

การศึกษาแผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาคด้านการจราจรบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หมายเลข 7 และหมายเลข 9

Study of Macroscopic fundamental diagrams on Motorway Number 7 and Motorway Number 9

ธาศรี รักมาก^{1,*} พลเทพ เลิศวรวินิช² อธิฎ เี่ยมล้ำอาจค์³ พัฒนพงศ์ จอสน⁴ อารักษ์ มณฑา⁵ และกฤษณะ เพ็ญสมบุรณ์⁶

^{1,2,3,4} สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

⁵ สำนักอำนวยความสะดวก กรมทางหลวง

⁶ แขวงทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง กรมทางหลวง

*Corresponding author, E-mail address: ton.tr1995@gmail.com

บทคัดย่อ

แผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาคด้านการจราจร (Macroscopic fundamental diagram) เป็นแผนภาพที่ใช้ในการศึกษาการจราจรในระดับเมือง ที่กว้างกว่าการวิเคราะห์การจราจรในระดับถนนหรือทางแยกแบบทั่วไป โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการจราจร กับความเร็วหรืออัตราการไหลของการจราจรในโครงข่ายถนนขนาดใหญ่ โดยงานวิจัยนี้จะทดลองใช้ระยะทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (Vehicle Kilometers Traveled: VKT) ซึ่งแสดงถึงปริมาณการเดินทางของโครงข่ายถนนเป็นตัวแทนของ อัตราการไหลของการจราจร (Flow) และระยะเวลาเดินทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (Vehicle Hours Traveled: VHT) เป็นตัวแทนของความหนาแน่นของปริมาณการจราจร (Density) โดยเก็บข้อมูลบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 และ หมายเลข 9 พบว่าแผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาคด้านการจราจรที่ได้ มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Flow) และความหนาแน่น (Density) ของแผนภาพพื้นฐานด้านการจราจร (Fundamental diagram) ของถนนทั่วไป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถนำไปปรับใช้ในโครงข่ายถนนอื่นๆ เพื่อใช้คาดการณ์ปริมาณการเดินทาง การบริหารจัดการจราจร และวางแผนโครงการก่อสร้างถนนในอนาคต

คำสำคัญ: แผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาคด้านการจราจร, อัตราการไหลของการจราจร, ความหนาแน่นของการจราจร, ระยะทางเดินทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย, ระยะเวลาเดินทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย

Abstract

The macroscopic fundamental diagram (MFD) is a tool used to study traffic at the city level, which covers a broader scope than traditional traffic analysis on individual roads or intersections. The MFD illustrates the relationship between

traffic density and either speed or flow across road networks.

This research explores the use of the total vehicle kilometers traveled (VKT), representing the total travel distance of users within the network, as an indicator of traffic flow, and Vehicle Hours Traveled (VHT), representing the total travel time of users, as an indicator of traffic density. Data were collected on the Motorway No. 7 and No. 9. The results show that the derived MFD has characteristics similar to the traditional flow-density relationship (Fundamental diagram) of given road. These findings can be applied to other road networks to forecast travel demand, improve traffic management, and inform future road construction planning.

Keywords: Macroscopic fundamental diagram, Traffic flow, Traffic density, Vehicle kilometers traveled, Vehicle Hours Traveled

1. ที่มาและความสำคัญ

ระบบขนส่งและโครงข่ายทางหลวงถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ส่งผลต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ การเพิ่มขึ้นของปริมาณยานพาหนะและการขยายตัวของเมืองนำไปสู่ปัญหาการจราจรติดขัด ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการสิ้นเปลืองเวลาและพลังงาน รวมถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น การบริหารจัดการจราจรอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นประเด็นเร่งด่วนที่ต้องอาศัยเครื่องมือวิเคราะห์ที่ครอบคลุมและแม่นยำ

โดยทั่วไปการศึกษาการจราจรมักมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในระดับถนนสายเดี่ยวหรือทางแยก (Microscopic Level) ซึ่งไม่สามารถสะท้อนสภาพการจราจรโดยรวมของโครงข่ายทางหลวงขนาดใหญ่ได้อย่างครบถ้วน แนวคิด แผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาคด้านการจราจร (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) จึงได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษา

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลักทางจราจรในระดับเครือข่าย เช่น อัตราการไหล (Flow) และ ความหนาแน่น (Density) โดยอาศัยข้อมูลเชิงมหภาค ได้แก่ ระยะทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในเครือข่าย (Vehicle Kilometers Traveled: VKT) และ ระยะเวลาเดินทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในเครือข่าย (Vehicle Hours of Travel: VHT) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สะท้อนทั้ง "ปริมาณ" และ "คุณภาพ" ของการเดินทางตามลำดับ [1]

