



การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ: กรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติก

จตุฤทธิ์ พรหมศาลา¹ และ โรจณี หอมชาลี^{2*}

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, วิทยาการจัดการสถิติ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ภาควิชาคณิตศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: rojanee.h@msu.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 31 มกราคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 23 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติก ให้ต้นทุนโดยรวมของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับต่ำที่สุด เริ่มจากการหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยการวิเคราะห์กลุ่มแบบขั้นตอนและการวิเคราะห์กลุ่มแบบเคมีน หลังจากนั้นจึงนำตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกที่ได้ไปเป็นตัวแปรตัดสินใจของตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear Programming Model: MINLP) ซึ่งตัวแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการตัดสินใจที่เหมาะสมในการเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก การขนส่งและการเก็บรวบรวมขยะพลาสติก รวมถึงการรีไซเคิลเม็ดพลาสติก โดยตัวแบบถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม LINGO 13.0 นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ความไวโดยปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับความจุและจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกทางเลือก พบว่า หากมีจำนวนศูนย์รวบรวมที่เปิดดำเนินการมาก จะใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่า มีปริมาณการรีไซเคิลพลาสติกน้อยกว่า และมีต้นทุนโดยรวมต่ำกว่า ตรงข้ามหากมีจำนวนศูนย์รวบรวมที่เปิดดำเนินการน้อย แม้จะมีต้นทุนโดยรวมมากกว่า แต่จะสามารถรีไซเคิลพลาสติกได้ในปริมาณมากกว่า ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สามารถนำมาประกอบการพิจารณาแนวทางในการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับของขยะพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การรีไซเคิลพลาสติก; โลจิสติกส์ย้อนกลับ; การโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

Development of Mathematical Model for Reverse Logistics Management: A Case Study of Plastic Recycling

Jaturit Promsala¹ and Rojanee Homchalee^{2*}

¹ Master of Science Program in Statistical Management Science, Mahasarakham University

² Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahasarakham University

* Corresponding author, E-mail: rojanee.h@msu.ac.th

Received: 16 June 2023; Revised: 31 January 2024; Accepted: 23 February 2024

Online Published: 25 April 2024

Abstract: The aim of this research is the development of a mathematical model for reverse logistics management: a case study of plastic recycling. Offers the minimization of the total costs of the reverse logistics system. First, the alternative locations for collecting plastic waste in the Northeast were determined using hierarchical clustering and K-means clustering. These alternative locations were used as decision variables in the Mixed Integer Non-linear Programming Model (MINLP). The model was developed to appropriately decide for opening a plastic waste collection center, the transport and collection of plastic waste, and the recycling of plastic pellets. This proposed model was processed with the LINGO 13.0 program. In addition, the sensitivity analysis by varying parameters regarding the capacity and number of alternative collection centers was proceeded. It was found that if there are many collection centers operating, it will take longer time to process, less plastic recycling, with lower total cost. In contrast, if there are a small number of collection centers operating, despite having more total costs but will be able to recycle more plastic. The results of this research can be used to effectively manage the reverse logistics of plastic waste in the Northeast.

Keywords: Plastic Recycling; Reverse Logistics; Mixed Integer Non-linear Programming



1. บทนำ

ปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปี 2555-2562 และมีแนวโน้มลดลงในปี 2563-2565 โดยในปี 2565 มีปริมาณขยะมูลฝอย 25.70 ล้านตัน เพิ่มขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 2.80 จากปี 2564 ที่มีปริมาณ 24.98 ล้านตัน และยังพบว่าประเทศไทยมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.07 กิโลกรัม/คน/วัน เพิ่มขึ้นจากปี 2564 ที่มีอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.03 กิโลกรัม/คน/วัน ทั้งนี้ปริมาณขยะมูลฝอยในปี 2565 ที่ถูกนำไปกำจัดอย่างถูกต้องมีประมาณ 9.80 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 38.13 ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.60 จากปี 2564 ส่วนที่ถูกกำจัดอย่างไม่ถูกต้อง 7.10 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 27.63 ซึ่งลดลงร้อยละ 9.09 จากปี 2564 นอกจากนี้ยังพบว่า มีขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ประมาณ 8.80 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 34.24 ซึ่งลดลงร้อยละ 11.53 จากปี 2564 [1]

การรีไซเคิลขยะพลาสติกเป็นแนวทางหนึ่งในการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในประเทศไทยยังมีน้อย เพราะต้องใช้เงินลงทุนสูงในการสร้างโรงงานและการดำเนินการ ดังนั้น พลาสติกที่ใช้แล้วจำนวนมากจึงไม่ได้ถูกนำมารีไซเคิลเพื่อใช้ประโยชน์ โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปฝังดินตามแหล่งจัดเก็บขยะต่างๆ หรือถูกนำไปเผาทำลาย ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการปล่อยก๊าซพิษเข้าสู่บรรยากาศโลก [2]

จากการศึกษาปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนในปี 2565 โดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณขยะมูลฝอย 16,942 ตันต่อวัน โดยในพื้นที่สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11 มีปริมาณมากที่สุด 6,482.26 ตันต่อวัน เมื่อพิจารณาทั้งภาค พบว่าขยะมูลฝอยที่ถูกกำจัดไม่ถูกต้องมีมากถึง 5,277 ตัน

ต่อวัน ส่วนที่ถูกกำจัดอย่างถูกต้องมีเพียง 3,259 ตันต่อวัน และพบว่าขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ 8,406 ตันต่อวัน ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นขยะพลาสติก และแม้จะมีการกำจัดทุกวัน แต่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีขยะมูลฝอยตกค้างรวมถึง 2,133,130 ตัน [1]

จากปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยในชุมชนซึ่งรวมถึงขยะพลาสติกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีปริมาณมาก และบางส่วนไม่ได้ถูกกำจัดอย่างถูกต้อง รวมถึงการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ยังมีปริมาณที่น้อยนั้น การนำขยะพลาสติกกลับมารีไซเคิลจึงถือเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาได้ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกในการรวบรวมขยะพลาสติก และพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ เพื่อการตัดสินใจที่เหมาะสมในการเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก การขนส่งและการเก็บรวบรวมขยะพลาสติก รวมถึงการรีไซเคิลเม็ดพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลจิสติกส์ย้อนกลับเป็นกระบวนการวางแผนการดำเนินงานและการควบคุมวัตถุดิบในกระบวนการและผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย จากการผลิตไปจนถึงการจัดจำหน่าย และจากการใช้ประโยชน์ไปจนถึงการใช้ซ้ำ ดังนั้น การออกแบบการไหลย้อนกลับที่มีประสิทธิภาพจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการจัดการห่วงโซ่อุปทานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) เช่น หลักการวิจัยดำเนินงาน (Operations Research) สามารถช่วยลดต้นทุนและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด



บทความวิจัย

โซ่อุปทาน โดยมีงานวิจัยที่ตีพิมพ์หลายฉบับ เช่น การวางแผนด้านสิ่งแวดล้อม โลจิสติกส์สีเขียว การออกแบบโซ่อุปทาน หรือการจัดการอย่างยั่งยืนที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและสังคม ซึ่งงานเหล่านี้มุ่งเน้นการจัดการโลจิสติกส์หรือโซ่อุปทานแบบการไหลไปข้างหน้า [3]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกหลายเรื่อง [4-9] ที่มีการพัฒนาตัวแบบสำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ และจากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ทบทวน พบว่า ประเภทของตัวแบบมีความหลากหลายแตกต่างกันไปตามบริบทของการประยุกต์ใช้ แต่ฟังก์ชันเป้าหมาย

(Objective Function) ส่วนใหญ่ มีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด ดังรายละเอียดสรุปในตารางที่ 1

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีศึกษาการรีไซเคิลพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อวิเคราะห์และแสดงการไหลของขยะพลาสติกให้เหมาะสม รวมถึงหาตำแหน่งที่ตั้งในการรวบรวมขยะพลาสติก โดยกำหนดวิธีดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 วัตถุประสงค์ ประเภทตัวแบบ/วิธีการ และสมการเป้าหมายของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	ตัวแบบ/วิธีการ	สมการเป้าหมาย
เสกสรร สุธรรมานนท์ และคณะ [4]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม สำหรับการคำนวณต้นทุนการขนส่งขยะคอมพิวเตอร์ในจังหวัดสงขลา	Integer Linear Programming Model (ILP)	Minimize total cost
Schultmann และคณะ [5]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม สำหรับการวางแผนเครือข่ายและหาทำเลที่ตั้งโรงงานเพื่อการผลิตรีไซเคิลแบตเตอรี่เก่าที่หมดอายุการใช้งานแล้วในเยอรมนี	Mixed Integer Linear Programming Model (MILP)	Minimize total cost
Vaidyanathan และคณะ [6]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม สำหรับเครือข่ายและทำเลที่ตั้งของโรงงานผลิตซ้ำในสหรัฐอเมริกา	Mixed Integer Linear Programming Model (MILP)	Minimize total cost
Mahdi Mokhtarzadeh และคณะ [7]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม เพื่อลดต้นทุน มลพิษทางเสียง และการคุกคามที่เกิดจากการจัดตั้งศูนย์กลางสำหรับประชากร	Mixed Integer Non-linear Programming Model (MINLP)	Minimize total cost
Amir Aghsami และคณะ [8]	พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับห่วงโซ่อุปทานเลือด เพื่อช่วยลดต้นทุนทั้งหมดและเพิ่มความพึงพอใจของผู้บริจาคเลือดโดยการลดเวลารอคอยของระบบ	Mixed Integer Non-linear Programming Model (MINLP)	Minimize total cost
Ines Soares และคณะ [9]	พัฒนาตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม เพื่อเพิ่มกำไรสูงสุดอันเป็นผลมาจากการซื้อพลังงานในตลาดที่มีการจัดระเบียบ และขายให้กับผู้บริโภค	Mixed Integer Linear Programming Model (MILP) and Hybrid Metaheuristics	Maximize total profit



บทความวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีศึกษา การรีไซเคิลพลาสติก

ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ถูกรวบรวมจากเอกสารวิชาการ รายงานการวิจัย และฐานข้อมูลของหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน เช่น กรมควบคุมมลพิษ สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกไทย โดยดำเนินการวิเคราะห์โครงสร้างและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ วิเคราะห์การไหลของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ ตั้งแต่การไหลของขยะพลาสติกและการขนส่งด้วยรถประเภทต่างๆ จากชุมชน (อำเภอ) ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และขนส่งต่อไปยังโรงงานรีไซเคิลพลาสติก และวิเคราะห์ต้นทุนที่เกี่ยวข้องของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่งขยะพลาสติก ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิล เป็นต้น

3.2 การหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลพิกัดของชุมชน (อำเภอ) และปริมาณขยะพลาสติกของชุมชน เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ด้วยการวิเคราะห์จัดกลุ่ม 2 วิธี คือ แบบขั้นตอน (Hierarchical Clustering) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนกลุ่มมาก่อน โดยนำมาใช้ในการหาจำนวนกลุ่มที่ควรจะเป็นในเบื้องต้น และแบบเคมีน (K-Means Clustering) เป็นเทคนิคที่ต้องทราบจำนวนกลุ่มมาก่อน ซึ่งประยุกต์ใช้หลังจากที่กำหนดจำนวนกลุ่มในเบื้องต้นได้จากการแบ่งกลุ่ม แบบขั้นตอน (Hierarchical Clustering) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

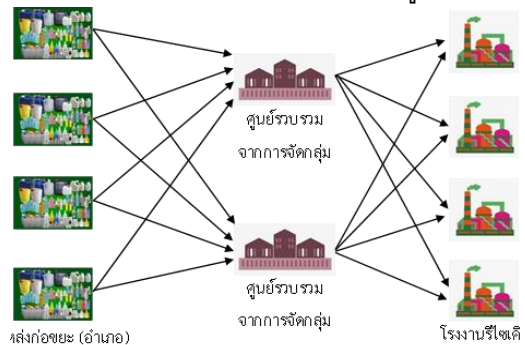
1) แปลงค่าข้อมูลของพิกัดชุมชนและปริมาณขยะพลาสติกของชุมชนเป็นคะแนนมาตรฐาน วิเคราะห์จัดกลุ่มด้วยวิธี Hierarchical Clustering และพิจารณาแผนภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) โดยเลือกการแบ่งกลุ่ม 3 ระดับ คือ จำนวนกลุ่มเท่ากับ K1 K2 และ K3

