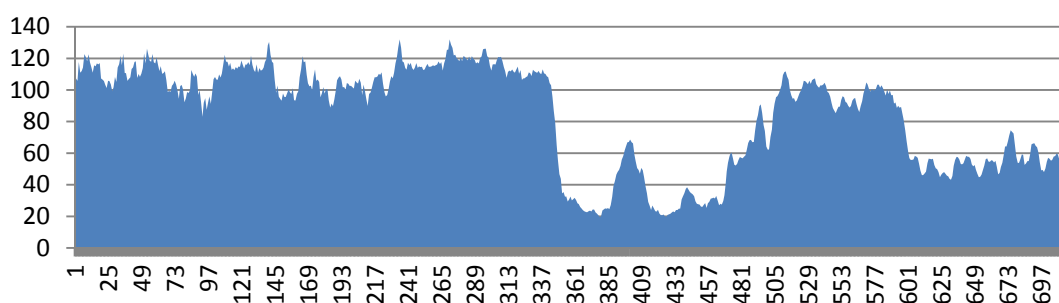
#### 5.2.1 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบค่าความแตกต่างของตัวแปรที่เปลี่ยนไประหว่างการจราจรปกติกับการจราจรติดขัดได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.2.1-1 โดยจากการกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 0.95 ทำให้ค่า P-Value มากที่สุดที่จะยอมรับการทดสอบค่าคะแนนทีว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ คือ 0.05

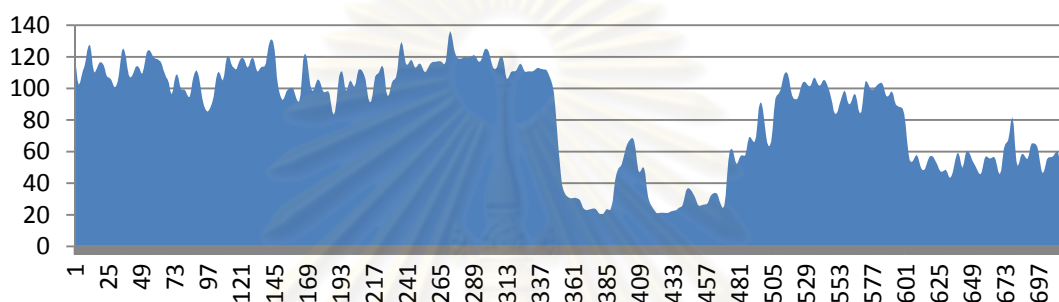
รูปที่ 5.2.1-1 ถึงรูปที่ 5.2.1-6 แสดงตัวอย่างวันที่ 7 ธันวาคม 2551 ทิศทางการจราจรขาเข้ากรุงเทพมหานคร ที่ช่วงเฉลี่ย 1 นาที โดยรูปที่ 5.2.1-1 ถึงรูปที่ 5.2.1-3 แสดงข้อมูลความเร็วเฉลี่ย (Mean Speed) ที่ไม่ผ่านการปรับเรียบ ผ่านการปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบง่าย และการปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และรูปที่ 5.2.1-4 ถึงรูปที่ 5.2.1-6 แสดงข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย (SD of Mean Speed) ที่ไม่ผ่านการปรับเรียบ ผ่านการปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบง่าย และการปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล



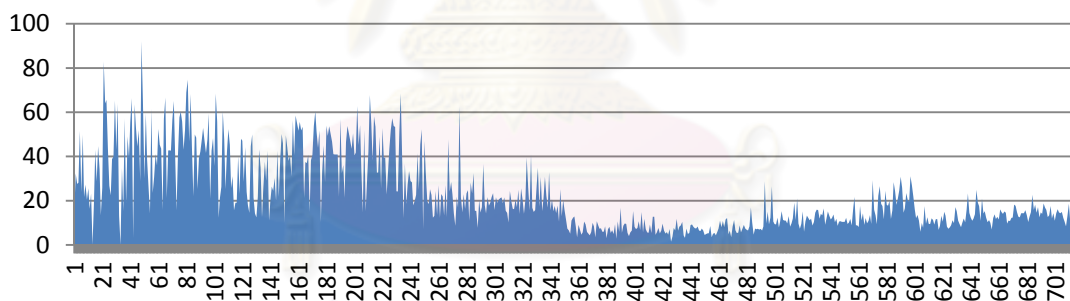
รูปที่ 5.2.1-1 ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่ไม่มีการปรับเรียบ



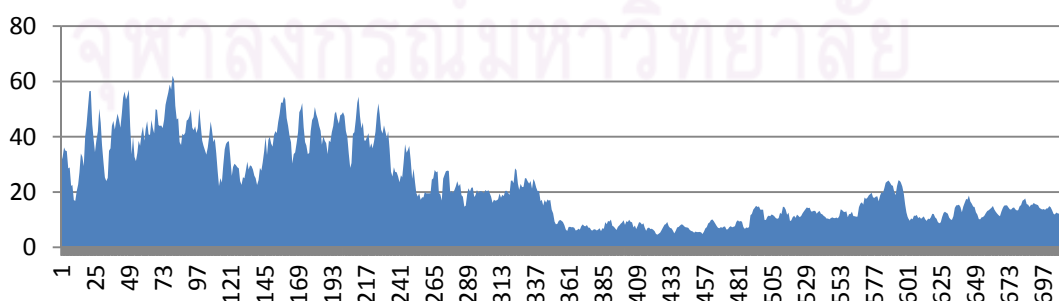
รูปที่ 5.2.1-2 ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียงด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย



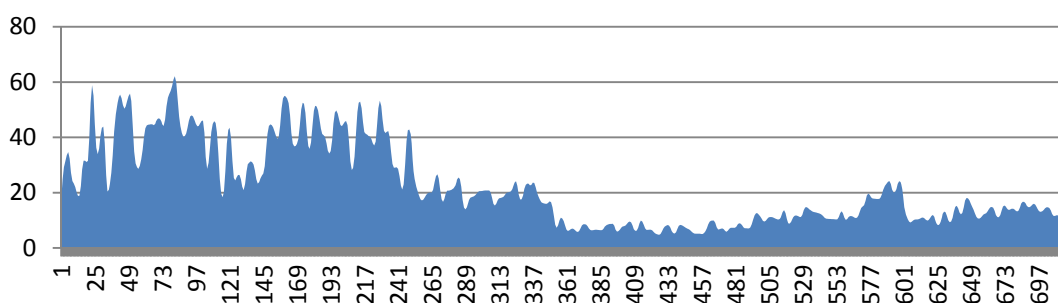
รูปที่ 5.2.1-3 ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียงด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอ็กโปเนนเชียล



รูปที่ 5.2.1-4 ข้อมูลเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยที่ไม่มีการปรับเรียง



รูปที่ 5.2.1-5 ข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียงด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย



รูปที่ 5.2.1-6 ข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยที่ปรับเรียบ  
ด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

ตารางที่ 5.2.1-1 ผลสรุปคะแนนที่ ช่องการจราจรขาออก

		ค่าเฉลี่ยคะแนนที่ของการจราจรปกติและการจราจรติดขัด			
ทิศทาง	สถิติทดสอบ	No Smoothing	Simple MA.	Exponential MA.	
ขาเข้า	Mean	t-Score	3.22	4.88	4.93
		P-Value	$3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
	SD	t-Score	3.10	3.72	3.77
		P-Value	$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$
ขาออก	Mean	t-Score	3.07	3.93	3.93
		P-Value	$4 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$
	SD	t-Score	2.88	3.51	3.54
		P-Value	$9 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$

### 5.2.2 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพบว่าเมื่อปรับเรียบข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ ค่าความแตกต่างระหว่างการจราจรปกติกับการจราจรติดขัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และการปรับเรียบด้วยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจะให้ค่าความแตกต่างมากกว่าค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบง่ายเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของการปรับเรียบแต่ละรูปแบบ โดยการปรับเรียบแบบค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบง่ายจะมีการเฉลี่ยค่าทั้งหมดโดยให้ความสำคัญกับทุกค่าเท่าๆ กัน ส่วนการคำนวณของค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจะให้ความสำคัญกับค่าที่ใกล้ที่สุดตามสมการการยกกำลัง ซึ่งการคำนวณแบบดังกล่าวตรงกับจุดประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ต้องการวิเคราะห์ค่าข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างทันกาล ซึ่งค่าการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลจะช่วยปรับเรียบข้อมูลรบกวน แต่ยังคง



แสดงค่าสำคัญ (Significant Value) ของตัวแปร (ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างเด่นชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [19]

### 5.3 การฝึกฝนอัลกอริทึม

ในขั้นตอนการฝึกฝนอัลกอริทึมทั้งสองชนิดจะทำให้ได้รูปแบบอ้างอิงเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบและจำแนกรูปแบบที่ต้องการ โดยผู้วิจัยจะเลือกรูปแบบอิงจากการจราจรติดขัดอย่างสุด 11 รูปแบบ (60%) จากรูปแบบการจราจรติดขัดต้นแบบ 19 ครั้งใน 19 วันสำหรับทิศทางขาออก และ 19 ครั้งใน 19 วันเช่นกัน สำหรับทิศทางขาเข้า และเลือกรูปแบบอิงจากการจราจรปกติอย่างสุดอีก 60% จากรูปแบบการจราจรปกติต้นแบบที่เหลืออีก 165 วัน ซึ่งคือ 99 วัน ทั้ง 2 ทิศทางการจราจร เพื่อนำมาประมวลผลตามขั้นตอน โดยเริ่มจากคำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย (Feature Measurements) และจึงนำมาผ่านอัลกอริทึมเริ่มต้นและจับข้อมูลรูปแบบจำลอง (Trigger & Capture Algorithm) ซึ่งทำให้ได้รูปแบบอ้างอิงเพื่อนำไปใช้สำหรับอัลกอริทึมการจำแนกดังตารางที่ 5.2-1 และ 5.2-2 แสดงรูปแบบอ้างอิงของความเร็วเฉลี่ย และตารางที่ 5.2-3 และ 5.2-4 แสดงรูปแบบอ้างอิงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ของทิศทางขาเข้าและขาออกตามลำดับ โดยแทนที่ค่าของตัวแปร และแทนที่ช่วงของข้อมูลที่เก็บได้จากอัลกอริทึมเริ่มต้นแบบจำลอง

#### 5.3.1 การฝึกฝนอัลกอริทึมไดว์นามิกซ์โทมัวร์ปิง

สำหรับอัลกอริทึมไดว์นามิกซ์โทมัวร์ปิง จะนำรูปแบบอิงที่ได้มาสร้างเวกเตอร์ของลักษณะสำคัญ (Features) นั้นๆ เพื่อนำไปประมวลผลในอัลกอริทึมไดว์นามิกซ์โทมัวร์ปิงต่อไป ซึ่งจะมีรูปแบบ ดังต่อไปนี้

Speed Vector :  $[V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]$  และ SD of Speed Vector :  $[SD_1, SD_2, SD_3, \dots, SD_n]$

#### 5.3.2 การฝึกฝนอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์

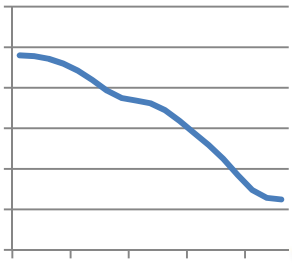
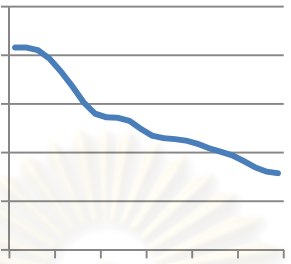
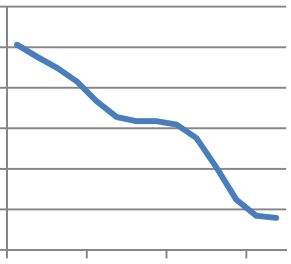
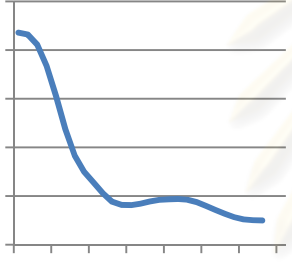
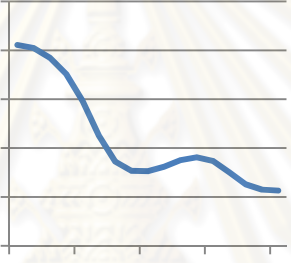
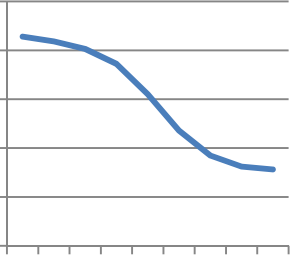
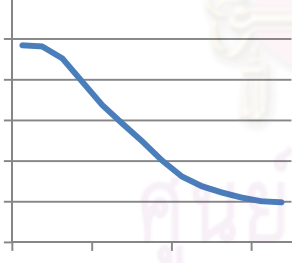
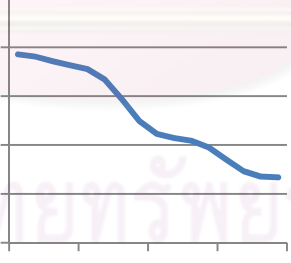
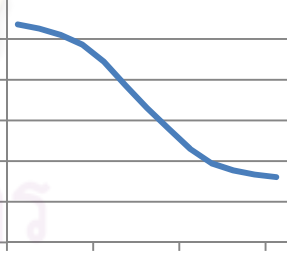
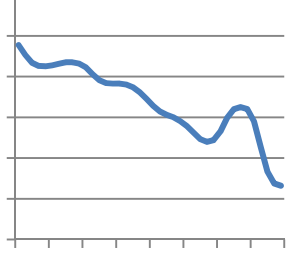
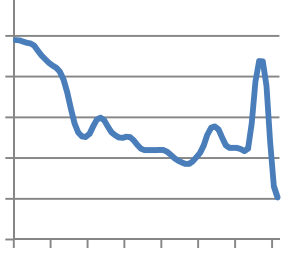
สำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเบย์ จะนำแบบรูปแบบเข้าคำนวณตามสมการ (4.4.1.2-1) ทำให้ได้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการจราจรติดขัด (Congestion Likelihood) ตามอัลกอริทึมในหัวข้อ 4.4.1.2

##### 5.3.2.1 การวิเคราะห์หาความรู้ก่อนหน้าตามงานวิจัยของ Oh et al [4]

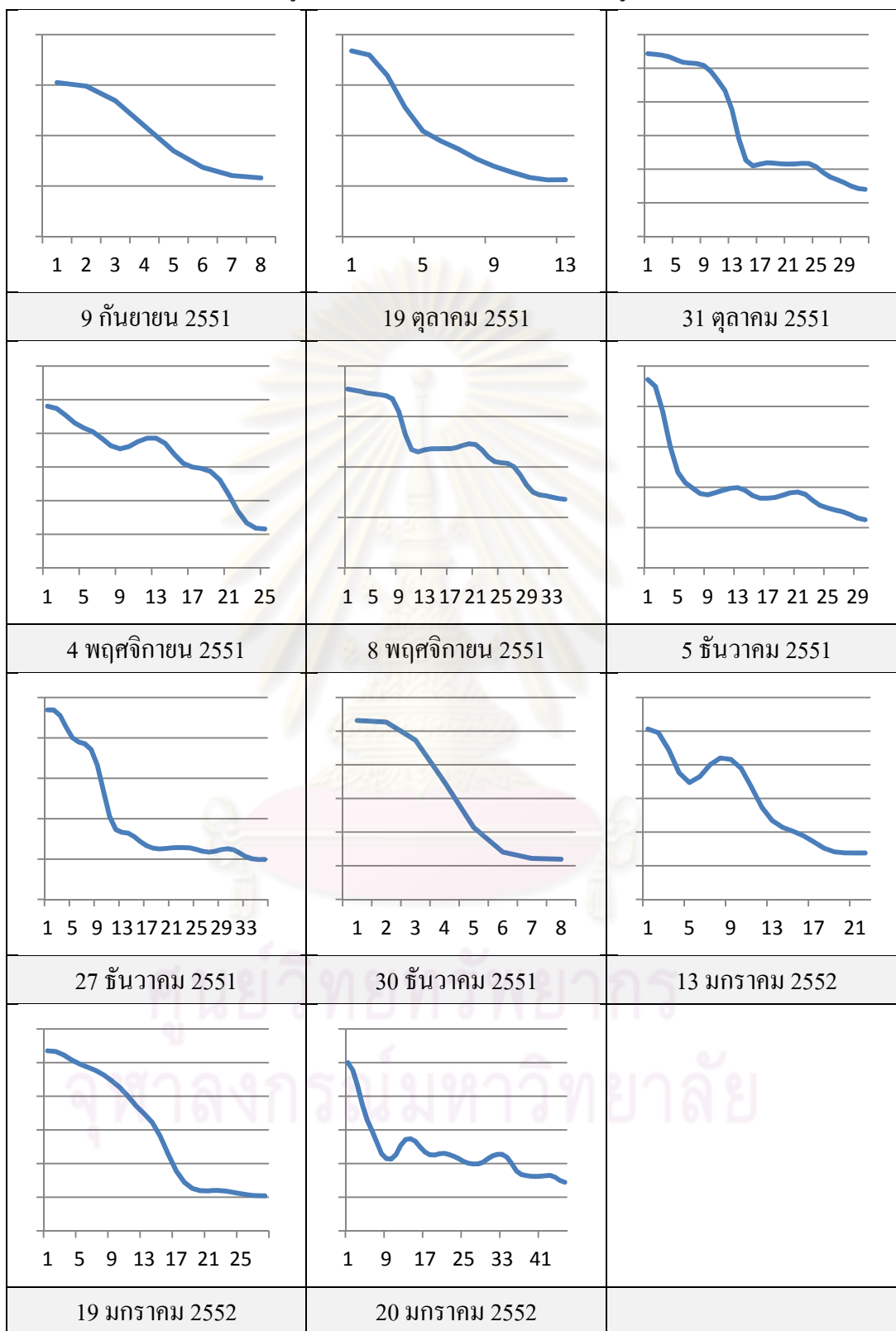
เนื่องจากข้อมูลความรู้ก่อนหน้ามีลักษณะต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จึงพัฒนาประยุกต์ใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นขึ้นโดยใช้ฟังก์ชัน Kernel Density Estimator -  $\hat{f}_h(x)$  ประมาณการกระจายตัวประชากรเพื่อนำมาเป็นความรู้ก่อนหน้าในสมการความน่าจะเป็นของเบย์ โดยผลการคำนวณ  $\hat{f}_h(x)$  สำหรับความเร็วเฉลี่ยการจราจรขาเข้าและขาออก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3-1 และรูปที่ 5.3-2 และผลการคำนวณ

