การประเมินปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่งสินค้าทางถนน: กรณีศึกษาท่าเรือแหลมฉบัง

Carbon Emission Assessment from Road Freight Transport
A Case Study of Laem Chabang Port

ณัฐชนน คงแก้ว[1] ณัฐสิทธิ์ สนธิพันธ์ศักดิ์[2] และ อาจารย์พงษ์สันธ์ บัณฑิตสกุลชัย[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การขนส่งสินค้าทางถนนในประเทศไทย โดยเฉพาะระหว่างนิคมอุตสาหกรรมกับท่าเรือแหลมฉบัง มีบทบาทสำคัญต่อระบบโลจิสติกส์ แต่ขณะเดียวกันก็เป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการเดินทางของรถบรรทุกด้วยข้อมูล GPS และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลดคาร์บอนฟุตพรินต์โดยการส่งเสริมเส้นทางที่มีประสิทธิภาพและตรงตามมาตรฐานมากขึ้น ข้อมูลที่ใช้ได้มาจากระบบติดตาม GPS ของรถบรรทุกสิบล้อที่วิ่งระหว่างนิคมอุตสาหกรรมกับท่าเรือแหลมฉบัง โดยนำมาวิเคราะห์เส้นทางจริง และประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซ CO_2 ด้วยค่าคาร์บอนฟุตพรินต์จากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีเส้นทางจำนวนหนึ่งที่มีแนวโน้มจะช่วยลดการปล่อย CO_2 ได้หากมีการส่งเสริมให้ใช้จริงในเชิงนโยบาย พร้อมทั้งเสนอแนวทางประยุกต์ใช้ข้อมูล GPS เพื่อการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ด้านการขนส่งอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, การวิเคราะห์ข้อมูล GPS, การลดผลกระทบจากการขนส่ง, ท่าเรือแหลมฉบัง, เส้นทางโลจิสติกส์

Abstract

Road freight transport in Thailand, especially between industrial estates and Laem Chabang Port, plays a vital role in the logistics system while being a significant source of greenhouse gas emissions. This study aims to examine truck travel patterns using GPS data and assess the potential for carbon footprint reduction by promoting more efficient and standardized routes. GPS tracking data from ten-wheel trucks traveling between industrial estates and Laem Chabang Port was analyzed and compared with recommended routes. The carbon dioxide emissions were estimated using secondary emission factors. The findings indicate that certain actual routes, if widely adopted, could help reduce CO_2 emissions. The study also proposes practical strategies to integrate GPS data into transport decision-making for sustainable logistics planning.

Keywords: Carbon Emission Reduction, GPS Data Analysis, Transportation Impact Mitigation, Laem Chabang Port, Logistics Route Optimization

1 บทนำ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas: GHG) โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการใช้พลังงาน ยังคงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยในปี 2023 การปล่อย CO_2 ทั่วโลกจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลพุ่งแตะระดับสูงสุดที่ราว 37.4 พันล้านตัน แม้ว่าการใช้พลังงานสะอาดจะขยายตัว แต่ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องก็ยังผลักดันให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น

ในระดับสากล หลายประเทศได้กำหนดเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซผ่านข้อตกลงปารีส เพื่อควบคุมอุณหภูมิโลกไม่ให้เพิ่มเกิน 1.5 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม ซึ่งเป้าหมายดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับความร่วมมือจากทุกภาคส่วน รวมถึงภาคการขนส่งซึ่งเป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนที่สำคัญ

สำหรับประเทศไทย ภาคการขนส่งเป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 34% ของการปล่อยทั้งหมด โดยเฉพาะระบบขนส่งทางถนนที่มีการพึ่งพารถบรรทุกเป็นหลัก ซึ่งมีอัตราการปล่อยคาร์บอนต่อระยะทางสูงกว่าระบบขนส่งประเภทอื่นอย่างชัดเจน การลดการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่งทางถนนจึงถือเป็นแนวทางสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศสู่เป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

แม้งานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการประเมินการปล่อยคาร์บอนจากระบบขนส่งในภาพรวม แต่ยังขาดการวิเคราะห์เชิงลึกในระดับเส้นทางจริงที่ใช้ข้อมูล GPS จากการเดินรถจริงของรถบรรทุก ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินศักยภาพการลดคาร์บอนของแต่ละเส้นทางได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทความฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เส้นทางการเดินรถบรรทุกที่ให้บริการขนส่งสินค้าไปยังท่าเรือแหลมฉบัง โดยใช้ข้อมูล GPS ที่ได้จากการเดินรถจริง ร่วมกับการประเมินปริมาณการปล่อย CO_2 บนแต่ละเส้นทาง เพื่อค้นหา “เส้นทางสีเขียว” ที่ปล่อยคาร์บอนต่ำที่สุดในแต่ละคู่ต้นทาง-ปลายทาง (OD pair) ผลการวิเคราะห์นี้ไม่เพียงนำเสนอภาพรวมของพฤติกรรมการเดินทางของรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษา แต่ยังสามารถใช้สนับสนุนการวางแผนและนโยบายด้านโลจิสติกส์ การเลือกเส้นทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการส่งเสริมการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบขนส่งที่ปล่อยคาร์บอนน้อยกว่าในอนาคต

2 การทบทวนวรรณกรรม

2.1 แผนและนโยบายคาร์บอน

เพื่อสนับสนุนการศึกษานี้ จำเป็นต้องทบทวนแผนและนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย ซึ่งมีดังนี้

2.1.1 ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580)

มุ่งพัฒนาระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนโลจิสติกส์ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยตั้งเป้าเพิ่มการขนส่งสินค้าทางรางจาก 2.5% เป็น 7% ภายในปี 2580 และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคขนส่ง

2.1.2 แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13

ส่งเสริมเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ โดยเน้นการเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งจากถนนเป็นราง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในพื้นที่ EEC และท่าเรือแหลมฉบัง

2.1.3 แผนปฏิบัติการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย

ตั้งเป้าลดก๊าซเรือนกระจก 20–25% ภายในปี 2573 โดยการขนส่งทางรางเป็นมาตรการสำคัญ ซึ่งสามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้มากกว่า 60% เมื่อเทียบกับรถบรรทุก

2.1.4 แผนพัฒนาการขนส่งระบบราง

ตั้งเป้าเพิ่มสัดส่วนการขนส่งสินค้าทางรางจาก 2% เป็น 5% ภายในปี 2570 โดยเชื่อมต่อโครงข่ายรางกับท่าเรือแหลมฉบัง เพื่อสร้างระบบขนส่งที่ยั่งยืนและลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

