

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นตรงแบบผสมสำหรับการเลือกที่ตั้งท่าเรือบกในประเทศไทย โดยคำนึงถึงโลจิสติกส์สีเขียว

A Mixed Integer Linear Programming Model for Green Logistics-Based Inland Container Depot Location Selection in Thailand

ศราวุธ ไม้แก้ว¹ กานต์ มุลศรี^{2,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม จ.นครพนม

²ภาควิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม จ.นครพนม

*Corresponding author; E-mail address: k.moonsri@npu.ac.th

บทคัดย่อ

การขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2567 ท่าเรือแหลมฉบังมีปริมาณตู้คอนเทนเนอร์ผ่านท่าถึง 9.46 ล้าน TEU แม้ว่าพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานระบบรางของประเทศจะสร้างโอกาสในการพัฒนาระบบโลจิสติกส์แบบบูรณาการ แต่ความแออัดบริเวณท่าเรือและมลภาวะจากการขนส่งยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Linear Programming: MILP) เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจเลือกที่ตั้งที่เหมาะสมของท่าเรือบก (Inland Container Depot: ICD) โดยผสมผสานวัตถุประสงค์ด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกันอย่างสมดุล การศึกษาใช้การทดลองเชิงตัวเลขจากสถานการณ์จำลองที่สะท้อนบริบทของประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พบว่าการเลือกสร้าง ICD ที่ลาดกระบังและสุราษฎร์ธานีเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยมีต้นทุนรวมประมาณ 447.75 ล้านบาท และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อยู่ที่ 891 ตัน แม้ว่าจะสามารถสร้าง ICD ได้สูงสุด 3 แห่งภายใต้งบประมาณ 500 ล้านบาท แต่แบบจำลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกเพียง 2 แห่งในตำแหน่งเชิงกลยุทธ์ก็เพียงพอ นอกจากนี้ การใช้การขนส่งทางรางทั้งหมด (100%) ส่งผลให้คะแนนโลจิสติกส์สีเขียวสูงถึง 14.109 จากคะแนนเต็ม 10 แบบจำลองนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวางแผนและตัดสินใจในระบบโลจิสติกส์ที่ยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ท่าเรือบก, การเลือกทำเลที่ตั้ง, แบบจำลองคณิตศาสตร์, โลจิสติกส์สีเขียว

Abstract

Container transportation in Thailand has steadily increased, with Laem Chabang Port handling 9.46 million TEUs in 2024. While the development of national rail infrastructure enhances opportunities for integrated logistics systems, port congestion

and transport-related pollution remain key challenges. This study proposes a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model as a decision-support tool for identifying optimal locations for Inland Container Depots (ICDs), integrating both economic and environmental objectives. A numerical experiment based on a simulated scenario reflecting Thailand's logistics context was conducted. The results suggest that establishing ICDs in Lat Krabang and Surat Thani is the most appropriate strategy, with a total cost of approximately 447.75 million THB and resulting in 891 tons of CO₂ emissions. Although up to three ICDs could be built under a 500-million-THB budget, the model shows that two strategically located ICDs suffice to ensure efficient service delivery. Lat Krabang is positioned near high-demand zones and major ports, while Surat Thani serves the southern region and possesses high renewable energy potential. Using 100% rail transport in this scenario yields an exceptionally high green logistics score of 14.109 (on a normalized scale where 10 is the benchmark). The developed MILP model can serve as a practical planning and decision-making tool to promote sustainable and cost-effective logistics in Thailand.

Keywords: Inland Container Depot, location optimization, mathematical modeling, green logistics

1. บทนำ

การขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ในประเทศไทยยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ท่าเรือแหลมฉบังมีปริมาณตู้คอนเทนเนอร์ผ่านท่าถึง 9.46 ล้าน TEU เพิ่มขึ้นจาก 8.67 ล้าน TEU ในปีพ.ศ. 2566 และ 8.72 ล้าน TEU ในปี พ.ศ. 2565 การเติบโตนี้ส่งผลให้เกิดความแออัด

บริเวณท่าเรือและปัญหาการจราจรจากการขนส่งทางถนน ซึ่งเป็นความท้าทายสำคัญต่อระบบโลจิสติกส์ของประเทศ.