$\hat{f}_h(x)$  สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเร็วเฉลี่ยการศึกษากิจการจราจรขาเข้าและขาออก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3-3 ถึงรูปที่ 5.3-4

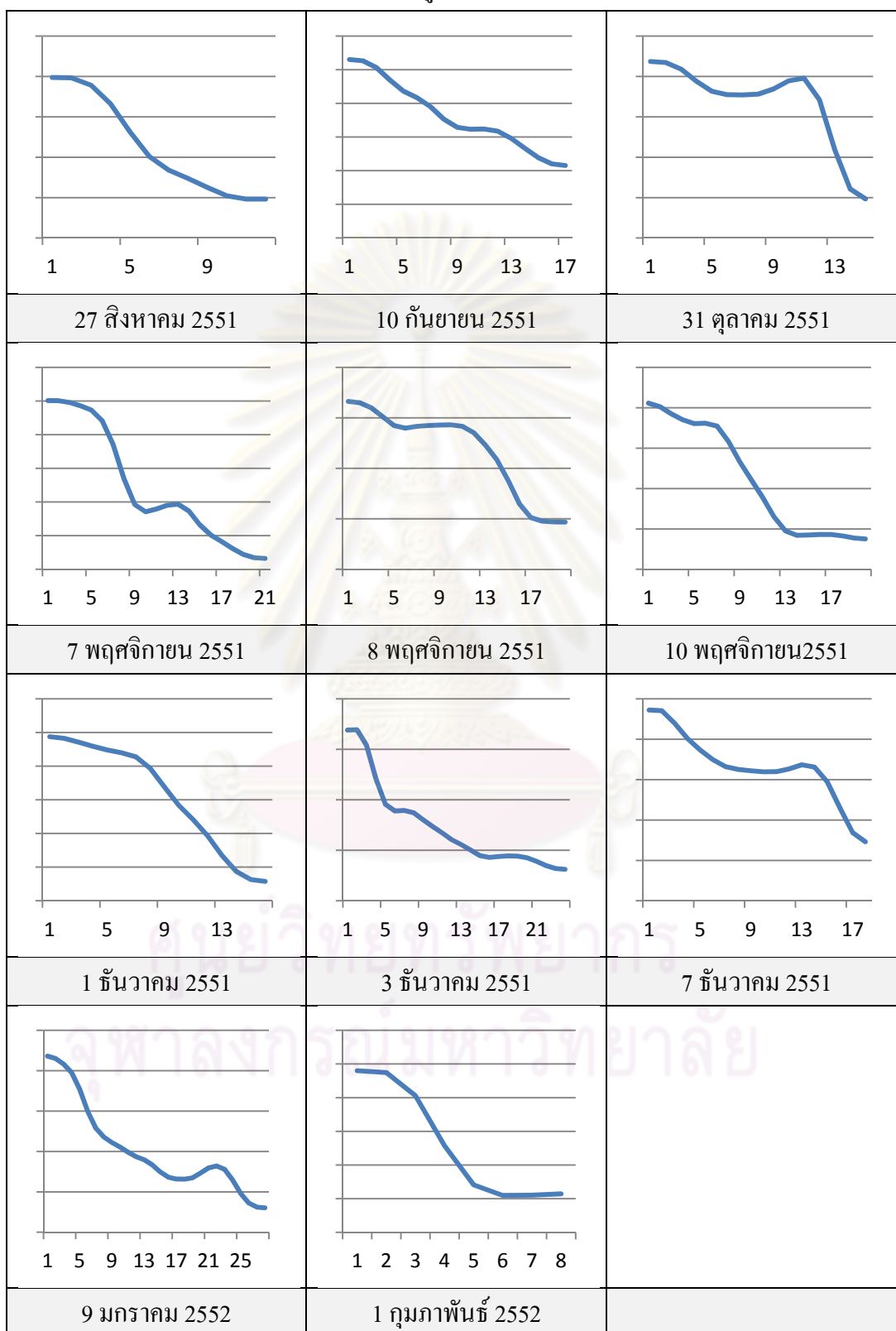
ตารางที่ 5.3-1 รูปแบบอ้างอิงความเร็วเฉลี่ยจากข้อมูลจริงทิศทางขาเข้า

		
27 สิงหาคม 2551	10 กันยายน 2551	31 ตุลาคม 2551
		
7 พฤศจิกายน 2551	8 พฤศจิกายน 2551	10 พฤศจิกายน 2551
		
1 ธันวาคม 2551	3 ธันวาคม 2551	7 ธันวาคม 2551
		
9 มกราคม 2552	1 กุมภาพันธ์ 2552	

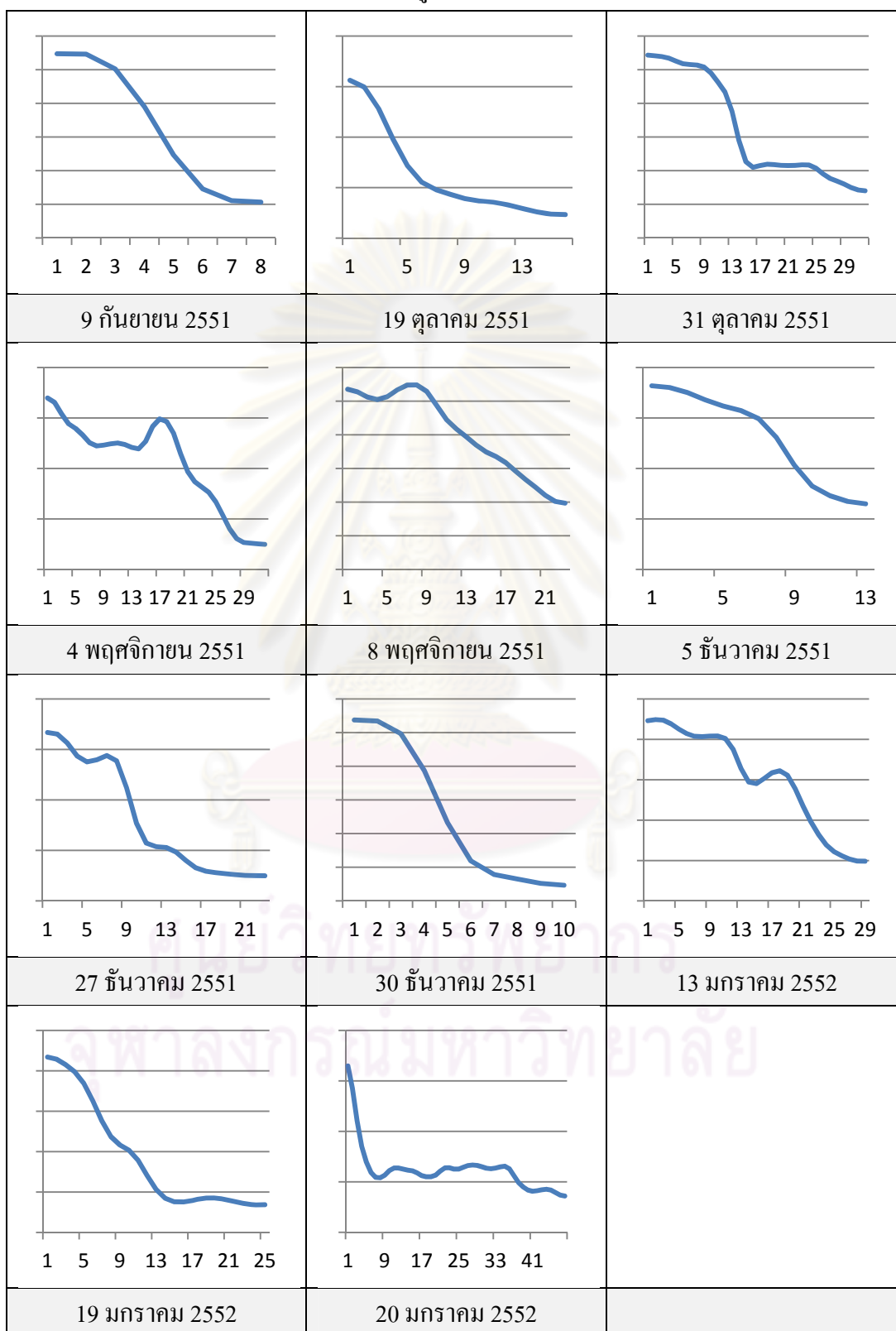
ตารางที่ 5.3-2 รูปแบบอ้างอิงความเร็วเฉลี่ยจากข้อมูลจริงทิศทางขาออก

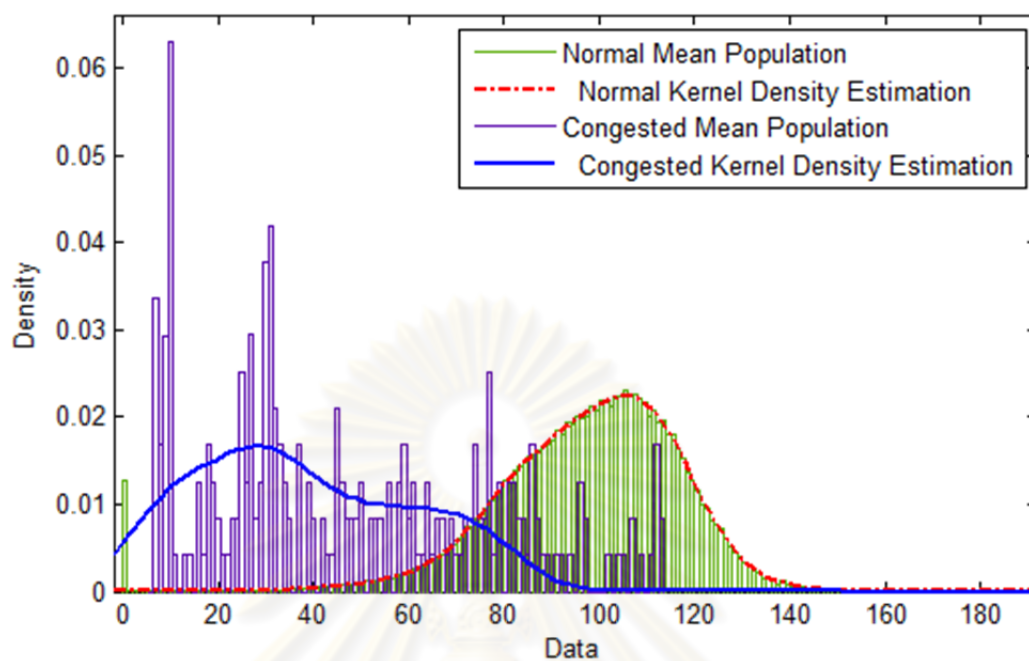


ตารางที่ 5.3-3 รูปแบบอ้างอิงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย  
จากข้อมูลจริงทิศทางขาเข้า

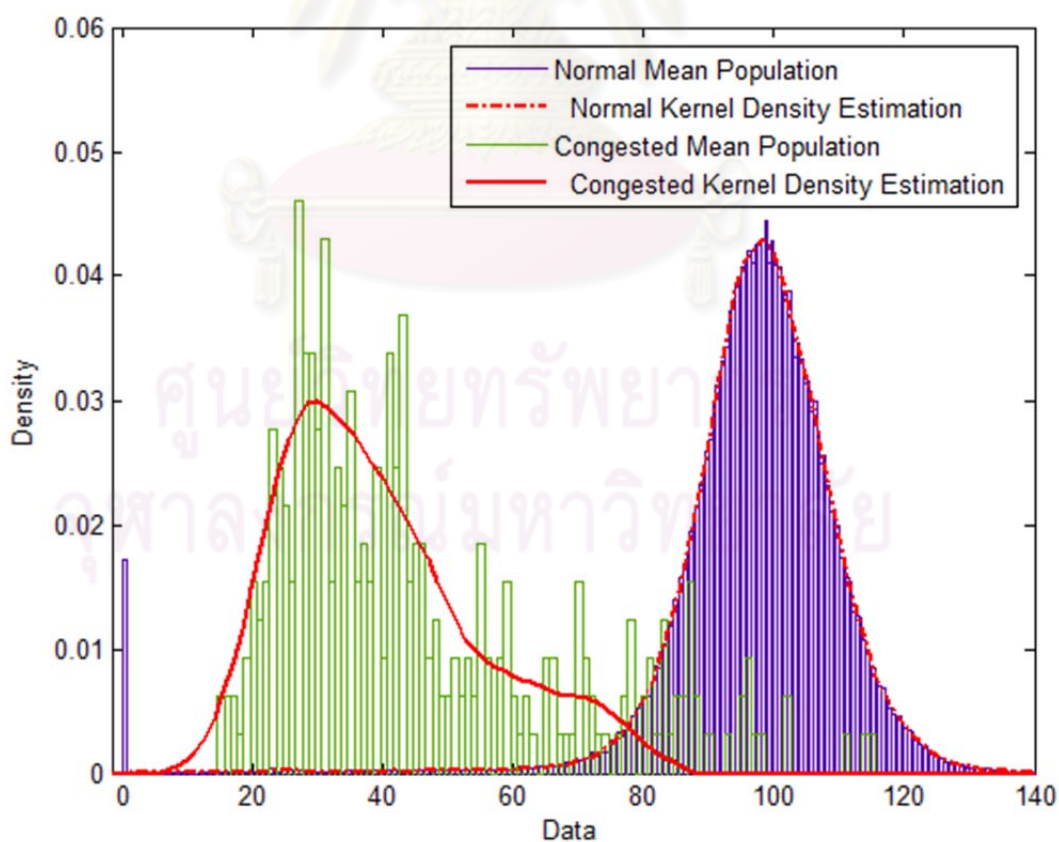


ตารางที่ 5.3-4 รูปแบบอ้างอิงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย  
จากข้อมูลจริงทิศทางขาออก

