วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้วิธีการอาณานิคมมดสำหรับการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวของจังหวัดนนทบุรี

Application of ant colony algorithm for tourism routing arrangement of Nonthaburi

ธนากร เกตุแก้วเกศกุล* สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Thanakorn Ketkaewketsakul* Supaporn Suwannarongsri

Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: s6101052810045@email.kmutnb.ac.th; Telephone: 091-819-0400

วันที่รับบทความ 24 กุมภาพันธ์ 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 17 เมษายน 2563 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 17 กรกฎาคม 2563
วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 17 สิงหาคม 2563 วันที่ตอบรับบทความ 26 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการอาณานิคมมดร่วมกับขั้นตอนการปรับปรุงประสิทธิภาพคำตอบซึ่งประกอบด้วยวิธีการสลับตำแหน่ง, วิธีการสลับคู่ตำแหน่ง และวิธีการแทรกจุด ในการวางแผนการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวของแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการเดินทางท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี ผลการวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึมที่นำเสนอประกอบด้วย อัตราการระเหยของฟีโรโมนเท่ากับ 0.9, น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนและน้ำหนักความสำคัญระยะทางเท่ากับ 5 และจำนวนมดเท่ากับ 10 ตัว โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถคำนวณเส้นทางการท่องเที่ยวที่เหมาะสมที่สุดได้เท่ากับ 76.5 กิโลเมตร ที่ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบเฉลี่ย 1.003 วินาที นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทดสอบอัลกอริทึมกับปัญหามาตรฐานจำนวน 15 ชุดปัญหา ผลการทดลองพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ทุกกรณีปัญหา โดยชุดปัญหา KroA150 เป็นชุดปัญหาที่ให้คำตอบที่คลาดเคลื่อนมากที่สุดซึ่งเท่ากับ 1.79 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอได้ถูกทดสอบโดยเปรียบเทียบคำตอบกับวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม วิธีการเชิงวิวัฒนาการ และวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด โดยแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม วิธีการเชิงวิวัฒนาการ และวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

คำสำคัญ

วิธีการอาณานิคมมด ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย การวางแผนเส้นทาง เมตาฮิวริสติกส์ ปัญหามาตรฐาน

Abstract

The research presented the Ant Colony Algorithm together with Local search including Swap, 2-opt and Insert Point to plan the route arrangement of Nonthaburi tourist attractions. The purpose of this research was to find the shortest paths for route to travel in Nonthaburi. The results showed that the best parameters for the algorithm used in the research included the pheromone evaporation equal to 0.9, the relative influence of the pheromone and the heuristic information equal to 5 and ant population equal to 10. The algorithm which was presented could calculate the optimal

path which were equal to 76.5 kilometers using 1.003 seconds of average processing time. In addition, the research also tested algorithm with 15 Benchmark Problems. It appeared that the algorithm which was presented could search solutions all Benchmark Problems. The kroA150 Problem had the highest error deviation equal to 1.79 percent. The research compared the optimal solutions with Traditional Ant colony algorithm, Evolutionary and Nearest Neighbor algorithm. It showed that the algorithm which was presented outperformed Traditional Ant Colony algorithm, Evolutionary algorithm and Nearest Neighbor algorithm

Keywords

ant colony algorithm; traveling salesman problem; route planning; metaheuristics; benchmark problems

1. บทนำ

การท่องเที่ยวนับเป็นเครื่องยนต์ขับเคลื่อนเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของไทยในช่วงหลายปีที่ผ่านมานี้ โดยภาคการท่องเที่ยวนับเป็นปัจจัยหนุนทางเศรษฐกิจที่สำคัญในภาวะที่การส่งออกและการลงทุนยังคงซบเซา ซึ่งรายได้จากการท่องเที่ยวของชาวไทยและต่างชาติในช่วงครึ่งแรกของปี 2562 มีบทบาทสำคัญถึงร้อยละ 17 ของผลิตภัณฑ์มวลรวม (GDP)

จังหวัดนนทบุรี เป็นจังหวัดหนึ่งที่ตั้งอยู่ในภาคกลางของประเทศไทย และจัดเป็นพื้นที่ในเขตปริมณฑลของกรุงเทพมหานคร ซึ่งส่งผลให้มีความสะดวกในเรื่องของการขนส่งสาธารณะ โดยจากจำนวนสถิติประชากรการท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ จะพบว่ามีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ถึงแม้การเติบโตของจำนวนนักท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรีจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรายได้จากการท่องเที่ยวรายจังหวัดของภาคกลางจากมากไปน้อย รายได้ของจังหวัดนนทบุรีจะอยู่ลำดับที่ 18 จาก 25 จังหวัด จึงทำให้ผู้วิจัยเห็นถึงความสำคัญและพัฒนางานวิจัยนี้ขึ้นมา ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อศึกษาเส้นทางการท่องเที่ยวของสถานที่ท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี และจัดเส้นทางการท่องเที่ยว โดยการนำวิธีอาณานิคมมดมาประยุกต์ใช้ในการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวซึ่งประกอบด้วย ศูนย์ราชการจังหวัดฯ ศูนย์แสดงสินค้าอิมแพคฯ ท่าน้ำนนทบุรี เกาะเกร็ด วัดเล่งเน่ยยี่ 2 วัดสวนแก้ว วัดสังฆทาน วัดเฉลิมพระเกียรติฯ วัดกู้ ตลาดน้ำไทรน้อย ตลาดน้ำวัดตะเคียน ตลาดน้ำบางคูลัด ตลาดน้ำวัดแสงสิริธรรม ตลาดน้ำประชารัฐสวนบัว และตลาดน้ำวัดใหญ่ฯ รวมทั้งหมด 15 แห่ง ให้มีระยะทางที่สั้นที่สุด เพื่อเป็นการส่งเสริมให้การท่องเที่ยวภายในจังหวัดนนทบุรีมีความสะดวกมากขึ้น อันเป็นการกระตุ้นรายได้จากภาคการท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรีให้เพิ่มสูงยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นแนวทางในการต่อยอดพัฒนาการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในจังหวัดอื่นได้

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การจัดเส้นทางการท่องเที่ยวตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีผู้วิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษา เช่น ในงานวิจัยของ นภดล ธนภัทร และคณะ [1] ได้ประยุกต์วิธีอาณานิคมมดและวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำในการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในอำเภอเขาค้อ โดยแบ่งขนาดปัญหาออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ ปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ โดยแต่ละขนาดจะมีแหล่งท่องเที่ยวจำนวน 10, 15 และ 20 จุด ตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ได้จากทั้งสองวิธี วิธีอาณานิคมมดจะมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนซ้ำทุกกรณีปัญหา, ชิด ชนก บุสริน และคณะ [2] ประยุกต์วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดในการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในจังหวัดนครนายก และใช้วิธีกำหนดการเชิงเส้นในการคำนวณหาระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่ต่ำที่สุด โดยสภาพการณ์ปัญหาของงานวิจัยประกอบด้วยสถานที่ท่องเที่ยว 4 แห่ง ซึ่งกำหนดให้เริ่มเดินทางจากอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ ผลการทดลองพบว่าทฤษฎีที่ผู้วิจัยนำเสนอสามารถลดระยะทางการท่องเที่ยวลงได้ร้อยละ 13.34, เสริมศิริ กษิดิศ และคณะ [3] ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการวิจัยเชิงคุณภาพ ด้วยวิธีการวิเคราะห์เอกสาร การสนทนากลุ่ม การสัมภาษณ์เชิงลึก และการสังเกตการณ์แบบไม่มีส่วนร่วม ในการพัฒนาเส้นทางการท่องเที่ยวตามรอยชาติพันธุ์ในจังหวัดเชียงราย โดยมุ่งบนเส้นทางท่องเที่ยวเศรษฐกิจของจังหวัดเชียงรายเป็นหลัก ผลการวิจัยพบว่าสามารถพัฒนาได้ 3 เส้นทางสำคัญ คือ เส้นทางท่องเที่ยวที่ 1 ธรรมชาติตาม

