

แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการแก้ปัญหา
สถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับในห่วงโซ่อุปทานชีวมวล

A Mixed-Integer Programming Model for Solving a Two-Level Location-Routing Problem in Biomass Supply Chains

เจ้านาย ครุฑไชยันต์¹ และเอื้ออารี บุญเพิ่ม^{1*}
Jaonai Krutchaiyan¹ and Aua-aree Boonperm^{1*}

Received: June 3, 2024; Revised: July 5, 2024; Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยมีเป้าหมายในการเลือกศูนย์รวบรวมไม้และกำหนดเส้นทางการขนส่งจากพื้นที่ในป่าไม้ไปยังศูนย์รวบรวมและจัดเส้นทางจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ เพื่อให้ได้ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด เนื่องจากแบบจำลองเริ่มต้นเป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ได้ เมื่อทดสอบแบบจำลองที่นำเสนอด้วยข้อมูลชีวมวลพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดเส้นทางทั้งสองระดับสามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ถึง 12.92 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเส้นทางเพียงระดับเดียว ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโลจิสติกส์ของห่วงโซ่อุปทานชีวมวลในประเทศไทย ซึ่งจะส่งเสริมการพัฒนาพลังงานชีวมวลที่ยั่งยืนในอนาคตได้

คำสำคัญ : แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม; ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ; ห่วงโซ่อุปทานชีวมวล; เทคนิคการแปลงเชิงเส้น

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

¹ Faculty of Science and Technology, Thammasat University

* Corresponding Author; Tel. 08 1735 2453, E - mail: aua-aree@mathstat.sci.tu.ac.th

Abstract

This study presents a mixed-integer programming model to address the location and routing problem for optimizing a two-level biomass supply chain. The primary objective is to select collection points and determine transportation routes from forest areas to collection points and from these points to biorefineries to minimize the total cost. While the initial model is non-linear, a linearization approach facilitates efficient solution finding. Real-world biomass data is used to evaluate the model's effectiveness. The results demonstrate that the two-level routing strategy significantly reduces overall costs by up to 12.92 % compared to a single-level approach. Consequently, the findings of this study can enhance the logistics efficiency of the biomass supply chain in Thailand, promoting the sustainable development of biomass energy in the future.

Keywords: Mixed-Integer Programming Model; Two-Level Location-Routing Problem; Biomass Supply Chains; Linearization Technique

บทนำ

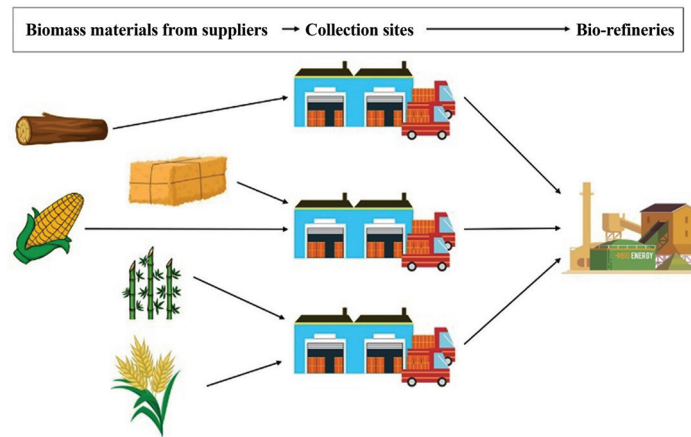
ปัญหาพลังงานเป็นหนึ่งในความท้าทายที่สำคัญในศตวรรษที่ 21 ซึ่งมีผลกระทบต่อทุกด้านของชีวิตมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ นำไปสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้การขุดเจาะและการสกัดเชื้อเพลิงฟอสซิลยังสร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการรุกรานป่า การทำลายถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ และการก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและอากาศ ในขณะเดียวกันทรัพยากรเหล่านี้ก็มีจำกัดและกำลังลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดความไม่มั่นคงทางพลังงานและผลกระทบทางเศรษฐกิจทั่วโลก

การหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดและยั่งยืนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างเร่งด่วน พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานชีวมวล กลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะสามารถใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีวันหมดและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนไปใช้พลังงานทางเลือกยังคงเผชิญกับความท้าทายหลายประการ เช่น ความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานหมุนเวียน ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาสูง รวมถึงการปรับเปลี่ยนโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานที่มีอยู่ การแก้ไขปัญหาพลังงานอย่างยั่งยืนจึงต้องอาศัยการวิจัยและนวัตกรรมเทคโนโลยี รวมถึงการสนับสนุนทางนโยบายจากภาครัฐและความร่วมมือระหว่างประเทศเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสร้างอนาคตที่มั่นคงและยั่งยืน

จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [1] ได้มีการระบุการใช้พลังงานทดแทนอยู่ที่ 14.11 % ของความต้องการพลังงานทั้งหมด โดยมีการใช้พลังงานชีวมวลคิดเป็น 7.65 % ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมดในปัจจุบัน ดังนั้น ชีวมวลจึงมีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน จากศักยภาพของพลังงานทดแทนนี้ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 - 2580 (AEDP2018) ของรัฐบาลจึงมีเป้าหมายที่จะเพิ่มการใช้พลังงานหมุนเวียนให้ถึง 30 % ภายในปี พ.ศ. 2580 และพลังงานชีวมวลจึงกลายเป็นกุญแจสำคัญในการบรรลุเป้าหมายนี้

พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากวัสดุชีวภาพหรือสิ่งมีชีวิตที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น พืช เศษไม้ เศษเหลือจากการเกษตร ขยะอินทรีย์ และมูลสัตว์ ซึ่งการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นพลังงานเป็นวิธีการที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตใหม่ได้ ต่างจากเชื้อเพลิง

ฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยห่วงโซ่อุปทานชีวมวล (Biomass Supply Chain - BSC) จะครอบคลุมทุกขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนี้ ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่การจัดหาและการเก็บเกี่ยวไปจนถึงการขนส่ง การแปรรูป และการนำไปใช้ผลิตพลังงานในที่สุด ชีวมวลสามารถแปลงเป็นพลังงานได้หลายวิธี เช่น การเผาไหม้ การหมัก หรือกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและยืดหยุ่นแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล



รูปที่ 1 ตัวอย่างห่วงโซ่อุปทานชีวมวล

จากรูปที่ 1 ห่วงโซ่อุปทานชีวมวล (BSC) เริ่มต้นด้วยการจัดหาวัตถุดิบชีวมวล เช่น เศษไม้หรือเศษเหลือจากการเกษตร จากนั้นวัตถุดิบชีวมวลจะถูกขนส่งไปยังโรงงานแปรรูปหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล (Bio-Refinery) ที่ซึ่งชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นรูปแบบที่ใช้งานได้ผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสับ การบด หรือการทำเป็นเม็ด โดยขั้นตอนสุดท้ายคือการใช้ชีวมวลแปรรูปเพื่อผลิตไฟฟ้า ความร้อน หรือเชื้อเพลิงชีวภาพ อย่างไรก็ตามหนึ่งในประเด็นสำคัญในห่วงโซ่อุปทาน คือ การขนส่งภายในห่วงโซ่อุปทานชีวมวล ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนที่ซับซ้อน เช่น การจัดหา การแปรรูป ซึ่งปัญหาเหล่านี้อาจเกี่ยวข้องกับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้ง (Facility Location Problem: FLP) ซึ่งสามารถนำมาแก้ปัญหการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลได้ เช่น [2] ได้ประยุกต์ใช้รูปแบบปัญหา FLP โดยสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาคำถามที่ตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมของโรงกลั่นชีวภาพและตำแหน่งศูนย์รวบรวมก่อนส่งวัตถุดิบชีวมวลไปยังโรงกลั่นชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกมากมายที่นำรูปแบบปัญหา FLP มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาล่วงโซ่อุปทานชีวมวล [3] - [5]

อีกหนึ่งปัญหาที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล คือ ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) [6] - [8] ซึ่งปัญหา VRP ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งชีวมวลจากแหล่งกำเนิดไปยังโรงงานแปรรูปหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยจะช่วยลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพลดการปล่อยมลพิษ และเพิ่มความยั่งยืน เช่น การจัดส่งไม้จากป่าไปยังโรงงานแปรรูป หรือขนส่งเศษวัสดุทางการเกษตรจากฟาร์มไปยังโรงงานผลิตพลังงานชีวมวล ซึ่งมีงานวิจัยอีกมากมายที่นำรูปแบบปัญหา VRP มาใช้ในการแก้ปัญหาล่วงโซ่อุปทานชีวมวล [9] - [12]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ปัญหา FLP และปัญหา VRP สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาล่วงโซ่อุปทานชีวมวล ทั้งการเลือกสถานที่ตั้งที่เหมาะสมและการจัดเส้นทางในการขนส่งชีวมวลให้มีประสิทธิภาพได้ ต่อมานักวิจัยจึงได้รวมปัญหา FLP และปัญหา VRP เข้าด้วยกัน และเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทาง (Location-Routing Problem: LRP) [13] - [15] ซึ่งปัญหา LRP แบบดั้งเดิมจะเกี่ยวข้องกับกำหนดตำแหน่งของโรงงานและเส้นทางของยานพาหนะ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายในธุรกิจขนส่ง ต่อมานักวิจัยได้นำวิธีการแก้ปัญหาลRP มาประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล เช่น [16] ได้มีการประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาลRP เพื่อการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล โดยต้องการพิจารณาการขนส่งไม้ชีวมวลจากแหล่งผลิตไปยังศูนย์รวบรวม โดยใช้วิธีการแบ่งกลุ่มด้วยวิธีเคมีน (K-Mean Clustering) เพื่อหาตำแหน่งของศูนย์รวบรวม จากนั้นจึงจัดเส้นทางสำหรับการขนส่งระหว่างแหล่งผลิตไม้ชีวมวลกับศูนย์

รวบรวมในภายหลัง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาปัญหา FLP โดยนักวิจัยได้กำหนดจำนวนสถานที่ตั้งก่อนการเลือกสถานที่ตั้งด้วยวิธีการจัดกลุ่ม หลังจากนั้นจึงได้นำจำนวนที่ได้มาคิดกับการขนส่งต่อไป ซึ่งทั้งสองงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้ประยุกต์ใช้วิธีการจัดกลุ่มเพื่อให้การคำนวณในการจัดเส้นทางง่ายขึ้น และในปี ค.ศ. 2024 [18] ได้เสนอแบบจำลองแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหา LRP เพื่อรวบรวมชีวมวลปาล์มในมาเลเซีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ซึ่งงานวิจัยนี้ยังครอบคลุมความยั่งยืนทางสังคมและสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

สำหรับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ประยุกต์ใช้ปัญหา LRP ในการแก้ปัญหา จะพิจารณาการขนส่งในระดับเดียวกัน นั่นคือการเลือกสถานที่ตั้งของศูนย์รวบรวมและจัดเส้นทางในการขนส่งระหว่างแหล่งผลิตชีวมวลกับศูนย์รวบรวม อย่างไรก็ตาม ในบริบทของห่วงโซ่อุปทานชีวมวล การขนส่งจะทำงานในสองระดับ ซึ่งปัญหาในรูปแบบนี้จะเรียกว่า ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ (Two-Level Location-Routing Problem: TLRP) โดยในระดับแรกจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งวัตถุดิบชีวมวลจากแหล่งผลิตไปยังศูนย์รวบรวม ซึ่งต้องมีการกำหนดศูนย์รวบรวมเพื่อจัดเก็บวัตถุดิบชีวมวล และระดับที่สองประกอบด้วย การขนส่งวัตถุดิบชีวมวลจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งโครงสร้างทั้งสองระดับนี้แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของห่วงโซ่อุปทาน เนื่องจากต้องมีการประสานงานระหว่างขั้นตอนต่าง ๆ ของการขนส่งและการจัดเก็บเพื่อรวบรวมก่อนขนส่งไปยังโรงไฟฟ้าชีวมวล ในปี ค.ศ. 2021 [19] ได้นำเสนอการแก้ปัญหา TLRP ซึ่งเป็นการขนส่งวัตถุดิบชีวมวลจากเกษตรกรไปยังศูนย์รวบรวมและส่งต่อไปยังโรงกลั่นชีวภาพ โดยได้เสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อลดต้นทุนในการดำเนินการและใช้วิธีฮิวริสติกในการแก้ปัญหา ซึ่งในระดับแรกจะเกี่ยวข้องกับการจัดการปัญหา LRP เพื่อเลือกตำแหน่งของศูนย์รวบรวมและจัดเส้นทางการขนส่งระหว่างเกษตรกรแต่ละราย ไปยังศูนย์รวบรวม ในขณะที่การขนส่งระดับที่ 2 จะเป็นการส่งโดยตรงจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ และเมื่อเร็ว ๆ นี้ [20] ได้เสนอแบบจำลองแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหา TLRP เพื่อการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนทางเศรษฐกิจและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ จะมีการพิจารณาการจัดเส้นทางขนส่งในระดับที่ 1 เท่านั้น ในขณะที่การขนส่งระดับที่ 2 จะเป็นการส่งโดยตรงจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา TLRP พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะมีการเลือกสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางเพียงในระดับที่ 1 แต่ในระดับที่ 2 จะเป็นการส่งสินค้าหรือวัตถุดิบชีวมวลจากศูนย์รวบรวมไปยังปลายทางโดยตรง [21] - [22] ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้มีการใช้รถขนส่งเท่ากับจำนวนจุดรวบรวมที่ถูกเลือก ซึ่งถ้าในกรณีที่บางศูนย์รวบรวมมีปริมาณสินค้าหรือวัตถุดิบชีวมวลในปริมาณน้อย การส่งโดยใช้จำนวนรถเท่ากับศูนย์รวบรวมอาจทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอวิธีการแก้ปัญหา TLRP โดยจะประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล โดยแบบจำลองที่นำเสนอจะพิจารณาการขนส่งในระดับที่ 2 เพิ่มเติม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถลดต้นทุนในการจัดการโดยรวมได้ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ตารางที่ 1 จะแสดงการจัดหมวดหมู่งานวิจัยตามหัวข้อต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยห่วงโซ่อุปทานชีวมวล (BSC) ปัญหา FLP VRP LRP และ TLRP รวมทั้งการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 ของปัญหา TLRP ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่อุปทานชีวมวลและการแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ

ปี ค.ศ.	บทความ	BSC	FLP	VRP	LRP	TLRP	จัดเส้นทางในระดับที่ 2
1972	[14]		✓	✓	✓		
1987	[7]			✓			
1998	[10]	✓		✓			

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่อุปทานชีวมวลและการแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ (ต่อ)

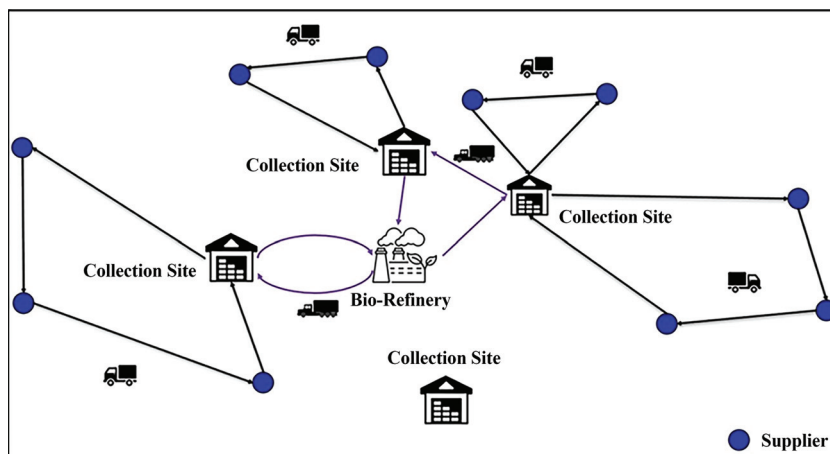
ปี ค.ศ.	บทความ	BSC	FLP	VRP	LRP	TLRP	จัดเส้นทางในระดับที่ 2
2007	[11]	✓		✓			
2009	[12]	✓		✓			
2011	[2]	✓	✓				
2012	[3]	✓	✓				
2018	[4]	✓	✓				
2018	[5]	✓	✓				
2021	[19]	✓	✓	✓	✓	✓	
2023	[21]			✓		✓	
2023	[22]		✓	✓	✓		
2023	[13]	✓		✓			
2023	[16]	✓	✓	✓	✓		
2024	[17]	✓	✓				
2024	[18]	✓	✓	✓	✓		
2024	[20]	✓	✓	✓	✓	✓	
2024	This study	✓	✓	✓	✓	✓	✓

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยต้องการเลือกศูนย์รวบรวมเพื่อแปรรูปไม้ชีวมวลและจัดเส้นทางขนส่งไปยังโรงกลั่นชีวภาพ และวัตถุประสงค์ของแบบจำลองคือ การพิจารณาถึงต้นทุนที่ต่ำที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. การกำหนดปัญหา