2.1.5 โครงการพัฒนาท่าเรือแหลมฉบัง ระยะที่ 3

เป็นโครงการสำคัญในพื้นที่ EEC ที่เน้นพัฒนาโครงข่ายรางเชื่อมท่าเรือเพื่อรองรับปริมาณการขนส่งที่เพิ่มขึ้น ลดการพึ่งพาถนน และลดผลกระทบต่อชุมชนโดยรอบ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องภายในงานวิจัย

2.2.1 Machine Learning

Machine Learning (ML) คือ การประยุกต์คณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์เพื่อทำให้คอมพิวเตอร์ สามารถเรียนรู้สิ่งต่างๆ ตัดสินใจได้โดยไม่ต้องกำหนดกฎและเงื่อนไขตายตัว และประมวลผลข้อมูลนั้นเพื่อให้สามารถตัดสินใจตามที่ต้องการ โดยการตัดสินใจที่ ML ทำได้มีหลายรูปแบบดังนี้

1. Supervised Learning (การเรียนรู้แบบมีการควบคุม) แบบจำลองเรียนรู้จากข้อมูลที่มีการควบคุมหรือป้ายกำกับเช่น การทำนายยอดขายในอนาคตจากข้อมูลในอดีตจำแนกประเภทของอีเมลว่าเป็นสแปมหรือไม่

2.Unsupervised Learning (การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม) แบบจำลองเรียนรู้จากข้อมูลที่ไม่มีการควบคุมหรือป้ายกำกับ เช่น การจัดกลุ่มลูกค้าที่คล้ายคลึงกันตามพฤติกรรมการซื้อของพวกเขา การค้นหากฎที่หาได้จากข้อมูลส่วนใหญ่

3.Reinforcement Learning (การเรียนรู้แบบเสริมสร้าง): แบบจำลองเรียนรู้ด้วยการทดลองและรับรู้จาก สิ่งแวดล้อมโดยได้รับรางวัลหรือลบล้างค่าโดยรวมของการกระทำ เช่นการสอนหุ่นยนต์ทำการเดินโดยให้ได้รับรางวัลเมื่อเดินถึงจุดหมายMachine learning ใช้ทฤษฎีและเทคนิคจากคณิตศาสตร์และสถิติเพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้และทำนายผลได้อย่างแม่นยำมากขึ้น โดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ machine learning ได้แก่ Python (กับไลบรารี Scikit-learn, TensorFlowKeras), R (กับไลบรารี Caret, MLR), Weka, RapidMiner ฯลฯ

2.2.2 K-means Clustering

K-means Clustering เป็นอัลกอริธึมการจัดกลุ่ม (Clustering Algorithm) ที่ใช้หลักการแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยๆ โดยอิงจากความใกล้เคียงกันของข้อมูลในเชิงระยะทาง จุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่ม (Centroid) จะถูกคำนวณขึ้นและปรับเปลี่ยนซ้ำๆ เพื่อให้ข้อมูลในแต่ละกลุ่มมีความคล้ายคลึงกันสูงที่สุดภายในกลุ่มเดียวกัน

กระบวนการเริ่มจากการกำหนดจำนวนกลุ่มที่ต้องการ (k) แล้วเลือกจุดศูนย์กลางเริ่มต้นแบบสุ่ม จากนั้นข้อมูลแต่ละจุดจะถูกจัด

เข้ากลุ่มที่มีระยะใกล้กับจุดศูนย์กลางมากที่สุด และทำการคำนวณจุดศูนย์กลางใหม่ซ้ำไปจนกว่าระบบจะนิ่ง

ข้อดีของ K-means คือ ทำงานได้เร็วและเข้าใจง่าย ใช้กับข้อมูลขนาดใหญ่ได้ดี ข้อเสีย คือ ต้องกำหนดจำนวนกลุ่มล่วงหน้า และอาจได้ผลลัพธ์ที่ไม่เสถียรหากข้อมูลไม่กระจายดีหรือมี outlier จำนวนมาก

2.2.3 Jaccard Similarity

Jaccard Similarity เป็นวิธีการวัดความคล้ายคลึงกันระหว่างชุดข้อมูล 2 ชุด โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของจำนวนสมาชิกที่ตรงกัน (Intersection) เทียบกับจำนวนสมาชิกทั้งหมดที่ปรากฏในทั้งสองชุดรวมกัน (Union) ดัง**สมการที่ (1)**

$$J(A,B) = \frac{|A \cap B)}{|A \cup B|} \qquad (1)$$

ถ้า A และ B มีสมาชิกเหมือนกันทั้งหมด ค่า Jaccard จะเท่ากับ 1 แต่ถ้าไม่มีสมาชิกที่ตรงกันเลย ค่า Jaccard จะเป็น 0ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถใช้เปรียบเทียบชุดข้อมูลที่เป็นประเภท binary, tag หรือกลุ่มคำได้ดี เหมาะกับการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงของคำ, เอกสาร หรือกลุ่มพฤติกรรมต่างกลุ่มคำได้ดี

2.2.4 การประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ไม่ใช้ตัวแปรเป้าหมาย (Unsupervised Learning) เช่นการจัดกลุ่ม (Clustering) หรือการลดมิติ (Dimensionality Reduction) มักใช้วิธีการที่ต่างจากการเรียนรู้แบบมีผู้สอน เนื่องจากไม่มี “คำตอบที่ถูกต้อง” ให้เปรียบเทียบโดยตรง สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูล (Clustering) เช่น K-Means หรือ DBSCAN นิยมใช้ตัวชี้วัดดังต่อไปนี้:

Inertia: คือผลรวมของระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลแต่ละจุดกับ centroid ของกลุ่มที่มันอยู่ ยิ่งค่า Inertia ต่ำ แสดงว่าจุดข้อมูลอยู่ใกล้ centroid มาก แปลว่าการจัดกลุ่มมีความกระชับดี อย่างไรก็ตาม ค่า Inertia มักลดลงเมื่อจำนวนกลุ่มเพิ่มขึ้น จึงควรใช้ร่วมกับ Elbow Method เพื่อเลือกจำนวนกลุ่มที่เหมาะสม

Silhouette Score: ค่านี้วัดความเหมาะสมของแต่ละจุดข้อมูลกับกลุ่มที่มันถูกจัดไว้ โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ใกล้เคียงที่สุด ค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ยิ่งใกล้ 1 ยิ่งดี แสดงว่าการจัดกลุ่มชัดเจน

