

**การศึกษาระบบการขนส่งด้วยรถไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
โดยวิธีการสร้างแบบจำลองและวิธีอาณานิคมมด**
**A Study of Electric Car Service System in Phetchabun Rajabhat University
by Simulations and Ant Colony Optimization**

ธนภัทร มะณีแสง¹ นพดล อ่ำดี²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

E-mail: idul_nazgul@hotmail.com

²สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

E-mail: amdee1973@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมจากการจำลองระบบการนำรถที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาใช้ในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางและความเป็นไปได้ในการนำรถพลังงานไฟฟ้าสาธารณะมาใช้ให้บริการในมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำและวิธีการอาณานิคมมดเพื่อจัดเส้นทางที่เหมาะสมก่อนนำเส้นทางที่ได้มาจำลองระบบการเดินรถพลังงานไฟฟ้าลงบนคอมพิวเตอร์ จากการทดลองพบว่า วิธีการอาณานิคมมดสามารถหาระยะทางได้สั้นกว่าวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำในทุกขนาดปัญหา จากนั้นนำเส้นทางที่ได้มาใช้ในการสร้างตัวแบบสำหรับการศึกษาพฤติกรรมจำลองของระบบรถพลังงานไฟฟ้าในมหาวิทยาลัย โดยใช้การกำหนดความถี่ของตารางการเดินรถ เวลาการมาถึง และจำนวนประชากรให้มีความแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า แบบจำลองสามารถใช้วางแผนและศึกษาการจัดตารางความถี่ของตารางการเดินรถให้เหมาะสมในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เมตาฮิวริสติกส์ / วิธีการอาณานิคมมด / การจำลองสถานการณ์ / ระบบการขนส่งด้วยรถไฟฟ้า

Abstract

The investigation was on the performance of the electric cars to be in service in Phetchabun Rajabhat University, by simulations, in order to explore a guideline and the feasibility of the appropriate service launch inside the campus. The researcher compared routing by between a search way of a repeated loop and ant colony optimization, then drew the route simulations on a computer platform. The findings indicated that the ant colony optimization could make a shorter distance than the search way of a repeated loop at all conditions. The prototype routes were later designed from the drafts with the descriptions of the operating schedule, service frequency, arriving times, and the number of passengers in various conditions. The developed prototypes could eventually create appropriate routes with the effective routing plans and frequency-time scheduling at various conditions.

Keywords: Metaheuristic / Ant colony optimization / Simulation / Electric car service

บทนำ

ปัจจุบันในจังหวัดเพชรบูรณ์มีการจราจรหนาแน่น เนื่องจากตัวเมืองที่มีการขยายตัว ในช่วงเวลาเร่งด่วนจะพบว่าการจราจรที่คับคั่งทำให้เพิ่มความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุได้ จากข้อมูลทางสถิติพบว่าการเกิดอุบัติเหตุที่มีตัวเลขค่อนข้างสูงในทุก ๆ ปี บริเวณที่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นบ่อยคือ บริเวณถนนสระบุรี – หล่มสักซึ่งเป็นศูนย์รวมของสถานที่ราชการและสถานศึกษา ในช่วงเช้าและเย็นมีผู้ใช้รถใช้ถนนจำนวนมาก จากการสำรวจพบว่า วิธีการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ประชากรส่วนใหญ่จะใช้รถจักรยานยนต์และรถยนต์ส่วนบุคคลเป็นจำนวนมากส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจร รวมถึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและเกิดมลพิษทางอากาศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์จึงมีแนวคิดในการลดการใช้พลังงาน โดยได้ทดลองนำรถไฟฟ้าขนาดเล็กมาวิ่งในมหาวิทยาลัย ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสถานการณ์ในการนำระบบรถพลังงานไฟฟ้าสาธารณะมาใช้ในมหาวิทยาลัยเพื่อหาแนวทางในการลดการเกิดอุบัติเหตุและปัญหาจราจร ขั้นตอนการดำเนินงาน ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ การประยุกต์ใช้วิธีเมตาฮิวริสติกเพื่อหาเส้นทางและจุดจอดของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม และส่วนที่ 2 คือ สร้างแบบจำลองเพื่อกำหนดความถี่ของตารางการเดินรถไฟฟ้า ซึ่งการหาเส้นทางและจุดจอดของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยคณะผู้วิจัยใช้เมตาฮิวริสติก 2 วิธี ประกอบด้วย 1) วิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำ (Iterated local search: ILS) ซึ่งเป็นเมตาฮิวริสติกที่มีความซับซ้อนน้อยสามารถทำ

ความเข้าใจได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว และ 2) วิธีอาณานิคมมด (Ant colony optimization: ACO) เป็นวิธีการที่ได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมของมดจริง ๆ ในธรรมชาติมดสามารถเดินทางไปยังแหล่งอาหารและกลับมาสู่รังได้โดยจะเริ่มจากให้มดทุกตัวหาคำตอบแบบสุ่ม เมื่อเวลาผ่านไปการหาคำตอบจะใช้วิธีการรวบรวมค่าคำตอบจากมดแต่ละตัวเพื่อเป็นข้อมูลในการเดินทางที่เหมาะสมเพื่อให้คำตอบดีขึ้นเรื่อย ๆ ต่างจากวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำที่ใช้วิธีการสุ่มเพียงอย่างเดียว แต่วิธีอาณานิคมมดจะใช้เวลาหาคำตอบนานกว่า

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแบบจำลองของระบบการขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และศึกษาแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างระบบขนส่งสาธารณะภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาผลลัพธ์ระหว่างวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำและวิธีอาณานิคมมดจากค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Best So Far: BSF) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S.D.)