รอยชาติพันธุ์ เส้นทาง 2 วิถีภูเขากับชนเผ่าชาติพันธุ์ และเส้นทางที่ 3 เยือนยลหลากชาติพันธุ์สีสันดอยตุง และเมื่อประเมินมาตรฐานของเส้นทางการท่องเที่ยวชาติพันธุ์ทั้ง 3 เส้นทาง พบว่า ทุกเส้นทางมีมาตรฐานในระดับปานกลาง, พัชรินทร์ และคณะ [4] ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcGis Desktop 9.3 และการวิเคราะห์โครงข่ายในการจัดเส้นทางแหล่งท่องเที่ยวชุมชนของอำเภอปากพะยูน รวมทั้งสิ้น 26 แห่ง โดยผลการทดลองพบว่าสามารถจัดเส้นทางแหล่งท่องเที่ยวชุมชนของอำเภอปากพะยูนได้ระยะทางรวม 21.22 กิโลเมตร

สำหรับการจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรีซึ่งเป็นปัญหาในงานวิจัยนี้ จะมีลักษณะเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ที่รู้จักกันในนามของปัญหา ทีเอสพี (TSP) โดยปัญหาทีเอสพีนี้เป็นปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง เมื่อมีเมืองหรือสถานที่ที่ต้องเดินทางไปจำนวน N เมือง หรือ N สถานที่ โดยที่การเดินทางจะเดินทางจากเมืองใดเมืองหนึ่งในจำนวน N เมือง ซึ่งเส้นทางการเดินทางนั้นจะต้องเดินทางผ่านเมืองทุกเมืองใน N และกลับมาที่เมืองที่ทำการเริ่มต้นในการเดินเหมือนการเดินวนรอบ [5] โดยปัญหาทีเอสพีเป็นหนึ่งในปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างต่อเนื่อง เช่น งานวิจัยของ เสกสรร นิเวศน์ และคณะ [6] ได้ประยุกต์ใช้ตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยมีรถรางนำเที่ยวของเทศบาลนครเชียงรายเป็นกรณีศึกษา จากนั้นจึงประยุกต์วิธีโปรแกรมเชิงเส้นและวิธีการประหยัดในการหาคำตอบของตัวแบบ ผลการวิจัยพบว่า วิธีโปรแกรมเชิงเส้นสามารถให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีการประหยัดคิดเป็นร้อยละ 9.075 พัชรลักษณ์ [7] ได้ประยุกต์ใช้ปัญหาการเดินทางของพนักขายและวิธีการค้นหาแนวลึก ในการพัฒนาเส้นทางในการเดินทางไปพบลูกค้า ผลการวิจัยพบว่าสามารถลดระยะทางและค่าใช้จ่ายในการเดินทางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเดินทางแบบเดิม ทัศนวรรณ ศิวิสา และคณะ [8] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมในการจัดเส้นทางการเดินรถของรถรับส่งนักเรียนที่มีรูปแบบเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ซึ่งผลการวิจัยพบว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมง่ายต่อการประมวลผลข้อมูล อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลให้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีโปรแกรมเชิงจำนวนเต็ม Mohammad Narges และคณะ [9] ได้พัฒนาต่อยอดอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า ICATS ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ซึ่งอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยได้นำเสนอนั้น ได้ประยุกต์หลักการทำงานของวิธีการแข่งขันเชิงจักรวรรดินิยมและวิธีการค้นหาแบบตาบู เข้าร่วมกันในการค้นหาคำตอบ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ชุดปัญหามาตรฐานจาก TSPLIB จำนวน 25 ชุด เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้กับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม อัลกอริทึมแบบฝูงผึ้ง และอัลกอริทึมแบบกลุ่มอนุภาค ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึม ICATS สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าทุกอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบ Yingying Yan และคณะ [10] ได้พัฒนาอัลกอริทึมที่มีรากฐานจากอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม รวมทั้งประยุกต์วิธีการปรับปรุงคำตอบ ประกอบด้วย วิธีการอยู่รอดของผู้แข็งแรงที่สุด วิธีการสลับสายพันธุ์ และวิธีการกลายพันธุ์แบบผกผัน ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่มีขนาดปัญหาจำนวน 50 จุด และมีระยะที่สั้นที่สุดเท่ากับ 554.282 ผลการวิจัยพบว่า อัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้เท่ากับ 561.851 หรือคิดเป็นความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.36 Yongsheng และคณะ [11] ได้พัฒนาขั้นตอนปรับปรุงคุณภาพคำตอบรูปแบบใหม่ที่มีชื่อว่า Dismantling Cross Paths โดยขั้นตอนดังกล่าวสามารถใช้ในการกำจัดเส้นทางที่ไขว้กันจนเกิดเป็นลูปได้ ซึ่งช่วยลดระยะทางรวมลงได้ โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ขั้นตอนดังกล่าวร่วมกับขั้นตอนวิธีการละโมบ ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายจาก TSPLIB จำนวน 6 ชุด ประกอบด้วย Ulysse22, Att48, Eil51, Berlin52, St70 และ Eil101 พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับอัลกอริทึมอื่นประกอบด้วย วิธีอาณานิคมมด, วิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีอีลาสติกเน็ตเวิร์ค ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ระยะทางรวมดีกว่าทุกอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบ ยกเว้นชุดปัญหา Ulysses22 อัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าความคลาดเคลื่อนในการค้นหาคำตอบมากกว่าทุกอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบ Wang [12] ได้ประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรม ร่วมกับขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพคำตอบประกอบด้วย วิธีการหาความเหมาะสม, วิธีการคัดเลือก, วิธีการสลับสายพันธุ์ และวิธีการกลายพันธุ์ ในการแก้ไขปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยได้เลือกทดสอบกับชุดปัญหา

Att48 ซึ่งเป็นชุดปัญหามาตรฐานจาก TSPLIB เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับวิธีเชิงพันธุกรรมแบบดั้งเดิมและวิธีการจำลองการอบเหนียว ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบดั้งเดิมร้อยละ 2.72 และสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการจำลองการอบเหนียวร้อยละ 9.24

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์วิธีการอาณานิคมมดในการจัดเส้นทางการท่องเที่ยว โดยวิธีอาณานิคมมดได้พัฒนาขึ้นเป็นเมตาฮิวริสติกส์และเผยแพร่โดย Dorigo และ Di Caro [13] โดยที่มาของวิธีอาณานิคมมดได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมจริงของมดที่ออกไปหาอาหาร โดยมดจะเดินทางจากรังไปสู่แหล่งอาหารและกลับมาที่รังอีกครั้งหลังจากได้อาหารแล้ว ซึ่งในระหว่างเดินทาง มดจะปล่อยสารเคมีที่ชื่อว่าฟีโรโมน เพื่อให้มดตัวอื่นๆ เดินทางตามฟีโรโมนนั้น ๆ [14] ทั้งนี้วิธีอาณานิคมมดเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการการแก้ไขปัญหาการขนส่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เช่น งานวิจัยของสุพรรณ อดิศักดิ์ และคณะ [15] ได้ประยุกต์วิธีอาณานิคมมด ในการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งโดยมีพาหนะขนส่งหลายขนาดและการขนส่งอยู่ภายใต้กรอบเวลาที่จำกัด ผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบที่ดีกว่าโปรแกรมลินโกที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นและมีคุณภาพคำตอบที่ดีขึ้นร้อยละ 1.47, ฐิตินนท์ และคณะ [16] ได้ประยุกต์วิธีอาณานิคมมดในการจัดเส้นทางยานพาหนะของบริษัทเจียรนัยน้ำดื่ม ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอให้ผลลัพธ์อยู่ในระดับที่ดี โดยสามารถลดระยะทางเดิมลงได้ร้อยละ 24.46, กิตติโรจน์ และคณะ [17] ได้ประยุกต์วิธีอาณานิคมมดในการจัดเส้นทางการเดินรถแบบสโทแคสติกที่ไม่ทราบความต้องการของลูกค้าอย่างแน่นอนก่อนล่วงหน้า โดยผลการทดลองพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดต้นทุนค่าขนส่งลงได้เมื่อเทียบกับวิธีการเดิม Xiaojiang Jiapin และ Min [18] ได้พัฒนาวิธีการอาณานิคมมด ในการแก้ไขปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่มีขนาดปัญหาขนาดใหญ่ ซึ่งได้เลือกใช้ชุดปัญหามาตรฐานจาก TSPLIB จำนวน 5 ชุด ประกอบด้วย Pr107, Pr136, Pr152, Pr226 และ FL1400 โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์หลักการแบ่งกลุ่มตามความหนาแน่น ในการแบ่งกลุ่มสถานที่ออกเป็นหลายกลุ่ม เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาก่อนที่จะดำเนินการในส่วนของวิธีการอาณานิคมมดต่อไป ทั้งนี้ผู้วิจัยยังได้พัฒนาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวิธีการอาณานิคมมดให้สามารถดำเนินการปรับตัวเองตามความเหมาะสมในการค้นหาคำตอบ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม วิธีการอาณานิคมมดที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีกว่าทั้งในเรื่องของระยะทางรวมและระยะเวลาในการทำงานเพื่อค้นหาคำตอบของปัญหา Pragya Pratyush และ Maitreyee [19] ได้พัฒนาต่อยอดอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า Dimensional Ant Colony Optimization (DACO) ซึ่งมีรากฐานจากวิธีอาณานิคมมด ในการแก้ไขปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกทดสอบกับชุดปัญหามาตรฐานจาก TSPLIB จำนวน 2 ชุดประกอบด้วย Eil51 และ Berlin52 และเปรียบเทียบประสิทธิภาพคำตอบกับวิธีอาณานิคมมดแบบดั้งเดิมและวิธีแบบกลุ่มอนุภาค ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอ สามารถค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอาณานิคมมดและวิธีแบบกลุ่มอนุภาคแบบดั้งเดิมทั้งในเรื่องของระยะทางรวมและเวลาในการทำงาน ของอัลกอริทึม Bai Sun และ Cao [20] ได้พัฒนาอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า Cellular Ant Algorithm โดยเป็นการประยุกต์วิธีการอาณานิคมมด และแบบจำลองเซลล์ลูลาร์ออโตมาตา เข้าด้วยกัน โดยผู้วิจัยได้ใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายในรูปแบบอัตราส่วนของระยะทางต่อกำไรที่มีขนาดปัญหา 10 จุด เพื่อหาอัตราส่วนเส้นทางต่อกำไรรวมที่ดีที่สุด ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึมมดแบบดั้งเดิม โดยได้กำหนดจำนวนรอบการทำงานไว้ที่ 1,000 และ 10,000 รอบ ผลการวิจัยพบว่าที่จำนวนรอบการทำงาน 1,000 รอบ อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าอัลกอริทึมมดดั้งเดิมร้อยละ 3.42 และที่จำนวนรอบการทำงาน 10,000 รอบ อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าอัลกอริทึมมดดั้งเดิมร้อยละ 5.4 Lin และ Zhang [21] ได้ศึกษาการทำงานของวิธีการอาณานิคมมด และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวิธีการอาณานิคมมด รวมทั้งประยุกต์วิธีการ 2-Opt ในการปรับปรุงคุณภาพคำตอบในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ชุดปัญหามาตรฐานจาก TSPLIB จำนวน 3 ชุดปัญหา