2) นำจำนวนกลุ่ม K1 K2 และ K3 มาวิเคราะห์ด้วย K-means Clustering โดยหาระยะห่างด้วยวิธี Euclidean แล้วจึงหาจุด Centroid ของกลุ่ม และแสดงแผนที่กลุ่ม

3) สรุปตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก โดยพิจารณาจาก Centroid ของ K-means Clustering ทั้ง 3 ระดับ

3.3 การออกแบบระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับและการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์

พิจารณาระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับสำหรับการรีไซเคิลพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเริ่มจากการนำขยะพลาสติกจากทุกอำเภอในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เพื่อทำการคัดแยกประเภทของพลาสติก แล้วเตรียมการจัดส่งต่อไปยังโรงงานรีไซเคิล โดยใช้ยานพาหนะประเภทต่างๆ ในการขนส่งทางถนน ดังโครงข่ายในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงข่ายโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีการรีไซเคิลพลาสติก



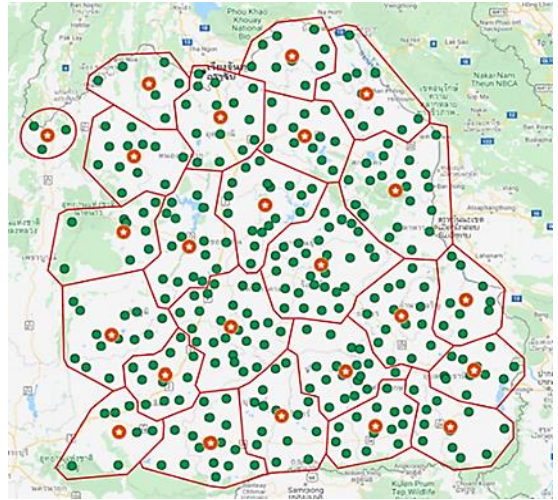
บทความวิจัย

จากนั้นจึงพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับที่สอดคล้องกับกรณีการรีไซเคิลพลาสติก รวบรวมและวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ และหาผลเฉลยของตัวแบบด้วยโปรแกรม LINGO 13.0 [10] รวมถึงวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยการทดลองแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนและความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก โดยกำหนดเป็นสถานการณ์วิเคราะห์ความไว K4 ถึง K10 ทั้งนี้เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ กรณีการรีไซเคิลพลาสติกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือในอนาคตที่อาจมีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น

4. ผลการวิจัย

4.1 ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกในการรวบรวมขยะพลาสติก

จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณขยะพลาสติก และหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกในการรวบรวมขยะพลาสติกของชุมชน (อำเภอ) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าประชากร 1 คน สามารถก่อกองขยะพลาสติกได้ 7.25 กิโลกรัมต่อปี และจากการนำข้อมูลพิกัดตำแหน่งที่ตั้งและปริมาณขยะพลาสติกของชุมชน (อำเภอ) ทั้งหมดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมาวิเคราะห์แบ่งกลุ่มแบบขั้นตอน และพิจารณาจากแผนภาพเดนไดรแกรม สรุปได้ว่า จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมสำหรับ 3 ระดับ ได้แก่ 24 33 และ 60 กลุ่ม แล้วนำจำนวนกลุ่มที่ได้มาวิเคราะห์กลุ่มแบบเคมีน และกำหนดพิกัดตำแหน่งของกลุ่มจากจุด Centroid พบว่า แบบ K1 (จำนวน 24 กลุ่ม) ได้ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกกระจายอยู่ใน 14 จังหวัด



รูปที่ 2 แผนที่กลุ่มจากผลวิเคราะห์

K-means Clustering แบบ K1 (จำนวน 24 กลุ่ม)

ตั้งแผนที่กลุ่มที่แสดงในรูปที่ 2 สำหรับแบบ K2 (จำนวน 33 กลุ่ม) ได้ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกกระจายอยู่ใน 17 จังหวัด และแบบ K3 (จำนวน 60 กลุ่ม) ได้ตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกกระจายอยู่ใน 19 จังหวัด ซึ่งแผนที่กลุ่มของแบบ K2 และ K3 ได้ดำเนินการในการทำงานเดียวกัน

4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปัญหาของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับกรณีการรีไซเคิลพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่พัฒนาได้ เป็นตัวแบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear Programming: MINLP) เนื่องจากตัวแปรตัดสินใจมีทั้งที่มีค่าเป็นปริมาณต่อเนื่องและมีค่าเป็นจำนวนเต็ม อีกทั้งสมการเป้าหมายเป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนโดยรวมในการ



บทความวิจัย

จัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด ซึ่งมี ดัชนี พารามิเตอร์ ตัวแปรตัดสินใจ และโครงสร้างของตัวแบบ ดังนี้

ดัชนี

- i คือ แหล่งก่อขยะ (อำเภอ) ; $i = 1, \dots, I$
 j คือ ศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก; $j = 1, \dots, J$
 k คือ โรงงานรีไซเคิล ; $k = 1, \dots, K$
 v คือ ประเภทของรถบรรทุก ; $v = 1, \dots, V$

พารามิเตอร์

- Pld_i คือ ปริมาณขยะพลาสติกของแหล่งก่อขยะที่ i (กิโลกรัม)
 Ce_j คือ ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (บาท/กิโลกรัม)
 Co_k คือ ต้นทุนการจัดเก็บขยะพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลที่ k (บาท/กิโลกรัม)
 Cr_k คือ ต้นทุนการผลิตของโรงงานรีไซเคิลที่ k (บาท/กิโลกรัม)
 Cp_k คือ ต้นทุนการจัดเก็บเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลที่ k (บาท/กิโลกรัม)
 Ct_v คือ ต้นทุนการขนส่งด้วยรถประเภทที่ v (บาท/กิโลเมตร)
 D_{ij} คือ ระยะทางระหว่างแหล่งก่อขยะที่ i กับศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (กิโลเมตร)
 D_{jk} คือ ระยะทางระหว่างศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก j กับโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลเมตร)
 $EeCap_j$ คือ ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (กิโลกรัม)
 $ErCap_k$ คือ ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

