



อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มและการประยุกต์ใช้งาน

Swarm Intelligence Algorithms and Their Applications

ดารานาถ แท่นสุย์^{1*} และ อาริต ธรรมโน²

Daranat Tansui^{1*} and Arit Thammano²

¹คณะวิทยาการสื่อสาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทศไทย

²คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

¹Faculty of Communication Sciences, Prince of Songkla University, Thailand

²Faculty of Information Technology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Received : 26 May 2024, Received in revised form : 7 October 2024, Accepted : 21 October 2024

Available online : 17 December 2024

บทคัดย่อ

ที่มาและวัตถุประสงค์ : การพัฒนาและประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่เรียนรู้จากพฤติกรรมของกลุ่มสิ่งมีชีวิตเป็นการนำแรงบันดาลใจจากธรรมชาติเพื่อนำมาแก้ไขปัญหาในด้านต่าง ๆ ของชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะด้านวิทยาศาสตร์ การแพทย์ วิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และการจัดการทางธุรกิจ อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมีสองแนวคิดหลัก คือ อัลกอริทึมการวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithms) ซึ่งใช้หลักการคัดเลือกโดยธรรมชาติของ Darwin ในการคัดเลือกสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุดในสภาพแวดล้อมที่มีอุปสรรค และอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm Intelligence Algorithms) ซึ่งเลียนแบบพฤติกรรมการทำงานร่วมกันของกลุ่มสิ่งมีชีวิต เช่น ผึ้งนกหรือฝูงปลา การประยุกต์ใช้รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลทางการแพทย์ เพื่อวินิจฉัยโรค การวางแผนการจัดสรรทรัพยากรในโครงการก่อสร้าง การออกแบบระบบการจราจรเพื่อปรับปรุงความปลอดภัย การวิเคราะห์ข้อมูลพันธุกรรมเพื่อค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างยีนและโรค และการวิเคราะห์ข้อมูลธุรกิจเพื่อทำนายพฤติกรรมของตลาด อัลกอริทึมเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความยั่งยืนในการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการที่ได้แรงบันดาลใจจากธรรมชาติ โดยวัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่ออธิบายหลักการทำงาน ประสิทธิภาพ วิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียและการประยุกต์ใช้งานของอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่ม

วิธีดำเนินการวิจัย : วิธีการดำเนินการวิจัยในบทความนี้มีขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การศึกษารวบรวมเอกสารของนักวิจัยจำนวน 10 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมมด (Ant Colony Optimization) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง (Artificial Bee Colony Algorithm) อัลกอริทึมค้างคาว (Batt Algorithm) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ (Flower Pollination Algorithm) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช (Weed Optimization Algorithm) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาผึ้งของผึ้ง (Bee Colony Optimization) อัลกอริทึมค้นหาแบบนกคู้เหว้า (Cuckoo Search Algorithm) อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนก (Bird Flocking Algorithm) อัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ (Chicken Swarm Optimization) อัลกอริทึม

ความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm intelligence algorithms) ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์หลักการทำงานและประสิทธิภาพ 10 อัลกอริทึม ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของ 10 อัลกอริทึม ขั้นตอนที่ 4 สรุปการประยุกต์ใช้งานของ 10 อัลกอริทึม ขั้นตอนที่ 5 ผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัยเพื่อหาข้อดีและข้อเสียของอัลกอริทึม รวมถึงการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการใช้งานในงาน 5 ด้าน ได้แก่ ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่น และปัญหาการจำแนกประเภท

ข้อมูลสำคัญ : บทความนี้กล่าวถึงการใช้อัลกอริทึมที่เรียนรู้จากพฤติกรรมของกลุ่มสิ่งมีชีวิตเพื่อแก้ไขปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์, การแพทย์, วิศวกรรมศาสตร์, เทคโนโลยี, อุตสาหกรรม และการจัดการทางธุรกิจ โดยใช้อัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหามีความซับซ้อน หลากหลายและการพัฒนาที่ยั่งยืนในสังคมและธุรกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มในการวิเคราะห์ข้อมูลทางการแพทย์ เช่น การวินิจฉัยโรคหรือการจัดการสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อสุขภาพ การพัฒนาและประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ภาพทางการแพทย์ เพื่อช่วยในการวินิจฉัยและรักษาโรคอย่างมีประสิทธิภาพ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี การใช้อัลกอริทึมที่เรียนรู้จากพฤติกรรมของกลุ่มสิ่งมีชีวิตในการวางแผนและออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการดำเนินงาน การวางแผนการจัดสรรทรัพยากรในโครงการสร้างสิ่งก่อสร้างหรือการออกแบบระบบการจราจร เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการเดินทาง ด้านการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ การใช้อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มในการค้นหาและวิเคราะห์พันธุกรรม เพื่อค้นหาคุณสมบัติหรือความสัมพันธ์ระหว่างยีนและโรคที่เกี่ยวข้อง การใช้อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและทำนายเพื่อใช้ในการวิจัยในหลากหลายสาขาวิทยาศาสตร์ ด้านการบริหารจัดการทางธุรกิจ การใช้อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลลูกค้าเพื่อทำนายพฤติกรรมหรือการวางแผนการตลาด การวิเคราะห์ข้อมูลการตลาดเพื่อการวางแผนการตลาดและการทำนายยอดขายและกำไร การนำเสนอและการใช้อัลกอริทึมที่มีความเหมาะสมจากธรรมชาติสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนและมีการประยุกต์ใช้ได้ในงาน 5 ด้าน ดังนั้น ผลจากการศึกษาของบทความวิชาการนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและประยุกต์ใช้อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มอย่างมีประสิทธิภาพ

แนวทางการใช้ประโยชน์ : บทความอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มช่วยพัฒนางานหลายด้านด้วยหลักการเลียนแบบพฤติกรรมการทำงานร่วมกันของฝูงสิ่งมีชีวิต สามารถนำมาใช้ประโยชน์ ในด้านวิทยาศาสตร์โดยใช้ค้นหาแหล่งน้ำมันหรือแร่ธาตุใต้ดิน โดยใช้วิธีการสแกนและสำรวจข้อมูลจากสัญญาณเซ็นเซอร์ที่ทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งที่มีโอกาสพบแหล่งทรัพยากร ด้านการแพทย์นำมาวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อวินิจฉัยโรคและการผ่าตัดที่ซับซ้อน อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มช่วยในการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ผ่าตัด โดยจำลองการเคลื่อนไหวให้คล้ายการทำงานของกลุ่มสัตว์ที่ต้องการความแม่นยำและความร่วมมือสูง ด้านวิศวกรรมศาสตร์ใช้พัฒนาระบบจราจรอัจฉริยะอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มช่วยในการออกแบบและปรับปรุงระบบจราจรอัจฉริยะ เช่น การจำลองการเคลื่อนไหวของรถยนต์ตาม

เส้นทางต่าง ๆ เพื่อลดการจราจรติดขัด และเพิ่มความปลอดภัยโดยการวางแผนเส้นทางที่ปลอดภัยที่สุดด้านเทคโนโลยี การพัฒนาหุ่นยนต์ร่วมมือในการผลิต หุ่นยนต์สามารถใช้การควบคุมที่เลียนแบบพฤติกรรมกลุ่ม ช่วยให้หุ่นยนต์ทำงานร่วมกัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น สายการผลิตที่ต้องการการร่วมมือระหว่างหุ่นยนต์หลายตัว ด้านการเกษตรใช้บริหารฟาร์ม อัจฉริยะและควบคุมโดรนกำจัดศัตรูพืช ส่วนด้านธุรกิจนำมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมผู้บริโภค อัลกอริทึมความฉลาดแบบ กลุ่มสามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของลูกค้า โดยพิจารณารูปแบบและแนวโน้มการซื้อสินค้า เพื่อให้สามารถทำนาย และปรับกลยุทธ์ทางการตลาดให้ตรงกับความต้องการของลูกค้าได้อย่างเหมาะสม

ข้อสรุป : จากการศึกษาการใช้อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มที่เรียนรู้จากพฤติกรรมของกลุ่มสิ่งมีชีวิต พบว่า อัลกอริทึม ความฉลาดแบบกลุ่ม 10 อัลกอริทึมมีหลักการทำงานและประสิทธิภาพที่แตกต่างกันในการนำไปใช้งาน รวมทั้ง ข้อดีข้อจำกัดที่ แตกต่างกัน พบว่าอัลกอริทึมแต่ละประเภทมีข้อดีที่เหมือนและแตกต่างกัน เช่น อัลกอริทึมที่ประยุกต์ใช้ในการประมวลผลแบบ คู่ขนานได้ คือ อัลกอริทึมมดและอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วค้นพบคำตอบ ได้อย่างรวดเร็ว ได้แก่ อัลกอริทึมมด อัลกอริทึมค้างคาว อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และอัลกอริทึม หาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของรังผึ้ง ส่วนอัลกอริทึม ที่นำมาใช้แล้วรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างแน่นอน ได้แก่ อัลกอริทึมมด และอัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ เป็นต้น สำหรับอัลกอริทึมแต่ละประเภทมีข้อเสียที่เหมือนและแตกต่างกัน เช่น อัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วจะพบปัญหาติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ ได้แก่ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม อนุภาค อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ และอัลกอริทึมการจับกลุ่มของนก อัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วอาจเกิดภาวะเกินพอดี คือ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของรังผึ้ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงาน 5 ด้าน ได้แก่ ปัญหาการหา ค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบ ตามงาน ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่น และปัญหาการจำแนกประเภท

คำสำคัญ : อัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่ม ; หลักการทำงาน ; ประสิทธิภาพ ; การวิเคราะห์ข้อดีข้อเสีย ; การประยุกต์ใช้งาน

Abstract

Background and objectives : Algorithms inspired by the behavior of living organisms have been developed to apply principles from nature to solve problems in various aspects of daily life, e.g., in science, medicine, engineering, technology, and business management. The developed algorithms follow two main ideas. First, evolutionary algorithms use Darwin's principle of natural selection to choose the most suitable organisms in an unforgiving environment. Second, Swarm Intelligence Algorithms mimic the collaborative behavior of groups of living things, such as flocks of birds or schools of fish. The applications of these algorithms include medical data analysis for disease diagnosis, resource allocation planning in construction projects, traffic system design for improved safety, genetic data analysis to find relationships between genes and diseases, and business data



analysis to predict customer buying behavior. These algorithms help increase efficiency, accuracy, and sustainability in solving various problems by applying principles inspired by nature. This article aims to explain working principles and performance, the advantages, disadvantages, and applications of Swarm Intelligence algorithms.

Methodology : The main research steps were the following: 1. Studying and collecting research documents on 10 algorithms: Ant Colony Optimization, Artificial Bee Colony Algorithm, Bat Algorithm, Particle Swarm Optimization, Flower Pollination Algorithm, Weed Optimization Algorithm, Bee Colony Optimization, Cuckoo Search Algorithm, Bird Flocking Algorithm, and Chicken Swarm Optimization. 2. Analysis of working principles and efficiency of 10 algorithms. 3. Analyzing the advantages and disadvantages of the 10 algorithms. 4. Summarizing the applications of the 10 algorithms. 5. Research results and conclusions.

Key findings : This article summarizes the applications of algorithms inspired by the behavior of living organisms to solve various daily life problems in fields such as science, medicine, engineering, technology, and business management. It also aims to explain the advantages and disadvantages of these algorithms in solving complex problems in various aspects of daily life, especially to efficiently achieve sustainable development in society and business. Some applications are such as the following: using intelligent algorithms in medical data analysis for disease diagnosis and environmental management; applying algorithms to analyze medical images for efficient diagnosis and treatment; utilizing algorithms in engineering and technology for infrastructure planning and design to enhance safety and operational efficiency; and using algorithms in business management for data analysis to predict customer behavior and marketing strategies.