ในการศึกษานี้จะพิจารณาการขนส่งด้านชีวมวลที่เป็นการขนส่งไม้เป็นหลัก โดยจะพิจารณาการรวบรวมไม้ชีวมวลจากแต่ละพื้นที่ในป่าไม้ไปยังศูนย์รวบรวมเพื่อแปรรูปไม้ก่อนขนส่งต่อไปยังโรงกลั่นชีวภาพ และในบางพื้นที่รถขนาดใหญ่อาจไม่สามารถเข้าไปเพื่อรวบรวมไม้ได้ ซึ่งต้องใช้รถขนาดเล็กในการรวบรวม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงแบ่งระดับการขนส่งออกเป็นสองระดับ นั่นคือ รวบรวมไม้ชีวมวลจากแต่ละพื้นที่ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า Supplier และขนส่งไปยังศูนย์รวบรวมเพื่อแปรรูปไม้และจะเรียกศูนย์รวบรวมนี้นว่า Collection Site ซึ่งจะใช้รถขนาดเล็กในการรวบรวม และจะเรียกระดับการจัดการนี้ว่าระดับที่ 1 ซึ่งในระดับที่ 1 นี้จะมีการคัดเลือก Collection Site เพื่อรวบรวมไม้จาก Supplier หลังจากนั้นไม้ที่ผ่านการแปรรูปจาก Collection Site จะถูกรวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ (Bio-Refinery) ซึ่งการรวบรวมนี้จะเป็นการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 และรูปแบบนี้จะอยู่ในรูปแบบปัญหา TLRP โดยในแต่ละระดับจะต้องจัดเส้นทางในการขนส่ง นั่นคือ จัดเส้นทางจาก Supplier ไปยัง Collection Site ที่ถูกเลือก และจัดเส้นทางเพื่อรวบรวมไม้จาก Collection Site ไปยัง Bio-Refinery ตัวอย่างผลลัพธ์ของปัญหา TLRP สำหรับการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลลัพธ์ของปัญหา TLRP สำหรับการจัดการห่วงโซ่อุปทานซี้วมวล

สำหรับสมมติฐานของแบบจำลองที่นำเสนอ เป็นดังนี้

- ยานพาหนะในระดับเดียวกันต้องเป็นยานพาหนะประเภทเดียวกัน และความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1 และระดับที่ 2 แตกต่างกัน โดยความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1 น้อยกว่าความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2
- ยานพาหนะที่ใช้ในระดับที่ 1 ไม่สามารถขนส่งในระดับที่ 2 ได้ และยานพาหนะที่ใช้ในระดับที่ 2 ไม่สามารถขนส่งในระดับที่ 1 ได้
- ความจุของ Collection Site ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2
- ไม่มีเส้นทางระหว่าง Collection Site ในการขนส่งระดับที่ 1
- ไม่มีเส้นทางจาก Supplier ไปยัง Bio-Refinery โดยตรง มีเพียงเส้นทางจาก Collection Site ไปยัง Bio-Refinery เท่านั้น
- ไม่มีเส้นทางระหว่าง Bio-Refinery ในการขนส่งระดับที่ 2
- ปริมาณของไม้ซี้วมวลในแต่ละ Supplier ต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1
- ปริมาณรวมของไม้ซี้วมวลในแต่ละ Collection Site จะต้องถูกส่งต่อไปยัง Bio-Refinery ทั้งหมด
- การสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม

ในการศึกษานี้จะนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-Integer Programming Model: MIP) สำหรับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งของ Collection Site และการจัดเส้นทางสำหรับห่วงโซ่อุปทานซี้วมวลแบบสองระดับ โดยต้องการลดต้นทุนในการดำเนินการต่ำที่สุด สำหรับแบบจำลองที่นำเสนอประกอบด้วย เซต พารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจ ดังตารางที่ 2 - 4

ตารางที่ 2 เซตที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่นำเสนอ

เซต	นิยาม
V_1	เซตของ Supplier ทั้งหมด
V_2	เซตของ Collection Site ทั้งหมด
B	เซตของ Bio-Refinery ทั้งหมด
L_1	เซตของ Supplier และ Collection Site ($V_1 \cup V_2$)
L_2	เซตของ Collection Site และ Bio-Refinery ($V_2 \cup B$)
K_1	เซตของยานพาหนะในระดับที่ 1
K_2	เซตของยานพาหนะในระดับที่ 2

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	นิยาม
d'_{ij}	ระยะทางระหว่างจุด i และจุด j ในระดับที่ 1
f_i	ค่าใช้จ่ายในการเปิดใช้งาน Collection Site i
c	ค่าใช้จ่ายต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร
vc_1	ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะ 1 คัน ในระดับที่ 1
n_1	จำนวนของ Supplier ทั้งหมด
n_2	จำนวนของ Collection Site ทั้งหมด
d''_{ij}	ระยะทางระหว่างจุด i และจุด j ในระดับที่ 2
vc_2	ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะ 1 คัน ในระดับที่ 2
$vcap_1$	ความจุของยานพาหนะระดับที่ 1
$vcap_2$	ความจุของยานพาหนะระดับที่ 2
$CScap$	ความจุของ Collection Site
p_i	จำนวนของไม้ซี้วมวลที่รวบรวมได้สำหรับ Supplier i

ตารางที่ 4 ตัวแปรตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่นำเสนอ

ตัวแปรตัดสินใจ	นิยาม
x_{ijk}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางจาก } i \text{ ไป } j \text{ ด้วยยานพาหนะ } k \text{ โดยที่ } i, j \in L_1 \text{ และ } k \in K_1 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
y_i	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้า Collection Site } i \text{ ถูกเปิด โดยที่ } i \in V_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
z_{ij}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้า Supplier } i \text{ ส่งไม้ซี้วมวลไปยัง Collection Site } j \text{ โดยที่ } i \in V_1 \text{ และ } j \in V_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
a_{ijk}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางจาก } i \text{ ไป } j \text{ ด้วยยานพาหนะ } k \text{ โดยที่ } i, j \in L_2 \text{ และ } k \in K_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
b_{ij}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้า Collection Site } i \text{ ส่งไม้ซี้วมวลไปยัง Bio-Refinery } j \text{ โดยที่ } i \in V_2 \text{ และ } j \in B \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
U'_{ik}	ตัวแปรเสริมเพื่อกำจัดทวิรยะในลำดับที่ 1 โดยที่ $i, j \in V_1$ และ $k \in K_1$
U''_{ik}	ตัวแปรเสริมเพื่อกำจัดทวิรยะในลำดับที่ 2 โดยที่ $i, j \in V_2$ และ $k \in K_2$