$PlCap_k$ คือ กำลังการผลิตเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

$EpCap_k$ คือ ขีดความสามารถในการจัดเก็บเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของโรงงานที่ k (กิโลกรัม)

$TCap_v$ คือ ความจุสูงสุดของรถบรรทุกประเภทที่ v (กิโลกรัม)

α คือ อัตราการแปลงขยะพลาสติกเป็นเม็ดพลาสติก (กิโลกรัม)

M คือ จำนวนจริงที่มีค่ามาก (Positive Large Number)

ตัวแปรตัดสินใจ

PD_{ijv} คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่ขนส่งจากแหล่งก่อขยะ i ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก j ด้วยรถบรรทุก v (กิโลกรัม)

PE_{jkv} คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่ขนส่งจากศูนย์รวบรวม j ไปยังโรงงานรีไซเคิล k ด้วยรถบรรทุก v (กิโลกรัม)

Se_j คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บในศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j (กิโลกรัม)

So_k คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บในโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

Sr_k คือ ปริมาณขยะพลาสติกที่นำเข้าไปรีไซเคิลในโรงงานที่ k (กิโลกรัม)

PR_k คือ ปริมาณเม็ดพลาสติกที่รีไซเคิลโดยโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

Sp_k คือ ปริมาณเม็ดพลาสติกรีไซเคิลที่จัดเก็บในโรงงานรีไซเคิลที่ k (กิโลกรัม)

E_j คือ ตัวแปรในการกำหนดตำแหน่ง โดยเท่ากับ 1 เมื่อศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j ถูกจัดตั้งขึ้นหรือเปิดดำเนินการ และเท่ากับ 0 เมื่อไม่ถูกจัดตั้งหรือไม่เปิดดำเนินการ



บทความวิจัย

X_{ij} คือ ตัวแปรในการกำหนดการขนส่ง โดยเท่ากับ 1 เมื่อมีการขนส่งขยะพลาสติกจากแหล่งกักขยะที่ i ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

Y_{jk} คือ ตัวแปรในการกำหนดการขนส่ง โดยเท่ากับ 1 เมื่อมีการขนส่งขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกที่ j ไปยังโรงงานรีไซเคิลที่ k และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับต่ำที่สุด ดังสมการ (1) ซึ่งประกอบด้วย 1) ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก คำนวณจากผลรวมของผลคูณระหว่างต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมแต่ละแห่ง กับปริมาณขยะ

พลาสติกที่จัดเก็บในศูนย์รวบรวมและตัวแปรการกำหนดตำแหน่ง 2) ต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิล คำนวณจากผลรวมของผลคูณระหว่างต้นทุนการดำเนินงาน (การจัดเก็บขยะพลาสติก/การผลิตเม็ดพลาสติก/การจัดเก็บเม็ดพลาสติก) ของโรงงานรีไซเคิลแต่ละแห่ง กับปริมาณพลาสติกที่โรงงานดำเนินการตามลำดับ 3) ต้นทุนการขนส่งขยะพลาสติกจากแต่ละแหล่งไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก คำนวณจากผลคูณระหว่างต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยด้วยรถบรรทุกกับระยะทางการขนส่ง และจำนวนรอบในการขนส่งขยะพลาสติกซึ่งพิจารณาจากความจุของรถแต่ละประเภท และ 4) ต้นทุนการขนส่งขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงงานรีไซเคิล คำนวณจากผลคูณระหว่างต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยด้วยรถบรรทุก กับระยะทางการขนส่ง และจำนวนรอบในการขนส่งขยะพลาสติกซึ่งพิจารณาจากความจุของรถแต่ละประเภท

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{j=1}^J C_{e_j} S_{e_j} E_j + \sum_{k=1}^K (C_{o_k} S_{o_k} + C_{r_k} S_{r_k} + C_{p_k} S_{p_k}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V C_{t_v} X_{ij} D_{ij} \frac{PD_{ijv}}{TCap_v} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V C_{t_v} Y_{jk} D_{jk} \frac{PE_{jkv}}{TCap_v} \right\} \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$\sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V PD_{ijv} \leq Pld_i \quad ; \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = 1 \quad ; \forall i \quad (3)$$

สมการ (2) เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณขยะพลาสติกที่ขนส่งไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกต้องไม่เกินปริมาณขยะพลาสติกของแต่ละแหล่งกักขยะนั้นๆ

สมการ (3) ขยะพลาสติกจากแต่ละแหล่งกักขยะใด ๆ สามารถส่งไปยังศูนย์รวบรวมได้แห่งเดียว



$$\sum_{j=1}^J X_{ij} \geq 1 \quad ; \forall_j \quad (4)$$

สมการ (4) ศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกใดๆ สามารถรับขยะพลาสติกได้จากหลายแหล่ง

$$\sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V PD_{ijv} \leq M(E_j) \quad ; \forall_j \quad (5)$$

สมการ (5) เป็นการกำหนดให้ปริมาณขยะพลาสติกทั้งหมดที่ขนส่งจากแหล่งก่อกองขยะไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ไม่เกินจำนวนจริงที่มีค่ามากพอ (Positive Large Number)

$$Se_j = \sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V PD_{ijv} - \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V PE_{jkv} \quad ; \forall_j \quad (6)$$

สมการ (6) สมดุลสินค้าคงคลังขยะพลาสติกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก

$$Se_j \leq EeCap_j(E_j) \quad ; \forall_j \quad (7)$$

สมการ (7) เป็นการประกันว่าปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บต้องไม่เกินขีดความสามารถในการจัดเก็บของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก

$$\sum_{k=1}^K Y_{jk} \geq 1 \quad ; \forall_j \quad (8)$$

สมการ (8) ขยะพลาสติกจากแต่ละศูนย์รวบรวมใดๆ สามารถส่งไปยังโรงงานรีไซเคิลได้หลายแห่ง

$$\sum_{j=1}^J Y_{jk} \geq 1 \quad ; \forall_k \quad (9)$$

สมการ (9) โรงงานรีไซเคิลใดๆ สามารถรับขยะพลาสติกได้จากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกหลายศูนย์

$$So_k = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V PE_{jkv} - Sr_k \quad ; \forall_k \quad (10)$$

