

การศึกษาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่  
ในขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงสำหรับปัญหา  
การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

A Study of New Gravitational Coefficient Function in  
Gravitational Search Algorithm for  
the One-dimensional Bin Packing Problem

ภัทรเวช ธาราเวชรักษ์<sup>1</sup> ศุภรัชชัย วรรัตน์<sup>1\*</sup> และ อำนาจ ผดุงศิลป์<sup>2</sup>  
Pattrawet Tharawetcharak<sup>1</sup>, Suparatchai Vorarat<sup>1\*</sup>  
and Aumnad Phdungsilp<sup>2</sup>

Received: 6 May 2022

Revised: 27 December 2022

Accepted: 10 February 2023

### บทคัดย่อ

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดการสูญเสียต้นทุนในกิจกรรมโลจิสติกส์เป็นจำนวนมากจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาการแก้ไขปัญหานั้นที่เหมาะสมการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะฟังก์ชันค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ในขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติการวิจัยนี้เริ่มศึกษาขั้นตอนวิธีการดังกล่าวและปรับค่าพารามิเตอร์ที่สามารถแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบวงกว้างซึ่งในการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ (1) กรณีปัญหาแบบง่าย (2) กรณีปัญหาแบบปานกลางและ (3) กรณีปัญหาแบบยากนอกจากนั้นยังทดสอบเชิงเปรียบเทียบด้วย 3 ขั้นตอนวิธีการได้แก่ (1) ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (2) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและ (3) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงเพื่อยืนยันสมรรถนะในการแก้ไขปัญหามาผลการวิจัยพบว่าขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่มีสมรรถนะสูงในการแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบง่ายและแบบปานกลางและมีค่าตอบใกล้เคียงกับค่าตอบที่ดีที่สุด

<sup>1</sup>บัณฑิตศึกษารจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10210

<sup>1</sup>Graduate Program in Engineering Management, College of Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 10210

<sup>2</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10140

<sup>2</sup>Division of Energy Management Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 10140

\*ผู้ติดต่อประสานงาน (Corresponding author) e-mail: vorarat@dpu.ac.th

ในกรณีปัญหาแบบยากนั้นยังไม่สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและยังได้คำตอบแบบเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ตั้งนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีการวิธีการดังกล่าวเหมาะสมกับปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยถึงปานกลางและปัญหาที่มีฟังก์ชันการค้นหาแบบฐานนิยมเดียว

**คำสำคัญ:** ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง

## ABSTRACT

The bin packaging problems cause many cost losses in logistics activities. Therefore, it is necessary to study appropriate solutions. This research aimed to study the New Gravitational Coefficient Function Performance in the Gravitational Search Algorithm (NGCFGSA) for one-dimensional bin packaging problems (1DBPP). This research begins to investigate such algorithms and optimize parameters that can solve a wide range of 1DBPP. In which the test is divided into 3 cases, (1) simple problem, (2) moderate problem, and (3) complex problem; in addition, a comparative test is performed with three algorithms, namely (1) the quantum evolution algorithm, (2) Particle Swarm Optimization, and (3) Gravitational Search Algorithm, to confirm the ability to solve problems. Results found that the NGCFGSA has high performance in searching for the answers of 1DBPP for simple and moderate cases and having answers close to the best solution compared with other algorithms. In the case of difficult 1DBPP, the NGCFGSA could not search optimization solutions better than other algorithms, and the answer was found at the local optimum. It can be concluded that the NGCFGSA is suitable for searching for simple and moderate problems and unimodal landscape function problems.

