



การวิเคราะห์ทางเลือกในการขนส่งของโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะ กรณีศึกษา



ธนวัฒน์ สิทธิชัยจารุ

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การวิเคราะห์ทางเลือกในการขนส่งของโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะ กรณีศึกษา



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การวิเคราะห์ทางเลือกในการขนส่งของโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะ กรณีศึกษา”
ของ ธนวัฒน์ สิทธิชัยจารุ
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.โพธิ จ้าวไพศาล)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โพธิ์งาม สมกุล)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญนิตี คำเมือง)

อนุมัติ

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมนาด อินทจามรรักษ์)

หัวหน้าภาควิชาภาษาศาสตร์ คติชนวิทยา ปรัชญาและศาสนา คณะมนุษยศาสตร์
รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

29 พ.ค. 2569

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์ทางเลือกในการขนส่งของโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะ กรณีศึกษา
ผู้วิจัย	ธนวัฒน์ สิทธิชัยจารุ
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โพธิ์งาม สมกุล
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัย นเรศวร, 2568
คำสำคัญ	เชื้อเพลิงขยะ, การขนส่งหลายรูปแบบ, ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) เติบโตแบบก้าวกระโดด โรงงานกรณีศึกษาผลิตและจัดส่ง RDF ให้กับกลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ซึ่งนำ RDF มาใช้ผลิตเป็นพลังงานความร้อนเพื่อลดการใช้ถ่านหิน ห่วงโซ่อุปทานของการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF ของกรณีศึกษาในปัจจุบัน ใช้การขนส่งด้วยรถบรรทุกขนาดใหญ่ ซึ่งมีต้นทุนและอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง จึงได้มีแนวคิดในการขนส่งหลายรูปแบบเข้ามาพิจารณาเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF ในอนาคต เพื่อลดต้นทุนรวมและลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห่วงโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะนี้

โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจวางแผนเชิงกลยุทธ์ สำหรับการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีทั้งสิ้น 4 Model ได้แก่ Model I การลดต้นทุนรวมของห่วงโซ่อุปทานให้มีค่าที่ต่ำที่สุด Model II การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีปริมาณน้อยที่สุด Model III การลดต้นทุนรวมในการขนส่งโดยคิดต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย และ Model IV การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยคำนึงถึงปริมาณความจุของคลังสินค้า โดยรูปแบบการขนส่งที่นำมาพิจารณานั้นประกอบไปด้วยยานพาหนะทั้งสิ้น 9 ประเภท ซึ่งประเภทที่ 1 - 8 นั้น เป็นการขนส่งทางถนน และประเภทที่ 9 เป็นการขนส่งทางราง โดยการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ด้วย OpenSolver บนโปรแกรม Microsoft Excel

จากผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ คือการเลือกการขนส่งทางถนนโดยยานพาหนะประเภทที่ 5 มาใช้ในการขนส่งวัตถุดิบ และเลือกยานพาหนะประเภทที่ 7 มาใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จะส่งผลให้มีต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถลดต้นทุน Model I ได้ถึง 2.80% และใน Model III ลดลง 2.79% และการเลือกยานพาหนะประเภทที่ 6 มาใช้ในการขนส่งทางถนน

และทางารวมกันกับพาหนะประเภทที่ 9 ส่งผลให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใน Model II มีปริมาณลดลงจากเดิมถึง 11.63% และใน Model IV ลดลง 9.74%



Title	ANALYSIS OF TRANSPORTATION ALTERNATIVES IN THE REFUSE DERIVED FUEL'S SUPPLY CHAIN: A CASE STUDY
Author	Thanawat Sittichaijaru
Advisor	Assistant Professor Po-ngarm Somkun, Ph.D.
Academic Paper	M.Eng. Thesis in Management Engineering, Naresuan University, 2025
Keywords	Refuse Derived Fuel (RDF), Multimodal transportation, Mathematical model

ABSTRACT

The Refuse Derived Fuel (RDF) manufacturing industry is experiencing exponential growth. In this case study, the factory produces and supplies RDF to the cement industry, which utilizes it to generate thermal energy and reduce coal consumption. Currently, the supply chain for transporting raw materials and RDF products relies on heavy-duty trucks, resulting in high costs and carbon dioxide emissions. Consequently, a multimodal transportation approach has been introduced for consideration. This serves as an alternative for future raw material and product transport, aiming to minimize total costs and reduce carbon dioxide emissions within this refuse-derived fuel supply chain.

This research presents mathematical models as decision-making alternatives for strategic planning in the transportation of raw materials and RDF products. The research proposes four mathematical models: 1) Minimizing Total Costs, 2) Minimizing Total Carbon Emissions, 3) Minimizing Total Costs and Carbon Emissions Costs, and 4) Minimizing Total Carbon Emissions considering warehouse capacity. The transport modes under consideration consist of nine vehicle types, where types 1 to 8 represent road transportation, and type 9 represents rail transportation. Optimization was performed using OpenSolver in Microsoft Excel.

Based on the optimal results from the mathematical models, selecting vehicle type 5 for road transportation of raw materials and vehicle type 7 for transporting RDF products yields the lowest combined cost, resulting in an immediate cost reduction of 2.80% in Model I and 2.79% in Model III. Furthermore, combining road transportation

using vehicle type 6 with rail transportation using vehicle type 9 reduces carbon dioxide emissions by 11.63% in Model II and 9.74% in Model IV.



ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับการอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณมากมายหลายท่าน ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โพธิ์งาม สมกุล ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้สละเวลาอันมีค่าคอยให้ความช่วยเหลือคำปรึกษา และช่วยตรวจทานแก้ไขตลอดจนระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.โพธิ์ จ้าวไพศาล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญนิตี คำเมือง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา และชี้แนะถึงแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์มากที่สุด นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ บุรณจารุกร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์ อาจารย์เกตุชนา บุญฤทธิ์ รวมไปถึงคุณณัฐชา สุนพานิช คุณนุชนารถ แก้วแดง คุณชลิดา ดอนจักร์ คุณธนัชพร สมใส คณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่เสียสละเวลา เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงไปได้ด้วยดี

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงบุคคลในครอบครัวและกัลยาณมิตรทุกท่าน ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

และสุดท้ายนี้ที่ขาดไปไม่ได้เลยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาสำหรับการให้ข้อมูลมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ธนวัฒน์ สิทธิชัยจารุ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ	
ประกาศคุณูปการ.....ช	
สารบัญ.....ช	
สารบัญตาราง.....ฉ	
สารบัญภาพ.....ฐ	
บทที่ 1 บทนำ..... 1	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1	
1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย..... 8	
1.3 ความสำคัญของการวิจัย..... 9	
1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... 9	
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ..... 10	
1.6 สมมุติฐานของการวิจัย..... 11	
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 12	
2.1. แนวคิดเกี่ยวกับขยะมูลฝอย..... 12	
2.2. แนวคิดเกี่ยวกับเชื้อเพลิงขยะ..... 16	
2.3. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ..... 21	
2.4. การใช้ RDF ในการผลิตพลังงาน..... 26	
2.5 นโยบายและมาตรการสนับสนุนของภาครัฐในการใช้ RDF..... 29	
2.6 มาตรการ CBAM ของสหภาพยุโรป..... 30	
2.7 การจัดการขยะมูลฝอยในประเทศไทย..... 33	
2.8 แนวคิดเกี่ยวกับการขนส่งทางราง (Rail Transportation)..... 35	

2.9 แนวคิดเกี่ยวกับการขนส่งแบบผสมผสาน (Multimodal Transportation)	38
2.10 แนวคิดเกี่ยวกับตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการขนส่งแบบผสมผสาน.....	42
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	63
3.1 ทบทวนวรรณกรรม เอกสารที่เกี่ยวข้อง และเก็บรวบรวมข้อมูล	63
3.2 เก็บข้อมูลในการขนส่งทั้งขาเข้า และขาออกของโรงงานกรณีศึกษา.....	65
3.3 สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบ.....	79
3.4 การสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์บนตารางทำการ Microsoft Excel	79
3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และแบบจำลองบนตารางทำการ	80
3.6 ทดลองเปรียบเทียบรูปแบบการขนส่งรูปแบบเดียว และหลายรูปแบบ จากข้อมูลปัจจุบัน และค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์	80
3.7 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)	81
3.8 วิเคราะห์ และสรุปผล	82
บทที่ 4 ผลการวิจัย	83
4.1 ภาพรวม ประเด็นพิจารณา และข้อตกลงเบื้องต้น ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์	83
4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I	90
4.3 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model II	99
4.4 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III	106
4.5 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV.....	114
4.6 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ.....	122
บทที่ 5 บทสรุป.....	123
5.1 สรุปผลการวิจัย	123
5.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ	124
บรรณานุกรม	126

ประวัติผู้วิจัย	137
-----------------------	-----



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 คุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงขยะ	20
ตาราง 2 สังเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตของตลาดเชื้อเพลิงขยะ	29
ตาราง 3 สังเคราะห์ผลกระทบของมาตรการ CBAM ต่ออุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงขยะ	32
ตาราง 4 การเติบโตของขยะมูลฝอยในประเทศไทย	33
ตาราง 5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ Multimodal Transportation	42
ตาราง 6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในประเทศไทย	55
ตาราง 7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในต่างประเทศ	57
ตาราง 8 สรุปวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	58
ตาราง 9 สังเคราะห์ช่องว่างการวิจัย (Research Gap Analysis)	61
ตาราง 10 สรุปค่า Emission Factor ของรูปแบบการขนส่งต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	62
ตาราง 11 คุณลักษณะของยานพาหนะที่พิจารณา	67
ตาราง 12 เส้นทางขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงานกรณีศึกษา	68
ตาราง 13 ระยะทางการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDFจากโรงงานกรณีศึกษาไปยังลูกค้า	72
ตาราง 14 ระยะทางจากซัพพลายเออร์ไปยังคลังสินค้า	76
ตาราง 15 ระยะทางจากคลังสินค้าไปยังโรงงาน RDF	77
ตาราง 16 ประเด็นที่นำมาพิจารณาในตัวแทนทางคณิตศาสตร์ของแต่ละโมเดล	83
ตาราง 17 ข้อตกลงเบื้องต้น (Assumptions)	84
ตาราง 18 การวิเคราะห์ความไว	89
ตาราง 19 ค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน	94
ตาราง 20 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแทนทางคณิตศาสตร์ Model I	94
ตาราง 21 ปริมาณการปล่อย CO ₂ ในการขนส่งของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน	101
ตาราง 22 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแทนทางคณิตศาสตร์ Model II	103

ตาราง 23 ค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมค่าอัตราการปล่อย CO ₂ ของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน	108
ตาราง 24 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III	110
ตาราง 25 ปริมาณการปล่อย CO ₂ ในการขนส่งของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน	118
ตาราง 26 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV	119
ตาราง 27 สรุปผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ	122



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF).....	1
ภาพ 2 แนวโน้มการเติบโตของตลาดเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในประเทศไทย.....	2
ภาพ 3 อัตราการผลิตไฟฟ้าจากภาคเอกชนด้วยพลังงานทดแทนประเภทต่างๆ	3
ภาพ 4 สัดส่วนขยะมูลฝอยที่สามารถแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF).....	5
ภาพ 5 แหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยประเภทต่างๆ	13
ภาพ 6 ประเภทของขยะมูลฝอยจำแนกตามองค์ประกอบ	14
ภาพ 7 สัดส่วนองค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย	15
ภาพ 8 ตัวอย่างเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในรูปแบบต่างๆ	18
ภาพ 9 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ตามมาตรฐาน ASTM	20
ภาพ 10 บริเวณรับและจัดเก็บขยะมูลฝอยในโรงงานผลิตเชื้อเพลิงขยะ	21
ภาพ 11 เทคโนโลยีการคัดแยกขยะในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ	22
ภาพ 12 เครื่องบดย่อยขยะในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ	23
ภาพ 13 วิธีการลดความชื้นของเชื้อเพลิงขยะ.....	24
ภาพ 14 เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในรูปแบบอัดแท่งและอัดเม็ด	25
ภาพ 15 แผนผังกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF).....	26
ภาพ 16 แผนผังการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะด้วยเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง	27
ภาพ 17 ปริมาณการเติบโตของขยะมูลฝอยในประเทศไทย	34
ภาพ 18 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	64
ภาพ 19 การไหลของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF	65
ภาพ 20 โครงข่ายการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา	66
ภาพ 21 แผนที่เส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ.....	71
ภาพ 22 แผนที่เส้นทางการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ทางรถไฟภาคกลางและภาคตะวันออก	72

ภาพ 23 แผนที่เส้นทางการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ทางรถไฟภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	73
ภาพ 24 แผนที่เส้นทางรถไฟ.....	74
ภาพ 25 การไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF ของการขนส่งแบบหลายรูปแบบ	75
ภาพ 26 ข้อมูลปริมาณการขนส่งวัตถุดิบขาเข้า	77
ภาพ 27 ข้อมูลปริมาณการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ขาออก.....	78
ภาพ 28 OpenSolver บนโปรแกรม Microsoft Excel.....	80
ภาพ 29 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบัน.....	93
ภาพ 30 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model I	95
ภาพ 31 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model I.....	96
ภาพ 32 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน Model I.....	98
ภาพ 33 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model I.....	98
ภาพ 34 เส้นทางและยานพาหนะจากผลลัพธ์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model II.....	102
ภาพ 35 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model II.....	104
ภาพ 36 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model II.....	105
ภาพ 37 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model III	109
ภาพ 38 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model III.....	111
ภาพ 39 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน Model III.....	112
ภาพ 40 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model III.....	113
ภาพ 41 เส้นทางและยานพาหนะจากผลลัพธ์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model IV	116
ภาพ 42 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model IV.....	120
ภาพ 43 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model IV	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยเป็นอย่างมาก เป็นการประสานอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนและการจัดการขยะ จากสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2566 พบว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 27.35 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้าร้อยละ 3.3 โดยมีอัตราการนำขยะมูลฝอยไปใช้ประโยชน์เพียงร้อยละ 33 เท่านั้น ในขณะที่ขยะส่วนใหญ่ยังคงถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2567) สถานการณ์ดังกล่าวทำให้การแปรรูปขยะมูลฝอยเป็นเชื้อเพลิง กลายเป็นทางเลือกสำคัญในการจัดการขยะและผลิตพลังงานทดแทนไปพร้อมกัน นอกจากนี้ รัฐบาลยังให้ความสำคัญกับการส่งเสริมพลังงานทดแทนจากขยะ โดยกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนไว้ที่ 900 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2580 ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (กระทรวงพลังงาน, 2567) อุตสาหกรรม RDF จึงมีบทบาทสำคัญทั้งในมิติของการแก้ไขปัญหาขยะล้นเมือง การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการสร้างคามมั่นคงทางพลังงานให้กับประเทศ

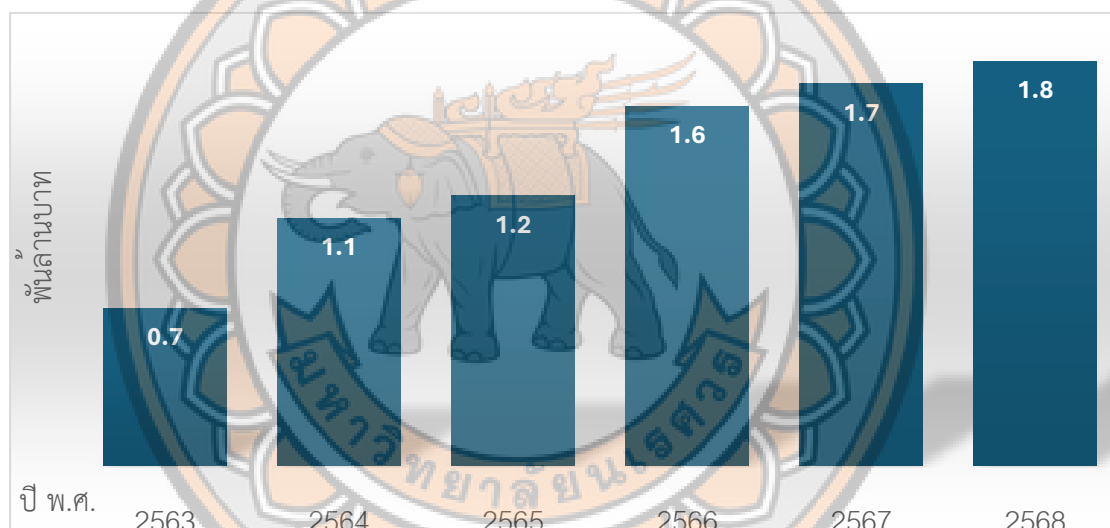


ภาพ 1 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

ที่มา: Clover Power (2567)

โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับการใช้ RDF ซึ่งได้จากการแปรรูปขยะมูลฝอยผ่านกระบวนการคัดแยกและปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน ดังภาพที่ 1 ถือว่าเป็นหนึ่งธุรกิจที่มีแนวโน้มในการเติบโตไปพร้อมกับการบริหารจัดการขยะมูลฝอยภายในประเทศ

จากรายงานของศูนย์วิจัยกสิกรไทย ตลาดของธุรกิจ RDF ในปี พ.ศ. 2568 มีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.3 ซึ่งมีมูลค่าการซื้อขายของตลาดเชื้อเพลิงขยะ RDF ถึง 1.8 พันล้านบาท โดยร้อยละ 64 ของ RDF จะถูกนำไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และอีกร้อยละ 36 จะถูกใช้ในการผลิตพลังงานความร้อน ดังภาพที่ 2 ซึ่งความต้องการ RDF ในภาคไฟฟ้าเติบโตขึ้นประมาณร้อยละ 9.9 จากการสนับสนุนการใช้พลังงานขยะของภาครัฐ (ธนพร เพชรจิรพงศ์, 2568)



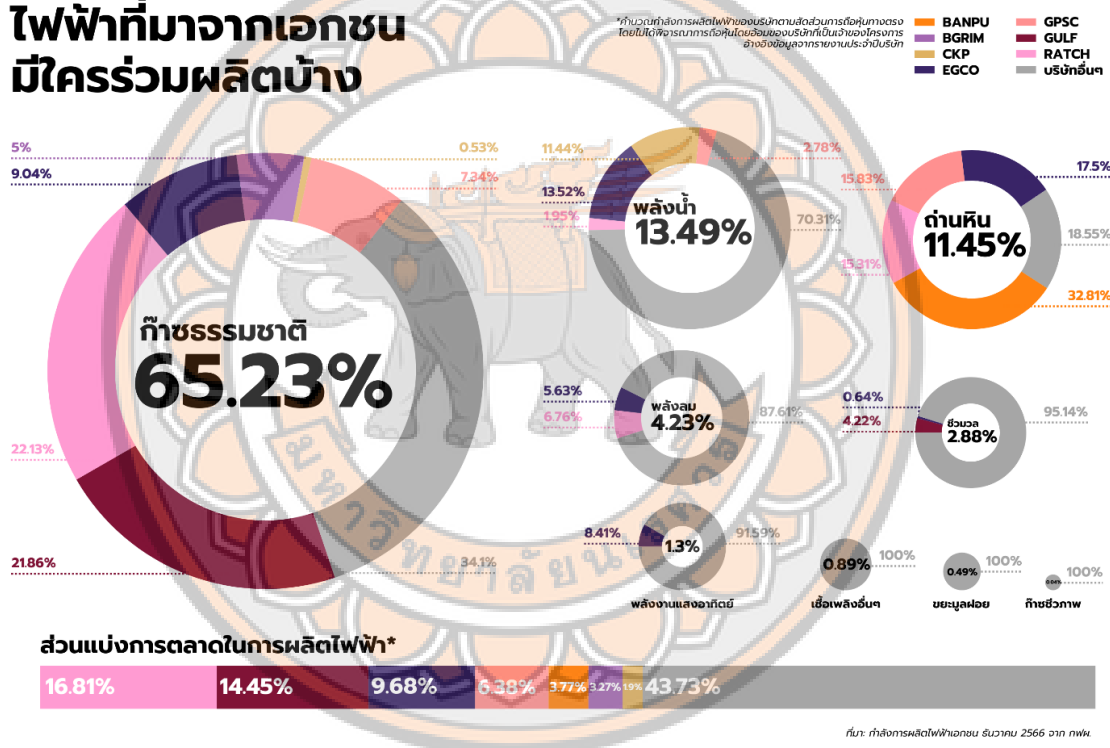
ภาพ 2 แนวโน้มการเติบโตของตลาดเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในประเทศไทย

ที่มา: ปรับปรุงจาก ศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2568)

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะมูลฝอยยังเกิดขึ้นจากพฤติกรรมบริโภค เช่น การสั่งอาหารเดลิเวอรี่ และการฟื้นตัวของนักท่องเที่ยวภายในประเทศ ส่งผลให้ภาครัฐต้องผลักดันนโยบายเพื่อจัดการกับปัญหาขยะล้นเมือง หนึ่งในนโยบายหลักคือการนำขยะมูลฝอยไปแปรรูปเพื่อผลิตเป็นพลังงาน เช่น การแปรรูปขยะมูลฝอยเป็น RDF วิธีนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณขยะคงค้าง แต่ยังนำขยะกลับมาใช้เป็นทรัพยากรในการผลิตพลังงานได้อีกด้วย (พิชัย ถิ่นสันติสุข, 2562)

ความต้องการ RDF สำหรับการผลิตไฟฟ้ายังเพิ่มขึ้นได้ตามการส่งเสริมของภาครัฐที่มีการตั้งอัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากขยะสูงกว่าพลังงานทดแทนประเภทอื่น การเปิดรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชนถึง 282.98 เมกะวัตต์ ในช่วงปี พ.ศ. 2568 - 2569 มีราคารับซื้ออยู่ที่ 3.66 - 5.78 บาทต่อหน่วย ในขณะที่พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์มีอัตราการรับซื้ออยู่ที่ 2.22 บาทต่อหน่วย และพลังงานที่ได้จากลมมีอัตราการรับซื้ออยู่ที่ 3.10 บาทต่อหน่วย (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2567) อัตราซื้อไฟฟ้าที่สูงกว่านี้ได้ดึงดูดผู้ประกอบการมาลงทุนในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนมากขึ้น ทำให้คาดว่าความต้องการ RDF อาจแตะ 6 ล้านตันภายในปี พ.ศ. 2570 (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2568)

ไฟฟ้าที่มาจากเอกชน มีใครร่วมผลิตบ้าง



ภาพ 3 อัตราการผลิตไฟฟ้าจากภาคเอกชนด้วยพลังงานทดแทนประเภทต่าง ๆ

ที่มา: คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (2567)

คาดว่าในปี พ.ศ. 2569 อัตราการใช้ถ่านหินในการผลิตพลังงานความร้อนจะลดลงถึงร้อยละ 6.6 โดยการใช้ RDF จะเพิ่มขึ้นราว 3 แสนตัน (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2568) ถึงแม้ว่าต้นทุนของการใช้ RDF ในการผลิตพลังงานความร้อนจะสูงกว่าการใช้ถ่านหินก็ตาม แต่เนื่องด้วยมาตรการปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (Carbon Border Adjustment Mechanism:

CBAM) ของสหภาพยุโรปที่เก็บค่าธรรมเนียมสินค้าที่ปล่อยค่าคาร์บอนสูง จึงทำให้อุตสาหกรรม การผลิตที่ปล่อยคาร์บอนจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ จำเป็นต้องปรับตัวเพื่อลดค่า การปล่อยคาร์บอนลง (European Commission, 2023) นอกจากมาตรการ CBAM จะส่งผลกระทบ ต่อผู้ส่งออกไทยแล้ว ประเทศไทยเองก็กำลังเร่งพัฒนากลไกการควบคุมการปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ภายในประเทศอย่างเป็นระบบ

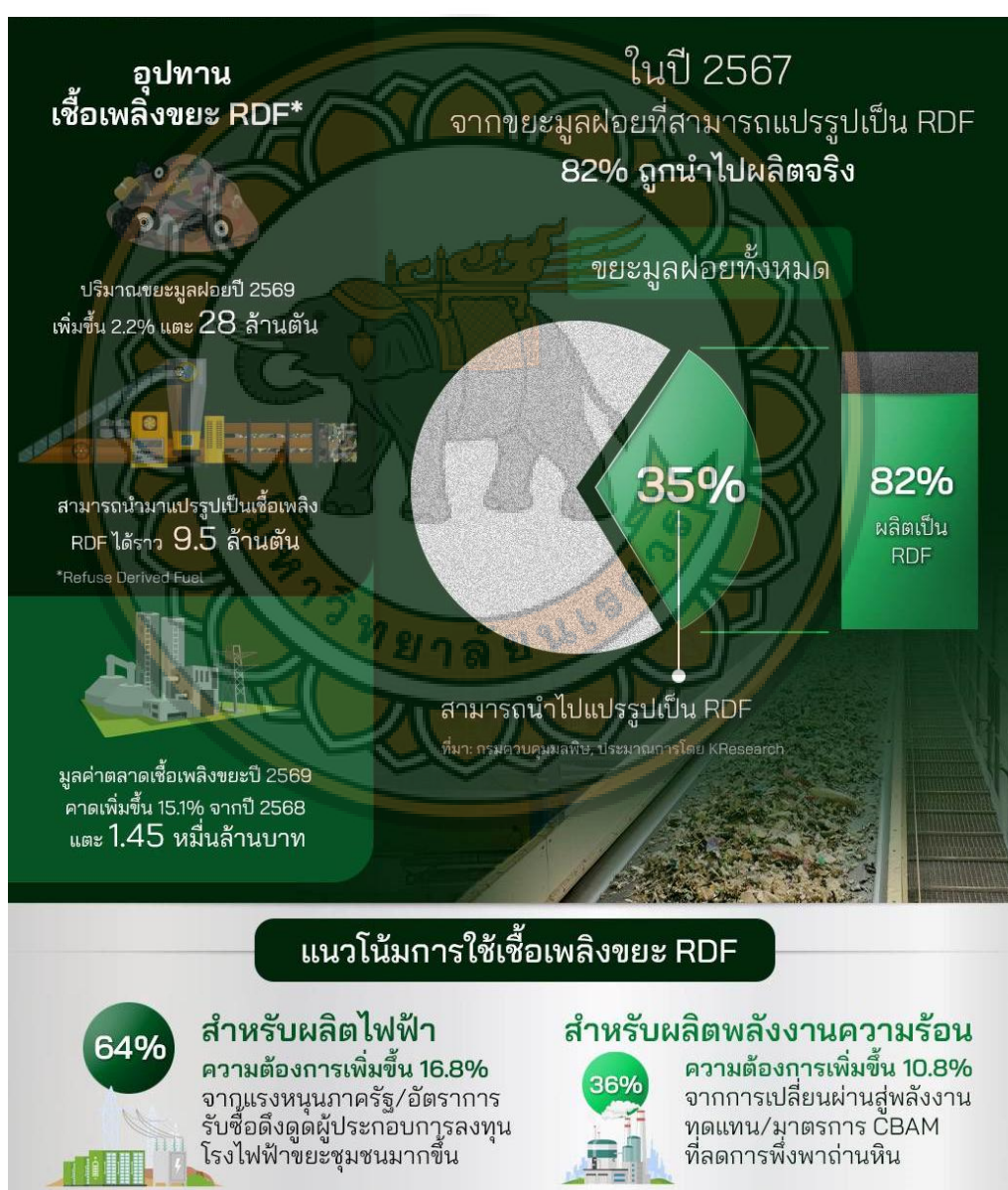
ความคืบหน้าภายในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการรับมือ CBAM ได้แก่ การกำหนด ภาษีคาร์บอน คณะรัฐมนตรีได้มีมติอนุมัติหลักการร่างกฎกระทรวงการคลังเมื่อวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2568 เพื่อกำหนดกลไกราคาคาร์บอนในฟิวกัดอัตราภาษีสรรพสามิต โดยกำหนด ราคาคาร์บอนเบื้องต้นที่ 200 บาทต่อตันคาร์บอนเทียบเท่า ครอบคลุมสินค้าน้ำมันและ ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ได้แก่ น้ำมันเบนซิน แก๊สโซฮอล์ น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และก๊าซปิโตรเลียม เหลว (กรุงเทพธุรกิจ, 2568) ทั้งนี้ ในระยะแรกการจัดเก็บภาษีดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อ ราคาขายปลีกน้ำมัน เนื่องจากการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตที่มีอยู่เดิมให้อยู่ในรูปแบบ ภาษีคาร์บอน ซึ่งจะช่วยให้ผู้ส่งออกไทยสามารถนำภาษีคาร์บอนที่จ่ายในประเทศไปหักลบกับ ค่าธรรมเนียม CBAM ที่ต้องจ่ายให้สหภาพยุโรปได้ (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2567)

สำหรับกรอบกฎหมายระยะยาว คณะรัฐมนตรีได้มีมติเห็นชอบในหลักการร่าง พระราชบัญญัติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2568 ซึ่งถือเป็น กฎหมายแม่บทฉบับแรกของไทยในการจัดการปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยร่าง กฎหมายฉบับนี้ได้วางระบบการซื้อขายสิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading System: ETS) และกลไกการปรับราคาคาร์บอนข้ามพรมแดน (Thailand CBAM) พร้อม กำหนดให้คาร์บอนเครดิตเป็นทรัพย์สินที่สามารถซื้อขายและโอนได้ตามกฎหมาย (ไทยรัฐ, 2568) คาดว่าระบบ ETS จะเริ่มบังคับใช้ได้ในปี พ.ศ. 2572 หลังจากมีการเก็บรวบรวมข้อมูล ในช่วงปี พ.ศ. 2569 - 2571 (Global Compliance News, 2568)

ในส่วนของการติดตามและรายงานการปล่อยมลพิษ กระทรวงอุตสาหกรรมได้ออก ประกาศเมื่อปี พ.ศ. 2565 กำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ 13 ประเภทที่มีการปล่อย มลพิษสูง รวมกว่า 600 โรงงานทั่วประเทศ ต้องติดตั้งระบบตรวจวัดมลพิษอย่างต่อเนื่อง (Continuous Emission Monitoring System: CEMS) และเชื่อมโยงข้อมูลแบบเรียลไทม์เข้าสู่ ระบบออนไลน์กลางของกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยโรงงานที่เข้าข่าย ได้แก่ โรงไฟฟ้า โรง ปูนซีเมนต์ โรงเหล็ก โรงกลั่นน้ำมัน และเตาเผาขยะ เป็นต้น (Automation.co.th, 2568)

ศูนย์วิจัยกสิกรไทยประเมินว่าเมื่อกฎหมายดังกล่าวมีผลบังคับใช้ ภาคอุตสาหกรรมไทย ที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง 14 กลุ่มอุตสาหกรรม ซึ่งมีมูลค่ารวม 6.5 ล้านล้านบาท หรือคิดเป็น ร้อยละ 37 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ จะเผชิญกับต้นทุนการดำเนินการที่เพิ่มสูงขึ้น จากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ระบบซื้อขายสิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และระบบ ภาษีคาร์บอน (ประชาชาติธุรกิจ, 2567)

อย่างไรก็ตาม การเติบโตของปริมาณขยะมูลฝอยในประเทศอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการ RDF ในอนาคต จากจำนวนขยะมูลฝอยทั้งหมดร้อยละ 100 จะมีเพียงร้อยละ 35 หรือประมาณ 9.5 ล้านตันเท่านั้นที่สามารถนำไปแปรรูปเป็น RDF ได้ ส่วนขยะที่เหลือจะไม่เหมาะสำหรับแปรรูปเป็น RDF หรือถูกนำไปรีไซเคิล โดยในปี ค.ศ. 2024 ขยะมูลฝอยกว่าร้อยละ 82 สามารถนำไปแปรรูปเป็น RDF ได้แล้ว ดังภาพที่ 4 (35% คือ ขยะที่สามารถนำไปผลิตเป็น RDF ได้ เมื่อเทียบกับขยะทั้งหมดภายในประเทศ และ 82% คือ ขยะที่ถูกนำไปผลิตแล้วจริงๆ เทียบกับขยะที่สามารถนำไป RDF ได้ จากก่อน 35% นั้น)



ภาพ 4 สัดส่วนขยะมูลฝอยที่สามารถแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

ที่มา: ศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2568)

ดังนั้น คาดว่าการเติบโตของขยะมูลฝอยของประเทศไทยอาจจะไม่เพียงพอที่จะรองรับการเติบโตของความต้องการ RDF ทั้งในภาคการผลิตพลังงานไฟฟ้าและภาคการผลิตพลังงานความร้อนที่มีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่องในอนาคต ทำให้ในระยะข้างหน้าการคัดแยกขยะและรวบรวมขยะอย่างถูกต้องจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องถูกผลักดันเพื่อเพิ่มปริมาณของขยะมูลฝอยที่สามารถแปรรูปเป็น RDF ได้มากขึ้น (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2568)

นอกจากนี้ การขนส่งแบบผสมผสาน (Multimodal Transport) ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจเพิ่มประสิทธิภาพของโซ่อุปทาน RDF ในประเทศไทย ปัจจุบันตลาดโลจิสติกส์และขนส่งสินค้าของไทยมีมูลค่าประมาณ 53.38 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ. 2568 และคาดว่าจะเติบโตถึง 72.19 พันล้านเหรียญสหรัฐภายในปี พ.ศ. 2573 ด้วยอัตราการเติบโตเฉลี่ยร้อยละ 6.22 ต่อปี (Mordor Intelligence, 2025) โดยภาครัฐมีแผนลงทุนในโครงการโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งกว่า 150 โครงการ รวมมูลค่า 18.83 พันล้านเหรียญสหรัฐภายในปี พ.ศ. 2568 ซึ่งรวมถึงการพัฒนาาระบบขนส่งทางรางและท่าเรือ (กระทรวงคมนาคม, 2567) ในด้านการขนส่ง RDF นั้น การศึกษาของ Shehata et al. (2022) พบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะสามารถทำได้โดยการวางแผนเส้นทางการขนส่งอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมผสานการขนส่งทางถนนกับทางรางจะช่วยลดต้นทุนการขนส่งในระยะทางไกลได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ SunEn et al. (2021) ได้เสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งเชื้อเพลิงทดแทนจากขยะมูลฝอยไปยังโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผลการศึกษานี้ให้เห็นว่าการขนส่งแบบผสมผสานสามารถลดต้นทุนรวมได้ร้อยละ 15 - 20 เมื่อเทียบกับการขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว

ซึ่งการเติบโตของโลจิสติกส์ระดับประเทศนี้ส่งผลต่อกรณีศึกษาในด้านต้นทุนในการขนส่งและความต่อเนื่องในการจัดส่งวัตถุดิบ จากเดิมมีเพียงการขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งในอนาคตอาจนำเอาการขนส่งทางรางมาเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานกรณีศึกษาได้อีกด้วย

สำหรับโซ่อุปทานของ RDF ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ พบว่าการใช้ RDF เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์เป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความร้อนที่ยอมรับได้สำหรับ RDF ในเตาเผาปูนซีเมนต์ของประเทศไทยอยู่ที่ 15 MJ/kg (Prechthai et al., 2008) ทั้งนี้ ปัจจัยสำคัญในการพัฒนาโซ่อุปทาน RDF ประกอบด้วย ต้นทุนการจัดซื้อ การแปรรูป และการขนส่งวัตถุดิบจากแหล่งกำเนิดไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ ซึ่งระยะทางในการขนส่งและความต่อเนื่องของอุปทานเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ (Shehata et al., 2022) การพัฒนาระบบขนส่งทางรางจึงมีศักยภาพในการลดต้นทุนการขนส่ง RDF ในระยะทางไกล เนื่องจากต้นทุนการขนส่งทางรางอยู่ที่ 0.93 บาทต่อตัน-กิโลเมตร ซึ่งต่ำกว่าการขนส่งทางถนนที่มีต้นทุน 1.72 บาทต่อตัน-กิโลเมตร (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2556) นอกจากต้นทุนการ

ขนส่งแล้ว การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณา โดยจากข้อมูลของ European Environment Agency (2021) พบว่าการขนส่งสินค้าทางรางปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยประมาณ 18 กรัม CO₂ ต่อตัน-กิโลเมตร ในขณะที่การขนส่งทางรถบรรทุกปล่อยประมาณ 112 กรัม CO₂ ต่อตัน-กิโลเมตร ซึ่งหมายความว่า การขนส่งทางรถบรรทุกปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการขนส่งทางรางประมาณ 6 เท่า (Umweltbundesamt, 2020) สำหรับประเทศไทย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (2556) ระบุว่าค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการขนส่งทางรางอยู่ที่ 0.04 กิโลกรัม CO₂ ต่อตัน-กิโลเมตร ขณะที่การขนส่งทางถนนอยู่ที่ 0.16 กิโลกรัม CO₂ ต่อตัน-กิโลเมตร ดังนั้นการเปลี่ยนรูปแบบการขนส่ง RDF จากทางถนนมาเป็นทางรางจึงมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ

โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการขนส่งหลายรูปแบบเข้ามา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายรวมของทั้งห่วงโซ่อุปทาน และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละรูปแบบการขนส่งวัตถุดิบและสินค้า การขนส่งแบบหลายรูปแบบเป็นนั่นถือว่าเป็นเสาหลักของโลจิสติกส์สมัยใหม่ โดยนำเสนอแนวทางแบบบูรณาการในการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบและสินค้า ความสำคัญอยู่ที่ความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพลดต้นทุนและปรับปรุงความเร็วในการจัดส่งโดยการผสมผสานรูปแบบการขนส่งที่แตกต่างกันอย่างมีกลยุทธ์ (Raquel Pérez, 2023)

ซึ่งรูปแบบของการขนส่งต่อเนื่องที่ได้รับความนิยมใช้ในปัจจุบันนั้น แบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ 1) Piggy - back เป็นการขนส่งที่ใช้การขนส่งทางรถไฟรวมกับการขนส่งทางรถบรรทุก ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งต่อเนื่องที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจศึกษา 2) Fishy - back เป็นการขนส่งที่ใช้การขนส่งทางรถบรรทุกรวมกับการขนส่งทางเรือ Coyle et al., (2016) 3) Sea - air เป็นการขนส่งที่ใช้การขนส่งทางเรือรวมกับการขนส่งทางเครื่องบิน และ 4) Land Bridge เป็นการขนส่งรูปแบบ Sea - Land - Sea คือการขนส่งทางเรือโดยใช้การขนส่งทางบกเป็นสะพานข้าม Rodrigue, J. P. (2020).

