การวางแผนชุดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงาน : กรณีศึกษาการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็ก

ศักรธร บุญทวียุวัฒน์*
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20250

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ชุดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กเพื่อการประหยัดพลังงาน และลดปริมาณการขนส่งทางถนนให้น้อยลง โดยเปรียบเทียบการขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียว การขนส่งทางรถไฟผสมผสานกับรถบรรทุก (รถไฟ-รถบรรทุก) และการขนส่งทางเรือผสมผสานกับรถบรรทุก (เรือ-รถบรรทุก) จากจุดเริ่มต้นที่กำหนดไปยังจุดหมายปลายทางที่ต้องการผลิตภัณฑ์เหล็กจำนวน 22 จังหวัดในประเทศไทย โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการแก้ไขปัญหาหลากหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Model) ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อหาชุดเส้นทางการขนส่งภายในประเทศใหม่ เพื่อการลดการใช้พลังงาน ต้นทุนและเวลาสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็ก จากผลที่ได้จากแบบจำลองฯ พบว่าชุดเส้นทางการขนส่งใหม่นี้สามารถช่วยประหยัดพลังงานและต้นทุนที่ใช้ในการขนส่งได้มากถึง 75.42% และ 28.71% ตามลำดับ แบบจำลองฯ ยังสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือสำหรับผู้ประกอบการขนส่งในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กหรือสินค้าเทกองทั่วไปในการตัดสินใจเลือกชุดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมเพื่อลดพลังงาน ต้นทุนและเวลาในการขนส่งสินค้า

คำสำคัญ : ชุดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสม / การประหยัดพลังงาน / แบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์

* *Corresponding author : sakaradhorn@eng.src.ku.ac.th*
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

Optimal Route Planning for Energy Savings : A Case Study of Steel Transportation

Sakaradhorn Boontaveeyuwat*

Kasetsart University, Sriracha Campus, Chonburi 20250

Abstract

This paper presents the analysis of optimal routes for steel products transportation with the aim to reduce energy consumption and traffic load. The uses of trailer only, train – trailer and barge – trailer for the transportation from a specific origin to 22 steel demands points in Thailand was compared. A multi-objective optimization model for solving the optimal inland routes such that the energy consumption as well as transportation cost and time are minimized is proposed. The results demonstrated that the proposed new route can reduce the energy consumption and cost by 75.42% and 28.71%, respectively. The model can indeed serve as a decision tool for steel and other bulk transportation operators with the aim to minimize the energy consumption, cost and time for cargo transportation.

Keywords : Optimal Route / Energy Savings / Multi-Objective Optimization

* *Corresponding Author : sakaradhorn@eng.src.ku.ac.th*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเหล็กภายในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศ และเป็นอุตสาหกรรมที่เป็นต้นน้ำในระบบโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ที่เป็นปัจจัยพื้นฐานในการพัฒนาประเทศ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น แม้ในปัจจุบันปริมาณการผลิตเหล็กในประเทศลดลงร้อยละ 4.6 ตามปริมาณการใช้เหล็กภายในประเทศ (Thailand Apparent Steel Supply) ที่ลดลง เนื่องจากสภาวะเศรษฐกิจประเทศไทย ในปี 2557 ที่มีอัตราการเติบโต (Thailand GDP Growth Rate) ที่ค่อนข้างต่ำ ขณะที่ภาคการส่งออกของประเทศยังคงเผชิญกับเศรษฐกิจโลกที่ยังคงชะลอตัว อย่างไรก็ตามภาพรวมความต้องการใช้เหล็กในปี 2558 มีแนวโน้มจะปรับตัวขึ้นเนื่องจากแผนการลงทุนก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานของภาครัฐที่เห็นได้ชัด

อุตสาหกรรมเหล็กของประเทศไทยจำกัดอยู่เฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย โดยมีการผลิตต้นทางที่สุดอยู่ในอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง คือ การหลอมเศษเหล็กโดยเตาหลอมไฟฟ้า ทำให้ประเทศไทยต้องพึ่งพานำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็กจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ อุตสาหกรรมเหล็กไทยในปัจจุบันต้องเผชิญกับราคาวัตถุดิบนำเข้าจากต่างประเทศที่มีความผันผวนมาก รวมทั้งต้นทุนการผลิตและค่าขนส่งระหว่างประเทศและภายในประเทศที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินงาน ปัจจุบันผลิตภัณฑ์เหล็กมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีปริมาณมากประมาณ 12 ล้านตัน ซึ่งส่วนใหญ่มาจากประเทศรัสเซีย จีน และออสเตรเลียขนส่งมาที่ท่าเรือบริเวณแหลมฉบังเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบไปด้วยท่าเรือศรีราชา ท่าเรือเกาะสีชัง และท่าเรือสยามซีพอร์ท ปริมาณเหล็กที่ขนผ่านท่าเรือบริเวณแหลมฉบังมีประมาณ 4 ล้านตัน [1] จากนั้น ผลิตภัณฑ์เหล็กจะถูกขนส่งไปยังจุดหมายปลายทางตามภาคต่างๆ ที่เป็นที่ตั้งของผู้ผลิตเหล็ก ผู้ค้าเหล็กและอุตสาหกรรมต่างๆของผู้บริโภคเหล็กภายในประเทศที่สำคัญ ได้แก่ กรุงเทพมหานคร อยุธยา เชียงใหม่ นครราชสีมา เป็นต้น การขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กภายในประเทศนั้นผู้ประกอบการขนส่งนิยมใช้การขนส่งทางถนนโดยรถบรรทุกหัวลากขนาด 22 ล้อเนื่องจากมีข้อได้เปรียบคือ ใช้เวลาในการเดินทางสั้นเมื่อเทียบกับการขนส่งในรูปแบบอื่น แต่ข้อเสียคือ ต้นทุนในการขนส่งสูงที่สุด และมีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงมากที่สุด โดยผู้ประกอบการขนส่งในปัจจุบันไม่ได้คำนึงถึงการขนส่งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงานและลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมมากเท่าที่ควร