ขอบเขตการวิจัย

1. ขอบเขตประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อทำการจำลองระบบรถไฟฟ้าสาธารณะโดยมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ยังไม่มีเมื่อนำระบบรถไฟฟ้าสาธารณะมาใช้จริง ดังนั้นการเก็บข้อมูลจึงไม่สามารถทำได้ คณะผู้วิจัยจึงได้นำเอาข้อมูลจากตารางการใช้ห้องเรียนของนักศึกษามาเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับจำลองระบบการใช้รถไฟฟ้าสาธารณะ

2. ขอบเขตเนื้อหา

งานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เพื่อหาเส้นทางและจุดจอดของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยจะประยุกต์ใช้วิธีค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำและวิธีการอาณานิคมมด และส่วนที่ 2 คือ สร้างแบบจำลองของระบบการขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และศึกษาแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างระบบขนส่งสาธารณะภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

2.1 การหาเส้นทางและจุดจอดที่เหมาะสม

- 1) หาเส้นทางที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการเมตาฮิวริสติกส์ 2 รูปแบบในการหาคำตอบ คือ วิธีค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำและวิธีการอาณานิคมมด
- 2) ขนาดของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ ปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่

3) การหาระยะทางระหว่างจุดจุดโดยใช้เว็บไซต์ Google map ร่วมกับการประยุกต์ใช้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem: TSP) โดยในทางทฤษฎี TSP เป็นกลวิธีในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดการที่ศึกษากันในสาขาการวิจัยดำเนินการและวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ โดยให้พนักงานขายเดินทางไปยังกลุ่มของเมืองให้ครบทุกเมืองแล้วตั้งคำถามว่า ถ้าหากต้องเดินทางผ่านทุกเมืองจะต้องใช้เส้นทางไหนถึงจะสั้นที่สุด (เสกสรรค์ วินยวงศ์กุล และคณะ.2557)

2.2 การสร้างแบบจำลอง

1) สร้างแบบจำลองของระบบการขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์โดยอาศัยการสร้างตัวแบบจากโปรแกรม Arena 7.0

2) เนื่องจากข้อมูลนำเข้าในส่วนของการใช้ห้องและแผนที่เป็นข้อมูลของมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นผลลัพธ์ที่จะนำมาใช้กับมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์เท่านั้น

3) การจำลองสถานการณ์จะมีลักษณะแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete event)

3. ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่ใช้เป็นแบบสมมาตร
- 2) ระยะทางระหว่างจุดจุดเลือกจากระยะทางที่สั้นที่สุดที่ได้จากเว็บไซต์Google map
- 3) การสร้างแบบจำลองจะใช้ปัญหาขนาดเล็กจำนวน 10 จุดจุด ส่วนปัญหาขนาด 15 และ 30 จุดจุดจะใช้เพื่อการทดสอบความสามารถของเมตาฮิวริสติกส์เท่านั้น
- 4) การกำหนดจำนวนผู้ใช้เวลาการมาถึงและจุดหมายของประชากรในแบบจำลองจะใช้ตารางการใช้ห้องเรียนเป็นข้อมูลในสถานี่แรกเท่านั้น (จุด P) ส่วนจุดหมายของประชากรจะถูกกำหนดให้มีโอกาสเท่ากันในการเลือกลงในแต่ละจุด ๆ จุดจุด
- 5) มีการจำกัดความเร็วของรถที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและมีเวลาเพื่อขึ้นรถและลงรถรวมถึงการชะลอรถอยู่ระหว่างการกระจายตัวแบบสามเหลี่ยม (Triangular) มีรถไฟฟ้าจำนวนทั้งหมด 10 คัน และแต่ละคันสามารถโดยสารได้ 16 คน
- 6) เมื่อถึงจุดจุดสุดท้ายรถจะไม่ย้อนกลับทางเดิมและจะวิ่งไปจุดจุดแรกทันที (จุด P)
- 7) ประชากรไม่สามารถเลือกจุดลงและจุดขึ้นรถเป็นจุดเดียวกันได้ ถ้าหากประชากรจะย้อนกลับไปยังจุดจุดที่รถได้ผ่านมาแล้วประชากรต้องเลือกลงจุดที่จอดบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยเพื่อต่อรถคันอื่น

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ อุปกรณ์ที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) ยี่ห้อ HP รุ่น HP 3330 ส่วนอุปกรณ์ซอฟต์แวร์ ได้แก่ โปรแกรม MINITAB 16 สำหรับวิเคราะห์ผลการทดลองและวิเคราะห์ความแปรปรวน โปรแกรม Arena Simulation 7.0 ในการสร้างแบบจำลองและใช้ภาษา Python 3.4.3 ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับจัดเส้นทางด้วยวิธีการ ACO และ ILS

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลัก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

