



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

**การวิเคราะห์ตำแหน่งที่ตั้งและเส้นทางสำหรับการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุในเครือข่าย
สถานพยาบาลด้วยแบบจำลองหลายวัตถุประสงค์แบบถ่วงน้ำหนักที่ใช้การปรับมาตรฐาน
เชิงเส้น**

**Analysis of location and routing for additive manufacturing logistics networks in
healthcare network using a linear-normalized weighted multi-objective model**

ชนิภา นิवासานนท์¹ พรเทพ อนุสรณนิติสาร¹ กสิน รังสิกรรพม^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

Chanipa Nivasanon¹ Pornthep Anussornnitisarn¹ Kasin Ransikarbun^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

² Department of Industrial Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: kasin.r@ubu.ac.th; Telephone: 098-409-4833

วันที่รับบทความ 24 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 17 เมษายน 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 11 พฤษภาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 26 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งและจัดเส้นทางขนส่งระบบรวมศูนย์ผลิตกายอุปกรณ์เฉพาะบุคคลภายนอกด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (FDM) ภายใต้เงื่อนไขกรอบเวลาที่เข้มงวด ในเครือข่ายสถานพยาบาล 23 แห่ง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แบบจำลองตั้งอยู่บนข้อสมมติสถานการณ์ที่มีความแน่นอนภายใต้ขนาดปัญหาเฉพาะท้องถิ่น ระเบียบวิธีวิจัยเริ่มต้นด้วยการหาทำเลที่ตั้งศูนย์กลาง (Centroid Hub) ด้วยแบบจำลองระยะทางแมนฮัตตันรวมน้อยที่สุด จากนั้นพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์หลายวัตถุประสงค์ (MOVRPTW) เพื่อลดต้นทุนรวม เวลาทำงานสูงสุดของพนักงาน และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกัน โดยประมวลผลหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีแบบแม่นยำ (Exact Method) ผลการศึกษาพบว่า โรงพยาบาล H17 เป็นทำเลที่ตั้งศูนย์กลาง และให้แผนการจัดเส้นทางด้วยยานพาหนะ 4 คัน เพื่อกระจายชิ้นงานรวม 99 ชิ้น สอดคล้องภายใต้กรอบเวลาปฏิบัติการ (09.00 – 14.05 น.) โดยควบคุมเวลาทำงานสูงสุดของพนักงานไว้ที่ 305 นาที และรักษาอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไว้ที่ 105.06 กิโลกรัม ในขณะที่ต้นทุนรวมอยู่ที่ 28,279 บาท (เฉลี่ย 285.65 บาทต่อหน่วย) งานวิจัยนี้ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์เพื่อยกระดับโลจิสติกส์บริการสุขภาพดิจิทัลที่คุ้มค่าและยั่งยืน

คำสำคัญ

การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ ทำเลที่ตั้งศูนย์กลาง การจัดเส้นทางขนส่งหลายวัตถุประสงค์ เงื่อนไขกรอบเวลา โลจิสติกส์บริการสุขภาพ

Abstract

This research aims to analyze location and optimize delivery routes for a centralized healthcare Additive Manufacturing (AM) system producing external patient-specific prostheses using Fused Deposition Modeling (FDM) technology under strict time-window constraints. A case study of 23 healthcare facilities in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province was conducted using a deterministic model tailored for a localized problem size. The methodology first

determines the optimal centroid hub using rectilinear minisum location model, followed by the development of a Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Time Windows (MOVRPTW) model. The model simultaneously minimizes total operating cost, maximum employee work time, and carbon dioxide emissions, and is solved using an exact method. The results indicate that hospital H17 is the optimal centralized production hub. The generated Pareto optimal solution yields a routing plan utilizing 4 vehicles to distribute a total of 99 medical parts within the operational time windows (09:00 AM – 02:05 PM). The plan limits the maximum employee work time to 305 minutes and restricts carbon dioxide emissions to 105.06 kilograms, while achieving a total operating cost of 28,279 THB (averaging 285.65 THB per unit). This study supports strategic planning to enhance cost-effective and sustainable digital healthcare logistics.

Keywords

Additive Manufacturing (AM); centroid location; multi-objective optimization; time windows; healthcare logistics

1. บทนำ

เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing: AM) หรือการพิมพ์สามมิติ (3DP) ได้เข้ามาปฏิวัติระบบสาธารณสุขสู่ยุคการแพทย์แม่นยำ (Precision Medicine) ด้วยขีดความสามารถในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์และกายอุปกรณ์เฉพาะบุคคล (Patient-specific) ที่สอดคล้องกับสรีระของผู้ป่วยแต่ละราย การนำเทคโนโลยีนี้เข้ามาใช้ส่งผลเชิงบวกต่อการรักษาอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วยเพิ่มความแม่นยำในหัตถการทางการแพทย์ ลดความเสี่ยงและภาวะแทรกซ้อนจากการศัลยกรรม และย่อระยะเวลาในการผ่าตัด ซึ่งส่งผลสัมฤทธิ์โดยตรงต่อความปลอดภัยและอัตราการรอดชีวิตของผู้ป่วย [1] แม้อุปสงค์ของเทคโนโลยีนี้ในภาคส่วนสุขภาพทั่วโลก (Healthcare Additive Manufacturing: HAM) จะมีแนวโน้มเติบโตอย่างก้าวกระโดด โดยคาดว่าจะสูงถึง 2.73 หมื่นล้านดอลลาร์สหรัฐภายในปี พ.ศ. 2573 [2] ทว่าความสำเร็จในการนำเทคโนโลยี AM มาประยุกต์ใช้ในระดับมหภาค จำเป็นต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานด้านโลจิสติกส์ที่รองรับการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ [3-4]

เนื่องจากเครื่องพิมพ์สามมิติทางการแพทย์มีต้นทุนสูงและต้องการการควบคุมมาตรฐานที่เข้มงวด การกระจายเครื่องพิมพ์ไว้ทุกโรงพยาบาลจึงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติการดำเนินงานจึงต้องอาศัยกลยุทธ์การรวมศูนย์ผลิตและกระจายสินค้า (3DP Production Hub) เพื่อรองรับอุปสงค์ของโรงพยาบาลเครือข่าย อย่างไรก็ตาม การกำหนดทำเลที่ตั้งของศูนย์กลางเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการรักษาพยาบาลแต่จำเป็นต้องเชื่อมโยงกับการวางแผนเส้นทางจัดส่งอย่างเป็น

ระบบ เนื่องจากชิ้นงานทางการแพทย์มักมีความอ่อนไหวสูงด้านเวลา (Time-sensitive) และมีกำหนดกรอบเวลาการใช้งานที่เข้มงวด (Strict Lead Time) เพื่อรองรับกรณีศัลยกรรมเร่งด่วน การตัดสินใจเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กลางและการจัดตารางเดินรถที่เชื่อมโยงกับเวลาที่ผลิตชิ้นงานเสร็จจริง จึงเป็นหัวใจสำคัญในการย่อระยะเวลาจัดส่งและรับประกันว่าผลิตภัณฑ์จะถึงมือแพทย์ทันกำหนดเวลาผ่าตัด