สำหรับประโยชน์ของการพัฒนาการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบนั้น การมีผู้ประกอบการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบในประเทศไทยจะทำให้ค่าระวางส่วนใหญ่อยู่ในประเทศและช่วยลดการขาดดุลการค้า อีกทั้งยังทำให้การคำนวณเวลาและต้นทุนค่าขนส่งทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากผู้ประกอบการสามารถควบคุมการขนส่งทั้งวงจรได้ นอกจากนี้ยังช่วยอำนวยความสะดวกทางการค้า เนื่องจากขั้นตอนทางพิธีการศุลกากรจะลดน้อยลง

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำการขนส่งทางรางมาใช้พิจารณาร่วมกับการขนส่งโดยรถบรรทุก จากกรณีศึกษาผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลและศึกษาเส้นทางในการขนส่งวัตถุดิบและสินค้า แล้วมีความเป็นไปได้ที่ในอนาคตจะการใช้การขนส่งทางรางมาเป็นอีกหนทางเลือกในการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานกรณีศึกษาได้

ในปัจจุบัน ระบบขนส่งทางรางของประเทศไทยอยู่ระหว่างการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ดำเนินการเครือข่ายรถไฟระหว่างเมืองรวมระยะทาง 4,814.862 กิโลเมตร ครอบคลุม 47 จังหวัด แบ่งเป็นทางเดี่ยว 3,391.513 กิโลเมตร ทางคู่ 1,103.192 กิโลเมตร และทางสาม 320.157 กิโลเมตร อย่างไรก็ตาม การขนส่งสินค้าทางรางในปัจจุบันยังคิดเป็นสัดส่วนเพียงประมาณร้อยละ 1.87 ของปริมาณการขนส่งสินค้าทั้งหมด ขณะที่การขนส่งทางถนนมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 80 เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ภาครัฐจึงมีแผนพัฒนาระบบรางอย่างจริงจัง โดยโครงการรถไฟทางคู่เฟสที่ 1 ครอบคลุม 7 เส้นทาง ดำเนินการแล้วเสร็จ 2 เส้นทาง รวมระยะทาง 993 กิโลเมตร ส่วนเฟสที่ 2 อยู่ระหว่างดำเนินการ 7 เส้นทาง รวมระยะทาง 1,483 กิโลเมตร ทั้งนี้คาดว่าจะเมื่อโครงการรถไฟทางคู่แล้วเสร็จจะสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการขนส่งสินค้าทางรางจาก 11 ล้านตันต่อปี เป็น 46 ล้านตันต่อปีภายในปี พ.ศ. 2570 นอกจากนี้กระทรวงคมนาคมได้ประกาศแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งปี พ.ศ. 2568 - 2569 รวม 287 โครงการ มูลค่ารวม 253.45 พันล้านบาท ซึ่งรวมถึงโครงการรถไฟทางคู่ระยะที่ 2 จำนวน 3 ช่วง มูลค่ารวม 101.25 พันล้านบาท (กระทรวงคมนาคม, 2568) โดยรัฐบาลตั้งเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการขนส่งสินค้าทางรางเป็นร้อยละ 10 ของการขนส่งสินค้าทั้งหมดภายในปี พ.ศ. 2580 (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2566)

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้้นำการขนส่งทางรางมาใช้พิจารณาร่วมกับการขนส่งโดยรถบรรทุก จากกรณีศึกษาผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลและศึกษาเส้นทางในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF แล้วพบว่ามีความเป็นไปได้ที่ในอนาคตจะให้การขนส่งทางรางมาเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานกรณีศึกษาได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรวมและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรูปแบบการขนส่งวัตถุดิบตั้งแต่ซัพพลายเออร์ผ่านคลังสินค้าหรือส่งตรงไปยังโรงงาน RDF จากนั้นผลิตภัณฑ์ RDF จึงถูกส่งต่อไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว กับการขนส่งแบบผสมผสานที่ใช้ทางรางร่วมด้วย เพื่อนำเสนอทางเลือกการขนส่งที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านต้นทุนและด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรูปแบบการขนส่งรูปแบบเดียว และทางเลือกในการขนส่งหลายรูปแบบของโรงงานเชื้อเพลิงขยะกรณีศึกษา
2. เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับรองรับความต้องการเชื้อเพลิงขยะในอนาคต โดยการวิเคราะห์ความไว

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

เพื่อหาข้อเสนอแนะเชิงกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับโรงงานกรณีศึกษา เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) โดยมีต้นทุนรวม และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย กำลังการผลิต RDF และคำสั่งซื้อ RDF ของกรณีศึกษา ในช่วง เดือนมกราคม พ.ศ. 2566 - มิถุนายน 2568
2. ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่งโดยรถบรรทุกเป็นไปตามข้อมูลของกรณีศึกษา เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2568
3. ระยะทางในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF เป็นไปตามข้อมูลที่กรณีศึกษาให้ไว้ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2568
4. งานวิจัยนี้ศึกษาการขนส่งวัตถุดิบในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ RDF เท่านั้น
5. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับการหาเส้นทางและรูปแบบการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ของโรงงานผลิต RDF กรณีศึกษาเท่านั้น
6. การพิจารณาการจัดเส้นทางยานพาหนะในงานวิจัยนี้ พิจารณาเฉพาะการขนส่งวัตถุดิบในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ RDF จากซัพพลายเออร์ ไปยังโรงงานกรณีศึกษา และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานกรณีศึกษา จนกระทั่งถึงลูกค้าเท่านั้น
7. ลูกค้าสามารถรับผลิตภัณฑ์ RDF ที่โรงงานกรณีศึกษาผลิตได้ทั้งหมด และต้องกระจายผลิตภัณฑ์ RDF ให้กับลูกค้าทุกราย
8. ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่งโดยรถไฟตามอัตราค่าระวางขนส่งสินค้าของการรถไฟแห่งประเทศไทย (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2567)
9. การประเมินค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวทางของคู่มือการคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2566)
10. การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยพิจารณาจากระยะทาง ราคาน้ำมัน และปริมาณในการขนส่ง

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. **เทคโนโลยีผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF)** คือ การเทคโนโลยีแปรรูปขยะมูลฝอยโดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขยะด้วยกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้เชื้อเพลิงขยะที่ได้มีคุณสมบัติ ค่าความร้อน ความชื้น และขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง
2. **ขยะมูลฝอย (Solid Waste)** หมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า พลาสติก ภาชนะที่ใส่อาหาร แก้ว มูลสัตว์ หรือซากสัตว์ รวมตลอดถึงสิ่งอื่นใดที่เก็บกวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์ หรือที่อื่น (พระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535)
3. **พลังงานความร้อน (Thermal Energy)** หมายถึง พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมที่ต้องการความร้อนสูง เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ที่ใช้ความร้อนในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนเม็ด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2566)
4. **โรงไฟฟ้าขยะชุมชน (Municipal Solid Waste Power Plant)** หมายถึง โรงไฟฟ้าที่ใช้ขยะมูลฝอยจากชุมชนหรือ RDF เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยต้องผ่านการพิจารณาคัดเลือกจากคณะกรรมการกลางจัดการสิ่งปฏิกูลและมูลฝอย และได้รับความเห็นชอบจากรัฐมนตรีว่าการกระทรวงมหาดไทย ตามพระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2560 (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2564)
5. **มาตรการปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism)** หมายถึง กลไกการปรับราคาคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดนของสหภาพยุโรป ซึ่งเป็นเครื่องมือในการกำหนดราคาที่เป็นธรรมสำหรับการปล่อยคาร์บอนที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตสินค้าที่ใช้คาร์บอนเข้มข้นที่นำเข้ามายังสหภาพยุโรป และเพื่อส่งเสริมการผลิตทางอุตสาหกรรมที่สะอาดขึ้นในประเทศนอกสหภาพยุโรป โดยครอบคลุมสินค้า 6 กลุ่ม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เหล็กและเหล็กกล้า อะลูมิเนียม ปุ๋ย ไฟฟ้า และไฮโดรเจน (European Commission, 2023)

1.6 สมมุติฐานของการวิจัย

การนำรูปแบบทางเลือกในการขนส่งหลายรูป และ/หรือ ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ มาร่วมพิจารณาในการขนส่งวัตถุติดและผลิตภัณฑ์ RDF จะสามารถส่งผลต่อต้นทุนรวม และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้น้อยกว่ารูปแบบการขนส่งในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ RDF ประกอบด้วย ความหมายและประเภทของเชื้อเพลิงขยะ กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ การใช้เชื้อเพลิงขยะ ในการผลิตพลังงาน นโยบายและมาตรการสนับสนุนของภาครัฐ มาตรการ CBAM ของสหภาพ ยุโรป การขนส่งแบบผสมผสานทั้งทางถนนและทางราง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. แนวคิดเกี่ยวกับขยะมูลฝอย

2.1.1 ความหมายของขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอย (Municipal Solid Waste MSW) หมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า เศษวัตถุ ถุงพลาสติก ภาชนะที่ใส่อาหาร เศษมูลสัตว์ ซากสัตว์ หรือสิ่งอื่นใดที่เก็บ กวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์ หรือที่อื่น และหมายความรวมถึงมูลฝอยติดเชื้อ มูลฝอยที่เป็น พิษหรืออันตรายจากชุมชน (พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535) ขยะมูลฝอยเป็นของ เสียที่อยู่ในรูปของแข็งหรือกึ่งแข็งที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งถูกทิ้งเนื่องจากไม่ ต้องการใช้ต่อไปหรือหมดประโยชน์ใช้สอยแล้ว

กรมควบคุมมลพิษ (2024) ได้ให้ความหมายของขยะมูลฝอยว่า หมายถึง สิ่งของเหลือ ทิ้งจากกระบวนการผลิตและอุปโภคบริโภคซึ่งเสื่อมสภาพจนใช้การไม่ได้ หรือไม่ต้องการใช้แล้ว บางชนิดเป็นของแข็ง หรือกึ่งของแข็ง (ไม่รวมของเหลวและอากาศเสีย) ขยะมูลฝอยสามารถ จำแนกได้หลายประเภทตามแหล่งกำเนิด องค์ประกอบ และคุณสมบัติทางกายภาพ โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.2 ประเภทของขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะและแหล่งกำเนิด ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2023)

1. การจำแนกตามแหล่งกำเนิด

ขยะมูลฝอยสามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 6 ประเภทหลัก ได้แก่

1) ขยะมูลฝอยจากบ้านเรือน (Residential Waste) คือ ขยะที่เกิดจากกิจกรรมภายใน ครัวเรือน เช่น เศษอาหาร ถุงพลาสติก กระดาษ ขวดแก้ว กระป๋อง เป็นต้น ขยะประเภทนี้มี ปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับขยะจากแหล่งอื่น ๆ และมีองค์ประกอบที่หลากหลาย

2) ขยะมูลฝอยจากสถานประกอบการ (Commercial Waste) คือ ขยะที่เกิดจากกิจกรรมทางธุรกิจ เช่น ร้านค้า ห้างสรรพสินค้า โรงแรม ร้านอาหาร สำนักงาน เป็นต้น ขยะประเภทนี้มักประกอบด้วยกระดาษ พลาสติก และบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ

3) ขยะมูลฝอยจากสถาบัน (Institutional Waste) คือ ขยะที่เกิดจากสถานศึกษา โรงพยาบาล สถานที่ราชการ และหน่วยงานต่าง ๆ ขยะประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกับขยะจากสถานประกอบการ แต่อาจมีขยะอันตรายปนเปื้อนโดยเฉพาะจากโรงพยาบาล

4) ขยะมูลฝอยจากการก่อสร้างและรื้อถอน (Construction and Demolition Waste) คือ ขยะที่เกิดจากการก่อสร้าง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนอาคาร ประกอบด้วยเศษคอนกรีต อิฐ ไม้ เหล็ก และวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ

5) ขยะมูลฝอยจากพื้นที่สาธารณะ (Municipal Services Waste) คือ ขยะที่เก็บกวาดจากถนน ทางเท้า สวนสาธารณะ และพื้นที่สาธารณะอื่น ๆ ประกอบด้วยใบไม้ กิ่งไม้ เศษดิน และขยะทั่วไป

6) ขยะมูลฝอยจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Waste) คือ ขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอาจเป็นขยะทั่วไปหรือขยะอันตราย ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม



ภาพ 5 แหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยประเภทต่าง ๆ

2. การจำแนกตามองค์ประกอบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2566)

ขยะมูลฝอยสามารถจำแนกตามองค์ประกอบได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1) ขยะอินทรีย์ (Organic Waste) คือ ขยะที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ประกอบด้วย เศษอาหาร เศษผัก ผลไม้ ใบไม้ และซากพืชซากสัตว์ ขยะอินทรีย์มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 40 - 60 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด และสามารถนำไปทำปุ๋ยหมักหรือผลิตก๊าซชีวภาพได้

2) ขยะรีไซเคิล (Recyclable Waste) คือ ขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือแปรรูปเป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ประกอบด้วยกระดาษ พลาสติก แก้ว โลหะ และอะลูมิเนียม ขยะรีไซเคิลมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 - 30 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด

3) ขยะทั่วไป (General Waste) คือ ขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ประกอบด้วยซองขนม ขวดพลาสติกเปื้อน กล่องโฟม และวัสดุผสม ขยะทั่วไปต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีการเผาหรือฝังกลบ

4) ขยะอันตราย (Hazardous Waste) คือ ขยะที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนสารอันตราย เช่น ถ่านไฟฉาย หลอดไฟ กระป๋องสเปรย์ ยาหมดอายุ และแบตเตอรี่ ขยะอันตรายต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ



ภาพ 6 ประเภทของขยะมูลฝอยจำแนกตามองค์ประกอบ

2.1.3. องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

จากการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษ (2567) พบว่าองค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทยมีสัดส่วนดังนี้

1. เศษอาหารและขยะอินทรีย์ ร้อยละ 46
2. พลาสติก ร้อยละ 24
3. กระดาษ ร้อยละ 8
4. แก้ว ร้อยละ 4
5. โลหะ ร้อยละ 2
6. ผ้าและสิ่งทอ ร้อยละ 3
7. ยาง ร้อยละ 2
8. ไม้และใบไม้ ร้อยละ 5
9. อื่น ๆ ร้อยละ 6

จากสัดส่วนดังกล่าว จะเห็นได้ว่าขยะอินทรีย์และพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยในประเทศไทย ซึ่งขยะเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ รวมถึงการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF)



ภาพ 7 สัดส่วนองค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

ที่มา : กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น (2568)

2.2. แนวคิดเกี่ยวกับเชื้อเพลิงขยะ

2.2.1. ความหมายของเชื้อเพลิงขยะ

เชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) หมายถึง เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากการนำขยะมูลฝอยชุมชน ขยะอุตสาหกรรม หรือขยะจากแหล่งอื่น ๆ มาผ่านกระบวนการคัดแยก บดย่อย ลดความชื้น และปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดย RDF มีค่าความร้อนที่สูงกว่าขยะมูลฝอยทั่วไป เนื่องจากได้ผ่านกระบวนการคัดแยกเอาวัสดุที่ไม่เผาไหม้และวัสดุที่มีความชื้นสูงออกไปแล้ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2020)

RDF เป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งที่มีความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลหลายประการ ได้แก่

1. การลดปริมาณขยะมูลฝอย การนำขยะมูลฝอยมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะช่วยลดปริมาณขยะที่ต้องนำไปฝังกลบ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในหลายพื้นที่ของประเทศไทย
2. การนำทรัพยากรกลับมาใช้ประโยชน์ แทนที่จะทิ้งขยะไปโดยเปล่าประโยชน์ การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะเป็นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า
3. การลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงขยะสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ในการผลิตพลังงาน ช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงนำเข้าจากต่างประเทศ
4. การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อเทียบกับการฝังกลบขยะ การนำขยะมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงและเผาเพื่อผลิตพลังงานช่วยลดการปล่อยก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนสูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.2 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะ

เชื้อเพลิงขยะ (RDF) สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล โดยจำแนกตามลักษณะทางกายภาพและกระบวนการผลิต ดังนี้ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2021)

1. RDF-1 (Municipal Solid Waste Used as Fuel)

RDF-1 คือ ขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบเดียวกับที่ทิ้งออกมา โดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปใด ๆ เป็นการนำขยะมูลฝอยไปเผาโดยตรงในเตาเผาขยะ ข้อดีคือไม่ต้องลงทุนในกระบวนการแปรรูป แต่ข้อเสียคือมีค่าความร้อนต่ำ ความชื้นสูง และมีสิ่งปนเปื้อนจำนวนมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำและอาจก่อให้เกิดมลพิษ

2. RDF-2 (Coarse RDF)

RDF-2 คือ ขยะมูลฝอยที่ผ่านการคัดแยกหรือบดย่อยขนาดหยาบ โดยอาจมีการคัดแยกวัสดุบางส่วนออก เช่น โลหะขนาดใหญ่ แต่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการแปรรูปอย่างสมบูรณ์ RDF-2 มีค่าความร้อนสูงกว่า RDF-1 เล็กน้อย แต่ยังคงมีความชื้นและสิ่งปนเปื้อนค่อนข้างสูง

3. RDF-3 (Fluff RDF)

RDF-3 คือ ขยะมูลฝอยที่ผ่านการบดย่อยจนมีขนาดเล็ก โดยคัดแยกโลหะและวัสดุอินทรีย์ออก มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ หรือเป็นปุย RDF-3 มีค่าความร้อนสูงกว่า RDF-1 และ RDF-2 เนื่องจากมีสัดส่วนของวัสดุที่เผาไหม้ได้สูงขึ้น และมีความชื้นต่ำลง RDF-3 เป็นประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย

4. RDF-4 (Powder RDF)

RDF-4 คือ ขยะมูลฝอยที่ผ่านการบดย่อยละเอียดจนเป็นผง มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ทำให้สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูง RDF-4 มักใช้ในเตาเผาที่มีระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบพ่น (Suspension Firing) ข้อจำกัดคือต้องใช้พลังงานมากในกระบวนการบดย่อย

5. RDF-5 (Densified RDF หรือ d-RDF)

RDF-5 คือ ขยะมูลฝอยที่ผ่านการอัดแท่งหรืออัดเม็ด มีความหนาแน่นสูง ทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บ ขนส่ง และป้อนเข้าสู่ระบบเผาไหม้ RDF-5 มีค่าความร้อนสูงประมาณ 4,000-5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีความชื้นต่ำ RDF-5 เป็นประเภทที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากมีคุณภาพสม่ำเสมอและสะดวกในการใช้งาน

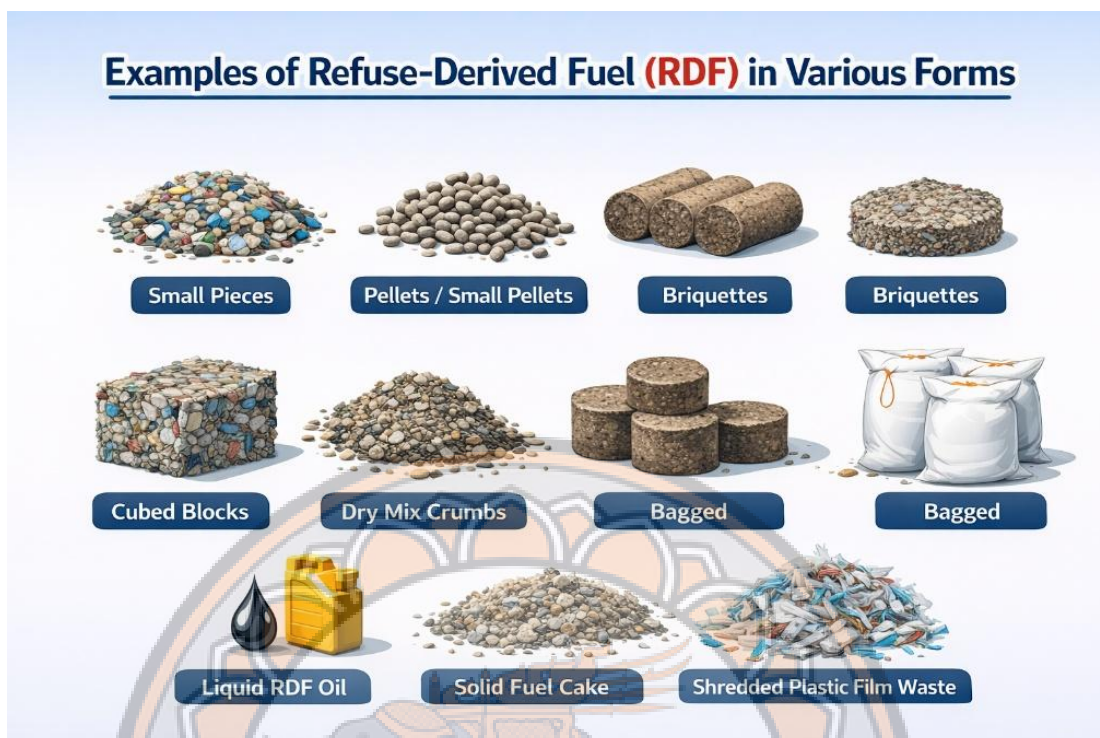
6. RDF-6 (Liquid RDF)

RDF-6 คือ ขยะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) หรือกระบวนการทางเคมีอื่น ๆ RDF-6 สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้ แต่กระบวนการผลิตมีความซับซ้อนและต้นทุนสูง

7. RDF-7 (Gaseous RDF)

RDF-7 คือ ขยะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) RDF-7 สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ก๊าซหรือกังหันก๊าซเพื่อผลิตไฟฟ้าได้

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษา RDF-3 โดยเริ่มจากการรับวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์มายังโรงงานกรณีศึกษา จากนั้นโรงงานกรณีศึกษาจะทำการบดย่อยวัตถุดิบให้มีขนาดเล็ก จนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ RDF และทำการส่งต่อผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ เป็นที่สิ้นสุด



ภาพ 8 ตัวอย่างเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา : European Commission. (2016). อ้างใน Fernandes & Correia (2022).

2.2.3. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

คุณสมบัติที่สำคัญของ RDF ที่ใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง มีรายละเอียดดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)

1. ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเชื้อเพลิงขยะ โดยบ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 หน่วยน้ำหนัก ค่าความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) **ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value HHV)** คือ ค่าความร้อนที่รวมความร้อนแฝงของไอน้ำที่ควบแน่นกลับเป็นน้ำ
- 2) **ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value LHV)** คือ ค่าความร้อนที่ไม่รวมความร้อนแฝงของไอน้ำ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้จริงในการคำนวณประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงาน

เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ที่ดีควรมีค่าความร้อนสูง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงขยะประเภท RDF-3 และ RDF-5 มีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 3,000 - 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าขยะมูลฝอยทั่วไปที่มีค่าความร้อนประมาณ 1,500 - 2,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

2. ความชื้น (Moisture Content)

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขยะ ความชื้นสูงจะทำให้ค่าความร้อนลดลง เนื่องจากต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิง นอกจากนี้ความชื้นสูงยังทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และเพิ่มปริมาณมลพิษ

RDF ที่ดีควรมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งขยะมูลฝอยทั่วไปในประเทศไทยมีความชื้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 40 - 60 ดังนั้นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะจึงต้องมีขั้นตอนการลดความชื้น

3. ปริมาณเถ้า (Ash Content)

ปริมาณเถ้าคือสัดส่วนของวัสดุที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด เถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะต้องนำไปกำจัดอย่างเหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดต้นทุนเพิ่มเติม

RDF ที่ดีควรมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก การคัดแยกวัสดุอินทรีย์ เช่น หิน ดิน แก้ว และโลหะ ออกจากขยะมูลฝอยก่อนการผลิตเชื้อเพลิงขยะช่วยลดปริมาณเถ้าได้

4. ปริมาณคลอรีน (Chlorine Content)

ปริมาณคลอรีนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการใช้เชื้อเพลิงขยะในหม้อไอน้ำและเตาเผา เนื่องจากคลอรีนสูงจะทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งก่อให้เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์และเกิดสารไดออกซิน (Dioxin) ซึ่งเป็นสารพิษที่มีอันตรายต่อสุขภาพ

RDF ที่ดีควรมีปริมาณคลอรีนต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก การคัดแยกพลาสติกประเภท PVC ซึ่งมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบออกจากขยะมูลฝอยช่วยลดปริมาณคลอรีนในเชื้อเพลิงขยะได้

5. ปริมาณกำมะถัน (Sulfur Content)

ปริมาณกำมะถันสูงจะทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศและก่อให้เกิดฝนกรด RDF ที่ดีควรมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

6. ขนาดและความหนาแน่น (Size and Density)

ขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะมีผลต่อการจัดเก็บ ขนส่ง และป้อนเข้าสู่ระบบเผาไหม้ เชื้อเพลิงขยะที่มีขนาดและความหนาแน่นสม่ำเสมอจะช่วยให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และลดปัญหาในการป้อนเชื้อเพลิง



ภาพ 9 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ตามมาตรฐาน ASTM

ที่มา : สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (2563)

ตาราง 1 คุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงขยะ

ข้อดีของพลังงานจากขยะ	ข้อเสียของพลังงานจากขยะ
1. ได้ค่าความร้อนที่สูงเทียบเท่ากับพลังงานชีวมวล 2. จัดเก็บเชื้อเพลิงได้ง่าย จัดการการขนส่งได้ง่าย และมีสร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก 3. ได้พลังงานออกมา 2 ประเภท คือ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า 4. ลดปริมาณขยะได้เยอะ และลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม	1. ต้องคัดแยกขยะมูลฝอยก่อนนำมาส่งผลให้มีต้นทุนสูง 2. การขนส่งขยะไปทำเชื้อเพลิงมีปริมาณที่มากขึ้น 3. ต้องใช้เทคโนโลยี และระบบต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะไปเป็นพลังงานอื่นๆ

ที่มา : Green Circular (2023)

2.3. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ

กระบวนการผลิต RDF ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2020)

2.3.1. การรับและจัดเก็บขยะมูลฝอย

ขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะคือการรับและจัดเก็บขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การรับขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เช่น ครั้วเรือน ตลาด สถานประกอบการ และโรงงานอุตสาหกรรม จะถูกรวบรวมและขนส่งมายังโรงงานผลิตเชื้อเพลิงขยะด้วยรถขนขยะ เมื่อรถขนขยะมาถึงโรงงาน จะต้องผ่านจุดชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกปริมาณขยะที่รับเข้า และมีการตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นเพื่อคัดกรองขยะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง เช่น ขยะอันตราย หรือขยะที่มีขนาดใหญ่เกินไป

2. การจัดเก็บขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยที่ผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกนำไปจัดเก็บในบริเวณพักขยะ (Tipping Floor) หรือหลุมพักขยะ (Receiving Pit) ซึ่งมีขนาดเพียงพอสำหรับจัดเก็บขยะในปริมาณที่เหมาะสมกับการผลิตของโรงงาน บริเวณพักขยะควรมีหลังคาคลุมเพื่อป้องกันน้ำฝน และมีระบบระบายอากาศเพื่อลดกลิ่นเหม็น



ภาพ 10 บริเวณรับและจัดเก็บขยะมูลฝอยในโรงงานผลิตเชื้อเพลิงขยะ

ที่มา : โรงงานกรณีศึกษา

2.3.2. การคัดแยกขยะ

ขั้นตอนการคัดแยกขยะมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกวัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงออก และแยกวัสดุที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ ดังนี้

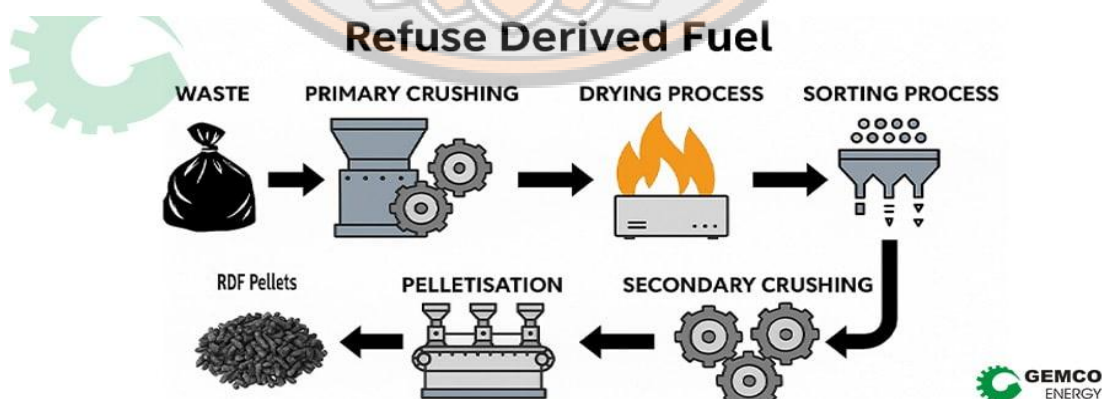
1. การคัดแยกด้วยมือ (Manual Sorting) เป็นวิธีที่ใช้แรงงานคนในการคัดแยกวัสดุบนสายพานลำเลียง โดยพนักงานจะหยิบวัสดุที่ต้องการคัดแยกออก เช่น ขวดแก้ว ขวดพลาสติก กระป๋องอะลูมิเนียม และวัสดุอันตราย วิธีนี้มีความแม่นยำสูง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วและต้องใช้แรงงานจำนวนมาก

2. การคัดแยกด้วยตะแกรงร่อน (Trommel Screen) ตะแกรงร่อนเป็นเครื่องจักรที่ใช้คัดแยกขยะตามขนาด โดยขยะจะถูกป้อนเข้าสู่ตะแกรงทรงกระบอกที่หมุนรอบแกน ขยะที่มีขนาดเล็กจะหลุดผ่านรูตะแกรงออกไป ส่วนขยะที่มีขนาดใหญ่จะถูกพาไปยังปลายทางของตะแกรง วิธีนี้ช่วยคัดแยกเศษดิน หิน และวัสดุขนาดเล็กออกจากขยะได้

3. การคัดแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separation) เครื่องคัดแยกแม่เหล็กใช้แม่เหล็กในการดึงดูดโลหะเหล็กออกจากขยะ โดยขยะจะถูกลำเลียงผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก โลหะเหล็กจะถูกดึงดูดและแยกออกจากขยะ วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการคัดแยกโลหะเหล็ก

4. การคัดแยกด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current Separation) เครื่องคัดแยกกระแสไหลวนใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าในการคัดแยกโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อะลูมิเนียม และทองแดง โดยสร้างกระแสไหลวนในโลหะ ทำให้เกิดแรงผลักดันโลหะออกจากขยะ

5. การคัดแยกด้วยลม (Air Classification) เครื่องคัดแยกด้วยลมใช้กระแสลมในการแยกวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น พลาสติกและกระดาษ ออกจากวัสดุที่มีน้ำหนักหนัก เช่น หิน แก้ว และโลหะ โดยขยะจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องที่มีกระแสลมพัดผ่าน วัสดุที่เบาจะถูกพัดพาไปกักลม ส่วนวัสดุที่หนักจะตกลงสู่ด้านล่าง



ภาพ 11 เทคโนโลยีการคัดแยกขยะในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ

ที่มา : GEMCO energy (2565)

2.3.3. การบดย่อย

ขยะที่ผ่านการคัดแยกแล้วจะถูกนำเข้าสู่เครื่องบดย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การบดย่อยขั้นต้น (Primary Shredding)

การบดย่อยขั้นต้นใช้เครื่องบดขนาดใหญ่ในการลดขนาดขยะจากขนาดเดิมให้มีขนาดเล็กลง โดยทั่วไปจะลดขนาดให้เหลือประมาณ 100 - 300 มิลลิเมตร เครื่องบดที่ใช้ในขั้นตอนนี้มักเป็นเครื่องบดแบบสองเพลา (Twin-Shaft Shredder) หรือเครื่องบดแบบค้อน (Hammer Mill)

2. การบดย่อยขั้นที่สอง (Secondary Shredding)

การบดย่อยขั้นที่สองใช้เครื่องบดขนาดเล็กกว่าในการลดขนาดขยะให้มีขนาดเล็กลงอีก โดยทั่วไปจะลดขนาดให้เหลือประมาณ 20 - 50 มิลลิเมตร ขนาดของเชื้อเพลิงขยะในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของ RDF ที่ต้องการผลิต



ภาพ 12 เครื่องบดย่อยขยะในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ

2.3.4. การลดความชื้น

เชื้อเพลิงขยะที่ผ่านการบดย่อยแล้วจะถูกนำไปลดความชื้นเพื่อเพิ่มค่าความร้อนและประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยมีวิธีการลดความชื้นหลายวิธี ดังนี้

1. การตากแห้งตามธรรมชาติ (Natural Drying)

การตากแห้งตามธรรมชาติเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดที่สุด โดยกระจายเชื้อเพลิงขยะบนพื้นที่โล่งและปล่อยให้แห้งด้วยแสงแดดและลม วิธีนี้ใช้เวลานานและขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ แต่ไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม

2. การอบแห้งด้วยความร้อน (Thermal Drying)

การอบแห้งด้วยความร้อนใช้เครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนในการระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิงขยะ วิธีนี้สามารถควบคุมความชื้นได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาสั้น แต่ต้องใช้พลังงานในการอบแห้ง

3. การอบแห้งด้วยชีวภาพ (Biological Drying)

การอบแห้งด้วยชีวภาพใช้ความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในการระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิงขยะ วิธีนี้ช่วยลดความชื้นได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม แต่ต้องใช้เวลานานและต้องควบคุมสภาวะให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์



ภาพ 13 วิธีการลดความชื้นของเชื้อเพลิงขยะ

2.3.5. การอัดแท่งหรืออัดเม็ด

สำหรับเชื้อเพลิงขยะประเภท RDF-5 จะมีขั้นตอนการอัดแท่งหรืออัดเม็ดเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บและขนส่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การอัดแท่ง (Briquetting)

การอัดแท่งใช้เครื่องอัดแท่งในการอัดเชื้อเพลิงขยะให้เป็นแท่งรูปทรงต่าง ๆ เช่น ทรงกระบอก หรือทรงสี่เหลี่ยม โดยใช้แรงดันสูงในการอัด อาจมีการเติมสารยึดเกาะ (Binder) เพื่อช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรง

2. การอัดเม็ด (Pelletizing)

การอัดเม็ดใช้เครื่องอัดเม็ดในการอัดเชื้อเพลิงขยะให้เป็นเม็ดขนาดเล็ก โดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 - 25 มิลลิเมตร เม็ดเชื้อเพลิงขยะมีความหนาแน่นสูงประมาณ 600 - 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้สะดวกในการจัดเก็บและขนส่ง

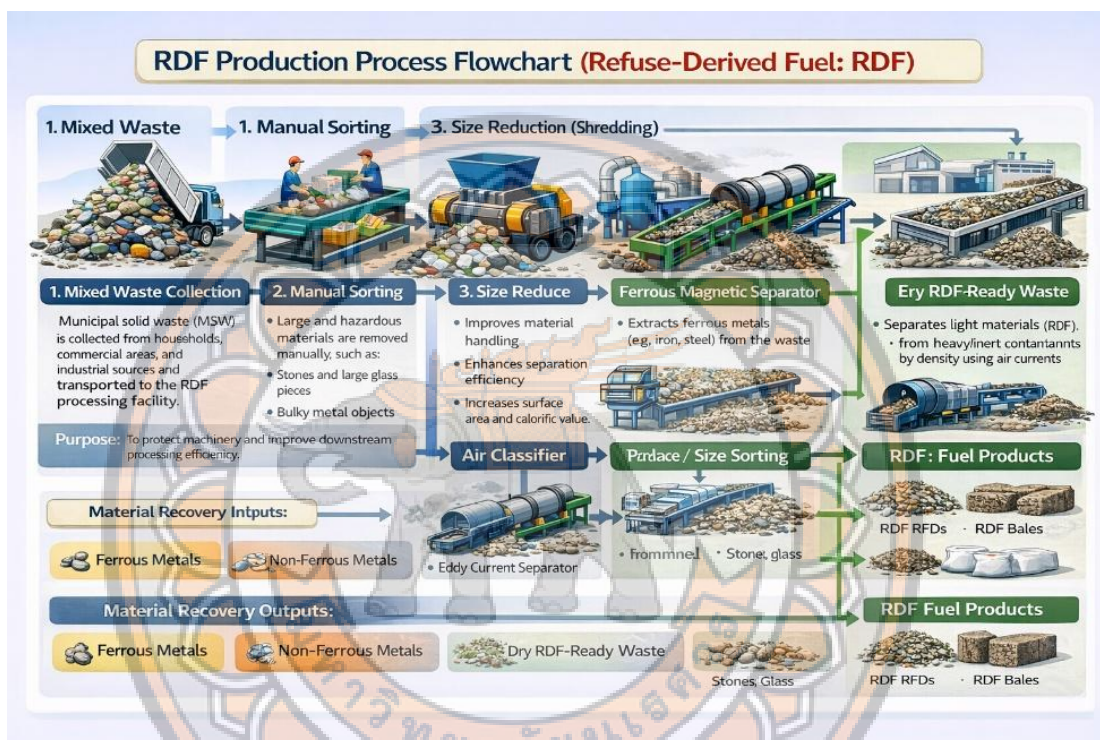


ภาพ 14 เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในรูปแบบอัดแท่งและอัดเม็ด

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2565)

2.3.6. การจัดเก็บและขนส่ง

เชื้อเพลิงขยะที่ผลิตเสร็จแล้วจะถูกนำไปจัดเก็บในโกดังหรือไซโลที่มีหลังคาคลุมเพื่อป้องกันความชื้น ก่อนที่จะขนส่งไปยังโรงไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง การขนส่งเชื้อเพลิงขยะอาจใช้รถบรรทุกหรือระบบสายพานลำเลียง ขึ้นอยู่กับระยะทาง และปริมาณที่ต้องขนส่ง



ภาพ 15 แผนผังกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2566).

2.4. การใช้ RDF ในการผลิตพลังงาน

2.4.1. การผลิตพลังงานไฟฟ้า

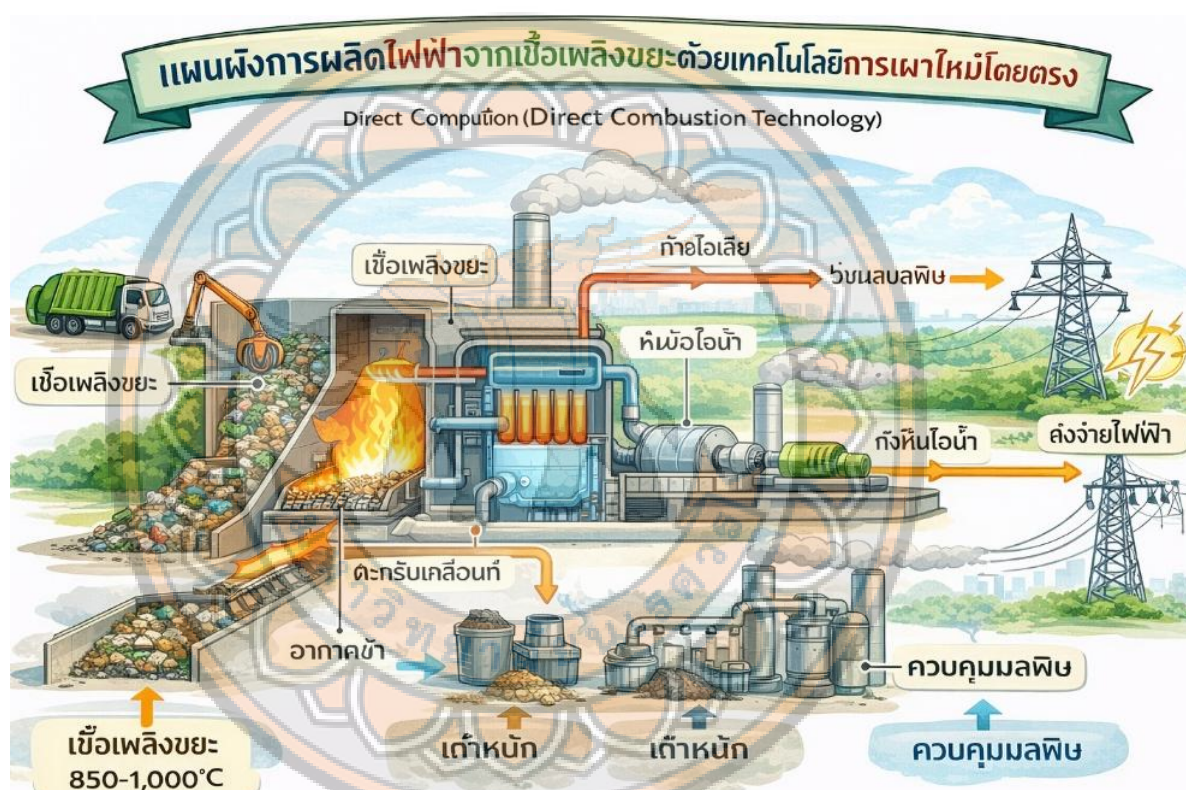
RDF สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยมีเทคโนโลยีที่ใช้หลายรูปแบบ ดังนี้

1. เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)

เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมากที่สุดในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะ โดยเชื้อเพลิงขยะจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผา และเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 850 - 1,000 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปต้มน้ำในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำแรงดันสูง ซึ่งจะไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เตาเผาที่ใช้ในเทคโนโลยีนี้มีหลายรูปแบบ ได้แก่

- 1) เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate Incinerator) เป็นเตาเผาที่มีตะแกรงเคลื่อนที่เพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงผ่านเตาเผา ทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูง
- 2) เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln Incinerator) เป็นเตาเผาทรงกระบอกที่หมุนรอบแกน ใช้สำหรับขยะที่มีความหลากหลายสูง
- 3) เตาเผาแบบฟลูอิดไชด์เบด (Fluidized Bed Incinerator) เป็นเตาเผาที่ใช้ทรายเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ทำให้การเผาไหม้สม่ำเสมอ



ภาพ 16 แผนผังการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะด้วยเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง

ที่มา : GEMCO Energy (2568)

2. เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงขยะให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) และมีเทน (CH₄) กระบวนการนี้ใช้อุณหภูมิประมาณ 700 - 1,000 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ก๊าซหรือกังหันก๊าซเพื่อผลิตไฟฟ้า หรือนำไปใช้ในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรง และปล่อยมลพิษน้อยกว่า แต่มีต้นทุนการลงทุนสูงกว่า

3. เทคโนโลยีไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เทคโนโลยีไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการสลายเชื้อเพลิงขยะในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน กระบวนการนี้ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 - 800 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันไพโรไลซิส ก๊าซไพโรไลซิส และถ่าน (Char)

น้ำมันไพโรไลซิสสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวทดแทนน้ำมันดีเซล ส่วนก๊าซไพโรไลซิสสามารถนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าหรือความร้อนได้

2.4.2. การผลิตพลังงานความร้อน

RDF สามารถนำไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมที่ต้องการพลังงานความร้อนสูง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานความร้อนจำนวนมากในกระบวนการเผาปูนเม็ด (Clinker) ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400 - 1,500 องศาเซลเซียส โดยปกติจะใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลัก

การใช้ RDF ทดแทนถ่านหินในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เรียกว่าการใช้เชื้อเพลิงทดแทน (Alternative Fuel) หรือ Co-processing ซึ่งมีข้อดีหลายประการ ได้แก่

- 1) ลดการใช้ถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล
- 2) ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 3) ลดต้นทุนเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะมีราคาถูกกว่าถ่านหิน
- 4) ช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องนำไปฝังกลบ

ปัจจุบันโรงงานปูนซีเมนต์ในประเทศไทยหลายแห่งได้เริ่มใช้ RDF ทดแทนถ่านหินในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เพื่อลดการปล่อยคาร์บอนและรับมือกับมาตรการ CBAM ของสหภาพยุโรป

2. การใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม

RDF สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไอน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือชีวมวลอื่นๆ

ตาราง 2 สังเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตของตลาดเชื้อเพลิงขยะ

Authors (year)	Policy Factors				Market Drivers		
	FiT Rate	AEDP Policy	CBAM	Local Gov Support	MSW Growth	Industry Demand	Environmental Concern Carbon Credit
Prasert (2565)	✓			✓	✓		
Attapon (2566)			✓			✓	✓
Pimjai et al. (2566)	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Tanaporn (2568)	✓	✓	✓		✓	✓	
Cucchiella et al. (2014)							✓ ✓
Malinauskaite et al. (2017)	✓	✓			✓		✓ ✓

FiT Rate (Feed-in Tariff) คือ มาตรการที่ใช้ในการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน,2565)

AEDP Policy คือ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (กระทรวงพลังงาน,2561)

CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism คือ มาตรการปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (European Commission, 2023)

Local Gov Support คือ มาตรการที่รัฐบาลใช้ในการสนับสนุนและส่งเสริมการลงทุนในสินค้าและบริการท้องถิ่น (Praornpit Katchwattana,2025)

2.5 นโยบายและมาตรการสนับสนุนของภาครัฐในการใช้ RDF

2.5.1. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

กระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย รวมถึงพลังงานจากขยะ แผน AEDP กำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานจากขยะในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้มีการนำขยะมูลฝอยมาแปรรูปเป็น RDF มากขึ้น (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2022)

แผน AEDP 2018 กำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนที่ 900 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2580 ซึ่งจะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องนำไปฝังกลบ

2.5.2. อัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากขยะ

คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ได้กำหนดอัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชนในอัตราพิเศษ เพื่อจูงใจให้ผู้ประกอบการลงทุนในโรงไฟฟ้าขยะชุมชน โดยมีรายละเอียดดังนี้

อัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชนในช่วงปี พ.ศ. 2568 - 2569 มีดังนี้

1. โรงไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 1 เมกะวัตต์ อัตรารับซื้อ 5.78 บาทต่อหน่วย
2. โรงไฟฟ้าขนาด 1 - 3 เมกะวัตต์ อัตรารับซื้อ 5.08 บาทต่อหน่วย
3. โรงไฟฟ้าขนาดมากกว่า 3 เมกะวัตต์ อัตรารับซื้อ 3.66 บาทต่อหน่วย

เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนประเภทอื่น ๆ พบว่าอัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากขยะสูงกว่าอัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (2.22 บาทต่อหน่วย) และพลังงานลม (3.10 บาทต่อหน่วย) ทำให้การลงทุนในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนมีความน่าสนใจมากขึ้น

2.5.3. การเปิดรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชน

ภาครัฐได้เปิดรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชนถึง 282.98 เมกะวัตต์ ในช่วงปี พ.ศ. 2568 - 2569 ซึ่งเป็นการดึงดูดผู้ประกอบการมาลงทุนในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนมากขึ้น และส่งผลให้ความต้องการ RDF เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

การเปิดรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชนเป็นส่วนหนึ่งของนโยบายการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและการจัดการขยะมูลฝอยอย่างยั่งยืน โดยมีเป้าหมายในการลดปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องนำไปฝังกลบ และเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้า

2.6 มาตรการ CBAM ของสหภาพยุโรป

2.6.1 ความหมายและวัตถุประสงค์ของ CBAM

CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) หรือมาตรการปรับราคาคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน เป็นมาตรการของสหภาพยุโรป (EU) ที่กำหนดให้สินค้านำเข้าจากประเทศที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงในกระบวนการผลิตต้องเสียค่าธรรมเนียมคาร์บอน (European Commission, 2023)

วัตถุประสงค์หลักของมาตรการ CBAM มีดังนี้

1. ป้องกันการย้ายฐานการผลิต (Carbon Leakage) เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ประกอบการในสหภาพยุโรปย้ายฐานการผลิตไปยังประเทศที่มีมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า เพื่อหลีกเลี่ยงต้นทุนด้านคาร์บอน

2. สร้างความเท่าเทียมในการแข่งขัน เพื่อให้สินค้านำเข้าจากต่างประเทศมีต้นทุนด้านคาร์บอนเทียบเท่ากับสินค้าที่ผลิตในสหภาพยุโรป

3. ส่งเสริมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อกระตุ้นให้ประเทศผู้ส่งออกมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

2.6.2 สินค้าที่อยู่ภายใต้มาตรการ CBAM

ในระยะแรก มาตรการ CBAM ครอบคลุมสินค้า 6 ประเภท ได้แก่

1. เหล็กและเหล็กกล้า (Iron and Steel)
2. อะลูมิเนียม (Aluminium)
3. ปูนซีเมนต์ (Cement)
4. ปุ๋ย (Fertilizers)
5. ไฟฟ้า (Electricity)
6. ไฮโดรเจน (Hydrogen)

สินค้าเหล่านี้เป็นสินค้าที่มีการปล่อยคาร์บอนสูงในกระบวนการผลิต และมีความเสี่ยงสูงต่อการย้ายฐานการผลิตไปยังประเทศที่มีมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า

2.6.3 กำหนดการบังคับใช้มาตรการ CBAM

มาตรการ CBAM มีกำหนดการบังคับใช้ดังนี้

1. ปี ค.ศ. 2023 - 2025 (ช่วงเปลี่ยนผ่าน) ผู้นำเข้าต้องรายงานปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสินค้านำเข้า แต่ยังไม่ต้องเสียค่าธรรมเนียม

2. ปี ค.ศ. 2026 เป็นต้นไป ผู้นำเข้าต้องซื้อใบรับรอง CBAM (CBAM Certificates) ตามปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสินค้านำเข้า โดยราคาใบรับรองจะอ้างอิงจากราคาคาร์บอนในตลาด EU ETS

2.6.4. ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมไทย

มาตรการ CBAM มีผลกระทบโดยตรงต่ออุตสาหกรรมไทยที่ส่งออกสินค้าไปยังสหภาพยุโรป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยคาร์บอนสูง ดังนี้

1. อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะการถลุงเหล็กจากแร่เหล็กด้วยเตาถลุงแบบ Blast Furnace ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมนี้จำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดการปล่อยคาร์บอน

2.7 การจัดการขยะมูลฝอยในประเทศไทย

2.7.1 สถานการณ์ขยะมูลฝอยในประเทศไทย

ประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี จากพฤติกรรมผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไปและการเติบโตของเศรษฐกิจ ตามข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ พ.ศ. 2567 ปริมาณขยะมูลฝอยในประเทศไทยมีดังแสดงในตารางที่ 4

