

การขนส่งสินค้าภายในเมืองโดยการขนส่งทางถนนร่วมกับระบบรถไฟฟ้ารางเบา Intra-city freight distribution combining road transport and light rail transit system

นันท์พิพัฒน์ ธนาวริศวัฒนา¹, อาทิตย์ อภิโชติธนกุล¹, ศิรวดี อริญนารณ^{1*}

Nanpipat Thanawaritwatthana¹, Arthit Apichottanakul¹, Sirawadee Arunyanart^{1*}

¹ศูนย์วิจัยห่วงโซ่อุปทานและระบบโลจิสติกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹Supply Chain and Logistics System Research Unit, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kean University, Thailand

*Corresponding Author. Tel.: 08 1592 6825, E-mail: sirawadee@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวิธีการขนส่งพัสดุภายในเมืองใช้การขนส่งทางถนน ซึ่งมีต้นทุนการขนส่งที่สูง งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการขนส่งพัสดุภายในเมืองในรูปแบบใหม่ซึ่งใช้การขนส่งด้วยระบบรถไฟฟ้ารางเบาร่วมกับการขนส่งบนท้องถนน โดยใช้การขนส่งด้วยระบบรถไฟฟ้ารางเบาในช่วงเส้นทางที่มีรถไฟฟ้ารางเบาวิ่งผ่านแทนการขนส่งในรูปแบบปัจจุบันซึ่งใช้การขนส่งทางถนนเท่านั้น โดยงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้ตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมในการจัดตั้งจุดบริการรับส่งพัสดุนสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อให้ต้นทุนในการขนส่งต่ำที่สุด โดยใช้โปรแกรม Lingo ในการประมวลผลหาคำตอบของแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-integer linear programming; MILP) ด้วยวิธี Branch-and-bound ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับจากกรณีศึกษาแบบการขนส่งแบบการใช้รถไฟฟ้ารางเบาร่วมกับการขนส่งบนท้องถนนที่นำเสนอมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการขนส่งในรูปแบบปัจจุบันถึง 61.25% และยังช่วยลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

คำสำคัญ : ระบบรถไฟฟ้ารางเบาร่วมกับการขนส่งบนท้องถนน การขนส่งสินค้าภายในเมือง ปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้ง

ABSTRACT

Current urban freight distribution uses road transport which has a high transportation cost. This research proposes a new method of parcel distribution and delivery within urban areas by combining transportation by light rail system and road. The parcel will be transported by light rail on the route that the light rail system exists instead of the current delivery method using only road transport. This research used mathematical models to select suitable stations for

Received 07-06-2020

Revised 16-07-2020

Accepted 10-08-2020

establishing parcel delivery service points on all three light rail systems in the Bangkok and the metropolitan region to minimize transportation cost. Lingo computer software was used in order to solve the numerical case of a mixed-integer linear programming (MILP) using Branch-and-bound method. The results from case studies showed that the transportation cost of the combined modes of light rail and road transportation was 61.25% which was lower than the current modes of transport. Moreover, this proposed research could help to reduce environmental pollution.

Keyword: Combined light rail transit system and road, Inter-city freight distribution, Location-allocation problem

1. บทนำ

ปัจจุบันการค้าออนไลน์ (E-commerce) มีการพัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑล ซึ่งเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจและการค้าที่มีจำนวนประชากรสูง นอกจากนี้ วิธีการใช้ชีวิตของคนในสังคมเมืองที่ต้องการความสะดวกและรวดเร็ว ทำให้เกิดปริมาณการสั่งซื้อสินค้าออนไลน์เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ปริมาณการขนส่งสินค้าและพัสดุสูงขึ้นตามไปด้วย

การขนส่งสินค้าและพัสดุภายในกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลใช้ระบบการขนส่งทางถนนเป็นหลัก โดยมีผู้ให้บริการขนส่งที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เช่น Kerry Express, DHL, Lalamove, Best Express, Ninja Van, J&T Express และ SCG Express การขนส่งดังกล่าวไม่เพียงแต่บริการลูกค้าพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น แต่ยังครอบคลุมถึงการอำนวยความสะดวกให้กับบุคคลทั่วไป เช่น การส่งเอกสารข้ามบริษัท การส่งจดหมาย/สิ่งของสำคัญในชั่วโมงเร่งด่วน จากปริมาณการขนส่งที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อตัวเมือง คือ สภาพการจราจรที่หนาแน่นติดขัดเพิ่มขึ้นจากเดิมที่เคยมี

สภาพการจราจรหนาแน่นอยู่แล้ว จากผลการสำรวจการจราจรในปี พ.ศ. 2560 พบว่ากรุงเทพมหานครเป็นเมืองที่รถติดที่สุดในโลก [1]

จากปริมาณความต้องการขนส่งที่สูงขึ้นและการแข่งขันด้านธุรกิจขนส่งที่สูงขึ้น ทำให้ผู้ประกอบการขนส่งต้องพัฒนารูปแบบการให้บริการขนส่ง เพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในตลาดและเพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้องการในการขนส่งสินค้าที่หลากหลายรูปแบบ รวมไปถึงการขนส่งสินค้าแบบเร่งด่วน (Express transportation) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ดังนั้น การมีระบบขนส่งที่ดีย่อมส่งผลให้ผู้ประกอบการขนส่งสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความสามารถในการแข่งขันในตลาดได้เป็นอย่างดี ยิ่งไปกว่านั้นหากผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนด้านการขนส่งได้ก็จะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับผู้ประกอบการมากยิ่งขึ้น

การขนส่งทางถนนมีต้นทุนการขนส่งสูง และด้วยพื้นที่จำกัดของถนนและความแออัดในการจราจรอาจส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการขนส่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวทางใหม่ในการขนส่งสินค้า

ในเขตเมือง โดยประยุกต์ใช้รถไฟฟ้าระบบรางที่มีอยู่ ในปัจจุบันร่วมกับระบบถนนในการขนส่งสินค้าในเขตเมืองที่มีการจราจรแออัด ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนการขนส่งของผู้ประกอบการขนส่ง โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมของจุดให้บริการการขนส่งบนสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยจะทำการเลือกสถานีรถไฟฟ้าเป็นจุดจัดตั้งศูนย์ให้บริการรับ/ส่งสินค้าจากการขนส่งทางถนนให้เปลี่ยนมาใช้ระบบขนส่งทางรถไฟฟ้ารางเบา เนื่องจากการขนส่งทางรางมีต้นทุนที่ต่ำกว่าทางถนน ซึ่งปัญหานี้ถือเป็นปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม (Facility location problem; FLP) งานวิจัยการนี้จึงพัฒนาตัวแบบคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหา โดยใช้โปรแกรม Lingo ในการประมวลผล หาคำตอบแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-integer linear programming; MILP) ด้วยวิธี Branch-and-bound