สมการ (10) สมดุลสินค้าคงคลังขยะพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล

$$So_k \leq ErCap_k \quad ; \forall_k \quad (11)$$

สมการ (11) เป็นการประกันว่าปริมาณขยะพลาสติกที่จัดเก็บต้องไม่เกินขีดความสามารถในการจัดเก็บของโรงงานรีไซเคิล

$$\alpha(Sr_k) = PR_k \quad ; \forall_k \quad (12)$$

สมการ (12) ปริมาณเม็ดพลาสติกที่รีไซเคิลได้ต้องเท่ากับปริมาณขยะพลาสติกที่นำเข้าไปรีไซเคิล คุณด้วยอัตราการแปลง

$$PR_k \leq PlCap_k \quad ; \forall_k \quad (13)$$

สมการ (13) เป็นการประกันว่าปริมาณเม็ดพลาสติกที่ผลิตต้องไม่เกินขีดความสามารถในการผลิตของโรงงานรีไซเคิล

$$Sp_k \leq EpCap_k \quad ; \forall_k \quad (14)$$

สมการ (14) เป็นการประกันว่าปริมาณเม็ดพลาสติกที่จัดเก็บต้องไม่เกินขีดความสามารถในการจัดเก็บของโรงงานรีไซเคิล

$$Se_j \geq 0 \quad ; \forall_j \quad (15)$$

$$PR_k, So_k, Sp_k, Sr_k \geq 0 \quad ; \forall_k \quad (16)$$

$$PD_{ijv} \geq 0 \quad ; \forall_i, \forall_j, \forall_v \quad (17)$$

$$PE_{jkv} \geq 0 \quad ; \forall_j, \forall_k, \forall_v \quad (18)$$

สมการ (15-18) ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นจำนวนจริงที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0 (Non-negative)



บทความวิจัย

$$E_j \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall_j \quad (19)$$

สมการ (19) ตัวแปรกำหนดตำแหน่ง โดย เท่ากับ 1 เมื่อศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกถูกจัดตั้งหรือเปิด และ เท่ากับ 0 เมื่อไม่ถูกจัดตั้งหรือไม่เปิด

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall_i, \forall_j \quad (20)$$

สมการที่ (20) ตัวแปรกำหนดการขนส่ง โดย เท่ากับ 1 เมื่อ มีการขนส่งขยะพลาสติกจากแหล่งกักขยะ (อำเภอ) ไปยัง ศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

$$Y_{jk} \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall_j, \forall_k \quad (21)$$

สมการที่ (21) ตัวแปรกำหนดการขนส่ง โดย เท่ากับ 1 เมื่อ มีการขนส่งขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ไปยังโรงงานรีไซเคิล และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขนส่ง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้ตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้นกับกรณีศึกษาการรีไซเคิลขยะพลาสติกใน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยปริมาณขยะพลาสติก คำนวณจากข้อมูลการกักขยะพลาสติกในประเทศไทย และอัตราการนำกลับมาใช้ประโยชน์หรือรีไซเคิลคิดเป็น ปริมาณขยะพลาสติกของแหล่งกักขยะเท่ากับ 7.25 กิโลกรัม/คน/ปี [11-12] สำหรับ ต้นทุน การดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก คำนวณจาก ค่าเฉลี่ยของต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิล พลาสติก [13] ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของตัวแบบได้ ถูกวิเคราะห์และรวบรวมมาจากหลากหลายแหล่ง ดัง สรุปในตารางที่ 2

4.3 ผลเฉลยของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ แบบการโปรแกรม ไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear

Programming: MINLP) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด สำหรับตัดสินใจเกี่ยวกับการเปิดดำเนินการของศูนย์ รวบรวมขยะพลาสติก รวมถึงการกระจายขยะพลาสติก จากชุมชน (อำเภอ) ไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก การกระจายขยะพลาสติกจากศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ไปยังโรงงานรีไซเคิล และปริมาณการรีไซเคิลเป็นเม็ด พลาสติก ผลเฉลยพบว่า สถานการณ์ K1 ภายใต้ขนาด ตัวแปรทั้งหมด 33,560 ตัวแปร และมีสมการเงื่อนไข หรือข้อจำกัดจำนวน 26,105 สมการ ใช้เวลาในการ ประมวลผล 1 นาที 12 วินาที ดังในรูปที่ 3 มีการ ตัดสินใจเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกทั้งหมด 24 แห่ง กระจายอยู่ทั้งหมด 14 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ นครพนม นครราชสีมา บึงกาฬ บุรีรัมย์ เลย ศรีสะเกษ สกลนคร สุรินทร์ อำนาจเจริญ อุดรธานี และอุบลราชธานี และพบว่าขยะพลาสติกที่ ขนส่งจากแหล่งกักขยะ (อำเภอ) มีปริมาณรวม 159,610,961 กิโลกรัม ขยะพลาสติกที่ขนส่งจากศูนย์ รวบรวมไปยังโรงงานรีไซเคิล มีปริมาณรวม 102,010,961 กิโลกรัม และมีปริมาณการผลิตของ โรงงานรีไซเคิลพลาสติก รวม 20,935,210 กิโลกรัม ผล เฉลยนี้ทำให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติก ต่ำที่สุด เท่ากับ 70.11 ล้านบาท

สถานการณ์ K2 ภายใต้ขนาดตัวแปรทั้งหมด 46,106 ตัวแปร และมีสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัดจำนวน 35,555 สมการ ใช้เวลาในการประมวลผล 2 นาที 21 วินาที ดังในรูปที่ 4 มีการตัดสินใจเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ทั้งหมด 33 แห่ง กระจายอยู่ทั้งหมด 17 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ นครพนม นครราชสีมา บุรีรัมย์ มหาสารคาม มุกดาหาร ยโสธร ร้อยเอ็ด เลย ศรีสะเกษ สกลนคร สุรินทร์ หนองคาย อุดรธานี และ



