

การประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อแก้ไขปัญหการจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์ สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

สิปณัติ จานทอง^{1*} และ คมกฤต เล็กสกุล²

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Received: 06 May 2023; Revised: 21 July 2023; Accepted: 27 July 2023

บทคัดย่อ

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยในแต่ละปีระดับความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าที่มีทรัพยากรและศักยภาพในการผลิตที่จำกัด ดังนั้นองค์กรที่รับผิดชอบดูแลจะต้องทำการผลิตไฟฟ้าให้มีความสมดุลและสร้างความปลอดภัยให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การตรวจสอบสภาพสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีความสามารถพร้อมใช้งานอยู่ตลอดเวลา โดยการตรวจสอบสภาพสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นที่จะต้องได้รับการกำหนดแบบแผนในการดำเนินงานและใช้ต้นทุนในการปฏิบัติงานให้น้อยที่สุด งานวิจัยนี้ได้นำปัญหาการจัดแนวเส้นทางแบบมีความจุมาใช้เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคในการหาคำตอบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้หาคำตอบได้ในกรณีตัวอย่างขนาดเล็กเท่านั้นและใช้เวลาในการประมวลผลของโปรแกรมในระยะเวลาที่เหมาะสมอีกด้วย แต่กรณีตัวอย่างขนาดใหญ่และกรณีจริงจากพื้นที่ปฏิบัติงานไม่สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยในขั้นตอนต่อไปได้เลือกใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์แบบกลุ่มอนุภาคในการหาคำตอบต่อไป

คำสำคัญ: สายส่งไฟฟ้าแรงสูง, เฮลิคอปเตอร์, ปัญหาการจัดแนวเส้นทางแบบมีความจุ, วิธีกลุ่มอนุภาค

* Corresponding author. E-mail: onlynooy150@gmail.com or sippanat_chan@cmu.ac.th

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Application of Particle Swarm Optimization to solve Helicopter Arc Routing Problems for High Voltage Transmission Line Inspection

Sippanat Chanthong^{1*} and Komgrit Leksakul²

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

Received: 06 May 2023; Revised: 21 July 2023; Accepted: 27 July 2023

Abstract

Electric power is very essential for human daily life. Each year, the demand for electricity is steadily increasing until it affects the production of electricity with limited resources and production potential. Therefore, responsible organizations must balance electricity generation and ensure the safety of electricity consumers. One thing such organizations can do to create safety is to inspect high-voltage transmission lines to ensure they are available and ready to use at all times. By inspecting high-voltage transmission lines, it is necessary to obtain a work plan and minimize operating costs. The capacitated arc routing problem was used as a model for constructing a mathematical model for high-voltage transmission lines, and particle swarm optimization was applied in this research. The mathematical model created can only be used to find answers for small samples and it takes a reasonable amount of time to process the program. However, for large-scale cases and real-world scenarios, it cannot provide answers within a reasonable amount of time. Therefore, in the next step of the research, the cluster-particle metaheuristic method was employed to find additional answers.

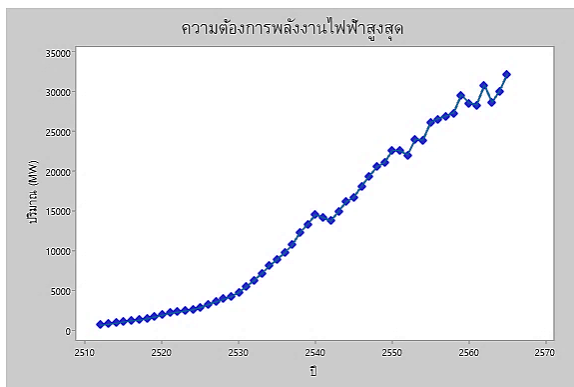
Keywords: high voltage transmission line, helicopter, capacitated arc routing problem, particle swarm optimization

* Corresponding author. E-mail: onlynooy150@gmail.com or sippanat_chan@cmu.ac.th

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Faculty of engineering, Chiang Mai University

1. บทนำ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) [1] ได้รายงานข้อมูลเชิงสถิติเกี่ยวกับความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดพบว่า ยังคงมีความต้องการเพิ่มขึ้นในแต่ละปี ดังรูปที่ 1 ทำให้ กฟผ. จะต้องทำการผลิตไฟฟ้าให้มีความสมดุลต่อการใช้งาน ซึ่งไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นจะต้องอาศัยตัวกลางที่เรียกว่า สายส่งไฟฟ้า ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับและส่งกระแสไฟฟ้าจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่ง สายส่งไฟฟ้าที่ใช้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติทนต่อแรงดัน สภาพแวดล้อม และอื่นๆ ซึ่งงานวิจัยนี้จะสนใจเพียงสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น ดังนั้น กฟผ. จะต้องหมั่นตรวจสอบสภาพและบำรุงรักษาอุปกรณ์รวมถึงสายส่งให้พร้อมใช้งานสม่ำเสมอเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากไฟฟ้า โดยในอดีตที่ผ่านมา กฟผ. ได้มีวิธีการตรวจสอบสภาพและบำรุงรักษาสายส่งด้วยการใช้อัตราค่ากำลังข้างสายส่งเป็นจำนวนมาก และใช้ต้นทุนในการปฏิบัติงานสูงย่อมส่งผลเสียต่อองค์กรในระยะยาว ดังนั้น กฟผ. จึงได้เปลี่ยนมาใช้เฮลิคอปเตอร์ในการบินตรวจสอบสภาพสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแทนการใช้รถยนต์หรือการเดินเท้า เนื่องจากเป็นวิธีการทำงานที่รวดเร็ว ประสิทธิภาพสูง สามารถตรวจสอบและรายงานสภาพสายส่งจากบริเวณพื้นที่ที่เข้าถึงยากได้โดยง่าย เช่น พื้นที่ป่าหรือภูเขา และใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยกว่าวิธีดั้งเดิม