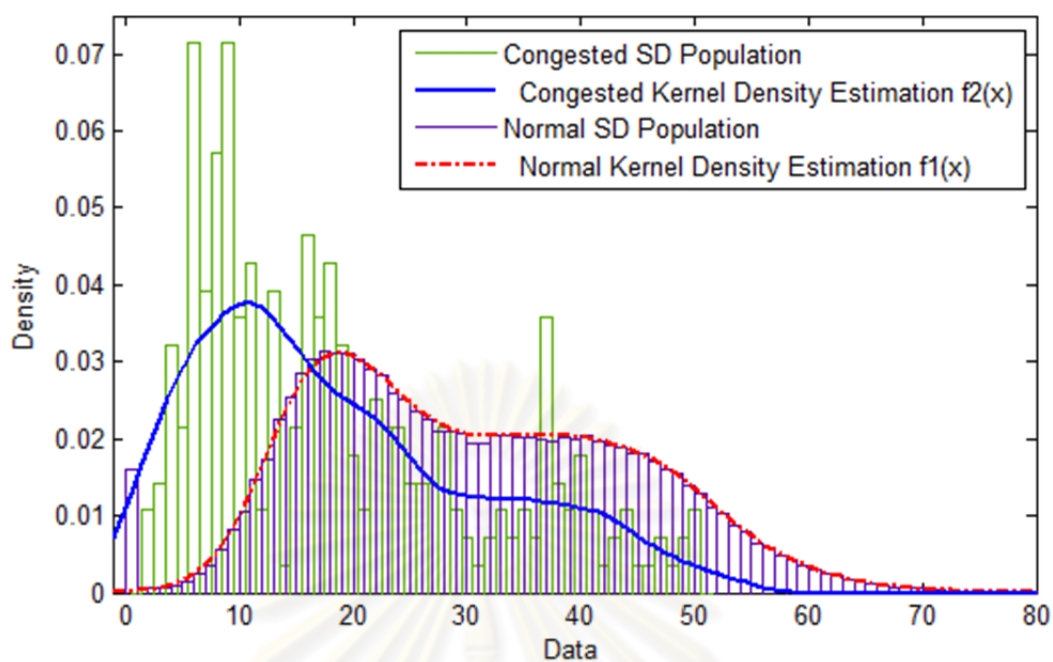




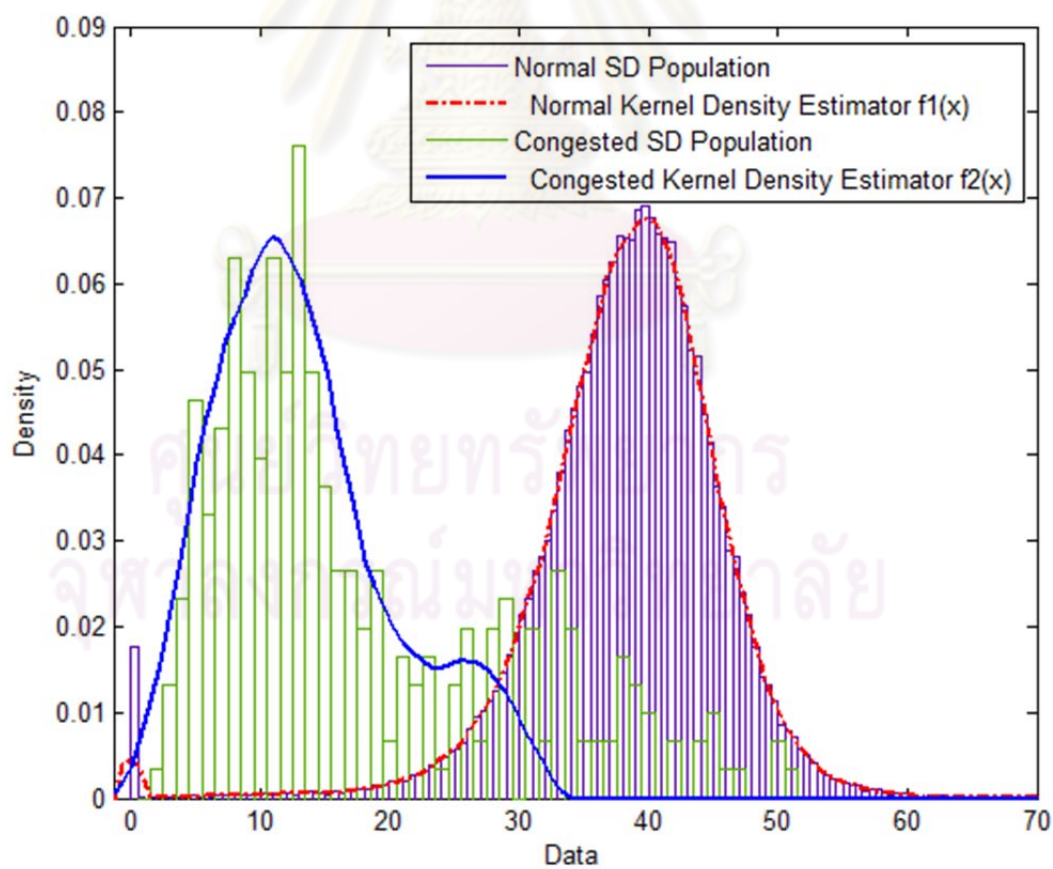
รูปที่ 5.3.2.1-1 การประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาเข้า



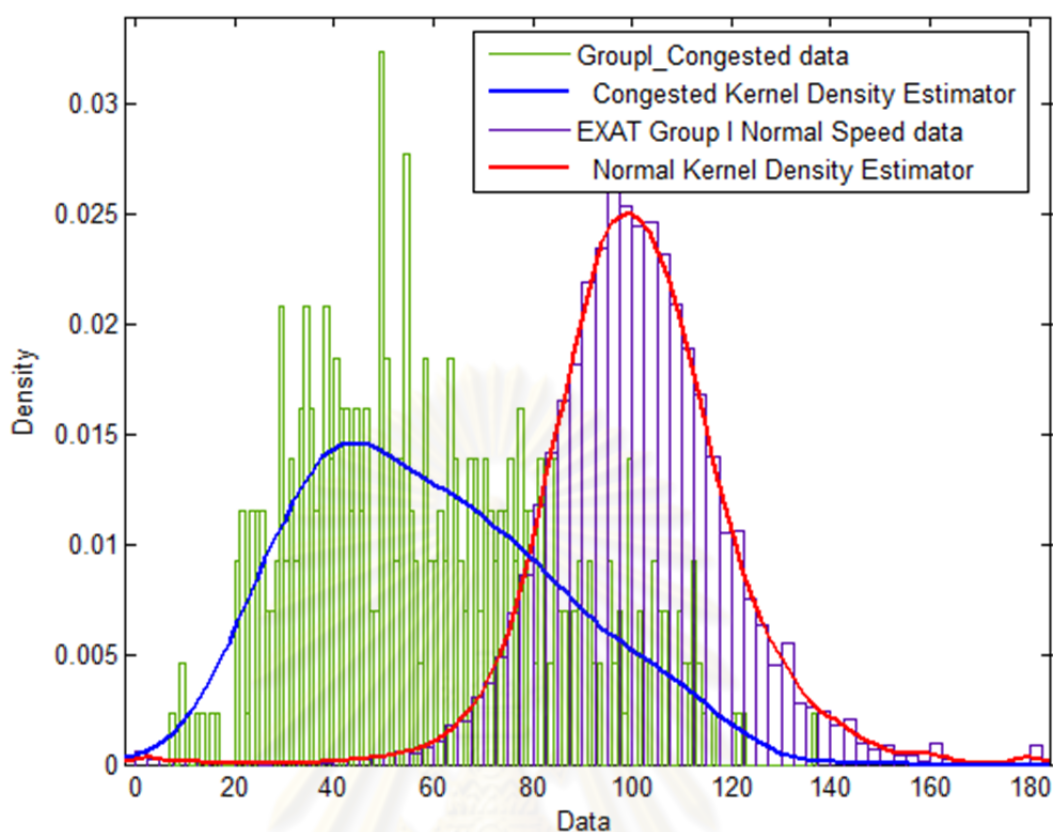
รูปที่ 5.3.2.1-2 การประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาออก



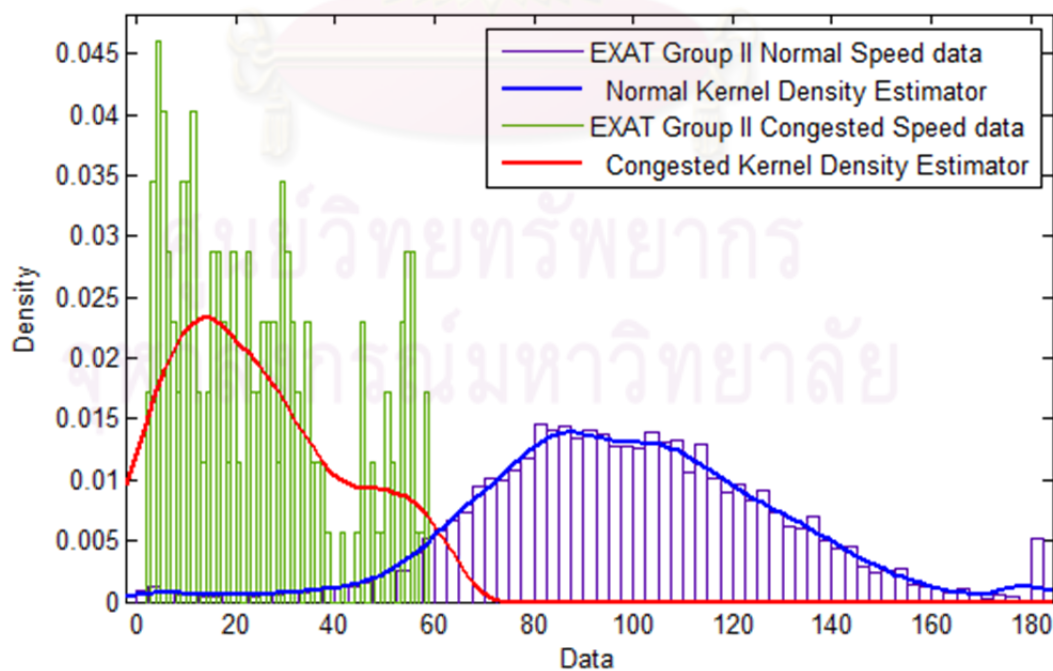
รูปที่ 5.3.2.1-3 การประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย  
ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาเข้า



รูปที่ 5.3.2.1-4 การประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย  
ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลทิศทางขาออก

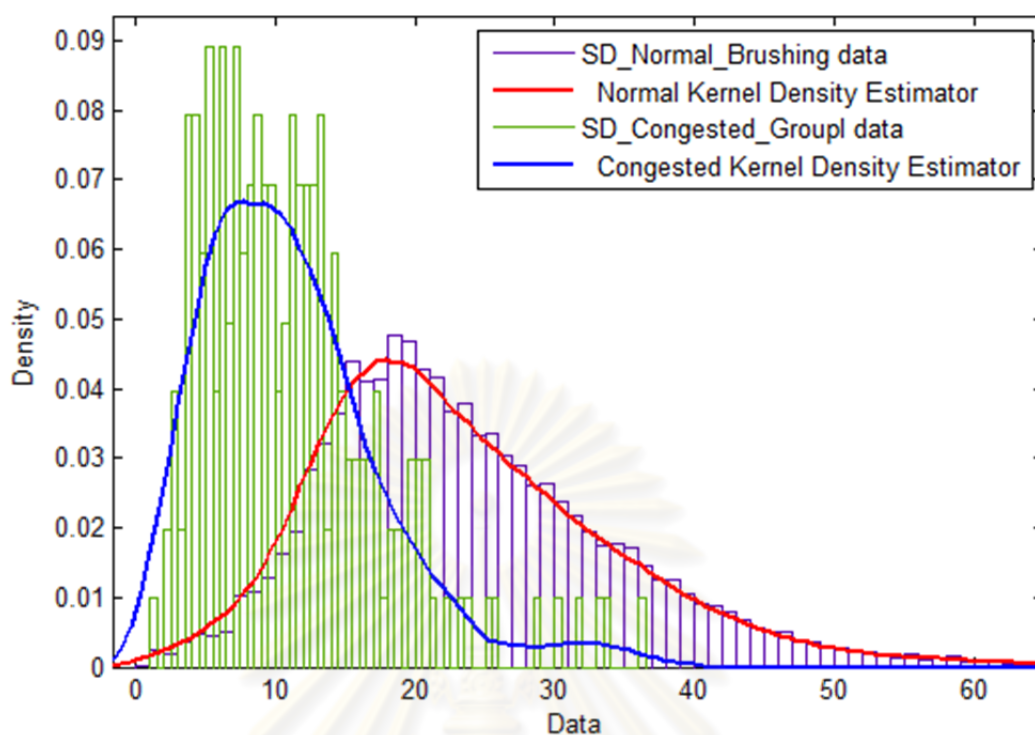


รูปที่ 5.3.2.1-5 การประมาณความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล  
ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

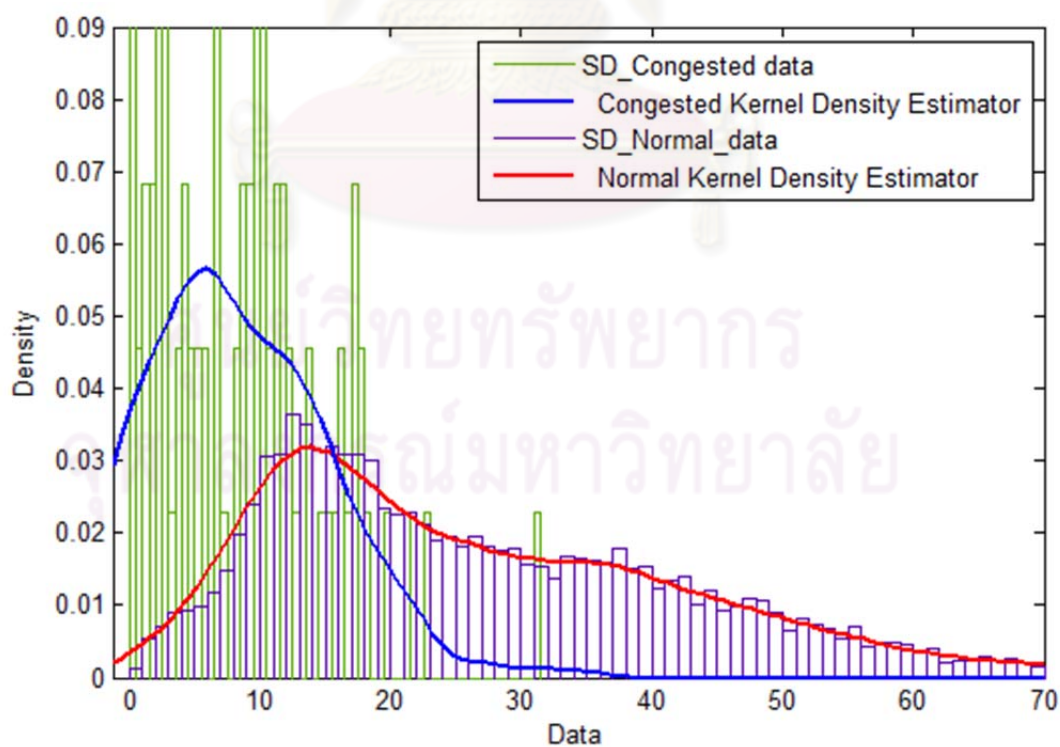


รูปที่ 5.3.2.1-6 การประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล  
ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2



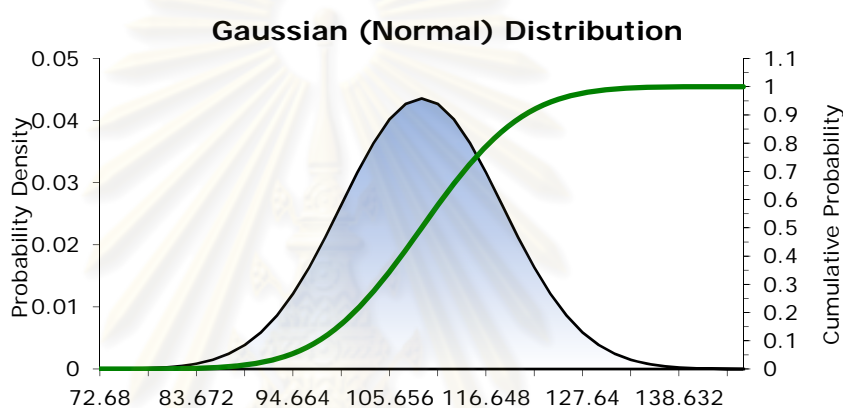


รูปที่ 5.3.2.1-7 การประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย  
ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

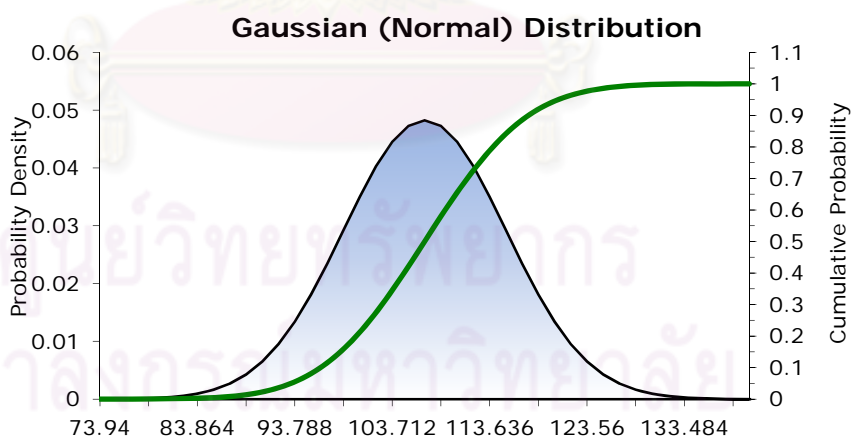


รูปที่ 5.3.2.1-8 การประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย  
ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

แต่อย่างไรก็ตาม ตามทฤษฎีการกระจายตัวทางสถิติและพฤติกรรมการขับชั้รถยนต์ [11,23] การกระจายตัวของความเร็วของถนนคลองหลวงควรจะมีการแจกแจงปกติ ซึ่งจากบทที่ 3 พบว่าข้อมูลความเร็วเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองมีการกระจายตัวแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 3.5.2-1 ถึง รูปที่ 3.5.2-8 แต่จากข้อมูลที่เก็บมาเป็นข้อมูลรวม 3 ช่องการจราจร จึงทำให้ลักษณะการกระจายตัวมีลักษณะคล้ายการกระจายตัวปกติที่มีค่าเฉลี่ยต่างกันซ้อนกันอยู่ซึ่งจะเห็นได้ในรูปที่ 5.2.2.1-1 ถึงรูปที่ 5.2.2.1-4 โดยในรูปที่ 5.2.2.2-5 และรูปที่ 5.2.2.2-6 แสดงตัวอย่างการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ที่มีความพอดีกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 5.3.2.1-7 การกระจายเกาส์เซียนทิศทางขาเข้า



