



การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับการกลายพันธุ์
สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์

ภัทรเวช ธาราเวชรักษ์

คู่มือฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ปีการศึกษา 2565

DEVELOPMENT OF THE GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM WITH
MUTATION FOR THE BIN PACKING PROBLEMS

PATTRAWET THARAWETCHARAK

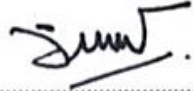
A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Engineering Management
College of Innovative Technology and Engineering,
Dhurakij Pundit University
Academic Year 2022




ใบรับรองวิทยานิพนธ์

วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับการกลายพันธุ์สำหรับ
 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์
เสนอโดย ภัทรเวช ชาราเวชรักษ์
สาขาวิชา การจัดการทางวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แล้ว


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์)


.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์)


..... กรรมการ
(ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ)


..... กรรมการ
(ดร.รชฎ ขำบุญ)

วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


.....
(ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)

คณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 12 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2566

Dissertation Title	DEVELOPMENT OF THE GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM WITH MUTATION FOR THE BIN PACKING PROBLEMS
Author	Pattrawet Tharawetcharak
Dissertation Advisor	Asst. Prof. Dr. Suparatchai Vorarat
Program	Doctor of Philosophy Program in Engineering Management
Academic Year	2022

ABSTRACT

This research aimed to increase the performance of NGCFGSAM in the global search for benchmark function, bin packing problem, and bin packing problem in the logistics industry. The research method begins to study literature related to the New Gravitational Search Coefficient Function of the Gravitational Search Algorithm (NGCFGSA) and Mutation in the Genetic Algorithm. In addition, the research method divides into two parts; the first part is research in mathematics that focuses on optimization problems in Non-deterministic Polynomial-time hard (NP-hard), and the second part is engineering research that focuses on bin packing problems in the logistics industry. After that, the proposed NGCFGSAM compared to previous functions in the literature based on six benchmark functions, such as three unimodal landscape functions and three multimodal landscape functions. Moreover, in confirming the ability to solve problems of the proposed NGCFGSAM, the research is compared to the bin packing problem in the literature based on eight issues and the bin packing problem in the logistics industry based on eight problems. The experimental results show that the NGCFGSAM outperforms the conventional algorithms on search performance, and the exploration and exploitation phases are well balanced. It has an average utilization rate of 96.43 % for simple problems, 95.46 % for medium problems, and 85.17 % for complicated issues.

Keywords: Gravitational Search Algorithm, Mutation, Bin Packing Problem

L. Vorat.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	6
1.5 คุณค่าทางวิชาการที่เกิดขึ้นจากการวิจัย.....	6
2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การทบทวนปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์.....	8
2.2 การหาค่าเหมาะที่สุดโดยขั้นตอนวิธีการแบบสามัญสำนึก.....	22
2.3 ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง.....	25
2.4 ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม.....	32
2.5 การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม.....	36
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	43
3.1 การพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM.....	43
3.2 การวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM.....	47
3.3 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ.....	51
3.4 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการวิจัย.....	55
4.1 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM.....	55
4.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์.....	58
4.3 ผลการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์.....	62
4.4 ผลการวิเคราะห์ร้อยละอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์.....	65
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 อภิปรายผล.....	72
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก.....	85
ก ข้อมูลจากปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในงานวิจัยของ Scholl และ Klein (2003); Swain, Ghosh และ Borah (2014).....	86
ข ข้อมูลจากปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติจากกรณีศึกษาบริษัทขนส่ง มาตรฐานตัวอย่างในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์.....	114
ค การพัฒนาตนเอง.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วรรณกรรมเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงและวิธีการในขั้นตอนวิธีการ เชิงพันธุกรรม.....	38
3.1 ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะ ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM.....	49
3.2 คำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะ ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM.....	50
3.3 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ แบบง่าย.....	54
3.4 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ แบบปานกลาง.....	54
3.5 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ แบบยาก.....	54
4.1 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับฟังก์ชันการวัด เปรียบเทียบสมรรถนะ.....	56
4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบง่าย.....	60
4.3 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบปานกลาง.....	61
4.4 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบยาก.....	61
4.5 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย.....	64
4.6 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบปานกลาง.....	64
4.7 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยาก.....	65
4.8 ผลการเปรียบเทียบอัตราอรรถประโยชน์ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย.....	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผลการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ แบบปานกลาง.....	67
4.10 ผลการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับ ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยาก.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ.....	8
2.2 กราฟสำหรับแบบจำลองการไหลส่วนโค้ง.....	10
2.3 แบบจำลองดายด์คอร์ฟ.....	13
2.4 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ.....	14
2.5 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบทรงกระบอก.....	16
2.6 สัญกรณ์สำหรับการวางหลักเกณฑ์.....	16
2.7 พารามิเตอร์และตัวแปรของกล่อง.....	21
2.8 การหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยขั้นตอนวิธีการแบบสามัญสำนึก.....	22
2.9 การหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยขั้นตอนวิธีการพื้นที่ว่างเล็กสุด (First Fit Algorithm).....	23
2.10 ขั้นตอนวิธีการพื้นที่ว่างเล็กสุดสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ.....	24
2.11 การหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยขั้นตอนวิธีการลดพื้นที่ว่างเล็กสุด (First Fit Decreasing Algorithm).....	24
2.12 การวิเคราะห์เครือข่ายบรรณานุกรมของขั้นตอนวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์.....	25
2.13 แรงดึงดูดระหว่างมวลของวัตถุแต่ละวัตถุ.....	26
2.14 หลักการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA).....	30
2.15 วิวัฒนาการเชิงพันธุกรรม (GA).....	33
2.16 ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA).....	34
3.1 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM).....	46
3.2 ฟังก์ชันภูมิภาคฐานนิยมเดี่ยว (ก) Sphere Function (ข) Matyas Function และ (ค) Rosenbrock Function.....	47
3.3 ฟังก์ชันภูมิภาคหลายรูปแบบ (ก) Griewank Function (ข) Schwefel Function และ (ค) Ackley Function.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 3.4 การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหา
ความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่
ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP)..... 52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาเศรษฐกิจของทุกประเทศทั่วโลกโดยส่วนใหญ่แล้วขึ้นอยู่กับ การขับเคลื่อนประเทศด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมตลอดจนการปรับกระบวนการทัศน์ของประชากรในประเทศนั้น ๆ สำหรับประเทศที่มีรายได้ต่ำและประเทศที่มีรายได้ปานกลาง นับเป็นประเทศที่เกิดการชะลอตัวทางเศรษฐกิจสูงทำให้การก้าวเข้าสู่ประเทศที่มีรายได้สูงย่อมเป็นไปได้ยากมาก จากข้อมูลของ Park and Rajah [1] พบว่า ในปี ค.ศ. 2014 มีประเทศรายได้ปานกลางในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาในภูมิภาคเอเชีย และกลุ่มลาตินอเมริกา รวมแล้วถึง 7 ประเทศ ได้แก่ สาธารณรัฐประชาชนจีน (People's Republic of China: PRC) อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ประเทศไทย บราซิล โคลัมเบีย เม็กซิโก หากประเทศเหล่านี้จะก้าวเข้าสู่ประเทศที่มีรายได้สูงได้นั้น จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านนวัตกรรมมากกว่าการเปลี่ยนแปลงด้านเทคโนโลยี อาทิเช่น การทำให้ประชากรเปลี่ยนกระบวนการทัศน์ในการยอมรับนวัตกรรมที่สร้างสรรค์ การปรับแผนและนโยบายให้สอดคล้องกับการยกระดับขีดความสามารถในการพัฒนาประเทศ และการคิดค้นนวัตกรรมใหม่ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจรากฐานของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมที่เป็นกำลังหลักในการพัฒนา และเป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product: GDP)