ในขณะเดียวกันรัฐบาลไทยได้ลงทุนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานระบบรางอย่างต่อเนื่อง ทั้งโครงการรถไฟทางคู่และรถไฟความเร็วสูง ซึ่งเปิดโอกาสให้เกิดการปรับเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งจากถนนสู่ราง Froböse และคณะ [1] ชี้ว่าการขนส่งทางรางสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 75% เมื่อเทียบกับการขนส่งทางถนนในระยะทางเท่ากัน

โดยท่าเรือบก (Inland Container Depot: ICD) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในฐานะจุดเชื่อมต่อระหว่างการขนส่งทางรางและการกระจายสินค้า ปัจจุบันประเทศไทยมี ICD หลักที่ลาดกระบัง กรุงเทพฯ ซึ่งมีขีดความสามารถรับตู้คอนเทนเนอร์ประมาณ 1.2 ล้าน TEU ต่อปี อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของกิจกรรมทางเศรษฐกิจไปสู่ภูมิภาคต่างๆ ทำให้มีความจำเป็นต้องพิจารณาการสร้าง ICD เพิ่มเติมในพื้นที่เชิงยุทธศาสตร์

ปัจจุบันแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียวได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากภาคการขนส่งมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 14% ของการปล่อยก๊าซทั้งหมด ประเทศไทยตั้งเป้าลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 20-25% ภายในปี 2573 โดยภาคการขนส่งเป็นหนึ่งในภาคส่วนเป้าหมาย ดัง McKinnon และคณะ [2] ซึ่งแสดงความสำคัญของการพิจารณาทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในการออกแบบระบบโลจิสติกส์

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Linear Programming: MILP) สำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้ง ICD ในประเทศไทยภายใต้แนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว โดยพิจารณาโครงสร้างเครือข่ายสามระดับประกอบด้วยท่าเรือ ICD และลูกค้า ทั้งการขนส่งทางรางและทางถนน รวมถึงนำปัจจัยด้านพลังงานหมุนเวียนมาพิจารณา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahi และ Searcy [3]

บทความนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 ส่วน โดยส่วนที่ 2 นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลือกตำแหน่งที่ตั้ง ICD และโลจิสติกส์สีเขียว ส่วนที่ 3 อธิบายการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยระบุสมมติฐาน เขต พารามิเตอร์ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัดต่างๆ ส่วนที่ 4 นำเสนอผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง และส่วนที่ 5 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ที่ยั่งยืนในประเทศไทย

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศและการพัฒนาระบบโลจิสติกส์สีเขียวเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากผลกระทบทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยในสาขานี้มุ่งเน้นการบูรณาการระหว่างการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนนี้ได้ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อสร้างพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในการศึกษานี้

Mohammadi และคณะ [4] นำเสนอแนวทางแบบองค์รวมในการจัดการขยะโดยใช้ IoT ที่บูรณาการการเก็บและคัดแยกขยะ พร้อมพัฒนา

แบบจำลองพหุวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตำแหน่งศูนย์คัดแยกและการจัดเส้นทางยานพาหนะสีเขียว โดยมุ่งลดต้นทุน ลดการปล่อย CO₂ และมลพิษทางสายตา ใช้ GAMS สำหรับวิธีแมนยาและอัลกอริทึม SEO กับ Keshtel สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ Ge และคณะ [5] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางขนส่งแร่เหล็กแบบหลายรูปแบบโดยคำนึงถึงต้นทุนคาร์บอน ใช้โครงข่ายประสาทเทียม BP สำหรับพยากรณ์ความต้องการและ NSGA-II ในการเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทาง ผลการศึกษาแนะนำให้เพิ่มสัดส่วนการขนส่งทางน้ำและรถไฟเพื่อประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ

Irawan และคณะ [6] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแบบสองวัตถุประสงค์สำหรับเครือข่ายท่าเรือแบบศูนย์กลาง-ซี่ล้อ เพื่อลดต้นทุนและการปล่อยคาร์บอน พัฒนาแบบจำลองแบบสองขั้นตอนและใช้อัลกอริทึมพันธุกรรมแบบผสมผสานเพื่อแก้ปัญหา NP-hard นี้ Tan และคณะ [7] เสนอแบบจำลองโปรแกรมสองระดับศึกษาผลกระทบของเครือข่ายสิทธิการปล่อยคาร์บอนต่อการตัดสินใจของผู้ให้บริการขนส่ง พิจารณาสมดุลทั้งด้านการแข่งขันและการซื้อขายโควตา พบว่าการเลือกเทคโนโลยีเชื้อเพลิงต้องเป็นแบบพาเรโตออปติมัล

Das และ Roy [8] ศึกษาผลกระทบการปล่อยคาร์บอนในปัญหาตำแหน่งสถานที่-p-การขนส่งแบบพหุวัตถุประสงค์ภายใต้สภาพแวดล้อมนิวโทรโซฟิค โดยใช้วิธีผสมผสานและทำการวิเคราะห์ความไวเพื่อตรวจสอบความยืดหยุ่นของแบบจำลอง Zhou และคณะ [9] พัฒนาการออกแบบเครือข่ายศูนย์กลาง-ซี่ล้อสำหรับการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ในทางน้ำภายในประเทศ ใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อกำหนดตำแหน่งศูนย์กลาง จัดสรรท่าเรือป้อนและกองเรือพร้อมกัน โดยทดสอบกับกรณีศึกษาแม่น้ำแยงซีเกียง