Implications : Swarm Intelligence algorithms, inspired by the collective behavior of living organisms, are valuable across various fields. In science, they can be utilized to locate underground oil or mineral resources through a network of sensors that collaborate to enhance efficiency in resource detection. In medicine, they aid in analyzing medical images for disease diagnosis and in complex surgeries by directing the movement of surgical robots, emulating precise, cooperative animal actions. In engineering, swarm algorithms improve intelligent traffic systems, simulating vehicle flows to alleviate congestion and plan safer routes. For technology, swarm-inspired collaborative robots excel in manufacturing, coordinating seamlessly with one another in intricate production lines. In agriculture, they are employed for managing smart farms and controlling drones for pest management. In business, swarm algorithms assist in analyzing consumer behavior by examining purchasing patterns, enabling accurate forecasting and adjustments to marketing strategies to better meet customer needs.

Conclusions : This review found that Swarm Intelligence algorithms were that the 10 swarm intelligence algorithms have different working principles and performance when applied in various tasks, along with their own advantages and disadvantages and limitations in solving problems, with some algorithms being more effective in certain areas. This article also concludes that some types of algorithms can solve complex problems and can be applied in 5 different areas comprehensively. This review may be beneficial to algorithm developers and users alike.

Keywords : swarm intelligence algorithm; working principles; performance; pros and cons analysis; application

*Corresponding author. E-mail : daranat.t@psu.ac.th

บทนำ

อัลกอริทึมด้านความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm intelligence algorithm) เป็นอัลกอริทึมพื้นฐานที่เป็นที่นิยมนำมาใช้เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution) โดยการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่ต้องใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนในงานด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านอุตสาหกรรม เทคโนโลยี การจัดการทางธุรกิจ วิทยาศาสตร์ การแพทย์ วิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น ซึ่งความฉลาดแบบกลุ่มเป็นวิธีหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่นิยมอย่างกว้างขวาง โดยความฉลาดแบบกลุ่ม คือ กลุ่มพฤติกรรมของระบบแบบกระจายศูนย์ที่ถูกนำมาใช้ประยุกต์ด้านปัญญาประดิษฐ์ กลุ่มพฤติกรรมของระบบแบบกระจายศูนย์ ประกอบด้วย ตัวแทน (Agent) ที่สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับตัวแทนตัวอื่นหรือกับสภาวะแวดล้อมได้ ซึ่งตัวแทนในระบบทุกตัวจะปฏิบัติตามกฎชุดหนึ่งแม้ว่าจะไม่มีศูนย์สั่งการที่ควบคุมว่าตัวแทนแต่ละตัวต้องปฏิบัติอย่างไร แต่การที่ตัวแทนแต่ละตัวมีปฏิสัมพันธ์กันก็ก่อให้เกิดรูปแบบความฉลาดในภาพรวมขึ้นมา ซึ่งตัวแทนแต่ละตัวไม่รู้ตัว แรงบันดาลใจที่ช่วยผลักดันความฉลาดแบบกลุ่มส่วนใหญ่จะมาจากธรรมชาติ โดยเฉพาะจากระบบนิเวศวิทยา (Adam *et al.*, 2018) โดยอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับ ประกอบด้วย 10 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมมด (หรืออัลกอริทึมอาณานิคมมด) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง อัลกอริทึมค้างคาว อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้ง อัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่า อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนก และอัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่

1. การศึกษาและรวบรวมเอกสาร: การศึกษาและรวบรวมเอกสารเกี่ยวกับ 10 อัลกอริทึม

1.1 อัลกอริทึมมด (Ant algorithm)

อัลกอริทึมมด (Ant algorithm) หรืออัลกอริทึมอาณานิคมมด (Ant colony algorithm) คือ ขั้นตอนวิธีในการค้นหาคำตอบของเส้นทางที่ดีที่สุดโดยเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของมด ซึ่งถูกนำเสนอเมื่อปี 1991 โดย Dorigo (Adam *et al.*, 2018) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial optimization problem) ที่หลากหลาย ได้อธิบายไว้ว่ามดจะค้นหาเส้นทางสั้นที่สุดระหว่างแหล่งอาหารกับรังของมัน ระหว่างที่เดินทางไปกลับระหว่างแหล่งอาหารและรัง มดจะทิ้งหลักฐานที่เรียกว่า ฟีโรโมน (Pheromone) ไว้บนพื้น ซึ่งเป็นสารเคมี เมื่อจะตัดสินใจเลือกทางเดินก็จะเลือกเส้นทางที่มีฟีโรโมนหนาแน่นมากกว่า องค์ประกอบที่สำคัญอย่างของอัลกอริทึมมด คือ การกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของโครงสร้างแบบกราฟ (Construction graph) เนื่องจากเส้นทางที่เดินผ่านกราฟอย่างสมบูรณ์จะแทนผลเฉลยของปัญหาและได้รับความนิยมในการนำมาใช้ ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของมด โดยพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของมดจะใช้วิธีการเดินแบบสุ่มในการหาแหล่งอาหาร สามารถสรุปหลักการทำงานของอัลกอริทึมมดได้ดังนี้ (Teja & Vandana, 2015)

1) เริ่มจากกำหนดประชากรมดและค่าฟีโรโมนเริ่มต้น การหาคำตอบเริ่มต้นของปัญหาโดยการที่มดตัวหนึ่งพบแหล่งอาหารมันจะทิ้งสารฟีโรโมนไว้บนเส้นทางที่เดิน

2) มดตัวต่อมาจะพิจารณาจากความเข้มข้นของกลิ่นฟีโรโมนที่มีอยู่ในการหาคำตอบ มดแต่ละตัวจะหาเส้นทางที่เป็นไปได้โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกเส้นทางเดินไปยังแหล่งอาหาร และเมื่อมดตัวอื่นๆ ไปยังแหล่งอาหารมดจะทิ้งสารฟีโรโมนเพิ่มเติมบนเส้นทางที่เดินผ่าน

3) ปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้น คือ การระเหย (Evaporation) ซึ่งการระเหยของฟีโรโมนนั้นขึ้นอยู่กับเวลาของมดที่เดิน ถ้าความเร็วในการเดินของมดคงที่และระยะทางของเส้นทางแต่ละเส้นทางแตกต่างกัน ระยะทางที่ยาวกว่าต้องใช้เวลาในการเดินทางนานกว่า

4) การปรับปรุงคำตอบโดยใช้วิธีการค้นหาเฉพาะที่เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดและนำไปปรับค่าฟีโรโมนเพื่อให้มดหาคำตอบได้ดีขึ้น การปรับ ฟีโรโมนทำได้ 2 ส่วน คือ การปรับค่าฟีโรโมนวงแคบเฉพาะที่ (Local pheromone update) และการปรับค่าฟีโรโมนวงกว้างครอบคลุม (Global pheromone update)

ดังนั้น ด้วยหลักการทั้งหมดจะได้เส้นทางที่สั้นกว่าจึงมีความเข้มข้นของฟีโรโมนที่สูงกว่าเนื่องจากการเพิ่มสารฟีโรโมนที่บ่อยกว่าและเมื่อเวลาผ่านไป สารฟีโรโมนบนเส้นทางที่ยาวกว่าก็จะค่อย จางหายไปทำให้เหลือเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด กล่าวคือ กระบวนการหาคำตอบจะอาศัยการทำซ้ำ โดยเส้นทางที่ดีจากรอบการทำซ้ำก่อนหน้าจะถูกเพิ่มสารฟีโรโมนให้มีความเข้มข้นมากขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลช่วยให้มดตัวอื่น หาเส้นทางได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในรอบถัดไป ในขณะที่วงสารฟีโรโมนบนเส้นทางทั้งหมดก่อนหน้านั้นจะถูกลดปริมาณลงเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสในการได้เส้นทางที่ไม่ดี (Adam *et al.*, 2018) อัลกอริทึมอาณานิคมมดมีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความสามารถในการนำมาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบในรูปแบบ

ขนานได้ (Zeineb *et al.*, 2017; Yi *et al.*, 2018) ความสามารถในการค้นพบคำตอบได้อย่างรวดเร็ว (Zeineb *et al.*, 2017; Yahong *et al.*, 2014) ความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงได้ และความสามารถในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างแน่นอน (Zeineb *et al.*, 2017; Gu *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมอาณานิคมมีข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งาน ได้แก่ การแจกแจงความน่าจะเป็นอาจไม่เท่ากันในแต่ละรอบ การใช้ลำดับของการตัดสินใจแบบสุ่มทำให้เกิดการประมวลผลที่ล่าช้า ใช้เวลาที่ไม่แน่นอนในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Zeineb *et al.*, 2017) และอาจจะเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงก่อนเวลาสมควร (Gu *et al.*, 2014)

1.2 อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง (Bee colony optimization algorithm)

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง นำเสนอโดย Karaboga เมื่อปี 2005 ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากพฤติกรรมการหาน้ำหวานของผึ้ง อัลกอริทึมนี้จะเลียนแบบพฤติกรรมของผึ้ง โดยผึ้งจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มเพื่อช่วยในการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด ได้แก่ กลุ่มผึ้งงาน (Employed bees) กลุ่มผึ้งเฝ้าดู (Onlooker bees) และกลุ่มผึ้งสำรวจ (Scout bees) หลักการทำงานอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งดังนี้ (Xianneng & Guangfe, 2016)

- 1) เริ่มต้นสร้างประชากรผึ้งทั้งหมดระบบจะส่งผึ้งงานไปหาแหล่งอาหารซึ่งแทนด้วยคำตอบที่เป็นไปได้ของปัญหา
- 2) จากนั้นผึ้งงานจะกลับมารายงานปริมาณน้ำหวานในแหล่งอาหารที่พวกมันค้นพบกับผึ้งเฝ้าดูที่รังของมัน ผึ้งเฝ้าดูจะทำการตรวจสอบแหล่งอาหารที่ถูกเลือกและนำไปเปรียบเทียบกับแหล่งอาหารบริเวณใกล้เคียงจากผึ้งงานตัวอื่น ยิ่งแหล่งอาหารใดมีแหล่งน้ำหวานมากก็มีความเป็นไปได้ในการที่ผึ้งเฝ้าดูเลือกแหล่งอาหารนั้น
- 3) เมื่อแหล่งอาหารใดไม่ถูกเลือกการหาแหล่งอาหารเปลี่ยนจากผึ้งงานเป็นผึ้งสำรวจซึ่งการทำงานของผึ้งสำรวจ (Scout Bee Phase) เริ่มต้นเมื่อแหล่งอาหารเดิมของผึ้งงานไม่ถูกเลือกจากผึ้งเฝ้าดูครบจำนวนที่กำหนดไว้ ผึ้งสำรวจจะทำการคำนวณหาแหล่งอาหารใหม่ด้วยการสุ่มมาแทนที่แหล่งอาหารเดิม
- 4) ระบบจะปรับปรุงความสามารถในการสำรวจเพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดจากการใช้ผึ้งสำรวจ ซึ่งผึ้งสำรวจจะเสนอกระบวนการการกลายพันธุ์ให้ระบบโดยการค้นหาแหล่งน้ำหวานใหม่ที่ยังไม่เคยสำรวจมาก่อนเพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นหาแหล่งน้ำหวานให้กว้างขึ้น