บทความนี้เสนอชุดของเส้นทางการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากจุดเริ่มต้นซึ่งเป็นท่าเรือนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็กที่สำคัญมากที่สุดของไทย ได้แก่ ท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทยซึ่งเป็นกรณีศึกษาในสถานการณ์จริง ได้แก่ เชียงใหม่ กรุงเทพฯ กาญจนบุรี กำแพงเพชร ขอนแก่น ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ชัยนาท นครปฐม นครราชสีมานครสวรรค์ ปราจีนบุรี สมุทรปราการ สมุทรสาคร สระบุรี สุพรรณบุรี สุราษฎร์-ธานี พระนครศรีอยุธยา และอุบลราชธานี โดยปริมาณการกระจายผลิตภัณฑ์เหล็กไปสู่จุดหมายปลายทางจะใช้ข้อมูลจาก Boontaveeyuwat and Saengsupavanich [2] โดยวิเคราะห์เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากรูปแบบการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบได้แก่ การขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียว การขนส่งแบบผสมผสานระหว่างรถบรรทุกและรถไฟ และการขนส่งแบบผสมผสานระหว่างรถบรรทุกและเรือ เพื่อแก้ปัญหาชุดเส้นทางการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 แห่งให้มีการประหยัดพลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งให้มากที่สุด เพื่อประโยชน์ต่อผู้ประกอบการขนส่ง ผู้ผลิตเหล็กและหน่วยงานภาครัฐที่รับผิดชอบทางด้านการกำหนดนโยบายการส่งเสริมการขนส่งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงานและลดมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแก้ไขปัญหาชุดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์เหล็กเพื่อทำให้การใช้พลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งต่ำที่สุดกระทำโดยนำเสนอแบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Model) ในการแก้ไขปัญหา โดยปกติแบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์จะถูกใช้ในการแก้ไขปัญหาโจทย์ที่มี

ลักษณะต้องการหาค่าที่ดีที่สุดหลายค่าในเวลาเดียวกัน ซึ่งลักษณะของแบบจำลองฯ สามารถเป็นได้ในหลายลักษณะ ได้แก่ การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) การโปรแกรมจำนวนเต็ม (Integer Programming) การโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming) การโปรแกรมเชิงกำลังสอง (Quadratic Programming) หรือ การโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Non-Linear Programming) [3] โดยงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองฯ ดังกล่าวในการแก้ปัญหาเช่น [4], [5] และ [6] ได้พัฒนาโปรแกรม WWW-NIMBUS บนอินเตอร์เนท เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาโจทย์ในลักษณะ Multi-Objective Optimization ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Hanaoka et al. [7] ได้พัฒนาแบบจำลอง Multi-Objective Optimization Model จากงานของ Department of Energy [8] เพื่อหาค่าสัดส่วนของรูปแบบการขนส่งแบบผสมผสานที่เหมาะสม เพื่อสามารถลดการใช้พลังงานในการขนส่งให้มากที่สุดเช่นกันโดยกรณีศึกษาเป็นการขนส่งสินค้าแบบคอนเทนเนอร์

ในส่วนของแบบจำลองลักษณะอื่นๆ ที่ถูกประยุกต์ในการประมวลผลการเลือกเส้นทางขนส่งนั้นส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การลดต้นทุนการขนส่งให้ต่ำที่สุด เช่น ในยุคเริ่มแรกนั้น Hitchcock [9] ได้เริ่มการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ไขปัญหาการขนส่งโดยการจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าชนิดเดียวกันจากจุดต้นทางและจุดปลายทางของสินค้ามากกว่าหนึ่งแห่ง ให้มีต้นทุนค่าขนส่งต่ำที่สุด ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อมา Tzeng, Hwang and Ting [10] ศึกษาการขนส่งถ่านหิน เพื่อการจัดตารางการขนส่งที่ทำให้ต้นทุนต่ำสุด และตรงต่อเวลาที่กำหนด โดยการสร้างสมการคณิตศาสตร์โดยมีเป้าหมายให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด โดยประกอบด้วย 2 ตัวแปร (Variables) คือ ต้นทุนค่าขนส่งและปริมาณการขนส่งในขณะที่ข้อจำกัดคือ ปริมาณของถ่านหินที่รองรับและเป็นที่ต้องการ ขนาดของเรือ และสภาพสมดุลของเรือเพื่อใช้ในการจัดตารางเพื่อการจัดส่งถ่านหิน

Sinh [11] เสนอแบบจำลองการโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming) สำหรับการวางแผนและจัดตารางการนำเข้าถ่านหินจากผู้จัดหาวัตถุดิบหลายแห่งเพื่อโรงงานผลิตของบริษัทมากกว่าหนึ่งแห่งเพื่อทำให้ต้นทุนเชิงโลจิสติกส์มีค่าน้อยที่สุดประกอบด้วย ต้นทุนค่าขนส่ง ต้นทุนวัสดุคงคลังและต้นทุนการจัดเก็บสินค้า ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดนโยบายการจัดซื้อของบริษัท ความต้องการของโรงไฟฟ้า ความสามารถของท่าเทียบเรือ เป็นต้น ในปีต่อมา Bookbinder and Fox [12] ได้ศึกษาเส้นทางและรูปแบบการขนส่งระหว่างประเทศแคนาดาและเม็กซิโก โดยการวิเคราะห์หาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด และคำนวณต้นทุนค่าขนส่ง และเวลาการเดินทางในแต่ละเส้นทางไว้เป็นฐานข้อมูล ทำการแจกแจงเส้นทางและรูปแบบการขนส่งเพื่อเป็นทางเลือกในการตัดสินใจในการวางแผนการขนส่งให้มีต้นทุนต่ำที่สุด ภายใต้ขอบเขตของเวลาที่กำหนด