การยกระดับขีดความสามารถทางนวัตกรรมของอุตสาหกรรมนั้น ต้องทำการวิเคราะห์ถึงการร่วมมือของทุกกิจกรรมตลอดห่วงโซ่อุปทาน (Collaboration in The Supply Chain) ตั้งแต่ต้นน้ำยังปลายน้ำ [2] ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กิจกรรม [3] ได้แก่ การจัดหา (Procurement) การขนส่ง (Transportation) การจัดเก็บ (Warehousing) และการกระจายสินค้า (Distribution) ซึ่งทุกกิจกรรมในห่วงโซ่อุปทานแฝงไปด้วยกิจกรรมย่อยที่ก่อให้เกิดต้นทุนในการบริหารจัดการสูงคือ กิจกรรมทางโลจิสติกส์ (Logistics) ซึ่งประกอบไปด้วย [4] การบริการลูกค้า (Customer Service) การดำเนินการตามคำสั่งซื้อของลูกค้า (Order Processing) การคาดการณ์ความต้องการของลูกค้า (Demand Forecasting) การบริหารสินค้าคงคลัง (Inventory Management) กิจกรรมการขนส่ง (Transportation) การบริหารคลังสินค้า (Warehousing and Storage) การจัดการสินค้ากลับคืน (Reverse Logistics) การจัดซื้อ (Purchasing) การบริการหลังการขาย (Service Support) การเลือกที่ตั้งโรงงาน และคลังสินค้า (Plant and Warehouse Site Selection) กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้าย การขนถ่ายวัตถุดิบ การขนถ่ายสินค้า (Material Handling) และการติดต่อสื่อสาร (Communications) จึงทำให้กิจกรรมโลจิสติกส์เปรียบเสมือนเส้นเลือดในร่างกายของมนุษย์ที่มีความเชื่อมโยงกันไปยังจุดต่าง ๆ ของร่างกาย อย่างไรก็ตาม กิจกรรมทางโลจิสติกส์ส่วนใหญ่เน้นไปที่กระบวนการเคลื่อนย้ายและการเก็บรักษาวัตถุดิบ และสินค้าคงคลัง เป็นหลัก ทำให้เกิดการสูญเสียต้นทุนในการบริหารจัดการเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของสถาบันโลจิสติกส์โลก [5] ได้เปิดเผยว่า หากสามารถลดต้นทุนทางโลจิสติกส์ลงได้จะมีโอกาสก้าวเข้าสู่ประเทศที่มีรายได้สูงได้อย่างยั่งยืน

ยกตัวอย่างเช่น กรณีของสหรัฐอเมริกาช่วงต้นทศวรรษในปี ค.ศ. 1980 ได้มีค่าใช้จ่ายด้านโลจิสติกส์มากกว่าร้อยละ 16 ของ GDP ก่อนที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงปี ค.ศ. 2017 เป็นต้นมามีระดับต่ำกว่าร้อยละ 10 ของ GDP นอกจากนี้ ต้นทุนโลจิสติกส์จะสูญเสียไปกับกิจกรรมการขนส่งมากถึงร้อยละ 50.3 จากกิจกรรมทั้งหมด อย่างไรก็ตาม การที่จะลดต้นทุนโลจิสติกส์ควรเน้นไปที่กิจกรรมการขนส่ง เป็นหลัก ซึ่งเริ่มต้นจากการจัดเรียงวัตถุดิบ สินค้าคงคลัง หรือสิ่งของ เพื่อลดพื้นที่ในการจัดเก็บ และเคลื่อนย้ายได้มากที่สุด ต่อรอบ [6] จากกิจกรรมตามที่ได้กล่าวมานั้นมีความเกี่ยวข้องกับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งเรียกกัน ในแวดวงวิชาการว่า “ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์” หรือ “Bin Packing Problems” และมีความจำเป็นต้อง ทำการศึกษาขั้นตอนวิธีการในการแก้ไขปัญหาเพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problems: BPP) เป็นการหาวิธีการนำวัสดุคงคลัง จำนวนหนึ่งมาบรรจุลงกล่อง (กล่อง ภาชนะ วัสดุห่อหุ้ม หรือ ตู้คอนเทนเนอร์ ที่มีปริมาตรมากกว่าวัสดุคงคลัง ที่จะนำมาบรรจุ) [7] และเป็นปัญหาที่จัดอยู่ในกลุ่ม Non-deterministic Polynomial-time hard (NP-hard) เป็นชุดข้อมูล (Set) ปัญหาขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลา แบบพหุนาม (Polynomial-time) [8] โดยทั่วไปปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด [9] ได้แก่ 1) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Bin Packing Problem: 1DBPP) [10] ซึ่งมีวัสดุคงคลังอยู่ n ชิ้น แต่ละวัสดุคงคลังจะแทนด้วยน้ำหนัก (weight: w_j) ที่เป็นจำนวนเต็ม โดยที่ $j = 1, \dots, n$ บรรจุลงในกล่องที่มีความจุเท่ากับ c และจำนวนของกล่องแทนด้วยจำนวนเต็มที่มีอยู่ อย่างไม่จำกัด โดยทั่วไปมักจะทำการหาวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์วัสดุคงคลังที่มีอยู่ทุกชิ้นโดยใช้กล่องน้อยที่สุด (Minimum Number of Bins) และสามารถบรรจุวัสดุคงคลังได้ไม่เกินความจุที่กล่องจะรับได้ 2) ปัญหา การบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ (Two Dimensional Bin Packing Problem: 2DBPP) [11] เป็นวิธีการบรรจุ ผลิตภัณฑ์โดยคำนึงถึงความกว้าง w_j และความสูง h_j โดยที่ $j = 1, \dots, n$ ของวัสดุคงคลังที่มีขนาดต่างกัน หรือเท่ากันมาบรรจุลงในกล่องที่มีปริมาตรมากกว่าโดยเหลือพื้นที่น้อยที่สุด โดยกล่องไม่จำกัดจำนวนที่มีขนาด เท่ากัน และมีความกว้าง W ความสูง H ($w_j \leq W, h_j \leq H$) ยิ่งไปกว่านั้น ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ แบบสองมิติได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด อาทิเช่น อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมโลหะแผ่น อุตสาหกรรมไม้ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมกระดาษเพื่อแบ่งพื้นที่ในการโฆษณา ในหนังสือพิมพ์ หรือนิตยสาร เป็นต้น และ 3) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ (Three Dimensional Bin Packing Problem: 3DBPP) [12] ซึ่งจะกำหนดให้มีวัสดุคงคลังทรงสี่เหลี่ยม n สิ่ง มีขนาดความกว้าง w_j สูง h_j และความหนา d_j โดยที่ $j = 1, \dots, n$ และกล่องไม่จำกัดจำนวนและมีขนาดเท่ากัน โดยมีความกว้าง W ความสูง H และความหนา D ($w_j \leq W, h_j \leq H, d_j \leq D$) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ เป็นการบรรจุวัสดุคงคลังทั้งหมดลงในกล่องโดยใช้กล่องจำนวนน้อยที่สุด โดยทั่วไปปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ แบบสามมิติได้ถูกนำไปใช้กับการบรรจุวัสดุคงคลังใส่ในตู้คอนเทนเนอร์ ดังนั้น การบรรจุวัสดุคงคลังใส่ในตู้ คอนเทนเนอร์จะต้องวางให้ขอบของคอนเทนเนอร์ขนานกับขอบของวัสดุคงคลังโดยไม่มีการหมุนวัสดุคงคลัง ด้วยความยากและการคำนวณที่มีตัวแปรซับซ้อนจึงทำให้การค้นหาคำตอบของปัญหา NP-hard ซึ่งต้อง

คำนวณด้วยวิธีการอื่น อาทิเช่น การค้นหาคำตอบด้วยวิธีการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound) วิธีการนี้จะทำซ้ำกับทุกปัญหาและทำการตัดปัญหาที่ไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจนกระทั่งพบคำตอบที่ดีที่สุด [13] วิธีการแบบสามัญสำนึก (Heuristic Algorithms) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนเพื่อให้ได้คำตอบที่ดี (Good Solution) [14] อาทิเช่น การค้นหาคำตอบย่านใกล้เคียง (Neighborhood Search) และการค้นหาคำตอบแบบทาบู่ (Tabu Search) เป็นต้น ข้อดีของวิธีการทางวิทยาการศึกษานี้จะสามารถค้นหาคำตอบได้เร็ว แต่ในทางกลับกันอาจได้คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optimum) นอกจากนี้ ยังมีวิธีการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์คือวิธีการทางเมตาฮิวริสติก (Metaheuristics) ลักษณะการค้นหาคำตอบจะใช้หลักการวนซ้ำและสุ่มค่าพารามิเตอร์เพื่อค้นหาคำตอบที่มีการหาค่าเหมาะสมที่สุด [11] ซึ่งวิธีการทางเมตาฮิวริสติกจะใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าวิธีการทางวิทยาการศึกษานี้ แต่จะสามารถได้คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) อย่างเช่น ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบนกคูดูเหว่า (Cuckoo Search Algorithm: CSA) ซึ่งเลียนแบบพฤติกรรมการวางไข่ของนกคูดูเหว่า และลักษณะการเคลื่อนที่ของ Lévy Flights ขั้นตอนวิธีการนี้มีการปรับพารามิเตอร์ และสามารถใช้จำนวนรอบในการคำนวณน้อย ข้อเสียยังมีโอกาสได้ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง [14] ต่อมาได้มีวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งจะใช้การเลียนแบบพฤติกรรมกลุ่มฝูงปลาและพฤติกรรมเริ่มต้นและประเมินการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ขั้นตอนวิธีการนี้มีข้อได้เปรียบทางด้านการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ง่าย และมีการปรับปรุงพารามิเตอร์ที่ใช้น้อย แต่ยังมีจุดด้อยคือมีโอกาสได้ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่งอยู่บ้างหากมีรอบในการคำนวณน้อย [15] ยังมีวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) เลียนแบบพฤติกรรมมาจากการหลั่งฟีโรโมน (Pheromone) ในการจดจำเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดไปยังแหล่งอาหาร ข้อดีคือสามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดได้เร็ว แต่คำตอบจะไปตกที่ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่งได้ง่ายหากใช้รอบในการคำนวณน้อย [16] และขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm: FA) ที่เลียนแบบมาจากพฤติกรรมการใช้แสงในการหาคู่ และหาอาหารของหิ่งห้อย มีข้อดีคือสามารถหาค่าตอบเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่งได้ทั้งหมด แต่ข้อเสียคือมีโอกาสยากมากที่จะเจอค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง [17] ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยใช้หลักการคัดเลือกทางธรรมชาติที่จำลองพฤติกรรมมาจากวิวัฒนาการทางพันธุกรรมมีจุดเด่นคือการตัดต่อโครโมโซมหรือการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) และกระบวนการกลายพันธุ์ (Mutation) ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด นับว่าเป็นขั้นตอนวิธีการที่ค่อนข้างดีที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลาย และจุดด้อยคือหากรอบในการคำนวณน้อยจะมีโอกาสติดอยู่ที่ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่งเนื่องจากมีลักษณะการค้นหาคำตอบแบบเป็นลำดับ [18] ต่อมา มีนักวิจัยได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีการใหม่ที่ถูกคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ. 2009 [19] และด้วยจุดเด่นที่มีความสามารถในการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) เนื่องจากมีลักษณะในการค้นหาคำตอบแบบฝูงการกระจายตัวได้ (Swarming) หากมีการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีความ

เหมาะสม ซึ่ง GSA มีความสามารถในการสำรวจคำตอบ (Exploration) ที่ดี แต่ยังพบข้อเสีย คือ มีการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) ที่ต่ำ

ด้วยข้อดีของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงในการสำรวจคำตอบ ทำให้นักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีการดังกล่าวเพื่อลดข้อเสียที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับการข้ามสายพันธุ์ ทำให้ขั้นตอนวิธีการมีความสามารถในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบในระยะแรกเพื่อเพิ่มอัตราการเข้าสู่คำตอบ [20]-[21] แต่การข้ามสายพันธุ์ไม่เหมาะกับการค้นหาคำตอบในปัญหาที่มีลักษณะซับซ้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมเพื่อเป็นโครโมโซมรุ่นต่อไปมากเกินไปจนเกิดความจำเอน จึงเกิดการเบี่ยงเบนของคำตอบได้มากกว่าการข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว [22] และยังมีงานวิจัยที่ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ และเพิ่มขีดความสามารถในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [23] รวมถึงยังได้ผสมกับวิธีการเรียนรู้ของฝ่ายค้าน (The Opposition Learning Strategy) เพื่อเพิ่มความเร็วของอัตราการเข้าสู่คำตอบ และวิธีการกลายพันธุ์ เพื่อเพิ่มความหลากหลายของคำตอบที่ได้ [24] ตลอดจนการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบฟัซซี่ (GSA-Fuzz) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสุ่มชุดคำตอบ ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง [25] การกลายพันธุ์ทำให้ส่วนหนึ่งของคำตอบของแต่ละโครโมโซมถูกแลกเปลี่ยน หรือสลับกับโครโมโซมอื่น หรือแทรกในโครโมโซมอื่นก็ได้ เช่นเดียวกัน [26]-[27] ทำให้วิธีการกลายพันธุ์เป็นวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถแลกเปลี่ยนหรือแทรกคำตอบได้ อย่างรวดเร็ว และมีการคำนวณที่สามารถมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่วิธีการข้ามสายพันธุ์นั้นยังไม่สามารถหาจุดสมดุลระหว่างการวิจิฉัยและการแสวงหาคำตอบได้ ต่อมา Tharawetcharak, Karot and Pornsing [28] ได้พัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วง (Gravitational Coefficient Function) เพื่อเพิ่มความสมดุลระหว่างการวิจิฉัยและการแสวงหาคำตอบ แต่ยังคงพบข้อเสียคือ ขั้นตอนวิธีการนี้ยังไม่สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ สำหรับฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions)

ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วง (New Gravitational Coefficient Function of Gravitational Search Algorithm: NGCFGSA) เนื่องจากมีความสามารถในการเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวิจิฉัยและการแสวงหาคำตอบที่สมดุลกันผสมกับข้อดีของวิธีการกลายพันธุ์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแสวงหาคำตอบ [29] ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนหรือแทรกคำตอบได้ และมีความรวดเร็วในการคำนวณที่สามารถมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดวงกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ชื่อขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอใหม่ในการวิจัยนี้ว่า “ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (New Gravitational Coefficient Function of Gravitational Search Algorithm with Mutation: NGCFGSAM)” นอกจากนี้ การวิจัยนี้ยังนำขั้นตอน

วิธีการที่นำเสนอไปทดสอบสมรรถนะกับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Function) และนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขการจำลองปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problem: BPP) อีกด้วย

ความน่าสนใจของการวิจัยครั้งนี้ เป็นการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่มาผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ ยิ่งไปกว่านั้น การวิจัยนี้ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการดังกล่าวให้มีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) สำหรับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะและการแก้ปัญหการบรรจุผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมให้สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ

1.2.2 เพื่อทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ มีขอบเขตในการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นจุดเด่นของขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) เพื่อการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ตลอดจนศึกษาอัตราการเข้าสู่คำตอบ (Convergence Rate) กับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark functions) ทั้งแบบฟังก์ชันภูมิภาคนิยมเดียว (Unimodal Landscape Function) และแบบฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) และผลสุดท้ายจะนำไปทดสอบกับการแก้ปัญหการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Bin Packing Problem: 1DBPP) และประยุกต์ใช้กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

โดยการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองทางคอมพิวเตอร์ (The Computational Experiments) ผ่านโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2016A ในการจำลองสถานการณ์ (Simulate) บนคอมพิวเตอร์ Intel Core i5-

8250U CPU @ 1.80 GHz Processor and 8 GB RAM นอกจากนี้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันความโน้มถ่วงแบบเดิม (The Conventional of Gravitational Coefficient Function) $G(t)$ ได้แก่ ค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) ที่เกิดขึ้นในช่วงควอนตัมจักรวาลแรก (The First Cosmic Quantum-interval) ณ เวลา $t_0 = 1000$ จำนวนค่าคงที่ $\beta = 0.01$ ค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) $G(t_0) = 100$ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) $G(t)$ ได้แก่ จำนวนค่าการคำนวณซ้ำสูงสุด (The Maximum Iteration Number) $T = 1000$ จำนวนค่าคงที่ $\beta = 2$ และค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) $G(t_0) = 100$ จำนวนเอเจนต์ (The Number of Agents) $N=50$

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถนำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) ไปใช้ในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ (Optimization)

1.4.2 สามารถนำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) ไปใช้ในการแก้ไขปัญหาภาคอุตสาหกรรมได้ (Industrial Problems)

1.4.3 สามารถนำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) ไปใช้ในการออกแบบการจัดเรียงวัสดุคงคลังและแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ (BPP)

1.4.4 สามารถนำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) ไปใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้รถบรรทุกในการขนส่งของกิจกรรมโลจิสติกส์ในห่วงโซ่อุปทานได้ (Logistics Activities in Supply Chain)

1.4.5 สามารถนำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) ไปใช้ในการเพิ่มร้อยละอัตรารถประโยชน์ (Percent of Utilization Rate) ในภาคการขนส่งได้

1.5 คุณค่าทางวิชาการที่เกิดขึ้นจากการวิจัย

1.5.1 ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) มีสมรรถนะในการค้นหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่การค้นหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ได้ทั้งปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาคนิยมเดี่ยว (Unimodal Landscape Functions) และ

ปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5.2 ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (BPP) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5.3 ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (BPP) ในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้ ได้ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอย่างครอบคลุมเพื่อรวบรวมองค์ความรู้ในการทำวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problems) การหาค่าเหมาะที่สุดโดยขั้นตอนวิธีการแบบสามัญสำนึก (Heuristic Optimization Algorithms) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดในปัญหาทางด้านวิศวกรรม (Gravitational Search Algorithm Applications on Engineering Optimization Problems) ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) จากการทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แสดงตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การทบทวนปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problems: BPP) เป็นการหาขั้นตอนวิธีการที่น่าวัสดุคงคลังจำนวนหนึ่งมาบรรจุในกล่อง ภาชนะ วัสดุห่อหุ้ม หรือ ตู้คอนเทนเนอร์ ที่มีปริมาตรมากกว่าวัสดุคงคลังที่จะนำมาบรรจุ [7] โดยทั่วไปปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด [9] ได้แก่ (1) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Bin Packing Problem: 1DBPP) (2) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ (Two Dimensional Bin Packing Problem: 2DBPP) และ (3) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ (Three Dimensional Bin Packing Problem: 3DBPP)