รูปที่ 5.3.2.1-8 แสดงการกระจายเกาส์เซียนทิศทางขาออก

แต่สำหรับการกระจายตัวของความเร็วของทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 นั้นเกิดจากการรวมข้อมูลจากหลายกล้องเข้าด้วยกันดังนั้นลักษณะการกระจายตัวจึงไม่เป็นการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนหรือการกระจายตัวปกติดังที่ให้เห็นในรูป 5.3.2.1-5 ถึง 5.3.2.1-8

### 5.3.2.2 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการจราจรติดขัดตามสมการของเบย์

เมื่อเตรียมฟังก์ชันความรู้ก่อนหน้า (Prior Knowledge) ได้แก่ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) ของการจราจรปกติ -  $f_1(x)$  และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) ของการจราจรติดขัด  $f_2(x)$  ทั้ง 2 ตัวแปรและ 2 ทิศทางการจราจรเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือคำนวณความน่าจะเป็นที่จะเกิดการจราจรติดขัดตามสมการของเบย์

โดยจากสมการ (4.4.1.2-1) จะสามารถคำนวณความน่าจะเป็นของการจราจรปกติได้จาก

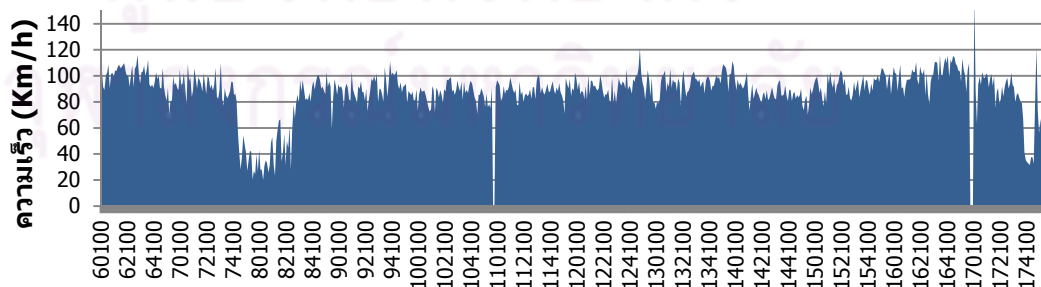
$$P(p_1 | x_0) = \frac{p_1 f_1(x_0)}{p_1 f_1(x_0) + p_2 f_2(x_0)} \dots \dots \dots (4.4.1.2-1)$$

และจะสามารถหาความน่าจะเป็นของการจราจรติดขัดได้จากคุณสมบัติผลรวมของความน่าจะเป็นจะได้

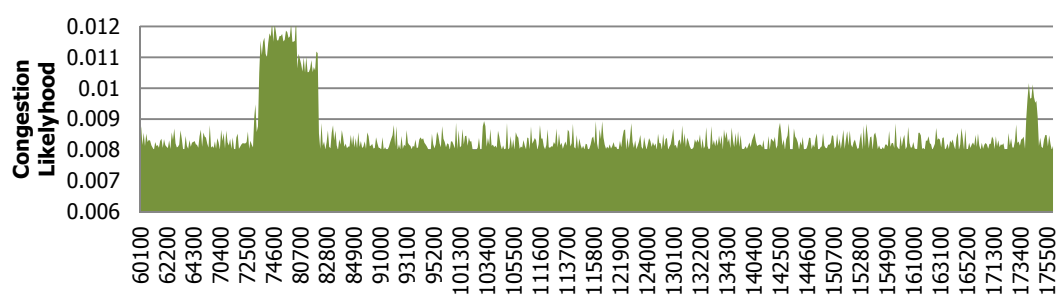
$$P(p_2 | x_0) = 1 - P(p_1 | x_0) \dots \dots \dots (4.4.1.2-2)$$

โดย  $p_1$  และ  $p_2$  เป็นความน่าจะเป็นก่อน (Prior Probabilities) โดย  $p_1$  เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดการจราจรปกติ และ  $p_2$  เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปสู่การจราจรติด ซึ่งคำนวณได้จากผลรวมของช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปสู่การจราจรติดขัดทั้งหมดหารด้วยช่วงเวลาการจราจรทั้งหมดในชุดข้อมูลที่ศึกษา และ  $p_1$  หาได้จากความสัมพันธ์ผลรวมของความน่าจะเป็น นั่นคือ  $p_1 = 1 - p_2$

เมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากสมการ (4.4.1.2-1) มาพล็อตตามแกนเวลาจะได้ดังรูปที่ 5.2.2.2-2 โดยเป็นของวันที่ 7 ธันวาคม ทิศทางขาเข้า ซึ่งเกิดการ



รูปที่ 5.3.2.2-1 ความเร็วของวันที่ 7 ธันวาคม ทิศทางขาเข้า



รูปที่ 5.3.2.2-2 ความน่าจะเป็นของการจราจรติดขัดที่คำนวณได้  
จากการทำการสอนอัลกอริทึมเบย์ทั้งหมดทำให้ได้ค่าขีดแบ่งดังต่อไปนี้

#### ตัวแปรความเร็วเฉลี่ย

- ถนนคลองหลวงทิศทางขาเข้ากรุงเทพ = 0.009
- ถนนคลองหลวงทิศทางขาออกกรุงเทพ = 0.009
- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 = 0.012
- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 = 0.012

#### ตัวแปรส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย

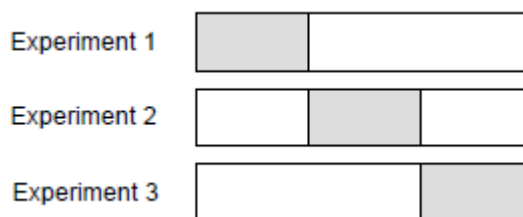
- ถนนคลองหลวงทิศทางขาเข้ากรุงเทพ = 0.010
- ถนนคลองหลวงทิศทางขาออกกรุงเทพ = 0.010
- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 = 0.015
- ทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 = 0.014

## 5.4 การสอบทานความถูกต้องแบบไขว้

จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1.5 การสอบทานความถูกต้องแบบไขว้ (Cross Validations) จะช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งการทดลองในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประยุกต์ใช้ 2 เทคนิค ตามความเหมาะสมของปริมาณข้อมูล ดังต่อไปนี้

### 5.4.1 การสอบทานข้อมูลแบบ K-Fold

ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคนี้กับข้อมูลถนนคลองหลวงทั้งสองทิศทางการจราจรที่มีตัวอย่างการทดสอบจำนวน 18 ตัวอย่างการทดสอบ และข้อมูลทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 ซึ่งมีตัวอย่างการทดสอบจำนวน 18 ตัวอย่างการทดสอบเช่นกัน โดยอ้างอิงจาก [7] ผู้วิจัยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน หรือจะใช้ค่า  $K=3$  ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงในระดับที่ยอมรับได้ และเป็นสัดส่วนลงตัวกับจำนวนข้อมูลที่ทำกรแบ่งแต่ละครั้ง ดังนั้นจะทำให้ได้ 3 การทดสอบ โดยในแต่ละการทดสอบจะใช้ 12 ชุด ตัวอย่างในการสอน (Training set) และ 6 ชุดตัวอย่างในการทดสอบ (Testing set) และผลลัพธ์ที่ได้นั้นคำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 5.4.1-1 แสดงการแบ่งกลุ่มข้อมูลและการทดลอง

#### 5.4.2 การสอบทานข้อมูลแบบ Leave-one-out

เนื่องจากการสอบทานข้อมูลแบบ Leave-one-out เหมาะสำหรับข้อมูลสอนที่มีปริมาณน้อย และยังคงให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยผู้วิจัยพิจารณาเลือกใช้กับชุดข้อมูลคววนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 ซึ่งมีตัวอย่างการทดสอบจำนวน 8 ตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งข้อมูลสอนทุกตัวจะถูกใช้เป็นข้อมูลสอนและข้อมูลทดสอบ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.1.1.5 ซึ่งทำให้มีการทดลองทั้งสิ้น 8 การทดลอง และผลลัพธ์ที่ได้นั้นคำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งหมด

#### 5.5 การทดสอบการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหนึ่งตัว

ในการทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของอัลกอริทึมไดว์นามิกซีทีเอ็มวาร์ปิงและอัลกอริทึมเบย์นั้น จะใช้ค่าชี้วัดดังต่อไปนี้

1. อัตราการตรวจพบ (Detection Rate - DR) คือ จำนวนตัวอย่างสภาพการจราจรติดขัดทั้งหมดที่อัลกอริทึมตรวจพบและรายงานได้อย่างถูกต้อง วัดเทียบจากข้อมูลสภาพการจราจรติดขัดทั้งหมดที่ถูกใช้เปรียบเทียบ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Detection Rate - DR} = \frac{\text{Number of Congestion Detected}}{\text{Total Number of Congestion Cases}}$$

2. อัตราการรายงานผิดพลาด (False Alarm Rate - FAR) คือ อัลกอริทึมรายงานชนิดของสภาพการจราจรผิดพลาด โดยรายงานตัวอย่างเป็นสภาพการจราจรติดขัด ทั้งๆ ที่เป็นสภาพการจราจรปกติ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{False Alarm Rate - FAR} = \frac{\text{Number of Alarms not in Specified Duration}}{\text{Total Number of Alarms}}$$

3. ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจพบ (Mean Time to Detection - MTTD) คือ ผลต่างระหว่างระยะเวลาที่อัลกอริทึมรายงานว่าเป็นการจราจรติดขัด กับเวลาที่เกิดการจราจรติดขัดจริง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Mean Time to Detection – MTTD} = \frac{\sum \text{Delay of True Alarms}}{\text{Total Number of True Alarms}}$$

4. ระยะเวลาประมวลผล (CPU Consumption Rate - CCR) คือ ระยะเวลาที่ใช้ประมวลผลข้อมูลทั้งหมด

$$\text{CPU Consumption Rate – CCR} = \frac{\sum \text{Delay of Algorithm Consumption (s)}}{\text{Maximum Algorithm Consumption (s)}}$$

จากหัวข้อที่ 5.2 จะเหลือข้อมูลที่ใช้สำหรับการทดสอบ 40% ของตัวอย่างจากการจราจรติดขัดทั้งหมด ซึ่งคือ 8 ตัวอย่างสำหรับการจราจรทิศทางขาเข้า และ 8 ตัวอย่างสำหรับการจราจรทิศทางขาออก

### 5.5.1 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บึง

ผลการทดสอบอัลกอริทึมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ อัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บึง ที่ไม่มีการปรับแต่งขอบเขตการเคลื่อนที่ และอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บึงที่มีการปรับแต่งขอบเขตการเคลื่อนที่ และเพื่อทดสอบความยืดหยุ่นของอัลกอริทึม จะนำข้อมูลสอน (training data) ที่สอนด้วยข้อมูลคลองหลวงนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลทางด่วนดาวคะนอง (Type-I) และข้อมูลที่สอนใหม่ด้วยข้อมูลทางด่วนดาวคะนองทั้งสองกลุ่มเอง (Type-II)

#### 5.5.1.1 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บึงปกติ

ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.3.1.1-1 และตารางที่ 5.3.1.1-2 แยกตามทิศทางการจราจร

ตารางที่ 5.5.1.1-1 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	410	0.530	17
SD	8	0.750	394	0.600	21

ตารางที่ 5.5.1.1-2 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาออก

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	454	0.600	18
SD	8	0.750	441	0.704	21

ตารางที่ 5.5.1.1-3 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

(Type-I ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงจากทั้งสองทิศทางจราจร)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	420	0.530	21
SD	8	0.750	410	0.704	25

ตารางที่ 5.5.1.1-4 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

(Type-I ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงจากทั้งสองทิศทางจราจร)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	18	0.389	420	0.600	22
SD	18	0.389	410	0.704	28

ตารางที่ 5.5.1.1-5 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

(Type-II ใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	420	0.530	21
SD	8	0.750	410	0.600	25

ตารางที่ 5.5.1.1-6 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

(Type-II ใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	18	0.611	420	0.600	22
SD	18	0.611	410	0.600	28

ตารางที่ 5.5.1.1-7 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	189	0	5
SD	8	1	180	0	6

### 5.5.1.2 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บึงจำกัดขอบเขต

ผลการทดสอบแบบการจำกัดขอบเขตความกว้างของหน้าต่างทางเดินที่ 3% แสดงได้ดังตารางที่ 5.4.1.2-1 ถึงตารางที่ 5.4.1.2-7 แยกตามทิศทางจราจร

ตารางที่ 5.5.1.2-1 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	398	0.467	8
SD	8	0.875	378	0.556	8

ตารางที่ 5.5.1.2-2 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาออก

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	442	0.600	8
SD	8	0.875	427	0.724	9

ตารางที่ 5.5.1.2-3 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

(Type-I ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงจากทั้งสองทิศทางการจราจร)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	420	0.467	21
SD	8	0.875	410	0.556	25

ตารางที่ 5.5.1.2-4 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

(Type-I ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงจากทั้งสองทิศทางการจราจร)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	18	0.389	420	0.556	22
SD	18	0.389	410	0.556	28

ตารางที่ 5.5.1.2-5 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

(Type-II ใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	420	0.167	21
SD	8	0.750	410	0.167	25



ตารางที่ 5.5.1.2-6 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2  
(Type-II ใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	18	0.611	420	0.111	22
SD	18	0.611	410	0.167	28

ตารางที่ 5.5.1.2-7 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	189	0	4
SD	8	1	180	0	4

### 5.5.2 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์

ตารางที่ 5.5.2-1 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาเข้า

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	300	0.600	~1
SD	8	0.875	210	0.724	~1

ตารางที่ 5.5.2-2 ข้อมูลถนนคลองหลวงทิศทางการจราจรขาออก

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	390	0.652	~1
SD	8	0.875	301	0.750	~1

ตารางที่ 5.5.2-3 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1  
(Type-I ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงจากทั้งสองทิศทางการจราจร)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0	-	$\infty^*$	-
SD	8	0	-	$\infty^*$	-

\*แสดง false alarm ตลอดเวลาการประมวลผล

ตารางที่ 5.5.2-4 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

(Type-I ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงจากทั้งสองทิศทางจราจร)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	18	0	-	$\infty^*$	-
SD	18	0	-	$\infty^*$	-

\*แสดง false alarm ตลอดเวลาการประมวลผล

ตารางที่ 5.5.2-5 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1

(Type-II ใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	0.875	387	0.375	21
SD	8	0.875	380	0.500	25

ตารางที่ 5.5.2-6 ข้อมูลจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2

(Type-II ใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2)

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	18	0.611	392	0.333	22
SD	18	0.611	389	0.278	28

ตารางที่ 5.5.2-7 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร

Candidate	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR
Mean	8	1	30.6	0	~1
SD	8	1	30.7	0	~1

## 5.6 การทดสอบการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหลายตัว

เนื่องจากการใช้ตัวแปรเดียวในการทดสอบ จะทำให้มีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการทดสอบแบบจำลองได้ง่าย ซึ่งจะเห็นได้จากค่า False Alarm Rate – FAR ที่ค่อนข้างสูง โดยจากภาพที่ 5.4-1 และ 5.4-2 จะเห็นได้ว่าการเกิด False Alarm นั้น มักจะไม่เกิดพร้อมกันที่ตำแหน่งเดียวกันทั้ง 2 ตัวแปร (ได้แก่ ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย) ดังนั้น ถ้ามีการประมวลผลที่มีการพิจารณาค่าทั้ง 2 ตัวแปรพร้อมกัน ก็จะทำให้สามารถลดค่า FAR ลงได้ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

### 5.6.1 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บั้ง

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว สำหรับอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บั้ง งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บั้งที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ กับอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บั้งที่มีการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 5.6.1.1 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บั้งปกติ

ตารางที่ 5.6.1.1-1 แสดงผลการจำแนกข้อมูลด้วย 2 ตัวแปร

ข้อมูล	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR (s)
ค.ขาเข้า	8	1	410	0.200	37
ค.ขาออก	8	0.875	454	0.364	37
ค.กลุ่มที่ 1 (Type I)*	8	0.875	420	0.530	46
ค.กลุ่มที่ 2 (Type I)*	18	0.389	420	0.600	55
ค.กลุ่มที่ 1 (Type II)*	8	0.875	420	0.556	48
ค.กลุ่มที่ 2 (Type II)*	18	0.611	420	0.556	55
แบบจำลอง	8	1	188	0	12

#### 5.6.1.2 ผลการทดสอบอัลกอริทึมไดนามิกวีโคมัวร์บั้งจำกัดขอบเขต

ตารางที่ 5.6.1.2-1 แสดงผลการจำแนกข้อมูลด้วย 2 ตัวแปร

ข้อมูล	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR (s)
ค.ขาเข้า	8	1	398	0.111	14
ค.ขาออก	8	0.875	442	0.222	15
ค.กลุ่มที่ 1 (Type I)*	8	0.875	420	0.467	47
ค.กลุ่มที่ 2 (Type I)*	18	0.389	420	0.389	47
ค.กลุ่มที่ 1 (Type II)*	8	0.875	420	0.250	46