Leung, Wu and Lai [13] ศึกษาการวางแผนการขนส่งสินค้าจากฮ่องกงไปจีนเพื่อให้ต้นทุนรวมการขนส่งต่ำสุด โดยการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming) กำหนดเครือข่ายการขนส่งเพื่อลดต้นทุนการขนส่งให้ต่ำที่สุดโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ถูกแก้ปัญหาโดยโปรแกรม LINDO เพื่อหารูปแบบการจัดการการขนส่งในแต่ละกลยุทธ์ที่กำหนดขึ้นเพื่อให้ต้นทุนการขนส่งต่ำที่สุดในแต่ละกรณีการเปลี่ยนแปลงสถานการณ์ของการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถบรรทุก ต้นทุนสินค้าคงคลังและต้นทุนแรงงานเป็นต้น Logozar, Radonjic and Bastic [14] ศึกษาวิธีการลดต้นทุนและหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการขนส่งในกรณีการนำผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมไปรีไซเคิลในโรงงาน เป็นการศึกษาระบบโลจิสติกส์และกระบวนการผลิตโดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์โดยมีเป้าหมายให้ต้นทุนการขนส่งรวมต่ำที่สุด โดยมีการกำหนดตัวแปรได้แก่ ต้นทุนการขนส่งแบบคงที่ (Fixed Transport Costs), ต้นทุนการขนส่งผันแปร (Variable Transport Costs), ระยะทาง (Distance), ปริมาณสินค้าที่ใช้ในการขนส่ง (Transported Quantity), พลังงานที่ใช้ในการขนส่ง (Energy Used for Transport) และ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานอื่นๆ (Other Operating Costs) เพื่อหาเส้นทางและปริมาณสินค้าที่ทำให้ต้นทุนการขนส่งต่ำที่สุด

สำหรับแบบจำลองการวิเคราะห์ชุดเส้นทางการขนส่งภายในประเทศที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้จะแตกต่างไปจากแบบจำลองในวรรณกรรมที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เน้นการเลือกเส้นทางการขนส่งแบบผสมผสานที่

เน้นลดการใช้พลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่ง โดยใช้กรณีศึกษา ท่าเรือแหลมฉบังเป็นจุดเริ่มต้นและ 22 จังหวัดในประเทศไทยเป็นจุดหมายปลายทางในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็ก

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์

ในหัวข้อนี้เป็นการเสนอแบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

$$Min \ \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=1}^{R}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} X_{ijr}^{nm} E_{ijr}^{nm} \quad \textbf{(1)}$$

$$Min \ \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=1}^{R}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} X_{ijr}^{nm} C_{ijr}^{nm} \quad \textbf{(2)}$$

$$Min \ \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=1}^{R}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} X_{ijr}^{nm} T_{ijr}^{nm} \quad \textbf{(3)}$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=1}^{R}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} X_{ijr}^{nm} = O_i \quad \forall\, i \quad \textbf{(4)}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{r=1}^{R}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} X_{ijr}^{nm} = D_j \quad \forall\, j \quad \textbf{(5)}$$

$$X_{ijr}^{nm} \le N_{ijr}^{nm} \qquad \forall\, i,j,r,n,m \quad \textbf{(6)}$$

$$X_{ijr}^{nm} \ge 0 \qquad \forall\, i,j,r,n,m \quad \textbf{(7)}$$

โดยกำหนดให้

- i = จุดเริ่มต้นของเส้นทางการขนส่งซึ่งในที่นี้ คือ ท่าเรือนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็กได้แก่ ท่าเรือแหลมฉบัง
- I = จำนวนของจุดเริ่มต้นทั้งหมด
- j = จุดปลายทางของเส้นทางการขนส่งซึ่งในที่นี้คือจุดหมายปลายทางของผลิตภัณฑ์เหล็กทั้ง 22 จังหวัดในไทย
- J = จำนวนจุดหมายปลายทางของผลิตภัณฑ์เหล็กทั้งหมด
- m = รูปแบบการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ การขนส่งทางรถบรรทุก การขนส่งทางเรือ และการขนส่งทางรถไฟ
- M = จำนวนของรูปแบบการขนส่งทั้งหมด
- r = เส้นทางการขนส่งของผลิตภัณฑ์เหล็ก
- R = จำนวนของเส้นทางการขนส่งทั้งหมดของผลิตภัณฑ์เหล็ก
- n = ชนิดของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กซึ่งจะมีผลต่อความจุของยานพาหนะ
- N = ความสามารถของชุดยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจนกระทั่งครบจำนวนตามที่กำหนด
- X_{ijr}^{nm} = ปริมาณการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากจุดเริ่มต้น i ไปยังจุดหมายปลายทาง j โดยใช้รูปแบบการขนส่ง เส้นทางการขนส่ง r ชนิดของยานพาหนะ n ซึ่งเป็นตัวแปรการตัดสินใจ
- T_{ijr}^{nm} = เวลาที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากจุดเริ่มต้น i ไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศ j โดยใช้รูปแบบการขนส่ง m เส้นทางการขนส่ง r ชนิดของยานพาหนะ n
- E_{ijr}^{nm} = พลังงานที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากจุดเริ่มต้น i ไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศ j โดยใช้รูปแบบการขนส่ง m เส้นทางการขนส่ง r โดยใช้ชนิดของยานพาหนะ n
- C_{ijr}^{nm} = ต้นทุนที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากจุดเริ่มต้น i ไปยังจุดหมายปลายทางในต่างประเทศ j โดยใช้รูปแบบการขนส่ง m เส้นทางการขนส่ง r โดยใช้ชนิดของยานพาหนะ n
- O_i = ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก ณ จุดเริ่มต้น
- D_j = ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก ณ จุดหมายปลายทาง

สมการวัตถุประสงค์ (1) จุดมุ่งหมายเพื่อการวางแผนการเลือกเส้นทางการขนส่งที่มีการใช้พลังงานในการขนส่งต่ำที่สุด โดยพลังงานรวมของการขนส่งเท่ากับผลรวมของปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ถูกขนส่ง X_{ijr}^{nm} จาก i ไป j โดยใช้รูปแบบการขนส่ง เส้นทางการขนส่ง r โดยชนิดของยานพาหนะ n ที่มีความจุของยานพาหนะดังกล่าวเป็นตัวควบคุม สมการวัตถุประสงค์ (2) และ (3)

จุดมุ่งหมายเพื่อการวางแผนการเลือกเส้นทางการขนส่งที่มีต้นทุนและเวลารวมในการขนส่งต่ำที่สุด โดยใช้ตัวแปรการตัดสินใจเช่นเดียวกับสมการวัตถุประสงค์ (1)