**Keywords:** One-dimensional Bin Packing Problem; New Gravitational Coefficient Function; Gravitational Search Algorithm

## บทนำ

การเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องทำการสังเคราะห์ทุกกิจกรรมตั้งแต่ต้นน้ำยังปลายน้ำตลอดห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กิจกรรม ได้แก่ การจัดหา (Procurement) การขนส่ง (Transportation) การจัดเก็บ (Warehousing) และการกระจายสินค้า (Distribution) [1] ซึ่งทุกกิจกรรมในห่วงโซ่อุปทานแฝงไปด้วยกิจกรรมย่อยอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดต้นทุนในการบริหารจัดการสูงคือ กิจกรรมทางโลจิสติกส์ [2] ซึ่งเปรียบเสมือนเส้นเลือดในร่างกายของมนุษย์ที่เชื่อมโยงกันไปยังจุดต่าง ๆ ของร่างกาย โดยกิจกรรมทางโลจิสติกส์ส่วนใหญ่เน้นไปที่กระบวนการเคลื่อนย้าย และการเก็บรักษาวัตถุดิบ และสินค้าคงคลังเป็นหลัก ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการสูญเสียต้นทุนในการบริหารจัดการเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของสถาบันโลจิสติกส์โลก พบว่า ประเทศที่กำลังพัฒนาสามารถลดต้นทุนทางโลจิสติกส์ลงได้จะมีโอกาสก้าวเข้าสู่ประเทศที่มีรายได้สูงได้อย่างยั่งยืน [3] ซึ่งกรณีตัวอย่างของสหรัฐอเมริกาที่มีค่าใช้จ่ายด้านโลจิสติกส์มากกว่า ร้อยละ 16 ของ GDP (Gross Domestic Product) ในช่วงปี ค.ศ.1980

ก่อนที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงปี ค.ศ.2017 เป็นต้นมามีระดับต่ำกว่าร้อยละ 10 ของ GDP ยิ่งไปกว่านั้น ต้นทุนโลจิสติกส์มักจะสูญเสียไปกับกิจกรรมการขนส่งมากถึงร้อยละ 50.3 ของกิจกรรมทั้งหมด ซึ่งสถานการณ์ดังกล่าวเกิดจากปัญหาการจัดเรียงสินค้าและบริการ หรือที่เรียกว่า ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problems: BPP) ทำให้มีความจำเป็นต้องทำการศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหานั้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาดังกล่าว [4]

ซึ่งปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP) เป็นการค้นหาวิธีการนำสิ่งของจำนวนหนึ่งมาบรรจุลงกล่อง ภาชนะ วัสดุห่อหุ้ม หรือ ตู้คอนเทนเนอร์ ที่มีปริมาตรมากกว่าสิ่งของที่จะนำมาบรรจุ [5] ซึ่งเป็นปัญหาที่จัดอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบ Non-deterministic Polynomial-time hard (NP-hard) ที่มีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่จึงค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time) [6] โดยทั่วไปปัญหาการบรรจุที่พบส่วนใหญ่เป็นปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (One-dimensional Bin Packing Problem: 1DBPP) [7] ซึ่งปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์นี้จะมีสิ่งของหรือวัสดุคงคลังอยู่  $n$  สิ่ง แต่ละวัสดุคงคลังจะแทนด้วยน้ำหนัก  $w_j$  โดยที่  $j$  เป็นจำนวนเต็มตั้งแต่  $1, \dots, n$  ซึ่งบรรจุลงในกล่องที่มีความจุเท่ากัน ( $C$ ) และจำนวนกล่องแทนด้วยจำนวนเต็มที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า นักวิจัยส่วนใหญ่จะทำการศึกษวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์โดยใช้จำนวนกล่องน้อยที่สุด (Minimum Number of Bins) ด้วยการค้นหาค่าตอบด้วยวิธีการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound) ซึ่งวิธีการนี้จะทำซ้ำกับทุกปัญหาและทำการตัดปัญหาที่ไม่สามารถค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดจนกระทั่งพบคำตอบที่ดีที่สุด [8]