ประกอบด้วย Dantzig42 Eil76 และ Ch130 ในการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอ ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ทุกกรณีปัญหา รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดี Ivan และ Zuzana [22] ได้ประยุกต์วิธีการอาณานิคมมด ในการแก้ปัญหาการเดินทางทั้ง 32 เมืองในประเทศสโลวาเกีย ซึ่งมีรูปแบบปัญหาเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ที่มีระยะทางที่สั้นที่สุดเท่ากับ 1,453 กิโลเมตร ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการทำงานของวิธีการอาณานิคมมดโดยการกำหนดระดับจำนวนมด 100, 1,000, 5,000 และ 10,000 ตัว ที่จำนวนรอบการทำงาน 1,000 รอบ เท่ากันทุกระดับการทดลอง ผลการวิจัยพบว่าจำนวนมดที่มากขึ้นส่งผลต่อคำตอบอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยจำนวนมดที่ 10,000 ตัว สามารถค้นหาคำตอบได้เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 1,465 กิโลเมตร ซึ่งคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่ดีที่สุดร้อยละ 0.83 Naixue Wenliang และ Chunxue [23] ได้พัฒนาวิธีการอาณานิคมมด โดยการประยุกต์หลักการแนวคิดเครือข่ายสังคม ที่เป็นโครงสร้างทางสังคมแบบหนึ่งที่เกิดจากการรวมตัวกันของผู้คนในการเชื่อมโยงจุดการเดินทางของปัญหาการเดินทางของพนักงานขายให้มีระยะทางที่ดีขึ้น โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ชุดปัญหามาตรฐานจาก TSPLIB ประกอบด้วย ชุดปัญหา Berlin52 และ Rat99 ในการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการทดสอบกับวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม ผลจากการวิจัยพบว่าวิธีการอาณานิคมมดที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นโดยการประยุกต์หลักการเครือข่ายสังคมนั้น สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม โดยชุดปัญหา Berlin52 วิธีการอาณานิคมมดที่พัฒนาขึ้นสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิมร้อยละ 3.00 และชุดปัญหา Rat99 วิธีการอาณานิคมมดที่พัฒนาขึ้นสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิมร้อยละ 1.96

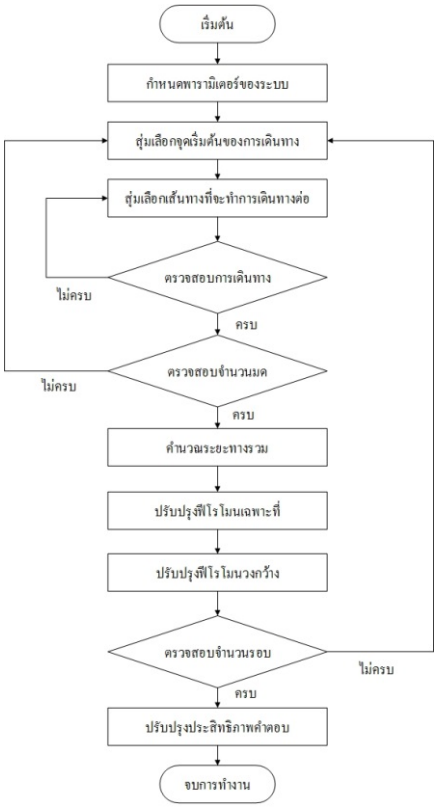
3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของวิธีดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยเริ่มจากการศึกษาสถานที่ท่องเที่ยวที่น่าสนใจในจังหวัดนนทบุรีจากฐานข้อมูลต่าง ๆ และได้รวบรวมมาทั้งหมด 15 แห่ง แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นจึงนำพิกัดตำแหน่งของแต่ละสถานที่ไปวิเคราะห์ในโปรแกรม Google Map เพื่อหาระยะขจัดของแต่ละสถานที่และสร้างเมตริกซ์ระยะทางที่มีระยะทางไปกลับแบบสมมาตรสำหรับใช้จัดเส้นทางการท่องเที่ยว

โดยในส่วนของอัลกอริทึมที่นำเสนอสำหรับจัดเส้นทางการท่องเที่ยวผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่ใช้หลักการวิธีการอาณานิคมมด ซึ่งวิธีการอาณานิคมมดจะเป็นวิธีการหาค้นหาคำตอบที่เลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของมด โดยยึดหลักการที่ว่ามดจะเลือกเดินทางไปยังแหล่งอาหารด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุดตามร่องรอยสารฟีโรโมนที่มดตัวอื่นทิ้งไว้ ซึ่งคุณสมบัติของสารฟีโรโมนจะมีการระเหยไปตามระยะเวลา ดังนั้นจึงส่งผลให้ระยะทางจากรังไปยังแหล่งอาหารที่สั้นที่สุดจะมีสารฟีโรโมนที่เข้มข้นมากที่สุด ทั้งนี้ในส่วนของอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอ มีขั้นตอนการทำงานสำหรับค้นหาคำตอบแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของแต่ละสถานที่

สถานที่ท่องเที่ยว	พิกัดตำแหน่งที่ตั้ง	
	ละติจูด	ลองจิจูด
ศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี	13.8602992	100.5139385
ศูนย์แสดงสินค้าอิมแพคฯ	13.9127425	100.546514
ท่าน้ำนนทบุรี	13.8424051	100.4915024
เกาะเกร็ด	13.912832	100.490059
วัดเล่งเน่ยยี่ 2	13.9129067	100.4214069
วัดสวนแก้ว	13.8618207	100.4423134
วัดสังฆทาน	13.8261237	100.4926434
วัดเฉลิมพระเกียรติฯ	13.8480456	100.4830699
วัดกู้	13.9317531	100.5051651
ตลาดน้ำไทรน้อย	13.978209	100.3117949
ตลาดน้ำวัดตะเคียน	13.8275844	100.4227616
ตลาดน้ำบางคูลัด	13.841607	100.3638223
ตลาดน้ำวัดแสงสิริธรรม	13.9024449	100.4721168
ตลาดน้ำประชารัฐสวนบัว	13.8667418	100.4470197
ตลาดน้ำวัดใหญ่ฯ	13.912338	100.4652977