ด.กลุ่มที่ 2 (Type II)*	18	0.722	420	0.389	46
แบบจำลอง	8	1	189	0	7

### 5.6.2 การจำแนกข้อมูลด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์

ตารางที่ 5.4.2-1 แสดงผลการจำแนกข้อมูลด้วย 2 ตัวแปร

ข้อมูล	Number of Cases	DR	MTTD (s)	FAR	CCR (s)
ค.ขาเข้า	8	1	300	0.333	~1
ค.ขาออก	8	0.875	390	0.417	~1
ด.กลุ่มที่ 1 (Type I)*	8	0	-	∞*	-
ด.กลุ่มที่ 2 (Type I)*	18	0	-	∞*	-
ด.กลุ่มที่ 1 (Type II)*	8	0.875	420	0.200	~1
ด.กลุ่มที่ 2 (Type II)*	18	0.611	420	0.222	~1
แบบจำลอง	8	1	30.7	0	~1

\*แสดง false alarm ตลอดเวลาการประมวลผล

### 5.7 สรุปผลและวิเคราะห์การทดลองของการเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึม

สำหรับข้อมูลถนนคลองหลวง การใช้ตัวแปรเดียวในการชี้วัดการจราจรติดขัด จากการทดลองจะพบว่าอัลกอริทึมไดนามิกซ์โทมัวร์ปีงที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ สามารถจำแนกสภาพการจราจรติดขัดออกจากสภาพการจราจรปกติ (DR) ได้ต่ำกว่าอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์อยู่ 1 ตัวอย่างทดสอบ หรือต่ำกว่าประมาณ 12.5% โดยใช้เวลาในการตรวจพบการจราจรติดขัด (MTTD) สูงกว่าเกือบ 2 เท่า แต่มีการเกิด False Alarm ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าประมาณ 25% แต่เมื่อได้ประยุกต์ใช้การจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ด้วย Sakoe-Chiba Band จะพบว่าอัลกอริทึมไดนามิกซ์โทมัวร์ปีงสามารถจำแนกสภาพการจราจรติดขัดได้ดีทัดเทียมกับอัลกอริทึมอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ และสามารถลดระยะเวลาในการตรวจพบได้ประมาณ 42% ส่วนระยะเวลาที่อัลกอริทึมใช้ประมวลผล (CCR) นั้น และเมื่อนำอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ใช้

ระยะเวลาที่น้อยมากประมาณ 1 วินาที ส่วนอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปึงใช้เวลาค่อนข้างมากประมาณ 20 วินาที แต่เมื่อมีการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่แล้ว จะลดภาระการประมวลผลของอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปึงได้ประมาณ 50%

สำหรับข้อมูลถนนคลองหลวง การใช้สองตัวแปรในการชี้วัดการจราจรติดขัด ซึ่งได้แก่ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย จะเห็นได้อย่างชัดเจนในทุกการทดสอบว่าสามารถลดรายงานความผิดพลาด (FAR) ลงได้อย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย จะมีการเปลี่ยนแปลงในทางลดทั้งคู่เมื่อเกิดการจราจรติดขัดขึ้นจริง ในทางตรงกันข้าม ถ้าไม่เกิดการจราจรติดขัดแต่เกิดข้อมูลรบกวนที่ผ่านกระบวนการการปรับเรียบมาได้ มักจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพียงตัวเดียว แต่อย่างไรก็ตามอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ตัวแปรพร้อมกันได้ถ้าเกิดการลดลงของความเร็วอย่างต่อเนื่อง เพียงชั่วครู่แต่ไม่เกิดการจราจรติดขัด ทั้งนี้เนื่องมาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยคำนวณค่ามาจากความเร็วเฉลี่ย ในส่วนของระยะเวลาการตรวจพบ (MTTD) เมื่อมีการใช้ทั้ง 2 ตัวแปรร่วมกัน ระยะเวลาการตรวจพบ (MTTD) เป็นค่าระยะเวลาที่มากที่สุดของตัวแปรทั้งสอง และระยะเวลาการประมวลผล (CCR) จะเท่ากับผลรวมของเวลาที่ใช้ประมวลผลสำหรับตัวแปรทั้งคู่

สำหรับข้อมูลทางด่วนดาวคะนอง การใช้ตัวแปรเดียวในการชี้วัดการจราจรติดขัดโดยนำมาศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลถนนคลองหลวงจะพบว่า สำหรับอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปึงทั้งแบบไม่จำกัดขอบเขตและจำกัดขอบเขตสามารถนำข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวง (Type I) มาใช้ได้โดยยังให้ค่าการตรวจพบค่อนข้างสูงที่ 87.5% สำหรับข้อมูลทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 1 และที่ 38.9% สำหรับข้อมูลทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 โดยให้ค่ารายงานความผิดพลาด (FAR) ใกล้เคียงกับถนนคลองหลวง แต่สำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์เมื่อนำข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวงมาใช้ จะไม่สามารถตรวจพบการจราจรติดขัดได้ และยังมีค่ารายงานความผิดพลาด (FAR) ตลอดระยะเวลาที่ประมวลผล แต่เมื่อสอนอัลกอริทึมใหม่ด้วยข้อมูลทางด่วนดาวคะนองแยกกันแต่ละกลุ่ม จะพบว่าสามารถลดค่ารายงานความผิดพลาด (FAR) ลงได้ประมาณ 10% สำหรับอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปึงทั้งแบบไม่จำกัดขอบเขตและจำกัดขอบเขต โดยที่ค่าการตรวจพบ (DR) ยังคงเท่าเดิม และสำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ จากที่ไม่สามารถตรวจพบได้เลยเมื่อใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวง เมื่อเปลี่ยนมาใช้ข้อมูลสอนจากทางด่วนดาวคะนอง จะมีอัตราการตรวจพบ (DR) และอัตรารายงานความผิดพลาด (FAR) ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากถนนคลองหลวง

สำหรับข้อมูลทางด่วนดาวคะนอง การใช้สองตัวแปรในการชี้วัดการจราจรติดขัด ซึ่งได้แก่ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยจะพบว่า อัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์-

วาร์ปปีงทั้งแบบไม่จำกัดขอบเขตและจำกัดขอบเขต จะสามารถลดค่ารายงานความผิดพลาด (FAR) ลงได้อีกประมาณ 10% ของข้อมูลทั้ง 2 กลุ่ม Type I และ ประมาณ 15% ของข้อมูลทั้ง 2 กลุ่ม Type II โดยขณะที่อัตราการตรวจพบ (DR) ยังคงเท่ากับการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรเดียว สำหรับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ ข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มใน Type I ไม่สามารถตรวจพบได้ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว และสำหรับข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มใน Type II อัตราการตรวจพบ (DR) ยังคงเท่ากับการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรเดียว และสามารถลดค่ารายงานความผิดพลาด (FAR) ลงได้อีกประมาณ 15% เช่นเดียวกับอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีง

ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะการทำงานของอัลกอริทึม ไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีงมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งหากลักษณะของถนนเส้นที่ทำการศึกษาล้ายกัน โดยส่งผลให้มีลักษณะการดำเนินการไปสู่การติดขัดคล้ายกัน จะสามารถใช้ข้อมูลทดแทนกันได้ ซึ่งต่างจากอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ ทั้งนี้เนื่องจากอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์จะต้องใช้ข้อมูลความรู้ก่อนหน้า (Prior Knowledge) ที่เป็นค่าของข้อมูลอย่างชัดเจน ไม่ใช่รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในอัลกอริทึม ไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปปีง ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าของความรู้ก่อนหน้าคือ ค่าความเร็ว และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วของถนนคลองหลวงและทางด่วนดาวคะนองมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน (หัวข้อที่ 3.4) โดยถนนคลองหลวงมีค่าความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย ทั้งในช่วงการจราจรปกติและการจราจรติดที่สูงกว่า จึงทำให้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ทำงานผิดพลาดในการจำแนกข้อมูลทางด่วนดาวคะนองที่ใช้ข้อมูลสอนจากถนนคลองหลวง

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของอัลกอริทึมทั้งสองเมื่อใช้ข้อมูลสอนจากแต่ละแหล่งของข้อมูลเอง จะเห็นได้ว่าอัลกอริทึมทั้งสองได้ให้ผลลัพธ์ของข้อมูลถนนคลองหลวง และทางด่วนดาวคะนอง กลุ่มที่ 1 ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนข้อมูลทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นปลายทางจากทางลงสะพานพระราม 9 เพื่อแยกออกสู่ถนนเส้นต่างๆ อัตราการตรวจพบ (DR) ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ผู้วิจัยจึงพิจารณาหาสาเหตุดังกล่าวโดยพบว่า ลักษณะการติดขัดที่ไม่สามารถตรวจพบได้ในชุดข้อมูลทางด่วนดาวคะนองกลุ่มที่ 2 (กล้อง EXAT7 EXAT9 และ EXAT10) มีลักษณะของความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วที่กล้อง EXAT10 แล้วส่งผลให้เกิดแถวคอยไปถึงกล้อง EXAT9 และ EXAT7 ตามลำดับ เกิดจากการห้ามรถของตำรวจจราจรอย่างกะทันหัน ซึ่งทำให้ไม่มีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ชัดเจน และมีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาอันสั้นมากประมาณ 1-2 นาที หรือเพียง 1-2 จุดข้อมูลที่ใช้ประมวลผล ซึ่งปกติลดลงจากความเร็วปกติจนถึงการจราจรติดขัดมักใช้เวลาประมาณ 10-20 นาที จึงทำให้ทั้งสองอัลกอริทึมที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว ไม่สามารถตรวจพบกรณีดังกล่าวได้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวิธีการค้นหาสภาพการจราจรติดขัดบนทางด่วนหรือทางหลวงสายตรงที่ไม่มีผลกระทบจากทางแยกหรือสัญญาณไฟจราจร โดยใช้กรรมวิธีที่แตกต่างกัน 2 แบบ กล่าวคือ อัลกอริทึมทางอนุกรมเวลาไดนามิกโทมัวร์บึงซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยเสนอ และอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ซึ่งเป็นอัลกอริทึมทางการเรียนรู้ของเครื่องที่มีผู้พัฒนาใช้ในงานด้านการวิเคราะห์สภาพการจราจรและได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีเยี่ยม ซึ่งผู้วิจัยนำมาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยเสนอขึ้นใหม่ โดยการทำงาน ของระบบมี 3 ขั้นตอน คือ การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น การจำแนกหรือทดสอบความคล้ายคลึงของรูปแบบ และขั้นตอนการตัดสินใจ

ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นแยกย่อยได้เป็น กระบวนการปรับเรียบข้อมูลซึ่งผู้วิจัยใช้เทคนิคการปรับเรียบค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลที่ได้ผลลัพธ์ในการกำจัดข้อมูลรบกวนได้ดีเยี่ยม และกระบวนการวัดค่าลักษณะสำคัญและเงื่อนไขในเริ่มต้นอัลกอริทึม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยเป็นตัวแปรชี้วัดในการจำแนกสภาพการจราจรติดขัดออกจากสภาพการจราจรปกติ โดยมี T1 เป็นเงื่อนไขในเริ่มต้นการทำงานของอัลกอริทึมให้มีการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปในการประมวลผล โดยมีการเรียกข้อมูลย้อนขึ้นไปถึงจุดที่มีความเร็วสูงสุด และจะเก็บข้อมูลจนถึงจุดต่ำสุดและถ้าจุดต่ำสุดนั้นอยู่ต่ำกว่าตำแหน่ง T2 จะนำส่งข้อมูลนั้นเข้าประมวลในอัลกอริทึมตัดสินใจอีกทีหนึ่ง และถ้าจุดต่ำสุดนั้นไม่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่ง T2 ก็จะไม่นำส่งข้อมูลนั้นเข้าประมวล ซึ่งตำแหน่ง T2 นั้นถือเป็นตำแหน่งที่บ่งสภาพการจราจรว่าติดขัดหรือไม่สำหรับตัวแปรชี้วัดนั้นๆ

ขั้นตอนการจำแนกหรือทดสอบความคล้ายคลึงของรูปแบบ จะแบ่งได้เป็นการสอนและการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม โดยข้อมูลสภาพการจราจรติดขัดจะถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ในอัตราส่วน 60:40 เพื่อใช้สอนและทดสอบตามลำดับ ซึ่งในการสอนอัลกอริทึมไดนามิกโทมัวร์บึงสามารถนำข้อมูลที่สุ่มได้ มาเป็นสร้างเมตริกในรูปแบบอ้างอิงได้เลย ส่วนการสอนอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ เนื่องจากข้อมูลตัวอย่างการจราจรติดขัดมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับข้อมูลการจราจรปกติ ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคตามงานวิจัยของ Oh *et al* [4] ที่มีการวิเคราะห์เพียง 2 ค่า ซึ่งในงานวิจัยนี้คือสภาพการจราจรติดขัดหรือไม่ ซึ่งเริ่มต้นกระบวนการโดยวิเคราะห์หาฟังก์ชันความน่าจะเป็นของสภาพการจราจรติดขัดและฟังก์ชันความน่าจะเป็นของสภาพการจราจรปกติเพื่อนำมาใช้เป็นความรู้ก่อนหน้าในสมการของเบย์ จากนั้นจึง

คำนวณความน่าจะเป็นของการจรรยาปกติแทน และอาศัยความสัมพันธ์ของกฎความน่าจะเป็นที่มีผลรวมเท่ากับ 1 เพื่อคำนวณหาความน่าจะเป็นของการจรรยาติดขัด โดยจะต้องนำข้อมูลที่สุ่มได้มาคำนวณตามสมการของเบย์เพื่อให้ได้ค่าขีดที่สามารถแบ่งแยกสภาพการจรรยาติดขัดออกจากสภาพการจรรยาปกติได้อย่างดีที่สุด ส่วนในการทดสอบ สำหรับอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปปีงใช้เทคนิคการวัดระยะทางแบบ Nearest Neighbor โดยระยะทางใกล้กับรูปแบบอ้างอิงของสภาพการจรรยาแบบใดให้ถือว่าเป็นสภาพการจรรยาตามรูปแบบอ้างอิงนั้น ส่วนการทดสอบอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์นั้นจะนำข้อมูลมาคำนวณตามสมการของเบย์ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าอยู่ในขอบเขตขีดแบ่งใดให้ถือว่าเป็นสภาพการจรรยาที่มีรูปแบบตามกำหนดไว้ และสำหรับอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปปีงผู้วิจัยได้เสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมด้วยการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่แบบ Sakoe-Chiba Band ไว้ด้วย

สำหรับขั้นตอนการตัดสินใจของอัลกอริทึมจะมีการใช้ตัวแปรชี้วัด 1 ตัวและ 2 ตัวพร้อมกันสำหรับทั้งสองอัลกอริทึม โดยผลลัพธ์สำหรับการใช้ตัวชี้วัดเพียงตัวเดียวแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ให้ค่าตรวจพบ (Detection Rate - DR) ที่สูงกว่าอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปปีงแบบปกติที่ไม่มีการจำกัดขอบเขต แต่ยังคงให้ค่าการตรวจพบผิดพลาด (False Alarm Rate - FAR) ที่สูงกว่าอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปปีงแบบปกติประมาณ 30% แต่เมื่อมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปปีงด้วยการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่แบบ Sakoe-Chiba Band พบว่าสามารถลดภาระการประมวลผลลงได้กว่า 50% แต่ภาระการประมวลผลยังคงถือว่ามากกว่ามากเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ที่ใช้เวลาไม่ถึง 1 วินาที และนอกจากนั้นการจำกัดขอบเขตยังช่วยทิศทางการเคลื่อนที่ที่วัดระยะทางระหว่างรูปแบบอ้างอิงกับรูปแบบที่นำมาทดสอบถูกต้องมีมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้ค่าการตรวจพบ (DR) มีค่าเทียบเท่ากับอัลกอริทึมของเบย์ เมื่อมีการใช้สองตัวแปรชี้วัดสภาพการจรรยาติดขัด ซึ่งได้แก่ ความเร็วเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย จะเห็นว่าอัลกอริทึมทั้งสองมีรายงานความผิดพลาด (FAR) ที่ลดลงได้มากกว่า 50% ในขณะที่ระยะเวลาการตรวจพบ (MTTD) เป็นค่าระยะเวลาที่มากที่สุดในระหว่างตัวแปรทั้งสอง และระยะเวลาการประมวลผล (CCR) จะเป็นผลรวมของเวลาที่ใช้ประมวลผลสำหรับตัวแปรทั้งคู่