แม้ที่ผ่านมาจะมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้ง (Location Problem) หรือการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem) ในระบบโลจิสติกส์ทั่วไป แต่งานวิจัยส่วนใหญ่แยกส่วนการพิจารณาสองปัญหานี้ออกจากกัน หรือละเลยข้อจำกัดเชิงบูรณาการระหว่างเวลาที่ชิ้นงานพร้อมส่งจากกระบวนการผลิต กับ เงื่อนไขกรอบเวลาขนส่งของโรงพยาบาลปลายทาง ซึ่งความบกพร่องในการวางแผนร่วมกันนี้อาจนำไปสู่ต้นทุนการดำเนินงานที่สูงเกินจริงและส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ป่วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กลางผลิตร่วมกับการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบหลายคลังสินค้าพร้อมเงื่อนไขเวลา (MDVRPTW) ภายใต้บริบทสาธารณสุข เพื่อลดต้นทุนรวมของระบบและยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในเครือข่ายบริการสุขภาพอย่างยั่งยืน [5]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ

เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัตถุสามมิติผ่านแพลตฟอร์มดิจิทัล โดยอาศัยหลักการเพิ่ม

วัสดุซ้อนทับกันเป็นชั้น (Layer-by-layer) จุดเด่นสำคัญของ AM คือความยืดหยุ่นในการออกแบบที่เอื้อต่อการผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง และสามารถตอบสนองความต้องการเฉพาะบุคคลในปริมาณมาก (Mass Customization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงขั้นตอนการผลิต แต่ยังมีบทบาทสำคัญต่อการออกแบบเครือข่ายห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Network Design) โดยเป็นปัจจัยสนับสนุนในการตัดสินใจเลือกกระหว่างโครงสร้างแบบรวมศูนย์ (Centralized) และแบบกระจายตัว (Decentralized) รวมถึงส่งเสริมความยั่งยืนผ่านการพัฒนาชิ้นส่วนและการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ [6-7]

ทั้งนี้ American Society of Testing and Material (ASTM) ได้จำแนกเทคโนโลยี AM ออกเป็น 7 ประเภทหลัก [8-9] ดังนี้:

1) Photopolymer Vat (SLA): กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เลเซอร์ยูวี (UV) ฉายลงบนเรซินเหลวเพื่อให้เกิดการแข็งตัวทีละชั้น มีจุดเด่นด้านความละเอียดสูง แต่ต้องผ่านกระบวนการหลังการผลิต (Post-processing) เพื่อให้ชิ้นงานมีความสมบูรณ์พร้อมใช้งาน

2) Material Extrusion (FDM): เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมสูงสุดเนื่องจากต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย โดยอาศัยการหลอมละลายวัสดุเส้นใย (Filament) แล้วอัดรีดผ่านหัวฉีดเพื่อขึ้นรูป พบได้ตั้งแต่ระดับเครื่องตั้งโต๊ะจนถึงระดับอุตสาหกรรม แม้จะยังมีความท้าทายในด้านความละเอียดของผิวงาน

3) Powder Bed Fusion (SLS): การใช้เลเซอร์พลังงานสูงฉายลงบนวัสดุผง (เช่น พลาสติก หรือโลหะ) เพื่อให้เกิดการหลอมละลายและเชื่อมติดกัน (Sintering) เทคโนโลยีนี้มีความโดดเด่นด้านความเร็ว ความละเอียด และความสามารถในการนำวัสดุส่วนเกินกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่

4) Material Jetting (Poly Jet): ระบบที่ประยุกต์ใช้หลักการคล้ายเครื่องพิมพ์ 2 มิติ โดยการพ่นวัสดุเรซินขนาดเล็กผ่านหัวพิมพ์จำนวนมากและทำให้แข็งตัวด้วยแสง UV ข้อดีคือมีความเร็วและความละเอียดสูงมาก สามารถผลิตชิ้นงานที่มีหลายคุณสมบัติ (Multi-material) ได้ในคราวเดียว

5) Laminated Object Manufacturing (LOM): กระบวนการที่นำวัสดุแผ่นมาตัดเป็นรูปร่างทีละชั้นด้วยเลเซอร์หรือมีด จากนั้นจึงเชื่อมประสานแต่ละชั้นเข้าด้วยกันด้วยกาว

(Adhesive) โดยระดับความละเอียดจะแปรผันตามความหนาของแผ่นวัสดุ

6) Directed Energy Deposition (DED): การขึ้นรูปโดยการพ่นวัสดุผง (มักเป็นโลหะ) เข้าสู่ลำแสงเลเซอร์กำลังสูงโดยตรงเพื่อให้เกิดการหลอมละลายและสะสมตัวบนชิ้นงาน เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง หรือไทเทเนียม

7) Binder Jetting: เทคโนโลยีที่ใช้หัวพิมพ์ฉีดพ่นสารยึดเกาะ (Binder) ลงบนชั้นของวัสดุผงเพื่อสร้างรูปร่างตามที่ต้องการ ออกแบบไว้ โดยกระบวนการจะทำซ้ำเป็นชั้นๆ จนได้ชิ้นงานที่ต้องการ

2.2 การวางแผนและการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์สำหรับระบบ AM ทางกายภาพ

การดำเนินงานในระบบ AM ทางกายภาพ ครอบคลุมการตัดสินใจและการวางแผนที่เชื่อมโยงกันตั้งแต่ระดับปฏิบัติการ ระดับยุทธวิธี ไปจนถึงระดับกลยุทธ์ เพื่อสร้างห่วงโซ่อุปทานที่สมบูรณ์ภายใต้เป้าหมายที่หลากหลาย ในระดับปฏิบัติการ (Operational Level) มุ่งเน้นไปที่งานเชิงเทคนิค เช่น การกำหนดทิศทางการวางชิ้นงาน การออกแบบโครงสร้างรองรับ การระบุความหนาของชิ้นงาน การปรับค่าพลังงานและอุณหภูมิ รวมถึงการจัดวางชิ้นงานหลายชิ้นบนฐานพิมพ์ [10-11] โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามข้อกำหนด ลดระยะเวลาการผลิต ลดของเสีย และรักษาความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของข้อมูล เช่น Arefin และคณะ [12] เน้นย้ำว่าการบูรณาการการตัดสินใจด้านวัสดุและกระบวนการเข้าด้วยกันเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานในเทคโนโลยีที่หลากหลาย เช่น FDM, SLA และ SLS ขณะที่ Schneider และคณะ [13] ให้ความสำคัญกับการเลือกวัสดุทางการแพทย์และการประมวลผลหลังการผลิต (Post-processing) เพื่อรับประกันความปลอดภัยทางชีวภาพ รวมถึงการออกแบบทิศทางการพิมพ์เพื่อควบคุมคุณภาพพื้นผิวให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