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

จากรูปที่ 1 มีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์ของระบบ: เป็นการกำหนดพารามิเตอร์ของการทำงาน ประกอบด้วย อัตราการระเหยของฟีโรโมน (ρ) น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมน (α) น้ำหนักความสำคัญระยะทาง (β) จำนวนรอบการทำงาน และจำนวนมด

2. สุ่มเลือกจุดเริ่มต้นของการเดินทาง: เป็นการสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของการเดินทาง โดยแต่ละตำแหน่งมีความน่าจะเป็นเท่ากันหมด

3. สุ่มเลือกเส้นทางที่จะทำการเดินทางต่อ: เป็นการสุ่มตำแหน่งที่จะเดินทางต่อ โดยความน่าจะเป็นในแต่ละตำแหน่งจะคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$p_{i,j} = \frac{\tau_{i,j}^{\alpha} \times \eta_{i,j}^{\beta}}{\sum_{j \in s}^{j=1} \left(\tau_{i,j}^{\alpha} \times \eta_{i,j}^{\beta} \right)} \qquad (1)$$

โดยที่ $\tau_{i,j}$ คือ ค่าสารฟีโรโมนในแต่ละเส้นทางของเมืองที่ i ไปเมืองที่ j และ $\eta_{i,j}$ คือ ส่วนกลับระยะทางของเมืองที่ i ไปเมืองที่ j

4. ตรวจสอบการเดินทาง: เป็นการตรวจสอบเงื่อนไขการเดินทางโดยต้องเดินทางผ่านครบทุกเมือง โดยในแต่ละเมืองจะสามารถเข้าและออกได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

5. ตรวจสอบจำนวนมด: เป็นการตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนมดที่ใช้สำหรับการทำงาน

6. คำนวณระยะทางรวม: เป็นการคำนวณระยะทางรวมของมดแต่ละตัว

7. ปรับปรุงฟีโรโมนเฉพาะที่: เป็นการปรับเปลี่ยนฟีโรโมนในแต่ละเส้นทางที่มดเลือกเดิน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\tau_{i,j}^{n} = \left(\tau_{i,j}^{n-1} \right) + \left(\sum_{l=1}^{m} \nabla \eta_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{l}} \right) \qquad (2)$$

โดยที่ $\nabla \eta_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{l}}$ คือ $\frac{Q}{L_l}$ เมื่อ Q คือ ค่าคงที่ค่าใดๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เท่ากับ 1 L_l คือระยะทางรวมของมดตัวที่ l m คือจำนวนมดที่อยู่ใน 1 รอบของการทำงาน และ n คือลำดับรอบการทำงาน

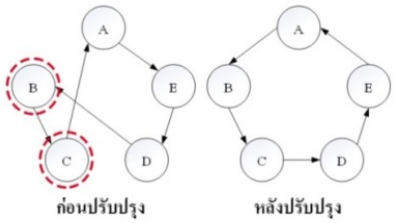
8. ปรับปรุงฟีโรโมนวงกว้าง: เป็นการปรับเปลี่ยนฟีโรโมนทุกเส้นทางทั้งระบบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\tau_{all}^{n} = \left(1 - \rho\right) \left(\tau_{all}^{n-1} \right) \qquad (3)$$

9. ตรวจสอบจำนวนรอบ: เป็นการตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนรอบการทำงานที่กำหนดไว้จนจบการทำงาน

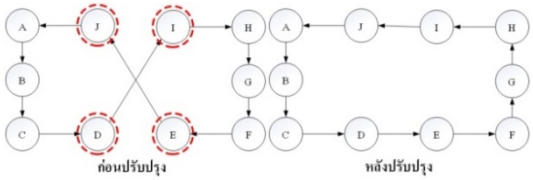
10. ปรับปรุงประสิทธิภาพคำตอบ: เป็นการปรับปรุงคำตอบที่ดีที่สุดหลังจากจบการทำงานของวิธีการอาณานิคมมด ซึ่งจะประกอบด้วย

1. วิธีการสลับตำแหน่ง(Swap): เป็นวิธีการสลับตำแหน่งสองตำแหน่งแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2



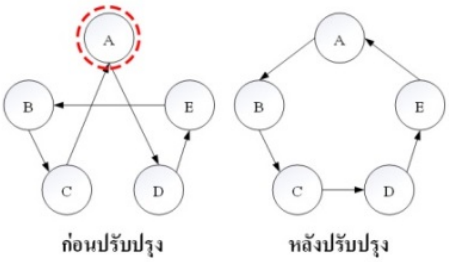
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการปรับปรุงด้วยวิธีสลับตำแหน่ง

2. วิธีการสลับคู่ตำแหน่ง(2-opt): เป็นวิธีการสลับตำแหน่งระหว่างคู่ของตำแหน่งแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการปรับปรุงด้วยวิธีสลับคู่ตำแหน่ง

3. วิธีการแทรกจุด(Insert Point): เป็นวิธีการแทรกที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น โดยการพิจาณาตำแหน่งทุกตำแหน่งสามารถแทรกเข้าไปในทุกคู่ตำแหน่ง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการปรับปรุงด้วยวิธีแทรกจุด

ทั้งนี้ในส่วนขั้นตอนปรับปรุงประสิทธิภาพ จะเริ่มปรับปรุงจากวิธีการสลับตำแหน่ง, วิธีการสลับคู่ตำแหน่ง และวิธีการแทรกจุด ตามลำดับจึงจะครบ 1 รอบการปรับปรุง และจะหยุดทำการปรับปรุงก็ต่อเมื่อ การปรับปรุงรอบปัจจุบันเท่ากับการปรับปรุงรอบล่าสุด กล่าวคือ หลังจากปรับปรุงแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคำตอบ

4. ผลการวิจัย

ในส่วนของผลการวิจัยผู้วิจัยได้ใช้คอมพิวเตอร์ในการวิจัยเป็นคอมพิวเตอร์รุ่น Intel(R) Core(TM) i5-4690 CPU@3.50 GHz Ram 8.00 GB โดยการทดสอบเพื่อแก้ปัญหาของงานวิจัยประกอบด้วย 4 หัวข้อหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม: การทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผู้วิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบอัตราการระเหยของฟีโรโมน (ρ) น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมน (α) และน้ำหนักความสำคัญระยะทาง (β) และการทดสอบจำนวนมด โดยการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้จะใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ทางสถิติและใช้โปรแกรม Matlab ในส่วนของการทำงานของอัลกอริทึม ซึ่งการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทดสอบกับชุดปัญหามาตรฐาน p01 ของ Department of Scientific Computing at Florida State University [24] ซึ่งมีรูปแบบเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่มีขนาดปัญหา 15 ตำแหน่ง โดยมีคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 291 โดยในส่วนของการทดสอบอัตราการระเหยของฟีโรโมน น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมน และน้ำหนักความสำคัญระยะทาง ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเบื้องต้น โดยผู้วิจัยเลือกใช้รูปแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2 Level Factorial Experiment) ซึ่งออกแบบการทดลองให้มีการทำซ้ำ 3 ครั้ง และเพิ่มจุดกึ่งกลาง 3 จุด โดยมีเกณฑ์การเลือกใช้พารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงเกณฑ์การเลือกใช้พารามิเตอร์สำหรับทดสอบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ช่วงการใช้งาน
อัตราการระเหยของฟีโรโมน	ρ	ช่วง 0 ถึง 1
น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมน	α	จำนวนเต็ม 1 ถึง 5
น้ำหนักความสำคัญระยะทาง	β	จำนวนเต็ม 1 ถึง 5

ซึ่งจากตารางที่ 2 ทำให้ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดสอบในขั้นตอนแรกแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับทดสอบหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ระดับปัจจัย	ค่าของพารามิเตอร์
ρ	ระดับต่ำ	0.2
	ระดับสูง	0.8
α	ระดับต่ำ	1
	ระดับสูง	5
β	ระดับต่ำ	1
	ระดับสูง	5

สำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเบื้องต้น ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การทดลองโดยการทดสอบการทำงานของอัลกอริทึมในการหาคำตอบที่จำนวนรอบการทำงาน 500 รอบ และใช้จำนวนมด 10 ตัว จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม โดยผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าคำตอบที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5 และผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7