Zhao และคณะ [10] นำเสนอระบบโลจิสติกส์ตู้คอนเทนเนอร์แบบร่วมมือระหว่างท่าเรือบกและท่าเรือน้ำ ใช้อัลกอริทึม INSGA-II และวิธีถ่วงน้ำหนักแบบเอนโทรปี ผลการศึกษายืนยันว่าต้นทุนจัดเก็บต่ำกว่าระบบสถานีเดียว Kurtulus [11] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพโลจิสติกส์ตู้คอนเทนเนอร์และการกำหนดตำแหน่งท่าเรือบกจากมุมมองสิ่งแวดล้อม พบว่าการปล่อยมลพิษสามารถลดลงได้ 13.23% และชี้ให้เห็นว่าการลดต้นทุนขนส่งทางรถไฟเป็นมาตรการที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดมลพิษ

Wei และคณะ [12] นำเสนอกรอบการทำงานบูรณาการสำหรับเลือกตำแหน่งคลังตู้คอนเทนเนอร์ภายในประเทศและจัดตารางเวลา ผลการศึกษาแสดงว่าสามารถลดต้นทุนรวมได้อย่างน้อย 27% และลดระยะทางขนส่งตู้เปล่าอย่างน้อย 4% Ouevray และคณะ [13] ประเมินทางเลือกขนส่ง CO₂ ทั้งภายในแผ่นดินและนอกชายฝั่งในบริบทของห่วงโซ่อุปทาน CCTS โดยวิเคราะห์ทางเลือกทั้งตู้คอนเทนเนอร์ ถังถาวร และท่อส่ง พัฒนาความสัมพันธ์เพื่อกำหนดต้นทุนการขนส่งจากข้อมูลจริงที่รวบรวมจากผู้ให้บริการและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นที่การลดต้นทุนและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าและการขนส่ง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลากหลายรูปแบบ ทั้งโปรแกรมเชิงเส้น โปรแกรมพหุวัตถุประสงค์ และการใช้เทคนิคการหา

คำตอบแบบฮิวริสติกสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ยังมีช่องว่างในการศึกษาที่บูรณาการแนวคิดด้านพลังงานหมุนเวียนเข้ากับการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศ ซึ่งเป็นประเด็นที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อต่อยอดองค์ความรู้ในสาขาโลจิสติกส์สีเขียว

3. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนนี้จะนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว โดยจะเริ่มจากการกำหนดสมมติฐานหลักที่ใช้เป็นกรอบแนวคิดในการพัฒนาแบบจำลอง สมมติฐานเหล่านี้มีความสำคัญเนื่องจากช่วยกำหนดขอบเขตและลักษณะของปัญหา ซึ่งจะส่งผลต่อการออกแบบองค์ประกอบต่างๆ ของแบบจำลองและการแปลผลคำตอบที่ได้

3.1 สมมติฐานหลักในแบบจำลองการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว

แบบจำลองการเลือกตำแหน่ง ICD ตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียวของงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานสำคัญห้าประการดังนี้

- (1) โครงสร้างเครือข่ายสามระดับ เครือข่ายมีลักษณะเป็นโครงสร้างสามระดับประกอบด้วยท่าเรือ-ICD-ลูกค้า โดยไม่มีการขนส่งตรงจากท่าเรือสู่ลูกค้า [14]
- (2) สมดุลเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม: ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้น้ำหนักเท่ากัน (50:50) ระหว่างต้นทุนทางเศรษฐกิจและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [2]
- (3) บูรณาการหลายรูปแบบการขนส่ง: กำหนดให้การขนส่งทางรางมีสัดส่วนอย่างน้อย 30% ของความต้องการทั้งหมด สอดคล้องกับเป้าหมายของคณะกรรมการยุโรป [1]
- (4) ส่งเสริมพลังงานหมุนเวียน: กำหนดให้อย่างน้อย 60% ของ ICD ที่เลือกต้องมีศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียน [15]
- (5) การตัดสินใจแบบสถิตจุดเดียว: เป็นการตัดสินใจครั้งเดียวโดยไม่พิจารณาความไม่แน่นอนในอนาคต ควรเสริมด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวและสถานการณ์ [16]