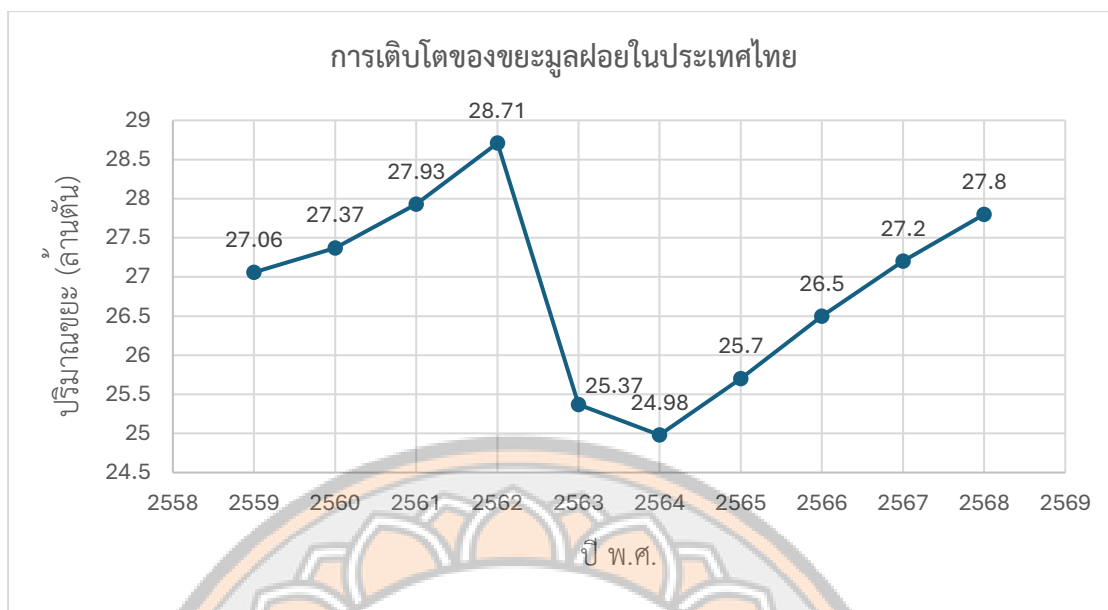
ตาราง 4 การเติบโตของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ปริมาณขยะ (ล้านตัน)	สถานะ / เหตุการณ์สำคัญ
2559	27.06	เศรษฐกิจโต การท่องเที่ยวขยายตัว
2560	27.37	เริ่มแผนแม่บทการบริหารจัดการขยะ
2561	27.93	(จุดสูงสุด) ก่อนเริ่มแคมเปญลดพลาสติก
2562	28.71	การบริโภคในประเทศสูงขึ้นอย่างมาก
2563	25.37	(ลดลง) ช่วง Lockdown / โควิด-19
2564	24.98	ขยะท่องเที่ยวลด แต่ขยะ Delivery พุ่ง
2565	25.70	เริ่มฟื้นตัวจากการเปิดประเทศ
2566	26.50	การท่องเที่ยวกลับมาเกือบปกติ
2567	27.20	แนวโน้มกลับมาเท่าช่วงก่อนโควิด
2568	27.80	เน้นการจัดการขยะที่ต้นทาง

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2568)

ปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยมีแนวโน้มทรงตัวในระดับสูง โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 25 - 28 ล้านตันต่อปี แต่ใส่ในการเปลี่ยนแปลงที่น่ากังวลดังนี้

ในช่วงปี พ.ศ. 2559 – 2562 มีปริมาณขยะพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการท่องเที่ยวบูมและเศรษฐกิจขยายตัว ขยะพลาสติกจาก Food Delivery เริ่มก่อตัว ซึ่งในช่วงปี พ.ศ. 2563 – 2564 มีปริมาณขยะลดลงเล็กน้อยและเปลี่ยนรูปแบบสัดส่วนของขยะไป เนื่องจากเป็นช่วง COVID-19 ทำให้ขยะในเมืองท่องเที่ยวลดลง แต่หาขยะพลาสติกจากการสั่งอาหารพุ่งขึ้นถึง 45% และในช่วงปี พ.ศ. 2565 – 2568 ปริมาณขยะได้มีการกลับมาขยายตัวเพิ่มขึ้นจากการฟื้นตัวของการท่องเที่ยว และการเติบโตของสังคมเมือง ดังแสดงในภาพที่ 17 ปริมาณการเติบโตของขยะมูลฝอยในประเทศไทย



ภาพ 17 ปริมาณการเติบโตของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2568)

2.7.2 การนำขยะมูลฝอยไปใช้ประโยชน์

จากจำนวนขยะมูลฝอยทั้งหมดในประเทศไทย สามารถจำแนกการนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2567)

1. การรีไซเคิล ขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น พลาสติก แก้ว กระดาษ และโลหะ จะถูกคัดแยกและนำไปรีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นวัตถุดิบใหม่ ในปี พ.ศ. 2566 มีขยะที่ถูกนำไปรีไซเคิลประมาณร้อยละ 32 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด

2. การทำปุ๋ยหมัก ขยะอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร ใบไม้ และกิ่งไม้ สามารถนำไปหมักเพื่อผลิตปุ๋ยหมักได้ ในปี พ.ศ. 2566 มีขยะที่ถูกนำไปทำปุ๋ยหมักประมาณร้อยละ 5 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด

3. การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง ขยะที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็น RDF จะถูกนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าและอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2566 มีขยะที่ถูกนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงประมาณร้อยละ 10 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด

4. การฝังกลบ ขยะที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธี ในปี พ.ศ. 2566 มีขยะที่ถูกนำไปฝังกลบประมาณร้อยละ 35 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด

5. การกำจัดไม่ถูกวิธี ยังมีขยะบางส่วนที่ถูกกำจัดไม่ถูกวิธี เช่น การทิ้งในที่โล่ง การเผากลางแจ้ง และการทิ้งลงแหล่งน้ำ ในปี พ.ศ. 2566 มีขยะที่ถูกกำจัดไม่ถูกวิธีประมาณร้อยละ 18 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด

2.7.3 ศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงขยะ

จากจำนวนขยะมูลฝอยทั้งหมดในประเทศไทย มีเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่สามารถนำไปแปรรูปเป็น RDF ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากจำนวนขยะมูลฝอยทั้งหมดร้อยละ 100 จะมีเพียงร้อยละ 35 หรือประมาณ 9.5 ล้านตันต่อปีเท่านั้นที่สามารถนำไปแปรรูปเป็น RDF ได้ ส่วนขยะที่เหลือไม่เหมาะสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง ด้วยเหตุผลดังนี้

1. **ขยะอินทรีย์** มีความชื้นสูงและค่าความร้อนต่ำ ไม่เหมาะสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงขยะ แต่สามารถนำไปทำปุ๋ยหมักหรือผลิตก๊าซชีวภาพได้

2. **ขยะรีไซเคิล** มีมูลค่าสูงกว่าเมื่อนำไปรีไซเคิลเมื่อเทียบกับการนำไปผลิตเชื้อเพลิง

3. **ขยะอันตราย** ต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ

โดยในปี ค.ศ. 2024 ขยะมูลฝอยที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็น RDF กว่าร้อยละ 82 ได้ถูกนำไปแปรรูปแล้ว ทำให้ศักยภาพในการเพิ่มปริมาณ RDF ในอนาคตมีจำกัด

ดังนั้น คาดว่าการเติบโตของขยะมูลฝอยของประเทศไทยอาจจะไม่เพียงพอที่จะรองรับการเติบโตของความต้องการ RDF ในอนาคต การคัดแยกขยะและรวบรวมขยะอย่างถูกต้องจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องถูกผลักดันเพื่อเพิ่มปริมาณของขยะมูลฝอยที่สามารถแปรรูปเป็น RDF ได้มากขึ้น

2.8 แนวคิดเกี่ยวกับการขนส่งทางราง (Rail Transportation)

2.8.1 ความหมายและความสำคัญของการขนส่งทางราง

การขนส่งทางราง (Rail Transportation) หมายถึง การเคลื่อนย้ายสินค้าหรือผู้โดยสารโดยใช้รถไฟเป็นพาหนะบนรางเหล็ก ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการขนส่งสินค้าปริมาณมากในระยะทางไกล การขนส่งทางรางมีบทบาทสำคัญในระบบโลจิสติกส์ของหลายประเทศ เนื่องจากมีต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่าการขนส่งทางถนน และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่า (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2556)

การขนส่งทางรางมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการขนส่งอื่นๆ ดังนี้

1. **ความสามารถในการบรรทุกสูง** รถไฟสามารถบรรทุกสินค้าได้ปริมาณมากในการเดินทางแต่ละเที่ยว โดยขบวนรถไฟสินค้าสามารถบรรทุกได้ตั้งแต่หลายร้อยถึงหลายพันตัน

2. **ต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยต่ำ** เมื่อพิจารณาต้นทุนต่อตัน-กิโลเมตร การขนส่งทางรางมีต้นทุนประมาณ 0.93 บาทต่อตัน-กิโลเมตร ซึ่งต่ำกว่าการขนส่งทางถนนที่มีต้นทุนประมาณ 1.72 บาทต่อตัน-กิโลเมตร

3. ประสิทธิภาพด้านพลังงาน รถไฟมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงกว่ารถบรรทุกเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างล้อเหล็กและรางเหล็กมีค่าต่ำ

4. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ การขนส่งทางรางมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 0.035-0.045 kgCO₂e/ตัน-กิโลเมตร ในขณะที่การขนส่งทางรถบรรทุกมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 0.112 - 0.160 kgCO₂e/ตัน-กิโลเมตร ซึ่งหมายความว่า การขนส่งทางรถบรรทุกปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าการขนส่งทางรางประมาณ 3 - 4 เท่า (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2566; สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2556)

5. ความปลอดภัยสูง อุบัติเหตุจากการขนส่งทางรางมีอัตราต่ำกว่าการขนส่งทางถนน

6. ความน่าเชื่อถือและความตรงต่อเวลา การขนส่งทางรางมีตารางเวลาที่แน่นอนและไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาการจราจรติดขัดบนท้องถนน

2.8.2 โครงสร้างพื้นฐานการขนส่งทางรางในประเทศไทย

ประเทศไทยมีระบบโครงข่ายทางรถไฟที่ดำเนินการโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ซึ่งมีเส้นทางรถไฟครอบคลุมทั่วประเทศ โดยแบ่งออกเป็น 4 สายหลัก ได้แก่

1. สายเหนือ จากกรุงเทพฯ ถึงเชียงใหม่ ระยะทาง 751 กิโลเมตร

2. สายตะวันออก-เฉียงเหนือ จากกรุงเทพฯ ถึงหนองคาย/อุบลราชธานี ระยะทางรวมประมาณ 575 - 570 กิโลเมตร

3. สายใต้ จากกรุงเทพฯ ถึงสุโขทัย-โก-ลก/ปาดังเบซาร์ ระยะทางประมาณ 990 กิโลเมตร

4. สายตะวันออก จากกรุงเทพฯ ถึงอรัญประเทศ ระยะทาง 255 กิโลเมตร

สำหรับการขนส่งสินค้า การรถไฟแห่งประเทศไทยให้บริการขนส่งสินค้าทั้งแบบตู้คอนเทนเนอร์และแบบบรรทุกทุกเทกอง โดยมีสถานีบรรจุและแยกสินค้า (Inland Container Depot: ICD) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อสำคัญในการขนส่งแบบผสมผสาน โดยสถานี ICD ที่สำคัญ ได้แก่

1. ICD ลาดกระบัง เป็นศูนย์กลางการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย

2. ICD ฉะเชิงเทรา รองรับการขนส่งสินค้าในเขตพื้นที่ภาคตะวันออก

3. สถานีขนส่งสินค้าคลองเตย สถานีขนส่งสินค้าหลักในเขตกรุงเทพมหานคร

2.8.3 การขนส่งสินค้าทางรางสำหรับอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

การนำการขนส่งทางรางมาใช้ในอุตสาหกรรม RDF มีศักยภาพในการลดต้นทุนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะในการขนส่งเชื้อเพลิงขยะจากแหล่งผลิตไปยังโรงงานปูนซีเมนต์หรือโรงไฟฟ้าที่อยู่ในระยะทางไกล ตัวอย่างเช่น การขนส่ง RDF ทางรางจากอิตาลีไปยังกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวียสามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ประมาณร้อยละ 85 ต่อตัน-กิโลเมตรเมื่อเทียบกับการขนส่งทางถนน (Brüning Group, 2024) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาห่วงโซ่อุปทาน RDF แบบผสมผสาน (multimodal) ทั้งทางถนน ทางเรือ และทางราง โดยขนส่ง RDF อัดก่อนจากสหราชอาณาจักรไปยังโรงไฟฟ้าในประเทศสวีเดนได้สำเร็จ (DFDS, 2023)

ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการนำการขนส่งทางรางมาใช้ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงขยะ ได้แก่

1. ระยะทางการขนส่ง การขนส่งทางรางมีความคุ้มค่าเมื่อระยะทางการขนส่งเกิน 300 กิโลเมตร เนื่องจากต้นทุนคงที่ในการยกขนส่งสินค้าขึ้น-ลงรถไฟจะถูกชดเชยด้วยต้นทุนผันแปรที่ต่ำกว่าการขนส่งทางถนน สอดคล้องกับยุทธศาสตร์การขนส่ง 2050 ของสหภาพยุโรป (EU Transport 2050 Strategy) ที่แนะนำให้เปลี่ยนการขนส่งสินค้าทางถนนระยะทางเกิน 300 กิโลเมตร ไปสู่การขนส่งทางรางหรือทางน้ำ (International Council on Clean Transportation [ICCT], 2025) ทั้งนี้ในบริบทของประเทศไทย ต้นทุนการขนส่งทางรางอยู่ที่ประมาณ 0.95 บาทต่อตันต่อกิโลเมตร ซึ่งต่ำกว่าการขนส่งทางถนนที่มีต้นทุนสูงถึง 2.12 บาทต่อตันต่อกิโลเมตร (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2559)

2. ปริมาณการขนส่ง การขนส่งทางรางเหมาะสำหรับการขนส่งสินค้าปริมาณมาก โดยขบวนรถไฟสินค้าสามารถบรรทุกได้หลายร้อยตันต่อเที่ยว ซึ่งรถไฟสินค้าหนึ่งขบวนที่มี 40 ตู้สินค้าสามารถทดแทนรถบรรทุกได้ถึง 100 คัน (ICCT, 2025) และมีต้นทุนต่อตัน-ไมล์ต่ำกว่าการขนส่งทางถนนประมาณร้อยละ 75 (Union Pacific Railroad, 2023)

3. การเข้าถึงระบบราง ผู้ผลิตเชื้อเพลิงขยะและโรงงานผู้ใช้นี้ต้องมีที่ตั้งอยู่ใกล้กับสถานีรถไฟหรือสถานี ICD หรือต้องมีการขนส่งทางถนนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบราง (RSI Logistics, 2024)

4. ลักษณะของผลิตภัณฑ์ RDF ที่ผ่านการอัดแท่งหรืออัดเม็ด (RDF-5) มีความเหมาะสมในการขนส่งทางราง เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงและง่ายต่อการยกขน ตามการจำแนกของ ASTM International นั้น RDF-5 คือขยะที่ผ่านการอัดเป็นเม็ด แท่ง หรือก้อน ซึ่งมีข้อได้เปรียบด้านการจัดเก็บ การขนส่ง และมีค่าความร้อนสูง (ASTM E856-83, 2004; Narukawa et al., 2000)

2.8.4 ต้นทุนการขนส่งทางราง

ต้นทุนการขนส่งทางรางสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่าระวางขนส่ง (Freight Charge) คิดตามน้ำหนักและระยะทาง โดยอัตราค่าระวางรถไฟสินค้าของการรถไฟแห่งประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 0.50 - 0.80 บาทต่อตัน-กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับประเภทสินค้าและปริมาณ

2. ค่ายกขน (Handling Charge) ค่าใช้จ่ายในการยกสินค้าขึ้น-ลงรถไฟ ซึ่งรวมถึงค่าใช้เครื่องจักรและแรงงาน

3. ค่าจัดเก็บสินค้า (Storage Charge) ค่าใช้จ่ายในการพักสินค้าที่สถานีก่อนและหลังการขนส่ง

4. ค่าขนส่งต่อเนื่อง (Drayage Cost) ค่าขนส่งทางถนนจากต้นทางไปยังสถานีรถไฟ และจากสถานีรถไฟไปยังปลายทาง

2.8.5 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งทางราง

การขนส่งทางรางถือเป็นรูปแบบการขนส่งที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าการขนส่งทางถนนอย่างมีนัยสำคัญ ตามข้อมูลจากฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศไทย (Thai National LCI Database) พบว่า

1. รถไฟดีเซล มีค่า Emission Factor ประมาณ 0.035 - 0.045 kgCO₂e/ตัน-กิโลเมตร

2. รถไฟฟ้า มีค่า Emission Factor ประมาณ 0.020 - 0.030 kgCO₂e/ตัน-กิโลเมตร

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งทางถนน ซึ่งมีค่า Emission Factor ตั้งแต่ 0.046 ถึง 0.152 kgCO₂e/ตัน-กิโลเมตร (ขึ้นอยู่กับประเภทรถบรรทุก) จะเห็นได้ว่าการขนส่งทางรางมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึงร้อยละ 50 - 80

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในบริบทของมาตรการ CBAM ของสหภาพยุโรป เนื่องจากการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่ง (Scope 3 Emissions) อาจถูกรวมเข้าในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในอนาคต

2.9 แนวคิดเกี่ยวกับการขนส่งแบบผสมผสาน (Multimodal Transportation)

2.9.1 ความหมายและหลักการของการขนส่งแบบผสมผสาน

การขนส่งแบบผสมผสาน (Multimodal Transportation) หมายถึง การขนส่งสินค้าที่ใช้รูปแบบการขนส่งมากกว่าหนึ่งรูปแบบในการเคลื่อนย้ายสินค้าจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยมีสัญญาขนส่งฉบับเดียว (Single Contract) และมีผู้ประกอบการรับผิดชอบตลอดเส้นทาง การขนส่งแบบผสมผสานมักประกอบด้วย การขนส่งทางถนน ทางราง ทางน้ำ และทางอากาศ ขึ้นอยู่กับลักษณะของสินค้าและเส้นทางการขนส่ง (SteadieSeifi et al., 2014)

หลักการสำคัญของการขนส่งแบบผสมผสาน ได้แก่

1. การใช้จุดแข็งของแต่ละรูปแบบการขนส่ง การผสมผสานรูปแบบการขนส่งที่เหมาะสมกับแต่ละช่วงของการขนส่ง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

2. การลดต้นทุนรวม การเลือกรูปแบบการขนส่งที่มีต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับแต่ละช่วงของเส้นทาง

3. การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้รูปแบบการขนส่งที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำในช่วงที่เป็นไปได้

4. ความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือ การมีทางเลือกในการขนส่งหลายรูปแบบช่วยลดความเสี่ยงจากการหยุดชะงักของการขนส่ง

2.9.2 รูปแบบการขนส่งแบบผสมผสานที่พบในประเทศไทย

ในประเทศไทย การขนส่งแบบผสมผสาน (Multimodal Transport) เป็นการขนส่งสินค้าที่ใช้การขนส่งตั้งแต่สองรูปแบบขึ้นไป ภายใต้ผู้ให้บริการรายเดียวและสัญญาฉบับเดียว โดยมุ่งเน้นให้เกิดประสิทธิภาพด้านต้นทุนเมื่อเปรียบเทียบกับ การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว (สถาบันอบรม ITBS, 2567) ทั้งนี้ ประเทศไทยมีพระราชบัญญัติการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ พ.ศ. 2548 เป็นกรอบกฎหมายรองรับการดำเนินกิจกรรมดังกล่าว (พระราชบัญญัติการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ, 2548) โดยรูปแบบการขนส่งแบบผสมผสานที่พบมากที่สุด ได้แก่

1. การขนส่งทางถนน - ทางราง (Road-Rail)

เป็นรูปแบบที่ใช้รถบรรทุกในการขนส่งสินค้าจากต้นทางไปยังสถานีรถไฟ จากนั้นใช้รถไฟในการขนส่งสินค้าไประยะทางไกล และใช้รถบรรทุกอีกครั้งในการขนส่งจากสถานีปลายทางไปยังจุดหมาย รูปแบบนี้เหมาะสำหรับการขนส่งสินค้าปริมาณมากในระยะทางไกล เช่น การขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างที่สำคัญในประเทศไทย คือ การขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ทางรางระหว่างสถานีบรรจุและแยกสินค้าคลองลาดกระบัง (ICD ลาดกระบัง) กับท่าเรือแหลมฉบัง ซึ่งปัจจุบันมีขบวนรถขนส่งสินค้า 24 ขบวนต่อวัน (ไป-กลับ) มีปริมาณการขนส่งสินค้าในปีงบประมาณ 2567 อยู่ที่ 465,329 TEUs โดยการรถไฟแห่งประเทศไทยตั้งเป้าเพิ่มเป็น 30 ขบวนต่อวัน (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2568)

2. การขนส่งทางถนน - ทางน้ำ (Road-Water)

เป็นรูปแบบที่ใช้รถบรรทุกในการขนส่งสินค้าจากต้นทางไปยังท่าเรือ จากนั้นใช้เรือในการขนส่งสินค้าตามเส้นทางน้ำ เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา หรือชายฝั่งทะเล รูปแบบนี้เหมาะสำหรับการขนส่งสินค้าน้ำหนักและสินค้าเทกอง ทั้งนี้ ท่าเรือกรุงเทพซึ่งตั้งอยู่ริมแม่น้ำเจ้าพระยา รองรับ การเชื่อมต่อ การขนส่งสินค้าจากท่าเรือแหลมฉบังและปลายทางทั่วประเทศผ่านการขนส่งหลายรูปแบบ ทั้งทางถนน ทางราง และทางน้ำ พร้อมรองรับเรือสินค้าและเรือขนส่งสินค้าชายฝั่ง (การท่าเรือแห่งประเทศไทย, 2566) นอกจากนี้ การขนส่งทางน้ำมีต้นทุนเพียง 0.65 บาทต่อตันต่อ กิโลเมตร ซึ่งต่ำกว่าการขนส่งทางถนนที่มีต้นทุน 2.12 บาทต่อตันต่อกิโลเมตร (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2559)

3. การขนส่งทางถนน - ทางราง - ทางน้ำ (Road-Rail-Water)

เป็นรูปแบบที่ผสมผสานการขนส่งทั้งสามรูปแบบ มักใช้ในการขนส่งสินค้าน้ำหนักมาก ประเทศ โดยเฉพาะการส่งออกและนำเข้าผ่านท่าเรือแหลมฉบัง ตัวอย่างเช่น การขนส่งสินค้าจากโรงงานในภาคกลางหรือภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยรถบรรทุกมายังสถานี ICD ลาดกระบัง จากนั้นขนส่งทางรางไปยังท่าเรือแหลมฉบัง และส่งต่อทางเรือไปยังต่างประเทศ โดย ICD ลาดกระบังมีขีดความสามารถรองรับตู้สินค้าได้ปีละประมาณ 1 ล้าน TEU ผ่านสถานีย่อย 6 สถานีที่ดำเนินงานโดยเอกชน (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2539) รูปแบบนี้ช่วยลด

ความคับคั่งของการจราจรทางถนน ลดมลภาวะ และประหยัดพลังงาน ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศ (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2559)

2.9.3 จุดเชื่อมต่อในการขนส่งแบบผสมผสาน

จุดเชื่อมต่อ (Intermodal Terminal หรือ Hub) เป็นสถานที่สำคัญในการถ่ายโอนสินค้าระหว่างรูปแบบการขนส่งต่าง ๆ จุดเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดเวลาและต้นทุนในการถ่ายโอนสินค้า

จุดเชื่อมต่อที่สำคัญในประเทศไทย ได้แก่

1. สถานี ICD ลาดกระบัง เป็นจุดเชื่อมต่อหลักสำหรับการขนส่งทางถนน-ทางราง โดยเฉพาะการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์

2. ท่าเรือแหลมฉบัง เป็นจุดเชื่อมต่อหลักสำหรับการขนส่งทางถนน/ทางราง-ทางน้ำ ในการส่งออกและนำเข้า

3. ท่าเรือคลองเตย เป็นจุดเชื่อมต่อสำหรับการขนส่งทางถนน-ทางน้ำ ในเขตกรุงเทพมหานคร

4. สถานีขนส่งสินค้าพุทธมณฑล สถานีขนส่งสินค้าทางถนนที่สำคัญในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

2.9.4 การพิจารณาต้นทุนและการปล่อย CO₂ ในการขนส่งแบบผสมผสาน

การวิเคราะห์ต้นทุนและการปล่อย CO₂ ในการขนส่งแบบผสมผสานต้องพิจารณาทุกช่วงของการขนส่ง รวมถึงต้นทุนและการปล่อย CO₂ ที่จุดเชื่อมต่อ ทั้งนี้ การออกแบบเครือข่ายการขนส่งแบบผสมผสานต้องคำนึงถึงทั้งกระบวนการขนส่ง (Transport) และกระบวนการขนถ่าย (Transshipment) ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งและการเปลี่ยนผู้ขนส่งที่สถานีเชื่อมต่อ (Rudi et al., 2016; Qu et al., 2016)

1. ต้นทุนรวมของการขนส่งแบบผสมผสาน

ต้นทุนรวมของการขนส่งแบบผสมผสานประกอบด้วย

$$TC_{multimodal} = TC_{road1} + TC_{handling1} + TC_{rail} + TC_{handling2} + TC_{road2} \quad (1)$$

โดยที่

TC_{road1} = ต้นทุนการขนส่งทางถนนจากต้นทางไปยังจุดเชื่อมต่อ

$TC_{handling1}$ = ต้นทุนการยกขนที่จุดเชื่อมต่อต้นทาง

TC_{rail} = ต้นทุนการขนส่งทางราง

$TC_{handling2}$ = ต้นทุนการยกขนที่จุดเชื่อมต่อปลายทาง

TC_{road2} = ต้นทุนการขนส่งทางถนนจากจุดเชื่อมต่อไปยังปลายทาง

ที่มา : Rudi, A., Fröhling, M., Zimmer, K., & Schultmann, F. (2016).

2. การปล่อย CO₂ รวมของการขนส่งแบบผสมผสาน

การปล่อย CO₂ รวมของการขนส่งแบบผสมผสานประกอบด้วย

$$E_{multimodal} = E_{road1} + E_{handling1} + E_{rail} + E_{handling2} + E_{road2} \quad (2)$$

โดยที่แต่ละองค์ประกอบคำนวณจาก

$$E = Q \times d \times EF \quad (3)$$

เมื่อ

Q = ปริมาณสินค้า (ตัน)

d = ระยะทาง (กิโลเมตร)

EF = ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO₂e/ตัน-กม.)

ที่มา : McKinnon, A., & Piecyk, M. (2012).

2.9.5 ข้อดีและข้อจำกัดของการขนส่งแบบผสมผสาน

ข้อดีของการขนส่งแบบผสมผสาน

1. ลดต้นทุนรวม การใช้รูปแบบการขนส่งที่มีต้นทุนต่อหน่วยต่ำในช่วงระยะทางไกล เช่น รถไฟหรือเรือ ช่วยลดต้นทุนรวมของการขนส่ง

2. ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้รูปแบบการขนส่งที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ช่วยลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของห่วงโซ่อุปทาน

3. ลดความแออัดบนท้องถนน การโอนภาระการขนส่งจากถนนไปสู่รางหรือน้ำ ช่วยลดปัญหาการจราจรติดขัด

4. เพิ่มความยืดหยุ่นในการขนส่ง การมีทางเลือกหลายรูปแบบช่วยลดความเสี่ยงจากการหยุดชะงัก

ข้อจำกัดของการขนส่งแบบผสมผสาน

1. ความซับซ้อนในการจัดการ การประสานงานระหว่างผู้ให้บริการขนส่งหลายราย

2. ต้นทุนยกขนที่จุดเชื่อมต่อ การถ่ายโอนสินค้าระหว่างรูปแบบการขนส่งมีต้นทุนเพิ่มเติม

3. เวลาการขนส่งอาจนานขึ้น การรอเวลาที่จุดเชื่อมต่ออาจทำให้ระยะเวลาการขนส่งรวมเพิ่มขึ้น

4. ข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐาน ไม่ใช่ทุกพื้นที่จะมีจุดเชื่อมต่อที่สะดวก

ตาราง 5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ Multimodal Transportation

Authors (year)	Transportation Modes			
	Road	Rail	Water	Air
Janic (2007)	✓	✓		✓
Bauer et al. (2010)	✓	✓	✓	
Demir et al. (2014)	✓			
SteadieSeifi et al. (2014)	✓	✓	✓	✓
Sawadogo & Anciaux (2015)	✓	✓	✓	
Archetti & Peirano (2020)	✓	✓		
Hrušovský et al. (2021)	✓	✓	✓	
Resat & Turkay (2015)	✓	✓	✓	
Agamez-Arias (2017)	✓	✓	✓	
Dong et al. (2018)	✓	✓		
Zhao et al. (2020)	✓	✓	✓	
Sun et al. (2022)	✓	✓		
Somsai et al. (2024)	✓	✓	✓	

2.10 แนวคิดเกี่ยวกับตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการขนส่งแบบผสมผสาน

2.10.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการห่วงโซ่อุปทานและการขนส่งเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน เนื่องจากต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการพร้อมกัน ได้แก่ ต้นทุน เวลา ความน่าเชื่อถือ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์และหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างเป็นระบบ (Aloui et al., 2022; Qi et al., 2024)

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการขนส่งแบบผสมผสานที่พิจารณาทั้งต้นทุนและการปล่อย CO₂ จัดอยู่ในกลุ่มปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะดังนี้ (Hu et al., 2025; Santos et al., 2020)

1. มีหลายวัตถุประสงค์ที่อาจขัดแย้งกัน เช่น การลดต้นทุนอาจทำให้การปล่อย CO₂ เพิ่มขึ้น หรือในทางกลับกัน

2. มีตัวแปรตัดสินใจหลายตัว ได้แก่ ปริมาณการสั่งซื้อ รูปแบบการขนส่ง เส้นทาง การขนส่ง และความถี่ในการสั่งซื้อ
3. มีเงื่อนไขบังคับหลายประการ ได้แก่ ความจุของยานพาหนะ ความจุของ คลังสินค้า ความต้องการของลูกค้า และข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐาน

2.10.2 ประเภทของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการขนส่งแบบผสมผสานสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP)

เป็นตัวแบบที่ฟังก์ชันเป้าประสงค์และเงื่อนไขบังคับทั้งหมดเป็นสมการเชิงเส้น ตัวแบบนี้เหมาะสำหรับปัญหาที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นเชิงเส้น และสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธี Simplex (Hillier & Lieberman, 2021; Bazaraa et al., 2010)

2. ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Linear Programming: MILP)

เป็นตัวแบบที่มีตัวแปรบางส่วนต้องเป็นจำนวนเต็ม (เช่น จำนวนรถ จำนวนเที่ยว) หรือตัวแปรไบนารี (0 หรือ 1) ตัวแบบนี้เหมาะสำหรับปัญหาการเลือกเส้นทางหรือการเลือกรูปแบบการขนส่ง (Wicaksono et al., 2020; Baykasoğlu et al., 2021; Al-Anbari et al., 2025)

3. ตัวแบบการหาค่าเหมาะที่สุดหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)

เป็นตัวแบบที่มีวัตถุประสงค์หลายข้อที่ต้องพิจารณาพร้อมกัน วิธีการแก้ปัญหาที่ใช้ได้แก่

- 1) วิธีถ่วงน้ำหนัก (Weighted Sum Method) รวมวัตถุประสงค์ทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยกำหนดน้ำหนักความสำคัญ (Marler & Arora, 2010)
- 2) วิธี ϵ -Constraint กำหนดให้วัตถุประสงค์หนึ่งเป็นฟังก์ชันเป้าประสงค์ และวัตถุประสงค์อื่น ๆ เป็นเงื่อนไขบังคับ (Haimes et al., 1971; Mavrotas, 2009)
- 3) วิธี Goal Programming กำหนดค่าเป้าหมายสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ และหาคำตอบที่เบี่ยงเบนจากเป้าหมายน้อยที่สุด (Charnes & Cooper, 1961; Miettinen, 1999)

2.10.3 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

สำหรับอุตสาหกรรม RDF ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ต้องพิจารณาลักษณะเฉพาะของอุตสาหกรรม ได้แก่ (Niziolek et al., 2018; Ansari et al., 2024; European Commission, 2023)

1. แหล่งผลิตกระจายตัว ผู้ผลิตเชื้อเพลิงขยะมีที่ตั้งกระจายทั่วประเทศ ใกล้กับแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอย
2. ความต้องการมีความแน่นอน โรงงานปูนซีเมนต์และโรงไฟฟ้ามีความต้องการเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างคงที่
3. ลักษณะสินค้า เชื้อเพลิงขยะมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับปริมาตร ทำให้การบรรทุกอาจจำกัดด้วยปริมาตรมากกว่าน้ำหนัก
4. ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เชื้อเพลิงขยะมีอายุการเก็บรักษาที่จำกัด และต้องป้องกันความชื้น
5. ความสำคัญของการลด CO₂ การลดการปล่อย CO₂ ในห่วงโซ่อุปทานช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเชื้อเพลิงขยะในบริบทของมาตรการ CBAM (European Commission, 2023)

2.10.4 ต้นแบบงานวิจัยและตัวแบบทางคณิตศาสตร์

Somsai et al. (2024) ได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ถูกออกแบบมาเป็น Linear Programming (LP) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ในโครงข่ายการขนส่งสินค้าของอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยแบ่งโครงสร้างโมเดลออกเป็น ส่วนประกอบหลักดังนี้

1. ดัชนีและพารามิเตอร์ (Indices & Parameters) โมเดลกำหนดตัวแปรพื้นฐาน เช่น i แหล่งผลิต (โรงงานน้ำตาล) j จุดเปลี่ยนถ่ายสินค้า/ท่าเรือบก (Dry Port) k จุดหมายปลายทาง/ท่าเรือหลัก (Major Seaport) และ m รูปแบบการขนส่ง (Road, Rail, Water)
2. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions) โมเดลนำเสนอ 3 รูปแบบตามเป้าหมายที่แตกต่างกัน

Model I: Minimizing Carbon Emissions เน้นการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก (CO₂) จากการขนส่งทุกช่วง และทุกรูปแบบ โดยคำนวณจากระยะทาง น้ำหนักสินค้า และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษของพาหนะแต่ละประเภท

Model II: Minimizing Carbon Emissions with Capacity Constraints ซึ่งเหมือนกับโมเดลแรก แต่เพิ่มเงื่อนไขความสามารถในการรองรับสินค้าของคลังสินค้าและจุดเปลี่ยนถ่าย (Storage Capacity) เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

Model III: Minimizing Total Costs โดยโมเดลนี้จะมุ่งเน้นความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าขนส่งตามระยะทาง (Transportation Cost) ค่ายกขนสินค้าขึ้น - ลงที่จุดเปลี่ยนถ่าย (Handling Cost) ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Cost) และต้นทุนภาษีคาร์บอน ตามนโยบายสิ่งแวดล้อม (Carbon Tax)

3. เงื่อนไขบังคับ (Constraints) เพื่อให้โมเดลทำงานได้ภายใต้ข้อจำกัดจริง จึงมีสมการเงื่อนไข เช่น Demand Constraint ปริมาณสินค้าที่ส่งต้องเท่ากับความต้องการของลูกค้า Flow Balance ปริมาณสินค้าที่เข้าสู่จุดพัก (Hub) ต้องเท่ากับปริมาณที่ออกจากจุดนั้น Capacity Constraint ปริมาณสินค้าที่ผ่านเส้นทางหรือจุดเปลี่ยนถ่ายต้องไม่เกินขีดความสามารถที่รองรับได้ Binary/Non-negativity ตัวแปรตัดสินใจต้องไม่ติดลบ และบางตัวแปรเป็น Binary (0 หรือ 1) ในการเลือกเส้นทาง

4. การตัดสินใจของโมเดล (Decision Variables) ประการแรก ควรส่งสินค้าจากที่ไหนไปยังที่ไหน (Routing) ประการที่สอง ควรใช้รถบรรทุก รถไฟ หรือเรือ ในช่วงการขนส่งใด (Mode Selection) ประการที่สาม ควรผ่านท่าเรือบก (Dry Port) แห่งใดจึงจะประหยัดที่สุด

จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นสรุปได้ดังนี้ โมเดลนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าเมื่อรวม "ภาษีคาร์บอน" เข้าไปในต้นทุน การเปลี่ยนโหมดการขนส่งจากทางถนน (Road) ไปเป็นทางราง (Rail) หรือทางน้ำ (Water) โดยผ่านท่าเรือบก จะกลายเป็นทางเลือกที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านต้นทุนและสิ่งแวดล้อม (Somsai et al. 2024)

โดยมีองค์ประกอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

ดัชนี (Indices)

i = โรงงาน โดยที่ $i = 1$

j = คลังเก็บสินค้า โดยที่ $j = 1,2,3,4$

k = ท่าเรือสำหรับส่งออกสินค้าไปยังต่างประเทศ โดยที่ $k = 1,2,3$

l = ท่าเรือแหลมฉบัง สำหรับกรณีขนส่งด้วยรถไฟ โดยที่ $l = 1$

m = สถานีบรรจุและแยกสินค้ากล่อง ลาดกระบัง โดยที่ $m = 1$

v = ชนิดของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง โดยที่ $v = 1,2,...,11$

พารามิเตอร์ (Parameters)

S = ปริมาณน้ำตาลที่ถูกส่งออกไปยังต่างประเทศต่อปี (ตัน)

CAP_v = ความจุของยานพาหนะชนิด v (ตัน)

EF_v = ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซ CO₂ ของยานพาหนะชนิด v (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ตัน·กิโลเมตร)

a_{ikv} = ระยะทางขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะ v (กิโลเมตร)

b_{ijv} = ระยะทางขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (กิโลเมตร)

C_{jkv} = ระยะทางขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากคลังเก็บสินค้า j ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะ v (กิโลเมตร)

d_{imv} = ระยะทางขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังสถานีบรรจุและแยกสินค้า กล่อง ลาดกระบ้ง m ด้วยยานพาหนะ v (กิโลเมตร)

e_{mlv} = ระยะทางขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากสถานีบรรจุและแยกสินค้ากล่อง ลาดกระบ้ง m ไปยังท่าเรือแหลมฉบัง l ด้วยยานพาหนะ v (กิโลเมตร)

$CAPWH$ = ความจุของคลังเก็บสินค้า (ตัน)

TFU_v = ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์น้ำตาลขึ้นไปยังยานพาหนะ v (บาท/ตัน)

TFD_v = ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์น้ำตาลลงจากยานพาหนะ v (บาท/ตัน)

TFB_j = ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากคลังเก็บสินค้า j ลงเรือโป๊ะ (บาท/ตัน)

TFB_k = ค่าขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลผ่านเรือโป๊ะไปยังท่าเรือ k (บาท/ตัน)

$TFM_{k,v}$ = ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์น้ำตาลขึ้นเรือเดินสมุทรที่ทำเรือ k จากยานพาหนะชนิด v (บาท/ตัน)

WHC_k = ค่าฝากสินค้าที่ทำเรือ k (บาท/ตัน)

WHC_m = ค่าฝากสินค้าที่สถานีบรรจุและแยกสินค้ากล่องลาดกระบ้ง m (บาท/ตัน)

WHC_j = ค่าฝากสินค้าที่คลังเก็บสินค้า j (บาท/ตัน)

FC = ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท)

VHC = ค่าสัมประสิทธิ์ในการคิดค่าจ้างเหมายานพาหนะเพื่อบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ขนาด 20 ฟุต (ตัน)

TFI = ค่า Intake ผลิตภัณฑ์น้ำตาลเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ (บาท/ตู้)

Fr = อัตราค่าระวางของรถไฟ (บาท/ตู้)

CTN = จำนวนตู้คอนเทนเนอร์ที่ใช้สำหรับขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาล (ตู้)

R_v = จำนวนรอบในการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลของยานพาหนะชนิด v (รอบ)

TPC = ค่าบริการสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลด้วยรถไฟจากสถานีบรรจุและแยกสินค้ากล่อง ลาดกระบ้งด้วยรถไฟ ไปยังท่าเรือแหลมฉบัง (บาท/ตู้)

CEX = ต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาท/ตันคาร์บอน)

M = จำนวนเต็มที่มีค่ามากที่สุด (Large Positive Number)

TC_{ikv} = ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะชนิด v (บาท)

TC_{ijv} = ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังคลังเก็บสินค้า j ด้วยยานพาหนะชนิด v (บาท)

TC_{jkv} = ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากคลังเก็บสินค้า j ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะชนิด v (บาท)

TC_{imv} = ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังสถานีบรรจุ และแยกสินค้ากล่อง ลาดกระบ้ง m ด้วยยานพาหนะชนิด v (บาท)

TC_{mlv} = ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากสถานีบรรจุและแยกสินค้า กล่อง ลาดกระบ้ง m ไปยังท่าเรือแหลมฉบัง l ด้วยยานพาหนะชนิด v (บาท)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

ε_{ikv} = 1 ในกรณีที่มีการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะชนิด v ในกรณีอื่นๆ มีค่าเป็น 0

μ_{ijv} = 1 ในกรณีที่มีการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังคลังเก็บสินค้า j ด้วยยานพาหนะชนิด v ในกรณีอื่นๆ มีค่าเป็น 0

ρ_{jkv} = 1 ในกรณีที่มีการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากคลังเก็บสินค้า j ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะชนิด v ในกรณีอื่นๆ มีค่าเป็น 0

σ_{imv} = 1 ในกรณีที่มีการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากโรงงาน i ไปยังสถานีบรรจุ และแยก สินค้ากล่อง ลาดกระบ้ง m ด้วยยานพาหนะชนิด v ในกรณีอื่นๆ มีค่าเป็น 0

ω_{mlv} = 1 ในกรณีที่มีการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากสถานีบรรจุและแยกสินค้า กล่อง ลาดกระบ้ง m ไปยังท่าเรือแหลมฉบัง l ด้วยยานพาหนะชนิด v ในกรณีอื่นๆ มีค่าเป็น 0

Q_{ikv} = ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ขนส่งจากโรงงาน i ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

R_{ijv} = ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ขนส่งจากโรงงาน i ไปยังคลังเก็บสินค้า j ด้วยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

S_{jkv} = ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ขนส่งจากคลังเก็บสินค้า j ไปยังท่าเรือ k ด้วยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

T_{imv} = ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ขนส่งจากโรงงาน i ไปยังสถานีบรรจุและแยกสินค้า กล่อง ลาดกระบ้ง m ด้วยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

U_{mlv} = ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ขนส่งจากสถานีบรรจุและแยกสินค้ากล่อง ลาดกระบ้ง m ไปยังท่าเรือแหลมฉบัง l ด้วยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

ฟังก์ชันเป้าประสงค์ (Objective Function)

กรณีที่ 1 เป็นการหาลักษณะของการขนส่ง และเส้นทางการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลเพื่อการส่งออก โดยลักษณะและเส้นทางการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลนั้นจะต้องเป็นเส้นทางมีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำที่สุด ดังสมการที่ (4)

$$\begin{aligned}
 Min Z = & \sum_i^{NF} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} (CAP_v \times a_{ikv} \times EF_v \times R_v) \varepsilon_{ikv} \\
 & + \sum_i^{NF} \sum_j^{NW} \sum_v^{NV} (CAP_v \times b_{ijv} \times EF_v \times R_v) \mu_{ijv} \\
 & + \sum_j^{NW} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} (CAP_v \times c_{jkv} \times EF_v \times R_v) \rho_{jkv} \\
 & + \sum_i^{NF} \sum_m^{ND} \sum_v^{NV} (CAP_v \times d_{imv} \times EF_v \times R_v) \sigma_{imv} \\
 & + \sum_m^{ND} \sum_l^{NL} \sum_v^{NV} (CAP_v \times e_{mlv} \times EF_v \times R_v) \omega_{mlv}
 \end{aligned} \tag{4}$$

โดยที่

$$\sum_i^{NF} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} \varepsilon_{ikv} + \sum_i^{NF} \sum_j^{NW} \sum_v^{NV} \mu_{ijv} + \sum_i^{NF} \sum_m^{ND} \sum_v^{NV} \sigma_{imv} = 1 \tag{5}$$

$$\sum_i^{NF} \sum_v^{NV} \mu_{ijv} = \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} \rho_{jkv} ; \forall j \tag{6}$$

$$\sum_i^{NF} \sum_v^{NV} \sigma_{imv} = \sum_l^{NL} \sum_v^{NV} \omega_{mlv} ; \forall m \tag{7}$$

$$\varepsilon_{ikv}, \mu_{ijv}, \rho_{jkv}, \sigma_{klv}, \omega_{mlv} \in \{0,1\} ; \forall i, j, k, m, l, v \tag{8}$$

กรณีที่ 2 เป็นการหาลักษณะและเส้นทางในการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาล ที่มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำที่สุด โดยพิจารณาถึงข้อจำกัดด้านความจุของคลังสินค้า ดังสมการที่ (9)

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_i^{NF} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} (Q_{ikv} \times a_{ikv} \times EF_v) \\
 & + \sum_i^{NF} \sum_j^{NW} \sum_v^{NV} (R_{ijv} \times b_{ijv} \times EF_v) \\
 & + \sum_j^{NW} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} (S_{jkv} \times c_{jkv} \times EF_v) \\
 & + \sum_i^{NF} \sum_m^{ND} \sum_v^{NV} (T_{imv} \times d_{imv} \times EF_v) \\
 & + \sum_m^{ND} \sum_l^{NL} \sum_v^{NV} (U_{mlv} \times e_{mlv} \times EF_v)
 \end{aligned} \tag{9}$$

โดยที่

$$Q_{ikv} + R_{ijv} + T_{imv} = S ; \forall i, \forall j, \forall k, \forall m, \forall v \tag{10}$$

$$R_{ijv} = S_{jkv} ; \forall i, \forall j, \forall k, \forall v \tag{11}$$

$$T_{imv} = U_{mlv} ; \forall i, \forall m, \forall l, \forall v \tag{12}$$

$$R_{ijv} \leq CAPWH ; \forall i, \forall j, \forall v \tag{13}$$

$$Q_{ikv}, R_{ijv}, S_{jkv}, T_{imv}, U_{mlv} \geq 0 ; \forall i, \forall j, \forall k, \forall m, \forall v \tag{14}$$

กรณีที่ 3 ต้นทุนโดยรวม สำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ต่ำที่สุด โดยรวมไปถึง ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (15) โดยที่เงื่อนไขข้อบังคับ เช่นเดียวกับกับกรณีที่ 1

$$\begin{aligned}
 Min Z = & \sum_i^{NF} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} TC_{ikv} \varepsilon_{ikv} \\
 & + \sum_i^{NF} \sum_j^{NW} \sum_v^{NV} TC_{ijv} \mu_{ijv} \\
 & + \sum_j^{NW} \sum_k^{NP} \sum_v^{NV} TC_{jkv} \rho_{jkv} \\
 & + \sum_i^{NF} \sum_m^{ND} \sum_v^{NV} TC_{imv} \sigma_{imv} \\
 & + \sum_m^{ND} \sum_l^{NL} \sum_v^{NV} TC_{mlv} \omega_{mlv}
 \end{aligned} \tag{15}$$

ที่มา : Somsai et al. (2024)

การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาขึ้นจากการบูรณาการแนวคิดของแบบจำลองปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่คำนึงถึงมลพิษ (Pollution-Routing Problem: PRP) ซึ่งเสนอโดย Bektaş and Laporte (2011) เป็นแบบจำลองที่ขยายจากปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) โดยเพิ่มวัตถุประสงค์ในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับเปลี่ยนและบูรณาการแบบจำลองทั้งสองให้สอดคล้องกับบริบทของห่วงโซ่อุปทานเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ของกรณีศึกษา โดยมีการปรับเปลี่ยนที่สำคัญ ดังนี้

ประการแรก ด้านโครงสร้างเครือข่ายการขนส่ง ได้ออกแบบเครือข่ายเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย ผู้ผลิตวัตถุดิบ (Suppliers) คลังสินค้า/สถานีขนถ่าย (Warehouses) และโรงงานกรณีศึกษา (Destination) โดยเพิ่มทางเลือกในการขนส่งทั้งแบบส่งตรง (Direct Shipment) และแบบส่งผ่านคลังสินค้า (Warehouse Transshipment) ซึ่งแตกต่างจากต้นแบบเดิมที่พิจารณาการขนส่งเพียงรูปแบบเดียว

ประการที่สอง ด้านรูปแบบการขนส่ง ได้เพิ่มตัวแปรประเภทยานพาหนะ (V) เพื่อรองรับการขนส่งหลายรูปแบบ (Multimodal Transport) ทั้งการขนส่งทางถนนด้วยรถบรรทุก

และการขนส่งทางรางด้วยรถไฟ ซึ่งแต่ละรูปแบบมีความจุ ต้นทุน และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกัน

ประการที่สาม ด้านฟังก์ชันเป้าประสงค์ ได้กำหนดเป็นแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) โดยวัตถุประสงค์ที่ 1 คือการลดต้นทุนรวมให้ต่ำที่สุด และวัตถุประสงค์ที่ 2 คือการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ต่ำที่สุด ซึ่งประยุกต์จากแนวคิดของ Bektaş and Laporte (2011)

ประการที่สี่ ด้านเงื่อนไขบังคับ ได้เพิ่มเงื่อนไขที่สอดคล้องกับข้อจำกัดเฉพาะของการขนส่ง RDF ในประเทศไทย เช่น ข้อจำกัดของเส้นทางรถไฟที่ต้องผ่านสถานีบรรจุ และแยกสินค้าที่กำหนด และเงื่อนไขการเลือกรูปแบบการขนส่งเพียงกรณีเดียวต่อเส้นทาง

องค์ประกอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดัชนี (Indices)

i = ผู้ผลิตวัตถุดิบ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, m$

j = คลังสินค้า โดยที่ $j = 1, 2, \dots, n$

k = โรงงานกรณีศึกษา โดยที่ $k = 1, 2, \dots, o$

v = ประเภทยานพาหนะ โดยที่ $v = 1, 2, \dots, r$

พารามิเตอร์ (Parameters)

D = ความต้องการเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ต่อปี (ตัน/ปี)

S = ต้นทุนการสั่งซื้อต่อครั้ง (บาท/ครั้ง)

H = ต้นทุนการเก็บรักษาต่อหน่วยต่อปี (บาท/ตัน/ปี)

C = ต้นทุนเชื้อเพลิงขยะต่อหน่วย (บาท/ตัน)

CAP_v = ความจุของยานพาหนะประเภท v (ตัน)

EF_v = ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของยานพาหนะประเภท v (kgCO₂e/ตัน·กม.)

a_{ikv} = ระยะทางจากผู้ผลิต i ไปยังโรงงาน k ด้วยยานพาหนะ v (กม.)

b_{ijv} = ระยะทางจากผู้ผลิต i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (กม.)

c_{jkv} = ระยะทางจากคลังสินค้า j ไปยังโรงงาน k ด้วยยานพาหนะ v (กม.)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

Q = ปริมาณการสั่งซื้อต่อครั้ง (ตัน)

X_{ikv} = ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกขนส่งเชื้อเพลิงขยะจากผู้ผลิต i ไปยังโรงงาน k ด้วยยานพาหนะ v โดยตรง (กรณีส่งตรง)

Y_{ijv} = ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกขนส่งเชื้อเพลิงขยะจากผู้ผลิต i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (กรณีส่งผ่านคลัง)

Z_{jkv} = ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกขนส่งเชื้อเพลิงขยะจากคลังสินค้า j ไปยังโรงงาน k ด้วยยานพาหนะ v (กรณีส่งผ่านคลัง)

กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็น 1 หากมีการขนส่งเชื้อเพลิงขยะ และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)

เป็นการวางเป้าหมายที่ทำให้เกิดการสั่งซื้อและขนส่ง RDF จากผู้ผลิตไปยังโรงงานโดยมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1: ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } TC = \frac{D}{Q} \times S + \frac{Q}{2} \times H + D \times C + TC_{transport} \quad (16)$$

โดยที่

$$TC_{transport} = TC_{direct} + TC_{warehouse} \quad (17)$$

TC_{direct} = ต้นทุนการขนส่งในกรณีส่งตรง

$TC_{warehouse}$ = ต้นทุนการขนส่งในกรณีส่งผ่านคลัง

ที่มา : Harris, F.W. (1913).