สมการที่ (4) – (7) นั้นเป็นข้อจำกัด (Constraint) ของแบบจำลองฯ โดยสมการที่ 4 เป็นการกำหนดค่าของปริมาณการขนส่งในแต่ละเส้นทางของผลิตภัณฑ์เหล็กที่ออกจากจุดเริ่มต้นเดียวกันแต่มีจุดหมายปลายทางต่างกัน ผลรวมของปริมาณการขนส่งทั้งหมดจะต้องเท่ากันกับปริมาณของสินค้าที่ปล่อยออกมา ณ จุดเริ่มต้นเดียวกัน ซึ่งในทางกลับกัน สมการที่ 5 ที่ปริมาณการขนส่งในแต่ละเส้นทางที่ออกจากจุดเริ่มต้นต่างกัน แต่ขนส่งไปที่จุดหมายปลายทางเดียวกัน ผลรวมของปริมาณการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กต้องเท่ากับความต้องการของสินค้าที่จุดหมายปลายทางในจุดเดียวกัน ในขณะที่สมการที่ 6 แสดงปริมาณการขนส่งในแต่ละเส้นทางจะมีค่าไม่เกินความสามารถในการขนส่งสินค้าของกลุ่มยานพาหนะในแต่ละรูปแบบที่เลือกใช้ และสมการที่ 7 แสดงปริมาณการขนส่งของผลิตภัณฑ์เหล็กที่ถูกเลือกมาจะต้องมีค่าไม่ติดลบเสมอ

3.2 ข้อมูลและสมมติฐาน

ในช่วงแรกของกระบวนการวิจัยจะทำการหาระยะทางในการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กทั้งจากจุดเริ่มต้นคือท่าเรือแหลมฉบังซึ่งเป็นท่าเรือที่มีปริมาณเหล็กผ่านท่ามากที่สุดในไทย ซึ่งรวมถึงท่าเรือบริเวณโดยรอบท่าเรือแหลมฉบังได้แก่ ท่าเรือศรีราชา ท่าเรือสยามซีพอร์ท ท่าเรือเกาะสีชัง เป็นต้น อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะเรียกรวมกันว่าท่าเรือแหลมฉบัง โดยข้อมูลที่ได้จากกรมศุลกากร เฉพาะปริมาณเหล็กกล้าดิบ และผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป เช่น เหล็กแท่ง และเหล็กแท่งแบนมีปริมาณผ่านท่าประมาณ 3 ล้านตันต่อปี (ในบทความนี้จะใช้ 2,938,639 ตันในการคำนวณ) ไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 แห่งในไทยซึ่งในปัจจุบันใช้การขนส่งด้วยรถหัวลากขนาด 22 ล้อทั้งหมดเกือบ 100% ดังนั้นในการศึกษานี้ การขนส่งในปัจจุบันจะถูกกำหนดให้เป็นการขนส่งทางรถบรรทุกทั้งหมด สถานีรถไฟและท่าเรือที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายผลิตภัณฑ์เหล็กถูกเลือกจาก 2 หลักการได้แก่ ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดหมายปลายทางมากที่สุดและสถานีรถไฟและท่าเรือดังกล่าวสามารถรองรับการเปลี่ยนถ่ายผลิตภัณฑ์เหล็กได้อย่างแน่นอนซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากการสอบถามจากหน่วยงานการรถไฟแห่งประเทศไทยและผู้บริหารของท่าเรือในแต่ละท่าตามลำดับ

ความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กทั้ง 22 จังหวัดใช้ข้อมูลจาก Boontaveeyuwat and Saengsupavanich [2] รายละเอียดข้อมูลแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณสำหรับรูปแบบการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบได้แก่ การขนส่งทางรถบรรทุก รถไฟ และเรือลำเลียง แสดงรายละเอียดดังนี้

1. การขนส่งเหล็กทางรถบรรทุกนั้นจะใช้รถหัวลากหรือรถบรรทุกขนาด 22 ล้อ ซึ่งในการคำนวณน้ำหนักที่ใช้ในการขนส่งทางรถบรรทุกในบทความนี้จะใช้ค่าที่ 27 ตัน เวลาที่ใช้ในการขนส่งจะใช้ความเร็วของรถบรรทุกที่สภาพการจราจรปกติโดยเฉลี่ยที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในการคำนวณ ในขณะที่อัตราการบริโภคน้ำมันจะอยู่ที่ 2.8 กิโลเมตรต่อลิตร ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้มาจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งโดยตรง จำนวนของรถบรรทุกที่สามารถให้บริการได้พร้อมกันถูกกำหนดที่ 50 คัน ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนขนส่งสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กจากท่าเรือแหลมฉบังไปยัง อ.วังน้อย จ.พระนครศรีอยุธยาทางรถบรรทุก ซึ่งมีระยะทาง 174 กม. ต้นทุนการขนส่งจะคิดจากสมการที่ 8 ดังต่อไปนี้

[(ระยะทาง (กม.) / อัตราการบริโภคน้ำมัน (กม./ลิตร)) x อัตราน้ำมันดีเซลต่อลิตร] / ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของเหล็กที่รถบรรทุกสามารถขนได้ (1 คัน/เที่ยว) (8)

ซึ่งจะเท่ากับ [(174/2.8) x 26] /27 = 59.84 บาทต่อตัน ซึ่งเมื่อรวมกับต้นทุนในการเปลี่ยนถ่ายสินค้า (4.68 บาทต่อตัน) และ ค่ากรรมกรที่ใช้ในการขนถ่ายสินค้า (15 บาทต่อตัน จำนวน 2 ครั้ง) จะทำให้ผลรวมของต้นทุนการขนส่งทางถนนจะเท่ากับ 94.52 บาทต่อตัน ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการขนส่งจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังพระนครศรีอยุธยาจะคำนวณจาก เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายสินค้า (325 ตันต่อชม.) รวมกับ เวลาที่ใช้ในการขนส่ง (60 กม./ชม.) ซึ่งเมื่อคำนวณจากระยะทาง 174 กม.แล้วเวลาที่ใช้ในการขนส่งจะเท่ากับ 0.00035 วันต่อตัน

ในส่วนของประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะคำนวณจากสมการที่ 9

μ_k = 139,000 / 3.7854 $e_k V_k$ (น้ำมันดีเซล) **(9)**
= 153,200 / 3.7854 $e_k V_k$ (น้ำมันเตา)