รูปที่ 2.1 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [30]

2.1.1 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Bin Packing Problem: 1DBPP) [10] เป็นปัญหาที่มีวัสดุคงคลังอยู่ n ชิ้น วัสดุคงคลังแต่ละชิ้นแทนด้วยน้ำหนัก (weight: w_j) ที่เป็นจำนวนเต็ม โดยที่ $j = 1, \dots, n$ ซึ่งถูกบรรจุลงในกล่องที่มีความจุเท่ากับ c ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และจำนวนของกล่องแทน

ด้วยจำนวนเต็มที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด ตามทฤษฎีของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติจะทำการหาวิธีการบรรจุวัสดุคงคลังที่มีอยู่ทุกชิ้นใส่กล่องโดยใช้จำนวนกล่องให้น้อยที่สุด (Minimum number of bins) และสามารถบรรจุวัสดุคงคลังได้ไม่เกินความจุที่กล่องจะรับได้ [31] ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ต่อไปนี้ [32]

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

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

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

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

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

เมื่อ m คือ จำนวนของกล่องที่ใช้ (Number of bins used)

n คือ จำนวนของวัสดุคงคลัง (Number of items)

w_j คือ น้ำหนักของวัสดุคงคลัง j (Weight of items j)

C คือ ความจุของกล่องแต่ละกล่อง (Capacity of each bin)

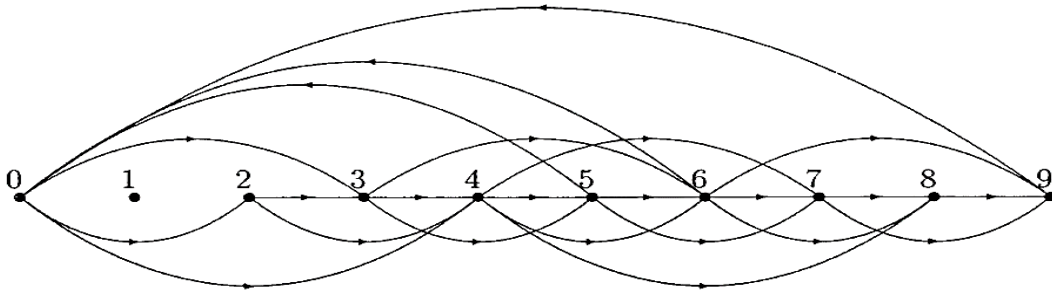
y_i คือ กำหนดให้ใช้กล่องที่ i

x_{ij} คือ การกำหนดให้วัสดุคงคลัง j ได้รับมอบหมายให้บรรจุในกล่องที่ i

โดยสมการวัตถุประสงค์ (1) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของจำนวนกล่องที่จะใช้น้อยที่สุดและขีดจำกัดของน้ำหนักวัสดุคงคลังแต่ละชิ้นที่จะบรรจุได้ไม่เกินน้ำหนักของกล่องสามารถอธิบายได้ดังเงื่อนไขบังคับที่ (2) และเงื่อนไขบังคับที่ (3) แสดงให้เห็นว่าวัสดุคงคลังที่มีอยู่ทุกชิ้นต้องนำไปบรรจุในกล่องทั้งหมดไม่ว่าจะใช้กล่องจำนวนเท่าใดก็ตาม นอกจากนี้ เงื่อนไขบังคับที่ (4) หาก y_i เท่ากับ 1 ถ้ามีการใช้กล่องที่ i หาก y_i เท่ากับ 0 จะไม่มีการเลือกใช้กล่องที่ i ใด ๆ (Otherwise) และเงื่อนไขบังคับที่ (5) หาก x_{ij} เท่ากับ 1 ถ้าวัสดุคงคลัง j ได้รับมอบหมายให้บรรจุในกล่องที่ i หาก x_{ij} เท่ากับ 0 วัสดุคงคลังจะไม่มีการได้รับมอบหมายให้บรรจุในกล่องที่ i ใด ๆ

นอกจากนี้ การจัดตำแหน่งของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติยังมีแบบจำลองคณิตศาสตร์อื่น ๆ อีก ได้แก่ แบบจำลองการไหลส่วนโค้ง (Arc Flow Model) ซึ่งให้วัสดุคงคลังเป็นชุดข้อมูล (Set) ของจำนวนเต็มบวกที่มีความจุที่ไม่เท่ากันและกล่องเป็นชุดข้อมูลของจำนวนเต็มบวกที่มีความจุเท่ากันทุกกล่อง เมื่อนำวัสดุคงคลังทุกชิ้นบรรจุใส่กล่องจะพิจารณาเพื่อให้เหลือความจุของกล่องที่น้อยที่สุด เมื่อกำหนดให้ความจุของกล่องเป็น w_k โดยที่ $k = 1, \dots, K$ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดข้อมูลจำนวนกล่องในแต่ละคลาส B_k โดยที่ $k = 1, \dots, K$ และกลุ่มของวัสดุคงคลังที่อยู่ใน m คลาส ที่มีขนาดแตกต่างกัน w_i โดยที่ $i = 1, \dots, m$ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดข้อมูลจำนวนวัสดุคงคลังแต่ละคลาส b_i โดยที่ $i = 1, \dots, m$ หลังจากการจัดกลุ่มสามารถสมมติให้คลาสของกล่องและคลาสของวัสดุคงคลังมีดัชนีที่มีค่าลดลงตามความจุและขนาดของวัสดุคงคลังที่นำมาบรรจุ [33]

เมื่อกำหนดให้ $W_{max} = \max_k W_k = W_1$ พิจารณากราฟ $G = (V, A)$ ซึ่งชุดข้อมูลของจุดยอด (Vertices) $V = \{0, 1, 2, \dots, W_{max}\}$ และชุดข้อมูลของส่วนโค้ง $A = \{(d, e) : 0 \leq d < e \leq W_{max} \text{ และ } e - d = w_i \text{ สำหรับทุก } i \text{ ในช่วง } 1 \leq i \leq m\}$ หมายความว่ามีส่วนโค้งกำกับระหว่างสองจุดถ้ามีรายการวัสดุคงคลังที่มีขนาดเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาส่วนโค้งระหว่าง $(d, d + 1, d = 0, 1, \dots, W_{max} - 1)$ จะตรงกับส่วนของกล่องที่ไม่ได้ใช้งาน และจำนวนของส่วนโค้งคือ $O(mW_{max})$



รูปที่ 2.2 กราฟสำหรับแบบจำลองการไหลส่วนโค้ง

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [33]

ดังนั้น ความจุที่จะทำการบรรจุในกล่องหนึ่งกล่อง W_k มีเส้นทางระหว่างจุดยอดของ 0 และ W_k ความยาวของเส้นโค้งเป็นเส้นทางกำหนดขนาดของวัสดุคงคลังที่จะนำมาบรรจุ และในชุดข้อมูลของจุดยอดเดียวกัน จะพิจารณาจากทิศทางของเส้นโค้งจากจุดยอดของ W_k ถึงจุดยอดของ 0 ถ้ากล่องมีความจุ W_k โดยที่ $k = 1, \dots, K$ เมื่อจำนวนของเส้นโค้งกล่อง (Bin Arcs) คือ K ซึ่งเป็น $O(W_{max})$ ดังนั้น จำนวนของเส้นโค้งทั้งหมดคือ $O(mW_{max})$ และจำนวนของเงื่อนไขบังคับในแบบจำลองคณิตศาสตร์คือ $O(W_{max} + m + K)$ ดังแสดงตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่อไปนี้

$$\text{Minimize } Z = \sum_{k=1}^k W_k z_k \quad (1)$$

$$\text{Subject to } - \sum_{(d,e) \in A'} x_{de} + \sum_{(e,f) \in A'} x_{ef} = \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k & \text{if } e = 0, \\ -z_k & \text{for } e = W_k, \quad k = 1, \dots, K \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{(d,d+w_i) \in A'} x_{d,d+w_i} \geq b_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (3)$$

$$z_k \leq B_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (4)$$

$$x_{de} \geq 0 \text{ and integer}, \quad \forall (d, e) \in A', \quad (5)$$

$$z_k \geq 0 \text{ and integer}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (6)$$