รูปที่ 1 กราฟความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดแต่ละปี [1]

การตรวจสอบสภาพสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยเฮลิคอปเตอร์จึงจำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดแผนการดำเนินงานที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพเพื่อทำให้การปฏิบัติงานเป็นไป

ได้อย่างเรียบร้อยและเสร็จสิ้นภายในระยะเวลาอันสั้น และช่วยลดภาระด้านต้นทุนค่าใช้จ่ายของ กฟผ. โดยแผนงานดังกล่าวประกอบไปด้วย แนวเส้นทางในการบินตรวจ ลำดับการตรวจก่อนและหลัง และสถานที่ขึ้นและลงจอดของเฮลิคอปเตอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจในการจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสอบสภาพสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของผู้ให้บริการบำรุงรักษาสายส่งในเขตพื้นที่ภาคเหนือ และเพื่อประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคในการแก้ปัญหาดังกล่าว

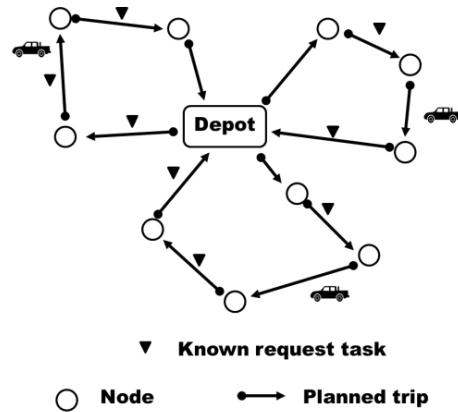
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา รวบรวม และอภิปรายเกี่ยวกับหลักการ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดแนวเส้นทาง (Arc routing problem: ARP) และวิธีการแก้ปัญหาทั้งวิธีการตรง (Exact method) และวิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic method) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ปัญหาการจัดแนวเส้นทาง (Arc routing problem: ARP)

ปัญหา ARP [2] เป็นการหาเส้นทางเพื่อตอบสนองต่อเป้าหมายต่าง ๆ เช่น การรวบรวมขยะตามบ้านเรือนของเทศบาล การกวาดถนน การซ่อมบำรุงเครือข่าย (ถนน, เสาสัญญาณ, อื่นๆ) การรับ-ส่งนักเรียนด้วยรถโรงเรียน เป็นต้น ทั้งนี้การเดินทางของ ARP นั้นจะต้องเดินทางผ่านเส้นทางต่าง ๆ ภายในปริภูมิเครือข่าย (Network) ให้ครบทุกเส้นตามที่กำหนด ดังรูปที่ 2 ซึ่งได้มีผู้วิจัยเสนอปัญหา ARP ไว้มากมายเช่น [3] ได้นำเสนอแบบจำลองปัญหามูซไปรษณีย์จีนภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา (Chinese postman problem with time window: CPPTW) ซึ่งเป็นปัญหา ARP ประเภทหนึ่งที่มีวัตถุประสงค์คือการหาค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดในการให้บริการ โดยลักษณะการเดินทางของมูซไปรษณีย์ไม่มีการกำหนดทิศทางที่แน่นอนว่าควรเดินไปทางไหน เมื่อเดินทางจากจุดเริ่มต้นผ่านเส้นทางต่างๆ ให้ครบแล้วเดินย้อนกลับมายังจุดเริ่มต้นดั้งเดิมโดยมีข้อจำกัดด้านเวลาเป็นตัวกำหนด ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาสามารถหาค่าได้อย่าง