โดยที่ μ_k = ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการขนส่งรูปแบบ k (BTU/ตัน-กม.)
e_k = การบริโภคพลังงานของการขนส่งรูปแบบ k (กิโลเมตร/ลิตร)
V_k = การบริโภคพลังงานของการขนส่งรูปแบบ k (ตัน)

จากสมการที่ 9 เมื่อพิจารณาจากการบริโภคน้ำมัน (2.8 กม./ลิตร) ระยะทางจากกรุงเทพไปยังพระนครศรีอยุธยา (174 กม.) อัตราการบริโภคน้ำมันที่ใช้ในการขนถ่าย (9 ลิตรต่อ 100 ตัน) ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ที่ 84,635.96 BTU/ตัน

2. การขนส่งทางรถไฟจะใช้การบรรทุกเหล็กในรูปแบบเทกอง (Bulk) โดยมีปริมาณที่ใช้ในการขนส่งแต่ละเที่ยวประมาณ 700 – 900 ตัน ซึ่งในการคำนวณน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกในบทความนี้จะใช้ที่ 800 ตันต่อ 1 ขบวน ความเร็วที่ใช้ในการขนส่งจะใช้ที่ 39 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราการบริโภคน้ำมันจะอยู่ที่ 3 กิโลเมตรต่อลิตร ในส่วนของสถานีรถไฟที่สามารถรองรับการเข้ามาของรถหัวลากเพื่อขนสินค้าไปยังจุดหมายปลายทางจะถูกเลือกโดยมีพื้นฐานจากสถานีรถไฟสำหรับการขนส่งสินค้าได้อย่างแท้จริง ความถี่ของขบวนรถไฟที่สามารถให้บริการถูกกำหนดที่ 3 ขบวนต่อวัน

ตารางที่ 1 สัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์เหล็กจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางในไทยโดยผ่านสถานีรถไฟและท่าเรือเปลี่ยนถ่าย

จุดต้นทาง	สถานีรถไฟเปลี่ยนถ่าย	ท่าเรือเปลี่ยนถ่าย	จุดหมายปลายทาง	สัดส่วนการกระจายตัว (%)
ท่าเรือแหลมฉบัง	เชียงใหม่	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	เชียงใหม่	2.06
	พหลโยธิน	กรุงเทพ	กรุงเทพฯ	26.98
	กาญจนบุรี	ท่าเรือแม่น้ำ อ.สามพราน	กาญจนบุรี	1.51
	พิจิตร	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	กำแพงเพชร	0.77
	ขอนแก่น	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	ขอนแก่น	3.14
	ฉะเชิงเทรา	บางปะกง	ฉะเชิงเทรา	2.01
	ชลบุรี	แหลมฉบัง	ชลบุรี	4.46
	นครสวรรค์	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	ชัยนาท	2.1
	นครปฐม	ท่าเรือแม่น้ำ อ.สามพราน	นครปฐม	1.46
	จิระ	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	นครราชสีมา	4.72
	นครสวรรค์	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	นครสวรรค์	3.83
	ปราจีนบุรี	บางปะกง	ปราจีนบุรี	2.01
	พิษณุโลก	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	พิษณุโลก	3.75
	บ้านฉาง	แหลมฉบัง	ระยอง	4.9

ตารางที่ 1 สัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์เหล็กจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางในไทยโดยผ่านสถานีรถไฟและท่าเรือเปลี่ยนถ่าย **(ต่อ)**

จุดต้นทาง	สถานีรถไฟเปลี่ยนถ่าย	ท่าเรือเปลี่ยนถ่าย	จุดหมายปลายทาง	สัดส่วนการกระจายตัว (%)
	ราชบุรี	ท่าเรือแม่น้ำแม่กลอง	ราชบุรี	2.46
	ฉะเชิงเทรา	พระประแดง	สมุทรปราการ	17.46
	นครปฐม	ท่าเรือแม่น้ำท่าจีน	สมุทรสาคร	8.28
	สระบุรี	ท่าเรือแม่น้ำ อ.ท่าเรือ	สระบุรี	2.1
	สุพรรณบุรี	กรุงเทพ	สุพรรณบุรี	0.62
	สุราษฎร์ธานี	สุราษฎร์ธานี	สุราษฎร์ธานี	0.75
	อยุธยา	บางปะอิน	อยุธยา	1.8
	อุบลราชธานี	บางปะกง	อุบลราชธานี	2.87

3. การขนส่งทางเรือลำเลียงจะใช้ขบวนเรือลำเลียงทะเล 5,100 ตัน ใช้เรือลากจูง 1 ลำขนาด 940 แรงม้า ขนาดระวาง 153.3 ตันกรอส ความยาว 28.0 เมตร ความกว้าง 7.2 เมตร ความสูง 3.0 เมตร ลากขบวนเรือลำเลียงในทะเล 3 ลำลำละ 1,700 ตัน อัตราการใช้น้ำมัน 180 ลิตร/ชม. ใช้ความเร็วเฉลี่ยในการวิ่ง 3.5 น็อตโดยไม่มีการรวมเวลาที่ใช้ในการรอน้ำ (6 ชั่วโมง) โดยสมมติฐานให้เรือแล่นทวนน้ำและตามน้ำทั้งขาไปและขากลับโดยใช้ความเร็วเฉลี่ยดังกล่าว

ในการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบ ต้นทุนและเวลาจะถูกคำนวณทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนถ่ายสินค้า ยกตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาจากจำนวนครั้งของการเปลี่ยนถ่ายสินค้าสำหรับการขนส่งทางรถไฟจะพิจารณาจำนวนการเปลี่ยนถ่ายสินค้าจำนวน 5 ครั้ง ได้แก่

1. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากเรือไปสู่รถบรรทุกที่วิ่งภายในท่าเรือแหลมฉบัง

2. การเปลี่ยนถ่ายจากรถบรรทุกไปสู่สถานีรถไฟเปลี่ยนถ่าย

3. การเปลี่ยนถ่ายจากรถไฟไปยังสถานีรถไฟปลายทาง

4. การเปลี่ยนถ่ายจากสถานีรถไฟปลายทางไปยังรถบรรทุก

5. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากรถบรรทุกไปยังโกดังเก็บสินค้าของลูกค้า

การขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียวจะมีการเปลี่ยนถ่ายจำนวน 2 ครั้ง ได้แก่

1. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากเรือไปสู่รถบรรทุก

2. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากรถบรรทุกไปยังโกดังเก็บสินค้าของลูกค้า

สำหรับการขนส่งทางเรือลำเลียงจะมีการเปลี่ยนถ่ายสินค้า 4 ครั้ง ได้แก่

1. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากเรือนำเข้าไปสู่เรือลำเลียง

2. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากเรือลำเลียงไปสู่ท่าเรือเปลี่ยนถ่าย

3. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากท่าเรือเปลี่ยนถ่ายไปสู่รถบรรทุก

4. การเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากรถบรรทุกไปสู่โกดังเก็บสินค้าของลูกค้า

ผลการคำนวณต้นทุน เวลาและพลังงานที่ใช้ในการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบการขนส่งซึ่งได้แก่ รถบรรทุกอย่างเดียว รถไฟ-รถบรรทุก และเรือ-รถบรรทุก จะถูกแสดงในหัวข้อถัดไป

4. ผลการวิจัย

การคำนวณชุดเส้นทางการขนส่งของรูปแบบการขนส่งผลิตภัณฑ์เหล็กในปัจจุบันซึ่งก็คือการขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียวจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าพลังงานรวมที่ใช้ในการขนส่งอยู่ที่ 302,330.05 ล้าน BTU ต้นทุนรวมอยู่ที่ 315.67 ล้านบาทและเวลารวมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบอยู่ที่ 1,073.22 วัน ในขณะที่ตารางที่ 3 และ 4 เป็นการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งในรูปแบบของรถไฟ-รถบรรทุก และเรือ-รถบรรทุก ตามลำดับ สิ่งที่น่าสนใจจากการเปรียบเทียบต้นทุน เวลาและการใช้พลังงานในการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบพบว่าการขนส่งผสมผสานระหว่างรถไฟ-รถบรรทุกใช้ต้นทุนและพลังงานในการขนส่งน้อยที่สุดที่ 245.17 ล้านบาท และ 48,752.79 ล้าน BTU ตามลำดับ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการขนส่งน้อยที่สุดคือการขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียว

จากการปรับชุดเส้นทางการขนส่งใหม่จากการประมวลผลในแบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์ที่เสนอขึ้นเพื่อหาชุดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมที่สุดโดยการผสมผสานระหว่างการขนส่งทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวเพื่อทำให้ต้นทุนเวลาและการใช้พลังงานในการขนส่งมีค่าต่ำที่สุด ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าพลังงานรวมที่ใช้ในการขนส่งลดลงมาอยู่ที่ 74,309.22 ล้าน BTU คิดเป็นการลดลงจากชุดเส้นทางการขนส่งเดิม (การขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียว) ถึง 75.42% ต้นทุนรวมอยู่ที่ 225.04 ล้านบาทคิดเป็นการลดลงจากชุดเส้นทางการขนส่งเดิม 28.71%และเวลารวมเปรียบเทียบอยู่ที่ 1,812.06 วัน ซึ่งมากกว่าชุดเส้นทางการขนส่งเดิม 69.88% จากการสังเกตผลลัพธ์ของชุดเส้นทางการขนส่งใหม่จะเห็นได้ว่าเป็นการขนส่งผสมผสานระหว่างรถไฟและรถบรรทุกถึง 16 เส้นทางจากทั้งหมด 23 เส้นทางคิดเป็นสัดส่วนถึง 69.56% ซึ่งผลจากการผสมผสานกันระหว่างรูปแบบการขนส่งดังกล่าวอาจทำให้บางเส้นทางนั้นต้นทุนการขนส่งเพิ่มขึ้นจากเดิมเพื่อทำให้พลังงานที่ใช้ในการขนส่งลดลง เช่น เส้นทางการขนส่งระหว่างท่าเรือแหลมฉบังไปยังกรุงเทพมหานครเป็นต้น

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งสำหรับชุดเส้นทางการขนส่งทาง**รถบรรทุก** จากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทย

เส้นทางจากท่าเรือแหลมฉบับไปยัง	พลังงาน (ล้าน BTU)	ต้นทุน (ล้านบาท)	เวลา (วัน)	ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก (ตัน)
กรุงเทพฯ	51,271.02	63.74	257.43	792,528
พระนครศรีอยุธยา	4,475.04	5.00	18.29	52,874
เชียงใหม่	23,635.39	18.81	40.51	60,512
นครราชสีมา	20,501.84	19.30	57.23	138,648
กาญจนบุรี	5,890.07	5.70	17.60	44,356
กำแพงเพชร	5,159.80	4.43	11.26	22,618
ขอนแก่น	22,297.83	18.96	47.23	92,236
ฉะเชิงเทรา	2,515.81	3.83	17.80	59,043
ชลบุรี	2,778.43	6.51	36.53	131,011
ชัยนาท	9,481.70	8.84	25.84	61,687

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งสำหรับชุดเส้นทางการขนส่งทาง**รถบรรทุก** จากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทย **(ต่อ)**

เส้นทางจากท่าเรือแหลมฉบังไปยัง	พลังงาน (ล้าน BTU)	ต้นทุน (ล้านบาท)	เวลา (วัน)	ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก (ตัน)
นครปฐม	3,942.69	4.27	15.17	42,887
นครสวรรค์	19,317.56	17.56	49.28	112,505
ปราจีนบุรี	4,508.93	5.24	19.91	59,043
พิษณุโลก	25,933.15	22.16	55.67	110,115
ระยอง	4,389.78	8.10	41.55	143,936
ราชบุรี	8,154.62	8.27	27.15	72,262
สมุทรปราการ	28,190.37	37.72	161.32	512,881
สมุทรสาคร	18,219.20	21.32	81.63	243,222
สระบุรี	6,451.16	6.70	22.64	61,687
สุพรรณบุรี	2,037.47	2.07	6.82	18,212
สุราษฎร์ธานี	8,122.86	6.51	14.24	22,031
อุบลราชธานี	25,055.33	20.64	48.11	84,305
รวม	302,330.05	315.67	1,073.22	2,938,639