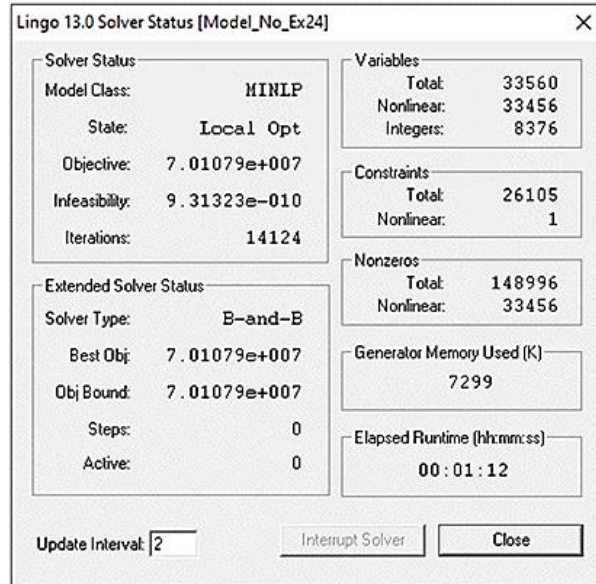
บทความวิจัย

อุปสรรคเหล่านี้ และพบว่าขยะพลาสติกที่ขนส่งจากแหล่งก่อขยะ (อำเภอ) มีปริมาณรวม 159,610,961 กิโลกรัม ขยะพลาสติกที่ขนส่งจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงงานรีไซเคิล มีปริมาณรวม 80,410,961 กิโลกรัม และมีปริมาณการผลิต

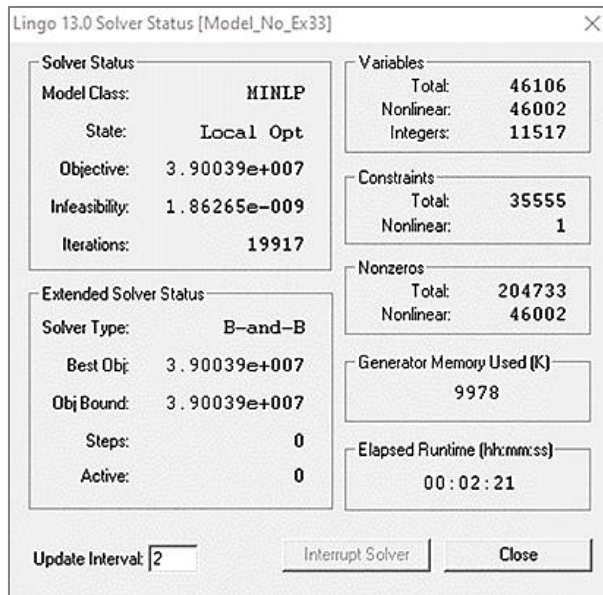
ของโรงงานรีไซเคิลพลาสติก รวม 13,159,210 กิโลกรัม ผลเฉลยดังกล่าวทำให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด เท่ากับ 39.01 ล้านบาท

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย	แหล่งที่มา
ปริมาณขยะพลาสติกของแหล่งก่อขยะ	7.25	กิโลกรัม/คน/ปี	กรีนพีซ ประเทศไทย [11] และ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [12]
ต้นทุนการดำเนินงานของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก	0.06	บาท/กิโลกรัม	คำนวณค่าเฉลี่ยจากต้นทุนการดำเนินงานของโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการจัดเก็บขยะพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล	0.03 – 0.09	บาท/กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการผลิตของโรงงานรีไซเคิล	0.50 – 1.50	บาท/กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการจัดเก็บเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล	0.17 – 0.52	บาท/กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ต้นทุนการขนส่งทางถนน	11 – 22.5	บาท/กิโลเมตร	บริษัท จิซทิกซ์ จำกัด [15]
ระยะทางจากแหล่งก่อขยะไปยังศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก	4.1 – 721.8	กิโลเมตร	คำนวณด้วยวิธี Euclidean Distance
ระยะทางระหว่างศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกไปยังโรงงานรีไซเคิล	9.9 – 674.3	กิโลเมตร	คำนวณด้วยวิธี Euclidean Distance
กำลังการผลิตเม็ดพลาสติกของโรงงานรีไซเคิล	143,000 – 14,950,000	กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก	2,400,000	กิโลกรัม	คำนวณค่าเฉลี่ยของขีดความสามารถของโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ขีดความสามารถในการดำเนินงาน (รับซื้อ/คัดแยก/จัดเก็บ) ของโรงงานรีไซเคิล	105,600 – 11,040,000	กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ขีดความสามารถในการจัดเก็บเม็ดพลาสติกรีไซเคิลของโรงงาน	7,920 – 828,000	กิโลกรัม	เทียบเคียงข้อมูลทุนจดทะเบียนของแต่ละโรงงาน [14] กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]
ความจุสูงสุดของรถบรรทุกประเภท	1,000 – 14,000	กิโลกรัม	บริษัท จิซทิกซ์ จำกัด [15]
อัตราการแปลงขยะพลาสติกเป็นเม็ดพลาสติก	0.36	กิโลกรัม	ข้อมูลจากโรงงานรีไซเคิลพลาสติก [13]



รูปที่ 3 สรุปการประมวลผลด้วยโปรแกรม LINGO สำหรับสถานการณ์ K1



รูปที่ 4 สรุปการประมวลผลด้วยโปรแกรม LINGO สำหรับสถานการณ์ K2



สำหรับสถานการณ์ K3 ที่มีตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกมากถึง 60 แห่ง ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยใช้เวลารวมถึง 48 ชั่วโมง แต่ยังไม่สามารถประมวลผลได้ด้วยตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้นได้

4.4 ผลเฉลยจากการวิเคราะห์ความไว

จากข้อจำกัดในการประมวลผลของสถานการณ์ K3 ผู้วิจัยได้ออกแบบการวิจัยเพิ่มเติม ด้วยการวิเคราะห์ความไวแบบการวิเคราะห์ภายหลังการหาค่าที่เหมาะสม (Post Optimality Analysis) หรือ การโปรแกรมพารามेटริก (Parametric Programming) หรือการวิเคราะห์ความเหมาะสม (Optimality Analysis) ซึ่งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความไว โดยพยายามตั้งคำถามและหาคำตอบในลักษณะ “จะเกิดอะไรขึ้นถ้า...? (What-if?)”