การขนส่งด้วยระบบราง

การขนส่งคมนาคมเป็นสิ่งจำเป็นกับชีวิตมนุษย์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการวิวัฒนาการการขนส่งออกเป็นหลายรูปแบบด้วยกัน หลายประเทศพยายามใช้ระบบขนส่งแบบรางในการส่งผู้โดยสารและสินค้าภายในเขตเมืองเนื่องจากจำนวนประชากรที่หนาแน่นและการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว Behrends [2] ได้ทำการแบ่งสาเหตุสำคัญในการขนส่งคมนาคมและการขนส่งสินค้าด้วยระบบรางในเมืองออกเป็น 3 ประการด้วยกัน ได้แก่ ประการที่ 1 เพื่อตอบสนองจากการคาดการณ์ที่บ่งชี้ว่าการขนส่งสินค้าจะเติบโตในอนาคต ประการที่ 2 เพื่อตอบสนองการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของเมือง ประการที่ 3 เพื่อตระหนักถึงมลภาวะและ

สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้น จากการสำรวจการขนส่งคมนาคมโดยรถไฟฟ้าสามารถลดการใช้พลังงานในการขนส่งสินค้าลงได้ถึงร้อยละ 50 จากการขนส่ง ต้น/กิโลเมตร เมื่อเทียบกับระบบขนส่งสินค้าทางถนน [3] นอกจากนี้ระบบรางยังช่วยเพิ่มปริมาณการบรรทุกสินค้าที่มากขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา แต่อย่างไรก็ตาม การกระจายสินค้าในเมืองโดยใช้ระบบรางยังมีจุดอ่อนและข้อจำกัดในการขนส่งสินค้า [4] คือ ความสามารถในการจัดส่งแบบ Door-to-door ที่ไม่ดี ขาดความยืดหยุ่น และมีต้นทุนอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องในการจัดส่งสินค้า Goldman and Gorham [5] ได้ทำการศึกษาการคมนาคมขนส่งสินค้าในเมืองที่มีความซับซ้อนและแออัด โดยทดลองใช้วิธีการการขนส่งผู้โดยสารและการขนส่งสินค้าเชื่อมโยงระหว่างสถานที่ต้นทางไปยังปลายทาง ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการขนส่งผู้โดยสารกับสินค้าไปพร้อมกัน สามารถทำให้รถบรรทุกลดลงไป 1 ใน 3 ของการขนส่งสินค้าจากการใช้รถบรรทุกที่เกิดขึ้น

ปัญหาการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม

โดยทั่วไปแล้วปัญหาการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม (Facility location problem; FLP) เกือบทุกประเภท จัดเป็นปัญหายาก (Non-deterministic polynomial-time hardness; NP-hard) การพัฒนาวิธีการแก้ปัญหา FLP สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ [6] ได้แก่ วิธีแม่นยำตรง (Exact algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution) และการพัฒนาฮิวริสติกส์ (Heuristics) ซึ่งใช้เวลาระยะเวลาในการคำนวณที่เร็วกว่า แต่คุณภาพของคำตอบด้อยกว่าวิธีแม่นยำตรง งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหา

ด้วยการพัฒนาอภิวริสติกส์ เนื่องด้วยวิธีนี้มันตรงมีความยากและความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ของปัญหา ใช้เวลาในการหาคำตอบที่นานเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่

ปัญหาการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมมีความหลากหลายจากปัจจัยต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนั้น ๆ จากผลการศึกษาของจันทร์ศิริ [7] พบว่า วัตถุประสงค์การเลือกสถานที่ตั้งความต้องการในการตัดสินใจ และช่วงระยะเวลาในการพิจารณา เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์และการใช้วิธีการแก้ปัญหาในงานวิจัย โดยสามารถแบ่งประเภทปัญหาจากปัจจัยดังกล่าวออกเป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) ปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่ให้บริการแบบดีเทอร์มินิสติก (2) ปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบพลวัต (3) ปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบสโตแคสติก และ (4) ปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบโรบัสต์ ReVell and Eiselt [8] ระบุว่าปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งที่เหมาะสม มีลักษณะเฉพาะอย่าง 4 ประการด้วยกันที่ใช้ในการแก้ปัญหา ประกอบได้ด้วย (1) ลูกค้าซึ่งมีตำแหน่งที่ตั้งแน่นอนอยู่แล้วที่ใดที่หนึ่งหรืออยู่บนเส้นทางการขนส่ง (2) โรงงานหรือคลังสินค้าที่ต้องการหาตำแหน่งที่ตั้งเพื่อให้ต้นทุนต่ำที่สุด (3) ตำแหน่งที่ตั้งของลูกค้า โรงงาน และคลังสินค้า ตั้งอยู่เดิมมีอยู่แล้วที่ต้องการเปิดปิด (4) ค่าระยะทางหรือเวลาในการเดินทางระหว่างโรงงานกับลูกค้า

Ballou [9] เสนอการนำผลการเลือกตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบดีเทอร์มินิสติกมาประยุกต์ใช้กับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบพลวัตเพื่อให้ได้กำไรสูงสุดในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าตลอดช่วงระยะเวลาของแผนการดำเนินการ

Marufuzzaman et al.. [10] ได้ทำการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมที่มีความซับซ้อนแบบพลวัต โดยมีขอบเขตจำกัดในการเลือกเปิดปิดหรือรักษาทำเลที่ตั้งเดิมไว้ โดยการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบ ซึ่งพบว่าการสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาใช้เวลาในการคำนวณที่นาน ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Marufuzzaman et al. [10] ได้ทำการออกแบบอัลกอริทึมแบบไฮบริด RH-Benders ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบได้รวดเร็วและคุณภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ Wu et al. [11] เสนอการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบปัญหาจากการเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมและการจัดเส้นทางในการขนส่ง (Location routing problem; LRP) ซึ่งเป็นปัญหาส่วนหนึ่งของวิธีการเลือกทำเลที่ตั้ง (Facility location- allocation problem) โดยปฐพี [12] ได้รวบรวมข้อมูลระบุถึงรูปแบบของตัวแบบคณิตศาสตร์ของปัญหานี้ว่าโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย (1) จำนวนสถานที่ตั้ง (2) ความต้องการสินค้าของลูกค้า (3) จำนวนสถานที่ตั้งของจุดที่นำจะตั้งศูนย์กระจายสินค้าและ (4) ชนิดและขนาดของยานพาหนะ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสามารถหาหรือกำหนดได้ ส่วนการวางแผนการกระจายสินค้าและจัดเส้นทางขนส่งนั้น จะต้องได้รับการออกแบบเพื่อ (1) ตอบสนองความต้องการของลูกค้าแต่ละราย (2) ลูกค้าแต่ละรายจะได้รับการจัดส่งสินค้า โดยยานพาหนะหนึ่งคันอย่างแน่นอน (3) ความต้องการโดยรวมในแต่ละเส้นทางจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับความสามารถของยานพาหนะที่ได้รับมอบหมายให้ไปในเส้นทางนั้น ๆ (4) แต่ละเส้นทางจะต้องเริ่มและจบที่ศูนย์กระจายสินค้าเดียวกัน ปรางประเสริฐ และชุมพล [13] ได้ศึกษาการเลือก

ทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าโดยการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงปริมาณร่วมกันกับปัจจัยเชิงคุณภาพด้วยฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นจำนวนเต็มผสม และวิเคราะห์คำตอบด้วยฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ เพื่อให้ต้นทุนต่ำที่สุด ผลจากการศึกษาพบว่า มี 13 จังหวัด ที่ได้ถูกเลือกให้เป็นแหล่งก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าในประเทศไทย Motraghi and Marinov [14] ได้ศึกษาการส่งสินค้าโดยการจำลองเหตุการณ์โดยใช้โปรแกรมอารีนา (ARENA) เพื่อพัฒนาเสริมสร้างประสิทธิภาพในการขนส่งสินค้าภายในเมืองด้วยรถไฟ จากการสร้างแบบจำลองโปรแกรมอารีนาพบว่า รถไฟมีประสิทธิภาพในการขนส่งสินค้าที่สูงที่สุด และต้นทุนต่ำเหมาะกับการขนส่งภายในเมืองที่มีการจราจรแออัด ผลจากงานวิจัยได้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบการขนส่งสินค้าด้วยรถไฟใต้ดินในเมืองนิวคาสเซิล ประเทศอังกฤษ ผลจากการจำลองพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานจากการขนส่งสินค้าแบบเดิมได้ 5% แต่มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถทำการส่งสินค้าแบบถึงมือลูกค้าโดยตรง (Door-to-door) ได้ จึงเกิดต้นทุนในการขนส่งอื่น ๆ เสริมตามมา

ต้นทุนการขนส่ง

คงเดช [15] ได้ให้นิยามถึงประเภทต้นทุนที่เกิดขึ้นของรถขนส่งสินค้าในการใช้งานขนส่ง โดยแบ่งต้นทุนออกเป็น 2 ประเภท คือ ต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่ คือ ต้นทุนที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการขนส่ง เช่น ค่าจ้างพนักงาน ค่าเช่าสถานที่ และค่าประกันภัยยานพาหนะ เป็นต้น ต้นทุนผันแปร คือ ต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการขนส่งสินค้า ระยะทางที่ขนส่ง เช่น ค่าน้ำมันในการขนส่งสินค้า และค่าคอมมิชชันจากเที่ยวการขนส่ง เป็นต้น

ระบบขนส่งสาธารณะโดยรถไฟฟ้าในประเทศไทย

ระบบขนส่งสาธารณะรถไฟฟ้ารางเบาเป็นระบบขนส่งมวลชนที่ให้บริการในเขตเมืองขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะปล่อยมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ารถไฟปกติเป็นอย่างมาก เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในการขับเคลื่อน มีการให้บริการครอบคลุมพื้นที่ในเขตกรุงเทพและปริมณฑลมากที่สุดในการขนส่งสาธารณะแบบราง โดยในปัจจุบัน รถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอยู่ภายใต้การให้บริการจาก 3 หน่วยงาน คือ รถไฟฟ้าบีทีเอส (BTS skytrain; BTS) รถไฟฟ้ามหานคร (Metropolitan rapid transit; MRT) และรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Suvarnabhumi airport rail link; ARL)

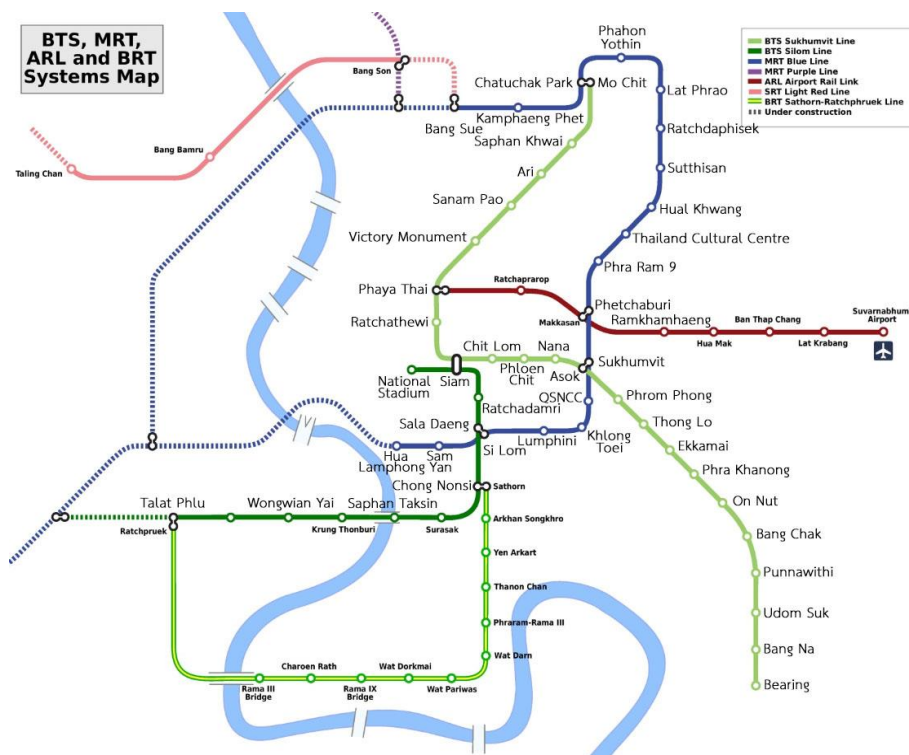
รถไฟฟ้าบีทีเอส ให้บริการทั้งหมด 2 สาย คือ สายสุขุมวิท มีจำนวนสถานี 32 สถานี ระยะทาง 36.18 กิโลเมตร และสายสีลม มีจำนวนสถานี 44 สถานี (โดยนับสถานีสยาม ซึ่งเป็นสถานีเชื่อมต่อทั้ง 2 สายเป็นสถานีเดียว และไม่รวม 2 สถานีโครงการในอนาคต) ระยะทาง 14.67 กิโลเมตร รวมระยะทางรถไฟฟ้าบีทีเอสทั้งสิ้น 50.85 กิโลเมตร

รถไฟฟ้ามหานคร เป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ดำเนินการโดยการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) เป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประเทศไทย (รฟท.) รถไฟฟ้ามหานครที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน ได้แก่ รถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคลและสายฉลองรัชธรรม ประกอบไปด้วยสถานีทั้งหมด 41 รวมระยะทางทั้งสิ้น 52.3 กิโลเมตร

รถไฟฟ้าที่เชื่อมต่อท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ หรือ แอร์พอร์ต เรล ลิงก์ เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนแบบพิเศษ ดำเนินการก่อสร้างโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) และได้เปิดดำเนินการเชิงพาณิชย์เมื่อปีพ.ศ. 2553 โดย บริษัท รถไฟฟ้า

ร.ฟ.ท. จำกัด ประกอบไปด้วยสถานีทั้งหมด 8 รวมระยะทางทั้งสิ้น 28.6 กิโลเมตร [16]

เส้นทางและสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบที่ดำเนินการในปัจจุบันในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนที่แสดงเส้นทางและสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล [17]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในการเขียนรูปแบบคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ดังนี้

2.1 ตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากการวิเคราะห์การขนส่งโดยอาศัยระบบรางสาธารณะด้วยรถไฟฟ้าสามารถสร้างตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

(1) ดัชนี

i คือ ผู้ประกอบการ ($i = 1 \dots I$)

j คือ สถานีรถไฟฟ้า ($j = 1 \dots J$)