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งมีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความง่ายในการนำมาใช้งาน (Sangeeta & Pawan, 2016) ความสามารถในการใช้ฟังก์ชันที่ซับซ้อนได้ (Chen *et al.*, 2018) และความสามารถในการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาแบบพหุฐานนิยมได้ (Peng *et al.*, 2014) ความสามารถในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว (Yahong *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งมีข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งาน คือ การทำงานของระบบจะช้าเมื่อมีการประมวลผลแบบลำดับงาน (Tatjana *et al.*, 2014) และความง่ายต่อการติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ (Sangeeta & Pawan, 2016)

1.3 อัลกอริทึมค้างคาว (Bat algorithm)

อัลกอริทึมค้างคาวถูกนำเสนอโดย Xin-She Yang ในปี 2010 ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากพฤติกรรมการปล่อยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงของค้างคาว (Sonar) ใช้ในการนำทางและหาอาหาร (Echolocation) ค้างคาวเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่เล็กที่สุดในโลกมีลักษณะคล้ายหนู แต่มีปีกสามารถบินได้ ค้างคาวมีดวงตาที่เล็กมาก จมูกและปากของค้างคาวกินแมลงและมีหน้าที่ช่วยบังคับเสียง Sonar เพื่อใช้ในการนำทางและหาอาหาร ค้างคาวส่วนใหญ่ไม่ได้ใช้ตาในการมองเห็นขณะบินแต่เคลื่อนที่เข้าหาแหล่งอาหารตามเสียงสะท้อนที่ถูกปล่อยด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงมาก (คลื่นเหนือเสียง) การค้นหาที่เป็นจังหวะและสม่ำเสมอทำให้ค้นหาผลลัพธ์และแก้ปัญหาที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วอย่างมีประสิทธิภาพ การปล่อยคลื่นเสียง Sonar ของค้างคาวจะทำงานสัมพันธ์กันกับหูของค้างคาวทำให้ค้างคาวสามารถรู้ตำแหน่งและระยะห่างของสิ่งกีดขวางจากเสียงที่สะท้อนกลับมาทำให้ค้างคาวสามารถบินได้อย่างคล่องแคล่วแม้ในที่มืด โดยไม่ชนสิ่งกีดขวางพร้อมทั้งสามารถตรวจสอบตำแหน่งของสิ่งที่เป็นอาหารได้ด้วย พฤติกรรมดังกล่าวของค้างคาวถูกนำมาใช้กำหนดกลไกในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมค้างคาวได้ 3 หลักการ ได้แก่ (Sweta & Sudip, 2019)

หลักการที่ 1 ค้างคาวค้นหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้เสียงสะท้อนกลับเพื่อรับรู้ถึงระยะทางและความแตกต่างระหว่างอาหาร (หรือเหยื่อ หรือสิ่งกีดขวาง)

หลักการที่ 2 ค้างคาวบินอย่างไร้แบบแผน (Randomly) ด้วยความเร็วใดความเร็วหนึ่งที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งด้วยความถี่คงที่ โดยจะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นและความดังของเสียง Sonar เพื่อค้นหาเหยื่อและสามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (หรือความถี่) ของพัลส์ที่ปล่อยออกมาและปรับอัตราการปล่อยพัลส์ (Pulse emission) โดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับความใกล้ไกลของเป้าหมาย การปล่อยพัลส์จะเริ่มจากศูนย์และจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อค้างคาวเข้าใกล้เหยื่อเพิ่มมากขึ้น อัตราการปล่อยพัลส์ของค้างคาวจะถูกปรับเปลี่ยนไป

หลักการที่ 3 ความดังของเสียง สามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ เช่น ความดังของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากความดังที่สูงที่สุดไปยังค่าคงที่ที่ต่ำที่สุด กล่าวคือ ความดังจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อค้างคาวเข้าใกล้เหยื่อเพิ่มมากขึ้น ความดังของเสียงจะถูกปรับเปลี่ยนตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้น เป็นต้น

ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวของค้างคาวถูกนำมาใช้กำหนดกลไกในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมค้างคาว โดยมีขั้นตอนการทำงาน สามารถสรุปได้ดังนี้ (Sweta & Sudip, 2019)

1) กำหนดประชากรค้างคาวเริ่มต้นให้กับค้างคาวแต่ละตัวด้วยวิธีการสุ่มเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นพร้อมกับความเร็ว ความถี่พัลส์ อัตราการปล่อยพัลส์ และความดังของเสียง

2) สร้างคำตอบใหม่โดยการปรับค่าความถี่พัลส์ ปรับปรุงค่าความเร็วและตำแหน่งของค้างคาวแต่ละตัว และคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค้างคาวทุกตัว

3) กำหนดเลขสุ่ม ถ้าเลขสุ่มมีค่ามากกว่าอัตราการปล่อยพัลส์ให้เลือกคำตอบที่ดีที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสร้างคำตอบวงแคบเฉพาะที่ (Local solution) รอบๆ คำตอบที่ดีที่สุด

4) สร้างคำตอบใหม่ด้วยการสุ่มค่าความใหม่ ดังนั้น ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 จึงอยู่ในกลไกการทำงานหลักการที่ 1 ของอัลกอริทึมค่างคาว

5) กำหนดเลขสุ่ม ถ้าเลขสุ่มมากกว่าความดังของเสียง และค่าประเมินคำตอบเก่ามากกว่าค่าประเมินคำตอบใหม่ให้ยอมรับคำตอบใหม่เพิ่มอัตราการปล่อยพัลส์ของค่างคาวแต่ละตัว ขั้นตอนที่ 5 เป็นการสร้างสมการอัตราการปล่อยพัลส์ซึ่งอยู่ในหลักการที่ 2 ของอัลกอริทึมค่างคาว

6) ลดความดังของเสียงของค่างคาวแต่ละตัวเป็นการสร้างสมการเพื่อความดังของเสียงจะถูกปรับเปลี่ยนตามระยะใกล้ไกลของเหยื่อซึ่งอยู่ในหลักการที่ 3 ของอัลกอริทึมค่างคาว

7) เรียงลำดับค่าคำตอบค่างคาวตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์และหาคำตอบที่ดีที่สุดในช่วงกว้างครอบคลุมปัจจุบัน และทำงานซ้ำจนได้ตามกำหนด

อัลกอริทึมค่างคาวมีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ง่ายในการนำมาใช้งาน (Adis & Milan, 2014) ความสามารถในการนำไปประยุกต์ในการแก้ไขปัญหาได้หลากหลายอย่างมีประสิทธิภาพ (Osama *et al.*, 2014) โดยเฉพาะปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Sweta & Sudip, 2019) ความสามารถในการให้คำตอบที่ดีที่สุดในเวลาที่ยาวนาน (Selim & Ecir, 2014) และทำงานได้ดีกับปัญหาที่ซับซ้อน (Xu *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมค่างคาวมีข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งาน ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็วเฉพาะช่วงแรกและอัตราลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงจะช้าลงเรื่อยๆ และความแม่นยำอาจถูกจำกัดถ้ามีจำนวนฟังก์ชันการประเมินไม่สูงนัก (Ramli *et al.*, 2019)

1.4 อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization)

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคนำเสนอโดย Kennedy and Eberhart เมื่อปี 1995 เป็นวิธีการคำนวณหาคำตอบโดยคำนึงถึงการวัดคุณภาพที่กำหนด ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากพฤติกรรมการเดินทางหรือหาอาหารของฝูงสัตว์ (Satyasai *et al.*, 2017) โดยเฉพาะฝูงนกและฝูงปลา ตัวอย่างเช่น มีนกฝูงหนึ่งกำลังบินสุ่มหาอาหารอยู่พื้นที่หนึ่ง ที่ซึ่งมีอาหารอยู่เพียงชั้นเดียวในบริเวณนั้น นกทุกตัวไม่รู้ว่ามีอาหารอยู่ที่ตำแหน่งไหน จากสัญชาตญาณของนก มันจะรู้ว่ามีอาหารอยู่ห่างจากอาหารเท่าไร และขณะที่พวกมันบินไปพวกมันจะหาระยะห่างของมันจากแหล่งอาหาร นกที่ฝูงจะเลือกบินตามนกตัวที่อยู่ใกล้อาหารมากที่สุด จากนั้นพวกมันก็จะบินต่อไปเป็นช่วง ๆ โดยที่นกทั้งฝูงจะทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนพวกมันบินมาถึงแหล่งอาหาร จากวิธีการหาอาหารของฝูงนกเราจะเห็นได้ว่าการกำหนดตำแหน่งระยะห่างของตัวมันจากแหล่งอาหาร และการตัดสินใจบินตามนกตัวที่บินอยู่ใกล้แหล่งอาหารมากที่สุดในแต่ละช่วงจะใช้เวลาไม่นานมาก จนดูเหมือนมันบินเกาะกลุ่มกันไปแบบต่อเนื่อง วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคอธิบายได้ดังต่อไปนี้ (Zeineb *et al.*, 2017)

1) กำหนดค่าเริ่มต้นให้อนุภาค (Initial particles) ด้วยการสุ่มค่าตำแหน่ง

2) กำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคทุกตัวลงในพื้นที่การค้นหา

3) การประเมินค่าคำตอบของแต่ละอนุภาคโดยคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness value) ของอนุภาคผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวนั้นเคยพบและตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบ

4) การปรับปรุงค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวนั้นเคยพบ โดยแต่ละอนุภาคเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมของอนุภาคกับค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวนั้นเคยพบของตัวเอง หากค่าความเหมาะสมของอนุภาคล่าสุดดีกว่าค่าความเหมาะสมของอนุภาคก่อนหน้านั้นจะทำการปรับปรุงค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวนั้นเคยพบ (Update Pbest) ของตัวเอง แต่ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคล่าสุดไม่ดีกว่าให้คงค่าความเหมาะสมของอนุภาคก่อนหน้านั้นที่ดีกว่าไว้

5) การปรับปรุงค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบ โดยแต่ละอนุภาคเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมของอนุภาคของตัวเองกับค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบของกลุ่ม หากค่าความเหมาะสมของอนุภาคตัวเองดีกว่าค่าความเหมาะสมของค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบจะทำการปรับปรุงค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบ (Update Gbest)

6) การปรับปรุงความเร็ว โดยการปรับปรุงความเร็วของแต่ละอนุภาคเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่อนุภาค หลักการนี้ประกอบไปด้วยการนำค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคตัวนั้นเคยพบ ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบ และค่าความเร็วเดิมมาใช้ในการคำนวณ (Update velocity)

7) การปรับปรุงตำแหน่ง โดยการปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคมีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความง่ายในการนำมาใช้งานและมีการใช้ตัวแปรที่ปรับค่าน้อย รวมถึงเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการคำนวณแบบคู่ขนานได้และสามารถเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงมีกระบวนการที่กระชับทำให้ใช้เวลาไม่มากในการประมวลผล นอกจากนี้ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคยังมีความสามารถในการค้นหาปัญหาที่ยากต่อการค้นหาคำตอบโดยการค้นหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคก็มีข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความยากในการกำหนดการออกแบบตัวแปรเริ่มต้น ไม่สามารถแก้ไขปัญหาในรูปแบบการกระเจิงได้ (Problems of scattering) และไม่สามารถเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้ในกรณีที่ต้องแก้ไขปัญหามีความซับซ้อนสูงได้ รวมถึงในบางครั้งจะเกิดการลู่เข้าก่อนกำหนดซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ติดอยู่ในค่าคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่และไม่สามารถกระโดดออกไปค้นหาคำตอบต่อไปได้ (Zeineb et al., 2018)

1.5 อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ (Flower pollination algorithm)

อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Xin-She Yang ในปี 2012 ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากการสืบพันธุ์ของพืชดอกโดยอาศัยการถ่ายโอนข้อมูลที่เป็นละอองเกสรดอกไม้ กระบวนการสืบพันธุ์ดังกล่าวมักจะมีการเชื่อมโยงและเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายของละอองเกสร ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยพาหะถ่ายเรณู (Pollinator) ในการขนส่งละอองเกสรไปยังพืชดอกอื่น เช่น นก ค้างคาว ผีเสื้อ เป็นต้น วิธีการผสมเกสรดอกไม้ไม่สามารถใช้ได้ 2 วิธีการ ได้แก่ (Mandeep & Monika, 2016)

1) วิธีการผสมเกสรดอกไม้เป็นการผสมภายในดอกเดียวกัน ใช้วิธีการผสมเกสรแบบอาศัยสิ่งไม่มีชีวิต (Abiotic pollination) เป็นวิธีการผสมเกสรโดยใช้สิ่งรอบ ๆ เช่น ใช้ลมในการแพร่กระจายเกสร ยกตัวอย่างเช่น ดอกหญ้าที่ปลิวตามลม เพื่อแพร่กระจายเกสรไปในที่ต่างๆ ซึ่งถือว่าเป็นการผสมเกสรแบบท้องถิ่น (Local)

2) วิธีการผสมเกสรดอกไม้เป็นการผสมข้ามดอกข้ามต้น วิธีผสมเกสรแบบอาศัยสิ่งมีชีวิต (Biotic pollination) เช่น ผึ้ง มากินน้ำหวานที่ดอกไม้และทำให้ขาหรือลำตัวมีเกสรของดอกไม้ติดอยู่ เกสรเหล่านี้ก็จะถูกผึ้งนำไปยังดอกไม้อื่นๆ เพื่อผสมเกสรต่อไปถือว่าเป็นการผสมเกสรแบบครอบคลุม (Global) โดยส่วนใหญ่การผสมเกสรดอกไม้จะใช้วิธีผสมเกสรแบบอาศัยสิ่งมีชีวิต ซึ่งผึ้งมีแนวโน้มที่จะนำเกสรดอกไม้ก่อนหน้าไปยังดอกไม้ที่แข็งแรงซึ่งจะทำให้เกิดความมั่นคงของดอกไม้ (Flower constancy) คือ การที่มีแนวโน้มการโอนถ่ายละอองเกสรจากผึ้งจะไปยังดอกไม้อื่น ๆ ซึ่งทำให้เกิดวิวัฒนาการของสายพันธุ์ดอกไม้ที่ดีขึ้น (Mandeep & Monika, 2016) โดยกระบวนการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) สร้างจำนวนประชากรเริ่มต้นด้วยการกำหนด พารามิเตอร์ ขนาดของประชากร

2) หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบ ซึ่งค่าของตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทุกตัวเคยพบใช้กับวิธีการที่ 2

3) กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการวัดความน่าจะเป็นอยู่ระหว่าง $[0,1]$ เช่น 0.6

4) ทำการทดสอบค่าโดยการสุ่มค่าระหว่าง $[0,1]$ เช่น

ได้ 0.4 นั้นหมายความว่า 0.4 น้อยกว่า 0.6 จึงใช้กระบวนการทำงานของหลักการวิธีการที่ 2 แต่ถ้าสุ่มค่าระหว่าง $[0,1]$ เช่น

ได้ 0.7 นั้นหมายความว่า 0.7 มากกว่า 0.6 จึงใช้กระบวนการทำงานของหลักการวิธีการที่ 1

5) นำค่าคำตอบของคำตอบวงแคบเฉพาะที่ (Local solution) ใช้วิธีการที่ 1 และคำตอบวงกว้างครอบคลุม (Global solution) ใช้วิธีการที่ 2 มารวมกันและดูค่าคำตอบที่ดีที่สุดเป็นคำตอบผลเฉลย

อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้มีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความง่ายในการนำมาใช้งาน ความสามารถในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างแน่นอนแต่จะเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็วในรอบการทำซ้ำในช่วงต้นของการประมวลผลเท่านั้น หลังจากนั้นจะเกิดข้อเสียจากการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้ช้าลงเมื่อถึงรอบการทำซ้ำในรอบถัดมาในช่วงท้ายๆ (Mohammed *et al.*, 2020)

1.6 อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช (Invasive weed optimization)

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืชนำเสนอโดย Mehrabian and Lucas ในปี 2006 ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากการแพร่กระจายเพื่อล่าอาณานิคมของวัชพืช การแพร่กระจายของวัชพืชเป็นไปในลักษณะของการล่าอาณานิคมโดยการครอบครองพื้นที่ว่างระหว่างพืชต่าง ๆ ทั้งหมด วัชพืชมีความทนทานสูงและสามารถปรับตัวเองให้เข้ากับสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้เป็นอย่างดี วัชพืชมีคุณสมบัติ 2 ด้าน ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช ได้แก่ การเติบโตอย่างรวดเร็ว และการแข่งขันกันแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว โดยอัลกอริทึมนำคุณสมบัติของวัชพืชมาพิจารณาใน 2 ประเด็น ดังนี้ (Mojgan & Mahdi, 2019)

ประเด็นที่ 1 มีการจำกัดจำนวนเมล็ดพันธุ์พืชที่ถูกแพร่กระจายในพื้นที่การค้นหาสำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นของประชากรหลัก

ประเด็นที่ 2 เมล็ดแต่ละเมล็ดพันธุ์มีการเติบโตและมีน้ำที่ผลิตเมล็ดพันธุ์ใหม่รุ่นถัดไปซึ่งอัตราการเติบโตของพืชเป็นไปในลักษณะเชิงเส้น โดยที่อัตราการเติบโตจะค่อย ๆ ลดลงจากอัตราการเติบโตสูงสุดไปสู่อัตราการเติบโตต่ำสุด โดยกระบวนการทำงานของอัลกอริทึม สามารถอธิบายได้ดังนี้ (Souad & Besma, 2014)

1) เริ่มต้นสร้างเมล็ดพืชขึ้นมาจำนวนหนึ่งแล้วให้กระจายแบบสุ่มในพื้นที่คำตอบการค้นหา (Search space) ที่กำหนด และมีการเจริญเติบโตเป็นต้นพืช

2) ทำการประเมินผล โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด เป็นขั้นตอนที่มีการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละต้นของพืช หลังจากนั้นจึงเรียงลำดับต้นของพืชตามค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

3) การสืบพันธุ์ เป็นขั้นตอนที่พืชมีการสืบพันธุ์โดยมีการสร้างเมล็ด แต่ละต้นสามารถสร้างเมล็ดขึ้นมาจำนวนหนึ่ง โดยจำนวนเมล็ดจะขึ้นอยู่กับค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละต้น ต้นที่เป็นพืชที่ดีที่สุดจะมีจำนวนเมล็ดมากที่สุด และจำนวนจะลดลงแบบเชิงเส้น (Linearly decrease) ตามค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จนถึงจำนวนน้อยที่สุด

4) การกระจายเมล็ดพันธุ์ เมล็ดที่สร้างขึ้นจะถูกกระจายแบบสุ่มในพื้นที่คำตอบโดยใช้หลักการกระจายแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ รวมถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบของการวนรอบ

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของพืชเป็นอัลกอริทึมที่เกิดจากการศึกษาพฤติกรรม การเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ของพืชที่แข็งแกร่งทนต่อทุกสภาวะมีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ การมีขั้นตอนการประมวลผลและการคำนวณหาค่าตอบที่สั้นและเป็นวิธีที่มีโครงสร้างง่ายต่อการใช้งาน มีพารามิเตอร์น้อย มีความน่าเชื่อถือสูง ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการประยุกต์ใช้งาน (Souad & Besma, 2014) และมีความสามารถในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว (Mojgan & Mahdi, 2019) รวมถึงใช้แก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ (Sasan *et al.*, 2020) สำหรับข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งานของอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของพืช คือ การเกิดภาวะเกินพอดี (Over fitting) (Roozbeh *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตาม พบว่ามีผลการวิจัยที่แสดงว่าการเกิดภาวะเกินพอดีของอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของพืชมีค่าน้อยกว่าอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Chawalsa *et al.*, 2017)

1.7 อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้ง (Marriage in honey bees optimization)

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้งนำเสนอโดย Abbass เมื่อปี 2001 ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากการหาคู่และการผสมพันธุ์ของผึ้ง (Anguluri *et al.*, 2017) โดยธรรมชาติผึ้งจะแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผึ้งราชินี (Queen) ผึ้งโดรน (Drone) ซึ่งเป็นผึ้งตัวผู้ และผึ้งงาน (Worker) ซึ่งเป็นผึ้งตัวเมีย การหาคู่และการผสมพันธุ์ของผึ้งเกิดขึ้นระหว่างผึ้งราชินีและผึ้งโดรน โดยผึ้งราชินีจะพิจารณาเลือกผสมพันธุ์จากความเร็วและความเหมาะสมของพ่อพันธุ์ของผึ้งโดรน โดยอัลกอริทึมนี้อาศัยรูปแบบพฤติกรรมหาอาหารตามธรรมชาติของผึ้ง ประกอบด้วย 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 การสร้างอาณานิคมนี้เริ่มจากผึ้งตัวเมียที่เจริญพันธุ์แล้วต้องการจะสร้างรัง ผลิตไข่ และหาอาหารสำหรับตัวอ่อน

วิธีที่ 2 การจับกลุ่มในอาณานิคมโดยเริ่มจากผึ้งราชินีของฝูงจำนวน 1 ตัวหรือมากกว่ารวมกันกับผึ้งโดรนจากอาณานิคมดั้งเดิม ทำการวางไข่และเป็นผู้ดูแลตัวอ่อน สำหรับอาณานิคมที่มีผึ้งราชินีเพียงตัวเดียว เรียกว่า “Monogynous colony” หรือถ้ามีผึ้งราชินีมากกว่า 1 ตัวจะเรียกว่า “Polygynous colony” ซึ่งการจับกลุ่มของผึ้งหลายราชินีถูกใช้ในอัลกอริทึมนี้

กระบวนการอัลกอริทึมอาศัยการผสมพันธุ์จะเกิดขึ้นขณะบินบนอากาศ โครงสร้างอาณานิคมผึ้ง ประกอบด้วย ผึ้งราชินี ผึ้งโดรน ผึ้งงาน และตัวอ่อน ซึ่งผึ้งราชินีเป็นตัวหลักในการขยายพันธุ์ ผึ้งโดรนจะทำการขยายพันธุ์โดยไม่กลายพันธุ์ ส่วนผึ้งงานจะคอยฟักไข่หรือตัวอ่อน ในการผสมพันธุ์นั้นจะเริ่มจากผึ้งโดรนบินไปหาผึ้งราชินีเพื่อผสมพันธุ์บนอากาศ ซึ่งผึ้งราชินี 1 ตัวสามารถผสมพันธุ์กับผึ้งโดรนได้เป็นจำนวน 7 ถึง 20 ตัว แล้วผึ้งราชินีจะเก็บเชื้อไว้ผสมกับไข่เป็นการเลือกผสมแบบสุ่ม ส่วนผึ้งงานทำหน้าที่ฟักไข่และดูแลตัวอ่อนซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวแทนที่ช่วยปรับปรุงให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด การผสมพันธุ์นี้ผึ้งราชินีจะเป็นผู้เลือกผึ้งโดรนซึ่งขึ้นกับคุณภาพของพ่อพันธุ์ เมื่อผึ้งราชินีบินช้าลงและเริ่มเคลื่อนที่ในระยะสั้นๆ คือ การสิ้นสุดการเลือกผึ้งโดรน ซึ่งการผสมพันธุ์นี้ผึ้งราชินีจะบินแบบสุ่มจนความเร็วในการบินลดลงเรื่อย ๆ โดยกระบวนการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ (Anguluri *et al.*, 2017)