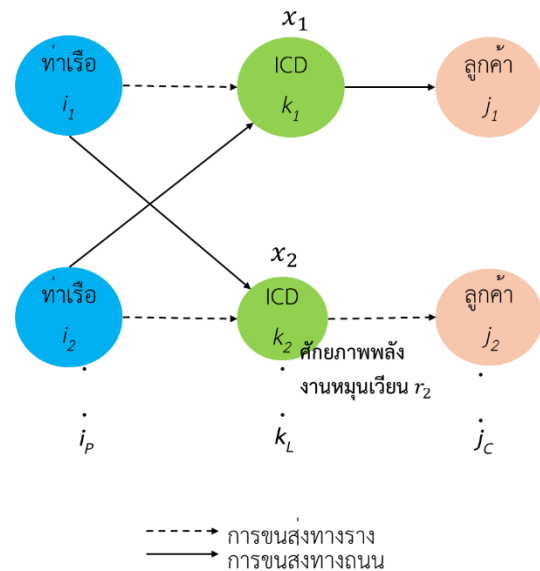
3.2 เซต พารามิเตอร์และตัวแปรตัดสินใจ

ในส่วนนี้จะนำเสนอองค์ประกอบพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว ประกอบด้วยเซต พารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจ ดังนี้

ตารางที่ 1 เซต, พารามิเตอร์และตัวแปรตัดสินใจ

ตัวแปร	ความหมาย
เซต	
i	ดัชนีของท่าเรือ (Port), $i \in \mathcal{P}$
j	ดัชนีของลูกค้า (Customer), $j \in \mathcal{C}$
k	ดัชนีของตำแหน่ง ICD ที่เป็นไปได้ (Potential ICD Site), $k \in \mathcal{L}$
m	ดัชนีของรูปแบบการขนส่ง (Mode of

ตัวแปร	ความหมาย
	Transport), $m \in \mathcal{M}$ โดย $m = 1$ คือ รถไฟ และ $m = 2$ คือรถบรรทุก
พารามิเตอร์	
F_k	ต้นทุนคงที่ในการติดตั้งศูนย์ ICD ที่ตำแหน่ง k
C_{ikjm}	ต้นทุนการขนส่งจากท่าเรือ i ไปยังลูกค้า j ผ่าน ICD k โดยใช้รูปแบบ m
e_{ikjm}	ปริมาณการปล่อย CO ₂ จากการขนส่ง $i \rightarrow j$ ผ่าน k และโหมด m
r_k	ศักยภาพพลังงานหมุนเวียนที่ตำแหน่ง k
d_j	ความต้องการของลูกค้า j
Q_k	ความจุของศูนย์ ICD ที่ตำแหน่ง k
B	งบประมาณที่มีอยู่รวมทั้งหมด
N	จำนวนสูงสุดของศูนย์ ICD ที่สามารถติดตั้งได้
$E_{\max}$	ปริมาณ CO ₂ ที่อนุญาตสูงสุด
ตัวแปรตัดสินใจ	
x_k	$x_k = 1$ หากติดตั้งศูนย์ ICD ที่ตำแหน่ง k , และ $x_k = 0$ หากไม่ติดตั้ง
f_{ikjm}	ปริมาณการขนส่งจากท่าเรือ i ไปยังลูกค้า j ผ่าน ICD k โดยใช้รูปแบบ m



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของปัญหาการเลือกตำแหน่งศูนย์ ICD โดยพิจารณาเส้นทางการขนส่งทางรถไฟและทางถนน พร้อมการใช้พลังงานหมุนเวียน

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองที่นำเสนอเป็นโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Linear Programming: MILP) ที่ผสมผสานระหว่างตัวแปรต่อเนื่อง (การไหลของสินค้า) และตัวแปรทวิภาค (การเลือกตำแหน่ง ICD)

แสดงดังรูปที่ 1. โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้งในฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด เหมาะสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ต้องบูรณาการเงื่อนไขทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกันโดยมีสมการวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัดดังนี้

$$\text{Min } 0.5 \left(\sum_{k \in L} F_k x_k + \sum_{i \in P} \sum_{k \in L} \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} c_{ikjm} f_{ikjm} \right) \quad (1)$$

$$+ 0.5 \sum_{i \in P} \sum_{k \in L} \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} e_{ikjm} f_{ikjm}$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in L} \sum_{m \in M} f_{ikjm} = d_j, \quad \forall j \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} f_{ikjm} \leq Q_k x_k, \quad \forall k \in L \quad (3)$$

$$\sum_{k \in L} F_k x_k \leq B \quad (4)$$

$$\sum_{k \in L} x_k \leq N \quad (5)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in L} \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} e_{ikjm} f_{ikjm} \leq E_{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in L} f_{ikj1} \geq 0.3 \cdot d_j, \quad \forall j \in C \quad (7)$$