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการอื่นในการแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิตียังพบว่าการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการสร้างคอลัมน์ที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลในการค้นหาค่าตอบปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมการผลิตผลของคำตอบที่ดียังไม่เข้าสู่คำตอบที่มีลักษณะติดอยู่ที่คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) [9] และการศึกษาขั้นตอนวิธีการแบบสามัญสำนึก (Heuristic Algorithms) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาค่าตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนเพื่อให้ได้คำตอบที่ดี (Good Solution) [10] เช่น การค้นหาค่าตอบในย่านใกล้เคียง (Neighborhood Search: NS) และการค้นหาค่าตอบแบบทาบ (Tabu Search: TS) เป็นต้น สำหรับข้อดีของวิธีการทางวิทยาการศึกษาค้นหาค่าตอบได้เร็ว แต่ในทางกลับกันอาจได้คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ซึ่งอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีวิธีการค้นหาค่าตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP) ด้วยวิธีการทางเมตาฮิวริสติก (Metaheuristics) โดยที่ลักษณะการค้นหาค่าตอบจะใช้หลักการวนซ้ำและสุ่มค่าพารามิเตอร์เพื่อค้นหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) [11] เช่น วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งจะใช้การเลียนแบบพฤติกรรมกลุ่มประชากรเริ่มต้นและประเมินการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรในการหาค่าเหมาะสมที่สุด วิธีการนี้มีข้อได้เปรียบทางด้านหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ง่าย และไม่มี ความซับซ้อนในการปรับปรุงพารามิเตอร์ แต่ยังมีจุดด้อยคือมีโอกาสได้ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่อยู่บ้างหากมีรอบในการคำนวณน้อย และยังมีวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ANCO) ซึ่งเลียนแบบพฤติกรรมมาจากการหลั่งฟีโรโมน (Pheromone) ในการจดจำเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดไปยังแหล่งอาหาร ข้อดีคือสามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดได้เร็วแต่คำตอบจะไปตกที่ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้ง่ายหากใช้รอบในการคำนวณน้อย [12] นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยใช้หลักการคัดเลือกทางธรรมชาติที่จำลองพฤติกรรมมาจากวิวัฒนาการทางพันธุกรรมมีจุดเด่นคือการตัดต่อโครโมโซม (Mutation) และกระบวนการสลับสายพันธ์ (Crossover) ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด นับว่าเป็นขั้นตอนวิธีการที่ค่อนข้างดีที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่จุดด้อยคือหากรอบในการคำนวณน้อยจะมีโอกาสติดอยู่ที่ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ [13] และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง

(Gravitational Search Algorithm: GSA) ที่มีความสามารถในการค้นหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้าง (Global Search) หากมีการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมถือว่าเป็นขั้นตอนวิธีการใหม่ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ.2009 [14] แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของการใช้ระยะเวลานานในการหาค่าเหมาะที่สุดในแต่ละรอบ ต่อมาได้มีการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function: NGCFGSA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้างอย่างครอบคลุม และมีความสามารถในการหาค่าเหมาะที่สุดได้เร็วขึ้น [15]

ดังนั้นการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ในการค้นหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (1DBPP) เนื่องจากข้อดีของวิธีการดังกล่าวมีความสามารถในการค้นหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้าง (Global Search) และคำนึงถึงการเชื่อมโยงการค้นหาค่าแบบการวิจจัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน ซึ่งเหมาะกับปัญหาขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ [16] ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำร่องโดยการทดสอบขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับฟังก์ชันปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ในเชิงเปรียบเทียบ (Benchmark) กับขั้นตอนวิธีการอื่นๆเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) ได้แก่ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (Quantum Evolutionary Algorithm: QEA) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) และเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) เพื่อทดสอบและยืนยันประสิทธิภาพการหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้างอย่างครอบคลุม