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลารวมที่ใช้ในการขนส่งสำหรับชุดเส้นทางการขนส่งทาง**รถไฟ-รถบรรทุก** จากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทย

เส้นทางจากท่าเรือแหลมฉบังไปยัง	พลังงาน (ล้าน BTU)	ต้นทุน (ล้านบาท)	เวลา (วัน)	ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก (ตัน)
กรุงเทพฯ	12,863.41	65.92	570.93	792,528
พระนครศรีอยุธยา	793.00	4.35	39.51	52,874
เชียงใหม่	917.04	4.99	62.71	60,512
นครราชสีมา	2,252.74	11.53	111.66	138,648
กาญจนบุรี	221.92	3.34	33.85	44,356
กำแพงเพชร	1,214.16	2.48	20.45	22,618
ขอนแก่น	841.50	7.21	80.06	92,236

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลารวมที่ใช้ในการขนส่งสำหรับชุดเส้นทางการขนส่งทาง**รถไฟ-รถบรรทุก** จากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทย **(ต่อ)**

เส้นทางจากท่าเรือแหลมฉบับไปยัง	พลังงาน (ล้าน BTU)	ต้นทุน (ล้านบาท)	เวลา (วัน)	ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก (ตัน)
ฉะเชิงเทรา	133.91	4.33	39.97	59,043
ชลบุรี	345.55	9.64	86.17	131,011
ชัยนาท	2,432.41	6.14	52.08	61,687
นครปฐม	220.08	3.23	31.43	42,887
นครสวรรค์	1,048.82	8.81	91.41	112,505
ปราจีนบุรี	217.02	4.39	41.58	59,043
พิษณุโลก	1,012.66	8.61	96.43	110,115
ระยอง	1,876.57	11.65	98.18	143,936
ราชบุรี	334.25	5.42	54.56	72,262
สมุทรปราการ	18,925.63	50.15	365.98	512,881
สมุทรสาคร	1,248.14	18.32	178.26	243,222
สระบุรี	261.26	4.61	46.42	61,687
สุพรรณบุรี	122.04	1.39	14.08	18,212
สุราษฎร์ธานี	404.70	1.87	21.83	22,031
อุบลราชธานี	1,065.97	6.80	80.76	84,305
รวม	48,752.79	245.17	2,218.33	2,938,639

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลารวมที่ใช้ในการขนส่งสำหรับชุดเส้นทางการขนส่งทาง**<u>เรือ-รถบรรทุก</u>** จากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทย

เส้นทางจากท่าเรือแหลมฉบับไปยัง	พลังงาน (ล้าน BTU)	ต้นทุน (ล้านบาท)	เวลา (วัน)	ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก (ตัน)
กรุงเทพฯ	25,030.32	84.55	522.16	792,528
พระนครศรีอยุธยา	2,441.53	6.18	38.12	52,874
เชียงใหม่	19,705.86	19.04	63.51	60,512
นครราชสีมา	16,826.09	23.59	115.55	138,648
กาญจนบุรี	3,103.73	5.94	31.20	44,356
กำแพงเพชร	3,944.07	4.70	20.12	22,618
ขอนแก่น	19,762.79	21.75	85.93	92,236
ฉะเชิงเทรา	1,652.89	6.15	36.15	59,043
ชลบุรี	2,778.43	11.05	70.12	131,011
ชัยนาท	6,166.00	9.56	50.01	61,687
นครปฐม	1,662.04	4.76	28.71	42,887
นครสวรรค์	13,270.35	18.87	93.36	112,505
ปราจีนบุรี	3,651.73	7.56	38.27	59,043
พิษณุโลก	20,012.26	23.44	98.83	110,115
ระยอง	4,389.78	13.09	78.46	143,936
ราชบุรี	3,131.54	8.31	48.65	72,262
สมุทรปราการ	14,183.67	53.29	321.84	512,881
สมุทรสาคร	11,792.45	28.86	159.48	243,222
สระบุรี	3,063.44	7.37	46.73	61,687
สุพรรณบุรี	1,392.83	2.52	12.86	18,212
สุราษฎร์ธานี	2,162.35	3.39	24.58	22,031
อุบลราชธานี	24,253.74	24.26	74.78	84,305
รวม	204,337.89	388.24	2,059.43	2,938,639

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณพลังงาน ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งสำหรับชุดเส้นทางการขนส่งแบบผสมผสานจากท่าเรือแหลมฉบังไปยังจุดหมายปลายทางทั้ง 22 จังหวัดในไทยที่ทำให้พลังงานต้นทุนและเวลาในการขนส่งต่ำที่สุด

เส้นทางจากท่าเรือแหลมฉบับไปยัง	พลังงาน (ล้าน BTU)	ต้นทุน (ล้านบาท)	เวลา (วัน)	ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็ก (ตัน)
กรุงเทพฯ (รถบรรทุก)	11,965.81	14.87	60.08	184,963
กรุงเทพฯ (รถไฟ-รถบรรทุก)	9,861.30	50.53	437.69	607,565
พระนครศรีอยุธยา (รถไฟ-รถบรรทุก)	793.00	4.35	39.51	52,874
เชียงใหม่ (รถไฟ-รถบรรทุก)	917.04	4.99	62.71	60,512
นครราชสีมา (รถไฟ-รถบรรทุก)	2,252.74	11.53	111.66	138,648
กาญจนบุรี (รถไฟ-รถบรรทุก)	221.92	3.34	33.85	44,356
กำแพงเพชร (รถไฟ-รถบรรทุก)	1,214.16	2.48	20.45	22,618
ขอนแก่น (รถไฟ-รถบรรทุก)	841.50	7.21	80.06	92,236
ฉะเชิงเทรา (รถบรรทุก)	2,515.81	3.83	17.80	59,043
ชลบุรี (รถบรรทุก)	2,778.43	6.51	36.53	131,011
ชัยนาท (รถไฟ-รถบรรทุก)	2,432.41	6.14	52.08	61,687
นครปฐม (รถไฟ-รถบรรทุก)	220.08	3.23	31.43	42,887
นครสวรรค์ (รถไฟ-รถบรรทุก)	1,048.82	8.81	91.41	112,505
ปราจีนบุรี (รถไฟ-รถบรรทุก)	217.02	4.39	41.58	59,043
พิษณุโลก (รถบรรทุก)	1,012.66	8.61	96.43	110,155
ระยอง (รถบรรทุก)	4,389.78	8.10	41.55	143,936
ราชบุรี (รถไฟ-รถบรรทุก)	334.25	5.42	54.56	72,262
สมุทรปราการ (รถบรรทุก)	28,190.37	37.72	161.32	512,881
สมุทรสาคร (รถไฟ-รถบรรทุก)	1,248.14	18.32	178.26	243,222
สระบุรี (รถไฟ-รถบรรทุก)	261.26	4.61	46.42	61,687
สุพรรณบุรี (รถไฟ-รถบรรทุก)	122.04	1.39	14.08	18,212
สุราษฎร์ธานี (รถไฟ-รถบรรทุก)	404.70	1.87	21.83	22,031
อุบลราชธานี (รถไฟ-รถบรรทุก)	1,065.97	6.80	80.76	84,305
รวม	74,309.22	225.04	1,812.06	2,938,639