โดยกำหนดช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solutions) หรือมีผลต่อค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) [16] แนวทางดังกล่าวนี้สอดคล้องกับแนวทางในการกำหนดสถานการณ์สำหรับการวิเคราะห์ความไวของตัวแบบในผลงานวิจัยของ Keles and Pekkaya [17] และของ Koothongsumrit and Meethom [18] สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ 2 ตัว คือ จำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก และความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เพื่อหาผลเฉลยของสถานการณ์วิเคราะห์ความไว K4 ถึง K10 ภายใต้วัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์และผลการประมวลด้วยโปรแกรม LINGO 13.0 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลสถานการณ์สำหรับการวิเคราะห์ความไว

สถานการณ์ (Scenario)	ความจุของศูนย์รวบรวม (ล้าน กก.)	จำนวนศูนย์รวบรวมจาก Clustering	เวลาในการประมวลผล (วินาที)	จำนวนศูนย์รวบรวมที่เปิด	ต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด (ล้านบาท)	หมายเหตุ
K1	2.4	24	72	24	70.11	
K2	2.4	33	141	33	39.01	
K3	2.4	60	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.
K4	2.4	40	206	40	19.20	
K5	2.4	48	276	48	10.75	
K6	3.0	33	164	33	17.88	
K7	3.0	40	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.
K8	3.5	33	156	33	10.62	
K9	3.5	40	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.
K10	3.5	50	-	-	-	ไม่สามารถประมวลผลได้ภายใน 48 ชม.



บทความวิจัย

สำหรับสถานการณ์ K4 ซึ่งมีความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก 2.4 ล้านกิโลกรัม เท่าเดิม และมีจำนวนศูนย์รวบรวมทางเลือกจากการจัดกลุ่ม 40 แห่ง พบว่า มีการเปิดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก ทั้ง 40 แห่ง เนื่องจากปริมาณขยะพลาสติกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอยู่มาก และมีต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด เท่ากับ 19.20 ล้านบาท ภายใต้ขนาดตัวแปรทั้งหมด 55,864 ตัว และมีสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัดจำนวน 42,905 สมการ ใช้เวลาในการประมวลผล 3 นาที 26 วินาที ทั้งนี้หากเพิ่มความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกและจำนวนของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก จะทำให้มีต้นทุนโดยรวมลดลง แต่ถ้าหากเพิ่มมากเกินไปจนกลายเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาเกินที่จะหาคำตอบได้ด้วยตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้น

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการปรับจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 แห่ง แต่ความจุของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกยังคงเดิม เท่ากับ 2.4 ล้านตัน (สถานการณ์ K5) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์และทราบถึงขีดจำกัดของตัวแบบที่เสนอ พบว่า ขีดจำกัดของตัวแบบที่เสนอ จะมีจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เท่ากับ 48 แห่ง มีต้นทุนรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด เท่ากับ 10.75 ล้านบาท ภายใต้ขนาดตัวแปรทั้งหมด 67,016 ตัว และมีสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัด จำนวน 51,305 สมการ ใช้เวลาในการประมวลผลตัวแบบ 4 นาที 36 วินาที ดังรายละเอียดในตารางที่ 3

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการจัดกลุ่ม (Clustering) 2 วิธี คือ การจัดกลุ่มแบบขั้นตอน (Hierarchical Clustering) ตามด้วยการจัดกลุ่มแบบเคมีน (K-means

Clustering) ในการหาตำแหน่งที่ตั้งทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Non-linear Programming: MINLP) สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ย้อนกลับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกต่ำที่สุด พบว่า ภายใต้ขอบเขตปัญหาเดียวกันเกี่ยวกับปริมาณขยะพลาสติกของทั้งภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับสถานการณ์ขนาดเล็กที่มีจำนวนศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกทางเลือกจำนวนไม่มาก ดังสถานการณ์ K1, K2, K4, K5, K6 และ K8 นั้น ตัวแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solutions) ได้ในเวลารวดเร็ว ส่วนกรณีที่มีการกำหนดจำนวนทางเลือกของศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกจำนวนมากขึ้นดังสถานการณ์ K3, K7, K9 และ K10 ซึ่งเป็นสถานการณ์ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ผู้วิจัยได้ทดสอบการประมวลผลของทั้ง 4 สถานการณ์ โดยใช้เวลาถึง 48 ชั่วโมง แต่ยังไม่สามารถประมวลผลได้ด้วยตัวแบบ MINLP ที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากตัวแบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MINLP) เป็นตัวแบบที่มีอย่างน้อยหนึ่งนิพจน์ไม่เป็นเชิงเส้นและเซตย่อยของตัวแปรมีข้อจำกัดเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งโดยทั่วไปถือว่าเป็นประเภทตัวแบบที่ใช้หาผลเฉลยได้สำหรับปัญหาขนาดเล็ก แต่จะหาผลเฉลยได้ยากมากสำหรับกรณีปัญหาขนาดใหญ่ [19] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ines Soares และคณะ [9] ที่แนะนำให้ใช้วิธีการเมตาฮีริสติกแบบไฮบริดในการจัดการกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่

ทั้งนี้ในการใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MINLP) มาวางแผนตัดสินใจกำหนดตำแหน่งที่ตั้งศูนย์รวบรวม