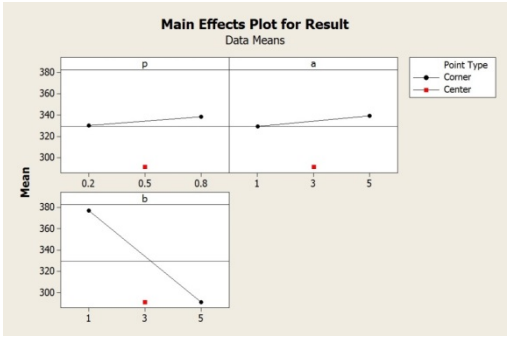
Analysis of Variance for Result (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	45665.3	45665.3	15221.8	1592.98	0.000
p	1	384.0	384.0	384.0	40.19	0.000
a	1	560.7	560.7	560.7	58.67	0.000
b	1	44720.7	44720.7	44720.7	4680.07	0.000
2-Way Interactions	3	1011.3	1011.3	337.1	35.28	0.000
p*a	1	66.7	66.7	66.7	6.98	0.017
p*b	1	384.0	384.0	384.0	40.19	0.000
a*b	1	560.7	560.7	560.7	58.67	0.000
3-Way Interactions	1	66.7	66.7	66.7	6.98	0.017
p*a*b	1	66.7	66.7	66.7	6.98	0.017
Curvature	1	4969.0	4969.0	4969.0	520.01	0.000
Residual Error	18	172.0	172.0	9.6		
Pure Error	18	172.0	172.0	9.6		
Total	26	51884.3				

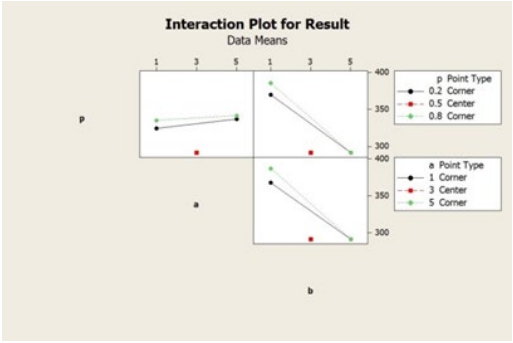
รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ของการทดสอบเบื้องต้น

จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาจากค่า P-Value พบว่าทุกปัจจัยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งกล่าวได้ว่าทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อการหาคำตอบของอัลกอริทึม

จากรูปที่ 6 แสดงถึงผลกระทบของปัจจัยหลัก พบว่าปัจจัยหลักน้ำหนักความสำคัญระยะทางมีอิทธิพลต่อการค้นหาคำตอบมากที่สุด โดยปัจจัยน้ำหนักความสำคัญระยะทางที่ระดับ 5 ส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุด และจากรูปที่ 7 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของปัจจัยร่วมจะพบว่า



รูปที่ 6 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักของการทดสอบเบื้องต้น



รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมของการทดสอบเบื้องต้น

ปัจจัยร่วมน้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนที่ระดับ 5 และน้ำหนักความสำคัญระยะทางที่ระดับ 5 จะส่งผลต่อการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น เนื่องจากให้กราฟฟังก์ชันลดที่สูง

ปัจจัยร่วมน้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนที่ระดับ 5 และอัตราการระเหยฟีโรโมนที่ระดับ 0.8 จะส่งผลต่อการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น เนื่องจากให้กราฟฟังก์ชันลดที่สูง

ปัจจัยร่วมอัตราการระเหยฟีโรโมนที่ระดับ 0.8 และน้ำหนักความสำคัญระยะทางที่ระดับ 5 จะส่งผลต่อการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น เนื่องจากให้กราฟฟังก์ชันเพิ่มที่ต่ำ

จากการวิเคราะห์ทั้งผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ρ	0.8
α	5
β	5

โดยต่อมาจะเป็นขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอย่างละเอียด ซึ่งการทดสอบในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้เลือกการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (General Full Factorial Experiment) โดยออกแบบการทดลองให้มีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับทดสอบหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอย่างละเอียด

พารามิเตอร์	ระดับปัจจัย	ค่าของพารามิเตอร์
ρ	ระดับต่ำ	0.7
	ระดับกลาง	0.8
	ระดับสูง	0.9
α	ระดับต่ำ	4
	ระดับสูง	5
β	ระดับต่ำ	4
	ระดับสูง	5

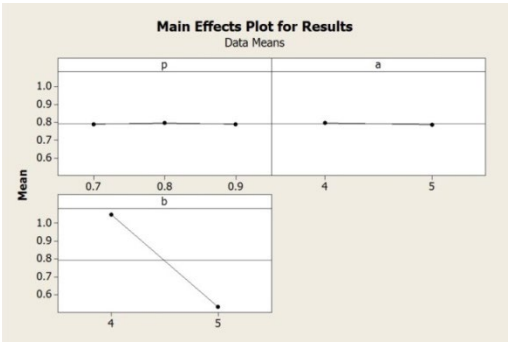
โดยผลการทลองในครั้งแรกพบว่าเมื่อใช้เกณฑ์การทดลองเป็นค่าคำตอบของอัลกอริทึมไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากทุกการทดลองในครั้งนี้ที่จำนวนรอบการทำงาน 500 รอบ และใช้จำนวนมด 10 ตัว ให้ค่าคำตอบเท่ากับ 291 ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Global Solution) ของชุดปัญหา p01 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเปลี่ยนเกณฑ์การทดลองโดยให้โปรแกรมทำงานจนกว่าจะได้คำตอบที่เท่ากับ 291 จากนั้นจึงทำการบันทึกระยะเวลาในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม โดยผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าคำตอบที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 8 และผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10

Analysis of Variance for Results, using Adjusted SS for Tests

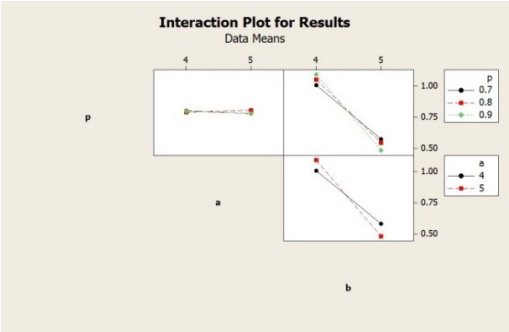
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
p	2	0.00054	0.00054	0.00027	0.16	0.854
a	1	0.00070	0.00070	0.00070	0.42	0.525
b	1	2.41440	2.41440	2.41440	1430.73	0.000
p*a	2	0.00297	0.00297	0.00148	0.88	0.428
p*b	2	0.04669	0.04669	0.02334	13.83	0.000
a*b	1	0.07962	0.07962	0.07962	47.18	0.000
p*a*b	2	0.01897	0.01897	0.00948	5.62	0.010
Error	24	0.04050	0.04050	0.00169		
Total	35	2.60438				

รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ของการทดสอบอย่างละเอียด

จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาจากค่า P-Value พบว่าปัจจัยอัตราการระเหยของฟีโรโมน ปัจจัยน้ำหนักความสำคัญฟีโรโมน และปัจจัยร่วมอัตราการระเหยของฟีโรโมนและน้ำหนักความสำคัญฟีโรโมน จะมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งกล่าวได้ว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีอิทธิพลต่อการค้นหาคำตอบ



รูปที่ 9 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักของการทดสอบอย่างละเอียด



รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมของการทดสอบอย่างละเอียด

จากรูปที่ 9 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก พบว่าปัจจัยหลักน้ำหนักความสำคัญระยะทางที่ระดับ 5 ส่งผลต่อการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด และจากรูปที่ 10 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของปัจจัยร่วมจะพบว่า

ปัจจัยร่วมน้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนที่ระดับ 5 และน้ำหนักความสำคัญระยะทางที่ระดับ 5 จะส่งผลต่อระยะเวลาการประมวลผลเพื่อค้นหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้น เนื่องจากให้กราฟฟังก์ชันลดสูงที่สุด รวมทั้งให้ค่าระยะเวลาต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกราฟอื่น

ปัจจัยร่วมอัตราการระเหยของฟีโรโมนที่ระดับ 0.9 และน้ำหนักความสำคัญระยะทางที่ระดับ 5 จะส่งผลต่อระยะเวลาการประมวลผลเพื่อค้นหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้น เนื่องจากให้กราฟฟังก์ชันลดสูงที่สุด รวมทั้งให้ค่าระยะเวลาต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกราฟอื่น