- 1) กำหนดจำนวนผึ้งนางพญา จำนวนผึ้งงาน และจำนวนตัวอ่อนที่เกิดจากนางพญา 1 ตัว
- 2) กำหนดขนาดของถุงเก็บสเปิร์มในเพศเมียซึ่งแสดงจำนวนครั้งในการจับคู่ของนางพญาต่อการบินจับคู่ 1 ครั้ง
- 3) กำหนด พลังงานและความเร็วของนางพญาแบบสุ่ม
- 4) กำหนดจำนวนผึ้งงานใช้วิธีการสุ่มค่าเฉพาะที่ไม่ซ้ำกัน
- 5) เลือกผึ้งงานแบบสุ่มเพื่อปรับปรุงจีโนไทป์ (Genotype) ของนางพญาแต่ละตัว และกำหนดให้นางพญานั้นถือเป็นผู้ที่ดีที่สุด ถือเป็น 1 รอบของการบินจับคู่
- 6) การบินจับคู่แต่ละรอบนางพญาแต่ละตัวจะบินด้วยพลังงานและความเร็วที่ถูกสุ่มขึ้นก่อนการบินแต่ละรอบสำหรับแต่ละตัว
- 7) การบินจับคู่เริ่มต้นขึ้น โดยผึ้งตัวผู้จะถูกสุ่มขึ้นมาและนางพญาจะย้ายตำแหน่งไปอยู่เหนือผึ้งตัวนั้น ระยะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยนางพญาขึ้นอยู่กับความเร็วซึ่งแสดงความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนแต่ละบิต (Bit) ในจีโนม (Genome) ของผึ้งตัวผู้ ดังนั้น ในตอนเริ่มต้นของการบินนางพญาจะบินด้วยความเร็วสูงและเคลื่อนที่ไปไกล เมื่อพลังงานลดลงความเร็วก็จะลดลงสมาชิกใกล้เคียงที่ถูกล่าก็จะถูกนางพญาควบคุมก็จะลดลง
- 8) การเคลื่อนที่แต่ละครั้งที่นางพญาเคลื่อนที่จะทำการจับคู่กับผึ้งตัวผู้ที่พบโดยใช้ความน่าจะเป็น
- 9) ถ้าการจับคู่สำเร็จ สเปิร์มจากผึ้งตัวผู้จะถูกเก็บลงสู่ถุงเก็บสเปิร์มของนางพญา ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าแต่ละครั้งที่ผึ้งตัวผู้ถูกสุ่มขึ้นมายีนส์ (Genes) ครั้งหนึ่งของผึ้งตัวผู้จะถูกทำเครื่องหมายแบบสุ่ม ดังนั้น ยีนส์ที่จะถูกส่งผ่านไปยังตัวอ่อนสำหรับผึ้งตัวหนึ่ง ๆ จะคงเดิม

10) เมื่อนางพญาทุกตัวบินจับคู่เสร็จแล้ว พวกมันจะทำการผสมพันธุ์โดยเลือกสัดส่วนสำหรับค่าความเหมาะสม (Fitness) และจับคู่กับสเปิร์มที่สุ่มเลือกขึ้นมาจากในถุงเก็บสเปิร์ม ฝัองงานจะถูกเลือกจากค่าความเหมาะสมเพื่อปรับปรุงตัวอ่อน

11) ได้ตัวอ่อนทั้งหมดแล้วจะทำการเรียงลำดับจากค่าความเหมาะสมของตัวอ่อนที่มีค่าที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดให้ไปแทนที่นางพญาที่มีค่าต่ำที่สุด จนกระทั่งไม่มีตัวอ่อนตัวไหนมีค่าดีกว่านางพญา จากนั้นการบินหาคู่ก็จะเริ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งครบจำนวนที่กำหนด

อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้งมีข้อดีในการนำมาใช้งาน คือ การลู่เข้าก่อนกำหนดเกิดขึ้นได้ยาก ซึ่งทำให้ไม่เกิดการติดอยู่ในค่าคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Chenguang & Qiaoge, 2013) และง่ายในการนำมาใช้งานร่วมกับอัลกอริทึมแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของปัญหาที่ซับซ้อนได้ รวมถึงเป็นอัลกอริทึมที่แก้ไขปัญหาลักษณะหลายอย่างมีประสิทธิภาพ (Yuksel & Erkan, 2013 ; Ajchara & Arit, 2013) สำหรับข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งานของอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้ง ได้แก่ มีการประมวลผลการทำงานที่ช้าและมีกระบวนการทำงานที่ซับซ้อน รวมถึงมีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้ช้า (Chenguang & Qiaoge, 2013)

1.8 อัลกอริทึมค้นหาแบบนกคuckoo (Cuckoo search algorithm)

อัลกอริทึมค้นหาแบบนกคuckoo หรือนำเสนอโดย Xin-She Yang และ Suash Deb เมื่อปี 2009 ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากวิธีการสืบพันธุ์โดยการที่นกคuckoo ไข่ไว้กับรังนกสายพันธุ์อื่น โดยใช้ประโยชน์จากรังนกบางสายพันธุ์ที่นกคuckoo พิจารณาแล้วว่ามีคุณภาพสูงในการฟักไข่เพื่อขยายสายพันธุ์ รังที่นกคuckoo เลือกวางไข่ลงไปจะถูกสุ่มเลือกเพื่อหาคุณภาพของรัง ถ้ารังที่ถูกเลือกมีคุณภาพก็จะนำมาใช้เป็นรังสำหรับวางไข่ในรุ่นถัดไป โดยนกคuckoo อาจวางไข่พร้อมกันที่หลาย ๆ รัง เมื่อวางไข่แล้วนกคuckoo จะเลียนแบบไข่ของตัวเองให้มีความคล้ายกับไข่ของนกชนิดอื่นในรังดังกล่าวให้มากที่สุด (หรือบางครั้งถูกเรียกว่าการสร้างไข่เลียนไว้ในรังเป้าหมาย) โดยพยายามให้นกที่เป็นเจ้าของรังไม่สามารถค้นหาเจอว่ามีไข่แปลกปลอมอยู่ กรณีที่นกเจ้าของรังค้นเจอว่าเป็นไข่แปลกปลอมการดำเนินการจะมีอยู่ 2 ทางเลือก ได้แก่ การทำลายไข่แปลกปลอมด้วยการโยนไข่ของคuckoo ทิ้ง และการทิ้งรังไปสร้างรังใหม่ อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมค้นหาแบบนกคuckoo มีข้อตกลง 3 ข้อ ดังนี้ (Anuja et al., 2017)

ข้อที่ 1 นกคuckoo สามารถวางไข่ได้ 1 ฟองต่อครั้ง (สามารถเลือกได้ 1 ชุดคำตอบหรือค่าที่เหมาะสมต่อครั้ง) สามารถวางไข่ไว้ในรังที่ได้ทำการคัดเลือกแล้วว่ามีคุณภาพเหมาะสม (เป็นชุดคำตอบหรือค่าที่เหมาะสมต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหา)

ข้อที่ 2 รังที่ดี (ชุดคำตอบหรือค่าที่เหมาะสมต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหา) และไข่ที่มีคุณภาพดีมากจะได้รับการคัดเลือกให้เป็นรุ่นถัดไป

ข้อที่ 3 กำหนดจำนวนรังที่นกสามารถเลือกใช้ได้มาจำนวนหนึ่ง โดยกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่ไข่ของนกคuckoo จะถูกค้นพบโดยนกเจ้าของรังเท่ากับค่าความน่าจะเป็นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ขั้นตอนการทำงานของวิธีการค้นหาอัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่าสำหรับการค้นหาคำตอบของปัญหามีรายละเอียด ดังนี้ (Anuja *et al.*, 2017)

- 1) กำหนดจำนวนรังของนกดูเหว่าเท่ากับจำนวนหนึ่ง ซึ่งหมายถึง จำนวนวิธีการแก้ปัญหาตามจำนวนรังนกที่กำหนดไว้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
- 2) กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับแต่ละวิธี กำหนดค่าพารามิเตอร์แต่ละวิธีด้วยวิธีกำหนดค่าเลขสุ่มตามขอบเขตของข้อมูลที่กำหนด
- 3) เลือกวิธีแก้ปัญหาจำนวน 1 วิธี จากวิธีทั้งหมดแล้วคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการเลือกวิธีแก้ปัญหาจากขั้นตอนที่ 2 มา 1 วิธี จากวิธีการแก้ปัญหาทั้งหมดที่มีอยู่จากนั้นทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 4) เลือกวิธีแก้ปัญหาจำนวน 1 วิธี (สำหรับใช้เปรียบเทียบกับขั้นตอนที่ 3) จากวิธีทั้งหมดแล้วคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการเลือกวิธีแก้ปัญหาจากขั้นตอนที่ 2 มา 1 วิธี จากวิธีการแก้ปัญหาทั้งหมดที่มีอยู่จากนั้นทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 5) เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 โดยทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของขั้นตอนที่ 3 น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของขั้นตอนที่ 4 หรือไม่
- 6) แทนที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของข้อที่ 4 ด้วยวิธีแก้ปัญหาตัวใหม่ เมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของข้อที่ 3 น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของขั้นตอนที่ 4 แล้วไปทำขั้นตอนที่ 8
- 7) กำหนดให้วิธีการของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของขั้นตอนที่ 4 เป็นวิธีแก้ปัญหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของข้อที่ 3 มากกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของข้อที่ 4 แล้วไปทำขั้นตอนที่ 8
- 8) ยกเลิกวิธีแก้ปัญหาที่ไม่ดีด้วยสัดส่วนความน่าจะเป็นและสร้างวิธีแก้ปัญหารูปแบบใหม่ด้วยจำนวนเท่ากัน
- 9) เก็บวิธีแก้ปัญหาค่าที่ดีที่สุดไว้

อัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่า มีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ มีความง่ายในการนำมาใช้งานแต่จะขึ้นอยู่กับประชากรและความน่าจะเป็นที่นำมาใช้ และมีแนวโน้มต่ำที่จะเกิดการตกอยู่ในสถานการณ์ติดอยู่ในคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่สามารถออกจากสถานการณ์ดังกล่าวด้วยความรวดเร็ว (Kashif *et al.*, 2018) สำหรับข้อเสียที่เกิดขึ้นในการนำมาใช้งานของอัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่า ได้แก่ ประสิทธิภาพการทำงานไม่สูงเนื่องจากการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้ช้า (Yin *et al.*, 2016) และมีการทำงานที่ช้าเนื่องจากใช้จำนวนการทำซ้ำหลายรอบ (Le & Vo, 2015)

1.9 อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนก (Bird swarm algorithm)

อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนกได้ถูกนำเสนอในปี 2015 โดย Xian-Bing Meng และคณะ ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากวิธีการจับกลุ่มจากพฤติกรรมทางสังคมและปฏิสัมพันธ์ทางสังคมในฝูงนก นกส่วนใหญ่มีพฤติกรรม 3 ลักษณะ ได้แก่ พฤติกรรมการจับเหยื่อ พฤติกรรมการเฝ้าระวัง และพฤติกรรมการบิน นกจะหาอาหารและหลบหนีผู้ล่าโดยใช้การปฏิสัมพันธ์ทางสังคมเพื่อให้มีโอกาสสูงในการรอดชีวิต พฤติกรรมทางสังคมของนกที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนา

อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนกจะนำมาใช้ลดความซับซ้อนของพฤติกรรมทางสังคมของนกด้วยกฎทางอุดมคติ 5 ประการ ดังนี้ (Xian *et al.*, 2016)

- 1) นกแต่ละตัวสามารถสลับพฤติกรรมไปมาไ้ระหว่างพฤติกรรมการเฝ้าระวังและพฤติกรรมการจับเหยื่อ
- 2) ในขณะที่หาอาหารนกแต่ละตัวสามารถบันทึกและปรับปรุงประสบการณ์ที่ดีที่สุดก่อนหน้านี้เกี่ยวกับสถานที่หาอาหารก่อนหน้านี้ ประสบการณ์นี้สามารถใช้ในการค้นหาอาหารโดยข้อมูลจะถูกแบ่งปันกันในฝูงนก
- 3) เมื่ออยู่ในสภาวะเฝ้าระวัง นกแต่ละตัวจะพยายามขยับไปที่กึ่งกลางของฝูง พฤติกรรมนี้ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความสามารถในแข่งขันกันเองในฝูง โดยนกที่มีปริมาณอาหารสูงกว่าจะมีแนวโน้มที่จะอยู่ใกล้กับใจกลางฝูงมากกว่านกที่มีปริมาณอาหารต่ำกว่า
- 4) นกจะบินไปที่อื่นเป็นระยะเมื่อบินไปยังสถานที่อื่นนกมักจะสลับไปมาระหว่างการหาอาหารและการขออาหาร นกที่มีการสำรวจอาหารมากที่สุดจะเป็นผู้หาอาหารในขณะที่นกที่มีการสำรวจอาหารต่ำสุดจะเป็นผู้ขออาหาร นกอื่นที่มีการสำรวจอาหารระหว่างการสำรวจอาหารสูงสุดและการสำรวจอาหารต่ำสุดจะสุ่มเลือกเป็นผู้หาอาหารและผู้ขออาหาร
- 5) นกผู้หาอาหาร (Producers) มีกิจกรรมในการค้นหาอาหาร และนกผู้ขออาหาร (Scroungers) จะสุ่มหาอาหารตามนกผู้หาอาหาร

อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนกมีข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้งาน (Min *et al.*, 2018) ใช้ตัวแปรปรับค่าที่น้อย (Chao *et al.*, 2018) ความสามารถในการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว (Ibrahim *et al.*, 2019 ; Chao *et al.*, 2018) และมีความแม่นยำสูง (Min *et al.*, 2018) งานได้ดีกับปัญหาที่ซับซ้อน (Xian *et al.*, 2016 ; Ibrahim *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนกมีข้อเสีย คือ เป็นอัลกอริทึมที่ง่ายต่อการติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่และเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงก่อนเวลาที่สมควร (Chao *et al.*, 2018)

1.10 อัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ (Chicken swarm optimization)

อัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ได้ถูกนำเสนอในปี 2014 โดย Xian-Bing Meng และคณะ ซึ่งมีแรงบันดาลใจทางธรรมชาติจากการเลียนแบบลำดับชั้นในฝูงไก่และพฤติกรรมในการหาอาหารของฝูงไก่ ประกอบด้วย ไก่ตัวผู้ (Roosters) ไก่ตัวเมีย (Hens) และลูกไก่ (Chicks) ซึ่งฝูงไก่สามารถแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มแต่ละกลุ่มประกอบด้วย ไก่ตัวผู้ 1 ตัว ไก่ตัวเมีย และลูกไก่ในจำนวนมาก โดยไก่แต่ละตัวจะมีการหาอาหารที่แตกต่างกันและจะปฏิบัติตามกฎของการเคลื่อนไหวที่แตกต่างกัน โดยมีการแข่งขันระหว่างไก่แต่ละตัวภายใต้ลำดับชั้นที่เฉพาะเจาะจง ไก่เป็นสัตว์สังคมที่อาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูง ไก่มีความซับซ้อนทางปัญญา และสามารถรับรู้และจดจำข้อมูลหลัก ๆ ได้มากแม้จะผ่านไปหลายเดือน ไก่จะใช้เสียงที่แตกต่างกันมากกว่า 30 ลักษณะเสียงสำหรับการติดต่อสื่อสารกันเอง รวมถึงการอาศัยการถ่ายทอดข้อมูลองค์ความรู้จำนวนมากให้กันและกันภายในฝูง เช่น การทำรัง การค้นหาอาหาร การผสมพันธุ์ การป้องกันอันตราย เป็นต้น พฤติกรรมทางสังคมของไก่ที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ด้วยกฎ 4 ประการ ดังนี้ (Xianbing *et al.*, 2014)

1) ในฝูงไก่มีหลายกลุ่มแต่ละกลุ่มประกอบด้วยไก่ตัวผู้ ไก่ตัวเมียและลูกไก่

2) วิธีแบ่งฝูงไก่ออกเป็นหลายกลุ่มและกำหนดตัวตนของไก่ทั้งหมด (ไก่ตัวผู้ ไก่ตัวเมียและลูกไก่) ขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสม (Fitness values) ของไก่แต่ละตัว โดยไก่ที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดจะได้รับบทบาทเป็นไก่ตัวผู้ของกลุ่มแต่ละกลุ่ม ส่วนไก่ที่มีค่าความเหมาะสมต่ำที่สุดจะได้รับบทบาทเป็นลูกไก่ และที่เหลือจะได้รับบทบาทเป็นไก่ตัวเมียโดยเลือกอยู่ในแต่ละกลุ่มด้วยวิธีการสุ่ม ความสัมพันธ์ว่าลูกไก่จะเป็นลูกของไก่ตัวเมียตัวใดก็จะใช้วิธีการสุ่มเช่นกัน

3) ลำดับชั้นความสัมพันธ์ในการปกครองและความสัมพันธ์ระหว่างแม่และลูกในกลุ่มจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

4) ไก่แต่ละตัวจะติดตามกันและกันในกลุ่มเพื่อค้นหาอาหาร และไก่แต่ละตัวอาจจะป้องกันไม่ให้ไก่ตัวอื่นมากินอาหารของตัวเอง ไก่แต่ละตัวจะพยายามแย่งอาหารของไก่ที่ค้นพบอาหารแล้ว ส่วนลูกไก่จะค้นหาอาหารรอบ ๆ แม่ไก่ของตัวเอง (ไก่ตัวเมีย) ค่าความเหมาะสมของไก่สัมพันธ์กับความสามารถในการแข่งขันในการหาอาหาร (ความสามารถการค้นหาอาหารและการแย่งอาหาร)

อัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ ข้อดีในการนำมาใช้งาน ได้แก่ มีความแม่นยำสูงในการค้นหา มีความสามารถในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว (Xianbing *et al.*, 2014 ; Chiwen *et al.*, 2017) มีความแม่นยำสูง (Chiwen *et al.*, 2017) และมีจำนวนตัวแปรควบคุมน้อย (Nursyiva *et al.*, 2017) นอกจากนี้ ถ้าใช้เทคนิคการค้นหาแบบสุ่มด้วยการแจกแจงแบบปกติจะทำให้โอกาสเกิดการลู่เข้าก่อนกำหนดเกิดขึ้นได้ยาก ซึ่งทำให้ไม่มีปัญหาการติดอยู่ในค่าคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Chiwen *et al.*, 2017) สำหรับข้อเสียของอัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ ได้แก่ มีกระบวนการทำงานที่ซับซ้อน (Dorin *et al.*, 2018)

2. วิเคราะห์หลักการทำงานและประสิทธิภาพ 10 อัลกอริทึม

อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Algorithms) เป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนในหลายสาขา โดยมุ่งเน้นการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือมีประสิทธิภาพที่สุด อัลกอริทึมแต่ละตัวมีลักษณะเฉพาะที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ เช่น ความเร็ว ความแม่นยำ และความสามารถในการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในค่าที่ไม่เหมาะสม (Local Optima) ช่วยให้สามารถแก้ปัญหาได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและการปรับแต่งพารามิเตอร์ให้เหมาะสม ต้น โดยประสิทธิภาพของอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มทั้ง 10 ประเภท สรุปได้ดัง Table 1



Table 1 An overview of each algorithm's working principles and their performance

Algorithm	Working Principle	Performance
Ant Colony Optimization (ACO)	Simulates ant's behavior in finding the shortest path using pheromone trails.	High accuracy, but slow when the size of the problem is big.
Artificial Bee Colony (ABC)	Simulates bees' searching for nectar and sharing information to find optimal solutions.	It is Highly flexible, and it avoids local optima well, but careful parameter tuning is needed.
Bat Algorithm (BA)	Simulates bats using echolocation to locate prey in finding optimal solutions.	Fast, but can get stuck in local optima.
Particle Swarm Optimization (PSO)	Simulates the movement of particles based on personal best position and neighboring best positions.	Simple structure and fast, but sometimes gets trapped in local optima.
Flower Pollination Algorithm (FPA)	Simulates flower pollination, using local and global search strategies.	Good at exploring solutions and avoiding traps, but its performance depends on parameter tuning.
Weed Optimization Algorithm	Simulates the growth and spread of weeds to find the most suitable area to take root.	Effective at exploring multiple points, but it gets slow as the problems become more complex.
Bee Colony Optimization (BCO)	Simulates bees' sharing information about food sources hence improving search performance.	Finds optimal solutions well, but involves fine parameter tuning.
Cuckoo Search Algorithm (CSA)	Simulates cuckoos laying eggs in other birds' nests, using nest randomization and nest replacement strategies.	Good at avoiding local optima and finding high-quality solutions.
Bird Flocking Algorithm (BFA)	Simulates flocking birds adjusting their flight based on the behavior of neighboring birds.	Efficient at searching, but performance depends on parameter tuning.
Chicken Swarm Optimization (CSO)	Simulates chicken flocking behavior. Assigning different roles within the flock to search for optimal solutions.	Effective at exploration, but complex chicken selection strategy.

กล่าวโดยสรุป อัลกอริทึมทั้ง 10 แบบใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมจากธรรมชาติในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เช่น Ant Colony Optimization (ACO) ที่เลียนแบบการทำงานของมด, Particle Swarm Optimization (PSO) ที่จำลองการเคลื่อนไหวของกลุ่มอนุภาค และ Artificial Bee Colony (ABC) ที่จำลองการค้นหารอาหารของผึ้ง หลักการสำคัญของอัลกอริทึมเหล่านี้คือการกระจายการค้นหาในพื้นที่กว้างเพื่อหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในค่าที่ไม่เหมาะสม (Local Optima) และค่อยๆ ปรับปรุงตำแหน่งหรือคำตอบไปสู่ค่าที่ดีที่สุด แต่ละอัลกอริทึมมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน เช่น PSO มีโครงสร้างที่เรียบง่ายและทำงานได้เร็ว แต่มีโอกาสติดอยู่ในค่าที่ไม่เหมาะสมได้ ขณะที่ Cuckoo Search Algorithm และ Flower Pollination Algorithm (FPA) มีประสิทธิภาพในการหลีกเลี่ยงการติดกับดักได้ดีแต่ต้องอาศัยการสุ่มที่เหมาะสม อัลกอริทึมที่ซับซ้อน เช่น Bee Colony Optimization (BCO) และ Chicken Swarm Optimization (CSO) ต้องการการปรับพารามิเตอร์อย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้น การเลือกใช้อัลกอริทึมจึงต้องคำนึงถึงลักษณะของปัญหาและความต้องการในด้านความเร็วหรือความแม่นยำในการแก้ปัญหา

3. วิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่ม

จากการศึกษาข้อดีและข้อเสียของอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มทั้ง 10 ประเภท พบว่า อัลกอริทึมแต่ละประเภทมีข้อดีที่เหมือนและแตกต่างกัน เช่น อัลกอริทึมที่ประยุกต์ใช้ในการประมวลผลแบบคู่ขนานได้ คือ อัลกอริทึมมดและอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วค้นพบคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ได้แก่ อัลกอริทึมมด อัลกอริทึมค้างคาว อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช ส่วนอัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างแน่นอน ได้แก่ อัลกอริทึมมด และอัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ เป็นต้น สำหรับอัลกอริทึมแต่ละประเภทมีข้อเสียที่เหมือนและแตกต่างกัน เช่น อัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วจะพบปัญหาติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ ได้แก่ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ และอัลกอริทึมการจับกลุ่มของนก อัลกอริทึมที่นำมาใช้แล้วอาจเกิดภาวะเกินพอดี คือ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช เป็นต้น โดยข้อดีและข้อเสียของอัลกอริทึมความฉลาดแบบกลุ่มทั้ง 10 ประเภท สรุปได้ดัง Table 2



Table 2 The advantages and disadvantages of group intelligence algorithms

Advantages and Disadvantages	Ant Colony Optimization	Bee Colony Optimization	The bat algorithm	Particle Swarm Optimization	Flower Pollination Algorithm	Invasive weed optimization	Marriage in honey bees optimization	Cuckoo search algorithm	Bird swarm algorithm	Chicken swarm optimization
Advantages										
processing	X			X						
Discovers solutions quickly	X		X	X		X				
Adaptable to changes	X									
Converges to true solution clusters with certainty	X				X					
Rapid convergence to true solution clusters				X		X			X	X
Easy to implement		X	X	X	X	X	X	X	X	
Handles complex functions or problems effectively		X	X	X		X	X		X	
Performs well with polynomial optimization problems		X								
Efficiently solves diverse and complex problems			X				X			
Requires few control variables				X					X	X
High accuracy				X					X	X
Avoids getting stuck in local optima							X	X		X
Disadvantages										
Unequal probability distribution in each iteration	X									
Random decision-making sequence	X									
Uncertain discovery time for solutions	X									
Converges to true solution clusters prematurely	X									
Slow processing time		X			X		X			

Low rate of convergence to true solutions			X							
Low accuracy			X							
Difficulties in designing initial variable settings				X						
Complex operational processes							X			X
Incapable of solving oscillating problems				X						
Encounters stuck-in-local-optima issues		X		X					X	
Occurrence of critical situations						X				
Slow convergence to true solution clusters							X	X		
Requires multiple iterations.								X		

4. การประยุกต์ใช้งานของอัลกอริทึมฉลาดแบบกลุ่ม (Application)

ปัญหาในกระบวนการทำงานที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นกรณีศึกษาปัญหาที่มีขนาดใหญ่หรือปัญหาประเภทเอ็น-พีฮาร์ด (NP-Hard) ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น การออกแบบ การวางแผนโรงงาน การพยากรณ์ การหาคำคำตอบที่เหมาะสม การจัดตารางการผลิต การขนส่งและการจัดเส้นทางทางการเดินทาง เป็นต้น จากการศึกษาสรุปได้ Table 2 พบว่า ได้มีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมด้านความฉลาดแบบกลุ่มมาใช้แก้ปัญหาด้วยการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งการแก้ปัญหาต่างๆ ในมุมมองการประยุกต์ใช้งานของอัลกอริทึมสามารถแบ่งให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานได้ 5 ประเภท ได้แก่ ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง (Continuous optimization problems) ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete optimization problems) ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน (Job-shop scheduling problems) ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่น (Flexible Job-shop scheduling problems) และปัญหาการจำแนกประเภท (Classification problems) โดยมีการประยุกต์ใช้งานอัลกอริทึมด้านความฉลาดแบบกลุ่มในการแก้ปัญหาแต่ละประเภทดังนี้

4.1 ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง

จากการศึกษา พบว่า อัลกอริทึมที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง ได้แก่ อัลกอริทึมมด เช่น การนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้เทคนิคการแบ่งพาร์ติชันโดเมน (Domain partitioning technique) สำหรับใช้ในการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง (Pirapong & Jeerayut, 2018) เป็นต้น อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง เช่น การนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาแบบเพื่อนบ้านที่ดีที่สุด (Best neighbor-guided) สำหรับใช้เพิ่มความเร็วในการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง (Sangeeta & Pawan, 2016) เป็นต้น อัลกอริทึมค้างคาว เช่น การประยุกต์ปรับปรุงเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าความ

เหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่องในการสนับสนุนการแก้ไขในรูปแบบต่างๆ (Ramli *et al.*, 2017) การนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไข ปัญหาการออกแบบโครงข่ายการขนส่ง (Transport network design problem) (Sweta & Sudip, 2019) การประยุกต์ร่วมกับ วิธีการอลวน (Chaotic) สำหรับแก้ไขปัญหาการโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม (Integer programming problems) (Osama *et al.*, 2014) เป็นต้น อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง เช่น การหาจุดต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Global minimum) ของฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง (Continuous functions) เป็น

4.2 ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง

จากการศึกษา พบว่า อัลกอริทึมที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง ได้แก่ อัลกอริทึมมด เช่น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling salesman problem) (Adam *et al.*, 2018) การแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการเดินทางของยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem) (Teja & Vandana, 2015) เป็นต้น รวมถึงอัลกอริทึมค้นหาแบบนกดู่ว่าก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการเดินทางของพนักงานขายด้วยเช่นเดียวกัน (Anuja *et al.*, 2017) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง เช่น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องในระบบเส้นทางอพยพหนีไฟ (Fire evacuation routing system) (Chen *et al.*, 2018) อัลกอริทึม ค้างคาว เช่น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการออกแบบโครงข่ายการขนส่ง (Transport network design problem) (Sweta & Sudip, 2019) การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม (Integer programming problems) (Osama *et al.*, 2014) เป็นต้น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องด้วยอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค เช่น การประยุกต์ใช้ในการกระจายพลังงานไฟฟ้าของการผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากแหล่งพลังงานไฟฟ้าหมุนเวียน (Distributed generation from renewable energy sources) (Zeineb *et al.*, 2018) เป็นต้น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องด้วยอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้ง เช่น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการเดินทางของพนักงานขาย (Chenguang & Qiaoge, 2013) เป็นต้น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องด้วยอัลกอริทึมการจับกลุ่มของนก (Manzoor *et al.*, 2018) เช่น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการเดินทางของพนักงานขายด้วยการอิงค่าเมทริกซ์ของความไม่บริสุทธิ์ของข้อมูล (Information entropy matrix) (Min *et al.*, 2018) เป็นต้น และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องด้วยอัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ เช่น การประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการเดินทางของพนักงานขาย (Fayçal *et al.*, 2018) เป็นต้น

4.3 ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน

จากการศึกษา อัลกอริทึมที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน ได้แก่ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง (Adam *et al.*, 2018 : Anguluri *et al.*, 2017) และอัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ (Mandeep & Monika, 2016) ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องของการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน เช่น การประยุกต์

แก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงานด้วยการใช้เวลาน้อยที่สุดที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Minimize the make span) นอกจากนี้ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งถูกพัฒนาเป็นอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้งซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงานได้เช่นเดียวกัน (Anguluri *et al.*, 2017) ส่วนอัลกอริทึมมด อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่า อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช (Mojgan & Mahdi, 2019) และอัลกอริทึมค้างคาวสามารถนำมาประยุกต์ในการจัดตารางงานผลิตได้เช่นกัน โดยเฉพาะอัลกอริทึมค้างคาวถูกใช้ประยุกต์ในการแก้ปัญหาที่มีลักษณะที่ต้องการคำตอบโดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้เวลาน้อยที่สุดหรือการเพิ่มความน่าเชื่อถือสูงสุดด้วยการรักษางบประมาณให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด (Adam *et al.*, 2018)

4.4 ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่น

จากการศึกษา พบว่า อัลกอริทึมที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่น ได้แก่ อัลกอริทึมค้างคาวถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตด้วยการใช้เกณฑ์ความยืดหยุ่นของการเลือกเครื่องจักรและลำดับขั้นตอนการผลิต (Xu *et al.*, 2017) เป็นต้น อัลกอริทึมมดและอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่นด้วยการใช้เวลาน้อยที่สุดที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Yi *et al.*, 2018) อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืชถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่นด้วยการใช้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ซึ่งมีเงื่อนไขของวัตถุประสงค์ที่ประกอบด้วย เกณฑ์ของเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Make span) ภาระงานทั้งหมดของเครื่องจักร (Total workload of machines) และเครื่องจักรที่มีภาระงานมากที่สุด (Workload of most loaded machine) (Souad & Besma, 2014) เป็นต้น อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาคู่ของผึ้งถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่นด้วยการใช้ร่วมกับอัลกอริทึมมีมเมตริก (Memetic algorithm) ทำให้สามารถแก้ปัญหาในกรณีที่มีหลายงานหลายเครื่องจักรและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาเฉพาะที่ได้ (Ajchara & Arit, 2013) และอัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่าถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่นด้วยการใช้เกณฑ์ของการใช้ต้นทุนที่เกิดจากความล่าช้าในการผลิตต่ำสุดร่วมกับเกณฑ์ของเวลาที่เครื่องจักรถูกใช้ประโยชน์สูงสุด (Anuja *et al.*, 2017) เป็นต้น

Table 3 Application of group intelligence algorithms"

Application of Algorithms	Continuous Optimization Problem	Discrete Optimization Problem	Job Shop Scheduling Problem	Flexible Job Shop Scheduling Problem	Classification Problem
Ant Colony Optimization	X	X	X	X	X
Bee Colony Optimization	X	X	X	X	X
The bat algorithm	X	X	X	X	X
Particle Swarm Optimization	X	X	X		X
Flower Pollination Algorithm	X		X		X
Invasive weed optimization	X		X	X	X
Marriage in honeybees optimization	X	X	X	X	
Cuckoo search algorithm	X	X	X	X	X
Bird swarm algorithm	X	X			X
Chicken swarm optimization	X	X			X

4.5 ปัญหาการจำแนกประเภท

จากการศึกษา พบว่า อัลกอริทึมที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภท ได้แก่ อัลกอริทึมมด อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Adam *et al.*, 2018) และอัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ (Mohammed *et al.*, 2020) ถูกนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภทข้อมูลเพื่อการจัดทำเหมืองข้อมูล เป็นต้น นอกจากนี้ อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการแยกประเภทโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks) อีกด้วย (Mohammed *et al.*, 2020) เป็นต้น ส่วนอัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้ง อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของวัชพืช อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และอัลกอริทึมมด ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภทข้อมูลในลักษณะการสอนด้วยระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive neuro-fuzzy inference system) (Sasan *et al.*, 2020) อัลกอริทึมค้นหาแบบนกทูแคนถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกประเภทปัจจัยต่างๆ ในการแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสม

ที่สุดในกรรมวิธีการผลิต (Manufacturing optimization problem) (Anuja *et al.*, 2017) อัลกอริทึมค้ำคาวถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภทเกี่ยวกับการแบ่งลักษณะของภาพแบบแยกย่อยแบบหลายระดับ (Multilevel image thresholding) (Adis & Milan, 2014) เป็นต้น อัลกอริทึมการจับกลุ่มของนกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภทข้อมูลและปัญหาเชิงถดถอย (Data classification and regression problems)(Ibrahim *et al.*, 2019) เป็นต้น และอัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep neural networks) เพื่อการจำแนกประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากกระบวนการผลิต (Dorin *et al.*, 2018) เป็นต้น