วัตถุประสงค์ที่ 2: การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } E_{total} = E_{direct} + E_{warehouse} \quad (18)$$

โดยที่

$$E_{direct} = \sum_i \sum_k \sum_v CAP_v \times a_{ikv} \times EF_v \times X_{ikv} \quad (19)$$

$$E_{warehouse} = \sum_i \sum_j \sum_v CAP_v \times b_{ijv} \times EF_v \times Y_{ijv} + \sum_j \sum_k \sum_v CAP_v \times c_{jkv} \times EF_v \times Z_{jkv} \quad (20)$$

ที่มา : Bektaş, T., & Laporte, G. (2011).

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมชาย วงศ์สวัสดิ์ และคณะ (2563) ได้ศึกษาศักยภาพการผลิต RDF จากขยะมูลฝอยชุมชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่าขยะมูลฝอยในพื้นที่มีศักยภาพในการผลิต RDF ได้ประมาณ 1.2 ล้านตันต่อปี โดยเชื้อเพลิงขยะที่ผลิตได้มีค่าความร้อนเฉลี่ย 3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งสามารถนำไปใช้ในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนและอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ได้ งานวิจัยนี้ยังพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงขยะ ได้แก่ ความชื้นของขยะ สัดส่วนของพลาสติกและกระดาษ และประสิทธิภาพของกระบวนการคัดแยก

วิภาวี ศรีสุข และคณะ (2564) ได้ศึกษาการใช้ RDF ทดแทนถ่านหินในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ RDF ทดแทนถ่านหินในสัดส่วนร้อยละ 20 สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณร้อยละ 15 และลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ประมาณร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงขยะในสัดส่วนที่สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์และเพิ่มปริมาณมลพิษทางอากาศ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงขยะและปรับปรุงระบบควบคุมมลพิษให้เหมาะสม

ประเสริฐ แสงทอง (2565) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจลงทุนในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนในประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจลงทุนมากที่สุด ได้แก่ อัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากภาครัฐ ปริมาณขยะมูลฝอยในพื้นที่ และการสนับสนุนจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น นอกจากนี้ยังพบว่าอุปสรรคสำคัญในการลงทุน ได้แก่ การต่อต้านจากชุมชนในพื้นที่ ความไม่แน่นอนของนโยบายภาครัฐ และความยากลำบากในการจัดหาที่ดินสำหรับก่อสร้างโรงไฟฟ้า

นิพนธ์ วิชัยกุล และคณะ (2565) ได้ศึกษาคูณสมบัติของ RDF ที่ผลิตจากขยะมูลฝอยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ผลการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงขยะที่ผลิตได้มีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 3,200 - 4,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ความชื้นร้อยละ 15 - 25 และปริมาณเถ้าร้อยละ 10 - 18 คุณภาพของเชื้อเพลิงขยะมีความแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของขยะ โดยขยะจากเขตพาณิชย์กรรมมีคุณภาพสูงกว่าขยะจากเขตที่พักอาศัย เนื่องจากมีสัดส่วนของพลาสติกและกระดาษสูงกว่า

อรรถพล จันทรสุวรรณ (2566) ได้ศึกษาผลกระทบของมาตรการ CBAM ต่ออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่ามาตรการ CBAM จะทำให้ต้นทุนการส่งออกปูนซีเมนต์ไปยังสหภาพยุโรปเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 8 - 12 ขึ้นอยู่กับปริมาณการปล่อยคาร์บอนของแต่ละโรงงาน งานวิจัยนี้เสนอแนะว่าผู้ประกอบการควรเร่งลดการปล่อยคาร์บอนโดยการใช้เชื้อเพลิงทดแทน เช่น RDF และชีวมวล รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิต

พิมพ์ใจ สุวรรณวงศ์ และคณะ (2566) ได้ศึกษาแนวโน้มตลาด RDF ในประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่าตลาด RDF มีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยคาดว่าจะเติบโตเฉลี่ยร้อยละ 5 - 8 ต่อปี ในช่วงปี พ.ศ. 2567 - 2572 ปัจจัยหลักที่ขับเคลื่อนการเติบโต ได้แก่ นโยบายสนับสนุนของภาครัฐ มาตรการ CBAM ของสหภาพยุโรป และความต้องการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังพบว่าปริมาณขยะมูลฝอยที่สามารถแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะได้อาจไม่เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต หากไม่มีการปรับปรุงระบบการคัดแยกขยะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ธัญพร สมใส (2567) ได้ศึกษาห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมน้ำตาลโดยการพิจารณาการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลแบบหลายรูปแบบ ทั้งทางถนน ทางราง และทางน้ำ ซึ่งแก้ปัญหาด้วยการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อหารูปแบบวิธีการขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด

ธนพร เพชรจิรพงศ์ (2568) ได้รายงานแนวโน้มตลาด RDF ในปี ค.ศ. 2025 ว่ามีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.3 ซึ่งมีมูลค่าถึง 1.8 พันล้านบาท โดยร้อยละ 64 ของ RDF จะถูกนำไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และอีกร้อยละ 36 จะถูกใช้ในการผลิตพลังงานความร้อน ความต้องการ RDF ในภาคไฟฟ้าเติบโตขึ้นประมาณร้อยละ 9.9 จากการสนับสนุนการใช้พลังงานขยะของภาครัฐ

โดยสรุปได้ว่าแนวโน้มในการใช้เชื้อเพลิง RDF ของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และการสนับสนุนของภาครัฐ ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานจริงที่แสดงในบทความที่เกี่ยวข้อง ห่วงโซ่อุปทานของโรงงานกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้การขนส่งหลายรูปแบบเพื่อลดต้นทุนการขนส่ง โดยพิจารณาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์

จากตารางที่ 6 สะท้อนให้เห็นว่า วรรณกรรมในประเทศไทยมีความพยายามที่จะเปลี่ยนผ่านจากการมองขยะให้เป็นเพียง "สิ่งปฏิกูลที่ต้องกำจัด" มาสู่การเป็น "พลังงานทดแทนที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและช่วยลดมลพิษจากการปล่อย CO₂" โดยมุ่งเน้นการตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรมหนักอย่างโรงปูน และโรงไฟฟ้าเป็นหลัก งานวิจัยในกลุ่มนี้ศึกษาเชิงพื้นที่ภายในประเทศไทยเป็นหลัก โดยมีลักษณะการเก็บข้อมูลที่น่าสนใจ คือประเภทข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่ เช่น สมชาย วงศ์สวัสดิ์ และคณะ (2563), วิภาวี ศรีสุข และคณะ (2564) และ นิพนธ์ วิชัยกุล และคณะ (2565) เลือกใช้ ข้อมูลจริงที่เป็นปฐมภูมิ ซึ่งหมายถึงการลงพื้นที่เก็บข้อมูลดิบจากหน่วยงานจริง โรงงาน หรือชุมชนโดยตรง มีเพียงบางงานในระยะหลัง เช่น อรรถพล (2566) และ พิมพ์ใจ และคณะ (2566) ที่เริ่มใช้ ข้อมูลทุติยภูมิ หรือการรวบรวมจากสถิติที่มีการบันทึกไว้แล้ว ขอบเขตพื้นที่มีการกระจายตัวศึกษาตั้งแต่ระดับภูมิภาค เช่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไปจนถึงพื้นที่ที่มีขยะสะสมหนาแน่นและเป็นแหล่งอุตสาหกรรมหลักอย่าง กรุงเทพฯ และปริมณฑล รวมถึงภาพรวมทั้งประเทศ

ตาราง 6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในประเทศไทย

Problem Characteristics			Research Focus		Objective Function Based on			Application								
					Cost	Non-Cost	Green									
Authors (year)	Data Type	Data Used	Region	RDF Production	RDF Utilization	Market Analysis	Policy Study	Production	Fuel	Investment	Potential	Quality	CO ₂ Reduction	Power Plant	Cement Industry	
		สมชาย วงศ์สวัสดิ์ และคณะ (2563)	Primary	Real	NE Thailand	✓						✓	✓		✓	✓
		วิภาวี ศรีสุข และคณะ (2564)	Primary	Real	Thailand		✓			✓		✓	✓	✓		✓
		ประเสริฐ แสงทอง (2565)	Primary	Real	Thailand			✓			✓				✓	
		นิพนธ์ วิชัยกุล และคณะ (2565)	Primary	Real	BKK & Vicinity	✓								✓		
		อรุณพล จันทร์สุวรรณ (2566)	Secondary	Real	Thailand	✓		✓								✓

Problem Characteristics		Research Focus	Objective Function Based on			Application
			Cost	Non-Cost	Green	
Authors (year)	Data Type	Data Used	Region	CO ₂ Reduction	Quality	Potential
พิมพ์ใจ สุวรรณวงศ์ และคณะ (2566)	Secondary	Real	Thailand	Investment	Fuel	Production
ธนพร เพชรจิรพงศ์ (2568)	Secondary	Real	Thailand	Policy Study	Market Analysis	RDF Utilization
				RDF Production	Cement Industry	Power Plant

พิมพ์ใจ สุวรรณวงศ์ และคณะ (2566)

ธนพร เพชรจิรพงศ์ (2568)

ตาราง 7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในต่างประเทศ

Database		Research Focus							Objective Function Based on			
Authors (year)		Scopus	ISI	RDF Production	RDF Quality	Combustion	Gasification	Production	Cost		Non-Cost	Green
									Operation	Fuel	Quality	CO ₂ Reduction
Arena (2012)		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
Sarc & Lorber (2013)		✓		✓				✓			✓	
Sarc et al. (2014)		✓		✓	✓	✓		✓			✓	
Cucchiella et al. (2014)		✓		✓	✓	✓			✓			✓
Gug et al. (2015)			✓	✓	✓	✓			✓		✓	
Lombardi et al. (2015)			✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓
Zhao et al. (2016)		✓		✓	✓					✓		✓
Kumar & Samadder (2017)			✓		✓	✓	✓		✓			✓
Malinauskaite et al. (2017)			✓			✓				✓		✓
Iacovidou et al. (2018)		✓			✓	✓					✓	
This Work				✓				✓	✓	✓		✓

ตาราง 8 สรุปวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (คำย่อ: กรณี Logistic เข้า Inbound (I) และ Logistic ขาออก Outbound (O))

Authors(year)	Problem Characteristics			Transportation Mode					Objective Function based on				
	Logistics	Data used	Product	Recycling	Road	Rail	Water	Air	Operational cost	Transport cost	GHG emission charges	Fuel cost	GHG emissions
Bortolini et al. (2016)	O	Case	Food		✓	✓		✓	✓				✓
Yadollahinia et al. (2018)	IO	Case	Tires	✓	✓				✓	✓			✓
Martins et al. (2019)	IO	Case	Food		✓				✓	✓	✓		
Rohmer et al. (2019)	IO	Case	Food		✓	✓	✓	✓	✓	✓			
Vafaei et al. (2020)	IO	Case	Online retailer		✓				✓	✓			
Yakavenka et al. (2020)	O	Case	Fruit		✓				✓				
Orjuela-Castro et al. (2021)	O	Survey	Fruit		✓					✓			
Ardliana et al. (2022)	IO	Synthetic	Product		✓	✓			✓	✓	✓		
Purnomo et al. (2022)	IO	Case	Fresh fish	✓	✓				✓	✓	✓		✓

Authors(year)	Problem Characteristics			Transportation Mode			Objective Function based on						
	Logistics	Data used	Product	Recycling	Road	Rail	Water	Air	Operational cost	Transport cost	GHG emission charges	Fuel cost	GHG emissions
Bortolini et al. (2022)	0	Case	Civil materials		✓				✓				
Kharrat et al. (2022)	0	Case	Cereal		✓					✓			
Orjuela-Castro et al. (2022)	0	Case	Agri-food		✓				✓				
Fathi et al. (2023)	10	Case	Agri-food		✓				✓				
Moreno-Camacho et al. (2023)	10	Case	Dairy		✓				✓				
Rajabzadeh et al. (2023)	1	Case	Food & Beverage		✓		✓		✓	✓	✓		
Wangsa et al. (2023)	10	Case	Fresh food		✓			✓	✓	✓			
Somsai et al. (2024)	0	Case	Sugar		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
Anwar et al. (2025)	1	Case	Fruit		✓				✓			✓	
This work	10	Case	RDF	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 8 เป็นการรวบรวมงานวิจัยทางการขนส่งหลายรูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบหาช่องว่างของงานวิจัยนี้ โดยรายละเอียดด้านข้อมูลงานวิจัยเกือบทั้งหมดนิยมใช้ข้อมูลจริงจากกรณีศึกษาต่างๆ มีเพียงบางงานเท่านั้นที่ใช้ข้อมูลแบบจำลองจำลองขึ้นมา ซึ่งสะท้อนว่าการวิจัยด้านโลจิสติกส์ จำเป็นต้องอิงกับตัวเลขและเส้นทางจริงในภาคธุรกิจจึงจะเกิดความแม่นยำ

โดยประเภทสินค้าที่งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษา นั้น จะกระจุกตัวอยู่ในกลุ่ม สินค้าเกษตรและอาหาร หรือสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ยางรถยนต์ และวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากสินค้าเหล่านี้มีข้อจำกัดเรื่องเวลา และต้นทุนการขนส่งที่สูง ซึ่งรูปแบบการขนส่งจะใช้ทางถนนเป็นหลัก เนื่องจากเป็นรูปแบบการขนส่งขั้นพื้นฐานที่เข้าถึงทุกพื้นที่ได้ง่ายที่สุด โดยทิศทางของการขนส่ง มีการจำแนกออกเป็นขาเข้า (Inbound: I) เพื่อส่งวัตถุดิบเข้าโรงงาน และขาออก (Outbound: O) เพื่อกระจายสินค้าไปสู่ผู้บริโภค

แต่ผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังคงปฏิเสธไม่ได้ว่าต้องมีเรื่องต้นทุนเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยแบ่งเป็นต้นทุนการดำเนินงาน และต้นทุนการขนส่ง ซึ่งงานวิจัยยุคหลังๆ เริ่มมีการนำปัจจัยเรื่องการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และต้นทุนด้านเชื้อเพลิงเข้ามาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อตอบโจทย์แนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว ในขณะที่งานวิจัยอื่นนั้นศึกษาเรื่องอาหาร ผลไม้ หรือสินค้าทั่วไป แต่่างานวิจัยนี้เลือกศึกษาการขนส่งของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพ ความคุ้มค่า และการจัดการที่แตกต่างจากสินค้าทั่วไปอย่างสิ้นเชิง งานวิจัยนี้ไม่ได้มองแค่การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว แต่มุ่งเน้นการบูรณาการขนส่งทางถนนร่วมกับการขนส่งทางราง เพื่อลดต้นทุนและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้น้อยที่สุด

จากตารางที่ 9 และตารางที่ 10 สังเคราะห์ช่องว่างการวิจัยจะช่วยให้เห็นความสำคัญ และคุณค่าของงานวิจัยขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งงานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่หากเป็นงานวิจัยการขนส่ง มักจะศึกษาในกลุ่มสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป สินค้าประเภทอาหารและเกษตรหรือสารอันตราย แต่งานวิจัยชิ้นนี้ มุ่งเน้นไปที่ RDF ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเฉพาะตัวสูง เนื่องจากมีซัพพลายเชนที่เชื่อมโยงระหว่างการจัดการขยะชุมชน และการแปรสภาพเพื่อส่งต่อไปยังโรงงานอุตสาหกรรม การศึกษาการขนส่งของ RDF จึงมีข้อจำกัดและเงื่อนไขที่แตกต่างจากสินค้าทั่วไป และงานวิจัยนี้แก้ปัญหาด้วยการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยมีวัตถุประสงค์การลดต้นทุน และลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคู่กัน ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับความเป็นจริงในภาคธุรกิจปัจจุบัน คืองานวิจัยต้องการทั้ง "การประหยัดค่าใช้จ่าย" และ "การเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม" ไปพร้อมๆ กัน โดยโมเดลนี้จะช่วยหาจุดสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างสองปัจจัยนี้

ตาราง 9 สันเคราะห์ช่องว่างการวิจัย (Research Gap Analysis)

Research Aspects	Existing Literature	This Research	Gap Addressed
Product Focus			
- General goods	✓		
- Food products	✓		
- Hazardous materials	✓		
- RDF/Waste-derived fuel		✓	✓
Objective Function			
- Single objective (Cost)	✓		
- Single objective (CO ₂)	✓		
- Multi-objective (Cost + CO ₂)	✓	✓	
Transportation Mode			
- Road only	✓	✓	
- Road + Rail	✓	✓	
- Road + Water	✓		
- Road + Rail + Water	✓		
Supply Chain Stage			
- Procurement	✓	✓	
- Production	✓		
- Distribution	✓	✓	
- Integrated (EOQ + Transport)	✓		
Geographic Context			
- Europe	✓		
- North America	✓		
- Asia (General)	✓		
- Thailand (RDF Industry)	✓	✓	✓
Policy Integration			
- Carbon tax	✓	✓	
- CBAM consideration		✓	✓
- Green supply chain	✓	✓	

ตาราง 10 สรุปค่า Emission Factor ของรูปแบบการขนส่งต่าง ๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Transportation Mode	Emission Factor (kgCO ₂ e/tonne-km)	Source
Road Transport		
Light truck (< 7.5 tonne)	0.1500 - 0.2000	Thai National LCI Database (2020)
Medium truck (7.5 - 16 tonne)	0.0600 - 0.0800	Thai National LCI Database (2020)
Heavy truck (> 16 tonne)	0.0400 - 0.0600	Thai National LCI Database (2020)
Articulated truck	0.0450 - 0.0550	US EPA (2021)
CNG truck	0.0500 - 0.0550	McKinnon (2015)
Rail Transport		
Freight train (Diesel)	0.0350 - 0.0450	IPCC (2014)
Freight train (Electric)	0.0200 - 0.0300	EEA (2020)
Water Transport		
Inland waterway	0.0300 - 0.0500	IFEU (2018)
Coastal shipping	0.0150 - 0.0250	IMO (2020)

บทที่ 3

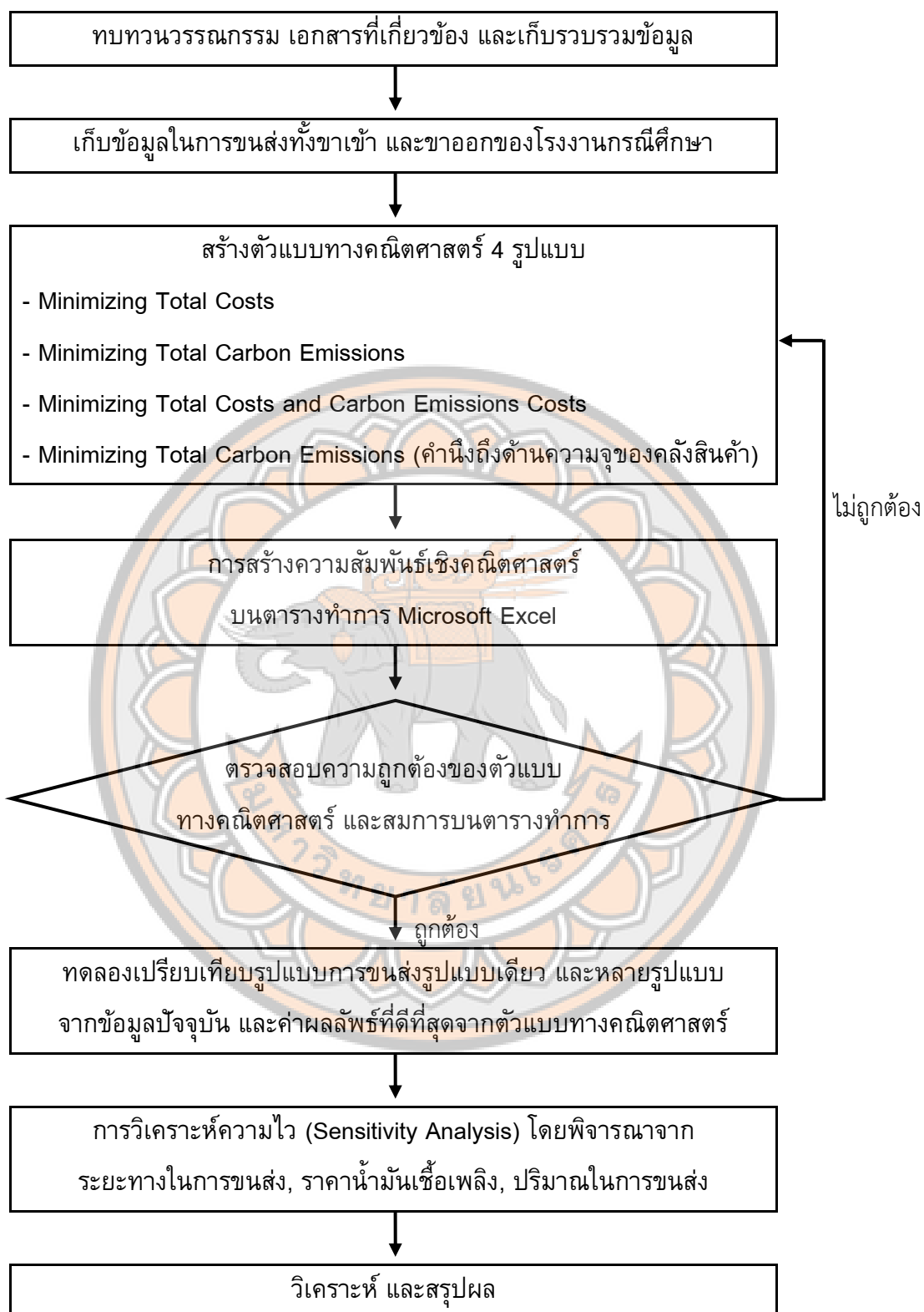
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย และขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัย เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการหารูปแบบการขนส่ง และเส้นทางการขนส่งวัตถุดิบเพื่อนำมาผลิตเป็น RDF ที่ทำให้ต้นทุนรวมของโซ่อุปทานต่ำที่สุด โดยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโซ่อุปทานต่ำที่สุด

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อหารูปแบบ และเส้นทางการขนส่งวัตถุดิบที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดสำหรับห่วงโซ่อุปทาน RDF โดยเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการลงพื้นที่โรงงานกรณีศึกษาเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตเป็น RDF สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาทดลองกับการขนส่งในแบบปัจจุบัน และอนาคต ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ หากไม่ถูกต้องให้ทำการปรับปรุงแก้ไขตัวแบบจำลอง เมื่อตัวแบบทางคณิตศาสตร์ให้ผลของคำตอบที่ไม่ละเอียดถี่ถ้วนแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ต้นทุนรวม และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของการทดลองการขนส่งรูปแบบเดียว และทางเลือกในการขนส่งหลายรูปแบบของโรงงานกรณีศึกษาทั้งในปัจจุบัน และสำหรับรองรับความต้องการในอนาคต หลังจากนั้นจึงทำการสรุปผล ดังภาพที่ 18

3.1 ทบทวนวรรณกรรม เอกสารที่เกี่ยวข้อง และเก็บรวบรวมข้อมูล

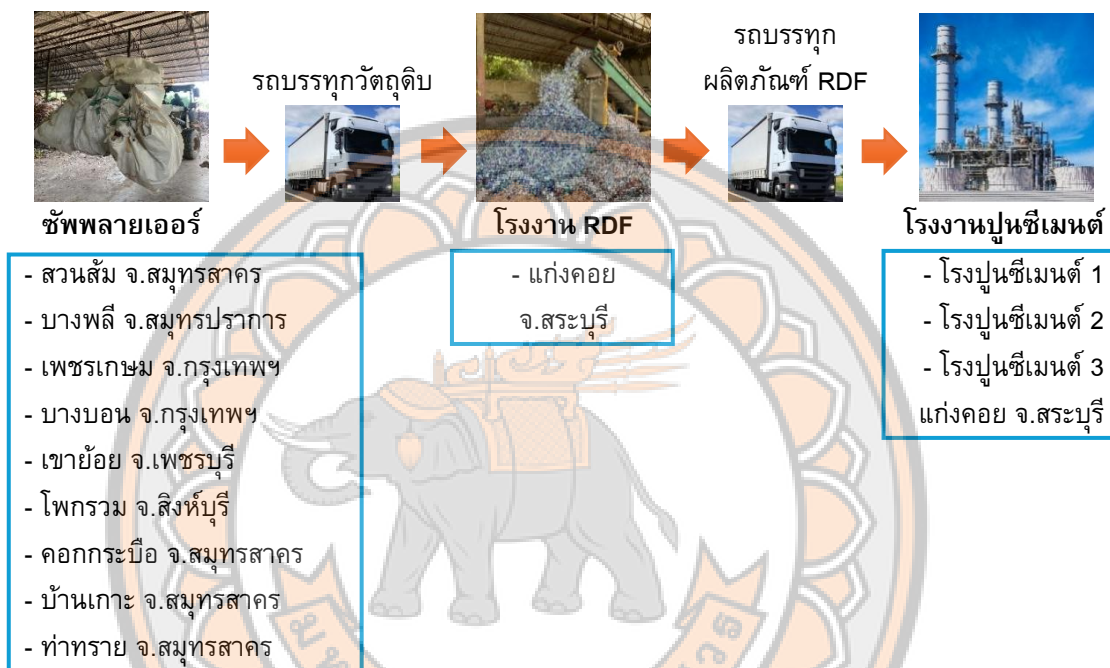
ขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาการจัดการห่วงโซ่อุปทาน การจัดการโลจิสติกส์ ประเภทและรูปแบบการขนส่ง ห่วงโซ่อุปทานในอุตสาหกรรม RDF และผลกระทบของมาตรการ CBAM ต่ออุตสาหกรรม ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ที่ใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 2 - 10 จากฐานข้อมูลวารสารวิชาการที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติ และทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อนำไปเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในบทที่ 2



ภาพ 18 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เก็บข้อมูลในการขนส่งทั้งขาเข้า และขาออกของโรงงานกรณีศึกษา

จากการศึกษาขั้นตอนในการดำเนินงานในด้านการขนส่ง RDF ทั้งขาเข้าและขาออกของโรงงานกรณีศึกษา พบว่าทางโรงงานกรณีศึกษามีการนำเข้าวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตเป็น RDF จากซัพพลายเออร์ หลายแห่งภายในประเทศ และเป็นการขนส่งโดยตรงจากซัพพลายเออร์ มายังโรงงานกรณีศึกษา

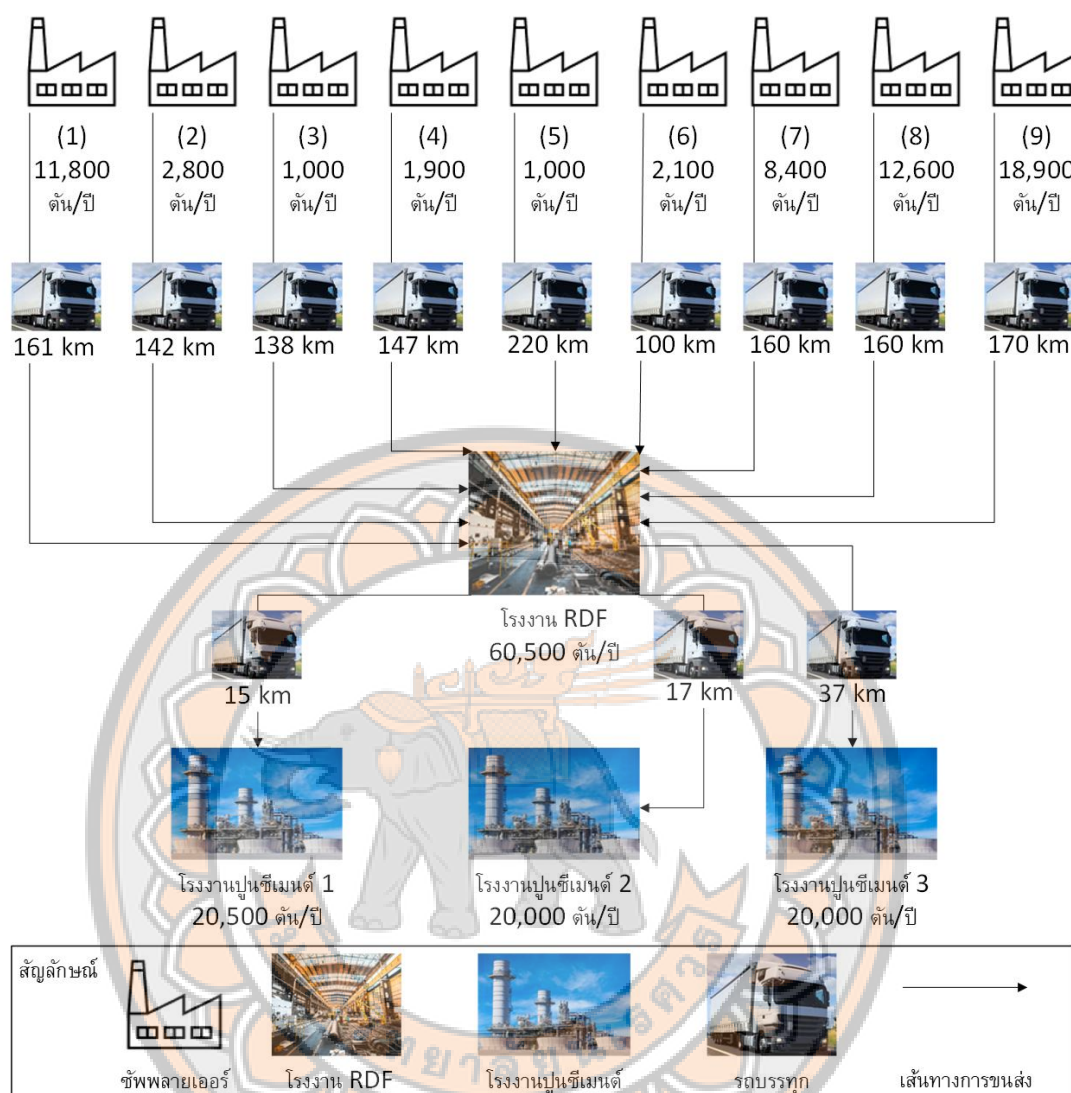


ภาพ 19 การไหลของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF

ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

จากภาพที่ 19 การไหลของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF โดยวัตถุดิบจะไหลจากระดับซัพพลายเออร์ ไปยังระดับโรงงาน RDF และผลิตภัณฑ์ RDF จะไหลจากระดับโรงงาน RDF ไปยังระดับโรงงานปูนซีเมนต์ ซึ่งมีการขนส่งโดยใช้รถบรรทุก

การขนส่งวัตถุดิบเพื่อนำมาผลิตเป็น RDF ในปัจจุบันนั้น ใช้รถบรรทุกเป็นพาหนะหลัก ซึ่งยังไม่มีรถไฟเข้ามาช่วยในการขนส่ง สำหรับภาพที่ 20 แสดงโครงข่ายการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา และยานพาหนะที่ถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบการขนส่ง ได้แก่ รูปแบบการขนส่งทางถนนโดยรถบรรทุก และรูปแบบการขนส่งทางถนนและทางรางร่วมกัน โดยคุณลักษณะของยานพาหนะของแต่ละรูปแบบการขนส่ง แสดงดังตารางที่ 11 และอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่นำมาคำนวณผลลัพธ์ในแต่ละโมเดลนั้น ใช้ค่ากลางของช่วงตัวเลขจากในตาราง



ภาพ 20 โครงข่ายการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบันของโรงงาน
กรณีศึกษา

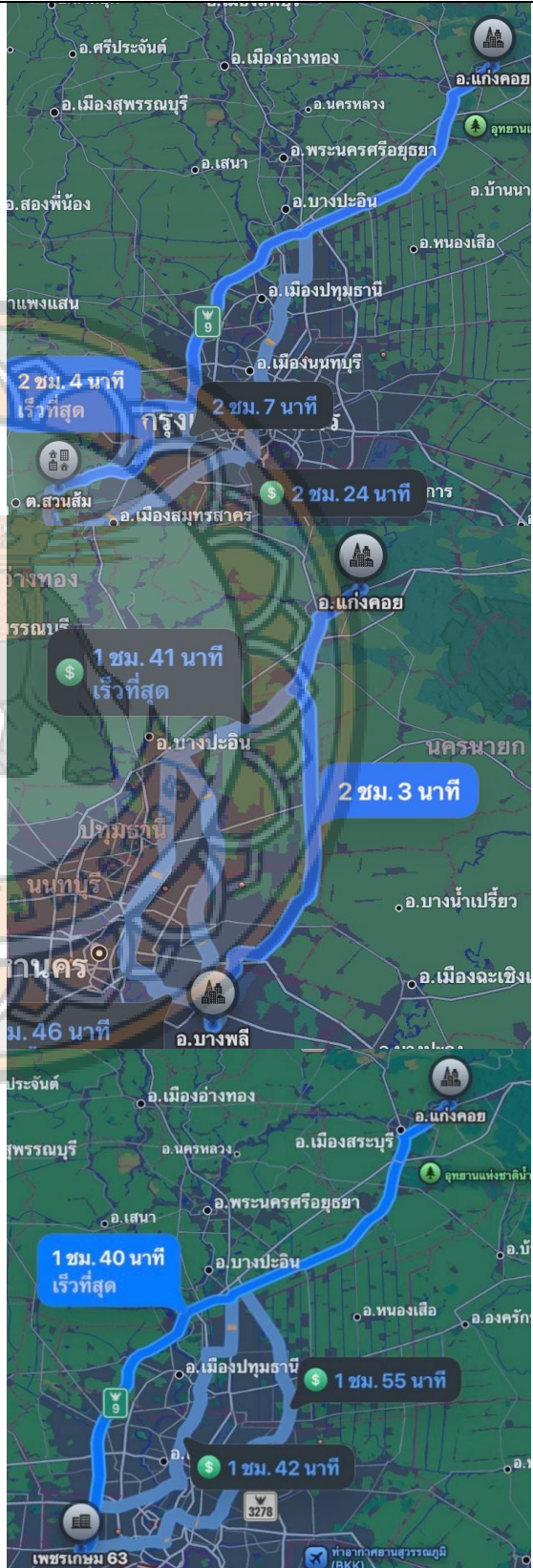
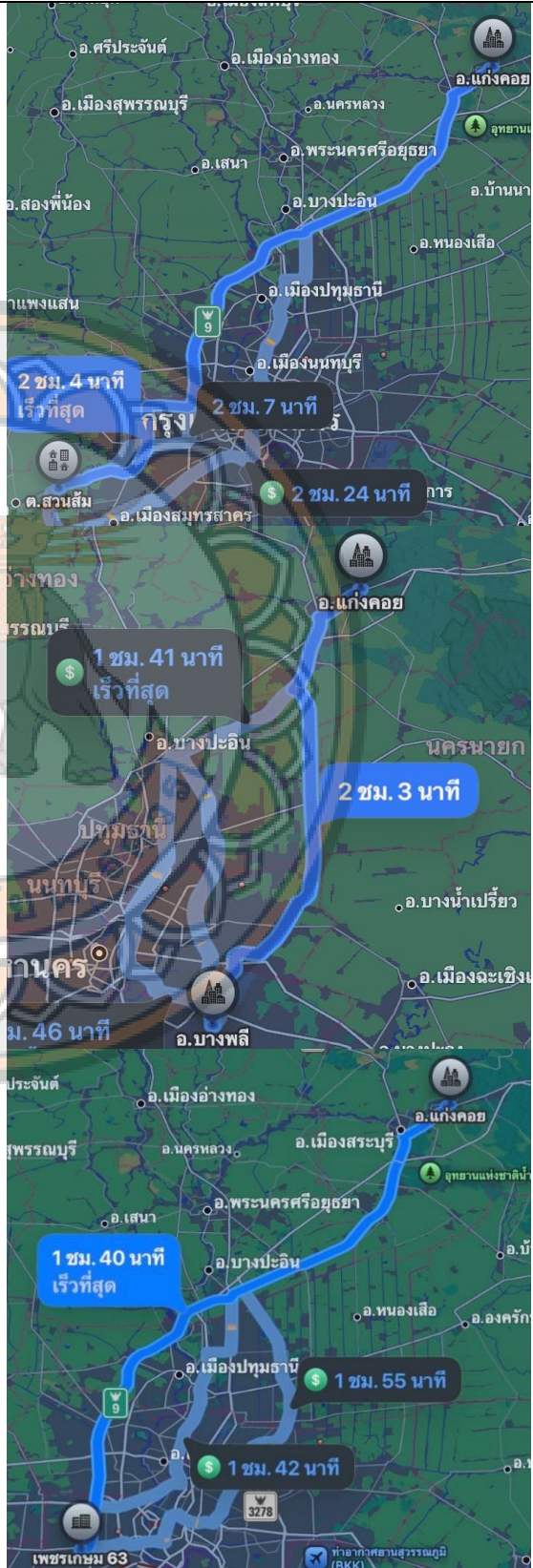
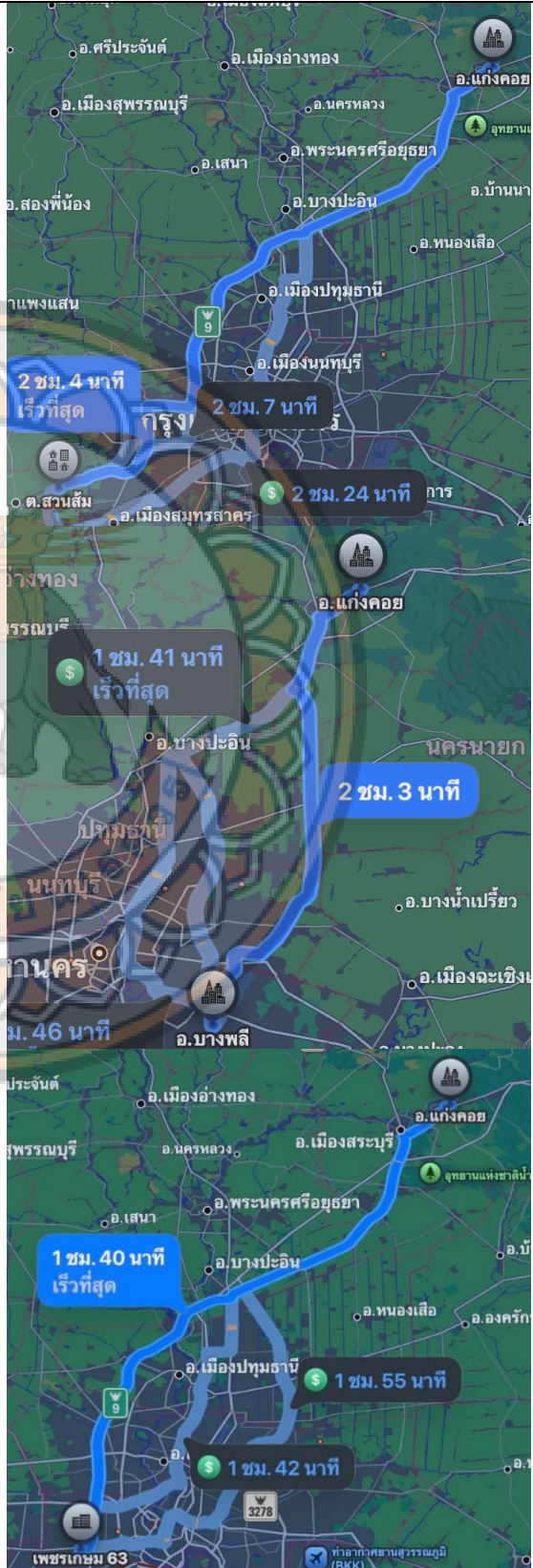
ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