(2) พารามิเตอร์

I คือ จำนวนผู้ประกอบการ

J คือ จำนวนสถานีรถไฟ

FC_j คือ ต้นทุนในการเปิดจุดบริการรับ/ส่งสินค้า j หน่วย: บาท

- C คือ ต้นทุนคงที่ในการขนส่งจากผู้ประกอบการ i กับจุดบริการรับ/ส่งสินค้า j หน่วย: บาท/กิโลเมตร
- $Dist_{ij}$ คือ ระยะทางในการขนส่งจากผู้ประกอบการ i ไปยังจุดบริการรับ/ส่งสินค้า j หน่วย: กิโลเมตร
- D_i คือ ปริมาณความต้องการส่งสินค้าของผู้ประกอบการ i หน่วย: กล้อง
- CAP_j คือ ความสามารถในการรับสินค้าของจุดบริการรับ/ส่งสินค้า j หน่วย: กล้อง

(3) ตัวแปรการตัดสินใจ

- X_{ij} คือ ปริมาณการขนส่งสินค้าจากผู้ประกอบการ i ไปยังจุดบริการรับ/ส่งสินค้า j ใดๆ หน่วย: กล้อง
- Y $\begin{cases} 1 & \text{เมื่อมีการเปิดจุดบริการรับ/ส่งสินค้า } j \\ 0 & \text{เมื่อไม่มีการเปิดจุดบริการรับ/ส่งสินค้า } j \end{cases}$

สมการเป้าหมาย

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (Y_j FC_j) + (Dist_{ij} CX_{ij}) \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = D_i \quad ; \forall i \quad (2)$$

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

$$X_{ij} \geq 0 \quad ; \forall i, j \quad (4)$$

$$Y_j \in \{0,1\} \quad ; \forall j \quad (5)$$

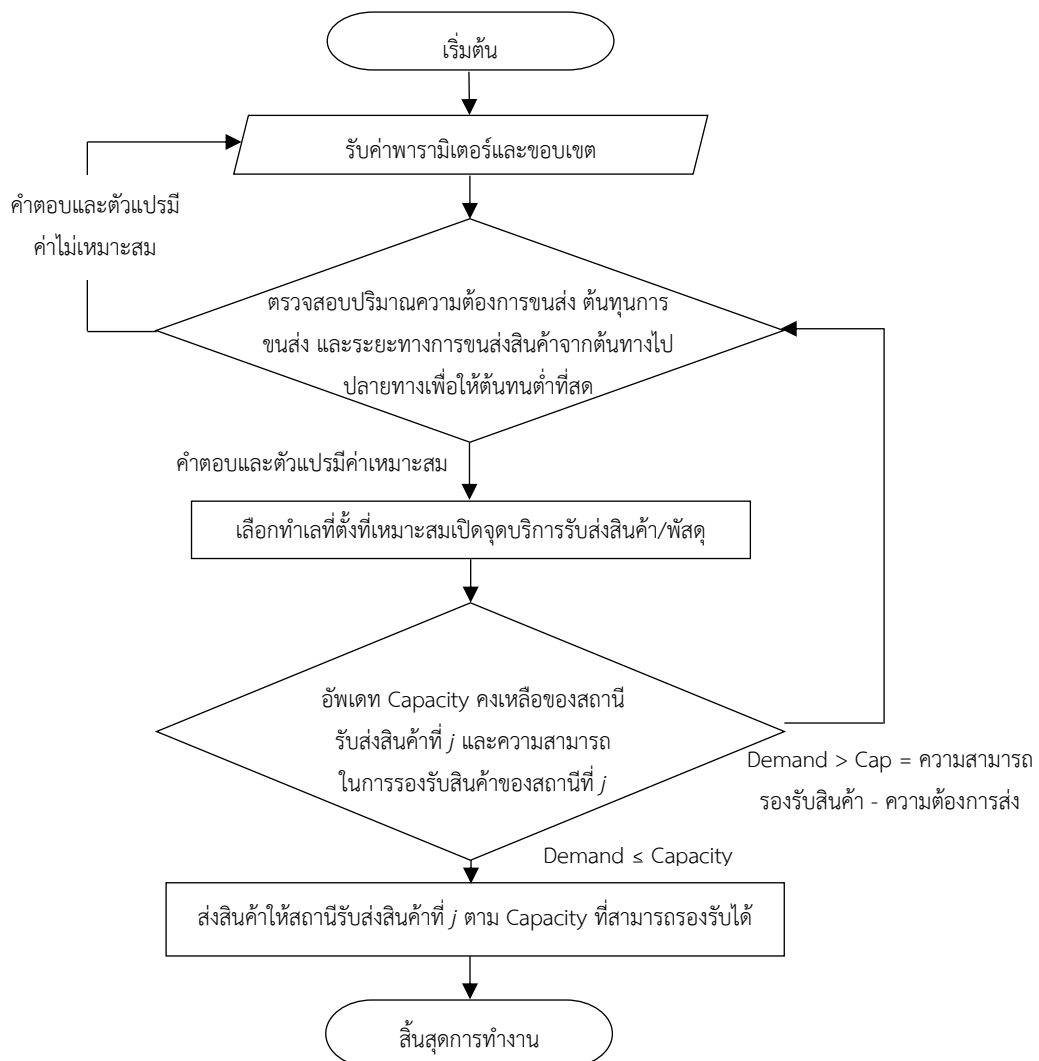
สมการที่ (1) เป็นสมการเป้าหมายของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการเลือกจัดตั้งจุดบริการรับ/ส่งสินค้าเพื่อให้ต้นทุนในการขนส่งสินค้าต่ำที่สุด โดยต้นทุนประกอบด้วยต้นทุนในการเปิดจุดบริการรับ/ส่งสินค้าและต้นทุนการขนส่งจากผู้ประกอบการไปยังจุดบริการรับ/ส่งสินค้า มีข้อจำกัด คือ สมการที่ (2) ถึง (5) โดยสมการที่ (2) แสดงปริมาณการขนส่งสินค้าจากผู้ประกอบการไปยังจุดบริการรับ/ส่งสินค้า

ต้องเท่ากับปริมาณความต้องการส่งสินค้าจากผู้ประกอบการแต่ละแห่ง สมการที่ (3) แสดงปริมาณการขนส่งจากผู้ประกอบการไปยังจุดบริการรับ/ส่งสินค้าในแต่ละแห่งต้องไม่เกินความสามารถในการรับสินค้าของจุดบริการรับ/ส่งสินค้า สมการที่ (4) กำหนดให้ปริมาณการขนส่งสินค้าที่เกิดขึ้นต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 และสมการที่ (5) กำหนดให้การเปิดหรือปิดของจุดบริการรับ/ส่งสินค้าเป็นตัวแปรที่ถูกกำหนดให้มี 2 ค่า (Binary variable) คือ 0 และ 1

2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลกรณีศึกษาในงานวิจัยได้ดังนี้ มีจำนวนสาขาผู้ประกอบการ (I) ทั้งหมด 31 สาขา จำนวนสถานีรถไฟฟ้า (J) ทั้งหมด 97 สถานี ปริมาณความต้องการส่งสินค้าของผู้ประกอบการ (D_i) มีตั้งแต่ 3,900 ถึง 8,700 กล้องต่อเดือน ต้นทุนในการเปิดจุดบริการรับ/ส่งสินค้าที่สถานีใดๆ (FC_j) มีตั้งแต่ 100,000 บาท ถึง 150,000 บาท ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของสถานี กำหนดให้ความสามารถในการรับสินค้าของจุดบริการรับ/ส่งสินค้า (CAP_j) มีค่าเท่ากันทุกสถานี คือ 6,000 กล้อง ต้นทุนการขนส่ง (C) 2.12 บาทต่อกิโลเมตร อ้างอิงจากลักษณะค่าใช้จ่ายประเภทของการขนส่งสินค้ายานพาหนะในการใช้งานด้านการขนส่ง [18]

จากการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้มาและการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม ซึ่งเป็นแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม Mixed-integer linear programming (MILP) โดยมีอัลกอริทึมการทำงานของโปรแกรม Lingo ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 อัลกอริทึมการทำงานของโปรแกรม Lingo 13.0

2.3 ต้นทุนการขนส่งสินค้า

เพื่อให้เห็นภาพรวมของความแตกต่างของต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งต่อ 1 เทียะ ระหว่างการขนส่งโดยใช้ทางถนนร่วมกับระบบรางกับการขนส่งเฉพาะทางถนนของกรณีศึกษาตัวอย่าง 6 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีศึกษามีระยะทางการขนส่งจาก

ศูนย์กระจายสินค้าต้นทางไปยังศูนย์กระจายสินค้าปลายทางที่ต่างกัน โดยเริ่มจากศูนย์กระจายสินค้าที่มีระยะทางไกลกันมากและใกล้เข้ามา

การคำนวณต้นทุนการขนส่งทางถนน
คิดจากต้นทุนการขนส่ง = ระยะทางจากศูนย์กระจายสินค้าต้นทางไปยังศูนย์กระจายสินค้าปลายทาง (กิโลเมตร) × ต้นทุนการขนส่ง (บาท/กิโลเมตร)

ดังแสดงในภาพที่ 3 ส่วนต้นทุนการขนส่งสินค้าโดยอาศัยระบบรางสาธารณะด้วยโครงข่ายรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบร่วมกับกับการขนส่งสินค้าทางท้องถนนสามารถคำนวณต้นทุนการขนส่งจาก [ระยะทางจากศูนย์กระจายสินค้าต้นทางไปยังสถานีจุดรับ/ส่งสินค้าต้นทาง + ระยะทางจากสถานีจุดรับ/ส่งสินค้าปลายทางไปยังศูนย์กระจายสินค้าปลายทาง] × ต้นทุนการขนส่ง (บาท/กิโลเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยการคำนวณข้างต้นไม่คิดต้นทุนระยะทางภายในระบบรางสาธารณะ เนื่องจากเป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นจากตารางการเดินรถที่มีต้นทุนคงที่

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการประมวลข้อมูลด้วยโปรแกรม Lingo

จากการนำข้อมูลมาทำการทดสอบผลค่าคำตอบด้วยโปรแกรม Lingo เวอร์ชัน 13.0 พบว่าจำนวนจุดให้บริการที่เหมาะสมที่ควรเปิดเพื่อรับส่งสินค้า/พัสดุนสถานีรถไฟเพื่อให้เกิดต้นทุนรวมต่ำที่สุดมีทั้งหมด 36 แห่ง จากสถานีรถไฟไฟฟ้าที่มีทั้งหมด 97 สถานี ได้แก่ สถานี ได้แก่ (N7) สะพานควาย (N1) ราชเทวี (E2) เพลินจิต (E3) นานา (E5) พร้อมพงษ์ (E10) บางจาก (E11) ปุณณวิถี

(E12) อุดมสุข (E15) สำโรง (E16) ปู่เจ้า (E18) โรงเรียนนายเรือ (E21) แพรกษา (E22) สายลวด (E23) เคหะ (S5) สุรศักดิ์ (S6) สะพานตากสิน (S7) กรุงเทพมหานคร (S9) โพธิ์นิมิต (S10) ตลาดพลู (S11) วุฒากาศ (BL19) ศูนย์วัฒนธรรม (BL30) สามยอด (BL31) สนามไชย (BL33) บางไผ่ (BL37) บางแค (PP01) คลองบางไผ่ (PP04) บางพลู (PP07) ไทรมา (PP09) แยกถนนพหลโยธิน (PP10) บางกระสอ (PP11) ศูนย์ราชการนนทบุรี (PP12) กระทรวงสาธารณสุข (PP13) แยกติวานนท์ (PP14) วงศ์สว่าง (A5) รามคำแหง และ (A7) ราชปรารภ โดยมีต้นทุนในการจัดตั้งศูนย์ให้บริการและต้นทุนค่าขนส่งรวมทั้งหมด 6,353,716 บาท โดยรายละเอียดของสถานีที่มีการเปิดจุดให้บริการรับส่งสินค้า/พัสดุโดยระบบรถไฟฟ้ารางเบาในกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑล สาขาศูนย์กระจายสินค้าของผู้ประกอบการขนส่งที่ต้องใช้บริการที่จุดให้บริการรับส่งสินค้า/พัสดุ และปริมาณสินค้า/พัสดุที่ต้องขนส่งไปยังจุดให้บริการนั้น ๆ ได้แสดงในตารางที่ 1 และแผนที่แสดงตำแหน่งจุดบริการรับ/ส่งสินค้าบนสถานีรถไฟและตำแหน่งที่ตั้งของผู้ประกอบการสาขาต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 3 การขนส่งทางถนน



ภาพที่ 4 การขนส่งสินค้าด้วยรถไฟไฟฟ้าร่วมกับการขนส่งทางถนน

ตารางที่ 1 สถานีที่เลือกเปิดจุดรับ/ส่งสินค้าและปริมาณการขนส่งสินค้าจากผู้ประกอบการ

ที่	สถานี	ผู้ประกอบการ	ปริมาณ การ ขนส่ง (กล่อง)
1	N7 สะพานควาย	DC28 จตุจักร	6,000
2	N1 ราชเทวี	DC9 สยามสแควร์	1,500
		DC10 รongเมือง	4,500
3	E2 เพลินจิต	DC6 อโศก	300
		DC8 สีลม	4,800
		DC9 สยามสแควร์	900
4	E3 นานา	DC6 อโศก	3,900
		DC7 คลองเตย	2,100
		เหนือ	
5	E5 พร้อมพงษ์	DC7 คลองเตย	6,000
		เหนือ	
6	E10 บางจาก	DC4 อ่อนนุช	5,700
		DC5 ห้วยขวาง	300
7	E11 ปุณณวิถี	DC2 มินบุรี	6,000
8	E12 อุตุสมสุข	DC2 มินบุรี	600
		DC3 ลาตกระบัง	1,200
		DC21 หนองจอก	4,200
9	E15 สำโรง	DC3 ลาตกระบัง	3,600
		DC8 สีลม	2,400
10	E16 ปู่เจ้า	DC8 สีลม	900
		DC22 เทพารักษ์	4,800

DC31 บางขุนเทียน 300

ตารางที่ 1 (ต่อ) สถานีที่เลือกเปิดจุดรับ/ส่งสินค้าและปริมาณการขนส่งสินค้าจากผู้ประกอบการ