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปปีงที่มีการจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ด้วย Sakoe-Chiba Band ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีทัดเทียมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ในขณะที่ใช้ข้อมูลรูปแบบอ้างอิงสภาพการจรรยาติดขัดที่น้อยมาก เพียง 11 รูปแบบอ้างอิง ในขณะที่อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ไม่สามารถฝึกฝนได้โดยตรงจากข้อมูลรูปแบบอ้างอิงสภาพการจรรยาติดขัดเนื่องจากชุดข้อมูลสอนจากรูปแบบการจรรยาติดขัดที่มีน้อยส่งผลให้ความรู้ก่อนหน้าที่ได้จากฟังก์ชันเคอร์เนลไม่น่าเชื่อถือจึงทำให้ค่าขีดแบ่งสำหรับแบ่งแยก



ความน่าจะเป็นของการจราจรติดขัดจากการจราจรปกติไม่น่าเชื่อถือไปด้วย แต่เนื่องจากงานวิจัยมีการจำแนกเพียง 2 ทางเลือก กล่าวคือ การจราจรปกติหรือการจราจรติดขัด ดังนั้น อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์จะอาศัยการฝึกฝนจากข้อมูลสภาพการจราจรปกติที่มีมากกว่า แทนแล้วอาศัยความสัมพันธ์ของกฎผลรวมความน่าจะเป็นที่เท่ากับ 1 จึงได้ความน่าจะเป็นของการจราจรติดขัดคือส่วนต่างที่เหลือ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าอัลกอริทึมไดนามิกไทม์- วาร์ปิงจะมีประโยชน์อย่างมากเมื่อข้อมูลสอนมีจำนวนน้อย แต่ยังคงให้ความถูกต้องแม่นยำเทียบเคียงได้กับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องโดยไม่ต้องอาศัยวิธีการคำนวณทางอ้อม และหากในอนาคตมีข้อมูลที่ระบุถึงสาเหตุที่มาของการติดขัด จะสามารถสร้างรูปแบบอ้างอิงและนำไปใช้จำแนกได้ทันที ซึ่งอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์นั้นนอกจากจะต้องทำการฝึกฝนใหม่ทั้งหมดเพื่อให้ได้ค่าขีดแบ่งค่าใหม่แล้ว ยังจะไม่สามารถทำการคำนวณทางอ้อมจากการจราจรปกติโดยอ้างอิงจากกฎผลรวมของความน่าจะเป็นเพื่อให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือได้อีกต่อไป เนื่องจากการจำแนกจะมีมากกว่า 2 ทางเลือก จึงทำให้ค่าขีดแบ่งที่ได้ไม่น่าเชื่อถือตามไปด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปิงจึงมีความเหมาะสมในการจำแนกข้อมูลสภาพการจราจรที่มีตัวอย่างสอนจำนวนน้อย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการพัฒนาให้อัลกอริทึมสามารถจำแนกชุดข้อมูลได้ออกได้หลายรูปแบบ

นอกจากนี้การทดลองนำข้อมูลจากแหล่งใหม่ ที่มีลักษณะถนนทางกายภาพคล้ายคลึงกัน แต่อาจมีความแตกต่างกันในรายละเอียดจากทางด่วนดาวคะนองมาทำการทดสอบจะพบว่า อัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปิงมีความยืดหยุ่นสูงพอเพียงที่นำข้อมูลสอนจากถนนทดลองหลวงมาใช้งานได้ทันที ซึ่งแตกต่างจากอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ที่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ จะต้องมีการสอนข้อมูลใหม่ทั้งหมดเมื่อมีการเปลี่ยนแหล่งข้อมูล ซึ่งเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปิง แต่ทั้งนี้การใช้ข้อมูลสอนที่เป็นข้อมูลแหล่งเดียวกับข้อมูลที่จะจำแนกย่อมให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า สำหรับทั้งสองอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้

อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมทางอนุกรมเวลายังมีข้อเสียประการสำคัญที่การะการประมวลผลสำคัญจะอยู่การจำแนกข้อมูล ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานอัลกอริทึมต่ำลงเมื่อมีรูปแบบอ้างอิงมากขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์ที่การะการประมวลผลสำคัญจะอยู่ที่การฝึกฝนอัลกอริทึม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า อัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปิงจะต้องใช้ต้นทุนหรือทรัพยากรในการจำแนกข้อมูลที่มีมากกว่าอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเบย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการประมวลผลที่เท่ากัน แต่เมื่อนำค่าการะการประมวลผลมาเทียบเคียงกับระยะเวลาการตรวจพบ (MTTD) พบว่ามีค่าค่อนข้างน้อยประมาณ 0.01 – 5% ของค่าระยะเวลาการตรวจพบ ซึ่งค่าสูงที่สุด (5%) เป็นของอัลกอริทึม ไดนามิกไทม์วาร์ปิงแบบไม่จำกัดขอบเขต ที่จำแนกด้วย 2 ตัวแปรชี้วัด นอกจากนี้ยังสามารถลด

ระยะเวลาการประมวลผลด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพทางฮาร์ดแวร์ด้วยการเพิ่มความเร็วของตัวประมวลผล และการเพิ่มประสิทธิภาพทางซอฟต์แวร์ด้วยการพัฒนาโดยใช้ภาษาที่มี Overhead ต่ำ เช่น ภาษา C และ/หรือ เทคนิคการคัดลอกแบบอ้างอิงไปไว้บนหน่วยความจำหลักที่มีความเร็วสูงแล้วจึงประมวลผลแทนการเก็บไว้บนฮาร์ดไดรฟ์ที่มีความเร็วต่ำกว่ามาก ทั้งนี้เป็นปัญหาด้านทางเทคนิค ที่สามารถพัฒนาต่อได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการประมวลผลโดยไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของอัลกอริทึม

## 6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 6.2.1 ข้อมูลที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ต้องเป็นข้อมูลความเร็วรายคันที่มีเวลาระบุอย่างชัดเจนเมื่อเข้าและออกจากอุปกรณ์ตรวจวัด เพื่อคำนวณหาความเร็ว และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเร็วเฉลี่ยต่อไป อย่างไรก็ตามหากมีการนำอัลกอริทึมของงานวิจัยนี้ไปใช้ ผู้พัฒนาสามารถดัดแปลงใช้ข้อมูล หรือประมวลข้อมูลจากแหล่งอื่นโดยให้ค่าความเร็วเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ย และอัตราการเคลื่อนตัวทุก 1 นาที แทนได้
- 6.2.2 การจำแนกสภาพการจราจรในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้บ่งบอกแต่เพียงว่าข้อมูลที่นำมาพิจารณานั้นเป็นสภาพการจราจรปกติหรือเป็นสภาพการจราจรติดขัดเพียง 2 ชนิดเท่านั้น โดยไม่ได้บ่งบอกถึงสาเหตุและที่มาว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร ดังนั้นต่อไปเมื่อมีข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น และข้อมูลมีการเก็บรายละเอียดถึงสาเหตุของการติดขัดผู้ที่นำไปพัฒนาต่อน่าจะสามารถสร้างรูปแบบอ้างอิงที่ระบุถึงเหตุได้
- 6.2.3 การจำแนกสภาพการจราจรติดขัดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถใช้ได้บนทางด่วน หรือทางหลวงเส้นทางตรงที่ไม่มีผลกระทบจากทางแยก หรือสัญญาณไฟจราจร เนื่องจากพฤติกรรมของตัวแปรชีวิตอาจจะแตกต่างไปจากที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นถ้าหากมีการนำไปใช้บนถนนที่มีผลกระทบดังกล่าว ผู้พัฒนาจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบจากอิทธิพลจากสถานะแวดล้อมที่ต่างไปต่อตัวแปรชีวิตต่างๆ
- 6.2.4 ค่าขีดแบ่ง (Thresholds) ต่างๆ เป็นค่าที่คำนวณขึ้นเพื่อใช้สำหรับถนนคลองหลวงทั้งสองทิศทางการจราจร ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ดังนั้นเมื่อนำงานวิจัยนี้ไปใช้บนถนนสายอื่นที่มีลักษณะทางตรงไม่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอกของสัญญาณไฟทางร่วมหรือทางแยก ผู้พัฒนาจำเป็นต้องมีการปรับเทียบค่าต่างๆ (Calibrate) ให้เหมาะสมกับถนนที่นำอัลกอริทึมไปใช้งานอีกทีหนึ่ง

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

- 6.3.1 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการใช้มีการใช้ข้อมูลดิบที่มาจาก 3 ช่องทางการจราจรพร้อมกัน ถึงแม้ผู้วิจัยจะใช้ทฤษฎีทางสถิติในการแยกข้อมูลความเร็วต่ำในช่องทางจราจรริมซ้ายออกไปแล้ว แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลชุดใหม่ที่เหมาะสมควรจะเป็นข้อมูลที่แยกช่องทางการจราจร และนำเข้าประมวลผลของช่องทางจราจร ซึ่งจะช่วยให้ตัวแปรมีพฤติกรรมและค่าขีดแบ่งที่ชัดเจนส่งผลให้อัลกอริทึมทำงานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น
- 6.3.2 เมื่อมีการนำเอาอัลกอริทึมไปใช้งานจริง เมื่อมีข้อมูลการจราจรติดขัดที่เพิ่มมากขึ้น ควรนำเอาตัวอย่างการจราจรติดขัดนั้นสอนอัลกอริทึมเพิ่มเข้าไปเพื่อให้มีการทำงานที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น
- 6.3.3 เนื่องจากอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปิงเป็นอัลกอริทึมทางอนุกรมเวลา ดังนั้นเมื่อมีข้อมูลสอนหรือรูปแบบอ้างอิง (Reference Pattern) จำนวนมากจึงควรมีการจัดกลุ่มรูปแบบอ้างอิง (Clustering) เพื่อลดการเปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิงที่ไม่จำเป็น ซึ่งทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผล
- 6.3.4 เนื่องจากคุณสมบัติของอัลกอริทึมไดนามิกซ์ไทม์วาร์ปิงที่มีการจำรูปแบบอ้างอิง ดังนั้นเมื่อมีข้อมูลตัวอย่างสภาพการจราจรแบบต่างๆ ที่ละเอียดและมากเพียงพอ เช่น สภาพการจราจรติดขัดที่เกิดมาจากฝนตก อุบัติเหตุ หรือมีงานเทศกาลต่างๆ เป็นต้น ผู้ที่นำอัลกอริทึมนี้ไปพัฒนาต่อจะสามารถพัฒนาอัลกอริทึมนี้ให้บ่งบอกถึงสาเหตุของการจราจรติดขัดได้อีกด้วย ทั้งนี้สาเหตุประการสำคัญที่หุดข้อมูลได้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถพัฒนาถึงสาเหตุที่นอกเหนือจากข้อจำกัดด้านปริมาณข้อมูลแล้ว คือ ข้อมูลไม่มีการบันทึกถึงสาเหตุของการเกิดการจราจรติดขัดดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาเหตุจากอุบัติเหตุ ดังนั้น ถ้ามีการบันทึกถึงสาเหตุที่ชัดเจนในทุกการจราจรติดขัด ก็น่าจะได้รูปแบบอ้างอิงที่มีความจำเพาะเจาะจนสามารถระบุไปถึงสาเหตุของการติดขัดได้

## รายการอ้างอิง

- [1] ธนิต นาชัยเวียง. 2544. การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของความปลอดภัยจากการจราจรคับคั่งในกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] Zegeer, C.V., D.W. Reinfurt, J. Hummer, L. Herf, and W. Hunter. 1988. Safety effects of cross-section design for two-lane roads. Transportation Research Record 1195 : 20-32.
- [3] Gipps, P. 1981. , A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation. Transportation Research Part B: Methodological 15, 2 : 105–111.
- [4] Oh, J.-S., C. Oh, S. G. Ritchie, and M. Chang. 2005. Real-Time Estimation of Accident Likelihood for Safety Enhancement. ASCE Journal of Transportation Engineering 1 : 358–363.
- [5] Anderson, IB, K.M. Bauer, D.W. Harwood and K. Fitzpatrick. 1999. Relationship to safety of geometric design consistency measures for rural two-lane highways. Transportation Research Record 1658 : 43-51.
- [6] Rechar O., Duda. 1997. Pattern Classification. Second Edition. USA : McGraw-Hill, Bayesian decision theory
- [7] Han, J., Kamber, M., Data Mining: Concepts and Techniques 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier: 363-365.
- [8] Mitchell, T. (1997) Machine Learning, McGraw-Hill.
- [9] Sakoe, H. & S. Chiba. 1978. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Proc., Vol. ASSP-26.
- [10] Itakura, F. Minimum Prediction Residual Principle Applied to Speech Recognition. In IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Proc. vol. ASSP-23, pp 52-72, 1975.
- [11] Jon D. Fricker and Robert K. Whitford. 2004. Fundamentals of Transportation Engineering. USA:Prentice Hall.
- [12] Zhang, L., and D. Levinson. Some Properties of Flows at Freeway Bottlenecks. Transportation Research Board : 83th Annual Meeting 2004.
- [13] Knuiman, Matthew W., F.M. Council, and D.W. Reinfurt. 1993. Association of median width and highway accident rates. Transportation Research Record 1401 : 70-82.
- [14] Parkany, E. and C. Xie. 2005. A Complete Review of Incident Detection Algorithms and Their Deployment: What Works and What Doesn't. The New England Transportation Consortium NETCR37 : 41-61.

- [15] Artificial Intelligence and Advanced Computing Applications Committee. 2007. Artificial Intelligence in Transportation: Information for Application. TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR. E-C113 : 1-32.
- [16] Payne, H.J. and Tignor, S.C. 1978. Freeway incident-detection algorithms based on decision trees with states. Transportation Research Record, No. 682 : 30-37.
- [17] Payne, H.J. and Tignor, S.C. 1978. Freeway incident-detection algorithms based on decision trees with states. Transportation Research Record, No. 682 : 30-37.
- [18] Zhang, L., and D. Levinson. Some Properties of Flows at Freeway Bottlenecks. Transportation Research Board : 83th Annual Meeting 2004.
- [19] Chassiakos, A.P., Stephanedes, Y.J. 1993. Smoothing algorithms for incident detection. Transportation Research Record 1394 : 9–16.
- [20] AIMSUN's Microsimulator User's Manual Version 5.1. 2006. Barcelona: Transport Simulation Systems
- [21] Krammes, R.A. and S.W. Glascock. 1992. Geometric inconsistencies and accident experience on two-lane rural highways. Transportation Research Record 1356 : 1-10.
- [22] Lee, C., B. Hellinga, and F. Saccomanno. 2003. Real-Time Crash Prediction Model for Application to Crash Prevention in Freeway Traffic. Transportation Research Record 1840 : 67-77.
- [23] Sheldon M. Ross. 2004. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. USA : Elsevier Inc.
- [24] Thajchayapong S., A Barria J. 2010. Anomaly Detection using Microscopic Traffic Variables on Freeway Segments. Transportation Research Board : 89th Annual Meeting
- [25] Ratanamahatana, C. A. and Keogh, E. Everything you know about Dynamic Time Warping is Wrong. Third Workshop on Mining Temporal and Sequential Data, in conjunction with the Tenth ACM SIGKDD. International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-2004).
- [26] Ratanamahatana, C. & E. Keogh. Making Time-series Classification More Accurate Using Learned Constraints. Proc of SIAM Intl. Conf. on Data Mining 2004 : 11-22.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 แสดงฐานข้อมูลการจราจรติดขัดของถนนคลองหลวงทิศทางขาเข้า

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
1	BKK	13-Aug-2008	17:06:05	26.53	16
1	BKK	13-Aug-2008	17:09:05	34.56	23
1	BKK	13-Aug-2008	17:12:05	37.14	23
1	BKK	13-Aug-2008	17:15:05	34.71	20
2	BKK	22-Aug-2008	17:45:00	40.03	21
2	BKK	22-Aug-2008	17:48:00	26.93	21
2	BKK	22-Aug-2008	17:51:00	28.47	21
2	BKK	22-Aug-2008	17:54:00	25.75	24
2	BKK	22-Aug-2008	17:57:00	26.26	21
2	BKK	22-Aug-2008	18:00:00	37.15	29
3	BKK	26-Aug-2008	17:31:39	38.24	22
3	BKK	26-Aug-2008	17:34:39	35.2	22
3	BKK	26-Aug-2008	17:37:39	31.63	21
4	BKK	27-Aug-2008	16:31:33	26.88	19
4	BKK	27-Aug-2008	16:34:33	32.73	18
4	BKK	27-Aug-2008	16:37:33	23.58	24
4	BKK	27-Aug-2008	16:40:33	30.7	23
4	BKK	27-Aug-2008	16:49:33	20.06	3
4	BKK	27-Aug-2008	16:52:33	38.35	5
4	BKK	27-Aug-2008	17:04:33	35.65	6
4	BKK	27-Aug-2008	17:07:33	31.09	5
4	BKK	27-Aug-2008	17:10:33	12.24	6
4	BKK	27-Aug-2008	17:13:33	17.03	19
4	BKK	27-Aug-2008	17:16:33	15.23	14
4	BKK	27-Aug-2008	17:19:33	19.39	13
4	BKK	27-Aug-2008	17:22:33	16.96	16
4	BKK	27-Aug-2008	17:25:33	30.22	21
4	BKK	27-Aug-2008	17:28:33	35.69	20
4	BKK	27-Aug-2008	17:31:33	35.68	22
4	BKK	27-Aug-2008	17:34:33	32.5	21
4	BKK	27-Aug-2008	17:37:33	30.43	23
4	BKK	27-Aug-2008	17:40:33	35.46	18
4	BKK	27-Aug-2008	17:43:33	35.92	18
4	BKK	27-Aug-2008	18:01:33	34.53	8
5	BKK	10-Sep-2008	17:22:26	37.89	25
5	BKK	10-Sep-2008	17:25:26	33.88	27
5	BKK	10-Sep-2008	17:28:26	31.55	27
5	BKK	10-Sep-2008	17:31:26	33.56	20
5	BKK	10-Sep-2008	17:34:26	29.46	26
5	BKK	10-Sep-2008	17:37:26	34.98	26