งานวิจัยนี้ทดลองใช้ระยะทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในเครือข่าย (Vehicle Kilometers Traveled: VKT) ซึ่งแสดงถึงปริมาณการเดินทางของเครือข่ายถนนเป็นตัวแทนของ อัตราการไหลของการจราจร (Flow) และระยะเวลาเดินทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในเครือข่าย (Vehicle Hours Traveled: VHT) เป็นตัวแทนของความหนาแน่นของปริมาณการจราจร (Density) โดยเก็บข้อมูลบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2566 และ หมายเลข 9 ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2567 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2567

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ศึกษาการวางแผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาคด้านการจราจร (Macroscopic fundamental diagram: MFD) การนำไปใช้ประโยชน์ รวมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่างๆ มีดังนี้

Cassidy และคณะ [2] ศึกษาการเกิด MFD บนเครือข่ายทางหลวงพิเศษ โดยชี้ให้เห็นว่า MFD จะปรากฏชัดเจนเมื่อข้อมูลมาจากช่วงเวลาที่มีการจราจรในทุกเลนและทุกส่วนของเครือข่ายอยู่ใน ภาวะเดียวกัน (Single Regime) ทั้งภาวะคล่องตัวหรือติดขัด การศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากเส้นทางรถจริง (Vehicle Trajectories) และเครื่องตรวจจับจราจรปิด (Loop Detectors) พบว่า MFD มีรูปร่างสามเหลี่ยมและสามารถทำซ้ำได้ (Reproducible) เมื่อกรองข้อมูลช่วง Multi-regime ออก

Geroliminis and Daganzo [3] สืบค้น MFD ในพื้นที่เมืองโยโกฮามะ ด้วยข้อมูลจากเครื่องตรวจจับถนน และรถแท็กซี่ติด GPS พบว่าการรวมข้อมูลการจราจรจากหลายจุดลดการกระจายตัวของข้อมูล สร้าง MFD ที่ชัดเจน ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเดินทางสำเร็จ (Trip Completion Rate) และประสิทธิภาพการผลิต (Production) ของเครือข่าย ผลการศึกษาชี้ว่าการควบคุมปริมาณยานพาหนะเข้าเมือง (Perimeter Control) โดยรักษาระดับความหนาแน่นให้ใกล้จุดสูงสุด (Critical Accumulation) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจราจร

Suwanno และคณะ [4] ศึกษาผลกระทบของความลึกน้ำท่วมต่อ MFD ในเขตสุขุมวิท กรุงเทพมหานคร โดยใช้ข้อมูลจากรถตรวจสอบ (Probe Vehicles) ซึ่งเป็นรถแท็กซี่ ในช่วงปี ค.ศ. 2019 พบว่าเมื่อน้ำท่วมสูงกว่า 10 ซม. ความเร็วเฉลี่ยลดลง 19.4 - 30.5% และอัตราการไหลสูงสุดลดลง 28.3 - 49.6% ซึ่งส่งผลให้รูปร่าง MFD เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพัฒนาด้านแบบการจราจรแบบไดนามิก (Dynamic Traffic

Assignment Model) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมาตรการจัดการ เช่น การปรับสัญญาณไฟจราจรและเปิดทางด่วนฟรีในช่วงน้ำท่วม

Bagloee และคณะ [5] ประเมินโครงการถนนในสหรัฐอเมริกาแบบไรต์ส โดยผนวกปัจจัยความยั่งยืน เช่น การปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ และค่าใช้จ่ายจากอุบัติเหตุทางถนน เข้ากับการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis) แบบดั้งเดิม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงการทางเลือกต่าง ๆ อย่างรอบด้าน โดยแบ่งเป็น 3 สถานการณ์ คือ รักษาถนน E-75 ในสภาพเดิม (1 ช่องจราจรต่อทิศทาง) ขยายถนน E-75 เป็น 2 ช่องจราจรต่อทิศทาง (ระยะทาง 79 กม.) และสร้างถนนบายพาสดูไบ (Dubai Bypass) เป็น 3 ช่องจราจรต่อทิศทาง (ระยะทาง 68 กม.) ซึ่งมีการใช้ VHT เป็นเกณฑ์หนึ่งในการประเมิน โดยใช้ซอฟต์แวร์ EMME3 จำลองการจราจรในปี 2030 เพื่อประมาณ เวลารวมที่ยานพาหนะใช้บนถนน (VHT) รายวันสำหรับทั้งรถยนต์และรถบรรทุก พบว่าถนนบายพาสดูไบ ลด VHT ได้มากที่สุด (3,309 ชั่วโมง/วัน) เทียบกับ การขยาย E-75 (7,107 ชั่วโมง/วัน) และคงไว้สภาพเดิม (7,721 ชั่วโมง/วัน) เมื่อแปลงเป็นมูลค่าทางการเงินถนนบายพาสดูไบให้ผลประโยชน์เวลา 410 ล้าน AED/ปี ขณะที่การขยาย E-75 ประหยัดได้ 57 ล้าน AED/ปี