Jaccard Similarity: ใช้ในกรณีที่มีข้อมูลกลุ่มจริง (Ground Truth) โดยวัดความคล้ายคลึงของกลุ่มที่ได้จากการจัดกลุ่มกับกลุ่มจริง ค่ายิ่งใกล้ 1 แสดงว่าการจัดกลุ่มมีความแม่นยำ

ข้อดีของการประเมินแบบนี้คือสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีฉลากข้อมูลได้อย่างมีระบบ ข้อเสียคือบางตัวชี้วัดอาจให้ค่าที่เข้าใจยาก และต้องพิจารณาควบคู่กับบริบทของข้อมูล

3 กระบวนการและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงประยุกต์ที่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลการติดตามตำแหน่งของรถบรรทุก (GPS Tracking) เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในแง่ของการลดการปล่อยคาร์บอนจากระบบการขนส่งสินค้าทางถนน (Freight Transportation)

กระบวนการศึกษาประกอบด้วยการนำเข้าข้อมูล GPS และข้อมูลถนน เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเดินทางและพฤติกรรมการใช้งานเส้นทางของรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษา โดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เช่น การจัดกลุ่มข้อมูลด้วย K-means และการวัดความคล้ายคลึงของชุดข้อมูลด้วย Jaccard Similarity เพื่อจำแนกเส้นทางที่มีลักษณะการใช้งานที่คล้ายกัน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดกลุ่มและวิเคราะห์เส้นทางจะถูกนำมาใช้ในการประเมินการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอน โดยพิจารณาจากระยะทางที่ใช้ ความถี่ของการเดินทาง และความหนาแน่นของยานพาหนะในแต่ละเส้นทาง ซึ่งจะนำไปสู่การเสนอแนะแนวทางการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการขนส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 การจัดเตรียมและทำความสะอาดข้อมูล

เพื่อเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น (Exploratory Data Analysis: EDA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจลักษณะทั่วไปของข้อมูล ตรวจสอบความถูกต้อง และปรับปรุงโครงสร้างข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้การตรวจสอบโครงสร้างข้อมูล

ทำการตรวจสอบประเภทและขอบเขตของข้อมูลในแต่ละฟิลด์ของข้อมูลแต่ละชุดโดยข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วย

ตารางที่ 1 ข้อมูลชุดที่1 GPS Data

Field Name	Data Type	คำอธิบาย
unit_id	String	หมายเลขประจำรถบรรทุก
time_stamp	Datetime	เวลาที่บันทึกข้อมูลในรูปแบบ UTC
lat	Float	ละติจูด
lon	Float	ลองจิจูด
speed	Float	ความเร็วของรถ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
unit_type	Float	ประเภทของรถ

ตารางที่ 2 ข้อมูลชุดที่2 Road_Hierarchy

Field Name	Data Type	คำอธิบาย
id	integer	คีย์หลัก
section_id	integer	รหัสตอนควบคุม
road_id	integer	รหัสทางหลวง
road_code	character	หมายเลขทางหลวง
control	character	ตอนควบคุม
control_name	character	ชื่อตอนควบคุม
the_geom	geometry	Geometryของถนน

3.2.1 การจัดการค่าที่ขาดหาย (Missing Values)

ดำเนินการตรวจสอบค่าที่ขาดหายในตัวแปรสำคัญ ได้แก่ unit_id, time_stamp, lat, lon และ speed โดยใช้เกณฑ์ดังนี้:

กรณีที่ time_stamp, lat หรือ lon ว่างเปล่า จะตัดเรคคอร์ดนั้นออกทันที เนื่องจากไม่สามารถระบุตำแหน่งหรือเวลาได้ หาก speed ขาดหาย ในจำนวนไม่มาก จะลบทิ้ง แต่หากพบในปริมาณ

มากในรถคันใด อาจพิจารณาการประมาณค่า (imputation) หรือเติมเป็น 0 หากสอดคล้องกับพฤติกรรมรถหยุดนิ่ง

3.2.2 การจัดการค่าผิดปกติ (Outlier Detection and Filtering)

ตรวจสอบและกรองค่าผิดปกติที่อาจเกิดจากปัญหาทางเทคนิค เช่น สัญญาณ GPS ผิดเพี้ยน หรือค่าความเร็วผิดปกติ โดยใช้เกณฑ์ดังนี้:

(a) ความเร็ว (Speed): กำหนดช่วงค่าที่สมเหตุสมผลไว้ที่ 0–120 กม./ชม. ค่าที่สูงเกินหรือมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะถูกลบ เว้นแต่พิสูจน์ได้ว่าอยู่ในช่วงหยุดรถ

(b) ตำแหน่งพิกัด (Latitude / Longitude): ละติจูดที่อยู่นอกช่วง 0–25 องศา และลองจิจูดนอกช่วง 97–106 องศา จะถูกตัดออก

(c) เวลา (Timestamp): ตรวจสอบและลบค่าที่ซ้ำซ้อนหรือไม่เรียงลำดับ เพื่อรักษาความถูกต้องเชิงเวลา

3.2.3 การจัดการข้อมูลซ้ำซ้อน (Duplicate Records)

ดำเนินการตรวจหาข้อมูลที่ซ้ำแบบสมบูรณ์ (exact duplicates) โดยเฉพาะฟิลด์ unit_id, time_stamp, lat, lon, speed ซึ่งอาจเกิดจากการส่งข้อมูลซ้ำจากอุปกรณ์ GPS เรคคอร์ดที่ซ้ำจะถูกลบออก

3.3 การระบุจุด เริ่มต้น และ จุดสิ้นสุด (OD identification)

3.3.1 การเตรียมข้อมูลพื้นฐาน

ข้อมูล GPS ถูกจัดเก็บในตาราง TruckGPSData ซึ่งประกอบด้วยหมายเลขรถ (unit_id), เวลาที่บันทึก (timestamp), พิกัดละติจูดและลองจิจูด (lat/lon) และความเร็ว (speed) ในขณะเดียวกันข้อมูลตำแหน่งของนิคมอุตสาหกรรมถูกจัดเก็บในตาราง IndustrialZones ซึ่งมีข้อมูลชื่อพื้นที่ จังหวัด และรูปทรงขอบเขต (geometry) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่

3.3.2 การคัดกรองข้อมูลพื้นที่ศึกษา

ทำการคัดเลือกเฉพาะรถบรรทุกที่มีการเคลื่อนที่เข้า-ออกจากเขตนิคมอุตสาหกรรมเป้าหมาย และมีการเดินทางไปยังท่าเรือแหลมฉบังอย่างน้อยหนึ่งครั้ง โดยใช้ฟังก์ชัน STIntersects() กับข้อมูลเชิงพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรมและท่าเรือ เพื่อกำหนดตำแหน่ง zone_name และ zone_type สำหรับแต่ละตำแหน่ง GPS