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
5	BKK	10-Sep-2008	17:40:26	34.52	26
5	BKK	10-Sep-2008	17:46:26	33.47	25
6	BKK	17-Oct-2008	17:42:10	32.63	34
6	BKK	17-Oct-2008	17:45:10	32.62	35
6	BKK	17-Oct-2008	17:48:10	33.75	31
6	BKK	17-Oct-2008	17:51:10	34.96	38
6	BKK	17-Oct-2008	17:54:10	39.36	32
7	BKK	30-Oct-2008	17:44:55	24.82	28
7	BKK	30-Oct-2008	17:47:55	32.07	26
7	BKK	30-Oct-2008	17:50:55	34.44	31
7	BKK	30-Oct-2008	17:53:55	29.65	31
7	BKK	30-Oct-2008	17:56:55	35.22	37
7	BKK	30-Oct-2008	17:59:55	32.02	35
7	BKK	30-Oct-2008	18:02:55	35.52	2
8	BKK	31-Oct-2008	12:44:16	34	15
8	BKK	31-Oct-2008	12:47:16	23.85	9
8	BKK	31-Oct-2008	12:50:16	33.42	11
8	BKK	31-Oct-2008	13:50:16	18.08	10
8	BKK	31-Oct-2008	13:53:16	18.84	14
8	BKK	31-Oct-2008	13:56:16	18.52	18
8	BKK	31-Oct-2008	13:59:16	23.69	13
8	BKK	31-Oct-2008	14:02:16	25.71	12
8	BKK	31-Oct-2008	14:05:16	25.5	12
8	BKK	31-Oct-2008	14:08:16	28.6	18
9	BKK	4-Nov-2008	12:38:56	27.84	19
9	BKK	4-Nov-2008	12:41:56	24.16	15
9	BKK	4-Nov-2008	12:44:56	27.12	13
10	BKK	7-Nov-2008	10:09:01	28.67	8
10	BKK	7-Nov-2008	10:12:01	15.43	13
10	BKK	7-Nov-2008	10:15:01	17.17	10
10	BKK	7-Nov-2008	10:18:01	19.06	16
10	BKK	7-Nov-2008	10:21:01	14.9	15
10	BKK	7-Nov-2008	10:24:01	10.62	16
10	BKK	7-Nov-2008	10:27:01	10.12	16
10	BKK	7-Nov-2008	10:30:01	9.61	16
10	BKK	7-Nov-2008	10:33:01	10.29	20
10	BKK	7-Nov-2008	10:36:01	10.39	13
10	BKK	7-Nov-2008	10:39:01	10.03	19
10	BKK	7-Nov-2008	10:42:01	9.94	16
10	BKK	7-Nov-2008	10:45:01	8.87	22
10	BKK	7-Nov-2008	10:48:01	6.99	11
10	BKK	7-Nov-2008	10:51:01	6.88	17



No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
10	BKK	7-Nov-2008	10:54:01	9.06	17
10	BKK	7-Nov-2008	10:57:01	6.56	18
10	BKK	7-Nov-2008	11:00:01	7.86	17
10	BKK	7-Nov-2008	11:03:01	8.66	21
10	BKK	7-Nov-2008	11:06:01	6.39	23
10	BKK	7-Nov-2008	11:09:01	7.41	18
10	BKK	7-Nov-2008	11:12:01	8.85	17
10	BKK	7-Nov-2008	11:15:01	9.1	21
10	BKK	7-Nov-2008	11:18:01	10.2	27
10	BKK	7-Nov-2008	11:21:01	8.61	27
10	BKK	7-Nov-2008	11:24:01	12.95	24
10	BKK	7-Nov-2008	11:27:01	11.34	20
10	BKK	7-Nov-2008	11:30:01	12.74	18
10	BKK	7-Nov-2008	11:33:01	10.15	18
10	BKK	7-Nov-2008	11:36:01	11.45	21
10	BKK	7-Nov-2008	11:44:11	11.09	19
10	BKK	7-Nov-2008	11:47:11	10.08	21
10	BKK	7-Nov-2008	11:50:11	9.21	20
10	BKK	7-Nov-2008	11:53:11	10.74	20
10	BKK	7-Nov-2008	11:56:11	7.9	23
10	BKK	7-Nov-2008	11:59:11	11.12	24
10	BKK	7-Nov-2008	12:02:11	7.99	23
10	BKK	7-Nov-2008	12:05:11	9.8	27
10	BKK	7-Nov-2008	12:08:11	12.55	18
10	BKK	7-Nov-2008	12:11:11	12.39	17
10	BKK	7-Nov-2008	12:14:11	15.09	18
10	BKK	7-Nov-2008	12:17:11	15.51	15
10	BKK	7-Nov-2008	12:20:11	11.76	23
10	BKK	7-Nov-2008	12:23:11	14.44	19
10	BKK	7-Nov-2008	12:26:11	13.36	19
10	BKK	7-Nov-2008	12:29:11	26.81	13
10	BKK	7-Nov-2008	12:32:11	20.45	14
10	BKK	7-Nov-2008	12:35:11	24.37	12
10	BKK	7-Nov-2008	12:38:11	23.41	10
10	BKK	7-Nov-2008	12:41:11	28.62	7
10	BKK	7-Nov-2008	12:44:11	26.9	15
10	BKK	7-Nov-2008	12:47:11	21.33	15
10	BKK	7-Nov-2008	12:50:11	29.04	18
10	BKK	7-Nov-2008	12:53:11	22.91	15
10	BKK	7-Nov-2008	12:56:11	25.68	14
10	BKK	7-Nov-2008	12:59:11	23.6	12
10	BKK	7-Nov-2008	13:05:11	23.61	14

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
10	BKK	7-Nov-2008	13:08:11	27.42	13
10	BKK	7-Nov-2008	13:11:11	27.71	10
10	BKK	7-Nov-2008	13:14:11	37.71	13
10	BKK	7-Nov-2008	13:17:11	33.94	15
10	BKK	7-Nov-2008	13:20:11	38.51	13
10	BKK	7-Nov-2008	13:23:11	26.94	10
10	BKK	7-Nov-2008	13:26:11	36.83	8
10	BKK	7-Nov-2008	13:29:11	25.73	10
10	BKK	7-Nov-2008	13:44:11	32.61	14
10	BKK	7-Nov-2008	13:47:11	34.78	20
10	BKK	7-Nov-2008	13:50:11	27.68	16
10	BKK	7-Nov-2008	13:53:11	26.84	14
10	BKK	7-Nov-2008	13:56:11	29.78	17
10	BKK	7-Nov-2008	13:59:11	26.42	18
10	BKK	7-Nov-2008	14:02:11	33.26	13
10	BKK	7-Nov-2008	14:05:11	32.2	14
10	BKK	7-Nov-2008	14:08:11	25.7	22
10	BKK	7-Nov-2008	14:11:11	29.97	19
10	BKK	7-Nov-2008	14:14:11	34.66	17
10	BKK	7-Nov-2008	14:17:11	27.42	18
10	BKK	7-Nov-2008	14:20:11	29.09	20
10	BKK	7-Nov-2008	14:23:11	29.54	14
10	BKK	7-Nov-2008	14:26:11	33.67	18
10	BKK	7-Nov-2008	14:29:11	26.26	19
10	BKK	7-Nov-2008	14:32:11	27.06	26
10	BKK	7-Nov-2008	14:35:11	24.55	18
10	BKK	7-Nov-2008	14:38:11	28.56	13
10	BKK	7-Nov-2008	14:41:11	27.7	13
10	BKK	7-Nov-2008	14:44:11	21.9	21
10	BKK	7-Nov-2008	14:47:11	24.16	16
10	BKK	7-Nov-2008	14:50:11	22.82	15
10	BKK	7-Nov-2008	14:53:11	23.52	10
10	BKK	7-Nov-2008	14:56:11	24.45	15
10	BKK	7-Nov-2008	14:59:11	22.05	14
10	BKK	7-Nov-2008	15:02:11	22.19	14
10	BKK	7-Nov-2008	15:05:11	20.66	17
10	BKK	7-Nov-2008	15:08:11	31.43	23
11	BKK	8-Nov-2008	16:48:32	30.48	22
11	BKK	8-Nov-2008	16:51:32	38.12	29
11	BKK	8-Nov-2008	16:54:32	24.82	22
11	BKK	8-Nov-2008	16:57:32	20.17	27
11	BKK	8-Nov-2008	17:00:32	24.01	27

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
11	BKK	8-Nov-2008	17:03:32	22.69	25
11	BKK	8-Nov-2008	17:06:32	22.39	27
11	BKK	8-Nov-2008	17:09:32	26.29	26
11	BKK	8-Nov-2008	17:12:32	25.76	30
11	BKK	8-Nov-2008	17:15:32	19.52	24
11	BKK	8-Nov-2008	17:18:32	19.96	30
11	BKK	8-Nov-2008	17:21:32	14.74	21
11	BKK	8-Nov-2008	17:24:32	20.24	26
11	BKK	8-Nov-2008	17:27:32	11.49	18
11	BKK	8-Nov-2008	17:30:32	13.87	24
11	BKK	8-Nov-2008	17:33:32	12.92	24
11	BKK	8-Nov-2008	17:36:32	11.99	24
11	BKK	8-Nov-2008	17:39:32	9.23	26
11	BKK	8-Nov-2008	17:42:32	13.46	30
11	BKK	8-Nov-2008	17:45:32	10.57	23
11	BKK	8-Nov-2008	17:53:05	16.11	29
11	BKK	8-Nov-2008	17:56:05	22.78	30
11	BKK	8-Nov-2008	17:59:05	11.77	28
11	BKK	8-Nov-2008	18:02:05	14.32	11
12	BKK	10-Nov-2008	17:46:48	34.66	34
12	BKK	10-Nov-2008	17:49:48	31.47	29
12	BKK	10-Nov-2008	17:52:48	31.81	28
12	BKK	10-Nov-2008	17:55:48	34.31	33
12	BKK	10-Nov-2008	17:58:48	35.19	35
13	BKK	13-Nov-2008	17:10:45	31.71	30
13	BKK	13-Nov-2008	17:13:45	31.24	31
13	BKK	13-Nov-2008	17:16:45	29.31	32
13	BKK	13-Nov-2008	17:19:45	31.81	29
14	BKK	1-Dec-2008	7:12:00	32.34	19
14	BKK	1-Dec-2008	7:15:00	22.47	19
14	BKK	1-Dec-2008	7:18:00	21.26	24
14	BKK	1-Dec-2008	7:21:00	27.8	21
14	BKK	1-Dec-2008	7:24:00	24.54	25
14	BKK	1-Dec-2008	7:27:00	31.58	25
14	BKK	1-Dec-2008	7:39:00	39.62	19
14	BKK	1-Dec-2008	7:51:00	26.95	16
14	BKK	1-Dec-2008	7:54:00	24.83	10
14	BKK	1-Dec-2008	7:57:00	20.97	15
14	BKK	1-Dec-2008	8:00:00	21.19	16
14	BKK	1-Dec-2008	8:03:00	20.32	18
14	BKK	1-Dec-2008	8:06:00	31.25	13
15	BKK	3-Dec-2008	17:31:16	39.57	27

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
15	BKK	3-Dec-2008	17:34:16	38.95	31
15	BKK	3-Dec-2008	17:37:16	25.8	21
15	BKK	3-Dec-2008	17:40:16	27.52	30
15	BKK	3-Dec-2008	17:43:16	27.95	28
15	BKK	3-Dec-2008	17:46:16	27.66	27
15	BKK	3-Dec-2008	17:49:16	32.74	35
15	BKK	3-Dec-2008	17:52:16	29.57	29
15	BKK	3-Dec-2008	17:55:16	33.59	39
15	BKK	3-Dec-2008	17:58:16	36.07	37
16	BKK	7-Dec-2008	11:54:36	39.09	11
16	BKK	7-Dec-2008	11:57:36	31.92	9
16	BKK	7-Dec-2008	12:00:36	27.28	7
16	BKK	7-Dec-2008	12:03:36	32.62	11
16	BKK	7-Dec-2008	12:06:36	32.46	11
16	BKK	7-Dec-2008	12:09:36	27.48	9
16	BKK	7-Dec-2008	12:12:36	22.37	11
16	BKK	7-Dec-2008	12:15:36	22.77	13
16	BKK	7-Dec-2008	12:18:36	25.19	14
16	BKK	7-Dec-2008	12:21:36	18.37	12
16	BKK	7-Dec-2008	12:24:36	24.92	12
16	BKK	7-Dec-2008	12:27:36	24	9
16	BKK	7-Dec-2008	12:30:36	26.52	12
16	BKK	7-Dec-2008	12:57:36	26.41	11
16	BKK	7-Dec-2008	13:00:36	24.33	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:03:36	22.32	15
16	BKK	7-Dec-2008	13:06:36	22.23	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:09:36	19.35	19
16	BKK	7-Dec-2008	13:12:36	22.59	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:15:36	22.13	16
16	BKK	7-Dec-2008	13:18:36	25.32	15
16	BKK	7-Dec-2008	13:21:36	30.88	12
16	BKK	7-Dec-2008	13:24:36	39.94	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:27:36	34.27	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:30:36	31.46	20
16	BKK	7-Dec-2008	13:33:36	26.67	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:36:36	26.19	14
16	BKK	7-Dec-2008	13:39:36	30.72	20
16	BKK	7-Dec-2008	13:42:36	32.63	18
16	BKK	7-Dec-2008	13:45:36	29.95	21
16	BKK	7-Dec-2008	13:48:36	29.91	15
16	BKK	7-Dec-2008	13:51:36	29.84	24
17	BKK	14-Dec-2008	8:41:23	38.52	7

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
17	BKK	14-Dec-2008	8:44:23	34.52	6
17	BKK	14-Dec-2008	8:47:23	30.13	11
17	BKK	14-Dec-2008	8:50:23	31.85	14
18	BKK	9-Jan-2009	17:42:22	31.51	19
18	BKK	9-Jan-2009	17:45:22	28.21	20
18	BKK	9-Jan-2009	17:48:22	39.35	17
18	BKK	9-Jan-2009	17:51:22	27.32	14
18	BKK	9-Jan-2009	17:54:22	34.89	15
18	BKK	9-Jan-2009	17:57:22	36.84	19
18	BKK	9-Jan-2009	18:00:22	33.68	18
19	BKK	1-Feb-2009	16:48:03	22.88	29
19	BKK	1-Feb-2009	16:51:03	27.74	27
19	BKK	1-Feb-2009	16:54:03	38.92	39
19	BKK	1-Feb-2009	16:57:03	30.73	36
19	BKK	1-Feb-2009	17:00:03	35.1	39
19	BKK	1-Feb-2009	17:03:03	34.28	34
19	BKK	1-Feb-2009	17:06:03	32.02	32
19	BKK	1-Feb-2009	17:09:03	33.43	29
19	BKK	1-Feb-2009	17:12:03	36.03	37
19	BKK	1-Feb-2009	17:15:03	36.62	31
19	BKK	1-Feb-2009	17:18:03	36.73	36
19	BKK	1-Feb-2009	17:21:03	35.11	37
19	BKK	1-Feb-2009	17:24:03	30.86	37
19	BKK	1-Feb-2009	17:27:03	32.41	33
19	BKK	1-Feb-2009	17:30:03	31.26	33
19	BKK	1-Feb-2009	17:33:03	33.07	29

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 แสดงฐานข้อมูลการจราจรติดขัดของถนนคลองหลวงทิศทางขาออก