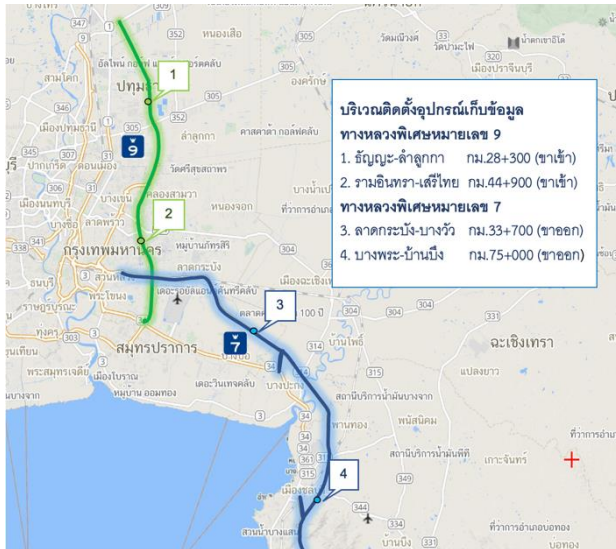
The City of Calgary, Transport Planning [6] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ VKT ในเมืองคัลการี ประเทศแคนาดา โดยใช้ข้อมูลปริมาณการจราจรจากถนนหลักและระบบ GIS พบว่าในช่วงปี 2005-2009 VKT รายวันเพิ่มขึ้น 11% และ VKT รายปีเพิ่มขึ้น 12% แต่ VKT ต่อหัวประชากรลดลงหลังปี 2007 เนื่องจากประชากรเพิ่มขึ้น 11% และปัจจัยเศรษฐกิจ เช่น ราคาน้ำมันสูงขึ้นและการใช้ระบบขนส่งสาธารณะมากขึ้น นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ว่าถนนหลัก (Skeletal Roads) มีสัดส่วนการใช้งานสูงถึง 61% ของ VKT ทั้งหมด โดยเสนอแนะให้ส่งเสริมการพัฒนาพื้นที่แบบผสมผสาน (Mixed-use Development) เพื่อลดระยะทางการเดินทางและพึ่งพารถยนต์ ซึ่งจะช่วยลดมลพิษทางอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งอย่างยั่งยืน

3. วิธีการศึกษา

3.1 พื้นที่ศึกษา

เส้นทางที่ใช้ศึกษาคือทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เก็บค่าจราจร Houton Radar รุ่น SpeedLane Pro โดยงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนติดตั้งบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ได้แก่ จุดติดตั้งธัญญะ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า) และจุดติดตั้งรามอินทรา - เสรีไทย กม. 44+900 (ขาเข้า) และทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 ได้แก่ จุดติดตั้งลาดกระบัง - บางบัว

กม. 33+700 (ขาออก) และ จุดติดตั้งบางพระ - บ้านบึง กม. 75+000 (ขาออก) รวมทั้งสิ้น 4 จุดสำรวจ



รูปที่ 1 จุดติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

3.2 ข้อมูลจากอุปกรณ์เก็บค่าจราจร

ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์เก็บข้อมูลประกอบด้วยหมายเลขลำดับข้อมูล หมายเลขอุปกรณ์ วันที่เก็บข้อมูล เวลาที่เก็บข้อมูล (ราย 5 นาที) ช่องจราจร ปริมาณการจราจร ความเร็วเฉลี่ย โดยเก็บข้อมูลบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2566 และ หมายเลข 9 ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2567 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2567

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลจากจุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า)

data_id	device_id	Date	Time	Zone	Volume	Reg	Med	Large	Truck	XLarge	Speed
47826312	55	1/1/2024	00:00:00	1	3	2	0	0	1	0	76
47826313	55	1/1/2024	00:05:00	2	9	8	0	1	0	0	96
47826314	55	1/1/2024	00:10:00	3	27	34	0	3	0	0	94
47826315	55	1/1/2024	00:15:00	4	23	20	3	0	0	0	109
47826316	55	1/1/2024	00:20:00	1	3	2	1	0	0	0	78
47826317	55	1/1/2024	00:25:00	2	18	12	2	3	1	0	82
47826318	55	1/1/2024	00:30:00	3	40	38	0	0	2	0	95
47826319	55	1/1/2024	00:35:00	4	15	11	4	0	0	0	102
47826772	55	1/1/2024	00:10:00	1	3	3	0	0	0	0	82
47826773	55	1/1/2024	00:15:00	2	15	14	0	1	0	0	87
47826774	55	1/1/2024	00:20:00	3	27	27	0	0	0	0	100
47826775	55	1/1/2024	00:25:00	4	16	9	7	0	0	0	113
47826776	55	1/1/2024	00:30:00	1	2	1	0	0	1	0	78
47826777	55	1/1/2024	00:35:00	2	12	10	0	2	0	0	87
47826778	55	1/1/2024	00:40:00	3	26	26	0	0	0	0	100
47826779	55	1/1/2024	00:45:00	4	10	5	5	0	0	0	114