3.3.3 การจัดกลุ่มตามช่วงเวลาในพื้นที่เดียวกัน (Zone Grouping)

จากตำแหน่งที่อยู่ภายในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง ระบบจะจัดกลุ่มข้อมูลตามลำดับเวลาที่ต่อเนื่องในพื้นที่เดียวกัน โดยใช้ฟังก์ชัน LAG() เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนพื้นที่ และสร้าง group_id ด้วยการสะสมค่าด้วยฟังก์ชัน SUM() สำหรับแต่ละกลุ่ม จะบันทึกเวลาที่เริ่มต้นและสิ้นสุดของการอยู่ในพื้นที่นั้น

3.3.4 การจับคู่ต้นทาง-ปลายทาง (OD Pairing)

OD Trip จะถูกสร้างจากการจับคู่การเปลี่ยนผ่านระหว่างนิคมอุตสาหกรรมและท่าเรือ โดยพิจารณาลำดับของ group_id สำหรับแต่ละ unit_id เพื่อจัดกลุ่มเป็นเที่ยวเดินทาง และกำหนด trip_id พร้อมช่วงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละเที่ยว

3.3.5 การดึงข้อมูล GPS ตามช่วงเวลาการเดินทาง

สำหรับแต่ละเที่ยวที่ได้จากขั้นตอนจับคู่ OD จะดึงข้อมูล GPS ในช่วงเวลาเริ่มต้นถึงสิ้นสุดของ trip_id เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์เส้นทางเดินรถ ระยะทาง เวลาในการเดินทาง และประเมินการปล่อย CO_2 ของแต่ละเที่ยวได้อย่างละเอียด

กระบวนการทั้งหมดนี้ช่วยให้สามารถระบุเส้นทางการเดินทางระหว่างนิคมอุตสาหกรรมและท่าเรือแหลมฉบังได้อย่างแม่นยำในระดับเที่ยวเดินทาง ช่วยวางรากฐานในการวิเคราะห์เชิงลึกต่อไป เช่น การเลือกเส้นทางที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำที่สุดในแต่ละคู่ OD และการวางแผนระบบโลจิสติกส์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

3.4 การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก

3.4.1 การจำแนกเส้นทางการเดินรถด้วยวิธีความคล้ายคลึงของชุดถนน (Jaccard Similarity)

(a) การสร้างเส้นทางที่เป็นไปได้ (Candidate Routes)

เริ่มจากการใช้ Google Maps เพื่อสร้างเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างต้นทางและปลายทาง (OD pair) ซึ่งจะได้เส้นทางแนะนำหลายทาง (Alternative Routes) แล้วแปลงเป็นลำดับของรหัสถนน (Road ID) ที่รถมีแนวโน้มใช้

(b) การจับคู่จุด GPS กับรหัสถนน (GPS Point Matching)

นำจุดพิกัด GPS ที่ได้จากรถบรรทุกมาจับคู่กับถนนจริงบนโครงข่ายถนน โดยใช้ฟังก์ชัน sjoin_nearest จากไลบรารี GeoPandas ของ Python เพื่อระบุ Road ID ที่ใกล้ที่สุด โดยพิจารณาระยะทางที่เหมาะสม เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณคลาดเคลื่อน

(c) การแมตช์เส้นทางจริงกับเส้นทางจำลอง (Path Matching)

เปรียบเทียบลำดับของ Road ID ที่ได้จาก GPS กับลำดับของแต่ละเส้นทางที่สร้างจาก Google Maps โดยใช้ดัชนีความคล้ายคลึงแบบ Jaccard (Jaccard Similarity Score) เพื่อประเมินว่าเส้นทางจริงใกล้เคียงกับเส้นทางจำลองใดมากที่สุด

3.4.2 การวิเคราะห์เส้นทางรถบรรทุกด้วยวิธี Machine Learning

เพื่อจำแนกพฤติกรรมการเดินทางของรถบรรทุกบนเครือข่ายถนนในประเทศไทย โดยใช้เทคนิค Unsupervised Clustering เพื่อจัดกลุ่มเส้นทางที่มีลักษณะการใช้งานถนนคล้ายกัน โดยเริ่มจากการนำผลลัพธ์จากกระบวนการ Map-Matching มาแปลงให้อยู่ในรูปแบบ One-Hot Encoding ซึ่งแสดงว่าทริปใดใช้ถนนสายใดบ้าง จากนั้นข้อมูลจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการจัดกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-Means Clustering ที่ใช้เวกเตอร์ไบนารีของการใช้งานถนนเป็นตัวแทนลักษณะของแต่ละทริป

ขั้นตอนการวิเคราะห์ประกอบด้วย:

(a) การเตรียมข้อมูลเวกเตอร์ของการใช้งานถนน

(b) การเลือกจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมด้วยวิธี Elbow Method

(c) การจัดกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-Means

(d) การตีความผลลัพธ์เชิงพฤติกรรมการขนส่งของแต่ละกลุ่ม

ผลที่ได้สามารถสะท้อนลักษณะการใช้งานถนนหลักที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มรถบรรทุก ช่วยให้สามารถเข้าใจรูปแบบการเดินทางและพฤติกรรมการขนส่งเชิงลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.5 การวิเคราะห์ระยะทางโดยอาศัยGPS

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลพิกัด GPS ที่บันทึกจากการเดินทางของรถบรรทุกแต่ละทริป เพื่อคำนวณระยะทางจริงบนพื้นผิวโลก (ground-truth distance) โดยไม่พึ่งพาแผนที่จากแหล่งภายนอก เช่น Google Maps ซึ่งอาจไม่สะท้อนเส้นทางที่เกิดขึ้นจริง

การวิเคราะห์ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้:

(a) จัดกลุ่มข้อมูลตามรหัสทริป (trip_name) เพื่อแยกเส้นทางการเดินทางแต่ละรอบออกจากกัน

(b) เรียงลำดับข้อมูลตามเวลา (timestamp) เพื่อให้เส้นทางมีลำดับที่ถูกต้อง สะท้อนการเคลื่อนที่จริง

(c) คำนวณระยะทางแบบจุดต่อจุด โดยใช้ไลบรารี geopy และฟังก์ชัน geodesic() ที่อิงโมเดล WGS-84 เพื่อความแม่นยำในการคำนวณระยะทางเชิงภูมิศาสตร์ระหว่างพิกัดที่อยู่ติดกัน