จากการวิเคราะห์ทั้งผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอย่างละเอียดได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอย่างละเอียด

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ρ	0.9
α	5
β	5

ในขั้นตอนสุดท้ายผู้วิจัยได้นำพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบหาความเหมาะสมนี้ไปทดสอบหาจำนวนมดที่เหมาะสม ซึ่งการทดสอบหาจำนวนมดที่เหมาะสมผู้วิจัยได้เลือกใช้การทดลองแบบจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA) โดยเกณฑ์การทดลองจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ยในการค้นหาคำตอบที่ 291 ซึ่งกำหนดจำนวนมดในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7 โดยทำการทดลองในแต่ละกลุ่มจำนวน 5 ครั้ง

ตารางที่ 7 แสดงรายละเอียดของจำนวนมดที่ใช้ทดสอบ

พารามิเตอร์	ระดับปัจจัย	ค่าของพารามิเตอร์
จำนวนมด	ระดับต่ำ	5
	ระดับกลาง	10
	ระดับสูง	15

สำหรับวิธีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการของ Tukey’s Honesty Significant Difference กับวิธีการของ Fisher’s least significant difference ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 ถึง รูปที่ 13

```
Grouping Information Using Fisher Method

Ant
Population  N     Mean  Grouping
 5          5  1.03560    A
15          5  0.44820    B
10          5  0.40800    B
```

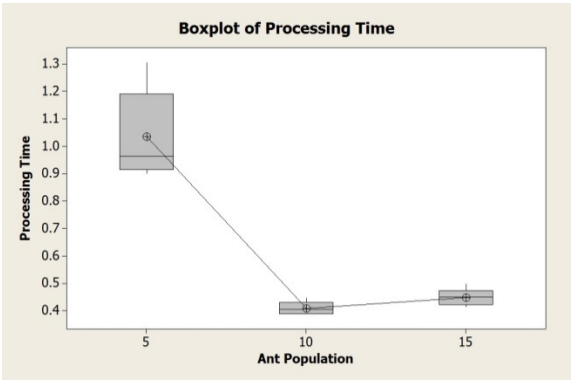
รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีการ Fisher

```
Grouping Information Using Tukey Method

Ant
Population  N     Mean  Grouping
 5          5  1.03560    A
15          5  0.44820    B
10          5  0.40800    B
```

รูปที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีการ Tukey

เมื่อพิจารณารูปที่ 11 และรูปที่ 12 พบว่าวิธีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ของทั้ง 2 วิธีจะให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการค้นหาคำตอบของจำนวนมด 5 ตัว จะแตกต่างกับจำนวนมด 10 ตัว และ 15 ตัว แต่ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการค้นหาคำตอบของจำนวนมด 10 ตัวและ 15 ตัวจะไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของระยะเวลา

โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 13 พบว่าที่จำนวนมด 10ตัว จะให้ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจำนวนมด 10 ตัว เหมาะสมที่สุด

หลังจากทำการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ทำให้สามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอัลกอริทึมที่นำเสนอจะแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ρ	0.9
α	5
β	5
จำนวนมด	10

จากตารางที่ 8 สามารถสรุปได้ว่า อัตราการระเหยของฟีโรโมนเท่ากับ 0.9 น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนเท่ากับ 5 น้ำหนักความสำคัญระยะทางเท่ากับ 5 และจำนวนมดเท่ากับ 10 เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอัลกอริทึมที่นำเสนอ

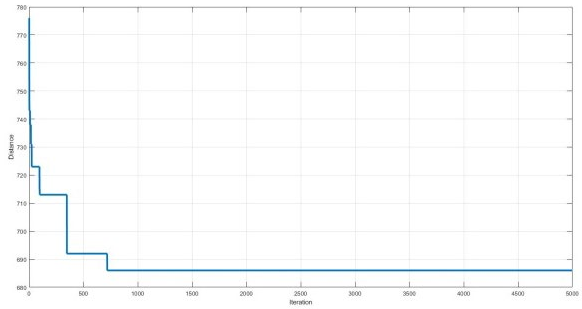
4.2 การทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับปัญหามาตรฐาน: ในส่วนของการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับปัญหามาตรฐาน ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับปัญหามาตรฐานของ TSPLIB [25] รวมทั้งหมด 15 ชุดปัญหา ซึ่งเป็นรูปแบบปัญหาเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขายมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงรายละเอียดของปัญหามาตรฐาน

ชุดปัญหา	ขนาดปัญหา (สถานที่)	ค่าคำตอบที่ดีที่สุด
burma14	14	3,323
p01	15	291
ulysses16	16	6,859
ulysses22	22	7,013
eil51	51	426
berlin52	52	7,542
st70	70	675
gr96	96	55,209
rat99	99	1,211
kroA100	100	21,282
eil101	101	629
lin105	105	14,379
bier127	127	118,282
gr137	137	69,853
kroA150	150	26,524

โดยในการทดสอบกับปัญหามาตรฐานผู้วิจัยได้ประยุกต์วิธีสร้างตัวเลขสุ่มเทียมด้วยจำนวนเฉพาะแมร์แซน (Mersenne Twister) ซึ่งการทดลองจะกำหนดจำนวนรอบการทำงานที่ 5,000 รอบ เพื่อหาการลู่เข้าของค่าคำตอบแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 14

จากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าค่าคำตอบจะมีการลู่เข้าที่จำนวนรอบ 1,000 รอบ ซึ่งจำนวนรอบที่เกิดการลู่เข้าของค่าคำตอบนี้จะถือว่าเป็นจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมนี้ไปทดสอบกับอัลกอริทึมอีกครั้ง ทั้งนี้จากการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับปัญหามาตรฐานทั้ง 15 ชุดปัญหา จะได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 10



รูปที่ 14 แสดงตัวอย่างการทดสอบการลู่เข้าของชุดปัญหา eil101

ตารางที่ 10 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับปัญหามาตรฐาน

ชุดปัญหา	ค่าคำตอบที่ดีที่สุด	วิธีการอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization)		
		ค่าคำตอบที่เหมาะสม	ระยะเวลาประมวลผล (วินาที)	ค่าคลาดเคลื่อน
burma14	3,323	3,323	1.941	0.00
p01	291	291	1.951	0.00
ulysses16	6,859	6,859	2.226	0.00
ulysses22	7,013	7,013	20.405	0.00
eil51	426	427	43.912	0.23
berlin52	7,542	7,542	37.521	0.00
st70	675	682	51.343	1.04
gr96	55,209	55,771	159.194	1.02
rat99	1,211	1,218	215.147	0.58
kroA100	21,282	21,543	118.315	1.23
eil101	629	639	51.050	1.59
lin105	14,379	14,483	82.719	0.72
bier127	118,282	119,808	133.420	1.29
gr137	69,853	70,128	215.413	0.39
kroA150	26,524	26,999	259.695	1.79

จากตารางที่ 10 ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างประกอบคำอธิบายเป็นชุดปัญหา burma14 โดยสามารถอธิบายได้ว่า ชุดปัญหา burma14 อัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยค้นหาเส้นทางครบรอบที่เหมาะสมที่สุดคือ 3,323 คิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0 ใช้ระยะเวลาค้นหาคำตอบเท่ากับ 1.941 วินาที

ทั้งนี้อาจเห็นได้ว่าบางชุดปัญหาที่มีขนาดใหญ่กว่าแต่กลับมีระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อยกว่าปัญหาที่มีขนาดเล็กกว่านั้น มีสาเหตุเนื่องมาจากระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่แสดงในตารางที่ 10 เป็นระยะเวลาที่อัลกอริทึมค้นพบคำตอบดังนั้นคำตอบที่อัลกอริทึมค้นพบจึงมีจำนวนรอบในการทำงานที่แตกต่างกัน

4.3 การประยุกต์อัลกอริทึมที่นำเสนอในการแก้ปัญหาของงานวิจัย: ในส่วนของการประยุกต์อัลกอริทึมที่นำเสนอสำหรับจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี ผู้วิจัยได้กำหนดการทดลองโดยเริ่มการทดลองที่จำนวนรอบการทำงาน 100 รอบ ทดลองจำนวน 5 ครั้ง และเพิ่มจำนวนรอบการทำงานทีละ 50