ในระดับยุทธวิธี (Tactical Level) ให้ความสำคัญในการเลือกเครื่องพิมพ์และวัสดุให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของชิ้นงานแพทย์และข้อกำหนดการบริการ รวมถึงการวางแผนกำลังการผลิต การจัดการอะไหล่และวัตถุดิบ และการ

ออกแบบผังสถานประกอบการ ตัวอย่างเช่น Alakas และคณะ [14] ได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (MCDA) เพื่อคัดเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตอวัยวะเทียม ซึ่งผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่า FDM มีความเหมาะสมที่สุดในด้านความคุ้มค่าและความหลากหลายของวัสดุ สอดคล้องกับงานของ Anussornnitisarn และคณะ [15] ที่เสนอโครงสร้างการวิเคราะห์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Decision Analysis) ซึ่งเผยให้เห็นว่ามุมมองต่อเทคโนโลยีที่ยั่งยืนนั้นแตกต่างกันระหว่างผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรมที่เน้นด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม กับบุคลากรทางการแพทย์ที่ให้ความสำคัญกับผลกระทบทางสังคมและคุณภาพของงานเป็นอันดับต้น

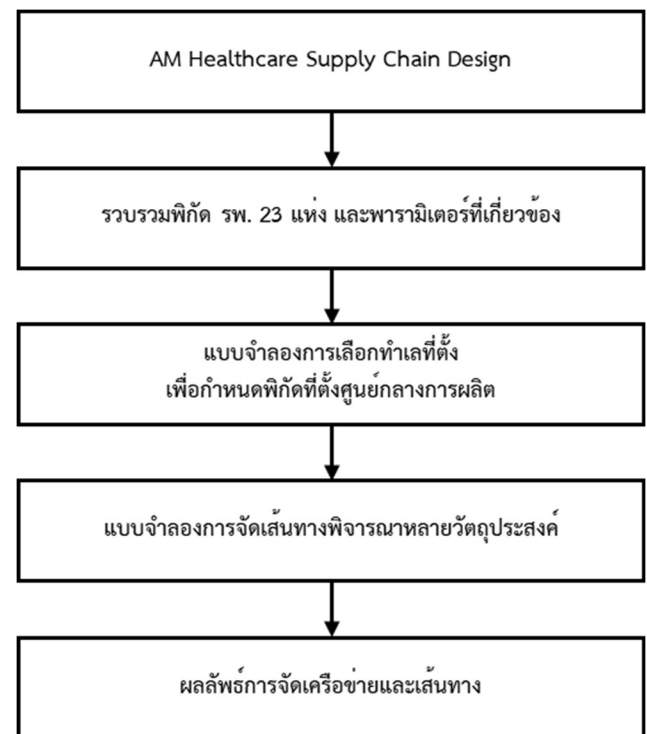
ในระดับกลยุทธ์ (Strategic Level) ห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่ตัวผู้ป่วย สถานพยาบาล ไปจนถึงระบบการแพทย์แบบบูรณาการ [16] โดยเน้นการออกแบบเครือข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและส่งเสริมการนำเทคโนโลยี AM มาใช้เพื่อผลลัพธ์การรักษาที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังครอบคลุมถึงการกำหนดนโยบายเพื่อสร้างความร่วมมือ การปฏิบัติตามข้อกำหนดทางกฎหมาย และการเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงบริการในทุกสายงานของห่วงโซ่อุปทานสาธารณสุข [17] การบูรณาการการออกแบบเครือข่าย เข้ากับกระบวนการวางแผน โดยมีการจัดทำทรัพยากรที่ต่อเนื่องและระบบโลจิสติกส์ที่เหมาะสม จะเป็นรากฐานสำคัญในการสนับสนุนการบริหารที่เน้นผู้ป่วยเป็นศูนย์กลาง มีความคุ้มค่า และมีมาตรฐานที่สม่ำเสมอ

การออกแบบเครือข่ายและการวางแผน (Network Design and Planning) ในบริบทของการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ มุ่งเน้นไปที่การตัดสินใจในระดับกลยุทธ์ (Strategic Decision) เพื่อสร้างรากฐานที่มีประสิทธิภาพ โดยประเด็นสำคัญคือการคัดเลือกทำเลที่ตั้งของสถานประกอบการหรือศูนย์ผลิต (Facility Location) ที่เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งการกำหนดโครงสร้างเชื่อมโยงระหว่างศูนย์กลางการผลิต (Hub) และโรงพยาบาลเครือข่ายต่าง ๆ [18] นอกจากนี้ ยังครอบคลุมถึงการเลือกระหว่างระบบการผลิตแบบรวมศูนย์ (Centralized) เพื่อเน้นการควบคุมมาตรฐานและการประหยัดต่อขนาด หรือแบบกระจายตัว (Decentralized) เพื่อเพิ่มความคล่องตัวในการตอบสนอง ซึ่งการออกแบบเครือข่ายนี้จะทำงานประสานกับการวางแผนในระดับยุทธวิธีและปฏิบัติการ

ไม่ว่าจะเป็นการวางแผนกำลังการผลิต (Capacity Planning) การบริหารจัดการทรัพยากรและวัตถุดิบ ตลอดจนการจัดการเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing) เพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นงานจะถูกส่งมอบถึงมือผู้ป่วยได้ทันเวลาตามความจำเป็นเร่งด่วนทางการแพทย์ [19]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้มีการออกแบบและวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ โดยมุ่งเน้นการบูรณาการมิติด้านทำเลที่ตั้ง เชิงกลยุทธ์ร่วมกับการจัดการโลจิสติกส์ภายใต้ข้อจำกัดที่เข้มงวดของระบบบริการสุขภาพ เพื่อให้เห็นลำดับขั้นตอนการคำนวณและทิศทางการไหลของข้อมูล (Data Flow) ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงปริมาณที่ชัดเจน ผู้แต่งจึงได้กำหนดกรอบแนวคิดระเบียบวิธีวิจัยโดยรวม (Methodology Framework) ดังแสดงรายละเอียด ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

3.1 แบบจำลองการเลือกทำเลที่ตั้ง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเลือกทำเลที่ตั้งด้วยแบบจำลองระยะทางแมนแฮตตันรวมน้อยที่สุด (Minisum Rectilinear Location Model) เพื่อพิจารณาทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมุ่งเน้นการลดผลรวมของต้นทุนการขนส่งแปรผันตามระยะทางและอุปสงค์รวมของเครือข่ายโรงพยาบาล โดยการหาพิกัดจุดที่เหมาะสมของตำแหน่งศูนย์กลาง เพื่อลดระยะทางรวมไปยังตำแหน่งต่างๆ ของโรงพยาบาล โดยใช้ระยะทางแบบ Manhattan [20] ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n |x - x_i| + |y - y_i| \quad (1)$$

โดยที่ x และ y คือพิกัดของศูนย์กลางที่ต้องการ

3.2 สมมุติฐาน

1) การประมาณการอุปสงค์: อุปสงค์ขึ้นงานการแพทย์ (HAM) ของแต่ละโรงพยาบาล แปรผันตรงตามจำนวนเตียง โดยกำหนดเป็นอัตราส่วนมาตรฐานต่อรอบการวางแผน