$$\sum_{k \in L} r_k x_k \geq 0.6 \cdot \sum_{k \in L} x_k \quad (8)$$

สมการวัตถุประสงค์ (1) ของปัญหาการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียวประกอบด้วยสองส่วน: 1) องค์ประกอบทางเศรษฐกิจ (50%) ซึ่งรวมถึงต้นทุนคงที่ในการติดตั้ง ICD และต้นทุนการขนส่งระหว่างท่าเรือ ICD และลูกค้า และ 2) องค์ประกอบทางสิ่งแวดล้อม (50%) ซึ่งคำนวณจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งทั้งหมด โดยมีสมการข้อจำกัดที่สำคัญดังนี้ สมการข้อจำกัด (2) กำหนดให้ความต้องการของลูกค้าแต่ละรายต้องได้รับการตอบสนองอย่างครบถ้วน ในขณะที่สมการข้อจำกัด (3) กำหนดให้การไหลผ่าน ICD ต้องไม่เกินความจุและ ICD นั้นต้องถูกสร้างขึ้น และสมการข้อจำกัด (4) กำหนดให้ต้นทุนในการติดตั้ง ICD ทั้งหมดต้องไม่เกินงบประมาณที่กำหนดสำหรับสมการข้อจำกัด (5) กำหนดจำนวน ICD สูงสุดที่สามารถสร้างได้ สมการข้อจำกัด (6) กำหนดให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดไม่เกินค่าสูงสุดที่อนุญาต ส่วนสมการข้อจำกัด (7) กำหนดให้อย่างน้อย 30% ของความต้องการของลูกค้าต้องขนส่งโดยใช้ระบบราง และสมการข้อจำกัด (8) กำหนดให้ ICD ที่มีศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียนต้องมียังน้อย 60% ของ ICD ทั้งหมด

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลองกับกรณีตัวอย่าง

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ถูกแก้ไขด้วย IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 22.1.0 โดยใช้อัลกอริทึม Branch and Bound สำหรับปัญหา MILP การทดสอบบนคอมพิวเตอร์ Intel Core i7-8750H CPU @ 2.20GHz (RAM 16.0 GB) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมี

ความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของปัญหา โดยเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นเมื่อตัวแปรและข้อจำกัดเพิ่มขึ้น

4.1 ข้อมูลนำเข้า

การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียวอาศัยข้อมูลกรณีตัวอย่างในประเทศไทย ข้อมูลนำเข้าประกอบด้วยท่าเรือ 3 แห่ง ได้แก่ แหลมฉบัง กรุงเทพฯ และมาบตาพุด ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับ ICD 6 แห่ง ได้แก่ ลาดกระบัง นครราชสีมา ขอนแก่น พิษณุโลก เชียงใหม่ และสุราษฎร์ธานี ลูกค้า 6 กลุ่ม ได้แก่ กรุงเทพฯ เชียงใหม่ ขอนแก่น หาดใหญ่ นครราชสีมา และชลบุรี และรูปแบบการขนส่ง 2 แบบ คือ ทางรางและทางถนน ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นการทดลองเชิงตัวเลข (Numerical experiment) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้มีความสอดคล้องกับบริบทของการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ในประเทศไทย ทั้งในด้านระยะทาง ต้นทุนการขนส่ง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วัตถุประสงค์หลักคือการทดสอบความสามารถของแบบจำลองในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้สถานการณ์จำลอง และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมในระบบโลจิสติกส์

ต้นทุนการติดตั้ง ICD มีความแตกต่างกันตามขนาดและทำเลที่ตั้ง โดย ICD ที่ลาดกระบังมีต้นทุนสูงสุดที่ 250 ล้านบาท ส่วน ICD ที่พิษณุโลกมีต้นทุนต่ำสุดที่ 150 ล้านบาท ในด้านความจุ ICD ที่ลาดกระบังมีความจุสูงสุดที่ 8,000 TEU ขณะที่ ICD ที่เชียงใหม่มีความจุต่ำสุดที่ 2,000 TEU ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ต้นทุนการติดตั้ง ศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียนและความจุของ ICD

ลำดับ	ตำแหน่ง ICD	ต้นทุนการติดตั้ง (ล้านบาท)	ศักยภาพด้าน พลังงาน หมุนเวียน (0-1)	ความจุ (TEU)
1	ลาดกระบัง	250	0.5	8,000
2	นครราชสีมา	180	0.7	4,000
3	ขอนแก่น	160	0.8	3,000
4	พิษณุโลก	150	0.6	2,500
5	เชียงใหม่	190	0.7	2,000
6	สุราษฎร์ธานี	170	0.9	3,500