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยได้ทำการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ซึ่งมีความสามารถในการค้นหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้าง(Global Search) มาค้นหาค่าตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยมีปัจจัยนำเข้า (Input Factor) ได้แก่จำนวนกล่องที่ใช้ในการบรรจุน้ำหนักของสิ่งของที่ใช้บรรจุจำนวนสิ่งของในการบรรจุและความจุด้วยปัญหานี้ประกอบไปด้วยปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัยทำให้ปัญหาดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบNP-hard ที่มีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่จึงทำให้การค้นหาค่าเหมาะที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time) ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้แสดงดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการศึกษาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่และการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ [15] หลังจากนั้นนำขั้นตอนวิธีการดังกล่าวมาทดสอบสมรรถนะการค้นหาค่าตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติตามขั้นตอนในภาพที่1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ระบุขอบเขตในการค้นหาค่าตอบของอนุภาค (Particle) จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

ขั้นตอนที่ 2 สร้างประชากรชุดคำตอบแบบสุ่มของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยใช้วิธีการสุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอนุภาค

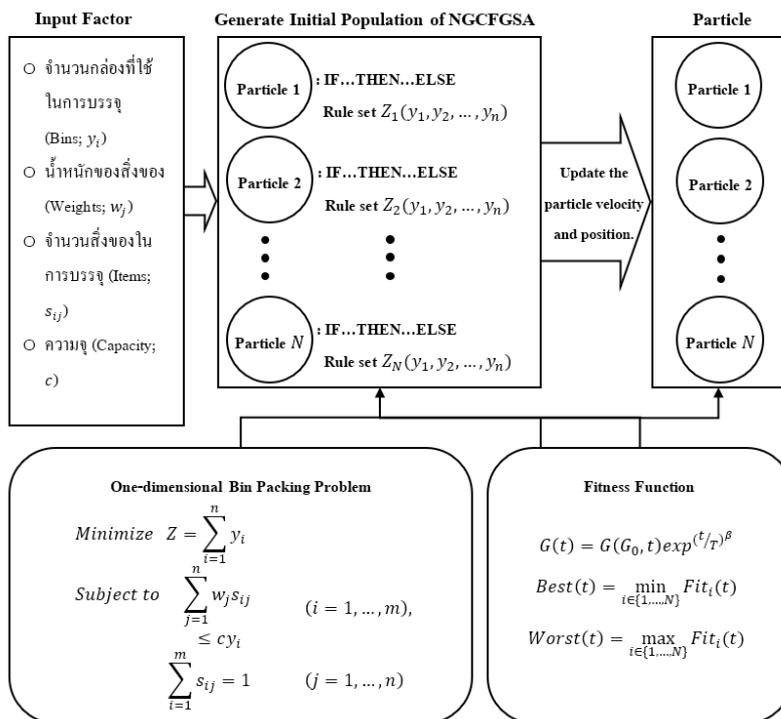


Figure1 Flow diagram of NGCFGSA for 1DBPP

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินหาความเหมาะสม (Fitness Function) ของแต่ละอนุภาคในประชากรชุดคำตอบสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ [7-8] โดยกำหนดให้หาจำนวนบรรจุภัณฑ์ที่น้อยที่สุดใน การบรรจุผลิตภัณฑ์ขนาดต่างๆจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังแสดงตามสมการที่ (1) ถึง (5)

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n y_i \tag{1}$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^n w_j s_{ij} \leq c y_i \quad (i = 1, \dots, m), \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^m s_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n), \tag{3}$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i = 1, \dots, m), \tag{4}$$