จากตารางที่ 1 ปริมาณการจราจรจะมีการแยกประเภทตามขนาดของยานพาหนะ และเวลาที่จัดเก็บจะถูกเก็บราย 5 นาที ในแต่ละช่องจราจร เพื่อลดความซับซ้อนในการประมวลผล งานวิจัยนี้จึงจะรวมข้อมูลเป็นราย 15 นาที ซึ่งเป็นกรอบเวลาที่ใช้วิเคราะห์ของ Highway Capacity Manual [7] โดยจะรวมปริมาณการจราจรของแต่ละช่องจราจรเข้าด้วยกันทุกประเภท พร้อมกับเฉลี่ยความเร็วของยานพาหนะให้อยู่ในกรอบ 15 นาที ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลในกรอบ 15 นาที จากจุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า)

Date & Time	Volume (veh)	Speed (km/hr)	Length (km)
1/1/2024 00:00	209	95.67	16.6
1/1/2024 00:15	217	99.51	16.6
1/1/2024 00:30	253	98.77	16.6
1/1/2024 00:45	313	95.80	16.6
1/1/2024 01:00	296	96.48	16.6
1/1/2024 01:15	278	95.90	16.6
1/1/2024 01:30	268	98.13	16.6
1/1/2024 01:45	249	95.18	16.6
1/1/2024 02:00	213	98.04	16.6
1/1/2024 02:15	208	95.87	16.6
1/1/2024 02:30	183	94.39	16.6

3.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

จากข้อมูลในกรอบเวลา 15 นาที จะนำระยะทางของช่วงถนนที่ศึกษา มาประกอบเพื่อใช้คำนวณค่า VKT โดยช่วงถนนของจุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า) ยาว 16.6 กิโลเมตร ช่วงถนนของจุดติดตั้ง รามอินทรา - เสรีไทย กม. 44+900 (ขาเข้า) ยาว 16.6 กิโลเมตร ช่วงถนนของจุดติดตั้งลาดกระบัง - บางบัว กม. 33+700 (ขาออก) ยาว 41.3 กิโลเมตร และช่วงถนนของจุดติดตั้งบางพระ - บ้านบึง กม. 75+000 (ขาออก) ยาว 41.3 กิโลเมตร โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$VKT = Volume \times Length \quad (1)$$

โดย VKT คือ ระยะทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (กิโลเมตร)

Volume คือ ปริมาณการจราจร (คัน)

Length คือ ระยะทาง (กิโลเมตร)

จากนั้นคำนวณค่า VHT โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$VHT = \frac{VKT}{Space Mean Speed} \quad (2)$$

โดย VHT คือ ระยะเวลาดำเนินการรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (ชั่วโมง)

VKT คือ ระยะทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (กิโลเมตร)

Space mean speed คือ ความเร็วเฉลี่ยตามระยะทาง (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

4. ผลการศึกษา

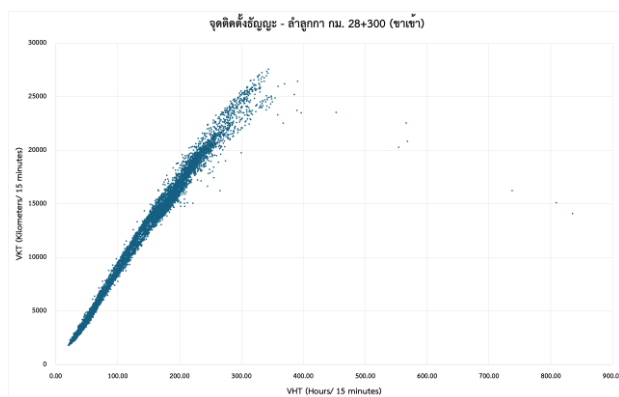
จากข้อมูลความยาวช่วงถนนในแต่ละจุดติดตั้งอุปกรณ์ และผลการในหัวข้อที่ 3.3 สามารถคำนวณค่า VKT และ VHT ในกรอบ 15 นาที ได้ดังตัวอย่างในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่า VKT และ VHT จากจุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า)

Date & Time	Volume (veh)	Speed (km/hr)	Length (km)	VKT (km)	VHT (hr)
1/1/2024 00:00	209	95.67	16.6	3469.4	36.26
1/1/2024 00:15	217	99.51	16.6	3602.2	36.20
1/1/2024 00:30	253	98.77	16.6	4199.8	42.52
1/1/2024 00:45	313	95.80	16.6	5195.8	54.24
1/1/2024 01:00	296	96.48	16.6	4913.6	50.93
1/1/2024 01:15	278	95.90	16.6	4614.8	48.12
1/1/2024 01:30	268	98.13	16.6	4448.8	45.33
1/1/2024 01:45	249	95.18	16.6	4133.4	43.43
1/1/2024 02:00	213	98.04	16.6	3535.8	36.07
1/1/2024 02:15	208	95.87	16.6	3452.8	36.02
1/1/2024 02:30	183	94.39	16.6	3037.8	32.18