ความต้องการของลูกค้ามีความหลากหลายตามลักษณะภูมิศาสตร์และกิจกรรมทางเศรษฐกิจ โดยลูกค้าที่กรุงเทพฯ มีความต้องการสูงสุดที่ 5,000 TEU คิดเป็นประมาณ 44% ของความต้องการทั้งหมด (11,400 TEU) ในขณะที่ลูกค้าที่หาดใหญ่มีความต้องการต่ำสุดที่ 800 TEU ดังแสดงในตารางที่ 3

ต้นทุนการขนส่งและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แปรผันตามระยะทาง รูปแบบการขนส่ง และเส้นทาง โดยทั่วไปการขนส่งทางถนนมีต้นทุนและการปล่อยก๊าซ CO₂ สูงกว่าการขนส่งทางราง ต้นทุนการขนส่งต่ำสุดอยู่ที่ 800 บาท/TEU สำหรับการขนส่งจากท่าเรือกรุงเทพฯ ไปยังลูกค้าที่กรุงเทพฯ ผ่าน ICD ลาดกระบังโดยทางราง และสูงสุดที่ 19,000 บาท/TEU สำหรับการขนส่งจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังลูกค้าที่หาดใหญ่

ผ่าน ICD เชียงใหม่โดยทางถนน ในลักษณะเดียวกัน การปล่อยก๊าซ CO₂ มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 20 กิโลกรัม CO₂ เทียบเท่ากับ TEU ไปจนถึง 1,350 กิโลกรัม CO₂ เทียบเท่ากับ TEU ตัวอย่างต้นทุนการขนส่งและการปล่อยก๊าซ CO₂ สำหรับการขนส่งจากท่าเรือแหลมฉบังผ่าน ICD ลาดกระบังไปยังลูกค้าแต่ละรายแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ความต้องการของลูกค้า (TEU)

ลำดับ	ลูกค้า	ความต้องการ
1	กรุงเทพฯ	5,000
2	เชียงใหม่	1,200
3	ขอนแก่น	900
4	หาดใหญ่	800
5	นครราชสีมา	1,500
6	ชลบุรี	2,000

ตารางที่ 4 ต้นทุนการติดตั้ง ศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียนและความจุของ ICD

ลูกค้า	ต้นทุนการขนส่ง		การปล่อยก๊าซ CO ₂	
	(บาท/TEU)		(กก./TEU)	
	ทางราง	ทางถนน	ทางราง	ทางถนน
กรุงเทพฯ	1,500	2,500	60	180
เชียงใหม่	7,000	9,500	220	650
ขอนแก่น	5,000	6,500	150	450
หาดใหญ่	9,000	12,000	280	820
นครราชสีมา	3,500	5,000	120	350
ชลบุรี	1,200	1,800	40	120

ข้อจำกัดของแบบจำลองประกอบด้วยงบประมาณสูงสุด 500 ล้านบาท จำนวน ICD สูงสุดที่สามารถสร้างได้ 3 แห่ง ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂ สูงสุด 5,000,000 กิโลกรัม สัดส่วนการขนส่งทางรางขั้นต่ำ 30% ของความต้องการทั้งหมด และสัดส่วนขั้นต่ำของ ICD ที่มีศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียน 60% ของ ICD ที่เลือกทั้งหมด

4.2 ผลลัพธ์ที่ได้

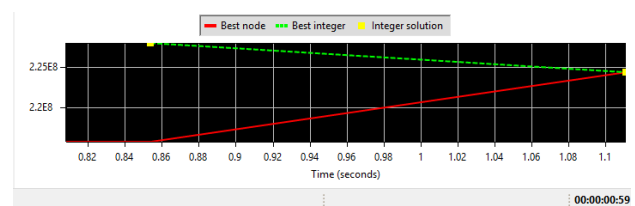
จากการประมวลผลแบบจำลองด้วยข้อมูลนำเข้าข้างต้น พบว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดคือการเลือกสร้าง ICD 2 แห่ง ได้แก่ ลาดกระบังและสุราษฎร์ธานี โดยตัวชี้วัดสำคัญของคำตอบนี้ประกอบด้วยต้นทุนรวม 447.75 ล้านบาท (ต้นทุนการติดตั้ง ICD 420 ล้านบาทและต้นทุนการขนส่ง 27.75 ล้านบาท) การปล่อยก๊าซ CO₂ 891 ตัน สัดส่วนการขนส่งทางราง 100% และสัดส่วนการขนส่งทางถนน 0% ส่งผลให้ได้คะแนนโลจิสติกส์สีเขียว 14.109 จาก 10 คะแนน ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ปกติเนื่องจากการขนส่งทางรางทั้งหมดและการปล่อยก๊าซ CO₂ ในระดับต่ำ

รูปที่ 2 แสดงกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองการเลือกตำแหน่งคลังสินค้าภายในประเทศ โดยแกนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที) และแกนตั้งแสดงค่าวัตถุประสงค์ (ในหน่วย 10⁸ บาท) กราฟนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า