1. การประยุกต์ใช้วิธีการหาคำตอบเฉพาะที่เพื่อหาเส้นทางและจุดจอดที่เหมาะสมโดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูล ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) การกำหนดเส้นทางจะใช้เส้นทางจากเว็บไซต์ Google map จากภาพที่ 1 แสดงวิธีการหาเส้นทางระหว่างจุดจอดรถไฟฟ้าและอาคารเรียน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ เส้นทางการเดินทาง 3 เส้นทางในการพิจารณาจะเลือกเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด



ภาพที่ 1 แสดงวิธีการออกแบบเส้นทางจากเว็บไซต์ Google map

ที่มา : <https://maps.google.co.th>

3) แก้ปัญหาโดยใช้เมตาฮิวริสติก 2 รูปแบบ ประกอบด้วย วิธีค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำและวิธีการอาณานิคมมด ดังนี้

(1) การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนซ้ำ ซึ่งพัฒนามาจากการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local search: LS) โดยข้อเสียของ LS คือ คำคำตอบที่ได้มักจะไปติดที่คำตอบที่ดีที่สุดที่ยานคำตอบใกล้เคียง ILS ได้เพิ่มกลยุทธ์เพื่อให้ LS สามารถหลีกเลี่ยงไม่ให้คำตอบไปติดที่คำตอบที่ดีที่สุดที่ยานคำตอบใกล้เคียง (Helena R., et al.. 2001)

กำหนดค่า $l_{\max}$ และ $n_{\max}$ สุ่มตำแหน่งของหาคำตอบเริ่มต้น x กำหนดให้ $l \leftarrow 1$ และ $n \leftarrow 1$

1.1) หาคำตอบ x' จาก $x' \in (N(x))$: ถ้าหาก $f(x') < f(x)$ ให้ $x \leftarrow x'$ และทำซ้ำไม่เช่นนั้นให้ x เป็นคำตอบเดิมและกำหนดให้ $n \leftarrow n+1$ และ $l \leftarrow l+1$ ทำซ้ำ

1.2) ถ้า $n = n_{\max}$ ให้สุ่มตัวแทนคำตอบใหม่ $N(x')$ แทนที่ $N(x) \leftarrow N(x')$

1.3) ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่า $l = l_{\max}$ หรือถึงเงื่อนไขการหยุด

(2) วิธีการอาณานิคมมดเป็นวิธีการที่ได้จากการเลียนแบบพฤติกรรมของมดในธรรมชาติ ซึ่งมดสามารถเดินทางไปยังแหล่งอาหารและกลับมาสุรังได้ โดยมีดจะเลือกเส้นทางที่ใช้เดินให้มีระยะทางรวมเป็นระยะทางที่สั้นที่สุด (ระพีพันธ์ ปิตาเคโส. 2554) ประกอบด้วย ขั้นตอนดังนี้

2.1) เริ่มจากตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ACO ทั้งหมด

2.2) สร้างคำตอบเริ่มต้นจากพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ตั้งไว้

2.3) ปรับค่าพารามิเตอร์ของ ACO ต่าง ๆ ในข้อที่ 2.1 ประกอบด้วย 6 พารามิเตอร์ คือ จำนวนรอบที่ต้องการวนซ้ำ (Iteration: l) จำนวนประชากรมด (Ant population: n) ค่าฟีโรโมน (Pheromone: τ) ค่าความน่าสนใจ (Attractiveness: $\omega(i, j)$) ค่าแอลฟา (Alpha: α) และบีตา (Beta: β)

2.4) สร้างตารางเมตริกซ์เก็บเส้นทางระหว่าง จุดท่องเที่ยว $d_{i,j}$

2.5) สร้างตารางเมตริกซ์เก็บค่าฟีโรโมน $\tau_{i,j}$ และค่าความน่าสนใจ $\omega_{i,j}$

2.6) คำนวณค่า $\omega_{i,j}$ จากสมการที่ 1 และเก็บค่าไว้ในตารางค่าความน่าสนใจ โดยที่ $\tau_{i,j}^\alpha$ คือ ค่าฟีโรโมนของการเดินทางระหว่างจุดท่องเที่ยว i ไปยังจุดท่องเที่ยว j ที่ให้น้ำหนักด้วยการยกกำลัง ส่วนค่า $\pi_{i,j}^\beta$ คือ ค่าคงที่ค่าหนึ่งในปัญหา TSP ซึ่งเป็นส่วนกลับของระยะห่างระหว่างจุดท่องเที่ยว 2 จุด ซึ่งค่า $\pi = 10 / d_{i,j}$

$$\omega(i, j) = \tau_{i,j}^\alpha \times \pi_{i,j}^\beta \quad (1)$$

2.7) สุ่มหาความน่าจะเป็นของจุดท่องเที่ยวที่จะเป็นจุดท่องเที่ยวต่อไปดังสมการที่ 2 โดยค่า S คือ ชุดเมืองที่ยังไม่ได้ถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่ใช้ผ่านของจุดท่องเที่ยว

$$p_{i,j} = \frac{\tau_{i,j}^\alpha \times \pi_{i,j}^\beta}{\sum_{j \in S} (\tau_{i,j}^\alpha \times \pi_{i,j}^\beta)} = \frac{\omega(i, j)}{\sum_{j \in S} \omega(i, j)} \quad (2)$$