จากตารางที่ 11 แสดงถึงค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ได้มาจากฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ (Thai National Life Cycle Inventory Database) จัดทำโดยสถาบันเทคโนโลยีและสารสนเทศเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (TIIS, สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2569) และสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency [US EPA], 2025, สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2569)

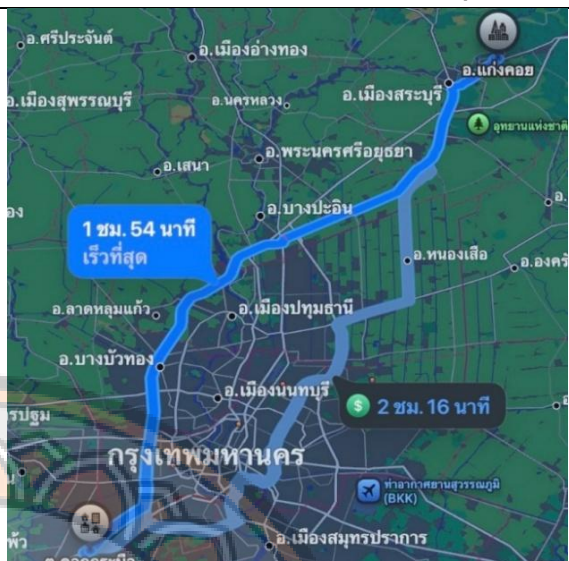
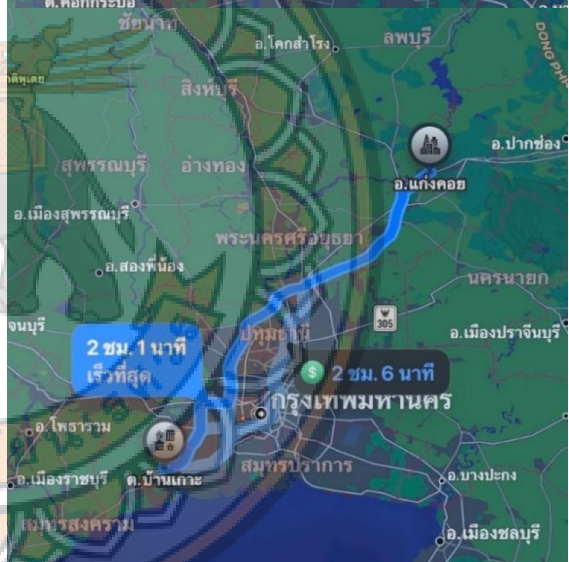
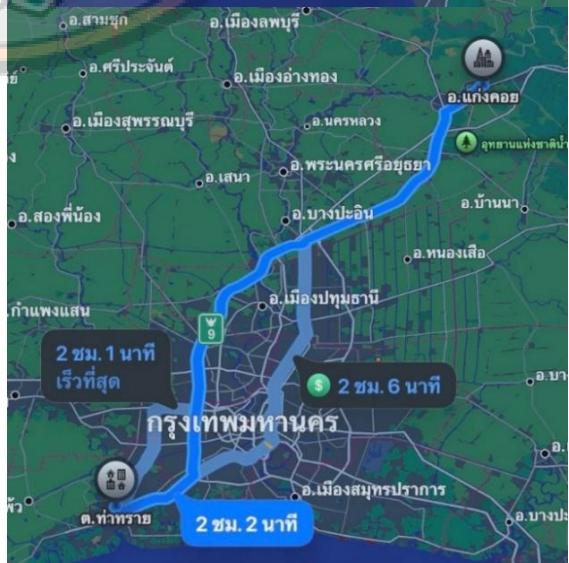
ตาราง 11 คุณสมบัติของยานพาหนะที่พิจารณา

No.	ประเภทยานพาหนะที่ใช้พิจารณา	Fuel	น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (km/l)	Emission Factor (kgCO ₂ e/tonne·km)
1.	รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ	Diesel	5	4.0 – 6.0	0.15190
2.	รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ	Diesel	8	5.0 – 7.0	0.07140
3.	รถกระบะบรรทุก 6 ล้อ	Diesel	11	4.0 – 6.0	0.06740
4.	รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ	Diesel	16	4.0 – 4.8	0.05860
5.	รถกระบะบรรทุกกึ่งพ่วง 18 ล้อ	Diesel	32	2.5 – 3.2	0.04885
6.	รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ	Diesel	32	3.2 – 3.0	0.04595
7.	รถกระบะบรรทุกพ่วง 22 ล้อ	Diesel	32	2.2 – 2.8	0.04995
8.	รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ (CNG)	CNG	32	0.6 – 0.8 (km/kg)	0.05130
9.	รถไฟฟ้า	-	782	-	0.03700

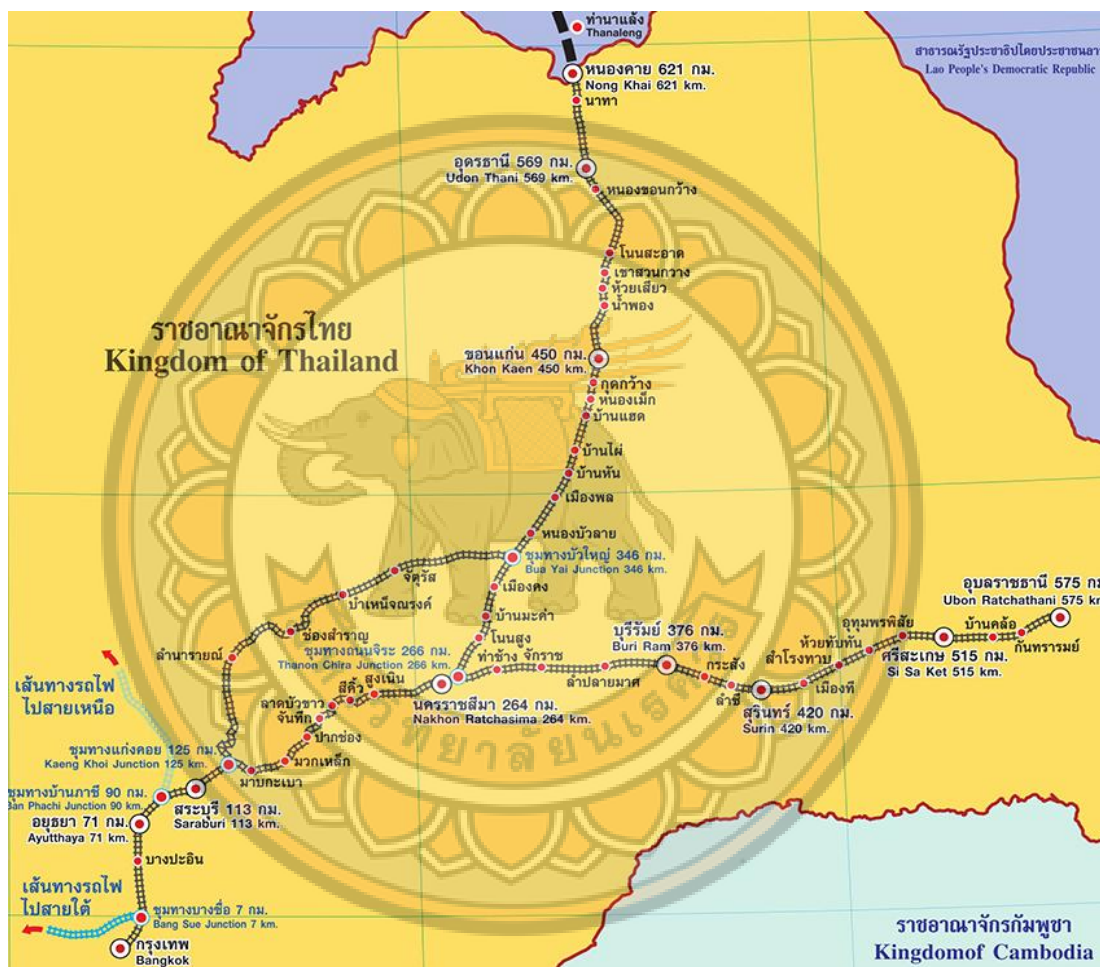
ตาราง 12 เส้นทางขนส่งวัตถุดิบจากฉัพลายเออร์ไปยังโรงงานกรณีศึกษา

ฉัพลายเออร์	ระยะทาง (km.)	เส้นทางขนส่งโดยรถบรรทุก
$i = 1$ สวนส้ม จ.สมุทรสาคร (ฟอยล์ 1) 11,800 ตัน/ปี	161	
$i = 2$ บางพลี จ.สมุทรปราการ (ฟอยล์ 2) 2,800 ตัน/ปี	142	
$i = 3$ เพชรเกษม จ.กรุงเทพฯ (ฟอยล์ 3) 1,000 ตัน/ปี	138	

ซัพพลายเออร์	ระยะทาง (km.)	เส้นทางการขนส่งโดยรถบรรทุก
$i = 4$ บางบอน จ.กรุงเทพฯ (ฟอยล์ 4) 1,900 ตัน/ปี	147	
$i = 5$ เขาย้อย จ.เพชรบุรี (ฟอยล์ 5) 1,000 ตัน/ปี	220	
$i = 6$ โพนกรวม จ.สิงห์บุรี (กระดาษ 1) 2,100 ตัน/ปี	100	

ซัพพลายเออร์	ระยะทาง (km.)	เส้นทางการขนส่งโดยรถบรรทุก
$i = 7$ คอกกระบือ จ.สมุทรสาคร (กระดาด 2) 8,400 ตัน/ปี	160	
$i = 8$ บ้านเกาะ จ.สมุทรสาคร (กระดาด 3) 12,600 ตัน/ปี	160	
$i = 9$ ท่าทราย จ.สมุทรสาคร (กระดาด 4) 18,900 ตัน/ปี	170	

นั้นใช้วิธีการขนส่งแบบทางเดียว คือการขนส่งทางถนน ด้วยรถบรรทุกเท่านั้น และจากตารางที่ 13 ระยะทางการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานการศึกษาไปยังลูกค้าแต่ละรายในปัจจุบัน มีลูกค้าทั้งหมด 3 แห่ง ในจังหวัดเดียวกัน เพื่อตอบสนองต่อการเติบโตของตลาด RDF ในอนาคต งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงการขนส่งด้วยระบบรางเข้ามาร่วมพิจารณา หากในอนาคตมีการขยายฐานลูกค้าออกไปยังจังหวัดต่างๆ อีกด้วย

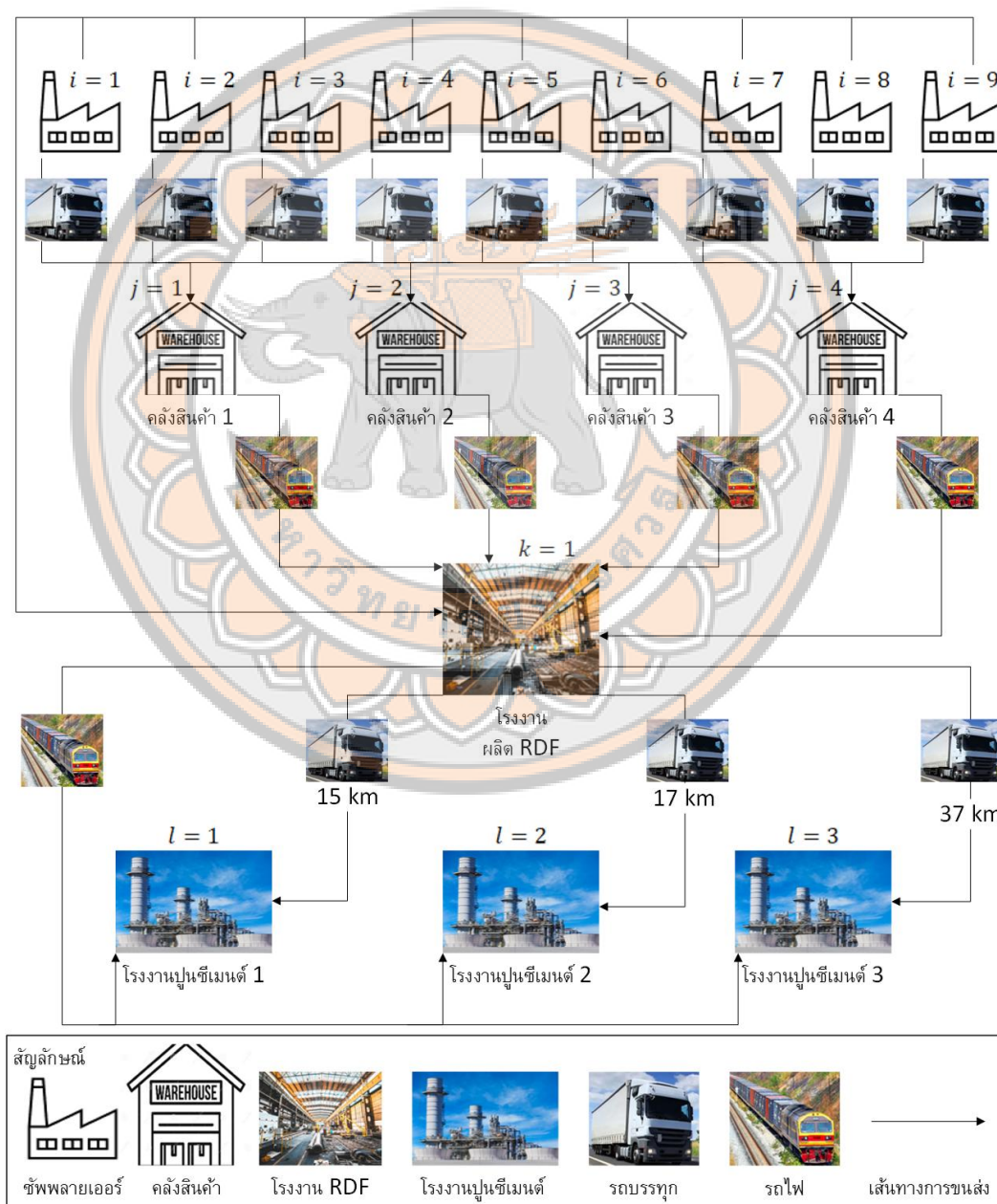


ภาพ 21 แผนที่เส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ

ที่มา : การรถไฟแห่งประเทศไทย (2563)

จากภาพที่ 21 แสดงถึงเส้นทางเดินรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีความคาบเกี่ยวกับเส้นทางการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต RDF ของโรงงานศึกษานี้ในปัจจุบัน

โดยโรงงานกรณีศึกษา ได้มีแผนการดำเนินการขยายโรงงาน และไลน์การผลิต RDF เพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งอาจเกิดปัญหาวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต RDF มีการขาดตลาด และไม่เพียงพอต่อความต้องการของโรงงาน เนื่องด้วยโควตาที่ได้จาก ชัฟฟลายเออร์ แต่ละแหล่งนั้นมีจำนวนจำกัด ซึ่งการนำเอาวิธีขนส่งโดยระบบรางเข้ามาร่วมพิจารณานี้ ทำให้โรงงานได้ ชัฟฟลายเออร์ หลากหลายขึ้น จากแหล่งวัตถุดิบอื่นๆที่ห่างออกไปตามแนวเส้นทางการเดินรถไฟ ดังภาพที่ 24 เพื่อตอบสนองต่อความต้องการวัตถุดิบของโรงงานกรณีศึกษา และความต้องการ RDF ของกลุ่มลูกค้าใหม่ในท้องตลาดที่อยู่ห่างไกลออกไปจากเดิม



ภาพ 25 การไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF ของการขนส่งแบบหลายรูปแบบ

ดังในภาพที่ 25 แสดงให้เห็นถึงการไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF โดยมีการขนส่งมากกว่ารูปแบบเดียว ซึ่งเริ่มจาก ชัฟฟลายเออร์ ขนส่งวัตถุดิบมายังคลังสินค้า ด้วยรถบรรทุก จากนั้นวัตถุดิบจึงถูกขนส่งต่อไปยังโรงงานด้วยรถไฟ และผลิตภัณฑ์ RDF ที่ออกจากโรงงาน RDF ถูกขนส่งไปยังลูกค้าด้วยรถบรรทุก

จากตารางที่ 14 แสดงระยะทางจากชัฟฟลายเออร์ไปยังคลังสินค้าที่ผู้วิจัยได้เลือกพิจารณาทั้ง 4 แห่งนี้ เนื่องจากแต่ละแห่ง เป็นสถานีดั้งเดิมในการขนส่งโดยระบบราง และการสำรวจแหล่งชัฟฟลายเออร์ ณ ปัจจุบัน มีความสอดคล้องกับเส้นทางการขนส่งเหล่านี้อีกด้วย และตารางที่ 15 ได้แสดงระยะทางจากแต่ละคลังสินค้าไปยังโรงงาน RDF เพื่อใช้ในการขนส่งวัตถุดิบด้วยระบบราง ผ่านตู้คอนเทนเนอร์

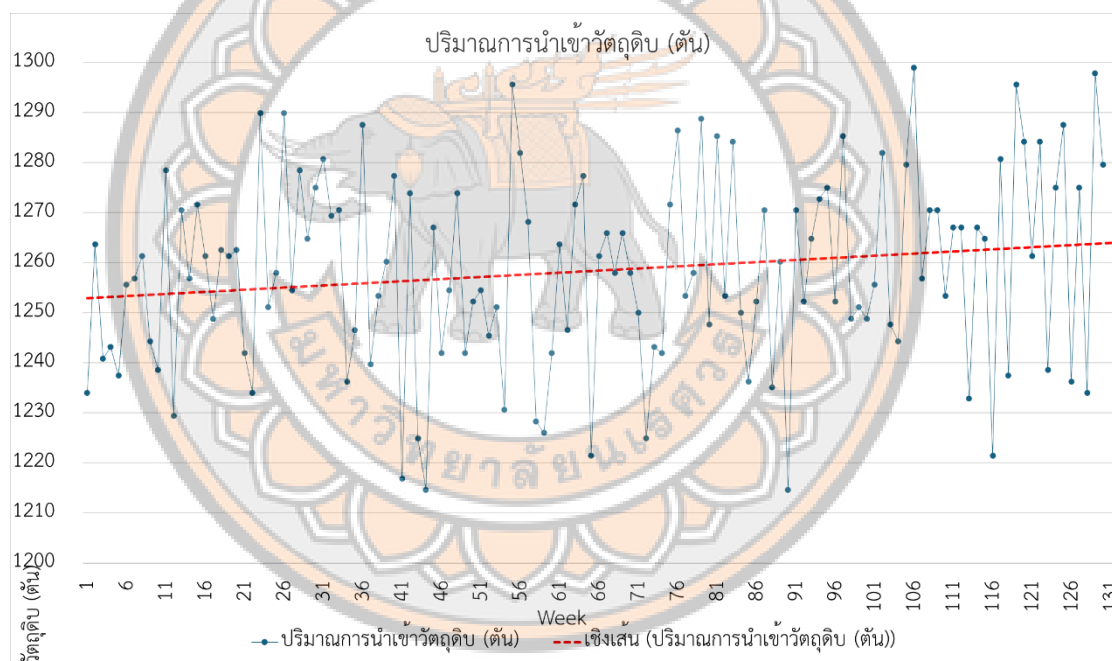
ตาราง 14 ระยะทางจากชัฟฟลายเออร์ไปยังคลังสินค้า

	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
ชัฟฟลายเออร์ \ คลังสินค้า (กิโลเมตร)	ท่าหลุยส์	วัดจรัญ	ICD ลาดกระบัง	บ้านป่าหยา
$i = 1$ สวนส้ม จ.สมุทรสาคร	57	29	75	170
$i = 2$ บางพลี จ.สมุทรปราการ	113	75	26	163
$i = 3$ เพชรเกษม จ.กรุงเทพฯ	59	26	71	148
$i = 4$ บางบอน จ.กรุงเทพฯ	76	38	51	146
$i = 5$ เขาย้อย จ.เพชรบุรี	77	103	141	238
$i = 6$ โพนกรวม จ.สิงห์บุรี	198	165	158	38
$i = 7$ คอกกระบือ จ.สมุทรสาคร	72	43	65	157
$i = 8$ บ้านเกาะ จ.สมุทรสาคร	67	38	76	170
$i = 9$ ท่าทราย จ.สมุทรสาคร	70	41	75	172

ตาราง 15 ระยะทางจากคลังสินค้าไปยังโรงงาน RDF

คลังสินค้า \ โรงงาน RDF (กิโลเมตร)	$k = 1$ โรงงาน RDF
$j = 1$ ย่านพหลโยธิน	120
$j = 2$ วัดจิวราย	150
$j = 3$ ICD ลาดกระบัง	130
$j = 4$ บ้านป่าหวาย	50

ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบเข้าเพื่อนำมาใช้ผลิต RDF ของโรงงานการศึกษาในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2566 - มิถุนายน 2568 ทั้งสิ้น 30 เดือน หรือ 130 สัปดาห์ ดังภาพที่ 26 ข้อมูลปริมาณการขนส่งวัตถุดิบเข้า



ภาพ 26 ข้อมูลปริมาณการขนส่งวัตถุดิบเข้า

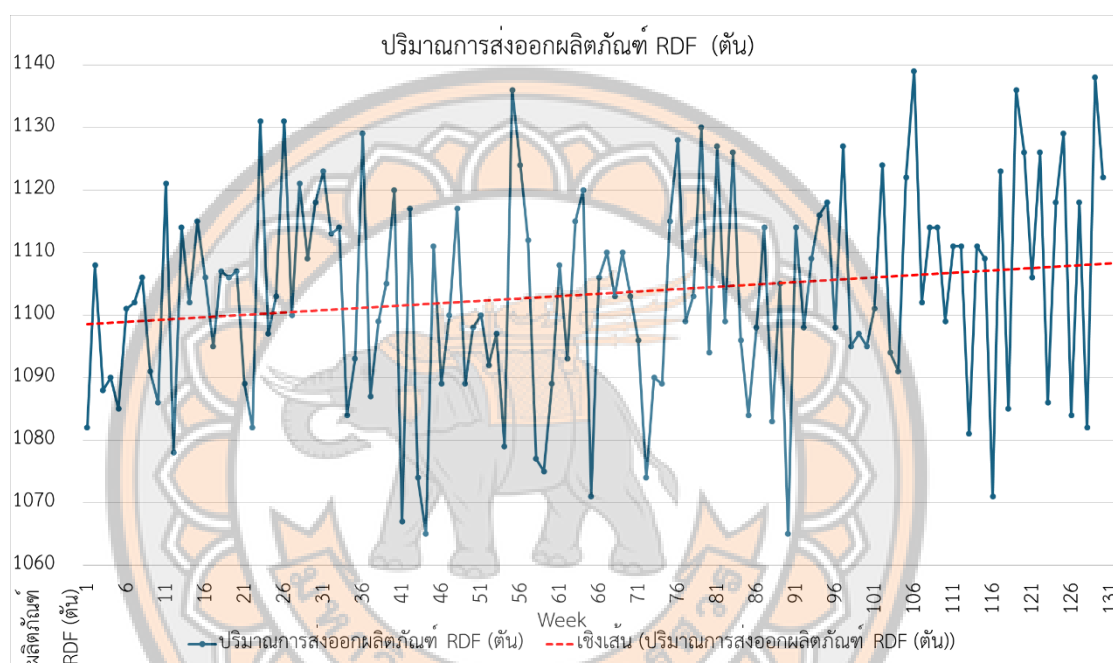
ที่มา: โรงงานการศึกษา

จากการแสดงข้อมูลปริมาณการนำเข้าวัตถุดิบรายสัปดาห์ ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึง 130 โดยมีรายละเอียดที่น่าสนใจดังนี้

ภาพรวมและแนวโน้ม (Trend Analysis) มีทิศทางเป็นบวก ซึ่งเส้นประสีแดง (Linear Trendline) แสดงให้เห็นว่าในภาพรวม 130 สัปดาห์ ปริมาณการนำเข้าวัตถุดิบมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ (Slight Upward Trend) โดยช่วงค่าของข้อมูลส่วนใหญ่แกว่งตัวอยู่ในช่วง

ประมาณ 1,220 ถึง 1,290 ตัน และมีความผันผวนของข้อมูล (Fluctuation & Volatility) ที่มีความแปรปรวนสูง (High Variance) ซึ่งกราฟมีลักษณะเป็นฟันปลาที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าปริมาณการนำเข้าในแต่ละสัปดาห์นั้นมีความผันผวนสูงมาก และไม่ได้คงที่เนื่องจากโควตาที่ได้จากซัพพลายเออร์ นั้นมีจำกัด

จึงส่งผลต่อปริมาณการขนส่งขาออกของผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานไปยังลูกค้า ดังภาพที่ 27 ข้อมูลปริมาณการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ขาออก



ภาพ 27 ข้อมูลปริมาณการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ขาออก

ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

ทิศทางการเติบโตเส้นประสีแดง (Linear Trendline) ซึ่งให้เห็นว่าภาพรวมของการส่งออกมีทิศทางที่เพิ่มขึ้น (Upward Trend) อย่างชัดเจนว่าการนำเข้าก่อนหน้านี้ ซึ่งจุดเริ่มต้นและปลายทาง มีแนวโน้มเริ่มต้นที่ประมาณ 1,100 ตัน ในสัปดาห์ที่ 1 และค่อยๆ ขยับขึ้นไปแตะระดับเกือบ 1,110 ตัน ในช่วงสัปดาห์ที่ 130 โดยความผันผวนและการแกว่งตัวของปริมาณการส่งออกส่วนใหญ่เคลื่อนไหวอยู่ในช่วง 1,065 ถึง 1,140 ตัน และความผันผวนรายสัปดาห์จากภาพมีลักษณะฟันปลาที่ถี่และเล็ก แสดงถึงความไม่แน่นอนของคำสั่งซื้อหรือรอบการส่งออกในแต่ละสัปดาห์ที่ค่อนข้างสูง จุดที่น่าสังเกตแม้แนวโน้มจะเพิ่มขึ้น แต่ความผันผวนไม่ได้ลดลงเลย แสดงถึงปัจจัยภายนอกที่กระทบการส่งออกยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง

3.3 สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบ

ทำการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการหารูปแบบของการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF ของโรงงานกรณีศึกษา โดยเป็นรูปแบบที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับ การขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF สำหรับองค์ประกอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ มีดังต่อไปนี้

- 1) ดัชนี (Indices)
- 2) พารามิเตอร์ (Parameters)
- 3) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)
- 4) ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)
- 5) เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

โดยที่ Model I : Minimizing Total Costs เป็นการลดต้นทุนรวมจากการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF ของห่วงโซ่อุปทานให้มีค่าที่ต่ำที่สุด

Model II : Minimizing Total Carbon Emissions เป็นการลดปริมาณการปล่อย CO₂ จากการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF

Model III : Minimizing Total Costs and Carbon Emissions Costs เป็นการลดต้นทุนและค่าการปล่อย CO₂ รวม ให้มีค่าต่ำที่สุด

Model IV : Minimizing Total Carbon Emissions ซึ่งมีพื้นฐานเหมือนกันกับ Model II แต่เพิ่มเงื่อนไขด้านความจุของคลังสินค้า เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น

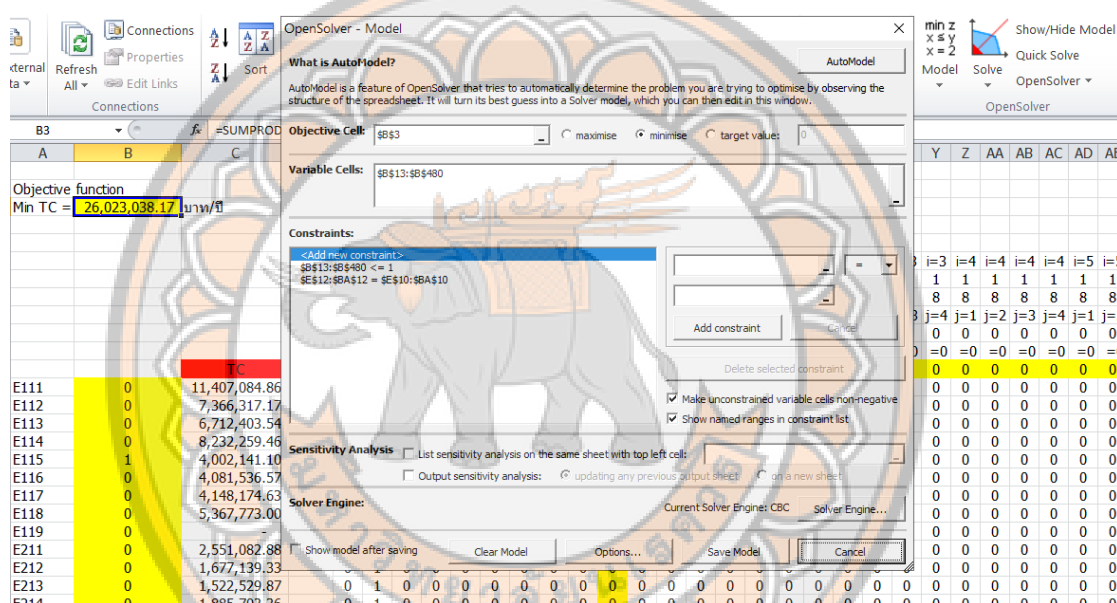
3.4 การสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์บนตารางทำการ Microsoft Excel

สร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายลักษณะของปัญหาและเงื่อนไขของปัญหา หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์บนตารางทำการ Microsoft Excel โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) ส่วนนำเข้าข้อมูล (Input Section) ประกอบด้วย สมการเป้าหมายและตัวแปรตัดสินใจ เงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ พร้อมการกำหนดค่าบนตาราง OpenSolver
- 2) ส่วนการคำนวณ (Calculation Section) ประกอบด้วย การคำนวณต้นทุนรวม และการคำนวณปริมาณ CO₂

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คอมพิวเตอร์สำหรับสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ คำนวณด้วย OpenSolver บนโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหารูปแบบการการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด จำนวน 1 เครื่อง โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core i5
- 2) หน่วยความจำหลัก (RAM) 8 GB
- 3) หน่วยความจำสำรอง (Hard Disk/SSD) 250 GB
- 4) ระบบปฏิบัติการ (OS) Microsoft Windows 10 Pro 64-bit Operating System



ภาพ 28 OpenSolver บนโปรแกรม Microsoft Excel

3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และแบบจำลองบนตารางทำการ

หลังจากสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงทำการตรวจสอบสมการ โดยการแทนค่าสัมประสิทธิ์กับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อเช็คความถูกต้องของสมการ จากนั้นทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วย OpenSolver

3.6 ทดลองเปรียบเทียบรูปแบบการขนส่งรูปแบบเดียว และหลายรูปแบบ จากข้อมูลปัจจุบัน และค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ผู้วิจัยทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ของรูปแบบการขนส่งทั้ง 2 รูปแบบ โดยพิจารณาจาก 3 วัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

- วัตถุประสงค์ที่ 1: รูปแบบเส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง
 วัตถุประสงค์ที่ 2: ต้นทุนรวมของห่วงโซ่อุปทานที่ต่ำที่สุด
 วัตถุประสงค์ที่ 3: การลดปริมาณการปล่อย CO₂

3.7 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไวเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวแบบมีการเปลี่ยนแปลง ผลลัพธ์ของตัวแบบจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ซึ่งช่วยให้ผู้ตัดสินใจเข้าใจความเสี่ยงและสามารถเตรียมแผนรองรับได้อย่างเหมาะสม (Saltelli et al., 2008; Pannell, 1997)

3.7.1 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ความไว

ผู้วิจัยเลือกพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอนสูงและมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของตัวแบบเพื่อทำการวิเคราะห์ความไว ดังต่อไปนี้

- 1) การเปลี่ยนแปลงของระยะทางในการขนส่งวัตถุดิบ
- 2) การเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน
- 3) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความต้องการวัตถุดิบ

3.7.2 การนำเสนอผลการวิเคราะห์ความไว

ผลการวิเคราะห์ความไวจะนำเสนอในรูปแบบกราฟเส้น (Line Chart) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ (แกนนอน) กับการเปลี่ยนแปลงของค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (แกนตั้ง) สำหรับพารามิเตอร์แต่ละตัว การวิเคราะห์จุดเปลี่ยน (Break-even Analysis) เพื่อระบุค่าของพารามิเตอร์ที่ทำให้รูปแบบการขนส่งที่เหมาะสมที่สุดเปลี่ยนแปลง โดยคำนวณจากสมการ

$$Z_{1,Road-Rail}(P^*) = Z_{1,RoadOnly}(P^*) \quad (21)$$

เมื่อ P^* = ค่าพารามิเตอร์ ณ จุดเปลี่ยน (Break-even Point) ที่ทำให้ต้นทุนรวมของการขนส่งแบบผสมผสาน (Road-Rail) เท่ากับการขนส่งทางถนนอย่างเดียว (Road Only)

ที่มา : Saltelli, A. et al. (2008).

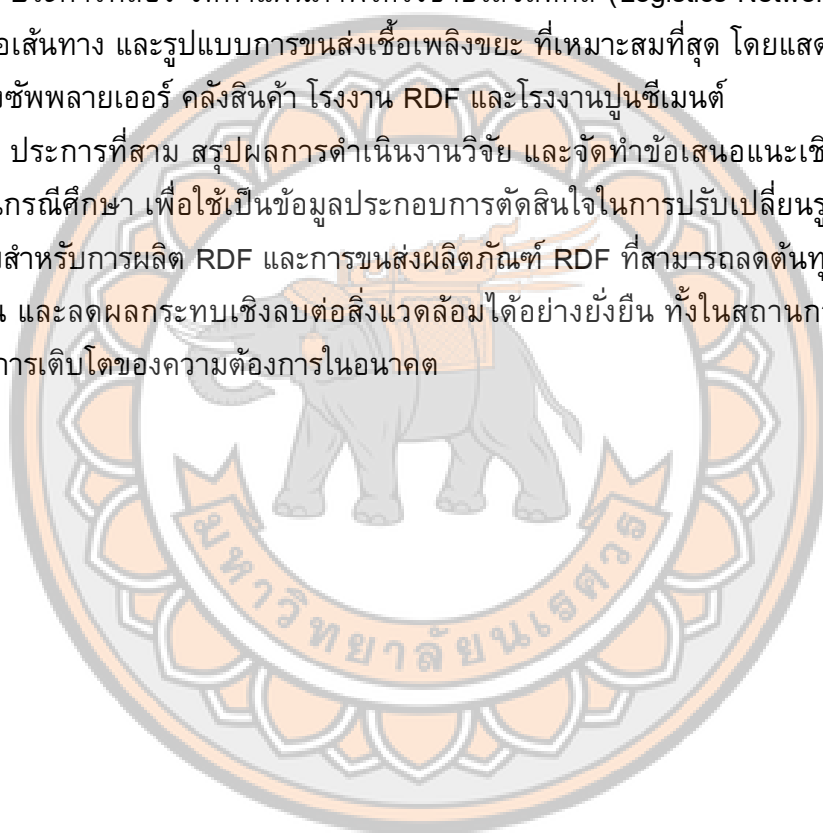
3.8 วิเคราะห์ และสรุปผล

เมื่อได้ผลลัพธ์จากการทดลองรูปแบบการขนส่งทั้งในสถานการณ์ปัจจุบัน และค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์แล้ว ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ และสรุปผล ดังนี้

ประการแรก วิเคราะห์ผลที่ได้จากข้อมูลปัจจุบัน และค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ผลการวิเคราะห์ความไวเปรียบเทียบรูปแบบการขนส่งทั้ง 2 รูปแบบ ในด้านต้นทุนรวมของห่วงโซ่อุปทาน และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อระบุรูปแบบการขนส่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงานกรณีศึกษา ทั้งในสถานการณ์ปัจจุบัน และในอนาคต

ประการที่สอง จัดทำแผนภาพโครงข่ายโลจิสติกส์ (Logistics Network Diagram) เพื่อนำเสนอเส้นทาง และรูปแบบการขนส่งเชื้อเพลิงขยะ ที่เหมาะสมที่สุด โดยแสดงความเชื่อมโยงระหว่างซัพพลายเออร์ คลังสินค้า โรงงาน RDF และโรงงานปูนซีเมนต์

ประการที่สาม สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำข้อเสนอแนะเชิงกลยุทธ์สำหรับโรงงานกรณีศึกษา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งวัตถุดิบสำหรับการผลิต RDF และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ที่สามารถลดต้นทุนรวมของห่วงโซ่อุปทาน และลดผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน ทั้งในสถานการณ์ปัจจุบันและรองรับการเติบโตของความต้องการในอนาคต



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้เป็นการนำเสนอ ผลการศึกษากระบวนการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ช่วยในการตัดสินใจระดับกลยุทธ์ในการกำหนดรูปแบบและเส้นทางในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ที่ทำให้ต้นทุนรวมของห่วงโซ่อุปทานต่ำที่สุด โดยมีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห่วงโซ่อุปทานต่ำที่สุด ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ การอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์ความไว

4.1 ภาพรวม ประเด็นพิจารณา และข้อตกลงเบื้องต้น ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การศึกษานี้พิจารณาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

Model I : Minimizing Total Costs เป็นการลดต้นทุนรวมของห่วงโซ่อุปทานให้มีค่าที่ต่ำที่สุด จากการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF โดยคำนวณจากค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าขนถ่ายวัตถุดิบขึ้นยานพาหนะ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ ค่าเช่ายานพาหนะ ค่าแรงคนขับ ค่าใช้คลังสินค้า อัตราค่าระวางของรถไฟ อัตราค่าเชื้อเพลิงของรถไฟ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ และค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ

Model II : Minimizing Total Carbon Emissions เน้นการลดปริมาณการปล่อย CO₂ จากการขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF โดยคำนวณจากระยะทาง ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษของยานพาหนะแต่ละประเภท ปริมาณวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF

Model III : Minimizing Total Costs and Carbon Emissions Costs โดยที่โมเดลนี้ได้มุ่งเน้นทั้งการลดต้นทุนและการปล่อย CO₂ รวม โดยคำนวณจากค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าขนถ่ายวัตถุดิบขึ้นยานพาหนะ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ ค่าเช่ายานพาหนะ ค่าแรงคนขับ ค่าใช้คลังสินค้า อัตราค่าระวางของรถไฟ อัตราค่าเชื้อเพลิงของรถไฟ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ และต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Model IV : Minimizing Total Carbon Emissions ซึ่งมีพื้นฐานเหมือนกันกับ Model II แต่เพิ่มเงื่อนไขด้านความจุของคลังสินค้าทั้ง 4 แห่ง เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 โมเดล โดยผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาทั้ง 3 เป้าหมายพร้อมกันแล้ว เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้นั้นไม่ต่างจาก Model III ผู้วิจัยจึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ ณ ที่นี้

ตาราง 16 ประเด็นที่นำมาพิจารณาในตัวแทนทางคณิตศาสตร์ของแต่ละโมเดล

Model	สมการเป้าหมาย ต้นทุน การขนส่ง ต่ำที่สุด	สมการเป้าหมาย การ ปล่อย CO ₂ ต่ำที่สุด	เงื่อนไข ความจุสูงสุด ของคลังสินค้า
I	✓		
II		✓	
III	✓	✓	
IV		✓	✓

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอข้อตกลงเบื้องต้น การกำหนดสัญลักษณ์ของดัชนี พารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ร่วมกันในทั้ง 4 โมเดล โดยข้อตกลงเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 17

ตาราง 17 ข้อตกลงเบื้องต้น (Assumptions)

No.	ข้อตกลงเบื้องต้น	Model			
		I	II	III	IV
1.	ปริมาณวัตถุดิบมีเพียงพอเสมอในการตอบสนองต่อความต้องการ Unlimited Supply	✓	✓	✓	✓
2.	มีความจุของยานพาหนะเพียงพอเพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการขนส่ง Unlimited Capacity (รถเช่า)	✓	✓	✓	✓
3.	ไม่มีการสูญเสียวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ RDF ในการขนส่งหรือการจัดเก็บ No Loss	✓	✓	✓	✓
4.	การขนถ่ายวัตถุดิบขาเข้าเป็นแบบ Big Bag และการขนถ่ายผลิตภัณฑ์ RDF ขาออกเป็นแบบ Bulk Cargo	✓		✓	
5.	โรงงาน RDF ไม่มีข้อจำกัดในการผลิต Unlimited Capacity	✓	✓	✓	✓
6.	ราคาน้ำมันดีเซล (C_v^D) ที่นำมาคำนวณเท่ากับ 31.94 บาท/ลิตร ณ วันที่ 20 มิถุนายน 2568	✓		✓	
7.	ราคาแก๊ส CNG ที่นำมาคำนวณเท่ากับ 18.55 บาท/กิโลกรัม ณ วันที่ 20 มิถุนายน 2568 (C_v^G)	✓		✓	
9.	ค่าขนถ่ายวัตถุดิบขึ้นไปยังยานพาหนะ 50 บาท/ตัน (TFU_v^{bb}) และค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงจากยานพาหนะ 35 บาท/ตัน (TFD_v^{bb}) สำหรับยานพาหนะ 1 - 8 (Big Bag)	✓		✓	

No.	ข้อตกลงเบื้องต้น	Model			
		I	II	III	IV
10.	ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์ RDF ขึ้นไปบนยานพาหนะ 35 บาท/ตัน (TFU_v^{bc}) และค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์ RDF ลงจากยานพาหนะ 20 บาท/ตัน (TFD_v^{bc}) สำหรับยานพาหนะ 1 - 8 (Bulk Cargo)	✓		✓	
11.	ค่าขนถ่ายวัตถุดิบเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ 1,050 บาท/ตู้ (TFI) และค่าขนถ่ายวัตถุดิบลง 700 บาท/ตู้ (TFO) สำหรับยานพาหนะ 9	✓		✓	
12.	อัตราค่าระวางของรถไฟ (FR) กำหนดให้เท่ากับ 5,825 บาท/ตู้	✓		✓	
13.	ความจุของตู้คอนเทนเนอร์ในกรณีที่ส่งด้วยรถไฟ ($CAPCT$) กำหนดให้เท่ากับ 21 ตัน/ตู้	✓	✓	✓	✓
14.	อัตราค่าเชื้อเพลิงของรถไฟ (BR) กำหนดให้เท่ากับ 1,953 บาท/ตู้ กรณีระยะทางไม่เกิน 300 กม. หากระยะทางเกิน 300 กม. จะคิดอัตราตามการรถไฟแห่งประเทศไทยกำหนด	✓		✓	
15.	ค่าใช้จ่ายคลังสินค้า (WH_j) ทุกแห่ง 20 บาท/ตัน	✓		✓	
16.	ต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CEX) 200 บาท/ตันคาร์บอน			✓	
17.	ความจุสูงสุดของคลังสินค้า ($CAPWH_j$) เท่ากับ 5,000 ตัน				✓

ดัชนี (Indices)

i = ชัฟฟลายเออร์ ; $i = 1, 2, \dots, I$ โดยที่ I = จำนวนชัฟฟลายเออร์ทั้งหมด คือ 9

j = คลังสินค้า ; $j = 1, 2, \dots, J$ โดยที่ J = จำนวนคลังสินค้า ทั้งหมด คือ 4

k = โรงงานผลิต RDF ; $k = 1, 2, \dots, K$ โดยที่ K = จำนวนโรงงานผลิต RDF ทั้งหมด คือ 1

l = โรงงานปูนซีเมนต์ ; $l = 1, 2, \dots, L$ โดยที่ L = จำนวนโรงงานปูนซีเมนต์ ทั้งหมด คือ 3

v = ประเภทของยานพาหนะ ; $v = 1, 2, \dots, V$ โดยที่ V = จำนวนประเภทของยานพาหนะ คือ 9

พารามิเตอร์ (Parameters)

S_{ik} = ปริมาณวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i มายังโรงงานผลิต RDF k (ตัน/ปี)

P_{kl} = ปริมาณผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l (ตัน/ปี)

CAP_v = ความจุของยานพาหนะ (ตัน) สำหรับ $v = 1 - 8$

B_v = อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (กม./ลิตร) สำหรับ $v = 1 - 8$