โดยแบบจำลองการไหลส่วนโค้งของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของจำนวนกล่องที่จะใช้น้อยที่สุด ดังแสดงตามสมการที่ (1) เงื่อนไขบังคับที่ (2) เป็นเงื่อนไขบังคับการไหลตามแบบการอนุรักษ์ (Conservation) เพื่อให้ตรวจสอบความสอดคล้องของการไหลในการบรรจุที่ถูกต้อง เนื่องจากวัสดุคงคลังจะถูกวางไว้ที่ขอบของกล่องก่อนเป็นอันดับแรก เงื่อนไขบังคับที่ (3) บังคับให้กล่องมีการตอบสนองความต้องการบรรจุวัสดุคงคลัง ในขณะที่เงื่อนไขบังคับที่ (4) ตรวจสอบว่าปริมาณการไหลในส่วนโค้งป้อนกลับมีความจุไม่เกินความจุของกล่อง ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งของเงื่อนไขบังคับเหล่านี้อาจไม่สามารถใช้ได้กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ทุกปัญหาได้ เงื่อนไขบังคับที่ (5) การไหลตามแบบการอนุรักษ์ที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม และเงื่อนไขบังคับที่ (6) เส้นโค้งของจำนวนกล่องที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

โดยคุณสมบัติการไหลแยก (Flow Decomposition Properties) คือ การไหลไม่เป็นลบ (Non-negative Flows) สามารถทำการแยกให้กลายเป็นชุดข้อมูลของเส้นทางและวัฏจักรที่แน่นอนได้ ทำให้เงื่อนไขบังคับที่ (1) จึงกำหนดเป็นระบบเอกพันธ์ (Homogeneous System) ซึ่งการไหลแยกเป็นชุดข้อมูลของวัฏจักรซึ่งแต่ละวัฏจักรมีส่วนโค้งของวัสดุคงคลังและส่วนโค้งป้อนกลับเชิงเดี่ยวที่ตรงกับขนาดของกล่องที่กำหนด [34]

แบบจำลองดัยด์คอฟ (Dyckhoff Model) สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบดัยด์คอฟจะทำการบรรจุในแนวแกน X หรือแนวนอน ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับปัญหาการตัดวัสดุคงคลังแบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Cutting Stock Problem) และปัญหาเศษตัดริม (Trim Loss Problem) เมื่อกำหนดให้ S เป็นชุดข้อมูลของความกว้างของวัสดุคงคลังที่มีขนาดตามมาตร $q \in$

$\{W_1, \dots, W_K\} \subset \mathbb{N}$ และ D ชุดข้อมูลของความกว้างอื่น ๆ จะกำหนดให้เป็น $q \in \{W_1, \dots, W_m\} \subset \mathbb{N}$ และสมมติให้ $S \cap D = \emptyset$ กำหนดให้ $y_{p,q}$ เป็นจำนวนของวัสดุคงคลังแต่ละชั้นที่มีความกว้าง p ที่แบ่งออกเป็น ส่วนตามความต้องการของความกว้าง p และวัสดุคงคลังแต่ละชั้นอื่น ๆ จะมีความกว้างที่เหลือเป็น $p - q$ ซึ่งคือวัสดุคงคลังชั้นกลางของกระบวนการบรรจุหรือกระบวนการตัด ขนาดของวัสดุคงคลังส่วนกลางถ้ามีความกว้างมากกว่ากล่องจะกำหนดให้เป็นชุดข้อมูลของความกว้างที่เหลือ R ในขณะที่มีความต้องการแบ่งชุดข้อมูลของวัสดุคงคลังตามความกว้างหรือความยาวที่เหลือเพื่อให้ได้ความกว้างให้ไม่เกินความกว้างของกล่องสำหรับบรรจุ ซึ่งมีตัวแปรการตัดสินใจในการตรวจสอบความถูกต้องคือ $y_{p,q}, p \in S \cup R, q \in D, q < p$ [33]

แบบจำลองตายตัวคอร์ปมีหลักการพิจารณาสมการวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับแบบจำลองการไหลส่วนโค้ง (Arc Flow Model) ชุดข้อมูลของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solutions) สามารถคำนวณได้ตามสูตรของเงื่อนไขบังคับสมดุล (Balance Constraints) ที่แสดงในพจน์ของแต่ละความกว้างนั้น ๆ ตามที่ตัวแปรการตัดสินใจ z_k ซึ่งหมายถึงจำนวนของวัสดุคงคลังขนาดใหญ่ที่มีขนาด W_k ดังแสดงตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่อไปนี้

$$\text{Minimize } Z = \sum_{k=1}^k W_k z_k \quad (1)$$

$$\text{Subject to } z_k + \sum_{p \in D: q+p \in SUR} y_{p+q,p} \geq \sum_{p \in D: p < q} y_{q,p} \quad \forall q \in S = \{W_1, \dots, W_k\}, \quad (2)$$

$$\sum_{p \in SUR: p < q} y_{q,p} + \sum_{p \in D: p+q \in SUR} y_{p+q,p} \geq \sum_{p \in SUR: p < q} y_{q,p} + N_q \quad \forall q \in (D \cup R) \setminus S, \quad (3)$$

$$z_k \leq B_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (4)$$

$$x_{p,q} \geq 0 \text{ and integer}, \quad p \in S \cup R, q \in D, q < p, \quad (5)$$

$$z_k \geq 0 \text{ and integer}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (6)$$

เมื่อ N_q คือ ค่าความต้องการของวัสดุคงคลังที่ขนาด q (for $q \notin D: N_q = 0$; for $q \in D$) ซึ่ง ($q = w_i: N_q = b_i$)

อสมการในของเงื่อนไขบังคับที่ (2) เป็นการระบุจำนวนของวัสดุคงคลังตามความกว้าง q ซึ่งสามารถแบ่งได้น้อยกว่า หรือเท่ากับความกว้างของกล่องมีขนาด W_k และนำ z_k รวมกับจำนวนของวัสดุคงคลังที่มีความกว้าง q ได้มาจากการบรรจุหรือตัดวัสดุคงคลังชั้นแรกกับเศษที่เหลือมีความกว้าง $p + q$ ซึ่งทำตามหลักการนี้เพื่อต้องการความกว้างที่มีขนาด p

สำหรับความต้องการของความกว้างที่รับได้กำหนดให้เป็นไปตามแสดงตามเงื่อนไขบังคับที่ (3) ซึ่งเป็นการระบุให้วัสดุคงคลังมีความกว้าง q ที่มีความกว้างในการแบ่งไม่เกินความกว้างของกล่อง เมื่อแบ่งวัสดุคงคลังออกไปแล้ววัสดุคงคลังที่แบ่งนั้นจะให้ความกว้างเป็น p และจากการบรรจุหรือตัดวัสดุคงคลังชิ้นแรกกับเศษที่เหลือมีความกว้าง $p + q$ เงื่อนไขบังคับที่ (4) เป็นการตรวจสอบว่าจำนวนของวัสดุคงคลังที่นำมาบรรจุจะต้องมีขนาดไม่เกินขนาดของกล่อง เงื่อนไขบังคับที่ (5) การแบ่งสิ่งเพื่อนำมาบรรจุซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก และเงื่อนไขบังคับที่ (6) เป็นการตัดสินใจเลือกกล่องซึ่งต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

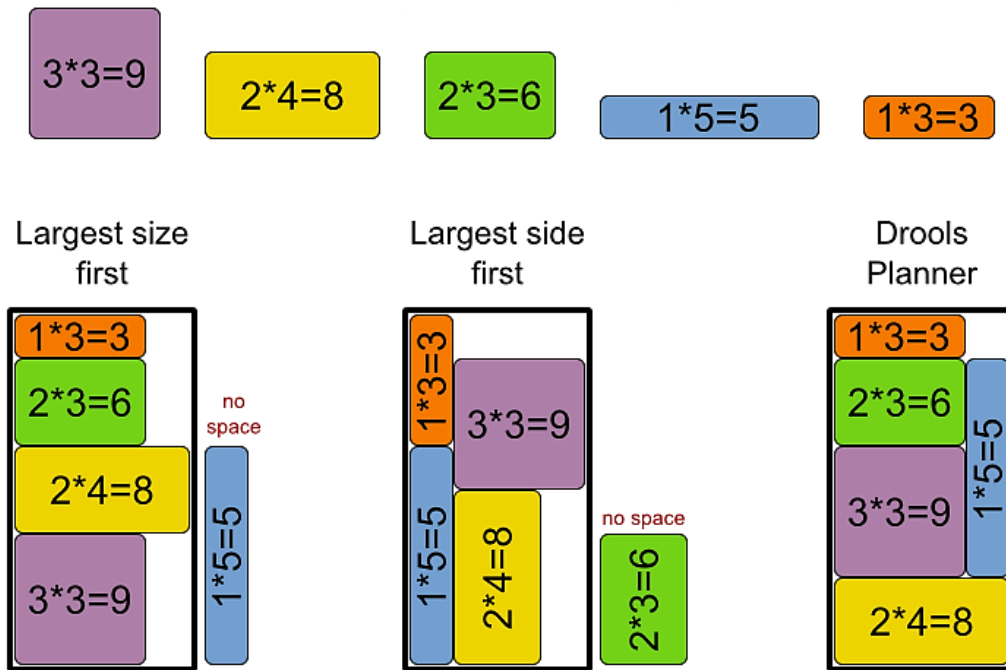
นอกจากนั้น กำหนดให้ $W_{max} = \max_k W_k W_1$ แบบจำลองนี้มีจำนวนแบบพหุนามสมมติ (Pseudo Polynomial Number) ของตัวแปร $O(mW_{max})$ ซึ่งวัสดุคงคลังแต่ละชิ้นจะมีความกว้างที่ต้องการและความกว้างที่เหลือ และความกว้างที่เหลือคือ $O(W_{max})$ สำหรับแต่ละความกว้างนั้น ต้องมีความกว้างไม่เกิน m ที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับการแบ่งวัสดุคงคลังแต่ละครั้ง มีเงื่อนไขบังคับคือ $O(K + W_{max})$