2.8) ใช้หลักการวงกลมรูเล็ต (Roulette wheel) เพื่อหาจุดจอดลำดับถัดไปโดยใช้ ค่า $p_{i,j}$ ของแต่ละจุดท่องเที่ยวมาสร้างความเป็นสะสม $cumpop_{i,j}$ ดังสมการที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า k คือ ลำดับของเมืองที่อยู่ในลำดับของผู้แข่งขัน (Candidate List: CL)

$$cumpop_{i,j} = \sum_{k=1}^j p_{i,k} \quad (3)$$

2.9) สุ่มตัวเลขมา 1 ค่า r ซึ่งค่า r ที่สุ่มได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง $\{0,1\}$ ถ้าหากตัวเลขตกอยู่ในช่วงของจุดท่องเที่ยวใดให้เลือกจุดท่องเที่ยวนั้นเป็นจุดท่องเที่ยวถัดไป

2.10) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 8 จนถึง 10 จนกว่าจะครบทุกจุด

2.11) เมื่อได้เส้นทางแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ขั้นตอนการปรับค่าฟีโรโมน โดยใช้ส่วนกลับของระยะทางรวมของเส้นทางใหม่ที่ได้ ดังสมการที่ 3 โดยที่ f คือ ค่าที่จะใช้ปรับค่าในตารางเมทริกซ์ โดยที่ j คือ จำนวนจุดท่องเที่ยวทั้งหมด

$$f = \frac{1}{\sum_{k=1}^j d_{i,k}} \quad (4)$$

2.12) ปรับค่า $\tau_{i,j}$ ในเส้นทางที่ถูกเลือก ($d_{i,j}$) โดยใช้สมการที่ 4 สำหรับในเส้นทางระหว่างจุดท่องเที่ยวที่ไม่ได้เลือกให้ปรับค่า $\tau_{i,j}$ ดังสมการที่ 5 โดยที่ค่า ρ คือค่า $\tau_{i,j}$ ที่ระเหยไปถ้าหากเส้นทางนั้นไม่ได้ถูกเลือก

$$\tau_{i,j}^n = (1-\rho)(\tau_{i,j}^{n-1}) \quad (5)$$

$$\tau_{i,j}^n = (1-\rho)(\tau_{i,j}^{n-1}) + \rho^l \quad (6)$$

2.13) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 8 จนถึงขั้นตอนที่ 13 จนกว่า $n = n_{\max}$ ซึ่งจะนับเป็น 1 รอบ หรือ $l \leftarrow 1$

4) ทดสอบและตรวจสอบความถูกต้องกับปัญหาอย่างง่ายเพื่อให้ทราบว่เส้นทางที่โปรแกรมสร้างขึ้นถูกต้องและไม่ละเมิดเงื่อนไข

5) ออกแบบการทดลองเพื่อเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเมตาฮิวริสติกส์โดยกำหนดค่าเริ่มต้น (Seed) เท่ากับ 777 ในส่วนเริ่มต้นของโปรแกรม และพัฒนาคำตอบให้ครบ 200,000 คำตอบ ทำซ้ำ 10 ครั้งจากนั้นหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยการกำหนดให้พัฒนาคำตอบให้ครบ 200,000 คำตอบทำซ้ำจำนวน 30 รอบ

6) เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากเมตาฮิวริสติกทั้ง 2 รูปแบบ สรุปผลจากการทดลองและนำผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อออกแบบเส้นทางการบินของรถไฟฟ้าต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูล

ลักษณะปัญหาประชากรจะเริ่มขึ้นรถ ณ จุดจอดบริเวณหน้ามหาวิทยาลัย โดยช่วงเวลาที่พิจารณาคือ 7.00-10.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ประชากรมีความหนาแน่นที่สุด รถคันแรกจะออกเดินทางเวลา 7.05 น. และคันต่อไปก็จะออกเว้นช่วงระยะเวลาตามที่โจทย์กำหนด ประชากรจะเดินทางมาถึงและมีเป้าหมายในการเดินทางที่มีความแตกต่างกัน ข้อมูลที่นำมาใช้เพื่อให้แบบจำลองเพื่อหามีความสมจริงยิ่งขึ้น คือ ตารางการใช้ห้องเรียน โดยมีขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองดังนี้

1) รูปแบบการมาถึงแบบ Exponential และใช้ความถี่ของเวลาเพื่อกำหนดจำนวนประชากรทำให้แต่ละวันเวลาการมาถึงจำนวนประชากรและจุดหมายจะไม่เหมือนกันแต่นำมาใช้เพียงแค่กับในจุด P แต่ในส่วนของจุดจอดที่ 1-10 เวลาการมาถึงของประชากรถูกกำหนดให้เป็นรูปแบบเดียวกัน คือ Exponential โดยกำหนดความถี่ของเวลาเท่ากับ 5 นาที ส่วนการเลือกจุดหมายของประชากรจะกำหนดให้แต่ละจุดจอดมีโอกาสเลือกเท่าๆ กัน