ที่	สถานี	ผู้ประกอบการ	ปริมาณ การ ขนส่ง (กล่อง)
11	E18 โรงเรียนนายเรือ	DC23 ปากน้ำ	6,000
12	E21 แพรกษา	DC3 ลาตกระบัง	2,400
		DC23 ปากน้ำ	300
		DC24 แพรกษา	3,300
13	E22 สายลวด	DC24 แพรกษา	3,300
		DC25	1,800
14	E23 เคหะ	DC25 บางปู	6,000
15	S5 สุรศักดิ์	DC8 สีลม	600
		DC12 สยามซี	5,400
		พอร์ต	
16	S6 สะพานตากสิน	DC12 สยามซี	6,000
		พอร์ต	
17	S7 กรุงธนบุรี	DC12 สยามซี	1,500
		พอร์ต	
		DC13 บางลำภูล่าง	4,500
19	S10 ตลาดพลู	DC17 บางบอน	1,200
		DC31 บางขุนเทียน	4,800
20	S11 วุฒากาศ	DC15 ภาษีเจริญ	1,800
		DC17 บางบอน	4,200

ตารางที่ 1 (ต่อ) สถานที่ที่เลือกเปิดจุดรับ/ส่งสินค้า และปริมาณการขนส่งสินค้าจากผู้ประกอบการ

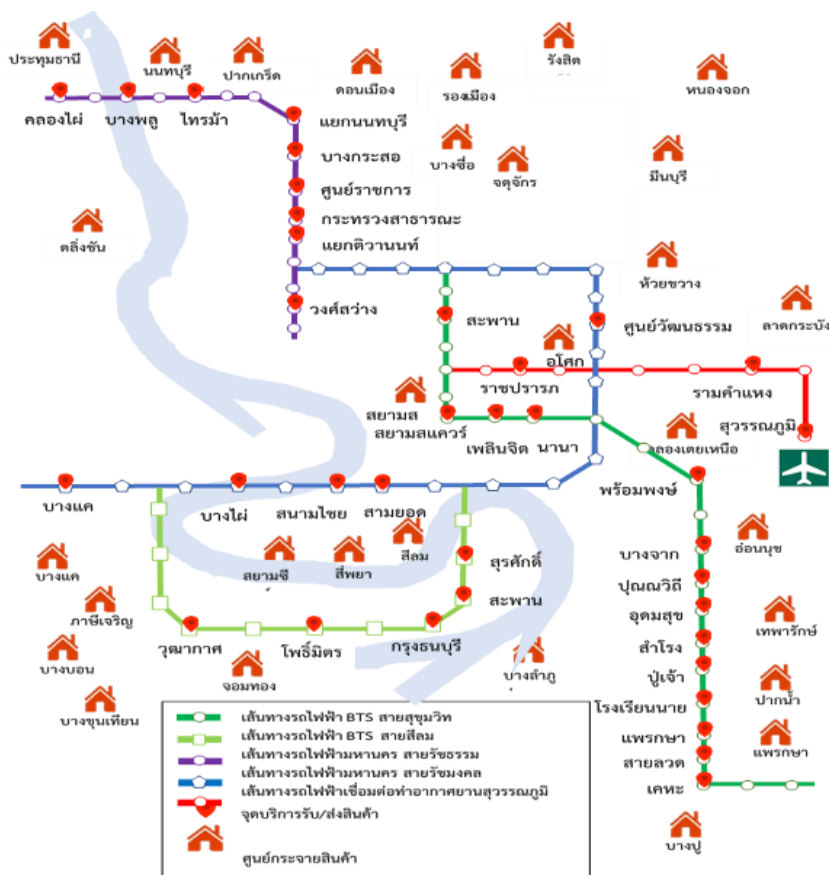
ที่	สถานที่	ผู้ประกอบการ	ปริมาณ การ ขนส่ง (กล่อง)
21	BL19 ศูนย์ วัฒนธรรม	DC5 ห้วยขวาง	2,400
		DC6 อโศก	3,300
		DC28 จตุจักร	300
22	BL30 สามยอด	DC10 รongเมือง	300
		DC11 สีพญา	4,200
		DC14 ดลิ่งชัน	1,500
23	BL31 สนามไชย	DC14 ดลิ่งชัน	6,000
24	BL33 บางไผ่	DC15 ภาษีเจริญ	4,800
		DC16 บางแค	1,200
25	BL37 บางแค	DC16 บางแค	6,000
26	PP14 วงศ์สว่าง	DC28 จตุจักร	2,400
		DC29 บางซื่อ	3,600
27	PP13 แยกติวานนท์	DC1 บางเขน	1,500
		DC29 บางซื่อ	4,500
28	PP12 กระโหลก	DC1 บางเขน	3,000
		DC26 ดอนเมือง	3,000
29	PP11 ศูนย์ราชการ นนทบุรี	DC20 รังสิต	300
		DC26 ดอนเมือง	5,700
30	PP10 บางกระสอ	DC20 รังสิต	300
		DC27 ปากเกร็ด	5,700
31	PP09 แยกถนนพหลโยธิน 1	DC20 รังสิต	6,000
32	PP07 ไทรมา	DC18 นนทบุรี	2,400
		DC19 ปทุมธานี	2,400
		DC20 รังสิต	1,200
33	PP04 บางพลู	DC18 นนทบุรี	6,000
34	PP01 คลองบางไผ่	DC19 ปทุมธานี	6,000
35	A5 รามคำแหง	DC5 ห้วยขวาง	6,000
36	A7 ราชปรารภ	DC9 สยามสแควร์	6,000

จากผลเฉลยของการแก้ปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมในการจัดตั้งจุดบริการรับส่ง

พัสดุบนสถานีรถไฟฟ้ามหานคร จะเห็นได้ว่าสถานีที่ถูกเลือกนั้นกระจายอยู่ทั่วโครงข่ายรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

3.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณเพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์ผลอันเนื่องมาจากอัตราการเพิ่มหรือลดของปริมาณความต้องการส่งสินค้าของศูนย์กระจายสินค้าที่เปลี่ยนไปต่อการเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับการสร้างศูนย์รับ/ส่งสินค้าในสถานีรถไฟฟ้ามหานคร โดยสร้างสถานการณ์จำลอง 8 เหตุการณ์ โดยการเปลี่ยนแปลงระดับความต้องการของผู้ใช้บริการการขนส่งดังนี้ $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, และ $\pm 20\%$ จากนั้นทำการทดลองด้วยตัวแปรการตัดสินใจเดียวกันทั้งหมด ในการทดสอบความแตกต่างระหว่างการเลือกทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับการสร้างศูนย์รับ/ส่ง กระจายสินค้าในสถานีรถไฟฟ้ามหานครและต้นทุนรวมในแต่ละสถานการณ์ต่ำที่สุด ผลลัพธ์ของแต่ละสถานการณ์แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองจากสถานการณ์ปกติ (อัตราการเพิ่ม/ลดของปริมาณขนส่งเท่ากับศูนย์) พบว่า ความต้องการด้านการขนส่งที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในแต่ละศูนย์การกระจายสินค้า จะส่งผลต่อจำนวนสถานีที่ถูกเลือกเพื่อเปิดศูนย์บริการรับ/ส่งสินค้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณความต้องการขนส่งที่มีมากกว่าความสามารถในการรองรับสินค้าของศูนย์ให้บริการรับ/ส่งสินค้า เป็นข้อจำกัดให้เปิดศูนย์บริการรับ/ส่งสินค้า ส่วนค่าใช้จ่ายรวมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณจำนวนการเปิดศูนย์บริการรับ/ส่งสินค้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถให้ค่าผลเฉลยที่ค่อนข้างแม่นยำ