วัตถุประสงค์จากแบบจำลอง (224.32 ล้านบาท) กับต้นทุนรวมที่รายงานในผลลัพธ์ (447.75 ล้านบาท)

เส้นสีแดงแสดงขอบเขตล่างของคำตอบที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ส่วนเส้นสีเขียวแสดงคำตอบจำนวนเต็มที่ดีที่สุดซึ่งลดลงตามเวลา เมื่อเส้นทั้งสองบรรจบกันที่ 1.1 วินาที แสดงว่าแบบจำลองได้พบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ค่าวัตถุประสงค์ 224.32 ล้านบาท

ค่าวัตถุประสงค์นี้มาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ให้น้ำหนัก 50% กับต้นทุนทางเศรษฐกิจ (ต้นทุนการติดตั้งและต้นทุนการขนส่ง) และอีก 50% กับต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม (การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ส่วนต้นทุนรวม 447.75 ล้านบาทที่ปรากฏในผลลัพธ์ คือต้นทุนทางเศรษฐกิจทั้งหมดโดยไม่มีการถ่วงน้ำหนักและไม่รวมต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 ความก้าวหน้าของการหาคำตอบของแบบจำลองตามเวลา

การเลือกสร้าง ICD ที่ลาดกระบังมีความสมเหตุสมผลเนื่องจากมีความจุสูงถึง 8,000 TEU และตั้งอยู่ใกล้กับลูกค้าที่มีความต้องการสูงสุดคือ กรุงเทพฯ (5,000 TEU) และชลบุรี (2,000 TEU) ซึ่งคิดเป็นประมาณ 61% ของความต้องการทั้งหมด นอกจากนี้ยังตั้งอยู่ในทำเลที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบรางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่การเลือกสร้าง ICD ที่สุราษฎร์ธานีช่วยให้ครอบคลุมพื้นที่ภาคใต้และรองรับความต้องการในพื้นที่หาดใหญ่ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังมีศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียนสูงถึง 0.9 ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว

5.สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลอง MILP สำหรับการเลือกตำแหน่ง ICD ตามแนวคิดโลจิสติกส์สีเขียว โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดต้นทุนรวมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้น้ำหนักเท่ากันระหว่างองค์ประกอบทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ซึ่งสะท้อนปรัชญาพื้นฐานของโลจิสติกส์สีเขียวที่มุ่งสร้างสมดุลระหว่างผลกำไรทางธุรกิจและความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม

แบบจำลองมีลักษณะสำคัญคือการพิจารณาโครงสร้างเครือข่ายสามระดับ ประกอบด้วยท่าเรือต้นทาง คลังสินค้าภายในประเทศ และลูกค้าปลายทาง การบูรณาการรูปแบบการขนส่งทั้งทางรางและทางถนน การส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน และการตัดสินใจภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แบบจำลองนี้คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกที่ตั้ง การกำหนดปริมาณการไหลของสินค้า และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่มักถูกพิจารณาแยกส่วนในงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการทดสอบกับกรณีศึกษาในประเทศไทย ซึ่งพิจารณาตำแหน่งที่เป็นไปได้ 6 แห่ง ได้แก่ ลาดกระบัง นครราชสีมา ขอนแก่น พิษณุโลก เชียงใหม่ และสุราษฎร์ธานี ผลลัพธ์แสดงว่าการเลือกสร้าง ICD ที่ลาดกระบังและสุราษฎร์ธานีเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด มีต้นทุนรวม 447.75 ล้านบาท ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂ 891 ตัน และมีการขนส่งทางราง 100% สะท้อนศักยภาพของการขนส่งทางรางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังพบประเด็นที่น่าสนใจคือ แม้จะสามารถสร้าง ICD ได้สูงสุดถึง 3 แห่งภายใต้งบประมาณ 500 ล้านบาท แต่การสร้างเพียง 2 แห่งที่มีตำแหน่งเชิงกลยุทธ์ก็เพียงพอต่อการให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยลาดกระบังตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความต้องการสินค้าสูงและอยู่ใกล้กับท่าเรือหลัก ในขณะที่สุราษฎร์ธานีมีตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการให้บริการพื้นที่ภาคใต้และมีศักยภาพด้านพลังงานหมุนเวียนสูง คะแนนโลจิสติกส์สี่เหลี่ยมที่คำนวณได้มีค่าสูงถึง 14.109 จากคะแนนเต็ม 10 แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้การขนส่งทางรางทั้งหมดสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านโลจิสติกส์ของประเทศไทยในปัจจุบัน ที่มุ่งเน้นการพัฒนาบรรณการและส่งเสริมการขนส่งหลายรูปแบบ (Multimodal Transport) อันจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและความยั่งยืนของระบบโลจิสติกส์ไทยในระยะยาว