บทความวิจัย

ขยะพลาสติก รวมถึงการกระจายขยะพลาสติกในระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด เป็นตัวแบบที่มีตัวแปรตัดสินใจทั้งแบบเป็นค่าปริมาณต่อเนื่องและค่าเป็นจำนวนเต็มแบบ Binary ซึ่งเป็นแนวทางในการวางแผนตัดสินใจกำหนดตำแหน่งที่ตั้งและเปิดดำเนินการสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการผลิต สอดคล้องกับงานวิจัยของ เสกสรร สุธรรมานนท์ [4] ที่ศึกษากระบวนการขนส่งในโลจิสติกส์ย้อนกลับของขยะคอมพิวเตอร์ในจังหวัดสงขลา โดยประยุกต์ใช้ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (ILP) เพื่อให้ต้นทุนรวมสำหรับการขนส่งต่ำที่สุด และงานวิจัยของ Schultmann และคณะ [5] ที่ประยุกต์ใช้ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MILP) ในระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับ กรณีศึกษาการวางเครือข่ายและการหาทำเลที่ตั้งของโรงงานเพื่อการรีไซเคิลแบตเตอรี่เก่าที่หมดอายุการใช้งานแล้วในเยอรมนี รวมถึงงานวิจัยของ Vaidyanathan และคณะ [6] ที่วิเคราะห์โครงข่ายโลจิสติกส์สำหรับโรงงานซึ่งทำการผลิตซ้ำในสหรัฐอเมริกา โดยสร้างตัวแบบ MILP เพื่อตัดสินใจกำหนดจำนวนและที่ตั้งของโรงงาน

จากผลการวิจัยครั้งนี้จึงมีข้อเสนอแนะได้ว่า ควรมีการกำหนดศูนย์รวบรวมขยะพลาสติก เพื่อรวบรวมและคัดแยกขยะพลาสติกที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ และทำให้ประหยัดต้นทุนโดยรวมในการจัดการขยะพลาสติกสำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งมีพื้นที่มากและมีขยะพลาสติกปริมาณมากกระจายอยู่ในอำเภอต่างๆ ทั้งนี้ในการพัฒนาวิจัยต่อไปสามารถพิจารณาถึงช่วงของโซ่อุปทานเกี่ยวกับการจำหน่ายเม็ดพลาสติกรีไซเคิลทั้งในและต่างประเทศ และอาจขยายขอบเขตจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นทั้งประเทศเพื่อเป็น

แนวทางในการจัดการขยะพลาสติกในภาพรวมของประเทศ รวมทั้งกรณีที่ชุมชนแหล่งก่อขยะพลาสติก (อำเภอ) อยู่ใกล้กับโรงงานรีไซเคิลพลาสติก สามารถกำหนดให้มีการตัดสินใจขนส่งตรงไปยังโรงงานรีไซเคิลโดยไม่ต้องผ่านศูนย์รวบรวมขยะพลาสติกได้ โดยกำหนดเงื่อนไขว่าโรงงานจะต้องมีการคัดแยกขยะพลาสติก ก่อนนำเข้ากระบวนการรีไซเคิล และกรณีปัญหาที่มีขนาดใหญ่มากและใช้เวลานานในการประมวลผล สามารถประยุกต์ใช้เมตาฮีริสติกในการแก้ไขปัญหา เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (GA) วิธีวิวัฒนาการผลต่าง (DE) หรือวิธีการอื่น ๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2564 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยระบบโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม LINGO 13.0 ในการประมวลผลข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2565>. (Accessed on 31 August 2023)
- [2] S. Somsri, Reverse logistics design for plastic recycling in Thailand, A case study, Thesis, Thammasat University, 2010.
- [3] S.K. Srivastava, Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review, International Journal of Management Reviews, 2007, 9(1), 53-80.



- [4] S. Suthummanon, N. Sirivongpaisal, L. Treranuwat and S. Kongkang, A study of transportation system in reverse logistics for computer wastes in songkhla, *KKU Research Journal*, 2013, 18(4), 628-641. (in Thai)
- [5] F. Schultmann, B. Engels and O. Rentz, Closed-loop supply chains for spent batteries, *Interfaces*, 2003, 33(6), 57-71.
- [6] V. Jayaraman, V. Guide and R. Srivastava, A closed-loop logistics model for remanufacturing, *Journal of the Operational Research Society*, 1999, 50(5), 497-508.
- [7] M. Mokhtarzadeh, R. Tavakkoli-Moghaddam, C. Triki and Y. Rahimi, A hybrid of clustering and meta-heuristic algorithms to solve a p-mobile hub location–allocation problem with the depreciation cost of hub facilities, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 98, 104-121.
- [8] A. Aghsami, S.R. Abazari, A. Bakhshi, M.A. Yazdani, S. Jolai and F. Jolai, A meta-heuristic optimization for a novel mathematical model for minimizing costs and maximizing donor satisfaction in blood supply chains with finite capacity queueing systems, *Healthcare Analytics*, 2023, 3, 100-136.
- [9] I. Soares, M.J. Alves and C.H. Antunes, A deterministic bounding algorithm vs. a hybrid meta-heuristic to deal with a bilevel mixed-integer nonlinear optimization model for electricity dynamic pricing, *Computers and Operations Research*, 2023, 155, 106-195.
- [10] Lingo, Lingo 13 User's manual version 13.0., LINDO System Inc., IL, USA, 2012.
- [11] <https://www.greenpeace.org/thailand/story/18232/plastic-challenge-to-combat-plastic-pollution-in-thailand/>. (Accessed on 30 October 2021)
- [12] <https://www.onep.go.th/plastic-waste/> (Accessed on 15 October 2022)
- [13] Khon Kaen University, Project to increase efficiency and productivity with technology and innovation, intelligent systems, monitoring and monitoring the operation of machines (Machine Monitoring System), Industrial Promotion Center Region 5, Fiscal Year 2018, 2019. (in Thai)
- [14] <http://plastic.oie.go.th/Directory.aspx>. (Accessed on 20 January 2020)
- [15] <https://giztix.com/pricing>. (Accessed on 26 March 2022)
- [16] B. Render, R. Stair and M.E. Hanna, *Quantitative analysis for management*, Prentice Hall, NJ, USA, 2012.



บทความวิจัย

- [17] N. Keles and M. Pekkaya, Evaluation of logistics centers in terms of sustainability via MCDM methods, *Journal of Advances in Management Research*, 2023, 20(2), 291-309.
- [18] N. Koohathongsumrit and W. Meethom, A fuzzy decision-making framework for route selection in multimodal transportation networks, *Engineering Management Journal*, 2022, 34(4), 689-704.
- [19] Lingo, The modeling language and optimizer, LINDO Systems, Inc., IL, USA, 2018.