C_v^D = ราคาน้ำมันดีเซล (บาท/ลิตร) สำหรับ $v = 1 - 7$

C_v^G = ราคาแก๊ส CNG (บาท/กิโลกรัม) สำหรับ $v = 8$

H_v = ค่าเช่ายานพาหนะ (บาท/รอบ) สำหรับ $v = 1 - 8$

W_v = ค่าแรงคนขับ (บาท/รอบ) สำหรับ $v = 1 - 8$

WH_j = ค่าใช้คลังสินค้า j (บาท/ตัน)

$CAPWH_j$ = ความจุสูงสุดของคลังสินค้า j (ตัน)

TFU_v^{bb} = ค่าขนถ่ายวัตถุดิบขึ้นไปยังยานพาหนะ v (บาท/ตัน) $v = 1 - 8$

TFD_v^{bb} = ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงจากยานพาหนะ v (บาท/ตัน) $v = 1 - 8$

TFU_v^{bc} = ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์ RDF ขึ้นไปยังยานพาหนะ (บาท/ตัน) $v = 1 - 8$

TFD_v^{bc} = ค่าขนถ่ายผลิตภัณฑ์ RDF ลงจากยานพาหนะ (บาท/ตัน) $v = 1 - 8$

TFI = ค่าขนถ่ายวัตถุดิบเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ (บาท/ตู้)

TFO = ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงจากยานพาหนะ (บาท/ตู้)

FR = อัตราค่าระวางของรถไฟ (บาท/ตู้) $v = 9$

BR = อัตราค่าเชื้อเพลิงของรถไฟ (บาท/ตู้) $v = 9$

$CAPCT$ = ความจุของตู้คอนเทนเนอร์ในกรณีที่ใช้ด้วยรถไฟ (ตัน)

CTN^S = จำนวนตู้คอนเทนเนอร์ที่ใช้สำหรับขนส่งวัตถุดิบ (ตู้)

CTN^P = จำนวนตู้คอนเทนเนอร์ที่ใช้สำหรับขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF (ตู้)

CEX = ต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาท/ตันคาร์บอน)

E_v = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของยานพาหนะแต่ละประเภท (kgCO₂e/tonne·km)
ดังแสดงในตารางที่ 11

R_{ikv} = จำนวนรอบในการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะชนิด v (รอบ)

R_{ijv} = จำนวนรอบในการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะชนิด v (รอบ)

R_{jkv} = จำนวนรอบในการขนส่งวัตถุดิบจากคลังสินค้า j ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (รอบ)

R_{klv} = จำนวนรอบในการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l ด้วยยานพาหนะชนิด v (รอบ)

C_{ikv} = ต้นทุนการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

C_{ijv} = ต้นทุนการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

C_{ijkv} = ต้นทุนการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ผ่านคลังสินค้า j ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

C_{klv} = ต้นทุนการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

D_{ik} = ระยะทางการขนส่งวัตถุดิบจาก ซัพพลายเออร์ i ไปยังโรงงานผลิต RDF k ดังแสดงในตารางที่ 12

D_{ij} = ระยะทางการขนส่งวัตถุดิบจาก ซัพพลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j ดังแสดงในตารางที่ 14

D_{ijk} = ระยะทางการขนส่งวัตถุดิบจาก จากคลังสินค้า j ไปยังโรงงานผลิต RDF k ดังแสดงในตารางที่ 15

D_{kl} = ระยะทางการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l ดังแสดงในตารางที่ 13

E_{ikv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจาก ซัพพลายเออร์ i ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ปี)

E_{ijv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจาก ซัพพลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ปี)

E_{ijkv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ผ่านคลังสินค้า j ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ปี)

E_{klv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ปี)

CE_{ikv} = ต้นทุนรวมค่าภาษีคาร์บอนของการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

CE_{ijv} = ต้นทุนรวมค่าภาษีคาร์บอนของการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

CE_{ijkv} = ต้นทุนรวมค่าภาษีคาร์บอนของการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ i ผ่านคลังสินค้า j ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

CE_{klv} = ต้นทุนรวมค่าภาษีคาร์บอนของการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l ด้วยยานพาหนะ v (บาท)

EW_{ikv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจาก ชัฟฟลายเออร์ i ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ตัน)

EW_{ijv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจาก ชัฟฟลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ตัน)

EW_{ijkv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจากชัฟฟลายเออร์ i ผ่านคลังสินค้า j ไปยังโรงงานผลิต RDF k ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ตัน)

EW_{klv} = ปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานผลิต RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l ด้วยยานพาหนะ v (kgCO₂/ตัน)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) เป็นตัวแปรตัดสินใจในการเลือกขนส่ง การขนส่งวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ RDF จากต้นทางไปยังปลายทางด้วยรูปแบบการขนส่งต่างๆ เป็นตัวแปรฐานสอง (Binary) สำหรับ Model I, Model II และ Model III ดังนี้

$\varepsilon_{ikv} = 1$ เมื่อมีการขนส่งวัตถุดิบจาก ชัฟฟลายเออร์ i ไปยังโรงงาน RDF k โดยยานพาหนะชนิด v , ในกรณีอื่น = 0

$\mu_{ijv} = 1$ เมื่อมีการขนส่งวัตถุดิบจาก ชัฟฟลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j โดยยานพาหนะชนิด v , ในกรณีอื่น = 0

$\rho_{ijkv} = 1$ เมื่อมีการขนส่งวัตถุดิบจากชัฟฟลายเออร์ i ผ่านคลังสินค้า j ไปยังโรงงาน RDF k โดยยานพาหนะชนิด v , ในกรณีอื่น = 0

$\sigma_{klv} = 1$ เมื่อมีการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงาน RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l โดยยานพาหนะชนิด v , ในกรณีอื่น = 0

สำหรับ Model IV

Q_{ikv} = ปริมาณการขนส่งวัตถุดิบจาก ชัฟฟลายเออร์ i ไปยังโรงงาน RDF k โดยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

A_{ijv} = ปริมาณการขนส่งวัตถุดิบจาก ชัฟฟลายเออร์ i ไปยังคลังสินค้า j โดยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

S_{ijkv} = ปริมาณการขนส่งวัตถุดิบจากชัฟฟลายเออร์ i ผ่านคลังสินค้า j ไปยังโรงงาน RDF k โดยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

U_{klv} = ปริมาณการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงาน RDF k ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ l โดยยานพาหนะชนิด v (ตัน)

ทั้งนี้ มีข้อจำกัดทางด้านรูปแบบการขนส่ง ได้แก่

- 1) บางเส้นทางไม่สามารถใช้รูปแบบการขนส่งบางรูปแบบได้
- 2) ข้อจำกัดในการขนส่งด้วยรถไฟ คือ การขนส่งด้วยรูปแบบรถไฟจะต้องขนวัตถุติดไปยังคลังสินค้าเท่านั้น
- 3) การขนส่งวัตถุติดออกจากคลังสินค้าจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการขนส่ง วัตถุติดจากซัพพลายเออร์มายังคลังสินค้าที่ถูกเลือกเป็นทางผ่านเท่านั้น
- 4) การขนส่งวัตถุติดจะทำได้เพียงกรณีใดกรณีหนึ่ง จากทั้งหมด 2 กรณี คือ 1) ส่งตรง คือ การขนส่งวัตถุติดไปยังโรงงาน RDF โดยตรง และ 2) ส่งผ่านคลังสินค้า คือ การขนส่งวัตถุติดไปยังคลังสินค้าก่อนที่จะส่งไปยังโรงงาน RDF อีกต่อหนึ่ง

จากค่าใช้จ่าย และพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าผลลัพธ์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าขนถ่ายวัตถุติดขึ้นยานพาหนะ ค่าขนถ่ายวัตถุติดลงยานพาหนะ ค่าเช่ายานพาหนะ ค่าแรงคนขับ ค่าใช้คลังสินค้า ระยะทางในการขนส่งวัตถุติด ค่าภาษีปริมาณการปล่อย CO₂ และปริมาณความต้องการวัตถุติด ผู้วิจัยได้เลือกพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอนสูง และมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ความไว ดังต่อไปนี้

- 1) การเปลี่ยนแปลงของระยะทางในการขนส่งวัตถุติด
- 2) การเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน
- 3) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความต้องการวัตถุติด

ตาราง 18 การวิเคราะห์ความไว

Model	ระยะทาง	ราคาน้ำมัน	ปริมาณวัตถุติด
I	✓	✓	✓
II	✓		✓
III	✓	✓	✓
IV	✓		✓

โดยในแต่ละโมเดลนั้นจะทำการวิเคราะห์ความไวดังแสดงในตารางที่ 18 เนื่องจาก Model II และ Model IV เป็นการลดปริมาณการปล่อย CO₂ ให้ต่ำที่สุด ฉะนั้นเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมันจึงไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณการปล่อย CO₂ ผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ความไวในส่วนนี้

4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I

4.2.1 ฟังก์ชันเป้าประสงค์ (Objective Function) การขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงานผลิต RDF และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานไปยังลูกค้าปลายทางด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยการลดต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางดังต่อไปนี้ ก) ซัพพลายเออร์และโรงงาน RDF ข) ซัพพลายเออร์ และคลังสินค้า ค) คลังสินค้า และโรงงาน RDF ง) โรงงาน RDF และโรงงานปูนซีเมนต์

TC = ค่าขนส่งรวม (บาท/ปี)

$$\begin{aligned}
 Min TC = & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V C_{ikv} \times \varepsilon_{ikv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V C_{ijv} \times \mu_{ijv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V C_{ijkv} \times \rho_{ijkv} \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^V C_{klv} \times \sigma_{klv}
 \end{aligned} \tag{22}$$

4.2.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

การขนส่งวัตถุดิบขาออกจากซัพพลายเออร์แต่ละรายสามารถเลือกได้เพียงเส้นทางเดียว โดยอาจจะเป็นการส่งตรงไปยังโรงงาน RDF หรือส่งผ่านคลังสินค้า และพาหนะประเภทเดียวกันเท่านั้น

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \varepsilon_{ikv} + \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V \mu_{ijv} = 1, \forall i \tag{23}$$

หากมีการใช้คลังสินค้า จำนวนรวมการเลือกใช้เส้นทางขาเข้าต้องเท่ากับขาออกเสมอสำหรับซัพพลายเออร์แต่ละแห่งผ่านคลังสินค้าแต่ละแห่ง

$$\sum_{v=1}^V \mu_{ijv} = \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \rho_{ijkv}, \forall i, j \tag{24}$$

วัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ทั้งหมดต้องส่งถึงโรงงาน RDF

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \varepsilon_{ikv} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \rho_{jkv} = I \quad (25)$$

โรงงานปูนซีเมนต์ทั้งหมดได้รับผลิตภัณฑ์ RDF

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \sigma_{klv} = 1, \forall l \quad (26)$$

$$\varepsilon_{ikv}, \mu_{ijv}, \rho_{jkv}, \sigma_{klv} \in \{0,1\}, \forall i, j, k, l, v \quad (27)$$

4.2.3 การคำนวณค่าขนส่งของยานพาหนะแต่ละประเภท

สำหรับการขนส่งวัตถุดิบ สมการคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละเส้นทาง โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8 ซึ่งขนส่งทางถนน ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด 6 ส่วน ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าขนถ่ายวัตถุดิบขึ้นยานพาหนะ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ ค่าเช่ายานพาหนะ ค่าแรงคนขับ และค่าใช้ค้ำลังสินค้า (คิดค่าใช้ค้ำลังสินค้าเฉพาะกรณีที่ส่งผ่านค้ำลังสินค้า)

$$C_{ikv} = \left(\frac{D_{ik}}{B_v} \times C_v^D \times R_{ikv} \right) + (TFU_v^{bb} \times S_{ik}) + (TFD_v^{bb} \times S_{ik}) + (H_v \times R_{ikv}) + (W_v \times R_{ikv}), \forall i, k, v \quad (28)$$

โดย

$$R_{ikv} = \left\lceil \frac{S_{ik}}{CAP_v} \right\rceil \quad (29)$$

สำหรับ C_{ijv} เป็นการขนส่งวัตถุดิบ ไปยังค้ำลังสินค้า จึงคิดค่าใช้ค้ำลังสินคาร่วมด้วย

$$C_{ijv} = \left(\frac{D_{ij}}{B_v} \times C_v^D \times R_{ijv} \right) + (TFU_v^{bb} \times S_{ik}) + (TFD_v^{bb} \times S_{ik}) + (H_v \times R_{ijv}) + (W_v \times R_{ijv}) + (WH_j \times S_{ik}), \forall i, j, v \quad (30)$$

โดย

$$R_{ijv} = \left\lceil \frac{S_{ik}}{CAP_v} \right\rceil \quad (31)$$

สมการคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละเส้นทาง โดยยานพาหนะประเภทที่ 9 ซึ่งขนส่งทาง
ราง ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่ อัตราค่าระวางของรถไฟ อัตราค่าเชื้อเพลิง
ของรถไฟ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ และค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ

$$C_{ijkv} = (FR \times CTN^s) + (BR \times CTN^s) \\ + (TFI \times CTN^s) + (TFO \times CTN^s), \forall i, j, k, v \quad (32)$$

โดย

$$CTN_s = \left\lceil \frac{S_{ik}}{CAPCT} \right\rceil \quad (33)$$

สำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8

$$C_{klv} = \left(\frac{D_{kl}}{B_v} \times C_v^D \times R_{klv} \right) + (TFU_v^{bc} \times P_{kl}) \\ + (TFD_v^{bc} \times P_{kl}) + (H_v \times R_{klv}) + (W_v \times R_{klv}), \forall k, l, v \quad (34)$$

โดย

$$R_{klv} = \left\lceil \frac{P_{kl}}{CAP_v} \right\rceil \quad (35)$$

สมการคำนวณค่าขนส่งของยานพาหนะประเภทที่ 9

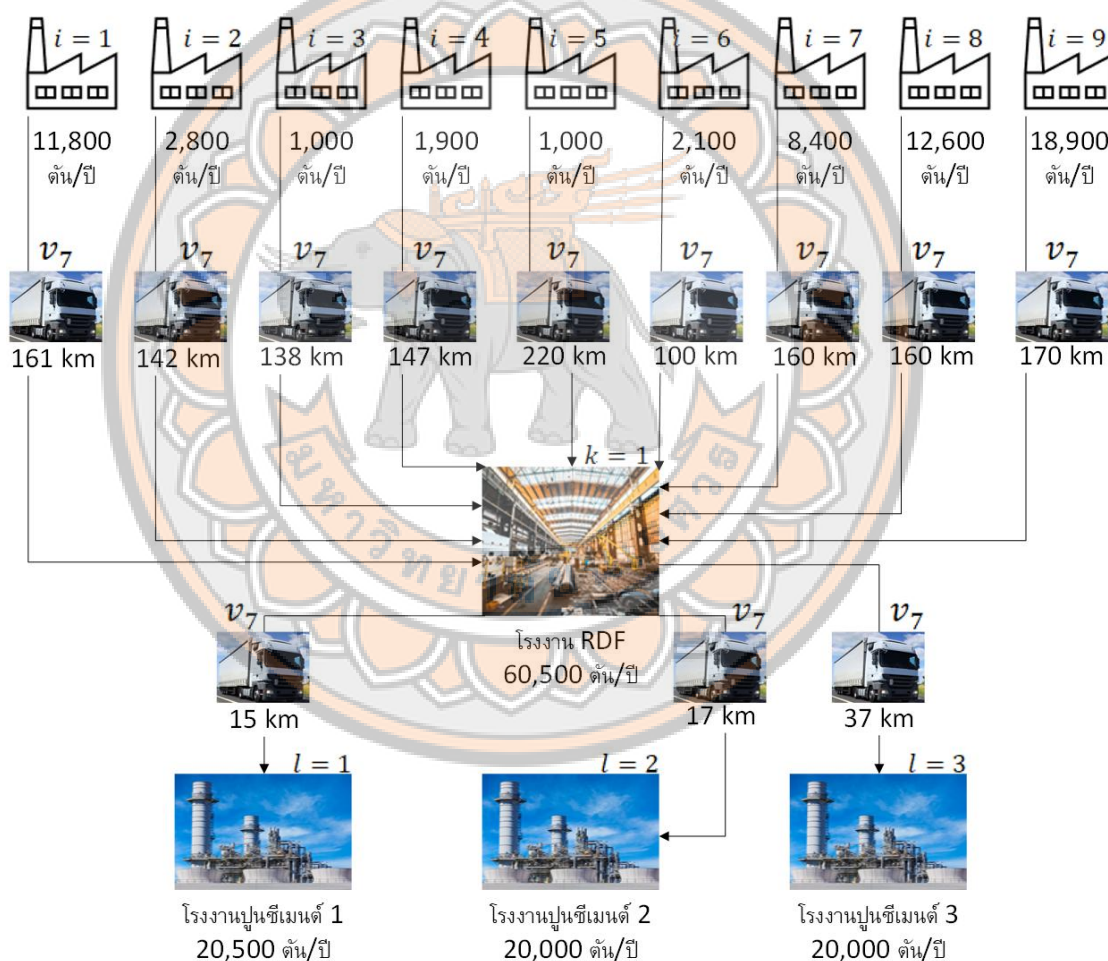
$$C_{klv} = (FR \times CTN^p) + (BR \times CTN^p) \\ + (TFI \times CTN^p) + (TFO \times CTN^p), \forall k, l, v \quad (36)$$

โดย

$$CTN_p = \left\lceil \frac{P_{kl}}{CAPCT} \right\rceil \quad (37)$$

4.2.4 ผลการศึกษากระบวนการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ของกรณีศึกษา

จากภาพที่ 29 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบันนั้น ได้ทำการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ทั้ง 9 แห่ง ไปยังโรงงานผลิต RDF ด้วยยานพาหนะประเภทที่ 7 รวมทั้งสิ้น 60,500 ตัน/ปี และขนส่งผลิตภัณฑ์จากโรงงาน RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ 1 - 3 ด้วยยานพาหนะประเภทที่ 7 รวมทั้งสิ้น 60,500 ตัน/ปี ดังตารางที่ 19 ค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบันนั้น เท่ากับ 26,772,473.36 บาท/ปี โดยประกอบไปด้วย ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 6,459,673.36 บาท/ปี ค่าขนถ่ายขึ้น-ลง 8,470,000.00 บาท/ปี ค่าแรงคนขับรถ 5,325,200.00 บาท/ปี และค่าเช่ายานพาหนะ 6,517,600.00 บาท/ปี



ภาพ 29 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบัน

ตาราง 19 ค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งของโรงเรียนการศึกษาในปัจจุบัน

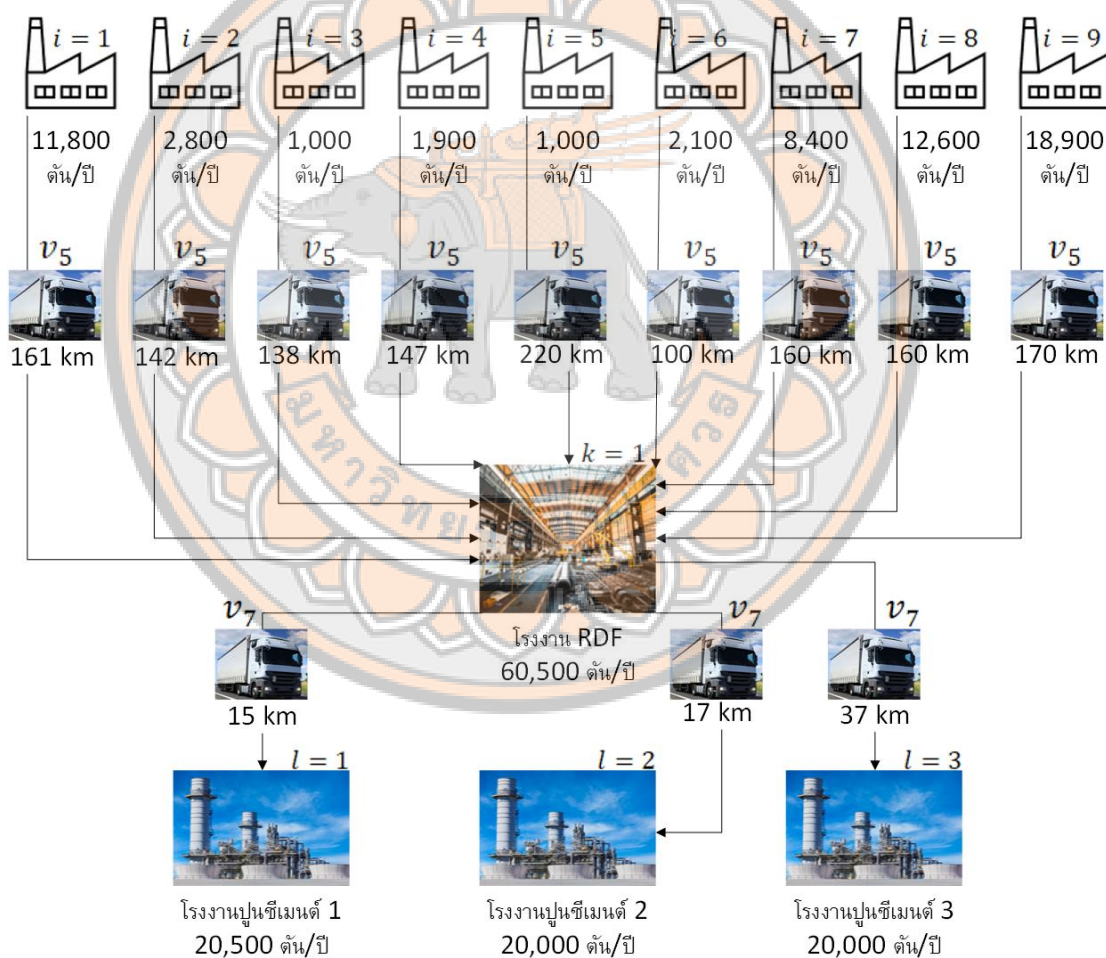
จาก	ไปยัง	รูปแบบการ	จำนวนรอบ	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ค่าห้ำมั้น	ค่าขนถ่ายขึ้นลง	ค่าแรงคนขับ	ค่าเช่า	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ปี)
ซีพีพลายเออร์ 1 - 9	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	2,755.00	60,500.00	5,653,252.24	5,142,500.00	4,959,000.00	5,510,000.00	21,264,752.24
			2,752.00	60,500.00	806,421.12	3,327,500.00	366,200.00	1,007,600.00	5,507,721.12
โรงงาน RDF									

ตาราง 20 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I

จาก	ไปยัง	รูปแบบการ	จำนวนรอบ	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ค่าห้ำมั้น	ค่าขนถ่ายขึ้นลง	ค่าแรงคนขับ	ค่าเช่า	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ปี)
ซีพีพลายเอร์ 1	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	562.00	11,800.00	1,032,141.10	1,003,000.00	843,000.00	1,124,000.00	4,002,141.10
ซีพีพลายเอร์ 2	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	134.00	2,800.00	217,055.11	238,000.00	201,000.00	268,000.00	924,055.11
ซีพีพลายเอร์ 3	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	48.00	1,000.00	75,560.91	85,000.00	72,000.00	96,000.00	328,560.91
ซีพีพลายเอร์ 4	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	91.00	1,900.00	152,593.35	161,500.00	136,500.00	182,000.00	632,593.35
ซีพีพลายเอร์ 5	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	48.00	1,000.00	120,459.43	85,000.00	72,000.00	96,000.00	373,459.43
ซีพีพลายเอร์ 6	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	100.00	2,100.00	114,071.43	178,500.00	150,000.00	200,000.00	642,571.43
ซีพีพลายเอร์ 7	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	400.00	8,400.00	730,057.14	714,000.00	600,000.00	800,000.00	2,844,057.14
ซีพีพลายเอร์ 8	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	600.00	12,600.00	1,095,085.71	1,071,000.00	900,000.00	1,200,000.00	4,266,085.71
ซีพีพลายเอร์ 9	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 5	900.00	18,900.00	1,745,292.86	1,606,500.00	1,350,000.00	1,800,000.00	6,501,792.86
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 1	ยานพาหนะ 7	932.00	20,500.00	178,608.48	1,127,500.00	93,200.00	279,600.00	1,678,908.48
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 2	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	197,644.72	1,100,000.00	91,000.00	273,000.00	1,661,644.72
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 3	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	430,167.92	1,100,000.00	182,000.00	455,000.00	2,167,167.92
		Total Cost			6,088,738.16	8,470,000.00	4,690,700.00	6,773,600.00	26,023,038.17

4.2.5 ผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I

จากตารางที่ 20 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I ได้มีการแสดงรูปแบบในการขนส่งวัตถุดิบ จากซัพพลายเออร์ที่ 1 ถึง 9 ไปยังโรงงาน RDF โดยรูปแบบการขนส่งทางถนน และการขนส่งผลิตภัณฑ์จากโรงงาน RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ โดยพิจารณาจากยานพาหนะทั้ง 9 ประเภท ซึ่งพบว่าซัพพลายเออร์ทั้ง 9 แห่งนั้น ได้เลือกประเภทยานพาหนะในการขนส่ง ประเภทที่ 5 มาใช้ในการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงาน RDF โดยการส่งตรง และโรงงาน RDF ได้ทำการส่งผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ทั้ง 3 แห่ง ด้วยรูปแบบการขนส่งทางถนน โดยเลือกยานพาหนะประเภทที่ 7 มาใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์ แสดงเส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งดังภาพที่ 30



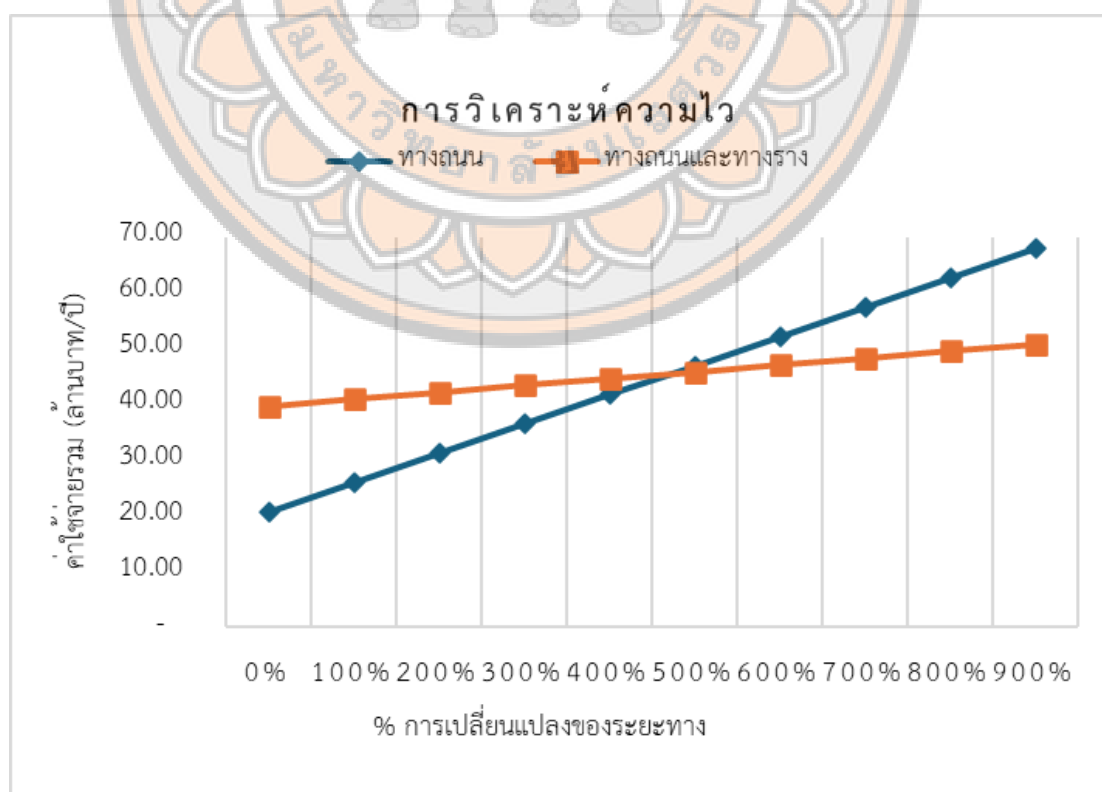
ภาพ 30 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model I

ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I เท่ากับ 26,023,038.17 บาท/ปี ประกอบไปด้วยค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 6,088,738.16 บาท/ปี ค่าขนถ่ายขึ้น-ลง 8,470,000.00 บาท/ปี ค่าแรงคนขับรถ 4,690,700.00 บาท/ปี และค่าเช่ายานพาหนะ 6,773,600.00 บาท/ปี ทำให้ประหยัดได้ถึง 749,435.19 บาท/ปี ซึ่งค่าใช้จ่ายรวมนั้นลดลงจากเดิมถึง 2.80% โดยส่วนที่ลดนี้ มาจากค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 370,935.20 บาท/ปี และค่าแรงคนขับ 634,500.00 บาท/ปี ในส่วนของค่าขนถ่ายขึ้น-ลงนั้น มีค่าเท่ากันทั้งกรณีปัจจุบัน และผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ แต่ค่าเช่ายานพาหนะกลับสวนทางกันกับค่าอื่นๆ โดยที่มีค่าสูงขึ้นจากเดิมถึง 256,000.00 บาท/ปี อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์สุดท้ายที่ออกมาได้ค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุด

4.2.6 การวิเคราะห์ความไว Model I

1) เปลี่ยนแปลงระยะทาง

จากภาพที่ 31 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทางโดยที่เส้นสีน้ำเงินแทนการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงาน RDF โดยการขนส่งทางถนน เป็นการขนส่งทางตรง และเส้นสีส้มแสดงการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงาน RDF โดยการขนส่งทางถนนและทางรางร่วมกัน เป็นการขนส่งแบบผ่านคลังสินค้า



ภาพ 31 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model I

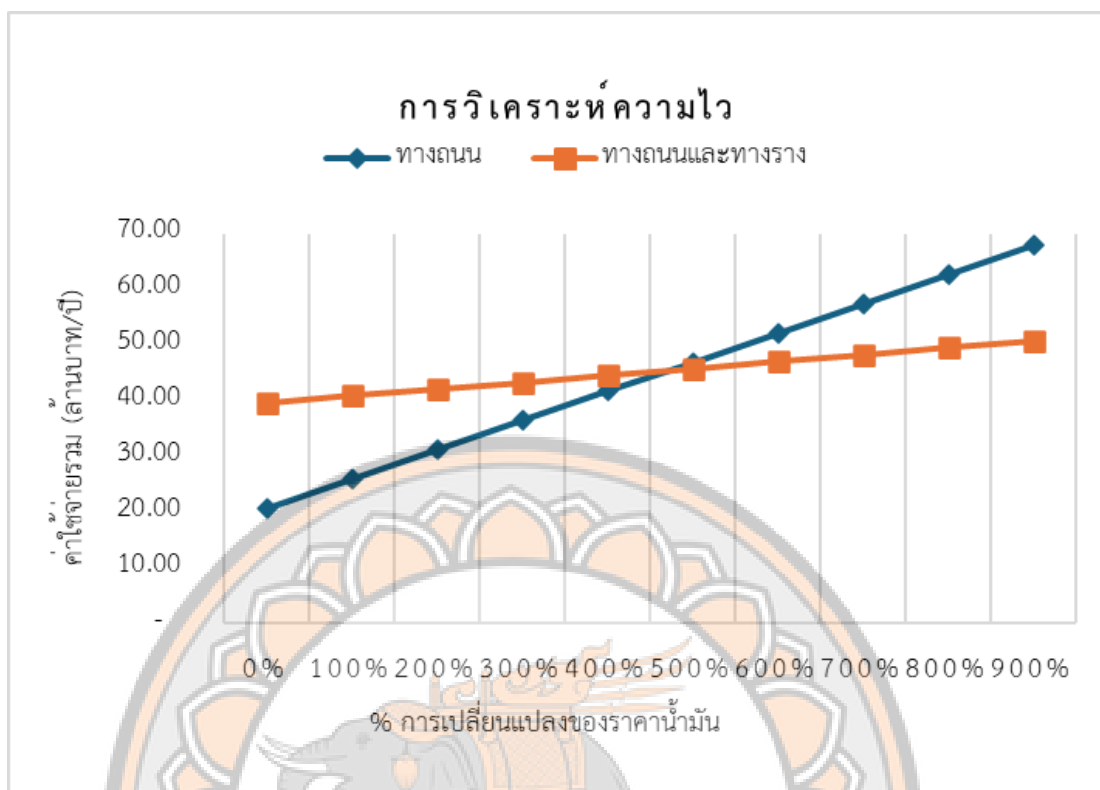
จากผลการวิเคราะห์ความไว การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียวมีต้นทุนคงที่เริ่มต้นที่ต่ำกว่าอยู่ที่ประมาณ 20 ล้านบาท/ปี แต่มีความชันของกราฟที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด นั้นหมายความว่าต้นทุนจะผันแปรและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้นทุนต่อกิโลเมตรสูง และการขนส่งแบบผสมผสานทางถนนและทางราง มีต้นทุนคงที่เริ่มต้นสูงกว่าอยู่ที่เกือบ 40 ล้านบาท/ปี เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการยกขนเปลี่ยนถ่ายสินค้า แต่มีความชันของกราฟที่ต่ำกว่ามาก หมายความว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วนั้น ต้นทุนรวมจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ามากเนื่องจากต้นทุนต่อกิโลเมตรต่ำ โดยที่จุดตัดและจุดคุ้มทุน (Break-even Point) อยู่ที่ 472.24% หรือคิดเป็นระยะทางอยู่ในช่วงประมาณ 500 – 1,200 กิโลเมตร มีค่าใช้จ่ายรวมอยู่ที่ประมาณ 44 - 45 ล้านบาท/ปี จุดนี้คือเครื่องมือสำคัญในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการขนส่ง แปลว่า หากต้องขนส่งวัตถุดิบเป็นระยะทางไกลเกินกว่า 1,200 กิโลเมตรขึ้นไป การเลือกขนส่งแบบผสมผสาน "ทางถนนและทางราง" จะมีความคุ้มค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งระยะทางไกลขึ้นเท่าไร ส่วนต่างของผลประโยชน์ (Cost Savings) ก็จะมีกว้างขึ้นเรื่อยๆ

2) เปลี่ยนแปลงราคาน้ำมัน

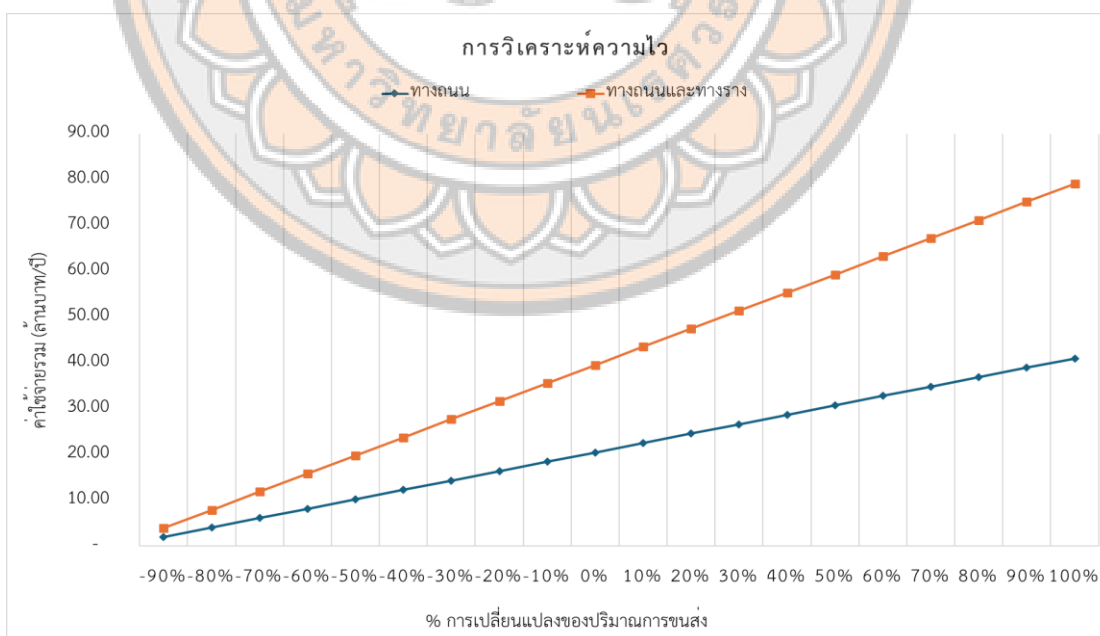
จากภาพที่ 32 ทำการวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน เพื่อดูผลกระทบของความผันผวนของราคาน้ำมันที่มีต่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมต่อปี โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขนส่ง ทางถนน และการขนส่งร่วมกันระหว่างทางถนนและทางราง

โดยที่แกนนอนนั้นแสดงถึง % การเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน โดยกำหนดให้จุดเริ่มต้น 0% มีราคาน้ำมันดีเซลอยู่ที่ 31.94 บาท/ลิตร และแกนตั้งแสดงถึงค่าใช้จ่ายรวมล้านบาท/ปี สามารถอธิบายความสัมพันธ์และจุดคุ้มทุนจากกราฟได้ดังนี้ ความไวต่อราคาน้ำมันของทั้ง 2 รูปแบบ การขนส่งทางถนน มีต้นทุนคงที่เมื่อราคาน้ำมันยังไม่เปลี่ยนแปลง อยู่ที่ประมาณ 20 ล้านบาท/ปี แต่กราฟมีความชันที่สูงมาก แสดงว่าการขนส่งทางถนนมีความไว ต่อราคาน้ำมันสูงมาก หากราคาน้ำมันปรับตัวสูงขึ้น ต้นทุนค่าขนส่งรวมจะดีดตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

การขนส่งทางถนนและทางรางมีต้นทุนเริ่มต้นที่สูงกว่า อยู่ที่เกือบ 40 ล้านบาท/ปี แต่กราฟมีความชันที่ต่ำกว่ามาก เพราะระบบรางประหยัดพลังงานมากกว่า และมีสัดส่วนของต้นทุนผันแปรด้านน้ำมันต่อน้ำมันหนักสินค้าน้อยกว่าทางถนน ซึ่งจุดตัดและจุดคุ้มทุน (Break-even Point) อยู่ที่ 471.80% เมื่อราคาน้ำมันปรับตัวสูงขึ้นจนถึงจุดตัดนี้ ราคาน้ำมันดีเซลจะไปแตะอยู่ที่ประมาณ 182.63 บาท/ลิตร จะพบเป็นเส้นแบ่งการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ ช่วงของราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 471.80% เส้นสีน้ำเงินจะอยู่ต่ำกว่าเส้นสีส้มการขนส่งทางถนน ยังคงให้ต้นทุนรวมที่ประหยัดกว่า เนื่องจากส่วนต่างค่าน้ำมันที่เพิ่มขึ้นยังไม่สูงพอที่จะชดเชยต้นทุนคงที่เริ่มต้นที่สูงของระบบรางได้ช่วงที่ราคาน้ำมันเพิ่มขึ้นมากกว่า 471.80% เส้นสีส้มนั้นจะอยู่ต่ำกว่าเส้นสีน้ำเงินการขนส่งแบบผสมผสานทางถนนและทางราง จะกลายเป็นตัวเลือกที่ประหยัดและคุ้มค่ากว่า และยิ่งน้ำมันแพงขึ้นเท่าใด การขนส่งทางรางจะยิ่งช่วยประหยัดกว่าอย่างมาก



ภาพ 32 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน Model I



ภาพ 33 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุอันตราย Model I

3) เปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ

จากภาพที่ 33 ทำการวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ แกนนอนแสดงถึง % การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่ง โดยกำหนดให้จุดฐานที่ 0% มีปริมาณการขนส่งวัตถุดิบอยู่ที่ 60.500 ตัน/ปี และแกนตั้งแสดงถึงค่าใช้จ่ายรวม ล้านบาท/ปี สามารถอธิบายความสัมพันธ์และโครงสร้างต้นทุนจากกราฟได้ดังนี้ ลักษณะของกราฟและการไม่มีจุดตัด (No Intersecting Point) ความแตกต่างที่สำคัญที่สุดของกราฟนี้เมื่อเทียบกับกราฟระยะทางหรือราคาน้ำมันก่อนหน้านี้ คือเส้นกราฟทั้งสองเส้นไม่มีการตัดกันเลย ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -90% ไปจนถึง +100% เส้นสีน้ำเงินนั้นอยู่ต่ำกว่าเส้นสีส้มในทุกๆ ระดับของปริมาณการขนส่งสิ่งนี้ระบุว่า ภายใต้เงื่อนไขหรือระยะทางคงที่ ที่ใช้ในการคำนวณของโมเดลนี้ การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียวให้ต้นทุนรวมที่ถูกกว่าการขนส่งระบบรางในทุกกรณี ไม่ว่าปริมาณการขนส่งจะขยับเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว หรือลดลงจนเกือบหมดก็ตาม

4.3 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model II

4.3.1 ฟังก์ชันเป้าประสงค์ (Objective Function) การขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงานผลิต RDF และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานไปยังลูกค้าปลายทาง โดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำที่สุด พิจารณาจากเส้นทางดังต่อไปนี้ ก) ซัพพลายเออร์ และโรงงาน RDF ข) ซัพพลายเออร์ และคลังสินค้า ค) คลังสินค้า และโรงงาน RDF ง) โรงงาน RDF และโรงงานปูนซีเมนต์

TE = ปริมาณการปล่อย CO_2 รวม (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี)

$$\begin{aligned}
 Min TE = & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V E_{ikv} \times \varepsilon_{ikv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V E_{ijv} \times \mu_{ijv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V E_{ijkv} \times \rho_{ijkv} \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^V E_{klv} \times \sigma_{klv}
 \end{aligned} \tag{38}$$

4.3.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

เช่นเดียวกันกับ Model I แสดงดังสมการที่ (23) – (27)

4.3.3 การคำนวณปริมาณการปล่อย CO₂ ของยานพาหนะแต่ละประเภท

สำหรับการขนส่งวัตถุดิบ สมการคำนวณอัตราการปล่อย CO₂ ของแต่ละเส้นทาง โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8 ขนส่งทางถนน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{ikv} = CAP_v \times D_{ik} \times E_v \times R_{ikv}, \forall i, k, v \quad (39)$$

สำหรับ E_{ijv} สำหรับการขนส่งวัตถุดิบ ไปยังคลังสินค้า

$$E_{ijv} = CAP_v \times D_{ij} \times E_v \times R_{ijv}, \forall i, j, v \quad (40)$$

สมการคำนวณอัตราการปล่อย CO₂ ของแต่ละเส้นทาง โดยยานพาหนะประเภทที่ 9 ซึ่งขนส่งทางราง ด้วยตู้คอนเทนเนอร์

$$E_{ijkv} = CAP_v \times D_{ijk} \times E_v \times CTN^s, \forall i, j, k, v \quad (41)$$

สำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8

$$E_{klv} = CAP_v \times D_{kl} \times E_v \times R_{klv}, \forall k, l, v \quad (42)$$

สมการคำนวณอัตราการปล่อย CO₂ ของยานพาหนะประเภทที่ 9

$$E_{klv} = CAP_v \times D_{kl} \times E_v \times CTN^p, \forall k, l, v \quad (43)$$

4.3.4 การขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ที่ส่งผลให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษา

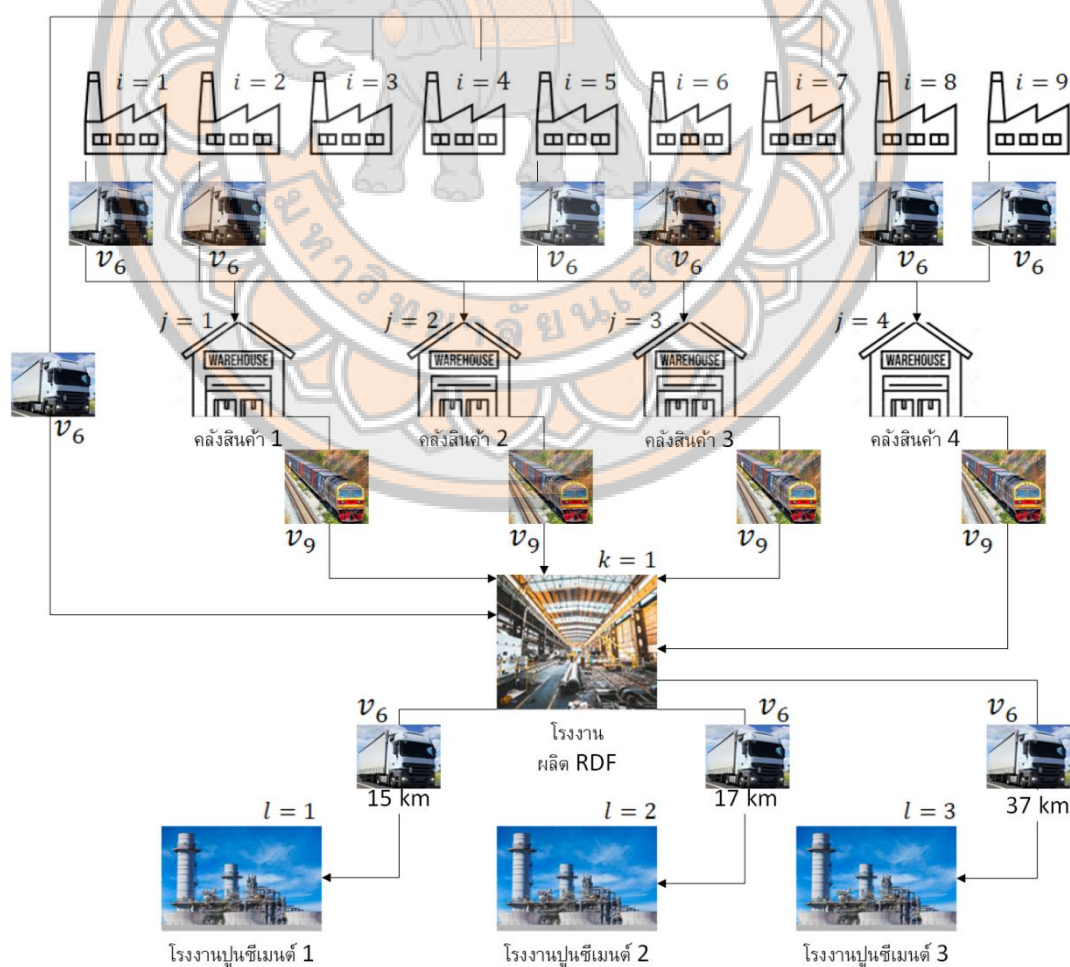
จากภาพที่ 29 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบันนั้น ได้ส่งผลให้เกิดอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 555,614.83 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี แสดงได้ดังตารางที่ 21 ปริมาณการปล่อย CO₂ ในการขนส่งของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก เนื่องด้วยโรงงานกรณีศึกษา ได้เลือกใช้ยานพาหนะขนาดใหญ่ที่สุดประเภทที่ 7 ทั้งในการขนส่งวัตถุดิบจากแต่ละซัพพลายเออร์ไปยังโรงงาน RDF และขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ จึงมีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง

ตาราง 21 ปริมาณการปล่อย CO₂ ในการขนส่งของโรงเรียนการศึกษานานาชาติในปัจจุบัน

จาก	ไปยัง	รูปแบบการขนส่ง	จำนวนรอบ	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ปริมาณการปล่อย CO ₂ รวม (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ปี)
ซีพีแอลเออร์ 1	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	537.00	11,800.00	95,007.60
ซีพีแอลเออร์ 2	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	128.00	2,800.00	19,973.61
ซีพีแอลเออร์ 3	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	46.00	1,000.00	6,975.82
ซีพีแอลเออร์ 4	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	87.00	1,900.00	14,053.83
ซีพีแอลเออร์ 5	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	46.00	1,000.00	11,120.87
ซีพีแอลเออร์ 6	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	96.00	2,100.00	10,549.44
ซีพีแอลเออร์ 7	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	382.00	8,400.00	67,164.77
ซีพีแอลเออร์ 8	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	573.00	12,600.00	100,747.15
ซีพีแอลเออร์ 9	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	860.00	18,900.00	160,659.18
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 1	ยานพาหนะ 7	932.00	20,500.00	15,362.62
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 2	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	16,999.98
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 3	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	36,999.96
					555,614.83

4.3.5 ผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model II

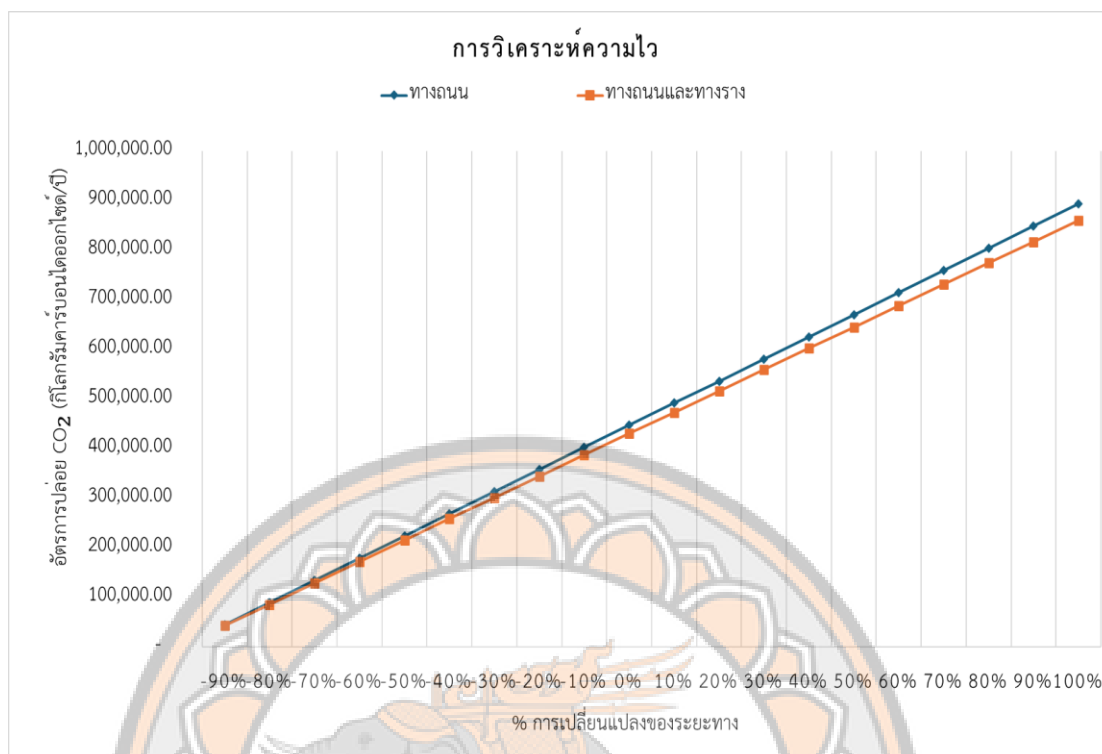
จากตารางที่ 22 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model II ได้มีการแสดงรูปแบบในการขนส่งวัตถุดิบ จากซัพพลายเออร์ที่ 1 ถึง 9 ไปยังโรงงาน RDF ทั้งทางตรง และส่งผ่านคลังสินค้าทั้ง 4 แห่ง และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ โดยพิจารณาจากยานพาหนะทั้ง 9 ประเภท ดังตารางที่ 11 พบว่าซัพพลายเออร์ที่ 3, 4, และ 7 นั้นเลือกประเภทยานพาหนะในการขนส่งประเภทที่ 6 มาใช้ขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงาน RDF โดยการส่งตรง และซัพพลายเออร์ที่ 1, 2, 5, 6, 8, และ 9 นั้น ได้เลือกยานพาหนะประเภทที่ 6 ในการขนส่งวัตถุดิบไปยังคลังสินค้าแต่ละแห่ง จากนั้นคลังสินค้าได้ทำการส่งวัตถุดิบต่อมายังโรงงาน RDF ทางรางโดยยานพาหนะประเภทที่ 9 ผ่านตู้คอนเทนเนอร์ และสุดท้ายโรงงาน RDF ได้ทำการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ทั้ง 3 แห่งด้วยยานพาหนะประเภทที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 34 ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model II เท่ากับ 491,007.75 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี ซึ่งลดลงจากปัจจุบัน 64,607.08 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี หรือคิดเป็น 11.63%



ภาพ 34 เส้นทางและยานพาหนะจากผลลัพธ์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model II

ตาราง 22 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model II

จาก	ไปยัง	รูปแบบการขนส่ง	จำนวนรอบ	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ปริมาณการปล่อย CO ₂ รวม (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เป็)
ซัพพลายเออร์ 1	คลังสินค้า 2	ยานพาหนะ 6	562.00	11,800.00	15,726.76
คลังสินค้า 2	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 9	562.00	11,800.00	65,501.10
ซัพพลายเออร์ 2	คลังสินค้า 3	ยานพาหนะ 6	134.00	2,800.00	3,361.89
คลังสินค้า 3	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 9	134.00	2,800.00	13,535.34
ซัพพลายเออร์ 3	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 6	48.00	1,000.00	6,391.83
ซัพพลายเออร์ 4	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 6	91.00	1,900.00	12,908.14
ซัพพลายเออร์ 5	คลังสินค้า 1	ยานพาหนะ 6	48.00	1,000.00	3,566.46
คลังสินค้า 1	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 9	48.00	1,000.00	4,475.52
ซัพพลายเออร์ 6	คลังสินค้า 4	ยานพาหนะ 6	100.00	2,100.00	3,666.81
คลังสินค้า 4	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 9	100.00	2,100.00	3,885.00
ซัพพลายเออร์ 7	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 6	400.00	8,400.00	61,756.80
ซัพพลายเออร์ 8	คลังสินค้า 2	ยานพาหนะ 6	600.00	12,600.00	22,000.86
คลังสินค้า 2	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 9	600.00	12,600.00	69,930.00
ซัพพลายเออร์ 9	คลังสินค้า 2	ยานพาหนะ 6	900.00	18,900.00	35,606.66
คลังสินค้า 2	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 9	900.00	18,900.00	104,895.00
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 1	ยานพาหนะ 6	977.00	20,500.00	14,141.34
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 2	ยานพาหนะ 6	953.00	20,000.00	15,633.15
โรงงาน RDF	โรงงานปูนซีเมนต์ 3	ยานพาหนะ 6	953.00	20,000.00	34,025.10
					491,007.75



ภาพ 35 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model II

4.3.6 การวิเคราะห์ความไว Model II

1) เปลี่ยนแปลงระยะทาง

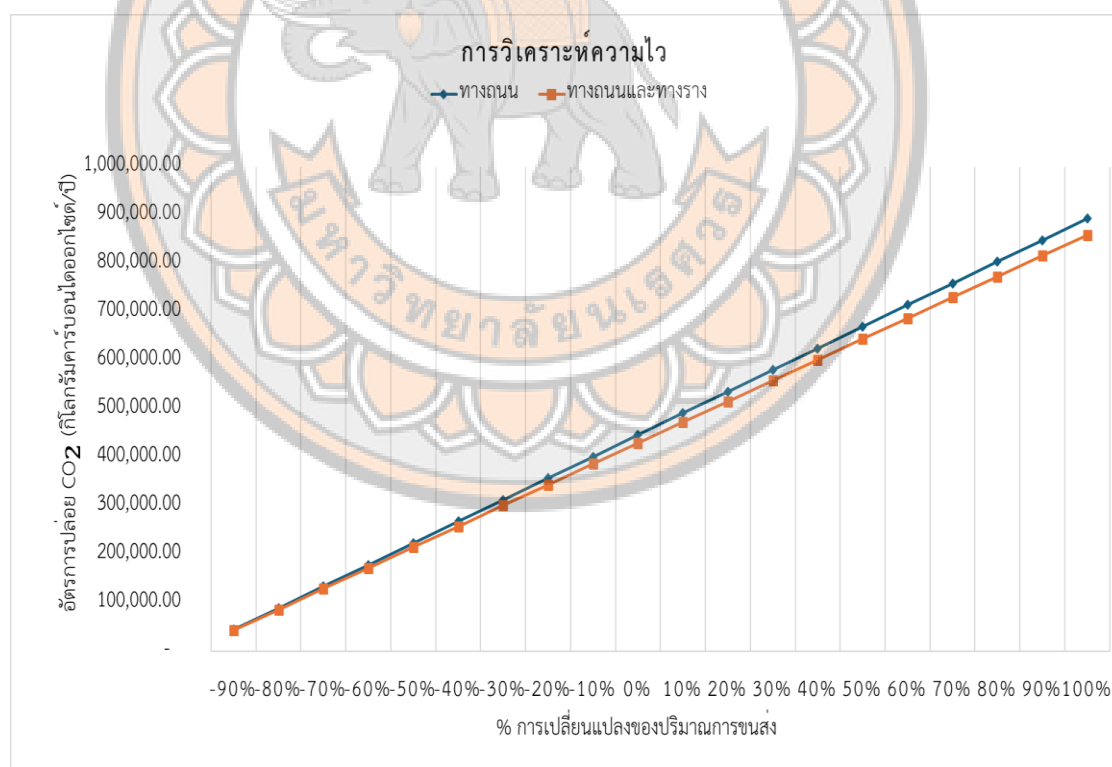
จากภาพที่ 35 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทางในด้านของสิ่งแวดล้อม โดยเปรียบเทียบผลกระทบระหว่าง % การเปลี่ยนแปลงของระยะทาง กับอัตราการปล่อย CO₂ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี) ระหว่างวิธีการขนส่ง 2 รูปแบบ คือทางถนน (เส้นสีน้ำเงิน) และการขนส่งแบบผสมผสานทางถนนและทางราง (เส้นสีส้ม) สามารถอธิบายรายละเอียดและข้อสรุปสำคัญจากกราฟได้ดังนี้

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของทางถนนและทางราง จะอยู่ต่ำกว่าทางถนนเพียงอย่างเดียวในทุกช่วงของการเปลี่ยนแปลงระยะทาง สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นว่าในแง่ของสิ่งแวดล้อม การขนส่งแบบผสมผสานที่มีระบบรางเข้ามาช่วย จะปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียวเสมอ ยิ่งระยะทางเพิ่มขึ้น ช่องว่างหรือส่วนต่างของการปล่อย CO₂ ระหว่างสองเส้นนี้จะยิ่งกว้างขึ้นเรื่อยๆ หมายความว่า การขนส่งด้วยระบบรางนั้นจะช่วยลดการปล่อยคาร์บอนได้เป็นทวีคูณเมื่อระยะทางไกลขึ้น

2) เปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ

จากภาพที่ 36 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ แสดงให้เห็นว่าเส้นการขนส่งทางถนนและทางรางนั้น อยู่ต่ำกว่าทางถนนเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับกราฟปริมาณขนส่งในแง่ของต้นทุนที่เคยวิเคราะห์ไปก่อนหน้านี้ กราฟในแง่สิ่งแวดล้อมนี้ระบุว่า การเลือกใช้ระบบรางร่วมด้วยจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีกว่าทางถนนในทุกๆ ระดับปริมาณสินค้ายังปริมาณการขนส่งเพิ่มมากขึ้นเท่าใด ส่วนต่างในการช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์

ซึ่งความชันของกราฟ (Slope Analysis) การขนส่งทางถนนมีกราฟที่ชันกว่าหมายความว่า อัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไวต่อปริมาณวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นมากกว่าโรงงานรับวัตถุดิบมาจัดการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว +100% ปริมาณคาร์บอนที่ปล่อยออกมาจากการใช้รถบรรทุก จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การขนส่งทางถนนและทางรางนั้นมีความชันที่น้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งสะท้อนถึงการปล่อยมลพิษที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าเมื่อปริมาณการขนส่งวัตถุดิบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น



ภาพ 36 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model II

4.4 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III

4.4.1 ฟังก์ชันเป้าประสงค์ (Objective Function) การขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงานผลิต RDF และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานไปยังลูกค้าปลายทางด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยที่โมเดลนี้ได้มุ่งเน้นทั้งการลดต้นทุนและการปล่อย CO₂ รวม คำนวณจากเส้นทางดังต่อไปนี้ ก) ซัพพลายเออร์ และโรงงาน RDF ข) ซัพพลายเออร์ และคลังสินค้า ค) คลังสินค้า และโรงงาน RDF ง) โรงงาน RDF และโรงงานปูนซีเมนต์

$TCE = \text{ค่าขนส่ง} + \text{ค่าอัตราการปล่อย CO}_2 \text{ รวม (บาท/ปี)}$

$$\begin{aligned}
 Min TCE = & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V CE_{ikv} \times \varepsilon_{ikv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V CE_{ijv} \times \mu_{ijv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V CE_{ijkv} \times \rho_{ijkv} \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^V CE_{klv} \times \sigma_{klv}
 \end{aligned} \tag{44}$$

4.4.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

เช่นเดียวกับกับ Model I แสดงดังสมการที่ (23) – (27)

4.4.3 การคำนวณค่าขนส่งของยานพาหนะแต่ละประเภท

สำหรับการขนส่งวัตถุดิบ สมการคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละเส้นทาง โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8 ซึ่งขนส่งทางถนน ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด 7 ส่วน ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าขนส่งวัตถุดิบขึ้นยานพาหนะ ค่าขนส่งวัตถุดิบลงยานพาหนะ ค่าเช่ายานพาหนะ ค่าแรงคนขับ ค่าใช้คลังสินค้า (คิดค่าใช้คลังสินค้าเฉพาะกรณีที่ส่งผ่านคลังสินค้า) และต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$\begin{aligned}
 CE_{ikv} = & \left(\frac{D_{ik}}{B_v} \times C_v^D \times R_{ikv} \right) + (TFU_v^{bb} \times S_{ik}) \\
 & + (TFD_v^{bb} \times S_{ik}) + (H_v \times R_{ikv}) + (W_v \times R_{ikv}) \\
 & + \left[\left(\frac{CAP_v \times D_{ik} \times E_v \times R_{ikv}}{1000} \right) \times CEX \right], \forall i, k, v
 \end{aligned} \tag{45}$$

สำหรับ CE_{ijv} เป็นการขนส่งวัตถุดิบ ไปยังคลังสินค้า จึงคิดค่าใช้จ่ายคลังสินค้านี้รวมด้วย

$$\begin{aligned}
 CE_{ijv} = & \left(\frac{D_{ij}}{B_v} \times C_v^D \times R_{ijv} \right) + (TFU_v^{bb} \times S_{ik}) + (TFD_v^{bb} \times S_{ik}) \\
 & + (H_v \times R_{ijv}) + (W_v \times R_{ijv}) + (WH_j \times S_{ik}) \\
 & + \left[\left(\frac{CAP_v \times D_{ik} \times E_v \times R_{ijv}}{1000} \right) \times CEX \right], \forall i, j, k, v
 \end{aligned} \quad (46)$$

สมการคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละเส้นทาง โดยยานพาหนะประเภทที่ 9 ซึ่งขนส่งทางราง ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่ อัตราค่าระวางของรถไฟ อัตราค่าเชื้อเพลิงของรถไฟ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์ ค่าขนถ่ายวัตถุดิบลงยานพาหนะ และต้นทุนสำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$\begin{aligned}
 CE_{ijkv} = & (FR \times CTN^S) + (BR \times CTN^S) \\
 & + (TFI \times CTN^S) + (TFO \times CTN^S) \\
 & + \left[\left(\frac{CAP_v \times D_{ij} \times E_v \times CTN^S}{1000} \right) \times CEX \right], \forall i, j, k, v
 \end{aligned} \quad (47)$$

สำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8

$$\begin{aligned}
 CE_{klv} = & \left(\frac{D_{kl}}{B_v} \times C_v^D \times R_{klv} \right) + (TFU_v^{bc} \times P_{kl}) + (TFD_v^{bc} \times P_{kl}) \\
 & + (H_v \times R_{klv}) + (W_v \times R_{klv}) \\
 & + \left[\left(\frac{CAP_v \times D_{kl} \times E_v \times R_{klv}}{1000} \right) \times CEX \right], \forall k, l, v
 \end{aligned} \quad (48)$$

สมการคำนวณค่าขนส่งของยานพาหนะประเภทที่ 9

$$\begin{aligned}
 CE_{klv} = & (FR \times CTN^p) + (BR \times CTN^p) + (TFI \times CTN^p) \\
 & + (TFO \times CTN^p) \\
 & + \left[\left(\frac{CAP_v \times D_{ik} \times E_v \times CTN^p}{1000} \right) \times CEX \right], \forall k, l, v
 \end{aligned} \quad (49)$$

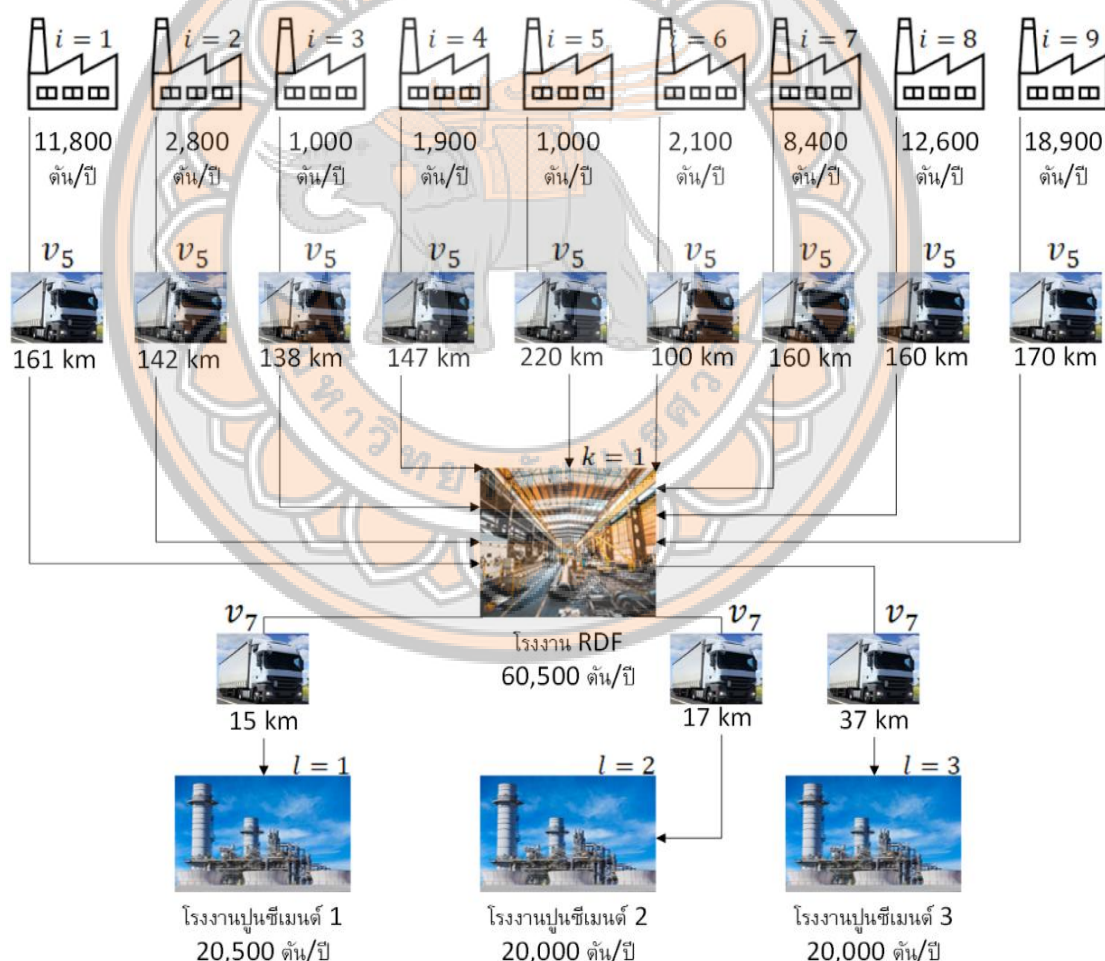
ตาราง 23 ค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมค่าอัตราการปล่อย CO₂ ของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน

จาก	ไปยัง	รูปแบบการขนส่ง	จำนวนรอบ	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ค่าน้ำมัน	ค่าขนส่ง	ค่าแรงคนขับ	ค่าเช่า	ค่าอัตราการปล่อย CO ₂	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ปี)
<i>i</i> 1	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	537.00	11,800.00	1,104,574.63	1,003,000.00	966,600.00	1,074,000.00	19,001.52	4,167,176.15
<i>i</i> 2	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	128.00	2,800.00	232,216.58	238,000.00	230,400.00	256,000.00	3,994.72	960,611.30
<i>i</i> 3	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	46.00	1,000.00	81,102.05	85,000.00	82,800.00	92,000.00	1,395.16	342,297.21
<i>i</i> 4	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	87.00	1,900.00	163,392.26	161,500.00	156,600.00	174,000.00	2,810.77	658,303.03
<i>i</i> 5	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	46.00	1,000.00	129,293.12	85,000.00	82,800.00	92,000.00	2,224.17	391,317.29
<i>i</i> 6	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	96.00	2,100.00	122,649.60	178,500.00	172,800.00	192,000.00	2,109.89	668,059.49
<i>i</i> 7	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	382.00	8,400.00	780,869.12	714,000.00	687,600.00	764,000.00	13,432.95	2,959,902.07
<i>i</i> 8	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	573.00	12,600.00	1,171,303.68	1,071,000.00	1,031,400.00	1,146,000.00	20,149.43	4,439,853.11
<i>i</i> 9	<i>k</i>	ยานพาหนะ 7	860.00	18,900.00	1,867,851.20	1,606,500.00	1,548,000.00	1,720,000.00	32,131.84	6,774,483.04
<i>k</i>	<i>l</i> 1	ยานพาหนะ 7	932.00	20,500.00	178,608.48	1,127,500.00	93,200.00	279,600.00	3,072.52	1,678,908.48
<i>k</i>	<i>l</i> 2	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	197,644.72	1,100,000.00	91,000.00	273,000.00	3,400.00	1,661,644.72
<i>k</i>	<i>l</i> 3	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	430,167.92	1,100,000.00	182,000.00	455,000.00	7,399.99	2,167,167.92
Total Cost					6,459,673.36	8,470,000.00	5,325,200.00	6,517,600.00	92,121.44	26,869,723.81

(คำย่อ: *i* = ชัฟฟลายเออร์, *k* = โรงงาน RDF, *l* = โรงงานปูนซีเมนต์)

4.4.4 ค่าใช้จ่ายรวมค่าภาษีคาร์บอนจากการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน

จากภาพที่ 29 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ในปัจจุบันนั้น มีการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงานผลิต RDF และขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงาน RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าน้ำมัน 6,459,673.36 บาท/ปี ค่าขนถ่ายวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ขึ้น – ลง 8,470,000.00 บาท/ปี ค่าแรงคนขับ 5,325,200.00 บาท/ปี ค่าเช่ายานพาหนะ 6,517,600.00 บาท/ปี และค่าอัตราการปล่อย CO₂ 92,121.44 บาท/ปี โดยมีผลรวมของค่าใช้จ่ายสูงถึง 26,869,723.81 บาท/ปี แสดงดังตารางที่ 23 ค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมค่าอัตราการปล่อย CO₂ ของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน



ภาพ 37 เส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model III

ตาราง 24 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III

จาก	ไปยัง	รูปแบบการขนส่ง	จำนวนรอบ	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ค่าน้ำมัน	ค่าขนส่ง	ค่าแรงคนขับ	ค่าเช่า	ค่าอัตราการปล่อย CO ₂	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ปี)
i_1	k	ยานพาหนะ 5	562.00	11,800.00	1,032,141.10	1,003,000.00	843,000.00	1,124,000.00	18,564.19	4,020,705.29
i_2	k	ยานพาหนะ 5	134.00	2,800.00	217,055.11	238,000.00	201,000.00	268,000.00	3,903.97	927,959.09
i_3	k	ยานพาหนะ 5	48.00	1,000.00	75,560.91	85,000.00	72,000.00	96,000.00	1,359.05	329,919.96
i_4	k	ยานพาหนะ 5	91.00	1,900.00	152,593.35	161,500.00	136,500.00	182,000.00	2,744.56	635,337.91
i_5	k	ยานพาหนะ 5	48.00	1,000.00	120,459.43	85,000.00	72,000.00	96,000.00	2,166.60	375,626.02
i_6	k	ยานพาหนะ 5	100.00	2,100.00	114,071.43	178,500.00	150,000.00	200,000.00	2,051.70	644,623.13
i_7	k	ยานพาหนะ 5	400.00	8,400.00	730,057.14	714,000.00	600,000.00	800,000.00	13,130.88	2,857,188.02
i_8	k	ยานพาหนะ 5	600.00	12,600.00	1,095,085.71	1,071,000.00	900,000.00	1,200,000.00	19,696.32	4,285,782.03
i_9	k	ยานพาหนะ 5	900.00	18,900.00	1,745,292.86	1,606,500.00	1,350,000.00	1,800,000.00	31,391.01	6,533,183.87
k	l_1	ยานพาหนะ 7	932.00	20,500.00	178,608.48	1,127,500.00	93,200.00	279,600.00	3,072.52	1,678,908.48
k	l_2	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	197,644.72	1,100,000.00	91,000.00	273,000.00	3,400.00	1,661,644.72
k	l_3	ยานพาหนะ 7	910.00	20,000.00	430,167.92	1,100,000.00	182,000.00	455,000.00	7,399.99	2,167,167.92
Total Cost					6,088,738.16	8,470,000.00	4,690,700.00	6,773,600.00	108,880.79	26,118,046.45

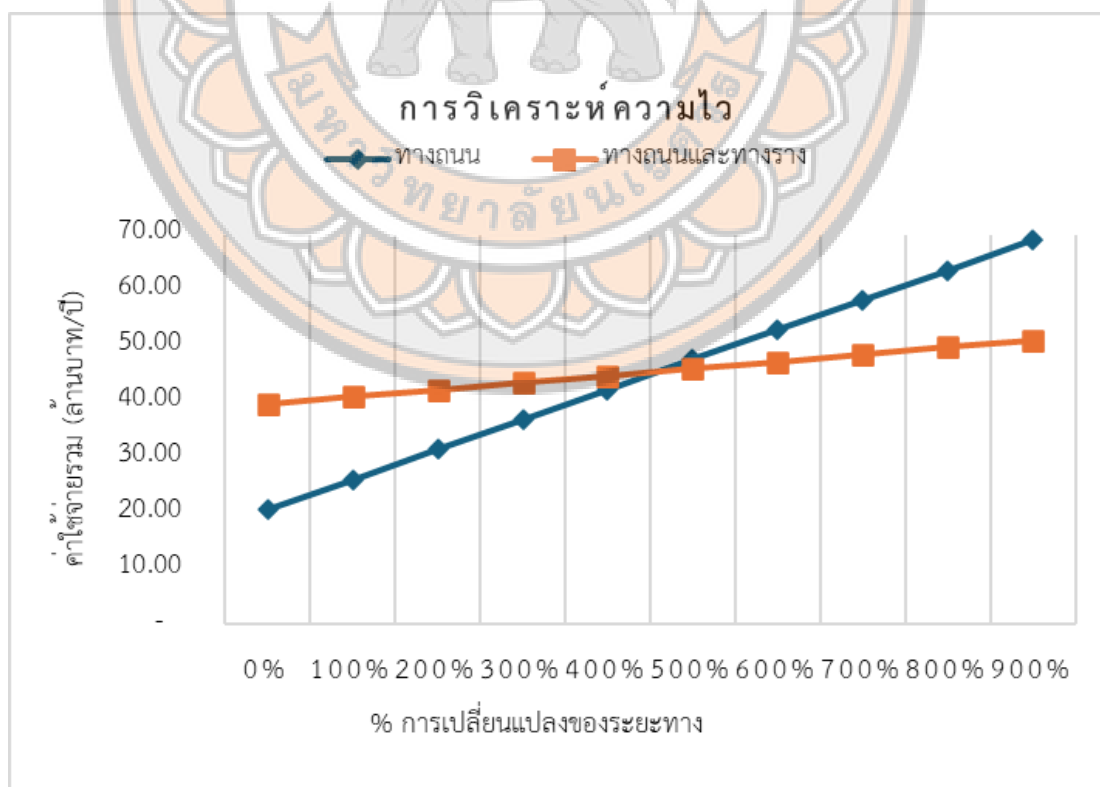
(คำย่อ: i = ชัฟฟลายเออร์, k = โรงงาน RDF, l = โรงงานปูนซีเมนต์)

4.4.5 ผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III

จากตารางที่ 24 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III ได้มีการแสดงรูปแบบในการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงาน RDF โดยเลือกใช้น้ำมันพาหนะประเภทที่ 5 มาใช้ในการขนส่ง และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงาน RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ ได้เลือกใช้น้ำมันพาหนะประเภทที่ 7 สามารถแสดงเส้นทางและยานพาหนะที่ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III เลือกมาใช้ในการขนส่งดังภาพที่ 37 ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าน้ำมัน 6,088,738.16 บาท/ปี ค่าขนถ่ายวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ขึ้น – ลง 8,470,000.00 บาท/ปี ค่าแรงคนขับ 4,690,700.00 บาท/ปี ค่าใช้น้ำมันพาหนะ 6,773,600.00 บาท/ปี และค่าอัตราการปล่อย CO₂ 108,880.79 บาท/ปี ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model III เท่ากับ 26,118,046.45 บาท/ปี ลดลงจากเดิมถึง 751,677.36 บาท/ปี โดยคิดเป็น 2.79% ของค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด โดยส่วนต้นทุนที่ลดนั้น มี 2 ค่าด้วยกัน ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง และค่าคนขับรถ ซึ่งลดไปทั้งสิ้น 2,381,261.84 บาท/ปี และ 1,826,900.00 บาท/ปี ตามลำดับ

4.4.6 การวิเคราะห์ความไว Model III

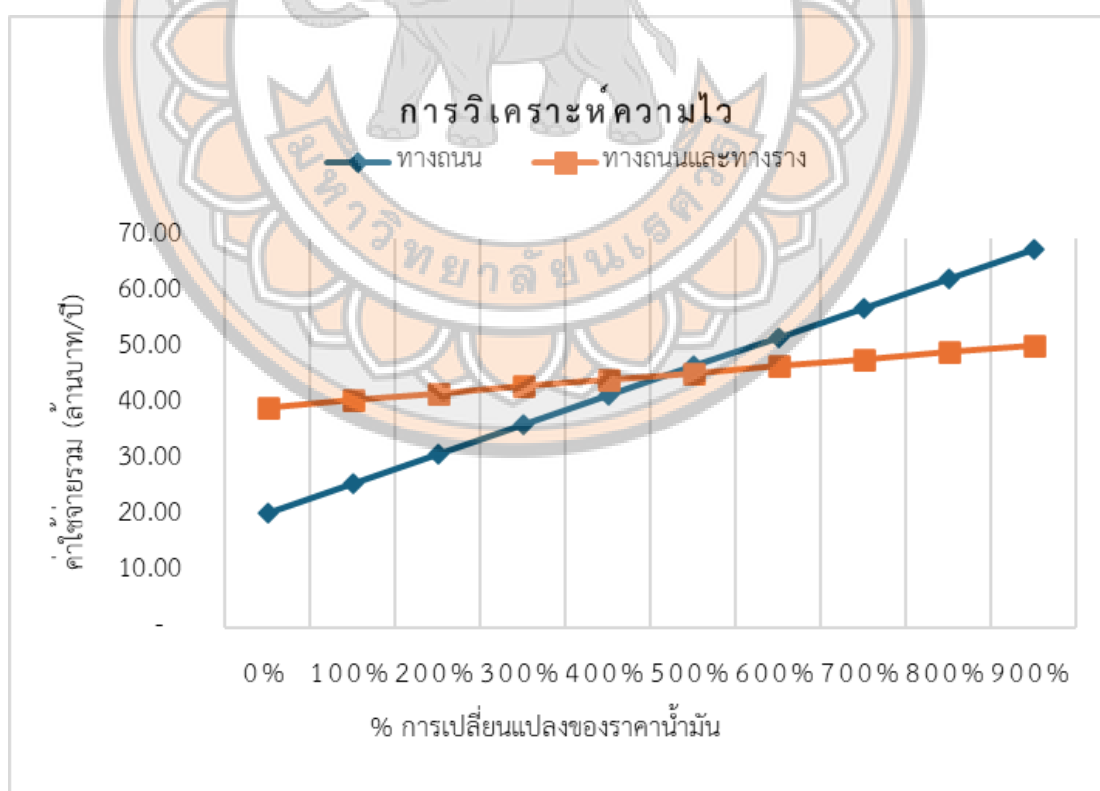
1) เปลี่ยนแปลงระยะทาง



ภาพ 38 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model III

จากภาพที่ 38 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่ายรวมล้านบาท/ปี และ % การเปลี่ยนแปลงของระยะทาง เพื่อหาจุดคุ้มทุนในการเปลี่ยนรูปแบบการขนส่ง (Modal Shift) ระหว่างการขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว (เส้นสีน้ำเงิน) กับการขนส่งแบบผสมผสานทางถนนและทางราง (เส้นสีส้ม) โดยมีรายละเอียดและข้อสรุปสำคัญจากกราฟดังนี้ ณ จุดตัดที่ 462.13% บนแกนนอนคือจุดเปลี่ยนผ่านความคุ้มค่าเชิงกลยุทธ์ (Strategic Break-even Point) ซึ่งสามารถแบ่งพื้นที่การตัดสินใจออกเป็น 2 ส่วนตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ฝั่งซ้ายของจุดตัดนั้นเส้นสีน้ำเงินจะอยู่ด้านล่างหมายความว่าหากจุดอ้างอิงระยะทางเดิม ขยายตัวเพิ่มขึ้นไม่เกิน 462.13% การตัดสินใจใช้การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว จะยังคงให้ต้นทุนรวมต่อปีที่ต่ำกว่า และระบบรางพื้นที่ฝั่งขวาของจุดตัด เส้นสีส้มได้พลิกกลับมาอยู่ด้านล่าง หมายความว่าเมื่อใดก็ตามที่ระยะทางในการขนส่งวัตถุใด ถูกปรับเปลี่ยนเกินกว่า 462.13% ของระยะทางฐาน ระบบขนส่งแบบผสมผสานทางถนนและทางราง จะกลายเป็นโมเดลที่คุ้มค่าที่สุด

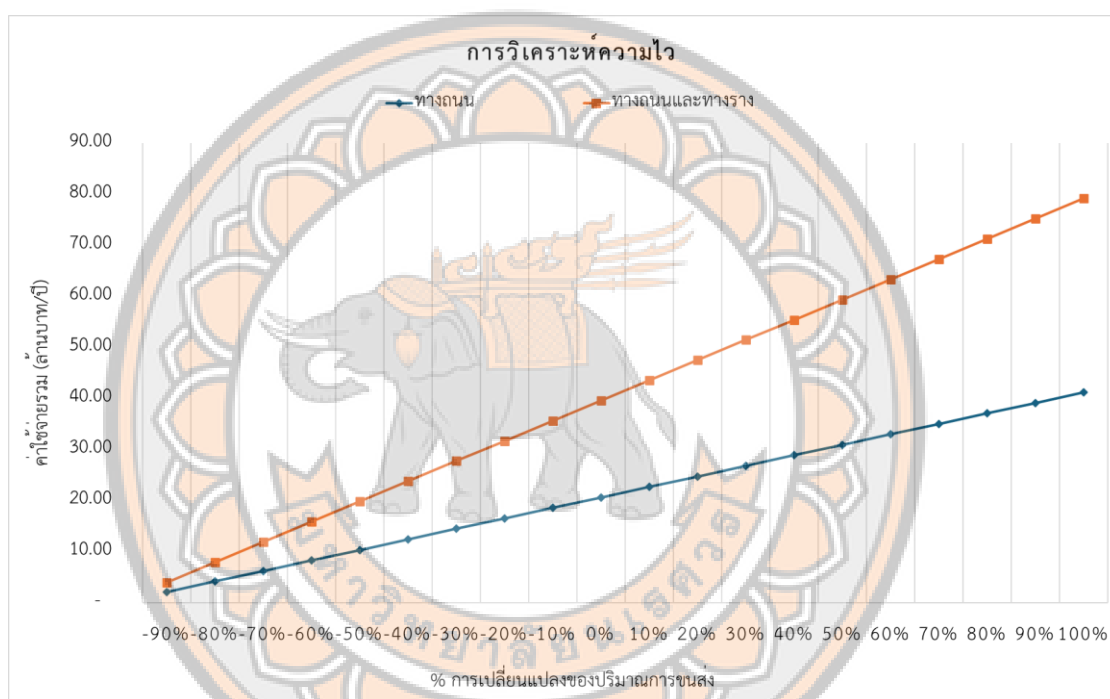
2) เปลี่ยนแปลงราคาน้ำมัน



ภาพ 39 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน Model III

จากภาพที่ 39 ทำการวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 470.00% เกิดการตัดกันขึ้นของทั้งสองเส้น จากเดิมที่การขนส่งทางถนน (เส้นสีน้ำเงิน) มีผลรวมต่ำกว่า ทางถนนและทางราง (เส้นสีส้ม) แต่เมื่อเลย 470.00% ขึ้นไปแล้วนั้น การขนส่งแบบผสมผสานทางถนนและทางรางมีผลรวมของค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า เมื่อราคาน้ำมันสูงขึ้น

3) เปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ



ภาพ 40 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model III

จากภาพที่ 40 ทำการวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ จากจุดเริ่มต้นการขนส่งทางถนนและทางรางมีผลรวมของค่าใช้จ่ายสูงกว่าทางถนนเพียงอย่างเดียวไม่มากนัก แต่ทว่าเมื่อมีปริมาณในการขนส่งเพิ่มขึ้น การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียวกลับมีความคุ้มค่ามากกว่า และจากการลดปริมาณในการขนส่งลง ก็ยังพบว่าการขนส่งทางถนนนั้น มีผลรวมในการขนส่งที่ต่ำกว่าทางถนนและทางรางอยู่ดี เนื่องด้วยปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลต่อการใช้คลังสินค้าของรูปแบบการขนส่งทางถนนและทางราง จึงมีผลรวมที่สูงกว่ามากอย่างมีนัยสำคัญ

4.5 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV

4.5.1 ฟังก์ชันเป้าประสงค์ (Objective Function) การขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงานผลิต RDF และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงานไปยังลูกค้าปลายทาง โดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำที่สุด และคำนึงถึงปริมาณความจุของคลังสินค้าด้วย คำนวนจากเส้นทางดังต่อไปนี้ ก) ซัพพลายเออร์ และโรงงาน RDF ข) ซัพพลายเออร์ และคลังสินค้า ค) คลังสินค้า และโรงงาน RDF ง) โรงงาน RDF และโรงงานปูนซีเมนต์

TEW = ปริมาณการปล่อย CO_2 รวม (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี)

$$\begin{aligned}
 Min TEW = & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V EW_{ikv} \times Q_{ikv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V EW_{ijv} \times A_{ijv} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V EW_{ijkv} \times S_{ijkv} \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^V EW_{klv} \times U_{klv}
 \end{aligned} \tag{50}$$

4.5.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

การขนส่งวัตถุดิบขาออกจากซัพพลายเออร์แต่ละรายจะมีปริมาณรวมเท่ากับวัตถุดิบที่ซัพพลายเออร์นั้นมีอยู่ โดยอาจจะเป็นการส่งตรงไปยังโรงงาน RDF หรือส่งผ่านคลังสินค้า

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V Q_{ikv} + \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V A_{ijv} = S_i, \forall i \tag{51}$$

ปริมาณวัตถุดิบที่ผ่านคลังสินค้าแต่ละแห่งต้องไม่เกินความจุของคลังสินค้า

$$\sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V A_{ijv} \leq CAPWH_j, \forall j \tag{52}$$

หากมีการใช้คลังสินค้า ปริมาณวัตถุดิบขาเข้าต้องเท่ากับขาออกเสมอสำหรับซัพพลายเออร์แต่ละแห่งผ่านคลังสินค้าแต่ละแห่ง

$$\sum_{v=1}^V A_{ijv} = \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V S_{ijkv}, \forall i, j \tag{53}$$

วัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ทั้งหมดต้องส่งถึงโรงงาน RDF

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V Q_{ikv} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V S_{ijkv} = \sum_{i=1}^I S_i \quad (54)$$

โรงงานปูนซีเมนต์ทั้งหมดได้รับผลิตภัณฑ์ RDF

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V U_{klv} = D_l, \forall l \quad (55)$$

$$Q_{ikv}, A_{ijv}, S_{ijkv}, U_{klv} \geq 0, \forall i, j, k, l, v \quad (56)$$

4.5.3 การคำนวณการปล่อย CO₂ ของยานพาหนะแต่ละประเภท

สำหรับการขนส่งวัตถุดิบ สมการคำนวณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งจากซัพพลายเออร์ตรงไปยังโรงงาน RDF โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8 ขนส่งทางถนน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$EW_{ikv} = D_{ik} \times E_v, \forall i, k, v \quad (57)$$

สำหรับ EW_{ijv} เป็นการขนส่งวัตถุดิบ ไปยังคลังสินค้า

$$EW_{ijv} = D_{ij} \times E_v, \forall i, j, v \quad (58)$$

สมการคำนวณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบจากคลังสินค้าไปยังโรงงาน RDF โดยยานพาหนะประเภทที่ 9 ซึ่งขนส่งทางราง ด้วยตู้คอนเทนเนอร์

$$EW_{ijkv} = D_{ijk} \times E_v, \forall i, j, k, v \quad (59)$$

สำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF จากโรงงาน RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ โดยยานพาหนะประเภทที่ 1 - 8