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์ คือ การลดต้นทุนให้ต่ำที่สุด (Minimum Cost) ซึ่งจะนับรวมค่าใช้จ่ายในการเปิดใช้งาน Collection Site ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการใช้ยานพาหนะในระดับที่ 1 ค่าใช้จ่ายตามระยะทางในระดับที่ 1 ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการใช้ยานพาหนะในระดับที่ 2 และค่าใช้จ่ายตามระยะทางในระดับที่ 2 ดังนั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถเขียนได้ดังฟังก์ชันที่ (1) และจากสมมติฐานของแบบจำลองที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม สำหรับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งของ Collection Site และการจัดเส้นทางสำหรับท่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับสามารถเขียนได้ดังเงื่อนไขที่ (2) - (31)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\min \sum_{i \in V_2} f_i y_i + vc_1 \sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} + c \sum_{i \in L_1} \sum_{j \in L_1} \sum_{k \in K_1} d'_{ij} x_{ijk} + vc_2 \sum_{i \in B} \sum_{j \in V_2} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} + c \sum_{i \in L_2} \sum_{j \in L_2} \sum_{k \in K_2} d''_{ij} a_{ijk} \quad (1)$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraint)

$$\sum_{i \in L_1, i \neq j} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} = 1; \quad \forall j \in V_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in L_1, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{i \in L_1, i \neq j} x_{jik}; \quad \forall j \in L_1, \forall k \in K_1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_2} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} = 0; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_1} x_{ijk} \leq 1; \quad \forall k \in K_1 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} \leq My_i; \quad \forall i \in V_2 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V_2} z_{ij} = 1; \quad \forall i \in V_1 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_1} z_{ij} \leq My_j; \quad \forall j \in V_2 \quad (8)$$

$$-z_{ij} + \sum_{l \in L_1} (x_{ilk} + x_{jlk}) \leq 1; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_1 \quad (9)$$

$$\sum_{j \in L_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} \geq y_i; \quad \forall i \in V_2 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in L_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} \geq y_j; \quad \forall j \in V_2 \quad (11)$$

$$U'_{ik} - U'_{jk} + n_1 x_{ijk} \leq n_1 - 1; \quad \forall i, j \in V_1, \forall k \in K_1 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in L_2, i \neq j} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} = y_j; \quad \forall j \in V_2 \quad (13)$$

$$\sum_{i \in L_2, i \neq j} a_{ijk} = \sum_{i \in L_2, i \neq j} a_{jik}; \quad \forall j \in L_2, \forall k \in K_2 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} = 0; \quad (15)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in V_2} a_{ijk} \leq 1; \quad \forall k \in K_2 \quad (16)$$

$$\sum_{j \in B} b_{ij} = y_i; \quad \forall i \in V_2 \quad (17)$$

$$-b_{ij} + \sum_{l \in L_2} (a_{ilk} + a_{jlk}) \leq 1; \quad \forall i \in V_2, \forall j \in B, \forall k \in K_2 \quad (18)$$

$$\sum_{j \in V_2} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} \geq 1; \quad \forall i \in B \quad (19)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} \geq 1; \quad \forall j \in B \quad (20)$$

$$U''_{ik} - U''_{jk} + n_2 a_{ijk} \leq n_2 - 1; \quad \forall i, j \in V_2, \forall k \in K_2 \quad (21)$$

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{j \in L_1} p_i x_{ijk} \leq vcap_1; \quad \forall k \in K_1 \quad (22)$$

$$\sum_{i \in V_1} p_i z_{ij} \leq y_j CScap; \quad \forall j \in V_2 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} \sum_{l \in L_2} p_i z_{ij} a_{ljk} \leq vcap_2; \quad \forall k \in K_2 \quad (24)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j \in L_1, \forall k \in K_1 \quad (25)$$

$$y_i \in \{0,1\}; \quad \forall i \in V_2 \quad (26)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (27)$$

$$U'_{ik} \geq 0; \quad \forall i \in V_1, \forall k \in K_1 \quad (28)$$

$$a_{ijk} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j \in L_2, \forall k \in K_2 \quad (29)$$

$$b_{ij} \in \{0,1\}; \quad \forall i \in V_2, \forall j \in B \quad (30)$$

$$U''_{ik} \geq 0; \quad \forall i \in V_2, \forall k \in K_2 \quad (31)$$

โดยเงื่อนไขบังคับทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นเงื่อนไขสำหรับการจัดเส้นทางในระดับที่ 1 (เงื่อนไข (2) - (12)) และเงื่อนไขบังคับสำหรับการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 (สมการที่ (13) - (21)) เงื่อนไขด้านความจุ (เงื่อนไข (22) - (24)) และเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ (เงื่อนไข (25) - (31)) โดยความหมายของแต่ละเงื่อนไขอธิบายได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความหมายและคำอธิบายของเงื่อนไขบังคับของแบบจำลองที่นำเสนอ