ค่า VKT และ VHT จะใช้เป็นตัวแทนของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจรตามลำดับ โดยให้แกน x แสดงค่า VHT และแกน y แสดงค่า VKT เพื่อดูแนวโน้มของข้อมูลที่ได้แสดงผลในกราฟความสัมพันธ์ โดยการแสดงผลได้เป็นดังนี้

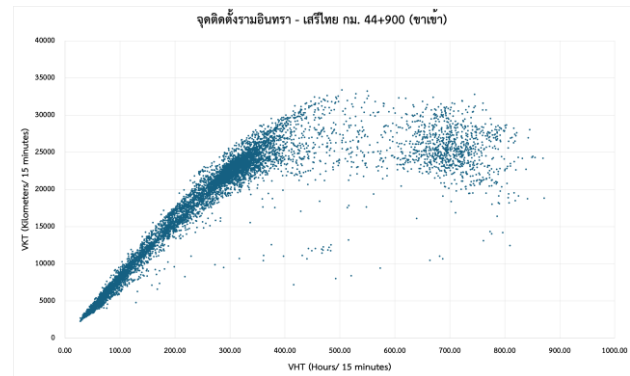
4.1 ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 จุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า)



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ VKT และ VHT จากจุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า)

จากกราฟความสัมพันธ์ของ VKT และ VHT ณ จุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา พบว่าข้อมูลกระจายตัวเป็นความชันที่เป็นเส้นตรง โดยค่า VKT แปรผันตรงกับค่า VHT หมายความว่าเมื่อยานพาหนะใช้เวลาบนถนนมากขึ้น ปริมาณระยะทางก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับในช่วง Undersaturated flow ของกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร ซึ่งสามารถประเมินได้ว่า ณ จุดสำรวจนี้ ปริมาณการจราจรมีความคล่องตัว และถนนมีการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามความจุที่ได้มีการกำหนดไว้ แต่มีข้อมูลบางส่วนที่ค่า VHT สูงขึ้น แต่ค่า VKT ลดลง ซึ่งแสดงถึงการติดขัดของปริมาณจราจรที่ยานพาหนะใช้เวลาบนถนนมากขึ้น แต่ได้ระยะทางที่ลดลง

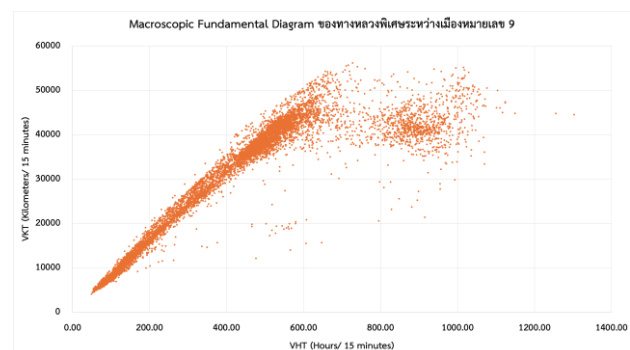
4.2 ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 จุดติดตั้งรวมอินทรา - เสรีไทย กม. 44+900 (ขาเข้า)



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ VKT และ VHT จากจุดติดตั้งรวมอินทรา - เสรีไทย กม. 44+900 (ขาเข้า)

จากกราฟความสัมพันธ์ของ VKT และ VHT ณ จุดติดตั้งรวมอินทรา - เสรีไทย มีความแตกต่างจากจุดติดตั้งสัญญาณ - ลำลูกกา โดยมีค่า VKT สูงกว่า ซึ่งค่าสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 35,000 กิโลเมตร และกราฟมีทั้งช่วงที่ค่า VKT แปรผันตรงกับค่า VHT และช่วงที่ค่า VKT และ VHT แปรผกผันกัน อย่างชัดเจน ซึ่งใกล้เคียงกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร ในช่วง Undersaturated flow ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.1 และช่วง Oversaturated flow ที่แสดงถึงช่วงที่ปริมาณการจราจรมีค่าเกินความจุของถนนทำให้เกิดการจราจรติดขัดส่งผลต่อเวลาที่ใช้นบนถนนที่สูงขึ้น แต่มีค่าระยะทางในการเคลื่อนตัวที่ลดลง