2) ขอบเขตสถานะผลิตภัณฑ์: งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการขนส่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปชิ้นหลัง (Post-processing) และพร้อมในการจัดส่ง โดยการวางแผนผลิตชิ้นงานอยู่นอกขอบเขตของงานวิจัย [21]

3) เงื่อนไขเวลาและบริการ: การจัดส่งอยู่ภายในกรอบเวลาของแต่ละโรงพยาบาล โดยประมาณการเวลาปฏิบัติการ ณ จุดจอด (Service Time) เป็นค่าคงที่

4) การคำนวณระยะทาง: ระยะทางในงานวิจัยนี้ใช้การประมาณการจากระยะทางแบบแมนแฮตตัน (Rectilinear) ซึ่งเป็นการประมาณการตามแนวตั้งและแนวนอน (City Block)

5) ต้นทุนตามประเภทอุปสงค์: อุปสงค์จากโรงพยาบาลเครือข่ายหลัก (hub) ไม่มีค่าขนส่งภายนอก ส่วนการขนส่งโรงพยาบาลอื่นๆ คำนวณต้นทุนการขนส่งที่เกี่ยวข้อง

3.3 แบบจำลองการวิเคราะห์เส้นทาง (MOVRPTW)

3.3.1 เขต

N : เขตของโรงพยาบาลทั้งหมด โดยที่ 0 หมายถึง ศูนย์กลาง AM ที่วางแผนไว้

NC : เขตของโรงพยาบาล

A : เขตของเส้นทางการขนส่ง

V : เขตของยานพาหนะ

3.3.2 พารามิเตอร์

n : จำนวนโหนดโรงพยาบาลทั้งหมด

m : จำนวนรถขนส่งที่มีอยู่

c^f : ต้นทุนคงที่ต่อคัน (บาท)

c^v : ต้นทุนการขนส่งผันแปรต่อคันตามระยะทางของเส้นทาง (บาท)

f^{trans} : อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (กิโลเมตรต่อลิตร)

ef^{CO_2} : ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$d_{i,j}$: ระยะทางระหว่างตำแหน่ง i และ j โดยที่ $(i, j) \in A$ (กิโลเมตร)

p_i : ปริมาณชิ้นส่วน AM ที่ต้องจัดส่งในแต่ละรอบสำหรับแต่ละโหนด $i \in N$ (หน่วย)

pq_k^{cap} : ความจุในการบรรทุกของรถขนส่ง (หน่วย)

t^{beg} : เวลาเริ่มต้นของกรอบเวลาการวางแผน (นาฬิกา)

t^{end} : เวลาสิ้นสุดของกรอบเวลาการวางแผน (นาฬิกา)

t_i^s : เวลาที่ใช้ในการให้บริการโหลดชิ้นส่วน AM ณ โหนด i (นาฬิกา)

$t_{i,j}^t$: เวลาในการเดินทางของรถขนส่งระหว่างตำแหน่ง i และ j โดยที่ $(i, j) \in A$ (นาฬิกา)

t_i^{ra} : ขอบเขตเวลาที่เร็วที่สุดที่ยอมรับได้สำหรับการเข้ารับสินค้า ณ แต่ละโหนด i (นาฬิกา)

t_i^{rb} : ขอบเขตเวลาที่ช้าที่สุดที่ยอมรับได้สำหรับการเข้ารับสินค้า ณ แต่ละโหนด i (นาฬิกา)

i^{Z1} : พารามิเตอร์ช่วยที่แทนค่าในอุดมคติ (Ideal Value) ของวัตถุประสงค์ที่ 1

i^{Z2} : พารามิเตอร์ช่วยที่แทนค่าในอุดมคติ (Ideal Value) ของวัตถุประสงค์ที่ 2

i^{Z3} : พารามิเตอร์ช่วยที่แทนค่าในอุดมคติ (Ideal Value) ของวัตถุประสงค์ที่ 2

ai^{Z1} : พารามิเตอร์ช่วยที่แทนค่านอกอุดมคติ (Anti-ideal Value) ของวัตถุประสงค์ที่ 1

ai^{Z2} : พารามิเตอร์ช่วยที่แทนค่านอกอุดมคติ (Anti-ideal Value) ของวัตถุประสงค์ที่ 2

ai^{Z3} : พารามิเตอร์ช่วยที่แทนค่านอกอุดมคติ (Anti-ideal Value) ของวัตถุประสงค์ที่ 3

α_i : ค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ w ที่พิจารณา

3.3.3 ตัวแปรตัดสินใจ

$X_{i,j,k}$ ตัวแปรตัดสินใจ binary แสดงกรณีมีการใช้เส้นทางขนส่งหรือไม่ในระบบ

$Y_{i,j,k}$ ตัวแปรตัดสินใจแทนปริมาณสะสมของการรับชิ้นส่วน AM

$W_{i,k}$ ตัวแปรตัดสินใจแทนเวลาเริ่มต้นการให้บริการ ในการวางแผนการขนส่ง

W^{max} ตัวแปรตัดสินใจแทนกรณีที่แย่ที่สุด (Worst Case) ของเวลาที่ใช้ในการเดินทางถึงโหนดสุดท้ายในแต่ละรอบการขนส่ง โดยพิจารณาจากค่าเวลาที่มากที่สุดในรถขนส่งทั้งหมด

3.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Minimize $Z_1 =$

$$\sum_{(0,j) \in A; k \in V} c^f X_{i,j,k} + \sum_{(0,j) \in A; k \in V} \left(\frac{c^v d_{i,j}}{f^{trans}} \right) X_{i,j,k} \quad (2)$$

$$\text{Minimize } Z_2 = W^{max} \quad (3)$$

$$W^{max} \geq W_{i=n+1,k} - W_{0 \in N,k} : \forall k \in V \quad (4)$$

$$\text{Minimize } Z_3 = \sum_{(0,j) \in A; k \in V} ef^{CO_2} \cdot \left(\frac{d_{i,j}}{f^{trans}} \right) X_{i,j,k} \quad (5)$$