สรุปผลลัพธ์ ในรูปแบบตารางที่แสดงรหัสทริป (trip_name), ระยะทางรวม (GPSP2P_dist) และจำนวนจุดที่ใช้ในการคำนวณ (num_points)

ผลลัพธ์จากกระบวนการนี้สามารถใช้เปรียบเทียบความแม่นยำของระยะทางกับแหล่งข้อมูลอื่น และตรวจสอบความสมเหตุสมผลของพฤติกรรมการเดินทางที่ได้จากข้อมูล GPS จริง

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ปล่อยในปัจจุบัน

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการโดยใช้สมการมาตรฐานด้านโลจิสติกส์และสิ่งแวดล้อม ดังแสดงตัวอย่างใน**สมการที่ (2)**

$$GE = (\sum_{i=1}^{N} D) \times L \times EF \qquad (2)$$

โดยที่ GE = ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2e$), N = จำนวนเที่ยวเดินทางของรถบรรทุก, D = ระยะทางที่รถบรรทุกแต่ละคันเดินทาง (km), L = น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ยต่อคันรถ (ตัน), EF = ปัจจัยการปล่อยคาร์บอน (เท่ากับ 0.0852 $kgCO_2e$/ตัน·กิโลเมตร)

4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์เส้นทางที่รถบรรทุกใช้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์เส้นทางรถบรรทุกด้วยวิธีเปรียบเทียบความคล้ายคลึงของชุดข้อมูล

ในการวิเคราะห์เส้นทางการเดินทางของรถบรรทุก งานวิจัยได้ดำเนินการสุ่มเลือกและกรองข้อมูลพิกัด GPS ของรถบรรทุกตามเงื่อนไขต้นทาง–ปลายทาง (OD pairs) ที่มีความสมบูรณ์และเชื่อถือได้ โดยผลจากกระบวนการดังกล่าวพบว่ามี OD pairs ที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งหมดจำนวน **9 คู่** สำหรับแต่ละคู่ของเส้นทางพบว่ามี **เส้นทางหลักที่รถบรรทุกใช้งานจริง 2–3 เส้นทาง** โดยเส้นทางเหล่านี้สะท้อนถึงพฤติกรรมการเลือกเส้นทางของผู้ขับขี่ในสภาพแวดล้อมจริง

เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปแบบการเดินทาง ระบบได้จัดเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ GeoDataFrame สองชุด ได้แก่

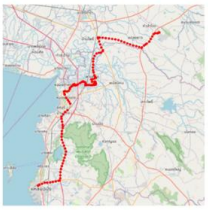
gdf_utm: ชุดข้อมูลพิกัด GPS ของรถบรรทุก ซึ่งถูกแปลงให้อยู่ในระบบพิกัด UTM เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่

polyline_data_wgs84: ชุดข้อมูลโครงข่ายถนนในระบบพิกัด WGS84 ที่นำมาจากฐานข้อมูล OpenStreetMap หรือ Google Maps สำหรับใช้อ้างอิงเป็นเส้นทางที่สามารถเดินทางได้ตามปกติ (Suggested route)

การวิเคราะห์ความคล้ายคลึงของเส้นทางทำได้โดยการนำเส้นทางเดินทางจริง (Actual route) มาซ้อนทับและเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ระบบแนะนำหรืออนุญาตให้วิ่งได้ตามโครงข่ายถนน (Suggested route) โดยใช้เกณฑ์ด้านตำแหน่งเชิงพื้นที่และรูปแบบของเส้นโค้งในการพิจารณา ตัวอย่างผลลัพธ์ดังแสดงใน**รูปที่ 2** ข้างต้น

เส้นทางหลัก	ผ่านถนนหมายเลข 331	ผ่านถนนหมายเลข 7
รูป		
เส้นทางย่อยที่ผ่าน	[741, 154, 738, 737, 739, 740]	[741, 2156, 699, 701, 700, 149, 150, 154]
ระยะทาง	100 km	94.3 km

Result:



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบข้อมูลของคู่การเดินทางระหว่าง นิคมอุตสาหกรรมเกตเวย์ซิตี้-ท่าเรือแหลมฉบัง

โดยจากการเปรียบเทียบพบว่า เส้นทางการเดินทางของรถบรรทุกส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกับเส้นทางที่ระบบแนะนำ โดยมีความเบี่ยงเบนเล็กน้อยในบางกรณีซึ่งอาจเกิดจากการหลีกเลี่ยงการจราจร จุดพัก หรือข้อจำกัดของถนนในช่วงเวลานั้น

4.1.2 ผลการวิเคราะห์เส้นทางรถบรรทุกด้วย Unsupervised Learning (K-means)

เพื่อระบุจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมในการจัดกลุ่มรถบรรทุก ได้ทำการทดลองโดยใช้ค่า k ตั้งแต่ 2 ถึง จำนวนรถบรรทุกที่วิ่งทั้งหมด และประเมินด้วยวิธี Elbow Method และ Silhouette Score

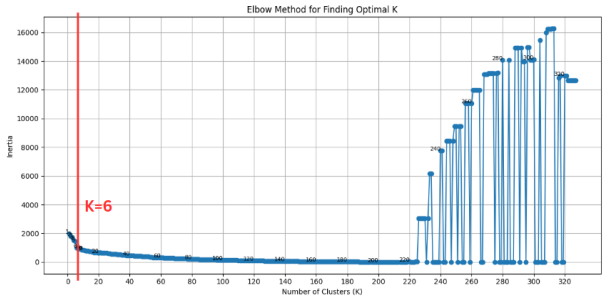
จากการประมวลผลด้วย K-means ด้วยค่า k = 6 สามารถจำแนกพฤติกรรมการเดินทางของรถบรรทุกออกเป็น 4 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มมีลักษณะการใช้เส้นทางที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น:

กลุ่มที่ 1: ใช้งานถนนสายหลักในเขตเมืองเป็นหลัก

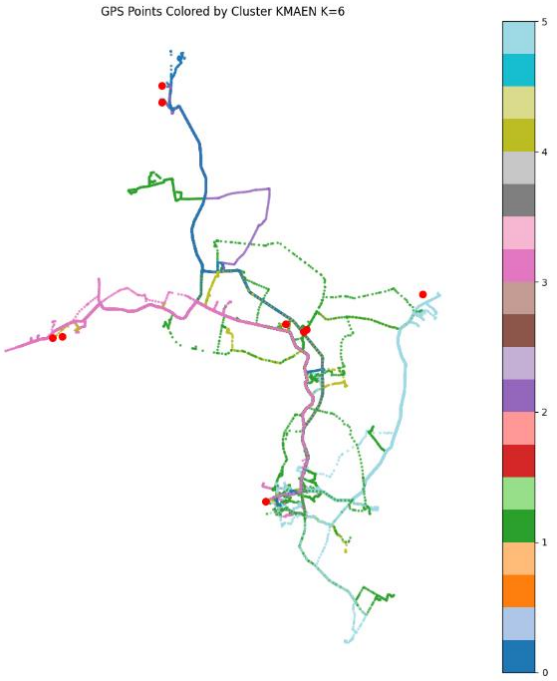
กลุ่มที่ 2: มีการวิ่งระยะไกลระหว่างจังหวัด และใช้ถนนสายหลักหลายเส้น

กลุ่มที่ 3: เดินรถในพื้นที่เฉพาะ เช่น วิ่งวนในนิคมอุตสาหกรรมหรือแหล่งกระจายสินค้า

กลุ่มที่ 4: ลักษณะเฉพาะ วิ่งเส้นทางซ้ำ ๆ เพียงไม่กี่เส้นทาง



รูปที่ 3 กราฟ Elbow และค่า Inertia score ตามค่า k ต่าง ๆ



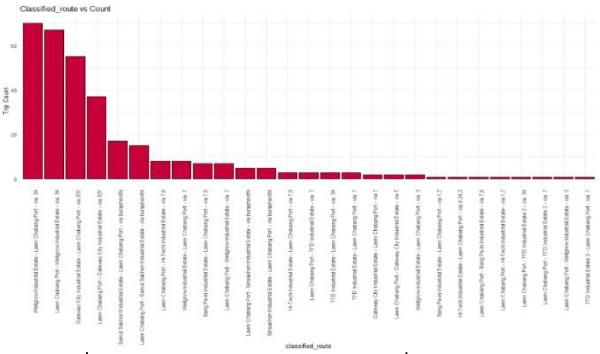
รูปที่ 4 แผนที่ผลลัพธ์ของรูปแบบการใช้ถนนของแต่ละกลุ่ม

4.2 ผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวของรถบรรทุก (Trip Count Analysis)

จากการประมวลผลพบว่า จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกแต่ละคันมีความหลากหลาย โดยมีทั้งคันที่เดินรถเพียงไม่กี่เที่ยว ไปจนถึงคันที่มีจำนวนเที่ยวสูงมากในช่วงเวลาที่บันทึกข้อมูล ดังผลลัพธ์ที่แสดงใน **รูปที่ 5** ข้างต้น

classified_route <chr>	count <int>
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 34	212
Laem Chabang Port - Gateway City Industrial Estate - via 331	184
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 34	168
Gateway City Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 331	150
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7,9	60
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7	53
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 7	46
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 7,9	38
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7	28
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via buraphavithi	27
Laem Chabang Port - Sinsakhon Industrial Estate - via buraphavithi	16
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 3	16
Laem Chabang Port - Samut Sakhon Industrial Estate - via buraphavithi	14
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 34	13
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 34	12
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 7	12
Laem Chabang Port - Bang Pa-in Industrial Estate - via 7,9	8
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 9,34,3	5
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 3	5
Sinsakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via buraphavithi	5
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7,9	4
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 9,34,3	4
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 1,7	4
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 9,34,3	3
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 1,7	3
Laem Chabang Port - Bang Pa-in Industrial Estate - via 9,34,3	3
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 3	3
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 1,7	1
Laem Chabang Port - Gateway City Industrial Estate - via 7	1
Laem Chabang Port - Samut Sakhon Industrial Estate - via 3	1
Laem Chabang Port - Sinsakhon Industrial Estate - via 3	1
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate 2 - via 34	1
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 3,7	1

รูปที่ 5 แสดงการแจกแจงจำนวนเที่ยวของรถบรรทุกทั้งหมดแยกตามราย route

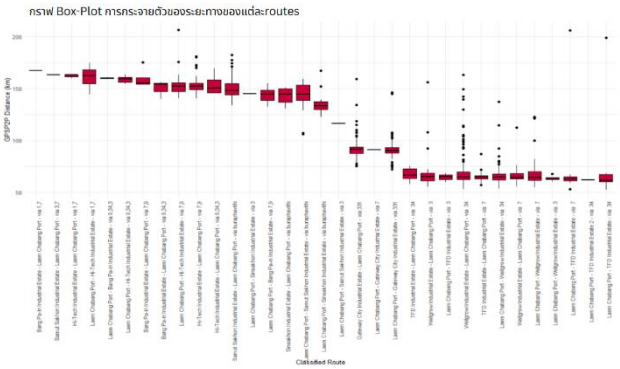


รูปที่ 6 Histogramการแจกแจงจำนวนเที่ยวของรถบรรทุก

พบว่านิคมอุตสาหกรรมที่มีการเดินทางกับท่าเรือแหลมฉบังมากที่สุดสองอันดับแรกคือ นิคมอุตสาหกรรมเวลโกรว์(Wellgrow Industrial Estate) ซึ่งเส้นทางหลักที่ใช้คือ Route 34 มีเที่ยวการเดินทาง 380 เที่ยว (ซึ่งคิดเป็น 34.5% ของการเดินทางทั้งหมด) และนิคมอุตสาหกรรมเกตเวย์ซิตี้ (Gateway City Industrial Estate) ใช้เส้นทางหลักคือ Route 331 มีเที่ยวการเดินทาง 334 เที่ยว (ซึ่งคิดเป็น 30.3% ของการเดินทางทั้งหมด)

4.3 ผลการวิเคราะห์ระยะทางโดยอาศัยข้อมูล GPS

เส้นทางที่มีจุด Outlier เยอะกว่าเส้นอื่น ไม่ได้บอกเส้นทางนั้นผลลัพธ์วัดได้ไม่ดี แต่เพียงแค่มีจำนวน Trip การเดินทางที่เยอะกว่า โดย จุดOutlier บ่งบอกถึงรถบรรทุกที่ขับออกนอกเส้นทางOD ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรม ไปรับสินค้าจากที่อื่นก่อนจะกลับเข้าเส้นทางปกติ