บทสรุป

บทความนี้ วิเคราะห์หลักการทำงานและประสิทธิภาพ อัลกอริทึมทั้ง 10 อัลกอริทึม ใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมทางธรรมชาติ เช่น การหาอาหารของมด (ACO) และการบินของฝูงนก (PSO) เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ละอัลกอริทึมมีความสามารถในการกระจายการค้นหาและหลีกเลี่ยงการติดในค่าที่ไม่เหมาะสม (Local Optima) โดยประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ การปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสม อัลกอริทึมที่มีโครงสร้างเรียบง่าย เช่น PSO มักให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว ในขณะที่อัลกอริทึมที่ซับซ้อน เช่น BCO ต้องการการปรับแต่งอย่างระมัดระวัง ในกรณีอัลกอริทึมมีการลู่เข้าสู่ค่าตอบเร็วเกินไปมักทำให้อัลกอริทึมติดอยู่ในค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (Global Optimum) ทำให้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมาะสมหรือได้ผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำ ส่งผลให้การแก้ปัญหาไม่สมบูรณ์ตามที่ต้องการได้ ดังนั้นการเลือกใช้อัลกอริทึมต้องขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของปัญหาที่ต้องการแก้ไข รวมถึงอธิบายข้อดีและข้อเสียของอัลกอริทึมด้านความฉลาดแบบกลุ่ม ได้แก่ ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความยืดหยุ่นและปัญหาการจำแนกประเภท อัลกอริทึมด้านความฉลาดแบบกลุ่มมีทั้งข้อดีและข้อเสียรวมถึงมีการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายแตกต่างกันไป ผลการศึกษา พบว่า อัลกอริทึมที่มีความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานได้ครบทั้ง 5 ด้าน ได้แก่ อัลกอริทึมมด อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมฝูง อัลกอริทึมค้ำคาว และอัลกอริทึมค้นหาแบบนกดูเหว่า ส่วนอัลกอริทึมที่เหลือก็มีข้อดีสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค คือ การค้นหาปัญหาที่ยากต่อการค้นหาคำตอบโดยการค้นหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ อัลกอริทึมผสมเกสรดอกไม้มียกข้อดี คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างแน่นอน อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการแพร่ของไวรัสมีข้อดี คือ ง่ายต่อการทำความเข้าใจและมีความน่าเชื่อถือสูง อัลกอริทึมการจับกลุ่มของไก่มีข้อดี คือ การไม่มีปัญหาการติดอยู่ในค่าคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ อัลกอริทึมหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบการหาฝูงของฝูงและอัลกอริทึมการจับกลุ่มของนกมีข้อดี คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว และคำตอบที่ได้มีความแม่นยำสูง เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

- Adam, S., Senior, M., & Halina, K. (2018). Nature Inspired Methods and Their Industry Applications-Swarm Intelligence Algorithms. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3), 1004-1015.
- Adis, A., & Milan, T. (2014). Improved Bat Algorithm Applied to Multilevel Image Thresholding. *The Scientific World Journal*, 1-16.
- Ajchara, P., & Arit, T. (2013). Memetic algorithm based on marriage in honey bees optimization for flexible job shop scheduling problem. *Memetic Computing*, 9, 295-309.
- Anguluri, R., Nandar, L., Swagatam, D., & Ponnuthura, N. S. (2017). Computing with the Collective Intelligence of Honey Bees- A Survey. *Swarm and Evolutionary Computation*, 32, 25-48.
- Anuja, S. J., Omkar, K., Kakandikar, G. M., & Nandedkar, V. M. (2017). Cuckoo Search Optimization- A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7262-7269.
- Chao, Z., Lei, M., Ryad, C., & Yongkun, Z. (2018). An Improved Bird Swarm Algorithm with Adaptive Characteristics. in *Proc. the 2018 International Symposium on Communication Engineering & Computer Science*, Hohhot, China, 230-235.
- Chawalsak, P., Juthawut, C., & Napatsarun, C., (2017). Training Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Using Invasive Weeds Optimization for Predicting Tourist Arrivals to Thailand. in *Proc. National Conference on Innovation and Technology Conference*, 201-209. (in Thai)
- Chen, W., Lincoln, C. W., Heng, L., Zhenye, A., & Abolfazl, K. (2018). Applied Artificial Bee Colony Optimization Algorithm in Fire Evacuation Routing System. *Journal of Applied Mathematics*, 1-17.
- Chenguang, Y., & Qiaoge, L. (2013). Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Coperate with Linear Method. *Advanced Materials Research*, 871, 330-337.
- Chiwen, Q., Shian, Z., Yanming, F., & Wei, H. (2017). Chicken Swarm Optimization Based on Elite Opposition-Based Learning. *Mathematical Problems in Engineering*.



- Dorin, M., Viorica, C., Cristina, P., Tudor, C., Ionut, A., & Ioan, S. (2018). Chicken Swarm Optimization and Deep Learning for Manufacturing Processes. *in Proc. Conference: Networking in Education and Research*, Cluj-Napoca, Romania, 1-6.
- Faycal, C., Mohammed, E. R., Amine, A., Soukaina, C. B. S., & Abdelfattah, H. (2018). Improved Chicken Swarm Optimization Algorithm to Solve the Travelling Salesman Problem. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 12(3), 1054-1062.
- Gu, P., Xiu, C., Cheng, Y., Luo, J., & Li, Y. (2014). Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm. *in Proc. International Conference on Mechatronics and Control*, Jinzhou, China, 95-98.
- Kashif, H., Mohd, N. M. S., Yuli, A. P., & Shi, C. (2018). Personal best Cuckoo search algorithm for global optimization. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 8(4), 1209 -1217.
- Lbrahim, A., Hossam, F., Seyedali, M., Nailah. A., Alaa, S., & Majdi, M. (2019). Evolving neural networks using bird swarm algorithm for data classification and regression applications. *Cluster Computing*, 22, 317-1345.
- Le, A. D., & Vo, N. D. (2015). Application of Cuckoo Search Algorithm for Optimal Power Flow in Power System. *GMSARN International Journal*, 9(2).
- Mandeep, K., & Monika. S. (2016). Parallel Scheduling of Jobs using Flower Pollination Process. *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, 4(10), 19-24.
- Manzoor, A., Nadeem, J., Iftikhar, A. N., Sundus, S., Rehman, Obaid. U. R., & Hafiz, M. H. (2018). Application of Bird Swarm Algorithm for Solution of Optimal Power Flow Problems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 772, 280-291
- Mandeep, K., & Monika. S. (2016). Parallel Scheduling of Jobs using Flower Pollination Process. *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, 4(10), 19-24.



- Min, L., Yiwen, Zhong., Juan, L., & Xiaoyu, L. (2018). Discrete Bird Swarm Algorithm Based on Information Entropy Matrix for Traveling Salesman Problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-15.
- Mohammed, A., Moad, A. Q., Abdelaziz, I. H., Mohd, S. A., & Saleh, A. (2020). Flower Pollination Algorithm for Solving Classification Problems. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications*, 12(1), 15-34.
- Mojgan, M., & Mahdi, Y. (2019). Improved invasive weed optimization algorithm (IWO) based on chaos theory for optimal design of PID controller. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 284-295.
- Nursyiva, I., Aris, T., & Dian, E. W. (2017). Chicken Swarm as a Multi Step Algorithm for Global Optimization. *International Journal of Engineering Science Invention*, 6(1), 8-14.
- Osama, A., Mohamed, A., & Ibrahim, E. (2014). An Improved Chaotic Bat Algorithm for Solving Integer Programming Problems. *I.J. Modern Education and Computer Science*, 2014(8), 18 -24.
- Peng, Z., Hong, L., & Yanhui, D. (2014). Dynamic bee colony algorithm based on multi-species co-evolution. *Applied Intelligence*, 40(3).
- Pirapong, S., & Jeerayut, W. (2018). Solving Continuous Optimization Problems by Ant Colony Optimization with Domain Partitioning Technique. in *Proc. 23 rd. Annual Meeting in Mathematics 2018, Mathematical Sciences for Thailand 4.0*, Bangkok, Thailand, 257-262.
- Ramli, M. R., AbalAbas, Z., Desa, M. I., Abidin, Z. Z., & Alazzam, M. B. (2019). Enhanced convergence of Bat Algorithm based on dimensional and inertia weight factor. *Journal of King Saud University- Computer and Information Sciences*, 31(4), 452-458.
- Roozbeh, R., Vasile, P., & Enrico, Z. (2014). Invasive weed classification. *Neural Computing and Applications*, 26, 525-539.
- Sangeeta, S., & Pawan, B. (2016). Artificial Bee Colony Algorithm: A Survey. *International Journal of Computer Applications*, 149(4), 0975-8887.



- Sasan, H., Madjid, Kh., Javad, M., & Sadoullah, E. (2020). Optimizing a Neuro-Fuzzy System based on nature inspired Emperor Penguins Colony optimization algorithm. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1(1), 1-15.
- Satyasai, J. N., & Ganapati, Panda. (2017). A survey on nature inspired metaheuristic algorithms for partitional clustering. *Swarm and Evolutionary Computation*, 16, 1-18.
- Selim, Y., & Ecir, U. K. (2014). A New Modification Approach on Bat Algorithm for Solving Optimization Problems. *Applied Soft Computing*, 28, 259 -275.
- Souad, M., & Bessa, C., F. (2014). A Modified Invasive Weed Optimization Algorithm for Multiobjective Flexible Job Shop Scheduling Problems. in Proc. *Third International Conference on Advanced Information Technologies and Applications*, 51-60.
- Sweta, S., & Sudip, K. (2019). Application of Bat Algorithm for Transport Network Design Problem. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2019,1-12.
- Teja, C., & Vandana, P. (2015). Solving vehicle routing problem using ant colony optimization with nodal demand. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(9), 679-682.
- Xianneng, L., & Guangfei, Y. (2016). Artificial bee colony algorithm with memory. *Applied Soft Computing*, 41, 362 - 372.
- Xian, B.M., Xiao, Z. G., Lihua, L., Yu, L., & Hengzhen, Z. (2016). A new bio-inspired optimisation algorithm: Bird Swarm Algorithm. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 28(4)1-15.
- Xianbing, M., Yu, L., Xiaozhi, G., & Hengzhen, Z. (2014). A New Bio-inspired Algorithm: Chicken Swarm Optimization. in Proc. International Conference in Swarm Intelligence, *Advances in Swarm Intelligence*, Hefei, China, 86-94.
- Xu, H., Bao, Z.R., & Zhang, T. (2017). Solving dual flexible job-shop scheduling problem using a Bat Algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, 12(1), 5 -16.



- Yahong, Z., Lian, L., & Khaled, M. (2014). Comparative Study of Heuristics Algorithms in Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem with Condition Based Maintenance. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(2), 518-531.
- Yi, Z., Fazhi, H., Neng, H., & Yimin, Q. (2018). Parallel ant colony optimization on multi-core SIMD CPUs. *Future Generation Computer Systems*, 79(2), 473-487.
- Yin, G., Xiujuan, L., & Cai, D. (2016). Cuckoo Search Algorithm Inspired by Artificial Bee Colony and Its Application. in *Proc. International Conference on ICSI 2016*, Bali, Indonesia, 74-85.
- Yuksel, C., & Erkan, U. (2013). An Improved Marriage in Honey Bees Optimization Algorithm for Single Objective Unconstrained Optimization. *The Scientific World Journal*, 1-11.
- Zeineb, A., Adel, G., Lazhar, B., Mohamed, H., & Nasser, A. (2017). Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. *Renewable Energy*, 113, 266-280.