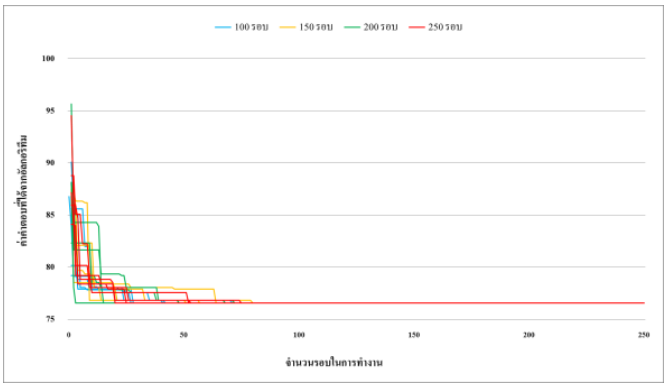
รอบ จนกว่าจะเกิดการลู่เข้าของคำตอบที่เหมาะสม โดยจากการทดสอบได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 11 และตารางที่ 12 โดยกราฟแสดงอัตราการลู่เข้าของคำตอบที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 15

ตารางที่ 11 แสดงค่าคำตอบที่ได้จากการทดสอบแต่ละรอบ

จำนวนรอบการทำงาน	การทดลองซ้ำครั้งที่					ระยะทางเฉลี่ย (กิโลเมตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5		
100	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	0.00
150	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	0.00
200	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	0.00
250	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	0.00

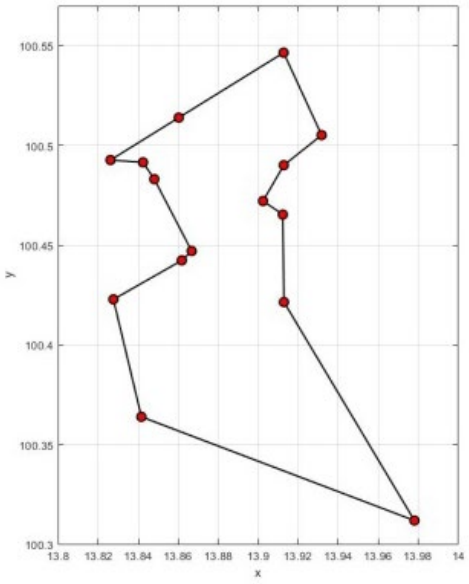
ตารางที่ 12 แสดงระยะเวลาในการทำงานของแต่ละรอบ

จำนวนรอบการทำงาน	การทดลองซ้ำครั้งที่					เวลาประมวลผลเฉลี่ย (วินาที)
	1	2	3	4	5	
100	1.044	0.958	0.979	1.077	0.959	1.003
150	1.136	1.118	1.115	1.210	1.226	1.161
200	1.277	1.307	1.285	1.400	1.303	1.314
250	1.514	1.480	1.496	1.454	1.568	1.502



รูปที่ 15 แสดงอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

จากรูปที่ 15 จะพบว่าอัตราการลู่เข้าของคำตอบจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 76.5 กิโลเมตร โดยจำนวนรอบการทำงาน 100 รอบ จะเป็นจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ค่าคำตอบที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0 โดยพบว่าเส้นทางการท่องเที่ยวที่เหมาะสมทั้ง 15 แห่ง แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงเส้นทางการท่องเที่ยวของจังหวัดนนทบุรี

จากรูปที่ 16 จะเชื่อมโยงจากศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี ศูนย์แสดงสินค้าอิมแพคฯ วัดกู้ เกาะเกร็ด ตลาดน้ำแสงสิริธรรม ตลาดน้ำวัดใหญ่ฯ วัดเล่งเน่ยยี่ 2 ตลาดน้ำไทรน้อย ตลาดน้ำบางคูลัด ตลาดน้ำวัดตะเคียน วัดสวนแก้ว ตลาดน้ำประชารัฐสวนบัว วัดเฉลิมพระเกียรติฯ ท่าน้ำนนทบุรี และวัดสังฆทาน โดยจุดเริ่มต้นของการเดินทางสามารถเริ่มจากจุดไหนก่อนก็ได้

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม: ในส่วนของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบค่าคำตอบกับวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม วิธีการเชิงวิวัฒนาการ และวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด โดยในส่วนของวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด ผู้วิจัยได้ทำการค้นหาคำตอบ โดยการกำหนดให้ทุกตำแหน่งสามารถเป็นจุดเริ่มต้น จากนั้นจึงทำการเลือกค่าคำตอบที่ดีที่สุดมาใช้ในการเปรียบเทียบ และในส่วนของวิธีอาณานิคมมดแบบดั้งเดิมกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการ ผู้วิจัยได้ทำการค้นหาคำตอบโดยการกำหนด ระยะเวลาการทำงานเท่ากับระยะเวลาในการประมวลเพื่อค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ ซึ่งการเปรียบเทียบผู้วิจัยได้ทดสอบกับปัญหาของงานวิจัย และปัญหามาตรฐานจำนวน 3 ชุดปัญหาที่มีขนาดปัญหาน้อยกว่า เท่ากัน และมากกว่าขนาดปัญหาของงานวิจัย แสดงรายละเอียดของชุดปัญหาดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงรายละเอียดชุดปัญหาที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพคำตอบ

ปัญหา	ขนาดปัญหา	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา
ปัญหาของงานวิจัย	15	-
ชุดปัญหา burma14	14	3,323
ชุดปัญหา p01	15	291
ชุดปัญหา ulysses16	16	6,859

ในส่วนของผลการทดสอบของแต่ละอัลกอริทึมจะแสดงค่าคำตอบดังตารางที่ 14 และแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในแต่ละอัลกอริทึมเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา (Global Solution) ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 14 แสดงค่าคำตอบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึม

ปัญหา	ค่าคำตอบที่ได้จากการทดสอบ			
	วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด	วิธีเชิงวิวัฒนาการ	วิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม	วิธีการอาณานิคมมดที่นำเสนอ
ปัญหาของงานวิจัย	78.3	81.6	76.5	76.5
ชุดปัญหา burma14	3,841	3,371	3,323	3,323
ชุดปัญหา p01	291	291	291	291
ชุดปัญหา ulysses16	7,950	6,868	6,865	6,859

ตารางที่ 15 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบในแต่ละอัลกอริทึม

ปัญหา	ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ (เปอร์เซ็นต์)			
	วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด	วิธีเชิงวิวัฒนาการ	วิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม	วิธีการอาณานิคมมดที่นำเสนอ
ปัญหาของงานวิจัย	-	-	-	-
ชุดปัญหา burma14	15.5883	1.4445	0	0
ชุดปัญหา p01	0	0	0	0
ชุดปัญหา ulysses16	15.9061	0.1312	0.0875	0

จากตารางที่ 15 แสดงให้เห็นว่าชุดปัญหา burma14 และชุดปัญหา ulysses16 วิธีอาณานิคมมดที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบได้ดีที่สุด โดยในชุดปัญหา p01 ทุกอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้เท่ากัน ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของชุดปัญหา

5. สรุปผลการวิจัย

ในส่วนของสรุปการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ แสดงรายละเอียดดังนี้

5.1 การทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะเริ่มจากการทดสอบพารามิเตอร์อัตราการระเหยของฟีโรโมน น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนและบีต้าที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการทดสอบจำนวนมดที่เหมาะสม โดยผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมประกอบด้วย อัตราการระเหยของฟีโรโมนเท่ากับ 0.9 น้ำหนักความสำคัญฟีโรโมนและน้ำหนักความสำคัญระยะทางเท่ากับ 5 และจำนวนมดเท่ากับ 10 ตั

5.2 การทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับปัญหามาตรฐาน พบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้ทุกปัญหามาตรฐาน โดยชุดปัญหา kroA150 เป็นชุดปัญหาที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ร้อยละ 1.79

5.3 การประยุกต์อัลกอริทึมที่นำเสนอสำหรับจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรีทั้ง 15 แห่ง พบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ สามารถหาระยะทางการท่องเที่ยวที่เหมาะสมได้เท่ากับ 76.5 กิโลเมตร ที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0 โดยจำนวนรอบการทำงาน 100 รอบ เป็นจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมสำหรับแก้ไขปัญหาของงานวิจัย ซึ่งใช้เวลาประมวลผลเฉลี่ยเท่ากับ 1.003 วินาที