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
1	AYT	8-Aug-2008	12:21:56	32.33	32
1	AYT	8-Aug-2008	12:24:56	29.3	32
1	AYT	8-Aug-2008	12:27:56	29.03	29
1	AYT	8-Aug-2008	12:30:56	32.38	33
1	AYT	8-Aug-2008	12:33:56	32.55	31
1	AYT	8-Aug-2008	12:36:56	29.59	30
1	AYT	8-Aug-2008	12:39:56	31.53	33
1	AYT	8-Aug-2008	12:42:56	31.98	38
2	AYT	28-Aug-2008	15:33:28	36.27	33
2	AYT	28-Aug-2008	15:36:28	30.32	33
2	AYT	28-Aug-2008	15:39:28	27.11	33
3	AYT	9-Sep-2008	14:17:07	33.2	39
3	AYT	9-Sep-2008	14:20:07	22	29
3	AYT	9-Sep-2008	14:23:07	35.17	33
3	AYT	9-Sep-2008	14:29:07	35.05	33
3	AYT	9-Sep-2008	14:32:07	24.57	34
3	AYT	9-Sep-2008	14:35:07	19.75	26
3	AYT	9-Sep-2008	14:38:07	17.84	27
3	AYT	9-Sep-2008	14:41:07	18.34	27
3	AYT	9-Sep-2008	14:44:07	17.51	25
3	AYT	9-Sep-2008	14:47:07	14.16	23
3	AYT	9-Sep-2008	14:50:07	12.97	18
3	AYT	9-Sep-2008	14:53:07	18.22	25
3	AYT	9-Sep-2008	14:56:07	21.43	33
3	AYT	9-Sep-2008	14:59:07	36.85	49
3	AYT	9-Sep-2008	15:05:07	31.12	50
4	AYT	10-Oct-2008	9:40:57	39.82	43
4	AYT	10-Oct-2008	9:43:57	37.82	42
4	AYT	10-Oct-2008	9:49:57	33.24	39
4	AYT	10-Oct-2008	9:52:57	30.7	34
4	AYT	10-Oct-2008	10:01:57	36.98	36
4	AYT	10-Oct-2008	10:04:57	36.56	44
4	AYT	10-Oct-2008	10:10:57	31.47	36
4	AYT	10-Oct-2008	10:13:57	34	42
5	AYT	19-Oct-2008	8:57:00	38.84	33
5	AYT	19-Oct-2008	9:00:00	30.94	30
5	AYT	19-Oct-2008	9:03:00	24.32	28
5	AYT	19-Oct-2008	9:06:00	23.94	32
5	AYT	19-Oct-2008	9:09:00	25.85	30
5	AYT	19-Oct-2008	9:12:00	24.69	36

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
5	AYT	19-Oct-2008	9:15:00	22.15	33
5	AYT	19-Oct-2008	9:18:00	20.37	31
5	AYT	19-Oct-2008	9:21:00	25.58	31
5	AYT	19-Oct-2008	9:24:00	19.67	29
5	AYT	19-Oct-2008	9:33:24	22.93	32
5	AYT	19-Oct-2008	9:36:24	21.12	23
5	AYT	19-Oct-2008	9:39:24	25.31	29
5	AYT	19-Oct-2008	9:42:24	18.28	24
5	AYT	19-Oct-2008	9:45:24	22.31	28
5	AYT	19-Oct-2008	9:48:24	31.59	37
5	AYT	19-Oct-2008	9:51:24	32.68	33
6	AYT	31-Oct-2008	6:54:03	39.13	36
6	AYT	31-Oct-2008	7:00:03	34.44	34
6	AYT	31-Oct-2008	7:03:03	28.03	32
6	AYT	31-Oct-2008	7:06:03	32.42	33
6	AYT	31-Oct-2008	7:15:03	38.43	40
6	AYT	31-Oct-2008	7:18:03	30.49	34
6	AYT	31-Oct-2008	7:21:03	30.85	35
6	AYT	31-Oct-2008	7:24:03	31.15	34
6	AYT	31-Oct-2008	7:27:03	38.27	37
6	AYT	31-Oct-2008	7:30:03	32.58	36
6	AYT	31-Oct-2008	7:33:03	30.35	38
6	AYT	31-Oct-2008	7:36:03	30.95	35
6	AYT	31-Oct-2008	7:39:03	33.08	37
6	AYT	31-Oct-2008	7:42:03	30.55	36
6	AYT	31-Oct-2008	7:45:03	30.72	34
6	AYT	31-Oct-2008	7:48:03	32.34	37
6	AYT	31-Oct-2008	7:51:03	30.91	38
6	AYT	31-Oct-2008	7:54:03	32.61	40
6	AYT	31-Oct-2008	7:57:03	32.47	45
6	AYT	31-Oct-2008	8:03:03	37.12	39
6	AYT	31-Oct-2008	8:06:03	32.17	38
6	AYT	31-Oct-2008	8:09:03	35.85	40
6	AYT	31-Oct-2008	8:12:03	35.96	34
6	AYT	31-Oct-2008	8:15:03	36.45	42
6	AYT	31-Oct-2008	8:18:03	34.02	39
6	AYT	31-Oct-2008	8:21:03	37.74	38
6	AYT	31-Oct-2008	8:24:03	36.82	44
7	AYT	1-Nov-2008	7:48:02	35.61	35
7	AYT	1-Nov-2008	7:54:02	35.4	34
7	AYT	1-Nov-2008	7:57:02	29.82	35
7	AYT	1-Nov-2008	8:00:02	32.93	37

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
7	AYT	1-Nov-2008	8:03:02	33.91	34
7	AYT	1-Nov-2008	8:06:02	30.36	41
7	AYT	1-Nov-2008	8:09:02	29.75	36
8	AYT	4-Nov-2008	14:23:56	26.24	25
8	AYT	4-Nov-2008	14:26:56	23.21	25
8	AYT	4-Nov-2008	14:29:56	22.17	23
8	AYT	4-Nov-2008	14:32:56	21.44	23
8	AYT	4-Nov-2008	14:35:56	21.55	23
8	AYT	4-Nov-2008	14:38:56	19.59	19
8	AYT	4-Nov-2008	14:41:56	15.79	25
8	AYT	4-Nov-2008	14:44:56	18	22
8	AYT	4-Nov-2008	14:47:56	22.04	20
8	AYT	4-Nov-2008	14:50:56	19.42	23
8	AYT	4-Nov-2008	14:53:56	18.95	27
8	AYT	4-Nov-2008	14:56:56	17.52	21
8	AYT	4-Nov-2008	14:59:56	23.19	30
8	AYT	4-Nov-2008	15:02:56	22.29	25
8	AYT	4-Nov-2008	15:05:56	21.91	28
8	AYT	4-Nov-2008	15:08:56	24.58	28
8	AYT	4-Nov-2008	15:11:56	24.16	33
8	AYT	4-Nov-2008	15:14:56	18.82	24
8	AYT	4-Nov-2008	15:17:56	22.03	26
8	AYT	4-Nov-2008	15:20:56	26.78	28
8	AYT	4-Nov-2008	15:23:56	23.13	29
8	AYT	4-Nov-2008	15:26:56	22.67	28
8	AYT	4-Nov-2008	15:32:56	32.92	29
8	AYT	4-Nov-2008	15:35:56	29.68	30
8	AYT	4-Nov-2008	15:41:56	35.71	36
8	AYT	4-Nov-2008	15:47:56	33.37	32
9	AYT	8-Nov-2008	15:45:32	39.99	31
9	AYT	8-Nov-2008	15:48:32	28.26	31
9	AYT	8-Nov-2008	15:51:32	26.89	29
9	AYT	8-Nov-2008	15:54:32	29.16	30
9	AYT	8-Nov-2008	15:57:32	29.89	29
10	AYT	21-Nov-2008	11:46:19	35.46	35
10	AYT	21-Nov-2008	11:49:19	31.88	35
11	AYT	5-Dec-2008	9:45:59	33.91	42
11	AYT	5-Dec-2008	9:48:59	33.05	39
11	AYT	5-Dec-2008	9:51:59	38.67	45
11	AYT	5-Dec-2008	9:54:59	31.62	43
11	AYT	5-Dec-2008	9:57:59	27.19	34
11	AYT	5-Dec-2008	10:00:59	33.09	33



No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
11	AYT	5-Dec-2008	10:03:59	34.26	43
11	AYT	5-Dec-2008	10:06:59	28.39	37
11	AYT	5-Dec-2008	10:09:59	28.81	42
11	AYT	5-Dec-2008	10:12:59	34.51	38
11	AYT	5-Dec-2008	10:15:59	27.3	27
11	AYT	5-Dec-2008	10:18:59	21.54	29
12	AYT	10-Dec-2008	6:57:01	39.68	36
12	AYT	10-Dec-2008	7:06:01	35.49	30
12	AYT	10-Dec-2008	7:30:01	39.31	37
13	AYT	27-Dec-2008	12:27:14	25.65	36
13	AYT	27-Dec-2008	12:30:14	25.62	42
13	AYT	27-Dec-2008	12:33:14	25.95	43
13	AYT	27-Dec-2008	12:36:14	22.77	30
13	AYT	27-Dec-2008	12:39:14	23.91	36
13	AYT	27-Dec-2008	12:42:14	23.25	35
13	AYT	27-Dec-2008	12:45:14	20.24	35
13	AYT	27-Dec-2008	12:48:14	20.82	37
13	AYT	27-Dec-2008	12:51:14	20.4	32
13	AYT	27-Dec-2008	12:54:14	22.13	34
13	AYT	27-Dec-2008	12:57:14	22.97	34
13	AYT	27-Dec-2008	13:00:14	22.36	33
13	AYT	27-Dec-2008	13:03:14	25.38	30
13	AYT	27-Dec-2008	13:06:14	25.73	31
13	AYT	27-Dec-2008	13:09:14	33.63	32
13	AYT	27-Dec-2008	13:12:14	38.48	34
13	AYT	27-Dec-2008	13:15:14	30.21	36
13	AYT	27-Dec-2008	13:18:14	31.04	37
13	AYT	27-Dec-2008	13:21:14	27.18	36
13	AYT	27-Dec-2008	13:24:14	27.42	38
13	AYT	27-Dec-2008	13:33:14	35.84	38
14	AYT	30-Dec-2008	14:35:16	25.19	14
14	AYT	30-Dec-2008	14:38:16	25.35	18
14	AYT	30-Dec-2008	14:44:16	23.96	17
15	AYT	31-Dec-2008	8:34:27	30.17	35
15	AYT	31-Dec-2008	8:37:27	21.2	35
16	AYT	13-Jan-2009	9:19:36	35.35	33
16	AYT	13-Jan-2009	9:22:36	29.01	35
16	AYT	13-Jan-2009	9:25:36	28.29	32
16	AYT	13-Jan-2009	9:28:36	29.67	32
17	AYT	19-Jan-2009	6:21:02	29.12	33
17	AYT	19-Jan-2009	6:24:02	25.88	32
17	AYT	19-Jan-2009	6:27:02	23.68	29

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
17	AYT	19-Jan-2009	6:30:02	20.63	31
17	AYT	19-Jan-2009	6:33:02	19.98	27
17	AYT	19-Jan-2009	6:36:02	22.73	30
17	AYT	19-Jan-2009	6:39:02	23.18	29
17	AYT	19-Jan-2009	6:42:02	22.38	23
17	AYT	19-Jan-2009	6:45:02	27.89	23
17	AYT	19-Jan-2009	6:48:02	16.95	20
17	AYT	19-Jan-2009	6:51:02	16.37	20
17	AYT	19-Jan-2009	6:54:02	16.43	20
17	AYT	19-Jan-2009	6:57:02	18.35	19
17	AYT	19-Jan-2009	7:00:02	17.25	23
17	AYT	19-Jan-2009	7:03:02	16.65	21
17	AYT	19-Jan-2009	7:06:02	15.65	22
17	AYT	19-Jan-2009	7:09:02	16.17	21
17	AYT	19-Jan-2009	7:12:02	11.48	17
17	AYT	19-Jan-2009	7:15:02	10.81	17
17	AYT	19-Jan-2009	7:18:02	12	19
17	AYT	19-Jan-2009	7:21:02	10.41	17
17	AYT	19-Jan-2009	7:24:02	11.05	18
17	AYT	19-Jan-2009	7:27:02	11.61	19
17	AYT	19-Jan-2009	7:30:02	11.45	23
17	AYT	19-Jan-2009	7:33:02	16.9	24
17	AYT	19-Jan-2009	7:36:02	19.99	28
17	AYT	19-Jan-2009	7:39:02	22.66	29
17	AYT	19-Jan-2009	7:42:02	23.25	27
17	AYT	19-Jan-2009	7:45:02	22.43	27
17	AYT	19-Jan-2009	7:48:02	27.6	30
17	AYT	19-Jan-2009	7:51:02	26.89	33
17	AYT	19-Jan-2009	7:54:02	24.35	31
17	AYT	19-Jan-2009	7:57:02	26.13	29
17	AYT	19-Jan-2009	8:00:02	27.78	31
17	AYT	19-Jan-2009	8:03:02	27.6	34
17	AYT	19-Jan-2009	8:06:02	23.2	31
17	AYT	19-Jan-2009	8:09:02	31.54	34
17	AYT	19-Jan-2009	8:12:02	20.89	27
17	AYT	19-Jan-2009	8:15:02	25.32	35
17	AYT	19-Jan-2009	8:18:02	37.96	39
18	AYT	20-Jan-2009	7:18:03	33.86	32
18	AYT	20-Jan-2009	7:21:03	34.92	34
18	AYT	20-Jan-2009	7:24:03	36.44	32
18	AYT	20-Jan-2009	7:27:03	26.87	25
18	AYT	20-Jan-2009	7:30:03	30.79	33

No.	Direction To.	Date	Time	Speed	Flow
18	AYT	20-Jan-2009	7:33:03	32.27	32
18	AYT	20-Jan-2009	7:36:03	36.78	32
18	AYT	20-Jan-2009	7:39:03	37.27	40
18	AYT	20-Jan-2009	7:42:03	34.48	36
18	AYT	20-Jan-2009	7:48:03	34.36	34
18	AYT	20-Jan-2009	7:51:03	38.74	41
18	AYT	20-Jan-2009	7:54:03	30.22	33
18	AYT	20-Jan-2009	7:57:03	38.14	33
18	AYT	20-Jan-2009	8:03:03	29.31	31
18	AYT	20-Jan-2009	8:06:03	35.03	34
18	AYT	20-Jan-2009	8:09:03	36.76	37
18	AYT	20-Jan-2009	8:12:03	37.99	41
18	AYT	20-Jan-2009	8:15:03	33.17	33
18	AYT	20-Jan-2009	8:18:03	38.25	44
18	AYT	20-Jan-2009	8:21:03	38.21	37
19	AYT	23-Jan-2009	8:54:03	13.08	1
19	AYT	23-Jan-2009	8:57:03	13.8	N/A
19	AYT	23-Jan-2009	9:18:03	17.68	1
19	AYT	23-Jan-2009	9:21:03	31.62	7
19	AYT	23-Jan-2009	9:29:47	27.4	12
19	AYT	23-Jan-2009	9:32:47	30.87	12
19	AYT	23-Jan-2009	9:35:47	30.65	21
19	AYT	23-Jan-2009	9:38:47	35.71	31
19	AYT	23-Jan-2009	9:41:47	37.9	36
19	AYT	23-Jan-2009	9:44:47	24.68	28
19	AYT	23-Jan-2009	9:47:47	32.07	28
19	AYT	23-Jan-2009	9:50:47	27.22	33
19	AYT	23-Jan-2009	9:53:47	30.52	30
19	AYT	23-Jan-2009	9:56:47	34.42	32
19	AYT	23-Jan-2009	9:59:47	30.69	33
19	AYT	23-Jan-2009	10:02:47	36.01	36
19	AYT	23-Jan-2009	10:05:47	38.16	37
19	AYT	23-Jan-2009	10:08:47	31.52	29
19	AYT	23-Jan-2009	12:02:47	33.85	35
19	AYT	23-Jan-2009	12:05:47	33.13	35

ตารางที่ 3 แสดงฐานข้อมูลการจราจรติดขัดของทางด่วนดาวคะนอง

Timing Step / Camera	EXAT2		EXAT3		EXAT5		EXAT6	
	Begin	Congested	Begin	Congested	Begin	Congested	Begin	Congested
3-Jun-10	24480	24840	23700	24180	no	no	no	No
4-Jun-10	no	no	21960	25380	no	no	73140	73740
5-Jun-10	no	no	no	no	no	no	no	No
6-Jun-10	no	no	no	no	no	no	no	No
7-Jun-10	23220	23700	21960	22320	no	no	no	No
8-Jun-10	no	no	23880	28140	no	no	no	No
9-Jun-10	25500	25980	22200	24960	no	no	78420	80280

Timing Step / Camera	EXAT7		EXAT9		EXAT10	
	Begin	Congested	Begin	Congested	Begin	Congested
3-Jun-10	no	no	65520	66360	62940	63660
4-Jun-10	64620	65580	63540	64080	62520	63000
5-Jun-10	no	no	no	no	no	no
6-Jun-10	no	no	0	1680	0	2280
7-Jun-10	no	no	no	no	43260	44040
8-Jun-10	27480	28560	26760	27540	25680	26940
			65280	66720	62820	63900
9-Jun-10	31170	31970	30540	30960	30140	30560
			78120	80040	70020	70540

\* ตัวเลขที่แสดงในตารางคือลำดับเวลา (Timing Step) การติดขัดทุก 1 วินาที เริ่มนับจากเวลา 0.00.00 นาฬิกาของทุกวัน โดยวันที่ไม่มีการติดขัดจะแสดงเป็น no

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติพงษ์ หิริโด้ปะปะ เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษาเดียวกัน ได้มีผลงานตีพิมพ์ซึ่งเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ ITS World Congress 2010 ที่ประเทศเกาหลี งานประชุมวิชาการนานาชาติ International Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE) ครั้งที่ 14 ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง และงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Conference of Thai Society for Transportation & Traffic Studies ครั้งที่ 1 ที่จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย