



การประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพ
การจราจรระดับจุลภาค

ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน

คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลอง
สภาพการจราจรระดับจุลภาค



ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน

คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

EVALUATING CONGESTION MANAGEMENT EFFICIENCY OF CONTAINER PORTS USING
MICROSCOPIC SIMULATION MODELS



NATTHAPONG CHUCHOTTAWORN

A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR DOCTOR DEGREE OF PHILOSOPHY
IN LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

FACULTY OF LOGISTICS

BURAPHA UNIVERSITY

2025

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมดัชนีพนธ์และคณะกรรมการสอบดัชนีพนธ์ได้พิจารณาดัชนีพนธ์ของ ฌัษฐพงศ
ชูโชติถาวร ฌบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการ
จัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมดัชนีพนธ์

คณะกรรมการสอบดัชนีพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เร้าธนชलग)

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห)
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณกร อินทร์พุง)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุทธ์ ชันธสะอาด)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาทิพย์ สุรารักษ์)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เร้าธนชलग)

..... คณบดีคณะโลจิสติกส์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เร้าธนชलग)

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับดัชนีพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทวัส แจงเอี่ยม)

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.

63810107 : สาขาวิชา การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, ปร.ด.

คำสำคัญ : ปัจจัยความแออัด/ การจำลองการจราจร/ สัญญาณไฟจราจร

ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร : การประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (EVALUATING CONGESTION MANAGEMENT EFFICIENCY OF CONTAINER PORTS USING MICROSCOPIC SIMULATION MODELS)

คณะกรรมการควบคุมคุณภาพนิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เร้าธนชกุล ปี พ.ศ. 2568

ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรและการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือแหลมฉบัง วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือจำนวน 3 พื้นที่ ได้แก่ ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 ด้วยโปรแกรม SUMO ผลการวิจัยปรากฏว่า

1. การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือพบว่าประตูตรวจสอบหมายเลข 1 พบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความความแออัดจากค่าน้อยไปหามากได้ดังนี้ 1. ปัจจัยจำนวน ช่องจราจร, 2. ปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า 3. ความสามารถในการดำเนินงานของประตู และ 4. การกำหนดประเภทช่องจราจร การวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณด้วยการทดสอบ Wilks พบว่าการจับคู่ของปัจจัยปัจจัยจำนวนช่องจราจรและความสามารถในการดำเนินงานของประตู ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงสุด สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 การจับคู่ของปัจจัยจำนวนช่องจราจรและรอบสัญญาณไฟจราจรถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงสุด

2. การออกแบบและปรับเปลี่ยนรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยการชดเชยเวลาสัญญาณไฟจราจรสีเขียวของทางแยกประสานสัมพันธ์ พบว่าวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยแถวคอยเพื่อกำหนดค่าเวลาชดเชยจะสามารถช่วยลดระยะเวลาการรอคอยรวมได้สูงที่สุด ในช่วงเวลาเร่งด่วน (13:00-17:00 น.) มีเวลารอคอยเฉลี่ยลดลงร้อยละ 3.31 และช่วงเวลา 17:00-20:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยลดลงร้อยละ 1.82 ปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านทางแยกมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการจราจรปัจจุบัน 207คัน หรือร้อยละ 15.65

3. การวิเคราะห์นโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส พบว่าการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 1 ช่อง ค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 1.5 ในช่วงเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00 น.) มีระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 210.58 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 4.58 และมีความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรรวมลดลง 1034.18 เมตร

63810107 : MAJOR LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT, Ph.D.

KEYWORDS : CONGESTION FACTORS/ TRAFFIC SIMULATION/ TRAFFIC LIGHT

NATTHAPONG CHUCHOTTAWORN : EVALUATING CONGESTION MANAGEMENT EFFICIENCY OF CONTAINER PORTS USING MICROSCOPIC SIMULATION MODELS. ADVISORY COMMITTEE: PAIROJ RAOTHANACHONKUN, D.Eng. 2025

This thesis aims to examine the factors contributing to congestion at Laem Chabang Port and to formulate a traffic model. The Simulation of Urban Mobility (SUMO) program was utilized to examine the factors affecting congestion on Gate Nos. 1, 3, and 4. The findings of the research are summarized below:

1. Gate No. 1 found the factors affecting route congestion to the port from least to most: Lane count, appointment level, gate capacity, and lane type. Multiple analysis of variance with Wilks test showed that Number of lanes and Gate operating capacity were the most important factors.

2. By accounting for the green traffic light time of the interconnected intersection, the traffic light cycle is designed and modified. The method of utilizing the average queue to determine the compensation time was determined to be the most effective in reducing the total waiting time. The average waiting time was reduced by 3.31 percent during rush hour (13:00-17:00) and by 1.82 percent during 17:00-20:00. Vehicles passing through the intersection exceeded the current traffic volume by 207 vehicles, or 15.65%.

3. The analysis of the policy of arranging the counter-current traffic lanes revealed that the queue coefficient was 1.5 during rush hour, which was critically unbalanced. 13:00–17:00 In the same period, the average waiting time per car decreased by 210.58 seconds, or 4.58 percent, and the average waiting length per traffic lane decreased by 1034.18 meters, or 25.49 percent.

กิตติกรรมประกาศ

ดุชฎินิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เร้าธนชลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห ประธาน คณะกรรมการสอบดุชฎินิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ณกร อินทร์พยุง กรรมการสอบดุชฎินิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ทำให้การจัดทำดุชฎินิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้ทุนอุดหนุนการศึกษา ในโครงการพัฒนาบุคลากรเพื่อศึกษาต่อในประเทศ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ข้อมูลซึ่งเป็น ประโยชน์ต่อการวิจัยขอบคุณแหล่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ผู้เขียนหนังสือตำราวารสารวิชาการ วितยานิพนธ์ ดุชฎินิพนธ์ และเอกสาร ที่ใช้อ้างอิงทุกท่านซึ่งผู้วิจัยได้ใช้เป็นแนวทางในการศึกษา ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์และจัดทำดุชฎินิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากดุชฎินิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูทเวทิตาแต่ บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้าได้รับการศึกษา มีความรู้ในศาสตร์ด้านการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน ขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวซึ่งเป็นแรงสนับสนุนที่สำคัญยิ่งสำหรับผู้วิจัยให้สามารถจัดทำดุชฎินิพนธ์นี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	14
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	14
ขอบเขตของการวิจัย	16
นิยามศัพท์เฉพาะ	16
กรอบแนวคิดในการวิจัย	16
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	20
แนวคิดทฤษฎีทางการจรรยาบรรณ	20
ความหมายของแบบจำลองสภาพการจรรยาบรรณระดับจุลภาค	43
แนวคิดการลดความแออัดที่ประตูท่าเรือ	62
การศึกษาปัจจัยความแออัด	64

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	68
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	91
กำหนดขอบเขตการศึกษา	91
การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล	98
การพัฒนาแบบจำลองฐาน	106
การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือ	128
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	133
ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยด้วยเทคนิค ANOVA	133
การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา	145
การออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจร	145
นโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส	159
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล	169
สรุปผลลัพธ์แนวทางการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลา.....	170
สรุปผลลัพธ์นโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส	171
ข้อเสนอแนะ	173
บรรณานุกรม.....	174
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	188

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 จำนวนสินค้าที่ทำเรือแหลมฉบัง (หน่วย : ล้านตัน)	5
ตารางที่ 2 จำนวนตู้คอนเทนเนอร์สินค้าที่ทำเรือแหลมฉบัง (หน่วย : ที.อี.ยู.)	6
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองสภาพการจราจร	38
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองสภาพการจราจร (ด้านความสามารถ)...	39
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของแบบจำลองสภาพการจราจรในแต่ละระดับ	41
ตารางที่ 6 ตัววัดประสิทธิภาพการจราจรจำแนกตามวัตถุประสงค์ในการควบคุม	42
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค	48
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร	50
ตารางที่ 9 เกณฑ์ในการปรับเทียบแบบจำลองของ DMRB	61
ตารางที่ 10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	85
ตารางที่ 11 ปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3	100
ตารางที่ 12 ปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 4	100
ตารางที่ 13 ความยาวและระยะเวลารอคอยเฉลี่ย (08.00-14.00).....	104
ตารางที่ 14 ความยาวและระยะเวลารอคอยเฉลี่ย (14.00-20.00)	104
ตารางที่ 15 รอบสัญญาณไฟจราจรทางแยกประตูตรวจสอบ	106
ตารางที่ 16 รูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1.....	109
ตารางที่ 17 รูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3.....	110
ตารางที่ 18 รูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 4	111
ตารางที่ 19 รูปแบบการมาถึงของยานพาหนะในเส้นทางร่วม	111
ตารางที่ 20 สัดส่วนการเลือกเข้ารับบริการที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1	112
ตารางที่ 21 สัดส่วนการเลือกเข้ารับบริการที่ทำเทียบเรือปลายทาง	113
ตารางที่ 22 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของรถบรรทุกตู้ (ประตู 1)	114
ตารางที่ 23 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของรถบรรทุกตู้ (ประตู 3)	115
ตารางที่ 24 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของรถบรรทุกตู้ (ประตู 4)	115
ตารางที่ 25 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของยานพาหนะร่วมในเส้นทาง	116
ตารางที่ 26 การเปรียบเทียบระหว่างการสังเกตและการจำลอง	124

ตารางที่ 27 ความยาวแฉกคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 (ก่อนตัดปัจจัย)	134
ตารางที่ 28 ความยาวแฉกคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 (หลังตัดปัจจัย)	135
ตารางที่ 29 ปัจจัยระยะเวลารอคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3	136
ตารางที่ 30 ปัจจัยความยาวแฉกคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3	136
ตารางที่ 31 ความยาวแฉกคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4 (ก่อนตัดปัจจัย)	137
ตารางที่ 32 ความยาวแฉกคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4 (หลังตัดปัจจัย)	137
ตารางที่ 33 ปัจจัยระยะเวลารอคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4	138
ตารางที่ 34 ปัจจัยความยาวแฉกคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4	139
ตารางที่ 35 ผลลัพธ์ One-way MANOVA ประตูตรวจสอบหมายเลข 3	140
ตารางที่ 36 ผลลัพธ์ One-way MANOVA ประตูตรวจสอบหมายเลข 4	140
ตารางที่ 37 ผลลัพธ์ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 (ก่อนตัดปัจจัย)	141
ตารางที่ 38 ผลลัพธ์ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 (หลังตัดปัจจัย)	142
ตารางที่ 39 ผลลัพธ์ปัจจัยระยะเวลารอคอยประตูตรวจสอบหมายเลข 1	143
ตารางที่ 40 ผลลัพธ์ปัจจัยความยาวแฉกคอยประตูตรวจสอบหมายเลข 1	143
ตารางที่ 41 ผลลัพธ์ MANOVA ประตูตรวจสอบหมายเลข 1	144
ตารางที่ 42 ผลการดำเนินการที่ทางแยกประตูตรวจสอบ (ก่อนปรับปรุง)	151
ตารางที่ 43 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแฉกคอยก่อนหน้า (08.00-13.59)	151
ตารางที่ 44 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแฉกคอยก่อนหน้า (14.00-19.59)	152
ตารางที่ 45 ผลลัพธ์การหลังการปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแฉกคอยก่อนหน้าสูงสุด (08.00-13.59)	153
ตารางที่ 46 ผลลัพธ์การหลังการปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแฉกคอยก่อนหน้าสูงสุด (14.00-19.59)	153
ตารางที่ 47 ตัวแปรของสมการกำหนดนโยบายการจราจรแบบสวนกระแส	161
ตารางที่ 48 ผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านระยะเวลารอคอยเฉลี่ย	164
ตารางที่ 49 ผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านความยาวแฉกคอยเฉลี่ย (เมตร)	166

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1	พื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก	7
ภาพที่ 2	การเปรียบเทียบเส้นทางการเข้าถึงท่าเรือแหลมฉบังในระยะเวลา 4 ชั่วโมง	10
ภาพที่ 3	สถิติรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ผ่านท่าเรือแหลมฉบัง พ.ศ. 2563-2565 (คััน)	11
ภาพที่ 4	สถิติรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าประตูตรวจสอบหมายเลข 1,3 และ 4 (คััน)	12
ภาพที่ 5	การจราจรติดขัดในพื้นที่โดยรอบและประตูตรวจสอบท่าเรือแหลมฉบัง	13
ภาพที่ 6	กรอบแนวคิดของการวิจัย	18
ภาพที่ 7	ระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่วิ่งตามกันในโครงข่ายกระแสการจราจร	26
ภาพที่ 8	องค์ประกอบของระบบแถวคอย	33
ภาพที่ 9	ระบบแถวคอยการให้บริการ	36
ภาพที่ 10	การสร้างปริมาณการจราจรในโปรแกรม SUMO	55
ภาพที่ 11	การสร้างเครือข่ายถนนในโปรแกรม SUMO	56
ภาพที่ 12	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	91
ภาพที่ 13	ภาพรวมท่าเรือแหลมฉบัง (กรกฎาคม 2565 - มกราคม 2566)	96
ภาพที่ 14	ร้อยละของประเภทรถที่เข้ามาแต่ละประเภท	96
ภาพที่ 15	ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 3 และ 4	97
ภาพที่ 16	ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 1	97
ภาพที่ 17	ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 3	102
ภาพที่ 18	ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 4	102
ภาพที่ 19	ลักษณะการติดขัดที่ ณ ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4	103
ภาพที่ 20	ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 1	103
ภาพที่ 21	ผลลัพธ์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4	105
ภาพที่ 22	โครงสร้างของแบบจำลองสภาพการจราจร	107
ภาพที่ 23	รูปแบบโครงข่ายเส้นทางจากโปรแกรมที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3และ 4	108
ภาพที่ 24	รูปแบบโครงข่ายเส้นทางจากโปรแกรมที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1	109
ภาพที่ 25	การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง ณ ประตูตรวจสอบหมายเลข 1	117

ภาพที่ 26 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง ณ ประตูดูตรวจสอบหมายเลข 3	118
ภาพที่ 27 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง ณ ประตูดูตรวจสอบหมายเลข 4	119
ภาพที่ 28 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่องของยานพาหนะร่วมในเส้นทาง	120
ภาพที่ 29 การประมวลผลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	123
ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบจำนวนยานพาหนะระหว่างการสำรวจและแบบจำลองสถานการณ์	125
ภาพที่ 31 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองสถานการณ์ที่ประตูดูตรวจสอบหมายเลข 1	127
ภาพที่ 32 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองสถานการณ์ที่ประตูดูตรวจสอบหมายเลข 3	127
ภาพที่ 33 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองสถานการณ์ที่ประตูดูตรวจสอบหมายเลข 4	128
ภาพที่ 34 โครงข่ายเส้นทางจากโปรแกรม QGIS และ SUMO	146
ภาพที่ 35 แนวคิดการระบายยานพาหนะภายในแถวคอย	147
ภาพที่ 36 ช่วงเวลาการชดเชยสัญญาณไฟจราจร	148
ภาพที่ 37 การแสดงภาพจุดตัดที่เชื่อมต่อกันที่ประตูดูตรวจสอบ	149
ภาพที่ 38 ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยก่อนและหลังการปรับปรุง	154
ภาพที่ 39 ระยะเวลาการรอคอยรวมของประตูดูตรวจสอบก่อนปรับปรุง	156
ภาพที่ 40 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอย	156
ภาพที่ 41 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอยสูงสุด	157
ภาพที่ 42 ผลลัพธ์ตามช่วงเวลาหลังปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอยสูงสุด	157
ภาพที่ 43 เปรียบเทียบผลลัพธ์การปรับปรุง	158
ภาพที่ 44 จำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าและออกหลังการปรับปรุง	158
ภาพที่ 45 เปรียบเทียบผลลัพธ์จำนวนยานพาหนะเข้า-ออก	158
ภาพที่ 46 การดำเนินงานด้วยนโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส	160
ภาพที่ 47 หลักการเปลี่ยนแปลงทิศทางการจราจรของช่องจราจรแบบสวนกระแส	160
ภาพที่ 48 ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยต่อยานพาหนะใน 3 ช่วงเวลา	165
ภาพที่ 49 ผลลัพธ์แต่ละสถานการณ์	165
ภาพที่ 50 ความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรใน 3 ช่วงเวลา	167
ภาพที่ 51 ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงในแต่ละสถานการณ์	167

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการขนส่งทางทะเลเป็นรูปแบบการขนส่งสินค้าหลักของการค้าระหว่างประเทศและเศรษฐกิจโลก ท่าเรือเป็นมากกว่าสิ่งอำนวยความสะดวกทางด้านโลจิสติกส์ในกระบวนการนำเข้าและส่งออกสินค้าทางทะเลของแต่ละประเทศ อีกทั้งท่าเรือเป็นจุดเชื่อมโยงที่สำคัญในห่วงโซ่อุปทานที่สามารถช่วยให้แต่ละประเทศสามารถขยายขอบเขตทางเศรษฐกิจไปได้ทั่วโลก ดังนั้นระบบเศรษฐกิจในยุคสมัยใหม่ได้ให้ความสำคัญกับการแข่งขันระหว่างท่าเรือเพื่อสนับสนุนกระบวนการของระบบห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมภายในประเทศ (Magala & Sammons, 2008) ในปี 2564 การค้าทางทะเลของโลกขยายตัวร้อยละ 4.3 โดยมีสัดส่วนการขนส่งสินค้าทางทะเลคิดเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณการค้าระหว่างประเทศทั้งหมด การพัฒนาของระบบการขนส่งสินค้าทางทะเลระหว่างประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการเติบโตของระบบห่วงโซ่อุปทานของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก (Popa & Strer, 2016) ส่งผลให้การขนส่งสินค้าทางเรือบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับความต้องการปริมาณมาก (Dekker et al., 2013) ก็ตาม การฟื้นตัวของการค้าทางทะเลยังคงเผชิญกับปัจจัยเสี่ยงอย่างต่อเนื่องจากการแพร่ระบาดของโรคระบาด ปัญหาการขาดแคลนตู้คอนเทนเนอร์เปล่า การหยุดชะงักของห่วงโซ่อุปทานและความแออัดในท่าเรือ โดยทั่วไปปัญหาประสิทธิภาพการปฏิบัติงานเนื่องจากการขาดแคลนทรัพยากรของท่าเรือการจะถือเป็นหนึ่งในปัญหาที่ก่อให้เกิดความล่าช้าของกระบวนการท่าเรือ (Talley & Ng, 2016) โดยเฉพาะปัญหาความแออัดของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าและออกท่าเรือเพื่อรับและส่งตู้คอนเทนเนอร์ดูเหมือนจะเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงปรารถนาที่สามารถพบได้ในท่าเรือทั่วโลก (Dekker et al., 2013) ปริมาณการค้าระหว่างประเทศและการขนส่งสินค้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแออัดของการจราจรที่ท่าเรือกลายเป็นปัญหาร้ายแรงที่กระทบต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานของท่าเรือ เวลาที่รถบรรทุกคอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมักจะมีแถวคอยรถบรรทุกที่ประตูทางเข้า-ออกเพื่อรอรับและส่งตู้คอนเทนเนอร์จากท่าเรือ บางครั้งความแออัดยังขยายไปถึงเครือข่ายถนนโดยรอบ สถานการณ์นี้ขัดขวางการดำเนินงานของท่าเรือและธุรกิจใกล้เคียงอื่น ๆ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (Qu, Tao, Xie, & Qi, 2021) การหยุดชะงักของการไหลสินค้าเนื่องจากความติดขัดของสภาพการจราจรภายในบริเวณท่าเรือและพื้นที่โดยรอบจะส่งผลทำให้เกิดค่าใช้จ่ายมหาศาลและอาจนำไปสู่ปัญหาคอขวดของอุปทานอย่างรุนแรงภายในประเทศ (Popa &

Strer, 2016) โดยผลเสียที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่กระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของท่าเรือแต่ยังส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์และทิศทางการกำหนดกลยุทธ์การพัฒนาท่าเรืออย่างยั่งยืนในอนาคต ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ทางทะเลกำลังประสบปัญหาความแออัดในท่าเรือตู้คอนเทนเนอร์ เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมและชุมชนโดยรอบ (Chamchang & Niyomdechcha, 2021) ปัญหาความล่าช้าที่ประตูทางเข้าไม่เพียงแต่ส่ง ผลเสียต่อเศรษฐกิจเท่านั้นแต่ยังส่งผลให้เกิดความล่าช้าในห่วงโซ่อุปทานและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างมาก (Xu et al., 2021) ปัญหาแถวคอยที่ประตูทางเข้าและส่งผลให้เกิดความแออัดภายในท่าเรือ (Essi et al., 2021) โดยปริมาณงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเพิ่มภาระงานของท่าเรือจำนวนมากให้กับท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกภายนอกที่ต้องการเข้ามารับหรือส่งตู้คอนเทนเนอร์มาถึงท่าเรืออย่างไม่ตั้งใจทำให้ประสิทธิภาพของสถานีขนส่งลดลง (Zhang et al., 2019) ถึงแม้ความแออัดของท่าเรือทั้งหมดลดลงได้โดยการขยายโครงสร้างพื้นฐานเป็นทางออกที่เร็วที่สุดแต่ยังมีค่าใช้จ่ายและใช้เวลานานที่สุด ดังนั้นการศึกษาหาปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแออัดจากสภาพแวดล้อมปัจจุบันสามารถให้ประโยชน์ที่ยั่งยืน (Xu et al., 2021)

กระบวนการของท่าเรือ ระบบการขนย้ายตู้คอนเทนเนอร์ ลานพักของยานพาหนะ ระหว่างการขนส่งและประตูให้บริการของท่าเรือ เป็นส่วนเชื่อมโยงที่สำคัญในระบบการขนส่งทางทะเลและรูปแบบการขนส่งทางบก เช่น รถบรรทุกและรถไฟ (Dhanak et al., 2021) ดังนั้นท่าเรือหลักสำหรับการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศของประเทศต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการเตรียมตัววางแผนและปรับตัวให้เข้ากับเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ที่กำลังเกิดขึ้นหรือปัญหาที่มีแนวโน้มจะขยายตัวมากขึ้นในอนาคต ท่าเรือที่มีการเตรียมพร้อมและความยืดหยุ่นจะสามารถช่วยลดระยะเวลาการหยุดชะงักและเวลาในการกู้คืนของกระบวนการที่รวดเร็วขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการดำเนินการท่าเรือ การหยุดชะงักของกระบวนการ ความล่าช้าที่เกิดขึ้นเพื่อปรับให้เข้ากับความต้องการเฉพาะของท้องถิ่น (Magala & Sammons, 2008) แม้ว่าท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์และท่าเทียบเรือทั่วไปจะแตกต่างกันมากในด้านขนาดหน้าที่การดำเนินงานและรูปร่าง แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยระบบย่อยเดียวกัน (Kotachi, Rabadi & Obeid, 2013) ได้แก่ การดำเนินงานของท่าเรือ ลานจอดพักของยานพาหนะและประตูของท่าเรือ การประสานงานระหว่างระบบย่อย 3 ระบบและการกำหนดทรัพยากรการจัดการให้กับกิจกรรมที่จำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานภายในท่าเทียบเรือและหลีกเลี่ยงปัญหาคอขวดที่อาจเกิดภายในท่าเรือ (Essi, Chen, Loh, & Gu, 2021)

การพัฒนาท่าเรืออย่างยั่งยืนมี 3 เสาหลัก ได้แก่ ความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental sustainability) ความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ (Economic sustainability) และความยั่งยืนทางสังคม (Social sustainability) ความล่าช้าจากความแออัดของท่าเรือ

อาจทำให้เกิดผลกระทบลุกล้ำต่อผู้ดำเนินการที่เกี่ยวข้องรายอื่นที่รับช่วงต่อการขนส่งสินค้าต่อจากรูปแบบการขนส่งสินค้าทางเรือ โดยส่วนใหญ่ผู้ที่รับช่วงต่อการขนส่งคือการขนส่งทางบกด้วยรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ (Saharidis & Konstantzos, 2018) โดยความแออัดของท่าเรืออาจส่งผลกระทบต่อความยั่งยืนของท่าเรือผ่านผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานของรถบรรทุกที่รับช่วงต่อการขนส่งจากท่าเรือก็ได้รับผลกระทบจากความแออัดของท่าเรือเช่นกัน เนื่องจากความล่าช้าทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่จอดรอเข้ารับบริการที่ท่าเรือพร้อมกัน เกิดแถวคอยจำนวนมากสำหรับรถบรรทุกที่มาถึงเพื่อใช้บริการจัดส่ง และรับตู้คอนเทนเนอร์ที่ท่าเรือ (Essi et al., 2021) ดังนั้นจึงกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความยั่งยืนของท่าเรือและประสิทธิภาพการทำงานของรถบรรทุกมีความเกี่ยวข้องกันอย่างใกล้ชิดแยกจากกันไม่ได้และปัญหาที่อาจส่งผลกระทบต่อความยั่งยืนของท่าเรือคือปัจจัยด้านความแออัดภายในท่าเรือ ในทศวรรษที่ผ่านมามีความพยายามที่จะทำการศึกษาศึกษาเพื่อจำแนกความแออัดของท่าเรือที่เกิดขึ้น (Nze & Onyemechi, 2018) ศึกษาแนวคิดเรื่องความผันแปรที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานของเรือและคลังสินค้าเปรียบเทียบกับความสามารถของท่าเรือสำหรับการระบุปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแออัดในบริบทของท่าเรือในทวีปแอฟริกา ผลการศึกษาพบว่ามีความแออัดที่เกิดขึ้นภายในของท่าเรือ 6 ประเภท ได้แก่ ความแออัดของท่าเทียบเรือ (Ship berth congestion) ความแออัดของงานเรือ (Ship work congestion) ความแออัดของประตูยานพาหนะ (Vehicle gate congestion) ความแออัดของงานยานพาหนะ (Vehicle work congestion) ความแออัดของกองสินค้า (Cargo stack congestion) และความแออัดของเส้นทางเรือเข้าหรือออก (Ship entry or exit route congestion) หรือการจำแนกปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแออัดที่ท่าเรือออกเป็น 8 ประเภท ได้แก่ เส้นทางเข้าถึงทางทะเล (Maritime access routes) การติดขัด (Locks) ท่าเทียบเรือ (Berths) การขนถ่าย (Loading and unloading) พื้นที่จัดเก็บ (Storage) การตรวจสอบทางศุลกากร (Customs inspection) การขนถ่ายไปยังพื้นที่ห่างไกลจากตัวเมือง (Hinterland loading and unloading) และการเชื่อมต่อห่างไกลจากตัวเมือง (Hinterland connections) อย่างไรก็ตามแม้ว่าหลายปัจจัยอาจทำให้เกิดความแออัดที่ท่าเรือ แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าการมาถึงของรถบรรทุกบนท้องถนนปริมาณมากในช่วงเวลาพร้อมกันเป็นสาเหตุหลักของความแออัดที่เกิดขึ้นของท่าเรือ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่น ๆ อีกหลายประการที่ทำให้รถบรรทุกแออัด เช่น ปริมาณตู้คอนเทนเนอร์ที่เพิ่มขึ้นการวางแผนที่ไม่เหมาะสมการขาดแคลนโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นในการสนับสนุนการทำงานของท่าเรือ (Owusu, Donkoh & Muntaka, 2017) นอกเหนือจากแนวทางการดำเนินการเพื่อการแก้ไขปัญหาความแออัดของท่าเรือตามบริบทของแต่ละประเทศ ยังมีนักวิจัยจำนวนมากพยายามศึกษาและนำเสนอวิธีแก้ปัญหาเพื่อบรรเทา

ความแออัดของท่าเรือโดยการพิจารณาแก้ไขปัญหามาจากประเภทของความแออัดที่เกิดขึ้น เช่น ประเภทความแออัดของประตูยานพาหนะ (Vehicle gate congestion) ความแออัดของประตูท่าเรือและลานพักตู้คอนเทนเนอร์เป็นลักษณะทั่วไปของความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์ เป็นสิ่งกีดขวางไม่ให้รถบรรทุกเดินทางอย่างอิสระ ในการเข้ารับบริการส่งและรับตู้คอนเทนเนอร์ จากท่าเรือและกลายเป็นปัญหาคอขวดที่จำกัดประสิทธิภาพการทำงานของท่าเรือ (Xu et al., 2021) โดยสามารถกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของการขนส่งทางทะเลขึ้นอยู่กับการทำงานที่ราบรื่นของรูปแบบการขนส่งทางบกที่เข้ามารับ ช่วงต่อการขนส่งการมาถึงของรถบรรทุกที่ตรงต่อเวลาสามารถช่วยลดการเคลื่อนไหวที่ไม่มีประสิทธิภาพของการดำเนินงานภายในท่าเรือได้ (Van, Borgman, & Dekker, 2013) นอกจากนี้สภาพปัญหาการจราจรในพื้นที่โดยรอบของท่าเรือยังเพิ่มความไม่แน่นอนของเวลามาถึงของรถบรรทุกและความแออัดในประตูท่าเรือ จัดการการมาถึงของรถบรรทุกอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งวันโดยเฉพาะความแออัดสูงสุดในตอนเช้าและตอนเย็นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของท่าเรืออย่างยั่งยืน (Xu et al., 2021) ถึงแม้ผู้ที่เกี่ยวข้องของท่าเรือพยายามจะแก้ไขปัญหาโดยการนำระบบจองเวลาล่วงหน้ามาใช้ก็ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้จากข้อจำกัด การเข้าถึงเทคโนโลยีและทรัพยากรของท่าเรือส่งผลให้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างเกิดประสิทธิภาพได้สูงสุด Zhao et al. (2015) จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาแนวทางการลดปัญหา ความไม่แน่นอนของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้ามาได้ (Xu, X. Liu, Y. Yang, J. Li, & O. Postolache, 2021) บริหารจัดการจำนวนช่องจราจรและการลดระยะเวลาการดำเนินการของเจ้าหน้าที่ในประตูทางเข้าท่าเรือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความสนใจจากหน่วยงานของท่าเรือแต่ละที่ เนื่องจากเป็นวิธีการที่หลีกเลี่ยงการลงทุนด้านงบประมาณเพื่อปรับโครงสร้างการให้บริการที่อาจต้องอาศัยระยะเวลาและความเห็นชอบจากการกำหนดนโยบายของภาครัฐ อีกทั้งวิธีการดังกล่าวยังสามารถกำหนดวิธีการดำเนินการได้อย่างรวดเร็วและยืดหยุ่นตามบริบทของท่าเรือแต่ละประเทศ (Chamchang & Niyomdecha, 2021) โดยมีงานวิจัยของ Huynh & Chu. (2017) ได้นำเสนอแนวทางการลดปัญหาความแออัดที่ประตูทางเข้าท่าเรือโดยการพัฒนาแบบจำลองเพื่อกำหนดจำนวนช่องจราจรที่เหมาะสม จากงานวิจัยที่มีการศึกษาที่ผ่านมาให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์ปัจจัยจากสภาพแวดล้อมโดยรอบหรือนโยบายของที่มีการบังคับใช้จากท่าเรือที่มีบริบทแตกต่างกันตามพื้นที่เพื่อนำปัจจัยที่ความแออัดมากำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาสำหรับการศึกษาปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณท่าเรือของประเทศไทย

ปัจจุบันได้มีการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหามาในหลากหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่เสนอวิธีการแก้ไขปัญหามาด้วย 2 วิธีการ ได้แก่ 1) การลงทุนก่อสร้างเส้นทางและการเพิ่มอุปกรณ์ดำเนินงาน มีการวิเคราะห์ต้นทุนและนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหามาโดย

การลงทุนอุปกรณ์ขนย้ายภายในท่าเทียบเรือเพิ่ม Chamchang & Niyomdech (2021) นำเสนอแนวทาง การเพิ่มจำนวนช่องเดินรถตามปริมาณของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ในแต่ละ ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และ 2) การศึกษาแนวทางการกำหนดค่าปรับรถบรรทุกที่เข้ามาใน ช่วงเวลาเร่งด่วนเพื่อลดปริมาณยานพาหนะ หรือการนำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว การ กำหนดค่าผ่านทางที่ตามระดับความแออัดที่เกิดขึ้นภายในท่าเรือแหลมฉบังเพื่อกระจายความ ต้องการขนส่งสินค้าไปในช่วงเวลาต่าง ๆ สำหรับประเทศไทยท่าเรือแหลมฉบังเป็นท่าเรือหลักที่ สำคัญสำหรับกระบวนการนำเข้าและส่งออกสินค้าของประเทศไทย เป็นท่าเรือน้ำลึกขนาดใหญ่ ที่สุดของประเทศไทยมีขีดความสามารถรองรับเรือขนส่งสินค้าระหว่างประเทศได้หลากหลายและ มีพื้นที่บริหารจัดการขนาดใหญ่ภายในท่าเรือ สามารถเชื่อมโยงรูปแบบการขนส่งสินค้าจากท่าเรือ ไปยังรูปแบบการขนส่งอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการท่าเรือแห่งประเทศไทยทำหน้าที่เป็น องค์กรบริการท่าเรือโดยรวม ส่วนงานด้านปฏิบัติการเป็นการให้เอกชนเช่าประกอบการท่า โดย ท่าเรือแหลมฉบังมีแนวโน้มปริมาณสินค้าขาเข้าและปริมาณสินค้าขาออกสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 1 จำนวนสินค้าที่ท่าเรือแหลมฉบัง (หน่วย: ล้านตัน)

ท่าเรือ	ปีงบประมาณ	2560	2561	2562	2563	2564
ท่าเรือแหลม ฉบัง	สินค้าขาเข้า	32.575	34.738	36.693	34.43	38.919
	สินค้าขาออก	50.286	51.082	52.51	46.87	50.566
	รวม	82.861	85.82	89.203	81.3	89.485

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนสินค้าที่ท่าเรือแหลมฉบังพบว่าปริมาณสินค้าขาเข้าและสินค้า ขาออกในปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2563 เนื่องจา กการฟื้นตัวของกลุ่มประเทศเศรษฐกิจหลักสำหรับการส่งออกสินค้าของประเทศไทย ได้แก่ สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป สหราชอาณาจักร และกลุ่มเศรษฐกิจอุตสาหกรรมใหม่ (NIEs) ที่มีการผ่อนคลายมาตรการควบคุมการนำเข้าสินค้าเนื่องจากปัญหาการระบาดของไวรัส COVID- 19 ส่งผลให้กิจกรรมทางเศรษฐกิจโดยเฉพาะการส่งออกสินค้าของประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้นอย่าง รวดเร็ว

ตารางที่ 2 จำนวนตู้คอนเทนเนอร์สินค้าที่ทำเรือแหลมฉบัง (หน่วย: ที.อี.ยู.)

ท่าเรือ	ปีงบประมาณ	2560	2561	2562	2563	2564
ตู้สินค้า ขาเข้า	ตู้บรรจุสินค้า	2,628,392.25	2,353,495	2,473,271	2,312,909	2,168,898
	ตู้สินค้าเปล่า	1,517,894.5	1,372,450	1,482,546	1,600,699	1,541,675
	ตู้สินค้าถ่ายลำ	42,411.75	61,440	41,764	42,080	42,920
ตู้สินค้า ขาออก	ตู้บรรจุสินค้า	4,032,288.5	3,658,707	3,941,174	3,960,491	3,822,600
	ตู้สินค้าเปล่า	70,564.75	90,537	84,685	58,450	58,714
	ตู้สินค้าถ่ายลำ	43,832	61,272	40,544	41,252	42,472
	ตู้ Shifting	83,327.5	44,047	43,632	0	0
รวมตู้สินค้าผ่านท่า		8,418,711	7,641,947	8,107,615	8,015,880	7,677,279

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนตู้คอนเทนเนอร์สินค้าที่ทำเรือแหลมฉบังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560-2563 โดยหากพิจารณาผลการดำเนินการงานการให้บริการเรือ สินค้า และตู้สินค้าผ่านท่าเรือแหลมฉบังในรอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2564 ของท่าเรือแหลมฉบัง พบว่ามีเรือเทียบท่า 9,670 เทียบ สินค้าผ่านท่า 90.445 ล้านตัน เพิ่มขึ้น 9.0% มีตู้สินค้า ผ่านท่า 8.419 ล้านที่อียู เพิ่มขึ้น 10.2% (รายงานประจำปีการทำเรือแห่งประเทศไทย, 2564)

หากพิจารณาจะสถานที่ตั้งของท่าเรือแหลมฉบังจะพบว่าท่าเรือแหลมฉบังเป็นส่วนหนึ่งของนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังที่มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ทั้งภาคการผลิตและภาคการบริการ คลังสินค้าและศูนย์กระจายสินค้า โดยเฉพาะอุตสาหกรรมประเภทยานยนต์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการผลิตเพื่อการส่งออกล้อมรอบพื้นที่ของท่าเรือ ส่งผลให้มีปริมาณสินค้าที่มีการผลิตเพื่อการส่งออกจำนวนมากและต่อเนื่อง นอกเหนือจากสินค้าสินค้าส่วนใหญ่จากโรงงานภายในนิคมอุตสาหกรรมจะถูกส่งออกผ่านท่าเรือแหลมฉบัง ยังมียานพาหนะขนส่งสินค้าจำนวนมากจากทั่วทั้งประเทศเข้ามามายังท่าเรือแหลมฉบังเพื่อใช้บริการด้านการนำเข้าสินค้าและส่งออกสินค้าจนทำให้ท่าเรือแหลมฉบังกลายมาเป็นส่วนหนึ่งของระบบการคมนาคมที่สำคัญที่สุดของประเทศไทยในภาคตะวันออก

อีกทั้งท่าเรือแหลมฉบังยังได้รับการวางแผนให้เป็นศูนย์กลางของโครงการระเบียงเขตเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) แสดงดังภาพที่ 1 โครงการระเบียงเขตเศรษฐกิจภาคตะวันออกเป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษซึ่งจัดตั้งขึ้นโดยมติคณะรัฐมนตรีใน พ.ศ. 2558 ตั้งอยู่บริเวณในชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของอ่าวไทยซึ่งถือเป็นพื้นที่ทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา จังหวัดชลบุรี และจังหวัดระยอง กิจกรรมทางเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นภายในระเบียงเศรษฐกิจนี้คาดการณ์ว่าจะมีมูลค่าร้อยละ 14 ของทั้ง

ประเทศไทย โดยท่าเรือแหลมฉบังถือเป็นท่าเรือหลักในการขนส่งสินค้าและสนับสนุนกระบวนการทางด้านโลจิสติกส์ของเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมในภาคตะวันออกของประเทศไทย ท่าเรือสามารถเชื่อมโยงรูปแบบการขนส่งต่อเนื่องต่างรูปแบบเพื่อเพิ่มขีดความสามารถการเชื่อมโยงกับการตลาดทั้งภายในประเทศและระหว่างประเทศ โดยมีโครงการสนับสนุนการดำเนินงานจากนโยบายภาครัฐ อาทิ การขยายถนนทางหลวง การพัฒนาท่าเรือน้ำลึกแหลมฉบังและการขยายสนามบินทั้ง 3 แห่งใกล้กรุงเทพฯ ได้แก่ สุวรรณภูมิ ดอนเมือง และอู่ตะเภาความร่วมมือระหว่างภาครัฐ ภาคมหาชนและภาคเอกชน และสถาบันทางการศึกษาจะทำให้เกิดกลไกที่ดี ครอบคลุมด้านต่าง ๆ เช่น การลงทุนในโครงสร้างพื้นฐาน บุคลากร การศึกษาและการสนับสนุนจากภาครัฐ



ภาพที่ 1 พื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

สอดคล้องกับสำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม ได้สรุปประเด็นปัญหาที่พบเพื่อการจัดทำแผนยุทธศาสตร์กระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2560-2564 พบว่าปัจจุบันการขนส่งทางถนนยังถือเป็นรูปแบบการขนส่งหลักของประเทศไทย รวมถึงมีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการสนับสนุนการให้บริการของระบบขนส่งรูปแบบอื่น ๆ โดยปัจจุบันโครงข่ายการขนส่งทางถนนของไทยสามารถเชื่อมโยงการเคลื่อนย้ายสินค้ากับประเทศเพื่อนบ้านได้โดยสะดวก การเข้าเป็นประชาคมอาเซียนการบรรลุข้อตกลงการค้าการลงทุนภายในภูมิภาคอาเซียนและนโยบายพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษชายแดนของรัฐบาลไทย ส่งผลให้การขนส่งทาง

ถนนระหว่างประเทศที่มีความสำคัญอยู่ยังมีบทบาทที่สำคัญมากขึ้นและการเป็นรูปแบบการขนส่งสินค้าหลักทั้งภายในประเทศและระหว่างประเทศ

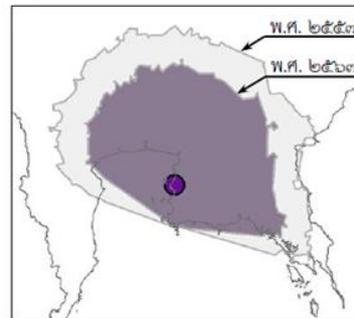
จากที่กล่าวมาข้างต้น ความเจริญของท่าเรือแหลมฉบังและนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังส่งผลให้เกิดการขยายตัวของชุมชนโดยรอบ แรงงานทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคบริการเคลื่อนย้ายเข้าสู่พื้นที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดปัญหาการขยายตัวของชุมชนที่ไร้ทิศทางขาดการควบคุมอย่างเหมาะสม ส่งผลให้ลักษณะและพฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้ทางเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จุดประสงค์ในการคมนาคมและการใช้ถนนแตกต่างจากที่เคยออกแบบไว้ ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ที่ตามมา อาทิ การจราจรที่คับคั่งจากทั้งยานพาหนะขนส่งสินค้าและยานพาหนะของชุมชนในพื้นที่ ปัญหาอุบัติเหตุการจราจรติดขัด การแบ่งแยกชุมชนการจราจรผสมระหว่างยานพาหนะขนาดเล็กและใหญ่ ยานพาหนะขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำและความเร็วสูง การจอดและหยุดรถในพื้นที่ถนน สภาพปัญหามลพิษและปัญหาสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมตามความเจริญทางเศรษฐกิจ โดยแต่ละพื้นที่จำเป็นต้องมีการประเมินปัญหาและคาดการณ์ทิศทางการพัฒนาที่มองความต้องการของผู้ใช้บริการแต่ละกลุ่มหรือแต่ละพื้นที่เป็นสำคัญให้มากขึ้นในอนาคต เพื่อเชื่อมต่อไปยังสิ่งอำนวยความสะดวกทางด้านโลจิสติกส์ที่สำคัญของพื้นที่ เช่น ท่าอากาศยานและท่าเรือ ในขณะที่อุตสาหกรรมโลจิสติกส์ทางทะเลขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ท่าเรือหลายแห่งและชุมชนโดยรอบประสบปัญหาการจราจรติดขัดที่ประตูท่าเรือ เวลารอคอยที่ประตูของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ไม่เพียงส่งผลเสียต่อคุณภาพชีวิตและประสิทธิภาพการทำงานของคนขับรถบรรทุกเท่านั้น แต่ยังทำให้ห่วงโซ่อุปทานล่าช้าและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างมากและก่อให้เกิดปัญหาด้านสังคมกับชุมชนโดยรอบ ปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้รวมกันทำให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดที่ประตูเมืองอย่างรุนแรง ส่งผลให้อุตสาหกรรมท่าเรือต้องเผชิญกับความท้าทายในการบริหารจัดการการขนส่งสินค้าจำนวนมากอย่างมีประสิทธิภาพ (Chamchang & Niyomdecha, 2021)

สำหรับประเทศไทยปัญหาแถวคอยรถบรรทุกเกิดขึ้นบ่อยครั้งในท่าเรือทั้งของภาครัฐและเอกชนหลายแห่งในประเทศไทย โดยเฉพาะท่าเรือสำคัญในภูมิภาคต่าง ๆ เนื่องจากท่าเรือเป็นหนึ่งในศูนย์กลางทางด้านโลจิสติกส์ที่สำคัญภายในพื้นที่ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายแรงงานจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่เกิดการขยายตัวของชุมชนส่งผลให้ไม่สามารถขยายพื้นที่ การปฏิบัติงานของท่าเรือได้จนทำให้มีพื้นที่ปฏิบัติงานอย่างจำกัด ในขณะที่ความต้องการบริการด้านโลจิสติกส์เพื่อการนำเข้าและส่งออกสินค้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสามารถเกิดได้จากทรัพยากรสำหรับการปฏิบัติงานไม่เพียงพอทำให้เกิดความแออัดในกระบวนการขนส่งอุปทานภายในท่าเรือมีพื้นที่ทำงานจำกัดและที่จอดรถเพื่อรอการรับบริการไม่เพียงพอ ความแออัดที่เกิดขึ้นจากประตูท่าเรือเป็นปัญหาสำคัญที่ท่าเรือหลายแห่งกำลังเผชิญอยู่ โดยในประเทศไทยท่าเรือกรุงเทพ ท่าเรือแหลมฉบัง และท่าเรือสงขลาที่เป็นท่าเรือหลักในภาคกลาง ตะวันออกและภาคใต้

ของประเทศไทยล้วนแล้วประสบปัญหาเดียวกัน ประกอบกับจำนวนรถพ่วงและรถกึ่งพ่วงสำหรับการบรรทุก ตู้คอนเทนเนอร์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นที่เพิ่มขึ้นในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ส่งผลให้ท่าเรือไม่สามารถบริหารจัดการแถวคอยของรถบรรทุกที่ประตูทางเข้าท่าเรือในช่วงเวลาเร่งด่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้เกิดแถวคอยของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูทางเข้าและภายในท่าเรือจำนวนมาก เกิดเป็นปัญหาด้านประสิทธิภาพการทำงานของท่าเรือ และปัญหาด้านมลพิษทางอากาศและทางเสียงกับชุมชนโดยรอบสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมให้กับชุมชนใกล้เคียง (Wootichaiwat, 2015) การขาดการติดต่อสื่อสารกับท่าเรือ การมาถึงล่าช้าของเรือ ความแออัดของรถบรรทุกและการส่งมอบที่กระจัดกระจายเป็นปัญหาที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ประสิทธิภาพของของรถบรรทุกที่ท่าเรือลดลง

กรมทางหลวงได้มีการศึกษาการเปรียบเทียบเส้นทางการเข้าถึงท่าเรือแหลมฉบัง ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 ถึงปี พ.ศ. 2567 พบว่าขอบเขตพื้นที่การเข้าถึงท่าเรือแหลมฉบังที่เป็นสิ่งอำนวยความสะดวกทางด้านโลจิสติกส์ที่สำคัญของประเทศมีแนวโน้มจะลดลงจากในปี พ.ศ. 2557 อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากปัญหาการจราจรที่ติดขัดจากการดำเนินงานของท่าเรือและการขยายตัวของชุมชนโดยรอบอย่างกระจัดกระจายส่งผลต่อความหนาแน่นของเส้นทางการขนส่งสินค้า ดังนั้นการพัฒนาระดับการเข้าถึงท่าเรือแหลมฉบังจึงเป็นสิ่งจำเป็นไม่ว่าจะด้วยการก่อสร้าง ขยายช่องจราจร การก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หรือการพัฒนาระบบขนส่งทางถนนที่ยังไม่ครอบคลุมผู้ประกอบการอย่างเหมาะสมแสดงดังภาพที่ 2 ได้แสดงของพื้นที่ที่เข้าถึงท่าเรือแหลมฉบังได้ทางถนนที่ลดลงภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าขอบเขตของพื้นที่ที่เข้าถึงท่าเรือแหลมฉบังได้ภายใน เวลา 4 ชั่วโมง จะลดลงจากในปี พ.ศ. 2557 อย่างมาก สอดคล้องกับการศึกษาของการท่าเรือแห่งประเทศไทยได้กล่าวถึงโครงการปรับปรุงระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานของท่าเรือแหลมฉบัง โดยการขนส่งสินค้าระหว่างท่าเรือกับผู้ประกอบการ โรงงานผู้ผลิตหรือศูนย์กระจายสินค้านั้น ยังคงเป็นในรูปแบบการขนส่งด้วยรถบรรทุกทางถนนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งท่าเรือแหลมฉบังจำเป็นต้องมีโครงสร้างสาธารณูปโภคด้านถนนและลานจอดรถบรรทุกที่มีความพร้อมในการใช้งานอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะเส้นทางและช่องทางสำหรับรองรับการเข้าสู่ท่าเรือของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่มีปริมาณมากขึ้นจนเกิดความแออัดที่ประตูทางเข้าท่าเรือและสภาผู้ส่งสินค้าทางเรือแห่งประเทศไทยได้ศึกษาการขยายตัวของการส่งออกในช่วงแรกของปี พ.ศ. 2561 เปรียบเทียบกับความพร้อมในการรองรับสินค้าของท่าเรือแหลมฉบัง ซึ่งในปัจจุบันมีสภาพการจราจรแออัด โดยเฉพาะในบริเวณทางเข้าท่าเทียบเรือ (Sub gate) และในบริเวณศุลกากรท่าเรือแหลมฉบังซึ่งจะมีรถบรรทุกจอดรอเป็นระยะทางยาวมากโดยมีสาเหตุมาจาก 1) สัดส่วนการขนส่งสินค้าไปยังท่าเรือแหลมฉบัง พึ่งพาการขนส่งทางถนนเป็นหลัก ทำให้ปริมาณรถบรรทุกที่วิ่งเข้าสู่ท่าเรือมีจำนวนมาก โดยมีพฤติกรรม

เข้าสู่ท่าเรือในเวลาเดียวกัน 2) ความไม่พร้อมในการให้บริการขนส่งสินค้าทางรางเชื่อมไปยังท่าเรือ และ 3) ผู้ประกอบการส่งออกบางส่วนส่งข้อมูลเข้าระบบ National Single Window (NSW) ของไม่ถูกต้องทำให้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกบริเวณที่ประตูทางเข้าหลักของท่าเรือแหลมฉบัง (Main gate) เกิดความล่าช้า โดยสาเหตุทั้ง 3 ประการที่กล่าวมา ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการขนส่งสินค้าเข้าไปยังท่าเรือเป็นเหตุให้สินค้ามีโอกาสตกเรือสูงขึ้น



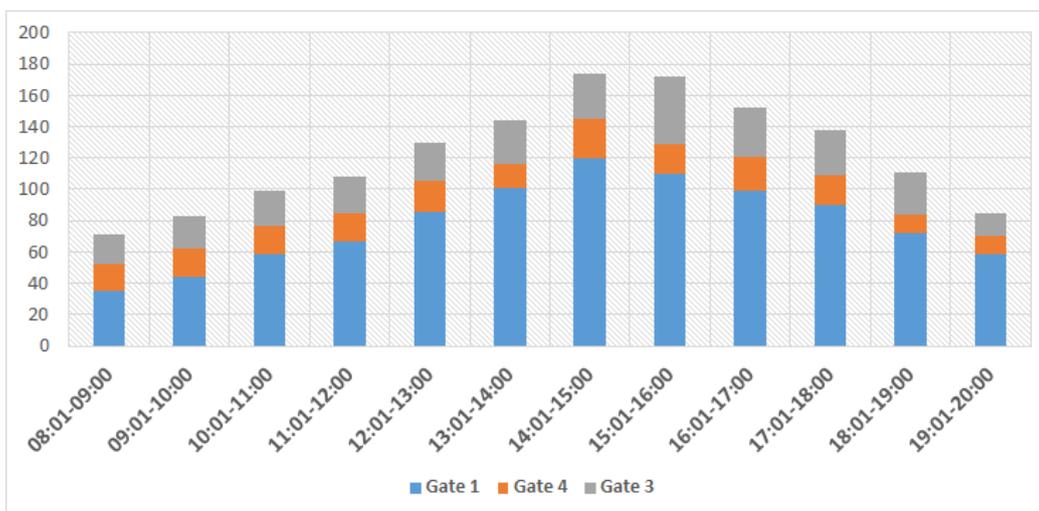
ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบเส้นทางการเข้าถึงท่าเรือแหลมฉบังในระยะเวลา 4 ชั่วโมง

สินค้าส่วนใหญ่ที่เข้าและออกผ่านท่าเรือแหลมฉบังจะอยู่ในรูปแบบการเคลื่อนย้ายผ่านระบบตู้คอนเทนเนอร์ ดังนั้นจึงส่งผลให้ยานพาหนะที่เข้าและออกท่าเรือแหลมฉบังมีความหลากหลายทั้งยานพาหนะส่วนบุคคลขนาดเล็กและยานพาหนะขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์ เช่น รถตู้บรรทุกคอนเทนเนอร์ที่มีจุดประสงค์เพื่อการเข้ารับตู้คอนเทนเนอร์และการส่งตู้คอนเทนเนอร์ตามตารางเวลาของสายเรือในแต่ละวันมีปริมาณยานพาหนะเข้าออกท่าเรือแหลมฉบังมากกว่า 10,000 เที่ยว แสดงดังภาพ 3



ภาพที่ 3 สถิติรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ผ่านท่าเรือแหลมฉบัง พ.ศ. 2563-2565 (คัน)

ภาพที่ 3 แสดงข้อมูลสถิติรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ผ่านท่าเรือแหลมฉบัง พ.ศ. 2563-2565 ตามภาพที่ 3 จะพบว่าปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ผ่านเข้าประตูท่าเรือมีจำนวนสูงที่สุดในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 จำนวน 378,953 คัน และปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ผ่านเข้าประตูท่าเรือมีจำนวนต่ำที่สุดในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 261,412 คัน ปริมาณเฉลี่ยรถบรรทุกที่ผ่านเข้าท่าเรือแหลมฉบังเท่ากับ 304,011 คันต่อเดือน สำหรับรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่มีการนัดหมายที่ผ่านเข้าประตูท่าเรือมีจำนวนสูงที่สุดในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 จำนวน 76,372 คัน และรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่มีการนัดหมายที่ผ่านเข้าประตูท่าเรือมีจำนวนต่ำที่สุดในช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 13,271 คัน ปริมาณเฉลี่ยของรถบรรทุกที่มีการนัดหมายผ่านเข้าท่าเรือแหลมฉบังเท่ากับ 40,032 คันต่อเดือน และปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้าท่าเทียบเรือได้ตรงเวลามีจำนวนสูงที่สุดในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 61,097 คัน และปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้าท่าเทียบเรือได้ตรงเวลามีจำนวนต่ำที่สุดในช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 9,688 คัน ปริมาณเฉลี่ยรถบรรทุกที่ผ่านเข้าท่าเรือแหลมฉบังเท่ากับ 30,098 คันต่อเดือน โดยพบว่าปี พ.ศ. 2563 ปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ผ่านท่าเรือแหลมฉบังมีปริมาณปรับตัวลดลงเนื่องจากผลกระทบจาก โครonavirus COVID-19 ส่งผลให้ประเทศสำคัญการส่งออกของประเทศไทยชะลอการนำเข้าสินค้าหลายรายการและมีมาตรการชะลอการนำเข้าเพื่อป้องกันการแพร่ระบาดที่อาจเกิดขึ้นจาก อย่างไรก็ตามในไตรมาส 4 ปี พ.ศ. 2563 จนถึงปัจจุบันแนวโน้มปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์มีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการผ่อนคลายมาตรการจำกัดการนำเข้าของประเทศส่งออกสำคัญ



ภาพที่ 4 สถิติรถบรรทุกคอนเทนเนอร์ที่เข้าประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 (คัน)

ภาพที่ 4 แสดงสถิติจำนวนรถบรรทุกคอนเทนเนอร์ที่เข้าประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 แบ่งตามช่วงเวลาที่เกิดขึ้นโดยกองอำนวยการทั่วไปท่าเรือแหลมฉบังและฝ่ายแผนกรักษาความปลอดภัยและหมวดจัดเก็บค่าธรรมเนียมยานพาหนะท่าเรือแหลมฉบังพบว่า การเข้ามาของยานพาหนะบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 พบว่า ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมงที่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลประตูตรวจสอบหมายเลข 1 จะมีปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้ามาสูงที่สุดที่ 942 คัน หรือร้อยละ 64.21 รองลงมาได้แก่ ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 มีปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้ามา 312 คัน หรือ ร้อยละ 21.27 และประตูตรวจสอบหมายเลข 4 มีปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้ามา 213 คัน หรือร้อยละ 14.52

การเข้ามาของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ 1) ช่วงนอกเวลาเร่งด่วนเช้าครอบคลุมตั้งแต่ 08.00-13.00 น. เป็นช่วงที่ปริมาณการจราจรไม่หนาแน่น ยานพาหนะที่เข้ามาจะมีช่วงเวลาความห่างระหว่างยานพาหนะค่อนข้างมาก 2) ช่วงเวลาเร่งด่วนครอบคลุม 13.00-17.00 น. เป็นช่วงเวลาที่มียานพาหนะตู้คอนเทนเนอร์เข้ามาเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลาเร่งด่วนเป็นช่วงที่ประตูตรวจสอบทั้ง 3 ประตูมีโอกาสเกิดความแออัดบริเวณทางเข้าไปอยู่บ่อยครั้ง บางครั้งการจราจรติดขัดในท่าเรือสามารถขยายกว้างออกไปจนถึงพื้นที่โดยรอบ และ 3) ช่วงนอกเวลาเร่งด่วนเย็นครอบคลุมตั้งแต่ 17.00-20.00 น. เป็นช่วงที่ความหนาแน่นของการจราจรบริเวณประตูตรวจสอบเริ่มลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณยานพาหนะในทิศทางมุ่งหน้าออกจากท่าเรือจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแทน



ภาพที่ 5 การจราจรติดขัดในพื้นที่โดยรอบและประตูตรวจสอบท่าเรือแหลมฉบัง

จากข้อมูลข้างต้นท่าเรือแหลมฉบังซึ่งเป็นท่าเรือหลักในการขนส่งสินค้าทางทะเลระหว่างประเทศของประเทศไทย โดยหากพิจารณาจากสถิติปริมาณตู้คอนเทนเนอร์ที่ผ่านเข้าและออกท่าเรือพบว่าท่าเรือแหลมฉบังมีความเหมาะสมและสามารถเป็นตัวแทนสำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดได้ เนื่องจากเป็นท่าเรือหลักของประเทศไทยและรูปแบบการดำเนินงานปัจจุบันอยู่ในช่วงของการเริ่มต้นนำเทคโนโลยีเข้ามาเริ่มใช้ร่วมกับการแก้ไขปัญหาในเชิงกายภาพ ดังนั้นหากไม่มีการใช้มาตรการกำกับดูแลที่เหมาะสม ความแออัดอาจแพร่กระจายไปยังพื้นที่อื่น ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับท่าเรือหรือท่าเรือที่มีการเชื่อมโยงการดำเนินงานร่วมกันเมื่อเวลาผ่านไปจนเปิดปัญหาการจราจรติดขัดอย่างรุนแรงภายในท่าเรือแหลมฉบัง โดยผลกระทบดังกล่าวแล้วเกิดขึ้นคล้ายกันกับท่าเรืออื่น ๆ ที่สำคัญของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก อาทิเช่น ท่าเรือซานอันโตนิโอของประเทศชิลี เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดเพื่อนำมาใช้กำหนดนโยบายการแก้ปัญหาการจราจรติดขัดที่เกิดขึ้นในท่าเรือ จากการทบทวนงานวิจัยพบว่ายังมีช่องว่างของการวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของประตูตรวจสอบท่าเรือ อีกทั้งจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ยังไม่มี การนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของปัจจัยร่วมกันระหว่างวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติและแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ดังนั้นผู้เขียนจึงมีการตั้งสมมติฐานว่า 1.) ปัจจัยด้านความแออัดแต่ละปัจจัยส่งผลกระทบต่อประตูทางเข้าท่าเรือแตกต่างกัน และ 2.) การบริหารจัดการประตูทางเข้าท่าเรือที่เหมาะสมจากปัจจัยความแออัดสามารถลดความแออัดภายในท่าเรือได้ โดยสมมติฐานทั้งหมดข้างต้นเป็นกลยุทธ์ที่สามารถช่วยให้ท่าเรือสามารถบริหารจัดการรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ทั้งที่มีการจองเวลาล่วงหน้าและไม่มีการจองเวลาล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์ด้านระยะเวลารอเฉลี่ยและจำนวนแถวคอยของรถบรรทุกในแต่ละสถานการณ์จะถูกเปรียบเทียบกับรูปแบบ

การเข้าแถวคอยแบบดั้งเดิม เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการดังนั้นผลลัพธ์จะถูกลดด้วยแบบจำลองสภาพการจราจรแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้กำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสม จึงเป็นที่มาและความสำคัญของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 เป็นการให้ข้อมูลเบื้องต้นและแนวคิดสนับสนุนหลักในการแก้ไขปัญหาความแออัดที่ท่าเรือในบริบทของการจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค

ส่วนที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยด้านความแออัดของท่าเรือและแนวทางการแก้ไขปัญหาจากการศึกษาในอดีต

ส่วนที่ 3 นำเสนอรายละเอียดสมมติฐาน ชุดข้อมูลการทดลองและการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ที่เป็นไปได้ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ส่วนที่ 4 นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์การโต้ตอบของปัจจัยความแออัดแบบเดี่ยวและแบบกลุ่ม เพื่อนำผลลัพธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดมากำหนดนโยบายการบริหารประตูท่าเรือ เปรียบเทียบวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพรูปแบบการเข้าแถวคอยแบบดั้งเดิมและวิธีการจัดสรรประตูทางเข้าจากปัจจัยด้านความแออัดแบบใหม่ของผู้ตรวจสอบทั้ง 3 แห่ง

ส่วนที่ 5 ข้อสรุปและแนวทางการวิจัยในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรสำหรับการวิเคราะห์ความแออัดของท่าเรือแหลมฉบัง
2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดที่เกิดขึ้นภายในท่าเรือแหลมฉบัง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรสำหรับการวิเคราะห์ความแออัดของท่าเรือแหลมฉบังได้
2. ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดที่เกิดขึ้นภายในท่าเรือแหลมฉบัง

ประโยชน์ในเชิงวิชาการ

ผลการวิจัยให้ความรู้ที่เกิดจากการบูรณาการองค์ความรู้ทางด้านการบริหารธุรกิจ, การจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน ดังนี้

1. ทราบความพฤติกรรมและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังตามช่วงเวลา
2. สามารถสร้างและนำแบบจำลองสถานการณ์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของท่าเรือแหลมฉบัง
3. สามารถนำเสนอวิธีการดำเนินการ การเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดและการเปรียบเทียบผลลัพธ์การดำเนินงานของท่าเรือเพื่อการพัฒนาต่ออนาคตในงานวิจัยในอนาคต

ประโยชน์ในเชิงนโยบาย

หน่วยงานและผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการดำเนินงาน ดังนี้

1. เป็นแนวทางเพื่อช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจวางแผนและการกำหนดนโยบายของท่าเรือแหลมฉบังด้านการประยุกต์ใช้ระบบการบริหารแถวคอยและการจัดสรรประตูท่าเรือแหลมฉบังและพื้นที่เศรษฐกิจสำคัญในอนาคต
2. หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค มาเป็นกรอบการตัดสินใจประเมินผลประโยชน์และผลกระทบทางเศรษฐกิจในอนาคต
3. ผู้ประกอบการภายในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังสามารถนำผลลัพธ์ของแบบจำลองไปใช้เป็นกรอบการดำเนินงานเพื่อการปรับเปลี่ยนแนวทางการบริหารจัดการภายในองค์กรให้สามารถสอดคล้องกับการดำเนินงานของท่าเรือแหลมฉบังได้ในอนาคต

ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ

ผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการเผยแพร่ข้อมูลและการพัฒนาหรือกำหนดนโยบายการดำเนินงานต่อสาธารณะประโยชน์ ดังนี้

1. ผู้ประกอบการสามารถนำผลลัพธ์ของแบบจำลองสถานการณ์ไปใช้ประกอบการพิจารณาพิจารณาการลงทุนทางเศรษฐกิจได้อย่างเหมาะสมจากแนวทางการดำเนินงานและแนวโน้มของหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องตามแผนยุทธศาสตร์ของประเทศ
2. ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลลัพธ์ของงานวิจัยใช้เป็นแนวทางและข้อมูลสนับสนุนการบริหารจัดการโดยการปรับเปลี่ยนแบบจำลองสถานการณ์ตามนโยบายขององค์กร
3. ผู้ใช้บริการท่าเรือแหลมฉบังรายเดิมและรายใหม่ในอนาคตสามารถทราบแนวทางการดำเนินงานของท่าเรือแหลมฉบังและผลกระทบการดำเนินงานที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยเรื่องการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากปัญหาสภาพการจราจรครอบคลุมพื้นที่ภายในท่าเรือแหลมฉบังและบริเวณประตูตรวจสอบที่ 1, 3 และ 4 ที่เกิดจากการถบรถตู้คอนเทนเนอร์เท่านั้น
2. การวิเคราะห์แถวคอยของยานพาหนะขาเข้าของท่าเรือแหลมฉบังเลือกเก็บข้อมูลจากการถบรถตู้คอนเทนเนอร์ที่ใช้บริการท่าเทียบเรือ A0-A5 ถึง B1-B5 เท่านั้น ไม่ครอบคลุมการดำเนินงานของเรือสินค้า เครื่องมือยกขนตู้คอนเทนเนอร์และการดำเนินงานภายในท่าเทียบเรือ
3. การพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคครอบคลุมเส้นทางภายในและเส้นทางบริเวณโดยรอบที่มุ่งเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังเท่านั้น

โครงสร้างเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 บท ประกอบด้วย บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความ เป็นมาและความสำคัญของปัญหา ช่องว่างการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย โครงสร้างเนื้อหาวิทยานิพนธ์ และนิยามศัพท์เฉพาะ

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงแนวคิดทฤษฎีทางการจราจร ทฤษฎีตัวแบบแถวคอย แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค แนวคิดการลดความแออัดที่ประตูท่าเรือ และการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย กล่าวถึงพื้นที่ศึกษาวิจัย การเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

บทที่ 4 การวิเคราะห์ปัญหาสภาพการจราจรและการพัฒนาแบบสภาพการจราจรระดับจุลภาคภายในพื้นที่และเส้นทางบริเวณโดยรอบของท่าเรือแหลมฉบัง การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหามาจากปัจจัยความแออัดที่ได้รับ สำหรับบทสุดท้ายคือบทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยการอภิปรายผลการวิจัยรวมทั้งข้อเสนอแนะจากการวิจัย

นิยามศัพท์เฉพาะ

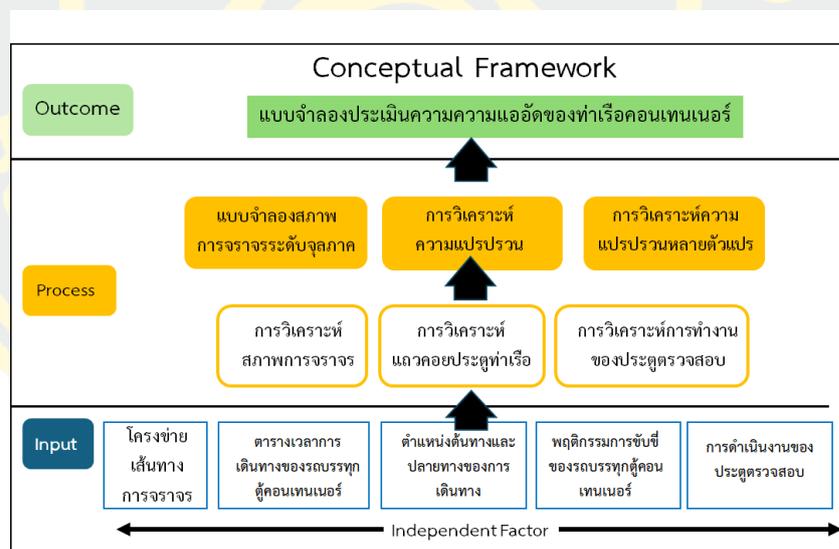
1. ท่าเรือแหลมฉบัง หมายถึง พื้นที่และหน่วยงานที่อยู่ในความรับผิดชอบของท่าเรือแหลมฉบัง
2. ประตูท่าเรือ หมายถึง ประตูสำหรับให้รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ใช้ผ่านมีพื้นด้านหนึ่งติดกับท่าเรือแหลมฉบังและอีกด้านเชื่อมนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง โดยรวมถึงประตูตรวจสอบที่ 1-4 บริเวณทางเข้าท่าเรือแหลมฉบัง
3. ประตูท่าเทียบเรือ หมายถึง ทางเข้าท่าเทียบเรือเอกชนภายในท่าเรือแหลมฉบัง
4. การขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ หมายถึง การเคลื่อนตัวของตู้คอนเทนเนอร์ระหว่างท่าเทียบเรือตู้สินค้าทางทะเลกับจุดแจกจ่ายภายในประเทศหรือท่าเทียบเรือ เกี่ยวข้องกับการส่งมอบ คอนเทนเนอร์ขาออกไปยังท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ทางทะเล หรือการหยิบคอนเทนเนอร์ขาเข้าจากท่าเทียบเรือ
5. การเคลื่อนย้ายระยะสั้นจากท่าเทียบเรือ หมายถึง การเคลื่อนตัวของตู้คอนเทนเนอร์ระหว่างท่าเทียบเรือกับจุดกระจายสินค้าทางบกหรือท่าเทียบเรือ การกำหนดการขนส่งโดยทั่วไปเกี่ยวข้องกับการส่งมอบตู้สินค้าส่งออกไปยังท่าเรือหรือหยิบภาชนะนำเข้าจากท่าเทียบเรือ

กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการวิจัยเรื่องการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคได้นำหลักการทางด้านวิศวกรรมจราจรมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลโครงข่ายเส้นทางเชื่อมโยงจากถนนบริเวณโดยรอบท่าเรือแหลมฉบัง กำหนดให้ลักษณะของโครงข่ายเส้นทางจราจร ตารางเวลาการเดินทางของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของการเดินทางและพฤติกรรมการขับขึ้นของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เป็นตัวแปรอิสระและกำหนดตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านการจราจรเป็นตัวแปรตาม โดยกำหนดกรอบแนวทางการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็น 3 ประเด็น ได้แก่ การวิเคราะห์สภาพการจราจร การวิเคราะห์แถวคอยประตูท่าเรือ การวิเคราะห์การทำงานของประตูตรวจสอบ

โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือแหลมฉบัง การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบการทดลองที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการจับคู่การโต้ตอบระหว่าง

ผลของปัจจัย การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยเทคนิค ANOVA และ MANOVA เป็นเครื่องมือการวัดทางสถิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดซึ่งมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในชุดข้อมูล มีความแตกต่างหลายประการระหว่างการทดสอบ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยเทคนิค ANOVA ส่วนใหญ่จะตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ประชากร 2 กลุ่ม ในขณะที่ MANOVA ตรวจสอบความแตกต่างระหว่างตัวอย่าง ประชากรหลายกลุ่ม MANOVA ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความแปรปรวนร่วม-ความแปรปรวนในการพิจารณาตัวแปรตามมากกว่าหนึ่งตัว ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ANOVA จะเกี่ยวข้องกับตัวแปร 2 ตัว ในขณะที่ MANOVA จะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของตัวแปรหลายตัวพร้อมกัน ANOVA จึงช่วยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 2 ตัวในเวลาเดียวกัน แต่สามารถรวมตัวแปรตามได้เพียงตัวเดียวในการวิเคราะห์ ในทางกลับกัน MANOVA สามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายตัวพร้อมกันได้ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดที่เกิดขึ้นกับท่าเรือแหลมฉบังเนื่องจากมีช่วงเวลาที่นำมาใช้ในการช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า-เย็น และช่วงเวลาเร่งด่วนต่อไป แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กรอบแนวคิดของการวิจัย

ในศึกษาการวิเคราะห์สภาพการจราจรและสิ่งแวดล้อมครอบคลุมพื้นที่ภายในท่าเรือและเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือจากนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังและทางหลวงหมายเลข 7 ในช่วงเวลา 08.00-20.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ครอบคลุมช่วงเวลาที่สภาพการจราจรปกติและสภาพการจราจรในพื้นที่และเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังมีสภาพการจราจรติดขัดมาก

ที่สุด โดยข้อมูลสภาพการจราจรที่รวบรวมมาจะสะท้อนถึงพฤติกรรมของการจราจรที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์รูปแบบแถวคอยและการจัดสรรประตูเข้าออกท่าเรือโดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแออัดที่เกิดขึ้นกับท่าเรือแหลมฉบัง เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาได้อย่างสอดคล้องระหว่างโครงข่ายเส้นทางเชื่อมโยงจากภายนอกท่าเรือและการดำเนินงานภายในท่าเรือแหลมฉบังเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบริหารจัดการได้ครอบคลุมมากที่สุด เพื่อให้สามารถอธิบายได้ว่ากรอบแนวทางการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคทั้ง 4 ประเด็น ผ่านตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านการจราจร เช่น จำนวนยานพาหนะที่สามารถออกจากพื้นที่ ระยะทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงข่ายรวม ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในโครงข่าย ระยะเวลาและความยาวแถวคอย เวลาในการดำเนินการในเขตท่าเรือ โดยใช้โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็นเครื่องมือในการอธิบายผลลัพธ์และความสัมพันธ์ของตัวแปรทางการจราจร ดังนั้นเพื่อให้เกิดการนำไปใช้ได้จริงงานวิจัยนี้จึงเลือกสำรวจข้อมูลภาคสนามและข้อมูลที่เก็บรวบรวมไว้โดยท่าเรือแหลมฉบัง เมื่อได้ข้อมูลจากการสำรวจแล้วจึงนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรเพื่อเป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจสำหรับการวางนโยบายทางด้านคมนาคมของภาครัฐต่อไป

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคได้อาศัยแนวคิดทฤษฎีทางด้านการจราจร ทฤษฎีตัวแบบแถวคอย แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค แนวคิดการลดความแออัดที่ประตูท่าเรือ แนวคิดการวิเคราะห์ปัจจัยความแออัดที่เกิดขึ้นในบริเวณท่าเรือ การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยให้ผู้วิจัยสามารถกำหนดวิธีการศึกษา และสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยมีรายละเอียดตามลำดับ ดังนี้

1. แนวคิดทฤษฎีทางด้านการจราจร
2. ทฤษฎีตัวแบบแถวคอย
3. แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค
4. การศึกษาปัจจัยความแออัด
5. การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดทฤษฎีทางด้านการจราจร

วิศวกรรมจราจรเป็นส่วนหนึ่งของวิศวกรรมขนส่ง (Transportation engineering) ซึ่งว่าด้วยการวางแผน การออกแบบ และการควบคุมระบบการจราจรบนท้องถนนให้มีประสิทธิภาพ (Efficient) และปลอดภัย (Safe) (วัฒนวงศ์ รัตนวราห, 2545) เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคด้านวิศวกรรมเพื่อทำให้การเคลื่อนย้ายคนและสิ่งของบนเส้นทางเป็นไปด้วยความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานด้านวิศวกรรมจราจรจึงเกี่ยวข้องกับการศึกษาเพื่อความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพของกระแสจราจร เช่น เรขาคณิตของถนน ทางเท้า ทางข้าม ป้ายจราจร เครื่องหมายจราจร สัญญาณไฟจราจร เป็นต้น รวมถึงการศึกษาพฤติกรรมการใช้รถและถนนของผู้เดินทาง ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของถนนและพฤติกรรมของผู้ขับขี่และปฏิสัมพันธ์ต่อกันระหว่างยานพาหนะแต่ละคันในกระแสจราจรรวมถึงการควบคุมกระแสจราจรบนถนน โดยทั่วไปแล้ว โครงการด้านวิศวกรรมจราจรจะเกี่ยวข้องกับการออกแบบควบคุมการจราจร ได้แก่ เครื่องหมายจราจรป้ายจราจรสัญญาณไฟจราจรนอกจากนี้ยังรวมถึงการศึกษาด้านความปลอดภัยทางถนนและการเกิดอุบัติเหตุ การวิเคราะห์ผลกระทบของการจราจรจากโครงการพัฒนาพื้นที่การจัดการจราจร เพื่อช่วยให้การจัดการปัญหาการจราจร ติดขัดให้มี

ประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมจราจรและศาสตร์ด้านวิศวกรรมแขนงอื่น โดยสามารถจำแนกขอบเขตงานด้านวิศวกรรมจราจรดังนี้ (ศักรธร บุษยวิญญ์, 2563)

1. การศึกษาด้านพฤติกรรมการสัญจรและการเคลื่อนตัว มุ่งเน้นศึกษาเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของผู้ใช้รถ การเคลื่อนตัวของการจราจรปริมาณจราจรความเร็วความล่าช้าและอุบัติเหตุ เป็นต้น
2. การประเมินประสิทธิภาพด้านการจราจร เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพของระบบการให้บริการด้านการจราจร เช่น ความสามารถในการให้บริการของถนน
3. การควบคุมด้านการจราจร การศึกษาในด้านนี้เกี่ยวข้องกับกฎหมายข้อบังคับต่าง ๆ รวมถึงอุปกรณ์ในการควบคุมการจราจร อาทิ ป้ายจราจรเครื่องหมายจราจรสัญญาณไฟจราจร การจัดระเบียบการเดินรถ
4. การดำเนินการด้านการจราจร เกี่ยวข้องกับการศึกษาการประเมินผลการดำเนินงานด้านการจราจร อาทิเช่น การประมวลผลของการจัดการการจราจรทางเดียว การดำเนินการของรถขนส่งมวลชนและระบบการควบคุมการจราจรแบบโครงข่าย เป็นต้น
5. การวางแผนทางด้านการจราจร เกี่ยวข้องกับงานด้านการวางแผนเพื่อทำให้การจราจรมีประสิทธิภาพ
6. การออกแบบเรขาคณิตของถนน จำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางด้านวิศวกรรมจราจร เพื่อให้การออกแบบมีความเหมาะสมและปลอดภัยทั้งในส่วนของการออกแบบ ทางร่วมทางแยก เป็นต้น

ตัวแปรการอธิบายลักษณะของกระแสจราจร

ลักษณะพื้นฐานของสภาพการจราจรเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับผู้ที่มีความต้องการศึกษาวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกระแสจราจร เนื่องจากกระแสการจราจรมีความเป็นพลวัตสูงดังนั้นการกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมที่สามารถใช้อธิบายลักษณะพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเดี่ยวหรือกลุ่มของยานพาหนะเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง โดยตัวแปรสำคัญที่สามารถอธิบายลักษณะของกระแสจราจร ได้แก่ 1) ปริมาณจราจรและอัตราการไหล (Traffic volume and traffic rate of flow) 2) ความเร็วและเวลาในการเดินทาง (Speed and travel time) 3) ความหนาแน่นและการใช้งานผิวการจราจร (Density and occupancy) และ 4) ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ (Spacing) และช่วงห่างระหว่างยานพาหนะ (Headway) (วิรัช หิรัญ, 2558)

ปริมาณจราจร (Traffic volume) หมายถึง ปริมาณของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านทิศทางตำแหน่งอ้างอิงหรือช่องทางการจราจรในช่วงระยะเวลาที่กำหนด โดยมีหน่วยเป็นจำนวนยานพาหนะต่อช่วงเวลา อาจเป็นนาที ชั่วโมงหรือวัน เป็นต้น แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{n}{T}$$

โดยที่

q = ปริมาณการจราจรที่แล่นผ่านจุด

n = จำนวนยานพาหนะที่แล่นผ่านจุดในช่วงเวลา T

T = ช่วงเวลาที่ทำการสำรวจ

สำหรับอัตราการไหล (Rate of flow) หมายถึง การไหลของกระแสจราจรในช่วงเวลาที่น้อยกว่าหนึ่งชั่วโมง โดยทั่วไปนิยมใช้ระยะเวลา 15 นาที หน่วยของอัตราการไหลมีหน่วยเป็นคันต่อช่วงเวลาเช่นเดียวกับปริมาณการจราจร โดยค่าการไหลสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{n \cdot 3600}{t}$$

โดยที่

q = ค่าอัตราการไหลรายชั่วโมงมีหน่วยเป็นคันต่อชั่วโมง (vph)

n = จำนวนยานพาหนะที่วิ่งผ่านจุดที่ทำการสำรวจในช่วงเวลา t มีหน่วยเป็นคัน (v)

t = ช่วงเวลาที่ใช้ในการสำรวจมีหน่วยเป็นวินาที (s)

ปริมาณการจราจรรายวัน

การวิเคราะห์การขยายตัวของปริมาณจราจรเพื่อศึกษาแนวโน้มของปริมาณความต้องการใช้ถนนในพื้นที่ การตรวจวัดปริมาณกระแสการจราจรแบบรายวันสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์อัตราการขยายตัวของปริมาณการจราจร (Daily traffic volume) นิยมใช้ 4 รูปแบบ ดังนี้ (ศักรธร บุญทิววัฒน์, 2563)

1. ค่าเฉลี่ยปริมาณจราจรรายวันตลอดปี (Average Annual Daily Traffic, AADT) คือ ค่าจากการตรวจวัดปริมาณการจราจรเฉลี่ยในพื้นที่หรือช่วงที่กำหนดตลอด 24 ชั่วโมงหรือรายวัน เป็นระยะเวลา 365 วัน

2. ค่าเฉลี่ยปริมาณจราจรรายสัปดาห์ตลอดปี (Average Annual Weekday Traffic, AAWT) ค่าจากการตรวจวัดปริมาณการจราจรเฉลี่ยในพื้นที่หรือช่วงที่กำหนดในช่วงวันจันทร์ถึงวันศุกร์ เป็นระยะเวลา 260 วัน

3. ค่าเฉลี่ยปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic, ADT) ค่าจากการตรวจวัดปริมาณการจราจรเฉลี่ยในพื้นที่หรือช่วงที่กำหนดตลอด 24 ชั่วโมงในช่วงเวลาที่มีการกำหนดการสำรวจไว้ โดยส่วนใหญ่อาจใช้เป็นการสำรวจรายเดือน

4. ค่าเฉลี่ยปริมาณจราจรรายสัปดาห์ (Average Weekday Traffic, AWT) ค่าจากการตรวจวัดปริมาณการจราจรเฉลี่ยในพื้นที่หรือช่วงที่กำหนดในช่วงวันจันทร์ถึงวันศุกร์ในช่วงเวลาที่มีการกำหนดการสำรวจไว้ โดยส่วนใหญ่อาจใช้เป็นการสำรวจรายเดือน

ในการออกแบบ ค่าปริมาณจราจรสูงสุดรายชั่วโมง (Peak-hour volumes) สามารถประมาณได้จากค่า AADT โดยจะพิจารณาทิศทางที่เกิดปริมาณจราจรสูงสุด ค่าดังกล่าว ได้แก่ ปริมาณจราจรรายชั่วโมงสำหรับออกแบบจำแนกทิศทาง โดยมีสมการดังต่อไปนี้

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

โดยที่

K = ค่าสัดส่วนของปริมาณจราจรรายวันที่เกิดขึ้นในชั่วโมงที่มีปริมาณจราจรสูงสุด

D = ค่าสัดส่วนของปริมาณจราจรในชั่วโมงที่มีปริมาณจราจรสูงสุดที่เดินทางในทิศทางที่มีปริมาณจราจรสูงสุดเกิดขึ้น

ความเร็วและเวลาในการเดินทาง (Speed and travel time)

ความเร็ว (Speed) คือ อัตราการเคลื่อนที่ในหน่วยระยะทางต่อเวลาหรือระยะทางต่อหนึ่งหน่วยเวลา เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสถานะของกระแสจราจรได้อย่างดี สำหรับการคำนวณความเร็วในทางปฏิบัติจะคำนวณจากเวลาที่รถเคลื่อนที่ผ่านระยะทางช่วงในช่วงหนึ่งที่ทราบระยะแน่นอนแล้วโดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$s = \frac{d}{t}$$

โดยที่

s = ความเร็วของยานพาหนะ มีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อชั่วโมง

d = ระยะทางที่ยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ได้ มีหน่วยเป็นกิโลเมตร

t = เวลาที่ยานพาหนะใช้ในการเดินทาง มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที หรือ วินาที

โดยทั่วไปยานพาหนะแต่ละคันที่เคลื่อนที่ในโครงข่ายการจราจรมักจะมีความเร็วที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยเป็นตัวแทนความเร็วของยานพาหนะทั้งหมดในกระแสจราจร สำหรับอธิบายลักษณะของกระแสจราจรนั้น ความเร็วเฉลี่ยสามารถคำนวณหาได้ 2 วิธีและให้ค่าที่แตกต่างกัน ได้แก่ (วิรัช หิรัญ, 2558)

1. Time Mean Speed (TMS) คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วของยานพาหนะทั้งหมดที่วิ่งผ่านตำแหน่งใด ๆ บนถนนหรือช่องจราจรในช่วงเวลาที่กำหนด สามารถกล่าวอีกนัยหนึ่ง ได้ว่าค่าของ TMS คือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าความเร็วของยานพาหนะแต่ละคันโดยมีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อชั่วโมงและใช้สัญลักษณ์คือ U_t

2. Space Mean Speed (SMS) คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วของยานพาหนะทั้งหมดที่ครอบคลุมช่วงถนนที่พิจารณาในช่วงเวลาที่กำหนด โดยค่าดังกล่าวคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างจำนวนระยะทางรวมที่ยานพาหนะแล่นผ่านช่วงระยะทางกับระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ ดังนั้นค่าของ SMS คือ ค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิก (Harmonic mean) ของค่าความเร็วของยานพาหนะโดยมีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อชั่วโมงและใช้สัญลักษณ์คือ U_s

สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$TMS = \frac{\sum_i \frac{d}{t_i}}{n}$$

$$SMS = \frac{nd}{\sum_i t_i}$$

โดยที่

n = จำนวนข้อมูลเวลาในการเดินทางที่สังเกตได้

d = ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ หน่วย ไมล์ (mi) กิโลเมตร (km) หรือ ฟุต (f)

t_i = เวลาที่ใช้ในการเดินทางของยานพาหนะคันที่ i หน่วย ชั่วโมง (h) หรือวินาที (s)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรพื้นฐานของระบบจราจรจะนิยมใช้ค่า SMS อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการคำนวณ TMS ส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่า SMS ซึ่งค่าผลต่างนี้จะน้อยลงเมื่อค่าความเร็วของกระแสจราจรมีค่าสูงขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ค่า SMS ในกรณีของการจราจรแบบไม่ถูกรบกวนสามารถใช้ช่วงความยาว 50 ถึง 100 เมตรในการวัดค่า

ความเร็วเดินทางเฉลี่ยและความเร็ววิ่งเฉลี่ยแตกต่างกันที่องค์ประกอบของเวลาที่นำมาใช้ในการคำนวณ ได้แก่ 1) เวลาในการเดินทาง (Travel time) หมายถึง ระยะเวลาทั้งหมดที่ยานพาหนะใช้ในการเดินทางในช่วงถนนหรือระยะทางที่กำหนด และ 2) เวลาวิ่ง (Running time) คือ เวลาทั้งหมดเฉพาะช่วงที่รถวิ่งที่ใช้ในการเดินทางในช่วงถนนหรือระยะทางที่กำหนด

ความแตกต่างกันระหว่างเวลาทั้ง 2 ประเภทนี้คือกรณีเวลารอวิ่ง จะไม่นำความล่าช้าที่เกิดจากการหยุดรถ (Stopped delays) มาคำนวณ

ความหนาแน่นและการใช้งานผิวการจราจร (Density and occupancy) ความหนาแน่นของกระแสจราจร คือ จำนวนยานพาหนะที่ครอบครองพื้นผิวจราจรในช่วงความยาวถนนหรือช่องจราจรที่กำหนด (โดยทั่วไปมักเป็น 1 กิโลเมตร) ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง หน่วยของความหนาแน่นโดยทั่วไปจะแสดงในรูปของจำนวนจำนวนของยานพาหนะต่อระยะทาง อย่างไรก็ตามการวัดค่าตัวแปรความหนาแน่นและการใช้งานผิวการจราจรทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการคำนวณค่าความหนาแน่นจากความเร็วอัตราการไหลจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับ (Detectors) แทนการวัดค่าโดยตรง โดยนิยามแล้วการครอบครองผิวจราจรคือสัดส่วนของเวลาที่อุปกรณ์ตรวจจับถูกครอบครองหรือทาบผ่านด้วยยานพาหนะในช่วงเวลาที่ทำการสำรวจข้อมูล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดหลักที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของการไหลของการจราจรเนื่องจากสามารถใช้บอกถึงระยะห่างระหว่างยานพาหนะในกระแสจราจรซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่สะท้อนถึงความอิสระในการขับขี่บนสายทางและความสบายในการขับขี่ของผู้ใช้ถนนดังนั้นค่านี้จึงถูกใช้เป็นตัวกำหนดระดับการให้บริการของถนน

$$K = \frac{n}{L}$$

โดยที่

K = ค่าความหนาแน่นของยานพาหนะบนถนนมีหน่วยเป็นคันต่อกิโลเมตร

L = ความยาวของช่วงถนน ณ เวลาที่กำหนด มีหน่วยเป็นกิโลเมตร

n = จำนวนยานพาหนะทั้งหมดบนช่วงถนน ที่กำหนด มีหน่วยเป็นคัน (v)

ระยะห่างและช่วงห่าง (Spacing and headway)

ปริมาณจราจร ความเร็ว และความหนาแน่น เป็นค่าที่ใช้อธิบายกระแสจราจรในลักษณะมหภาค (Macroscopic) การอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ย่อยลงมาระดับรถแต่ละคันที่วิ่งอยู่ในกระแสจราจร เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์สภาพการจราจรในระดับจุลภาค (Microscopic) โดยการใช้ตัวแปรระยะห่าง (Spacing) และช่วงห่าง (Headway) สำหรับการอธิบายลักษณะกระแสจราจรที่เกิดขึ้นมีรายละเอียด ดังนี้ (ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์, 2561)

ระยะห่าง (Spacing) คือ ระยะระหว่างยานพาหนะที่เคลื่อนที่ตามกันในโครงข่ายกระแสจราจร โดยวัดจากตำแหน่งอ้างอิงที่แน่นอนบนตัวรถคันหนึ่งถึงตำแหน่งเดียวกันบนตัวรถคันถัดไป ที่วิ่งตามกันมา อาทิ จากกันชนหน้าถึงกันชนหน้า กันชนท้ายถึงกันชนท้าย หรือเพลาน้ำถึงเพลาน้ำ

เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 7 ค่าเฉลี่ยของระยะห่างในแต่ละช่องจราจรสามารถคำนวณได้โดยตรงจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$S_a = \frac{1}{K}$$

โดยที่

S_a = ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างยานพาหนะในแต่ละช่องจราจร หน่วย ฟุต (ft)

K = ความหนาแน่นกระแสจราจร หน่วย คันต่อไมล์ต่อช่องจราจร (veh/mi/ln)



ภาพที่ 7 ระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่วิ่งตามกันในโครงข่ายกระแสการจราจร
ที่มา: วัฒนวงศ์ รัตนวราห (2545)

ช่วงห่าง (Headway) คือ ระยะห่างของช่วงเวลาระหว่างยานพาหนะที่วิ่งติดกันมาซึ่งผ่านตำแหน่งหรือแนวอ้างอิงที่กำหนดไว้บนถนนหรือช่องจราจร โดยสังเกตจากเวลาที่ตำแหน่งอ้างอิงบนตัวรถคันหนึ่งวิ่งผ่านจุดที่กำหนดไว้ ถึงเวลาที่ตำแหน่งอ้างอิงเดียวกันบนรถคันถัดไปวิ่งตามกันมาผ่านจุดที่กำหนดนั้นเช่นกัน ตำแหน่งบนตัวรถที่นิยมใช้ในการอ้างอิง อาทิ กันชนหน้า กันชนท้าย หรือเพลาหน้า เป็นต้น โดยสามารถแบ่งช่วงห่างออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ Distance headway และ Time headway ซึ่งขาทั้ง 2 นี้เป็นตัวแปรด้านการจราจรสำหรับการวิเคราะห์ในระดับจุลภาค (Microscopic) เนื่องจากตัวแปรทั้ง 2 อธิบายถึงปฏิสัมพันธ์ของยานพาหนะแบบรายคู่ ในกระแสจราจร โดย Distance headway หมายถึง ระยะทางระหว่างส่วนหน้าของรถคันแรกกับส่วนหน้าของรถคันที่ตามมา โดยมีสมการดังนี้

$$h_d = \frac{1,000}{k}$$

โดยที่

h_d = ช่วงห่างเฉลี่ยระหว่างยานพาหนะ มีหน่วยคือเมตรต่อคัน

k = ค่าความหนาแน่นมีหน่วย คือคันต่อกิโลเมตร

Time headway หมายถึง ช่วงเวลาระหว่างขณะที่ส่วนหน้าของรถคันที่หนึ่งผ่านจุดสังเกต ไปถึงเวลาขณะที่ส่วนหน้าของรถคันที่ 2 ผ่านจุดเดียวกันโดยที่ Mean-Time headway คือค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาระหว่างรถแต่ละคู่เมื่อวัดในคาบเวลา ณ จุดใดจุดหนึ่ง ดังนี้

$$h_t = \frac{3,600}{q}$$

โดยที่

h_t = ช่วงระยะเวลาห่างเฉลี่ยระหว่างยานพาหนะ มีหน่วยคือวินาทีต่อคัน

q = ค่า ปริมาณการจราจรมีหน่วยเป็นคันต่อชั่วโมง

ความล่าช้า (Delay) หมายถึง เวลาที่สูญเสียไปในขณะเดินทางซึ่งเป็นผลมาจากปัญหาสภาพการจราจรติดขัดและระบบที่ใช้ในการควบคุมการจราจรหรือสาเหตุอื่นซึ่งในบางครั้งผู้ขับขี่ยานพาหนะไม่สามารถจัดการได้โดยค่าความล่าช้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. ความล่าช้าคงที่ (Fixed delay) หมายถึง ความล่าช้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบควบคุมการจราจรซึ่งต้องเกิดขึ้นเสมอ ไม่ว่าสภาพการจราจรจะมีน้อยหรือมาก อาทิเช่น ความล่าช้าที่เกิดขึ้นบริเวณทางแยกโดยอาจจะเป็นทางแยกควบคุมสัญญาณไฟโดยจราจร สัญญาณไฟกระพริบ ป้ายหยุดป้ายระวังหรือจุดตัดกับทางรถไฟ เป็นต้น

2. ความล่าช้าจากปัญหาการจราจร (Operational delay) หมายถึง ความล่าช้าที่มีสาเหตุมาจากความขัดแย้งในส่วนของกระแสจราจรซึ่งอาจเป็นผลมาจากการจราจรในส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การมีรถจอด รถเลี้ยว คนข้ามถนน รถเสีย รถจอดซ้อนคันหรือรถวิ่งตัดกัน นอกจากนั้นยังเป็นผลมาจากสภาพการจราจรในตัวมันเอง เช่น การติดขัดเนื่องจากมีปริมาณจราจรมาก ความจุของถนนไม่เพียงพอ และลักษณะการแทรกตัวของรถหรือการออกไปจากกระแสจราจร

3. ความล่าช้าในการเดินทาง (Travel delay) คือ ผลต่างระหว่างเวลาที่ใช้ในการเดินทางจริงผ่านช่วงเส้นทางที่ทำการศึกษากับระยะเวลาที่เกิดขึ้นเมื่อรถวิ่งด้วยอัตราเร็วปกติและการจราจรมีสภาพคล่องตัวไม่ติดขัด หรือเป็นความล่าช้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชะลอเพื่อที่จะหยุดรถหรือการเร่งเพื่อเคลื่อนตัวรถออกไป

4. ความล่าช้าจากการหยุด (Stopped time delay) เป็นช่วงเวลาที่รถไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระหว่างการเดินทางบนช่วงถนน หรือเส้นทางที่ทำการศึกษาซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น อุบัติเหตุ เป็นต้น

ความสัมพันธ์พื้นฐานของตัวแปรที่อธิบายกระแสจราจร

ในการสำรวจกระแสการไหลของยานพาหนะในโครงข่าย ผู้สำรวจมักจะพบว่าปริมาณการจราจรของถนนแต่ละช่วงจะมีปริมาณยานพาหนะไม่เท่ากัน โดยทั่วไปช่วงเช้าจนถึงเย็นปริมาณการจราจรจะหนาแน่นตามชั่วโมงการทำงานของพื้นที่และจะลดลงในช่วงเย็นจนถึงดึกเป็นแบบนี้ตามวันที่มีการสำรวจ ดังนั้นการจึงจำเป็นต้องอธิบายด้วยตัวแปรทางด้านการจราจร 3 ตัวแปรคือ 1) อัตราการไหลของยานพาหนะ 2) ความเร็วของยานพาหนะ และ 3) ความหนาแน่นของเส้นทางการจราจร ซึ่งทั้ง 3 ตัวแปรมีความเกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกันโดยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 3 คือ

$$q = uk$$

โดยที่

- q = อัตราการไหลของยานพาหนะ (คันต่อชั่วโมง)
- u = ความเร็วของยานพาหนะ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
- k = ความหนาแน่นของเส้นทางการจราจร (คันต่อกิโลเมตร)

อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรใช้ความสัมพันธ์ความเร็วและความหนาแน่นเป็นเส้นตรงเพื่อใช้อธิบายให้เข้าใจถึงการนำเสนอสภาพการจราจรกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะความสัมพันธ์ดังนี้ (ศักรธร บุญทวีวัฒน์, 2563)

1. สภาพการจราจรเบาบาง สภาพการจราจรดังกล่าวความหนาแน่นจราจรจะเท่ากับศูนย์เนื่องจากไม่มียานพาหนะผ่านไปมาบนถนนและปริมาณจราจรก็มีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกันส่วนความเร็วจะมีค่าสูงสุดซึ่งในทางทฤษฎีเรียกว่าความเร็วการไหลอิสระ (Free flow)
2. สภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง จะเกิดขึ้นในสภาพการจราจรแน่นมากที่จุดจนมีสภาพติดขัดหยุดนิ่งยานพาหนะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้การที่ความหนาแน่นการจราจรมีค่ามาก เนื่องจากยานพาหนะแต่ละคันจอดหยุดนิ่งโดยเว้นระยะห่างระหว่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในทางทฤษฎีความหนาแน่นในสภาพการณ์เช่นนี้เรียกว่าความหนาแน่นในสภาพติดขัด (Jam distance) ซึ่งจะเป็นความหนาแน่นสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้สำหรับถนนมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นในสภาพการจราจรอื่นส่วนความเร็วจราจรในสภาพดังกล่าวจะเท่ากับศูนย์เนื่องจากยานพาหนะทุกคันจะหยุดนิ่ง
3. สภาพการจราจรสูงสุด สภาพการจราจรนี้จะไม่มีความเสถียรเนื่องจากระยะห่างระหว่างยานพาหนะแต่ละคัน (Gap) ในกระแสการจราจรน้อยลงเมื่อมีการรบกวนกระแสการจราจรเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มขึ้นของยานพาหนะการเปลี่ยนช่องจราจรการชะลอความเร็วของรถคันหนึ่งในกระแสการจราจรจะส่งผลรบกวนกระแสการจราจรกลายเป็นสภาพการจราจรติดขัดได้ทันที

ในช่วงเวลาอันสั้นดังนั้นการดำเนินการต่าง ๆ ณ จุดความจุนี้จะเป็นไปด้วยความยากลำบากและยากที่จะหลีกเลี่ยงการจราจรติดขัด

4. ช่วงไหลมีความเสถียร (Stable flow) สามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหลโดยช่วงการไหลมีความเสถียรจะเริ่ม ตั้งแต่สภาพการจราจรเบาบางที่สุดไปจนถึงสภาพการจราจรเต็มความจุซึ่งสภาพการจราจรในช่วงนี้จะไม่มีความคล่องตัวไม่มีการติดขัดของกระแสจราจรผู้ขับขี่สามารถใช้ความเร็วสูงมีอิสระในการขับขี่พอสมควรที่จุดเริ่มต้นของกราฟปริมาณการจราจรน้อยผู้ขับขี่สามารถใช้ความเร็วได้ จนถึงความเร็วการไหลอิสระ (Free flow speed) แต่เมื่อจำนวนรถในช่องทางมีมากขึ้นความเร็วจะลดต่ำลงแต่คนขับยังมีอิสระในการขับขี่

5. ช่วงการไหลไม่เสถียร (Unstable flow) หรือสภาพการจราจรติดขัดสามารถอธิบายด้วยกราฟว่าสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการไหลโดยช่วงการไหลไม่เสถียรเนื่องจากสภาพการจราจรเต็มความจุไปจนถึงสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่งสภาพการจราจรนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนตัวช้าไปจนถึงสภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่งโดยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วลดลงอย่างรวดเร็ว รถแต่ละคันไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระลักษณะการเคลื่อนที่ของรถคันหน้าจะมีผลต่อรถคันหลังและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเพียงคันเดียวจะส่งผลกระทบต่อสภาพการจราจรทั้งหมดความเร็วลดลงมากและทำให้ปริมาณการจราจรลดลงมากด้วยจนเมื่อความหนาแน่นสูงมากจนถึงความหนาแน่นสูงสุด (Jam density) จากนั้นจะเข้าสู่สภาพการจราจรติดขัดหยุดนิ่ง

ระบบสัญญาณไฟจราจร

ระบบสัญญาณไฟจราจรถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้สำหรับการจัดระเบียบการไหลของกระแสจราจร เพื่อควบคุมการไหลของการจราจร ไฟจราจรจะส่งสัญญาณ 3 จังหวะ คือ สีเขียว สีแดง และสีเหลืองอำพัน (Teo et al., 2010) การจราจรในแต่ละช่วงได้รับอนุญาตให้ผ่านรถได้โดยอาศัยสัญญาณไฟสีเขียว ดังนั้น สัญญาณสีเขียวจึงเป็นสัญญาณที่สำคัญที่สุดในแง่ของการไหลของรถ ในทางกลับกัน สัญญาณสีแดงห้ามรถผ่านทางแยก ในขณะที่สัญญาณสีเหลืองจะถูกให้ไว้ระหว่างสัญญาณสีแดงและสีเขียวเพื่อเตือนให้รถชะลอความเร็ว ประสิทธิภาพของการไหลของการจราจรจะถูกกำหนดโดยสัญญาณไฟจราจรทั้ง 3 จังหวะ

เพื่อปรับเวลาสัญญาณไฟจราจรให้เหมาะสมที่สุดและเพิ่มปริมาณรถที่ออกจากทางแยกให้มากที่สุด จำเป็นต้องทำความเข้าใจว่าปัจจัยใดที่ควบคุมประสิทธิภาพของปริมาณรถที่ไหลออกจากทางแยกก่อนที่จะเกิดปัญหาพื้นฐานขึ้น โดยทั่วไปสัญญาณไฟจราจรจะทำงานเป็นสัญญาณเวลาคงที่ตามลำดับการทำงานของสัญญาณที่กำหนดไว้ล่วงหน้าเสมอ (Teo et al., 2010) โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนไฟตามปริมาณรถในแต่ละทิศทางหรือการใช้ดุลยพินิจของผู้ควบคุมในการปรับรอบสัญญาณไฟจราจร ส่งผลให้เมื่อรอบสัญญาณไฟจราจรไม่สัมพันธ์กับแถวคอยบริเวณทางแยกจะทำให้

ยานพาหนะบางส่วนไม่สามารถผ่านทางแยกได้ก่อนที่รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวจะหมดเกิดการติดขัดสะสมระหว่างรถที่เข้ามาในทางแยกจากทิศทางที่แตกต่างกัน

ในอดีตมีงานวิจัยบางฉบับได้ศึกษาแนวทางการควบคุมสัญญาณไฟจราจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวทางการปรับรอบระยะเวลาสัญญาณไฟเขียวเพื่อควบคุมการจราจร แต่การพิจารณาทางแยกที่มีการควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรก่อนเข้าด้านตรวจสอบหรือด้านเก็บค่าผ่านทางยังไม่มีปรากฏให้เห็น โดยด้านตรวจสอบหรือด้านเก็บค่าผ่านทางหากมีการตั้งอยู่ใกล้กับทางแยกจะมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดความล่าช้าจากกระบวนการที่เป็นจุดคอขวดและส่งผลให้เกิดการจราจรติดขัดสะสมจึงถึงทางแยกส่งผลเสียต่อการไหลของการจราจรของยานพาหนะในเครือข่ายถนนรวมถึงการไหลเข้าของยานพาหนะ (Chitour & Piccoli, 2005)

การหยุดชะงักของการไหลของการจราจรหรือระบบส่วนใหญ่เกิดจากรอบระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรสีเขียวที่ถูกกำหนดไว้แบบคงที่ไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนตามปริมาณแควคอยในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือทุกทิศทางที่มุ่งเข้าสู่ทางแยก ทำให้ทุกทางแยกเกิดความล่าช้า (Branston & Van, 1978) โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วนที่แตกต่างกันในแต่ละเส้นทาง ระบบการจราจรจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นและมีโอกาสที่แควคอยจะล้นไปจนถึงบริเวณทางแยกและไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้หากไม่ถึงรอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวรอบถัดไปจนเกิดสภาวะการจราจรอึมตัว (Enrique & Darcy, 2015) ในสภาวะที่การจราจรอึมตัวยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าสู่ทางแยกจะมีปริมาณสูงมากกว่าความสามารถที่สามารถรองรับได้ การแก้ไขปัญหาโดยการเพิ่มระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรสีเขียวให้สูงขึ้นโดยไม่มีการพิจารณาเส้นทางโดยรอบเป็นเพียงการถ่ายโอนปัญหาความแออัดจากบริเวณที่เกิดปัญหาไปยังบริเวณอื่นเท่านั้น (Kulovic, 2015)

การจัดการการจราจรบริเวณทางแยก

ทางแยกถือเป็นหนึ่งในพื้นที่ทางระบบการจราจรที่มีโอกาสเกิดปัญหาความติดขัดได้บ่อยครั้งเนื่องจากปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ทางแยกในแต่ละทิศทางจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน การจราจรติดขัดบริเวณทางแยก ส่งผลให้เส้นทางใกล้เคียงเกิดความแออัดเพิ่มขึ้น (Muneera et al., 2020) ปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางแยกมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาเร่งด่วนของเส้นทาง อย่างไรก็ตามทางแยกส่วนใหญ่ควบคุมโดยเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรและเจ้าหน้าที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานจราจร บ่อยครั้งที่เจ้าหน้าที่ควบคุมจะทำการปล่อยยานพาหนะตามจำนวนแควคอยทั้งหมดที่บริเวณทางแยกแต่ละแห่ง บางครั้งอาจขึ้นอยู่กับความชอบหรือความเคยชินส่วนตัวของเจ้าหน้าที่ในแต่ละทางแยกจะมีตัวแปรสำหรับการพิจารณาที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ ความยาวของแควคอยการไหลของการจราจรขาเข้า ระยะเวลารอคอยของยานพาหนะและความยาวแควคอยของยานพาหนะ (Teo et al., 2010) โดยเฉพาะความยาวของแควคอยของยานพาหนะก่อนจะผ่านทางแยก เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับระบบการจราจรที่ดี หากมีความยาวแควคอย

ของยานพาหนะก่อนเข้าสู่ทางแยกจำนวนมาก หมายถึงการควบคุมการไหลของการจราจรที่ไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ของยานพาหนะออกจากทางแยกได้เพียงเล็กน้อยและยานพาหนะจำนวนมากไม่มากสามารถผ่านทางแยกได้ ในทางกลับกันความยาวของแถวคอยที่สั้นแสดงถึงการไหลของการจราจรที่สามารถให้ยานพาหนะส่วนใหญ่ผ่านทางแยกได้ การบริหารทางแยกที่ไม่มีประสิทธิภาพจะทำให้ประสิทธิภาพของสัญญาณไฟจราจรสีเขียวไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ เกิดเวลาที่สูญเสียไปของสัญญาณไฟจราจรสีเขียวเนื่องจากไม่มียานพาหนะใดสามารถผ่านทางแยกได้ การกำหนดรอบสัญญาณไฟจราจร สีเขียวที่เหมาะสมกับความยาวแถวคอยของยานพาหนะที่ทางแยกทั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกเวลาเร่งด่วนจะสามารถช่วยให้ยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ออกจากทางแยกได้เพิ่มขึ้นและมีระยะเวลารอคอยของยานพาหนะลดลง การเพิ่มรอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวที่มีประสิทธิภาพในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงสภาพการจราจรเนื่องจากจะมียานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกในแต่ละทิศทางได้อย่างสมดุล

หากพิจารณาจากการวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพด้านการจราจรในช่วงเวลาที่ผ่านมา จะพบว่า งานวิจัยต่าง ๆ จะมีการอ้างอิงทฤษฎีเกี่ยวกับการปรับรอบเวลาสัญญาณไฟจราจรให้เหมาะสมอัตราการใช้ของยานพาหนะในแต่ละทิศทาง (Enrique & Darcy, 2015) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับระบบการจราจรและนำเสนอวิธีการรวบรวมข้อมูลอัตราการไหลของยานพาหนะเทียบกับเวลาสัญญาณไฟจราจร พบว่าเมื่อรอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวได้ทำงานยานพาหนะที่ทางแยกจะเสียระยะเวลาในการติดเครื่องยนต์และเคลื่อนที่ในช่วงแรกด้วยรอบเครื่องยนต์ต่ำ ยานพาหนะบางคันจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาสำหรับการเร่งความเร็วจากจุดเริ่มต้น Sasaki & Nagatani (2003) เมื่อยานพาหนะเริ่มเคลื่อนที่อัตราการไหลของกระแสจราจรจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำงานถึงจุดอิ่มตัว อัตราการไหลของยานพาหนะจะคงที่เท่ากับอัตราการไหลสูงสุดและจะลดลงจนเท่ากับศูนย์ โดยการรวบรวมข้อมูลอัตราการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจำเป็นต้องศึกษาข้อจำกัดด้านการจราจรหรือกิจกรรมในระหว่างวัน เพื่อให้สามารถดำเนินการตามเวลาสัญญาณไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกช่วงระยะเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลการจราจรควรกำหนดไว้ 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาที่มีปริมาณการจราจรสูงสุดโดยส่วนใหญ่เป็นช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเย็นที่อาจแตกต่างกันตามพื้นที่ และช่วงเวลาที่ปริมาณการจราจรปกติ ในกรณีที่โครงข่ายเส้นทางเป็นทางแยกที่มีการดำเนินงานต่อเนื่องกันจำเป็นต้องมีการพิจารณาด้านการประสานงานการจราจร การประสานงานการจราจรเป็นแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการประสานสัญญาณรอบสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกมากกว่า 2 ทางเข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้ยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ผ่านทางแยกได้อย่างราบรื่น

ทฤษฎีตัวแบบแถวคอย

ปัจจัยที่สำคัญและเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแออัดของประตูที่ทำเรือคือพฤติกรรมการเข้าแถวคอยของรถบรรทุก ระบบประตูในท่าเรือเป็นระบบการเข้าแถวคอยที่ไม่คงที่มีความเป็นพลวัตสูงเนื่องจากอัตราการมาถึงของรถบรรทุกที่แตกต่างกันไปในแต่ละชั่วโมงและระยะเวลาการให้บริการอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา Chu & Huynh (2017) สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้าแถวคอยของรถบรรทุกที่ประตูปลายทางด้วยแบบจำลองการเข้าแถวคอย ได้แก่ 1) ระบบการจัดแถวคอยแบบไม่รวมกลุ่ม (Non-pooled queues) กระบวนการและเวลาให้บริการของรถบรรทุกเป็นอิสระและแยกแถวคอย มีข้อดีคือง่ายต่อการบริหารจัดการ ข้อเสียคือเมื่อรถบรรทุกมีปัญหาในการทำธุรกรรมจะขัดขวางไม่ให้รถบรรทุกด้านหลังทั้งหมดเข้ารับบริการ และ 2) ระบบการจัดแถวคอยแบบรวมกลุ่ม (Pooled queues) เป็นระบบการจัดแถวคอยจะมีจำนวนประตูทำงานแบบคู่ขนานเพื่อให้บริการรถบรรทุกเพียงแถวคอยเดียวมีข้อดีคือสามารถใช้ประโยชน์จากประตูได้อย่างเต็มที่และมีข้อเสียคือยากต่อการบริหารจัดการ

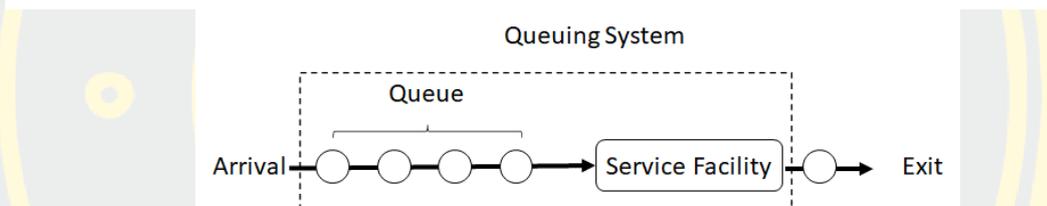
ทฤษฎีแถวคอยเป็นทฤษฎีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานด้านการบริการที่ต้องมีการรอคอย นำมาใช้เพื่อจัดระเบียบแถวคอยเพื่อสามารถช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการและลดเวลาที่ลูกค้ารอคอยเพื่อให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ ในองค์กรหรือกิจการเกือบทุกชนิดจะมีตัวอย่างของกิจกรรมที่เกิดแถวคอยหรือการเข้าคิวคอยให้เห็นอยู่เสมอ ในเชิงเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับเรื่องนี้คือแถวคอยจะเกิดขึ้นเพราะมีจำนวนผู้ต้องการใช้หรือขอรับบริการมากกว่าจำนวนทรัพยากรหรือสิ่งอำนวยความสะดวกที่มีอยู่อย่างจำกัด ตัวอย่างเช่น การเข้าแถวปล่อยของลูกค้าธนาคารเพื่อรับบริการทางการเงินเกิดขึ้นเพราะจำนวนพนักงานหน้าเคาน์เตอร์ที่มีอยู่จำกัดแต่มีลูกค้ามาติดต่อจำนวนมาก แต่ในกรณีพนักงานมีมากกว่าลูกค้าแถวคอยจะไม่เกิดขึ้นเพราะทรัพยากรมีจำนวนมาก เมื่อคุณเป็นลูกค้าคนแรกที่เดินเข้าสู่ประตูธนาคารเมื่อธนาคารเริ่มเปิดให้บริการในตอนเช้า (วินัย พุททกุล, 2551)

ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) ต้นทุนของเวลาที่คอย (Cost of waiting time) ต้นทุนประเภทแรกเกิดกับลูกค้าหรือผู้เข้ารับการรับบริการ ในรูปของค่าเสียโอกาสของเวลาที่ใช้ในการคอยและค่าความไม่สะดวกหรืออึดอัดที่ต้องรอคอย (Inconveniences) และ 2) ต้นทุนของการให้บริการ (Cost of providing service) ต้นทุนส่วนนี้เกิดกับผู้ให้บริการในรูปของค่าการลงทุนต่าง ๆ เช่น เครื่องมือเครื่องจักรอุปกรณ์ ค่าจ้าง เงินเดือน เป็นต้น ดังนั้นต้นทุนรวมของแถวคอย (Total waiting line cost) คือผลรวมของต้นทุนทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวข้างต้นที่เกิดขึ้นในฝั่งผู้ให้บริการและผู้รับบริการ การศึกษาและประยุกต์แนวคิดของทฤษฎีแถวคอยเพื่อต้นทุนรวมของแถวคอยในการดำเนินงานให้มีค่าน้อยที่สุด (To minimize expected total waiting line cost) โดยความสัมพันธ์ของต้นทุนการให้บริการและต้นทุนของเวลา

จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือเมื่อระดับการให้บริการสูงขึ้นต้นทุนการให้บริการก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

องค์ประกอบและลักษณะของระบบแถวคอย

หากพิจารณาระบบแถวคอยจากภาพที่ 7 จะพบว่ากระบวนการแถวคอยเริ่มต้นจากลูกค้าเข้ากระบวนการ โดยในกรณีที่หน่วยบริการยังให้บริการลูกค้าก่อนหน้าไม่เสร็จสิ้นลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการที่หลังจะทำการรอคอยในระบบแถวคอยจะเข้าสู่ ณ เวลาที่ผ่านไปช่วงใดช่วงหนึ่งจะมีลูกค้าคนใดคนหนึ่งถูกเลือกเพื่อให้บริการผ่านกฎเกณฑ์ เรียกว่าระเบียบการให้บริการของแถวคอย (Queue discipline) เมื่อลูกค้าได้รับบริการจนเสร็จสิ้นแล้วก็จะออกจากระบบแถวคอย (Served customers) (ยูภาพร ตงประสิทธิ์, 2554) ดังนั้นองค์ประกอบของระบบแถวคอยประกอบด้วย องค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนได้แก่ 1) ผู้มารับบริการ (Arrivals) 2) แถวคอยหรือคิว (Waiting line or the queue) และ 3) ส่วนให้บริการ (Service facility) โดยแต่ละส่วนมีลักษณะสำคัญดังรายละเอียดต่อไปนี้



ภาพที่ 8 องค์ประกอบของระบบแถวคอย

ที่มา: ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ (2561)

1. ลักษณะของผู้มารับบริการ กล่าวได้ว่าผู้มารับบริการจะเป็นปัจจัยนำเข้าของระบบแถวคอยมีลักษณะสำคัญ การเข้ามาของลูกค้าเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอนและคาดการณ์ได้ยาก ดังนั้นในระบบแถวคอยจะให้ความสำคัญกับรูปแบบการการแจกแจงความน่าจะเป็นของจำนวนลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการในช่วงเวลาหนึ่ง หรือระยะเวลาระหว่างการมาของลูกค้า โดยที่ต้องพิจารณา 3 ประการคือ ขนาดของประชากรผู้มารับบริการแบบแผนการมาของผู้รับบริการและพฤติกรรมของผู้มารับบริการ (มานพ วรารักดี, 2552)

1.1 ขนาดของประชากรผู้มารับบริการ (Size of calling population) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ มีจำนวนมากจนนับไม่ถ้วน (Infinite) และมีจำนวนไม่มากสามารถนับทวนได้ (Finite) ตัวอย่างกรณีประชากรผู้มารับบริการมีจำนวนนับไม่ถ้วน เช่น จำนวนลูกค้าคอยคิวจ่ายเงินในซูเปอร์มาร์เก็ต จำนวนรถยนต์คอยคิวจ่ายค่าทางด่วน จำนวนลูกค้าคอยคิวซื้อแฮมเบอร์เกอร์ เป็นต้น

1.2 แบบแผนการมาของผู้มารับบริการ (Pattern of arrivals) หมายถึง ลักษณะการมาถึงหน่วยให้บริการของผู้รับบริการว่ามีลักษณะอย่างไรซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ มีแบบแผน (Organized pattern or know schedule) และไม่มีแบบแผนหรือเข้ามาโดยสุ่ม (Random order) ตัวอย่างการมาของผู้รับบริการอย่างมีแบบแผน เช่น มีผู้มาติดต่อชำระภาษีรถยนต์ที่สำนักงานขนส่งหนึ่งคนทุก ๆ 3 นาที เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์แถวคอยส่วนใหญ่ มักกำหนดให้แบบแผนการมารับบริการเป็นแบบสุ่มโดยกำหนดให้มีจำนวนผู้มารับบริการต่อหน่วยเวลามีการกระจายตัวแบบปัวส์ซง (Poisson distribution) แบบแผนการกระจายความน่าจะเป็นของตัวแบบสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องแบบหนึ่ง ตัวแปรของการกระจายความน่าจะเป็นแบบนี้คืออัตราเฉลี่ยของการมาถึงหน่วยให้บริการต่อหน่วยเวลา (Average arrival rate) หรือ λ (เช่น 20 คนต่อชั่วโมง) โดยมีสูตรการคำนวณความน่าจะเป็นสำหรับจำนวนการมาถึงหน่วยบริการ X หน่วยนับต่อหน่วยเวลา คือ

$$P(X) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{X!}$$

โดยที่

X = จำนวนของผู้มาถึงหน่วยบริการต่อหน่วยเวลา

$P(X)$ = ความน่าจะเป็นที่มีจำนวนผู้มารับบริการจำนวน X ต่อหน่วยเวลา

λ = จำนวนโดยเฉลี่ยของการมาถึงต่อหน่วยเวลา

e = จำนวนธรรมชาติ (Natural number) มีค่าเท่ากับ 2.7183

1.3 พฤติกรรมของผู้มารับบริการ (Behavior of the arrival) ประชากรผู้มารับบริการแต่ละรายมีนิสัยและทัศนคติส่วนตัวต่อการเข้าแถวคอยแตกต่างกัน บางคนมีความอดทนสูงเมื่อต้องเข้าแถวคอยบางคนไม่ชอบการเข้าแถวคอยและยินดีมารับบริการภายหลัง ในการวิเคราะห์ปัญหาแถวคอยได้มีการกำหนดรูปแบบพฤติกรรมของผู้เข้าแถวคอยเป็น 3 ลักษณะ คือ 1) เข้าแถวคอยแต่ยกเลิกภายหลัง (Reneging) 2) เข้าแถวคอยทันทีเมื่อมาถึง (Balking) และ 3) ทำการสลับแถวคอยเมื่อแถวคอยอีกแถวสั้นกว่า (Jockeying)

ลักษณะของแถวคอย

แนวปฏิบัติทั่วไปในการวิเคราะห์จะแบ่งลักษณะของแถวคอยเป็น 2 ลักษณะ คือ ความยาวของแถวคอยไม่จำกัดและความยาวของแถวคอยที่จำกัดบางครั้งแถวคอยอาจหมายถึงบริเวณที่ลูกค้ารอคอยก่อนเข้ารับบริการ โดยการให้บริการกับลูกค้าในแถวคอยจะมีระยะเวลาที่อยู่ในแถวคอย ไม่แน่นอน เพราะลูกค้าแต่ละรายใช้เวลาในการรับบริการไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็น

จะต้องศึกษารูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็นของระยะเวลาในการให้บริการ (กัลยา วานิชย์ บัญชา, 2546)

ส่วนของการให้บริการประกอบด้วย รูปแบบของระบบให้บริการ ระเบียบของ การให้บริการและแบบแผนของการกระจายความน่าจะเป็นของเวลาให้บริการ

รูปแบบของระบบให้บริการ (Configurations of queue system)

หลักเกณฑ์ในการจำแนกรูปแบบของระบบให้บริการคือ จำนวนช่องทางหรือจำนวน ผู้ให้บริการ (Number of channels or servers) และจำนวนชนิดของบริการ (Number of phases)

1) ระเบียบการให้บริการ (Service discipline)

ระเบียบการให้บริการ (Service discipline) หมายถึง หลักเกณฑ์การคัดเลือกหรือ กำหนดการให้บริการ มีรายละเอียด ดังนี้ (วินัย พุทธิกุล, 2551)

1. การมาก่อนได้รับบริการก่อน (First come first served) รูปแบบการให้บริการ ตามลำดับการเข้ามาถึงของลูกค้าหรือผู้ใช้บริการ โดยผู้ขอรับบริการที่เข้ามาถึงจุดบริการก่อนจะได้รับ การบริการก่อน
2. การมาหลังได้รับบริการก่อน (Last come first served) รูปแบบการให้บริการ ตามลำดับการเข้ามาถึงของลูกค้าหรือผู้ใช้บริการที่เข้าสู่แถวคอยหลังสุดจะได้รับการบริการก่อน
3. การให้บริการอย่างสุ่ม (Service in random order) รูปแบบการให้บริการโดยการสุ่ม ลำดับของผู้เข้ารับบริการโดยไม่สนใจลำดับการเข้ามาภายในแบบจำลอง
4. การให้บริการตามลำดับความสำคัญ (Priority) เป็นการกำหนดลำดับการให้บริการ ตามลำดับความสำคัญของผู้เข้ารับบริการที่เข้ามาโดยไม่สนใจลำดับการเข้ามาแต่จะสนใจลำดับ ความสำคัญอื่น ๆ แทน

เมื่อพิจารณาโดยคำนึงถึงช่องทางให้บริการเพียงลักษณะเดียวสามารถแบ่งระบบให้บริการ ได้เป็น 2 ประเภทคือ ระบบช่องทางเดียว (Single-channel system) เช่น แถวคอยตู้เอทีเอ็มที่มี เพียงตัวเดียวและระบบหลายช่องทาง (Multi-channel system) เช่น ระบบการให้บริการของ ธนาคารที่มีพนักงานให้บริการหลายคน

เมื่อพิจารณาจากจำนวนชนิดของบริการเพียงอย่างเดียวสามารถแบ่งระบบให้บริการได้ เป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกันคือระบบให้บริการชนิดเดียว (Single-phase system) เช่น ระบบ การให้บริการเคาน์เตอร์ของธนาคารดังกล่าวข้างต้น ซึ่งลูกค้ารับบริการที่เคาน์เตอร์เพียงชนิดเดียวเมื่อ เสร็จธุรกรรมแล้วก็ออกจากระบบ อีกประเภทหนึ่งคือระบบให้บริการหลายชนิด (Multi-phase system) เช่น ระบบการให้บริการทำวีซ่าของกรมศุลกากร

เมื่อนำเอาหลักเกณฑ์ทั้ง 2 ประการมาพิจารณาประกอบการจะทำให้ได้รูปแบบพื้นฐานของระบบให้บริการ 4 แบบ แสดงดังภาพที่ 9 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ระบบช่องทางเดียว หนึ่งบริการ (Single-channel, Single-phase system)
2. ระบบช่องทางเดียว หลายบริการ (Single-channel, Multi-phase system)
3. ระบบหลายช่องทาง หนึ่งบริการ (Multi-channel, Single-phase system)
4. ระบบหลายช่องทาง หลายบริการ (Multi-channel, Multi-phase system)

ระเบียบของการให้บริการ (Queue discipline) หมายถึง กฎกติกาในการให้บริการที่กำหนดขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 หลักเกณฑ์ใหญ่ ๆ คือ ตามลำดับความสำคัญ (Priority) และหลักการมาก่อนรับบริการก่อน (First come, first serve)

แบบแผนการกระจายความน่าจะเป็นของเวลาให้บริการ (Probability distribution of service time) เวลาที่ให้บริการอาจมีค่าคงที่ (Constant) หรือไม่แน่นอน (Random) ก็ได้ ในกรณีที่เวลาให้บริการไม่แน่นอนนักวิเคราะห์มักเลือกกำหนดให้เวลาให้บริการมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบ Negative exponential ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่องกำหนดโดยฟังก์ชันความหนาแน่น คือ

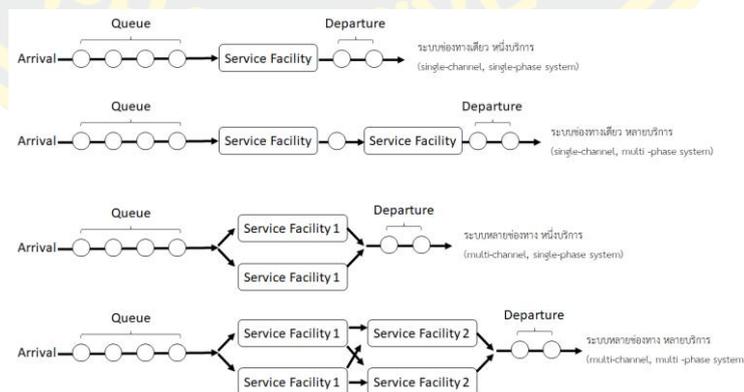
$$P(X) = \mu e^{-\mu x}$$

โดยที่

X = เวลาในการให้บริการ

μ = ค่าเฉลี่ยการให้บริการต่อหน่วยเวลา

e = จำนวนธรรมชาติ (Natural Number) มีค่าเท่ากับ 2.7183



ภาพที่ 9 ระบบแถวคอยการให้บริการ

ที่มา: ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ (2561)

การใช้สัญลักษณ์เคนดอลในการจัดระบบแถวคอย

สัญลักษณ์เคนดอลถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1951 เพื่อใช้เรียกระบบแถวคอยรูปแบบต่าง ๆ (Kendall notation) ประกอบด้วย 5 ส่วนคือ ลักษณะของการมารับบริการ (Arrival characteristics) ลักษณะของเวลาให้บริการ (Service time characteristics) และจำนวนช่องทางให้บริการ (Number of service channel) และเขียนสัญลักษณ์แสดงส่วนประกอบ 3 ส่วนดังกล่าวตามลำดับเป็น A/ B/ C โดยที่ A และ B หมายถึง ลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้ (วินัย พุทธิกุล, 2551)

M: เมื่ออัตราการมารับบริการมีการกระจายแบบปัวส์ซง โดยมีอัตราเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา λ เล็กเมื่อเวลาให้บริการมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยมีอัตราการให้บริการเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา μ

D: เมื่ออัตราการมารับบริการหรือเวลาให้บริการมีค่าคงที่

G: เมื่ออัตราการมารับบริการและเวลาการให้บริการมีการกระจายแบบทั่วไปใด ๆ (General distribution) ซึ่งทราบค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนชัดเจน

C หมายถึง ช่องทางการให้บริการที่มีอยู่ทั้งหมด เช่น ระบบที่มีช่องทางบริการเดียวโดยมีอัตราการมาถึงของผู้รับบริการมีการกระจายแบบปัวส์ซงและเวลาให้บริการมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล เขียนแสดงโดยสัญลักษณ์เคนดอล คือ M/ M/ 1 ส่วนระบบแถวคอยที่มี 3 ช่องทางบริการโดยมีอัตราการมาถึงของผู้รับบริการมีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) และเวลาให้บริการมีอัตราคงที่จะมีสัญลักษณ์เคนดอล คือ G/ D/ 3

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

เป็นหนึ่งในการรูปแบบการจำลองสถานการณ์ที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมจราจรเนื่องจากแบบจำลองสามารถนำเสนอผลลัพธ์จากพฤติกรรมของการจราจรที่มีความซับซ้อนได้อย่างหลากหลายและตรงตามความต้องการ เพื่อความถูกต้องของแบบจำลองจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามและต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำไปใช้งาน โดยแบบจำลองมีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่สามารถระบุขอบเขตชัดเจนได้ โดยที่ต้องกำหนดข้อมูลที่แบบจำลองต้องการ เช่น พฤติกรรมการขับขี่ ปริมาณกระแสการจราจรและลักษณะของเส้นทาง (ธีรดนัย อินดี และจำรัส พิทักษ์ศฤงคาร, 2564)

การดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวางแผนการจราจรจำเป็นต้องมีการเลือกใช้เครื่องมือในการอธิบายและคาดการณ์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสภาพการจราจรอย่างเหมาะสมเนื่องจากในสภาพแวดล้อมจริงของการจราจรจะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกจำนวนมากที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า เช่น กระบวนการขับขี่ยานพาหนะ พฤติกรรมการตัดสินใจ โดยเครื่องมือหลักอย่างหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายความไม่แน่นอนของกระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่

การจำลองสถานการณ์ (Daniel Krajzewicz et al., 2014) โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับกรวิเคราะห์ข้อมูลประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายการจราจร อาทิเช่น กระแสการจราจร มูลค่าทางการเงิน หรือมลพิษที่แพร่กระจายสู่ประชากรในพื้นที่ ทำให้สามารถประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโลกแห่งความเป็นจริง เป็นวิธีที่ลงทุนต่ำและปลอดภัยในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของการปรับเปลี่ยนที่นำเสนอและจะเกิดขึ้นในอนาคต (Capela et al., 2013)

ในปัจจุบันปัญหาทางด้านการจราจรเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อเศรษฐกิจในพื้นที่การแก้ไขปัญหาการจราจรเพียงบางด้านหรือบางพื้นที่ก็ไม่สามารถจัดการกับปัญหาการจราจรได้อย่างหมดสิ้น โดยจะต้องเป็นการแก้ไขปัญหาการจราจรแบบครอบคลุมทั้งโครงข่าย ดังนั้นการวิเคราะห์ การจัดการกับสภาพการจราจรในปัจจุบันโดยการใช้แบบจำลองจึงเป็นวิธีที่มีความสำคัญที่จะสามารถทดสอบและทดลองด้วยระบบคอมพิวเตอร์โดยเมื่อมีแบบจำลองสภาพการจราจรที่น่าเชื่อถือจะสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์สภาพการจราจรในแต่ละโครงข่ายเพื่อกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหาการจราจรหรือหาทางเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายการจราจรได้ตลอดจนสามารถใช้สำหรับการประเมินและทดสอบโครงการต่าง ๆ ได้ การจำลองสภาพการจราจรนั้นจะเป็นการใช้หลักความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความหนาแน่นและปริมาณการจราจร เป็นพื้นฐานในการจำลองแยกกันไปในแต่ละกลุ่มของยานพาหนะโดยจะมีการสุ่มพฤติกรรมการขับขี่ยานพาหนะในรูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นไปตามสภาพการจราจรในปัจจุบัน โดยมีข้อดีและข้อเสียของการสร้างแบบจำลองสภาพการจราจร ดังนี้

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองสภาพการจราจร

ข้อดีของแบบจำลองสภาพการจราจร	ข้อเสียของแบบจำลองสภาพการจราจร
สามารถวิเคราะห์สภาพการจราจรได้พร้อมกันทั้งโครงข่าย	ต้องใช้ข้อมูลด้านสภาพการจราจรจำนวนมาก เพื่อให้มีความเหมือนจริง
สามารถจำลองการเกิดอุบัติเหตุเพื่อศึกษาผลกระทบ	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองต้องใช้ความละเอียด
สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการจราจรที่มีความซับซ้อน เช่น ทางแยก	ผู้สร้างแบบจำลองต้องมีพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการใช้โปรแกรมเป็นอย่างดี
สามารถนำมาใช้ศึกษาผลกระทบสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ บนโครงข่าย	การจำลองสภาพการจราจรให้มีผลลัพธ์ที่แน่นอนต้อง
มีตัวเลือกหลากหลายตามลักษณะการใช้งาน	บางส่วนมีค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองสภาพการจราจร (ด้านความสามารถ)

ข้อดีของแบบจำลองสภาพการจราจร	ข้อเสียของแบบจำลองสภาพการจราจร
สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีลักษณะรูปแบบการให้บริการที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถคำนวณได้ทางคณิตศาสตร์	ข้อมูลที่ผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจมีผลทำให้แบบจำลองสภาพการจราจรมีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก
สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของยานพาหนะแต่ละคันที่ดีกว่าแบบกลุ่ม	ต้องใช้เวลาเป็นอย่างมากในการสร้างแบบจำลอง

ระดับของโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร

ระดับของแบบจำลองสภาพการจราจรสามารถจำแนกได้จากประเภทและขนาดของพื้นที่ที่ทำการศึกษามากกว่าแยกเดี่ยวไปสู่โครงข่ายขนาดใหญ่ การเลือกใช้โปรแกรมต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาความละเอียดและการแจกแจงการเดินทางให้มีความเหมาะสมกับระดับของแบบจำลองสภาพการจราจร โดยสามารถจำแนกโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรที่มีการนำมาใช้งานในปัจจุบันได้เป็น 3 ระดับคือระดับจุลภาค (Microscopic) ระดับมหภาค (Macroscopic) และระดับกึ่งจุลภาค (Mesoscopic) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับมหภาค (Macro simulation)

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับมหภาคมีลักษณะเป็นแผนภาพดำเนินการและภาพร่างการวางแผนสำหรับวิเคราะห์ระบบของโครงข่ายถนนขนาดใหญ่ โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับมหภาค วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (Speed) ความหนาแน่นจราจร (Density) และปริมาณจราจร (Flow) ของกลุ่มยานพาหนะที่เล่นอยู่ภายในเครือข่าย นำเสนอผลลัพธ์ตามที่กำหนดผ่านการวิเคราะห์ตัวแปรความสัมพันธ์ของตัวแปรการจราจรทั้ง 3 ด้านข้างต้น โดยไม่ได้พิจารณาพฤติกรรมของยานพาหนะแยกทีละคัน เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการศึกษาในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือโครงข่ายถนนสายหลัก แบบจำลองสภาพการจราจรระดับมหภาคอธิบาย การรายละเอียดยานพาหนะ กิจกรรมและการโต้ตอบในระดับต่ำ ในลักษณะการแสดงผลทางข้อมูล เช่น ความเร็ว การไหล และความหนาแน่น (Behrisch, Bieker-Walz, Erdmann, & Krajzewicz, 2011) แบบจำลองการจราจรระดับมหภาคเหมาะสำหรับการนำมาใช้เมื่อไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลโดยละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมของยานพาหนะแต่เป็นเพียงการประเมินโดยทั่วไปของกระแสการรับส่งข้อมูลในเครือข่าย เหมาะสมสำหรับการวางแผนการขนส่งระดับภูมิภาค (Capela et al., 2013)

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับกึ่งจุลภาค (Meso simulation)

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับกึ่งจุลภาค เป็นการผสมผสานรูปแบบการดำเนินการระหว่างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับมหภาคและแบบจำลองระดับจุลภาค โดยการวิเคราะห์โครงข่ายการจราจรขนาดใหญ่แบบการจำลองระดับจุลภาคและใช้ค่าต่าง ๆ ที่มีความละเอียดแบบจำลองระดับจุลภาค เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีลักษณะผสมทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กพร้อมกันหรืออาจหมายถึงเส้นทางสายหลักและเส้นทางสายรองด้วยก็ได้แต่ไม่สามารถแสดงข้อมูลที่มีความละเอียดในระดับพฤติกรรมของยานพาหนะแต่ละคันเหมือนกับแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคได้ แบบจำลองสภาพการจราจรระดับกึ่งจุลภาค (Meso Simulation) สามารถแสดงรายละเอียดของยานพาหนะส่วนใหญ่ได้ในรายละเอียดสูงแต่อธิบายกิจกรรมและการโต้ตอบในระดับที่ต่ำ (Behrisch et al., 2011)

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Micro simulation)

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรสำหรับพื้นที่การศึกษาขนาดเล็กสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อกำหนดนโยบายทางด้านการจราจรต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย วัตถุประสงค์วัตถุประสงค์ที่มีความละเอียดและแสดงถึงพฤติกรรมยานพาหนะแต่ละคันได้ดี แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็นแบบจำลองสภาพการจราจรที่มีความละเอียดสูง ให้ความสำคัญกับการจำลองพฤติกรรมของยานพาหนะในแต่ละคันได้ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานการจำลองการเคลื่อนที่ตามกันของยานพาหนะ (Car following) และการจำลองการเปลี่ยนช่องจราจร (Lane changing) กล่าวคือการขับขึ้นของยานพาหนะคันหน้าที่มีการเพิ่มและลดความเร็วจะส่งผลโดยตรงกับยานพาหนะที่ขับตามมา การสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการสร้างแบบจำลองและให้ความสำคัญกับการกระจายตัวทางสถิติของยานพาหนะ การกำหนดต้นทางปลายทางของยานพาหนะแต่ละประเภทและลักษณะของการขับขึ้นจำเป็นต้องมีการปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Micro simulation) สามารถอธิบายทั้งข้อมูลรายละเอียดของระบบและการโต้ตอบระหว่างยานพาหนะกับเส้นทางได้ในรายละเอียดระดับสูง แสดงผลลัพธ์ของรูปแบบของยานพาหนะและการเปลี่ยนช่องทางได้เป็นอย่างดี (Behrisch et al., 2011) แบบจำลองขนส่งสินค้าระดับจุลภาคนำเสนอข้อมูลโดยประมาณแต่เชื่อถือได้และมีรายละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมของยานพาหนะแต่ละคัน จึงเหมาะสมกับการศึกษาระบบการจราจรในพื้นที่ไม่กว้าง (Capela et al., 2013)

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงพฤติกรรมของประชากรในเขตเมืองอย่างละเอียด พบว่ามีวิถีชีวิตที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเดินทางภายในเมืองทั้งการทำงานและการพักผ่อน เนื่องจากความต้องการเหล่านี้ การวางผังถนนในเมืองจึงกลายเป็นประเด็นสำคัญในช่วง

หลายทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากหลักฐานในอดีตบ่งชี้ว่าเครื่องข่ายทางถนนส่วนใหญ่ไม่ได้รับการดูแลและออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ก่อให้เกิดปัญหา เช่น ถนนแคบเกินกว่าขนาดของยานพาหนะ ไม่มีพื้นที่สำหรับการจอดรถและการไม่มีเส้นทางขนส่งที่เพียงพอสำหรับสถานที่สำคัญบางแห่งทำให้การวางแผนเครือข่ายถนนในเมืองเป็นปัญหาที่ซับซ้อนมาก เมื่อเชื่อมโยงกับปัญหาความแออัดของการจราจรที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวันของประชาชน โดยเฉพาะในพื้นที่เขตเมืองมากที่สุด ส่งผลให้คุณภาพการใช้ชีวิตลดลงและก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพทั้งทางกายและจิตใจ อาทิเช่น ความหงุดหงิด ความเครียด และอื่น ๆ นอกจากนี้ ความแออัดเหล่านี้ยังนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วยการปล่อย CO₂ ที่เพิ่มขึ้นตลอดจนสารเคมีที่ก่อมลพิษอื่น ๆ ปัญหาด้านเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นจากการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากสภาพการจราจรที่หนาแน่นในทุกช่วงเวลาสัมพันธ์กับราคาน้ำมันดิบที่เพิ่มสูงขึ้น (Capela et al., 2013) ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองสภาพการจราจรในแต่ละระดับ ผู้ใช้ควรศึกษาเพื่อพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้และความเหมาะสมในการวิเคราะห์สภาพการจราจร เช่น ขนาดของพื้นที่ทำการศึกษารูปแบบของการศึกษา ลักษณะการเดินทาง ประเภทของยานพาหนะในแบบจำลองตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจำลองสถานการณ์ โดยสามารถสรุปความแตกต่างและความเหมาะสมในการเลือกใช้ของแบบจำลองสภาพการจราจรทั้ง 3 ระดับ ได้ดังนี้

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของแบบจำลองสภาพการจราจรในแต่ละระดับ

ประเด็นในการเปรียบเทียบ	ระดับของแบบจำลองสภาพการจราจร		
	ระดับมหภาค (Macro simulation)	ระดับกึ่งจุลภาค (Meso simulation)	ระดับจุลภาค (Micro simulation)
ระดับการวิเคราะห์	วางแผน ออกแบบและก่อสร้าง	วางแผน ออกแบบและก่อสร้าง	วางแผนและก่อสร้าง
ขอบเขตของการวิเคราะห์	วิเคราะห์แนวตามยาวของถนนโครงข่ายถนนสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่และภูมิภาค	วิเคราะห์บางส่วนของโครงข่าย สำหรับโครงข่ายขนาดเล็กที่ร่วมกับภูมิภาค	วิเคราะห์ส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงข่ายถนนสำหรับโครงข่ายขนาดเล็ก
สิ่งอำนวยความสะดวกในการจำลอง	ถนนสายหลัก ทางหลวง ทางด่วน และช่องจราจรเฉพาะ	ทางแยกเดี่ยว ถนนสายหลัก ทางหลวง ทางด่วน	ทางแยกเดี่ยว วงเวียน ถนนสายหลัก ทางหลวง ทางด่วน
การประยุกต์ใช้งาน	ทางด่วน ถนนสายหลัก	ทางด่วน ถนนสายหลัก ทางแยกหลัก	ทางแยกหลัก ทางหลัก อุบัติการณ์

ตัววัดประสิทธิภาพการจราจร

การจำลองสภาพการจราจรของเส้นทางแต่ละครั้งจะได้ผลลัพธ์ที่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากพฤติกรรมของยานพาหนะและสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับระบบการจราจรล้วนส่งผลให้เกิดความแตกต่างกัน ผู้พัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรอาจสังเกตความเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนถนนหรือความยาวแถวคอยที่เกิดขึ้นจากหน้าจอแสดงผล แต่เป็นการยากที่จะสามารถระบุผลลัพธ์ของการจำลองสภาพการจราจรว่ามีประสิทธิภาพดีหรือมีผลกระทบต่อการจราจรในบริเวณทางแยกของถนนอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาพรวมของการจำลองสภาพการจราจรมีความแตกต่างกันไม่มาก เช่น การปรับเปลี่ยนรูปแบบและความยาวรอบสัญญาณไฟจราจร การกำหนดนโยบายห้ามเลี้ยวที่บริเวณทางแยก เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจำลองสภาพการจราจรได้ โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรที่ดีจึงจำเป็นต้องสามารถสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพการจราจรในเชิงปริมาณที่เรียกว่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจราจร (Performance indicators) สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

ตารางที่ 6 ตัววัดประสิทธิภาพการจราจรจำแนกตามวัตถุประสงค์ในการควบคุม

วัตถุประสงค์ของการควบคุม	ตัววัดประสิทธิภาพการจราจร
ประสิทธิภาพ (Efficiency)	ความเร็ว
	ระยะเวลาที่ใช้เดินทาง
	ระดับความแออัด
	ความผันแปรของเวลาที่ใช้เดินทาง
	ความยาวแถวคอย
ความปลอดภัย (Safety)	ระยะห่างระหว่างยานพาหนะในหน่วยเวลา
	จำนวนครั้งที่เกิดอุบัติเหตุ
	ความรุนแรงของอุบัติเหตุ
	จำนวนครั้งที่ชนกัน
	ความปลอดภัยของคนเดินเท้า
สิ่งแวดล้อม (Environment)	อัตราการปล่อยมลพิษจากรถยนต์
	ระดับความดังของเสียงที่เกิดขึ้น
ความสะดวกสบาย (Comfort)	ความสะดวกสบายที่ได้รับจากการใช้บริการ
	ความเครียดของผู้ใช้บริการ

ความหมายของแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคคือการจำลองเครือข่ายระบบการขนส่งในพื้นที่ขนาดเล็กเพื่อเรียนรู้พฤติกรรมของยานพาหนะแต่ละประเภทภายในเครือข่ายทั้งการเคลื่อนที่แบบพลวัตและแบบสุ่ม ด้วยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่ตามกันของยานพาหนะและการเปลี่ยนช่องทางจราจร การใช้สถานการณ์สมมติในการวิเคราะห์ปัญหาสภาพการจราจรในปัจจุบันและปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต สามารถประหยัดเวลาและงบประมาณในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้กับผู้ที่เกี่ยวข้อง โดยแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็นการจำลองสภาพการจราจร (Traffic simulation) โดยเป็นการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมและลักษณะในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นจริงบนท้องถนนหรือบนโครงข่ายของถนน เพื่อเป็นการนำแบบจำลองที่ตั้งขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์สภาพการจราจรที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบัน เป็นการนำเสนอภาพของสภาพการจราจรโดยการสังเกตและการเก็บข้อมูลทางสถิติ การจำลองพฤติกรรมและลักษณะในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะถูกพิจารณาเป็นช่วงเวลา โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการเคลื่อนที่และพฤติกรรมในการขับขี่ของยานพาหนะแต่ละคัน การจำลองสภาพการจราจรที่มีความละเอียดและซับซ้อนโดยมีพื้นฐาน การจำลองมาจากทฤษฎีการเคลื่อนที่ตัวตามกันของรถ (Car-following) การเปลี่ยนช่องทางจราจร (Lane changing) และระยะระหว่างรถที่ยอมรับได้ (Gap acceptance) โดยจะคำนึงถึงพฤติกรรมของยานพาหนะในแต่ละชั้นเป็นหลัก

ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ตัวอย่างเช่น ปริมาณยานพาหนะบนท้องถนน ระดับการให้บริการของถนน ระยะเวลาในการเดินทาง ความล่าช้าในการเดินทาง ความยาวแถวคอย การจัดการสัญญาณไฟจราจร เป็นต้น กล่าวคือแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคใช้แนวคิดของการรับรู้ของแต่ละบุคคล เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการขับขี่ในแบบจำลองโดยแบบจำลองจะทำการกำหนดให้ผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่เล่นตามมาที่หลังเริ่มเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการขับขี่ เช่น ลดความเร็ว การชะลอรถ การหยุดรถ ของรถคันหน้า ที่จะมีผลต่อการขับขี่ของรถคันที่ขับตามมาแต่ก็จะไม่มีผลต่อการขับขี่ของผู้ขับขี่ที่ได้รับผลกระทบมาจากพฤติกรรมการขับขี่ของยานพาหนะ จะทำให้ระยะห่าง (Distance) และความแตกต่างระหว่างความเร็ว (Speed difference) ของยานยนต์ที่เล่นตามกันเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 สภาวะ ดังต่อไปนี้

1. สภาวะการขับขี่แบบอิสระ (No reaction) เป็นสภาวะที่ผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่เคลื่อนที่ตามหลังไม่ได้รับอิทธิพลจากยานยนต์คันที่ถูกสังเกตซึ่งอยู่ข้างหน้าทำให้ผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่เล่นตามหลังสามารถเลือกใช้ความเร็วได้ตามต้องการ (Desired Speed) และจะพยายามรักษาระดับความเร็วนั้นไว้

2. สภาวะการขับขี่ขณะเข้าใกล้ยานยนต์ที่อยู่ข้างหน้า (Reaction) เป็นสภาวะที่ผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่แล่นตามหลังได้รับอิทธิพลจากยานยนต์การที่ถูกสังเกตซึ่งอยู่ข้างหน้าทำให้ต้องลดความเร็วลงหลังจากที่เริ่มรับรู้ว่ายานยนต์คันที่ถูกสังเกตมีความเร็วต่ำกว่าจนความเร็วของยานยนต์ทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน ในระยะห่างที่เท่ากับระยะปลอดภัยที่ต้องการ (Desired safety distance) ของผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่แล่นตามหลัง

3. สภาวะการขับขี่ตามกันไป (Unconscious reaction) เป็นสภาวะที่ผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่แล่นตามหลังพยายามที่จะรักษาระยะห่างปลอดภัยตามที่ต้องการไว้โดยความแตกต่างระหว่างความเร็วของยานยนต์ทั้ง 2 คันจะแกว่งอยู่ใกล้ ๆ ค่าสูง

4. สภาวะเบรก (Deceleration and collision) เป็นสภาวะที่ผู้ขับขี่ยานยนต์คันที่แล่นตามหลังลดความเร็วลงโดยใช้อัตราหน่วยที่สูงกว่าปกติ หลังจากที่ได้รับรู้วาระยะห่างจากยานยนต์การที่อยู่ข้างหน้าลดความเร็วลงอย่างทันทีทันใดเนื่องจากมียานยนต์จากช่องทางจราจรอื่นเปลี่ยนช่องทางจราจรเข้ามาอยู่ข้างหน้าอย่างยานยนต์คันที่ถูกสังเกตดังกล่าว

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคในปัจจุบันได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นรูปแบบการจำลองสภาพการจราจรที่มีความแม่นยำสูง สามารถกำหนดตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่มีความเหมาะสมกับสภาพการจำลองและนำมาใช้กำหนดนโยบายทางการจราจรได้เป็นอย่างดี โดยโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านการวิจัยและการกำหนดนโยบายทางการจราจร ได้แก่โปรแกรม Simulation of Urban Mobility หรือ SUMO เป็นเครื่องมือจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคที่สามารถนำมาใช้กำหนดแนวทางการวางแผนการจราจรปริมาณสูงให้เคลื่อนที่ผ่านเครือข่ายถนนขนาดใหญ่ในพื้นที่เขตเมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้โปรแกรมจำลองสภาพการจราจร SUMO ยังมีโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคที่นิยมอื่น ๆ เช่น โปรแกรม VISSIM และ โปรแกรม TRANSIMS เป็นต้น (Capela et al., 2013) ดังนั้นผู้วิจัยได้สรุปและคัดเลือกโปรแกรมสำคัญที่มีการนำมาใช้อย่างต่อเนื่องกับงานวิจัยได้ ดังนี้

โปรแกรม TRANSIMS (TRansportation ANalysis and SIMulation System) เป็นโปรแกรมจำลองระบบสภาพการจราจรแบบบูรณาการที่ไม่มีค่าใช้จ่ายที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ระบบการขนส่งในระดับภูมิภาคได้ สนับสนุนกระบวนการทั้งหมดของการสร้างแบบจำลองและการจำลองการขนส่งจากข้อมูลกลุ่มประชากรสังเคราะห์ ผ่านการสร้างกิจกรรมการขนส่งไปจนถึงการจำลองการจราจรขนาดเล็ก โดยปกติกระบวนการจะดำเนินการซ้ำ ๆ เพื่อให้ได้สมดุลของระบบ (Equilibrium assignment) ตามหลักการกำหนดสมดุล (Equilibrium assignment) กำหนดปริมาณการใช้ข้อมูลให้กับเส้นทางและจุดเชื่อมโยงที่มีสาระสำคัญคือผู้เดินทางจะพยายามค้นหา

เส้นทางที่สั้นที่สุดจากต้นทางไปยังปลายทางและสมดุลของเครือข่ายเกิดขึ้นเมื่อไม่มีผู้เดินทางคนใดสามารถเปลี่ยนเส้นทางใหม่ได้ โดยเงื่อนไขเหล่านี้เรียกว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ใช้นี้ เนื่องจากผู้ใช้นี้จะไม่ได้รับผลจากการเปลี่ยนเส้นทางเดินทางเมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถประเมินการปล่อยมลพิษโดยพิจารณาจากผลการจำลอง สภาพการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โปรแกรม TRANSIMS ประกอบด้วยหน่วยประกอบของ โปรแกรม (Modules) จำนวนมาก โดยหนึ่งในหน่วยประกอบที่สำคัญคือหน่วยประกอบสำหรับการจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Traffic micro-simulator) ที่นำมาใช้สำหรับการจำลอง การจราจรระดับจุลภาค อ้างอิงทฤษฎีเซลลูลาร์ออโตมาตา (Cellular automata) และใช้โมเดล Nagel-schreckenberg ครอบคลุมการเปลี่ยนช่องเดินรถของยานพาหนะและคุณลักษณะหลักของ แบบจำลองคือการแบ่งเวลาและพื้นที่ของแต่ละเส้นทางเชื่อมต่อ การแยกพื้นที่การดำเนินการเป็น รายยานพาหนะทำให้เกิดการแยกพารามิเตอร์ของยานพาหนะ เช่น ความยาว ความเร็วสูงสุดและ ตัวแปรสถานะของยานพาหนะ (Vehicle state variables) เช่น ตำแหน่งและความเร็วของ ยานพาหนะ ตัวโปรแกรมสามารถแสดงคุณสมบัติของแบบจำลอง การไหลของสภาพการจราจร ระดับมหภาคได้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการจำลองเครือข่ายระดับภูมิภาคที่มีขนาดใหญ่และ ซับซ้อนหรือแม้แต่ระดับประเทศได้ (Maciejewski, 2010)

VISSIM เป็นโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเชิงพาณิชย์สำหรับโดยมี วัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (Car following) ของพื้นที่ที่ กำหนด สามารถนำมาใช้งานวิจัยได้อย่างหลากหลาย อาทิเช่น การศึกษาจำลองพฤติกรรมจราจรที่ พิจารณาถึงอิทธิพลของการรับรู้ของผู้ขับขี่ที่มีต่อการควบคุมความเร็วและการตอบสนองต่อ การเปลี่ยนช่องเดินรถของผู้ขับขี่ โปรแกรม VISSIM จะแสดงข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองใน รูปแบบเครือข่ายถนนที่ประกอบด้วยแผนภูมิของโหนด (Vertices) และจุดเชื่อมโยง (Edges) สำหรับนำมาใช้ในการสร้างโครงสร้างของทางเชื่อมแบบเดินรถทางเดียว (One-Way) ที่เชื่อมต่อกับ จุดเชื่อมต่อ (Connectors) ทำให้ผู้วิจัยสามารถสร้างแบบจำลองของระบบเครือข่ายการขนส่งสินค้า ในเกือบทุกโครงสร้าง รวมทั้งวงเวียน โปรแกรม VISSIM มีตัวเลือกการทำงานสำหรับ การสร้าง แบบจำลองตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบตัวควบคุมเวลาคงที่และตัวควบคุมสัญญาณไฟที่ ปรับเปลี่ยนตามสภาพการจราจร นอกเหนือจากความสามารถในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง พื้นฐานถนนที่มีประสิทธิภาพ โปรแกรมมีความสามารถในการปรับคุณสมบัติของยานพาหนะที่เข้าสู่ แบบจำลอง อนุญาตให้จำลองยานพาหนะ 2 ล้อ รถรางและคนเดินถนน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และหาได้ยากในเครื่องมือสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคอื่น ๆ ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการตามขั้นตอนซ้ำของการกำหนดการรับส่งข้อมูลแบบพลวัต

(Dynamic traffic assignment) และความสามารถด้านกราฟิกสำหรับการสร้างแอนิเมชันที่มีรายละเอียดสูงได้ (Maciejewski, 2010)

SUMO (Simulation for Urban MObility) เป็นโปรแกรมจำลองการไหลของการจราจรระดับจุลภาคที่เปิดให้ผู้ที่สนใจเข้าร่วมใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย พัฒนาโดย German Aerospace Center (DLR) ประกอบด้วยการกำหนดระยะเวลาปลอดภัยของการเคลื่อนที่ยานพาหนะตามกันด้วยรูปแบบ Krauss model ส่วนต่อขยายของ Gipps model และ Krajzewicz model สำหรับการเปลี่ยนช่องเดินรถ โปรแกรม SUMO รองรับวิธีการแบบพื้นที่ไม่ต่อเนื่อง (Space-discrete) และเวลาไม่ต่อเนื่อง (Time-discrete) ระบบนี้ช่วยให้สามารถเลือกใช้การจำลองสำหรับยานพาหนะประเภทต่าง ๆ การจำลองประเภททางแยกต่าง ๆ ที่มีหรือไม่มีสัญญาณไฟจราจร สำหรับเครือข่ายที่มีจำนวนเส้นทางการเชื่อมต่อเกิน 10,000 เส้นทาง นอกจากนี้โปรแกรม SUMO ยังมีขั้นตอนสำหรับการกำหนดการรับส่งข้อมูลแบบพลวัตและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานในรูปแบบการแสดงผลภาพกราฟิก 2 มิติของการจำลองการจราจร (Maciejewski, 2010)

โดยโปรแกรมดังกล่าวข้างต้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่มีใช้ในการจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค โปรแกรมที่คัดเลือกมานั้นมีความแตกต่างกันในการใช้งานและประสิทธิภาพในการแสดงผล ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์เลือกโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบโปรแกรมแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค โดยมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติ ประสิทธิภาพในการใช้งาน และความเหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาในการใช้งาน พร้อมทั้งข้อดีและข้อด้อยในการใช้งานจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคมีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรม คุณลักษณะเฉพาะของโปรแกรม ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสภาพการจราจร ยานพาหนะที่จำเป็นสำหรับการสร้างโครงข่ายระบบถนนและข้อจำกัดการใช้งานของแต่ละโปรแกรม อย่างไรก็ตามบ่อยครั้งความนิยมของโปรแกรมถูกวัดโดยจำนวนการดาวน์โหลด ตัวบ่งชี้นี้มีข้อเสียบางประการเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นเพราะไม่ทราบว่ามีผู้ใช้หรือผู้ย่นต์ซอฟต์แวร์ดาวน์โหลดซอฟต์แวร์และเพื่อวัตถุประสงค์ใด

Maciejewski (2010) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคของเครือข่ายถนน การกำหนดการไหลของยานพาหนะทั้งข้อมูลด้านปริมาตรและการกระจายประเภทของยานพาหนะขาเข้าจากตำแหน่ง (Node) ขอบเขตแต่ละโหนดจะถือว่ามีปริมาณเท่ากับการไหลที่วัดได้ที่บริเวณทางแยกที่ใกล้ที่สุด โดยในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยพบว่าขั้นตอนการสร้างปริมาณการจราจรในโปรแกรม SUMO ค่อนข้างตรงไปตรงมาและเข้าใจได้ง่ายมากที่สุดเมื่อ

เทียบกับโปรแกรมอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ โดยโปรแกรม SUMO สามารถนำเสนอฟังก์ชัน JTRROUTER (Junction Turning Ratios ROUTER) ที่อำนวยความสะดวกในการสร้างเส้นทาง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนการเลี้ยวและการไหลเข้า สำหรับโปรแกรม VISSIM นำเสนอแนวทางที่แตกต่างจากโปรแกรม SUMO แต่ยังคงถือว่าค่อนข้างง่ายโดยการกำหนดความหมายของกระแสการจราจรที่จะเข้าสู่แบบจำลองผ่านฟังก์ชันการสร้างยานพาหนะและกำหนดอัตราส่วนการเลี้ยวของทางแยกพร้อมการตัดสินใจเส้นทางและโปรแกรม TRANSIMS มีฟังก์ชันการทำงานที่มีประสิทธิภาพและใช้งานได้หลากหลายแต่ไม่มีเครื่องมือที่สร้างการเข้าของยานพาหนะตามอัตราส่วนการเลี้ยวเนื่องจากเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบของโปรแกรมโดยทั่วไปโปรแกรม VISSIM ช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองและการจำลองที่มีความแม่นยำที่สุดโดยเน้นที่ความสมจริงในระดับสูงเกี่ยวกับเครือข่ายถนน ยานพาหนะและผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตามความแม่นยำดังกล่าวต้องแลกมาด้วยความเร็วการจำลองที่ต่ำและขอบเขตพื้นที่การจำลองที่จำกัดมาก แตกต่างกับโปรแกรม TRANSIMS ที่การไหลของกระแสจราจรของแบบจำลองสภาพการจราจรจุลภาคแสดงผลเป็นภาพกว้างแต่มีรายละเอียดน้อยที่สุดในขณะเดียวกันการแสดงผลการจำลองสภาพการจราจรของโปรแกรมที่มีรายละเอียดน้อยจะส่งผลให้การจำลองมีความความเร็วสูงและรองรับการประมวลผลหลายตัว ดังนั้นโปรแกรม TRANSIMS จึงเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการจราจรทั่วภูมิภาคที่มียานพาหนะจำนวนมากในระบบ อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคที่มีปริมาณยานพาหนะค่อนข้างมากคือโปรแกรม SUMO ถือได้ว่าเป็นโปรแกรมที่มีการประนีประนอมที่สมเหตุสมผล สามารถจำลองยานพาหนะในพื้นที่ต่อเนื่องตามแบบจำลองและสามารถเปิดใช้งานการจำลองสำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่ แม้แต่ในระดับภูมิภาคได้ จากมุมมองของผู้ใช้งานโปรแกรม VISSIM นั้นเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน มีสภาพแวดล้อมและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานในรูปแบบกราฟิกที่มีประสิทธิภาพและใช้งานง่ายสามารถรองรับเครือข่ายในรูปแบบ 2 มิติและการแสดงภาพจำลองในรูปแบบ 3 มิติ จึงมีความเหมาะสมสำหรับทั้งผู้เริ่มต้นและผู้ใช้ที่มีประสบการณ์ ในทางกลับกันโปรแกรม SUMO และ TRANSIMS มีจุดเด่นในการเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สที่มีความอิสระในการใช้งานค่อนข้างมากสามารถช่วยให้ผู้สร้างแบบจำลองสามารถวิเคราะห์ แก้ไขและสามารถผสมผสานรวมกับซอฟต์แวร์ภายนอกได้ง่ายขึ้นมาก โดยทั้งโปรแกรม SUMO และโปรแกรม TRANSIMS เป็นโปรแกรมที่ให้บริการโดยไม่มีค่าใช้จ่ายในขณะที่โปรแกรม VISSIM เป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่มีราคาสูงเหมาะกับองค์กรขนาดใหญ่ โดยมีผลการเปรียบเทียบรายละเอียดเพิ่มเติมระหว่างทั้ง 3 ระบบ รวมถึงปัจจัยทั้งหมดที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองและผลลัพธ์สุดท้าย ดังนี้

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

Topic	TRANSIMS	SUMO	VISSIM
ประเภทของการจำลอง	ไม่ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง
ระดับความสมจริง	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
การรองรับยานพาหนะ	ไม่รองรับ	ไม่รองรับ	รองรับ
ตัวแทนเครือข่าย	Link&Node	Link&Node	Link&Connector
เส้นทางวงเวียนและทางแยก	ค่อนข้างแม่นยำ	ค่อนข้างแม่นยำ	แม่นยำ
ความเร็วในการจำลอง	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
พื้นที่ขอบเขตสูงสุด	ภูมิภาคและประเทศ	เมืองและภูมิภาค	อำเภอและพื้นที่ขนาดเล็ก
การสร้างแบบจำลอง	ผ่านไฟล์ข้อความ	ผ่านไฟล์ XML	ผ่านกราฟิก
การสร้างภาพจำลอง	ออฟไลน์และ 2 มิติ	ออฟไลน์ 2 มิติ และ 3 มิติ	ออฟไลน์ 2 มิติ และ 3 มิติ
การใช้ข้อมูล OD	รองรับ	ไม่รองรับ	รองรับ

จากการศึกษาการพัฒนาโปรแกรมล่าสุดพบว่าโปรแกรม SUMO เป็นโปรแกรมที่มีศักยภาพและสามารถนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ โดยการเลือกใช้โปรแกรม SUMO ส่วนหนึ่งเป็นผลจากลักษณะเชิงพาณิชย์ของ VISSIM ที่มีราคาสูงแต่แลกมากับประสิทธิภาพที่ดีรวมถึงการพัฒนาล่าสุดที่สามารถจัดซื้อเสียบางประการของโปรแกรม SUMO จากรุ่นของโปรแกรมก่อนหน้า (Capela et al., 2013)

Archana. (2022) ศึกษาปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการยอมรับเทคโนโลยีสมาร์ตกริด (Smart Grid) ในอินเดียจากมุมมองของผู้บริโภค โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณผ่านการสำรวจความคิดเห็นของผู้บริโภคจำนวน 221 คน เครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis: EFA) เพื่อระบุโครงสร้างของอุปสรรค และเทคนิค Total Interpretive Structural Modeling (TISM) ร่วมกับการวิเคราะห์ MICMAC เพื่อจัดลำดับความสัมพันธ์ของอุปสรรคอย่างเป็นระบบ

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการไหลของยานพาหนะ เส้นทาง ระดับของถนน ความเร็ว และความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลสำหรับสถานการณ์การจราจรต่าง ๆ ได้ศึกษา

ขีดความสามารถของเครือข่ายถนนปัจจุบัน (Chandra & Shukla, 2012) โดยมีรายละเอียดของการศึกษา ดังนี้

โปรแกรม HETEROSIM Simulator เป็นโปรแกรมจำลองการจราจรที่แตกต่างกันซึ่งอนุญาตให้มีการเคลื่อนตัวของรถจราจรในช่องจราจรน้อยลงและยานพาหนะที่ต่างกันได้รับการพัฒนาโดยใช้ภาษาโปรแกรม C++ ในโปรแกรม HETEROSIM ยานพาหนะจะแสดงเป็นลักษณะบล็อก 4 เหลี่ยม ผู้สร้างแบบจำลองจำเป็นต้องระบุความยาวและความเร็วสำหรับยานพาหนะทุกคันในแบบจำลอง การเคลื่อนตัวของรถจราจรบนถนนที่มีระเบียบวินัยน้อยได้รับการสนับสนุนโดยใช้รูปแบบการติดตามและการแซงยานพาหนะตามตำแหน่ง ซึ่งเป็นรูปแบบที่สมจริงที่สุดสำหรับการแสดงสถานการณ์การจราจรในอินเดียหรือในพื้นที่ที่มีการจราจรคับคั่งและไม่มีระเบียบโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการใช้ยานพาหนะ 2 ล้อเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามโปรแกรมจำลองไม่พร้อมใช้งานเป็นโอเพ่นซอร์สสำหรับผู้ทั่วไปหรือนักศึกษาและมีการตั้งค่าการจำลองที่ซับซ้อนแก้ไขได้ยาก รูปแบบการแซงของยานพาหนะในแบบจำลองไม่สามารถปรับแต่งได้โดยหากพิจารณาจากข้อจำกัดทั้งหมด โปรแกรม HETEROSIM จึงเหมาะสมสำหรับการจำลองการรับส่งข้อมูลขนาดเล็กเท่านั้น

โปรแกรม SUMO Simulator เป็นโปรแกรมจำลองการจราจรบนถนนไม่เสียค่าใช้จ่าย (Open source) ที่สามารถให้ผู้ใช้งานทั่วไปหรือ โปรแกรมมีขนาดเล็ก ออกแบบมาเพื่อจัดการกับสถานการณ์จำลองขนาดใหญ่ได้ดี SUMO มีแอปพลิเคชันสนับสนุนมากมายที่ช่วยในการเตรียมแบบจำลองการจำลองการจราจรระดับจุลภาคแบบละเอียด สามารถกำหนดพารามิเตอร์เครือข่ายถนน เช่น จำนวนช่องจราจร ความยาว ประเภทยานพาหนะที่อนุญาตและสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของยานพาหนะในแบบจำลอง เช่น ประเภทยานพาหนะ ความเร่ง ความยาว ความเร็วสูงสุด เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดเส้นทางและพารามิเตอร์การไหลของรถ สิทธิผ่าน, สิทธิการไปก่อน (Right-of-way) สัญญาณไฟจราจรได้อย่างอิสระ มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (Car following model) และรูปแบบการแซงยานพาหนะ (Overtaking model) ที่หลากหลาย โปรแกรม SUMO มีส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟิกที่ใช้ OpenGL ที่มีความเร็วในการดำเนินการที่รวดเร็ว การทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันอื่น ๆ ในขณะที่ใช้งานโดยใช้อินเทอร์เฟซ TRACI และระดับเส้นทาง (Edge level) ระดับยานพาหนะ (Vehicle level) และผลลัพธ์จากเครื่องตรวจจับ (Detector level outputs) เป็นคุณสมบัติที่โดดเด่น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญของโปรแกรมจำลอง SUMO คือรองรับเฉพาะการจราจรในช่องทางและบังคับใช้วินัยของช่องทางในการเคลื่อนตัวของยานพาหนะทั้งหมด

โปรแกรม SIMTram ได้รับการพัฒนาโดยกลุ่มวิจัยด้านการขนส่งที่ IIT Bombay โดยการปรับ SUMO เวอร์ชัน 0.12 เพื่อรองรับการเคลื่อนตัวของรถจราจรในช่องทางที่มีระเบียบวินัยน้อย รองรับคุณสมบัติทั้งหมดที่มีใน SUMO เพื่อแสดงถึงสถานการณ์การจราจรของอินเดียใน

ลักษณะที่สมจริงมากขึ้น โปรแกรม SIMTraM แบ่งความกว้างช่องทางตามจำนวนแถบที่กำหนดได้ และเชื่อมโยงจำนวนแถบคงที่กับรถทุกประเภทตามความกว้างของรถ ข้อบกพร่องที่สำคัญของ โปรแกรม SIMTraM คืออาจพบข้อผิดพลาดในขณะที่ทำงานภายใต้บางเงื่อนไข โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในขณะที่จำลองยานพาหนะจำนวนมาก รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร

ตัวชี้วัด	HETEROSIM	SUMO	SIMTraM
การเคลื่อนที่ของ การจราจร	มีวินัยในเลนน้อย	มีวินัยในเลน	มีวินัยในเลนน้อย
เครือข่ายถนน	สร้างด้วยมือ	สร้างด้วยตนเองหรือ นำเข้าจากแผนที่	สร้างด้วยตนเองหรือนำเข้า จากแผนที่
รายละเอียดรถ	ยานพาหนะมีคุณสมบัติ เหมือนกัน	รองรับคุณลักษณะ ต่างกัน	รองรับคุณลักษณะต่างกัน
คำอธิบายเส้นทาง	เส้นทางเดียวกันสำหรับ ยานพาหนะทั้งหมด	เส้นทางที่กำหนดเอง	เส้นทางที่กำหนดเอง

ประสิทธิภาพของของโปรแกรมจำลองสภาพภูฏัดด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้าน การจราจร เช่น การไหลของยานพาหนะ ความเร็ว และความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลภายใต้ สถานการณ์การจราจรของอินเดียที่เป็นตัวแทน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าโปรแกรม SUMO ช่วยให้มีความหนาแน่นของรถสูงขึ้นพร้อมความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่สมจริงยิ่งขึ้น สำหรับทุกสถานการณ์การจราจรและมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับการจำลองภายใต้ สถานการณ์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค Simulation of Urban Mobility

โปรแกรม Simulation of Urban MObility หรือ SUMO เป็นโปรแกรมจำลองสภาพ การจราจรระดับจุลภาค ที่มีความสามารถในการสร้างโครงข่ายของเส้นทางการจราจรรูปแบบ ต่าง ๆ เช่น ทางถนน ทางราง เพื่อจำลองและวัดผลลัพธ์การเคลื่อนที่ของประเภทยานพาหนะในเส้นทาง (Archana et al., 2022) โดยอาศัยข้อมูลพิกัดเส้นทางและพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดย Wongchavalidkul and Siewwuttanagul (2021) โดยโปรแกรม SUMO เป็นโปรแกรมที่มี ความยืดหยุ่นสูงและสามารถปรับเปลี่ยนการทำงานเพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลาย

ของผู้ใช้งานได้และมีจุดเด่นคือความรวดเร็วในการสร้างแบบจำลองจากชุดคำสั่งที่โปรแกรมมีให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางเลือกเส้นทางและการพยากรณ์การจราจรตามช่วงเวลา เช่น การนำมาใช้ในการพยากรณ์ปริมาณการจราจรที่เกิดขึ้นในโครงข่ายเส้นทางเพื่อหาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Josep, 2013)

โปรแกรม SUMO เป็นโปรแกรมการจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคสำหรับการรับส่งข้อมูลแบบไม่เสียค่าใช้จ่าย (Opensource) โปรแกรม SUMO สามารถนำมาใช้สำหรับช่วยตรวจสอบหัวข้อการวิจัยต่าง ๆ เช่น ทางเลือกเส้นทางและชุดคำสั่งสัญญาณไฟจราจร การจำลองการสื่อสารของยานพาหนะ สามารถนำมาใช้วางแผนในโครงการต่าง ๆ เพื่อจำลองกลยุทธ์การจัดการจราจร (Behrisch et al., 2011)

โปรแกรม Simulation of Urban Mobility หรือ SUMO ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคประเภทไม่เสียค่าใช้จ่าย (Opensource) ที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสำหรับการจำลองเครือข่ายการจราจรในเมืองสำหรับการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ Krajzewicz (2014) คุณสมบัติและจำนวนของเครื่องมือที่มีให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การจำลองมีความสมจริงมากขึ้น ในสถานะปัจจุบัน ฟังก์ชันต่าง ๆ ประกอบด้วยเลขฐาน 2 (Binary) และสคริปต์ (Script) ที่ดำเนินการกับไฟล์จำนวนมาก ประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับเครือข่าย (Network) ยานพาหนะ (Vehicles) เขต (Districts) เส้นทางการเดินทาง (Trips routes) การกำหนดค่า (Configurations) และพารามิเตอร์อื่น ๆ อีกมากมาย สคริปต์ส่วนใหญ่เขียนด้วยภาษา Python ส่งผลให้สามารถรองรับวิธีการจำลองสถานการณ์แบบไม่ต่อเนื่องและแบบเวลาต่อเนื่องของพื้นที่รองรับการจำลองสำหรับยานพาหนะประเภทต่าง ๆ รูปแบบของทางแยกที่หลากหลายทั้งที่มีสัญญาณไฟจราจรและไม่มี ใช้เพื่อประเมินเวลาการเดินทางที่มีประสิทธิภาพของแผนสำหรับประชากรทั้งหมด นำมาใช้ในการวางแผนและวิธีการดำเนินการเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแผนการโดยพิจารณาจากเวลา การเดินทางที่มีประสิทธิภาพจากการจำลองการทำงานแต่ละรอบ โปรแกรมแสดงให้เห็นเครือข่ายสังเคราะห์สภาพการจราจรและเครือข่ายเมืองเสมือนจริง นอกจากนี้โปรแกรม SUMO ยังมีขั้นตอนสำหรับการกำหนดการรับส่งข้อมูลแบบพลวัตและนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟิก 2 มิติและ 3 มิติของการจำลองการจราจร โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงพารามิเตอร์จำนวนมากเกี่ยวกับรูปแบบการเปลี่ยนช่องทางการจราจรและอื่น ๆ ได้โดยตรงในไฟล์การกำหนดที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะและพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ได้แก่ 1) ความสามารถในการเร่ง (Acceleration ability) 2) ความสามารถในการชะลอ (Deceleration ability) 3) ความไม่สมบูรณ์ของผู้ขับขี่ (Driver imperfection) 4) ความยาวของรถ (Vehicle length) 5) ความเร็วสูงสุดของรถ (Vehicle maximum velocity) และ 6) เวลาตอบสนองของคนขับ (Driver response time) (Maciejewski, 2010) ประมวลผลพฤติกรรมของ

ยานพาหนะแต่ละรายการที่เคลื่อนที่ไปตามถนนของแบบจำลองเครือข่ายถนนที่กำหนด เพื่อพิจารณาข้อมูลผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วสูงสุด (Maximum velocities) ข้อจำกัดการใช้ถนน (Road use restrictions) และกฎสิทธิของทางที่ทางแยก (Right-of-way) เป็นต้น นอกจากนี้ยังรองรับการสร้างแบบจำลองการขนส่งสาธารณะและสิ่งอำนวยความสะดวกด้านโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติม เช่น สัญญาณไฟจราจรที่รองรับการสั่งงานด้วยวิธีการต่าง ๆ การกำหนดป้ายรถเมล์ หรือเครื่องตรวจจับจำลองประเภทต่าง ๆ โปรแกรมการจำลองมาพร้อมกับส่วนเพิ่มเติมอีกหลายตัวที่อนุญาตให้นำเข้าและสร้างเครือข่ายถนนสำหรับเครื่องจำลอง เช่นเดียวกับเครื่องมือสำหรับการสร้างยานพาหนะเพื่อจำลองและคำนวณเส้นทางตามวิธีการที่แตกต่างกัน แม้แค่การจำลองประกอบด้วยแอปพลิเคชันการจำลองที่มีส่วนต่อประสานกราฟิก เครื่องมืออื่น ๆ ที่มีอยู่ในแพ็คเกจจะต้องเริ่มต้นและกำหนดค่าผ่านบรรทัดคำสั่ง (Command line) โปรแกรม SUMO มีคุณลักษณะหลากหลายได้รับการพัฒนาในช่วงเวลาที่ยาวนานพร้อม การปรับปรุงที่เผยแพร่ต่อสาธารณะบ่อยครั้ง (Krajzewicz, 2014)

โปรแกรม SUMO เป็นการจำลองตัวแทนของเครือข่ายในโลกแห่งความเป็นจริงในรูปแบบกราฟเส้นโดยใช้ข้อมูลทางแยก (Node) และถนนแสดงด้วยเส้นทาง (Edge) ทางแยกประกอบด้วยตำแหน่ง รูปร่างและกฎการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนทางแยก ซึ่งอาจเขียนทับโดยสัญญาณไฟจราจร เส้นทางคือการเชื่อมต่อทางเดียวระหว่าง 2 ทางแยกและมีจำนวนช่องจราจร (Lane) คงที่ ข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของยานพาหนะที่อนุญาตให้ผ่านและความเร็วสูงสุดที่อนุญาต ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงจำนวนช่องจราจรบนถนนจึงแสดงโดยใช้หลายเส้นทาง มุมมองดังกล่าวเกี่ยวกับโครงข่ายถนนเป็นเรื่องปกติ แม้ว่าจะมีวิธีการอื่นเช่นรูปแบบเครือข่ายของ VISSIM หรือรูปแบบ OpenDRIVE (Daniel Krajzewicz, Erdmann, Behrisch, & Bieker-Walz, 2012) อย่างไรก็ตามโปรแกรมมีแนวโน้มจะขยายฟังก์ชันการใช้งานของโปรแกรมให้ครอบคลุมรูปแบบการขนส่งประเภทอื่น ได้แก่ รถประจำทางและรถไฟ เพื่อให้เกิดการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multi-Modal) ในปัจจุบันโปรแกรมจำลองสถานการณ์สภาพการจราจร Simulation of Urban Mobility มีความสามารถในการรองรับความสามารถในการดำเนินงาน ด้านการเคลื่อนที่ของรถกรณีไม่มีการชนกัน ประเภทรถที่แตกต่างกัน ถนนหลายช่องเดินรถพร้อมช่องเปลี่ยนช่องเดินรถ กฎการใช้ทางแยกตามทางแยก การเชื่อมต่อระหว่างช่องเดินรถกับช่องเดินรถ การกำหนดเส้นทางในเครือข่ายแบบพลวัตและควบคุมสัญญาณไฟจราจรเพื่อปรับปรุงการไหลของระบบการจราจร (Brockfeld, Barlovic, Schadschneider, & Schreckenberg, 2001) ในการป้อนข้อมูล SUMO ต้องการไฟล์หลัก 3 ไฟล์แทนเส้นทาง (Routes) ตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อ (Nodes) และเส้นทาง (Edges) โดยที่ไฟล์ตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อ (Nodes) และเส้นทาง (Edges) แสดงถึงตำแหน่งและเส้นทางในกราฟถนนตามลำดับ ไฟล์เส้นทาง (Routes) แสดงถึงปริมาณความต้องการการจราจร

และมีข้อมูลเกี่ยวกับตัวแทน (Agents) ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการจำลองนี้และคุณลักษณะ เช่น เวลาออกเดินทาง (Departing time) ความเร่งสูงสุด (Maximum acceleration) การชะลอตัวสูงสุด (Maximum deceleration) ทักษะการขับขี่ (Driving skill) ความยาวและสีของยานพาหนะ (Vehicle length & color) (Capela et al., 2013) โดยโปรแกรม SUMO โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญของโปรแกรม 4 องค์ประกอบ ดังนี้

1. Sumo-netconvert เป็นเครื่องมือที่สำคัญของโปรแกรมทำหน้าที่สร้างเครือข่ายจากข้อมูล que ผู้สร้างได้เตรียมไว้ โดยอาศัยข้อมูลที่เป็นในการสร้างเครือข่ายถนน ได้แก่ จำนวนและพิกัดของถนน เพื่อลดความซับซ้อนของการสร้างเครือข่ายถนนในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ถนน ช่องเดินรถ กฎการขับขี่ของยานพาหนะ ช่องเดินรถการขับขี่ซ้าย-ขวา การเชื่อมต่อระหว่างช่องเดินรถกับถนน และสัญญาณไฟจราจรสำหรับทางแยก โดยผลลัพธ์ของการจำลองสภาพการจราจรจะถูกบันทึกลงในไฟล์ XML โดยในปัจจุบันโปรแกรมอนุญาตให้ผู้ใช้สร้างแบบจำลองสามารถนำเข้าไฟล์ข้อมูลเพื่อสร้างเครือข่ายเส้นทางในโปรแกรม SUMO ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้ 1) ข้อมูล XML ทั่วไปที่ประกอบด้วยจุดตำแหน่ง (Nodes) และ เส้นทาง (Edges) 2) ข้อมูลรายชื่อจุดตำแหน่ง (Nodes) และ เส้นทาง (Edges) ประเภท ASCII และ 3) ข้อมูลเครือข่าย VISUM (Daniel et al., 2003) อีกทั้งยังสามารถนำเข้าข้อมูลเครือข่ายถนนเสมือนโดยการแปลงเครือข่ายจากเครื่องจำลองการรับส่งข้อมูลอื่น ๆ เช่น VISUM, VISSIM หรือ MATSim นอกจากนี้ยังอ่านรูปแบบเครือข่ายถนนดิจิทัลทั่วไปอื่น ๆ เช่น shapefiles หรือ OpenStreetMap ช่วยให้สามารถควบคุมการอธิบายเครือข่ายถนนในโปรแกรม SUMO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การแสดงไฟล์ XML สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทไฟล์แต่ละประเภทสำหรับคำอธิบายของทางแยก (Node) เส้นทาง (Edge) ตัวเลือกประเภทเส้นทาง การเชื่อมต่อ และแผนสัญญาณไฟจราจร การเชื่อมต่ออธิบายว่าช่องจราจรใดที่เข้ามาในทางแยกที่เชื่อมต่อกับช่องจราจรที่ส่งออก เครือข่ายการจำลองที่สร้างโดย Netconvert มีค่าที่คำนวณแบบฮิวริสติกในทุกที่ที่ข้อมูลนำเข้าไม่สมบูรณ์ เช่น ค่ารูปทรงเรขาคณิตที่ทางแยก นอกจากนี้ยังสามารถแปลงเครือข่ายการจำลองกลับเป็นรูปแบบ "Plain" สามารถโหลดรูปแบบค่านำเข้า (Input) ได้หลายรูปแบบพร้อมกันและจะรวมเข้าด้วยกันโดยอัตโนมัติ เนื่องจากรูปแบบ "Plain" ช่วยให้สามารถระบุองค์ประกอบเครือข่ายและการปรับพารามิเตอร์เส้นทางและช่องจราจร จึงสามารถใช้สำหรับการปรับเปลี่ยนเครือข่ายได้หลากหลาย เพื่อสนับสนุนการปรับเปลี่ยนดังกล่าว SUMO สามารถรองรับเครื่องมือ Python "netdiff.py" ซึ่งคำนวณความแตกต่างที่มนุษย์อ่านได้ระหว่าง 2 เครือข่าย A และ B

2. Sumo-router ในโปรแกรม SUMO ข้อมูลสถิติต่าง ๆ ที่ถูกรวบรวมไว้สำหรับการสร้างเครือข่ายการจำลองสภาพการจราจรประกอบด้วยยานพาหนะที่กำลังเคลื่อนที่ (Moving vehicles) โดยทั่วไปในแบบจำลองสภาพการจราจรอื่น ๆ ผู้สร้างแบบจำลองจำเป็นต้องมีการระบุ

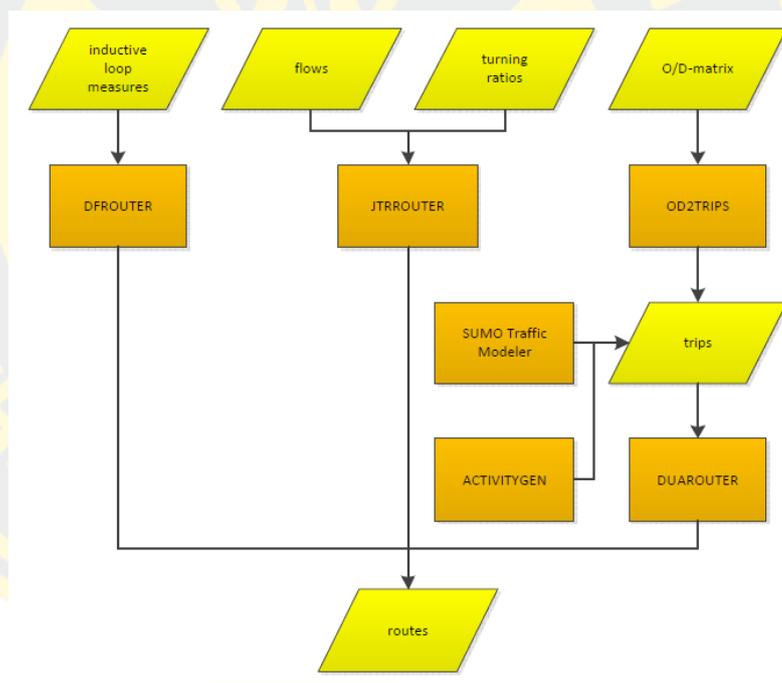
เวลาออกเดินทาง ตำแหน่งต้นทางและปลายทางของเส้นทาง แต่ต้องกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเอง ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ผู้สร้างแบบจำลองเสียเวลาในการสร้างแบบจำลอง ฟังก์ชัน Sumo-router จะทำหน้าที่สร้างและบันทึกไฟล์ข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่สามารถเรียกใช้เพื่อทำงานร่วมกับไฟล์เครือข่ายการจราจรที่ต้องการ โดยไฟล์ที่ได้จากฟังก์ชัน Sumo-router จะทำการสร้างข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการเดินทางของยานพาหนะ ได้แก่ระยะเวลาการออกเดินทางของยานพาหนะแต่ละคัน ตำแหน่งต้นทาง ตำแหน่งปลายทางและจำนวนเส้นทางผ่านเครือข่ายโดยใช้ชุดคำสั่งการกำหนดเส้นทาง Dijkstra (Dijkstra routing algorithm (Dijkstra 1959) สำหรับการกำหนดเส้นทางยังไม่มีการใช้ชุดคำสั่งที่ซับซ้อน เช่น เครือข่ายแบบลำดับชั้น เนื่องจากความเร็วบนท้องถนนเปลี่ยนไปตามปริมาณการจราจร ดังนั้นเส้นทางที่ดีที่สุดในช่วงเวลา ก่อนหน้าอาจช้ากว่าเส้นทางอื่น ๆ เมื่อแบบจำลองมีการเพิ่มปริมาณยานพาหนะลงในเส้นทางการกำหนดเส้นทางจะขึ้นอยู่กับแนวทางการกำหนดการจราจรแบบพลวัตที่พัฒนาโดย Christian Gawron ซึ่งเป็นการกำหนดเส้นทางและการจำลองซ้ำหลายครั้งเพื่อให้เกิดพฤติกรรมจริงของผู้ขับขี่ (Soares, Kokkinoginis, Macedo, & Rossetti, 2014)

3. Sumo-GUI เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนาจากการแพ็คเกจการจำลองดั้งเดิมด้วยหน้าต่างและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานในรูปแบบกราฟิกโดยอ้างอิง Qt Windowing และ OpenGL (OpenGL 2002) สำหรับการสร้างภาพเรขาคณิตภายในเครือข่ายอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถติดตั้งบนระบบปฏิบัติการทั่วไป อาทิ UNIX, Windows และ Linux ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

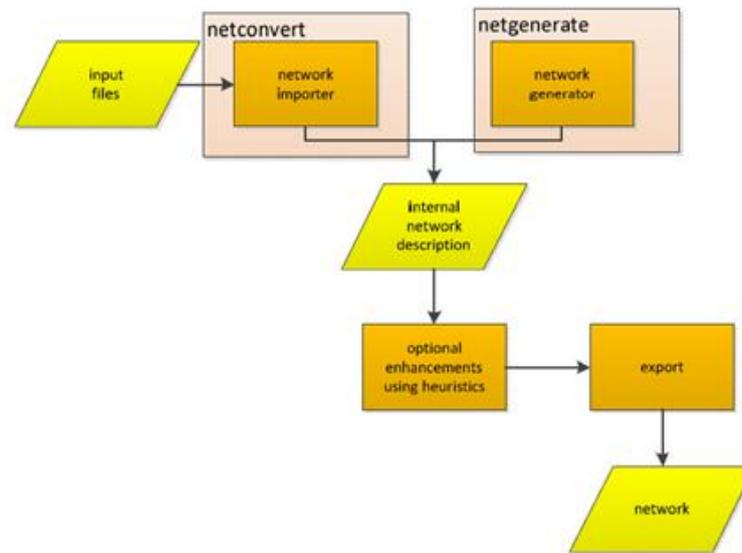
4. Sumo-netgenerate จะสร้างเครือข่ายถนนนามธรรมที่แตกต่างกัน 3 ประเภทคือ 1) แมนฮัตตัน (Manhattan) เป็นเครือข่ายกริดเสมือน 2) สไปเดอร์เน็ต (Spider-net) เป็นเครือข่ายแบบวงกลมและเครือข่ายสุ่ม (Random networks) ชุดคำสั่งการสร้างแต่ละชุดมีชุดตัวเลือก ซึ่งช่วยให้สามารถปรับคุณสมบัติของเครือข่ายได้ (Krajzewicz, 2012)

สำหรับสถานการณ์จำลองขนาดใหญ่มักใช้ "เมทริกซ์ต้นทางและปลายทาง" (O-D Matrix) สำหรับอธิบายการเคลื่อนไหวกวาระหว่างเขต การวิเคราะห์การจราจรที่เรียกว่า (Traffic Analysis Zones: TAZ) ในจำนวนรถต่อครั้ง สำหรับการใช้งานใน SUMO เมทริกซ์เหล่านี้ต้องถูกแบ่งออกเป็นการเดินทางด้วยรถยนต์แต่ละคันโดยแบ่งเวลาออกเดินทางตามช่วงเวลาที่ยกขานที่บ่อยครั้งมีการให้เมทริกซ์เดียวสำหรับวันเดียว ซึ่งไม่แน่ชัดเกินไปสำหรับการจำลอง เนื่องจากกระแสรถจราจรระหว่างพื้นที่แตกต่างกันอย่างมากในช่วงระยะเวลาของวัน ตัวอย่างเช่น ผู้คนจะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในใจกลางเมืองชั้นในเพื่อไปทำงานในตอนเช้าและออกจากเขตเมืองชั้นในช่วงบ่ายหรือเย็น SUMO ประกอบด้วย "Od2trips" แอปพลิเคชันสำหรับแปลงเมทริกซ์ เป็น การเดินทางของยานพาหนะแต่ละคัน สามารถกำหนดกราฟการไหลกระจายชั่วโมงเป็นตัวแปรนำเข้าเพิ่มเติม สำหรับการแยกปริมาณยานพาหนะรายวันออกเป็นส่วยย่อยรายชั่วโมงที่สมจริงยิ่งขึ้น นอกจากนี้

การแยกส่วนเมทริกซ์แล้ว แอปพลิเคชันยังเลือกกำหนดขอบของเครือข่ายถนนเป็นตำแหน่งออกขาเข้า ตามลำดับ การทำแผนที่จากเขตกำหนดการจราจรไปยังขอบต้องระบุเป็นข้อมูลเข้าอื่น โดยหากการเดินทางของยานพาหนะที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเส้นทางเริ่มต้นและสิ้นสุดพร้อมกับเวลาออกเดินทาง แต่ไม่มีข้อมูลเส้นทางที่ชัดเจนโปรแกรมจะกำหนดการจราจรโดยคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดภายใต้ฟังก์ชันต้นทุนที่แตกต่างกัน (Capela et al., 2013) การเดินทางที่เกิดขึ้นจาก Od2trips ประกอบด้วยเส้นทางเริ่มต้นและสิ้นสุดพร้อมกับเวลาออกเดินทาง อย่างไรก็ตาม การจำลองต้องการรายการเส้นทางทั้งหมดเพื่อผ่าน เส้นทางดังกล่าวมักจะคำนวณโดยดำเนินการกำหนดผู้ใช้แบบพลวัต (Dynamic User Assignment: DUA) นี่เป็นกระบวนการแบบวนซ้ำโดยใช้ขั้นตอนการกำหนดเส้นทาง เช่น การคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดภายใต้ฟังก์ชันต้นทุนที่แตกต่างกัน รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 10 และ 11



ภาพที่ 10 การสร้างปริมาณการจราจรในโปรแกรม SUMO
ที่มา: Daniel et al. (2012)



ภาพที่ 11 การสร้างเครือข่ายถนนในโปรแกรม SUMO

ที่มา: Daniel et al. (2012)

นอกจากนี้โปรแกรม SUMO ยังมีการอนุญาตให้กำหนดประชากรสำหรับพื้นที่ที่กำหนด และคำนวณปริมาณความต้องการในการเคลื่อนย้ายของประชากรซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองการจราจรได้ และตัวเลือกด้านการจราจรที่สำคัญโดยมีรายละเอียด ดังนี้ (Song, Wu, Xu, & Lin, 2015)

รูปแบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะร่วมกัน (Car-Following model) โปรแกรม SUMO ใช้ส่วนขยายของโมเดลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะร่วมกันที่พัฒนาโดย Stefan Krauß มีการจำลองการรับส่งข้อมูล 2 ประเภทคือ 1) คำสั่งรายบรรทัดสำหรับการจำลองกลุ่มข้อมูลจำนวนมากอย่างมีประสิทธิภาพ และ 2) การแสดงผลส่วนติดต่อแบบกราฟิกที่แสดงการจำลองที่ดำเนินการโดยใช้ OpenGL สำหรับการจำลองสภาพการจราจรแบบแบ่งช่วงเวลามีความยาวขั้นตอนการจำลองเริ่มต้น 1 วินาที มีความต่อเนื่องของภายในพื้นที่ ตำแหน่งของยานพาหนะแต่ละคันจะอธิบายโดยช่องทางที่ยานพาหนะอยู่และระยะห่างจากจุดเริ่มต้น เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านเครือข่าย ความเร็วของรถแต่ละคันจะถูกคำนวณ

การสื่อสารข้อมูลระหว่างยานพาหนะ (Vehicular communication) แอปพลิเคชันที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับชุด SUMO คือการสร้างแบบจำลองการรับส่งข้อมูลภายในการวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (Vehicle-to-vehicle) และยานพาหนะสู่โครงสร้างพื้นฐาน (Vehicle-to-infrastructure) การสื่อสารในที่นี้โดยปกติ SUMO จะเชื่อมต่อการจำลอง

การสื่อสารภายนอก เช่น ns2 หรือ ns3 โดยใช้ TraCI เพื่อให้ได้สภาพแวดล้อมการทำงานสำหรับการจำลองการสื่อสารด้วยยานพาหนะ

ตัวเลือกเส้นทางและการนำทางแบบพลวัต (Route choice and dynamic navigation) การกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมกับความต้องการของยานพาหนะได้รับการตรวจสอบทั้งบนพื้นฐานทางทฤษฎีและการใช้งาน เนื่องจากระยะเวลาที่ยานพาหนะผ่านเส้นทางขึ้นอยู่กับจำนวนปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านภายในเครือข่าย การคำนวณเส้นทางผ่านเครือข่ายภายใต้ภาระงานจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการเตรียมการจำลองการจราจรขนาดใหญ่ เพื่อความเร็วในการดำเนินการที่รวดเร็วโปรแกรม SUMO อนุญาตให้ตรวจสอบชุดคำสั่งสำหรับการกำหนดผู้ใช้ (User assignment) หรือ การกำหนดปริมาณการใช้งาน (Traffic assignment) โดยปกติขั้นตอนวิธี (Algorithm) ดังกล่าวจะได้รับการตรวจสอบโดยใช้แบบจำลองการไหลของการจราจรในระดับมหภาคหรือแม้แต่การใช้แบบจำลองความจุของถนนที่และการลดของความแออัดของถนน

อัลกอริทึมสัญญาณไฟจราจร (Traffic light algorithms) การประเมินโปรแกรมสัญญาณไฟจราจรที่พัฒนาขึ้นหรือชุดคำสั่งสำหรับการทำให้สัญญาณไฟจราจรปรับให้เข้ากับการจราจรในปัจจุบันเป็นหนึ่งในการใช้งานหลักสำหรับการจำลองการไหลของการจราจรระดับจุลภาค ด้วยเวลาดำเนินการที่รวดเร็วของ SUMO และ TraCI API แบบเปิดสำหรับการโต้ตอบกับแอปพลิเคชันภายนอกทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการประเมินชุดคำสั่งการควบคุมการรับส่งข้อมูลใหม่ ทั้งสำหรับการควบคุมทางแยกเดี่ยวและสำหรับการตรวจสอบทั่วทั้งเครือข่าย ด้วย การจำแนกประเภทของยานพาหนะที่แตกต่างกัน SUMO ยังอนุญาตให้จำลองการขนส่งสาธารณะหรือการจัดลำดับความสำคัญของรถฉุกเฉินที่ทางแยก (Passos & Rossetti, 2010)

การประเมินระบบเฝ้าระวัง (Evaluation of surveillance systems) ความสามารถของ SUMO ในการจำลองสถานการณ์ขนาดใหญ่ช่วยให้สามารถประเมินระบบเฝ้าระวังการจราจรใหม่ได้ ภายในโครงการ VABENE การจำลองการจราจรขณะวิ่งถูกปรับเทียบโดยใช้มาตรการวนรอบลูการเหนี่ยวนำทั่วไปและใช้ความหนาแน่นของยานพาหนะและความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากระบบกล้องที่มีการติดตั้งในพื้นที่ ภาพที่ถ่ายได้รับการประมวลผลบนเรือเหาะและระบบส่งตำแหน่งของยานพาหนะไปยังศูนย์ภาคพื้นดิน ในที่นี้จำนวนรถที่วิ่งผ่านการจำลองนั้นตรงกับจำนวนรถที่วิ่งบนถนนที่สังเกตได้ในความเป็นจริง ภายในโครงการ Traffic online ระบบสำหรับการสังเกตความเร็วการเดินทางโดยใช้ข้อมูล GSM ได้รับการออกแบบ ใช้งานและประเมินผล ความรับผิดชอบของ SUMO คือการสร้างพฤติกรรมเคลื่อนที่ของโทรศัพท์เสมือน สำหรับการทดสอบระบบจดจำความเร็วการเดินทางไม่เพียงแต่สร้างแบบจำลองการจราจรบนถนนทั้งบนทางหลวงและภายในเขตเมืองเท่านั้น นอกจากนี้ รถเมล์ รางเบา และรางเร็วยังถูกจำลองขึ้นเพื่อประเมินว่าระบบสามารถตรวจจับความเร็วบนท้องถนนได้หรือไม่ แม้ว่าจะมีผู้เข้าร่วมที่เคลื่อนไหวเพิ่มเติมอยู่ก็ตาม

ตัวเลือกการคำนวณเส้นทางเพิ่มเติม คือ 1) Jtrrouter ใช้คำจำกัดความของเปอร์เซ็นต์การเลี้ยวที่ทางแยกสำหรับการคำนวณเส้นทางผ่านเครือข่าย วิธีการดังกล่าวสามารถใช้เพื่อกำหนดความต้องการเดินทางภายในส่วนหนึ่งของเครือข่ายถนนที่ประกอบด้วยตำแหน่งเชื่อมต่อสูงสุดสิบแห่ง (José Capela, 2013) โดยสามารถนำมาใช้ในการกำหนดสัดส่วนที่สอดคล้องกับข้อมูลที่สำรวจมาได้จริง แอปพลิเคชันเพิ่มเติม 2) Dfrouter คำนวณเส้นทางโดยใช้ข้อมูลจากตัวตรวจจับลูบเหนียวนำ วิธีนี้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพเมื่อใช้กับสถานการณ์บนทางหลวงที่เครือข่ายถนนไม่มีวงแหวนและมีการติดตั้งเครื่องตรวจจับปิดทางเข้าและออกทางหลวงทั้งหมดทำหน้าที่บันทึกข้อมูลพร้อมแสดงผลลัพธ์เสมือนอุปกรณ์ลูบเหนียวนำ

การแสดงผลลัพธ์ของแบบจำลอง

โปรแกรม SUMO สามารถสร้างผลลัพธ์ที่หลากหลายสำหรับการจำลองการทำงานแต่ละครั้ง อาทิเช่น ข้อมูลจากการติดตั้งลูบเหนียวนำหรือตำแหน่งยานพาหนะแต่ละคันที่เขียนในแต่ละขั้นตอนของเวลาสำหรับยานพาหนะทุกคันในระบบการจำลอง จนถึงข้อมูลผลลัพธ์ที่มีค่าซับซ้อนเป็นข้อมูลเกี่ยวกับการเดินทางของรถแต่ละคันหรือการวัดข้อมูลโดยรวมตามเส้นทางถนนหรือภายในแต่ละช่องเดินรถ นอกจากนี้ข้อมูลด้านการจราจรทั่วไป โปรแกรม SUMO สามารถนำเสนอผลลัพธ์การปล่อยมลพิษทางเสียงและรูปแบบการปล่อยมลพิษและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

การแสดงผลลัพธ์ของโปรแกรมจำลองสถานการณ์สภาพการจราจร Simulation of Urban MObility สามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของไฟล์ดิบ (Raw output) ที่รวบรวมข้อมูลผลลัพธ์ของแบบจำลองสถานการณ์สภาพการจราจรของถนน (Streets) และช่องเดินรถ (Lanes) ทั้งหมดพร้อมกับยานพาหนะที่เคลื่อนที่อยู่บนถนนในแต่ละขั้นตอน โดยผลลัพธ์ของยานพาหนะมีคำอธิบายชื่อ ตำแหน่ง และความเร็ว ผู้สร้างแบบจำลองสถานการณ์สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับเครื่องมือหลังการประมวลผลสำหรับการประเมินเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามการที่แบบจำลองสร้างผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของไฟล์ดิบขนาดใหญ่จะส่งผลให้เกิดข้อมูลจำนวนมากที่ยากต่อการบริหารจัดการและอาจทำให้ผู้สร้างแบบจำลองเกิดความสับสนได้ ดังนั้นผู้พัฒนาโปรแกรมจึงมีการจัดเตรียมผลลัพธ์ขนาดเล็กคือการจำลองเครื่องตรวจที่เรียกว่าลูบเหนียวนำ (Induction loops) โดยผู้สร้างแบบจำลองสามารถวางตำแหน่งลูบเหนียวนำบนช่องทางการจราจรในตำแหน่งที่ต้องการเก็บรวบรวม เครื่องตรวจจับเหนียวนำจะทำหน้าที่คำนวณการไหลของยานพาหนะและความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะบนช่องเดินรถ เป็นต้น ผลลัพธ์ของการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยลูบเหนียวนำจะถูกแสดงในรูปแบบไฟล์ CSV โดยนอกเหนือจากการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของไฟล์ดิบ (Raw output) ขนาดใหญ่ที่รวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการจำลอง และผลลัพธ์ขนาดเล็กจากเครื่องตรวจลูบเหนียวนำ (Induction loops) ที่ใช้ในการวัดผลการ

ดำเนินการเฉพาะพื้นที่ โปรแกรมสามารถแสดงผลของแบบจำลองที่ประกอบด้วยข้อมูลทั่วไปที่ใช้ในการวิจัยด้านสภาพการจราจร (Traffic research) เช่น การไหลของกระแสการจราจร ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ เป็นต้น ผลลัพธ์ประเภทนี้จะถูกรวบรวมไว้สำหรับช่วงเวลาที่คุณสร้าง กำหนดค่า ผู้สร้างแบบจำลองสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในบรรทัดคำสั่งหรือภายในไฟล์ การกำหนดค่าได้ในภายหลัง ไฟล์ผลลัพธ์การจำลองสภาพการจราจรที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย 1) ผลลัพธ์ดิบ (Raw output) เป็นผลลัพธ์ที่รวบรวมข้อมูลเส้นทางและช่องเดินรถถนนทั้งหมดพร้อมกับยานพาหนะที่เคลื่อนที่เครื่องข่ายแบบจำลองในทุกขั้นตอนซึ่งส่งผลให้มีข้อมูลจำนวนมาก 2) ไฟล์บันทึก (Log-files) เป็นไฟล์ผลลัพธ์ที่สร้างโดยตัวตรวจจับจำลอง การจำลองลูบเหนี่ยวนำ (Inductive loops) ที่มีความสามารถในการคำนวณความเร็วเฉลี่ยบนช่องเดินรถรวมถึงค่าอื่น ๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเขียนโดยใช้รูปแบบ CSV ข้อมูลนี้สามารถรวบรวมตามช่วงเวลาที่กำหนดซึ่งผู้ใช้กำหนดค่าได้ โปรแกรมจำลองสภาพการจราจร SUMO สามารถนำเสนอวิธีการวัดตัวชี้วัดบางอย่าง เช่น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง หรือการปล่อยมลพิษ โดยอ้างอิงจากฐานข้อมูล Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA) เป็นวิธีการวัดการปล่อย CO₂ และการใช้เชื้อเพลิง ท่ามกลางปัจจัยมลพิษอื่น ๆ สำหรับประเภทยานพาหนะต่าง ๆ

การปรับเทียบแบบจำลอง (Model calibration)

การปรับเทียบแบบจำลองเป็นกระบวนการแก้ไขข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการสร้างแบบจำลองสภาพการจราจร โดยค่าตัวแปรบางตัวอาจเกิดความผิดพลาดจากผู้สร้าง โปรแกรมหรือจากชุดข้อมูลที่มีการรวบรวมมาให้ความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง (Calibration) ด้วยกระบวนการตรวจสอบตามขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองที่ได้ทำการสร้างขึ้นมีความใกล้เคียงสามารถเป็นตัวแทนสภาพการจราจรในพื้นที่ที่คุณสร้างแบบจำลอง ทำการศึกษา เพื่อให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์หรือประเมินประสิทธิภาพแนวทางแก้ไขปัญหารถจราจรด้วยแบบจำลองมีระดับความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือสูง การปรับเทียบแบบจำลองสามารถทำได้โดยการประมวลผลแบบจำลองด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลอง ขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลองเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคไม่สามารถครอบคลุมได้ครบทุกปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการจราจรได้อย่างครบถ้วนโดยเฉพาะปัจจัยที่เป็นปัจจัยเฉพาะในแต่ละพื้นที่ดังนั้นผลการเปรียบเทียบจะต้องผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการวางแผนการจราจร

การปรับแก้แบบจำลอง

การปรับแก้แบบจำลองนั้นเป็นการปรับแก้แบบจำลองให้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพการจราจรที่เป็นจริงในปัจจุบัน โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในพื้นที่โดยการปรับแก้จะต้องปรับแก้องค์ประกอบ 3 ประเภทได้แก่ แบบจำลองการเคลื่อนตัวตามกันของรถ (Car following model) แบบจำลองการเปลี่ยนช่องทางจราจร (Lane changing model) และแบบจำลองการยอมรับระยะระหว่างรถ (Gap acceptance model) ในการปรับแก้แบบจำลองจะต้องมีการตรวจสอบถึงลักษณะและพฤติกรรมของการจราจรในช่วงของการจำลองการจราจร ทางเลือกหนึ่งคือการคัดเลือกตัวแปรที่มักจะเป็นตัวแปรหลักในการปรับแก้ ตัวอย่างเช่น พฤติกรรมความก้าวร้าวของผู้ขับขี่ (Driver aggression) ความระลึกรู้และความตระหนักของผู้ขับขี่ (Driver awareness) ความเร่งและความหน่วงของยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะ ระยะห่างระหว่างรถ (Headway) และระยะเวลาในการตอบสนอง (Reaction time) แต่อย่างไรก็ตามตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดที่ควรใช้ในการปรับแก้แบบจำลองคือระยะทางระหว่างรถและระยะเวลาในการตอบสนอง

การทวนสอบแบบจำลอง (Model validation)

การนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองมีความสามารถในการแสดงผลที่ถูกต้องเป็นที่น่าเชื่อถือ การตรวจสอบค่าความถูกต้องจำเป็นต้องมีการตรวจสอบในหลายขั้นตอนไม่ว่าจะในขั้นตอนกระบวนการประมวลผลโปรแกรมเพื่อตรวจสอบหาข้อผิดพลาดจากการกำหนดค่าต่าง ๆ การตรวจสอบลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและลักษณะการทำงานของแบบจำลองโดยรวมในหลายขั้นตอนเพื่อให้สามารถแน่ใจว่าแบบจำลองจะพร้อมนำไปใช้งานจริง อาจกล่าวได้ว่าการทวนสอบแบบจำลองคือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนที่จะมีการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ เป็นขั้นตอนที่ต้องดำเนินไปแบบควบคู่กับขั้นตอนการปรับแก้แบบจำลอง โดยหากทวนสอบแบบจำลองแล้วพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความถูกต้องน้อยกว่าเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ ผู้สร้างแบบจำลองต้องมีการปรับแก้แบบจำลองใหม่เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การทวนสอบที่ถูกต้องมากขึ้น หากว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าความถูกต้องมากกว่าเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้แสดงว่าแบบจำลองนั้นมีความน่าเชื่อถือ

การตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคนั้นได้มีการพิจารณาโดยใช้ค่าทางสถิติของ Geoffrey E.Havers หรือเรียกว่าค่า GEH ในการเปรียบเทียบค่าของกระบวนการปรับแก้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ซึ่งค่า GEH เป็นค่าทางสถิติที่ใช้ในการคำนวณในงานด้านวิศวกรรมจราจรเป็นการคาดการณ์ปริมาณจราจรและ

แบบจำลองด้านการจราจรโดยค่า GEH นั้นเป็นค่าที่พัฒนามาจากหลักการทางสถิติที่เรียกว่า ไคส-แควร์ (Chi-Squared) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$GEH - 1 = \sqrt{\frac{(simulated - Observed)^2}{0.5 * (simulated + Observed)}}$$

โดยที่

Simulated คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

Observed คือ ค่าที่ได้จากการสำรวจจริง

ซึ่งค่า GEH ที่ได้นั้นสามารถประมวลผลได้ดังนี้

ถ้า $GEH < 5$ หมายถึง ปริมาณการจราจรที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม ที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลจริง

ถ้า $5 < GEH < 10$ หมายถึง ต้องมีการพิจารณาและตรวจสอบปริมาณจราจรเพื่อการปรับเทียบปริมาณการจราจรใหม่อีกครั้ง

ถ้า $GEH > 10$ หมายถึง ปริมาณการจราจรที่ได้จากแบบจำลองไม่มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากภาคสนามที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลจริง

โดยมีดัชนีในการชี้วัดความถูกต้องของแบบจำลองสภาพการจราจรระดับคุณภาพเพื่อให้ได้ค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลจากการสำรวจจริงมากที่สุดซึ่งเกณฑ์ในการเปรียบเทียบแบบจำลองของ DMRB เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายเกณฑ์ในการเปรียบเทียบแบบจำลองของ DMRB แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เกณฑ์ในการปรับเทียบแบบจำลองของ DMRB

ดัชนีชี้วัดการปรับเทียบ	เกณฑ์การปรับเทียบ	เป้าหมายในการปรับเทียบ
ปริมาณจราจร	$GEH < 5$	>85% ของกรณีทั้งหมด
ระยะเวลาในการเดินทาง	$\pm 15\%$ หรือไม่เกิน 1 นาที	>85% ของกรณีทั้งหมด
ความเร็วในการเดินทาง	$\pm 20\%$	>85% ของกรณีทั้งหมด
ความยาวแถวคอย	$\pm 20\%$ ความยาวแถวคอยที่สำรวจไม่เกิน 20 คัน	>85% ของกรณีทั้งหมด

แนวคิดการลดความแออัดที่ประตูท่าเรือ

การขนส่งสินค้าระยะสั้นในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ (Drayage) เป็นจุดเชื่อมโยงที่สำคัญในห่วงโซ่อุปทานระหว่างรูปแบบ ในทศวรรษที่ผ่านมากิจกรรมการขนส่งสินค้าระยะสั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ทำเรือคอนเทนเนอร์หลักในสหรัฐอเมริกา เนื่องจากมีรถบรรทุกขนถ่ายสินค้าจำนวนมากที่มาถึงท่าเรือตู้คอนเทนเนอร์ รถบรรทุกจึงมักประสบกับความล่าช้าอย่างมากที่ประตูปลายทาง การลดความล่าช้านี้จำเป็นต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของการดำเนินการขนส่งระยะสั้นและห่วงโซ่อุปทานของการขนส่งสินค้าทั้งหมดและเพื่อลดการปล่อยมลพิษจากรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันดีเซล การศึกษานี้พัฒนาเครื่องมือระดับการวางแผนที่สามารถใช้โดยวิศวกรออกแบบ เจ้าหน้าที่ควบคุมท่าเรือ เจ้าหน้าที่ท่าเรือ และผู้วางแผนการขนส่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบประตูและกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สามารถใช้เครื่องมือวิเคราะห์เพื่อกำหนดเวลาในแถวคอยรถบรรทุกโดยเฉลี่ยสำหรับการกำหนดค่าประตูท่าเรือที่กำหนด และเพื่อกำหนดจำนวนประตูบริการและช่องในแถวคอยที่จำเป็นเพื่อให้ได้ระดับการบริการที่ต้องการสำหรับอัตราการมาถึงของรถบรรทุกและอัตราค่าบริการของรถบรรทุก โดยการเคลื่อนย้ายระยะสั้นจากท่าเรือ (Port drayage) หมายถึง การเคลื่อนที่ของตู้คอนเทนเนอร์ระหว่างท่าเทียบเรือกับจุดกระจายสินค้าทางบกหรือท่าเทียบเรือ การกำหนดการขนส่งโดยทั่วไป เกี่ยวข้องกับการส่งมอบตู้สินค้าส่งออกไปยังท่าเรือหรือหีบภาชนะนำเข้าจากท่าเทียบเรือ เวลาที่คนขับใช้ในการมอบหมายงานดังกล่าวให้เสร็จสิ้นรวมถึงขั้นตอนต่อไปนี้ 1) เวลาในการเดินทางไปยังท่าเทียบเรือ (Travel time to marine terminals) 2) เวลาเข้าแถวคอยประตูขาเข้า (Inbound gate queuing time) 3) เวลาให้บริการประตูขาเข้า (Inbound gate service time) 4) เวลาการทำธุรกรรมลานตู้คอนเทนเนอร์ (Container yard transaction time) 5) เวลาเข้าแถวคอยประตูขาออก (Outbound gate queuing time) 6) เวลาให้บริการประตูขาออกหรือเวลาเดินทางไปยังลูกค้า (Outbound gate service time or travel time to customers or depots) และ 7) เวลาทำรายการ ณ ที่ตั้งของลูกค้า (Transaction time at customer locations or depots) โดยประสิทธิภาพของการขนส่งในตู้คอนเทนเนอร์โดยรวมขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนย้ายระยะสั้นของท่าเรือ การขนส่งด้วยตู้คอนเทนเนอร์เป็นระบบรวมศูนย์เพื่อประสานระบบการขนส่ง (Hub and spoke) โดยมีท่าเรือทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางและการเคลื่อนย้ายระยะสั้นโดยรูปแบบการขนส่งอื่นเป็นการเชื่อมโยง (Chu & Huynh, 2017) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาจำนวนมากขึ้นเกี่ยวกับความแออัดของประตูที่ท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ ในการศึกษาเหล่านี้ สามารถระบุแนวทางทั่วไปได้ 2 วิธี: การขยายความจุประตูและการจัดการการมาถึงของรถบรรทุก เกี่ยวกับ การขยายความจุของประตูท่าเรือ (Dekker et al., 2013) เสนอแนวคิดของท่าเทียบเรือ

การแลกเปลี่ยนแชสซี (Chassis Exchange Terminal: CET) โดยมีแนวคิดคือการสร้างลานจัดเก็บตู้คอนเทนเนอร์ด้านนอกสำหรับท่าเทียบเรือที่คับคั่ง ซึ่งคนขับรถบรรทุกสามารถไปส่งและรับคอนเทนเนอร์ในช่วงเวลาเร่งด่วน การเคลื่อนย้ายตู้คอนเทนเนอร์ระหว่างลานภายนอกและท่าเทียบเรือสามารถดำเนินการได้ในช่วงเวลาที่ไม่ว่างมาก โดยสถานีดังกล่าวสามารถเพิ่มความจุของประตูท่าเรือและการจราจรบางส่วนไปยังช่วงเวลาที่การจราจรไม่หนาแน่น อย่างไรก็ตาม การขยายกำลังการผลิตประตูมีการใช้งานที่จำกัดด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการ 1) ที่ดินและทรัพยากรไม่พร้อมใช้งานเสมอไป และ 2) การอนุญาตให้มีรถบรรทุกจำนวนมากเข้าในอาคารผู้โดยสารมากเกินไป อาจทำให้เกิดความแออัดของลานได้ (Guan & Liu, 2009)

ปัจจัยที่สำคัญและเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแออัดของประตูที่ท่าเทียบเรือคือพฤติกรรมการเข้าแถวคอยของรถบรรทุก งานศึกษาบางงานวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้แบบจำลองการจัดแถวคอย ผลการวิจัยพบว่าการใช้แบบจำลองการจัดแถวคอยแบบคงที่เพื่อวิเคราะห์ระบบการจัดแถวคอยที่มีลักษณะไม่คงที่อาจได้รับผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ที่ไม่เหมาะสม ระบบประตูในท่าเทียบเรือเป็นระบบการเข้าแถวคอยที่ไม่คงที่มีความเป็นพลวัตสูง เนื่องจากอัตราการมาถึงของรถบรรทุกมักจะแตกต่างกันไปในแต่ละชั่วโมง และอัตราค่าบริการประตูอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนั้นควรวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้าแถวคอยของรถบรรทุกที่ประตูปลายทางด้วยแบบจำลองการเข้าแถวคอยที่ไม่อยู่กับที่ ศึกษาพัฒนาแบบจำลองความต้องการการจราจรเพื่อประมาณการมาถึงของรถบรรทุกในท่าเรือคอนเทนเนอร์ของจีน การศึกษาครั้งที่ 2 เสนอแนวคิดดั้งเดิมของการปรับกรอบเวลาให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งในกรณีส่วนใหญ่กรอบเวลาถือเป็นข้อจำกัดมากกว่าที่จะเป็นตัวแปรในการตัดสินใจ

แถวคอยรถบรรทุกจำนวนมากเป็นปัญหาทั่วไปในสิ่งอำนวยความสะดวกด้านการขนส่งและโลจิสติกส์ขนาดใหญ่ เช่น ท่าเรือ สถานีขนส่ง และสนามบิน โดยทั่วไปแล้ว สิ่งอำนวยความสะดวกด้านการลงทุนที่สูงเหล่านี้จะมีความสามารถที่ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากทรัพยากรที่มีราคาแพงและจำกัด รวมทั้งที่ดิน จึงไม่สามารถขยายและเพิ่มอุปทานได้ทุกครั้งหลังสร้างเสร็จ ในทางกลับกันความต้องการของลูกค้าไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอตามเวลา ดังนั้นการรอแถวคอยของลูกค้าจึงเกิดขึ้นบ่อยครั้งในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้บริการสูงสุด ซึ่งจะเป็นการจำกัดความสามารถในการให้บริการในกรณีดังกล่าว สามารถใช้การจัดการการมาถึงของลูกค้าเพื่อลดความแออัดและใช้สิ่งอำนวยความสะดวกต่ออุปกรณ์ที่มีอยู่ (Harris, Schroer, Anderson, & Möller, 2010)

ท่าเทียบเรือเป็นตัวอย่างทั่วไปของสิ่งอำนวยความสะดวกดังกล่าว ผลที่ตามมาของปริมาณการขนส่งสินค้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและการเปิดตัวของเรือขนาดใหญ่ ความแออัดของรถบรรทุกที่ประตูท่าเทียบเรือกลายเป็นปัญหาทั่วไปในท่าเรือหลักหลายแห่ง แถวคอยรถบรรทุกทำให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างร้ายแรง และจำกัดความสามารถของกองรถบรรทุกและระบบ

ปลายทางอยู่ในความสนใจของทั้งภาครัฐและเอกชนในการลดแควคอยและรักษาประสิทธิภาพของ กระแสการขนส่ง อย่างไรก็ตาม ในวรรณคดีไม่พบการศึกษาเปรียบเทียบเกี่ยวกับวิธีการประมาณ ความยาวแควคอยรถบรรทุกที่มีอยู่ ซึ่งจะแสดงว่าวิธีใดเหมาะสมในสถานการณ์ใด (Namboothiri & Erera, 2008) ได้ศึกษาและพบว่าความแออัดของประตูทำให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสินค้า ภายในท่าเทียบเรือลดลง รถบรรทุกสำหรับเคลื่อนย้ายตู้คอนเทนเนอร์พบกับเวลารอนานขึ้นเมื่อ พวกเขามาถึงในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการดำเนินการของรถบรรทุกนานขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการเวลารอคิวที่ประตูทางออกและเวลาในอาคารท่าเทียบเรือ ผลกระทบที่ ตามมาจากความแออัดของประตูคือความความหนาแน่นของรถบรรทุกที่ไม่ได้ใช้งานโดยเมื่อ รถบรรทุกอยู่ในสถานะรอบเดินเบา จะปล่อยมลพิษออกมาในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ตอนที่พวกเขาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมาตรฐาน เป็นที่ทราบกันดีว่ามลพิษจากรถบรรทุกดีเซลมีสาร ก่อมะเร็งจำนวนหนึ่ง และเกี่ยวข้องกับระดับที่สูงขึ้นของโรคทางเดินหายใจจำนวนมาก (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez, & Voß, 2017)

เนื่องจากโมเดลการจัดแควคอยแบบไม่คงที่ให้ความแม่นยำในการประมาณค่าสูงสำหรับ ศึกษาปัญหาความแออัดของรถบรรทุก การเลือกรูปแบบการเข้าแควคอยตามลักษณะของ กระบวนการมาถึงของรถบรรทุกและกระบวนการบริการประตู การวิจัยพบว่ารถบรรทุกระหว่างที่ มาถึงที่ท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยไม่มีการควบคุมรอบเวลาโดยทั่วไปจะเป็นไปตามการแจกแจงแบบ เอกซ์โพเนนเชียล และเวลาให้บริการประตูจะเป็นไปตามการกระจาย Erlang ระบบการจัดแควคอย ดังกล่าวสามารถจัดเป็นแบบจำลองการจัดแควคอยแบบหลายผู้ให้บริการแบบไม่ที่ (Non-stationary multi-server) เช่น $Mt/Ek(t)/Ct$ (Guan & Liu, 2009)

การศึกษาปัจจัยความแออัด

ประสิทธิภาพของการดำเนินการท่าเรือโดยทั่วไปจะวัดด้วยตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพหลัก แบบดั้งเดิมบางรายการมุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพในการดำเนินงานและอย่างไรก็ตามในบรรดา ตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน เวลารอรถบรรทุก (Truck waiting time) เป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการดำเนินงานที่ประตูท่าเรือ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบสำคัญของเวลาให้บริการรถบรรทุก และความล่าช้าโดยรวมที่พื้นที่ปฏิบัติงาน ตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานสามารถวัด ประสิทธิภาพของการจัดการการหยุดชะงักในการศึกษาได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีวัตถุประสงค์เพื่อลด ผลกระทบเชิงลบของการมาถึงสายหรือก่อนกำหนด ในเวลารอของรถบรรทุกตรงเวลา ในยุค ปัจจุบันการกำหนดตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานที่มีความเหมาะสมจำเป็นต้องมีการศึกษา พฤติกรรมและความเฉพาะเจาะจงของพื้นที่ที่ทำการศึกษา เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีปัจจัยที่ส่งผล

ต่อประสิทธิภาพที่ต่างกัน ปัจจัยดังกล่าวได้รับการนิยามจากงานวิจัยจำนวนมากว่าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัด (Congestion factor) ที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดที่อาจเกิดขึ้นภายในท่าเรือทั่วโลก

ความแออัดของประตูทางเข้าท่าเรือเป็นลักษณะปัญหาที่สามารถพบได้ทั่วไปในท่าเรือและกลายเป็นสาเหตุที่จำกัดประสิทธิภาพการทำงานของท่าเรือและส่งผลกระทบต่อผู้ประกอบการรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ภายในประเทศที่รับช่วงต่อการขนส่งสินค้าจากการขนส่งทางทะเลอย่างมาก ปัญหาดังกล่าวสามารถเกิดได้จากความไม่แน่นอนของปริมาณการจราจรที่เข้าสู่ท่าเรือและจำนวนช่องทางการให้บริการที่ไม่เหมาะสม (Xu et al., 2021) เส้นทางที่มีการใช้ร่วมกันของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และยานพาหนะประเภทอื่นเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการชะลอตัวของกระแสการจราจรในเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือ (Essi et al., 2021) โดย Saharidis & Konstantzos (2018) ได้ศึกษาพบว่าจำนวนช่องจราจรและความสามารถในการดำเนินงานของประตูที่ไม่เหมาะสมกับปริมาณรถบรรทุกที่เข้าสู่ท่าเรือเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาการติดขัดสอดคล้องกับ Chamchang & Niyomdecha (2021) ที่พบว่าประสิทธิภาพ การทำงานของประตูตรวจสอบและการจัดสรรช่องจราจรที่เหมาะสมกับประเภทของยานพาหนะที่เข้ามาเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยให้จัดระเบียบและบรรเทาความแออัดที่เกิดขึ้น Wang et al., (2018) ได้ศึกษาปัญหาการเข้าแถวคอยของรถบรรทุกโดยพบว่าปัญหาหลักของแถวคอยที่เกิดขึ้นเกิดจากไม่มีการจัดระเบียบประเภทของยานพาหนะที่แตกต่างกันในเส้นทาง การจัดสรรจำนวนช่องจราจรที่ไม่เหมาะสมตามช่วงเวลา อีกทั้ง Zhao et al. (2015) ได้ศึกษาพบว่า การควบคุมสัญญาณไฟจราจรตามปริมาณกระแสการจราจรที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือช่วยให้สามารถแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดเช่น ประตูทางเข้าท่าเรือ และ Lu et al. (2018) นำเสนอการเปลี่ยนทิศทางการจราจรในช่วงสถานการณ์วิกฤตโดยเฉพาะช่องจราจรที่มีการใช้งานบ่อยสามารถเพิ่มปริมาณการไหลของกระแสการจราจรและลดความแออัดในเส้นทางได้ การรวมกันของปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมดส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดที่ประตูทางเข้าออกอย่างรุนแรงอุตสาหกรรมท่าเรือจึงเผชิญกับความท้าทายในการเพิ่มขีดความสามารถในการบริหารจัดการความแออัดอย่างมีประสิทธิภาพ (Chamchang & Niyomdecha, 2021)

แม้ว่าระบบการนัดหมายรถบรรทุกจะถูกนำมาใช้ในท่าเรือหลายแห่งทั่วโลก แต่ก็ไม่ได้ผลประโยชน์ที่คาดหวังไว้ทั้งหมด ตัวอย่างเช่น Zhao and Goodchild (2010) รายงานว่าไม่มีหลักฐานที่แสดงว่าเวลารอรถบรรทุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระบบถูกนำมาใช้ที่ท่าเรือของลอนดอนและลอสแอนเจลิส ในทางกลับกัน (Islam, 2017) เน้นย้ำถึงความท้าทายที่ผู้ให้บริการรถบรรทุกต้องเผชิญเมื่อ TAS ถูกนำมาใช้ที่ท่าเรือในนิวซีแลนด์ ความท้าทายเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการลดความยืดหยุ่นของรถบรรทุกและความเป็นไปได้ในการแบ่งปันความจุระหว่างผู้ให้บริการขนส่ง ดังนั้น

นโยบายการดำเนินงานจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลประโยชน์ที่สามารถทำได้ เมื่อมีการนำระบบประเภทนี้ไปใช้ เนื่องจากสิ่งเหล่านี้เป็นกลไกการแก้ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อ การดำเนินงานของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลายรายของท่าเรือ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้อง พิจารณาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละพอร์ต ดังนั้น ในต้นฉบับนี้ จึงพิจารณากรณีศึกษาในประเทศ เกิดใหม่ที่มีความจุจำกัดและเงื่อนไขพิเศษที่ทำให้การดำเนินงานซับซ้อนมากสำหรับผู้จัดการของท่า เทียบเรือ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลประโยชน์ที่อาจเกิดขึ้นในแง่ของประสิทธิภาพ ของการปฏิบัติงานในลานตลอดจนความแออัดของรถบรรทุก เพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับประโยชน์ ที่คาดหวังและคำแนะนำบางประการเกี่ยวกับขั้นตอนการจัดวางตู้คอนเทนเนอร์ที่อาจส่งผลให้มี การจัดการคอนเทนเนอร์ใหม่น้อยลง

กลยุทธ์ที่อธิบายข้างต้นเหมาะสมสำหรับท่าเรือที่มีพื้นที่เพียงพอในการจัดคิวและลำดับของ รถบรรทุกใหม่สำหรับการจัดส่งตู้คอนเทนเนอร์ ซึ่งไม่ใช่กรณีในท่าเทียบเรือส่วนใหญ่ในประเทศ กำลังพัฒนาที่มีพื้นที่จำกัดมาก มิฉะนั้น ความแออัดที่ทางเข้าท่าเรืออาจเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีความพยายามจะนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาคความแออัดด้วยวิธีการประเมินปัจจัยที่ส่งผล กระทบต่อความแออัดที่เกิดขึ้นในกระแสน้ำจราจรในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Gracia et al. (2016) วิเคราะห์กรณีศึกษาท่าเรือซานอันโตนิโอของชิลีเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อความ แออัดและปรับปรุงการควบคุมประตูของสถานีขนส่งของรถบรรทุกขาเข้า เวลาตอบสนอง และ การส่งมอบตู้คอนเทนเนอร์โดยใช้นโยบายการแบ่งช่องจราจรที่มีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการออกแบบ แพกทอเรียลแบบเศษส่วนเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมได้ในการวัดระดับการบริการ ที่แตกต่างกัน 2 แบบ Ming et al. (2014) ได้วิเคราะห์ความยาวคิวและเวลารอโดยเฉลี่ยของระบบ ประตูท่าเทียบเรือตู้สินค้ารถไฟ ตลอดจนถึงจำนวนช่องทางบริการที่เหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาต่าง ๆ ด้วยโมเดลการจัดที่ได้รับการพัฒนาตามการกระจายของช่วงเวลาที่มาถึงและเวลาให้บริการเพื่อ วิเคราะห์ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแออัดและนำปัจจัยดังกล่าวมากำหนดนโยบายในการแก้ไขปัญหา โดยผลลัพธ์พบว่าปัจจัยด้านจำนวนช่องทางบริการที่เหมาะสมสามารถช่วยลดระยะเวลา การรอ คอยขอยานพาหนะได้อย่างมีนัยสำคัญ Grubisic et al. (2020) พัฒนาแบบจำลองสภาพ การจราจร เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระแสการไหลของยานพาหนะที่เข้าสู่ท่าเรือในเมืองริเยกา ประเทศ โครเอเชีย โดยมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัด ผลลัพธ์ระบุว่าปัจจัยความ ยาวของช่องจราจรและจุดหยุดรถที่ไม่เหมาะสมเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาการจราจรที่ติดขัด อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยอีกหลายชิ้นได้กล่าวถึงปัญหาความแออัดที่เกิดขึ้นภายในท่าเรือต่าง ๆ ทั่ว โลก โดยเฉพาะปัญหาความแออัดของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าสู่ท่าเรือ (Saharidis & Konstantzos, 2018) ประตูทางเข้าท่าเรือเป็นจุดคอขวดในการจำกัดการเพิ่มประสิทธิภาพ การทำงานของท่าเรือคอนเทนเนอร์ โดยการเพิ่มจำนวนรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าสู่ท่าเรือทำ

ให้เกิดปัญหาแฉกคอคยที่ประตูทางเข้าอย่างรุนแรง (Essi et al., 2021) ถึงแม้ความแออัดของท่าเรือทั้งหมดลดลงได้โดยการขยายโครงสร้างพื้นฐานเป็นทางออกที่เร็วที่สุด แต่ยังมีค่าใช้จ่ายและใช้เวลานานที่สุด ดังนั้นการศึกษาหาปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแออัดจากสภาพแวดล้อมการดำเนินการปัจจุบันสามารถให้ประโยชน์ที่ยั่งยืน (Xu et al., 2021) โดยทั่วไปปัญหาความแออัดที่ประตูอาคารผู้โดยสารตู้คอนเทนเนอร์สามารถบรรเทาลงได้ด้วยการเพิ่มจำนวนช่องทางบริการ อย่างไรก็ตามท่าเรือหลายแห่งอาจเกิดข้อจำกัดของพื้นที่ว่างและต้นทุนการก่อสร้างที่สูง จึงไม่สามารถรองรับการขยายประตูสำหรับท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ทั้งหมดได้ (Wang et al., 2018) ดังนั้นการกำหนดวิธีการเปลี่ยนแปลง การทำงานของประตูที่มีความยืดหยุ่นจึงกลายเป็นวิธีการแก้ปัญหาในปัจจุบันที่ใช้งานได้จริงและลดงบประมาณการลงทุน โดยสามารถแบ่งกลุ่มของหัวข้อการศึกษาได้แก่ 1) การจัดการรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และ 2) การดำเนินงานของประตูท่าเรือ

สำหรับมุมมองการจัดการรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และมุมมองของการดำเนินงานของประตูท่าเรือ Phan and Kim (2016) นำเสนอแนวทางการกำหนดการเจรจาเพื่อจัดสรรช่วงเวลาการเข้ามาของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ของระหว่างบริษัทรถบรรทุกหลายแห่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณรถบรรทุกที่เข้ามาในช่วงเวลาเร่งด่วน Azab and Eltawil (2016) นำเสนอแบบจำลองสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกและแนะนำกลยุทธ์สำหรับผู้ปฏิบัติงานเพื่อลดเวลาเสียโดยไม่กระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของประตูท่าเรือ Chen and Jiang (2016) นำเสนอแนวทางการจัดการ การเดินทางของรถบรรทุกด้วยช่วงเวลาตามความสัมพันธ์ระหว่างการให้บริการรถบรรทุกและเรือโดยปรับขนาดหน้าต่างเวลาและทำการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบกลยุทธ์เน้นความสำคัญของการประสานงาน การวางแผนและประสิทธิผลของกลยุทธ์ Liu et al. (2023) การกำหนดระดับตารางเวลาการนัดหมายรถบรรทุกล่วงหน้าที่มีประสิทธิภาพเพื่อบรรเทาความแออัดมีประสิทธิภาพ

สำหรับมุมมองของการดำเนินงานและการจัดการประตูท่าเทียบเรือ Fleming et al. (2013) นำเสนอการจำลองแบบใช้ Agent เพื่อสร้างแบบจำลองการผสมผสานระหว่างการปรับปรุงโครงสร้างถนนและกลยุทธ์การวางแผนทางกายภาพเพื่อแก้ไขปัญหา (Kwateng et al., 2017) การปรับปรุงถนนและกลยุทธ์การเพิ่มความจุของที่จอดรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เพื่อลดการไหลของจรวดอย่างหนักในทิศทางเดียว (Kiunsi, 2013) การเพิ่มช่องทางในช่วงเวลาเร่งด่วนของท่าเรือที่ความยาวของคิวของรถบรรทุกที่อาจเกินความจุของถนน (Grubišić et al., 2020) บางงานวิจัยนำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาความแออัดที่แตกต่างออกไป เช่น การสร้างพันธมิตรระหว่างท่าเรือเพื่อแบ่งปันพื้นที่ท่าเรือสามารถช่วยเพิ่มความจุในการรองรับรถบรรทุกที่เข้าสู่ท่าเรือ (Lin et al., 2022) หรือการพยายามจัดการการเดินทางของรถบรรทุกและเปลี่ยนการจราจรจากกลางวันไปกลางคืน (Nze & Onyemechi, 2018) ความแออัดของท่าเรือบางส่วนเกี่ยวกับ

การวางแผนและกฎระเบียบที่ไม่สอดคล้องกับการแก้ไขปัญหา รวมถึงการนำเทคโนโลยีมาใช้โดยไม่สัมพันธ์กับพฤติกรรมของผู้รับช่วงต่อการขนส่งทางรถบรรทุก Tang et al. (2022) เสนอแนวทางการเพิ่มความยืดหยุ่นของกระบวนการภายในท่าเรือเพื่อลดการหยุดชะงักในการจัดสรรท่าเทียบเรือแบบไดนามิก Mnasri และ Alrashidi (2021) แนะนำแบบจำลองการจัดสรรท่าเทียบเรือแบบไดนามิกและขยายความยืดหยุ่นของช่วงเวลาในการมาถึงของเรือเพื่อช่วยให้การวางแผนตามเวลามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น Martin-Iradi et al. (2022) ใช้ทฤษฎีเกมความร่วมมือและการเพิ่มประสิทธิภาพที่แน่นอนเพื่อลดเวลารวมและต้นทุนการจัดการ Guo et al. (2023) นำเสนอแนวทางการเพิ่มความร่วมมือระหว่างเทอร์มินัลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน Bouzekri et al. (2023) ขยายกรอบแนวทางการจัดสรรท่าเทียบเรือโดยการพิจารณาเสถียรภาพของเรือและการกำหนดเส้นทางสายพานลำเลียงในท่าเรือจำนวนมาก Jiang et al. (2022) ได้สำรวจการบูรณาการข้อจำกัดการปล่อยคาร์บอนเข้ากับการจัดสรรท่าเทียบเรือและแบบจำลองการจัดตารางเดินเรือโดยปรับการดำเนินงานของท่าเรือให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ด้านสิ่งแวดล้อม Ursavas (2022) ได้ศึกษาเกี่ยวกับนโยบายการจัดสรรท่าเทียบเรือตามลำดับความสำคัญ โดยเน้นที่ข้อตกลงระหว่างบริษัทเดินเรือและหน่วยงานท่าเรือเพื่อปรับปรุงการตัดสินใจในการดำเนินงาน

อย่างไรก็ตามระบบเลนแบบย้อนกลับเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับโดยเน้นความเรียบง่ายและประสิทธิภาพในการบรรเทาความแออัดโดยไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างพื้นฐานใหม่ที่กว้างขวาง Wenyuan et al. (2018) ศึกษาเรื่องจำนวนช่องจราจรที่เหมาะสมบริเวณประตูตรวจสอบและการกำหนดนโยบายช่องจราจรแบบสวนกระแส พบว่าการเพิ่มจำนวนประตูให้เหมาะสมสามารถลดความแออัดที่ประตูได้อย่างมีนัยสำคัญ Zhao et al. (2015) กำหนดเลนแบบย้อนกลับภายในเส้นทางร่วมกับการปรับวิธีการควบคุมสัญญาณให้เหมาะสมเป็นวิธีการแบบดั้งเดิมในการจัดการจราจรที่ทางแยกที่ได้รับการยอมรับและสามารถรองรับการขยายตัวของปริมาณการจราจรที่จะเข้าสู่ท่าเรือในอนาคต Lu et al. (2018) พัฒนาวิธีการเปลี่ยนทิศทางการจราจรเพื่อลดความยาวของการจราจรติดขัดด้วยวิธีการเปิดหรือปิดเลนสำหรับช่องจราจรที่มีการใช้งานบ่อย

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนนี้นำเสนอภาพรวมของวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการประเมินความแออัดที่เกิดขึ้นในบริเวณท่าเรือแหลมฉบังของประเทศไทย การวิเคราะห์ปัจจัยความแออัด แก้ไขปัญหาความแออัดที่ประตูท่าเรือและการสร้างสถานการณ์ทางเลือกในบริบทของการจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค นอกจากนี้การเปรียบเทียบเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขปัญหาแบบดั้งเดิม โดย

มุ่งเน้นไปที่การศึกษาปัญหาด้านความแออัดการเข้าแถวคอยของรถบรรทุกที่ทางเข้าท่าเรือจากมุมมองการจัดการรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และมุมมองของการดำเนินงานของประตู่ท่าเรือ ดังนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

Daniel Krajzewicz et al. (2014) ได้ทำการศึกษาถึงแนวทางการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร SUMO โดยเลือกใช้พื้นที่ทางหลวงหมายเลข I-80 และ I-880 ในประเทศอเมริกาเป็นพื้นที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการจำลองสภาพการจราจร เนื่องจากเป็นเส้นทางที่มีการเสียหายจากการจราจรอยู่บ่อยครั้งและมีพื้นที่สำหรับการติดตั้งเครื่องตรวจจับจำนวนมาก โดยเครื่องตรวจจับทั้งหมดที่มีการติดตั้งรูปแบบลูบหนี้ยวนำคู่ (Double induction loops) สำหรับการวัดความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่ผ่านในเส้นทางโดยจะทำการจัดวางตำแหน่งของเครื่องตรวจจับที่ระยะห่าง 500 เมตรและทุกส่วนของถนนบริเวณต้นทางเลี้ยวและทางแยก ผลการวิจัยพบว่าโปรแกรมจำลองสภาพการจราจร SUMO สามารถจำลองการเคลื่อนไหวของยานพาหนะได้เฉลี่ย 1 ล้านครั้งต่อวินาที ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของเครือข่าย โปรแกรมจำลองสภาพการจราจร SUMO สามารถใช้สำหรับการสอบเทียบแบบจำลองการจราจรจุลภาคจากข้อมูลที่มีการเก็บรวบรวมจากพื้นที่กรณีศึกษาได้อย่าง

Maciejewski (2010) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบระบบการจำลองการไหลของการจราจรจุลภาคสำหรับพื้นที่ในเมือง โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรที่ได้รับความนิยมในการดำเนินงานวิจัยจำนวน 3 โปรแกรม ได้แก่ TRANSIMS, SUMO และ VISSIM สำหรับการจำลองการไหลของการจราจรจุลภาคในเครือข่ายถนนในเมือง ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งขั้นตอนการศึกษาเปรียบเทียบออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนหนึ่งเป็นการอธิบายปัญหาของการสร้างแบบจำลอง ขั้นตอนที่ 2 การจำลองการไหลของการจราจร และขั้นตอนที่ 3 เป็นการแนะนำโปรแกรมที่เลือกไว้ จากนั้นจึงนำเสนอการแนวทางการสร้างแบบจำลองและการจำลองสภาพการจราจร เพื่อการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงเปรียบเทียบสำหรับทั้ง 3 โปรแกรม โดยอ้างอิงถึงข้อมูลปริมาณการดำเนินงานที่มีการเก็บรวบรวมไว้จริง ผลการทดลองพบว่าโปรแกรม VISSIM ช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองและการจำลองที่แม่นยำที่สุด โดยให้ความสำคัญกับความสมจริงในแบบจำลองด้านเครือข่าย ยานพาหนะและพฤติกรรมของผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตามความแม่นยำดังกล่าวต้องแลกมาด้วยความเร็วการจำลองที่ต่ำและขอบเขตที่จำกัด ตรงข้ามกับโปรแกรม TRANSIMS ซึ่งโมเดลการไหลของการจราจรระดับจุลภาคที่มีความละเอียดต่ำที่สุดแต่ในขณะเดียวกัน โปรแกรมสามารถจำลองสถานการณ์ได้ด้วยความเร็วสูงและรองรับการประมวลผลหลายตัว ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับการจำลองการจราจรในระดับภูมิภาคที่มียานพาหนะจำนวนมาก โดยอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความน่าสนใจคือ โปรแกรม SUMO ที่ถือได้ว่าเป็นจุดกึ่งกลางของทั้ง

2 โปรแกรมข้างต้น โปรแกรมมีความสมเหตุสมผล สามารถจำลองการดำเนินงานของยานพาหนะ ในที่มีความต่อเนื่องได้ในพื้นที่การจำลองสำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่แม้แต่ในระดับภูมิภาค

Capela et al. (2013) ศึกษาเรื่องการเตรียมข้อมูลสำหรับการจำลองการจราจรในเมือง โดยใช้โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค SUMO โดยกล่าวว่าในปัจจุบันประชากรโลก มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดความต้องการด้านการขนส่งของมนุษย์ในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอดีต การจราจรบนถนนในเมืองใหญ่เป็นปัญหาใหญ่และเร่งด่วน จากปัญหาข้างต้นถึงกลายมาเป็นวัตถุประสงค์ของการเป็นเป้าหมายของการทบทวนปัญหาครั้งนี้ บทความนี้จะแนะนำโครงการขนาดใหญ่ที่เรียกว่า COSMO ในเมืองกูอิงบรา (Coimbra) ประเทศโปรตุเกสเป็นพื้นที่การศึกษา ในการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยมีเป้าหมายคือการจำลองสภาพการจราจรในพื้นที่เขตเมืองโดยใช้โปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค SUMO เพื่อการทดลองต่างปรับเปลี่ยนกระบวนการดำเนินงานแปรผันตามจำนวนยานพาหนะในเครือข่ายการขนส่งและตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้อง ผลลัพธ์การศึกษาพบว่าโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรที่เลือกสามารถจำลองการจราจรในเมือง Coimbra ได้อย่างแบบสมจริง โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งปลายทางและต้นทางตามข้อมูลจริงและชุดคำสั่งการกำหนดเส้นทาง ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าเครื่องจำลองสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมในด้านที่เกี่ยวข้องกับการจราจรในเมืองและการจัดการเครือข่ายถนนในพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น

Spasovic, Besenski, and He (2015) การเติบโตของปริมาตรคอนเทนเนอร์คาดว่าจะส่งผลให้เกิดความแออัดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผู้ประกอบการทำเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์และหน่วยงานของรัฐอยู่ภายใต้แรงกดดันในการกำหนดกลยุทธ์และการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่ทราบความถี่ในการมาถึงของเรือ Post-Panamax การศึกษาจึงตรวจสอบความต้องการที่สำคัญซึ่งจะส่งผลให้ควิลถึงขีดจำกัด ของพื้นที่ศึกษาและขยายไปยังเครือข่ายทางหลวง ผลการวิจัยพบว่าความต้องการรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้น 45% อาจทำให้ควิลเกินบนเครือข่ายทางหลวง การสังเกตด้วยสายตาของการจำลองเผยให้เห็นว่าทางแยกที่มีสัญญาณทำให้เกิดความล่าช้าของรถบรรทุกและจำกัดการเข้าถึงประตูท่าเทียบเรือในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และทำให้ควิลเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้น แบบจำลองสามารถปรับปรุงได้ด้วยการวิจัยในอนาคตดังต่อไปนี้ ชั้นแรกสามารถขยายชุดข้อมูลการนับจำนวนรถจากการพัฒนาการกระจายของรถ และจำนวนล่าสุดควิลใช้เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของรถ การใช้ความพยายามล่าสุดของหน่วยงานของรัฐในการปรับปรุงเครือข่ายถนน สัญญาณ และตรรกะของรถบรรทุกที่อยู่เบื้องหลังการเคลื่อนตัวของรถขนส่งสินค้าระยะสั้นระหว่างอาคารผู้โดยสารและคลังเก็บแชสซีจะช่วยปรับปรุงการทำงานของโหมคนีด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความล่าช้าที่เกิดขึ้นในคลังเก็บแชสซีควรถูกนำมาใช้ในโมเดล

Burhani, Zukhruf, and Frazila (2017) ศึกษาปัญหาการประเมินประสิทธิภาพของท่าเรือที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เช่น ปริมาณงาน การรอท่าเทียบเรือ เป็นต้น ตลอดจนระดับการใช้ อุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกภายในระยะเวลาหนึ่ง การประเมินผลการปฏิบัติงานจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนานโยบายที่เกี่ยวข้องเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของท่าเรือให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การประเมินมักจะดำเนินการตามแนวทางที่กำหนด ซึ่งแทบจะไม่สามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในท่าเรือได้ ดังนั้น บทความนี้จึงนำเสนอแบบจำลองจุลภาคแบบสุ่มสำหรับการตรวจสอบผลกระทบของความแปรผันของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพของท่าเรือ รูปแบบต่าง ๆ ได้มาจากข้อมูลจริงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมจริงยิ่งขึ้น โมเดลนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดยใช้ MATLAB และ Simulink ตามทฤษฎีการจลนศาสตร์ บทความนี้นำเสนอแบบจำลองจุลภาคสำหรับวิเคราะห์ผลการปฏิบัติงานของลานคอนเทนเนอร์เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ข้อมูลจริงของลานคอนเทนเนอร์ถูกพิจารณาในแบบจำลองการจำลองดำเนินการโดยการสร้างสถานการณ์เริ่มต้นที่แตกต่างกันหลายตัวเพื่ออธิบายระบบในโลกแห่งความเป็นจริง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถระบุปัญหาการดำเนินงานหลายอย่างของลานคอนเทนเนอร์ซึ่งอาจใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพของลานคอนเทนเนอร์รวมทั้งสำหรับการจัดการการทำงานของลานคอนเทนเนอร์

Raju, Mishra, Chepuri, Arkatkar, and Joshi (2017) นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจอดรถบรรทุกที่ออกแบบโดยใช้การจำลองการจราจรด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้ VISSIM ก่อนดำเนินการในสภาพภาคสนาม ด้วยความช่วยเหลือของอาคารจอดรถที่ออกแบบและความต้องการที่จอดรถที่คาดการณ์ไว้ เครื่องหมายที่จอดรถทั้งหมดถูกจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ VISSIM 8.0 จากแบบจำลองการจำลองนี้ สถานการณ์จำลองต่าง ๆ จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ความต้องการที่แตกต่างกัน (ปริมาณการจราจรหรืออัตราการมาถึงที่แตกต่างกัน) และอุปทาน (ระยะเวลาการจอดรถ) ในระดับต่าง ๆ สถานการณ์เหล่านี้ส่วนใหญ่รวมถึงการเปลี่ยนแปลงในการมาถึงของยานพาหนะด้วยอัตราการมาถึงที่สม่ำเสมอของปริมาณการจราจรที่แตกต่างกัน ปริมาณการจราจรโดยประมาณที่สม่ำเสมอที่อัตราการมาถึงที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาการจอดรถจากระยะเวลาการออกแบบโดยประมาณ จากสิ่งนี้ ประสิทธิภาพการทำงานในสถานการณ์ต่าง ๆ จะได้รับการประเมินโดยใช้ดัชนีการจอดรถที่แตกต่างกัน สังเกตว่าอาคารจอดรถที่ออกแบบไว้รองรับน้ำหนักที่จอดรถที่ออกแบบไว้ โดยมีประสิทธิภาพ 74% และมีปัจจัยส่วนต่างในการให้บริการโหลดที่จอดรถมากกว่าปริมาณที่จอดรถที่ออกแบบไว้

Ramirez-Nafarrate et al. (2017) ศึกษาผลกระทบของการนำระบบนัดหมายรถบรรทุกมาใช้ในท่าเทียบเรือ โดยพิจารณาเฉพาะกรณีของท่าเรืออาริกา การวิเคราะห์รวมถึงตัวชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับการดำเนินงานของลานตลอดจนการวัดความแออัดด้วยแบบจำลอง

สถานการณ์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นการลดลงอย่างมากของเวลารอคอยและความยาวของแถวคอยเมื่อใช้ระบบนัดหมายรถบรรทุกแม้ว่าความต้องการประตูท่าเทียบเรือต่อวันจะแตกต่างกันไปในแต่ละสัปดาห์ การลดเวลารอคอยรถบรรทุกหมายถึงเวลาตอบสนองที่สั้นลงสำหรับรถบรรทุกและความแออัดที่น้อยลงในบริเวณท่าเรือและทางหลวงรอบท่าเรือ ซึ่งอาจเพิ่มความปลอดภัยโดยรวมสำหรับผู้ขับขี่

Islam (2017) ศึกษาปัญหาการขาดแคลนยานพาหนะในการขนส่งสินค้าท่าเรือ มีความจำเป็นต้องเพิ่มความสามารถในการขนส่งสำหรับสินค้าที่บรรจุในตู้คอนเทนเนอร์ ดังนั้นประเด็นสำคัญที่ควรค่าแก่การประเมินคือการมาถึงและออกเดินทางของจำนวนรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เปล่าเข้าหรือออกจากท่าเรือด้วยแบบจำลองสถานการณ์ การเดินทางด้วยรถบรรทุกเปล่าที่ไม่ก่อผลจะลดความสามารถในการขนส่งในห่วงโซ่การจัดจำหน่ายตู้คอนเทนเนอร์ ควบคุมไว้กับทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอน ความแออัดของการจราจร การใช้เชื้อเพลิง และมลภาวะเพิ่มขึ้น การวิจัยเชิงวิชาการที่แก้ไขปัญหาคือการเดินทางที่เทียบเปล่าจากมุมมองของห่วงโซ่อุปทานยังคงหายาก จนถึงปัจจุบัน วรรณกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวกับปัญหาการเดินทางที่เปล่าประโยชน์ได้มองข้ามประโยชน์ของแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับผู้ให้บริการทางถนนทั้งหมดที่เกี่ยวข้องและการกำหนดสถานที่ตั้งภายนอกเพื่อลดความแออัด

Li et al. (2018) นำเสนอทางเลือกกลยุทธ์ในการตอบสนองการหยุดชะงักของท่าเทียบเรือ 4 รูปแบบ ในการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละกลยุทธ์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์ P&MM มีประสิทธิภาพสูงสุดในตัวชี้วัดของการตอบสนองจากการหยุดชะงัก ซึ่งจะช่วยให้รถบรรทุกสามารถเข้าถึงได้ตรงเวลาจะได้รับบริการอย่างทันท่วงที โดยมีประสิทธิภาพเหนือกว่ารูปแบบอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์ที่มีเวลามาถึงและอัตราการใช้อุปกรณ์สูง เมื่อเปรียบเทียบกับกลยุทธ์ FCFS แล้ว P&MM จะลดลงประมาณ 76% ของเวลาตอบสนองของรถบรรทุกตรงเวลา สำหรับ KPI ของสภาพแวดล้อม กลยุทธ์ MMDY มีประสิทธิภาพเหนือกว่ากลยุทธ์อื่น ๆ ในกรณีส่วนใหญ่ แต่ในกรณีอื่น ๆ ที่มีความตรงต่อเวลาน้อยกว่าและมีปริมาณของคอนเทนเนอร์น้อยกว่า กลยุทธ์ MMDY อาจดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ KPI ของสภาพแวดล้อมให้น้ำหนักที่สูงกว่า KPI อื่น ๆ

พัชรภรณ์ ยอดสุรางค์ และวเรศรา วีระวัฒน์ (2562) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสภาพจราจรระบบขนส่งสาธารณะ: กรณีศึกษาเมืองภูเก็ต โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาการให้บริการระบบขนส่งสาธารณะเพื่อรองรับการเติบโตของเมืองอย่างยั่งยืน โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรในระดับจุลภาคด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VISSIM เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการให้บริการรถโดยสารสาธารณะในเมืองภูเก็ตจำนวนเส้นทางที่ 2 พิจารณาผลกระทบ 1) ระยะเวลาการเดินทางจากต้นทางถึงปลายทาง 2) ความเร็วเฉลี่ยในโครงข่าย และ 3) เวลาถึงสถานีปลายทางของรถโดยสารสาธารณะ จากผลการวิเคราะห์พบว่า

การที่ปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในโครงข่ายลดลงร้อยละ 8.6 การกำหนดช่องทางการเดินรถเฉพาะรถโดยสารสาธารณะ สามารถลดระยะเวลาการเดินทางจากเดิมได้ร้อยละ 5.6

Grubiaj, Krljan, Maglic, and Vilke (2020) การเติบโตของการขนส่งผู้คอนเทนเนอร์ ทำให้ความต้องการการจราจรเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์ที่ท่าเรือผู้คอนเทนเนอร์ ตั้งอยู่ใกล้ใจกลางเมือง ปัญหาหลักคือความแออัดของการจราจรบนเครือข่ายที่เกิดจากการรวมยานพาหนะสำหรับงานหนักเข้ากับกระแสการจราจรในเมือง วัตถุประสงค์หลักคือการระบุพารามิเตอร์การรับส่งข้อมูลที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อองค์กรและสิ่งแวดล้อมต่อความต้องการการจราจรที่มีอยู่และในอนาคต แบบจำลองปริมาณการใช้ข้อมูลระดับจุลภาคถูกนำมาใช้สำหรับการทดสอบขั้นอุปสงค์ อุปทานและการควบคุมตามกรอบงานที่เสนอ โมเดลนี้ถูกสร้างขึ้นและเปรียบเทียบโดยอิงจากตัวอย่างของท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ขนาดกลาง "Brajdica" และเมืองริเยกา ประเทศโครเอเชีย ผลลัพธ์ระบุว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความยาวแถวคอยบนถนนใกล้ถึงท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ และ ค่าหน่วยเวลาหยุดบนทางเดินหลักในเมือง ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สูงทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น และการสร้างมลภาวะเพิ่มเติม ด้วยเหตุนี้ จึงมีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของประสิทธิภาพของระบบการจราจร โดยการกระจายเวลาของประตูทางเข้า-ออกลดลง 10% หลังจากจำลองการทำงานซ้ำแล้วซ้ำอีก ผลลัพธ์บ่งชี้ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงต่อการลดลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และมลพิษในรถยนต์

Hervás-Peralta et al. (2020) ศึกษาเรื่องระบบปฏิบัติการท่าเทียบเรือ (Terminal Operating System: TOS) ซึ่งเป็นระบบควบคุมการปฏิบัติงานที่ใช้ในท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ การปรับปรุง TOS ด้วยฟังก์ชันการทำงานที่ดีขึ้นและการเพิ่มประสิทธิภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของท่าเทียบเรือ ในการศึกษาก่อนหน้านี้ ผู้เขียนระบุและถ่วงน้ำหนักฟังก์ชัน TOS โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ลำดับชั้น (AHP) เพื่อการปรับปรุงฟังก์ชันการทำงานของ TOS ที่มีอิทธิพลมากที่สุดส่งผลต่อการปฏิบัติงานและประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมของท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ของระบบ TOS ที่ใช้ในปัจจุบันที่ท่าเทียบเรือ Intersagunto (สเปน) โดยการจำลองระดับจุลภาคโดยใช้โปรแกรม FlexTerm ผลลัพธ์แสดงว่าการปรับเปลี่ยน TOS สามารถปรับปรุงลักษณะการทำงานบางอย่างได้ เช่น จำนวนผู้คอนเทนเนอร์ที่จัดการ การยึดครองลานจัดเก็บและเวลาพัก อย่างไรก็ตามไม่มี การปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญในการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวคิดการแก้ไขปัญหาความแออัดที่ท่าเรือ

Chen et al. (2011) ศึกษาแบบจำลองการประมาณการคงที่แบบชี้จุดเชิงวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์กระบวนการจัดคิวรถบรรทุกที่ขึ้นกับเวลาด้วยการกระจายเวลาบริการแบบสุ่มที่ประตูและ

ลานคอนเทนเนอร์ของท่าเทียบเรือ โปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยลดเวลาการดำเนินการของรถบรรทุกภายในท่าเรือ วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพแบบ 2 เฟสใช้ใน การคำนวณรูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกที่เหมาะสมกับระบบก่อน จากนั้นจึงค้นหารูปแบบที่ต้องการของค่าผ่านทางที่แตกต่างกันตามเวลาซึ่งจะนำไปสู่รูปแบบการมาถึงที่เหมาะสมที่สุด มีการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณและความถูกต้องของแบบจำลองการปรับให้เหมาะสม

Van et al. (2013) ศึกษาเรื่องการประเมินผลกระทบของการนัดหมายรถบรรทุกต่อประสิทธิภาพการขนถ่ายตู้คอนเทนเนอร์ โดยการทดลองระบบนัดหมายรถบรรทุกเพื่อพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพการวางซ้อนตู้คอนเทนเนอร์ การนัดหมายการออกเดินทางสำหรับรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่จะมารับโดยใช้ข้อมูลจากการนัดหมายรถบรรทุกที่มีประโยชน์ 3 ประการ 1) ชุดคำสั่งการซ้อนสามารถใช้เวลาออกเดินทางที่แม่นยำยิ่งขึ้น เพื่อเลือกตำแหน่งการซ้อนที่ดีขึ้นในกรณีที่คอนเทนเนอร์จะออกเดินทางไม่นานหลังจากที่จัดเก็บในการวางซ้อน 2) ชุดคำสั่งสามารถพยายามหลีกเลี่ยงการจัดเก็บคอนเทนเนอร์บนคอนเทนเนอร์ที่ซ้อนกัน เพื่อปรับปรุงเวลาออกของคอนเทนเนอร์ซึ่งมีข้อมูลเวลาออกเดินทางที่ถูกต้องแม่นยำ 3) ชุดคำสั่ง การซ้อนสามารถพยายามปรับปรุงตำแหน่งของคอนเทนเนอร์เมื่อมีข้อมูลนี้โดยดำเนินการดูแลทำความสะอาดก่อนออกเดินทางจริง ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการนัดหมายเฉลี่ย 0.5 – 24 ชั่วโมงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างมาก เวลานัดหมายโดยเฉลี่ย 4 ชั่วโมงเพียงพอแล้วที่จะทำให้มีสัดส่วนที่สำคัญของการย้ายการดูแลทำความสะอาด ให้เสร็จสิ้นก่อนออกเดินทางจริง

Chen, Govindan, and Yang (2013) ศึกษาการจราจรที่ติดขัดและแถวคอยรถบรรทุกยาวที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ลดลงและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างร้ายแรง เพื่อลดความแออัดของประตู ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า Vessel Dependent Time Windows (VDTWs) เพื่อควบคุมการมาถึงของรถบรรทุก ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแบ่งรายการรถบรรทุกออกเป็นกลุ่มและกำหนดกรอบเวลาที่แตกต่างกันให้กับกลุ่ม วิธีการ VDTWs ที่เสนอประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) คาดการณ์การมาถึงของรถบรรทุกตามการกำหนดกรอบเวลา 2) การประมาณความยาวคิวของรถบรรทุก และ 3) การปรับการจัดกรอบเวลาให้เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนรวมในระบบ ชุดคำสั่งทางพันธุกรรมแบบเดิม (GA) และแบบหลายสังคัม กำหนดชุดคำสั่งไฮบริดที่ใช้ GA และ Simulated Annealing ใช้เพื่อแก้ปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่สุด มีการดำเนินการกรณีศึกษาโดยอิงจากท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์จริงในจีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี VDTWs สามารถทำให้การมาถึงของรถบรรทุกราบเรียบและลดความแออัดของประตูได้อย่างมาก

Chen, Govindan, and Yang (2013) ศึกษาปัญหาแถวคอยรถบรรทุกที่เป็นปัญหาทั่วไปที่ท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งโดยปกติแล้วทรัพยากรและอุปกรณ์จะถูก

กำหนดให้ให้บริการเรือก่อนรถบรรทุก เพื่อลดการรอคิวของรถบรรทุก ท่าเทียบเรือตู้สินค้าบางแห่ง จึงนำระบบการนัดหมายรถบรรทุกมาใช้เพื่อจัดการการมาถึงของรถบรรทุก นำเสนอนการณ์การใช้งาน TAS 2 สถานการณ์ ได้แก่ TAS แบบคงที่ (STAS) และ TAS แบบพลวัต (DTAS) ชั้นแรก แบบจำลองการจัดคิว $M(t)/Exc(t)$ ที่ไม่คงที่ ใช้ในการวิเคราะห์ระบบประตูปลายทางและแก้ไขด้วยวิธีการประมาณแบบใหม่ จากนั้น อัลกอริทึมทางพันธุกรรมจะถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โค้ดตำรายาวโมงของการนัดหมายรายการใน STAS สำหรับโมเดลคิวที่ได้รับ และเสนอแนวคิดของ DTAS ซึ่งง่ายต่อการใช้งาน และสามารถช่วยเหลือนคนขับรถบรรทุกแต่ละคันสำหรับการนัดหมาย โดยให้การประมาณการเวลารอตามเวลาจริงตามการนัดหมายที่มีอยู่ การวิเคราะห์ของพบว่า DTAS สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบได้อย่างมาก สิ่งสำคัญที่ควรทราบคือรถบรรทุกระหว่างขาเข้า อาจเป็นไปได้ตามการกระจายที่แตกต่างกันในท่าเทียบเรือที่แตกต่างกันและแม้กระทั่งในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

Chen and Yang (2014) ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการที่มีอยู่ในกรณีศึกษาและประเมิน ข้อดีและข้อเสียของปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางเข้าท่าเรือ พัฒนาแบบจำลองการถดถอย แบบอิงการจำลอง (Simulation-based regression model) โดยใช้โปรแกรมจำลองการจราจร ระดับจุลภาค PARMIC ในการจำลองพบว่ากระบวนการชั่วคราวของคิวเป็นไปตามเส้นโค้ง ลอการิทึมธรรมชาติ จากนั้นจึงพัฒนาแบบจำลองการประมาณความยาวคิวโดยอิงตามเส้นโค้ง เหล่านี้ในการทดลองเชิงตัวเลข แบบจำลองที่เสนอมีความแม่นยำในการประมาณค่าที่ดีกว่าวิธี อื่น ๆ ที่มีอยู่ การพัฒนาแบบจำลองการประมาณความยาวคิวสำหรับคิวรถบรรทุกที่ประตู ปลายทางตู้คอนเทนเนอร์พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอทำงานได้ดีกว่าแบบจำลองที่มีอยู่

Minh and Huynh (2017) ศึกษาเรื่องเครื่องมือระดับการวางแผนสำหรับการประเมิน และเพิ่มประสิทธิภาพท่าเรือคอนเทนเนอร์ทางทะเล โดยการใช้แบบจำลองการจัดคิว $M/G/n$ การประมาณการรูปแบบการเคลื่อนที่เพื่อจัดเตรียมเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการประเมินและ เพิ่มประสิทธิภาพแผนผังประตูสำหรับอัตราการมาถึงของรถบรรทุกและอัตราบริการของรถบรรทุก ภายใต้กลยุทธ์การจัดคิวประตู 2 แบบ ได้แก่ แบบรวมกลุ่ม (Nonpooled) และแบบไม่รวมกลุ่ม (Nonpooled) เครื่องมือนี้ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานและนักวิจัย (a) ประเมินการแลกเปลี่ยนระหว่าง กลยุทธ์การจัดคิวแบบรวม (Nonpooled) และไม่แบบไม่รวมกลุ่ม (Nonpooled) การประเมิน ระบบการเข้าคิวหลายระบบ รวมถึง $M/D/n$, $M/M/n$, $M/E/n$ และ $M/G/n$ และ (c) กำหนด จำนวนประตูบริการขั้นต่ำที่จำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าเวลาในคิวรถบรรทุกโดยเฉลี่ยไม่เกินเกณฑ์เวลารอ ที่ระบุ เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถใช้ในแบบเรียลไทม์โดยผู้ควบคุมสถานีเพื่อกำหนดจำนวน ประตูขั้นต่ำที่จำเป็นโดยพิจารณาจากอัตราการมาถึงของรถบรรทุกในปัจจุบัน ผลการทดลองพบว่า ระบบการเข้าคิวแบบรวมกลุ่มให้เวลาในการเข้าคิวรถบรรทุกโดยเฉลี่ยที่ต่ำกว่าระบบการจัดคิวแบบ

ไม่รวมกลุ่ม เมื่ออัตราค่าบริการรถบรรทุกต่ำระบบการจัดคิวแบบไม่รวมกลุ่มจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบการจัดคิวแบบรวมกลุ่มอย่างมาก ข้อบกพร่องของระบบการจัดคิวแบบรวมกลุ่มคือความยาวของคิวที่ยาว คิวที่ยาวอาจทำให้ระบบการจัดคิวแบบรวมกลุ่มใช้งานไม่ได้สำหรับประตูท่าเรือบางผู้วางแผนต้องคำนึงถึงความสอดคล้องระหว่างจำนวนประตูบริการและความยาวของคิว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยิ่งจำนวนประตูบริการต่ำลง คิวก็จะยิ่งยาวขึ้นตามไปด้วย

Zeng, Cheng, and Guo (2014) ศึกษาวิเคราะห์ระบบประตูตู้คอนเทนเนอร์รางรถไฟ โดยแบบจำลองการจัดคิวชั่วคราว $M/E_k/n$ กับแนวทางฮิวริสติกสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาจำนวนช่องทางการบริการที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละช่วงเวลา ผลการทดลองระบุว่าโมเดล $M/E_k/n$ สามารถให้การสะท้อนที่แม่นยำต่อกระบวนการเข้าคิวของระบบประตูลานตู้คอนเทนเนอร์และตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องของความแออัดของประตู เช่น จำนวนรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ในระบบได้ นอกจากนี้ ยังได้ดำเนินการทดสอบความไวที่หลากหลายเพื่อการวิเคราะห์ ปรากฏว่าตัวแบบมีประสิทธิภาพภายใต้สถานะที่แตกต่างกันโดยใช้การคำนวณที่ไม่ซับซ้อนจึงสามารถนำไปใช้เพื่อช่วยในการตัดสินใจได้ นอกจากนี้ เนื่องจากความยืดหยุ่นของวิธีการวิเคราะห์ โมเดลนี้จึงสามารถรวมเข้ากับการปรับให้เหมาะสมได้อย่างง่าย

Phan and Kim (2015) ศึกษาความแออัดของรถบรรทุกในบริเวณท่าเรือทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและการจราจรที่ร้ายแรงในหลายประเทศ สาเหตุหลักประการหนึ่งของความแออัดคือการมาถึงของรถบรรทุกบนถนนในช่วงเวลาเร่งด่วน มีการจัดการกระบวนการเจรจาเพื่อให้รถบรรทุกมาถึงในช่วงเวลาเร่งด่วนระหว่างบริษัทขนส่งหลายแห่งและอาคารผู้โดยสาร กระบวนการเจรจายจะใช้สำหรับระบบการนัดหมายรถบรรทุกถนนในท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ นำเสนอผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเรียกว่าแบบจำลองการตัดสินใจแบบรวมศูนย์ (Centralized decision-making model) และรูปแบบการตัดสินใจแบบกระจาย (Distributed decision-making model) ที่สนับสนุนกระบวนการเจรจาเรื่องเวลามาถึงของรถบรรทุกระหว่างบริษัทขนส่งสินค้าทางรถบรรทุกหลายแห่ง สำหรับการปรับยอดรถบรรทุกขาเข้าให้ราบเรียบ โดยพิจารณาจากความไม่สะดวกของรถบรรทุกจากการเปลี่ยนเวลามาถึงและค่าใช้จ่ายในการรอรถบรรทุกในชั่วโมงเร่งด่วน การศึกษานี้เสนอรูปแบบการตัดสินใจแบบกระจายอำนาจเพื่อสนับสนุนกระบวนการเจรจาระหว่างบริษัทรถบรรทุกและผู้ดำเนินการขนส่งสินค้า มันให้วิธีแก้ปัญหาที่ยอมรับได้สำหรับผู้เล่นทุกคนที่เกี่ยวข้องตลอดจนวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทั้งระบบจากมุมมองของทั่วโลก มีการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวทางในการศึกษานี้

Bentolila, Ziedeneber, Hayuth, and Notteboom (2016) ศึกษาแนวทางการขยายเวลาทำการของท่าเทียบเรือเพื่อเปิดให้บริการในช่วงเวลากลางคืน ทำให้รถบรรทุกมีช่วงเวลาที่ว่างมากขึ้นในการจัดตารางการเดินทางไปยังท่าเทียบเรือจากช่วงที่มีความหนาแน่นของ

เส้นทางโดยเลือกใช้กรณีศึกษาที่ทำเรือไฮฟาของอิสราเอลโดยการตรวจสอบระบบการเปลี่ยนแปลงในท้องถิ่นซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนการจราจรของรถบรรทุกที่ทำเรือจากเวลากลางวันเป็นกลางคืน ผลการศึกษาพบว่าควรมีการพิจารณาลูกค้ารายย่อยและขนาดกลางเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดค่าธรรมเนียมการบรรทุกผลกระทบบ เป็นเรื่องยากมากสำหรับลูกค้าขนาดเล็กและขนาดกลางในการจัดการกับค่าธรรมเนียมบรรทุกผลกระทบบ แม้ว่าลูกค้าเหล่านี้จะเป็นตัวแทนประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของลูกค้าทั้งหมด แต่มีปริมาณขนส่งตู้คอนเทนเนอร์เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นต้องนำระบบนัดหมายรถบรรทุกเข้ามาช่วย

Azab, Karam, and Eltawil (2017) ศึกษาการเติบโตที่เพิ่มขึ้นในการค้าตู้คอนเทนเนอร์ (CTs) กำลังเผชิญกับความแออัดของรถบรรทุกที่ประตูและลาน ปัญหาความแออัดของรถบรรทุกไม่เพียงแต่ส่งผลให้มีแถวคอยยาวของรถบรรทุกที่ประตูและลานท่าเทียบเรือเท่านั้น แต่ยังนำไปสู่เวลาการดำเนินการภายในท่าเรือของรถบรรทุกที่ยาวนานและการปล่อยมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ท่าเทียบเรือหลายแห่งจึงพยายามกำหนดกลยุทธ์และพัฒนาแนวทางใหม่เพื่อลดความแออัดในพื้นที่ปลายทางต่าง ๆ ในบทความนี้จัดการกับปัญหาความแออัดของรถบรรทุกด้วยระบบนัดหมายรถบรรทุกแบบพลวัตและการทำงานร่วมกันแบบใหม่ การทำงานร่วมกันทำให้เกิดการตัดสินใจร่วมกันระหว่างบริษัทรถบรรทุกและฝ่ายจัดการคอนเทนเนอร์ ในขณะที่คุณลักษณะแบบพลวัตของระบบที่เสนอช่วยให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้ง 2 สามารถรับมือกับลักษณะแบบพลวัตของปัญหาการจัดตารางเวลารถบรรทุก Dynamic Collaboration Truck Appointment System (DCTAS) ใหม่ได้รับการพัฒนาโดยใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ การจำลองแบบบูรณาการ แนวทางที่เสนอนี้รวมโมเดล MIP เข้ากับแบบจำลองเหตุการณ์ที่ไม่ต่อเนื่อง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า DCTAS ที่เสนอสามารถลดความแออัดของท่าเทียบเรือและทำให้อัตราการใช้งานในท่าเทียบเรือลดลง

Owusu et al. (2017) ศึกษาการประเมินตำแหน่งของท่าเรือภายในประเทศโดยใช้แบบจำลองความโน้มถ่วง ข้อมูลสำหรับแบบจำลองความโน้มถ่วงคือระยะทางจากท่าเรือหลักในประเทศกานาและท่าเรือ Boankra ไปจนถึงจุดหมายปลายทางหลังแผ่นดินใหญ่และจำนวนประชากรของจุดหมายปลายทาง นอกจากนี้ ผู้ตอบแบบสอบถาม 210 คน ได้รับการคัดเลือกและสัมภาษณ์เกี่ยวกับการมีส่วนร่วมของแนวคิดท่าเรือต่อการจัดการเศรษฐกิจและการขนส่งในประเทศกานา วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้คือเพื่อประเมินศักยภาพของการบูรณาการท่าเรือ Boankra เข้ากับห่วงโซ่อุปทานในประเทศกานา ผลการวิจัยชี้ว่าท่าเรือ Boankra จะทำหน้าที่เป็นวิธีแก้ไขปัญหาคความแออัดที่ท่าเรือได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการสร้างท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ที่ท่าเรือ ผลกระทบทางเศรษฐกิจจากการดำเนินการท่าเรือภายในประเทศคือการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งทั้งหมดและค่าใช้จ่ายภายนอก

Gracia, González-Ramírez, and Mar-Ortiz (2017) ศึกษาการวิเคราะห์กรณีศึกษาเกี่ยวกับท่าเทียบเรือของชิลีโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแออัดและปรับปรุงการควบคุมประตูของอาคารผู้โดยสารโดยการพัฒนาการแบ่งช่องเลนที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจำลองสถานการณ์ที่เป็นไปได้หลายประการด้วยระดับการจองที่แตกต่างกันในสภาพแวดล้อมที่คอนเทนเนอร์มาถึงแตกต่างกันอย่างมากในแต่ละวันและตามฤดูกาล ได้มีการเสนอแบบจำลองการจำลองโดยละเอียด จากนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วน (Fractional factorial design) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมได้บนการวัดระดับการบริการ 3 แบบ ซึ่งลดจำนวนสถานการณ์ที่จำเป็นเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ดี ผลการศึกษาพบว่ากลยุทธ์การแบ่งช่องจราจรที่เหมาะสมนั้นเพียงพอที่จะบรรลุผลประโยชน์ที่สำคัญในแง่ของการบรรเทาความแออัดที่ประตูควบคุม อย่างไรก็ตาม ความสำคัญของเกณฑ์แต่ละเกณฑ์คาดว่าจะแตกต่างกันไปในแต่ละท่าเทียบเรือ เพื่อกำหนดเวลาทรัพยากรของตัวเอง สิ่งนี้มีส่วนช่วยในการเสริมสร้างความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของท่าเรือ เนื่องจากการลดความแออัดอาจช่วยลดการปล่อยมลพิษสำหรับการขนส่งสินค้าไปยังท่าเรือ

Lange, Schwientek, and Jahn (2017) ศึกษาสำรวจวรรณกรรมที่ครอบคลุมเกี่ยวกับเวลารอคอยของรถบรรทุกและปัญหาที่เกิดขึ้นจากปัญหาการจราจรคับคั่งที่ท่าเรือ ครอบคลุมวิธีการวิเคราะห์เพื่อลดความแออัดของท่าเรือตั้งแต่การปรับโครงสร้างพื้นฐานให้เหมาะสมจนถึงการควบคุมเวลามาถึงของรถบรรทุกและปัญหาการจราจรติดขัดที่ทางเข้า แม้ว่าปัญหานี้จะได้รับการวิเคราะห์เป็นส่วนใหญ่จากมุมมองของท่าเรือคอนเทนเนอร์ ผลกระทบของปัญหายังส่งผลกระทบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอื่น ๆ ในท่าเรือ เช่น บริษัทขนส่งสินค้า คลังสินค้าเปล่า หรือสถานีขนส่งสินค้า การสำรวจวรรณกรรมที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่วิธีการเดียวหรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย สิ่งนี้นำไปสู่การประเมินที่จำกัดสำหรับเครือข่ายการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกทั้งหมดในท่าเรือ ดังนั้นรูปแบบการจัดหมวดหมู่ที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นพื้นฐานในการระบุพื้นที่การวิจัยเพิ่มเติมที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นไปได้ ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้เกิดแนวทางแบบองค์รวมมากขึ้น

Caballini, Mar-Ortiz, Gracia, and Sacone (2018) ศึกษาการเขียนโปรแกรมจำนวนเต็มกำหนดขึ้นเพื่อกำหนดเวลาการทำงานของรถบรรทุกที่ต้องรับหรือส่งมอบตู้คอนเทนเนอร์ในท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ที่ทำงานด้วย TAS แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พยายามกำหนดเวลาการนัดหมายในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยเวลาเปิดประตู โดยมีเป้าหมายในการปรับทรัพยากรของท่าเทียบเรือให้เหมาะสมที่สุด เพื่อรับประกันระดับบริการที่กำหนดไว้ล่วงหน้าสำหรับผู้ขนส่งสินค้า เช่น เวลาตอบสนองสูงสุดในท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ ในขณะที่ลดความแออัดภายในท่าเทียบเรือ ความถูกต้องของแนวทางการปรับให้เหมาะสมที่เสนอถูกเน้นโดยทดลองอิงตามชุดข้อมูลจริงที่จัดเตรียมโดยท่าเรือของอิตาลีและเม็กซิโก ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่เสนอนั้นมี

ประสิทธิภาพในการลดเวลาของรถบรรทุก ปรับปรุงทั้งประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำของการจัดสรรทรัพยากรในท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะสังเกตได้ว่าความจุของรถปลายทางและรูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อความล่าช้าโดยรวมของรถบรรทุก

Huiyun et al. (2018) ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบนัดหมายรถบรรทุก เนื่องจากความเจริญรุ่งเรืองของการค้าระหว่างประเทศทำให้เกิดความแออัดและการปล่อยมลพิษที่รุนแรงในบริเวณท่าเรือ โดยการเพิ่มขึ้นของการรถบรรทุก การเลี้ยวรถบรรทุก และแรงกดดันในการทำงานที่ท่าเรือ ในฐานะกลยุทธ์ใหม่ในการจัดการท่าเรือ ระบบนัดหมายรถบรรทุกเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงาน ให้ประโยชน์ทั้งบริษัทท่าเรือและรถบรรทุกและสร้างสมดุลระหว่างการแลกเปลี่ยนด้านสิ่งแวดล้อม สถานะปัจจุบันของการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ 1) มุมมองการควบคุมและการตัดสินใจ 2) โครงสร้างแถวคอยรถบรรทุก 3) วิธีการสร้างแบบจำลอง และ 4) การเพิ่มประสิทธิภาพแบบประสานงาน ด้วยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบจุดแข็งและจุดอ่อน ผลการศึกษาได้นำเสนอทิศทางที่เป็นไปได้ในอนาคต 3 ทิศทาง ได้แก่ ชุดคำสั่งการนัดหมายใหม่ที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ฟังก์ชันเวลาการไหลของการนัดหมายรถบรรทุกภายใต้กลไกการตอบรับข้อมูล และการจัดกำหนดการที่ประสานงานกับตัวแทนหลายรายและการจัดสรรผลประโยชน์

Zhang, Zeng, and Yang (2019) ศึกษาปัญหาความแออัดของรถบรรทุกในพื้นที่ท่าเทียบเรือซึ่งทำให้เวลารอรถบรรทุกนานขึ้นและประสิทธิภาพการทำงานลดลง เพื่อบรรเทาความแออัดและลดเวลาเปิด-ปิดของรถบรรทุกในท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ได้มีการเสนอแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการนัดหมายรถบรรทุก โดยการปรับปรุงรูปแบบโควต้าการนัดหมายของแต่ละช่วงเวลาได้รับการปรับให้เหมาะสมตามข้อจำกัดของโควต้าการปรับปรุงและเครือข่ายการจัดคิว BCMP ได้รับการพัฒนาเพื่ออธิบายขั้นตอนการเข้าคิวของรถบรรทุกในท่าเทียบเรือ ได้มีการออกแบบวิธีการที่อิงตาม Genetic Algorithm (GA) และ Point wise Stationary Fluid Flow Approximation (PSFFA) ใช้ GA เพื่อค้นหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดและ PSFFA ออกแบบมาเพื่อคำนวณเวลารอรถบรรทุก สุดท้าย มีการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อแสดงความถูกต้องของแบบจำลองและชุดคำสั่ง ผลการวิจัยพบว่าวิธี PSFFA ที่เสนอสามารถประมาณความยาวคิวได้อย่างแม่นยำและแบบจำลองสามารถลดเวลาการรอคอยของรถบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Fan, Ren, Guo, and Li (2019) ศึกษาปัญหาการจัดตารางเวลารถบรรทุกระหว่างลานด้านนอกและสถานีหลายจุด ได้มีการกำหนดรูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพการนัดหมายของรถบรรทุก เวลารอคิวและเวลาการทำงานของรถบรรทุกในช่วงระยะเวลาการนัดหมายของอาคารท่าเทียบเรือต่าง ๆ จะแตกต่างกัน ภายใต้ข้อจำกัดของโควต้าการนัดหมายที่กำหนดในแต่ละ

ช่วงเวลาที่นัดหมาย ให้กำหนดจำนวนรถบรรทุกที่มาถึงในแต่ละช่วงเวลาที่นัดหมาย เป้าหมายคือ การลดการปล่อยคาร์บอนและค่าใช้จ่ายทั้งหมด ปรับปรุงประสิทธิภาพของการจัดตารางเวลา รถบรรทุก ในการแก้ไขแบบจำลองนี้ ได้ออกแบบชุดคำสั่งทางพันธุกรรมแบบผสมพร้อมการค้นหา พื้นที่ใกล้เคียงแบบ แปรผัน ประการแรก สร้างโครโมโซม และส่วนหน้าของโครโมโซมแสดงถึงความ ต้องการคอนเทนเนอร์ขนาด 40 ฟุต และส่วนหลังแสดงถึงความ ต้องการคอนเทนเนอร์ขนาด 20 ฟุต จากนั้น เส้นทางจะถูกสร้างขึ้นตามข้อจำกัดด้านเวลาและโควตาการนัดหมายของแต่ละช่วง การนัดหมาย สุดท้าย การค้นหาพื้นที่ใกล้เคียงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของแนวทางการแก้ไขปัญหา ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการจัดกำหนดการภายใต้ระบบนัดหมาย รถบรรทุกใหม่สามารถลดจำนวนรถบรรทุกน้อยลง ปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดส่ง ลดต้นทุน ทั้งหมดและคำนึงถึงข้อกำหนดของคาร์บอนต่ำ

Nasution and Arviansyah (2011) ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบการนัดหมายรถบรรทุก (TAS) และกลยุทธ์การแบ่งช่องทางผ่านการจำลองเหตุการณ์ที่ไม่ต่อเนื่องในท่าเทียบเรือ Pelabuhan Tanjung Priok มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระบบการวางแผนปฏิบัติการในท่าเทียบเรือส่วนขนส่งออกทางทะเลและระบุปัญหาที่มีอยู่ การศึกษานี้ยังมุ่งที่จะตรวจสอบกระบวนการ ดำเนินการและเสนอสถานการณ์ทางเลือกในการแก้ปัญหาความแออัดในอาคารผู้โดยสาร สถานการณ์ทางเลือกที่มีให้คือการผสมผสานระหว่างระบบการนัดหมายรถบรรทุก (TAS) และกลยุทธ์การแบ่งช่องทาง กลยุทธ์การนัดหมายรถบรรทุก (TAS) ด้วยโปรแกรมจำลองสถานการณ์ ARENA ผลลัพธ์พบว่าช่วยลดเวลาโดยรวมในระบบโดยเฉลี่ย 76% และลดเวลาโดยรวมโดยเฉลี่ยในวันที่มีผู้ใช้บริการสูงสุด 88% จาก 151.5 นาที เป็น 38.4 นาที ต่อรถบรรทุกหนึ่งคัน ระบบ การนัดหมายรถบรรทุกยังได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถลดความยาวคิวได้ 97% จาก 162 คัน เป็น 5 คัน

Na Li (2011) ศึกษาปัญหาสำคัญคือการจัดสรรโควตาการนัดหมายและรถเครนที่ลานคอนเทนเนอร์พร้อมกัน แบบจำลองจำนวนเต็ม 2 วัตถุประสงค์ถูกตั้งค่าเพื่อสร้างสมดุลระหว่างการแลกเปลี่ยนระหว่างท่าเทียบเรือและรถบรรทุก โควตา 3 มิติใช้สำหรับกำหนดลักษณะความแปรปรวนในการดำเนินการจัดส่ง นอกจากนี้ยังรวมถึงปริมาณงานภายในและกำหนดเวลาปิดลานคอนเทนเนอร์ แนวทางที่อิงตามชุดคำสั่งทางพันธุกรรมได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาวิธีการนี้ได้รับการตรวจสอบโดยการทดลองเชิงตัวเลขอย่างละเอียด และผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นข้อดีของการปรับสมดุลภาระงานของรถเครนในสนามพร้อม ๆ กัน การวิเคราะห์พารามิเตอร์เผยให้เห็นอิทธิพลของทั้งขนาดเรือที่ใหญ่ขึ้นและการค้าที่เพิ่มขึ้น ตลอดจนอัตราส่วนการใช้ประโยชน์

Zhang et al. (2019) การนัดหมายรถบรรทุกเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการลดความแออัดที่ท่าเทียบเรือ ในการจัดทำแผนโควตาการนัดหมายที่สมเหตุสมผล จำเป็นต้องพิจารณา

การดำเนินการของท่าเทียบเรือ ผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองแนวทางใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบนัดหมายรถบรรทุกโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลารอของรถบรรทุกภายนอกที่ประตูและเวลารอของรถบรรทุกภายในที่ลาน แบบจำลองการจัดคิวใช้เพื่ออธิบายกระบวนการบริการที่ประสานกันของรถเครนสนาม ตามทฤษฎีการเข้าคิวแบบไม่อยู่กับที่ เวลารอรถบรรทุกจะถูกประมาณการได้แม่นยำยิ่งขึ้น มีการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อแสดงความถูกต้องของแบบจำลองและชุดคำสั่ง ผลการวิจัยพบว่า โมเดลดังกล่าวสะท้อนถึงลักษณะเฉพาะของกระบวนการบริการของเครนสนาม และช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณเวลารอรถบรรทุก

Azab, Karam, and Eltawil (2019) ศึกษาระบบ Dynamic Collaboration Truck Appointment System (DCATS) โดยใช้วิธีการปรับให้เหมาะสมตามการจำลองซึ่งรวมเอาแบบจำลองเหตุการณ์ที่ไม่ต่อเนื่องกับโมเดลการเขียนโปรแกรมจำนวนเต็มผสม กำหนดการนัดหมายภายใต้ความร่วมมือระหว่างบริษัทขนส่งสินค้าและท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ โดยพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของการดำเนินงานของท่าเทียบเรือ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้ระบบนัดหมายที่เสนอในการลดเวลาตอบสนองของรถบรรทุกและความยาวคิวของรถบรรทุกภายนอก นอกจากนี้ DCATS ยังมอบเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับผู้ปฏิบัติงานในท่าเทียบเรือเพื่อทำให้ภาระงานสูงสุดราบรื่นขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้รอบเวลาทำงาน โดยคำนึงถึงความสะดวกของบริษัทขนส่งด้วย

Suanchan, & Pitakringkarn (2019) ศึกษาเรื่องการพัฒนาพื้นที่เศรษฐกิจที่มีการปริมาณรถยนต์บนท้องถนนมากขึ้นก่อให้เกิดปัญหาจราจรติดขัด ผู้วิจัยได้เลือกใช้การจัดการระบบสัญญาณไฟจราจรสำหรับการลดความล่าช้าเฉลี่ยของรถยนต์และการเกิดอุบัติเหตุให้น้อยลง โดยใช้โปรแกรมจำลองสภาพจราจรในระดับมหภาค โดยพบว่าในช่วงเวลาที่มีปริมาณจราจรหนาแน่นควรให้มีการประสานสัญญาณไฟจราจรไปยังแยกที่อยู่ใกล้เคียงสามารถลดความล่าช้าร้อยละ 50 และการปรับสัญญาณไฟจราจรตามปริมาณจราจรในแต่ละทิศทางสามารถลดความล่าช้าลงได้ร้อยละ 33 – 35

Lange et al. (2020) ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมระบบนัดหมายรถบรรทุก (TAS) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการลดปัญหาการมาถึงของรถบรรทุกที่ท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ในท่าเรือและในพื้นที่ห่างไกลจากตัวเมือง ข้อดีอย่างหนึ่งที่สำคัญคือโอกาสในการลดต้นทุนการดำเนินงานสำหรับท่าเทียบเรือและความยาวของคิวรถบรรทุกที่หน้าประตูท่าเทียบเรือ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และจำแนกแนวทางต่าง ๆ ที่ใช้ในวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เพื่อกำหนดโควตาของรถบรรทุกที่ได้รับอนุญาตต่อรอบเวลา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแนวทางต่าง ๆ มาจากประสบการณ์และส่วนใหญ่จะใช้เพื่อปรับปรุงท่าเทียบเรือในพื้นที่แต่

ละแห่ง มากกว่าที่จะเป็นการแก้ไขที่ท่าเรือทั่วไป วิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงและวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างกันเป็นวิธีการหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพและการจำลองทางคณิตศาสตร์

Timo Faber et al (2020) ศึกษาการแนวทางการปรับปรุงการเคลื่อนที่ตามกันของ ยานพาหนะจากพื้นที่พักคอยภายนอกเมือง นำเสนอรูปแบบการเคลื่อนที่ตามกันของรถบรรทุก แบบเคลื่อนที่ตามกันบนเส้นทางขนส่งสายหลัก (Platoons on Mainline Carriageway) แบบเคลื่อนที่ตามกันเมื่อถึงจุดออกช่องทาง (Platoons Merging from an On-Ramp) และผ่าน โปรแกรมจำลองสถานการณ์ระดับจุลภาค OpenTrafficSim ผลการศึกษาแนะนำรูปแบบการวิ่งตามกันของรถบรรทุกอย่างอิงบนทางหลวงสายหลักทำให้ประสิทธิภาพและความปลอดภัย ในการจราจรลดลงทั้งในด้านความเข้มของการจราจรที่ต่ำและสูง อย่างไรก็ตามการรวมกันเคลื่อนที่ของรถบรรทุกซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการรวมการจราจรจากทางลาดไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการจราจร ผู้วิจัยใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหวในระดับท้องถิ่นและระดับโลกเพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะการเคลื่อนที่ต่อประสิทธิภาพการจราจรและความปลอดภัย การวิเคราะห์ความอ่อนไหวระดับโลกเน้นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของการเคลื่อนที่มีส่วนทำให้เกิดความไม่แน่นอนในตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพมากกว่าผลกระทบส่วนบุคคล โดยทั่วไป ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่รถบรรทุกและการจราจรโดยรอบ ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของการเคลื่อนที่ ความต้องการด้านการจราจร และสถานการณ์การจราจร

Xu, Yang, Li and Postolache (2021) ศึกษาปัญหาความแออัดของประตูและลาน เป็นลักษณะซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของความแออัดที่เกิดขึ้นในท่าเรือ กีดขวางไม่ให้รถบรรทุกเดินทางได้อย่างอิสระและกลายเป็นปัญหาคอขวดที่จำกัดประสิทธิภาพ การดำเนินงานของท่าเรือ นอกจากนี้การจราจรในเมืองยังเพิ่มความไม่แน่นอนของเวลามาถึงของรถบรรทุกและต้นทุนความแออัดเพิ่มเติม ท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์มีการใช้ระบบนัดหมายรถบรรทุก (TAS) มากขึ้น ซึ่งพยายามจัดการการมาถึงของรถบรรทุกอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งวัน การขยายการวิจัยที่มีอยู่ งานนี้พิจารณาความแออัดของช่วงเช้าและเย็น และเสนอแนวทางใหม่สำหรับ TAS ที่มีข้อจำกัดหลายข้อ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้บริการทั้งบริษัทรถบรรทุกและท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ แบบจำลอง TAS ที่มีข้อจำกัดหลายข้อแบบผสมจำนวนเต็ม (MINLP) ได้รับ การกำหนดขึ้น ซึ่งพิจารณาอย่างชัดเจนถึงต้นทุนการเปลี่ยนแปลงการนัดหมาย ต้นทุนในคิว และต้นทุนความแออัดสูงสุดในตอนเช้า และตอนเย็น จุดมุ่งหมายของแบบจำลอง TAS ที่มีข้อจำกัดหลายข้อที่เสนอคือการลดต้นทุนการดำเนินงานโดยรวม ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของ Lingo ใช้เพื่อแก้ปัญหาที่แน่นอนสำหรับปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง และมีการเสนอชุดคำสั่งทางพันธุกรรมแบบผสมและการหลอมจำลอง (HGA-SA) เพื่อให้ได้แนวทางแก้ไขปัญหาขนาดใหญ่ ผลการทดลองระบุว่า TAS ที่เสนอนั้นไม่เพียงแต่

ให้บริการแก่บริษัทรถบรรทุกและท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์ได้ดีขึ้นเท่านั้น แต่ยังช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานโดยรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับ TAS แบบเดิม

Manhar Dhanak et al. (2021) ศึกษาการหยุดชะงักที่ท่าเรือที่อาจส่งผลกระทบต่อทางเศรษฐกิจอย่างรุนแรงในเขตชายฝั่งทะเลและส่วนอื่น ๆ ของประเทศ ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในท่าเรือมีส่วนได้เสียในการทำงานระยะยาวและความอยู่รอดของท่าเรือ แต่ไม่มีมาตรการที่เป็นมาตรฐานสำหรับประสิทธิภาพหรือความยืดหยุ่นสำหรับพอร์ต เป้าหมายของการวิจัยนี้คือเพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของเครื่องมือประเมินความยืดหยุ่นของพอร์ตที่คาดการณ์ได้ เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ครอบคลุมแบบจำลองการจำลองการจราจรของข้อมูลด้วยกล้องจุลทรรศน์ (VISSIM) แบบไฮบริดที่ใช้การวิเคราะห์หลายรูปแบบของการทำงานของพอร์ตและให้การประเมินความยืดหยุ่นในเชิงปริมาณ

Azab and Morita (2022) ศึกษาการจัดตารางเวลาแบบใหม่ที่ปรับการนัดหมายรถบรรทุก ใบสั่งบริการรถบรรทุก และการย้ายตู้คอนเทนเนอร์ที่สนามบินผ่านแบบจำลอง IP แบบ 2 วัตถุประสงค์พร้อมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แนวทางที่เสนอนี้ทำหน้าที่เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเชิงรุกที่ประสานการนัดหมายรถบรรทุกกับการดำเนินการจัดการตู้คอนเทนเนอร์เพื่อหลีกเลี่ยงความล่าช้าที่มากเกินไปที่เกิดจากการย้ายตู้คอนเทนเนอร์ ประสิทธิภาพของแนวทางนี้เปรียบเทียบกับแนวทางปฏิบัติที่มีอยู่ของการย้ายคอนเทนเนอร์แบบออนไลน์โดยใช้กรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับท่าเทียบเรือคอนเทนเนอร์ของญี่ปุ่นในการดำเนินงาน โดยคำนึงถึงประเด็นสำคัญในทางปฏิบัติหลายประการ รวมถึงความชอบของบริษัทรถบรรทุก

Zhang, Huang, Zhang, and Shao (2022) ศึกษากระบวนการนัดหมายรถบรรทุก (TAS) สำหรับควบคุมจำนวนรถบรรทุกที่สามารถเข้าสู่ท่าเรือ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโควตามีจำกัด TAS จึงไม่สามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดของกรอบเวลาทั้งหมดสำหรับคนขับรถบรรทุกส่วนบุคคลได้อย่างเต็มที่ ผู้วิจัยได้เสนอระบบนัดหมายแบบโต้ตอบ (IAS) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมดุลสูงสุดที่รถบรรทุกมาถึงและลดเวลาตอบสนองของรถบรรทุก IAS ช่วยให้คนขับรถบรรทุกได้รับเวลาตอบสนองของรถบรรทุกโดยประมาณในช่วงเวลาที่ต้องการเมื่อทำการนัดหมายนำเสนอผ่านแบบจำลองสถานการณ์แบบไม่ต่อเนื่องเพื่อสนับสนุนการจำลองของ IAS โมเดลที่จัดทำขึ้นนี้มีระบบการตัดสินใจแบบ 3 ขั้นตอนซึ่งประกอบด้วย GSS ลานจอดรถ และ YCSS ผลลัพธ์ของการทดลองเชิงตัวเลขระบุว่า IAS ที่เสนอนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า NAS และ EQAS ในการลดเวลาตอบสนองของรถบรรทุก

ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร และไพโรจน์ เร้าธนชุลกุล (2024) ศึกษาปัญหาการจราจรติดขัดในบริเวณทางเข้าประตูตรวจสอบที่ 3 และ 4 ของท่าเรือแหลมฉบัง วิเคราะห์เพื่อปรับรูปแบบระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรใหม่ร่วมกับโปรแกรมจำลองสภาพจราจรในระดับจุลภาค Simulation

of Urban Mobility รุ่น 1.14.1 ผลการวิจัยพบว่าทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3 ควรปรับปรุง สัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการพื้นที่ว่างหลังแถวคอยบนถนนของทางแยกปลายทางได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

1) ความยาวแถวคอยเฉลี่ยที่ทางแยกลดลง ลดลงร้อยละ 3.9 และ 2) ความยาวเฉลี่ยแถวคอย ณ ประตูตรวจสอบลดลงร้อยละ 11.84 สำหรับทางแยกประตูตรวจสอบที่ 4 ควรปรับปรุงสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการรอบสัญญาณไฟสีร่วมกับระบบจัดการแถวคอยแบบร่วมกลุ่ม

1) ความยาวแถวคอยเฉลี่ยที่ทางแยกลดลงร้อยละ 36.77 และ 2) ความยาวเฉลี่ยแถวคอย ณ ประตูตรวจสอบลดลงร้อยละ 91.51

ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร และไพโรจน์ เร้าธนชุลกุล (2024) ศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดที่ทางเข้าท่าเรือประตูตรวจสอบหมายเลข 1 โดยการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้วย 1-Way ANOVA และการโต้ตอบของปัจจัยแบบกลุ่มด้วย 1-Way MANOVA นำเสนอผ่านแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม Simulation of Urban Mobility ในรูปแบบการจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดมี 4 ปัจจัยได้แก่ 1) จำนวนช่องจราจร 2) ระดับการจอด 3) ปัจจัย รอบสัญญาณไฟจราจร และ 4) การกำหนดประเภทช่องจราจร และผลการวิเคราะห์ On-Way MANOVA กลุ่ม 3 ปัจจัย พบหลักฐานที่สำคัญสำหรับการโต้ตอบ 1 คู่ได้แก่ จำนวนช่องจราจรและการกำหนดประเภทช่องจราจร โดยหากมีการเปิดใช้งานเลนย้อนกลับมีจำนวน 2 ช่อง 1.85 ที่ระดับการนัดหมาย 50% และค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลจะสามารถลดระยะเวลารอคอยเฉลี่ยได้สูงที่สุดที่ 15.02%

จากการทบทวนการวิจัยข้างต้นได้มีงานวิจัยบูรณาการองค์ความรู้สาขาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการลดความแออัดภายในท่าเรือ ระบบนัดหมายรถบรรทุก การประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค นโยบายการขนส่งสินค้าทางเรือ การจัดตั้งจุดพักรถบรรทุกภายนอกพื้นที่ท่าเรือ ซึ่งมีทฤษฎีแนวความคิดวิจัยแสดงผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง (ปี)	พื้นที่ศึกษา					กรอบแนวคิด				เครื่องมือในการวิจัย							
	Main Gate	Terminal	Container	Quay Cranes	Outer Yard	Transport	Reducing	Improve port	Logistics	Social impact	Traffic	Mathematical	Traffic Impact	Simulation	Transportation	Measuring	Optimization
Adrián Ramírez-Nafarrate et al. (2016)	/			/		/					/	/					
Al-Sahili and Hamadneh (2016)	/		/	/		/					/		/		/		
Azab et al. (2019)	/	/				/	/				/		/				
Azab, Karam and Eltawil (2017)		/	/	/		/	/						/				
Bentolita et al. (2016)					/	/			/								
Bouzekri, Alpan and Giard (2023)		/						/			/						/
Caballini et al. (2018)		/	/				/										/
Chamchang and Niyomdecha (2021).	/		/				/	/				/	/				
Chu and Huynh (2014)		/					/								/		
Dekker et al. (2013)	/	/				/									/		

ผู้แต่ง (ปี)	พื้นที่ศึกษา					กรอบแนวคิด					เครื่องมือในการวิจัย						
	Main Gate	Terminal	Container	Quay Cranes	Outer Yard	Transport	Reducing	Improve port	Logistics	Social impact	Traffic	Mathematical	Traffic Impact	Simulation	Transportatio	Measuring	Optimization
Eelco et al. (2012)		/	/	/			/						/			/	
Elmi et al. (2023)		/						/				/					
Essi et al. (2021).	/							/				/				/	
Fan et al. (2019)	/				/		/										/
Gang chen and zhong-zhen yang (2014)	/						/					/					
Grubisic et al. (2021)	/	/	/	/			/	/					/				
Guerrero (2018)		/					/					/					
Guo et al. (2023)		/						/				/					/
Hervás-Peralta et al. (2019)		/	/	/			/	/					/				
Huiyun et al (2018)	/						/										

ผู้แต่ง (ปี)	พื้นที่ศึกษา					กรอบแนวคิด					เครื่องมือในการวิจัย						
	Main Gate	Terminal Gate	Container Yard	Quay Cranes	Outer Yard	Transport planning	Reducing Truck Congestion	Improve port efficiency	Logistics sprawl & Distribution	Social Impact	Traffic Analysis	Mathematical modeling	Traffic Impact Assessment	Simulation	Transportation Model	Measuring external impacts	Optimization
Husein (2021)	/	/					/					/					
Islam (2017)	/				/	/		/					/				
Jiang et al. (2021)			/			/			/								
Jiang et al. (2021)		/				/								/			
Jiang et al. (2022)	/	/			/	/								/			
Jin et al. (2021)				/				/									
Lange et al. (2017)	/								/								
Li et al. (2011)	/		/	/		/											/
Liu et al. (2023).	/	/	/				/	/								/	
Manhar Dhanak et al. (2021)		/				/				/							
Mari'a D. Gracia et al. (2016)		/				/	/			/							
Martin-Iradi, et al. (2022)		/						/				/					/

ผู้แต่ง (ปี)	พื้นที่ศึกษา					กรอบแนวคิด					เครื่องมือในการวิจัย						
	Main Gate	Terminal	Container	Quay Cranes	Outer Yard	Transport	Reducing	Improve port	Logistics	Social impact	Traffic	Mathematical	Traffic Impact	Simulation	Transportation	Measuring	Optimization
Ming et al. (2014)	/				/		/										/
Minh (2021)		/				/	/										/
Minh and Huynh (2017).		/					/				/		/				
Minh and Noi (2021).	/	/						/			/						
Mnasri, S. and Alrashidi, M. (2021)		/						/				/					/
Mosca et al. (2000)		/				/							/				
Na Li (2011)			/				/										
Narayana Raju et al. (2020)			/			/	/				/	/					
Nasution and Arviansyah (2019)		/				/							/				
Natthapong and Pairoj (2024).	/					/	/				/	/	/				
Natthapong and Pairoj (2024).	/						/				/	/	/				

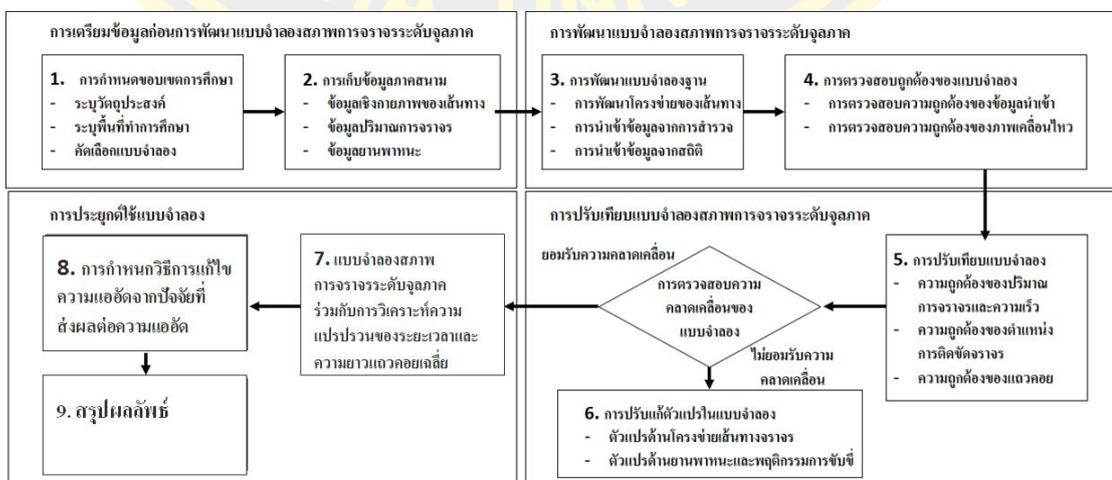
ผู้แต่ง (ปี)	พื้นที่ศึกษา					กรอบแนวคิด					เครื่องมือในการวิจัย						
	Main Gate	Terminal	Container	Quay Cranes	Outer Yard	Transport	Reducing	Improve port	Logistics	Social impact	Traffic	Mathematical	Traffic Impact	Simulation	Transportation	Measuring	Optimization
Popa and Strer (2016).	/					/					/		/				
Qi et al (2018)		/				/	/				/		/	/			
Shao et al. (2022)	/	/	/	/		/	/							/			
Song et al. (2015).		/	/	/			/				/		/				
Stojaković and Twrdy (2019)		/				/					/	/	/				
Stojaković and Twrdy (2021).		/				/	/				/	/	/				
Tang, S., Jin, J.G. and Lu, C. (2022)		/						/				/					/
Xiaoju et al. (2023)		/				/						/					
Xiaoju Zhang (2013)	/		/			/	/										/
Xu et al. (2021)	/					/	/					/					
Xu et al. (2021)	/		/			/											/

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยที่มีอยู่มุ่งเน้นไปที่การบริหารจัดการรถบรรทุกที่เข้ามาและการเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานของประตูท่าเรือเป็นหลัก โดยให้ความสำคัญกับ 1) การกำหนดช่วงเวลาการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ 2) การปรับปรุงกระบวนการดำเนินงานสำหรับประตูท่าเรือ 3) การนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และ 4) การพัฒนาวิธีการทางเลือกอื่น ๆ เช่นการปรับรอบสัญญาณไฟจราจรและการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแส โดยวิธีการการปรับรอบสัญญาณไฟจราจรและกำหนดเวลาเปิดใช้งานช่องจราจรแบบสวนกระแสจะมีผลกระทบต่อการทำงานของท่าเข้าท่าเรือและผู้ที่เกี่ยวข้องน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ โดยหากมีวิธีการควบคุมการเปิดใช้งานช่องจราจรแบบสวนกระแสได้อย่างเหมาะสมจะสามารถบรรเทาความแออัดที่ประตูทางเข้าท่าเรือได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการศึกษาเรื่องการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคทั้ง 3 ประเด็น คือ การพัฒนาแบบสภาพการจราจรระดับจุลภาคภายในพื้นที่และเส้นทางบริเวณโดยรอบของท่าเรือแหลมฉบัง วิเคราะห์และประเมินรูปแบบนโยบายแวกคอยและการจัดสรรประตูทางเข้าออกท่าเรือที่เหมาะสม และการวิเคราะห์ระบบการนัดหมายรถบรรทุกที่เหมาะสมเชื่อมโยงกับท่าเรือแหลมฉบัง โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. การออกแบบการทดลอง
2. กำหนดพื้นที่ศึกษาวิจัย
3. การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การพัฒนาแบบจำลองฐาน
5. สมมติฐานของการสร้างแบบจำลอง
6. ด้านตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูล
7. การปรับเทียบแบบจำลอง
8. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
9. การตรวจสอบผลลัพธ์ของแบบจำลองเบื้องต้น
10. การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา



ภาพที่ 12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากภาพที่ 12 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้ง 7 ขั้นตอน แสดงรายละเอียด ดังนี้

1) กำหนดขอบเขตการศึกษา (Project scope)

การกำหนดขอบเขตการศึกษา เป็นขั้นตอนแรกที่ต้องมีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนเพื่อประเมินความพร้อม ความสามารถของแบบจำลองก่อนการสร้างแบบจำลอง เช่น การกำหนดวิธีการที่ต้องใช้ ระยะเวลา เครื่องมือ รวมไปถึงการทบทวนและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

2) การสำรวจและรวบรวมข้อมูลภาคสนาม (Data collection)

การสำรวจและรวบรวมข้อมูล เป็นการเตรียมข้อมูลและเตรียมความพร้อมสำหรับการพัฒนาและวิเคราะห์แบบจำลอง ประกอบด้วยข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้ 1) ลักษณะทางกายภาพบริเวณขอบเขตที่ทำการศึกษา เช่น ความกว้าง จำนวนช่องจราจร 2) การควบคุมการจราจรบริเวณขอบเขตที่ศึกษา เช่น ระบบสัญญาณไฟจราจร ทิศทางกระแสจราจร หรือจำนวนรอบของสัญญาณไฟจราจร 3) ปริมาณจราจร เช่น ปริมาณการจราจรบริเวณทางแยก ความเร็ว 4) ข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลอง เช่น ความยาวของแถวคอย ความล่าช้าและระยะเวลาในการเดินทาง

3) การเก็บรวบรวมข้อมูลด้านพฤติกรรมของรถบรรทุก (Truck arrival behavior)

การสำรวจและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมรถบรรทุกที่ท่าเรือแหลมฉบัง โดยรวบรวมจากการสำรวจภาคสนามและจากข้อมูลที่มีการรวบรวมไว้โดยท่าเรือแหลมฉบัง โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมรถบรรทุกได้ 4 ประเภท ดังนี้ 1) การมาล่าช้ากว่าเวลาที่นัดหมาย (Late arrival) 2) การมาถึงก่อนเวลานัดหมาย (Early arrival) 3) การมาถึงโดยไม่ได้นัดหมาย (Non-appointed arrival) และ 4) การมาถึงตามเวลานัดหมาย (Punctual arrival)

4) การพัฒนาแบบจำลอง (Base model development)

การพัฒนาแบบจำลองฐาน เป็นขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้มีความถูกต้องและมีความใกล้เคียงกับข้อมูลในภาคสนามมากที่สุด โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ข้อมูลฐานของแบบจำลอง และ 2) ข้อมูลการควบคุมจราจร เรียกว่า โครงข่ายพื้นฐาน หลังจากนั้น เพิ่มข้อมูลความต้องการและพฤติกรรมในการเดินทางบนโครงข่าย

5) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Error checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นขั้นตอนที่ผู้วิจัยต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อหาความคลาดเคลื่อนและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลต่าง ๆ ที่เข้าสู่แบบจำลอง

6) การเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลภาคสนาม (Compare model to field data)
 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลภาคสนาม เป็นขั้นตอนในการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยผู้วิจัยพิจารณาเลือกตัวแปรจากแบบจำลองในการเปรียบเทียบซ้ำ ๆ เพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลภาคสนามมากที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจใช้ระยะเวลานานมากในการทำ การเปรียบเทียบ โดยรายละเอียดในการเปรียบเทียบแบบจำลองและการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

7) การวิเคราะห์ทางเลือก (Alternative analysis)

การวิเคราะห์ทางเลือก เป็นขั้นตอนที่ผู้วิจัยทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจร โดยทำการวิเคราะห์หลาย ๆ ทางเลือก ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองของทุกทางเลือกจะต้องใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน และใช้ค่าตัวแปรเดียวกันจากขั้นตอนของการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการจราจร และประเมินหาทางเลือกที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

8) การสรุปผลการวิเคราะห์ (Analysis report)

การสรุปผลการวิเคราะห์ เป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจร โดยผู้วิจัยต้องจัดทำรายงานเพื่อสรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ อาทิเช่น การเปรียบเทียบแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ทางเลือกต่าง ๆ เป็นต้น รวมทั้งการนำเสนอผลการศึกษาในรูปแบบอื่น เพื่อเสนอแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องสำหรับการประเมินโครงการต่าง ๆ

กำหนดขอบเขตการศึกษา (Project scope)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค โดยอาศัยทฤษฎีและหลักการในการบรรเทาปัญหาความแออัดที่ประตูทางเข้าท่าเรือที่ได้รับจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นส่วนนี้จะนำเสนอแนวทางการกำหนดขอบเขตการศึกษา และการออกแบบเชิงทดลองที่ใช้ในการการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือ การวิเคราะห์ปัจจัยความแออัด ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การกำหนดปัญหาและระบุขอบเขต

ขั้นตอนแรกเกี่ยวข้องกับการกำหนดปัญหาและความล่าช้าที่เกิดขึ้นในพื้นที่ท่าเรือกรณีศึกษา ครอบคลุมพื้นที่ประตูทางเข้าท่าเรือหมายเลข 1, 3 และ 4 ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน การพิจารณาข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องในบริบทการบริหารจัดการความแออัดและการจัดสรรประตู การดำเนินการในขั้นตอนนี้จะอ้างอิงโดยใช้ข้อมูลทางสถิติและการสำรวจภาคสนามที่ดำเนินการโดยหน่วยงานของท่าเรือแหลมฉบังของประเทศไทย

ขั้นตอนที่ 2: การทบทวนวรรณกรรมและการรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทบทวนวรรณกรรมในอดี้อย่างครอบคลุม และรวบรวมข้อมูลร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับท่าเรือแหลมฉบังของประเทศไทยเพื่อระบุแนวทางการประเมินความเสี่ยงและแนวทางการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแออัดที่ท่าเรือ การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความแออัด

ขั้นตอนที่ 3: การสร้างแบบจำลองจำลองการจราจรในระดับจุลภาค

ขั้นตอนที่สามเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองจำลองการจราจรในระดับจุลภาคโดยใช้ซอฟต์แวร์การจำลองการเคลื่อนที่ในเมือง ซึ่งทำได้โดยการบูรณาการข้อมูลทางภูมิศาสตร์จากโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลเครือข่ายถนนที่มุ่งสู่ท่าเรือแหลมฉบังและบริเวณโดยรอบ เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นฐาน จะต้องกำหนดตำแหน่งประตูตรวจในปัจจุบันพร้อมกับรูปแบบการจราจรของยานพาหนะทั้ง 4 ประเภท จากนั้นจึงทำการทดสอบแบบจำลองเพื่อความถูกต้องและแม่นยำ

ขั้นตอนที่ 4: การใช้ผลลัพธ์เพื่อกำหนดสถานการณ์ทางเลือก

ผลลัพธ์ของการประเมินความแออัดและการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดจะถูกใช้เพื่อสร้างสถานการณ์ทางเลือก กระบวนการนี้จะทำซ้ำสำหรับสถานการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากการศึกษาก่อนหน้านี้ เช่น การศึกษาวิจัยของ Chamchang และ Niyomdech (2021) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่คล้ายคลึงกันกับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ พบว่ากลยุทธ์การใช้ประตูร่วมกันสามารถช่วยลดปัญหาการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง (Wang et al., 2018) ดังนั้น โดยวิธีการเหล่านี้จึงทำหน้าที่เป็นตัวชี้วัดที่มีค่าสำหรับการประยุกต์ใช้และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการศึกษาวิจัยนี้

ขั้นตอนที่ 5: การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงเปรียบเทียบ

ผลการทดลองจะถูกเปรียบเทียบผ่านแบบจำลองการจำลองการจราจรในระดับจุลภาคระหว่างแบบจำลองพื้นฐานและแบบจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ การเปรียบเทียบนี้จะพิจารณาเวลาการรอเฉลี่ยและความยาวของคิวเฉลี่ยที่ประตูทางเข้าท่าเรือในช่วงเวลาต่าง ๆ

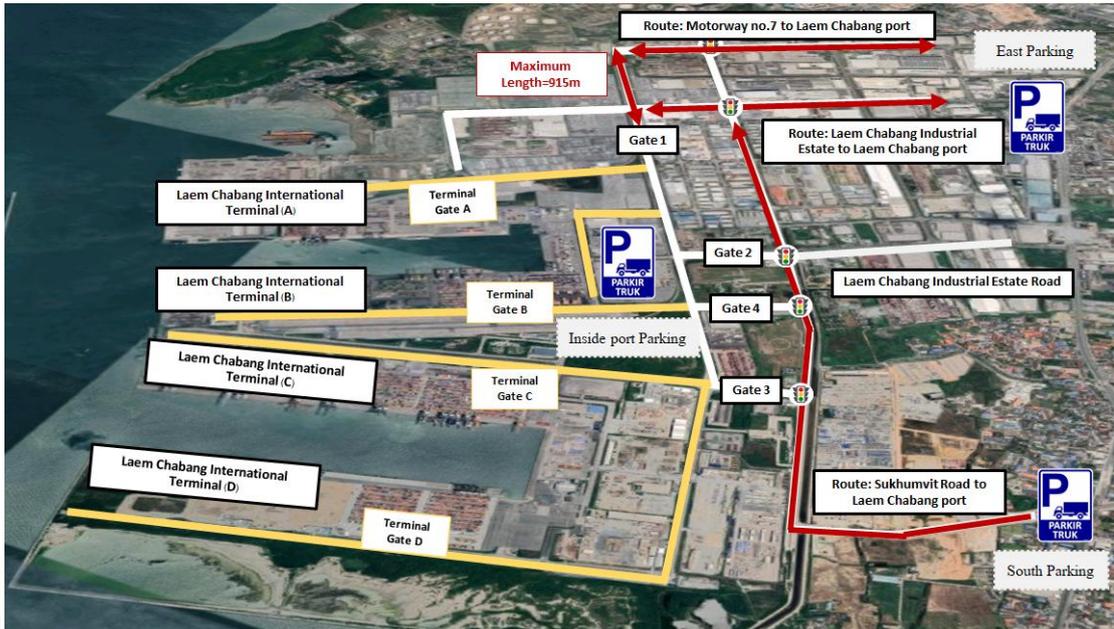
กำหนดพื้นที่ศึกษาวิจัย

การศึกษาเรื่องการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคกำหนดพื้นที่การศึกษาคือเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างบริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังจังหวัดชลบุรีและท่าเรือแหลมฉบังเนื่องจากมีพื้นที่และเครือข่ายถนนเชื่อมต่อถึงกันดังนั้นปริมาณยานพาหนะส่วนใหญ่ในพื้นที่จะใช้เส้นทางภายในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมเพื่อเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังและเส้นทางหลวงหมายเลข 7 เนื่องจากเป็นเส้นทางหลักในการรองรับปริมาณรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์จากพื้นที่ภายนอกจังหวัดชลบุรี โดยทั้ง 2 เส้นทางถือเป็นเส้นทางหลักในการรองรับปริมาณยานพาหนะเพื่อเข้าสู่ท่าเรือ

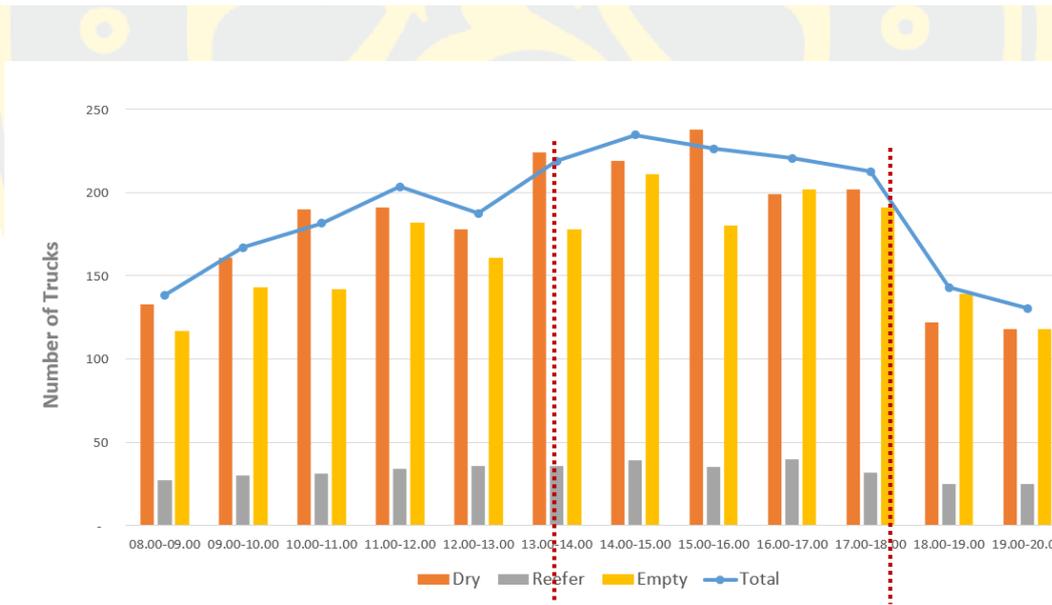
แหลมฉบัง ปริมาณสภาพการจราจรติดขัดจากเส้นทางจะส่งผลโดยตรงต่อสภาพการจราจรติดขัดที่พื้นที่ท่าเรืออย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยสภาพการจราจรที่ติดขัดจะเริ่มจากเส้นทางขาเข้าประตูตรวจสอบ 1, 3 และ 4 (Main gate) เนื่องจากเป็นประตูที่อนุญาตให้รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ผ่านเข้าออกได้และมีสภาพการจราจรติดขัดต่อเนื่องไปจนถึงเส้นทางภายในท่าเรือแหลมฉบังมุ่งหน้าสู่ท่าเทียบเรือเอกชน (Terminal gate) A-D ภายในท่าเรือ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกพื้นที่บริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังจังหวัดชลบุรี เส้นทางขาเข้าประตูตรวจสอบ 1, 3 และ 4 เป็นพื้นที่สำหรับทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล

ท่าเรือแหลมฉบังเปิดให้บริการทุกวันเวลาตลอด 24 ชั่วโมง แบ่งการทำงานเป็น 3 กะ ได้แก่ 08.00-16.00, 16.00-24.00 และ 24.00-08.00 ปัจจุบันประตูตรวจสอบหมายเลข 1 เป็นประตูทางเข้าหลักที่มีเส้นทางเชื่อมโยงโดยตรงกับทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ส่งผลให้ยานพาหนะขนาดใหญ่ เช่น รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ทั่วไป 2) รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ควบคุมอุณหภูมิ 3) รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เปล่า เลือกเข้ามาใช้บริการที่เส้นทางประตูตรวจสอบหมายเลข 1 เป็นจำนวนมาก มีช่องจราจรเข้าประตูตรวจสอบจำนวน 8 ช่องบริการที่มีถนนเข้าถึงร่วมกันระหว่างรถบรรทุกที่นัดหมายและไม่ได้นัดหมายล่วงหน้าจากการสำรวจพื้นที่ภาคสนามพบว่าปัจจุบันประตูตรวจสอบทั้งหมดไม่มีการแบ่งประเภทช่องจราจรตามประเภทยานพาหนะ ส่งผลให้รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์จะเข้ามาก่อนเวลาเพื่อแย่งกันเข้าประตูตรวจสอบและจอดรอภายในพื้นที่ท่าเรือ พฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดในท่าเรืออย่างมาก โดยพบว่าสัดส่วนของยานพาหนะขาเข้ามีปริมาณสูงสุดระหว่างช่วงเวลา 15.00-16.00 น. และมากกว่าร้อยละ 80 ของยานพาหนะขาเข้าเป็นตู้คอนเทนเนอร์เข้าเป็นยานพาหนะประเภทตู้สินค้าทั่วไปและรถบรรทุกเปล่า

ภาพที่ 14 แสดงสถิติการมาถึงรายชั่วโมงตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2565 ถึงมกราคม 2566 โดยมีค่าเฉลี่ยมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้าสู่ท่าเรือ 377 คันต่อวัน ขั้นต่ำ 261 คันและสูงสุด 469 คัน ปริมาณยานพาหนะสูงสุดระหว่างช่วงเวลา 14.00 น. 15.00 น. โดยสามารถจำแนกประเภทของยานพาหนะในแต่ละช่วงเวลาเพื่อแสดงสัดส่วนของยานพาหนะขาเข้าแต่ละประเภทตามสถิติการมาถึงยานพาหนะพบว่ามากกว่า 80% ของยานพาหนะขาเข้าเป็นตู้คอนเทนเนอร์เข้าประเภทตู้สินค้าทั่วไปและรถบรรทุกเปล่า



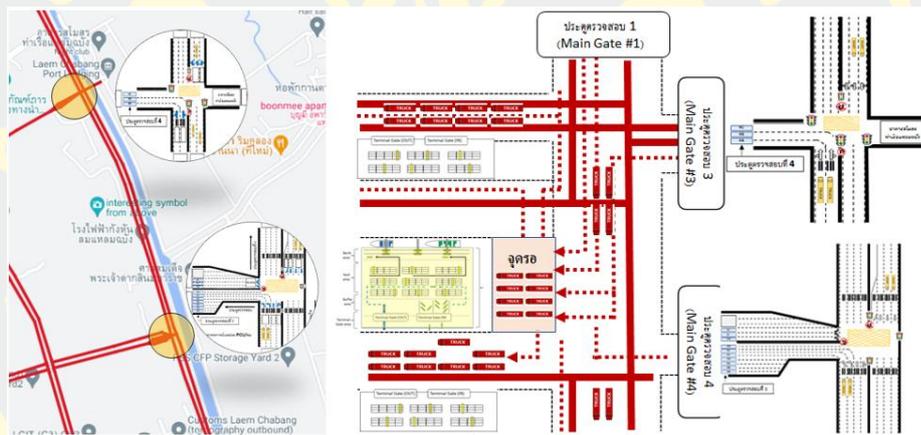
ภาพที่ 13 ภาพรวมท่าเรือแหลมฉบัง (กรกฎาคม 2565 - มกราคม 2566)



ภาพที่ 14 ร้อยละของประเภทรถที่เข้ามาแต่ละประเภท

สำหรับการสำรวจเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังในประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 จากการลงพื้นที่เก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามพบว่าปริมาณจราจรสูงและปัญหาการจราจรติดขัดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนรวมทั้งมีลักษณะเป็นทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบคงที่ที่มีปริมาณยานยนต์สูงที่สุด ศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลในเส้นทางซอยนิคมแหลมฉบัง 2 เนื่องจากเป็น

เส้นทางที่เชื่อมการจราจรระหว่างถนนสุขุมวิทกับทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 เข้าสู่ประตูตรวจสอบที่ 3 และ 4 ของท่าเรือแหลมฉบังได้โดยตรง ยานพาหนะส่วนใหญ่จึงเลือกใช้เส้นทางหลักเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการติดเข้าสู่ท่าเรือ อย่างไรก็ตามเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางที่ต้องใช้ร่วมกันระหว่างยานพาหนะส่วนบุคคลและรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และมีทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรส่งผลให้เกิดสภาพการจราจรแบบคอขวดและช่องจราจรมีลักษณะอึดอัดมากเมื่อเทียบกับเส้นทางอื่นในบริเวณใกล้เคียง ลักษณะทางกายภาพของถนนมีขนาด 3 ช่องทางจราจรทั้ง 2 ฝั่งระยะทางรวมประมาณ 6.5 กิโลเมตร ในเส้นทางมีจุดตัดของถนนที่มีการบริหารทางแยกด้วยสัญญาณไฟจราจรหลักทั้งหมด 2 ทางแยก ได้แก่ ทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3 และทางแยกประตูตรวจสอบที่ 4 ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาสภาพจราจรบริเวณทางแยกจะมีลักษณะอึดอัดมาก โดยมีลักษณะลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกแสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 3 และ 4



ภาพที่ 16 ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 1

ภาพที่ 16 แสดงลักษณะทางกายภาพของประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 1 โดยเส้นทางเข้าสู่ท่าเรือแบ่งออกเป็น 8 ช่องจราจรและฝั่งขาออกจำนวน 3 ช่องจราจร สำหรับฝั่งขาเข้าจะมีการแบ่งประตูตรวจสอบเป็น 2 ชั้น (2 Stagger) แต่ละชั้นมี 4 ประตู (Booth) โดยด้านด้านนอกประกอบด้วยประตูตรวจสอบ E-H และด้านด้านในประกอบด้วยประตูตรวจสอบ A-D โดยช่องจราจรทุกช่อง (A-H) จะให้บริการร่วมกันระหว่างรถบรรทุกที่มีการนัดหมายและไม่ได้นัดหมาย การมาถึงของทั้งรถบรรทุกทุกประเภทจะถือว่าเป็นอิสระจากกันและมีอัตราการมาถึงเฉลี่ยที่แตกต่างกัน ช่องจราจรทั้งหมดสามารถรองรับแถวคอยได้ไม่จำกัด รถบรรทุกในแต่ละช่องทางบริการจะให้บริการตามเกณฑ์ มาก่อนให้บริการก่อน รถบรรทุกแต่ละประเภทจะมีการนัดหมายมาถึงตรงเวลาและไม่มีการนัดหมาย

งานวิจัยนี้กำหนดการเลือกกลุ่มประชากรโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple random sampling) โดยการบันทึกวิดีโอตั้งแต่วันที่ 1-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 เพื่อตรวจนับจำนวนของยานพาหนะทั้งหมด 4 ประเภทที่เคลื่อนที่เข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 ได้แก่ 1) รถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2) รถบัส 3) รถพ่วงและ 4) รถกึ่งพ่วง ที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่ประตูตรวจสอบในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มียะเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยแถวคอยสูงกว่าค่าเฉลี่ย

การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลทางด้านกายภาพของพื้นที่และข้อมูลทางด้านวิศวกรรมจราจรเป็นสิ่งสำคัญสำหรับนำมาใช้ในการศึกษาค้นคว้า เนื่องจากข้อมูลทั้ง 2 ชุดจะเป็นองค์ประกอบของตัวแทนโครงข่ายเส้นทางและพฤติกรรมของยานพาหนะในเส้นทาง สำหรับนำไปใช้ใน การวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค สำหรับการกำหนดแนวทางและวิธีการแก้ไข ปัญหาสภาพการจราจรแออัดที่ท่าเรือแหลมฉบังอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้ง 2 ด้านมีรายละเอียด ดังนี้

1. ข้อมูลทางด้านกายภาพของพื้นที่ เป็นการสำรวจและเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเส้นทางบริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังโดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเส้นทาง เช่น จำนวนช่องจราจรของถนนโดยรอบท่าเรือแหลมฉบัง ขนาดความกว้างของช่องจราจร ขนาดความกว้างของบริเวณทางแยก จำนวนช่องทางเลี้ยวบริเวณทางแยก ระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจร ทิศทางในการสัญจรของถนนโดยมีรายละเอียด ดังนี้

2. ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของหน้าตัดถนน คือ การสำรวจข้อมูลจำนวนช่องจราจร ความกว้างของช่องจราจร ความกว้างของไหล่ทาง ความกว้างของเกาะกลางในพื้นที่เส้นทางจาก นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังและเส้นทางภายในท่าเรือแหลมฉบัง

3. ข้อมูลการควบคุมจราจร คือ การข้อมูลรอบสัญญาณไฟจราจรในแต่ละทิศทางใน บริเวณทางแยกในเส้นทางนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง รูปแบบจังหวะไฟจราจรแต่ละทางแยก และเส้นทางอนุญาตเลี้ยวของสัญญาณไฟจราจรในบริเวณทางแยก

4. ข้อมูลปริมาณการเดินทาง คือ การสำรวจข้อมูลปริมาณการเดินทางจากต้นทางถึง ปลายทางของยานพาหนะแต่ละประเภทจากจุดสังเกตที่กำหนดในเส้นทางท่าเรือแหลมฉบังและ เส้นทางภายในท่าเรือ

5. ข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบแบบจำลอง คือ การสำรวจปริมาณจราจรบนเส้นทางใน ช่วงเวลาที่กำหนด ปริมาณจราจรบริเวณทางแยก ความยาวแถวคอยบริเวณทางแยก, ความเร็ว จำแนกตามประเภทของยานพาหนะ

6. ข้อมูลพฤติกรรมของยานพาหนะที่เข้ามาจำแนกตามพฤติกรรมที่ได้มีการรวบรวมไว้ โดยกองการทำท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี

การเก็บรวบรวมข้อมูลทางด้านวิศวกรรมจราจร เป็นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ประเภทของยานพาหนะ พฤติกรรมการขับขี่ การตัดสินใจระหว่าง การขับขี่ จากการสำรวจข้อมูลภาคสนาม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองฐานร่วมกับ ข้อมูลเชิงกายภาพ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. การเก็บข้อมูลปริมาณจราจร ผู้วิจัยแบ่งพื้นที่การเก็บรวบรวมข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบริเวณพื้นที่ภายนอกท่าเรือแหลมฉบัง โดยเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณจราจรของถนน แต่ละเส้นที่อยู่ในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง โดยจะทำการเก็บข้อมูลโดยแบ่งเป็นเส้นทาง ต่าง ๆ กำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเดินทาง ตัวอย่างเช่น ระยะทางจากถนนมอเตอร์เวย์ จนถึงประตูตรวจสอบหรือจากถนนสุขุมวิทจนถึงประตูตรวจสอบเป็นต้น ทำการเก็บข้อมูลใน ช่วงเวลา 08:00-20:00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพการจราจรปกติไป จนถึงสภาพการจราจรติดขัดจากการใช้เส้นทางร่วมกันระหว่างรถบรรทุกขนาดใหญ่กับยานพาหนะ ภายในชุมชนและเป็นช่วงเวลาที่ปริมาณรถบรรทุกเข้าสู่นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังเป็นจำนวนมาก โดยมีจุดประสงค์เพื่อการจัดส่งตู้คอนเทนเนอร์ส่งออกและส่วนเส้นทางภายในท่าเรือแหลมฉบัง เป็นเส้นทางเมื่อรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ผ่านประตูตรวจสอบมาและต้องมุ่งหน้าต่อไปท่าเทียบ เรือเอกชนเพื่อจัดส่งตู้คอนเทนเนอร์ แบ่งประเภทของยานพาหนะออกเป็น 4 ประเภทคือ 1) รถยนต์ 2) รถจักรยานยนต์ 3) รถโดยสาร และ 4) รถบรรทุก สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นที่ ภายนอกท่าเรือและรถบรรทุกในส่วนในพื้นที่ภายในท่าเรือ

2. การเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณจราจรบริเวณทางแยก ดำเนินการสำรวจปริมาณจราจรโดยการบันทึกวิดีโอตั้งแต่วันที่ 1-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ในช่วงเวลา 08:00-20:00 น. บริเวณทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3 และ 4 จากนั้นนับปริมาณยานพาหนะในแต่ละทิศทางเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปริมาณการจราจร โดยรวมปริมาณจราจรในทุกทิศทางของทางแยกและรวบรวมเป็นปริมาณจราจรรวมต่อชั่วโมง สำหรับการวัดหรือคำนวณหาค่าปริมาณการจราจรจะใช้หน่วยเดียวกัน คือ หน่วยของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (Passenger Car Unit : PCU.) แสดงดังตารางที่ 11 ปริมาณจราจรที่เข้าสู่โครงข่ายถนนจะถูกแบ่งเก็บรวบรวมข้อมูลเป็น 48 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 15 นาที ตั้งแต่วันที่ 1-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ในช่วงเวลา 08:00-20:00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มียปริมาณการจราจรหนาแน่นสูงและปกติเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาแบบจำลองฐาน (Base case)

ตารางที่ 11 ปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3

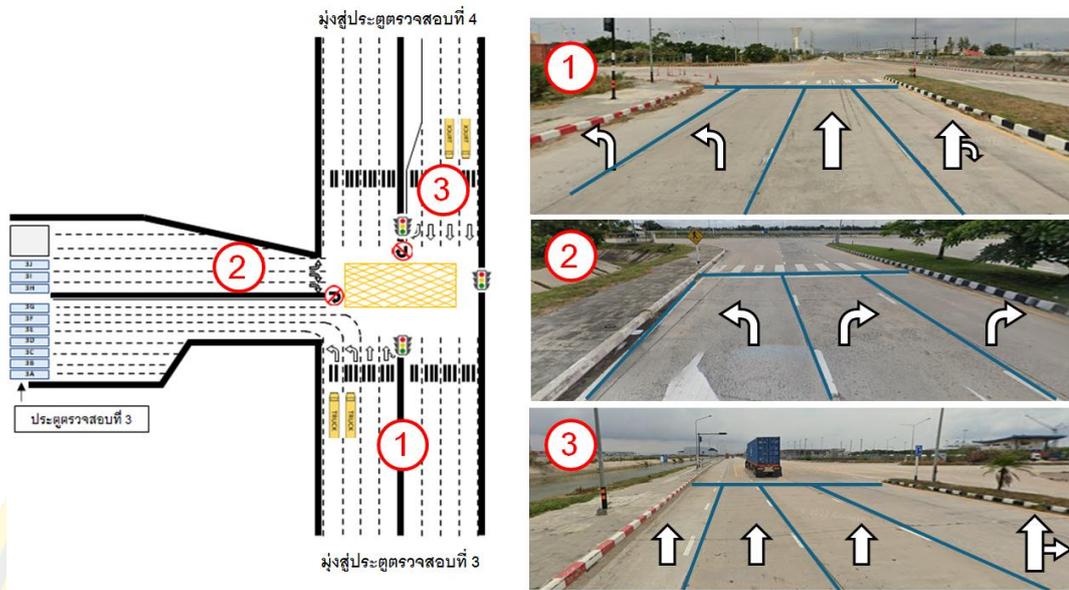
ปริมาณการจราจรทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3													
ประเภท	PCU	ช่วงเวลา 15.00-16.00				ช่วงเวลา 16.00-17.00				ช่วงเวลา 17.00-18.00			
		Left	top	U-Turn	bottom	Left	top	U-Turn	bottom	Left	top	U-Turn	bottom
รถยนต์	1	0	74	4	84	0	89	4	92	0	98	5	101
รถบัส	2.1	0	14	1	10	0	15	1	11	0	17	1	12
รถบรรทุก	2.5	0	45	2	41	0	50	3	45	0	55	3	50
รถพ่วง	2.5	109	42	2	55	110	50	3	61	80	60	3	67
รถกึ่งพ่วง	2.5	151	36	2	62	152	43	2	68	111	52	3	75

ตารางที่ 12 ปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 4

ปริมาณการจราจรทางแยกประตูตรวจสอบที่ 4													
ประเภท	PCU	ช่วงเวลา 15.00-16.00				ช่วงเวลา 16.00-17.00				ช่วงเวลา 17.00-18.00			
		Left	top	U-Turn	bottom	Left	top	U-Turn	bottom	Left	top	U-Turn	bottom
รถยนต์	1	0	122	0	143	0	137	24	160	0	153	27	179
รถบัส	2.1	0	32	0	14	0	36	8	16	0	40	9	18
รถบรรทุก	2.5	0	49	0	28	0	55	4	31	0	62	4	35
รถพ่วง	2.5	50	26	0	39	38	29	1	44	34	32	1	49
รถกึ่งพ่วง	2.5	76	40	0	61	58	45	1	68	50	50	1	76

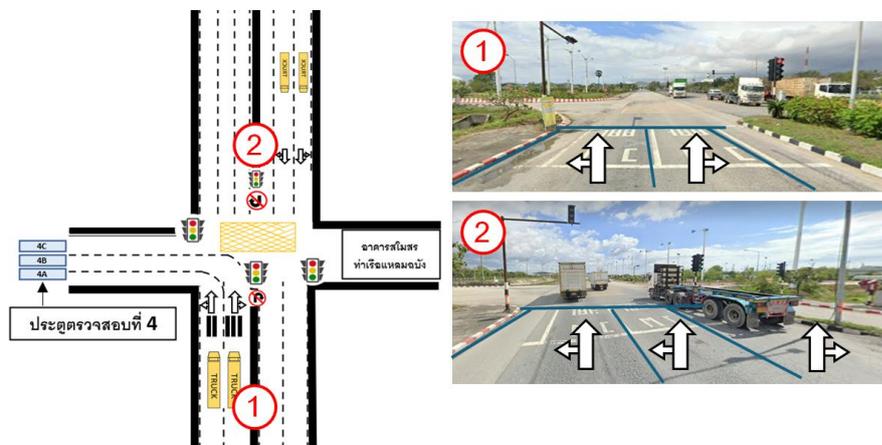
การเก็บรวบรวมข้อมูลลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยก การเก็บรวบรวมข้อมูลทางด้านกายภาพของถนนและลักษณะการจราจรในเส้นทางที่เกี่ยวข้อง สำหรับนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองสภาพจราจรโดยใช้แบบจำลองระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม Simulation of Urban Mobility โดยมีรายละเอียดของข้อมูล ดังนี้ 1) ลักษณะทางกายภาพของถนน ได้แก่ จำนวนช่องจราจร ความกว้างช่องจราจร ความกว้างเกาะกลาง ความกว้างของไหล่ทาง ทิศทางการจราจรและ 2) ลักษณะการจราจร ได้แก่ ข้อมูลปริมาณการจราจรของยานพาหนะประเภทต่างๆ พฤติกรรมการขับซึ่ สัดส่วนการเลี้ยวของยานพาหนะ ความยาวแถวคอยที่เกิดขึ้นบริเวณทางแยก ข้อมูลรอบเวลาสัญญาณไฟจราจรและข้อมูลด้านความเร็วของยานพาหนะ การเก็บข้อมูลความเร็วของยานพาหนะทั้ง 4 ประเภทที่เคลื่อนที่ภายในเส้นทางโดยรอบของท่าเรือแหลมฉบังและความเร็วของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ภายในท่าเรือแหลมฉบังเพื่อให้ทราบถึงความเร็วเฉลี่ยของรถแต่ละการใช้การสัญจร โดยใช้วิธีการบันทึกภาพเคลื่อนไหวและกำหนดจุดอ้างอิงเพื่อคำนวณความเร็วของยานพาหนะจากระยะทางและระยะเวลาที่เคลื่อนที่ผ่าน เก็บข้อมูลในช่วงเวลา 08:00-20:00 น.

เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณการจราจรด้วยวิธีการบันทึกวิดีโอรวมกับการใช้แบบฟอร์มการจดบันทึกพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การเปลี่ยนช่องจราจร ทิศทางการจราจรและปริมาณการจราจรในแต่ละช่องทาง ณ บริเวณทางเข้าประตูตรวจสอบ โดยปัจจุบันลักษณะทางกายภาพของเส้นทางเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 แบ่งเป็นถนน 2 ฝั่งเกาะกลางถนน ยานพาหนะในแต่ละฝั่งมีช่องจราจรจำนวน 3 ช่องทางและมีทิศทางการเคลื่อนที่สวนกัน แต่ละฝั่งมีช่องจราจรจำนวน 3 ช่องทาง มีความกว้างของช่องจราจรเท่ากับช่องจราจรทั่วไป คือ 3.30 เมตร ยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้ความเร็วการไหลแบบอิสระโดยมีขีดจำกัดความเร็วของถนนเท่ากับ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ระยะทางจากถนนสายหลังมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบจะมีระยะทางรวมประมาณ 10.5 กิโลเมตร มีทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร

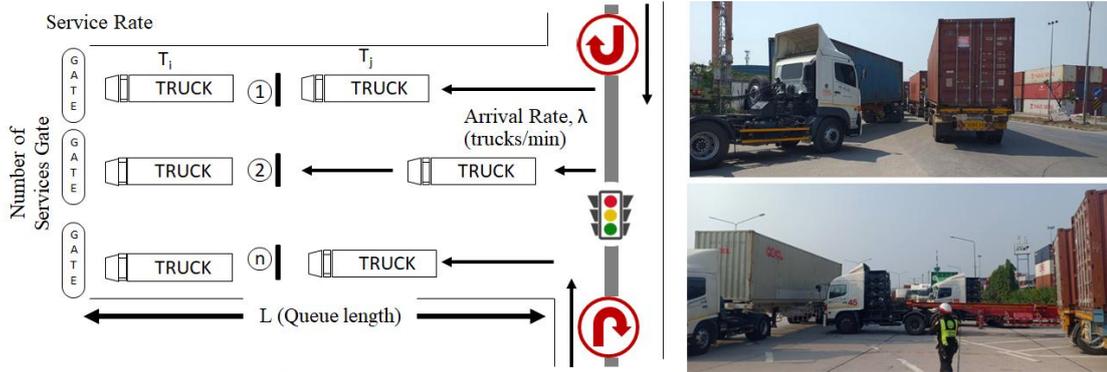


ภาพที่ 17 ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 3

ลักษณะทางกายภาพของประตูตรวจสอบหมายเลข 4 แบ่งเป็นถนน 2 ฝั่งเกาะกลางถนน ยานพาหนะในแต่ละฝั่งมีช่องจราจรจำนวน 3 ช่องทางและมีทิศทางการเคลื่อนที่สวนกัน แต่ละฝั่งมี ช่องจราจรจำนวน 3 ช่องทาง มีความกว้างของช่องจราจรเท่ากับช่องจราจรทั่วไป คือ 3.30 เมตร ยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้ความเร็วการไหลแบบอิสระโดยมีขีดจำกัดความเร็วของถนนเท่ากับ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ระยะทางจากถนนสายหลังมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบจะมีระยะทางรวม ประมาณ 6.5 กิโลเมตร มีทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร

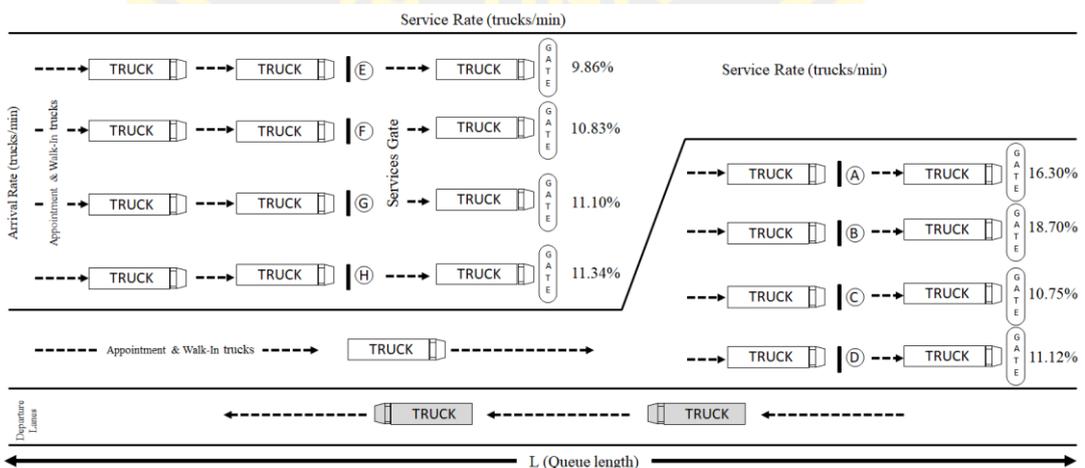


ภาพที่ 18 ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 4



ภาพที่ 19 ลักษณะการติดขัดที่ ถนน ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4

สำหรับลักษณะทางกายภาพของเส้นทางเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 แบ่งเป็นถนน 2 ฝั่งกั้นกลางด้วยแผงกั้นจราจรหรือ แบริเออร์ (Barrier) ยานพาหนะในฝั่งมุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือมีช่องจราจรจำนวน 8 ช่องจราจรและฝั่งขาออกจำนวน 3 ช่องจราจร สำหรับฝั่งขาเข้าจะมีการแบ่งประตูตรวจสอบเป็น 2 ชั้น (2 Stagger) แต่ละชั้นมี 4 ประตู (Booth) โดยด้านด้านนอกประกอบด้วยประตูตรวจสอบ E-H และด้านด้านในประกอบด้วยประตูตรวจสอบ A-D โดยช่องจราจรทุกช่อง (A-D) จะให้บริการร่วมกันระหว่างรถบรรทุกที่มีการนัดหมายและไม่ได้นัดหมาย มีความกว้างของช่องจราจรเท่ากับช่องจราจรทั่วไป คือ 3.30 เมตร ยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้ความเร็วการไหลแบบอิสระโดยมีขีดจำกัดความเร็วของถนนเท่ากับ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ระยะทางจากถนนสายหลังมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบจะมีระยะทางรวมประมาณ 6.5 กิโลเมตร มีทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร



ภาพที่ 20 ลักษณะทางกายภาพบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลขที่ 1

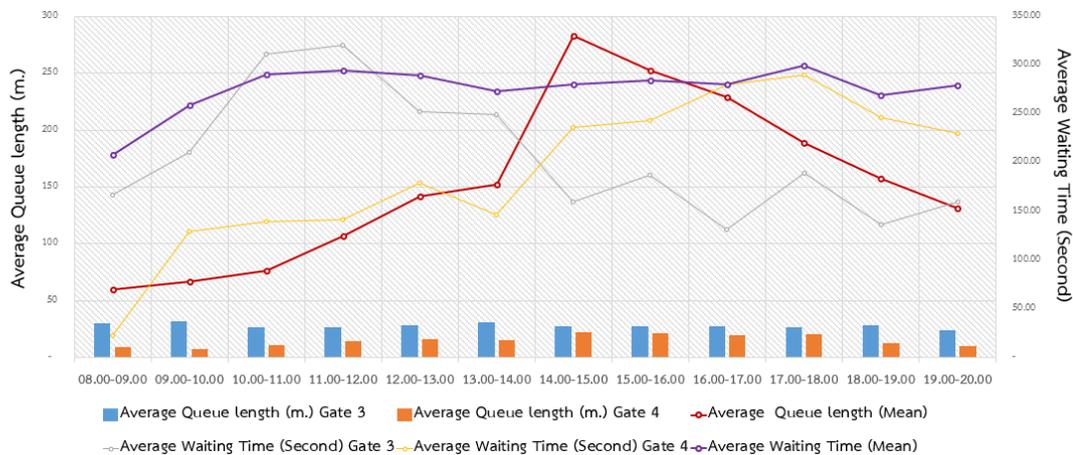
การเก็บข้อมูลระยะเวลาในการเดินทางและระยะเวลาการรอคอยของยานพาหนะ โดยการกำหนดจุดอ้างอิงการเดินทางในพื้นที่ถนนแต่ละเส้นบริเวณโดยรอบในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังและรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ภายในท่าเรือแหลมฉบังเพื่อบันทึกค่าระยะเวลาในการเดินทางของรถแต่ละคันที่ใช้ในการเดินทางจากจุดอ้างอิงดังกล่าวจนถึงบริเวณพื้นที่ที่กำหนดเก็บรวบรวมข้อมูลในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 08:00-20:00 น. โดยพบว่าความยาวเฉลี่ยของแถวคอยสูงสุดของประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 เท่ากับ 800.15, 30 และ 24 เมตร ตามลำดับ โดยอยู่ในช่วงเวลา 14.00-15.00 และ 15.00-16.00 แสดงดังตารางที่ 13 สำหรับระยะเวลาการคอยเฉลี่ยของยานพาหนะสูงสุดที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 เท่ากับ 1,446, 187.13 และ 243.50 24 วินาทีต่อคัน ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ความยาวและระยะเวลาการคอยเฉลี่ย (08.00-14.00)

ตัวชี้วัด	ประตู	08.00-09.00	09.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00
ความยาวเฉลี่ยของแถวคอย (เมตร)	Gate 1	140.76	160.46	190.81	280.13	380.94	410.28
	Gate 3	20.68	21.55	27.25	27.48	29.47	31.26
	Gate 4	19.52	17.54	21.57	24.46	26.3	26.47
ระยะเวลาการคอยเฉลี่ย (วินาที/คัน)	Gate 1	435	438	421	423	436	423
	Gate 3	167.00	211.00	311.25	321.00	251.88	249.00
	Gate 4	22.50	99.50	139.00	41.50	179.00	47.50

ตารางที่ 14 ความยาวและระยะเวลาการคอยเฉลี่ย (14.00-20.00)

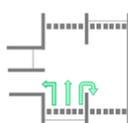
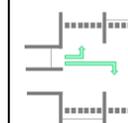
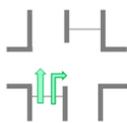
ตัวชี้วัด	ประตู	14.00-15.00	15.00-16.00	16.00-17.00	17.00-18.00	18.00-19.00	19.00-20.00
ความยาวเฉลี่ยของแถวคอย (เมตร)	Gate 1	800.15	710.22	640.04	520.41	430.53	360.26
	Gate 3	27.52	30.43	28.23	26.52	28.59	24.21
	Gate 4	32.53	34.57	30.47	30.47	33.22	30.38
ระยะเวลาการคอยเฉลี่ย (วินาที/คัน)	Gate 1	446	422	428	419	426	448
	Gate 3	159.88	187.13	131.63	189.13	136.50	160.13
	Gate 4	236.50	243.50	70.00	109.50	100.00	30.00



ภาพที่ 21 ผลลัพธ์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4

การเก็บรวบรวมข้อมูลการควบคุมการจราจรบริเวณทางแยกด้วยสัญญาณไฟจราจร ผู้วิจัยทำการสำรวจรอบสัญญาณไฟของทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3 และ 4 ที่ดำเนินงานในรูปแบบทางแยกเดี่ยวในช่วงเวลาที่กำหนด สืบหาข้อมูลจังหวะสัญญาณไฟจราจร ผู้วิจัยทำการสำรวจข้อมูลการควบคุมสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยก เช่น ระยะเวลารอบสัญญาณไฟจราจร การจัดจังหวะของระบบสัญญาณไฟจราจร และตำแหน่งอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้ควบคุมการจราจรบริเวณทางแยก เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค พบว่ารอบสัญญาณไฟจราจรของทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3 และ 4 ปัจจุบันใช้รอบสัญญาณไฟจราจรแบบคงที่ตลอดช่วงเวลา สัญญาณไฟของประตูตรวจสอบที่ 3 จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงต่อ 1 รอบสัญญาณไฟระยะเวลารวมเท่ากับ 392 วินาทีต่อรอบ และ 2 ช่วงต่อ 1 รอบสัญญาณไฟสำหรับประตูตรวจสอบที่ 4 มีระยะเวลารวมเท่ากับ 248 วินาทีต่อรอบ โดยแต่ละช่วงมีทิศทางการเคลื่อนตัวของยานพาหนะและรอบสัญญาณไฟจราจรแสดงดังตารางที่ 3-5

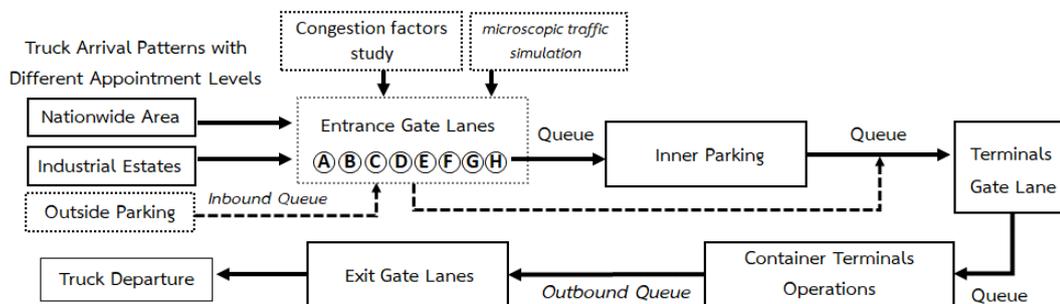
ตารางที่ 15 รอบสัญญาณไฟจราจรทางแยกประตูตรวจสอบ

จังหวะสัญญาณไฟจราจร		ทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3			ทางแยกประตูตรวจสอบที่ 4	
						
สัญญาณไฟ จราจรช่วงเวลา เร่งด่วน (วินาที)	ไฟเขียว	60	55	60	55	55
	ไฟเหลือง	3	3	3	3	3
	ไฟแดงทั้งหมด (All Red)	4	4	4	4	4
	รอบสัญญาณไฟจราจรรวม	67	62	67	62	62

การพัฒนาแบบจำลองฐาน

การพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคของพื้นที่โดยรอบและภายในท่าเรือแหลมฉบัง สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและการกำหนดแนวทางการแก้ไขในอนาคต การสร้างแบบจำลองฐานจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลจากทั้งข้อมูลภาคและข้อมูลสถิติที่มีการบันทึกไว้ เพื่อให้สามารถพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรที่มีคุณภาพจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลที่ใช้ ใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยการศึกษาในครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกทำการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคโดยใช้โปรแกรม Simulation of Urban MObility รุ่น 1.7.0 ซึ่งเป็นหนึ่งในโปรแกรมจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคที่ได้รับการยอมรับและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายอย่างต่อเนื่องในด้านงานวิจัย อีกทั้งโปรแกรม Simulation of Urban Mobility เป็นโปรแกรมโอเพนซอร์ส (Open source) ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายในการทำไปใช้ในเชิงการศึกษาและการพัฒนาเพื่อช่วยตัดสินใจในการประเมินทางเลือกสำหรับการแก้ไขปัญหาการจราจร ขั้นตอนการสร้างและพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคมีรายละเอียด ได้แก่ 1) การสร้างโครงข่ายถนน 2) การสร้างและกำหนดเส้นทางจราจร 3) การนำเข้าข้อมูลปริมาณจราจร 4) การกำหนดสัดส่วนของการจราจร 5) การกำหนดและประเภทของยานพาหนะในเครือข่าย 6) การกำหนดความเร็วของยานพาหนะ 7) การกำหนดนโยบายการจราจรที่ทางแยก 8) การกำหนดพื้นที่ชะลอความเร็ว และ 9) กำหนดค่าตัวแปรสำหรับการเก็บข้อมูล โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะถูกนำมาปรับแต่งให้ตรงกับลักษณะเฉพาะของท่าเรือแหลมฉบังในประเทศไทย ผู้เขียนได้รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องของท่าเรือแหลมฉบังในประเทศไทย เพื่อระบุปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความแออัดที่ประตูทางเข้า แนวทางนี้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Gracia et al. (2017) ซึ่งศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้า

ในการดำเนินงานของท่าเรือ การจัดสรรประตูทางเข้าค้ำึงถึงผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแออัด โครงสร้างการดำเนินงานภายในของท่าเรือแสดงไว้ในรูปที่ 3-11



ภาพที่ 22 โครงสร้างของแบบจำลองสภาพการจราจร

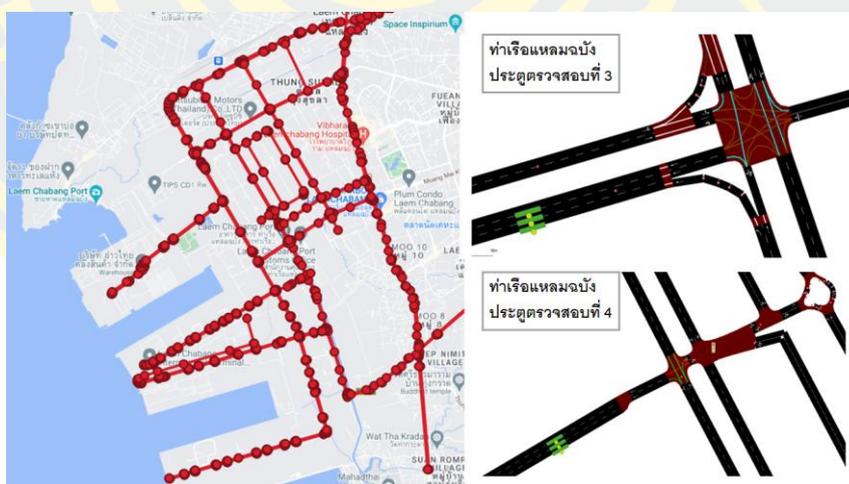
ปริมาณการจราจรที่คับคั่งที่ประตูท่าเรือเป็นผลมาจากพฤติกรรมการเลือกประตูท่าเรือแบบสุ่มและการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ไม่สามารถคาดเดาได้ เนื่องจากรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ส่วนใหญ่ไม่ได้นัดหมายล่วงหน้า การเคลื่อนตัวของยานพาหนะที่ซับซ้อนส่งผลให้เกิดข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์ ในขณะที่วิธีการสร้างแบบจำลองเหตุการณ์แยกส่วนสามารถจัดการกับกระบวนการที่ไม่แน่นอนและเป็นพลวัตได้อย่างเหมาะสมกว่า อีกทั้งการที่ท่าเรือยังไม่ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดจะทำให้กำหนดนโยบายแก้ไขปัญหาลาดเคลื่อน

นอกจากโปรแกรมสำหรับการจำลองสภาพการจราจร งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ 1) แบบสังเกตและบันทึกข้อมูลเพื่อรวบรวมข้อมูลภาคสนาม การบันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องดิจิทัล 2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนและของปัจจัย (ANOVA) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ (MANOVA) ด้วยโปรแกรม เครื่องมือทั้ง 2 กลุ่มจะถูกนำมาใช้ร่วมกัน ดังกล่าวข้างต้นจะถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยความแออัดที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดำเนินการของประตูตรวจสอบต่อไป

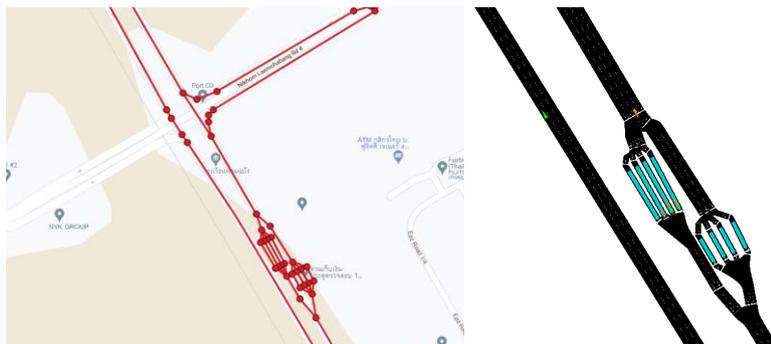
เพื่อให้ได้รับข้อมูลทางกายภาพที่มีความถูกต้อง ผู้วิจัยเลือกนำเข้าข้อมูลโครงข่ายถนนจากโปรแกรมภูมิศาสตร์สารสนเทศ QGIS ที่มีความสามารถในการเชื่อมโยงฐานข้อมูลกับ Google Maps สามารถใช้ในการอ้างอิงโครงสร้างและมาตรระยะทางของถนน โดยมีข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ 1) ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของถนน ได้แก่ จำนวนช่องจราจร ความกว้างช่องจราจร ความกว้างเกาะกลาง ความกว้างของไหล่ทาง ทิศทางการจราจร และ 2) ลักษณะการจราจร ได้แก่ จำนวนยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะ พฤติกรรมการแซง พฤติกรรมการหยุด สัดส่วนการเลี้ยวของยานพาหนะ ความยาวแถวคอยที่เกิดขึ้นบริเวณทางแยกและข้อมูลรอบเวลาสัญญาณไฟจราจร

การสร้างโครงข่ายถนนจากข้อมูลภูมิศาสตร์สารสนเทศเป็นขั้นตอนแรกในการสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรด้านเส้นทางให้มีลักษณะตรงกับพื้นที่ที่ทำการศึกษามากที่สุด ผู้วิจัยเลือกนำเข้าสู่ข้อมูลโครงข่ายถนนจากโปรแกรมภูมิศาสตร์สารสนเทศ QGIS ที่สามารถวิเคราะห์และแก้ไขข้อมูลสารสนเทศเชิงพื้นที่รวมถึงการสร้างแผนที่กราฟิกโดยสามารถนำเข้าสู่ข้อมูลจากฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ Google Map ที่สามารถใช้ในการอ้างอิงจากภาพถ่ายทางอากาศและมาตราระยะทางของถนน ผู้สร้างสามารถเพิ่มขึ้นของข้อมูลวงโคจรในลักษณะจุด (Point) เส้น (Line) หรือรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) เพื่อสร้างเป็นเส้นทางอ้างอิงสำหรับการสร้างแบบจำลองต่อไป

การสร้างลักษณะทางกายภาพของทางแยกที่ศึกษาของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 แบบจำลองพื้นที่ศึกษาถูกสร้างโดยอ้างอิงจากพื้นที่จริงบนถนนซอยนิคมแหลมฉบัง 2 โดยผู้ศึกษาได้วิเคราะห์ผลทางแยกทั้งรูปแบบทางแยกเดี่ยวและทางแยกแบบประสานสัมพันธ์ โดยมีช่องจราจรบนถนนสายหลัก 6 ช่องจราจร ทิศทางละ 3 ช่องจราจร สร้างลักษณะทางกายภาพของทางแยกโดยการสร้างเส้นเชื่อมโยง (Links) คือการสร้างแนวถนนซึ่งแต่ละเส้นทางเชื่อมโยงจะถูกกำหนดจำนวนช่องจราจร ความกว้าง ทิศทางการเชื่อมโยงและลักษณะทั่วไปของถนนที่อ้างอิงจากโปรแกรม QGIS โดยที่แต่ละเส้นทางจะเชื่อมกันด้วยจุดเชื่อมต่อ (Node) เพื่อทำให้เกิดโครงข่ายถนน กำหนดความกว้างของช่องจราจรเท่ากับช่องจราจรทั่วไป คือ 3.30 เมตร แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 รูปแบบโครงข่ายเส้นทางจากโปรแกรมที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4



ภาพที่ 24 รูปแบบโครงข่ายเส้นทางจากโปรแกรมที่ประตู่ตรวจสอบหมายเลข 1

การนำเข้าข้อมูลปริมาณจราจรและข้อมูลความเร็ว เป็นขั้นตอนการนำเข้าข้อมูลปริมาณจราจรในแต่ละเส้นทางครอบคลุมปริมาณการจราจรในเส้นทางหลัก เส้นทางรองและทางแยกประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงลักษณะพฤติกรรมจราจรที่ซับซ้อนยานพาหนะแต่ละประเภท ได้แก่ จำนวนยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะ พฤติกรรมการแซง พฤติกรรมการหยุด พฤติกรรมการขับขึ้นตามกัน เป็นต้น

ตารางที่ 16 รูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตู่ตรวจสอบหมายเลข 1

Time Period	Vehicle Types			Total	Proportion (%)
	Dry	Reefer	Empty		
08:01-09:00	52	9	47	108	4.36%
09:01-10:00	78	13	71	162	6.54%
10:01-11:00	91	15	84	190	7.67%
11:01-12:00	111	19	102	231	9.33%
12:01-13:00	99	16	91	206	8.32%
13:01-14:00	127	21	116	265	10.70%
14:01-15:00	137	23	125	285	11.51%
15:01-16:00	132	22	121	275	11.11%
16:01-17:00	127	21	116	264	10.66%
17:01-18:00	122	20	112	255	10.30%
18:01-19:00	62	10	57	129	5.21%
19:01-20:00	51	9	47	106	4.28%
Total	1189	198	1089	2476	100%

ตารางที่ 16 แสดงสัดส่วนการเข้ามาสู่ท่าเรือของรถบรรทุกแต่ละประเภทที่เข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ตั้งแต่เวลา 08:00-20:00 ที่ถูกรวบรวมโดยเจ้าหน้าที่ประตูตรวจสอบของท่าเรือแหลมฉบังในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา พบว่าสัดส่วนของรถบรรทุกทั้งหมดที่มีสัดส่วนสูงสุดเท่ากับ 1189 คัน หรือ 48.02% รองลงมาได้แก่รถบรรทุกตู้เปล่าเท่ากับ 1,089 คนหรือ 43.97% และสุดท้ายได้แก่รถบรรทุกตู้ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 198 คัน หรือ 8.01% โดยช่วงเวลา 14:01-15:00 เป็นช่วงเวลาที่มียานรถบรรทุกสูงที่สุด

ตารางที่ 17 รูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3

Time Period	Vehicle Types			Total	Proportion (%)
	Dry	Reefer	Empty		
08:01-09:00	24	5	32	61	8.24%
09:01-10:00	28	5	30	63	8.51%
10:01-11:00	29	8	27	64	8.65%
11:01-12:00	28	9	28	65	8.78%
12:01-13:00	28	4	30	61	8.24%
13:01-14:00	25	5	32	62	8.38%
14:01-15:00	26	7	35	68	9.19%
15:01-16:00	34	7	23	64	8.65%
16:01-17:00	26	9	29	64	8.65%
17:01-18:00	34	6	21	61	8.24%
18:01-19:00	26	6	22	54	7.30%
19:01-20:00	21	7	25	53	7.16%
Total	329	78	334	741	100%

ตารางที่ 17 แสดงสัดส่วนการเข้ามาสู่ท่าเรือของรถบรรทุกแต่ละประเภทที่เข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 ตั้งแต่เวลา 08:00-20:00 ที่ถูกรวบรวมโดยเจ้าหน้าที่ประตูตรวจสอบของท่าเรือแหลมฉบังในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา พบว่าสัดส่วนของรถบรรทุกตู้เปล่ามีสัดส่วนสูงสุดเท่ากับ 334 คัน หรือ 45.07% รองลงมาได้แก่รถบรรทุกทั้งหมดเท่ากับ 329 คนหรือ 44.40% และสุดท้ายได้แก่รถบรรทุกตู้ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 78 คัน หรือ 10.53% โดยช่วงเวลา 14:01-15:00 เป็นช่วงเวลาที่มียานรถบรรทุกสูงที่สุด

ตารางที่ 18 รูปแบบการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 4

Time Period	Vehicle Types			Total	Proportion (%)
	Dry	Reefer	Empty		
08:01-09:00	57	13	38	108	8.23%
09:01-10:00	55	12	42	109	8.31%
10:01-11:00	70	8	31	109	8.31%
11:01-12:00	52	6	52	109	8.31%
12:01-13:00	51	16	40	107	8.16%
13:01-14:00	72	10	30	112	8.54%
14:01-15:00	56	9	51	116	8.84%
15:01-16:00	72	6	36	114	8.69%
16:01-17:00	46	10	57	113	8.61%
17:01-18:00	46	6	58	110	8.38%
18:01-19:00	34	9	60	103	7.85%
19:01-20:00	46	9	46	102	7.77%
Total	657	114	541	1312	100%

ตารางที่ 18 แสดงสัดส่วนการเข้ามาสู่ท่าเรือของรถบรรทุกแต่ละประเภทที่เข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 4 ตั้งแต่เวลา 08:00-20:00 ที่ถูกรวบรวมโดยเจ้าหน้าที่ประตูตรวจสอบของท่าเรือแหลมฉบังในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา พบว่าสัดส่วนของรถบรรทุกทั้งหมดที่มีสัดส่วนสูงสุดเท่ากับ 657 คัน หรือ 50.08% รองลงมาได้แก่รถบรรทุกตู้เปล่าเท่ากับ 541 คันหรือ 41.23% และสุดท้ายได้แก่รถบรรทุกตู้ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 114 คัน หรือ 8.69% โดยช่วงเวลา 14:01-15:00 เป็นช่วงเวลาที่มียานพาหนะรถบรรทุกสูงที่สุด

ตารางที่ 19 รูปแบบการมาถึงของยานพาหนะในเส้นทางร่วม

Time Period	Vehicle Types		Total	Proportion (%)
	ประตูหมายเลข 1	ประตูหมายเลข 3 และ 4		
08:01-09:00	139	188	283	6.47%
09:01-10:00	141	191	290	6.63%
10:01-11:00	143	194	297	6.79%

ตารางที่ 19 (ต่อ)

Time Period	Vehicle Types		Total	Proportion (%)
	ประตูลำดับเลข 1	ประตูลำดับเลข 3 และ 4		
11:01-12:00	170	231	355	8.11%
12:01-13:00	174	235	365	8.34%
13:01-14:00	209	278	427	9.76%
14:01-15:00	237	315	490	11.20%
15:01-16:00	190	310	445	10.17%
16:01-17:00	165	268	382	8.73%
17:01-18:00	162	263	371	8.48%
18:01-19:00	161	257	362	8.27%
19:01-20:00	139	220	308	7.04%
Total	2030	2950	4375	100.00%

ปัจจุบันรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้ามาที่ท่าเรือสามารถเลือกเข้าประตูตรวจสอบได้ทั้ง 8 ประตูอย่างอิสระเนื่องจากยังไม่มีข้อกำหนดประเภทยานพาหนะที่จะให้บริการในแต่ละประตู ตารางที่ 20 แสดงสัดส่วนการเลือกประตูของรถบรรทุกโดยพบว่าประตูที่มีการเลือกสูงสุดคือประตู A มีสัดส่วนการเลือก 16.30% และประตูที่มีการเลือกต่ำสุดได้แก่ประตู E

ตารางที่ 20 สัดส่วนการเลือกเข้ารับบริการที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1

Entrance Gate	No. Vehicles	Proportion (%)
A	331	16.30%
B	380	18.70%
C	218	10.75%
D	226	11.12%
E	200	9.86%
F	220	10.83%

ตารางที่ 20 (ต่อ)

Entrance Gate	No. Vehicles	Proportion (%)
G	225	11.10%
H	230	11.34%
Total	2030	100.00%

ตารางที่ 21 สัดส่วนการเลือกเข้ารับบริการที่ท่าเทียบเรือปลายทาง

Non-Booking			Booking		
Terminal Gate	Vehicles	Proportion (%)	Terminal Gate	Vehicles	Proportion (%)
A0	157	7.75%	A0	22	1.09%
A1	165	8.15%	A1	24	1.16%
A2	169	8.33%	A2	20	0.98%
A3	170	8.37%	A3	19	0.96%
A4	159	7.82%	A4	20	0.98%
A5	162	7.99%	A5	19	0.95%
B1	167	8.24%	B1	19	0.95%
B2	171	8.41%	B2	22	1.06%
B3	170	8.35%	B3	22	1.09%
B4	170	8.35%	B4	18	0.87%
B5	152	7.48%	B5	13	0.66%
Total	1812	89.25%	Total	218	10.75%

ตารางที่ 21 แสดงสัดส่วนท่าเทียบเรือปลายทางที่รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์จะเข้าไปส่ง-รับตู้คอนเทนเนอร์ โดยทั่วไปบริเวณทางเข้าท่าเทียบเรือแต่ละแห่งจะมีการจัดช่องจราจรสำหรับยานพาหนะที่มีการนัดหมายเวลาและไม่มีการนัดหมายเวลาแยกออกจากกัน อย่างไรก็ตามในสถานการณ์จริงพบว่าบ่อยครั้งปริมาณรถบรรทุกที่เข้ามาจะไม่ทำการนัดหมายเวลาและเลือกที่จะมาเข้าแถวคอยบริเวณทางเข้าท่าเทียบเรือแต่ละแห่ง ส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางเข้าท่าเทียบเรือ สำหรับรถบรรทุกที่ไม่มีกำหนดหมายเวลา (Non-booking) จะมีสัดส่วนท่าเรือปลายทางที่มีการเลือกสูงสุดคือท่าเทียบเรือ B2 มีสัดส่วนการเลือก 8.41% และท่าเทียบเรือที่มีการเลือกต่ำสุดได้แก่ท่าเทียบเรือ B5 มีสัดส่วนการเลือก 7.48% สำหรับรถบรรทุกที่มีการนัดหมายเวลา (Booking) จะมีสัดส่วนท่าเรือปลายทางที่มีการเลือกสูงสุดคือท่าเทียบเรือ A1 มีสัดส่วน

การเลือก 1.16% และทำเทียบเรือที่มีการเลือกต่ำสุดได้แก่ทำเทียบเรือ B5 มีสัดส่วนการเลือก 0.66%

ผู้วิจัยการทดสอบการกระจายตัวการเข้ามาของรถบรรทุก โดยแบ่งรอบการทดสอบออกเป็น 12 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 1 ชั่วโมง ใช้การทดสอบ Kolmogorov-Smirnov test เพื่อหา P-Value โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

H_0 : กลุ่มตัวอย่างมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นไปตามที่กำหนด

H_a : กลุ่มตัวอย่างมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นไปตามที่กำหนด

ตารางที่ 22 และ 23 แสดงการทดสอบการกระจายตัว (Distribution fitting) และตีความการทดสอบด้วยวิธีการ Kolmogorov-Smirnov ของช่วงระยะห่างการเข้ามาของยานพาหนะในแต่ละช่วงเวลา que ประตุตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 โดยแบ่งช่วงเวลาละ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 08.00-20.00 โดยพบว่า ค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบทุกช่วงเวลามีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ได้ แสดงว่าการกระจายอยู่ในรูปแบบที่กำหนด การทดสอบความเบ้และความโด่ง (Skewness and kurtosis) ของชุดข้อมูลทั้งหมดพบว่าอยู่ในช่วง ± 1.96

ตารางที่ 22 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของรถบรรทุกตู้ (ประตุ 1)

Time Period	Distribution Fitting	Kolmogorov-Smirnov test (p-value)	Skewness (Pearson)	Kurtosis (Pearson)
08:01-09:00	Beta4(1.011,1.098,10.059,3594.599)	0.0170	0.079	-1.186
09:01-10:00	Beta4(3653.736,7227.564,0,0)	0.0250	-0.047	-1.287
10:01-11:00	Log-normal(9.079,0.119)	0.0001	0.196	-1.318
11:01-12:00	Log-normal(9.422,0.088)	0.0007	0.292	-1.253
12:01-13:00	Normal(16319.122,1027.955)	0.0004	-0.121	-1.123
13:01-14:00	Normal(19773.757,1048.241)	0.0003	0.086	-1.273
14:01-15:00	Logistic(23379.818,626.946)	0.0396	0.130	-1.240
15:01-16:00	Beta4(1.064,0.993,25197.262,28834.031)	0.0112	-0.050	-1.423
16:01-17:00	Beta4(1.083,1.192,28788.139,32425.234)	0.0158	0.051	-1.237
17:01-18:00	Beta4(1.163,1.03,32385.333,36002.812)	0.0428	-0.122	-1.197
18:01-19:00	Beta4(1.165,1.123,36045.547,39630.332)	0.0073	-0.133	-1.238
19:01-20:00	Beta4(0.965,0.929,39611.907,43209.82)	0.0100	-0.078	-1.266

ตารางที่ 23 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของรถบรรทุกตู้ (ประตู่ 3)

Time Period	Distribution Fitting	Kolmogorov-Smirnov test (p-value)	Skewness (Pearson)	Kurtosis (Pearson)
08:01-09:00	Beta4(0.976,0.956,88.009,3567.58)	0.221	-0.063	-1.211
09:01-10:00	Weibull (2)(5.899,5628.534)	0.104	0.085	-1.220
10:01-11:00	Beta4(0.937,1,7567.526,10804.967)	0.091	0.190	-1.216
11:01-12:00	Beta4(0.946,0.844,10874.356,14422.906)	0.392	-0.167	-1.424
12:01-13:00	Normal(231,0.014)	0.243	0.244	-1.085
13:01-14:00	Weibull (2)(23,20324.426)	0.211	-0.140	-1.110
14:01-15:00	Erlang(618,0.026)	0.144	-0.004	-1.105
15:01-16:00	Beta4(1.355,1.453,25243.787,28808.225)	0.362	0.188	-1.005
16:01-17:00	Erlang(1070,0.035)	0.139	0.181	-1.061
17:01-18:00	Beta4(1.134,1.268,32404.421,36012.631)	0.366	0.091	-1.114
18:01-19:00	Fisher-Tippett (2)(848.085,37116.989)	0.083	0.352	-1.136
19:01-20:00	Beta4(1.215,1.198,39694.439,43140.299)	0.071	-0.099	-1.064

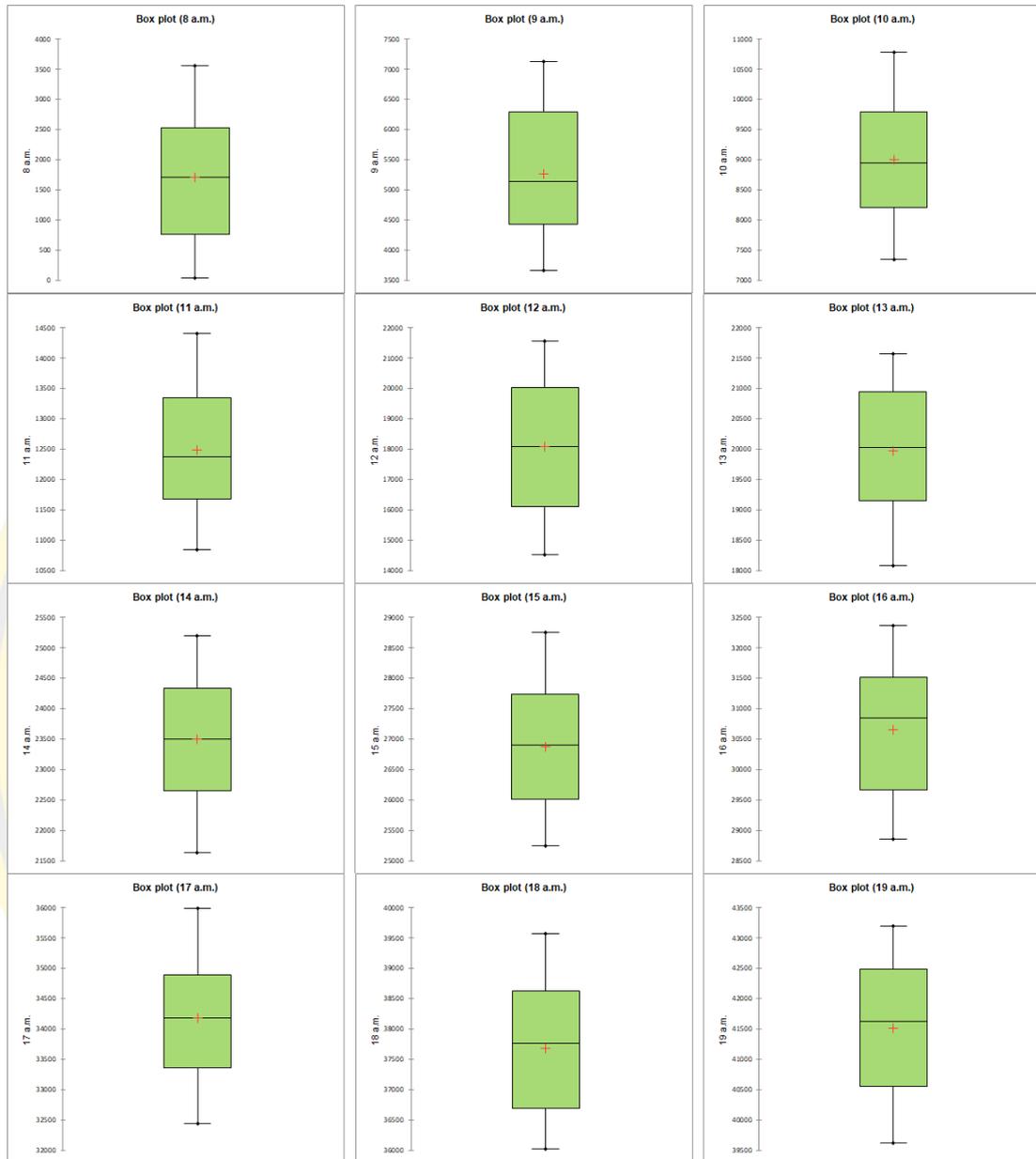
ตารางที่ 24 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของรถบรรทุกตู้ (ประตู่ 4)

Time Period	Distribution Fitting	Kolmogorov-Smirnov test (p-value)	Skewness (Pearson)	Kurtosis (Pearson)
08:01-09:00	Beta4(1.011,1.098,10.059,3594.599)	0.517	0.079	-1.186
09:01-10:00	Normal(5260.959,1045.872)	0.101	0.216	-1.198
10:01-11:00	Beta4(0.996,1.043,7313.513,10811.874)	0.122	0.166	-1.146
11:01-12:00	Beta4(1.019,1.189,10812.463,14436.022)	0.362	0.143	-1.107
12:01-13:00	Beta4(0.974,0.941,14443.802,21639.863)	0.412	-0.004	-1.341
13:01-14:00	Logistic(19985.94,625.499)	0.103	-0.135	-1.165
14:01-15:00	Beta4(1.148,1.04,21598.17,25232.113)	0.067	-0.063	-1.160
15:01-16:00	Gamma (2)(702.984,38.229)	0.120	0.118	-1.228
16:01-17:00	Erlang(929,0.03)	0.132	-0.106	-1.287
17:01-18:00	Beta4(1.218,1.268,32412.663)	0.431	-0.044	-0.976
18:01-19:00	Beta4(0.887,1.014,35989.377,39614.568)	0.405	0.072	-1.347
19:01-20:00	Beta4(0.985,0.894,39594.366,43229.758)	0.287	-0.123	-1.362

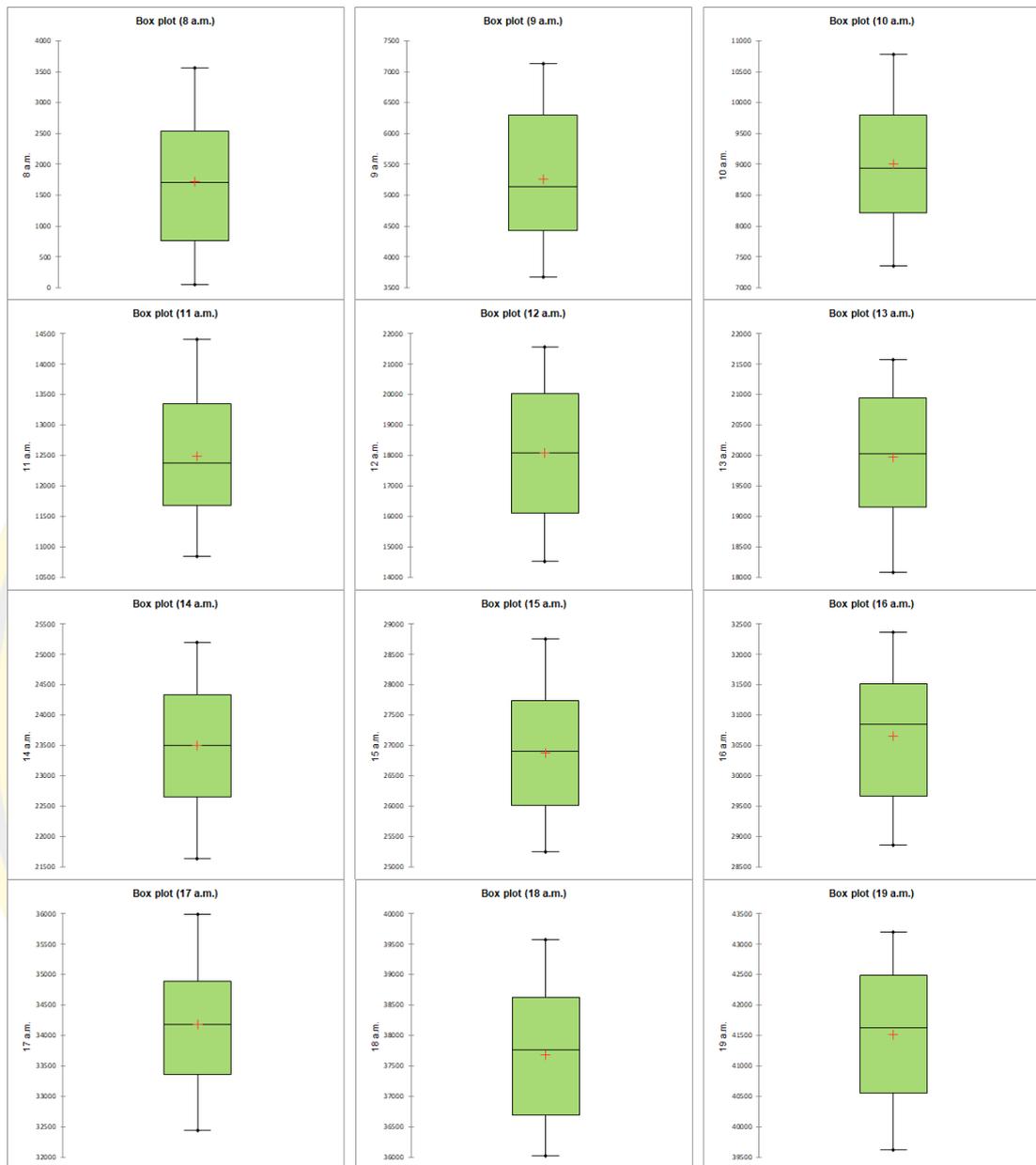
ตารางที่ 25 การทดสอบการกระจายตัวของการเข้ามาของยานพาหนะร่วมในเส้นทาง

Time Period	Distribution Fitting	Kolmogorov-Smirnov test (p-value)	Skewness (Pearson)	Kurtosis (Pearson)
08:01-09:00	Beta4(1.029,1.067,62.243,3576.743)	0.140	0.149	-1.316
09:01-10:00	Beta4(0.907,0.942,3659.232,7209.17)	0.328	-0.206	-1.284
10:01-11:00	Beta4(1.142,1.147,7321.383,10825.753)	0.226	-0.065	-1.133
11:01-12:00	Beta4(0.948,0.974,10796.417,14410.448)	0.406	-0.019	-1.332
12:01-13:00	Beta4(1.026,0.995,14423.372,17949.082)	0.419	-0.076	-1.241
13:01-14:00	Beta4(1.052,1.099,25298.442,28805.944)	0.096	-0.018	-1.210
14:01-15:00	Beta4(1.034,1.013,21599.636,25214.87)	0.050	-0.025	-1.375
15:01-16:00	Beta4(0.95,1.066,25185.759,28800.596)	0.064	0.071	-1.267
16:01-17:00	Normal(30625.582,986.3)	0.180	0.016	-1.296
17:01-18:00	Beta4(1.066,1.178,32416.305,36024.511)	0.094	0.110	-1.347
18:01-19:00	Beta4(1.091,1.055,36045.881,39630.258)	0.072	-0.020	-1.157
19:01-20:00	Beta4(1.094,1.052,39602.184,43235.78)	0.057	0.003	-1.184

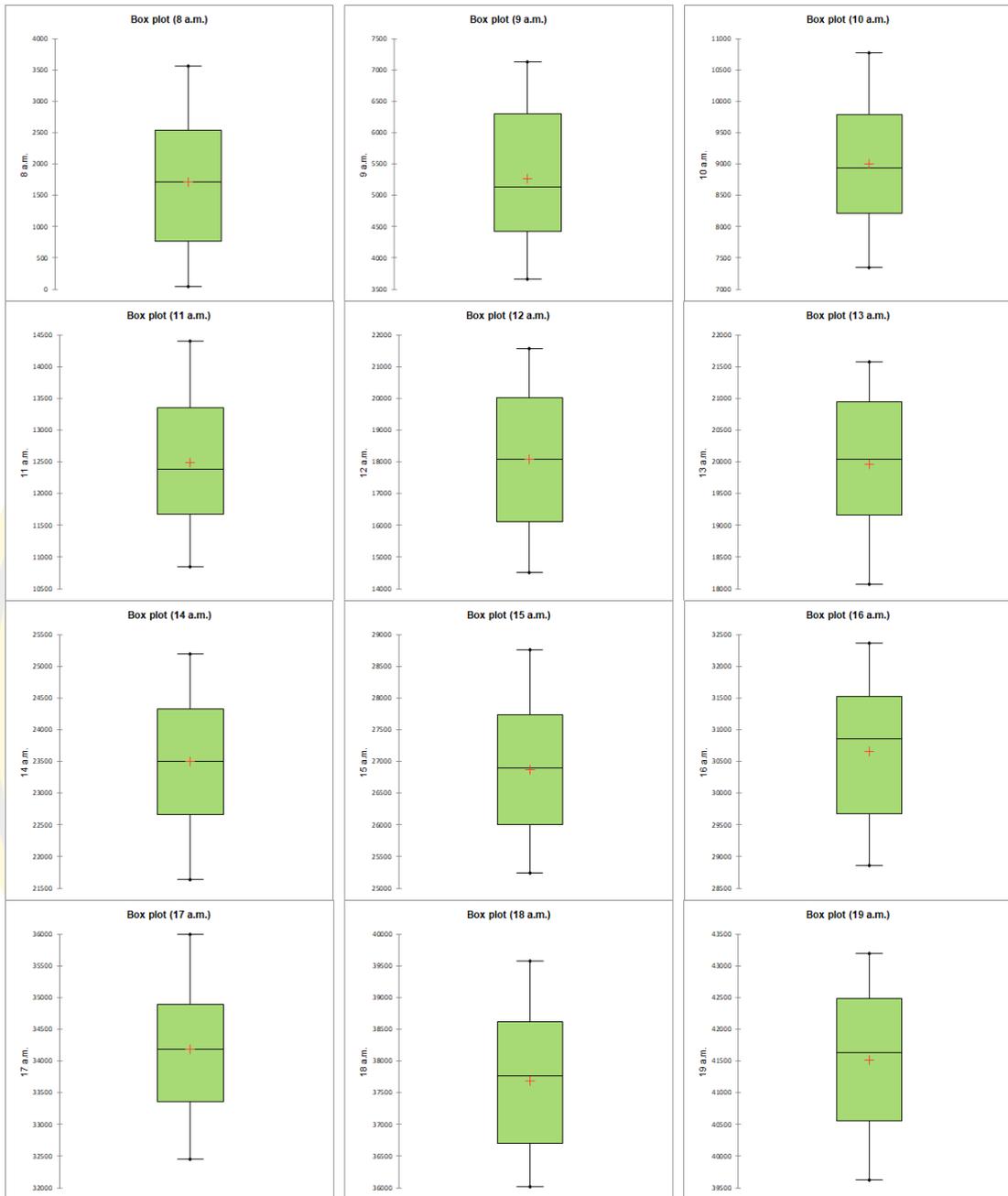
จากนั้นทำการพิจารณาแผนภูมิแท่ง (Histogram) ของชุดข้อมูลทุกช่วงเวลาพบว่าภูมิแสดงการแจกแจงรูปแบบปกติ (Normality) เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่ในพื้นที่ตรงกลางของแผนภูมิ พิจารณาการกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง (BOX plot) ของชุดข้อมูลทุกช่วงเวลาพบว่าการกระจายตัวของข้อมูลช่วงเวลามาของยานพาหนะที่สมมาตรกัน ข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่บริเวณตรงกลางของแผนภูมิ ช่วงแขนของข้อมูลทั้ง 2 ข้าง (Upper and lower quantities) มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน แสดงว่าข้อมูลที่น่ามาทดสอบมีการกระจายตัวที่สมมาตร สามารถกล่าวได้ว่าชุดข้อมูลทั้งหมดอยู่ในช่วยการแจกแจงปกติ ดังนั้นจึงสามารถนำการกระจายตัวของข้อมูลทั้ง 12 ช่วงเวลามาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองสภาพการจราจรที่พัฒนาขึ้น



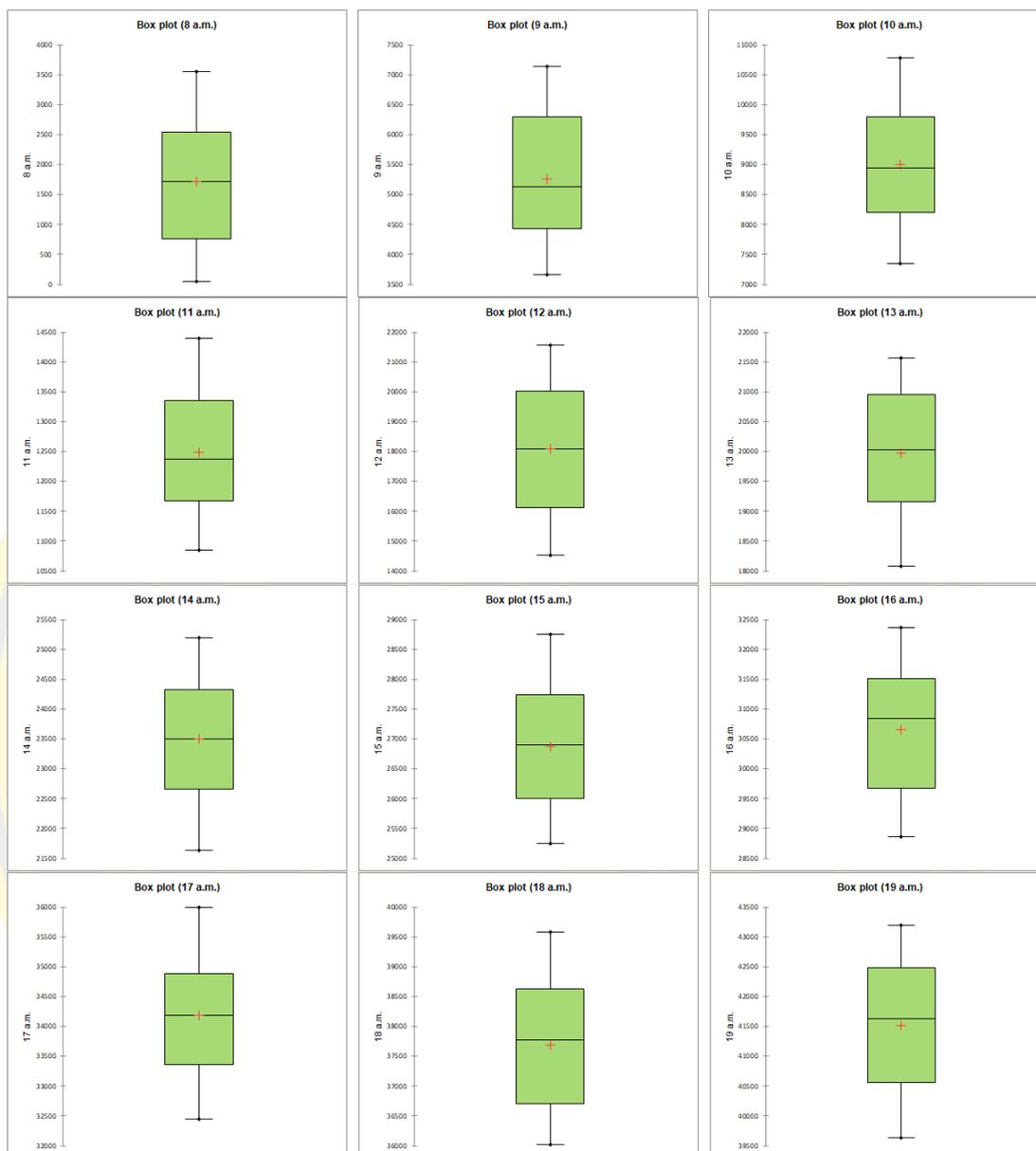
ภาพที่ 25 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง ณ ประตูดตรวจสอบหมายเลข 1



ภาพที่ 26 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง ณ ประตูดตรวจสอบหมายเลข 3



ภาพที่ 27 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่อง ณ ประตูดตรวจสอบหมายเลข 4



ภาพที่ 28 การกระจายตัวของแผนภาพรูปกล่องของยานพาหนะร่วมในเส้นทาง

สมมติฐานของการสร้างแบบจำลอง

การกำหนดสมมติฐานจะมุ่งเน้นไปที่ข้อมูลการดำเนินงานจริงในปัจจุบัน สำหรับนำมาใช้ในการสร้างชุดประเภทของประตูให้บริการและระดับการจองล่วงหน้า ผู้วิจัยได้กำหนดสมมติฐานและข้อจำกัดต่าง ๆ ของงานวิจัยได้ ดังนี้

1. โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลทางด้านวิศวกรรมจราจรผู้วิจัยกำหนดระบบหน่วยของมาตรวัดต่าง ๆ จะใช้ระบบเมตริกซ์ (Metric) คือระยะทางมีหน่วยเป็นเมตร ความเร็วมีหน่วยเป็น

กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร่งมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที² ความหนาแน่นจราจรมีหน่วยเป็นคันต่อกิโลเมตร

2. กำหนดให้ถนนสายหลักและถนนสายรองผู้ขับขี่ส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยกับเส้นทางในโครงข่ายถนนเป็นอย่างดี สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการไหลแบบอิสระ

3. การจำลองทางเลี้ยวบริเวณทางแยกของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 อนุญาตให้ยานพาหนะเลี้ยวได้ทุกทิศทาง อ้างอิงจากรูปแบบของทางแยกจริงในพื้นที่การศึกษา

4. ข้อมูลจำนวนการจราจรที่นำเข้าสู่แบบจำลองเป็นรูปแบบตารางต้นทาง-ปลายทาง (OD Matrix) และการกำหนดสัดส่วนการไหลของยานพาหนะแต่ละประเภทในแบบจำลองให้เป็นการจราจรเชิงพลวัต (Dynamic traffic flow)

5. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการจัดการจราจรเฉพาะถนนเส้นหลักเท่านั้น ไม่ได้พิจารณาทางแยกย่อย หรือ ซอยขนาดเล็กที่รถบรรทุกไม่สามารถสัญจรผ่านไป โดยมีสมมติฐานว่าทางแยกย่อยต่าง ๆ หรือ ซอยขนาดเล็กที่รถบรรทุกไม่สามารถสัญจรผ่านไปไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพการจราจรบนเส้นทางหลัก

6. งานวิจัยนี้เลือกใช้การสร้างเส้นทางโดยไม่พิจารณาปัญหาที่เกิดจากสภาพถนนที่ชำรุด ผิวถนนขรุขระ เป็นหลุม ตลอดเส้นทางจราจรจำลอง แต่สามารถกำหนดความเร็วของยานพาหนะที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการสัญจรผ่านช่วงถนนที่เกิดปัญหาได้

7. ประตู่ให้บริการทั้งหมดมีความสามารถในการให้บริการรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ทุกประเภท

8. ช่องจราจรจะถือว่าว่างเสมอเมื่อเริ่มต้นการจำลองสถานการณ์และมีความจุเท่ากับระยะทางของถนนทางเข้าท่าเรือ

9. สัดส่วนประเภทรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้ามา คือ 48.16%, 8.71% และ 43.13% ตามลำดับ สำหรับตู้คอนเทนเนอร์ทั่วไป ตู้คอนเทนเนอร์ควบคุมอุณหภูมิและรถบรรทุกเปล่า

การปรับเทียบแบบจำลองและการทวนสอบแบบจำลอง

การปรับเทียบและการทวนสอบแบบจำลองเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นภายใต้ข้อมูลและเงื่อนไขต่าง ๆ ทางด้านกายภาพและหลักวิศวกรรมจราจรให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ได้จริง โดยขั้นตอนที่ 1 คือ การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในเบื้องต้นจากการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลนำเข้าของข้อมูลด้านลักษณะทางกายภาพเส้นทาง ข้อมูลปริมาณการจราจร ข้อมูลประเภทของยานพาหนะในเส้นทาง ข้อมูลการเลี้ยวในแต่ละทางแยกของยานพาหนะ ข้อมูลด้านพฤติกรรมรถบรรทุกและความเร็ว และการตรวจสอบการแสดงผลลัพธ์จากภาพเคลื่อนไหวจากแบบจำลองเพื่อตรวจสอบ

พฤติกรรมของการขับขี่ของยานพาหนะที่ไม่เป็นธรรมชาติหรือไม่สอดคล้องกับข้อมูลนำเข้าที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลของแบบจำลอง การสังเกตเปรียบเทียบแบบจำลองกับภาพจากการวิดีโอ (VDO) เป็นตัวชี้วัดการเปรียบเทียบและทวนสอบแบบจำลอง เพื่อดำเนินการแก้ไขเบื้องต้นให้มีความพร้อมที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการเปรียบเทียบแบบจำลองอย่างละเอียดต่อไป

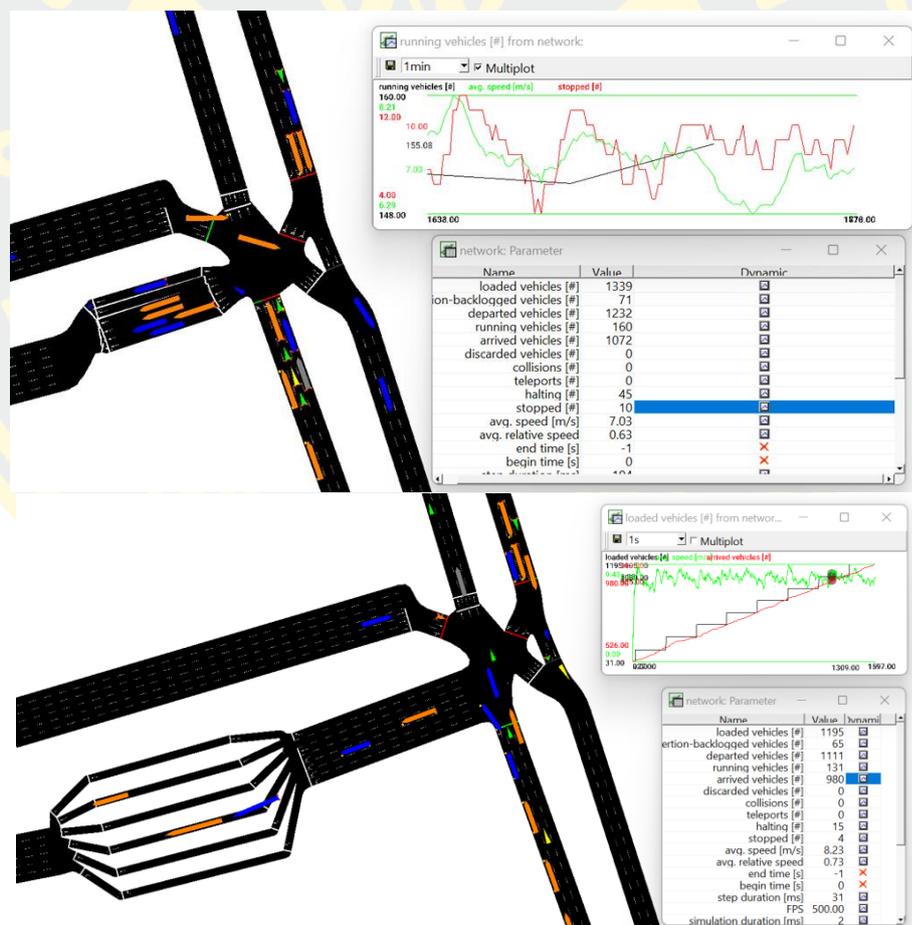
การเปรียบเทียบแบบจำลองเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเนื่องจากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคอาจไม่สามารถนำเสนอข้อมูลได้ครอบคลุมครบทุกปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการจราจรในพื้นที่ได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะปัจจัยเฉพาะในแต่ละพื้นที่ที่ผู้สร้างแบบจำลองต้องมีการเปรียบเทียบแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการขับขี่ของยานพาหนะในแบบจำลอง เช่น พฤติกรรมการเร่งความเร็ว พฤติกรรมการลดความเร็ว พฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจร พฤติกรรมการเคลื่อนที่ตามกันของยานพาหนะ พฤติกรรมการเลี้ยวที่ทางแยกจราจร ให้มีความสอดคล้องกับพื้นที่ที่ทำการศึกษาและข้อมูลที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลมากที่สุด การเปรียบเทียบแบบจำลองเป็นการปรับแก้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองเพื่อให้แบบจำลองสามารถแสดงผลลัพธ์และพฤติกรรมในการเคลื่อนที่ภายในเส้นทางออกมาตรงกับสภาพจริงมากที่สุด โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองต้องมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

การทวนสอบแบบจำลองเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนที่จะมีการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กำหนดมาตรการและนโยบายทางด้านจราจร โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นจำเป็นต้องมีผลลัพธ์ที่มีค่าความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งถ้าหากผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างและพัฒนาแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้จะต้องมีการปรับแก้แบบจำลองใหม่เพื่อให้แบบจำลองสามารถแสดงผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องและมีความเสมือนจริงมากที่สุด ซึ่งหากว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าความถูกต้องมากกว่าเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้แสดงว่าแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือสามารถนำแบบจำลองนั้นไปใช้ในการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ในขั้นตอนต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่นำเข้าทั้งในรูปแบบของข้อมูลที่มีอยู่ในส่วนของตารางและความผิดปกติผ่านจากการแสดงผลของหน้าจอผู้ใช้งาน การแสดงผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนมีความสมเหตุสมผลและพร้อมที่จะนำเข้าสู่ขั้นตอนการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบข้อมูลนำ ดังนี้ 1) ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลตัวแปรสำหรับการประมวลผลแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบช่วงระยะและระยะเวลาในการประมวลผลแบบจำลอง ครอบคลุมช่วงเวลาในการประมวลผลเมื่อแบบจำลองมีข้อมูลไม่เสถียร 2) ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลโครงข่ายการจราจร เป็นการ ตรวจสอบ

เส้นทางและจุดเชื่อมโยงของโครงข่าย การทิศทางของสัญญาณไฟจราจร เส้นทางห้ามรถบางประเภทผ่านและการควบคุมการใช้ช่องจราจรเป็นต้น 3) ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลความต้องการในการเดินทาง ได้แก่การตรวจสอบปริมาณจราจรของยานพาหนะแต่ละประเภทในเส้นทางที่เกี่ยวข้อง ตรวจสอบความถูกต้องและปริมาณการเดินทางของยานพาหนะแต่ละประเภท

การประมวลผลแบบจำลองด้วยโปรแกรม Simulation of Urban Mobility จะดำเนินการผ่านโปรแกรมย่อย sumo-gui โดยการนำข้อมูลโครงสร้างของโครงข่าย (.net) ข้อมูลปริมาณการจราจร (.rou) ข้อมูลเส้นทางเชื่อมต่อ (.con) และข้อมูลสัญญาณไฟจราจร (.tll) ที่ได้จัดเตรียมไว้ไปประมวลผลในรูปแบบของภาพเคลื่อนไหว โดยการตรวจสอบปริมาณจราจรที่ผ่านทางแยกในแต่ละทิศทางจากการสำรวจภาคสนามเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองต้องผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 29 การประมวลผลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายถนนโดยอ้างอิงจากเส้นทางโดยรอบที่มุ่งหน้าสู่ทางแยก ประตุตรวจสอบหมายเลข 1 และประตุตรวจสอบหมายเลข 3กับ4 ในรูปแบบทางแยกแบบประสานสัมพันธ์ โดยการสร้างแนวถนนเชื่อมโยง (Links) กับจุดเชื่อมต่อ (Node) เพื่อทำให้เกิดโครงข่ายถนนผ่านโปรแกรมภูมิศาสตร์สารสนเทศ QGIS รุ่น 3.16.2 และเชื่อมต่อฐานข้อมูลมาตราวัดระยะทางจาก Google Map โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นภาษา HTML เพื่อนำไปประมวลผลในโปรแกรม SUMO ต่อไป งานวิจัยนี้อ้างอิงวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้เกณฑ์การเปรียบเทียบแบบ Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) เพื่อคำนวณค่า Geoffrey E. Havers หรือ GEH โดยพิจารณาความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างปริมาณผลการจราจรของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการสำรวจภาคสนาม โดยวิธีการ GEH เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากงานวิจัยต่าง ๆ และมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการเปรียบเทียบแบบจำลองระดับจุลภาค โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณการจราจรที่ได้จากแบบจำลองและจากการสำรวจในเส้นทางสำคัญได้แก่ จุดสำรวจที่ 1 เส้นทางทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 มุ่งหน้าสู่ประตุตรวจสอบที่ 1 จุดสำรวจที่ 2 เส้นทางซอยแหลมฉบังมุ่งหน้าสู่ประตุตรวจสอบที่ 2 จุดสำรวจที่ 3 เส้นทางถนนนิคมอุตสาหกรรมมุ่งหน้าสู่ประตุตรวจสอบที่ 3 จุดสำรวจที่ 4 เส้นทางถนนนิคมอุตสาหกรรมมุ่งหน้าสู่ประตุตรวจสอบที่ 4 และ จุดสำรวจที่ 5 เส้นทางจากประตุตรวจสอบที่ 1 มุ่งหน้าสู่ท่าเทียบเรือเอกชนภายในท่าเรือแหลมฉบัง เก็บรวบรวมข้อมูลจุดสำรวจทั้ง 5 จุดในช่วงเวลา 15:00-18:00

โดยค่า GEH ที่ได้รับจะแสดงผลลัพธ์ของความสอดคล้องของข้อมูลแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณการจราจรที่ได้จากการสำรวจจริง เกณฑ์พิจารณายอมรับจำแนกเป็น 3 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 เมื่อค่า GEH น้อยกว่า 5 แสดงความสอดคล้องของข้อมูลแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจริง กรณีที่ 2 เมื่อค่า GEH มากกว่า 5 แต่ไม่เกิน 10 อาจมีข้อผิดพลาดหรือข้อมูลไม่ถูกต้อง และกรณีที่ 3 เมื่อค่า GEH มากกว่า 10 แสดงว่าไม่มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากการสำรวจและเก็บข้อมูลจริง

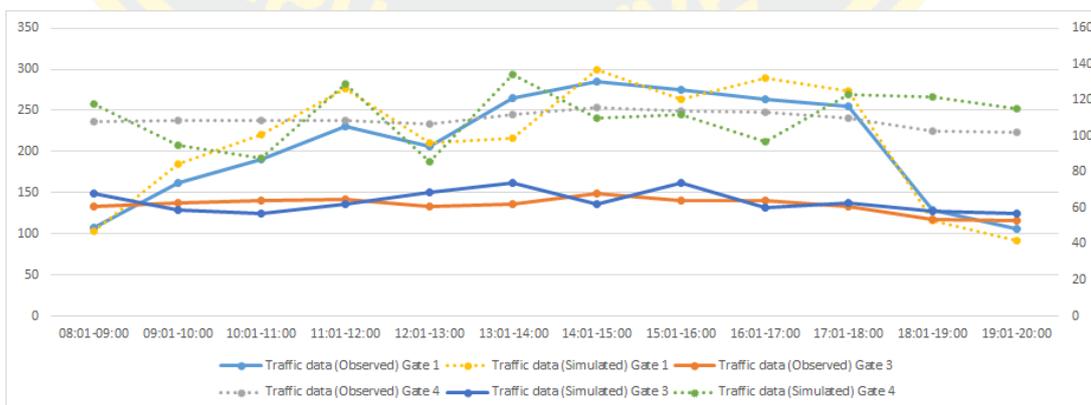
ตารางที่ 26 การเปรียบเทียบระหว่างการสังเกตและการจำลอง

Time Period	Traffic data (Observed)			Traffic data (Observed)			GEH			Calibration results
	Gate 1	Gate 3	Gate 4	Gate 1	Gate 3	Gate 4	Gate 1	Gate 3	Gate 4	
08:01-09:00	108	61	108	103	68	118	0.4868	0.8716	0.9407	Pass
09:01-10:00	162	63	109	185	59	95	1.7461	0.5121	1.3862	Pass
10:01-11:00	190	64	109	220	57	88	2.0953	0.9000	2.1159	Pass
11:01-12:00	231	65	109	277	62	129	2.8863	0.3765	1.8334	Pass

ตารางที่ 26 (ต่อ)

Time Period	Traffic data (Observed)			Traffic data (Observed)			GEH			Calibration results
	Gate 1	Gate 3	Gate 4	Gate 1	Gate 3	Gate 4	Gate 1	Gate 3	Gate 4	
12:01-13:00	206	61	107	210	69	86	0.2774	0.9923	2.1377	Pass
13:01-14:00	265	62	112	217	74	134	3.0920	1.4552	1.9837	Pass
14:01-15:00	285	68	116	299	62	110	0.8193	0.7442	0.5644	Pass
15:01-16:00	275	64	114	264	74	112	0.6701	1.2039	0.1881	Pass
16:01-17:00	264	64	113	290	60	97	1.5622	0.5080	1.5614	Pass
17:01-18:00	255	61	110	273	63	123	1.1078	0.2540	1.2044	Pass
18:01-19:00	129	54	103	116	58	122	1.1746	0.5345	1.7913	Pass
19:01-20:00	106	53	102	92	57	115	1.4071	0.5394	1.2480	Pass

ตารางที่ 26 แสดงผลลัพธ์การเกณฑ์การปรับเทียบแบบ DMRB พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้กล่าวคือมีค่า GEH น้อยกว่า 5 สอดคล้องกับ Chanchaichujit (2016) ที่ได้ทำการปรับเทียบแบบจำลองสภาพการจราจรที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับการสำรวจปริมาณการจราจร โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่า GEH น้อยกว่า 5 ดังนั้นแบบจำลองที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นจึงจึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สภาพการจราจรได้ต่อไป (Islam, 2017) ดังนั้นการทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ GEH น้อยกว่า 5 สำหรับฐานแบบจำลองฐานจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การวางแผนการจราจรและการกำหนดสัญญาณไฟจราจรต่อไป



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบจำนวนยานพาหนะระหว่างการสำรวจและแบบจำลองสถานการณ์

การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองพื้นฐานที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ดำเนินการเพื่อทดสอบกระบวนการทำงานของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน โดยการกำหนดช่องทางขาเข้าสู่ประตูตรวจสอบทั้ง 8 ประตู รถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ขาเข้าทุกประเภทจะได้รับอนุญาตให้สามารถเลือกเข้ารับบริการที่ช่องบริการใดก็ได้โดยไม่มีการกำหนดประตูบริการเฉพาะสำหรับรถแต่ละประเภทและไม่มีการกำหนดระดับการนัดหมายของยานพาหนะ โดยพบว่าแบบจำลองพื้นฐานสร้างรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ขาเข้าตามข้อมูลสถิติการเข้ามาของยานพาหนะตามตารางที่ 26 การศึกษาความไวได้ดำเนินการเพื่อสำรวจว่าโมเดลปัจจุบันทำงานอย่างไรใน 3 สถานการณ์ที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราการมาถึงของรถบรรทุกจะถูกเพิ่มขึ้น 10%-50% ภายใต้สถานการณ์เดียวกันเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแบบจำลอง

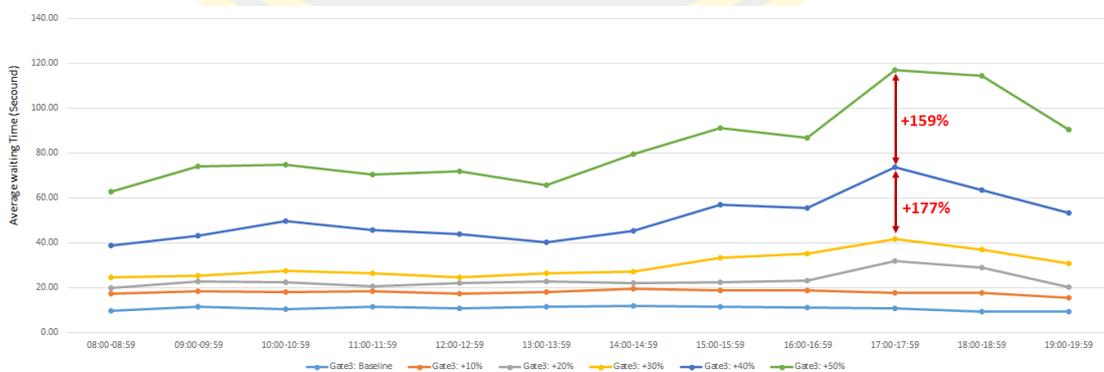
ภายใต้อัตราการมาถึงปัจจุบันเวลารอคอยเฉลี่ยของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์โดยระยะเวลาการรอแถวคอยเฉลี่ยในขาเข้าสู่ประตูเท่ากับ 13.73-49.56 วินาทีต่อคัน ตั้งแต่ 8:00-13:00 น. จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่เวลา 13:00-18:00 น. ระยะเวลารอเฉลี่ย 54.17-71.01 วินาทีต่อคัน จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงเป็น 16.04-28.44 วินาที/คัน ระหว่างเวลา 18:00-20:00 น. โดยมีระยะเวลารอสูงสุดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 71.01 วินาที/คัน ในช่วงเวลา 14:00-15:00 น.