5.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการพัฒนาในอนาคตแบบจำลองที่นำเสนอเป็นแบบสถิตที่ไม่ได้คำนึงถึงความไม่แน่นอนของปัจจัยต่างๆ เช่น ความต้องการของลูกค้าและราคาพลังงาน การพัฒนาแบบจำลองแบบพลวัตหรือแบบจำลองเชิงสโตคาสติกจะช่วยให้ผลลัพธ์มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงในอนาคต นอกจากนี้ การขยายขอบเขตการศึกษาไปสู่การเชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้านในกลุ่มอาเซียนจะช่วยสะท้อนแนวโน้มการบูรณาการทางเศรษฐกิจในภูมิภาค การพิจารณาปัจจัยทางสังคมเพิ่มเติม เช่น ผลกระทบต่อการจ้างงานและคุณภาพชีวิตของประชาชน จะช่วยให้การพัฒนา ICD มีความยั่งยืนอย่างแท้จริง สำหรับกรณีศึกษาขนาดใหญ่ การใช้วิธีวิฤตติหรืออัลกอริทึมเมตาวิฤตติอาจช่วยลดเวลาในการหาคำตอบ โดยสรุป งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสนับสนุนการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ที่ยั่งยืนในประเทศไทย การบูรณาการแนวคิดโลจิสติกส์สี่เหลี่ยมเข้ากับการเลือกตำแหน่ง ICD ช่วยลดทั้งต้นทุนการขนส่งและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นก้าวสำคัญสู่ระบบโลจิสติกส์ที่ยั่งยืนของประเทศไทยในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Froböse, J., Kille, C. and Schwemmer, M. (2016). *TOP 100 in European Transport and Logistics Services*. DVV Media Group, Hamburg.
- [2] McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M. and Whiteing, A. (2010). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page Publishers.
- [3] Ahi, P. and Searcy, C. (2015). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 86, pp.360–377.
- [4] Mohammadi, M., Rahmanifar, G., Hajiaghahi-Keshteli, M., Fusco, G. and Colombaroni, C. (2023). Industry 4.0 in waste management: An integrated IoT-based approach for facility location and green vehicle routing. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, 100535.
- [5] Ge, J., Huang, J., Chao, Y., Jin, J. and Zhu, S. (2025). Optimization of domestic inland transportation routes for imported iron ore with the consideration of carbon costs – A case study of Central China. *Regional Studies in Marine Science*, 83, 104097.
- [6] Irawan, C.A., Salhi, S., Jones, D., Dai, J. and Liu, M.J. (2024). A dry port hub-and-spoke network design: An optimization model, solution method, and application. *Computers & Operations Research*, 167, 106646.
- [7] Tan, Z., Shao, S., Zhang, D., Shang, W.-L., Ochieng, W. and Han, Y. (2024). Decarbonizing the inland container fleet with carbon cap-and-trade scheme. *Applied Energy*, 376, 124251.
- [8] Das, S.K. and Roy, S.K. (2019). Effect of variable carbon emission in a multi-objective transportation-p-facility location problem under neutrosophic environment. *Computers & Industrial Engineering*, 132, pp.311–324.
- [9] Zhou, S., Ji, B., Song, Y., Yu, S.S., Zhang, D. and Van Woensel, T. (2023). Hub-and-spoke network design for container shipping in inland waterways. *Expert Systems with Applications*, 223, 119850.
- [10] Zhao, Z., Shen, M., Chen, J., Wang, X., Wan, Z., Hu, X. and Liu, W. (2024). Design and optimization of the collaborative container logistics system between a dry port and a water port. *Computers & Industrial Engineering*, 198, 110654.
- [11] Kurtuluş, E. (2023). Optimizing inland container logistics and dry port location-allocation from an environmental

- perspective. *Research in Transportation Business & Management*, 48, 100839.
- [12] Wei, W., Dong, Z. and Fan, J. (2023). Integrated location selection and scheduling problems for inland container transportation. *Sustainability*, 15(22), 15992.
- [13] Oeuvray, P., Burger, J., Roussanaly, S., Mazzotti, M. and Becattini, V. (2024). Multi-criteria assessment of inland and offshore carbon dioxide transport options. *Journal of Cleaner Production*, 443, 140781.
- [14] Notteboom, T.E. and Rodrigue, J.P. (2005). Port regionalization: Towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*, 32(3), pp.297–313.
- [15] Ahi, P. and Searcy, C. (2015). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 86, pp.360–377.
- [16] Melo, M.T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management–A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), pp.401–412.