(สมการข้อจำกัด)

$$\sum_{i \in N; i \neq j} \sum_{k \in V} X_{i,j,k} = 1; \forall j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N; i \neq j} X_{i,j,k} = \sum_{i \in N; i \neq j} X_{i,j,k} ; \forall j = 1, \dots, n ; k \in V \quad (7)$$

$$\sum_{j \in 1, \dots, n} X_{0,j,k} \leq 1 ; \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} Y_{j,i} - \sum_{(i,j) \in A} Y_{i,j} = p_j ; \forall j = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$Y_{i,j} \leq \sum_{k \in V} pq_k^{cap} X_{i,j,k} ; \forall (i,j) \in A \quad (10)$$

$$W_{i=0,k \in V} = t^{beg} ; \forall k \in V \quad (11)$$

$$W_{i,k} + t_i^s + t_{i,j}^t - W_{j,k} \leq b(1 - X_{i,j,k}) ; \forall (i,j) \in A, k \in V \quad (12)$$

$$W_{i,k} \geq t_i^{ra} \sum_{(i,j) \in A; i \neq j} X_{i,j,k} ; \forall i = 1, \dots, n, k \in V \quad (13)$$

$$W_{i,k} \leq t_i^{ra} + b \left(1 - \sum_{(i,j) \in A; i \neq j} X_{i,j,k} \right) ; \forall i = 1, \dots, n, k \in V \quad (14)$$

$$t^{beg} \leq W_{i,k} \leq t^{end} ; \forall i = 1, \dots, n, k \in V \quad (15)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\} ; \forall (i,j) \in A, k \in V \quad (16)$$

$$Y_{i,j} \geq 0 ; \forall (i,j) \in A \quad (17)$$

$$W_{i,k} \geq 0 ; \forall i = 1, \dots, n, k \in V \quad (18)$$

$$W^{max} \geq 0 \quad (19)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการเครือข่ายขนส่งชิ้นส่วน AM ประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามประการ ได้แก่ สมการที่ (2) ซึ่งมุ่งเน้นการลดต้นทุนรวมในการดำเนินงานที่ประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรตามระยะทาง สมการที่ (3) เป็นการหาค่าที่น้อยที่สุดของเวลาที่ใช้ในการเดินทางถึงจุดหมายสุดท้ายที่นานที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านเวลา โดยมีสมการที่ (4) เป็นข้อกำหนดในการหาค่าขอบเขตเวลาที่สูงที่สุดของรถขนส่งทุกคันในส่วนของข้อจำกัดนั้น และสมการที่ (5) มุ่งเน้นการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่ง

นอกจากนี้ สมการที่ (6) และ (7) กำหนดให้แต่ละโรงพยาบาลในเครือข่ายต้องได้รับการเข้าถึงและออกจากโหนดโดยรถขนส่งเพียงครั้งเดียวเพื่อให้ครอบคลุมทุกจุดบริการ ขณะที่สมการที่ (8) กำหนดให้รถขนส่งแต่ละคันออกจากจุดเริ่มต้นได้ไม่เกินหนึ่งครั้ง สมการที่ (9) และ (10) เกี่ยวข้องกับการรักษาสมดุลของปริมาณชิ้นส่วน AM โดยควบคุมให้ปริมาณสะสมที่รับจากโหนดต่าง ๆ ต้องไม่เกินขีดความสามารถในการบรรทุกของรถขนส่ง สำหรับด้านการจัดการเวลา สมการที่ (11) กำหนดเวลาเริ่มต้นการทำงาน และสมการที่ (12) เป็นการคำนวณเวลาการเดินทางต่อเนื่องระหว่างโหนดเพื่อป้องกันการเกิดวงจรรอบ (Subtour Elimination) นอกจากนี้ สมการที่ (13) และ (14) ทำหน้าที่ระบุช่วงเวลาการให้บริการให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการเดินทางจริง และสมการที่ (15) กำหนดให้เวลาเริ่มต้นบริการต้องอยู่ภายในช่วงเวลา (Time Window) ที่กำหนดไว้ ที่แย่ที่สุด สมการที่ (16) ถึง (19) เป็นการระบุคุณลักษณะของตัวแปรตัดสินใจ ทั้งในรูปแบบ

เลขฐานสอง (Binary) และค่าตัวเลขที่ไม่เป็นลบ (Non-negative variables) เพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์ตามหลักการทางคณิตศาสตร์

3.3.5 การวิเคราะห์แบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

การวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization) เพื่อจัดการกับหน่วยวัดที่แตกต่างกันของแต่ละวัตถุประสงค์ โดยในสมการที่ (19) แสดงการคำนวณสำหรับวัตถุประสงค์ประเภทเน้นผลกำไร (Profit-type) ที่ต้องการหาค่าสูงสุด และสมการที่ (20) แสดงการคำนวณสำหรับวัตถุประสงค์ประเภทเน้นต้นทุน (Cost-type) ที่ต้องการหาค่าต่ำที่สุด โดยใช้พารามิเตอร์ค่าอุดมคติ (Ideal Value) และค่านอกอุดมคติ (Anti-ideal Value) เป็นฐานในการเปรียบเทียบ

จากนั้นในสมการที่ (21) ได้ทำการรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักสัมพัทธ์ (Weighted Sum Method) เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยมีการกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญ α ให้กับแต่ละวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (22) ซึ่งผลรวมของค่าน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง กระบวนการนี้ช่วยให้ผู้ตัดสินใจสามารถปรับสมดุลระหว่างต้นทุนการดำเนินงาน ระยะเวลาการให้บริการ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพตามบริบทของกรณีศึกษาจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

$$n_j(x) = \frac{f_i(x) - ai_j}{i_j - ai_j}; Profit-type \quad (20)$$

$$n_j(x) = \frac{ai_j - f_i(x)}{ai_j - i_j}; Cost-type \quad (21)$$

$$Maximize Z^{NP} = \alpha_{z1} \left(\frac{ai^{z1} - z_1}{ai^{z1} - i^{z1}} \right) + \alpha_{z2} \left(\frac{ai^{z2} - z_2}{ai^{z2} - i^{z2}} \right) + \alpha_{z3} \left(\frac{ai^{z3} - z_3}{ai^{z3} - i^{z3}} \right) \quad (22)$$

$$\alpha_{z1} + \alpha_{z2} + \alpha_{z3} = 1 \quad (23)$$

4. กรณีศึกษาและผลการวิจัย

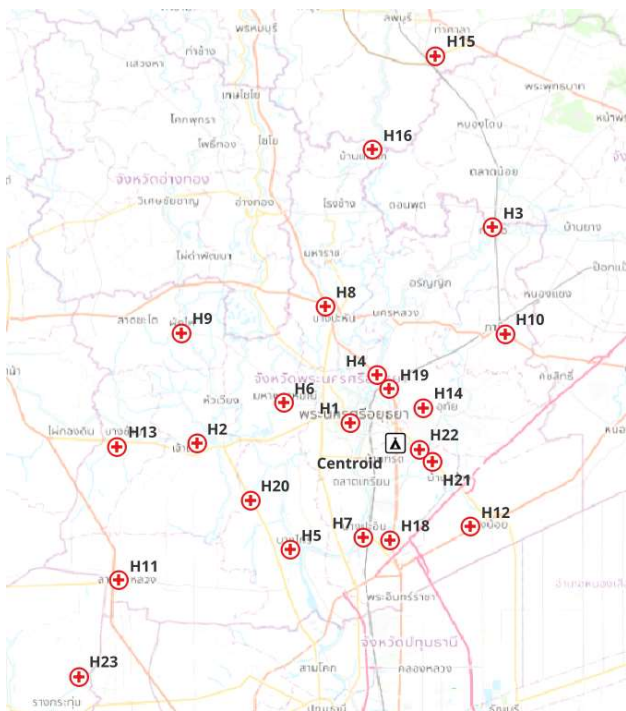
4.1 กรณีศึกษา

ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งศูนย์กลางของโครงข่ายสถานพยาบาลในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ของโรงพยาบาลทุกแห่งตามประเภทที่ได้จำแนกไว้ ซึ่งแสดงรายละเอียดพิกัดละติจูดและลองจิจูดในตารางที่ 1 โดยข้อมูลพิกัดเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการคำนวณหาตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวัดระยะทางแบบ Rectilinear (หรือ Manhattan Distance) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเส้นทางการคมนาคมในพื้นที่ที่มีการวางตัวเป็นโครงข่ายถนนในแนวตั้งฉาก