รูปที่ 7 Boxplot การแจกแจงระยะทางของรถบรรทุกแต่ละคันแยกตามเส้นทาง

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของระยะทางในแต่ละเส้นทาง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล GPS กับระยะทางที่แสดงใน Google Maps มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง -15% ถึง 25% ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ทางสถิติและไม่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ในภาพรวม

classified_route	count	mean_percent_diff	sd_percent_diff
Laem Chabang Port - Samut Sakhon Industrial Estate - via 3	1	25.3007087	NA
Laem Chabang Port - Bang Pa-in Industrial Estate - via 7,9	8	14.3917758	4.6472029
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7	53	13.7625936	10.1342118
Laem Chabang Port - Samut Sakhon Industrial Estate - via buraphavithi	14	12.2186806	10.5200685
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7,9	60	10.9325202	4.8920890
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 1,7	4	10.6026918	7.2398554
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 7,9	38	10.4919571	6.5657784
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 7	46	10.3521176	18.3369038
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 1,7	3	9.8817592	1.2409442
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate 2 - via 34	1	9.5652616	NA
Laem Chabang Port - Gateway City Industrial Estate - via 331	184	8.8027995	7.9094791
Gateway City Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 331	150	8.0417162	9.3007604
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 9,34,3	4	7.8544071	6.6375998
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 9,34,3	3	7.2597306	5.5178992
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via buraphavithi	27	5.4926342	7.8134060
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 9,34,3	5	4.8380256	2.3036668
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7,9	4	4.7696262	6.1597335
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7	28	4.6435612	7.8216525
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 1,7	1	4.4593073	NA
Laem Chabang Port - Gateway City Industrial Estate - via 7	1	3.5442010	NA
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 34	13	3.2899595	8.6243749
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 3,7	1	2.7060668	NA
Laem Chabang Port - Bang Pa-in Industrial Estate - via 9,34,3	3	1.0650088	0.4491592
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 3	5	-0.3424596	4.3493686
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 3	3	-1.3831545	7.0617961
Laem Chabang Port - Sinsakhon Industrial Estate - via buraphavithi	16	-2.9085272	8.0940713
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 34	168	-3.9613346	13.6956152
Laem Chabang Port - Sinsakhon Industrial Estate - via 3	1	-5.6731242	NA
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 34	12	-6.3220208	58.0371083
Sinsakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via buraphavithi	5	-8.0262606	6.4870931
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 34	212	-8.7536199	24.1858439
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 7	12	-8.8105124	61.3036502
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 3	16	-15.5391632	40.9251024

รูปที่ 8 ค่าทางสถิติของผลต่างระยะทางของรถบรรทุกแต่ละคันแยกตามเส้นทาง เทียบกับข้อมูล Google Map

4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ปล่อยในการขนส่งทางถนน

ในขั้นตอนการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เราใช้ผลลัพธ์ของ OD trips ร่วมกับข้อมูลระยะทาง โดยจะสมมุติค่าน้ำหนักเฉลี่ยของรถบรรทุกเท่าปากับ 17.50 ตัน ซึ่งมาจาก น้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อเปล่า 10 ตัน มาเฉลี่ยกับ น้ำหนักสูงสุดตามกฎหมายที่สามารถบรรทุกได้สำหรับรถสิบล้อ ซึ่งอยู่ที่ 25 ตัน และค่า Emission Factor จาก ข้อมูลองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก(TGO) (0.0454 kgCO2e/ton-km สำหรับรถบรรทุกประเภทสิบล้อ ได้ผลลัพธ์ดัง**รูปที่ 9**

classified_route	Carbon emission per Trip (kgCO2e/trip)
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 1,7	132.84
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7,9	127.11
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 9,34,3	119.37
Gateway City Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 331	72.09
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 1,7	128.88
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7,9	121.71
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 9,34,3	122.26
Laem Chabang Port - Bang Pa-in Industrial Estate - via 7,9	114.27
Laem Chabang Port - Bang Pa-in Industrial Estate - via 9,34,3	127.34
Laem Chabang Port - Gateway City Industrial Estate - via 331	72.00
Laem Chabang Port - Gateway City Industrial Estate - via 7	72.27
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 1,7	127.85
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 7,9	122.32
Laem Chabang Port - Hi-Tech Industrial Estate - via 9,34,3	126.26
Laem Chabang Port - Samut Sakhon Industrial Estate - via 3	92.58
Laem Chabang Port - Samut Sakhon Industrial Estate - via buraphavithi	112.29
Laem Chabang Port - Sinsakhon Industrial Estate - via 3	115.35
Laem Chabang Port - Sinsakhon Industrial Estate - via buraphavithi	107.92
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 3	51.31
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 34	58.03
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate - via 7	58.87
Laem Chabang Port - TFD Industrial Estate 2 - via 34	49.36
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 3	50.62
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 34	52.45
Laem Chabang Port - Wellgrow Industrial Estate - via 7	54.15
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 3,7	129.86
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via buraphavithi	120.89
Sinsakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port - via buraphavithi	113.29
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 34	52.79
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7	51.59
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 3	58.19
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 34	54.80
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port - via 7	52.55

รูปที่ 9 การปล่อย CO_2 ต่อเที่ยวเดินทางแยกตามราย route

หลังจากได้ข้อมูลการปล่อยคาร์บอนสำหรับแต่ละคู่ OD แยกตามราย route ได้นำข้อมูลเหล่านี้เพื่อมาหาว่าการวิ่งในเส้นทางไหน (route) ในแต่ละคู่ OD ที่จะมีการปล่อยคาร์บอนน้อยที่สุด ดังแสดงผลลัพธ์ของ**รูปที่ 10** ข้างต้น

OD	Low carbon_route	Carbon emission per Trip (kgCO2e/trip)
Bang Pa-in Industrial Estate - Laem Chabang Port	via 9,34,3	119.37
Laem Chabang Port - **Bang Pa-in** Industrial Estate	via 7,9	114.27
Hi-Tech Industrial Estate - Laem Chabang Port	via 7,9	121.71
Laem Chabang Port - **Hi-Tech** Industrial Estate	via 7,9	122.32
Samut Sakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port	via Burapha Withi	120.89
Laem Chabang Port - **Samut Sakhon** Industrial Estate	via 3	92.58
Sinsakhon Industrial Estate - Laem Chabang Port	via Burapha Withi	113.29
Laem Chabang Port - **Sinsakhon** Industrial Estate	via Burapha Withi	107.92
Wellgrow Industrial Estate - Laem Chabang Port	via 7	52.55
Laem Chabang Port - **Wellgrow** Industrial Estate	via 3	50.62
Gateway City Industrial Estate - Laem Chabang Port	via 331	72.09
Laem Chabang Port - **Gateway** City Industrial Estate	via 331	72.00
TFD Industrial Estate - Laem Chabang Port	via 7	51.59
Laem Chabang Port - **TFD** Industrial Estate	via 3	51.31
Laem Chabang Port - **TFD** Industrial Estate 2	via 34	49.36