รวดเร็วเมื่อมีข้อจำกัดด้านเวลา ต่อมา [4] ได้กล่าวถึงปัญหาบุรุษไปรษณีย์จีนแบบมีทิศทาง (Directed Chinese postman problem: DCP) ซึ่งเป็นปัญหา ARP อีกรูปแบบหนึ่งที่มีเป้าหมายเหมือนกับงานวิจัยอันแรก แตกต่างตรงที่ลักษณะการเดินทางของบุรุษไปรษณีย์จีนมีการเดินทางจากจุดเริ่มต้นผ่านเส้นทางต่างๆ ตามที่กำหนดไว้เท่านั้น แล้วเดินย้อนกลับมายังจุดเริ่มต้นดั้งเดิม ไม่จำเป็นต้องไปให้ครบทุกเส้น นอกจากนั้น [5] ได้กล่าวถึงปัญหาบุรุษไปรษณีย์จีนแบบผสม (Mixed Chinese postman problem : MCPP) ซึ่งเป็นปัญหาที่รวมปัญหาสองแบบแรกมาใช้ในการแก้ปัญหา กล่าวคือ จะมีเส้นทางแบบไร้ทิศทางและแบบมีทิศทางผสมกัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับการจัดเก็บขยะของเทศบาล การจัดตารางงานลาดตระเวนของตำรวจ และอื่นๆ ซึ่งเอกสารที่กล่าวมาข้างต้นยังพบอีกว่า ในการเดินทางผ่านเส้นทางต่างๆ นั้นจะใช้คนเพียงคนเดียวหรือยานพาหนะเพียงคันเดียว ดังนั้นเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดและสามารถปฏิบัติงานได้เร็วขึ้นจึงได้มีนักวิจัยได้นำเสนอปัญหาการจัดแนวเส้นทางแบบมีความจุ (Capacitated arc routing problem : CARP) [6] ซึ่งมีลักษณะรูปแบบการเดินทางแตกต่างกันตามลักษณะของปริมาณเครือข่าย แต่ CARP มีข้อจำกัดเพิ่มเติมทางด้านความจุของยานพาหนะ และเพิ่มจำนวนยานพาหนะที่ใช้งาน ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความคล้ายคลึงกับปัญหาการจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมากที่สุด เนื่องจากตำแหน่งในการปฏิบัติการเกิดขึ้นบนเส้นทางหรือสายส่ง ซึ่งเฮลิคอปเตอร์ที่ใช้ในการบินตรวจมีข้อจำกัดด้านเชื้อเพลิงจึงต้องมีการกำหนดเวลาที่ใช้ในการบิน เมื่อเชื้อเพลิงใกล้จะหมดจะต้องทำการบินย้อนกลับมายังลานจอดเพื่อเติมเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังพบเอกสารที่ได้สำรวจและสรุปลักษณะปัญหา ARP ไว้หลากหลายรูปแบบ [7], [8] และมีการรวบรวมจัดทำเป็นหนังสือที่ชื่อว่า Arc Routing Problems, Methods, and Applications [9]



รูปที่ 2 การเดินทางแบบปัญหาการจัดแนวเส้นทาง (ARP) [10]

2.2 วิธีแก้ปัญหาแบบเมตาฮิวริสติก

วิธีการแก้ปัญหามีหลากหลายวิธีที่สามารถหาคำตอบได้อย่างเหมาะสม เช่น วิธีการตรง (Exact Method) เป็นวิธีการแก้ปัญหาขั้นพื้นฐานที่สามารถใช้ได้กับปัญหาทุกรูปแบบ สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากการได้มาซึ่งคำตอบนั้นจะต้องผ่านการคำนวณที่สลับซับซ้อนรวมทั้งใช้เวลาในการประมวลผลนาน ด้วยเหตุนี้วิธีการตรงจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนักในการหาคำตอบที่มีความซับซ้อนสูงหรือการทำงานจริง ดังนั้นจึงต้องเล็งมาใช่วิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristic Method) หรือวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Method) แทน ซึ่งวิธีการเมตาฮิวริสติก เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาและดัดแปลงมาจากวิธีฮิวริสติกเพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการหาคำตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมากเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีแก้ปัญหาไว้ดังนี้

2.2.1 วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

เป็นหนึ่งในวิธีเมตาฮิวริสติกเช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ ที่ เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยการเลียนแบบพฤติกรรม

ทางธรรมชาติของกลุ่มประชากร ในการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิตแต่ละตัว (Individuals) ที่มีกลไกในการค้นหาไม่ว่าจะเป็นแหล่งที่อยู่หรืออาหารด้วยการเคลื่อนที่กันเป็นกลุ่มหรือฝูง (Swarm) เช่น นก ปลา หรือฝูง [11]–[13] โดยภายในกลุ่มหรือฝูงจะมีกลไกการเรียนรู้เพื่อค้นหาอาหารหรือที่อาศัยจากประสบการณ์ส่วนตัว (Cognitive learning) และการแลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างสมาชิกภายในกลุ่ม (Social learning) ซึ่งวิธี PSO เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดยอดนิยม มีความง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ และมีเพียงไม่กี่พารามิเตอร์ในการปรับแต่ง มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพที่สามารถผสมผสานเข้ากับโซลูชันที่ดีได้อย่างรวดเร็ว แม้กระทั่งปัญหาที่มีมิติสูงๆ จึงสามารถที่จะนำไปใช้กับปัญหาต่างๆ ในโลกแห่งความเป็นจริงในด้านวิศวกรรม การเงิน และสาขาอื่นๆ อีกมากมาย

3. กระบวนการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของปัญหาการจัดแนวเส้นทางแบบมีความจุ (Capacitated arc routing problem : CARP) มาประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาวิจัย โดยเป็นการปฏิบัติงานเฉพาะพื้นที่รับผิดชอบของผู้ให้บริการบำรุงรักษาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายในเขตภาคเหนือ (อปน.) และทำการแก้ปัญหาด้วยวิธีตรง และวิธีเมตาดิวริสติกส์แบบกลุ่มอนุภาค ซึ่งมีแนวคิดในการทำวิจัยดังนี้