2) สร้างตัวแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องในโปรแกรม Arena Simulation โดยพิสูจน์ความจริง (Verification) ว่าการทำงานของตัวแบบคล้ายกับระบบที่ต้องการและไม่ละเมิดเงื่อนไขที่กำหนดไว้ส่วนในขั้นตอนการมีเหตุผล (Validation) ไม่สามารถทำได้เนื่องจากตัวแบบเป็นแค่แนวคิดจึงไม่มีระบบจริงให้ทำการเปรียบเทียบ (รุ่งรัตน์ ภิสิทธิ์เพ็ญ. 2550)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการแสดงวิธีการหาโอกาสในการเลือกจุดลงรถของประชากรในแต่ละจุดจอด

วันจันทร์	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4		จุดที่ 9	จุดที่ 10	รวม
7.00-8.00	223	63	32	29		64	191	2,998
8.00-9.00	311	5	180	29		73	5	
โอกาส	18%	2%	7%	2%		5%	7%	100%

3) การออกแบบโจทย์และทำงานทดลองข้อมูลนำเข้าของการตัดสินใจลงจากรถและเวลาการมาถึงนำมาจากตารางการใช้ห้องเรียน ตั้งแต่วันจันทร์-วันอาทิตย์ ตัวอย่างในตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างวิธีการหาโอกาสในการเลือกจุดลงรถของประชากรในแต่ละจุดจอด งานวิจัยนี้จะจำลองข้อมูลว่ามีผู้เลือกใช้การเดินทางโดยใช้รถไฟฟ้าของมหาวิทยาลัย จำนวนร้อยละ 20 ของประชากรทั้งหมด ดังนั้น ร้อยละ 20 ของ 2,998 คน หมายความว่า จะมีประชากรมาขึ้นรถ ณ จุดประมาณ 500 คน ซึ่งไม่สามารถระบุจำนวนที่ชัดเจนได้เนื่องจากค่าที่ได้เป็นการสุ่มการมาถึงแบบ Exponential โดยความถี่ของเวลาจะเป็นการกำหนดจำนวนประชากรให้ใกล้เคียงกับจำนวนประชากรในโจทย์ ส่วนโอกาสในการเลือกจุดลงจอดในแต่ละจุดใช้จำนวนนักศึกษาที่จะต้องไปเรียนที่ตึกที่อยู่ใกล้กับจุดจอดเป็นตัวกำหนด ตัวอย่างเช่นในจุดจอดที่ 1 จำนวนคนที่ลงจุดจอดที่ 1 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 7.00 น.-8.00 น.จำนวน 223 คน และในช่วงเวลา 8.00-9.00 น.ซึ่งทั้ง 2 ช่วงเวลาจะมีประชากรที่

จะลงจุดจุดที่ 1 จำนวน 534 คน จาก 2,998 คน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 18 ของประชากรทั้งหมดหรือถ้าคิดเป็นร้อยละ 20 จากจำนวนคนที่ลงจุดจุดที่ 1 ก็จะเท่ากับ 107 คน

ผลการวิจัย

1. ผลลัพธ์จากการออกแบบเส้นทางจากการประยุกต์ใช้เมตาฮีริสติกส์ 2 รูปแบบกับปัญหา 3 ขนาด โดยสามารถอธิบายรายผลลัพธ์ของแต่ละวิธีการได้โดยสังเขปดังนี้

1.1 การค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำ มีการกำหนดจำนวนคำตอบที่ยินยอมให้มีการปรับปรุงในย่านคำตอบใกล้เคียงแล้วคำตอบไม่ดีกว่าเดิม (N_I) ดังตารางที่ 2 โดยให้ N_I เท่ากับ 500, 1,000 และ 1,500 คำตอบ ดังนั้นจึงต้องอาศัยโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้มีการปรับปรุงคำตอบ (N) จำนวน 200,000 คำตอบและทำซ้ำจำนวน 10 รอบ

ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหาคำตอบของ ILS

เมตาฮีริสติกส์	พารามิเตอร์			
ILS	N	200,000		
	N_I	500	1,000	1,500

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่เหมาะสมในการหาคำตอบของ ILS

ขนาดปัญหา	N_I			ค่า P -Value
	500	1,000	1,500	
ขนาดเล็ก	-	✓	-	0.034
ขนาดกลาง	-	✓	-	0.225
ขนาดใหญ่	-	✓	-	0.422

ผลลัพธ์จากการทดลองในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าในปัญหาขนาดเล็ก ปัจจัยในการกำหนดจำนวนคำตอบที่ยินยอมให้มีการปรับปรุงคำตอบในย่านคำตอบใกล้เคียงแล้วคำตอบไม่ดีกว่าเดิม มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ซึ่งมีค่า P -Value เท่ากับ 0.034 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ควรกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1,000 ส่วนในปัญหาขนาดกลางและขนาดใหญ่ปัจจัยดังกล่าวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ส่วนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดควรกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1,000 เช่นเดียวกับปัญหาขนาดเล็ก

ตารางที่ 4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการจัดเส้นทางเดินของ ACO

ขนาดปัญหา	Ant Population (N) and Iteration (I)		Evaporation Rate	Beta	Alpha
	n	I			
ขนาดเล็ก	50	4,000	0.00001	2.0	2
ขนาดกลาง	100	2,000	0.00005	2.0	2
ขนาดใหญ่	200	1,000	0.00009	2.0	2

1.2 วิธีการอาณานิคมมด การออกแบบการทดลองกำหนดให้มีจำนวนครั้งในการพัฒนาคำตอบ จำนวน 200,000 คำตอบ ซึ่งในการหาปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาประสิทธิภาพเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมของวิธีการอาณานิคมมด ประกอบด้วย 6 ปัจจัย คือ จำนวนรอบที่ต้องการวนซ้ำ (4,000, 2,000 และ 1,000 รอบ) จำนวนประชากรมด (50, 100 และ 200) ค่าฟีโรโมนเท่ากับ 1 ค่าความน่าสนใจ (0.00001, 0.00005 และ 0.00009) ค่าแอลฟา (1, 1.5 และ 2) และบีตาเท่ากับ 2 โดยมีการทดสอบซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละรูปแบบ ผลลัพธ์จากการทดลองจากการออกแบบการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีความเหมาะสมต่อการหาคำตอบในตารางที่ 4 สามารถหาคำตอบได้ดีที่สุด

1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาผลลัพธ์ของเมตาฮิวริสติกส์ ตารางที่ 5 ได้แสดงผลลัพธ์จากโปรแกรมการคำนวณที่ถูกพัฒนาขึ้น พบว่า ปัญหาขนาดเล็ก ACO และ ILS สามารถหาผลลัพธ์และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ได้ต่ำที่สุดเท่ากันคือ 3,130 เมตร ภาพที่ 2 ได้แสดงเส้นทางและลำดับการจอดรถไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งเส้นทางนี้จะนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ ถ้าหากประเมินประสิทธิภาพจากค่าเฉลี่ยของการหาคำตอบซ้ำทั้ง 30 ครั้ง ACO สามารถหาคำตอบที่ต่ำที่สุดคือ 3,130 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่ากับ 0 ส่วน ILS มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบรองลงมาซึ่งมีค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์เท่ากับ 3,565 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่ากับ 148.80 ในปัญหาขนาดกลาง ACO สามารถหาคำตอบที่ต่ำที่สุดได้ 4,470 ส่วน ILS หาคำตอบที่ต่ำที่สุดได้ 4,670 เมตร และถ้าหากประเมินประสิทธิภาพจากค่าเฉลี่ย ACO ของผลลัพธ์จากการทำซ้ำ จำนวน 30 ครั้งได้เท่ากับ 4,575 เมตร ส่วน ILS สามารถหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ได้เท่ากับ 5,841 เมตร ซึ่งในปัญหาขนาดกลางนี้ ACO มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลต่ำกว่า ILS มาก สุดท้ายในปัญหาขนาดใหญ่ ACO สามารถหาคำตอบที่ต่ำที่สุดได้ 6,325 ส่วน ILS หาคำตอบที่ต่ำที่สุดได้ 8,072 เมตร และถ้าหากประเมินประสิทธิภาพจากค่าเฉลี่ยของการหาคำตอบซ้ำทั้ง 30 ครั้ง ACO สามารถหาคำตอบที่ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ได้เท่ากับ 6,645 เมตร และ ILS สามารถหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ได้เท่ากับ 12,101 เมตร ซึ่งในปัญหาขนาดกลางนี้ ACO มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลต่ำกว่า ILS มากเช่นเดียวกับในปัญหาขนาดกลางและปัญหาใหญ่

ขนาดปัญหา	ค่าคำตอบที่ต่ำที่สุด		ค่าเฉลี่ย		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	ACO	ILS	ACO	ILS	ACO	ILS
เล็ก	3,130	3,130	3,130	3,565	0	148.80
กลาง	4,470	4,670	4,575	5,841	55.81	263.98
ใหญ่	6,325	8,072	6,645	12,101	128.11	916.38



ภาพที่ 2 เส้นทางและลำดับการจอดรถที่เหมาะสม

2. การหาความถี่ที่เหมาะสมของการเดินรถในแต่ละวันจากการสร้างแบบจำลอง
เมื่อทราบเส้นทางที่ใช้เดินรถแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การสร้างแบบจำลองการเดินรถเพื่อ
หาความถี่ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากแถวคอยในระบบ ถ้าหากเวลาการรอกคอยและจำนวนประชากร
ในแถวคอยยิ่งมาก แสดงว่านักศึกษาต้องใช้เวลาในการรอกคอยในระบบมากขึ้นเท่านั้น การทดลอง
ได้กำหนดการจัดความถี่ให้เท่ากับ 3, 5 และ 7 นาทีต่อ 1 คัน และจะให้ความสำคัญกับจุด P และ
ผลรวมของทั้ง 11 จุด

ตารางที่ 6 ตัวอย่างผลลัพธ์จำนวนประชากรในแถวคอยในแต่ละวัน

จุดจอด	โอกาสที่ผู้โดยสาร จากจุด P จะลง (%)	จำนวนประชากรในแถวคอย					
		3 นาทีต่อ 1 คัน		5 นาทีต่อ 1 คัน		7 นาทีต่อ 1 คัน	
		เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
จุดขึ้นรถ (P)	-	7.3349	23	45.1	117	129.09	259
1	18	0.312	3	1.54	7	1.7131	5
...	...	...	...	...	...	...	...
10	3	1.54	7	17.131	5	0.312	3
จำนวนประชากรในแถวคอยเฉลี่ย		2	7.56	5.37	14.09	13.02	25.71

เนื่องจากจุดจอดที่อยู่ใกล้กับต้นทางเวลาการรอคอยจะน้อยเนื่องจากรถเดินทางมาถึงเร็วต่างจากจุดจอดที่อยู่ห่างจากต้นทาง และจุด P เป็นจุดเริ่มต้นประชากรจะหนาแน่นมากที่สุดส่งผลให้มีการรอคอยนาน จากงานวิจัยของปัญญา เทียนนาวาและคณะ (2559) ได้ใช้แบบจำลองเพื่อหาความถี่การจัดตารางการเดินรถที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากเวลาการรอคอย

จากตารางที่ 7 ผลลัพธ์ได้แสดงให้เห็นว่า ในวันจันทร์ถึงพฤหัสบดี ควรจัดให้มีการเดินรถ 3 นาทีต่อ 1 คัน ส่วนในวันศุกร์สามารถลดความถี่เป็น 5 นาทีต่อคันได้ และในวันเสาร์อาทิตย์ที่มีจำนวนประชากรน้อย สามารถลดความถี่ลงเหลือ 7 นาทีต่อคันได้ ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการเพิ่มการพิจารณาจำนวนประชากรในแถวคอยจากตารางที่ 7 เป็นตัวอย่างของผลลัพธ์จากวันจันทร์ ถ้าหากให้จัดให้มีการเดินรถ 3 นาทีต่อ 1 คัน ประชากรในแถวคอยเฉลี่ยทั้ง 11 จุดสูงสุดจะอยู่ที่ 5 คน แต่ถ้าหากจัดตารางให้รถออก 5 นาทีต่อ 1 คัน ในแถวคอยจะมีประชากรเพิ่มขึ้นเป็น 15 คนและ 29 คน ในความถี่ที่ 7 นาทีต่อ 1 คัน ถ้าหากพิจารณาที่จุด P จำนวนประชากรจะอยู่ที่ประมาณ 45 คน และ 117 คน ดังนั้นในความถี่ดังกล่าวอาจส่งผลให้ประชากรอาจเดินทางไปถึงจุดหมายไม่ทันเวลา เพราะฉะนั้นควรจัดให้มีเวลาในการเดินรถที่ 3 นาทีต่อ 1 คัน เนื่องจากถ้าลดความถี่ลงจะส่งผลกระทบต่อเวลาเดินทางของนักศึกษาทันที จากตารางที่ 7 จะเห็นว่า วันอังคาร พุธ และพฤหัสบดี ความหนาแน่นของประชากร ณ จุด P จะอยู่ที่ประมาณ 500-600 คน จากตารางที่ 8 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็น 3 และ 5 นาทีต่อ 1 คัน ประชากรในแถวคอยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 45 คน เวลาการรอคอยสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 115-117 คน และสูงที่สุดในวันพุธซึ่งประชากรในแถวคอยจะสูงถึง 220 คน และถ้าหากพิจารณาเวลารอคอยเฉลี่ยรวมทั้ง 11 จุดจะพบว่า การจัดตารางการเดินรถที่ความถี่ 3 และ 5 นาทีต่อ 1 คันจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบมากนัก แต่ความถี่ที่เหมาะสมในการเดินรถในวันดังกล่าวควรอยู่ที่ 3 นาทีต่อ 1 คัน เพราะต้องคำนึงถึงจุด P และเวลาการเดินทางของรถไฟฟ้า ส่วนในวันศุกร์มีประชากรประมาณ 400 คน การเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 3 และ 5 นาทีต่อ 1 คัน ไม่ส่งผลต่อการรอคอยในจุด P มากนัก ซึ่งประชากรในแถวคอยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 5 คนเท่านั้น ส่วนประชากรในแถวคอยสูงสุดจะเพิ่มขึ้นจาก 17 คน เป็น 25 คน และ

ถ้าหากจัดตารางการเดินรถที่ความถี่ 7 นาที ประชากรในแถวคอยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นจาก 9 คน เป็น 12 คน และสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเป็น 83 คน ดังนั้นความถี่ที่เหมาะสมในการเดินรถในวันดังกล่าวควรอยู่ที่ 5 นาทีต่อ 1 คัน สุดท้ายในวันเสาร์อาทิตย์ที่มีประชาน้อยที่สุดคือประมาณ 100 คน การจัดตารางการเดินรถที่ความถี่ 3, 5 หรือ 7 นาทีต่อ 1 คัน ประชากรในแถวคอยสูงสุดของทั้งจุด P และ เฉลี่ยรวมของทั้ง 11 จุด อยู่ที่ประมาณ 3 และ 12 คน ซึ่งถือว่าไม่มากนัก ดังนั้นถ้าหากต้องการประหยัดต้นทุนในวันเสาร์และอาทิตย์สามารถกำหนดตารางการเดินรถที่ความถี่ที่ 7 นาทีต่อ 1 คัน

ตารางที่ 7 ข้อมูลจำนวนประชากรเฉลี่ยและสูงสุดทั้ง 7 วัน

วัน	จำนวนประชากร ในแถวคอย	3 นาทีต่อ 1 คัน		5 นาทีต่อ 1 คัน		7 นาทีต่อ 1 คัน	
		เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย
จันทร์	จุด P	7	23	45	117	129	259
	เฉลี่ย 11 จุด	1	5	5	15	14	29
อังคาร	จุด P	7	23	45	117	129	259
	เฉลี่ย 11 จุด	1	5	5	15	13	29
พุธ	จุด P	9	26	102	220	131	284
	เฉลี่ย 11 จุด	1	5	1	24	13	30
พฤหัสบดี	จุด P	7	21	58	115	116	232
	เฉลี่ย 11 จุด	1	5	6	14	12	26
ศุกร์	จุด P	5	17	9	25	43	83
	เฉลี่ย 11 จุด	1	4	2	6	6	13
เสาร์	จุด P	1	9	2	9	3	12
	เฉลี่ย 11 จุด	1	3	1	4	1	5
อาทิตย์	จุด P	1	9	2	9	3	12
	เฉลี่ย 11 จุด	1	3	1	4	1	5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสถานการณ์ในการนำระบบรถพลังงานไฟฟ้าสาธารณะมาใช้ในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์เพื่อลดการเกิดอุบัติเหตุและลดการใช้พลังงาน ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการประยุกต์ใช้เมตาฮีริสติกส์เพื่อหาเส้นทางและจุดจอดของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม และขั้นตอนที่ 2 คือ สร้างแบบจำลองเพื่อหาความถี่ตารางการเดินรถในแต่ละวันในขั้นตอนการหาเส้นทางและจุดจอดของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองพบว่า ACO สามารถหาระยะทางได้สั้นกว่า ILS ในทุกขนาดปัญหา ปัญหาขนาดเล็กที่จะ

นำไปใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง รวมระยะทางทั้งสิ้น 3,130 เมตร จากนั้นนำเส้นทางที่ได้มาสร้างแบบจำลอง การเดินทางเพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมของการเดินทางในแต่ละวันใช้การพิจารณาจากเวลาการรอคอย โดยทดลองจัดตารางการเดินทางให้มีความถี่เท่ากับ 3, 5 และ 7 นาทีต่อ 1 คัน และโจทย์จะใช้เวลาแตกต่างของตารางการใช้ห้องเรียน ทำให้แต่ละวัน เวลาการมาถึงจำนวนประชากร และจุดหมายจะแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า แบบจำลองสามารถใช้วางแผนในการจัดตารางความถี่การเดินทางให้เหมาะสมได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ถ้าหากเปรียบเทียบกับงานวิจัยของปัญญา เทียนนาวา และคณะ (2559) เพราะความถี่ที่เหมาะสมของการจัดตารางการเดินทางของรถไฟฟ้ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองนี้สามารถเป็นแนวทางการศึกษาในอนาคตได้

ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลการวิจัยไปใช้

งานวิจัยนี้ไม่มีระบบรถไฟฟ้าอยู่จริงในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบแบบจำลองกับระบบจริงได้ รวมไปถึงไม่สามารถเก็บข้อมูลจริงได้เนื่องจากไม่ทราบพฤติกรรมของประชากรทำได้แค่เพียงจำลองข้อมูลจากพฤติกรรมการตารางการใช้ห้องเรียนเท่านั้น ทำให้แบบจำลองที่ได้ยังขาดความสมจริง ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคตดังนี้

1. ถ้าในมหาวิทยาลัยมีการนำรถไฟฟ้าไปใช้จริงควรดูปัจจัยอื่นๆ อีกนอกเหนือจากงานวิจัยที่กล่าว ได้แก่ การเปลี่ยนตึกเรียนในการไปเรียนของช่วงเวลาที่มีการใช้รถไฟฟ้าสูง เช่น เวลาเรียนคาบแรกของวันหรือเวลาพักกลางวันที่นักศึกษาจำเป็นต้องใช้รถไฟฟ้าพร้อมกันว่าคุ้มค่ากับการลงทุนในระยะยาวหรือไม่
2. ยังมีการเดินทางทับในจุดเดิม ซึ่งอาจจะทำให้ระยะทางเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงควรออกแบบจุดจอดให้สามารถเดินทางไปได้ทันทีโดยไม่ต้องกลับรถ
3. ยังมีอีกหลายกรณีที่ที่น่าสนใจและยังไม่ได้ถูกพิจารณา เช่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วรถไฟฟ้า จำนวนคนที่รอคอย การทดลองกับเมตาฮิวริสติกส์รูปแบบอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ปัญญา เทียนนาวา ธนภัทร มะณีแสง และขวัญนิธิ คำเมือง. (2559). การศึกษาระบบการขนส่งด้วยรถไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง ครั้งที่ 4. หน้า 273-283.
- ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. (2554). วิธีการเมตาฮิวริสติกส์เพื่อแก้ปัญหการวางแผนการผลิตและการจัดการโลจิสติกส์. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- รุ่งรัตน์ ภิรัชเพ็ญ. (2550). คู่มือการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Arena. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีไอเดียเคชั่น.

- เสกสรรค์ วินยางค์กุล และคณะ. (2557). การประยุกต์ตัวแบบปัญหาการเดินทางของเซลล์แมน
กรณีศึกษาการจัดเส้นทางรถรางนำเที่ยวของเทศบาลนครเชียงราย. **วารสารวิชาการคณะ
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, ปีที่ 7 ฉบับที่ 2. หน้า 85-97.
- Helena R. et al. (2001). Handbook of metaheuristics iterated local search. **Operations
Research & Management Science**, V. 57, pp 320-353.