เงื่อนไขที่	ความหมายและคำอธิบาย
(2)	แต่ละ Supplier จะต้องมีการเดินทางเข้ามา 1 เส้นทาง
(3)	สำหรับทุกจุดในระดับที่ 1 ยานพาหนะที่เข้าและออกในทุก ๆ จุดจะต้องเป็นคันเดียวกัน
(4)	ไม่มีเส้นทางระหว่าง Collection Site ในระดับที่ 1
(5)	สำหรับยานพาหนะทุกคันเริ่มต้นที่ Collection Site ไม่เกิน 1 เส้นทาง
(6)	การเดินทางจะต้องมาจาก Collection Site ที่เปิดเท่านั้น
(7)	Supplier ทุกรายต้องส่งไม้ชีวมวลไปที่ Collection Site 1 แห่งเท่านั้น
(8)	Supplier ทุกรายต้องส่งไม้ชีวมวลไปที่ Collection Site ที่ถูกเปิดเท่านั้น
(9)	กำหนดระบบการจัดส่งให้แต่ละ Supplier ส่งไม้ชีวมวลไปยัง Collection Site เพียงหนึ่งจุดเท่านั้น
(10) - (11)	กำหนดให้ในระดับที่ 1 ทุกเส้นทางเริ่มและสิ้นสุดที่ Collection Site
(12)	ป้องกันการเกิดทัวร์ย่อยในระดับที่ 1 (การเดินทางระหว่าง Supplier โดยไม่ผ่าน Collection Site)
(13)	แต่ละ Collection Site ที่เปิดจะต้องมีเส้นทางเข้ามา 1 เส้นทาง
(14)	สำหรับทุกจุดในระดับที่ 2 ยานพาหนะที่เข้าและออกในทุก ๆ จุดจะต้องเป็นคันเดียวกัน
(15)	ไม่มีเส้นทางระหว่าง Bio-Refinery โดยตรง
(16)	สำหรับยานพาหนะทุกคันเริ่มต้นที่ Bio-Refinery ไม่เกิน 1 เส้นทาง
(17)	แต่ละ Collection Site ที่เปิด จะมีเส้นทางไป Bio-Refinery 1 แห่ง
(18)	กำหนดระบบการจัดส่งให้แต่ละ Collection Site ส่งไม้ชีวมวลไปยัง Bio-Refinery เพียงหนึ่งจุด
(19) - (20)	กำหนดให้ในระดับที่ 2 ทุกเส้นทางเริ่มและสิ้นสุดที่ Bio-Refinery
(21)	ป้องกันการเกิดทัวร์ย่อยในระดับที่ 2

ตารางที่ 5 ความหมายและคำอธิบายของเงื่อนไขบังคับของแบบจำลองที่นำเสนอ (ต่อ)

เงื่อนไข	ความหมายและคำอธิบาย
(22)	จำนวนไม้ซิวมวลไม่เกินความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1
(23)	จำนวนไม้ซิวมวลไม่เกินความจุของ Collection Site
(24)	จำนวนไม้ซิวมวลไม่เกินความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2
(25) - (31)	ค่าของตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

3. การแปลงฟังก์ชันให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น

จากแบบจำลองที่นำเสนอ จะเห็นว่า เงื่อนไขที่ (24) เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinear Function) นั่นคือ พจน์ $z_{ij}a_{ljk}$ ซึ่งเป็นการคูณกันของตัวแปรตัดสินใจสองตัวแปร ซึ่งจะทำให้แบบจำลองไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้โดยง่าย ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ได้จึงต้องทำการแปลงให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linearization) และเนื่องจาก z_{ij} และ a_{ljk} เป็นตัวแปรทวิภาค ดังนั้น เราสามารถกำหนดตัวแปรตัดสินใจใหม่ โดยกำหนดให้ $za_{ijkl} = z_{ij}a_{ljk}$ ซึ่งมีความหมายเป็นดังนี้

$$za_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางจาก } i \text{ ไป } j \text{ ในระดับที่ 1 และส่งต่อไปยัง } l \text{ ด้วยยานพาหนะ } k \text{ ในระดับที่ 2} \\ & \text{โดยที่ } i \in V_1, j \in V_2, l \in L_2 \text{ และ } k \in K_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

ดังนั้น เงื่อนไขที่ (24) จะถูกแปลงเป็นดังเงื่อนไขที่ (32)

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} \sum_{l \in L_2} p_i za_{ijkl} \leq vcap_2; \quad \forall k \in K_2 \quad (32)$$

และเพิ่มเงื่อนไขใหม่เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงสอดคล้องกับเงื่อนไขเดิม ดังเงื่อนไขที่ (33) - (35)

$$za_{ijkl} \leq z_{ij}; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_2, \forall l \in L_2 \quad (33)$$

$$za_{ijkl} \leq a_{ljk}; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_2, \forall l \in L_2 \quad (34)$$

$$z_{ij} + a_{ljk} \leq za_{ijkl} + 1; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_2, \forall l \in L_2 \quad (35)$$

จากเงื่อนไข (33) - (34) จะได้ว่า ถ้า $z_{ij} = 0$ หรือ $a_{ljk} = 0$ จะได้ว่า $za_{ijkl} = 0$ ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ (33) - (35) และถ้า $z_{ij} = 1$ และ $a_{ljk} = 1$ จะได้ว่า $za_{ijkl} = 1$ ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ (33) - (35) นั่นคือ ผลลัพธ์ที่ได้ของตัวแปรใหม่ za_{ijkl} ยังคงมีค่าเท่ากับ $z_{ij}a_{ljk}$

จากการแปลงเชิงเส้น จะได้ว่า แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการแก้ปัญหาห่วงโซ่อุปทานซิวมวลแบบสองระดับ จะประกอบด้วย ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (1) และเงื่อนไขที่ (2) - (23) และเงื่อนไขที่ (25) - (35)

ผลการวิจัย

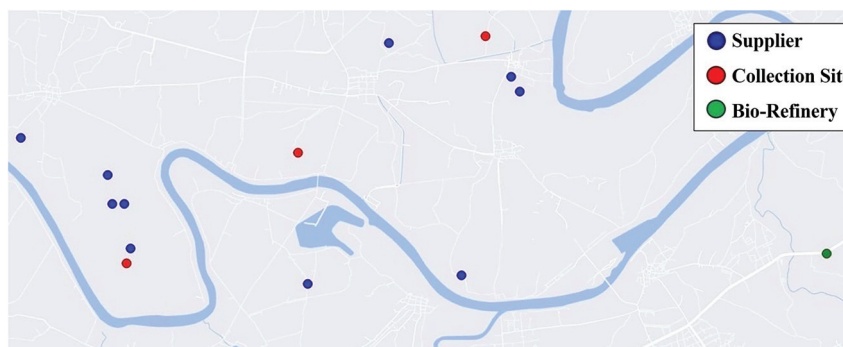
สำหรับการทดสอบแบบจำลองที่นำเสนอ ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลไม้ซิวมวลจากงานวิจัยของ [16] ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ ตำแหน่งของ Supplier และจำนวนไม้ซิวมวลที่จัดหาได้สำหรับแต่ละ Supplier และตำแหน่งของ Collection Site ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคัดเลือก Supplier ที่มีปริมาณไม้ซิวมวลมากเป็น