สำหรับตัวอย่างของการบรรจุตามแบบจำลองตายต์คอร์ฟ กำหนดให้วัสดุคงคลังมีชุดข้อมูลความกว้าง $S = \{9, 6, 5\}$ และชุดข้อมูลของความกว้างตามความต้องการคือ $D = \{4, 3, 2\}$ ปริมาณที่ต้องการคือ 20 10 และ 20 ตามลำดับ [35] จากการแบ่งวัสดุคงคลังตามความกว้างที่เป็นไปได้ จะได้ชุดข้อมูลของวัสดุคงคลังที่เหลือ $R = \{7, 6, 5, 4, 3, 2\}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

	z_1	z_2	z_3	y_{92}	y_{93}	y_{94}	y_{72}	y_{74}	y_{64}	y_{63}	y_{53}	y_{42}	
9	1			-1	-1	-1							≥ 0
8													≥ 0
7				1			-1	-1					≥ 0
6		1			1				-1	-1			≥ 0
5			1			1	1				-1		≥ 0
4						1		1	1			-1	≥ 20
3					1			1		2	1		≥ 10
2				1			1		1		1	2	≥ 20
$W_k = 9$	1												$\leq B_1$
6		1											$\leq B_2$
5			1										$\leq B_3$

รูปที่ 2.3 แบบจำลองตายต์คอร์ฟ

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [33]



รูปที่ 2.4 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [36]

2.1.2 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ (Two Dimensional Bin Packing Problem: 2DBPP) ตามทฤษฎีเป็นปัญหาการบรรจุที่คำนึงถึงความกว้าง w_j และความสูง h_j โดยที่ $j = 1, \dots, n$ ของวัสดุคงคลังที่มีขนาดต่างกันหรือเท่ากันมาบรรจุลงในกล่องที่มีปริมาตรมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การหารูปแบบของคำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติโดยเหลือพื้นที่ของกล่องที่น้อยที่สุด และสามารถใช้กล่องที่มีขนาดเท่ากันอย่างไม่จำกัดจำนวน ซึ่งกำหนดให้กล่องมีความกว้าง W และความสูง H ($w_j \leq W$, $h_j \leq H$) ยิ่งไปกว่านั้น ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติเป็นปัญหาที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมมากที่สุด อาทิเช่น อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมโลหะแผ่น อุตสาหกรรมไม้ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมกระดาษเพื่อแบ่งพื้นที่ในการโฆษณาในหนังสือพิมพ์ หรือนิตยสาร เป็นต้น ซึ่งปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติสามารถเขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ต่อไปนี้ [11]

$$\text{Minimize } Z = \sum_{k=1}^n q_k \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^{j-1} x_{ij} + y_j = 1 \quad (j = 1, \dots, n), \quad (2)$$

$$\sum_{j=i+1}^n w_j x_{ij} \leq (W - w_i) y_i \quad (i = 1, \dots, n - 1), \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{i-1} z_{ki} + q_i = y_i \quad (i = 1, \dots, n), \quad (4)$$

$$\sum_{i=k+1}^n h_j z_{ki} \leq (H - h_k) q_k \quad (k = 1, \dots, n - 1), \quad (5)$$

$$y_i, x_{ij}, q_k, z_{ki} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (6)$$

เมื่อ q_k คือ การกำหนดให้ใช้กล่องที่ k

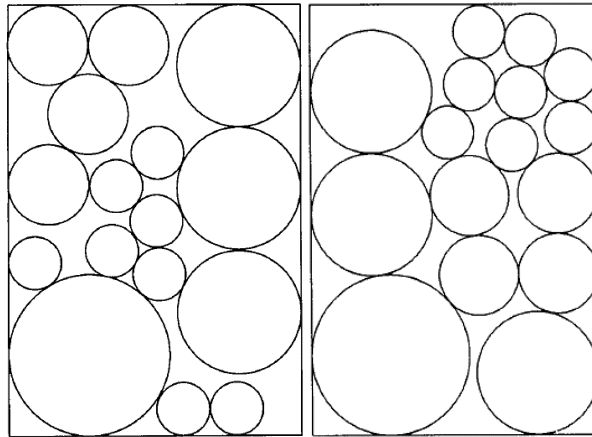
y_i คือ การกำหนดให้มีการเลือกบรรจุที่ระดับ i

x_{ij} คือ การกำหนดให้วัสดุคงคลัง j ได้รับมอบหมายให้บรรจุที่ระดับ i

z_{ki} คือ การกำหนดให้วัสดุคงคลัง i ได้รับมอบหมายให้บรรจุที่ระดับ k

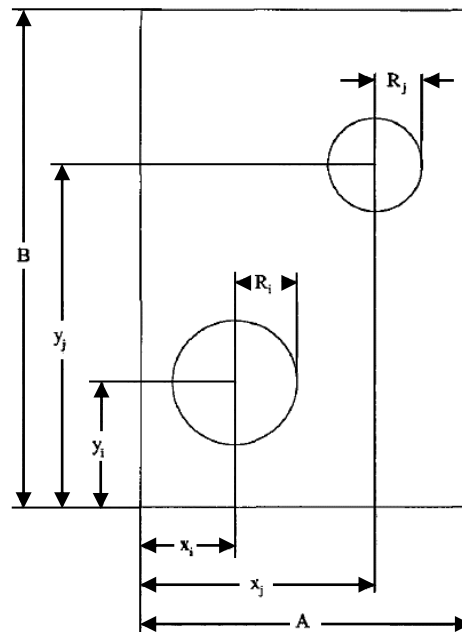
โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมพื้นที่ที่เหลือในการบรรจุของกล่องน้อยที่สุด ดังแสดงตามสมการที่ (1) นอกจากนี้ เงื่อนไขบังคับที่ (2) และ (4) เป็นการจัดสรรให้วัสดุคงคลังที่จะถูกนำมาบรรจุต่อจากของวัสดุคงคลังก่อนหน้าขึ้นใดหรือถูกบรรจุที่ระดับใด เงื่อนไขบังคับที่ (3) และ (5) เป็นการกำหนดให้บรรจุตามความกว้างของระดับ และบรรจุตามความสูงของแต่ละกล่อง ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น หาก $y_i = 1$ ถ้าวัสดุคงคลัง i เริ่มต้นบรรจุที่ระดับ i หาก $x_{ij} = 1$ ถ้าวัสดุคงคลัง j จะถูกบรรจุในระดับเริ่มต้นโดยวัสดุคงคลัง i หาก $q_k = 1$ ถ้าเลือกใช้กล่องที่ k หาก $z_{ki} = 1$ ถ้าวัสดุคงคลัง i บรรจุที่ระดับเริ่มต้นในกล่อง k และถ้า y_i, x_{ij}, q_k, z_{ki} เป็น 0 จะไม่มีการเลือกเงื่อนไขใด ๆ ที่ได้กล่าวมา ดังแสดงตามเงื่อนไขบังคับที่ (6) [11]

นอกจากนี้ ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติยังมีการพัฒนาเพื่อหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับรูปแบบสองมิติชนิดอื่นที่มีลักษณะเป็นรูปเรขาคณิตต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบทรงกระบอก (The Cylindrical Bin Packing Problem) อาทิเช่น ท่อ กระบอกสูบ และท่อนเหล็ก เป็นต้น ซึ่งวัสดุทรงกระบอกบางประเภทมีราคาสูง อย่างเช่น ท่อที่ผลิตจากคาร์บอนไฟเบอร์ และท่อนเหล็กกล้าขัดผิวมัน จึงมีความจำเป็นต้องห่อหุ้มเพื่อป้องกันความเสียหายระหว่างขนส่ง เช่น การบรรจุท่อเหล่านั้นใส่กล่องกระดาษ หรือตู้คอนเทนเนอร์ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้น ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบทรงกระบอกมีมุมมองเป็นพื้นที่หน้าตัดหรือมีลักษณะเป็นวงกลมบรรจุใส่กล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความยากของปัญหาดังกล่าวขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีขนาดแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 ปัญหาของการบรรจุผลิตภัณฑ์รูปวงกลม (Problem of Packing Circles) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันใส่ในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสูงและความกว้างคงที่ ซึ่งเป็นกำหนดการไม่เชิงเส้นที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม [37]



รูปที่ 2.5 ปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์แบบทรงกระบอก

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [37]



รูปที่ 2.6 สัญกรณ์สำหรับการวางหลักเกณฑ์

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [37]

เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 2.6 สำหรับแต่ละ $i \in I$ กำหนดให้ W_i เป็นความจุของวงกลม i -th ที่ถูกบรรจุในกล่องที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า W_i ทั้งหมด จะใช้สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function Coefficients) ในการวางหลักเกณฑ์ ค่าเชิงตัวเลขเหล่านั้นจะขึ้นอยู่กับบริบทของปัญหาที่กำลังจะ

ทำการหาคำตอบ [38] ยกตัวอย่างเช่น (1) การใช้ $W_i = (1/(AB))\pi R_i^2$ คือความหนาแน่นหรือพื้นที่หน้าตัดรูปวงกลม $i - th$ (2) สำหรับวงกลมที่ทับซ้อนกันของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบทรงกระบอกมักจะให้ W_i คือ พื้นที่หน้าตัดรูปวงกลมของทรงกระบอก $i - th$ (3) กรณีตีความเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจสำหรับปัญหาการบรรจุ W_i มักจะกำหนดเป็นตัวแปรในหน่วยมูลค่าทางการเงินดอลลาร์ของวงกลม $i - th$ และ (4) ในกรณีของการบรรจุโดยมีเงื่อนไขในการจัดเรียงบางประการเข้ามาเกี่ยวข้อง W_i คือ การวัดน้ำหนักการจัดเรียงของวงกลม $i - th$ สำหรับตัวแปรการตัดสินใจสำหรับการวางหลักเกณฑ์ของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบทรงกระบอกสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบแรกกำหนดให้ $\delta_i = 1$ ถ้าววงกลม $i - th$ ถ้าวางบรรจุในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อ $\delta_i = 0$ จะไม่มีการบรรจุวงกลมใด ๆ และแบบที่สองถ้าววงกลม $i - th$ มีการบรรจุในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะให้ (x_i, y_i) แทนพิกัด $x - y$ ของจุดศูนย์กลางวงกลม $i - th$ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในส่วนของปัญหาการวางหลักเกณฑ์จะพิจารณาตามวงกลมทุกวงที่แตกต่างกันได้ ดังนั้น เซตของดัชนี H สามารถแสดงตามฟังก์ชันต่อไปนี้

$$H = \{(i, j): i \in I, j \in I, j < i\}$$

การใช้สัญลักษณ์สำหรับการวางหลักเกณฑ์ในการพิจารณาปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์สามารถแสดงดังแบบจำลองต่อไปนี้ [37]

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} W_i \delta_i \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \delta_i R_i \leq x_i \leq \delta_i (A - R_i) \quad \forall i \in I, \quad (2)$$

$$\delta_i R_i \leq y_i \leq \delta_i (B - R_i) \quad \forall i \in I, \quad (3)$$

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq \delta_i \delta_j (R_i + R_j) \quad \forall (i, j) \in H, \quad (4)$$

$$x_i \geq 0, \quad y_i \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad (5)$$

$$\delta_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \quad (6)$$

เมื่อ I เป็นเซตของการบรรจุวัสดุคงคลังที่มีลักษณะวงกลมจำนวน n และเป็นการวางโดยใช้หลักเกณฑ์ที่มีตัวแปรการตัดสินใจแบบฐานสอง (Binary Decision Variables) $2n$ เป็นตัวแปรตัดสินใจแบบต่อเนื่อง (Continuous Decision Variables) และ $2n + \frac{1}{2}n(n - 1)$ เป็นเงื่อนไขบังคับของโครงสร้าง (Structural Constraints) เงื่อนไขบังคับที่ (2) และเงื่อนไขบังคับที่ (3) เป็นการตรวจสอบการวางวงกลมในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของวงกลมขยายออกไปนอกมิติของกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เงื่อนไขบังคับที่ (4) กำหนดให้แต่ละคู่ของวงกลมวางไว้ในกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีระยะห่างระหว่าง

จุดศูนย์กลางเป็นระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean Distance) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับผลรวมของรัศมีวงกลมสองวง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งวงกลมที่บรรจุอยู่ในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่สามารถทับซ้อนกันได้ เงื่อนไขบังคับที่ (5) เป็นการระบุพิกัด $x - y$ ของจุดศูนย์กลางของวงกลมเป็นตัวแปรไม่ติดลบอย่างต่อเนื่อง (Continuous Nonnegative Variables) และเงื่อนไขบังคับที่ (6) ระบุว่า การตัดสินใจ “ใช่หรือไม่” ให้วงกลมวางอยู่ในกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือไม่ซึ่งเป็นตัวแปรแบบฐานสอง

2.1.3 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ (Three Dimensional Bin Packing Problem: 3DBPP) ตามทฤษฎีแล้วจะมีลักษณะของวัสดุคงคลังเป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular หรือ Orthogonal) n สิ่ง มีขนาดความกว้าง w_i สูง h_i และความหนา d_i โดยที่ $i = 1, \dots, n$ ซึ่งจะถูกบรรจุใส่กล่องที่มีปริมาตรมากกว่า โดยมีความกว้าง W ความสูง H และความหนา D ($w_i \leq W, h_i \leq H, d_i \leq D$) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติเป็นการบรรจุวัสดุคงคลังทั้งหมดใส่ในกล่องโดยใช้จำนวนกล่องและเหลือปริมาตรของกล่องที่ใช้น้อยที่สุด [12] โดยทั่วไปปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติถูกนำไปใช้กับการบรรจุวัสดุคงคลังที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือคล้ายคลึงทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากใส่ในตู้คอนเทนเนอร์ เช่น ลังกระดาษ กราฟท์ ลังกระดาษลูกฟูก ลังที่แพ็คด้วยไม้ และวัสดุคงคลังที่ห่อหุ้มด้วยบับเบิ้ลกันกระแทก เป็นต้น ดังนั้น การบรรจุวัสดุคงคลังใส่ในตู้คอนเทนเนอร์จะต้องวางให้ขอบของคอนเทนเนอร์ขนานกับขอบของวัสดุคงคลัง โดยไม่มีการหมุนวัสดุคงคลังในด้านที่ทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติสามารถเขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ต่อไปนี้ [39]

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j=1}^m u_j \quad (1)$$

$$\text{Subject to } p_{ij} \leq u_j \quad \forall i, j, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} m_i \leq C u_j \quad \forall j, \quad (4)$$

$$x'_i \leq W \quad \forall i, \quad (5)$$

$$y'_i \leq H \quad \forall i, \quad (6)$$

$$z'_i \leq D \quad \forall i, \quad (7)$$

$$x'_i - x_i = r_{11}^i w_i + r_{12}^i d_i + r_{13}^i h_i \quad \forall i, \quad (8)$$

$$y'_i - y_i = r_{21}^i w_i + r_{22}^i d_i + r_{23}^i h_i \quad \forall i, \quad (9)$$

$$z'_i - z_i = r_{31}^i w_i + r_{32}^i d_i + r_{33}^i h_i \quad \forall i, \quad (10)$$

$$\sum_p r_{pq}^i = 1 \quad \forall i, q, \quad (11)$$

$$\sum_q r_{pq}^i = 1 \quad \forall i, p, \quad (12)$$

$$x_i - x'_k + (1 - x_{ki}^b)M + (2 - (p_{ij} + p_{kj}))M \geq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (13)$$

$$x_k - x'_i + (1 - x_{ki}^a)M + (2 - (p_{ij} + p_{kj}))M \geq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (14)$$

$$y_i - y'_k + (1 - y_{ki}^b)M + (2 - (p_{ij} + p_{kj}))M \geq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (15)$$

$$y_k - y'_i + (1 - y_{ki}^a)M + (2 - (p_{ij} + p_{kj}))M \geq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (16)$$

$$z_i - z'_k + (1 - z_{ki}^b)M + (2 - (p_{ij} + p_{kj}))M \geq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (17)$$

$$z_k - z'_i + (1 - z_{ki}^a)M + (2 - (p_{ij} + p_{kj}))M \geq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (18)$$

$$x_{ki}^b + x_{ki}^a + y_{ki}^b + y_{ki}^a + z_{ki}^b + z_{ki}^a > 0 \quad \forall i, k, \quad (19)$$

$$i, k \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, \dots, m\}, p, q \in \{1, 2, 3\}$$