ตารางที่ 1 พิกัดที่ตั้งของโรงพยาบาลในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

โรงพยาบาล	ละติจูด	ลองจิจูด	เตียง
H1	14.34391	100.55965	570
H2	14.32114	100.38554	208
H3	14.56612	100.72094	34
H4	14.39829	100.59041	45
H5	14.20061	100.49174	39
H6	14.36719	100.48449	26
H7	14.21377	100.57425	96
H8	14.47647	100.53168	35
H9	14.44592	100.36867	31
H10	14.44476	100.73576	40
H11	14.16569	100.29686	34
H12	14.22652	100.69669	77
H13	14.31715	100.29504	10
H14	14.36113	100.64301	37
H15	14.76038	100.65651	22
H16	14.65424	100.58554	10
H17	14.32149	100.61155	253
H18	14.21155	100.60548	105
H19	14.38255	100.60441	54
H20	14.25591	100.44632	55
H21	14.30000	100.65281	100
H22	14.31388	100.63843	59
H23	14.05651	100.25161	5

การเลือกใช้วิธีการวัดระยะทางแบบ Rectilinear มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาจุดศูนย์กลางที่สามารถลดระยะทางรวมในการรับ-ส่งต่อผู้ป่วยภายในระบบให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ พิกัดทางภูมิศาสตร์ของโรงพยาบาล (H1-H23) ยังทำหน้าที่เป็นโหนดสำคัญในเครือข่ายบริการสุขภาพซึ่งข้อมูลระยะทางที่ได้จะถูกนำไปบูรณาการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดการเส้นทางขนส่งชิ้นส่วน AM เพื่อมุ่งเน้นการลดต้นทุนการดำเนินงาน และการบริหารจัดการภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลาให้มีความแม่นยำและสอดคล้องกับสภาพพื้นที่จริงในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา



รูปที่ 2 พิกัดที่ตั้ง (ละติจูดและลองจิจูด) ของโรงพยาบาลในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

4.2 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่ง

จากตารางที่ 1 ซึ่งแสดงพิกัดที่ตั้ง (ละติจูดและลองจิจูด) ของโรงพยาบาลในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในครั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการวิเคราะห์หาจุดศูนย์กลางที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวัดระยะทางแบบ Rectilinear โดยผลการวิเคราะห์ตำแหน่งเชิงพื้นที่เพื่อหาจุดยุทธศาสตร์ที่สามารถลดระยะทาง

รวมในการรับ-ส่งต่อผู้ป่วยและขนส่งชิ้นส่วน AM ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด พบว่าทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมใกล้เคียงกับจุด H17 มากที่สุด ดังนั้นจึงกำหนดให้จุด H17 เป็นจุดศูนย์กลาง (Centroid) สำหรับการจัดตั้งศูนย์การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (3D Printing Center) โดยพิจารณาจากการตั้งเครื่อง AM ในโรงพยาบาล H17 แสดงดังรูปที่ 2

4.2.2 ผลการวิเคราะห์เส้นทางแบบหลายวัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์เส้นทางแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาข้อดีข้อเสียของแต่ละวัตถุประสงค์ (Trade-off Analysis) เชิงเศรษฐศาสตร์ เชิงเวลา และเชิงสิ่งแวดล้อม โดยประมวลผลหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีแบบแม่นยำ (Exact Method) ดังแสดงในตารางที่ 2

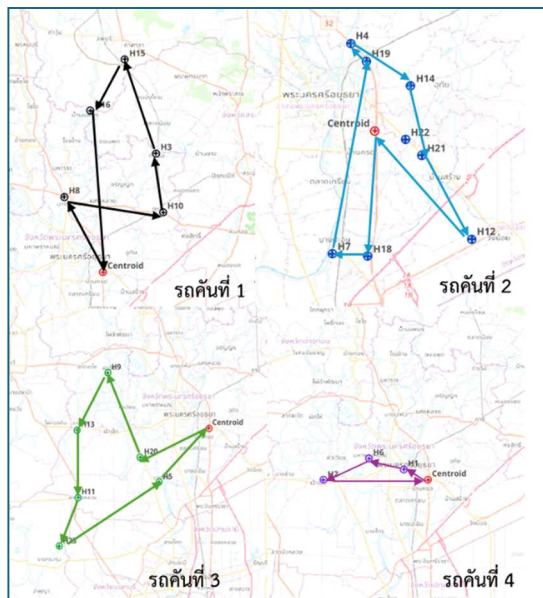
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เส้นทางแบบหลายวัตถุประสงค์

รายละเอียด	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์			
	Z_1	Z_2	Z_3	Multi-Objective
ต้นทุนรวม (บาท)	4627.19	8152.05	4636.71	6052.08
จำนวนรถ (คัน)	3	5	3	4
เชื้อเพลิง (ลิตร)	32.16	67.38	32.26	39.201
ต้นทุนคงที่ (บาท)	3600	6000	3600	4800
ต้นทุนแปรผัน (บาท)	1027.19	2152.05	1036.71	1252.08
เวลาทำงานสูงสุด (นาท)	480	299	480	305
อัตราการปล่อยCO ₂	86.1888	180.573	86.9874	105.06

ทั้งนี้เริ่มจากการวิเคราะห์การมุ่งลดต้นทุนการดำเนินงานรวม (Total Cost) หรือ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission) เป็นวัตถุประสงค์เดียวสามารถประหยัดทรัพยากรได้สูงสุดโดยใช้ยานพาหนะเพียง 3 คัน แต่ส่งผลกระทบต่อตรงต่อพนักงานจัดส่ง โดยพนักงานที่รับภาระหนักที่สุดมีเวลาทำงานสูงสุด (Work Time) ถึง 480 นาที ในทางตรงกันข้าม หากทำให้ภาระงานให้พนักงานมีเวลา