Collection Site เพิ่มเติม และบาง Supplier ได้ถูกตัดออกจากการพิจารณาเนื่องจากกระยะทางไกลกว่าจุดอื่น ๆ มาก ดังนั้น ในกรณีศึกษาครั้งนี้ จะมี Supplier จำนวน 10 จุด และ Collection Site จำนวน 3 จุด โดยรายละเอียดแต่ละจุดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด และปริมาณไม้ซี้วมวลของแต่ละ Supplier

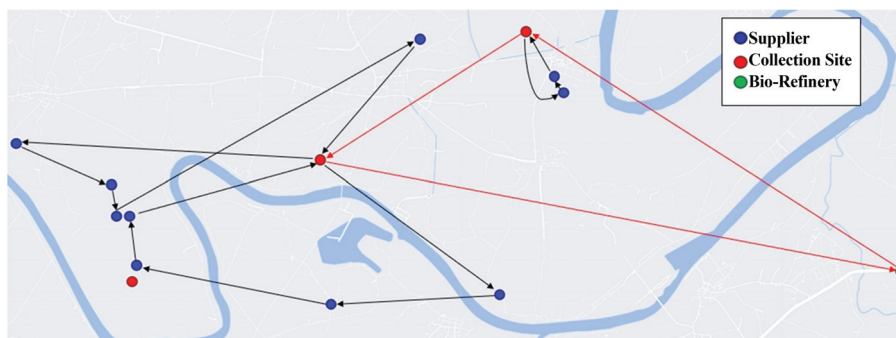
ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ปริมาณไม้ซี้วมวล (กก.)
Collection Site 1	15.1505030	104.6584878	-
Collection Site 2	15.1344963	104.6327180	-
Collection Site 3	15.1673784	104.6866989	-
Supplier 1	15.1615522	104.6905147	57
Supplier 2	15.1526875	104.6168721	396
Supplier 3	15.1366762	104.6333192	849
Supplier 4	15.1472667	104.6299594	113
Supplier 5	15.1430998	104.6305810	396
Supplier 6	15.1430998	104.6324031	226
Supplier 7	15.1593389	104.6918025	396
Supplier 8	15.1315736	104.6599839	113
Supplier 9	15.1664174	104.6721321	226
Supplier 10	15.1327825	104.6830828	283

สำหรับการแก้ปัญหานี้ จะต้องมีข้อมูลเพิ่มเติม นั่นคือ ตำแหน่งของ Bio-Refinery ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง โดยตำแหน่ง Supplier, Collection Site และ Bio-Refinery ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่ง Supplier, Collection Site และ Bio-Refinery บนแผนที่จริง

หลังจากทราบตำแหน่งของ Supplier, Collection Site และ Bio-Refinery ระยะทางระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกคำนวณด้วยระยะทางจริงจาก Google Map และนอกจากข้อมูลด้านตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้มาแล้ว จะมีข้อมูลความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น 1,500 กิโลกรัม ความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2 เป็น 5,000 กิโลกรัม รวมถึงค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะในระดับที่ 1 และ 2 จะอยู่ที่ 1,500 บาท และ 4,000 บาท และมีค่าใช้จ่ายคิดตามระยะทางโดยคิดค่าน้ำมันลิตรละ 33 บาท จากข้อมูลข้างต้น เมื่อนำแบบจำลองที่นำเสนอมาหาผลลัพธ์ด้วยซอฟต์แวร์ Gurobi โดยใช้โปรแกรม Python ซึ่งใช้เวลาประมวลผลจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 65,965 วินาที และผลลัพธ์ของตำแหน่งของ Collection Site ที่ถูกเปิด เส้นทางขนส่งทั้งระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่ง Collection Site ที่ถูกเปิดและเส้นทางการขนส่งทั้งสองระดับ

จากรูปที่ 3 จะได้ว่า จะต้องเปิด Collection Site จำนวน 2 จุด และใช้รถจำนวน 3 คัน ในระดับที่ 1 และในระดับที่ 2 จะใช้รถเพียงคันเดียวในการขนส่งทั้งหมด โดยจะได้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุดอยู่ที่ 29,277.43 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขนส่งไม้ชีวมวลแบบสองระดับ โดยที่ไม่มีการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 พบว่า จะมีค่าใช้จ่ายรวมอยู่ที่ 33,619.97 บาท ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 4,342.54 บาท ซึ่งคิดเป็น 12.92 %