$$s_{ij} \in \{0,1\} \quad (i = 1, \dots, m), (j = 1, \dots, n) \tag{5}$$

เมื่อ  $m$  คือ จำนวนของกล่องที่ใช้ (Number of Bins Used)  $n$  คือ จำนวนของสิ่งของ (Number of Items)  $w_j$  คือ น้ำหนักของสิ่งของ  $j$  (Weight of Items  $j$ )  $c$  คือ ความจุของกล่องแต่ละกล่อง (Capacity of Each Bin)  $y_i$  คือ กำหนดให้ใช้กล่องที่  $i$  และ  $s_{ij}$  คือการกำหนดให้สิ่งของ  $j$  ได้รับมอบหมายให้บรรจุในกล่องที่  $i$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (NGCFGSA) เมื่อ  $G(t_0)$  คือ ค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) ที่เกิดขึ้นในช่วงควอนตัมจักรวาลแรก (The First Cosmic Quantum-interval) ณ เวลา  $t_0$  [17] และ  $G(t)$  คือ ค่าความโน้มถ่วงคงที่แปรผันตามเวลา ( $t$ ) ซึ่ง  $t$  คือ จำนวนค่าการคำนวณซ้ำในปัจจุบัน (The Current Iteration Number)  $T$  คือจำนวนค่าการคำนวณซ้ำสูงสุด (The Maximum Iteration Number) และ  $\beta$  คือ จำนวนค่าคงที่ ดังแสดงตามสมการที่ (6) ถึง (8) โดยที่  $i$  คือ จำนวนเต็มตั้งแต่ 1 ถึง  $N$

$$G(t) = G(G_0, t) \exp^{(t/T)^\beta} \quad (6)$$

$$Best(t) = \min_{i \in \{1, \dots, N\}} Fit_i(t) \quad (7)$$

$$Worst(t) = \max_{i \in \{1, \dots, N\}} Fit_i(t) \quad (8)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณแรงทั้งหมดที่กระทำในทิศทาง  $i$  ที่ต่างกัน  $j$  ณ เวลา  $t$  ตามมิติ  $d$  คือ  $F_{ij}^d(t)$  โดยคำนวณจากค่า  $M_i(t)$  และ  $a_i^d(t)$  คือ ค่าความเร่ง ณ เวลา  $t$  โดยใช้  $M_{aj}$  คือ มวลความโน้มถ่วงที่กระทำกับเอเจนต์ (Agent)  $j$  และ  $\epsilon$  คือค่าคงที่ขนาดเล็ก (Small Constant)  $R_{ij}$  คือ ระยะทางแบบยูคลิด (Euclidian Distance) ระหว่างเอเจนต์  $i$  กับเอเจนต์  $j$  และ  $rand_j$  คือ ตัวแปรสุ่มเอกรูปในช่วงเวลา (Uniform Random Variable in the Interval)  $[0,1]$  ดังแสดงตามสมการที่ (9) ถึง (11)

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)}, \text{ เมื่อ } m_i = \frac{Fit_i(t) - Worst(t)}{Best(t) - Worst(t)} \quad (9)$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ij}(t)}, \text{ เมื่อ } F_i^d(t) = \sum_{j=1, i \neq j}^N rand_j F_{ij}^d(t) \text{ และ} \quad (10)$$

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (11)$$

ขั้นตอนที่ 6 ปรับความเร็วและตำแหน่งของอนุภาค (Update the Particle Velocity and Position) ซึ่งคำนวณได้จาก  $v_i^d(t+1)$  คือ ค่าความเร็วของอนุภาค ณ เวลา  $t$  และ  $x_i^d(t+1)$  คือ

ตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลา  $t$  ซึ่ง  $rand_j$  คือ ตัวแปรสุ่มเอกรูปในช่วงเวลา  $[0,1]$  ดังแสดงตามสมการที่ (12) ถึง (13)

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t), \quad (12)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (13)$$

ขั้นตอนที่ 7 เริ่มคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 3 และหยุดการคำนวณเมื่อพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่มี การปรับปรุงค่าคำตอบซ้ำกัน 1,000 ครั้ง

### ผลการวิจัย

เนื่องจากปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ มีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบตามวิธีดำเนินการวิจัย 7 ขั้นตอน โดยการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB Version R2016A และสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation) ผ่านคอมพิวเตอร์ Intel Core i8250-5U CPU 1.80GHz processor 8GB RAM สำหรับทดสอบสมรรถนะการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (1DBPP) โดยใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (NGCFGSA) ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ ฟังก์ชัน  $G(t)$  กำหนดให้  $t_0 = 1000$   $\beta = 0.01$  และ  $G(t_0) = 100$  สำหรับฟังก์ชัน  $G(t)$  แบบใหม่ กำหนดให้  $T = 1000$   $\beta = 2$  และ  $G(t_0) = 100$  และจำนวนเอเจนต์  $N = 50$  [14-15]

ในการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ได้ใช้ชุดข้อมูลตัวอย่างปัญหาของ [18] ในการจำลองสถานการณ์และมีการกำหนดให้พารามิเตอร์  $n$  คือ จำนวนของสิ่งของ (Number of Items)  $w_j$  คือ น้ำหนักของสิ่งของ  $j$  (Weight of Items  $j$ ) ( $j=1, \dots, n$ )  $C$  คือ ความจุของกล่องแต่ละกล่อง (Capacity of Each Bin)  $m^*$  คือ จำนวนของกล่องที่ใช้้น้อยที่สุด (Minimal Number of Bins Used) และ  $m$  คือ จำนวนของกล่องที่ใช้ (Number of Bins Used) นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาออกเป็น 3 กรณี คือ (1) กรณีปัญหาแบบง่ายจำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ  $NxCyWz_v$  เมื่อ  $x=1$  (สำหรับ  $n=50$ )  $x=2$  ( $n=100$ )  $x=3$  ( $n=200$ )  $x=4$  ( $n=500$ )  $y=1$  (for  $c=100$ )  $y=2$  ( $c=120$ )  $y=3$  ( $c=150$ )  $z=1$  (สำหรับ  $w_j$  จาก  $[1,100]$ )  $z=2$  ( $[20,100]$ )  $z=4$  ( $[30,100]$ ) และ  $v$  คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง ( $A \dots T$ ) (Instances of Each Class) (2) กรณีปัญหาแบบปานกลางจำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ  $NxWyBzRv$  เมื่อ  $x=1$  (สำหรับ  $n=50$ )  $x=2$  ( $n=100$ )  $x=3$  ( $n=200$ )  $x=4$  ( $n=500$ )  $y=1$  (สำหรับ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักความจุของกล่องแต่ละกล่อง  $avgWeight = c/3$ )  $y=2$  ( $c/5$ )  $y=3$  ( $c/7$ )  $y=4$  ( $c/9$ )  $z=1$  (สำหรับ  $\delta = 20\%$ )  $z=2$  ( $50\%$ )  $z=3$  ( $90\%$ ) และ  $v$  คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง ( $0 \dots 9$ ) (Instances of Each Class) และ (3) กรณีปัญหาแบบยากจำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ  $HARDv$  เมื่อ  $v$  คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง ( $0 \dots 9$ ) (Instances of Each Class) [18-19] และยังได้ทดสอบเชิงเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการ (Algorithms) จำนวน 3 ขั้นตอนวิธีการ

ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (QEA) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (1DBPP)

การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการแบบอื่น ๆ สามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในกรณีปัญหาแบบง่ายและปัญหาแบบปานกลาง ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่าคำตอบใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution,  $m^*$ ) เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการแบบอื่น ๆ ดังแสดงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ส่วนการแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ในกรณีปัญหาแบบยากนั้น ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ยังไม่สามารถหาค่าตอบที่เหมาะสมกว่าขั้นตอนวิธีการอื่นมากนัก และคำตอบที่ได้ยังมีค่าคำตอบที่มีลักษณะเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) ดังแสดงตามตารางที่ 3 เนื่องจากขั้นตอนวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาค่าตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนระดับน้อยถึงระดับปานกลางและปัญหาที่มีฟังก์ชันการค้นหาแบบฐานนิยมเดี่ยว (Unimodal Landscape Function) ทำให้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ ยังมีข้อและข้อจำกัดในเรื่องของการค้นหาสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบยากเมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดและขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ ซึ่งขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ต้องมีการพัฒนาสมรรถนะในการค้นหาค่าตอบของขั้นตอนวิธีการนี้ในงานวิจัยครั้งต่อไป