ภาพที่ 5 ตำแหน่งจุดบริการรับ/ส่งสินค้าบนสถานีรถไฟฟ้า

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณของแต่ละสถานการณ์

อัตราการเพิ่ม/ลด ของปริมาณขนส่ง	สถานที่ที่เปิด	จำนวนสถานที่ เปิด	ต้นทุนรวม
+20%	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E20, E21, E22, E23, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL23, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	38	7,624,459
+15	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E20, E21, E22, E23, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	37	7,306,773
+10%	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, E23, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	36	6,989,088

ตารางที่ 2 (ต่อ) ผลการคำนวณของแต่ละสถานการณ์

อัตราการเพิ่ม/ลด ของปริมาณขนส่ง	สถานที่ที่เปิด	จำนวนสถานที่ เปิด	ต้นทุนรวม
+5%	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, E23, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	36	6,671,402
0%	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, E23, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	36	6,353,716
-5%	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, E23, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	36	6,036,030
-10%	N7, N1, E2, E3, E5, E10, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	35	5,718,344
-15%	N7, N1, E2, E3, E5, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP12, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	34	5,400,659
-20%	N7, N1, E2, E3, E5, E11, E12, E15, E16, E18, E21, E22, S5, S6, S7, S9, S10, S11, BL19, BL30, BL31, BL33, BL37, PP14, PP13, PP11, PP10, PP09, PP07, PP04, PP01, A5, A7	33	5,082,973

3.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งสินค้า
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งต่อ 1 เที่ยว ระหว่างการขนส่งระบบรางและทางถนนกับการขนส่งเฉพาะทางถนนของศึกษากรณีตัวอย่าง 6 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีศึกษามีระยะทางการขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าต้นทางไปยังศูนย์กระจายสินค้าปลายทางที่ต่างกัน โดยเริ่มจากศูนย์กระจายสินค้าที่มีระยะทางไกลกันมากและใกล้เข้ามา ประกอบไปด้วย การขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าปทุมธานีไปบางปู จากศูนย์กระจาย

สินค้ารังสิตไปแพรกษา ศูนย์กระจายสินค้าลาดกระบังไปบางแค ศูนย์กระจายสินค้าสีลมไปบางซื่อ ศูนย์กระจายสินค้าคลองเตยเหนือไปจอมทอง และศูนย์กระจายสินค้าบางลำภูลงไปไทรโคก ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยการคำนวณต้นทุนการขนส่งทางถนน และต้นทุนการขนส่งโดยอาศัยระบบรางสาธารณะโครงข่ายรถไฟฟ้าทั้ง 3 ระบบรวมกับการขนส่งทางถนน ใช้วิธีตามที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งสินค้า/พัสดุจากต้นทางไปยังปลายทางด้วยวิธีการขนส่ง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งของการขนส่งสินค้ารูปแบบใหม่และรูปแบบปัจจุบันต่อการขนส่งใน 1 เทียว กรณีตัวอย่าง

ศูนย์กระจาย สินค้าต้นทาง	การขนส่งด้วยรถไฟฟ้ามาร่วมกับทางถนน (รูปแบบนำเสนอ)						การขนส่งทางถนน (ปัจจุบัน)		ผลต่างต้นทุนค่า ขนส่ง (บาท)	
	ระยะทางช่วงที่ 1			ระยะทางช่วงที่ 2			ต้นทุนค่า ขนส่ง (บาท)	ระยะทาง ขนส่ง (กิโลเมตร)		ต้นทุนค่า ขนส่ง (บาท)
	ศูนย์กระจาย สินค้าต้นทาง	สถานีจุดรับ/ส่ง สินค้าต้นทาง	ระยะทาง ขนส่ง (กิโลเมตร)	สถานีจุดรับ/ส่ง สินค้าปลายทาง	ศูนย์กระจาย สินค้าปลายทาง	ระยะทาง ขนส่ง (กิโลเมตร)				
– ศูนย์กระจาย สินค้า ปลายทาง										
ปทุมธานี – บางปู	ศูนย์กระจาย สินค้าปทุมธานี	สถานีรถไฟฟ้ามหานครคลอง บางไผ่	10.802	สถานีรถไฟฟ้ามหานคร เคหะ	ศูนย์กระจาย สินค้าบางปู	2.673	28.57	54.857	116.30	87.73
รังสิต – แพรกษา	ศูนย์กระจาย สินค้านางสิต	สถานีรถไฟฟ้านนทบุรี ศูนย์ราชการ นนทบุรี	19.520	สถานีรถไฟฟ้านนทบุรี แพรกษา	ศูนย์กระจาย สินค้านนทบุรี	2.340	46.34	44.413	94.16	47.82
ลาดกระบัง – บางแค	ศูนย์กระจาย สินค้า ลาดกระบัง	สถานีรถไฟฟ้ามุดมสุข	17.134	สถานีรถไฟฟ้ามุดม บางแค	ศูนย์กระจาย สินค้าบางแค	3.462	43.66	39.767	84.31	40.65
สีลม – บางซื่อ	ศูนย์กระจาย สินค้าสีลม	สถานีรถไฟฟ้ามะลิ นิต	2.079	สถานีรถไฟฟ้ามหานคร วงศ์สว่าง	ศูนย์กระจาย สินค้าบางซื่อ	0.788	6.08	11.570	24.53	18.45
คลองเตยเหนือ – จอมทอง	ศูนย์กระจาย สินค้าคลองเตย เหนือ	สถานีรถไฟฟ้ามานานา	0.791	สถานีรถไฟฟ้ามอ นิธิมิตร	ศูนย์กระจาย สินค้าจอมทอง	4.573	11.37	12.562	26.63	15.26
บางลำภูล่าง – อโศก	ศูนย์กระจาย สินค้าบางลำภูล่าง	สถานีรถไฟฟ้ามหานคร บุรี	0.691	สถานีรถไฟฟ้ามานานา	ศูนย์กระจาย สินค้าอโศก	1.238	4.09	7.366	15.62	11.53

ด้วยรูปแบบใหม่และวิธีการขนส่งปัจจุบันของ
กรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี แสดงดังตารางที่ 3 จะเห็นได้
ว่า การขนส่งโดยอาศัยระบบรางสาธารณะโดย
รถไฟฟ้ารางเบาแบบที่นำเสนอมีต้นทุนการขนส่ง
ต่ำกว่าการขนส่งทางถนนในทุก ๆ กรณีศึกษา โดยมี
ผลต่างต้นทุนการขนส่ง 87.73, 47.82, 40.65,
18.45, 15.26 บาท และ 11.53 บาท ตามลำดับ
สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่ง
ระหว่างการขนส่งโดยใช้ระบบรางร่วมกับทางถนนกับ
การขนส่งเฉพาะทางถนนจากกรณีตัวอย่าง 6 กรณี
พบว่า สามารถลดต้นทุนการขนส่งได้ทุกกรณี โดย
ต้นทุนรวมเฉลี่ยลดลงถึง 61.25% ดังนั้น วิธีการ
ขนส่งสินค้ารูปแบบใหม่จะทำให้ต้นทุนการขนส่ง
ต่ำลงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้การลดลงของต้นทุนเป็นผล
อันเนื่องมาจากการลดระยะทางการขนส่งทางถนน
ที่มีต้นทุนค่อนข้างสูง การใช้ระบบขนส่งสาธารณะ
ทำให้ต้นทุนการขนส่งต่ำลงและอาจส่งผลให้เวลา
การขนส่งลดลงด้วย เนื่องจากรถไฟฟ้ามีตาราง
การเดินรถที่แน่นอนและตรงเวลา

4. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานโยบายการขนส่ง
สินค้าโดยอาศัยระบบรางสาธารณะด้วยรถไฟฟ้าราง
เบาที่ทางถนนภายในเขตกรุงเทพมหานครและ
ปริมณฑล ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอเป็นแนวทาง
ใหม่ในการขนส่งสินค้าและพัสดุ โดยหาตำแหน่งที่ตั้ง
ที่เหมาะสมและจำนวนของจุดให้บริการการรับส่ง
สินค้าบนสถานีรถไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดต้นทุน
การขนส่งต่ำที่สุด และเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่ง
สินค้าระหว่างการขนส่งทางถนนและการขนส่งโดย
อาศัยระบบรางสาธารณะ จากการเก็บรวบรวมข้อมูล
ปัจจัยและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไข

ปัญหา โดยใช้โปรแกรม Lingo เวอร์ชัน 13.0 เพื่อหา
คำตอบ พบว่าจำนวนจุดให้บริการการขนส่งบนสถานี
รถไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด คือ 36
สถานี โดยมีต้นทุนในการจัดตั้งศูนย์ให้บริการและ
ต้นทุนค่าขนส่งรวมทั้งหมด 6,353,716 บาท และเมื่อ
เปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งระหว่างการขนส่งโดยใช้
ระบบรางร่วมกับทางถนนกับการขนส่งเฉพาะทาง
ถนน ของกรณีศึกษา 6 ตัวอย่าง พบว่าสามารถลด
ต้นทุนการขนส่งได้ทุกกรณี โดยต้นทุนรวมเฉลี่ยลดลง
ถึง 61.25%

ดังนั้น แนวทางใหม่ในการขนส่งสินค้าที่เสนอ
ในงานวิจัยนี้ ถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการขนส่ง
สินค้าในเขตเมืองที่มีระบบขนส่งสาธารณะรถไฟฟ้า
เพราะไม่เพียงแต่เป็นการประหยัดต้นทุนด้าน
การขนส่งให้แก่ผู้ประกอบการและอาจทำให้อัตรา
ค่าบริการที่ผู้บริโภคโดยตรงลดลง แต่ยังสามารถลด
ปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นการช่วย
ลดสถานะโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบันจากสภาพ
การจราจรที่ติดขัดภายในกรุงเทพมหานครและ
ปริมณฑล นอกจากนี้ยังเป็นการใช้พื้นที่รถไฟฟ้า
ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย ดังนั้นทางผู้วิจัย
หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยรูปแบบการขนส่งสินค้า
ที่นำเสนอจะเป็นแนวทางในการเปลี่ยนแปลง
รูปแบบการขนส่งสินค้าในเขตเมืองแก่ผู้ที่สนใจต่อไปได้
ในอนาคต

5. อ้างอิง

- [1] INRIX Global Traffic Scorecard. [Internet].
Boston; 2019 [cited 2019 Sep 7].
Available from: <https://thestandard.co/inrix-global-traffic-scorecard-2017>.

- [2] Behrends S. Urban freight transport sustainability -The interaction of urban freight and intermodal transport. Chalmers University of Technology Gothenburg. 2011; 3(2):11-8.
- [3] Ford H, Smith R, Harris N. Environmentally driven challenges. The Railways - Challenges to Science and Technology. Proceedings of the 5th a Conference held the Royal Society; 1995 Apr 20-22; Sheffield, Sheffield: Academic Press; 1995.
- [4] Robinson M, Mortimer P. Urban freight and rail the state of the art logistics & transport focus. Journal of The Chartered Institute of Logistics and Transport (UK). 2004; 10(2):46-51.
- [5] Goldman T, Gorham R. Sustainable urban transport four innovative directions. Journal Technology in society. 2006; 5(28):261-73.
- [6] Snyder L. Facility Location under Uncertainty. Journal IIE Transactions. 2006; 10(38):537-54.
- [7] จันทศิริ สิงห์เลื่อน. การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่ให้บริการด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด. วารสารวิศวกรรมสาร มก. 2554; 74(24):107-22.
- [8] ReVell CS, Eiselt HA. Location analysis: A synthesis and survey. Eur J Oper Res. 2005; 15(165):1-19.
- [9] Ballou RH. Dynamic Warehouse Location Analysis. J Market Res. 1968; 52(5):271-76.
- [10] Marufuzzaman M, Gedik R, Roni MS. A Benders based rolling horizon algorithm for a dynamic facility location problem. Journal Computers and Industrial Engineering. 2016; 4(98):462- 9.
- [11] Wu YM, Hsiao NC, Teng TL, et al. Near real-time seismic damage assessment of the rapid reporting system. Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic sciences. 2002;8(13):313-24.
- [12] ปรุฬห์ มະยะเฉียว. การแก้ปัญหาการเลือกสถานที่ตั้ง. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. 2557; 6(1):132-45.
- [13] ปรางประเสริฐ น้อยสังข์, ชุมพล มณฑาทิพย์กุล. การเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าภูมิภาคในประเทศไทย โดยการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงปริมาณร่วมกับปัจจัยเชิงคุณภาพด้วยฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์. วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน. 2560; 5(1):60-70.
- [14] Motraghi A, Marinov MV. Analysis of urban freight by rail using event based simulation. Journal Simulation Modelling Practice and Theory. 2012; 5(25):73-89.
- [15] คงเดช ทรงแสง. โครงสร้างประเภทต้นทุนค่าขนส่งสินค้าโดยการขนส่งสินค้าทางท้องถิ่น [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร; 2551 [เข้าถึงเมื่อ 15 กันยายน 2562]. จาก: <http://logisticscorner.com>

- [16] บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน). ระบบโครงสร้างทางวิ่งและสถานี [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร; 2551 [เข้าถึงเมื่อ 3 ตุลาคม 2562]. จาก: <https://www.bts.co.th/library/system-structuer.html>.
- [17] บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพจำกัด (มหาชน) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร; 2551 [เข้าถึงเมื่อ 5 ตุลาคม 2562]. จาก: <https://metro.bemplc.co.th/MRT-System-Map>.
- [18] บริษัท ฟาล์คอน อินเตอร์. อัตราการเปลี่ยนแปลงของการใช้เชื้อเพลิงของรถประเภทต่างๆ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร; 2551 [เข้าถึงเมื่อ 2 ตุลาคม 2562]. จาก: <https://thai.falcongo.co.th/blogs/news/cost-of-transport-in-thailand-car-vs-motorbike-vs-e-scooter>.