3.1 การศึกษาข้อมูลการสำรวจเดิม

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยเดิม [14] เพื่อให้ทราบถึงรายละเอียดข้อมูลต่างๆ ที่จะนำมาปรับใช้กับงานวิจัยที่จะทำ เช่น วิธีการตรวจสอบสายส่งด้วยเฮลิคอปเตอร์ ความเร็วในการบินของเฮลิคอปเตอร์ เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน เป็นต้น โดยจะพิจารณาเฉพาะพื้นที่รับผิดชอบของผู้ให้บริการบำรุงรักษาสายส่งภายในเขตภาคเหนือ และนำข้อมูลทั้งหมดไปสร้างสมการวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัดต่อไป นอกจากนั้นยังต้องมีการอัปเดตข้อมูลด้านต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปฏิบัติงานเพิ่มเติม

3.2 การสร้างสมการวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัด

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดแนวเส้นทาง การศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และการศึกษาระบบการบินตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยเฮลิคอปเตอร์ ทำให้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เข้ากับงานวิจัยนี้ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้มีสมการวัตถุประสงค์ และสมการข้อจำกัดดังนี้

3.2.1 ดัชนี (Index)

N แทน เซตของจำนวนจุดทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบเครือข่าย

H แทน เซตของจำนวนรอบการบินทั้งหมดที่ใช้ในการตรวจสอบสายส่ง

$A(i,j)$ แทน เซตของเส้นทางทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j

i แทน จุดในเครือข่าย ทั้งที่เป็นจุดต้นสายส่งและจุดที่เป็นลานจอด มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

j แทน จุดในเครือข่าย ทั้งที่เป็นจุดปลายสายส่งและจุดที่เป็นลานจอด มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

h แทน รอบการบินตรวจสอบสายส่ง มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง H

MR แทน เซตของรอบการบินในครั้งเช้า

AR แทน เซตของรอบการบินในครั้งบ่าย

$Depot$ แทน จำนวนลานจอดเฮลิคอปเตอร์ในระบบทั้งหมดที่สามารถให้บริการได้

หมายเหตุ : จุดที่เป็นจุดปลายของสายส่งจะเริ่มตั้งแต่ $i = Depot+1$ ถึง N

3.2.2 ตัวแปรทราบค่า (Parameter)

T_{ij} แทน เวลาที่ใช้ในการเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j

MT แทน เวลาสูงสุดที่เฮลิคอปเตอร์สามารถใช้ในการบินแต่ละรอบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 นาที

CC แทน อัตราค่าเช่าบริการเฮลิคอปเตอร์ต่อชั่วโมง

$Begin$ แทน เวลาที่ใช้ในการเดินทางจากส่วนกลางมายังตำแหน่งลานจอดเริ่มต้นที่ i

DC แทน ค่าเบี้ยเลี้ยงผู้ให้บริการรวมต่อวัน

lca แทน ค่าใช้จ่ายในการเช่าลานจอดในช่วงกลางวันต่อครั้ง

lcb แทน ค่าใช้จ่ายในการเข้าลานจอดในช่วงเย็นวันจันทร์ถึง
พฤหัสบดีต่อครั้ง

lcc แทน ค่าใช้จ่ายในการเข้าลานจอดในช่วงเย็นวันศุกร์ต่อ
ครั้ง

3.2.3 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

$$X_{ij}^h = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อมีการบินผ่านเส้นทางที่ A (i,j) จากจุด} \\ & i \text{ ไปยังจุด j ในรอบการบินที่ h} \\ 0 & \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases}$$

U_i แทน ตัวแปรสำหรับควบคุมการเกิดทัวร์ย่อยในจุดที่ i ซึ่ง
มีค่ามากกว่าเท่ากับ 0

TCC แทน ค่าใช้จ่ายรวมในการใช้บริการเฮลิคอปเตอร์

TDC แทน ค่าเบี้ยเลี้ยงของผู้ให้บริการรวมตลอดระยะเวลา
ปฏิบัติงาน

TLC แทน ค่าใช้จ่ายรวมในการเข้าลานจอดเฮลิคอปเตอร์

TLCa แทน ค่าใช้จ่ายรวมในการเข้าลานจอดในช่วงเวลา
กลางวัน

TLCb แทน ค่าใช้จ่ายรวมในการเข้าลานจอดในช่วงเย็นวัน
จันทร์ถึงพฤหัสบดี

TLCc แทน ค่าใช้จ่ายรวมในการเข้าลานจอดในช่วงเย็นวัน
ศุกร์

TLCbegin แทน ค่าใช้จ่ายรวมในการเข้าลานจอดก่อนเริ่ม
การตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