**Table 1** Results of performance for 1DBPP in simple case

Problems	Items	Capacity of Each Bin	Best Solution ( $m^*$ )	QEA ( $m$ )	PSO ( $m$ )	GSA ( $m$ )	NGCFGSA ( $m$ )
N1C1W1 <sub>C</sub>	50	100	20	25	24	25	23
N1C2W1 <sub>B</sub>	50	120	26	27	27	26	26
N2C1W1 <sub>A</sub>	100	100	48	50	49	49	49
N2C2W2 <sub>A</sub>	100	120	52	53	53	53	53

**Table 2** Results of performance for 1DBPP in medium case

Problems	Items	Capacity of Each Bin	Best Solution ( $m^*$ )	QEA ( $m$ )	PSO ( $m$ )	GSA ( $m$ )	NGCFGSA ( $m$ )
N2W1B1R0	100	1000	34	34	34	34	34
N3W1B1R1	200	1000	67	68	69	68	67
N3W2B2R2	200	1000	39	39	39	39	39
N4W3B1R2	500	1000	71	75	74	74	72

Table 3 Results of performance for 1DBPP in hard case

Problems	Items	Capacity of Each Bin	Best Solution ( $m^*$ )	QEA ( $m$ )	PSO ( $m$ )	GSA ( $m$ )	NGCFGSA ( $m$ )
HARD0	200	100000	56	57	59	59	60
HARD4	200	100000	57	57	57	57	57
HARD6	200	100000	57	59	62	63	62
HARD9	200	100000	56	56	56	56	56

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษาศมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ในการแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ มีสมรรถนะสูงในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาวิธีการค้นหาค่าตอบของ ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (QEA) ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) [14, 19-20] เนื่องจากที่มีความสามารถในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด วงกว้าง (Global Search) และค่าตอบที่ได้ที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ในกรณีปัญหาแบบง่ายและปัญหาแบบปานกลางเนื่องจากไม่มีความซับซ้อนของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ แบบหนึ่งมิติแต่สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในกรณีปัญหาแบบยากนั้นยังไม่สามารถค้นหา ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่นๆเนื่องจากปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบยากนั้น ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ยังไม่มีความสามารถในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Search) ได้มากพอและยังไม่มีฟังก์ชันที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปชุดค่าตอบโดยการตัดต่อโครโมโซม (Mutation) เพื่อเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวิจิฉัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ในการ ค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดได้

การนำขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาการจัดเรียงสินค้าและบริการเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณหาวิธีการบรรจุ ผลิตภัณฑ์สิ่งของลงในกล่องภาชนะวัสดุห่อหุ้มหรือตู้คอนเทนเนอร์และยังสามารถลดต้นทุนโลจิสติกส์ที่สูญเสีย ไปกับกิจกรรมการขนส่งการวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สามารถแก้ไขปัญหาการบรรจุ ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) และได้ทำการทดสอบสมรรถนะกับปัญหาการบรรจุ ผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ 3 กรณีคือ (1) กรณีปัญหาแบบง่าย (2) กรณีปัญหาแบบปานกลางและ (3) กรณีปัญหา แบบยาก นอกจากนี้ยังทดสอบเชิงเปรียบเทียบับ 3 ขั้นตอนวิธีการได้แก่ (1) ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิง ควอนตัม (QEA) (2) ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และ (3) ขั้นตอนวิธีการค้นหา ความโน้มถ่วง (GSA) เพื่อยืนยันสมรรถนะในการแก้ไขปัญหาค่าตอบที่ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มี สมรรถนะสูงในการแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในกรณีปัญหาแบบง่ายและแบบปานกลาง และมีค่าค่าตอบใกล้เคียงกับค่าตอบที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาแบบยากนั้นยังไม่สามารถค้นหาค่าตอบที่เหมาะสม ที่สุดและยังได้ค่าตอบแบบเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ตั้งนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีการวิธีการดังกล่าวเหมาะ กับปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยถึงปานกลางและปัญหาที่มีฟังก์ชันการค้นหาลักษณะเดียว (Unimodal Landscape Function)