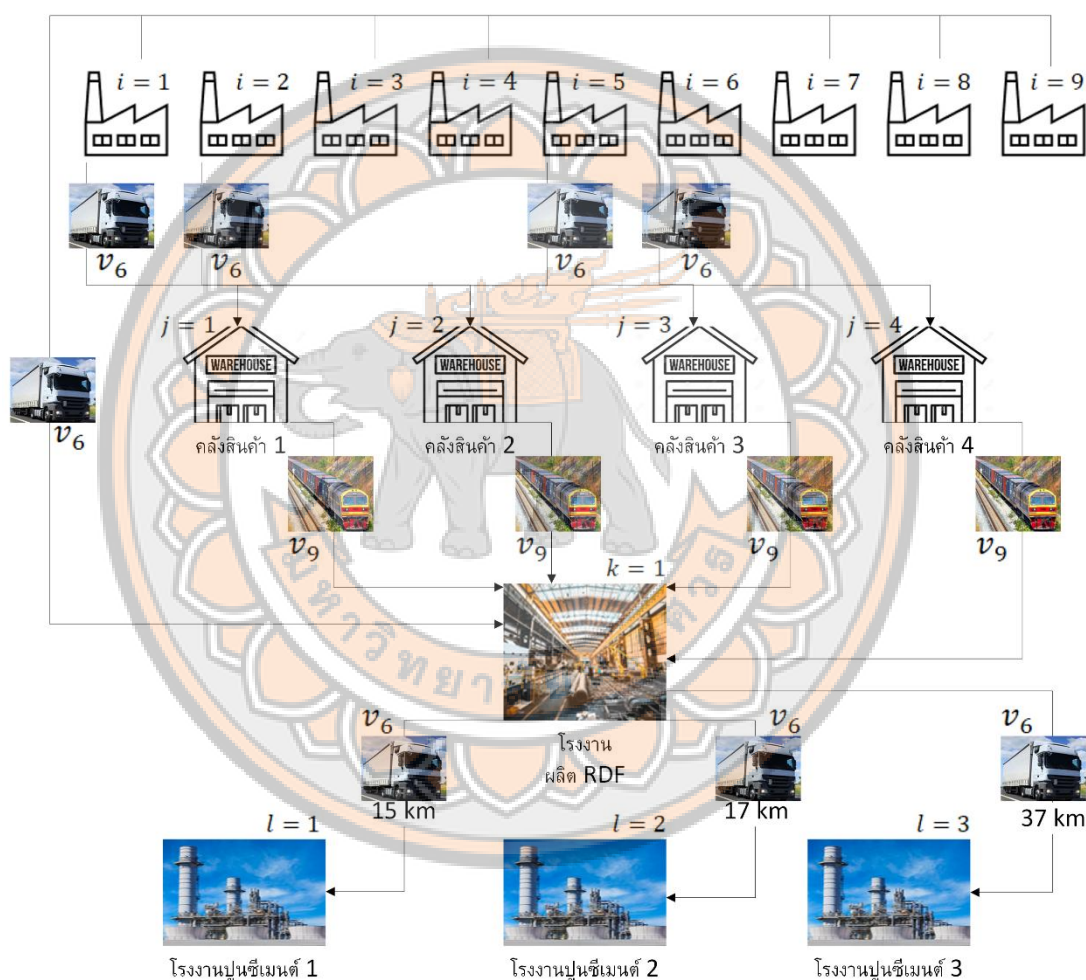
$$EW_{klv} = D_{kl} \times E_v, \forall k, l, v \quad (60)$$

สมการคำนวณค่าขนส่งจากโรงงาน RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ ของยานพาหนะประเภทที่ 9

$$EW_{klv} = D_{kl} \times E_v, \forall k, l, v \quad (61)$$

4.5.4 การขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ที่ส่งผลให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงงานการศึกษา

จากเส้นทางและยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF ของโรงงานการศึกษาในปัจจุบัน ได้มีการปล่อย CO₂ สูงถึง 554,704.74 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี แสดงดังตารางที่ 25 เนื่องจากโรงงานการศึกษาเลือกใช้รถกระบะบรรทุกทุกพ่วง 22 ล้อ ซึ่งเป็นยานพาหนะขนาดใหญ่ จึงมีปริมาณการปล่อย CO₂ ที่สูงตามไปด้วย

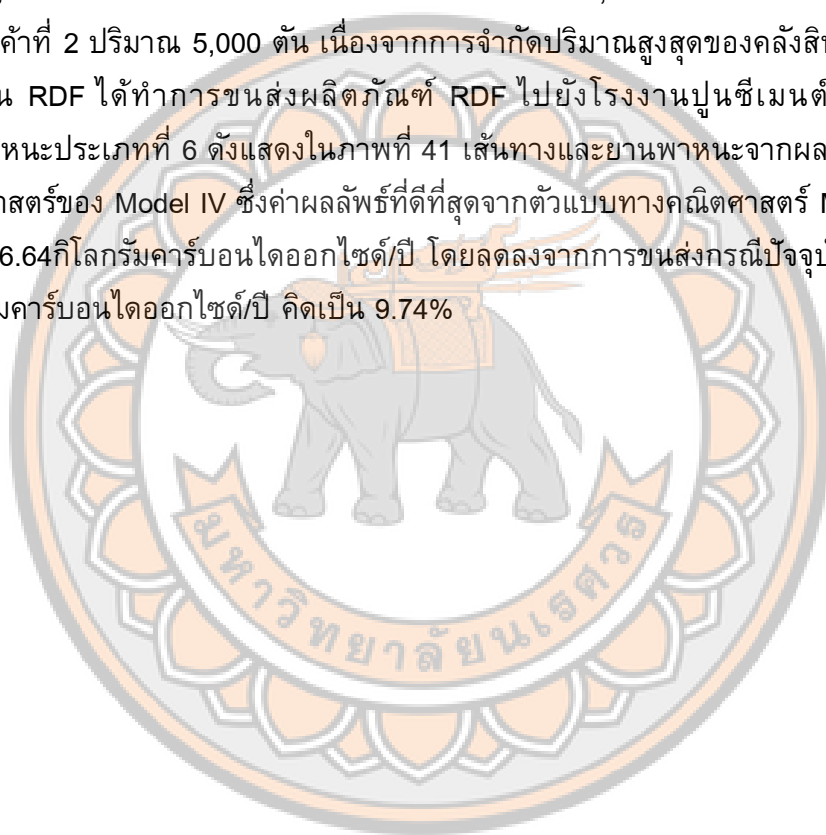


ภาพ 41 เส้นทางและยานพาหนะจากผลลัพธ์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model IV

4.5.5 ผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV

ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV ดังตารางที่ 26 ได้มีการแสดงรูปแบบในการขนส่งวัตถุดิบ จากซัพพลายเออร์ที่ 1 ถึง 9 ไปยังโรงงาน RDF ทั้งทางตรง และ

ส่งผ่านคลังสินค้าทั้ง 4 แห่ง และการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ โดยพิจารณาจากยานพาหนะทั้ง 9 ประเภท ดังตารางที่ 11 พบว่าซัพพลายเออร์ที่ 3, 4, 7, 8, และ 9 นั้น เลือกใช้ยานพาหนะประเภทที่ 6 มาใช้ขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงาน RDF โดยการส่งตรงและซัพพลายเออร์ที่ 2, 5 และ 6 นั้น ได้เลือกยานพาหนะประเภทที่ 6 ในการขนส่งวัตถุดิบไปยังคลังสินค้าแต่ละแห่ง จากนั้นคลังสินค้าได้ทำการส่งวัตถุดิบต่อมายังโรงงาน RDF ทางรางโดยยานพาหนะประเภทที่ 9 ผ่านตู้คอนเทนเนอร์ และพบว่าซัพพลายเออร์ที่ 1 นั้น ได้ทำการแบ่งปริมาณวัตถุดิบในการขนส่ง ออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยที่ส่วนแรกเป็นการส่งตรงไปยังโรงงาน RDF 2,800 ตัน ส่วนที่ 2 ส่งผ่านคลังสินค้าที่ 1 จำนวน 4,000 ตัน และส่วนที่สุดท้าย ส่งผ่านคลังสินค้าที่ 2 ปริมาณ 5,000 ตัน เนื่องจากการจำกัดปริมาณสูงสุดของคลังสินค้า และสุดท้ายโรงงาน RDF ได้ทำการขนส่งผลิตภัณฑ์ RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ทั้ง 3 แห่งด้วยยานพาหนะประเภทที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 41 เส้นทางและยานพาหนะจากผลลัพธ์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Model IV ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV เท่ากับ 500,666.64 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี โดยลดลงจากการขนส่งกรณีปัจจุบันถึง 54,038.10 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี คิดเป็น 9.74%



ตาราง 25 ปริมาณการปล่อย CO₂ ในการขนส่งของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน

จาก	ไปยัง	รูปแบบการขนส่ง	ปริมาณการปล่อย CO ₂ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ตัน)	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน)	ปริมาณการปล่อย CO ₂ รวม (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี)
ชีพลายเออร์ 1	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	8.04	11,800.00	94,895.01
ชีพลายเออร์ 2	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	7.09	2,800.00	19,860.12
ชีพลายเออร์ 3	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	6.89	1,000.00	6,893.10
ชีพลายเออร์ 4	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	7.34	1,900.00	13,951.04
ชีพลายเออร์ 5	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	10.99	1,000.00	10,989.00
ชีพลายเออร์ 6	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	5.00	2,100.00	10,489.50
ชีพลายเออร์ 7	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	7.99	8,400.00	67,132.80
ชีพลายเออร์ 8	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	7.99	12,600.00	100,699.20
ชีพลายเออร์ 9	โรงงาน RDF	ยานพาหนะ 7	8.49	18,900.00	160,489.35
โรงงาน RDF	โรงงานปุ๋ยซีเมนต์ 1	ยานพาหนะ 7	0.75	20,500.00	15,359.63
โรงงาน RDF	โรงงานปุ๋ยซีเมนต์ 2	ยานพาหนะ 7	0.85	20,000.00	16,983.00
โรงงาน RDF	โรงงานปุ๋ยซีเมนต์ 3	ยานพาหนะ 7	1.85	20,000.00	36,963.00
					554,704.74

ตาราง 26 ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model IV

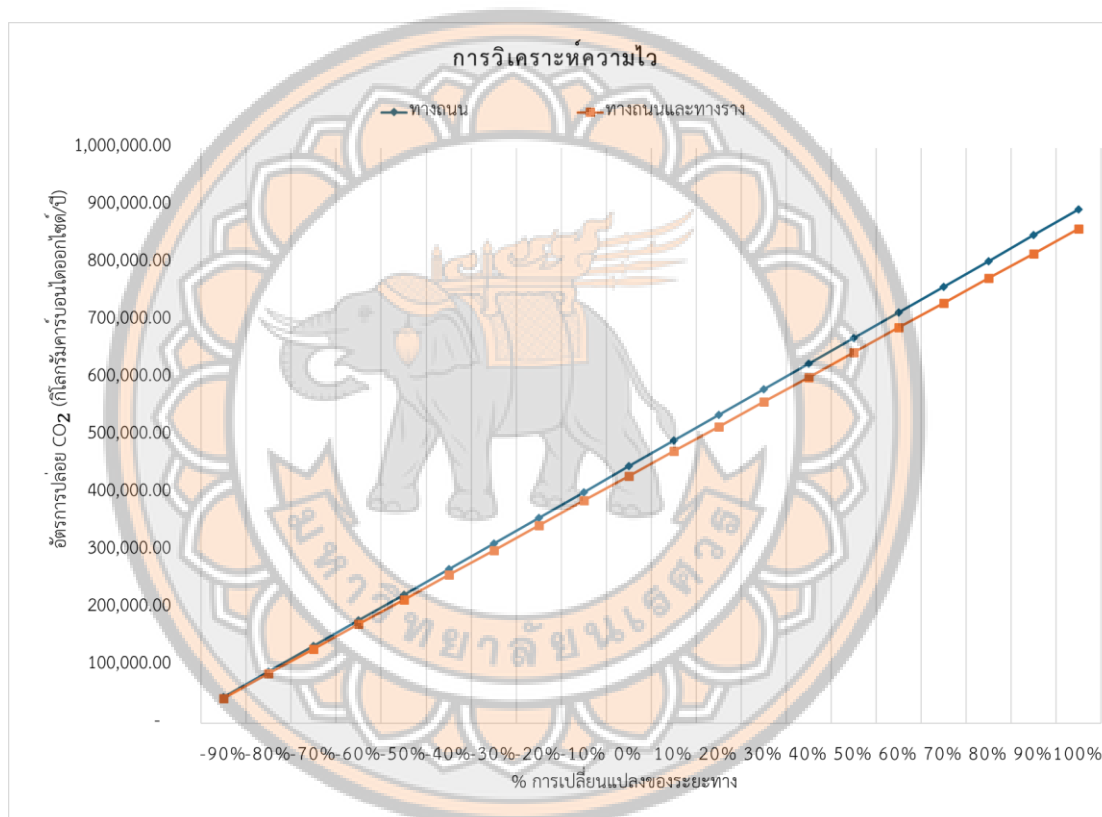
จาก	ไปยัง	รูปแบบการขนส่ง	ปริมาณที่ขนส่ง (ตัน/ปี)	ปริมาณการปล่อย CO ₂ (kgCO ₂ /ตัน)	ปริมาณการปล่อย CO ₂ รวม (kgCO ₂ /ปี)
<i>i</i> 1	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 6	2,800	7.40	20,714.26
<i>i</i> 1	<i>j</i> 1	ยานพาหนะ 6	4,000	2.62	10,476.60
<i>j</i> 1	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 9	4,000	4.44	17,760.00
<i>i</i> 1	<i>j</i> 2	ยานพาหนะ 6	5,000	1.33	6,662.75
<i>j</i> 2	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 9	5,000	5.55	27,750.00
<i>i</i> 2	<i>j</i> 3	ยานพาหนะ 6	2,800	1.19	3,345.16
<i>j</i> 3	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 9	2,800	4.81	13,468.00
<i>i</i> 3	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 6	1,000	6.34	6,341.1
<i>i</i> 4	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 6	1,900	6.75	12,833.84
<i>i</i> 5	<i>j</i> 1	ยานพาหนะ 6	1,000	3.54	3,538.15
<i>j</i> 1	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 9	1,000	4.44	4,440.00
<i>i</i> 6	<i>j</i> 4	ยานพาหนะ 6	2,100	1.75	3,666.81
<i>j</i> 4	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 9	2,100	1.85	3,885.00
<i>i</i> 7	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 6	8,400	7.35	61,756.80
<i>i</i> 8	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 6	12,600	7.35	92,635.20
<i>i</i> 9	<i>k</i> 1	ยานพาหนะ 6	18,900	7.81	147,637.35
<i>k</i> 1	<i>l</i> 1	ยานพาหนะ 6	20,500	0.69	14,129.63
<i>k</i> 1	<i>l</i> 2	ยานพาหนะ 6	20,000	0.78	15,623.00
<i>k</i> 1	<i>l</i> 3	ยานพาหนะ 6	20,000	1.70	34,003.00
					500,666.64

(คำย่อ: *i* = ซัพพลายเออร์, *j* = คลังสินค้า, *k* = โรงงาน RDF, *l* = โรงงานปูนซีเมนต์)

4.5.6 การวิเคราะห์ความไว Model IV

โดยที่การวิเคราะห์ความไวของโมเดลนี้ ไม่มีการคำนึงถึงปริมาณความจุของคลังสินค้า เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเปรียบเทียบค่าปริมาณการปล่อย CO₂ ของการขนส่งวัตถุดิบ ระหว่างทางถนน กับทางถนนและทางราง หากมีข้อจำกัดในด้านของความจุคลังสินค้าแล้วนั้น จะไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่แท้จริงของการขนส่งทางถนนและทางรางได้

1) เปลี่ยนแปลงระยะทาง



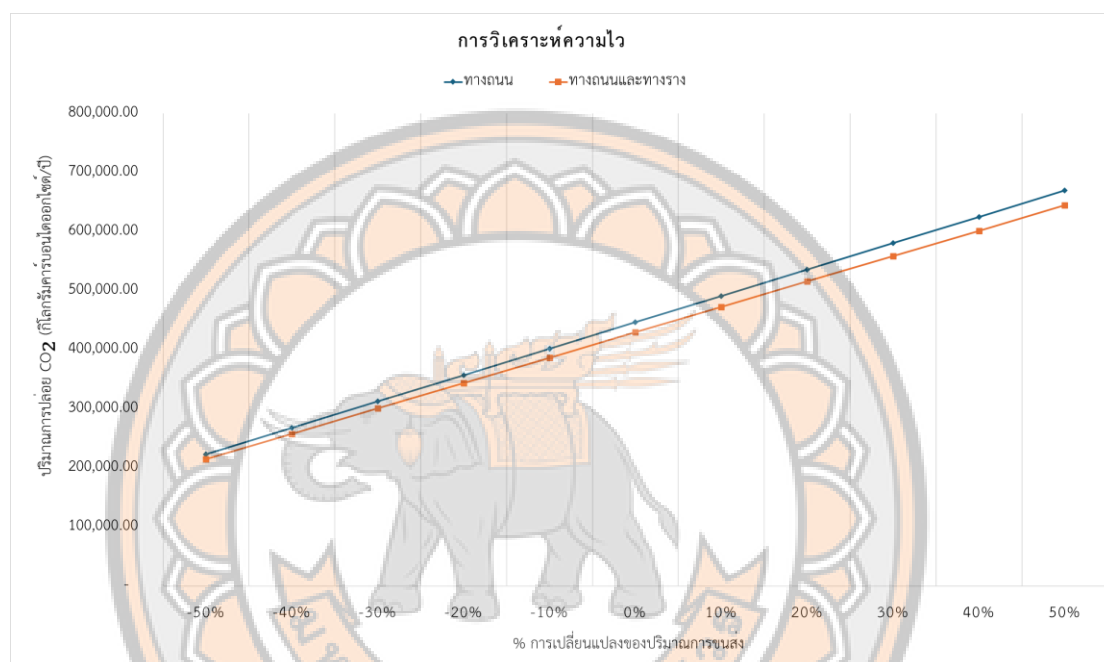
ภาพ 42 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง Model IV

จากภาพที่ 42 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง ซึ่งเส้นสีน้ำเงิน แทนการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ไปยังโรงงาน RDF ด้วยการขนส่งทางถนน เป็นการขนส่งทางตรง และเส้นสีส้มคือการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์ผ่านคลังสินค้าทั้ง 4 แห่ง ไปยังโรงงาน RDF โดยเป็นการขนส่งทางถนนและทางรางร่วมกัน

จากผลการวิเคราะห์ความไว Model IV แสดงให้เห็นว่าจากจุดเริ่มต้นนั้น การขนส่งทางถนน กับ การขนส่งทางถนนและทางรางร่วมกันนั้น มีปริมาณการปล่อย CO₂ ที่ไม่ต่างกันมาก แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะทางแล้วนั้น จะพบว่าอัตราการปล่อย CO₂ ของการขนส่ง

ทางถนนเพียงอย่างเดียว จะมีค่าที่สูงกว่าการขนส่งทางถนนและทางรางร่วมกัน โดยเมื่อระยะทางมากขึ้น การขนส่งทางถนนและทางรางจะมีอัตราการปล่อย CO₂ ที่ต่ำกว่าทางถนนเพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด

2) เปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ



ภาพ 43 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ Model IV

จากภาพที่ 43 การวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ แสดงให้เห็นว่าการขนส่งทางถนนและทางรางนั้นมีผลรวมของค่าปริมาณการปล่อย CO₂ ที่ต่ำกว่าทางถนนเพียงอย่างเดียว และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการขนส่งวัตถุดิบขึ้น จะสังเกตได้ว่าการขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว นั้น มีอัตราการปล่อย CO₂ ที่สูงกว่าทางถนนและทางรางมาก

4.6 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ

ดังแสดงในตารางที่ 27 สรุปผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ โดยแต่ละ Model มีเป้าประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่ง Model I : Minimizing Total Costs ได้ค่าที่ดีที่สุดของค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 26,023,038.17 บาท/ปี ลดลงจากปัจจุบันถึง 749,435.19 บาท/ปี คิดเป็น 2.80% ของค่าใช้จ่ายรวมในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา

Model II : Minimizing Total Carbon Emissions ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เท่ากับ 491,007.75 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี ซึ่งลดลงจากปัจจุบัน 64,607.08 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี หรือคิดเป็น 11.63%

Model III : Minimizing Total Costs and Carbon Emissions Costs ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เท่ากับ 26,118,046.45 บาท/ปี ลดลงจากเดิมถึง 751,677.36 บาท/ปี โดยคิดเป็น 2.79% ของค่าใช้จ่ายรวมกรณีศึกษา

Model IV : Minimizing Total Carbon Emissions (เงื่อนไขด้านความจุของคลังสินค้า) ได้ค่าปริมาณการปล่อย CO₂ เท่ากับ 500,666.64 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี โดยลดลงจากการขนส่งกรณีปัจจุบันถึง 54,038.10 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ปี คิดเป็น 9.74%

ตาราง 27 สรุปผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ

Model	กรณีปัจจุบัน	ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์	ลดลง	คิดเป็น %
I	26,772,473.36	26,023,038.17	749,435.19	2.80
II	555,614.83	491,007.75	64,607.08	11.63
III	26,869,723.81	26,118,046.45	751,677.36	2.79
IV	554,704.74	500,666.64	54,038.10	9.74

(Model I และ Model III (หน่วย : บาท/ปี), Model II และ Model IV (หน่วย : kgCO₂/ปี))

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึง ผลสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ เพื่อนำเสนอประเด็นงานวิจัยในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหานี้สามารถนำไปต่อยอดในอนาคตได้

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบรูปแบบทางเลือกการขนส่งรูปแบบเดียว กับทางเลือกในการขนส่งหลายรูปแบบของโรงงานเชื้อเพลิงขยะกรณีศึกษา โดยแบ่งการพิจารณาหารูปแบบสำหรับการขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานกรณีศึกษาออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การขนส่งทางถนนด้วยรถบรรทุก และการขนส่งทางรางด้วยรถไฟร่วมกับรถบรรทุกทางถนนซึ่งจากผลลัพธ์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ Model I สามารถลดค่าใช้จ่ายรวมได้เฉลี่ยถึง 2.80% เช่นเดียวกันกับ Model III เป็นการลดค่าใช้จ่ายรวมโดยคำนวณค่าภาษีคาร์บอนเข้าไปด้วย สามารถลดค่าใช้จ่ายรวมได้ถึง 2.79% และ Model II กับ Model IV เป็นการลดค่าปริมาณการปล่อย CO₂ ซึ่งลดลงได้ 11.63% และ 9.74% ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ความไว Model I โดยการเปลี่ยนแปลงระยะทาง ราคาน้ำมัน และปริมาณการขนส่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะทางที่ 472.24% และการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมันที่ 471.80% นั้น เกิดการตัดกันขึ้นของจุดคุ้มทุนในการขนส่งทางถนนรูปแบบเดียวกับการขนส่งทางถนนและทางราง แต่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ ไม่พบจุดตัดของจุดคุ้มทุน ส่งผลให้การขนส่งทางถนนเพียงอย่างเดียว ถูกกว่าการขนส่งทางถนนและทางรางร่วมกัน จาก Model II ทำการวิเคราะห์ความไวในส่วนของการเปลี่ยนแปลงระยะทาง และปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ ซึ่งพบว่า ไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงค่าใดๆ การขนส่งทางถนนและทางราง ก็มีปริมาณการปล่อย CO₂ น้อยกว่าทางถนนเพียงอย่างเดียวอยู่เสมอ Model III ได้วิเคราะห์ความไวทั้ง 3 ส่วน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของระยะทางที่เพิ่มขึ้นถึง 462.13% และราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้น 470.00% ได้พบจุดตัดกันของจุดคุ้มทุน จากเดิมการขนส่งทางถนนมีค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำกว่า ทำให้การขนส่งทางถนนและทางรางมีผลรวมของค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเมื่อระยะทางและราคาน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ เมื่อปริมาณการขนส่งยิ่งสูง จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งทางถนนและทางรางเพิ่มขึ้นสูงตามไปด้วย และ Model IV ได้ทำการวิเคราะห์ความไวในส่วนของการเปลี่ยนแปลงระยะทาง และปริมาณการขนส่งวัตถุดิบ พบว่า

การขนส่งทางถนนและทางรางนั้น มีปริมาณการปล่อย CO₂ ที่ต่ำกว่าการขนส่งทางถนนไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม

5.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ทำการคิดคำนวณเฉพาะค่า Emission ที่เกิดจากการขนส่งเพียงเท่านั้น ทั้งนี้งานวิจัยในอนาคตสามารถวิเคราะห์ต่อยอดในส่วนของการคิดค่า Emission ที่เกิดจากการขนถ่าย และกิจกรรมภายในคลังสินค้า

2. งานวิจัยนี้ได้พิจารณาพาหนะที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และแก๊ส CNG เท่านั้น หากในอนาคตมีการเพิ่มประเภทพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกเข้ามารวมพิจารณาด้วย จะส่งผลให้งานวิจัยมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้น

3. งานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงปริมาณความจุสูงสุดของคลังสินค้าที่เท่ากัน สามารถนำไปต่อยอดในการพิจารณาถึงปริมาณความจุของคลังสินค้าที่ไม่เท่ากัน อาจทำให้เกิดความซับซ้อนของปัญหามากขึ้น

4. งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษาเพียงที่เดียวเท่านั้น หากในอนาคตมีการเก็บรวบรวมข้อมูลจากโรงงานเชื้อเพลิงขยะอื่นๆ มาร่วมพิจารณาด้วย อาจทำให้งานวิจัยมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

5. จากเป้าหมายการลดต้นทุนรวมตัวแบบทางคณิตศาสตร์เลือกใช้พาหนะประเภทที่ 5 ในการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์มายังโรงงานกรณีศึกษานี้ เนื่องจากมีอัตราสิ้นเปลืองที่เหมาะสมกับระยะทางเฉลี่ย 100 – 220 กิโลเมตร และเลือกใช้พาหนะประเภทที่ 7 สำหรับส่ง RDF ไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ เพราะเหมาะสำหรับการขนส่งปริมาณมาก ในระยะทางที่สั้น 15 – 37 กิโลเมตร เพื่อให้ต้นทุนต่อหน่วยต่ำที่สุด

6. จากเป้าหมายการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เลือกใช้พาหนะประเภทที่ 6 และประเภทที่ 9 ร่วมกัน ในการขนส่ง เนื่องจากพาหนะทั้ง 2 ประเภทนี้ มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่าพาหนะประเภทอื่นที่นำมาใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้

7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากมาตรการปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (CBAM) ในแง่ของการสร้างมูลค่าเพิ่มด้านคาร์บอนเครดิตให้แก่โรงงานปูนซีเมนต์ ที่นำเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จากโรงงานกรณีศึกษาไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิต

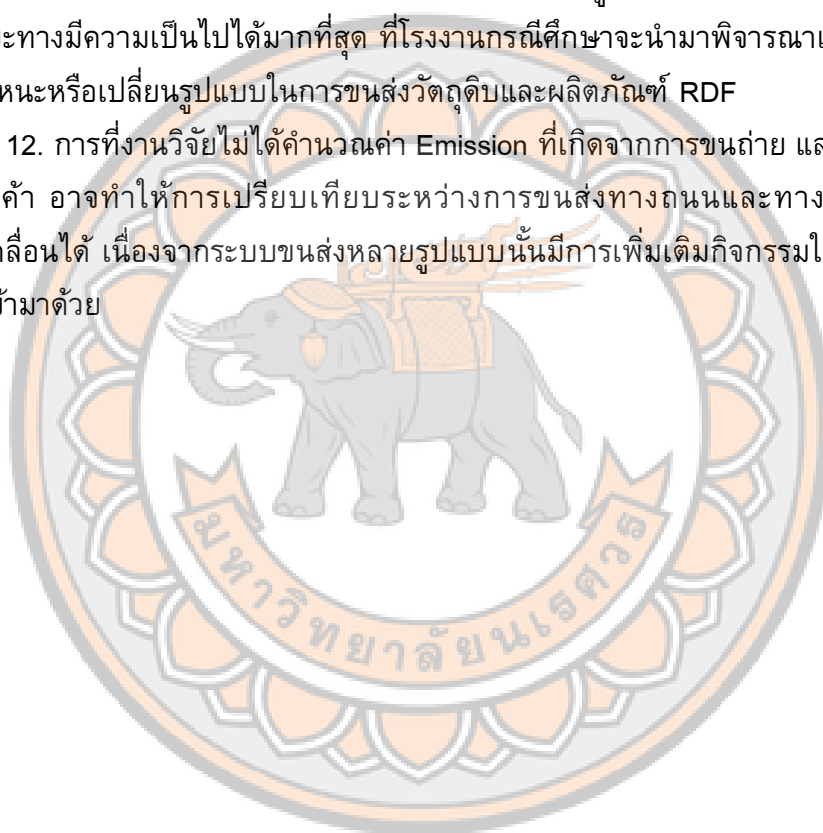
8. สำหรับการขนส่งวัตถุดิบนั้น ความชื้น การปนเปื้อน และการสูญเสียจากกระบวนการต่างๆ อาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนและการปล่อยมลพิษได้

9. ปริมาณวัตถุดิบที่มีเพียงพอเสมอในการตอบสนองต่อความต้องการนั้นในความเป็นจริงอาจยากในเชิงปฏิบัติ เนื่องด้วยความพร้อมใช้งานและคุณภาพของวัตถุดิบมักเป็นข้อจำกัดที่สำคัญ

10. จากข้อตกลงเบื้องต้นที่ว่ามีความจุของยานพาหนะเพียงพอเพื่อตอบสนองความต้องการในการขนส่ง เป็นการสมมติว่ามีกำลังการขนส่งที่เพียงพออาจปกปิดข้อจำกัดที่แท้จริงของจำนวนรถ ตารางเวลา และการให้บริการทางรถไฟ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พยายามให้ยานพาหนะเหล่านี้เป็นรถเช่า ที่พร้อมในการใช้งานเสมอ

11. ภายใต้เงื่อนไขที่ทำการวิเคราะห์ความไวนั้น ผู้วิจัยเห็นสมควรว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะทางมีความเป็นไปได้มากที่สุด ที่โรงงานกรณีศึกษาจะนำมาพิจารณาเลือกประเภทของยานพาหนะหรือเปลี่ยนรูปแบบในการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ RDF

12. การที่งานวิจัยไม่ได้คำนวณค่า Emission ที่เกิดจากการขนถ่าย และกิจกรรมภายในคลังสินค้า อาจทำให้การเปรียบเทียบระหว่างการขนส่งทางถนนและทางรถไฟเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากระบบขนส่งหลายรูปแบบนั้นมีการเพิ่มเติมกิจกรรมในการเปลี่ยนถ่ายสินค้าเข้ามาด้วย





กรมการขนส่งทางราง กระทรวงคมนาคม. (2568).

<https://www.drt.go.th/>

กรมควบคุมมลพิษ. (2562). แนวทางการจัดการขยะมูลฝอยเพื่อผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF).

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2023). รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ประจำปี ค.ศ.

2023. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2024). รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ประจำปี ค.ศ.

2024. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2020). คู่มือการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จาก

ขยะมูลฝอยชุมชน. กระทรวงพลังงาน.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2024). ทะเบียนโรงงานผลิตเชื้อเพลิงจากขยะ.

กระทรวงอุตสาหกรรม.

การจัดหาไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในรูปแบบ Feed-in Tariff (FiT) ปี 2565 - 2573 สำหรับ

กลุ่มไม่มีต้นทุนเชื้อเพลิง - สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน

<https://www.erc.or.th/th/power-purchasing3/2697>

เจาะลึกมาตรการส่งเสริม การใช้ Local Content นำร่องกลุ่มอุตสาหกรรม EV และเครื่องใช้ไฟฟ้า

ติดปีกผู้ประกอบการไทยสู่ Supply Chain โลกา

<https://www.salika.co/2025/07/14/local-content-industry-thailand-investment-policy/>

ชุดิกา เกียรติเรืองไกร, สมชาย หาญหิรัญ, และ วิภาวี ศรีสุข. (2020). การวิเคราะห์มูลค่าการ

ส่งออกของภาคอุตสาหกรรมไทย. วารสารเศรษฐศาสตร์ประยุกต์, 27(2), 45-68.

ณัฐ ธารพานิช. (2562). ผลกระทบแรงงานและมูลค่าเพิ่มของภาคอุตสาหกรรมไทย. วารสาร

เศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 15(1), 23-41.

ธนพร เพชรจิรพงศ์. (2025). แนวโน้มตลาดเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ปี 2025. ศูนย์วิจัยกสิกรไทย.

ธนพร สมใส. (2567). ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

ของโลจิสติกส์ขาออก ในอุตสาหกรรมน้ำตาล. วิทยานิพนธ์บัณฑิตมหาวิทยาลัยนครสวรรค์.

นิพนธ์ วิชัยกุล, สมศักดิ์ ประสานทอง, และ อรุณี แสงจันทร์. (2022). คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

ขยะ (RDF) ที่ผลิตจากขยะมูลฝอยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.

วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย, 36(2), 55-72.

ประเสริฐ แสงทอง. (2022). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจลงทุนในโรงไฟฟ้าขยะชุมชนในประเทศไทย

ไทย [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. หอสมุดแห่ง

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535. (2535, 29 มีนาคม). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 109 ตอนที่ 38 หน้า 27-71.
- พิชัย ถิ่นสันติสุข. (2562). การแปรรูปขยะมูลฝอยเป็นพลังงาน แนวทางการจัดการขยะอย่างยั่งยืน. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 23(4), 12-28.
- พิมพ์ใจ สุวรรณวงศ์, ธีรยุทธ วิไลวัลย์, และ กมลชนก ศรีประเสริฐ. (2023). แนวโน้มตลาดเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในประเทศไทย. *วารสารพลังงานทดแทน*, 11(2), 89-108.
- วิภาวี ศรีสุข, ประยุทธ์ วงศ์สวัสดิ์, และ สุรัชย์ แสงอรุณ. (2021). การใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ทดแทนถ่านหินในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 28(3), 112-129.
- สมชาย วงศ์สวัสดิ์, อนุชา พลอยประดับ, และ รัตนา ศรีวิชัย. (2020). ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จากขยะมูลฝอยชุมชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 17(1), 34-52.
- สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย. (2024). *รายงานประจำปี 2024*. สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย.
- สรุปนโยบายและแผนพลังงานของประเทศไทย ตอนที่ 2 - Locals Thai PBS <https://localsthaipbs.net/energy-transition-plan/>
- สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2566).
- สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2024). *รายงานสถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทย ประจำปี 2024*. สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2021). *คู่มือการจำแนกประเภทเชื้อเพลิงขยะตามมาตรฐาน ASTM*. กระทรวงพลังงาน.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2022). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP 2018)*. กระทรวงพลังงาน.
- อรรถพล จันท์สุวรรณ. (2023). ผลกระทบของมาตรการ CBAM ต่ออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทย. *วารสารบริหารธุรกิจและเศรษฐศาสตร์*, 10(2), 78-95.
- อาชนัน เกาะไพบุญย์, สมบัติ วงศ์ประเสริฐ, และ นิรันดร์ ศิริมงคล. (2558). การเติบโตของภาคอุตสาหกรรมไทยในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา. *วารสารเศรษฐศาสตร์ประยุกต์*, 22(1), 15-38.

- Al-Anbari, . (2025). Mathematical modeling for supply chain optimization.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM E856-19 Standard definitions of terms and abbreviations relating to physical and chemical characteristics of refuse derived fuel*. ASTM International.
- Ansari, M., Khan, S. A., & Shah, M. A. (2024). Optimization of solid waste management networks for refuse-derived fuel production: A green supply chain perspective. *Waste Management*, 174, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.015>
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification A review. *Waste Management*, 32(4), 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- Ardliana T, Pujawan IN, Siswanto N. A mixed-integer linear programming model for multiechelon and multimodal supply chain system considering carbon emission. *Cogent Eng*. 2022;9(1):2044589. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2044589>.
- Baykasoğlu, A., Subulan, K. (2021). An optimization model or metaheuristic approach for intermodal freight transportation / Green vehicle routing problem.
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2010). *Linear Programming and Network Flows* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.04.004>
- Best, J. W. (1981). *Research in education* (4th ed.). Prentice-Hall.
- Bortolini M, Faccio M, Ferrari E, Gamberi M, Pilati F. Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization. *J Food Eng* 2016;174:56–67. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.014>
- Bortolini M, Calabrese F, Galizia FG, Mora C. A three-objective optimization model for mid-term sustainable supply chain network design [Article]. *Comput Ind Eng* 2022;168.
- Brüning Group. (2024). "RDF: Block Trains from Italy to Scandinavia". Available at: [bruening-group.com](https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108131) <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108131>. Article 108131.
- Coyle, J. J., Novack, R. A., Gibson, B., & Bardi, E. J. (2016). *Transportation: A Global Supply Chain Perspective*. Cengage Learning.

- Chang, Y. H., Chen, W. C., & Chang, N. B. (1998). Comparative evaluation of RDF and MSW incineration. *Journal of Hazardous Materials*, 58(1-3), 33-45. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00118-0)
- Charnes, A., & Cooper, W. W. (1961). *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. John Wiley & Sons.
- Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, 34(12), 2116-2123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.023>
- Christensen, T. H. (Ed.). (2011). *Solid waste technology and management*. Wiley-Blackwell.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Gastaldi, M. (2014). Sustainable management of waste-to-energy facilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 719-728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.015>
- DFDS. (2023). Refuse-derived fuel (RDF). <https://www.dfds.com/en/freight-ferries-and-logistics/rdf>
- European Commission. (2023). *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)*. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en
- Fathi MR, Zamanian A, Khosravi A. Mathematical modeling for sustainable agri-food supply chain. *Environ Dev Sustain* 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-02992-w> [Article].
- Gug, J., Cacciola, D., & Sobkowicz, M. J. (2015). Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 35, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S., & Wismer, D. A. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-1(3), 296-297.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2021). *Introduction to Operations Research* (11th ed.). McGraw-Hill Education.

- Iacovidou, E., Hahladakis, J., Deans, I., Velis, C., & Purnell, P. (2018). Technical properties of biomass and solid recovered fuel (SRF) co-fired with coal Impact on multi-dimensional resource recovery value. *Waste Management*, 73, 535-545. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.001>
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA Publications.
- Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.
- K.Anwar and M. Türkay Journal of Food Engineering (2025). Inbound logistics optimization for fresh oranges with waste management Vol. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112411>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407-422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Kharrat N, Mrabti N, Hamani N, Elleuch M. A sustainable approach for a collaborative distribution network [Article]. *Transport Eng* 2022;9. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100131>. Article 100131.
- Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, 37, 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6), 853-862.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465.
- McKinnon, A., & Piecyk, M. (2012). Setting targets for reducing carbon emissions from logistics. Logistics Research Centre, Heriot-Watt University.

- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Springer Science & Business Media.
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R. J., Colón, J., Ponsá, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., López, I. C., Vlasopoulos, A., & Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 141, 2013-2044.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
- Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4), 988-1003.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.023>
- Martins CL, Melo MT, Pato MV. Redesigning a food bank supply chain network in a triple bottom line context [Article]. *Int J Prod Econ* 2019;214:234–47.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.011>.
- M. Rajabzadeh and S. M. Mousavi *Journal of Environmental Management* (2023)
 Allocation of products to a heterogeneous fleet of trucks in a cross-docking center based on carbon emissions and costs in food and beverage industry: Novel uncertain solution approaches
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117071>
- Moreno-Camacho CA, Montoya-Torres JR, Jaegler A. Sustainable supply chain network design: a study of the Colombian dairy sector [Article]. *Ann Oper Res* 2023;324(1–2):573–99.
<https://doi.org/10.1007/s10479-021-04463-9>.
- Niziolek, A. M., Onel, O., & Floudas, C. A. (2018). Municipal solid waste to liquid transportation fuels, olefins, and aromatics: Process synthesis, simulation, and techno-economic optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 109, 135-160.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Ouda, O. K. M., Raza, S. A., Nizami, A. S., Rehan, M., Al-Waked, R., & Korres, N. E. (2016). Waste to energy potential A case study of Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 328-340.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>

- Orjuela-Castro JA, Orejuela-Cabrera JP, Adarme-Jaimes W. Logistics network configuration for seasonal perishable food supply chains. *J Ind Eng Manag* 2021;14 (2):135–51.
<https://doi.org/10.3926/jiem.3161> [Article].
- Orjuela-Castro JA, Orejuela-Cabrera JP, Adarme-Jaimes W. Multi-objective model for perishable food logistics networks design considering availability and access. *Opsearch* 2022;59(4):1244–70.
<https://doi.org/10.1007/s12597-022-00594-0> [Article].
- Psomopoulos, C. S., Bourka, A., & Themelis, N. J. (2009). Waste-to-energy A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, 29(5), 1718-1724.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.005>
- Qu, W., Reich, J., & Schonfeld, P. (2016). A multicriteria optimization model for sustainable intermodal freight transport networks. *Journal of Advanced Transportation*, 50(8), 2011–2028.
- Purnomo MRA, Wangsa ID, Rizky N, Jauhari WA, Zahria I. A multi-echelon fish closed-loop supply chain network problem with carbon emission and traceability [Article]. *Expert Syst Appl* 2022;210.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118416>. Article 118416.
- Rada, E. C. (2016). *Solid waste management Policy and planning for a sustainable society*. Apple Academic Press.
- Raquel Pérez. (2023). ¿Qué es el transporte multimodal y cuál es su importancia? December 22, 2023 by Raquel Pérez
<https://hedyla.com/en/multimodal-transport-and-its-importance/>
- Rodrigue, J. P. (2020). *The Geography of Transport Systems*. Routledge.
- Rotter, V. S., Kost, T., Winkler, J., & Bilitewski, B. (2004). Material flow analysis of RDF-production processes. *Waste Management*, 24(10), 1005-1021.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.07.015>
- Rohmer SUK, Gerdessen JC, Claassen GDH. Sustainable supply chain design in the food system with dietary considerations: a multi-objective analysis. *Eur J Oper Res*
- Rudi, A., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2016). Resource allocation in intermodal transport networks: A case study of the German bioenergy sector. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 122-143.

- Rudi, A., Fröhling, M., Zimmer, K., & Schultmann, F. (2016). An integrated approach for resource allocation in intermodal transport networks: A case study of the German bioenergy sector. *International Journal of Production Research*, 54(22), 6823–6846.
- Sarc, R., & Lorber, K. E. (2013). Production, quality and quality assurance of refuse derived fuels (RDFs). *Waste Management*, 33(9), 1825-1834.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.004>
- Sarc, R., Lorber, K. E., Pomberger, R., Rogetzer, M., & Sipple, E. M. (2014). Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry. *Waste Management & Research*, 32(7), 565-585.
<https://doi.org/10.1177/0734242X14536462>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research methods for business students* (8th ed.). Pearson Education.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons.
- SteadieSeifi et al. (2014). Multimodal freight transportation planning: A review.
- Shehata et al. (2022). Supply Chain Management of Refuse-Derived Fuel: A Case Study of the Cement Industry
- Pannell, D. J. (1997). Sensitivity analysis of normative economic models: Theoretical framework and practical strategies. *Agricultural Economics*, 16(2), 139-152.
<https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.1997.tb00449.x>
- Prechthai et al. (2008). Sampling and variations of municipal solid waste (MSW) composition prior to incineration in Phuket, Thailand. (*Waste Management*)
- Sever Akdağ, A., Atımtay, A., & Sanin, F. D. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Management*, 47(Part B), 217-224.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.037>
- T. Somsai et al. (2024). Optimizing sustainable multimodal distribution networks in the context of carbon pricing, with a case study in the Thai sugar industry.
<https://www.sciencedirect.com/journal/energy>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.

- Vafaei A, Yaghoubi S, Tajik J, Barzinpour F. Designing a sustainable multi-channel supply chain distribution network: a case study [Article]. *J Clean Prod* 2020;251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119628>. Article 119628
- Velis, C. A., Longhurst, P. J., Drew, G. H., Smith, R., & Pollard, S. J. T. (2010). Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical-biological treatment (MBT) of waste A comprehensive assessment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(12), 979-1105. <https://doi.org/10.1080/10643380802586980>
- Wangsa ID, Vanany I, Siswanto N. An optimization model for fresh-food electronic commerce supply chain with carbon emissions and food waste. *J. Ind. Prod. Eng.* 2023;40(1):1–21. <https://doi.org/10.1080/21681015.2022.2099473>.
- Wicaksono, A. (2020). Sustainable supply chain network design under carbon regulations / Optimizing multimodal transport systems for industrial decarbonization.
- World Bank. (2022). *Trends in solid waste management*. [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends in solid waste management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends-in-solid-waste-management.html)
- Yadollahinia M, Teimoury E, Paydar MM. Tire forward and reverse supply chain design considering customer relationship management [Article]. *Resour Conserv Recycl* 2018;138:215–28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.018>. 2019;273(3):1149–64. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.006> [Article].
- Yakavenka V, Mallidis I, Vlachos D, Iakovou E, Eleni Z. Development of a multi-objective model for the design of sustainable supply chains: the case of perishable food products. *Ann Oper Res* 2020;294(1–2):593–621. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03434-5> [Article].
- Zhao, L., Giannis, A., Lam, W. Y., Lin, S. X., Yin, K., Yuan, G. A., & Wang, J. Y. (2016). Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. *Sustainable Environment Research*, 26(1), 51-54. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.003>