5.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบค่าคำตอบกับวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม วิธีการเชิงวิวัฒนาการ และวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด โดยผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีการอาณานิคมมดแบบดั้งเดิม วิธีการเชิงวิวัฒนาการ และวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด ในกรณีของชุดปัญหา burma14 และ ulysses16 โดยในส่วนของชุดปัญหา p01 อัลกอริทึมที่นำเสนอจะให้คำตอบที่เท่ากันกับอัลกอริทึมอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ

6. ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Method) กับปัญหาที่มีขนาด 15 จุด เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเมื่อปัญหามีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อปัญหามีขนาดที่ใหญ่ขึ้นการหาผลเฉลยที่เหมาะสมด้วยวิธีแม่นตรง (Exact Method) จะกระทำได้ยากขึ้น โดยแนวทางในการพัฒนารูปแบบปัญหานั้น ผู้วิจัยจะศึกษาในเรื่องของระยะเวลาในการเดินทางและรูปแบบการเดินทางที่ไม่สมมาตร (Asymmetric) เพื่อให้รูปแบบปัญหามีความสมจริงต่อสภาพการณ์ของปัญหามากยิ่งขึ้น

ในส่วนของผลการทดสอบอัลกอริทึมพบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีในปัญหาระดับเล็กและปานกลาง เนื่องจากให้ค่าคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่ดีที่สุดที่ต่ำและมีระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อย โดยเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นจะเห็นได้ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอจะมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ลดลง เนื่องจากการค้นหาคำตอบให้ค่าคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่ดีที่สุดที่สูงและมีระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากการเรียงตัวของข้อมูลที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปัญหามีความซับซ้อนในการแก้ปัญหาเพิ่มขึ้น โดยแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมของผู้วิจัยนั้นจะเป็นในส่วนของการศึกษาในเรื่องของการจัดกลุ่มข้อมูล (Clustering) เนื่องจากผู้วิจัยมีความเห็นว่าในปัญหาขนาดใหญ่ หากสามารถจัดกลุ่มข้อมูลแบ่งตามลักษณะของกลุ่มได้ อาจช่วยลดความซับซ้อนในการแก้ปัญหา อีกทั้งอาจช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาคำตอบลงได้

เอกสารอ้างอิง

[1] นพดล อ่ำดี, ธนภัทร มะณีแสง, หทัยนุช จันทร์ชัยภูมิ. การประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมมดเพื่อจัดเส้นทางการท่องเที่ยวในอำเภอเขาค้อ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8*. 25 – 27 พฤษภาคม 2559; 501 – 504.

[2] ชิดชนก อัจฉริยนิติ, บุสริน ศรสวรรค์,สุรัสวดี มณีวงศ์, นันทิยา ดิษประธูป. การประยุกต์ใช้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายในการหาเส้นทางการท่องเที่ยวจังหวัดนครนายก. *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการด้านการจัดการ โลจิสติกส์และโซ่อุปทาน ครั้งที่ 18*. 8 – 9 พฤศจิกายน 2561; 1 – 8.

[3] เสริมศิริ นิลดำ, กษิดิศ ใจผาวัง, จิราพร ขุนศรี, เบญจวรรณ เบญจกรณ์, ศิริพรรณ จีนะบุญเรือง นิเวศ จีนะบุญเรือง และคณะ. การพัฒนาเส้นทางการ ท่องเที่ยวตามรอยชาติพันธุ์ในจังหวัดเชียงราย. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์*. 2560; 12(1): 26 – 37.

[4] พัชรินทร์ เสริมการดี, ธีระ สุภเพียร. เส้นทางการท่องเที่ยวชุมชน: สินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) ในอำเภอปากพะยูน จังหวัดพัทลุง. *การประชุมหาดใหญ่วิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6*. 26 มิถุนายน 2558; 1042 – 1052.

[5] ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. *วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างสำหรับแก้ปัญหาการขนส่งโลจิสติกส์*. อุบลราชธานี: สำนักพิมพ์โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2559.

[6] เสกสรรค์ วินยางค์กูล, นิเวศน์ จีนะบุญเรือง, ประเวช อนันเอื้อ, นคร ไชยวงศ์ศักดา, พรวิไล กันทะวงค์, ณัฐพล หมวกเครือ และคณะ. การประยุกต์ตัวแบบปัญหาการเดินทางของเซลล์แมน กรณีศึกษาการจัดเส้นทางรถรางนำเที่ยวของเทศบาลนครเชียงราย. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*. 2557; 7(2):85 – 97.

[7] พัชรลักษณ์ รักธรรมจิรสุข. การศึกษารูปแบบการจัดเส้นทางเพื่อทำการวางแผนการเดินทางของพนักงานขาย. *การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 7*. 6 พฤศจิกายน 2557; 185 – 192.

[8] ทัศนวรรณ กังฮา, ศิวิสา จงรักษ์, พัชราภรณ์ เนียมมณี. การจัดเส้นทางการเดินรถของรถรับ-ส่งนักเรียนโดยการใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม. *การประชุมวิชาการ การวิจัยดำเนินงาน ประจำปี 2548*; 49 – 58.

[9] Ahmadvand M, MahmoodiDarani N, Yousefikhoshbakht M. Solving the travelling salesman problem by an efficient hybrid metaheuristic algorithm. *Journal of Advances in Computer Research*. 2012;3(3): 75 – 84.

[10] Yu Y, Chen Y, Li T. A new design of genetic algorithm for solving TSP. *Proceeding of 2011 Fouth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*. 2011 April 5 – 19; Yunnan, China. 2011. p. 309 – 313.

[11] Pan Y, Xia Y. Solving TSP by dismantling cross paths. *Proceeding of 2014 International Conference on Orange Technologies*. 2014 September 20 – 23; China. 2014. p. 121 – 124.

[12] Xueyuan W. Research on solution of TSP based on improved genetic algorithm. *Proceeding of International Conference on Engineering*

Simulation and Intelligent Control. 2018 August 10 – 11; Hunan China. 2018. p. 78 – 82.

[13] Dorigo M, Caro GD. Ant colony optimization: a new meta-heuristic. *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99*. 1999 July 6 – 9; USA. 1999. p.1470 – 1477.

[14] ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. *วิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อแก้ไขปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดการโลจิสติกส์*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2554.

[15] สุพรรณ สุดสนธิ์, อดิศักดิ์ สิงห์สั่งถ้ำ, ชราวุฒิ น้อยทะรงค์ และยงยุทธ จันรอง. อัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดสำหรับการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งโดยมีพาหนะขนส่งหลายขนาด ภายใต้การขนส่งที่มีกรอบเวลาจำกัด. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2558; 11(3)* :53 – 68.

[16] ฐิตินนท์ ศรีสุวรรณดี และระพีพันธ์ ปิตาคะโส.การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งยานพาหนะด้วยวิธีการ 5 อาณานิคมมด กรณีศึกษาบริษัทเจียรนัยน้ำดื่มจำกัด. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น*. 2555; 17(5):706-714.

[17] กิตติโรจน์ สันติฐายี และอุดม จันทร์จรัสสุข. ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับปปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีความต้องการแบบสโทแคสติก. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*. 2561; 41(4): 387 – 400.

[18] Xiaojiang Li, Liao J, Cai M. Ant colony algorithm for large scale TSP. *Proceeding of International Conference on Electrical and Control Engineering*. 2011 September 16 – 18; China. 2011. p.573 – 576.

[19] Pratyush P, Dutta M. TSP solution using dimensional ant colony optimization. *Proceeding of 2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*. 2015 February 21 – 22; India. 2015. p. 506 – 512.

[20] Yan-qi B, Xiao S, Zhi-yi C. TSP optimization by the cellular ant algorithm. *Proceeding of International Conference on Instrumentation Communication and Control*. 2011 October 21 – 23; China. 2011. p.274 – 276.

[21] Yuanyuan L, Jing Z. An application of ant colony optimization algorithm in TSP. *Proceeding of 2011 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*. 2011 November 1 – 3; China. 2012. p.61 – 64.

[22] Brezina I, Zuzana Cickova Z. Solving the travelling salesman problem using the ant colony optimization. *Journal of Management Information system.* 2011; 6(4):10 – 14.

[23] Xiong N, Wu W, Wu C. An Improved Routing Optimization Algorithm Based on Traveling Salesman Problem for Social Networks. *Sustainability*. 2017; 9(6):1 – 15.

[24] Departmet of scientific computing at florida state university. florida state university. Available from: https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/datasets/tsp/tsp.html.

[25] Reinelt G. TSPLIB – A Traveling Salesman Problem Library. *ORSA Journal on Computing*. 1991; 3(2): 376 – 384.