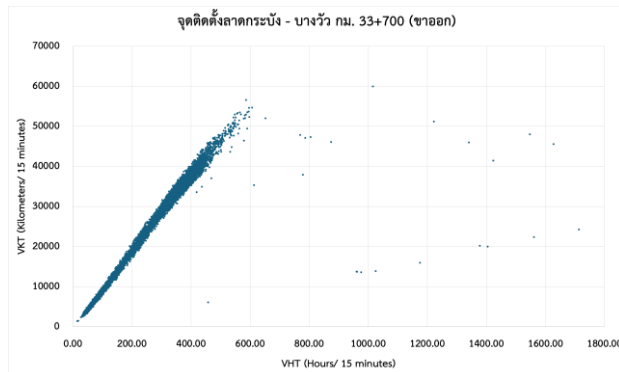
4.3 Macroscopic fundamental diagrams ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์รวม VKT และ VHT ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9

ข้อมูลของทั้งสองจุดสำรวจบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 เมื่อนำค่า VKT และ VHT จากทั้งสองจุดรวมกัน โดยกำหนดให้ช่วงเวลาตรงกัน อ้างอิงตามวิธีการสร้าง MFD ของงานวิจัยของ Cassidy และคณะ [2] สามารถเห็นแนวโน้มได้ชัดว่า โดยข้อมูลของมีทั้งช่วง Undersaturated flow และช่วง Oversaturated flow เทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร

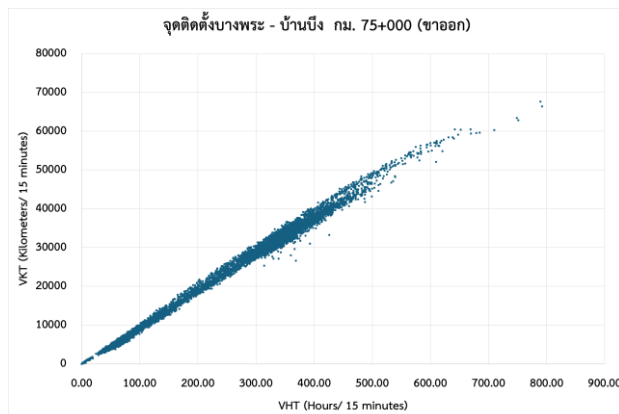
4.4 ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 จุดติดตั้งลาดกระบัง - บางบัว กม. 33+700 (ขาออก)



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ VKT และ VHT จากจุดติดตั้งลาดกระบัง - บางบัว กม. 33+700 (ขาออก)

จากกราฟความสัมพันธ์ของ VKT และ VHT ณ จุดติดตั้งลาดกระบัง - บางบัว พบว่าข้อมูลกระจายตัวเป็นความชันที่เป็นเส้นตรง โดยค่า VKT แปรผันตรงกับค่า VHT โดยค่า VKT สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 60,000 กิโลเมตร แสดงให้เห็นว่าปริมาณการจราจร ณ จุดสำรวจนี้มีความคล่องตัว ซึ่งสอดคล้องกับในช่วง Undersaturated flow เทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร โดยมีบางข้อมูลที่มีค่า VHT และ VKT แปรผกผันกัน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในบางช่วงเวลาเนื่องจากบริเวณดังกล่าวยังอยู่ในพื้นที่ชานเมือง

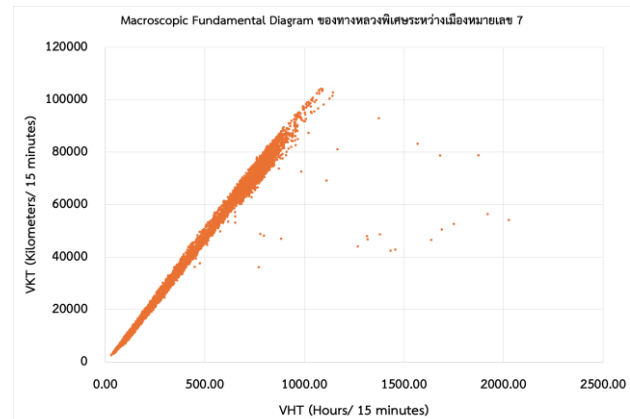
4.5 ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 จุดติดตั้งบางพระ - บ้านบึง กม. 75+000 (ขาออก)



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ VKT และ VHT จุดติดตั้งบางพระ - บ้านบึง กม. 75+000 (ขาออก)

จากกราฟความสัมพันธ์ของ VKT และ VHT ณ จุดติดตั้งบางพระ - บ้านบึง พบว่าข้อมูลกระจายตัวเป็นความชันที่เป็นเส้นตรง โดยค่า VKT แปรผันตรงกับค่า VHT โดยค่า VKT สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 69,000 กิโลเมตร แสดงให้เห็นว่าปริมาณการจราจร ณ จุดสำรวจนี้มีความคล่องตัว ซึ่งไม่มีข้อมูลที่ค่า VKT แปรผกผันกับ VHT แสดงให้เห็นว่าถนนมีการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามความจุที่ได้มีการกำหนดไว้ และความแตกต่างของพื้นที่ ในที่นี้คือระหว่างชานเมือง และต่างจังหวัด อาจส่งผลต่อค่าทางจราจรโดยแสดงให้เห็นผ่านกราฟความสัมพันธ์