3.2.4 สมการวัตถุประสงค์

$$\text{Min} = \text{TCC} + \text{TDC} + \text{TLC} \quad (1)$$

3.2.5 สมการข้อจำกัด

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h * T_{ij} \leq MT \quad \forall h; h \in H \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h = 1 \quad \forall h; h \in H \quad (3)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{i \neq j} X_{ij}^h = 1 \quad \forall j; j > \text{Depot} \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j \neq i} X_{ij}^h = 1 \quad \forall i; i > \text{Depot} \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h - \sum_{(j,i) \in A} X_{ji}^h = 0 \quad \forall h; h \in H \quad \forall j; j \in N \quad (6)$$

$$\sum_{h=1}^H (X_{ij}^h + X_{ji}^h) = \begin{cases} 1, & \text{if the A(i,j) line is served.} \\ 0, & \text{Other} \end{cases} \quad \forall (i,j), (i,j) \in A \quad (7)$$

$$U_i - U_j + \left(N * \sum_{h=1}^H X_{ij}^h \right) \leq N-1 \quad \forall (i,j), (i,j) \in A \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h - \sum_{(i,j) \in A} X_{ji}^{h+1} = 0 \quad \forall h+1; h+1 \leq H \quad \forall j; j \in N \quad (9)$$

$$\sum_{i=\text{Depot}+1}^N \sum_{j=\text{Depot}+1}^N X_{ij}^h = 0 \quad \forall h; h \in MR \quad (10)$$

$$\sum_{i=\text{Depot}+1}^N \sum_{j=\text{Depot}+1}^N X_{ij}^h = 0 \quad \forall h; h \in AR \quad (11)$$

$$\text{TCC} = \left(\sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h * T_{ij} + \sum_i \sum_j^{\text{Depot}} X_{ij}^1 * \text{Begin}_i \right) * CC \quad (12)$$

$$\text{TDC} = \text{DC} * \text{จำนวนวันปฏิบัติงาน} \quad (13)$$

$$\text{TLCa} = \sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h * \text{lca}_{ij} \quad (14)$$

$$\text{TLCb} = \sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h * \text{lcb}_{ij} \quad (15)$$

$$\text{TLCc} = \sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^h * \text{lcc}_{ij} \quad (16)$$

$$\text{TLCbegin} = \sum_{i=1}^{\text{Depot}} \sum_j^N X_{ij}^1 * \text{lcb}_{ij} \quad (17)$$

$$\text{TLC} = \text{TLCa} + \text{TLCb} + \text{TLCc} + \text{TLCbegin} \quad (18)$$

จากสมการทั้งหมดข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้
สมการที่ 1 เป็นสมการวัตถุประสงค์ที่เป็นผลรวมของ
ค่าใช้จ่ายต่างๆ ทั้งค่าเช่าเฮลิคอปเตอร์ ค่าเข้าลานจอด และ

ค่าเบี่ยงเบนของผู้ปฏิบัติงาน สมการที่ 2 เป็นข้อจำกัดด้านเวลาในการบินตรวจในแต่ละรอบ สมการที่ 3 เป็นข้อจำกัดด้านจุดขึ้นลงของเฮลิคอปเตอร์ในแต่ละรอบ สมการที่ 4-6 เป็นข้อจำกัดให้เฮลิคอปเตอร์บินผ่านแต่ละเส้นได้เพียงครั้งเดียว สมการที่ 7 เป็นข้อจำกัดให้เฮลิคอปเตอร์ทำการตรวจสายส่งให้ครบทุกสาย สมการที่ 8 เป็นข้อจำกัดการห้ามให้เกิดทัวร์ย่อย สมการที่ 9 เป็นข้อจำกัดด้านการเชื่อมต่อกันในแต่ละรอบการบิน สมการที่ 10-11 เป็นข้อจำกัดด้านการควบคุมไม่ให้เกิดการบินย้อนแสง สมการที่ 12 เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมในการเช่าเฮลิคอปเตอร์ สมการที่ 13 เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมของค่าเบี่ยงเบนผู้ปฏิบัติงาน สมการที่ 14-18 เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมในการเช่าลานจอดเฮลิคอปเตอร์

3.3 การเตรียมข้อมูลที่ใช้สำหรับการทดสอบโปรแกรม

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่างานวิจัยนี้ใช้วิธีการแก้ไขปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบของเส้นทางการบินตรวจสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีต้นทุนในการเดินทางที่ต่ำที่สุดหรือมีความใกล้เคียงกับค่าจริงของปัญหา ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีตรง และวิธีกลุ่มอนุภาค โดยใช้วิธีตรงเป็นตัวยืนยันประสิทธิภาพของวิธีกลุ่มอนุภาค หลังจากนั้นจึงนำวิธีกลุ่มอนุภาคไปใช้หาคำตอบจากกรณีศึกษาของ อปน. ต่อไป ดังนั้นก่อนที่จะสามารถยืนยันได้ว่าวิธีกลุ่มอนุภาคที่ถูกนำมาใช้นั้นจะสามารถหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพได้จริงจะต้องนำไปทดสอบกับกรณีตัวอย่างทั้ง 24 กรณีที่มีความครอบคลุมและซับซ้อนตั้งแต่เล็กน้อยไปจนถึงมากที่สุดเพื่อให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง

3.3.1 รายละเอียดพื้นฐาน

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีอยู่ในการกำกับดูแลและรับผิดชอบของผู้ให้บริการบำรุงรักษาสายส่ง มีจำนวนสายส่งประมาณ 80 สาย และมีช่วงความยาวอยู่ที่ประมาณ 10 - 300 กิโลเมตร ซึ่งบางครั้งสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวมากจนเกินไปก็จะไม่สามารถทำการตรวจให้เสร็จได้ภายในการ

บินรอบเดียว ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการแบ่งตรวจเป็นช่วงๆ โดยการบินในแต่ละรอบจะสามารถทำการบินตรวจได้ไม่เกิน 120 กิโลเมตร ความเร็วของเฮลิคอปเตอร์ที่ใช้ในการบินตรวจจะอยู่ที่ประมาณ 85 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วของเฮลิคอปเตอร์ที่ใช้ในการบินเปล่าอยู่ที่ประมาณ 180 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลดิบที่เป็นความยาวของสายส่งมาทำการแปลงให้อยู่ในหน่วยของเวลา (ชั่วโมง) ด้วยสมการที่ 19

$$t_{ij} = \frac{S_{ij}}{V} \quad (20)$$

โดยที่ T_{ij} แทน เวลาที่ใช้ในการบินจากเส้นทาง i ไปยัง j (ชั่วโมง) S_{ij} แทน ความยาวสายส่งจากเส้นทาง i ไปยัง j (กิโลเมตร) โดยเป็นการวัดตามระยะทางความยาวสายส่งจริง ไม่ใช่คิดตามระยะขจัด และ V แทน ความเร็วของเฮลิคอปเตอร์ใช้ในการบินตรวจสายส่งและการบินเปล่า หมายเหตุ ระยะขจัดระหว่างจุดสามารถคำนวณได้จาก Euclidean distance

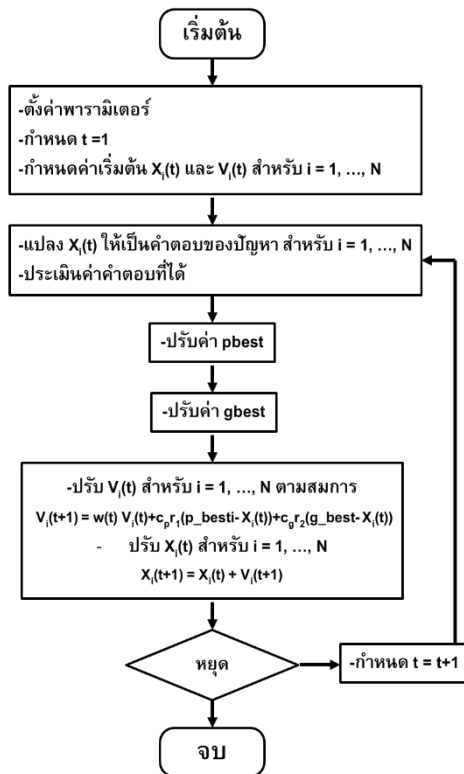
3.4 การหาคำตอบของปัญหาการจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

3.4.1 การหาคำตอบโดยวิธีตรง

จากที่ได้รับข้อมูลและกำหนดสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขแล้วนั้น นำสมการทั้งสองชนิดไปแปลงให้อยู่ในรูปแบบคำสั่งของโปรแกรม Lingo ก่อน หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาคำตอบด้วยการใช้กรณีตัวอย่างทั้ง 24 กรณี และกรณีสถานที่จริงของ อปน. อีก 1 กรณี

3.4.2 การหาคำตอบโดยวิธีกลุ่มอนุภาค

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเป็นหนึ่งในวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยกลุ่มประชากรเช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ ที่อาศัยการกำหนดกลุ่มประชากร ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ โดยวิธี PSO จะมีการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย Python ตามขั้นตอนของ PSO ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนของวิธีกลุ่มอนุภาค

3.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบ

หลังจากทำการทดสอบหาคำตอบของปัญหาการจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงครบทั้ง 24 กรณีตัวอย่างและกรณีจริงของ อปน. ด้วยวิธีตรงและวิธีกลุ่มอนุภาคแล้ว ขั้นตอนส่วนถัดไปจะเป็นการนำผลคำตอบจากวิธี PSO มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพคำตอบจากวิธีตรงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ARP ที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่าง ARP และ PSO กับคำตอบที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณของผู้ให้บริการบำรุงรักษาสายส่ง โดยลักษณะการเปรียบเทียบทั้งสองกรณีจะเป็นการนำผลคำตอบทางด้านต้นทุนค่าใช้จ่ายโดยรวมและเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานมาทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่าง

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบจากโปรแกรม Lingo

เมื่อนำกรณีตัวอย่างที่ 0 มาทำการประมวลผลโดยโปรแกรม ได้ผลการจัดเส้นทางการบินตรวจรูปที่ 4 และสามารถสรุปคำตอบได้ดังต่อไปนี้