ทำงานน้อย จะช่วยลดเวลาทำงานสูงสุดลงเหลือเพียง 299 นาที เพื่อลดความเหนื่อยล้าและเพิ่มความปลอดภัยของบุคลากร แต่ต้องแลกมาด้วยการเพิ่มจำนวนยานพาหนะเป็น 5 คัน ส่งผลให้ต้นทุนรวมสูงที่สุดเป็น 8,152.05 บาท (เพิ่มขึ้นร้อยละ 76.18) และปล่อยก๊าซคาร์บอนสูงสุดถึง 180.573 กิโลกรัมตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองหลายวัตถุประสงค์แบบถ่วงน้ำหนักที่ใช้การปรับมาตรฐานเชิงเส้น โดยในงานวิจัยนี้พิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์เท่าๆ กัน (equal weight) เพื่อพิจารณาความสมดุลตามหลักความยั่งยืน (Sustainability) [22] พบว่าสามารถวางแผนแบบสมดุลในทางปฏิบัติ โดยระบบเลือกใช้นยานพาหนะ 4 คัน ควบคุมเวลาทำงานสูงสุดของพนักงานไว้ได้ที่ 305 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีพนักงานทำงานน้อยที่สุด (เพิ่มขึ้น 6 นาที) แต่ช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ร้อยละ 25.76 (ลดต้นทุนรวมเหลือ 6,052.08 บาท) และรักษาอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนให้อยู่ในเกณฑ์เหมาะสมที่ 105.06 กิโลกรัม ผลลัพธ์นี้พิสูจน์ว่าแบบจำลองบูรณาการช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์ที่ยืดหยุ่น โดยสามารถรักษาสวัสดิภาพของพนักงานขนส่ง ควบคู่กับการควบคุมงบประมาณและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมกัน



รูปที่ 3 เส้นทางรถขนส่งของแต่ละคัน

จากนั้นเมื่อกำหนดจุดจัดตั้งศูนย์การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (H17) และทำการวิเคราะห์และวางแผนเส้นทางการขนส่งเพื่อกระจายชิ้นงานไปยังเครือข่ายสถานพยาบาลต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อมุ่งเน้นการลดต้นทุนการขนส่งรวม การรักษาสมาดุลระยะเวลาการทำงานของรถขนส่งแต่ละคัน และการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emissions) สามารถแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบและรายละเอียดของเส้นทางขนส่งที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 และแสดงเส้นทางในการขนส่งดัง รูปที่ 3

ตารางที่ 3 การวางแผนการขนส่งชิ้นงานตามแบบจำลองหลายวัตถุประสงค์

รถ	เส้นทาง
V1	H17 (AM hub) → H8 → H10 → H3 → H15 → H16 → H17 (AM hub)
V2	H17 (AM hub) → H18 → H7 → H19 → H4 → H14 → H21 → H12 → H22 → H17 (AM hub)
V3	H17 (AM hub) → H20 → H9 → H13 → H11 → H23 → H5 → H17 (AM hub)
V4	H17 (AM hub) → H1 → H6 → H2 → H17 (AM hub)
เวลาในการส่งชิ้นงาน	
V1	H17 (AM hub) 9.00 → 10.10 → 11.14 → 11.45 → 12.30 → 12.57 → 13.58 H17 (AM hub)
V2	H17 (AM hub) 9.00 → 10.00 → 10.31 → 11.25 → 11.44 → 12.05 → 12.26 → 13.06 → 13.44 → 14.04 H17 (AM hub)
V3	H17 (AM hub) 9.00 → 10.05 → 10.55 → 11.30 → 12.01 → 12.31 → 13.22 → 14.05 H17 (AM hub)
V4	H17 (AM hub) 9.00 → 9.30 → 12.15 → 12.38 → 14.05 H17 (AM hub)
จำนวนชิ้นงานอุปสงค์ในการขนส่ง	
V1	H17 (AM hub) → 8 → 6 → 4 → 2 → 1 → H17 (AM hub)
V2	H17 (AM hub) → 29 → 24 → 19 → 16 → 14 → 12 → 7 → 3 → H17 (AM hub)
V3	H17 (AM hub) → 11 → 8 → 6 → 5 → 3 → 2 → H17 (AM hub)
V4	H17 (AM hub) → 38 → 11 → 10 → H17 (AM hub)

4.2.3 ผลการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

ในขั้นตอนต่อมา เป็นการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ โดยอิงตามข้อมูลเทคโนโลยีประเภท Fused Deposition Modeling (FDM) สำหรับจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าและผลิตชิ้นงานทางการแพทย์เฉพาะบุคคล ทั้งนี้ โดยการศึกษาได้กำหนดขอบเขตและผลการประเมินต้นทุนต่อหน่วยดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์การผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (AM) ต่อหน่วย

รายละเอียด		ค่าใช้จ่าย
เครื่องพิมพ์ 3 มิติ		19,627 บาท
จำนวนชิ้นงาน	อุปสงค์ภายใน รพ. ที่ตั้ง AM (AM hub)	13 ชิ้น
	อุปสงค์ รพ. ในเครือข่าย	86 ชิ้น
ค่าใช้จ่ายภายใน รพ. ศูนย์ AM		2,600 บาท
ค่าใช้จ่ายรพ. ในเครือข่าย (MOVROTW)	ต้นทุนคงที่การใช้รถ	4,800 บาท
	ต้นทุนแปรผันการขนส่ง	1,253 บาท
รวม		28,279 บาท
ต้นทุนต่อหน่วย		285.65 บาท

ทั้งนี้ รายละเอียดต้นทุนรวมกรณีศึกษา มีมูลค่ารวมทั้งสิ้น 28,279 บาท ซึ่งสามารถจำแนกที่มาในการคำนวณออกเป็น 4 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกคือ ต้นทุนคงที่ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 19,627 บาท ซึ่งเป็นต้นทุนการลงทุนส่วนกลางเพื่อรองรับการผลิตชิ้นงานรวมทั้งหมด 99 ชิ้น ส่วนที่สองคือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานภายในโรงพยาบาลศูนย์ AM จำนวน 2,600 บาท จากการผลิตชิ้นงานเพื่อใช้ภายในโรงพยาบาลตั้งต้นจำนวน 13 ชิ้น โดยคำนวณมาจากสมมติฐานแหล่งพลังงาน และค่าแรงแปรผันในการผลิตอยู่ที่ชิ้นละ 200 บาท

สำหรับส่วนที่สามและส่วนที่สี่เป็นการคำนวณต้นทุนจากการใช้แบบจำลอง MOVROTW ในการขนส่งชิ้นงานออกไปยังโรงพยาบาลในเครือข่ายจำนวน 86 ชิ้น ประกอบด้วย ต้นทุน

คงที่การใช้รถ 4,800 บาท ซึ่งคิดเป็นค่าบริหารจัดการยานพาหนะพื้นฐาน เช่น ค่าเช่ารถหรือค่าแรงคนขับคงที่ คิดเป็น 1,200 บาทต่อคัน และ ต้นทุนผันแปรการขนส่ง จำนวน 1,253 บาท ซึ่งเป็นค่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่แปรผันตรงตามระยะทางขนส่งจริงในเครือข่ายรวมโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 39.21 ลิตร uly 3.194 บาท เมื่อนำต้นทุนคงที่และต้นทุนดำเนินงานทั้งหมดมารวมกันและหารเฉลี่ยด้วยปริมาณการผลิตรวม 99 ชิ้น เพื่อคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วย จึงสามารถประมาณการต้นทุนการผลิตและจัดส่งชิ้นงาน AM เฉลี่ยสุทธิอยู่ที่ 285.65 บาทต่อหน่วยในกรณีศึกษา ซึ่งข้อมูลต้นทุนเหล่านี้แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และการตั้งงบประมาณสำหรับการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุในเครือข่ายสถานพยาบาลในกรณีอื่นๆ ได้ต่อไป