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยต้องการเลือกจุดรวบรวมไม้จาก Supplier และจัดเส้นทางการขนส่งจากแต่ละ Supplier ไปยัง Collection Site และจัดเส้นทางการขนส่งจาก Collection Site ไปยัง Bio-Refinery ซึ่งวัตถุประสงค์ของแบบจำลองจะพิจารณาถึงต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่นำเสนอเริ่มต้นเป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้น ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ได้ ผู้วิจัยจึงได้แปลงแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น และเมื่อทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลไม้ชีวมวลจริง พบว่าผลลัพธ์ของแบบจำลองที่มีการจัดเส้นทางทั้งสองระดับสามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดเส้นทางเพียงระดับเดียว เนื่องจากการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 สามารถลดจำนวนของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบยังเป็นข้อมูลขนาดเล็ก แต่การหาผลลัพธ์ยังใช้เวลาค่อนข้างมาก ซึ่งเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่มากขึ้น การหาผลลัพธ์อาจใช้เวลานานมากยิ่งขึ้น ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงสามารถมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีฮิวริสติกเพื่อหาผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy of Thailand. (2020). **Alternative Energy Development Plan 2018-2037 (AEDP 2018-2037)**. Access (15 May 2024). Available (<https://policy.asiapacificenergy.org/node/4351>)
- [2] Bowling, I. M., Ponce-Ortega, J. M., and El-Halwagi, M. M. (2011). Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Vol. 50, No. 10, pp. 6276-6286. DOI: 10.1021/ie101921y
- [3] Johnson, D. M., Jenkins, T. L., and Zhang, F. (2012). Methods for Optimally Locating a Forest Biomass-to-Biofuel Facility. **Biofuels**. Vol. 3, Issue 4, pp. 489-503. DOI: 10.4155/bfs.12.34

- [4] Woo, H., Acuna, M., Moroni, M., Taskhiri, M. S., and Turner, P. (2018). Optimizing the Location of Biomass Energy Facilities by Integrating Multi-Criteria Analysis (MCA) and Geographical Information Systems (GIS). **Forests**. Vol. 9, Issue 10, DOI: 10.3390/f9100585
- [5] Nguyen, D. H. and Chen, H. (2018). Supplier Selection and Operation Planning in Biomass Supply Chains with Supply Uncertainty. **Computers & Chemical Engineering**. Vol. 118, pp. 103-117. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.07.012
- [6] Costa, Y. and Melo, T. (2024). **Facility Location Modeling in Supply Chain Network Design: Current State and Emerging Trends**. In: Sarkis, J. (eds) The Palgrave Handbook of Supply Chain Management. Palgrave Macmillan, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-19884-7_101
- [7] Solomon, M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. **Operations Research**. Vol. 35, No. 2, pp. 254-265
- [8] Tan, S.-Y. and Yeh, W.-C. (2021). The Vehicle Routing Problem: State-of-the-Art Classification and Review. **Applied Sciences**. Vol. 11, Issue 21, DOI: 10.3390/app112110295
- [9] Gracia, C., Velazquez-Martí, B., and Estornell, J. (2014). An Application of the Vehicle Routing Problem to Biomass Transportation. **Biosystems Engineering**. Vol. 124, pp. 40-52. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.06.009
- [10] Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J., and Palmer, H. (1998). Logistics Management and Costs of Biomass Fuel Supply. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**. Vol. 28, No. 6, pp. 463-477. DOI: 10.1108/09600039810245120
- [11] Searcy, E., Flynn, P., Ghafoori, E., and Kumar, A. (2007). The Relative Cost of Biomass Energy Transport. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. Vol. 137, pp. 639-652. DOI: 10.1007/s12010-007-9085-8
- [12] Perpina, C., Alfonso, D., Pérez-Navarro, A., Penalvo, E., Vargas, C., and Cárdenas, R. (2009). Methodology Based on Geographic Information Systems for Biomass Logistics and Transport Optimisation. **Renewable Energy**. Vol. 34, Issue 2, pp. 555-565. DOI: 10.1016/j.renene.2008.05.047
- [13] Sajida, K., Nazir Maryam, S., Kausar, N., Agarwal, P., Ozbilge, E., and Bulut, A. (2023). Optimizing Transportation Cost for Biomass Supply Chain. **Thermal Science**. Vol. 27, Special Issue 1, pp. S245-S251
- [14] Cooper, L. (1972). The Transportation-Location Problem. **Operations Research**. Vol. 20, No. 1, pp. 94-108. DOI: 10.1287/opre.20.1.94
- [15] Drexler, M. and Schneider, M. (2015). A Survey of Variants and Extensions of the Location-Routing Problem. **European Journal of Operational Research**. Vol. 241, Issue 2, pp. 283-308. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.08.030
- [16] Ransikarbum, K., Wattanasang, N., and Madathil, S. C. (2023). Analysis of Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows: The Implication for Open Innovation Dynamics. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**. Vol. 9, Issue 1, DOI: 10.1016/j.joitmc.2023.100024
- [17] Yunusoglu, P., Ozsoydan, F. B., and Bilgen, B. (2024). A Machine Learning-Based Two-Stage Approach for the Location of Undesirable Facilities in the Biomass-to-Bioenergy Supply Chain. **Applied Energy**. Vol. 362, DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122961



- [18] Yeng, F. F., Zainuddin, Z. M., and Pheng, H. S. (2024). Optimizing Palm Oil Biomass Supply Chain Logistics through Multi-Objective Location-Routing Model. **Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences (MJFAS)**. Vol. 20, No. 2, pp. 247-265
- [19] Cao, J. X., Zhang, Z., and Zhou, Y. (2021). A Location-Routing Problem for Biomass Supply Chains. **Computers & Industrial Engineering**. Vol. 152, DOI: 10.1016/j.cie.2020.107017
- [20] Wang, C., Cao, T., Nguyen, D. D., and Dang, T. (2024). Bi-Objective Optimization Modeling for Biomass Supply Chain Planning. **Measurement and Control**. Vol. 362, DOI: 10.1177/00202940241226603
- [21] Xu, R., Huang, Y., and Xiao, W. (2023). A Two-Level Variable Neighborhood Descent for a Split Delivery Clustered Vehicle Routing Problem with Soft Cluster Conflicts and Customer-Related Costs. **Sustainability**. Vol. 15, No. 9, pp. 1-22
- [22] Ghasemi, P., Hemmaty, H., Chobar, A. P., Heidari, M. R., and Keramati, M. (2023). A Multi-Objective and Multi-Level Model for Location-Routing Problem in the Supply Chain Based on the Customer's Time Window. **Journal of Applied Research on Industrial Engineering**. Vol. 10, Issue 3, pp. 412-426. DOI: 10.22105/jarie.2022.321454.1414