เมื่ออัตราการมาถึงของรถบรรทุกในแบบจำลองเพิ่มขึ้น 10%-30% ในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 25.17-78.71 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. ระยะเวลารอเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 85.59-114.83 วินาที/คัน เวลารอเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 114.83 วินาที/คัน อย่างไรก็ตามแบบจำลองพื้นฐานสำหรับสถานการณ์นี้เริ่มประสบปัญหาด้วยอัตราการมาถึงที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 40%-50% เวลารอเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 42.53-209.19 วินาที/คัน โดยมีเวลารอสูงสุดโดยเฉลี่ยมากกว่า 329.44 วินาที/คัน ส่งผลให้กระแสการจราจรในแบบจำลองเกิดปัญหาความติดขัดอย่างรุนแรงในเส้นทาง จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อว่าเมื่ออัตราการมาถึงเพิ่มขึ้นมากกว่า 30% จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงในการดำเนินการประตูหรือมีการเพิ่มประตูให้บริการเพิ่ม



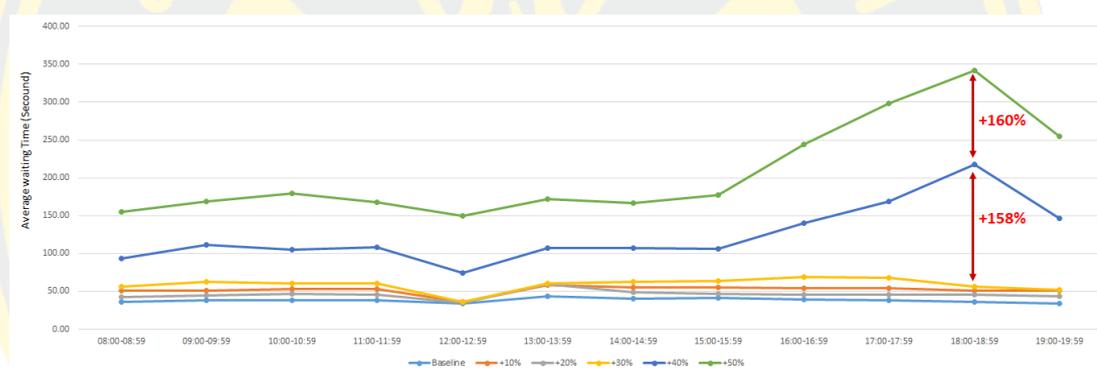
ภาพที่ 31 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองสถานการณ์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1

สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 3 จะถูกทดสอบความไวของแบบจำลองด้วยวิธีการเดียวกับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 โดยการเพิ่มอัตราการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ ตั้งแต่จะถูกเพิ่มขึ้น 10%-50% พบว่าในช่วงที่มีการเพิ่มระดับการจราจรตั้งแต่ 10%-30% ช่วงเวลา 08.00-13.00 น. ระยะเวลาการรอคอยที่ประตูตรวจสอบจะเท่ากับ 9.91-27.69 วินาที/คัน จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลา 13.00-18.00 น. โดยมีระยะเวลาการรอคอยอยู่ในช่วง 11.41-41.56 วินาที/คัน และค่อย ๆ ลดลงในช่วงเวลา 17.00-20.00 น. ในช่วงเวลาดังกล่าว มีระยะเวลาการรอคอยอยู่ในช่วง 9.26-29.23 วินาที/คัน อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบเพิ่มปริมาณการจราจรตั้งแต่ 40%-50% พบว่า ช่วงเวลา 08.00-13.00 น. ระยะเวลาการรอคอยที่ประตูตรวจสอบจะเท่ากับ 38.67-74.78 วินาที/คัน จากนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 13.00-18.00 น. โดยมีระยะเวลาการรอคอยอยู่ในช่วง 40.26-116.97 วินาที/คัน และค่อย ๆ ลดลงในช่วงเวลา 18.00-20.00 น. ระยะเวลาการรอคอย 53.50-114.27 วินาที/คัน แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองสถานการณ์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3

สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 4 จะถูกทดสอบความไวของแบบจำลองด้วยวิธีเดียวกับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 และ 3 โดยเพิ่มอัตราการมาถึงของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ตั้งแต่จะถูกเพิ่มขึ้น 10%-50% พบว่าในช่วงที่มีการเพิ่มระดับการจราจรตั้งแต่ 10%-30% ช่วงเวลา 08.00-13.00 น. ระยะเวลาการรอคอย 34.27-62.18 วินาที/คัน จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลา 13.00-18.00 น. โดยมีระยะเวลาการรอคอยอยู่ในช่วง 38.14-68.96 วินาที/คัน และค่อย ๆ ลดลงในช่วงเวลา 17.00-20.00 น. ในช่วงเวลาดังกล่าว มีระยะเวลาการรอคอยอยู่ในช่วง 34.39-55.94 วินาที/คัน อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบเพิ่มปริมาณการจราจรตั้งแต่ 40%-50% พบว่า ช่วงเวลา 08.00-13.00 น. ระยะเวลาการรอคอยที่ประตูตรวจสอบจะเท่ากับ 74.12-179.95 วินาที/คัน จากนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลา 13.00-20.00 น. โดยมีระยะเวลาการรอคอยอยู่ในช่วง 106.12- 242.31 วินาที/คัน ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองสถานการณ์ที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 4

จากการทดสอบความไวของแบบจำลองสภาพการจราจรด้วยวิธีการเพิ่มปริมาณการจราจรตั้งแต่ 10%-50% ของประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อแบบจำลองสภาพการจราจรมีความสามารถในการรองรับปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10%-30% โดยยังสามารถทำงานได้ตามปกติ โดยหากปริมาณการจราจรเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 30% จะส่งผลเกิดปัญหาการจราจรแออัดในแบบจำลองและส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือ

งานวิจัยในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการกล่าวถึงสาเหตุและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความแออัดที่เกิดขึ้นภายในท่าเรือจำนวนมาก อย่างไรก็ตามแต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่อาจมีสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดที่ตรงและแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้สามารถศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ

ความแออัดของท่าเรือแหลมฉบังได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้สรุปและคัดเลือก ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือจากการทบทวนวรรณกรรม โดยพบว่าปัจจัยที่มีความ เกี่ยวข้องและสามารถส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือแหลมฉบังมีจำนวน 8 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A)

จำนวนช่องจราจรเป็นปัจจัยที่มีงานวิจัยในอดีตได้กล่าวถึงและเป็นข้อเสนอแนะปัจจัยกลุ่ม แรกที่มีการแนะนำให้ทำการปรับปรุง ปัจจุบันการทำเรือแหลมฉบังตั้งอยู่บนพื้นราบประตูตรวจสอบ หมายเลข 1 มีจำนวนช่องจราจรฝั่งขาเข้าท่าเรือจำนวน 8 ช่องจราจรและฝั่งขาออกจำนวน 3 ช่อง จราจร สำหรับฝั่งขาเข้าจะมีการแบ่งประตูตรวจสอบเป็น 2 ชั้น (2 Stagger) แต่ละชั้นมี 4 ประตู (Booth) โดยด้านด้านนอกประกอบด้วยประตูตรวจสอบ E-H และด้านด้านในประกอบด้วยประตู ตรวจสอบ A-D สำหรับปัจจัยประตูตรวจสอบหมายเลข 3 มีจำนวนช่องจราจรฝั่งขาเข้าท่าเรือ จำนวน 5 ช่องจราจรและฝั่งขาออกจำนวน 4 ช่องจราจร สำหรับฝั่งขาเข้าจะมีการแบ่งประตู ตรวจสอบเป็น 1 ชั้น (1 Stagger) และ ปัจจัยประตูตรวจสอบหมายเลข 4 มีจำนวนช่องจราจรฝั่ง ขาเข้าท่าเรือจำนวน 3 ช่องจราจรและฝั่งขาออกจำนวน 3 ช่องจราจร สำหรับฝั่งขาเข้าจะมีการแบ่ง ประตูตรวจสอบเป็น 1 ชั้น (1 Stagger) ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของ จำนวนช่องจราจรในฝั่งขาเข้า 10%-30% ตามผลลัพธ์การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองเพื่อ การทดสอบการโต้ตอบของปัจจัย (Chamchang & Niyomdech, 2022) โดยในกรณีของประตู ตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 จะเป็นการนำเสนอสถานการณ์ในรูปแบบที่มี การขยายช่องทาง เพิ่มเติมบริเวณไหล่ทางเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจและกำหนดนโยบายในอนาคต

ปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า (ปัจจัย B)

การนัดหมายเวลาการเข้ามาของยานพาหนะล่วงหน้าเป็นหนึ่งในวิธีการที่ทำเรือใน ประเทศต่าง ๆ นำมาใช้โดยมีเป้าหมายเพื่อลดปริมาณยานพาหนะที่เข้ามาในช่วงเวลาเดียวกันจน เกิดปัญหาการจราจรที่ติดขัดปัจจุบันท่าเรือแหลมฉบังมีการนำระบบการนัดหมายช่วงเวลาล่วงหน้า มาใช้เพื่อจำกัดจำนวนของยานพาหนะที่จะเข้าสู่ท่าเรือดังนั้นการเพิ่มระดับการจองจะเป็นการเพิ่ม สัดส่วนของรถบรรทุก 2 ประเภท ได้แก่ รถพ่วงบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และรถกึ่งพ่วงบรรทุก ตู้คอนเทนเนอร์ให้แตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์ กล่าวคือรถบรรทุกที่มีการนัดหมายเวลาจะมี สัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นและสามารถเลือกใช้บริการที่ประตูตรวจสอบได้ทุกเส้นทาง สำหรับรถบรรทุกที่ ไม่ได้มีการนัดหมายจะมีสัดส่วนลดลง (Lu et al., 2018)

รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C)

ปัจจุบันรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าสู่ประตูตรวจสอบทุกเส้นทางของท่าเรือแหลม ฉบังของประเทศไทยจำเป็นต้องผ่าน 4 แยกที่มีการควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบคงที่ โดยเฉพาะประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ที่มีทางแยกที่ควบคุมการจราจรด้วยสัญญาณไฟ

จราจรอยู่ติดบริเวณหน้าทางเข้า สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 จะไม่มีทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรแต่จะมีสัญญาณไฟจราจรในเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือ โดยจากการเก็บข้อมูลภาคสนามพบว่าโดยส่วนใหญ่ปริมาณการจราจรบริเวณ 4 แยกในเส้นทางฝั่งขาเข้าและเส้นทางฝั่งขาออกจากท่าเรือจะมีปริมาณไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มรอบสัญญาณไฟจราจรของทางแยกที่อยู่โดยรอบท่าเรือแหลมฉบังขึ้นตั้งแต่ 10%-30% เพื่อทดสอบการโต้ตอบของปัจจัย (Zhao, 2015)

ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D)

เป็นปัจจัยที่กล่าวถึงระยะเวลาการทำงานของประตูตรวจสอบ เนื่องจากในหนึ่งช่วงจราจรจะมีประตูตรวจสอบให้บริการในอัตราส่วน 1ต่อ1 ดังนั้นสำหรับประตูตรวจสอบแต่ละบริเวณจะมีจำนวนของประตูตรวจสอบที่แตกต่างกัน ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 มีประตูตรวจสอบจำนวน 8 ประตู, ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 มีประตูตรวจสอบจำนวน 4 และประตูตรวจสอบหมายเลข 4 มีประตูตรวจสอบจำนวน 3 โดยที่ประตูตรวจสอบทั้งหมดจะมีความสามารถในการดำเนินงานของประตูมีความสามารถในการให้บริการรถบรรทุกแต่ละประเภทด้วยระยะเวลาไม่เท่ากัน โดยรถบรรทุกที่มีการนัดหมายเวลาจะใช้ระยะเวลา 55-65 วินาทีต่อคัน แต่หากเป็นรถบรรทุกที่ไม่มีการนัดหมายเวลา 90-150 วินาทีต่อคัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มความสามารถในการดำเนินงานของประตูขึ้นตั้งแต่ 10%-30% เพื่อทดสอบการโต้ตอบของปัจจัย (Chamchang & Niyomdecha, 2022)

ขนาดพื้นที่จอดรถ (ปัจจัย E)

ปัจจุบันยานพาหนะที่เข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังจะมีพฤติกรรมที่เข้ามาก่อนช่วงเวลาเพื่อจอดรถภายในท่าเรือ โดยปริมาณการเข้ามาของยานพาหนะก่อนเวลาจะมีปริมาณสอดคล้องกับระดับการนัดหมาย ปัจจุบันท่าเรือแหลมฉบังมีการใช้ที่จอดรถภายในท่าเรือ 71.04%, จอดริมถนนในท่าเรือ 22.34% และจอดภายนอกก่อนเข้าสู่ท่าเรือ 6.62% สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ยานพาหนะที่จะมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1, 3 และ 4 เลือกวิธีการจอดภายนอกก่อนเข้าสู่ท่าเรือเป็นหลักเนื่องจากสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงในปัจจุบันและการจอดยานพาหนะบริเวณไหล่ทางจะส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงด้านความแออัด ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จอดรถภายนอกท่าเรือขึ้นตั้งแต่ 10%-30% เพื่อทดสอบการโต้ตอบของปัจจัย (Xu et al., 2021)

การกำหนดประเภทช่องจราจร (ปัจจัย F)

ปัจจุบันการทำเรือแหลมฉบังไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์การเลือกใช้ประตูเพื่อให้บริการสำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 รถบรรทุกที่มีการนัดหมายเวลาและไม่ได้นัดหมายเวลาสามารถเลือกใช้บริการที่ประตูตรวจสอบได้ทุกเส้นทาง สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ระ

บรรทุกที่ที่มีการนัดหมายเวลาจะสามารถเลือกใช้บริการที่ประตูตรวจสอบได้ทุกเส้นทางแต่สำหรับรถบรรทุกที่ไม่ได้มีการนัดหมายจะนิยมเลือกถูกบังคับให้เลือกใช้ประตูตรวจสอบ E-H เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถศึกษาผลกระทบจากปัจจัยได้ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มสัดส่วนของช่องจราจรสำหรับรถบรรทุกที่ไม่ได้มีการนัดหมายขึ้น 10%-30% (Gracia, 2017)

ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G)

สำหรับเส้นทางมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1,3 และ 4 จะมีเส้นทางที่รถพ่วงบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และรถกึ่งพ่วงบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ต้องใช้เส้นทางร่วมกับยานพาหนะส่วนบุคคลประเภทอื่นรวมถึงยานพาหนะทั่วไปของประชาชนในพื้นที่ ดังนั้นเพื่อพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มสัดส่วนของยานพาหนะทั่วไปที่วิ่งร่วมในเส้นทางขึ้น 10%-30% (Habib, 2013)

ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H)

ทิศทางของช่องจราจรโดยเฉพาะในเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 มีทิศทางร่วมกันระหว่างเส้นทางตรงและเส้นทางเลี้ยวเข้าสู่ประตูตรวจสอบ สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ทิศทางของช่องจราจรจะเป็นเส้นทางตรงมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบในทิศทางเดียว ดังนั้นเพื่อพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มสัดส่วนของทิศทางที่สามารถเลี้ยวเข้าสู่ประตูตรวจสอบขึ้น 10%-30% (Gracia et al., 2017)

เพื่อทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับความแออัดของท่าเรือแหลมฉบัง ผู้วิจัยได้ทำการจำแนกกลุ่มของข้อมูลออกเพื่อทำการทดสอบผลลัพธ์ โดยการแยกการตรวจสอบจำแนกตามตำแหน่งของประตูตรวจสอบก่อนจะนำแบบจำลองมารวมกันอีกครั้งในภายหลัง สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ทำการแบ่งกลุ่มทดสอบเป็น 7 กลุ่มตามปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อความแออัด ได้แก่ 1) จำนวนช่องจราจร (Factor A) 2) ระดับการนัดหมายล่วงหน้า (Factor B) 3) รอบสัญญาณไฟจราจร (Factor C) 4) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (Factor D) 5) ขนาดพื้นที่จอดรถ (Factor E) 6) การกำหนดประเภทช่องจราจร (Factor F) และ 7) ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (Factor G) โดยไม่มีการเลือกใช้ปัจจัยทิศทางของช่องจราจร เนื่องจากทิศทางทั้งหมดของช่องจราจรเป็นทิศทางตรงมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบ สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ทำการแบ่งกลุ่มทดสอบเป็น 5 กลุ่มตามปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อความแออัด แต่ละกลุ่มจะถูกกำหนดเกณฑ์การทดสอบ ได้แก่ 1) ประเภทของยานพาหนะในช่องจราจร (ปัจจัย A) 2) ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย B) 3) รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C) 4) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) และ 5) จำนวนช่องจราจร (ปัจจัย E) โดยไม่มีการเลือกใช้ปัจจัยระดับการจอดรถเนื่องจากยานพาหนะส่วนใหญ่ที่เลือกเข้าสู่ท่าเรือผ่านประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 เป็นยานพาหนะที่ไม่มีการจองช่วงเวลา, ปัจจัยขนาดช่องจอดรถ

เนื่องจากยานพาหนะทั้งหมดไม่มีพฤติกรรมการจอดรอภายในท่าเรือและปัจจัยประเภทของรถที่ใช้เส้นทางร่วมกันเนื่องจากยานพาหนะที่เข้าสู่ท่าเรือผ่านเป็นรถฟ่วงบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์และรถกึ่งฟ่วงบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่ถือเป็นสัดส่วนน้อยในเส้นทาง จำลองผลลัพธ์ผ่านแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Gracia et al., 2017) กำหนดสมมติฐานการศึกษาว่าระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ นำผลลัพธ์ค่าความแปรปรวนจากการจำลองสถานการณ์ของแต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มด้วยเทคนิค ANOVA ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเป็นกลุ่ม กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานที่นิยมนำมาใช้สำหรับการดำเนินงานวิจัย (วินัย พุทธิกุล, 2551)



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการศึกษาเรื่องการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคทั้ง 3 ประเด็น คือ การพัฒนาแบบสภาพการจราจรระดับจุลภาคภายในพื้นที่และเส้นทางบริเวณโดยรอบของท่าเรือแหลมฉบัง วิเคราะห์และประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดด้วยการทดสอบทางสถิติและการนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาความแออัดของท่าเรือที่เหมาะสม โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. การออกแบบการทดลอง
2. กำหนดพื้นที่ศึกษาวิจัย
3. การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การพัฒนาแบบจำลองฐาน

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยด้วยเทคนิค ANOVA

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์ปัจจัยความแออัดเพื่อจัดสรรประตูทางเข้าท่าเรือด้วยแบบจำลองสถานการณ์ระดับจุลภาคเพื่อทดสอบความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเมื่อปัจจัยที่กำหนดเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยแบ่งกลุ่มทดสอบออกเป็น 7 กลุ่ม ตามจำนวนปัจจัยและกำหนดสมมุติฐานดังนี้

H_0 : ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ

H_a : ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยแตกต่างกันของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ

หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน หลักเกณฑ์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือแบ่งความแปรปรวนของข้อมูล ทั้งหมดออกตามสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกัน คือความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within group) และความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between group) โดยที่ ความแปรปรวนทั้งหมด เท่ากับ ความแปรปรวนภายในกลุ่มรวมกับความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม สำหรับการทดสอบสมมุติฐานจะใช้ตัวสถิติ F ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามวิธีการของ Fisher โดยวิเคราะห์ค่าผลรวมกำลัง 2 (Sum of Square: SS) ของแหล่งความแปรปรวน (Source of Variation, SOV) ค่าองศาอิสระ (Df) คือจำนวนข้อมูลอิสระที่ใช้

ตารางที่ 28 ความยาวแถวคอยเฉลี่ยของประตูดตรวจสอบหมายเลข 3 (หลังตัดปัจจัย)

แหล่งความแปรปรวน	เวลารอคอยเฉลี่ย						ความยาวเฉลี่ยแถวคอย					
	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig
ภายในกลุ่ม	10434 52	5	20869 0.4	1.922 745	2.21 41	0.088 149	38946 290	5	7789 258	1.834 048	2.21 41	0.103 704
ระหว่างกลุ่ม	93125 349	85 8	10853 7.7				3.64E +09	85 8	4247 030			
รวม	94168 800	86 3					3.68E +09	86 3				

ตารางที่ 28 แสดงผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยแถวคอยเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนปัจจัยที่ทดสอบ 30% ของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งกระทบต่อความแออัดที่ประตูดตรวจสอบหมายเลข 3 ทั้ง 8 ปัจจัยด้วยการทดสอบทางสถิติ one-way ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของเวลารอคอยเฉลี่ย (1.922745, Sig 0.00000072) และ ความยาวเฉลี่ยแถวคอย (1.834048, Sig 0.103704) ตามลำดับ โดยหากพิจารณาค่า F คำนวณจากการทดสอบปัจจัยทั้ง 8 กลุ่มที่มีค่ามากกว่าค่า F วิกฤตและค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) ที่ 0.5 จึงปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 แสดงว่ามีข้อมูลอย่างน้อย 1 คู่ที่มีผลลัพธ์แตกต่างกัน กล่าวคือมีปัจจัยอย่างน้อยจำนวน 1 ปัจจัยที่มีผลลัพธ์ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยแตกต่างกันที่ทำการทดสอบอื่น ๆ โดยพบว่าเมื่อตัดชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 2 (ปัจจัย B), ชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 5 (ปัจจัย E) และชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 6 (ปัจจัย F) ออกและทำการทดสอบความแปรปรวนของปัจจัยด้วยเทคนิค ANOVA พบว่าผลลัพธ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของเวลารอคอยเฉลี่ยและทำให้ได้รับค่า F คำนวณเท่ากับ 1.922745 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.088149 สำหรับข้อมูลความยาวเฉลี่ยค่า F คำนวณเท่ากับ 1.834048 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.103704 ดังนั้นหากพิจารณาค่า F คำนวณจากการทดสอบปัจจัยทั้ง 5 กลุ่มที่มีค่าน้อยกว่าค่า F วิกฤตและค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) ที่ 0.5 จึงยอมรับ H_0 กล่าวคือ ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของกลุ่มที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 29 ปัจจัยระยะเวลารอคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3

ระยะเวลารอคอยเฉลี่ย					
Factor	SS	MS	p-value	%	Cum. (%)
Factor C	815213.171	407606.585	0.010	22.59%	22.59%
Factor A	654391.834	654391.834	0.019	36.27%	58.87%
Factor D	892828.122	297609.374	0.037	16.50%	75.37%
Factor G	942861.794	235715.448	0.066	13.07%	88.43%
Factor H	1043451.851	208690.370	0.088	11.57%	100.00%
Total	4348746.771	1804013.611	0.220	100%	

ตารางที่ 30 ปัจจัยความยาวแถวคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3

ความยาวแถวคอยเฉลี่ย					
Factor	SS	MS	p-value	%	Cum. (%)
Factor C	31495003.99	15747502.00	0.015	6.27%	6.27%
Factor A	21591638.74	21591638.74	0.020	8.36%	14.64%
Factor D	34775960.18	11591986.73	0.038	15.72%	30.35%
Factor G	37482672.32	9370668.08	0.063	26.28%	56.63%
Factor H	38946290.00	7789258.00	0.104	43.37%	100.00%
Total	164291565.24	66091053.54	0.239	100%	

ตารางที่ 29 และ 30 แสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนรายปัจจัยของเวลา
รอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยแบบรายปัจจัยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 พบว่าผลลัพธ์
ของทั้ง 2 ตารางเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือปัจจัยที่นำมาทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าระดับ
นัยสำคัญทางสถิติ (P-Value) ที่ 0.5 จะส่งผลให้มีความแตกต่างจากแบบจำลองฐานสูงขึ้นไป
ด้วย โดยสามารถเรียงลำดับจากความแตกต่างของค่า P ได้ 1) รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C),
2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A), 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D), 4)
ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 5) ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H)

สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อความยาวแถวคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 เรียงตามลำดับนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value) ที่มีความแตกต่างสูงที่สุดไปต่ำสุดได้แก่ 1) รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C), 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A), 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D), 4) ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 5) ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H) ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการกระแสการจราจรที่และปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 โดยพิจารณาด้ำนระยะเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดที่ประตูสอดคล้องกัน

ตารางที่ 31 ความยาวแถวคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4 (ก่อนตัดปัจจัย)

แหล่งความแปรปรวน	เวลารอคอยเฉลี่ย						ความยาวเฉลี่ยแถวคอย					
	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig
ภายในกลุ่ม	785763 26.6	8	9822 041	4.121 641	1.93 84	0.000 071	1.1E+ 09	8	1.37E +08	91.81 802	1.93 84	0.000 014
ระหว่างกลุ่ม	306697 4483	12 87	2383 042				1.92E +09	12 87	1491 321			
รวม	314555 0809	12 95					3.01E +09	12 95				

ตารางที่ 32 ความยาวแถวคอยเฉลี่ยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4 (หลังตัดปัจจัย)

แหล่งความแปรปรวน	เวลารอคอยเฉลี่ย						ความยาวเฉลี่ยแถวคอย					
	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig
ภายในกลุ่ม	46448 9.1	5	92897 .82	2.164 15	2.21 41	0.050 782	22031 813	5	4406 363	2.055 855	2.21 41	0.068 817
ระหว่างกลุ่ม	35961 819	85 8	41913 .54				1.84E +09	85 8	2143 324			
รวม	36426 308	86 3					1.86E +09	86 3				

ตารางที่ 32 แสดงผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยแถวคอยเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนปัจจัยที่ทดสอบ 30% ของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 4 ทั้ง 8 ปัจจัยด้วยการทดสอบทางสถิติ one-way ANOVA พบว่าเมื่อทดสอบความแปรปรวนของทั้ง 8 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของเวลารอคอยเฉลี่ยค่า F คำนวณเท่ากับ 4.1216 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.000071 และความยาวเฉลี่ยแถวคอย ค่า F คำนวณเท่ากับ 91.81802 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.000014 โดยหากพิจารณาค่า F คำนวณจากการทดสอบปัจจัยทั้ง 8 กลุ่มที่มีค่ามากกว่าค่า F วิฤตและค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.5 จึงปฏิเสธ H₀ และยอมรับ H₁ แสดงว่ามีข้อมูลอย่างน้อย 1 คู่ที่มีผลลัพธ์แตกต่างกัน กล่าวคือมีปัจจัยอย่างน้อยจำนวน 1 ปัจจัยที่มีผลลัพธ์ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยแตกต่างกันกลุ่มที่ทำการทดสอบอื่น ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการตัดชุดข้อมูลที่เป็นตัวแทนของปัจจัยความแออัดออกครั้งละ 1 กลุ่ม โดยพบว่าเมื่อตัดชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 2 (ปัจจัย B), ชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 5 (ปัจจัย E) และ ชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 6 (ปัจจัย F) ออกและทำการทดสอบความแปรปรวนของปัจจัยด้วยเทคนิค ANOVA พบว่าผลลัพธ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของเวลารอคอยเฉลี่ยและทำให้ได้รับค่า F คำนวณเท่ากับ 2.16415 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.050782 สำหรับข้อมูลความยาวเฉลี่ยค่า F คำนวณเท่ากับ 2.055855 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.068817 ดังนั้นหากพิจารณาค่า F คำนวณจากการทดสอบปัจจัยทั้ง 5 กลุ่มที่มีค่าน้อยกว่าค่า F วิฤตและค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.5 จึงยอมรับ H₀ กล่าวคือ ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 33 ปัจจัยระยะเวลาการรอคอยของประตูตรวจสอบหมายเลข 4

ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ย					
Factor	SS	MS	p-value	%	Cum. (%)
Factor C	356396.199	178198.099	0.010	22.87%	22.87%
Factor A	258916.278	258916.278	0.013	33.23%	56.11%
Factor D	412124.725	137374.908	0.019	17.63%	73.74%
Factor G	446831.394	111707.848	0.030	14.34%	88.08%
Factor H	464489.075	92897.815	0.051	11.92%	100.00%
Total	1938757.671	779094.949	0.123	100%	

ตารางที่ 34 ปัจจัยความยาวแฉกคอยของประตูดตรวจสอบหมายเลข 4

ความยาวแฉกคอยเฉลี่ย					
Factor	SS	MS	p-value	%	Cum. (%)
Factor C	18123263.57	9061631.79	0.013	23.12%	23.12%
Factor A	13675642.80	13675642.80	0.019	34.89%	58.00%
Factor D	20328641.97	6776213.99	0.023	17.29%	75.29%
Factor G	21122955.02	5280738.75	0.043	13.47%	88.76%
Factor H	22031813.16	4406362.63	0.069	11.24%	100.00%
Total	95282316.53	39200589.97	0.167	100%	

ตารางที่ 33 และ 34 แสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนรายปัจจัยของเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวแฉกคอยเฉลี่ยแบบรายปัจจัยของประตูดตรวจสอบหมายเลข 4 พบว่าผลลัพธ์ของทั้ง 2 ตารางเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือยังปัจจัยที่นำมาทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value) ที่ 0.5 จะส่งผลให้มีความแตกต่างจากแบบจำลองฐานสูงขึ้นไปด้วย โดยสามารถเรียงลำดับจากความแตกต่างของค่า P ได้ 1) รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C), 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A), 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D), 4) ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 5) ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H) สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อความยาวแฉกคอยเฉลี่ยของประตูดตรวจสอบหมายเลข 4 เรียงตามลำดับนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value) ที่มีความแตกต่างสูงที่สุดไปต่ำสุดได้แก่ 1) รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C), 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A), 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D), 4) ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 5) ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H) ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการกระแสการจราจรที่และปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าสู่ประตูดตรวจสอบหมายเลข 4

ตารางที่ 35 ผลลัพธ์ One-way MANOVA ประตูดตรวจสอบหมายเลข 3

Source	Wilks' test	Eigenvectors		Source	Wilks' test	Eigenvectors	
	P-value	Waiting	Queue		P-value	Waiting	Queue
AC	0.946098	3.3538	4.3368	CG	0.9631	5.1708	0.004291
AD	0.997923	2.1747	0.00094	CH	0.4634	6.28089	0.026021
AG	0.888154	2.5059	0.00816	DG	0.8563	2.42861	0.00954
AH	0.984305	6.9899	0.00269	DH	0.8720	8.61379	0.008875
CD	0.968354	4.5739	0.003943	GH	0.5768	5.22532	0.020841

ตารางที่ 36 ผลลัพธ์ One-way MANOVA ประตูดตรวจสอบหมายเลข 4

Source	Wilks' test	Eigenvectors		Source	Wilks' test	Eigenvectors	
	P-value	Waiting	Queue		P-value	Waiting	Queue
AC	0.000033	<0.0001	11.11479	CG	0.9294	2.1684	0.006206
AD	0.000182	<0.0001	10.83601	CH	0.6973	1.8041	0.0159
AG	0.000184	<0.0001	11.13251	DG	0.9817	1.7347	0.00292
AH	0.000363	<0.0001	11.05256	DH	0.6957	1.30104	0.01597
CD	0.999238	4.3176	0.000565	GH	0.6065	3.5518	0.01958

ตารางที่ 35 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ (One-way MANOVA) เนื่องงานผลลัพธ์จากแบบจำลองในด้านระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กันโดยตรงดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การทดสอบ Wilks เพื่อตัดสินว่าแต่ละคู่ปัจจัยส่งผลต่อการตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยหากพิจารณา P-Value ของคู่ของปัจจัยที่นำมาทดสอบจะพบหลักฐานที่สำคัญสำหรับการโต้ตอบ 4 คู่ได้แก่ 1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C), 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D), 3) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 4) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H) ทั้ง 4 คู่ที่นำมาทำการทดสอบมีค่า P ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05

จึงสามารถสรุปได้ว่าการโต้ตอบของผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องจากปัจจัย AC, AD, AG และ AH มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามในมิติระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ย โดยการจับคู่ของปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และรอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดในทุกตัวแปรการโต้ตอบ สำหรับรอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดในทุกตัวแปรการตอบกลับ (ค่า P-value เท่ากับ 0.999238) โดยผลรวมค่า Eigen ของความยาวแถวคอยมีการโต้ตอบของคู่ปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ 0.000565 และเวลารอคอยโดยเฉลี่ยมีความแตกต่างน้อยที่สุดในปัจจัยส่วนใหญ่เท่ากับ 4.3176 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนประตูตรวจสอบหมายเลข 1

เช่นเดียวกับการทดสอบที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 แบบจำลองแต่ละกลุ่ม จะทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของปัจจัย 30% ตามผลลัพธ์การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองในหัวข้อก่อนหน้า โดยมีสมมติฐานการศึกษาว่าระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ กล่าวคือปัจจัยความแออัดทั้ง 8 ที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนของระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยให้เกิดความเปลี่ยนแปลงจากแบบจำลองฐานอย่างไรของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ แบ่งการเก็บรวบรวมข้อมูลรอบละ 15 นาที ตั้งแต่ 08.00-20.00 จำนวน 48 ชุดข้อมูลต่อกลุ่ม ผลลัพธ์ค่าความแปรปรวนจากการจำลองสถานการณ์ของแต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่ม โดยเทคนิค ANOVA ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Gracia et al., 2017)

ตารางที่ 37 ผลลัพธ์ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 (ก่อนตัดปัจจัย)

แหล่งความแปรปรวน	เวลารอคอยเฉลี่ย						ความยาวเฉลี่ยแถวคอย					
	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig
ภายในกลุ่ม	15052 11	8	18815 1.4	6.298 982	1.93 84	0.000 082	1.19E +08	8	14832 589	12.82 755	1.93 84	0.0000 609
ระหว่างกลุ่ม	15861 037	53 1	29870 .13				6.14E +08	53 1	11563 07			
รวม	17366 249	53 9					7.33E +08	53 9				

ตารางที่ 38 ผลลัพธ์ประตูดตรวจสอบหมายเลข 1 (หลังตัดปัจจัย)

แหล่งความแปรปรวน	เวลารอคอยเฉลี่ย						ความยาวเฉลี่ยแถวคอย					
	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig	SS	df	MS	F Cal	F Cri	Sig
ภายในกลุ่ม	19412		48531	1.092	2.37	0.360	63027		1575	0.874	2.37	0.479
	4.5	4	.12	798	19	238	77	4	694	737	19	382
ระหว่างกลุ่ม	13100	29	44409				5.31E	29	1801			
	938	5	.96				+08	5	334			
รวม	13295	29					5.38E	29				
	063	9					+08	9				

ตารางที่ 37 แสดงผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยแถวคอยเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนปัจจัยที่ทดสอบ 30% ของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งกระทบต่อความแออัดที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ทั้ง 8 ปัจจัยด้วยการทดสอบทางสถิติ one-way ANOVA พบว่าเมื่อทดสอบความแปรปรวนของทั้ง 8 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของเวลารอคอยเฉลี่ยค่า F คำนวณเท่ากับ 6.298982 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.000082 และความยาวเฉลี่ยแถวคอย ค่า F คำนวณเท่ากับ 12.82755 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.0000609 โดยหากพิจารณาค่า F คำนวณจากการทดสอบปัจจัยทั้ง 8 กลุ่มที่มีค่ามากกว่าค่า F วิฤตและค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.5 จึงปฏิเสธ H0 และยอมรับ H1 แสดงว่ามีข้อมูลอย่างน้อย 1 คู่ที่มีผลลัพธ์แตกต่างกัน กล่าวคือมีปัจจัยอย่างน้อยจำนวน 1 ปัจจัยที่มีผลลัพธ์ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยแตกต่างกันที่ทำการทดสอบอื่น ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการตัดชุดข้อมูลที่เป็นตัวแทนของปัจจัยความแออัดออกครั้งละ 1 กลุ่ม โดยพบว่าเมื่อตัดชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 3 (ปัจจัย C), ชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 5 (ปัจจัย E), ชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 7 (ปัจจัย G) และ ชุดข้อมูลของกลุ่มที่ 8 (ปัจจัย H) ออกและทำการทดสอบความแปรปรวนของปัจจัยด้วยเทคนิค ANOVA พบว่าผลลัพธ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของเวลารอคอยเฉลี่ยและทำให้ได้รับค่า F คำนวณเท่ากับ 1.092798 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.360238 สำหรับข้อมูลความยาวเฉลี่ยค่า F คำนวณเท่ากับ 0.874737 และค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.479382 ดังนั้นหากพิจารณาค่า F คำนวณจากการทดสอบปัจจัยทั้ง 4 กลุ่มที่มีค่าน้อยกว่าค่า F วิฤตและค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.5

จึงยอมรับ H_0 กล่าวคือ ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 39 ผลลัพธ์ปัจจัยระยะเวลาการรอคอยประตูตรวจสอบหมายเลข 1

ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ย					
Factor	SS	MS	p-value	%	Cum. (%)
Factor A	123791.123	123791.123	0.079	40.63%	40.63%
Factor B	151835.032	75917.516	0.166	24.92%	65.55%
Factor D	169289.922	56429.974	0.268	18.52%	84.07%
Factor F	194124.460	48531.115	0.360	15.93%	100.00%
Total	639040.537	304669.728	0.873	100%	

ตารางที่ 40 ผลลัพธ์ปัจจัยความยาวแถวคอยประตูตรวจสอบหมายเลข 1

ความยาวแถวคอยเฉลี่ย					
Factor	SS	MS	p-value	%	Cum. (%)
Factor A	2636916.66	2636916.66	0.197	30.12%	30.12%
Factor B	5334105.49	2667052.74	0.215	30.46%	60.58%
Factor D	5625689.39	1875229.80	0.365	21.42%	82.00%
Factor F	6302777.07	1575694.27	0.479	18.00%	100.00%
Total	19899488.61	8754893.47	1.257	100%	

ตารางที่ 39 และ 40 แสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนรายปัจจัยของเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความแออัดที่เกิดขึ้นกับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 พบว่าทุกปัจจัยมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ($P\text{-Value} < 0.05$) แสดงว่าระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันของทุกกลุ่มที่ทำการทดสอบ โดยสามารถเรียงลำดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความความแออัดจากค่าน้อยไปหามากได้ดังนี้

1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (Factor A), 2) ปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า (Factor B) 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (Factor D) และ 4) การกำหนดประเภทช่องจราจร (Factor F) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากการจัดการจราจรแบบสวนกระแสของเวลารอคอยเฉลี่ยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแปรปรวนของปัจจัยทั้ง 4

ตารางที่ 41 ผลลัพธ์ MANOVA ประตูตรวจสอบหมายเลข 1

Source	Wilks' test	Eigenvectors		Source	Wilks' test	Eigenvectors	
	P-value	Waiting	Queue		P-value	Waiting	Queue
AB	0.016300	2.486	0.0906	BD	0.9112	6.6159	0.007101
AD	0.005285	7.081	0.1109	BF	0.7241	3.83192	0.01484
AF	0.013632	6.308	0.0938	DF	0.9040	3.0531	0.00744

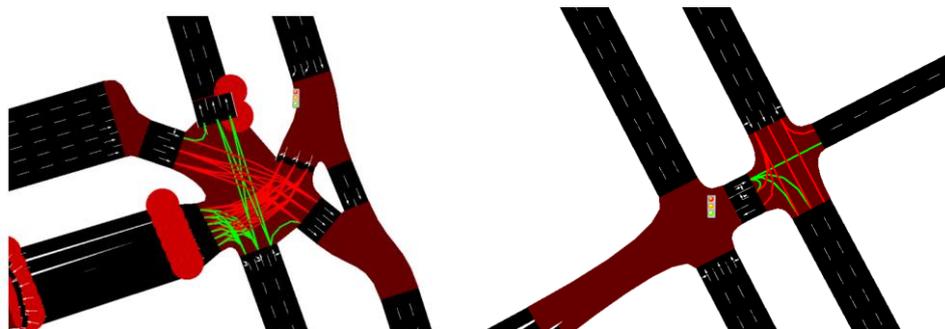
ตารางที่ 41 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ (One-way MANOVA) ผลลัพธ์จากแบบจำลองในด้านระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กันโดยตรงดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การทดสอบ Wilks เพื่อตัดสินว่าแต่ละคู่ปัจจัยส่งผลต่อการตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยหากพิจารณา P-Value ของคู่ของปัจจัยที่นำมาทดสอบจะพบหลักฐานที่สำคัญสำหรับการโต้ตอบ 3 คู่ได้แก่ 1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า (ปัจจัย B) 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) และ 3) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ การกำหนดประเภทช่องจราจร (ปัจจัย F) กล่าวคือค่า P-value ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.016300, 0.005285 และ 0.013632 ตามลำดับ ทั้ง 3 คู่ที่นำมาทำการทดสอบมีค่า P ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าการโต้ตอบของผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องจากปัจจัย AB, AD และ AE มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามในมิติระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ย โดยการจับคู่ของปัจจัยปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดในทุกตัวแปรการโต้ตอบ สำหรับปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า (ปัจจัย B) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุดในทุกตัวแปรการตอบกลับ (ค่า P-value เท่ากับ 0.9112) โดยผลรวมค่า Eigen ของความยาวแถวคอยมีการโต้ตอบของคู่ปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ 0.007101 และเวลารอคอยโดยเฉลี่ยมีความแตกต่างน้อยที่สุดในปัจจัยส่วนใหญ่เท่ากับ 6.6159

การนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา

เนื่องด้วยความแตกต่างของโครงสร้างทางกายภาพของเส้นทางเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ที่เป็นเส้นทางหลักของรถบรรทุกผู้คอนเทนเนอร์ที่ใช้สำหรับมุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบัง เส้นทางกายภาพเป็นเส้นทางที่มีอัตราส่วนของช่องจราจรขาเข้าและขาออกเท่ากับ 8 ต่อ 2 และมีสัดส่วนของปริมาณยานพาหนะขาเข้าและขาออกอยู่ในช่วง 60:40 จนถึง 70:30 ในเส้นทางไม่มีเกาะกลางแบ่งเส้นทางขาเข้าและออก แต่มีการใช้แผงกั้นจราจร หรือ แบรีเออร์ (Barrier) ที่สามารถปรับเปลี่ยนแนวกั้นทิศทางการจราจรได้เป็นตัวแบ่งทิศทางของช่องจราจร โดยปัจจัยปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงสุดในทุกตัวแปรการโต้ตอบ ซึ่งมีความแตกต่างจากเส้นทางเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ที่มีการใช้สัญญาณไฟจราจรในการควบคุมปริมาณการจราจรบริเวณทางแยกก่อนเข้าสู่ประตูตรวจสอบและปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงสุด ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาคความแออัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงทำการแบ่งแนวทางการนำเสนอวิธีการแก้ไขออกเป็น 2 แนวทาง เพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

การออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจร

เป็นแนวทางการนำเสนอการออกแบบและปรับเปลี่ยนรอบสัญญาณไฟจราจรสำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลรอบสัญญาณไฟจราจรในแต่ละทิศทางของถนนในทางแยกประตูตรวจสอบที่ 3 และ 4 สำหรับนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Simulation of Urban Mobility กำหนดให้ยานพาหนะเดินทางในลักษณะรถวิ่งช่องจราจรซ้ายดำเนินการโดยใช้คำสั่ง tLLogic และ phase duration การปรับรอบสัญญาณไฟจราจรให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจากวิธีการควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่เสนอปรับปรุงที่เหมาะสมกับสภาพการจราจรในสถานะอิมตัวมากเพื่อหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม โดยปัจจุบันที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 มีรอบสัญญาณไฟจราจร 62-67 วินาที และประตูตรวจสอบหมายเลข 4 มีรอบสัญญาณไฟจราจร 62 วินาที แสดงดังภาพที่ 34



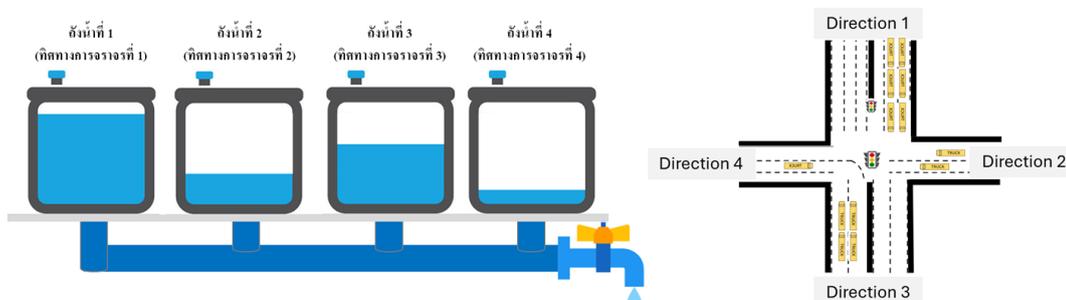
ภาพที่ 34 โครงข่ายเส้นทางจากโปรแกรม QGIS และ SUMO

การวิเคราะห์แนวทางการการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจร

เพื่อเพิ่มปริมาณยานพาหนะที่ออกจากทางแยกที่มีการควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรให้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จำเป็นต้องศึกษาเรื่องการปรับรอบระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรและปัจจัยที่ส่งผลต่อการไหลของกระแสจราจร เพื่อนำเสนอแนวทางการควบคุมให้กระแสการไหลของจราจรเป็นไปอย่างเป็นระเบียบ โดยพยายามลดจำนวนยานพาหนะที่เกิดแถวคอยในบริเวณทางแยก เปิดโอกาสให้ยานพาหนะสามารถเลี้ยวข้ามทางแยกได้อย่างสะดวกโดยไม่เกิดแถวคอยกีดขวางในทางแยก ดังนั้นการแก้ปัญหาด้วยวิธีการปรับรอบสัญญาณเวลาไฟจราจรสีเขียวให้เหมาะสมกับทางแยก ประสิทธิภาพเลข 3 และ 4 จะทำให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกได้เพิ่มสูงขึ้น

แนวคิดการออกแบบสัญญาณรอบไฟจราจรสีเขียวเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของการเติมน้ำในถังเก็บน้ำ โดยถังเก็บน้ำเปรียบเสมือนกับช่องจราจรในทิศทางต่าง ๆ ที่มีปริมาณน้ำในถังเป็นตัวแทนของจำนวนยานพาหนะที่อยู่ในแถวคอย การที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกเปรียบเสมือนการเปิดระบายน้ำออกจากถังน้ำโดยสามารถทำได้ครั้งละ 1 ถัง ดังนั้นจึงควรพิจารณาควบคุมความสมดุลของปริมาณน้ำโดยการระบายน้ำในถังที่มีโอกาสล้นสูงที่สุดก่อนเสมอ ดังนั้นจากภาพที่ 35 เราต้องเปิดถังที่ 1 ก่อนเป็นอันดับแรก ตามด้วยถังที่ 3 ถังที่ 2 และถังที่ 4 สำหรับระยะเวลาการปล่อยน้ำจะขึ้นอยู่กับขนาดของวาล์วน้ำซึ่งเปรียบเสมือนเป็นจำนวนช่องจราจร ดังนั้นหากมียานพาหนะหยุดนิ่งรอคอยในแถวคอยในทิศทางใดมากกว่าแถวคอยในทิศทางอื่น ๆ จำเป็นต้องมีการเปิดรอบสัญญาณไฟจราจรเขียวในทิศทางนั้นให้ยาวนานมากขึ้นเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณการจราจรและป้องกันการเกิดปัญหาการจราจรติดขัดเพิ่มเติม ทดแทนการกำหนดรอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวเท่ากันในแต่ละทิศทาง อย่างไรก็ตามหากรอบสัญญาณไฟจราจรเปิดไฟเขียวนานเกินในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาสภาพการจราจรในภาพรวม ดังนั้นจึงต้องพิจารณาระยะเวลารอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อจำกัดที่เราต้องคำนึงถึงสำหรับแนวทางแต่ละแนวทางหากทางแยกแห่งหนึ่งมีรอบ

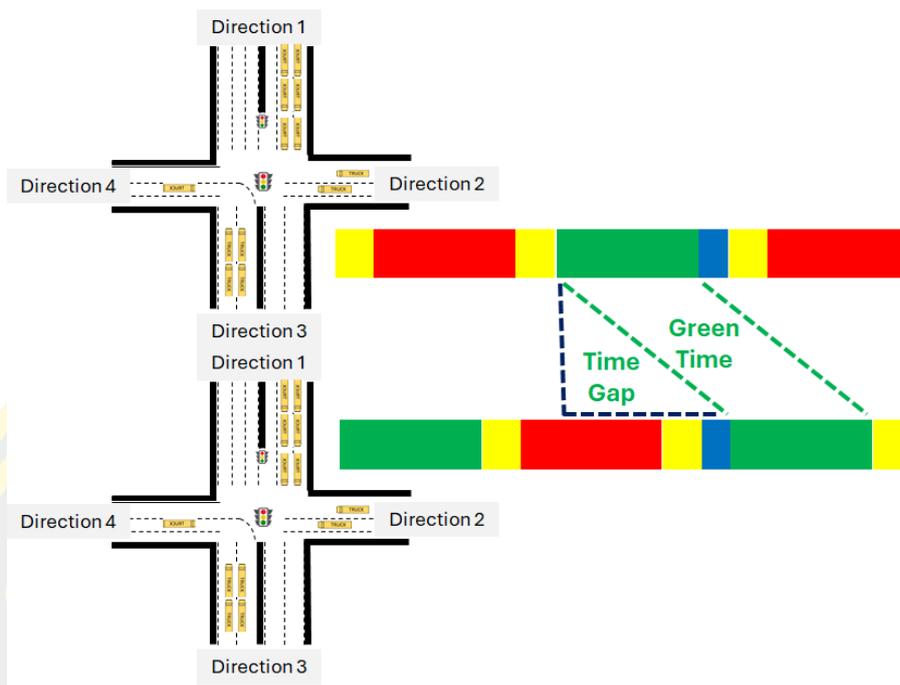
สัญญาณไฟจราจรสีเขียวที่ไม่มีประสิทธิภาพจะส่งผลให้เกิดความล่าช้าของการไหลออกจากยานพาหนะในเส้นทางตัดกัน



ภาพที่ 35 แนวคิดการระบายยานพาหนะภายในแฉกคอย

แนวคิดการประสานงานการจราจร

การประสานงานการจราจรเป็นแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการประสานการดำเนินงานของสัญญาณจราจรในแต่ละทางแยกเข้าไว้ด้วยกัน โดยเฉพาะทางแยกที่มีลักษณะประสานสัมพันธ์ (Co - ordination) เพื่อให้ยานพาหนะในเส้นทางที่เชื่อมต่อกันสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างราบรื่น และสัญญาณไฟจราจรมีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามปัญหาหลักที่ทางแยกส่วนใหญ่จะพบได้แก่ ปริมาณความยาวของแฉกคอยเริ่มต้นที่มีความแตกต่างกันระหว่างทางแยก ส่งผลให้หากทางแยกก่อนหน้ามีปริมาณยานพาหนะเริ่มต้นจำนวนมากจำเป็นต้องมีการชดเชยเวลา (Offset) ของสัญญาณไฟจราจรสีเขียวเพื่อลดการชะลอตัวหรือหยุดชะงักของกระแสจราจรเนื่องจากรอบสัญญาณไฟจราจรไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นหากต้องการให้การไหลของกระแสการจราจรมีความสม่ำเสมอจำเป็นต้องมีการพิจารณาแฉกคอยเริ่มต้นของทางแยกก่อนหน้าและระยะเวลาการเดินทางระหว่างทางแยก เพื่อดำเนินการปล่อยยานพาหนะที่เป็นแฉกคอยสะสมจากทางแยกก่อนหน้าสัมพันธ์แฉกคอยที่มีอยู่สำหรับทางแยกปัจจุบันด้วย

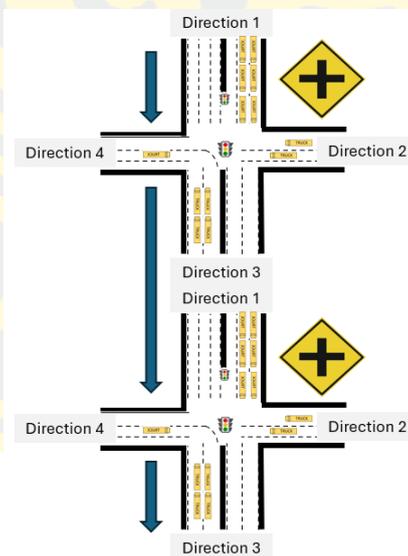


ภาพที่ 36 ช่วงเวลาการชดเชยสัญญาณไฟจราจร

จากภาพที่ 36 แสดงการเชื่อมโยงกันของทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 โดยหากพิจารณารอบสัญญาณไฟจราจรของทั้ง 2 ทางแยกซึ่งจะเห็นลักษณะของช่วงเวลาสัญญาณไฟจราจรที่ใช้รอบสัญญาณไฟจราจรใกล้เคียงกัน ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 4 มีความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรเท่ากับ 62 วินาทีและทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 มีความยาวรอบสัญญาณไฟจราจรเท่ากับ 67 วินาที อย่างไรก็ตามในระหว่างการเดินทางของยานพาหนะระหว่างทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 4 ไปทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 อาจมีปริมาณยานพาหนะในแถวคอยเหลืออยู่ส่งผลให้ยานพาหนะจากทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 4 ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสจราจรที่มีความต่อเนื่องระหว่างทางแยกจำเป็นต้องมีการกำหนดการชดเชยเวลาให้กับทางแยกลำดับถัดไป (ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3) วิธีการชดเชยเวลามีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแตกต่างของรอบสัญญาณไฟจราจรระหว่างทางแยกและช่วยให้สามารถประสานการทำงาน (Synchronize) ของทางแยกทั้ง 2 เข้าด้วยกัน เนื่องจากจะช่วยระบายแถวคอยเดิมที่เกิดขึ้นที่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 ก่อนจะทำการรับยานพาหนะใหม่จากทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 4 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจร

การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจรสำหรับทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อปรับปรุงปัญหาการจราจรที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองโดยแยกเส้นทางและทางแยกที่มุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ออกจากกันเพื่อให้สามารถปรับเทียบและประเมินความถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพก่อนจะนำทางแยกทั้ง 2 กลับเข้ามารวมกันอีกครั้ง ทางแยกทั้ง 2 จะถูกกำหนดให้ดำเนินงานในช่วงเวลา 08.00-20.00 ปริมาณจราจรที่เข้าสู่โครงข่ายถนนจะถูกแบ่งเก็บรวบรวมข้อมูลเป็น 48 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 15 นาที ตั้งแต่วันที่ 1-31 ตุลาคม พ.ศ. 2566 ในช่วงเวลา 08:00-20:00 น. โดยในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นของไตรมาสที่ 4 ของปีและเป็นช่วงเวลาที่ปริมาณยานพาหนะบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์จะเข้ามาใช้บริการในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเวลาก่อนหน้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่จะดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ใน การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เริ่มศึกษาพฤติกรรมตั้งแต่ปริมาณการจราจรทั่วไปจนกระทั่งปริมาณการจราจรเริ่มวิกฤตในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยมีระดับการบริการที่ประตูตรวจสอบและรอบระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกตามข้อมูลที่ถูกรวบรวมจากภาคสนาม



ภาพที่ 37 การแสดงภาพจุดตัดที่เชื่อมต่อกันที่ประตูตรวจสอบ

ในขั้นตอนเริ่มต้นข้อมูลปริมาณการจราจรจะถูกรวบรวมจากการประสานงานของยานพาหนะที่มีบริเวณทางแยก ดังที่แสดงในรูปที่ 38 แต่ละวิธีจะแสดงโดยตัวแปร i ที่มีค่าเท่ากับ 1 และ 2 สอดคล้องกับทิศทางของกระแสจราจร อย่างไรก็ตามทางแยกบางแห่งอาจมีทางแยก 3

ทางหรือ 4 ทางตัวแปร i จะมีค่าเพิ่มตามทิศทางการไหลของกระแสจากราจรที่เข้าสู่ทางแยก แลวคอยเริ่มต้นสามารถกำหนดเป็นแลวคอยปัจจุบันบวกกับยานพาหนะที่เพิ่มเข้าไปในความยาว แลวคอยจากทางแยกก่อนหน้า สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพจะดำเนินการที่ทางแยกของประตู ตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 เพื่อทดสอบขั้นตอนวิธีการดำเนินงานและแนวทางการใช้วิธีการ ชดเชยเวลาเพื่อเลื่อนเวลาให้ไฟเขียวตอบสนองความต้องการของแลวคอยทั้งหมดของแลวคอย ปัจจุบันแล้วแลวคอยก่อนหน้าที่มีพฤติกรรมแบบทางแยกประสานสัมพันธ์

การรวบรวมข้อมูล

การศึกษาระบบการจราจรบริเวณทางแยกต้อง มีการบันทึกจำนวนรถที่เข้าและออกจาก ทางแยกในแต่ละชั่วโมง จากทางเข้าและทางแยกแต่ละแห่งในช่วงเวลาทั่วไปและในช่วงเวลาเร่งด่วน คำนวณสมการเป้าหมายได้จากเวลาของไฟเขียว (วินาที) คูณด้วยปริมาณการไหลออกของ ยานพาหนะจากแต่ละทางแยกสูงสุด (คั่นต่อวินาที) สำหรับความยาวของรอบการจราจรสามารถ คำนวณได้จากเวลาสัญญาณสะสมของสีเขียว เหลือง และแดงจากแต่ละเส้นทาง

ข้อมูลจะถูกเก็บรวบรวมในช่วงเวลาทั่วไปและชั่วโมงเร่งด่วนจากแต่ละเส้นทาง เวลาที่ เก็บรวบรวมคือระหว่าง 08:00 น. ถึง 18.00 น. ของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 แต่ละ เส้นทางของทางแยกจะมีการรวบรวมข้อมูลนำเข้า (Input data) ที่เกี่ยวข้อง เช่น การเคลื่อนที่เข้า ทางแยก การเคลื่อนที่ออกจากทางแยก ระยะเวลารอคอยเฉลี่ย ความยาวแลวคอยเฉลี่ย ความยาว แลวคอยรวม แลวคอยเริ่มต้นทั้งหมด แลวคอยที่หยุดรอ สัญญาณไฟจราจรสีเขียว กำหนดให้ การเคลื่อนที่เข้าทางแยกถูกกำหนดให้เป็นค่านำเข้า (Input) และปริมาณการไหลออกของ ยานพาหนะเป็นค่าส่งออก (Output) การไหลจากแต่ละเส้นทางของยานพาหนะเข้าและออกที่ทาง แยกจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลที่เก็บรวบรวม โดยมีการคำนวณค่าการชดเชยเวลา ดังนี้

ค่าชดเชยเวลา (Off-set time) = เวลาในการเคลียแลวคอยก่อนหน้า - เวลาการเดินทาง จากทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 ไป 4

เวลาในการเคลียแลวคอยก่อนหน้า = ค่าเฉลี่ยแลวคอยเริ่มต้น/อัตราการไหลของ ยานพาหนะ

ผลลัพธ์การดำเนินการการออกแบบรอบสัญญาณไฟจราจร

จากแนวคิดเมื่อมีการชดเชยระยะเวลาของสัญญาณไฟจราจรสีเขียวด้วยรอบระยะเวลาที่ เหมาะสมในทางแยกที่มีลักษณะประสานสัมพันธ์จะส่งผลให้ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของ ยานพาหนะทั้ง 2 ทางแยกลดลง เนื่องจากการไหลของกระแสจากราจรจะมีความต่อเนื่องเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สภาพการจราจรโดยรวมดีขึ้น

โดยการทดลองจะดำเนินการปรับเปลี่ยนชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารรอบ สัญญาณไฟจราจรใหม่ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 สถานการณ์ได้แก่ 1) การคำนวณรอบ

การชดเชยเวลาใหม่จากค่าเฉลี่ยแถวคอยก่อนหน้า (Previous queue average) และ
 2) การคำนวณรอบการชดเชยเวลาใหม่จากค่าเฉลี่ยแถวคอยก่อนหน้าสูงสุด (Maximum previous queue average) ผลลัพธ์จากการดำเนินการลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยต่อยานพาหนะที่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ด้วยวิธีการชดเชยเวลา (Offset) แต่ละสถานการณ์ แสดงผลลัพธ์ ดังนี้

ตารางที่ 42 ผลการดำเนินการที่ทางแยกประตูตรวจสอบ (ก่อนปรับปรุง)

ตัวชี้วัด	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
อัตราการไหลเข้าของยานพาหนะ (คัน/ชม)	136	146	138	147	114	87
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 4 (วินาที)	534.50	822.25	622.50	842.00	503.75	498.00
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 3 (วินาที)	45.00	199.00	278.00	83.00	358.00	95.00
ค่าเฉลี่ยแถวคอยเริ่มต้น (เมตร)	40.05	41.57	36.35	34.33	40.54	42.94
จำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่ออก	117.00	128.00	121.00	129.00	98.00	76.00
ตัวชี้วัด	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
อัตราการไหลเข้าของยานพาหนะ	154	190	160	147	136	130
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 4 (วินาที)	919.75	974.25	863.25	778.25	673.00	720.25
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 3 (วินาที)	473.00	687.00	140.00	219.00	200.00	60.00
ค่าเฉลี่ยแถวคอยเริ่มต้น (เมตร)	49.95	40.07	38.94	36.46	37.83	31.45
จำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่ออก (คัน/ชม)	103	127	115	110	101	98

ตารางที่ 43 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอยก่อนหน้า (08.00-13.59)

ตัวชี้วัด	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
อัตราการไหลเข้า	136	146	138	147	114	87
อัตราการไหลของยานพาหนะ (คัน/ชม)	2058	2046	1955	2093	1992	1899
ค่าเฉลี่ยแถวคอยเริ่มต้น (เมตร)	24.75	25.6	22.29	21.09	23.89	25.59
เวลาในการเคลียร์แถวคอยก่อนหน้า	43.29	45.04	41.05	36.28	43.17	48.51
เวลาการเดินทางจากทางแยกประตูตรวจสอบ 3 ไป 4	53.55	53.86	52.96	48.05	59.93	69.50
ค่าชดเชยเวลา (Off-set time)	10.26	8.82	11.91	11.78	16.76	20.99
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 4 (วินาที)	55	55	55	55	55	55
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 3 (วินาที)	60	60	60	60	60	60

ตารางที่ 43 (ต่อ)

ตัวชี้วัด	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
รอบสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 3 + ค่าชดเชยเวลา (วินาที)	70.26	68.82	71.91	71.78	76.76	80.99
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 4 (วินาที)	993.00	1183.00	2485.00	3382.00	2048.00	1950.00
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 3 (วินาที)	28	136	162	121	154	69
จำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่ออก (คัน/ชม)	126.00	137.00	119.00	135.00	101.00	79.00

ตารางที่ 44 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอยก่อนหน้า (14.00-19.59)

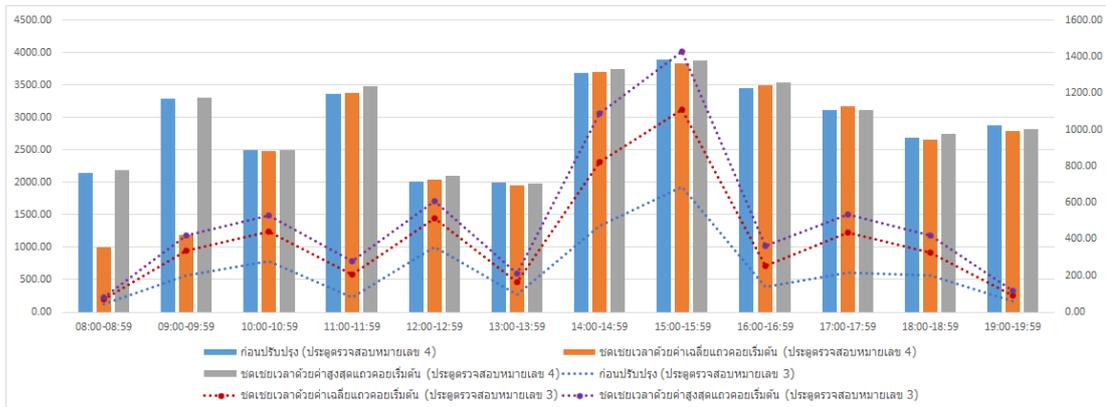
ตัวชี้วัด	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
อัตราการไหลเข้า	136	146	138	147	114	87
อัตราการไหลของยานพาหนะ (คัน/ชม)	1848	1610	1686	1730	1955	2093
ค่าเฉลี่ยแถวคอยเริ่มต้น (เมตร)	21.75	22.6	22.29	21.09	21.89	18.59
เวลาในการเคลียแถวคอยก่อนหน้า	42.37	50.53	47.59	43.89	40.31	31.98
เวลาการเดินทางจากทางแยกประตูตรวจสอบ 3 ไป 4	55.52	61.34	55.90	50.89	56.89	52.28
ค่าชดเชยเวลา (Off-set time)	13.15	10.81	8.31	7.01	16.58	20.31
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 4 (วินาที)	55	55	55	55	55	55
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 3 (วินาที)	60	60	60	60	60	60
รอบสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 3 + ค่าชดเชยเวลา (วินาที)	73.15	70.81	68.31	67.01	76.58	80.31
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 4 (วินาที)	3703.00	3835.00	3495.00	3172.00	2664.00	2789.00
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 3 (วินาที)	351.00	423.00	114.00	216.00	126.00	31.00
จำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่ออก (คัน/ชม)	143	179	139	132	120	120

ตารางที่ 45 ผลลัพธ์การหลังการปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอก่อนหน้าสูงสุด (08.00-13.59)

ตัวชี้วัด	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
อัตราการไหลเข้า	136	146	138	147	114	87
อัตราการไหลของยานพาหนะ (คัน/ชม)	2058	2046	1955	2093	1992	1899
ค่าเฉลี่ยแถวคอกเริ่มต้น (เมตร)	123.41	183.55	157.97	173.6	198.96	203.28
เวลาในการเคลียร์แถวคอก่อนหน้า	215.88	322.96	290.89	298.60	359.57	385.36
เวลาการเดินทางจากทางแยกประตูตรวจสอบ 3 ไป 4	53.55	53.86	52.96	48.05	59.93	69.50
ค่าชดเชยเวลา (Off-set time)	162.33	269.10	237.93	250.54	299.63	315.86
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 4 (วินาที)	55	55	55	55	55	55
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 3 (วินาที)	60	60	60	60	60	60
รอบสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 3 + ค่าชดเชยเวลา (วินาที)	102.33	209.10	177.93	190.54	239.63	255.86
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 4 (วินาที)	2195.00	3308.00	2497.00	3474.00	2093.00	1976.00
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 3 (วินาที)	7	84	88	75	96	49
จำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่ออก (คัน/ชม)	122.00	128.00	123.00	126.00	100.00	75.00

ตารางที่ 46 ผลลัพธ์การหลังการปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอก่อนหน้าสูงสุด (14.00-19.59)

ตัวชี้วัด	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
อัตราการไหลเข้า	136	146	138	147	114	87
อัตราการไหลของยานพาหนะ (คัน/ชม)	1848	1610	1686	1730	1955	2093
ค่าเฉลี่ยแถวคอกเริ่มต้น (เมตร)	195.17	197.9	182.21	199.74	165.1	183.39
เวลาในการเคลียร์แถวคอก่อนหน้า	380.20	442.51	389.06	415.64	304.02	315.43
เวลาการเดินทางจากทางแยกประตูตรวจสอบ 3 ไป 4	55.52	61.34	55.90	50.89	56.89	52.28
ค่าชดเชยเวลา (Off-set time)	324.68	381.17	333.16	364.75	-247.13	-263.15
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 4 (วินาที)	55	55	55	55	55	55
รอบสัญญาณไฟจราจรสีเขียวทางแยกประตู 3 (วินาที)	60	60	60	60	60	60
รอบสัญญาณไฟจราจรที่ทางแยกประตูตรวจสอบ หมายเลข 3 + ค่าชดเชยเวลา (วินาที)	264.68	321.17	273.16	304.75	187.13	203.15
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 4 (วินาที)	3745.00	3875.00	3545.00	3110.00	2741.00	2815.00
เวลาหยุดรอสัญญาณไฟจราจรเฉลี่ยที่แยกประตู ตรวจสอบหมายเลข 3 (วินาที)	266	318	111	98	92	26
จำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่ออก (คัน/ชม)	120	139	131	103	109	100



ภาพที่ 38 ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยก่อนและหลังการปรับปรุง

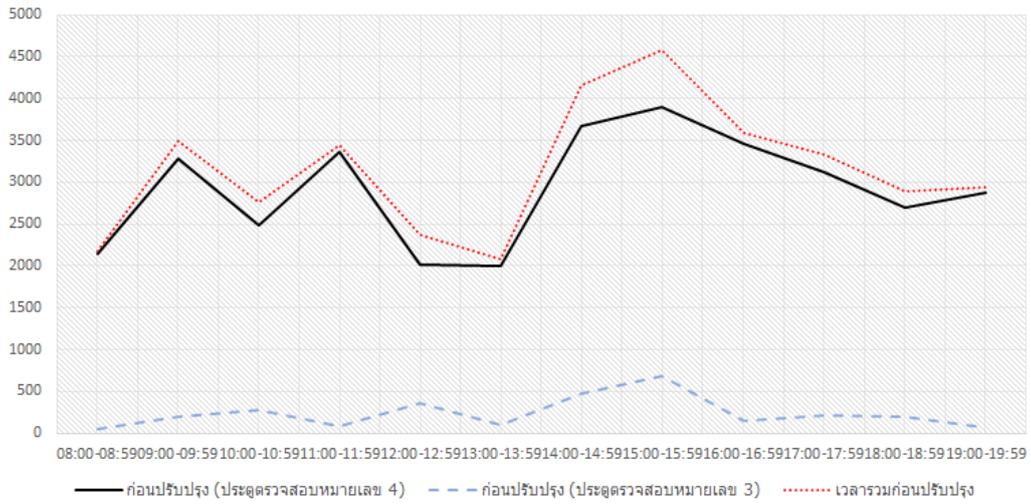
ตาราง 42 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การดำเนินงานของทางแยกก่อนการปรับปรุงของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 ข้อมูลจากแบบจำลองสภาพการจราจรหาแบ่งช่วงเวลาในการสรุปข้อมูล ออกเป็น 3 ช่วงเวลาตามพฤติกรรมรถเข้ามาของยานพาหนะจะพบว่าในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 192.60 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 348.75 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 159.67 วินาที/คัน สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 4 พบว่าในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 2660.00 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 3255.25 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 2895.33 วินาที/คัน โดยเมื่อนำระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะที่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 มารวมกันจะได้ระยะเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะที่ทางแยกทั้ง 2 แบ่งตามช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 2852.60 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 3604.00 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 3055.00 วินาที/คัน

ตาราง 43 และ 44 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การดำเนินงานของทางแยกที่มีการปรับปรุง โดยการชดเชยเวลาด้วยค่าเฉลี่ยของแถวคอยก่อนหน้า ผลลัพธ์ของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 จากแบบจำลองสภาพการจราจรหาแบ่งช่วงเวลาในการสรุปข้อมูลออกเป็น 3 ช่วงเวลาตาม พฤติกรรมรถเข้ามาของยานพาหนะจะพบว่าในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 120.20 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 239.25 วินาที/คัน และ ช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 124.33 วินาที/คัน สำหรับประตูตรวจสอบ หมายเลข 4 พบว่าในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 2018.20 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอเฉลี่ยเท่ากับ 3245.75 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น.