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้การบูรณาการแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการวิเคราะห์ที่ตั้งและการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOVROTW) ในการออกแบบการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุในเครือข่ายสถานพยาบาล 23 แห่งของกรณีศึกษาจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผลการศึกษาพบว่าโรงพยาบาลโหนด H17 เป็นทำเลที่ตั้งศูนย์กลางอุดมคติ (Centroid Hub) และการวิเคราะห์เส้นทางแบบหลายวัตถุประสงค์ให้แผนการดำเนินงานที่สมมูลที่สุด โดยระบบเลือกใช้ยานพาหนะ 4 คัน เพื่อกระจายชิ้นงานจำนวนรวม 99 ชิ้น (ภายในคลัง 13 ชิ้น และภายนอก 86 ชิ้น) ภายใต้นต้นทุนรวม 28,279 บาท (เฉลี่ย 285.65 บาทต่อหน่วย) โดยควบคุมเวลาทำงานสูงสุดของพนักงานไว้ที่ 305 นาที และรักษาอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ที่ 105.06 กิโลกรัม แสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์การผลิตแบบรวมศูนย์และการจัดเส้นทางที่ผูกโยงกรอบเวลาช่วยสนับสนุนการตัดสินใจที่คุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ตอบสนองทางการแพทย์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Logistics) พร้อมกัน

งานวิจัยในอนาคตควรขยายแบบจำลองให้รองรับความไม่แน่นอนของอุปสงค์และพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น ความไม่แน่นอนของสภาพการจราจร รวมถึงอาจพิจารณาเวลาในการพิมพ์สาม

มิติ ข้อจำกัดด้านกำลังการผลิต และจำนวนเครื่องพิมพ์ที่มีผลต่อความเป็นไปได้ของตารางการผลิตและการขนส่ง ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองสำหรับปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดเส้นทางร่วมกันในอนาคต นอกจากนี้ อาจพิจารณาการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละฟังก์ชันเป้าหมายที่ไม่เท่ากันตามความต้องการวางแผนได้เช่นกัน และการใช้วิธีสถิติและเมทาฮิวริสติกส์ในการเปรียบเทียบผลกรณีศึกษาที่มีจำนวนโรงพยาบาลมากขึ้นในเครือข่าย รวมถึงใช้ระยะทางบนโครงข่ายถนนจริงแทนเป็นต้น เพื่อเพิ่มความสมจริงของแบบจำลอง อีกทั้งอาจมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการผลิตแบบรวมศูนย์ (Centralized) กับแบบกระจายตัว (Decentralized) ในระดับภูมิภาค และบูรณาการเทคโนโลยีติดตามยานพาหนะแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์สาธารณสุขในภาวะต่างๆอย่างยั่งยืนได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Singh AB. Transforming healthcare: a review of additive manufacturing applications in the healthcare sector. In: *IECMA 2024*. 2024.
- [2] Grand View Research. *3D printing in healthcare market size, share & trends analysis report by technology (FDM, DLP, SLS, SLA), by application (medical, dental), by component (software, hardware), by region, and segment forecasts, 2024–2030*. San Francisco (CA): Grand View Research; 2024. Report No.: GVR-1-68038-713-7.
- [3] Chaldoupis K, Polychronakis Y, Syntetos AA, Holmström J. Additive manufacturing for standard parts in the healthcare supply chain: what are the available performance improvements? *International Journal of Production Research*. 2024;62(24):1–19.
- [4] Husainy ASN, Patil SD, Kokane RS, Upadhye CR, Chougule AV. Medical additive manufacturing: challenges and features. *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2023;12(1):15–23.
- [5] Rouf S, Malik A, Singh N, Raina A, Naveed N, Siddiqui MIH, et al. Additive manufacturing technologies: industrial and medical applications. *Sustainable Operations and Computers*. 2022;3:258–274. doi:10.1016/j.susoc.2022.05.001.
- [6] Adugna YW, Akessa AD, Lemu HG. Overview study on challenges of additive manufacturing for a healthcare application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1201(1):012041.
- [7] Alizadeh M, Pishvae MS, Jahani H, Paydar MM, Makui A. Viable healthcare supply chain network design for a pandemic. *Annals of Operations Research*. 2023;328(1):35–73.
- [8] Kawalkar R, Dubey HK, Lokhande SP. A review for advancements in standardization for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50:1983–1990.
- [9] Monzón MD, Ortega Z, Martínez A, Ortega F. Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;76(5–8):1111–1121.
- [10] Ransikarbum K, Pitakaso R, Kim N, Ma J. Multicriteria decision analysis framework for part orientation analysis in additive manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2021;8(4):1141–1157.
- [11] Fianko SK, Dzogbewu TC, Agbamava E, de Beer DJ. Mass customisation strategies in additive manufacturing: a systematic review and implementation framework. *Processes*. 2025;13(6):1855.
- [12] Arefin AME, Khatri NR, Kulkarni N, Egan PF. Polymer 3D printing review: materials, process, and design strategies for medical applications. *Polymers*. 2021;13(9):1499.
- [13] Schneider KH, Oberoi G, Unger E, Janjic K, Rohringer S, Heber S, et al. Medical 3D printing with polyjet technology: effect of material type and printing orientation on printability, surface

- structure and cytotoxicity. *3D Printing in Medicine*. 2023;9:27. doi:10.1186/s41205-023-00190-y.
- [14] Alakas HM, Yazici E, Ebiri U, Kizilay BA, Oruc O. Selection of 3D printing technologies for prosthesis production with multicriteria decision making methods. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2024;18(2):911–927. doi:10.1007/s12008-023-01489-0.
- [15] Anussornnitisarn P, Nivasanon C, Kim N, Ransikarbum K. Sustainable technology selection in additive manufacturing: an integrated fuzzy decision analysis framework. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;138:1177–1196.
- [16] Andrieiev I, Trehub D, Khatsko K, Sokolovska I, Ganzhiy I. Strategic management in healthcare: the impact of strategic decisions on achieving organizational goals and improving the quality of healthcare services. *Multidisciplinary Science Journal*. 2024;6:2024ss0217.
- [17] Huebner C, Flessa S. Strategic management in healthcare: a call for long-term and systems-thinking in an uncertain system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(14):8617.
- [18] Schneller E, Abdulsalam Y, Conway K, Eckler J. *Strategic management of the healthcare supply chain*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2023.
- [19] Ransikarbum K, Kim N. Importance of multi-objective evaluation in 3D printing. In: *Industrial Strategies and Solutions for 3D Printing: Applications and Optimization*. Hershey (PA): IGI Global; 2024. p.105–128.
- [20] Altay G, Akyüz MH, Öncan T. Solving a minisum single facility location problem in three regions with different norms. *Annals of Operations Research*. 2023;321(1):1–37.
- [21] Ransikarbum K, Pitakaso R, Kim N. A decision-support model for additive manufacturing scheduling using an integrative analytic hierarchy process and multi-objective optimization. *Applied Sciences*. 2020;10(15):5159.