ในขณะที่รูปแบบการขนส่งผสมผสานระหว่างเรือและรถบรรทุกไม่ถูกเลือกเลยในชุดการขนส่งใหม่ ข้อสังเกตอีกประเด็นหนึ่งที่มีความสำคัญมากคือ เวลาในการขนส่งในชุดเส้นทางการขนส่งใหม่นี้มีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งเกิดจากค่าน้ำหนักเปรียบเทียบ (weight) ระหว่างการใช้พลังงาน ต้นทุนและเวลาในการขนส่งถูกเฉลี่ยให้เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 1 ในบทความนี้ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับแบบจำลองฯ ที่ทำให้เวลาในการขนส่งน้อยที่สุด ผลที่ได้จากการประมวลผลในแบบจำลองฯ จะได้เวลารวมในการขนส่งที่ 1,073.22 วัน ซึ่งเท่ากับรูปแบบการขนส่งทางรถบรรทุกอย่างเดียวทั้งหมด แต่การใช้พลังงานและต้นทุนการขนส่งจะไม่ได้ค่าที่ประหยัดที่สุด การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) โดยการเพิ่มค่าน้ำหนักในมิติใดมิติหนึ่ง การเพิ่มจำนวนและความถี่ของยานพาหนะและการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วจะมีผลทำให้ผลลัพธ์ของชุดเส้นทางการขนส่งใหม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

5. สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองหลากหลายวัตถุประสงค์ที่นำเสนอในบทความนี้เพื่อประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจของผู้ประกอบการขนส่งและผู้ผลิตผลิตภัณฑ์เหล็กเพื่อลดการใช้พลังงาน ต้นทุนและเวลาในการขนส่งให้มากที่สุด โดยชุดเส้นทางการขนส่งใหม่สามารถประหยัดพลังงานจากชุดเส้นทางการขนส่งในปัจจุบันได้มากถึง 75.42% และลดต้นทุนในการขนส่งได้มากถึง 28.71% อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการขนส่งก็เพิ่มมากขึ้นด้วยถึง 69.88% ในกรณีที่มีข้อจำกัดทางด้านเวลาในการขนส่ง การเพิ่มสมการข้อจำกัดทางด้านเวลา (Time Constraint) หรือการปรับค่าน้ำหนักเปรียบเทียบให้เน้นทางด้านมิติของเวลาให้มากขึ้นจะสามารถลดเวลาในการขนส่งได้ เพื่อเป้าหมายหลักในการลดพลังงานและต้นทุนในการขนส่งได้อย่างมหาศาล

6. เอกสารอ้างอิง

1. International Maritime College, 2010, A Feasibility Study of a Steel Hub Development in Thailand, United Thai Shipping Corporation Limited, Bangkok.

2. Boontaveeyuwat, S. and Saengsupavanich, C., 2012, “Optimizing Steel Hub Location in Thailand,” *Maejo International Journal of Science and Technology*, 6 (3), pp. 397-414.

3. Winston, W.L., 1995, Introduction to Mathematical Programming, Duxbury Press, Belmont, California.

4. Miettinen, K. and Makela, M.M., 1999, “Comparative Evaluation of some Interactive Reference Point-based Methods for Multi-objective Optimization,” *Journal of the Operational Research Society*, 50, pp. 949-959.

5. Miettinen, K. and Makela, M.M., 2000, “Interactive Multi-objective Optimization System WWW-NIMBUS on the Internet,” *Computers and Operational Research*, 27, pp. 709-723.

6. Ministry of Transport, 2006, The Development of Multimodal Transport and Logistics Supply Chain Management for Implementation of Action Plan, Ministry of Transport, Thailand.

7. Hanaoka, S., Husnain, T., Kawasaki, T. and Kunadhamraks, P., 2011, “Measurement of Energysaving Effect by Intermodal-freight Transport in Thailand,” *World Review of Intermodal Transportation Research*, 3 (4), pp. 320-337.

8. Department of Energy, 1982, Energy Efficiency in Transportation, Department of Energy, U.S.A.

9. Hitchcock, F.L., 1941, “The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities,” *Journal of Mathematical Physics*, 20, pp. 224-230.

10. Tzeng, G., Hwang, M. and Ting, S., 1995, “Taipower’s Coal Logistics System : Allocation Planning and Bulk Fleet Deployment,” *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 25, pp. 24-46.

11. Shih, L.H., 1997, “Planning of Fuel Coal Imports Using a Mixed Integer Programming Method,” *International Journal of Production*

Economic, 51, pp. 243-249.

12. Bookbinder, J.H. and Fox, N.S., 1998, "Intermodal Routing of Canada-Mexico Shipments under NAFTA," *Transport Research part E : Logistics and Transportation Review*, 34 (4), pp. 289-303.

13. Leung, S.C.H., Yue, W. and Lai, K.K., 2002, "An Optimization Model for a Cross-Border Logistics Problem : A Case in Hong Kong," *Computer and Industrial Engineering*, 43, pp. 393-405.

14. Logozar, K., Radonjic, G. and Bastic, M., 2006, "Incorporation of Reverse Logistics Model into In-plant Recycling Process : A Case of Aluminium Industry," *Resources, Conservation and Recycling*, 49, pp. 49-67.