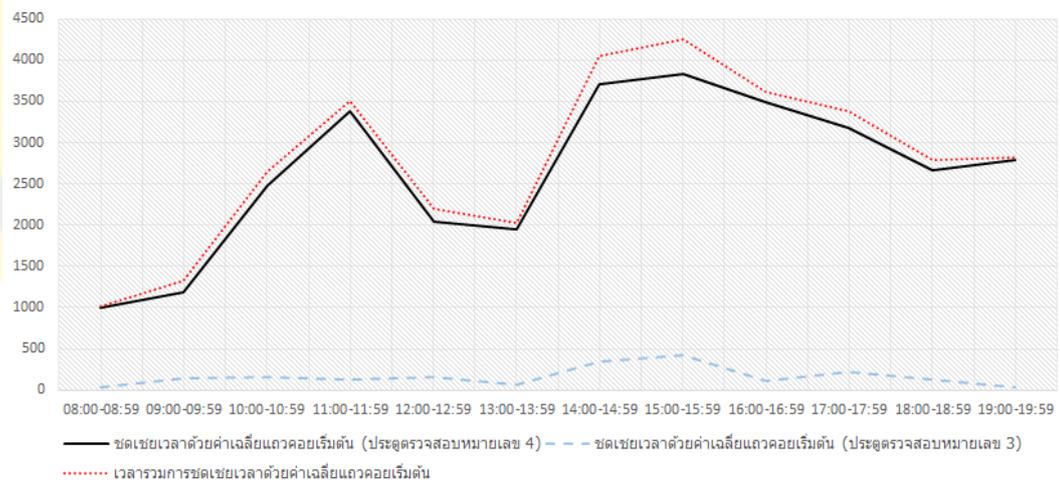
มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 2875.00 วินาที/คัน โดยเมื่อนำระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะที่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 มารวมกันจะได้ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะที่ทางแยกทั้ง 2 แบ่งตามช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 2138.40 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 3485.00 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 3055.00 วินาที/คัน

ตาราง 45 และ 46 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การดำเนินงานของทางแยกที่มีการปรับปรุง โดยการชดเชยเวลาด้วยค่าเฉลี่ยสูงสุดของแถวคอยก่อนหน้า ผลลัพธ์ของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 จากแบบจำลองสภาพการจราจรหาแบ่งช่วงเวลาในการสรุปข้อมูลออกเป็น 3 ช่วงเวลาตามพฤติกรรมการเข้ามาของยานพาหนะจะพบว่าในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 70.00 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 186.00 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 72.00 วินาที/คัน สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 4 พบว่าในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 2713.40 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 3285.25 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 2888.67 วินาที/คัน โดยเมื่อนำระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะที่ทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 มารวมกันจะได้ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะที่ทางแยกทั้ง 2 แบ่งตามช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 2783.40 วินาที/คัน ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 3471.25 วินาที/คัน และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 2960.67 วินาที/คัน

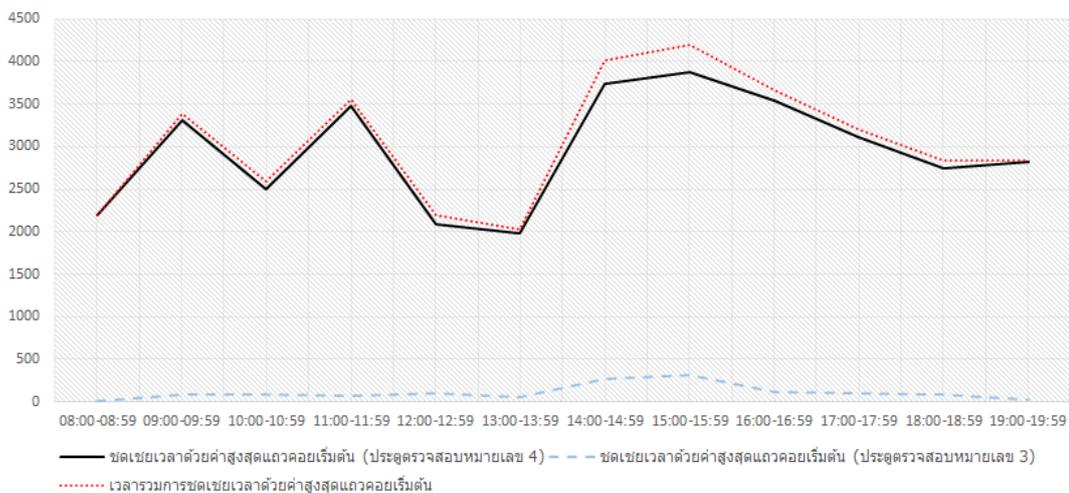
ภาพที่ 39 ถึง 41 แสดงผลลัพธ์การลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยรวมของยานพาหนะบริเวณทางแยกประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังด้วยวิธีการชดเชยระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรสีเขียวโดยการพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแถวคอยและค่าเฉลี่ยแถวคอยสูงสุดพบว่าวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยแถวคอยเพื่อกำหนดค่าเวลาชดเชยจะสามารถช่วยลดระยะเวลาการรอคอยรวมได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการก่อนการปรับปรุง โดยในช่วงเวลา 8:00-13:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยลดลง 714.00 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 25.04% , ช่วงเวลา 13:00-17:00 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยลดลง 119.00 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 3.31% และช่วงเวลา 17:00-19:59 น. มีเวลารอคอยเฉลี่ยลดลง 55.67 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 1.82%



ภาพที่ 39 ระยะเวลาการรอคอยรวมของประตูตรวจสอบก่อนปรับปรุง



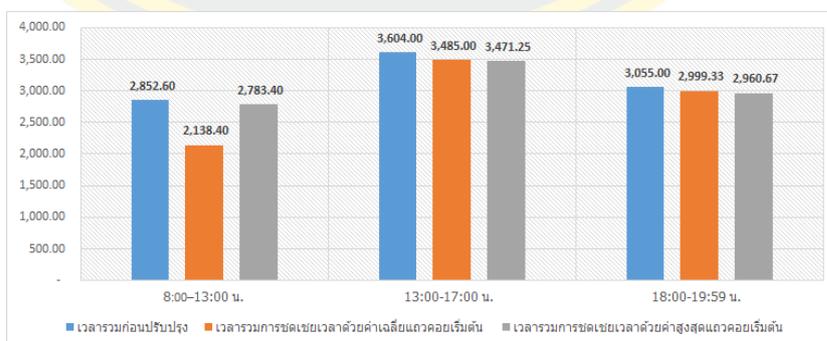
ภาพที่ 40 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยด้วยค่าเฉลี่ยแถวคอย



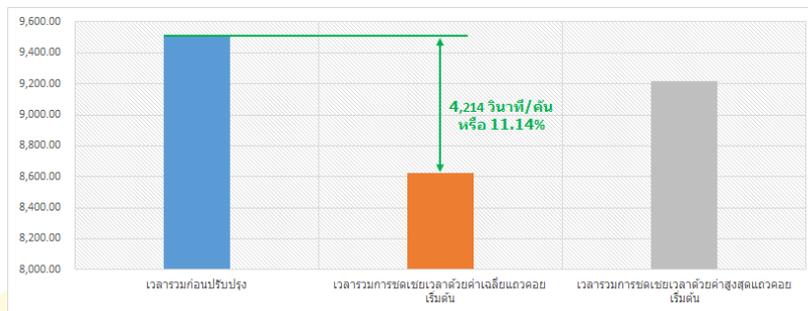
ภาพที่ 41 ผลลัพธ์การปรับปรุงด้วยด้วยค่าเฉลี่ยแวลคอยสูงสุด

สรุปผลการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลา

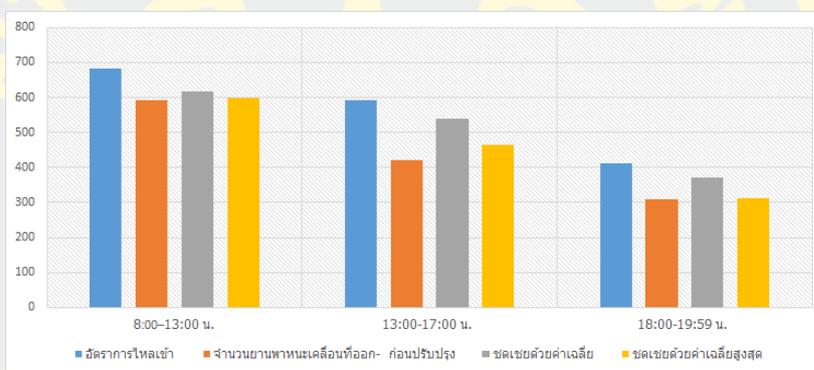
การสรุปผลการวิเคราะห์สำหรับการจัดการจราจรโดยรวมสำหรับทางแยกที่มีการควบคุมการจราจรด้วยสัญญาณไฟจราจรของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 พบว่าวิธีการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลาทำให้ได้รับผลลัพธ์การปรับปรุงดีขึ้นในระดับที่เหมาะสมทั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน โดยสามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ปรับปรุงมีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมของยานพาหนะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจราจรปัจจุบัน 4,214 วินาที/คัน หรือ 11.14% โดยนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 น. และ 18.00-19.59 น.) มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 769.87 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 13.03 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00 น.) ระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 119 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 3.29



ภาพที่ 42 ผลลัพธ์ตามช่วงเวลาหลังปรับปรุงด้วยค่าเฉลี่ยแวลคอยสูงสุด



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบผลลัพธ์การปรับปรุงความยาวแถวคอยเฉลี่ย



ภาพที่ 44 จำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าและออกหลังการปรับปรุง



ภาพที่ 45 เปรียบเทียบผลลัพธ์จำนวนยานพาหนะเข้า-ออก

ภาพที่ 44 ถึง 45 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบผลลัพธ์ปัจจุบันและผลลัพธ์ที่ปรับปรุงแล้วสำหรับแต่ละทางแยก สามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ด้านจำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนที่ออกจากทางแยก หมายเลข 3 และ 4 รวมกัน ด้วยวิธีการชดเชยด้วยค่าเฉลี่ยของแถวคอยมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อ

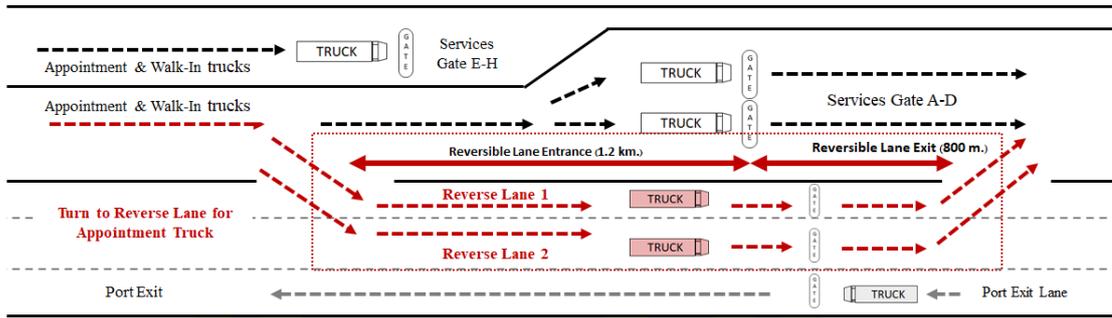
เปรียบเทียบกับจราจรปัจจุบัน 207 คัน หรือร้อยละ 15.65 ดีขึ้นมากกว่าที่คาดไว้ 10% โดยนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีปริมาณยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกเพิ่มขึ้น 88 คัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.76 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีปริมาณยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกเพิ่มขึ้น 119 คัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.27

นโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส

การจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส (Reversible lane) ถือเป็นรูปแบบหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากความจุของพื้นที่ถนนสูงที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มจำนวนช่องจราจรให้กับทิศทางที่มีปริมาณการจราจรจำนวนมากและไม่มีมีการตัดกันของกระแสจราจร การจัดช่องจราจรแบบสวนกระแสเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกรณีที่ปริมาณจราจรทั้ง 2 ทิศทางมีความหนาแน่นแตกต่างกันในสัดส่วน 70/30, 65/35 หรือ 60/30 ดังนั้นการนำแนวคิดช่องจราจรแบบสวนกระแสมาใช้จะทำให้เกิดวิธีการบริหารประตูทางเข้าท่าเรือแบบใหม่ โดยคำนึงถึงปริมาณการจราจรขาเข้าและขาออกจากท่าเรือที่ไม่สมดุล Liu et al. (2023)

เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดของช่องจราจรแบบสวนกระแส ค่าสัมประสิทธิ์การเข้าแถวคอยที่ไม่สมดุลถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อวัดสถานะการเข้าแถวคอยที่ประตูทางเข้าท่าเรือเพื่อหาเงื่อนไขว่า RL ควรเปลี่ยนทิศทางการจราจรเมื่อใด โดยค่าดังกล่าวแสดงด้วยตัวแปร CR (Congestion ratio) หมายถึงอัตราส่วนของความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออก โดยเมื่อค่า CR ถึงค่าที่กำหนดซึ่งกำหนดเป็นค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์การเข้าคิวที่ไม่สมดุล แทนด้วยตัวแปร CR^* ช่องจราจรจะเปลี่ยนเป็นทิศทางตรงกันข้าม โดยมีเงื่อนไขว่าจะต้องไม่มียานพาหนะใช้งานในช่องจราจรดังกล่าว

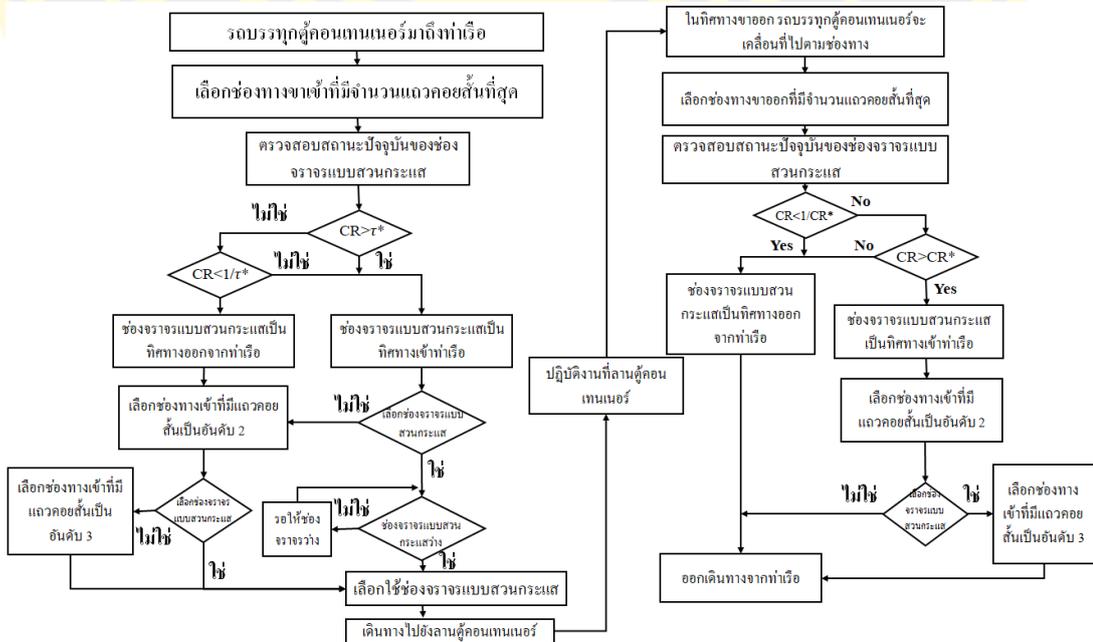
อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันปัญหาการเปลี่ยนทิศทางบ่อยครั้งในการทำงานจริง โดยมีวิธีการจัดการทิศทางการจราจรของ RL ได้ดังนี้ 1) เปลี่ยนทิศทางช่องจราจรที่กำหนดเป็นทิศทางขาเข้าเมื่อ $CR > CR^*$, 2) เปลี่ยนทิศทางช่องจราจรที่กำหนดเป็นทิศทางขาออกเมื่อ $CR < 1/CR^*$ และ 3) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของช่องจราจรเมื่อ $1/CR^* \leq CR \leq CR^*$ ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่ศึกษาสำหรับเส้นทางออกจากท่าเรือแหลมฉบังของประเทศไทยพบว่าปัจจุบันมีช่องจราจรสำหรับยานพาหนะขออกรถจำนวน 2 เส้นทางที่มีความเป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนเส้นทางสวนกระแส ปัจจุบันทางท่าเรือไม่มีการกำหนดนโยบายการใช้ช่องจราจรแบบสวนกระแส ข้อเสนอแนะของเจ้าหน้าที่ของท่าเรือจะพบว่าการดำเนินการช่องจราจรสวนทิศทางสามารถทดลองใช้ได้จำนวน 2 ช่องจราจร (เปิดพร้อมกัน) และกำหนดให้บริการเฉพาะรถบรรทุกที่มี การนัดหมายเวลาเท่านั้น



ภาพที่ 46 การดำเนินงานด้วยนโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส

หลักการทำงานของแบบจำลองนโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส

ตามขั้นตอนการปฏิบัติงานเมื่อรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์เข้ามายังท่าเรือจะทำการตรวจสอบสถานะของการเปิดใช้งาน ของช่องจราจรแบบสวนกระแส โดยหากอัตราส่วนของความยาวแถวคอยเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออก (CR) มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์การเข้าคิวที่ไม่สมดุล (CR*) จะทำการเปิดใช้งานช่องจราจรแบบสวนกระแสเป็นทิศทางขาเข้าท่าเรือ แต่หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้น ช่องจราจรแบบสวนกระแสจะไม่เปิดใช้ แสดงดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 หลักการเปลี่ยนแปลงทิศทางจราจรของช่องจราจรแบบสวนกระแส

การกำหนดชุดข้อมูลตัวแปรตัดสินใจเริ่มต้นของช่องจราจรแบบสวนกระแส

การเริ่มต้นกระบวนการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการเมตาฮีริสติกต้องมีการกำหนดค่าตัวแปรตัดสินใจทั้ง 4 ตัว (n_{in} , n_{out} , n_{RL} , and CR^*) เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับตัวแปรการตัดสินใจ จะส่งผลให้เกิดกระบวนการทำงานที่เกี่ยวข้องกับประตูท่าเรือ 2 ส่วนได้แก่ ปริมาณยานพาหนะที่เข้าสู่ท่าเรือและออกจากท่าเรือ โดยจำนวนเริ่มต้นของช่องจราจรแบบสวนกระแสจะไม่ถูกเปิดใช้งานหรือกำหนดค่าเป็นศูนย์ ค่าวิกฤตเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์การเข้าคิวที่ไม่สมดุล CR^* จะถูกกำหนดเป็น 3 ค่า ได้แก่ 2.33 (สัดส่วน 70:30), 1.85 (สัดส่วน 65:35) และ 1.50 (สัดส่วน 60:40) โดยข้อมูลตัวแปรตัดสินใจทั้ง 4 ตัวจะถูกกำหนดเป็นชุดของข้อมูลสำหรับการแก้ไขปัญหา โดยที่สามารถกำหนดตัวแปรการตัดสินใจ 4 ตัวเบื้องต้นได้ดังนี้ $u_{(0)} = (n_{in(0)}, n_{out(0)}, 0, CR^*_{(0)})$ โดยมีค่าจำกัดความของพารามิเตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 47

ตารางที่ 47 ตัวแปรของสมการกำหนดนโยบายการจราจรแบบสวนกระแส

ตัวแปร	ความหมาย
n_{in}	ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ
n_{out}	ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ
n_{RL}	จำนวนช่องทางเดินรถย้อนกลับ
CR	อัตราส่วนความยาวคิวเฉลี่ยขาเข้าและขาออก
CR^*	ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต
N	ช่องจราจรทั้งหมด
i	หมายเลขช่องทางเดินรถที่ทางเข้าท่าเทียบเรือตู้คอนเทนเนอร์

โดยการทดลองจะดำเนินการปรับเปลี่ยนชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสจำนวน 4 ตัวได้แก่ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}), 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}), 3) จำนวนช่องทางเดินรถสวนกระแส (n_{RL}) และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) โดยจำกัดให้ผลรวมของจำนวนช่องจราจรในทิศทางขาออก, ทิศทางขาเข้าและช่องจราจรแบบสวนกระแสที่เปิดใช้มีจำนวนเป็นค่าคงที่และมีจำนวนไม่สูงเกินกว่าจำนวนช่องจราจรที่ปรากฏ ค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลที่ต้องมีค่าเป็นบวกและถูกกำหนดเป็น 3 ค่า ได้แก่ 2.33 (สัดส่วน 70:30), 1.85 (สัดส่วน 65:35) และ 1.50 (สัดส่วน 60:40) (Wang et al., 2022) การทดลองจะแบบการประมวลผลผลลัพธ์ออกเป็น 7

สถานการณ์ เพื่อปรับเปลี่ยนชุดของตัวแปรที่แตกต่างกัน ดำเนินการวัดผลลัพธ์ด้านระยะเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฐาน โดยมีรายละเอียดในแต่ละสถานการณ์ที่ทำการทดลอง ดังนี้

สถานการณ์ที่ 0 เป็นสถานการณ์ที่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนของกระบวนการปัจจุบันที่ไม่ได้มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ ดังนั้นสถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสดังนี้ 1)

ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}) เท่ากับ 3, 3) จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 0 และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 0 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น $u_{(0)} = (4, 3, 0, 0)$

สถานการณ์ที่ 1 เป็นสถานการณ์ที่มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ โดยทำการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 1 ช่อง และปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 2.33 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวแถวคอยเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออกในสัดส่วน 70:30 ดังนั้น

สถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแส ดังนี้ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}) เท่ากับ 2, 3) จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 1 และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 2.33 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น $u_{(1)} = (4, 2, 1, 2.33)$

สถานการณ์ที่ 2 เป็นสถานการณ์ที่มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ โดยทำการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 1 ช่อง และปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 1.85 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวแถวคอยเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออกในสัดส่วน 65:35 ดังนั้น

สถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแส ดังนี้ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}) เท่ากับ 2, 3) จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 1 และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 1.85 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น $u_{(2)} = (4, 2, 1, 1.85)$

สถานการณ์ที่ 3 เป็นสถานการณ์ที่มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ โดยทำการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 1 ช่อง และปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 1.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวแถวคอย

เฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออกในสัดส่วน 60:40 ดังนั้น สถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแส ดังนี้ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}) เท่ากับ 2, 3) จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 1 และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 1.5 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น $u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$

สถานการณ์ที่ 4 เป็นสถานการณ์ที่มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ โดยทำการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 2 ช่อง และปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 2.33 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวแถวคอยเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออกในสัดส่วน 70:30 ดังนั้น สถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแส ดังนี้ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}) เท่ากับ 1, 3) จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 2 และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 2.33 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น $u_{(4)} = (4,1,2,2.33)$

สถานการณ์ที่ 5 เป็นสถานการณ์ที่มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ โดยทำการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 2 ช่อง และปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 1.85 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวแถวคอยเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออกในสัดส่วน 65:35 ดังนั้น สถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแส ดังนี้ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ (n_{out}) เท่ากับ 1, 3) จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 2 และ 4) ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 1.85 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น $u_{(5)} = (4,1,2,1.85)$

สถานการณ์ที่ 6 เป็นสถานการณ์ที่มีการนำแนวทางการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแสเข้ามาใช้ โดยทำการกำหนดช่องจราจรแบบสวนกระแสไว้ที่ 2 ช่อง และปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์แถวคอยที่ไม่สมดุลอย่างวิกฤตให้เท่ากับ 1.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวแถวคอยเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออกในสัดส่วน 60:40 ดังนั้น สถานการณ์จึงกำหนดชุดของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการช่องจราจรแบบสวนกระแส ดังนี้ 1) ช่องทางรถบรรทุกที่เข้าท่าเรือ (n_{in}) เท่ากับ 4, 2) ช่องทางรถบรรทุกที่ออกจากท่าเรือ

(n_{out}) เท่ากับ 1, 3. จำนวนช่องทางเดินสวนกระแส (n_{RL}) เท่ากับ 2 และ 4. ค่าสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลง่ายวิกฤต (CR^*) เท่ากับ 1.5 โดยสามารถกำหนดชุดตัวแปรในสถานการณ์ได้เป็น

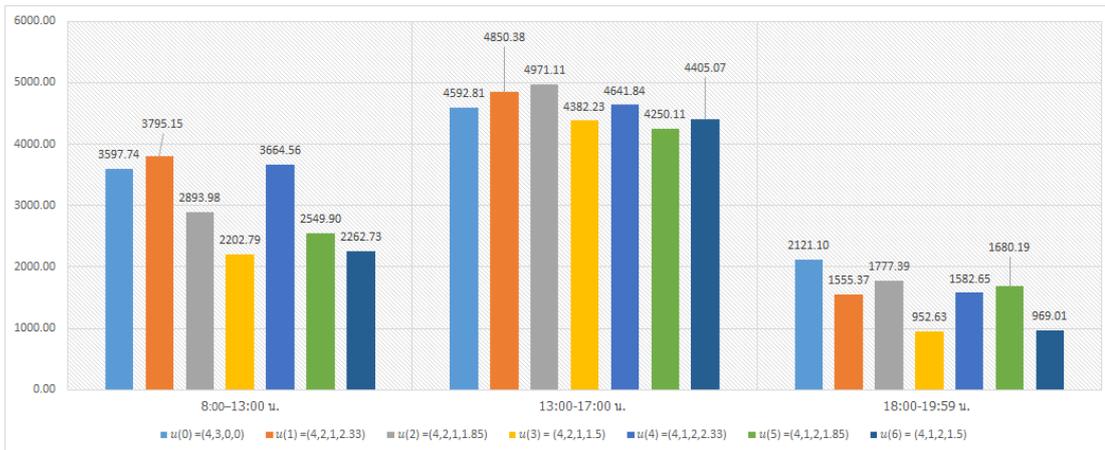
$$u_{(6)} = (4,1,2,1.5)$$

สรุปผลแนวทางการปรับปรุงการจัดการจราจรแบบสวนกระแส

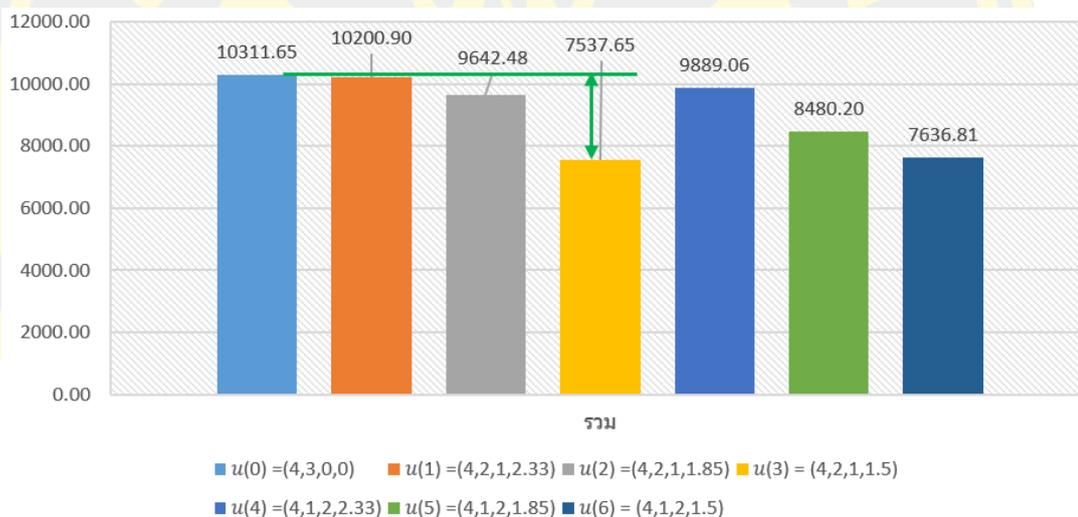
สำหรับประตูตรวจสอบหมายเลข 1 ผู้เขียนนำผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยเทคนิค 1-Way MANOVA มาใช้ กล่าวคือปัจจัยจำนวนช่องจราจรเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแออัดของการจราจรที่ประตูตรวจสอบหมายเลข 1 งานวิจัยนี้จึงได้นำปัจจัยดังกล่าวมาใช้เพื่อกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการกำหนดนโยบายการจราจรแบบสวนกระแส สถานการณ์สำหรับการจำลองแต่ละรูปแบบได้รับการออกแบบมาเพื่อให้เข้าใจถึงความเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลการดำเนินงานปัจจุบันจากแบบจำลองฐาน ในด้านระยะเวลาการรอคอยและจำนวนแถวคอยเฉลี่ยที่ประตูทางเข้าท่าเรือ โดยสามารถสรุปผลลัพธ์การทดลองดังตารางที่ 48

ตารางที่ 48 ผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ย

ทิศทางการจราจร	08:00-08:59	09:00-09:59	10:00-10:59	11:00-11:59	12:00-12:59	13:00-13:59
$u_{(0)} = (4,3,0,0)$	570.00	543.16	690.42	672.59	1121.58	1062.18
$u_{(1)} = (4,2,1,2.33)$	607.69	597.50	693.90	697.03	1199.03	1248.68
$u_{(2)} = (4,2,1,1.85)$	222.55	189.81	327.52	778.69	1375.41	1355.63
$u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$	177.10	184.12	319.96	666.30	855.32	1054.10
$u_{(4)} = (4,1,2,2.33)$	555.61	549.17	677.08	705.48	1177.23	1139.37
$u_{(5)} = (4,1,2,1.85)$	202.19	175.56	312.43	670.49	1189.24	1056.05
$u_{(6)} = (4,1,2,1.5)$	214.02	194.77	281.00	647.79	925.15	1118.24
ทิศทางการจราจร	14:00-14:59	15:00-15:59	16:00-16:59	17:00-17:59	18:00-18:59	19:00-19:59
$u_{(0)} = (4,3,0,0)$	1055.64	1228.33	1246.66	662.71	719.39	739.00
$u_{(1)} = (4,2,1,2.33)$	1222.56	1259.81	1119.33	704.03	668.72	182.62
$u_{(2)} = (4,2,1,1.85)$	1420.56	1301.62	893.30	724.59	703.46	349.34
$u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$	1245.78	1267.08	815.27	290.80	449.03	212.80
$u_{(4)} = (4,1,2,2.33)$	1205.64	1117.92	1178.92	654.33	698.35	229.98
$u_{(5)} = (4,1,2,1.85)$	1237.69	1186.48	769.89	678.46	709.49	292.24
$u_{(6)} = (4,1,2,1.5)$	1239.57	1243.52	803.74	253.77	404.16	311.08



ภาพที่ 48 ระยะเวลาการคอยเฉลี่ยต่อยานพาหนะใน 3 ช่วงเวลา



ภาพที่ 49 ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการคอยเฉลี่ย

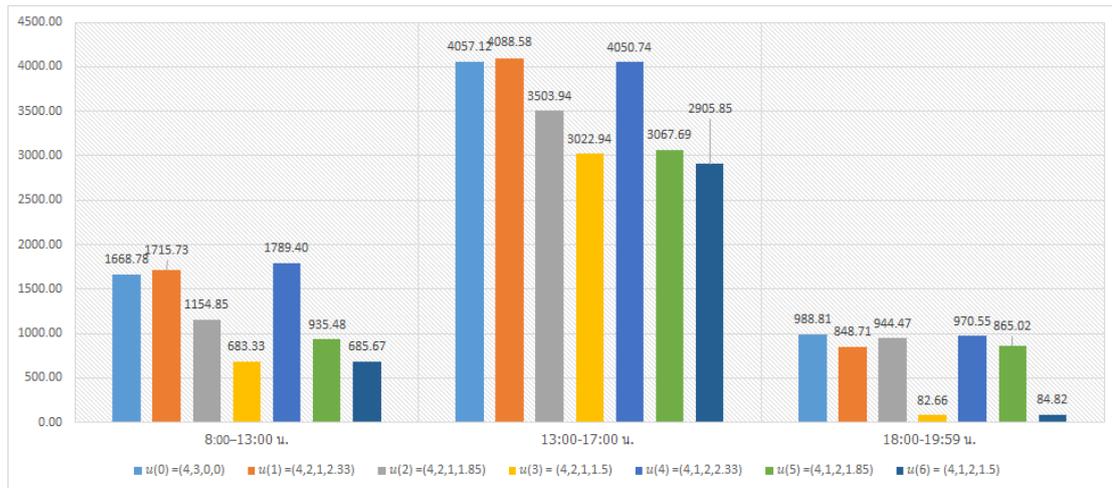
ตารางที่ 48 แสดงผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านระยะเวลาการคอยเฉลี่ย โดยการกำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการ 6 สถานการณ์ ($u_{(1)} - u_{(6)}$) โดยกำหนดให้ $u_{(0)}$ เป็นตัวแทนของกระบวนการทำงานในปัจจุบัน แบ่งช่วงเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลออกเป็น 12 ช่วงเวลา (08.00-20.00) โดยพบว่าผลลัพธ์ของการจำลองสถานการณ์ที่ 3 หรือ $u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$ เป็นแนวทางการดำเนินงานที่ได้ผลลัพธ์ด้านระยะเวลาการคอยเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 7537.65 วินาที/คัน โดยหากพิจารณาแบ่งตามช่วงเวลาพบว่านอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีระยะเวลาการคอยเฉลี่ยรวมลดลง 2563.42 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 44.82

ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 210.58 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 4.58

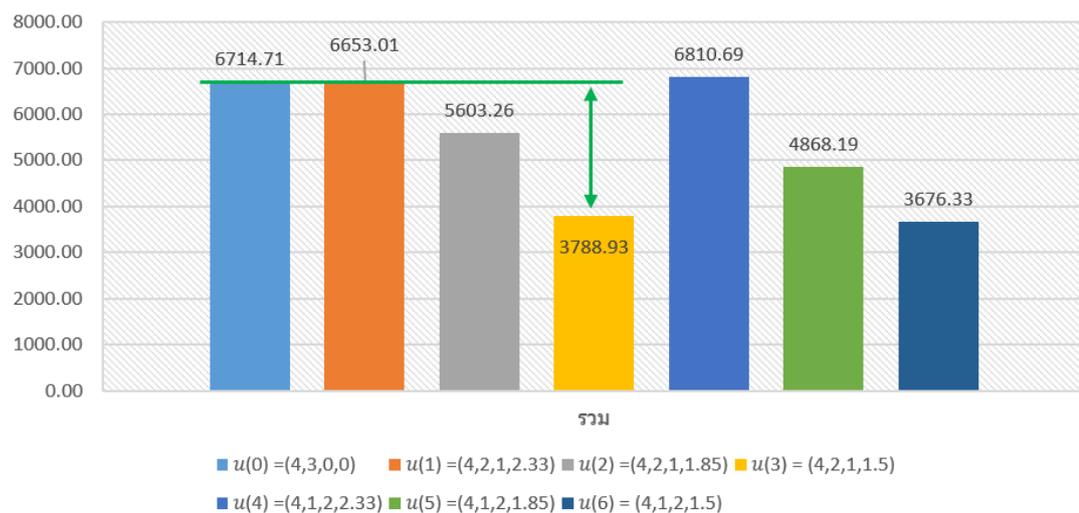
ภาพที่ 49 และ 50 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบผลลัพธ์ปัจจุบันและผลลัพธ์ที่ปรับปรุงแล้วสำหรับแต่ละสถานการณ์ สามารถสรุปได้ว่าระยะเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะจะถึงค่าต่ำสุดเมื่อตัวแปรการตัดสินใจ $u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$ กล่าวคือมีการกำหนดประตูขาเข้าจำนวน 4 ประตู, ประตูสำหรับยานพาหนะทิศทางออกจากท่าเรือจำนวน 2 ประตู, ช่องจราจรแบบสวนกระแสมีการเปิดใช้จำนวน 1 ช่องจราจรและมีค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลคือ 1.5 (สัดส่วน 60:40) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเริ่มต้น $u_{(0)} = (4,3,0,0)$

ตารางที่ 49 ผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านความยาวแถวคอยเฉลี่ย (เมตร)

ทิศทางการจราจร	08:00-08:59	09:00-09:59	10:00-10:59	11:00-11:59	12:00-12:59	13:00-13:59
$u_{(0)} = (4,3,0,0)$	130.17	264.69	404.74	508.70	360.47	805.82
$u_{(1)} = (4,2,1,2.33)$	141.95	252.30	409.22	558.06	354.20	877.33
$u_{(2)} = (4,2,1,1.85)$	21.52	27.73	44.34	640.82	420.44	927.77
$u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$	18.55	23.11	41.63	544.14	55.90	756.93
$u_{(4)} = (4,1,2,2.33)$	138.46	269.12	399.24	567.21	415.38	809.84
$u_{(5)} = (4,1,2,1.85)$	16.64	25.48	38.22	499.17	355.98	775.08
$u_{(6)} = (4,1,2,1.5)$	17.24	27.20	35.36	567.03	38.83	782.22
ทิศทางการจราจร	14:00-14:59	15:00-15:59	16:00-16:59	17:00-17:59	18:00-18:59	19:00-19:59
$u_{(0)} = (4,3,0,0)$	1151.48	1074.13	1025.70	549.29	295.77	143.75
$u_{(1)} = (4,2,1,2.33)$	1072.55	1046.17	1092.53	556.05	273.70	18.95
$u_{(2)} = (4,2,1,1.85)$	1342.94	1072.31	160.93	615.49	310.27	18.71
$u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$	1049.15	1062.75	154.11	38.76	32.14	11.76
$u_{(4)} = (4,1,2,2.33)$	1130.01	1006.15	1104.73	641.22	302.26	27.07
$u_{(5)} = (4,1,2,1.85)$	1195.30	949.60	147.70	565.63	280.81	18.58
$u_{(6)} = (4,1,2,1.5)$	1053.66	920.72	149.25	34.80	32.25	17.77



ภาพที่ 50 ความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรใน 3 ช่วงเวลา



ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงความยาวแถวคอยเฉลี่ย

ตารางที่ 49 แสดงผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรโดยการกำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการ 6 สถานการณ์ ($u_{(1)} - u_{(6)}$) โดยกำหนดให้ $u_{(0)}$ เป็นตัวแทนของกระบวนการทำงานในปัจจุบัน แบ่งช่วงเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลออกเป็น 12 ช่วงเวลา (08.00-20.00) โดยพบว่าผลลัพธ์ของการจำลองสถานการณ์ที่ 3 หรือ $u_{(3)} = (4,2,1,1.5)$ เป็นแนวทางการดำเนินงานที่ได้ผลลัพธ์ด้านความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรต่ำที่สุดที่ 3788.93 เมตร/ช่องจราจร กล่าวคือมีการกำหนดประตูขาเข้าจำนวน 4 ประตู,

ประตูสำหรับยานพาหนะทิศทางออกจากท่าเรือจำนวน 2 ประตู, ช่องจราจรแบบสวนกระแส มีการเปิดใช้จำนวน 1 ช่องจราจรและมีค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลคือ 1.5 (สัดส่วน 60:40) โดยหากพิจารณาแบ่งตามช่วงเวลาพบว่านอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรรวมลดลง 1891.60 เมตร หรือลดลงร้อยละ 71.18 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรรวมลดลง 1034.18 เมตร หรือลดลงร้อยละ 25.49



บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

การวิจัยนี้ได้ทำการประเมินการประเมินประสิทธิภาพการบริหารจัดการความแออัดของท่าเรือคอนเทนเนอร์โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค นำแบบภูมิสารสนเทศซ้อนทับชั้นข้อมูลของสถานที่สำคัญ เช่น โครงข่ายถนน ลักษณะทางกายภาพเพื่อนำมาใช้ในจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของโครงข่ายเส้นทางที่มุ่งหน้าเข้าสู่ท่าเรือแหลมฉบังและพื้นที่โดยรอบ การวิเคราะห์แนวทางการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลาและนโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส โดยได้สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

สรุปผลลัพธ์การประเมินปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือแหลมฉบัง

ในการประเมินปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดของท่าเรือแหลมฉบังรถบรรทุกในท่าเรือแหลมฉบัง งานวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลโดยการเก็บข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามและข้อมูลที่รวบรวมโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับท่าเรือแหลมฉบัง นำข้อมูลที่ได้มาจำลองด้วยโปรแกรม Simulation of Urban MObility (SUMO) ผ่านฐานข้อมูลภูมิศาสตร์สารสนเทศ QGIS รุ่น 3.16.2 เพื่อจำลองการไหลของกระแสจราจรของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าสู่ท่าเรือ ทบทวนวรรณกรรมจากแหล่งข้อมูลทั้งภายในและระหว่างประเทศเพื่อกำหนดปัจจัยทั้งหมด 8 ปัจจัยได้แก่ 1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร 2) ปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า 3) รอบสัญญาณไฟจราจร 4) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู 5) ขนาดพื้นที่จอดรถ 6) การกำหนดประเภทช่องจราจร 7) ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง และ 8) ทิศทางของช่องจราจร วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (MANOVA) ผ่านโปรแกรมวิเคราะห์สถิติ XLSTAT

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนของเวลารอคอยเฉลี่ยและความยาวแถวคอยเฉลี่ยในเส้นทางมุ่งหน้าเข้าสู่ประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 ได้แก่ รอบสัญญาณไฟจราจร โดยหากยิ่งปัจจัยที่นำมาทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (P-value) มากเท่าไรจะส่งผลให้มีความแตกต่างจากแบบจำลองฐานสูงขึ้นไปด้วย โดยสามารถเรียงลำดับจากความแตกต่างของค่า P ได้แก่ 1) รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C), 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A), 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D), 4) ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 5) ทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย

H) สำหรับประตูดตรวจสอบหมายเลข 1 สามารถเรียงลำดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความความแออัด จากค่าน้อยไปหามากได้ดังนี้ 1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (Factor A), 2) ปัจจัยระดับการนัดหมาย ล่วงหน้า (Factor B) 3) ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (Factor D) และ 4) การกำหนด ประเภทช่องจราจร (Factor F) อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลลัพธ์ด้านระยะเวลารอคอยเฉลี่ยและความ ยาวแถวคอยเฉลี่ย ในช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกเวลาเร่งด่วนเป็นผลลัพธ์ที่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น จึงสามารถนำการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (MANOVA) มาวิเคราะห์ปัจจัยแบบรายคู่ เพื่อหาคู่ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดได้ สำหรับประตูดตรวจสอบหมายเลข 1 พบว่า ผลลัพธ์การทดสอบด้วยวิธีการของ Wilks เพื่อตัดสินว่าแต่ละคู่ปัจจัยส่งผลการตอบสนองที่ แตกต่างกันพบหลักฐานที่สำคัญสำหรับการโต้ตอบ 3 คู่ได้แก่ 1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ปัจจัยระดับการนัดหมายล่วงหน้า (ปัจจัย B) 2) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) และ 3) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ การกำหนดประเภทช่องจราจร (ปัจจัย F) โดยการจับคู่ของปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดในทุก ตัวแปรการโต้ตอบ โดยผลรวมค่า Eigen ของความยาวแถวคอยมีการโต้ตอบของคู่ปัจจัยทั้งหมด เท่ากับ 0.007101 และเวลารอคอยโดยเฉลี่ยมีความแตกต่างน้อยที่สุดในปัจจัยส่วนใหญ่เท่ากับ 6.6159 สำหรับประตูดตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 พบหลักฐานที่สำคัญสำหรับการโต้ตอบ 4 คู่ได้แก่ 1) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ รอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C) 2) ปัจจัย จำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ความสามารถในการดำเนินงานของประตู (ปัจจัย D) 3) ปัจจัย จำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และ ประเภทของยานพาหนะที่วิ่งร่วมในเส้นทาง (ปัจจัย G) และ 4) ปัจจัยจำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และทิศทางของช่องจราจร (ปัจจัย H) โดยการจับคู่ของปัจจัย จำนวนช่องจราจร (ปัจจัย A) และรอบสัญญาณไฟจราจร (ปัจจัย C) ถือเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญสูง ที่สุดในทุกตัวแปรการโต้ตอบ ผลรวมค่า Eigen ของความยาวแถวคอยมีการโต้ตอบของคู่ปัจจัย ทั้งหมดเท่ากับ 0.000565 และเวลารอคอยโดยเฉลี่ยมีความแตกต่างน้อยที่สุดในปัจจัยส่วนใหญ่ เท่ากับ 4.3176

สรุปผลลัพธ์แนวทางการการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลา

เพื่อเพิ่มปริมาณยานพาหนะที่ออกจากทางแยกที่มีการควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรให้ มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จำเป็นต้องควบคุมให้กระแสการไหลของจราจรเป็นไปอย่างเป็นระเบียบ โดยพยายามลดจำนวนยานพาหนะที่เกิดแถวคอยในบริเวณทางแยก เปิดโอกาสให้ยานพาหนะ สามารถเลี้ยวข้ามทางแยกได้อย่างสะดวกโดยไม่เกิดแถวคอยกีดขวางในทางแยก ในขั้นตอนเริ่มต้น ข้อมูลปริมาณการจราจรจะถูกรวบรวมจากการประสานงานของยานพาหนะที่มีบริเวณทางแยก แถวคอยเริ่มต้นสามารถกำหนดเป็นแถวคอยปัจจุบันบวกกับยานพาหนะที่เพิ่มเข้าไปในความยาว

แถวคอยจากทางแยกก่อนหน้า สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพจะดำเนินการที่ทางแยกของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 เพื่อทดสอบขั้นตอนวิธีการดำเนินงานและแนวทางการใช้วิธีการชดเชยเวลาเพื่อเลื่อนเวลาให้ไฟเขียวตอบสนองความต้องการของแถวคอยทั้งหมดของแถวคอยปัจจุบันแล้วแถวคอยก่อนหน้าที่มีพฤติกรรมแบบทางแยกประสานสัมพันธ์ ผลการวิเคราะห์สำหรับการจัดการจราจรโดยรวมสำหรับทางแยกที่มีการควบคุมการจราจรด้วยสัญญาณไฟจราจรของประตูตรวจสอบหมายเลข 3 และ 4 พบว่าวิธีการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลาทำให้ได้รับผลลัพธ์การปรับปรุงดีขึ้นในระดับที่เหมาะสมทั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน สามารถปรับปรุงระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมของยานพาหนะให้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจราจรปัจจุบัน 4,214 วินาที/คัน หรือ 11.14% ดีขึ้นมากกว่าที่คาดหวังไว้ 10% โดยนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 769.87 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 13.03 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 119 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 3.29 ผลลัพธ์ด้านจำนวนยานพาหนะที่เคลื่อนที่ออกจากทางแยกหมายเลข 3 และ 4 รวมกันมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจราจรปัจจุบัน 207 คัน หรือร้อยละ 15.65 ดีขึ้นมากกว่าที่คาดหวังไว้ 10% โดยนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีปริมาณยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกเพิ่มขึ้น 88 คัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.76 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีปริมาณยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากทางแยกเพิ่มขึ้น 119 คัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.27 สอดคล้องกับ Grubisic et al. (2020) และ (Passos & Rossetti, 2010) ที่กล่าวถึงการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมต่อปริมาณยานพาหนะในเส้นทาง โดยหากสามารถกำหนดรอบสัญญาณไฟจราจรที่มีความเป็นพลวัตตามกระแสจราจรจะส่งผลให้สามารถลดปัญหาการจราจรที่ติดขัดในเส้นทางได้

สรุปผลลัพธ์นโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส

เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดของช่องจราจรแบบสวนกระแส ค่าสัมประสิทธิ์การเข้าแถวคอยที่ไม่สมดุลถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อวัดสถานะการเข้าแถวคอยที่ประตูทางเข้าท่าเรือเพื่อหาเงื่อนไขว่าช่องจราจรแบบสวนกระแสควรเปลี่ยนทิศทางการจราจรเมื่อใด โดยค่าดังกล่าวแสดงด้วยตัวแปร CR (Congestion ratio) หมายถึงอัตราส่วนของความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาเข้าหารด้วยความยาวคิวเฉลี่ยในทิศทางขาออก โดยเมื่อค่า CR ถึงค่าที่กำหนดซึ่งกำหนดเป็นค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์การเข้าคิวที่ไม่สมดุล แทนด้วยตัวแปร CR* ช่องจราจรจะเปลี่ยนเป็นทิศทางตรงกันข้าม โดยมีเงื่อนไขว่าจะต้องไม่มียานพาหนะใช้งานในช่องจราจรดังกล่าว ผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ด้านระยะเวลารอคอยเฉลี่ย โดยการกำหนดแนวทางการปรับปรุง

กระบวนการ 6 สถานการณ์ ($u(1) - u(6)$) โดยกำหนดให้ $u(0)$ เป็นตัวแทนของกระบวนการทำงานในปัจจุบัน แบ่งช่วงเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลออกเป็น 12 ช่วงเวลา (08.00-20.00) โดยพบว่าผลลัพธ์ของการจำลองสถานการณ์ที่ 3 หรือ $u(3) = (5,2,1,1.5)$ กลางคือเป็นแนวทางการดำเนินงานที่ได้ผลลัพธ์ด้านระยะเวลารอคอยเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 3375.34 วินาที/คัน โดยหากพิจารณาแบ่งตามช่วงเวลาพบว่านอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 1645.49 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 47.74 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยรวมลดลง 121.67 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 7.17 สอดคล้องกับระยะเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะจะถึงค่าต่ำสุดเมื่อตัวแปรการตัดสินใจ $u = (5,2,1,1.5)$ กล่าวคือมีค่าวิกฤตของสัมประสิทธิ์คิวที่ไม่สมดุลคือ 1.5 (สัดส่วน 60:40) และมีช่องจราจรแบบสวนกระแสจำนวน 1 ช่องทาง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเริ่มต้น $u = (5,3,0,0)$ แนวทางที่นำเสนอสามารถลดระยะเวลารอคอยเฉลี่ย 1,767.16 วินาทีต่อคันหรือร้อยละ 34.36 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการจำลองสถานการณ์ที่ 3 หรือ $u(3) = (5,2,1,1.5)$ เป็นแนวทางการดำเนินงานที่ได้ผลลัพธ์ด้านความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรต่ำที่สุดที่ 3375.34 วินาทีต่อคัน โดยหากพิจารณาแบ่งตามช่วงเวลาพบว่านอกช่วงเวลาเร่งด่วน (08.00-13.00 และ 18.00-19.59) มีความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรรวมลดลง 166.39 วินาที/คัน หรือลดลงร้อยละ 72.40 ในเวลาเร่งด่วน (13.00-17.00) มีความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรรวมลดลง 55.17 วินาทีต่อคัน หรือลดลงร้อยละ 23.98 และสามารถลดความยาวแถวคอยเฉลี่ยต่อช่องจราจรรวมได้ 221.55 เมตรต่อช่องจราจรหรือร้อยละ 48.18 สอดคล้องกับ Zhao (2015) และ Wang et al. (2018) Zhao (2015) และ Wang et al. (2018) ที่พบว่าการจัดสรรช่องจราจรที่เหมาะสมด้วยวิธีการเปิดช่องจราจรแบบสวนกระแสจะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถการดำเนินงานที่ประตูตรวจสอบและช่วยให้ท่าเรือสามารถจัดระเบียบและบรรเทาความแออัดที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งนี้

1. จากการศึกษาการประเมินความแออัดของท่าเรือแหลมฉบังพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดที่เกิดขึ้นที่ท่าเรือแหลมฉบังมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับปัญหาที่พบได้ในท่าเรือสำคัญของประเทศต่าง ๆ โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแออัดด้วยแบบจำลองสถานการณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติสามารถช่วยให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบของแนวทางการวิเคราะห์

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดำเนินงานด้านการจราจรให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เพื่อใช้ในการบริหารจัดการการจราจรในพื้นที่อื่นหรือในรูปแบบระบบการจราจรที่แตกต่างกันไป เช่น การจราจรในวงเวียนและการจราจรบริเวณด้านเก็บค่าผ่านทางได้

2. การวิเคราะห์แนวทางการการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรด้วยวิธีการชดเชยเวลา เป็นวิธีการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายเส้นทางหรือทางแยกที่มีการควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการดังกล่าวเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้สำหรับเส้นทางที่มีความเป็นพลวัตสูง ผู้บริหารท่าเรือหรือผู้เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยไปวางแผนเพื่อพัฒนาหรือขยายเส้นทางให้สามารถรองรับกระแสการจราจรได้ในทิศทางที่เพิ่มสูงขึ้นได้อย่างเหมาะสมต่อไป

3. นโยบายการจัดช่องจราจรแบบสวนกระแส ผลการดำเนินการได้นำเสนอความแตกต่างโดยการกำหนดตัวแปรความแออัดที่ใช้สำหรับการบ่งบอกความแตกต่างระหว่างปริมาณยานพาหนะที่เคลื่อนที่สวนทิศทางกัน วิธีการดังกล่าวจะสามารถช่วยให้ท่าเรือแหลมฉบังสามารถเพิ่มอัตราผลิตภาพของการใช้ประตูตรวจสอบในทิศทางขาออกได้มากขึ้น

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

งานวิจัยนี้ศึกษาความแออัดที่เกิดขึ้นที่ท่าเรือแหลมฉบังและพื้นที่โดยรอบ โดยให้ความสำคัญกับรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ที่เข้าสู่บริเวณท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี การนำเสนอผลลัพธ์ด้านปัจจัยความแออัดอาจมีความแตกต่างกับพื้นที่อื่น ๆ เมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ควรมีการศึกษาปัจจัยมีความเฉพาะของแต่ละพื้นที่หรือสภาพทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกัน ควรมีการศึกษารายละเอียดของการจัดการภายในท่าเทียบเรือแต่ละท่า เพื่อให้สามารถได้รับข้อมูลด้านปัจจัยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การทราบข้อมูลดังกล่าวจะช่วยให้ผู้บริหารท่าเรือหรือผู้เกี่ยวข้องพิจารณาวางแผนบริหารจัดการพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินในท่าเรือแหลมฉบังได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นต่อไป

ในอนาคตอาจมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบจัดเก็บตู้คอนเทนเนอร์แบบช่องสูงที่แบบใหม่ที่เรียกว่า Boxbay จากมุมมองของประสิทธิภาพการทำงานและการใช้พลังงานสำหรับนำมาใช้กำหนดนโยบายควบคุมที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงปริมาณงานและลดการใช้พลังงานภายในท่าเรือของประเทศไทยในอนาคต อีกทั้งอุปสรรคที่สำคัญและอาจตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของแก้ไขความแออัดของท่าเรือแหลมฉบังคือความเข้มงวดของการบังคับใช้วิธีการแก้ไขปัญหา โดยจำเป็นต้องมีการกำหนดแนวทางการบังคับใช้ร่วมกันตั้งแต่พนักงานในระดับปฏิบัติการไปจนถึงระดับบริหาร เพื่อให้ทิศทางการกำหนดนโยบายและทัศนคติของคณะทำงานเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ประเมินและจัดทำระยะดำเนินการที่ชัดเจนและเหมาะสม รวมถึงการประชาสัมพันธ์เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทราบอย่างชัดเจนต่อไป

บรรณานุกรม

- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2546). การวิเคราะห์สถิติ: สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย (พิมพ์ครั้งที่ 7 ed.). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร และไพโรจน์ เร้าธนชกุล. (2567). การวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณไฟจราจรและระบบการจัดแถวคอยการเข้าประตูตรวจสอบของรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ ณ ท่าเรือแหลมฉบัง, *Silpakorn University e-Journal (Social Sciences, Humanities, and Arts)*, 44(1), 43-55.
- ธีรรัตน์ อินดี และจำรัส พิทักษ์ศฤงคาร. (2564). การวิเคราะห์ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบผสมผสาน โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค : กรณีศึกษา ด้านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 38(1), 1-14.
- พัชรารณณ์ ยอดสุรางค์ และวเรศรา วีระวัฒน์ (2562). แบบจำลองสภาพจราจรระบบขนส่งสาธารณะ: กรณีศึกษาเมืองภูเก็ต. *The Journal of Industrial Technology*, 15(1), 1-16.
- มานพ วรภักดิ์. (2552). *การวิจัยดำเนินการ* (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: บริษัทแอคทีฟ พรินท์ จำกัด.
- วัฒนวงศ์ รัตนวราห. (2545). *วิศวกรรมขนส่ง* (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: รุ่งแสงการพิมพ์.
- วินัย พุทธิกุล. (2551). *การวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อการจัดการทางธุรกิจ* (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิรัช ทิรัญ. (2558). *วิศวกรรมจราจร* (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วุฒิไกร ไชยปัญญา และจารุวิศข์ ปราภณศักดิ์. (2564). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพโครงข่ายถนนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในสภาพก่อนและหลังการปรับปรุงรูปแบบการจัดการจราจร โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 1(1), 38-57
- ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์. (2561). *การวิเคราะห์ทางเลือกแบบไม่ต่อเนื่อง* (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศักรธร บุญทวีวัฒน์. (2563). *วิศวกรรมขนส่ง* (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Archana. (2022). Smart Grid Technology Acceptance Barriers: Indian Consumers Perspective. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 42(1). 79-100, doi: 10.13052/spee1048-5236.4215.

- Azab, A. E., & Eltawil, A. B. (2016). A simulation based study of the effect of truck arrival patterns on truck turn time in container terminals. In *Proceedings of the European Conference on Modelling and Simulation on 3 June 2016* (pp. 80–86). Regensburg: 30th EUROPEAN CONFERENCE ON MODELLING AND SIMULATIONAL.
- Azab, A. E., & Morita, H. (2022). Coordinating truck appointments with container relocations and retrievals in container terminals under partial appointments information. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 120, 1-23. doi: 10.1016/j.tre.2022.102673.
- Azab, A. E., Karam, A., & Eltawil, A. B. (2017). A Dynamic and Collaborative Truck Appointment Management System in Container Terminals. In *Proceedings of International Conference on Operations Research and Enterprise Systems on 23-25 February 2017* (pp. 85–94). Porto: 6th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems.
- Azab, A. E., Karam, A., & Eltawil, A. B. (2019). A simulation-based optimization approach for external trucks appointment scheduling in container terminals. *International Journal of Modelling and Simulation*, 40, 321 - 338.
- Azab, A., Karam, A., & Eltawil, A. (2019). A simulation-based optimization approach for external trucks appointment scheduling in container terminals. *International Journal of Modelling and Simulation*, 40(5), 321–338. doi: 10.1080/02286203.2019.1615261
- Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview, In *Proceedings of International Conference on Advances in System Simulation on 23-28 October 2011* (pp. 1–6). Barcelona: 6The Third International Conference on Advances in System Simulation.
- Bentolila, D., Ziedeneber, R. K., Hayuth, Y., & Notteboom, T. E. (2016). Off-peak truck deliveries at container terminals: the “Good Night” program in Israel. *Maritime Business Review*, 1(1), 2-20. doi: 0.1108/MABR-03-2016-0005
- Branston, D., & Van, zuylen, H. (1978). The estimation of saturation flow, effective green time and passenger car equivalents at traffic signals by multiple linear

- regression. *Transportation Research*, 12(1), 47-53. doi: 10.1016/0041-1647(78)90107-7
- Brockfeld, E., Barlovic, R., Schadschneider, A., & Schreckenberg, M. (2001). Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 64(5), 056132/056131-056132/056112. doi:10.1103/PhysRevE.64.056132
- Burhani, J. T., Zukhruf, F., & Frazila, R. B. (2017). Port performance evaluation tool based on microsimulation model. *MATEC Web of Conferences*, 101, 1-5. doi: 10.1051/mateconf/201710105011
- Bouzekri, H., Alpan, G. and Giard, V. (2023). Integrated laycan and berth allocation problem with ship stability and conveyor routing constraints in bulk ports. *Computers and Industrial Engineering*, 181, 19341, doi: 10.1016/j.cie.2023.109341.
- Caballini, C., Mar-Ortiz, J., Gracia, M. D., & Sacone, S. (2018). Optimal truck scheduling in a container terminal by using a Truck Appointment System, In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems on 4-7 November 2018* (pp. 2524–2530). Hawaii: 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- Capela, J., Henriques Abreu, P., Silva, D., Fernandes, G., Machado, P., & Leitão, A. (2013). *Preparing Data for Urban Traffic Simulation using SUMO*.
- Chamchang, P., & Niyomdecha, H. (2021). Impact of service policies on terminal gate efficiency: a simulation approach. *Cogent Business & Management*, 8(1), 1975955. doi:10.1080/23311975.2021.1975955
- Chandra, S., & Shukla, S. (2012). Overtaking Behavior on Divided Highways Under Mixed Traffic Conditions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43, 313-322. doi:https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.104
- Chen, G., & Jiang, L, P. (2016). Managing customer arrivals with time windows: a case of truck arrivals at a congested container terminal. *Annals of Operations Research*, 244, 349–365.

- Chen, G., & Yang, Z. (2014). Methods for estimating vehicle queues at a marine terminal: A computational comparison. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 24, 611 - 619.
- Chen, G., Govindan, K., & Golias, M. M. (2013). Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: Proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 55, 3-22.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.008>
- Chen, G., Govindan, K., & Yang, Z. (2013). Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.033>
- Chen, X., Zhou, X., & List, G. F. (2011). Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 965-982. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.04.001>
- Chitour, Y., & Piccoli, B. (2005). Traffic circles and timing of traffic lights for cars flow. *Discrete & Continuous Dynamical Systems-B*, 5(3), 599.
- Chu, M., & Huynh, N. (2017). Optimal design of container terminal gate layout. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 9, 640-650.
doi:10.1504/IJSTL.2017.086306
- Chuchottaworn, N. and Raathanachonkun, P. (2024). The study of congestion factors for optimal entrance gate allocation in a seaport: a micro-level scenario model analysis, *Journal of International Logistics and Trade*, 22(3), 134-155.
doi: 10.1108/JILT-12-2023-0079
- Daniel K., Michael, B., Peter W., Raphael L., & Mario K. (2015). Second generation of pollutant emission models for SUMO. In *Proceedings of Modeling Mobility with Open Data on 15-16 May 2014* (pp. 203–221). Berlin: Modeling Mobility with Open Data: 2nd SUMO Conference 2014
- Dekker, R., Heide, S., Asperen, E., & Ypsilantis. (2013). A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(4), 528-542, doi: 10.1007/s10696-012-9146-3

- Dhanak, M., Parr, S., Kaiser, E. & Goulianou, P., Russell, H. & Kristiansson, F. (2021). Resilience assessment tool for port planning. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(5), 126-143. doi: 10.1177/2399808321997824.
- Eelco, V. A., Bram, B., & Rommert, D. (2012). Evaluating impact of truck announcements on container stacking efficiency. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 25(4), 1-15. doi: 10.1007/s10696-011-9108-1.
- Elmi, Z., Li, B., Liang, B., Lau, Y., Borowska-Stefanska, M., Wisniewski, S. and Dulebenets, M.A. (2023). An epsilon-constraint-based exact multi-objective optimization approach for the ship schedule recovery problem in liner shipping. *Computers & Industrial Engineering*, 183, 109472. doi: 10.1016/J.CIE.2023.109472.
- Enrique D. S., & Darcy M. B. (2015). A Data-Driven Intersection Geometry Mapping Technique to Enhance the Scalability of Trajectory-Based Traffic Signal Performance Measures. *Journal of Transportation Technologies*, 13(3). 443-464, doi: <https://doi.org/10.17226/22097>
- Essi, M. S., Chen, Y., Loh, H. S., & Gu, Y. (2021). Enhancing productivity of ship handlers' trucks at the port for sustainability. *Maritime Business Review*, 7(3). doi:10.1108/MABR-12-2020-0068
- Faber, T., Sharma, S., Snelder, M., Klunder, G., Tavasszy, L.A. & Lint, J.W.C.. (2020). Evaluating Traffic Efficiency and Safety by Varying Truck Platoon Characteristics in a Critical Traffic Situation. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 22(5), 433-445. doi: 10.1177/0361198120935443.
- Fan, Z., Ren, J., Guo, Z., & Li, Y. (2019). Truck Scheduling Problem Considering Carbon Emissions under Truck Appointment System. *Sustainability*, 11(22), 1-23. doi: 10.3390/su11226256
- Fleming, M., Huynh, N., & Xie, Y. (2013). Agent-Based Simulation Tool for Evaluating Pooled Queue Performance at Marine Container Terminals. *Transportation Research Record*, 2330(1), 103-112. doi: 10.3141/2330-14

- Gang, C. & Zhong-Zhen Y. (2014). Methods for estimating vehicle queues at a marine terminal. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 24(3), 611–619. doi: 10.2478/amcs-2014-0044
- Gracia, M. D., González-Ramírez, R. G., & Mar-Ortiz, J. (2017). The impact of lanes segmentation and booking levels on a container terminal gate congestion. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29, 403-432.
- Grubijaj, N., Krljan, T., Maglic, L., & Vilke, S. (2020). The Microsimulation Model for Assessing the Impact of Inbound Traffic Flows for Container Terminals Located near City Centers. *Sustainability*, 12(22), 9478. doi: 10.3390/su12229478
- Grubisic, M. and Grunsven, R. H. (2021). Artificial light at night disrupts species interactions and changes insect communities. *Current Opinion in Insect Science*, 47, 136-141. doi: 10.1016/j.cois.2021.06.007.
- Guan, C., & Liu, R. (2009). Container terminal gate appointment system optimization. *Maritime Economics and Logistics*, 11(4), 378-398. doi:10.1057/mel.2009.13
- Guerrero, D. (2018). Impacts of transport connections on port hinterlands. *Regional Studies*, 53(4), 540–549. <https://doi.org/10.1080/00343404.2018.1474192>
- Guo, L., Zheng, J., Liang, J. and Wang, S. (2023). Column generation for the multi-port berth allocation problem with port cooperation stability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 171, 3-28. doi: 10.1016/j.trb.2023.03.004.
- Harris, G., Schroer, B., Anderson, M., & Möller, D. (2010). Evaluation of truck traffic at a container terminal using simulation. In *Proceedings of Annual Transportation Research Forum on 11-13 March 2010* (pp. 1–17). Arlington: 51st Annual Transportation Research Forum 2010.
- Hervás-Peralta, M., Ropon, T., Poveda-Reyes, S., Santarremigia, F. E., Pastor-Ferrando, J.-P., & Molero, G. D. (2020). Modelling the performance of port terminals using microsimulation. *European Transport*, 76, 1-11
- Huiyun, Y., Xin, L., Lixuan, X., Xiangjun, L., Zhihong, J., & Zhan, B. (2018). Truck appointment at container terminals: Status and perspectives. In *Proceedings of Chinese Control And Decision Conference on 9-11 June 2018* (pp. 1953–1960). Shenyang: 2018 Chinese Control And Decision Conference.

- Hussein, K., & Song, D. W. (2021). Sustainably integrated port supply chains: concepts and propositions. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 26(7), 765–787. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1981274>
- Huynh, N. & Chu, M. (2017). Optimal design of container terminal gate layout. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*. 9. 640. doi: 10.1504/IJSTL.2017.10005707.
- Islam, S. (2018). Simulation of truck arrival process at a seaport: evaluating truck-sharing benefits for empty trips reduction. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 21(1), 94-112. doi:10.1080/13675567.2017.1353067
- Islam, T., Vu, H. L., Panda, M., & Ngoduy, D. (2017). A study of realistic dynamic traffic assignment with signal control, time-scale, and emission. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(5), 446–461. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1413981>
- Jeon, H., Lee, J., & Sohn, K. (2017). Artificial intelligence for traffic signal control based solely on video images. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(5), 433–445. doi: org/10.1080/15472450.2017.1394192
- Jiang, B., Haider, J., Li, J., Wang, Y., Yip, T. L., & Wang, Y. (2021). Exploring the impact of port-centric information integration on port performance: the case of Qingdao Port. *Maritime Policy & Management*, 50(4), 466–491. doi: 10.1080/03088839.2021.2007551
- Jiang, C., Fu, X., Ge, Y. E., Zhu, S., Zheng, S., & Xiao, Y. bin. (2021). Vertical integration and capacity investment in a two-port system. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(4), 1431–1459. doi: 10.1080/23249935.2020.1869349
- Jiang, X., Zhong, M., Shi, J., Li, W., Sui, Y. and Dou, Y. (2022). Overall scheduling model for vessels scheduling and berth allocation for ports with restricted channels that considers carbon emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1757, doi: 10.3390/jmse10111757.
- Jin, Z., Lin, X., Zang, L., Liu, W. & Xiao, X. (2021). Lane Allocation Optimization in Container Seaport Gate System Considering Carbon Emissions. *Sustainability*, 13(7), 3628. doi: 10.3390/su13073628

- Kiunsi, R. B.. (2013). A Review of Traffic Congestion in Dar es Salaam City from the Physical Planning Perspective. *Journal of Sustainable Development*, 6(2), 94-103, doi: 10.5539/jsd.v6n2p94
- Konstantzos, G., Saharidis, G., & Loizidou, M. (2017). Development of a model for assessing Greenhouse Gas (GHG) emissions from terminal and drayage operations. *Operational Research*, 17(3). 1-14, doi: 10.1007/s12351-016-0242-0.
- Kotachi, M., Rabadi, G. & Obeid, M. F. (2013). Simulation modeling and analysis of complex port operations with multimodal transportation. *Procedia Computer Science*, 20, 229-234, doi: 10.1016/j.procs.2013.09.266
- Krajzewicz, D. (2014) Sumo in scientific literature, 2002-2012. In *Proceedings of Simulation of Urban MObility User Conference on 9-11 November 2014* (pp. 160–174). Germany: SUMO in Scientific Literature, 2002–2012.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. & Bieker-Walz, L. (2012). Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3), 127-138.
- Kulović, M. (2004). Freight Transport Costs Model Based on Truck Fleet Operational Parameters. *The Journal Promet – Traffic&Transportation*, 16(6). 321-325, doi: 10.7307/ptt.v16i6.608
- Kwateng, O, K., Donkoh, A. & Muntaka, A. S. (2017). Evaluation of dry port implementation in Ghana. *Maritime Business Review*, 2(3), 261-278. doi:10.1108/MABR-01-2017-0005
- Lange, A.-K., Schwientek, A. & Jahn, C. (2017). Reducing truck congestion at ports@ classification and trends. In *Proceedings of International Conference of Logistics (HICL) on 12-13 October 2017* (pp. 35–58). Hamburg : Hamburg International Conference of Logistics (HICL).
- Li, N., Chen, G., Govindan, K. & Jin, Z. (2018). Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 261-273. doi: 10.1016/j.trd.2015.12.014

- Li, N., Chen, L. & Low, S. (2011). Optimal Demand Response Based on Utility Maximization in Power Networks. In *Proceedings of Power and Energy Society General Meeting on 24-29 July 2011* (pp. 1–8). Detroit: Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE
- Lin, H., Zeng, W., Luo, J., & Nan, G.-jun .. (2022). An analysis of port congestion alleviation strategy based on system dynamics. *IEEE Access*, 1,1-9. doi10.1016/j.ocecoaman.2022.106336
- Liu, J. & Wang, X. & Chen, J. (2023). Port congestion under the COVID-19 pandemic: The simulation-based countermeasures. *Computers & Industrial Engineering*, 183, 109474. doi: 10.1016/j.cie.2023.109474.
- Lu, T., Yang, Z., Ma, D., & Jin, S.. (2018). Bi-Level Programming Model for Dynamic Reversible Lane Assignment. *IEEE Access*, 6, 71592-71601. doi10.1109/ACCESS.2018.2881290
- Maciejewski, M. (2010). A comparison of microscopic traffic flow simulation systems for an urban area. *Transport Problems*, 5(4), 27-38.
- Martin-Irardi, B., Pacino, D. and Ropke, S. (2022). The multiport berth allocation problem with speed optimization: exact methods and a cooperative game analysis. *Transportation Science*, 56(4), 799-1110, doi: 10.1287/trsc.2021.1112.
- Masashi S., & Takashi, N. (2003). Transition and saturation of traffic flow controlled by traffic lights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 325(3). 531-546, doi: 10.1016/S0378-4371(03)00148-1.
- Mateus, M., & Adrian, S. (2008). A New Approach to Port Choice Modelling. *Maritime Economics & Logistics*, 10(1), 9-34, doi: 10.1057/palgrave.mel.9100189
- Ming, Z. & Cheng, W. & Guo, P. (2014). A Transient Queuing Model for Analyzing and Optimizing Gate Congestion of Railway Container Terminals. *Mathematical Problems in Engineering*, 8, 1-13. 10.1155/2014/914706.
- Minh, C. C., & Noi, N. V. (2021). Optimising truck arrival management and number of service gates at container terminals. *Maritime Business Review*, 8(1), 1-15, doi: 10.1108/MABR-08-2021-0060

- Mnasri, S. and Alrashidi, M. (2021). A comprehensive modeling of the discrete and dynamic problem of berth allocation in maritime terminals. *Electronics (Switzerland)*, 10(21), 2684, doi: 10.3390/electronics10212684.
- Mosca, R., Giribone, P., & Bruzzone, A. G. (2000). Simulation of Dock Management and Planning in a Port Terminal. *International Journal of Modelling and Simulation*, 20(2), 153–157. <https://doi.org/10.1080/02286203.2000.11442152>
- Muneera, C, P., & Krishnamurthy, K. (2016). Economic Evaluation of Traffic Congestion at Intersection: Case study from an Indian City. In *Proceedings of World Conference on Transport Research on 26-31 May 2019* (pp. 1766–1777). Mumbai: World Conference on Transport Research - WCTR 2019.
- Namboothiri, R., & Erera, A. L. (2008). Planning local container drayage operations given a port access appointment system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(2), 185-202.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.07.004>
- Nasution, A., & Arviansyah. (2019). Container terminal landside operation analysis and discrete event simulation in container terminal in port: a case study of Terminal 3 Ocean-going PT Pelabuhan Tanjung Priok. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 567(1), 1-9. doi: 10.1088/1757-899X/567/1/012033
- Nze, I., & Onyemechi, C. (2018). Port congestion determinants and impacts on logistics and supply chain network of five African ports. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 3, 70-82. doi: 10.14254/jsdtl.2018.3-1.7
- Owusu, K., K., Donkoh, A., & Muntaka, A. S. (2017). Evaluation of dry port implementation in Ghana. *Maritime Business Review*, 2(3), 261-278.
doi:10.1108/MABR-01-2017-0005
- Passos, L., & Rossetti, R. (2010, 16-19 June 2010). Traffic light control using reactive agents. In *Proceedings of Iberian Conference on Information Systems and Technologies on 16-19 June 2010* (pp. 1–6). Santiago de Compostela: 5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies.

- Phan, M.-H., & Kim, K. (2015). Negotiating truck arrival times among trucking companies and a container terminal. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75. doi: 10.1016/j.tre.2015.01.004
- Phan, M.-H., & Kim, K. H. (2016). Collaborative truck scheduling and appointments for trucking companies and container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 37-50. doi: 10.1016/j.trb.2016.01.006
- Popa, A., & Strer, J. (2016). Analysis of passenger and vehicle flows with microscopic simulations as a result of security checks at ferry terminals. *Transportation Research Procedia*, 14(1), 1384 – 1393, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.211
- Qi, G., Guan, W., Li, X., Hounsell, N., & Stanton, N. A. (2018). Vehicle sensor data-based analysis on the driving style differences between operating indoor simulator and on-road instrumented vehicle. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 144–160.
<https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1525534>
- Raju, N., Arkatkar, S., & Joshi, G. (2020). Modeling following behavior of vehicles using trajectory data under mixed traffic conditions: an Indian viewpoint. *Transportation Letters*, 13(9), 649–663.
<https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1751440>
- Raju, N., Mishra, A., Chepuri, A., Arkatkar, S. S., & Joshi, G. (2017). A Simulation Approach for Examining Designed Truck Terminal Operations for Forecasted Demand at Busy Sea Port. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 12, 1531-1548.
- Ramirez-Nafarrate, A., Gonzalez, R., R., Smith, N., Guerra-Olivares, R., & Voss, S. (2017). Impact on Yard Efficiency of a Truck Appointment System for a Port Terminal. *Annals of Operations Research*, 258(1), 195-217. doi: 10.1007/s10479-016-2384-0
- Saharidis, G. K. D., & Konstantzos, G. E. (2018). Critical overview of emission calculation models in order to evaluate their potential use in estimation of Greenhouse Gas emissions from in port truck operations. *Journal of Cleaner Production*, 185(1), 1024-1031. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.036

- Schulte, F., Lalla-Ruiz, E., González-Ramírez, R. G., & Voß, S. (2017). Reducing port-related empty truck emissions: A mathematical approach for truck appointments with collaboration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *105*(1), 195-212.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.03.008>
- Shao, Q., Huang, M., Zhang, S., & Zhang, Y. (2022). Simulation of truck arrivals at container terminal based on the interactive truck appointment system. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, *14*(1-2), 141-171.
doi: 10.1504/IJSTL.2022.120667
- Soares, G., Kokkinogenis, Z., Macedo, J., & Rossetti, R. (2014). Agent-Based Traffic Simulation Using SUMO and JADE: An Integrated Platform for Artificial Transportation Systems. . In *Proceedings of Simulation of Urban MObility User Conference on 9-11 November 2014* (pp. 1–19). Germany: Simulation of Urban MObility User Conference
- Song, J., Wu, Y., Xu, Z., & Lin, X. (2015). Research on car-following model based on SUMO. in *Proceedings of International Conference on Advanced Infocomm Technology on 14-17 November 2014* (pp. 47-55). China: 2014 IEEE 7th International Conference on Advanced Infocomm Technology
- Spasovic, L., Besenski, D., & He, Y. (2015). *Quantifying Impact of Port Truck Traffic on Highway Operations Using GPS-Based Speed Data (Painting)*. May, 2015. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration
- Stojaković, M., & Twrđy, E. (2019). The Influence of Yard Trucks on Berth Operations in Smaller Container Terminals. *Pomorstvo*, *33*(1). 171-175. doi: 10.31217/p.33.2.6.
- Stojaković, M., & Twrđy, E. (2021). A Simulation Approach to the Definition of the Subsystems Parameters in Small Container Terminals. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(9), 1023. doi: 10.3390/jmse9091023.
- Suanchan, L., & Pitaksringkarn, J. (2019). A study of traffic signal coordination system: A case study of the Royal Initiative Project Road of His Majesty King RAMA IX. *Engineering Journal of Research and Development*, *31*(1), 73-85.

- Talley, W. K., & Ng, M. (2016). Port multi-service congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 94(1), 66-70.
doi: 10.1016/j.tre.2016.07.005
- Tang, S., Jin, J.G. and Lu, C. (2022). Investigation of berth allocation problem in container ports considering the variety of disruption. *Computers and Industrial Engineering*, 172(1), 108564, doi: 10.1016/j.cie.2022.108564.
- Teo, T., Tan, S. C., Lee, C., Chai, C., Koh, J., Li, C., & Cheah, H. (2010). The self-directed learning with technology scale (SDLTS) for young students: An initial development and validation. *Computers & Education*, 55(1), 1764-1771. doi: 10.1016/j.compedu.2010.08.001.
- Ursavas, E. (2022). Priority control of berth allocation problem in container terminals. *Annals of Operations Research*, 317(2), 805-824, doi: 10.1007/s10479-015-1912-7.
- Van, A. E., Borgman, B., & Dekker, R. (2013). Evaluating impact of truck announcements on container stacking efficiency. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(4), 543-556. doi: 10.1007/s10696-011-9108-1
- Wang, W. & Jiang, Y. & Peng, Y. & Zhou, Y. & Tian, Q. (2018). A Simheuristic Method for the Reversible Lanes Allocation and Scheduling Problem at Smart Container Terminal Gate. *Journal of Advanced Transportation*. 2018. 1-14. doi: 10.1155/2018/1768536.
- Wongchavalidkul, S & Siewwuttanagul. (2021). Experiences of Using Opensource Transport and Traffic Simulation Software for Transport and Traffic Studies in Thailand. *International Scientific Journal of Engineering and Technology*, 5(1). 11-19, doi: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/isjet/article/view/241614>
- Woottichaiwat, S. (2015). Efficiency Improvement of Truck Queuing System in the Freight Unloading Process Case Study of a Private Port in Songkhla Province. *Silpakorn University Science and Technology Journal*, 9, 52-58.
- Xu, B., Li, J., Liu, X., & Yang, Y. (2021). System Dynamics Analysis for the Governance Measures Against Container Port Congestion. *IEEE Access*, 1, 1-9, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3049967

- Xu, B., Liu, X., Yang, Y., Li, J., & Postolache, O. (2021). Optimization for a multi-constraint truck appointment system considering morning and evening peak congestion. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(3), 1-19. doi: 10.3390/su13031181
- Zeng, M., Cheng, W., & Guo, P. (2014). A Transient Queuing Model for Analyzing and Optimizing Gate Congestion of Railway Container Terminals. *Mathematical Problems in Engineering*, *2014*, 1-13. doi: 10.1155/2014/914706
- Zhang, T., Yin, J., Wang, X., & Min, J. (2023). Prediction of container port congestion status and its impact on ship's time in port based on AIS data. *Maritime Policy & Management*, *51*(5), 669–697.
<https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2165185>
- Zhang, X., Gu, Y., & Tian, Y. (2023). Integrated optimization of automated guided vehicles and yard cranes considering charging constraints. *Engineering Optimization*, *56*(11), 1748–1766.
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2023.2283603>
- Zhang, X., Zeng, Q., & Yang, Z. (2019). Optimization of truck appointments in container terminals. *Maritime Economics & Logistics*, *21*(1), 125-145.
- Zhang, Y., Huang, M.-G., Zhang, S., & Shao, Q. (2022). Simulation of truck arrivals at container terminal based on the interactive truck appointment system. I *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, *14*(1), 1-10, doi: 10.1504/IJSTL.2022.120667
- Zhao, J., Liu, Y., & Yang, X. (2015). Operation of signalized diamond interchanges with frontage roads using dynamic reversible lane control. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, *51*(1), 196-209, doi: 10.1016/j.trc.2014.11.010 <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2014.11.010>
- Zhao, W., & Goodchild, A. V. (2010). The impact of truck arrival information on container terminal rehandling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *46*(3), 327-343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.>

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายณัฐพงศ์ ชูโชติถาวร
วัน เดือน ปี เกิด	4 กันยายน พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	107/119 หมู่4 หมู่บ้านปริญญดา ไลท์ พระราม5 ถนนราชพฤกษ์ ตำบลบางกร่าง อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
ตำแหน่งและประวัติการทำงาน	อาจารย์คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร) มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการโลจิสติกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน) มหาวิทยาลัยบูรพา