4.6 Macroscopic fundamental diagrams ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์รวม VKT และ VHT ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7

ข้อมูลของทั้งสองจุดสำรวจบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 เมื่อนำค่า VKT และ VHT จากทั้งสองจุดรวมกัน โดยกำหนดให้ช่วงเวลาที่รวมต้องตรงกัน แนวโน้มเป็นเส้นตรงในช่วง Undersaturated flow เทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร โดยมีบางข้อมูลที่อยู่ในช่วง Oversaturated flow แต่ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับ MFD ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองสร้าง Macroscopic fundamental diagram (MFD) โดยใช้ค่าระยะทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (Vehicle Kilometers Traveled: VKT) และ ระยะเวลาเดินทางรวมทั้งหมดของผู้ใช้เส้นทางในโครงข่าย (Vehicle Hours of Travel: VHT) เป็นตัวแทนของอัตราการไหล (Flow) และ ความหนาแน่น (Density) ตามลำดับ โดยเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์เก็บค่าจราจร Houton Radar รุ่น SpeedLane Pro บนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2566 และ หมายเลข 9 ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2567 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2567 โดยทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 มี 2 จุดสำรวจ ได้แก่ จุดติดตั้งฉะเชิงเทรา - ลำลูกกา กม. 28+300 (ขาเข้า) ยาว 16.6 กิโลเมตร และจุดติดตั้งรามอินทรา - เสรีไทย กม. 44+900 (ขาเข้า) ยาว 16.6 กิโลเมตร และทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 มี 2 จุดสำรวจ ได้แก่ จุดติดตั้งลาดกระบัง - บางบัว กม. 33+700 (ขาออก) ยาว 41.3 กิโลเมตร และ จุดติดตั้งบางพระ - บ้านบึง กม. 75+000 (ขาออก) ยาว 41.3 กิโลเมตร รวมทั้งสิ้น 4 จุดสำรวจ โดยที่ระยะทาง ปริมาณการจราจร และค่าความเร็วเฉลี่ยตามระยะทาง จะใช้ในการคำนวณหาค่า VKT และ VHT

Macroscopic fundamental diagram ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองที่ได้ จะมาจากการรวมกันของค่า VKT และ VHT ของจุดสำรวจในสายนั้นๆ ซึ่งก็คือการแสดงความโน้มและภาพรวมที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ของ

แต่ละจุดสำรวจ ทำให้กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ของ Macroscopic fundamental diagram มีลักษณะของแนวโน้มของแต่ละจุดสำรวจรวมกัน ซึ่งจะชัดเจนในทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ที่ ณ จุดติดตั้งรวมอินทรา - เสรีไทย มีทั้งช่วงที่ค่า VKT และ VHT แปรผันตรง และแปรผกผันกัน ซึ่งสอดคล้องกับในช่วง Undersaturated flow และช่วง Oversaturated flow ของกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร ในส่วนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 กราฟความสัมพันธ์ของ VKT และ VHT จากทั้ง 2 จุดสำรวจ มีค่าแปรผันตรงกันสอดคล้องกับช่วง Undersaturated flow ของกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหล และความหนาแน่นของปริมาณจราจร ซึ่งมีส่วนน้อยที่แสดงอยู่ในช่วง Oversaturated flow ทำให้ภาพรวมที่ได้ของ Macroscopic fundamental diagram เป็นแนวเส้นตรงที่ชัดเจน ความแตกต่างของ Macroscopic fundamental diagram ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองทั้งสองสายนี้ ชี้ให้เห็นถึงความเร่งด่วนต่อการจัดการจราจรที่แตกต่างกัน ทางหลวงหมายเลขพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 แสดงพฤติกรรมจราจรที่ชัดเจนทั้งในช่วง Undersaturated flow และ Oversaturated flow สะท้อนถึงความเสี่ยงต่อการเกิดความแออัดที่สูงกว่าทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 ที่ส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่วง Undersaturated flow ที่แสดงถึงศักยภาพในการรองรับปริมาณจราจรที่ยังไม่ถึงขีดจำกัด ดังนั้นหากมีข้อจำกัดด้านงบประมาณในการบริหารจัดการจราจร เช่น การติดตั้งระบบตรวจจับเพิ่มเติม การเพิ่มมาตรการสำหรับจัดการปริมาณยานพาหนะ ที่ควรให้ความสำคัญกับเส้นทางหมายเลข 9 เป็นลำดับแรก โดยเฉพาะในบริเวณที่มีแนวโน้มเข้าสู่ Oversaturated flow ในที่นี้คือจุดติดตั้งรวมอินทรา - เสรีไทย กม. 44+900 ซึ่งอาจเกิดการจราจรติดขัดได้ หากมีปริมาณการจราจรที่เกินความจุ และไม่มีการจัดการที่เหมาะสม