รูปที่ 10 สรุป Low-carbon route สำหรับแต่ละคู่ OD

หมายเหตุ: คู่ OD ที่ตัวหนังสือเป็นสีแดงคือคู่ OD ที่มีการเดินทางของรถบรรทุกเส้นทางเดียว จึงไม่มีเส้นทางอื่นเปรียบเทียบ

5 บทสรุป

5.1 สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์จากข้อมูล GPS ช่วงวันที่ 12–18 ตุลาคม 2566 พบข้อมูลทั้งหมดกว่า 286 ล้านแถว โดยผ่านการคัดกรองเหลือ 52,319 แถว คิดเป็นจำนวนเที่ยวขนส่ง 1,102 เที่ยว

นิคมอุตสาหกรรมที่มีการเดินทางไปยังท่าเรือแหลมฉบังมากที่สุดคือ นิคมอุตสาหกรรมเวลโกรว์ (501 เที่ยว) และ นิคมอุตสาหกรรมเกตเวย์ซิตี้ (335 เที่ยว) รวมกันคิดเป็น 76% ของการ

เดินทางทั้งหมด ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) ทำเลที่ตั้งบนแนวทางโลจิสติกส์หลัก (EEC Corridor) (2) ประเภทอุตสาหกรรมที่พึ่งพาการขนส่งทางเรือ และ (3) ความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่ง

นอกจากนี้ ยังพบว่าเส้นทางหลักที่ใช้ในการเดินทางจากทั้งสองนิคม ได้แก่ Route 34 (เวลโกรว์) และ Route 331 (เกตเวย์ซิตี้) เป็นเส้นทางที่มีแนวโน้มเป็น Low-carbon route ซึ่งช่วยลดการปล่อยคาร์บอนได้มากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นทางทางเลือกอื่น

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

แม้งานวิจัยนี้จะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของรถบรรทุกและระบุเส้นทางที่มีแนวโน้มลดการปล่อยคาร์บอนได้ แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ ดังนี้ (1) ไม่มีข้อมูลน้ำหนักบรรทุกของรถแต่ละคัน: การขาดข้อมูลน้ำหนักบรรทุกทำให้ไม่สามารถสะท้อนความหลากหลายของภาระงานในแต่ละเที่ยววิ่งได้อย่างครบถ้วน ทั้งที่น้ำหนักบรรทุกมีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ และ (2) ไม่มีการคำนวณปัจจัยด้านสภาพจราจรและระยะเวลาเดินทาง: การคำนวณค่าการปล่อยคาร์บอนในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้รวมปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญ เช่น ความแออัดของการจราจรหรือเวลาที่ใช้ในการเดินทาง ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนจากสภาพการใช้งานจริง

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

เพื่อเพิ่มความครบถ้วนและแม่นยำในการวิเคราะห์ รวมถึงการประยุกต์ใช้ผลการศึกษานี้ในเชิงนโยบายหรืออุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาประเด็นต่อไปนี้ (1) การจัดเก็บข้อมูลน้ำหนักบรรทุกของแต่ละเที่ยววิ่ง : ควรมีการบูรณาการข้อมูลน้ำหนักบรรทุกเข้ากับข้อมูล GPS เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณค่าการปล่อยคาร์บอนต่อตัน-กิโลเมตร (ton-km) ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ และ (2) การศึกษาความเป็นไปได้ของการขนส่งแบบผสมผสาน (Multimodal Transport): ควรมีการวิเคราะห์ศักยภาพของการเปลี่ยนรูปแบบการขนส่ง (Modal Shift) เช่น จากถนนไปสู่ทางรางหรือรูปแบบการเชื่อมต่อหลายโหมด เพื่อสนับสนุนแนวทางการขนส่งที่ปล่อยคาร์บอนต่ำและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Akter, Taslima, and Sarah Hernandez. 2022. "Representative truck activity patterns from anonymous mobile sensor data." Transportation Research Part C: Emerging Technologies.

[2] Siripirote, T., and A. Sumalee. 2020. "Statistical estimation of freight activity analytics from Global Positioning System data of trucks." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.

[3] Dabiri, Sina, and Kevin Heaslip. 2018. "Inferring mode of travel using convolutional neural networks on GPS trajectories." Transportation Research Part C: Emerging Technologies.

[4] Jagadeesh, G. R., T. Srikanthan, and X. D. Zhang. 2004. "A map matching method for GPS-based real-time vehicle location." Journal of Navigation

[5] Rappos, Efstratios, Stephan Robert, and Philippe Cudre-Mauroux. 2018. "A force-directed approach for offline GPS trajectory map matching." In Proceedings of the 26th ACM SIGSPATIAL International Conference.

[6] Yang, Jian, and Liqiu Meng. 2014. "Feature selection in conditional random fields for map matching of GPS trajectories." In Progress in Location-Based Services.

[7] Regmi, M., and Hanaoka, S. 2010. "A survey on impacts of climate change on road transport infrastructure and adaptation strategies in Asia." Transportation Research Part A: Policy and Practice. Available at: https://www.researchgate.net/publication/225887118_A_survey_on_impacts_of_climate_change_on_road_transport_infrastructure_and_adaptation_strategies_in_Asia.

[8] Vierth, I., and Cullinane, K. 2023. "The impact of weight restrictions and rail freight incentives on carbon emission reduction in Sweden." Transportation Policy 142:125-136. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.125136.

[9] Zhu, L., Liu, Z., and Jian, W. 2023. "Using carbon tax policies to reduce CO2 emissions in freight transport: A case study on Yiwu-Ningbo container transport route in China." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. DOI: 10.1177/03611981231160538.

[10] Nguyen, H. A., Soltani, A., and Allan, A. 2018. "Adelaide's East End tramline: Effects on modal shift and

carbon reduction." Transportation Research Part A: Policy and Practice.

[11] Duan, L., Hu, W., Deng, D., Fang, W., Xiong, M., Lu, P., Li, Z., and Zhai, C. 2021. "Energy-saving measures and carbon emissions control in urban road transport: A case study in Chongqing, China." Energy Research. DOI: 10.1016/j.enres.2021.12.012.

[12] Regmi, M., and Hanaoka, S. 2015. "Assessment of modal shift and emissions along a freight transport corridor between Laos and Thailand." Transport Policy.

[13] Phadungsri, D. 2022. "Freight transportation demand and sustainable solutions in Thailand." International Journal of Logistics Research and Applications