Lingo 14.0 Solver Status [case0]	
Solver Status	
Model Class:	MILP
State:	Global Opt
Objective:	84817.4
Infeasibility:	2.72848e-012
Iterations:	40
Variables	
Total:	63
Nonlinear:	0
Integers:	49
Constraints	
Total:	198
Nonlinear:	0
Nonzeros	
Total:	623
Nonlinear:	0
Generator Memory Used (K)	
	65
Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
	00:00:00
Extended Solver Status	
Solver Type:	B-and-B
Best Obj:	84817.4
Obj Bound:	84817.4
Steps:	0
Active:	0
Update Interval:	2
Interrupt Solver	
Close	

รูปที่ 4 ผลการคำนวณโดยโปรแกรม Lingo จากกรณีตัวอย่างที่ 0

จากผลการคำนวณของโปรแกรม Lingo ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคำตอบที่ดีที่สุดของกรณีตัวอย่างที่ 0 มีค่าเท่ากับ 84,817.42 บาทและมีเส้นทางการบินตรวจคือ 1-3-2-6-7-5-4-1

4.2 ผลการคำนวณโดยตรง (Handle)

เพื่อให้การหาคำตอบจากโปรแกรม Lingo มีคำตอบที่ถูกต้องที่สุดจึงต้องทำการเปรียบเทียบคำตอบนั้นจากการคำนวณโดยตรงด้วยการทำการหาจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้จากค่าความน่าจะเป็น ดังเช่น ในกรณีตัวอย่างที่ 0 มีลานจอดเพียง 1 ลานจึงไม่จำเป็นที่จะต้องทำการเลือกลาน

จุดสำหรับใช้ในการบินขึ้นและลงจอด ซึ่งในกรณีนี้มีสายส่งทั้งหมด 3 สายส่ง จึงต้องทำการเลือกจุดปลายทางของสายส่งแต่ละเส้นเพื่อใช้เป็นจุดหมายปลายทางในการบิน โดยการสุ่มครั้งที่ 1 นั้นมีความเป็นไปได้อยู่ทั้งหมด 6 จุดหรือ 6 ตัวเลือกด้วยกัน เมื่อสามารถทำการเลือกได้แล้วการสุ่มครั้งที่ 2 จะเหลือเพียงทางเลือกเดียวคือจุดปลายทางอีกด้านของสายส่งที่เลือกได้จากครั้งที่ 1 จากนั้นในการสุ่มครั้งที่ 3 จะมีจุดที่เหลือให้เหลืออยู่ 4 จุด เมื่อเลือกได้แล้วครั้งที่ 4 ก็จะเหลือเพียงหนึ่งตัวเลือกเช่นเดียวกับครั้งที่ 2 หลังจากนั้นให้ทำตามขั้นตอนที่กล่าวมาซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งครบทุกสายส่งแล้วนำความน่าจะเป็นดังกล่าวมาคูณกันก็จะได้จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้มีทั้งหมด 48 คำตอบ และให้ค่าสมการวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดจำนวน 8 คำตอบ โดยมีลำดับการบินตรวจคือ 1-2-3-4-5-7-6, 1-3-2-4-5-7-6-1, 1-2-3-6-7-5-4-1, 1-3-2-6-7-5-4-1, 1-4-5-7-6-2-3-1, 1-4-5-7-6-3-2-1, 1-6-7-5-4-2-3-1 และ 1-6-7-5-4-3-2-1 ซึ่งทั้ง 8 คำตอบนี้ใช้เวลาในการบินตรวจสายส่ง 1.591 ชั่วโมง และมีค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น 84,817.42 บาท ซึ่งตรงกับคำตอบจากการคำนวณโดยโปรแกรม Lingo เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรม Lingo มีความสามารถในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างถูกต้องและสามารถนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพและความถูกต้องของวิธีเมตาฮิวริสติกในภายหลังได้

4.3 ผลการทดสอบจากโปรแกรม Lingo

หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบกับกรณีตัวอย่างอื่นๆ โดยค่าคำตอบที่ได้ในแต่ละกรณีตัวอย่างเป็นดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าสามารถหาคำตอบได้ในกรณีที่ 1-9 และ 11-12 กรณีตัวอย่างที่เหลือและกรณีสถานการณ์จริงจากผู้ให้บริการบำรุงรักษาสายส่ง (อปน.) ไม่สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาที่เหมาะสม กล่าวคือต้องใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า 24 ชั่วโมง เนื่องจากกรณีเหล่านั้นเป็นการสุ่มค่าขึ้นมาประกอบกับปัญหามีขนาดใหญ่และซับซ้อนเกินไป

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบโปรแกรม Lingo จากกรณีตัวอย่างบางกรณี

Case	N	A	RA	State	Objective Value (bath)	Operating Time (h.)	Runtime (hh:mm:ss)
1	7	21	3	Global Optimal	308,198	5.88	0:00:01
3	13	78	6	Global Optimal	293,948	5.60	0:00:03
5	14	91	6	Global Optimal	397,199	7.61	0:00:04
7	17	136	8	Global Optimal	332,119	6.34	0:00:04
9	18	153	8	Global Optimal	483,859	9.30	0:00:01
11	21	210	10	Global Optimal	415,853	7.98	0:01:30