Macroscopic fundamental diagram จากงานวิจัยนี้ เป็นตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของโครงข่ายถนน ซึ่งค่า VKT ที่เป็นเกณฑ์หนึ่งที่แสดงถึงปริมาณการใช้โครงข่าย และสามารถนำไปประเมินการเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ในแต่ละปี ทำให้ได้ว่าโครงข่ายมีการใช้งานมากน้อยแค่ไหน และค่า VHT ที่จะแสดงถึงคุณภาพการให้บริการของโครงข่ายว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่ ผ่านช่วงเวลาเวลาที่ใช้นโครงข่ายถนน [1] ซึ่งการสร้าง Macroscopic fundamental diagram ด้วยวิธีนี้จะสามารถประเมินคุณสมบัติของโครงข่ายได้ทั้งปริมาณ และคุณภาพ ทั้งนี้ หากมีการนำไปใช้ประโยชน์ต่อยอดให้สามารถประเมินโครงข่ายในการดูแลได้แบบทันที (Real-time) ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่จะช่วยในการจัดการปัญหาจราจรมีประสิทธิภาพ และทันทั่วทั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จุดสำรวจในงานวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ประเมินเพื่อสร้าง Macroscopic fundamental diagram ของงานวิจัยนี้มาจากจุดสำรวจ 2 จุดในแต่ละสายทาง ซึ่งหากมีการติดตั้งและเก็บข้อมูลโดยใช้จุดสำรวจเพิ่มขึ้น ในขอบเขตระยะทางที่สั้นลง จะทำ

ให้ได้ข้อมูลโครงข่าย และ Macroscopic fundamental diagram ที่มีความละเอียดมากขึ้น

5.2.2 วิธีการในการสร้าง Macroscopic fundamental diagram

วิธีการนี้เป็นเพียงหนึ่งในวิธีการเพื่อให้ได้มาซึ่ง Macroscopic fundamental diagram โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Cassidy และคณะ [2] เป็นเบื้องต้น ซึ่งยังมีตัวอย่างงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งใช้วิธีที่แตกต่างกันไป ดังเช่นงานวิจัยของ Suwanno และคณะ [4] ผู้อ่านจึงควรพิจารณาตามความเหมาะสมของงานวิจัยตนเอง

5.2.3 การนำผลลัพธ์จากงานวิจัยไปปรับใช้บนโครงข่ายถนนอื่น

งานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นการวิเคราะห์แผนภาพพื้นฐานเชิงมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) บนโครงข่ายทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ จากการที่ไม่มีจุดตัดจราจร หรือสัญญาณไฟจราจร ความเร็วของยานพาหนะที่สูง และมีการเข้าออกที่จำกัด แต่แนวคิดของ MFD สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายถนนประเภทอื่นที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น ถนนในเมือง (urban streets) ถนนสายรอง หรือโครงข่ายที่มีปัจจัยแวดล้อมที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยมีข้อควรพิจารณาดังนี้

- โครงข่ายที่มีความหลากหลายทางกายภาพ (เช่น ทางแยก, สัญญาณไฟ, ช่องจราจรไม่สม่ำเสมอ) ควรเพิ่มความหนาแน่นของจุดสำรวจเพื่อลดการกระจายตัวของข้อมูล
- โครงข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพการจราจร ควรมีการแบ่งโซนย่อย (Subnetwork partitioning) เพื่อให้การวิเคราะห์การจราจรมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. (2021). *Estimating vehicle hours of travel*. <https://www.volpe.dot.gov/sites/volpe.dot.gov/files/docs/Estimating-Vehicle-Hours-of-Travel.pdf>
- [2] Cassidy, M. J., Jang, K., & Daganzo, C. F. (2011). Macroscopic fundamental diagrams for freeway networks: Theory and observation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2260, 8–16. <https://doi.org/10.3141/2260-02>
- [3] Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42 (7), 759–770. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002>
- [4] Suwanno, P., Kasemsri, R., Duan, K., & Fukuda, A. (2021). Application of macroscopic fundamental diagram under flooding situation to traffic management measures. *Sustainability*, 13(20), 11227. <https://doi.org/10.3390/su132011227>

- [5] Bagloee, S. A., Asadi, M., & Bozic, C. (2012). A sustainability approach in road project evaluation, case-study: Pollutant emission and accident costs in cost benefit analysis. In *Sustainable transportation systems* (pp. 297–303). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34146-1_30
- [6] City of Calgary, Transportation Planning. (2010). *Mobility monitor: Vehicle kilometres travelled in Calgary*. <https://www.calgary.ca/transportation>
- [7] Dowling, R., Margiotta, R., Cohen, H., & Skabardonis, A. (2013). *Guide for Highway Capacity and Operations Analysis of Active Transportation and Demand Management Strategies (FHWA Report No. FHWA-HOP-13-042)*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.