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคตทางผู้วิจัยได้มุ่งไปที่การพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ให้มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบยากที่เข้าใกล้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดมากยิ่งขึ้นและจะทำการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการอื่นมาเปรียบเทียบกับสมรรถนะมากขึ้นกว่าเดิมตลอดจนประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ในการแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในกิจกรรมทางโลจิสติกส์จริงในภาคอุตสาหกรรม

## References

- [1] Kondratjev, J. (2015). *Logistics Transportation and Warehouse in Supply Chain*, (Master thesis, Centria University of Applied Sciences).
- [2] Rushton, A., et al. (2014). *The Handbook of Logistics and Distribution Management: Understanding the Supply Chain*. London: Kogan Page.
- [3] Manyika, J., et al. (2017). *A future that works: AI, automation, employment, and productivity*. McKinsey Global Institute Research, 60, 1-135.
- [4] Wei, L., et al. (2020). A new branch-and-price-and-cut algorithm for one-dimensional bin-packing problems. *INFORMS Journal on Computing*, 32(2), 428-443.
- [5] Abdel-Basset, M., et al. (2018). An improved nature inspired meta-heuristic algorithm for 1-D bin packing problems. *Personal and Ubiquitous Computing*, 22(5-6), 1117-1132.
- [6] Hannenhalli, S. (1996). Polynomial-time algorithm for computing translocation distance between genomes. *Discrete Applied Mathematics*, 71(1-3), 137-151.
- [7] Alvim, A. C., et al. (2004). A hybrid improvement heuristic for the one-dimensional bin packing problem. *Journal of Heuristics*, 10(2), 205-229.
- [8] Delorme, M., et al. (2016). Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms. *European Journal of Operational Research*, 255(1), 1-20.
- [9] Duan, J., et al. (2022). *A Data-Driven Column Generation Algorithm for Bin Packing Problem in Manufacturing Industry*. Available from <https://arxiv.org/pdf/2202.12466.pdf>. Accessed date: 27 December 2022.
- [10] Davis, L. (1985). Applying adaptive algorithms to epistatic domains. In *9<sup>th</sup> International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization* (p. 162-164). 18 – 23 August, 1985, Los Angeles, California, USA.
- [11] Lodi, A., et al. (2002). Two-dimensional packing problems: A survey. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 241-252.
- [12] Dorigo, M. & Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, 344(2-3), 243-278.

- [13] Srinivas, M. & Patnaik, L. M. (1994). Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24(4), 656-667.
- [14] Rashedi, E., et al. (2009). GSA: a gravitational search algorithm. *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248.
- [15] Tharawetcharak, P., et al. (2019). An improved gravitational coefficient function for enhancing gravitational search algorithm's performance. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 9(3), 261-266.
- [16] Sidhu, J. S., et al. (2007). The multifaceted nature of exploration and exploitation: Value of supply, demand, and spatial search for innovation. *Organization Science*, 18(1), 20-38.
- [17] Mansouri, R., et al. (1999). Effective time variation of G in a model universe with variable space dimension. *Physics Letters A*, 259(3-4), 194-200.
- [18] Scholl, A. & Klein, R. (2022). *Bin Packing*. Available from <https://www2.wiwi.uni-jena.de/Entscheidung/binpp/bin1dat.htm>. Accessed date: 01 Mar 2022.
- [19] Swain, B., et al. (2014). Quantum evolutionary algorithm for solving bin packing problem. *International Journal of Engineering Science Invention*, 3(8), 1-7.
- [20] Laurent, A. & Klement, N. (2019). Bin packing problem with priorities and incompatibilities using PSO: Application in a health care community. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2596-2601.