หมายเหตุ ผลการทดสอบโปรแกรม Lingo ในตารางนี้ได้แสดงบางกรณีเท่านั้น จากกรณีตัวอย่างทั้งหมด 24 กรณี และกรณีสถานการณ์จริงอีก 1 กรณี และ RA คือ เซตของจำนวนสายส่งที่ต้องได้รับการตรวจสอบ

5. สรุป

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และประยุกต์ใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์สำหรับแก้ปัญหาการจัดแนวเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายในพื้นที่รับผิดชอบของกองบำรุงรักษาสายส่ง ฝ่ายปฏิบัติการภาคเหนือ โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาในงานวิจัยดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและใช้เวลาไม่นานในกรณีตัวอย่างที่มีขนาดเล็กไม่ซับซ้อน แต่ด้วยข้อจำกัดและขนาดของปัญหาที่ใหญ่และซับซ้อนมากขึ้นส่งผลให้แบบจำลองดังกล่าวใช้เวลาในการหาคำตอบนานมากขึ้นหรือไม่สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดสอบนี้วิธีตรงสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เพียง 11 กรณีตัวอย่างจากกรณีตัวอย่างทั้งหมด 24 กรณี ซึ่งทั้ง 11 กรณีนี้เป็นกรณีตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก คือมีจำนวนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในระบบเพียง 6, 8 และ 10 สายส่ง ส่วนอีก 13 กรณีนั้นไม่สามารถหาคำตอบได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำวิธีการทางเมตาฮิวริสติกส์มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป นั่นคือวิธีกลุ่มอนุภาค ซึ่งเป็นวิธีที่มี

ประสิทธิภาพและนิยมนำมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ แต่ยังพบงานวิจัยที่นำมาประยุกต์กับปัญหาการจัดแนวเส้นทางน้อย

6. งานวิจัยที่ต่อไปในอนาคต

สำหรับงานการวิจัยในขั้นตอนต่อไปจะใช้วิธีการเมตะฮิวริสติกส์ คือ วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและนิยมนำมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ และยังพบงานวิจัยที่นำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดแนวเส้นทางน้อย โดยจุดเด่นของวิธีกลุ่มอนุภาคคือ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม มีความง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้และมีเพียงไม่กี่พารามิเตอร์ในการปรับแต่ง มีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่สามารถผสมผสานเข้ากับโซลูชันที่ดีได้อย่างรวดเร็ว แม้กระทั่งปัญหาที่มีมิติสูงๆ จึงสามารถที่จะนำไปใช้กับปัญหาต่างๆ ในโลกแห่งความเป็นจริงในด้านวิศวกรรม การเงิน และสาขาอื่นๆ ได้อีกมากมาย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กฟผ., “ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด – สถิติรายปี - การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย,” [Online]. Available: <https://www.egat.co.th/home/statistics-demand-annual/>. [Accessed: 19-Jun-2023].
- [2] J. K. Lenstra and A. H. G. R. Kan, “On general routing problems,” *Networks*, vol. 6, no. 3, pp. 273–280, 1976.
- [3] U. F. Aminu and R. W. Eglese, “A constraint programming approach to the Chinese postman problem with time windows,” *Computers and Operations Research*, vol. 33, no. 12, pp. 3423–3431, 2006.
- [4] H. Thimbleby, “The directed Chinese postman problem,” *Software: Practice and Experience*, vol. 33, no. 11, pp. 1081–1096, 2003.
- [5] E. Minieka, “The Chinese postman problem for mixed networks,” *Management Science*, vol. 25, no. 7, pp. 643–648, 1979.
- [6] B. L. Golden and R. T. Wong, “Capacitated arc routing problems,” *Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 305–315, 1981.
- [7] H. A. Eiselt, M. Gendreau, and G. Laporte, “Arc routing problems, part I: the Chinese postman problem,” *Operations Research*, vol. 43, no. 2, p. 231, 1995.
- [8] H. A. Eiselt, M. Gendreau, and G. Laporte, “Arc routing problems, part II: the rural postman problem,” *Operations Research*, vol. 43, no. 3, pp. 399–414, Jun. 1995.
- [9] Ángel Corberán and Gilbert Laporte (Edited), *Arc routing: problem, methods, and applications*, USA: MOS-SIAM Series on Optimization, 2015.
- [10] M. Liu, H. K. Singh, and T. Ray, “A Memetic Algorithm with a New Split Scheme for Solving Dynamic Capacitated Arc Routing Problems,” in *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014, China*, 2014.
- [11] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization,” in *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks. International Joint Conference on Neural Networks*, United States of America, 1995.
- [12] Y. Shi and R. C. Eberhart, “Empirical Study of Particle Swarm Optimization,” in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, United States of America, 1999.
- [13] พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์, “การอธิบายขั้นตอนการทำงานของวิธีการพาหิเคิลสวอมออปติไมเซชันผ่านตัวอย่าง,” *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 11, pp. 78–87, 2557.
- [14] บารมี ศรีวิชัยนันท์, “การจัดเส้นทางเฮลิคอปเตอร์สำหรับตรวจสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง,” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมโลจิสติกส์และการจัดการโซ่อุปทาน*, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2559.