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมพื้นที่ที่เหลือในการบรรจุของกล่องน้อยที่สุด ดังแสดงตามสมการที่ (1) นอกจากนี้ เงื่อนไขบังคับที่ (2) เมื่อมีการเลือกให้วัสดุคงคลัง i บรรจุได้เฉพาะกล่อง j เงื่อนไขบังคับที่ (3) วัสดุคงคลังทุกชิ้นจะต้องถูกบรรจุใส่กล่องโดยสามารถใช้กล่องอย่างไม่จำกัดจำนวน ซึ่งวัสดุคงคลังที่นำมาบรรจุต้องมีปริมาตรไม่เกินปริมาตรของกล่องตามเงื่อนไขบังคับที่ (4) เงื่อนไขบังคับที่ (5) ถึง (7) เป็นการตรวจสอบว่าวัสดุคงคลังที่นำมาบรรจุ มีปริมาตรไม่เกินปริมาตรของกล่อง เงื่อนไขบังคับที่ (8) ถึง (10) เป็นการกำหนดให้วัสดุคงคลังสามารถหมุนเชิงตั้งฉากภายในกล่อง ยิ่งไปกว่านั้น [39] ขอบของวัสดุคงคลังมีทั้งแบบขนานหรือตั้งฉากกับขอบของกล่อง ดังนั้น เงื่อนไขบังคับเหล่านี้สามารถแสดงในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} x'_i - x_i \\ y'_i - y_i \\ z'_i - z_i \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & r_{13}^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & r_{23}^i \\ r_{31}^i & r_{32}^i & r_{33}^i \end{pmatrix}}_{R^i} * \begin{pmatrix} w_i \\ d_i \\ h_i \end{pmatrix}$$

เมื่อ R^i คือ เมทริกซ์การเรียงสับเปลี่ยน (Permutation Matrix) นั้นหมายถึงสตมภ์และแถวของ R^i มีสมาชิกเดียวเท่านั้นที่เท่ากับหนึ่งส่วนที่เหลือจะให้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงในเงื่อนไขข้อบังคับที่ (11) และ (12) ถ้าเริ่มต้นมีการกำหนดความหนา d_i ความยาว w_i และความสูง h_i ของวัสดุคงคลัง i ตามแนวแกน x, y, z ดังตัวอย่างต่อไปนี้

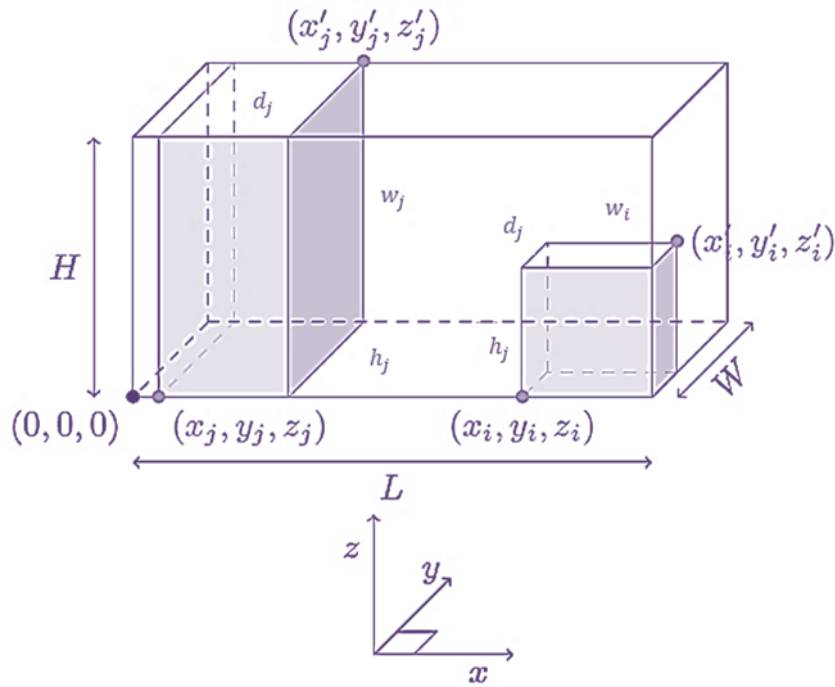
$$R^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

สำหรับวัสดุคงคลัง i และ j ดังแสดงในรูปที่ 2.7

$$R^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

และ

$$R^j = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



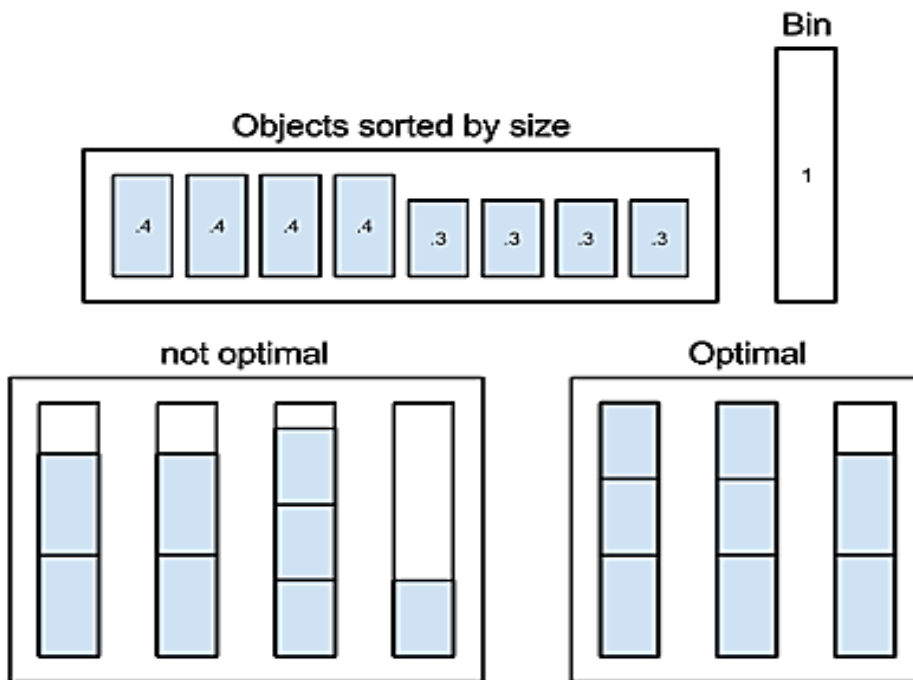
รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์และตัวแปรของกล่อง

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [39]

เงื่อนไขบังคับที่ (8) ถึง (10) ยังหมายถึง $x_i < x'_i$, $y_i < y'_i$, $z_i < z'_i$ และวัสดุคงคลังที่บรรจุในกล่องไม่สามารถที่จะซ้อนทับกัน (Non-overlapping) ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามเงื่อนไขบังคับที่ (13) ถึง (19) สำหรับพจน์ของ $(2 - (p_{ij} + p_{kj}))M$ เป็นการตรวจสอบว่าวัสดุคงคลังไม่มีการทับซ้อนกันโดยเฉพาะกล่องที่มีการบรรจุวัสดุคงคลังมากกว่าหนึ่งชั้น เงื่อนไขบังคับที่ (13) ถึง (18) เป็นการเชื่อมโยงตัวแปร $x_i, x'_i, y_i, y'_i, z_i, z'_i, x_k, x'_k, y_k, y'_k, z_k, z'_k$ เข้ากับตัวแปร $x_{ki}^b, x_{ki}^a, y_{ki}^b, y_{ki}^a, z_{ki}^b, z_{ki}^a$ เป็นต้น ซึ่งตำแหน่งของแต่ละด้านของวัสดุคงคลัง i จะถูกบรรจุในตำแหน่งด้านข้างของวัสดุคงคลัง k และต้องเป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่ (19) เพื่อไม่ให้เกิดการซ้อนทับกัน โดยใช้พารามิเตอร์ M เป็น $H \times W \times H$ เพื่อให้มีค่ามากกว่าค่าอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับการพิจารณาในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.2 การหาค่าเหมาะที่สุดโดยขั้นตอนวิธีการแบบสามัญสำนึก

ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์นั้นมีขั้นตอนวิธีการสำหรับแก้ไขปัญหาหลายแบบ ซึ่งคำตอบแต่ละรูปแบบจะมีทั้งค่าไม่เหมาะที่สุดและค่าเหมาะที่สุดแตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และเมื่อมีจำนวนวัสดุคงคลังมากขึ้นจะทำให้มีขั้นตอนวิธีการมากขึ้นแบบเลขชี้กำลัง (Exponential) [40] จึงทำให้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์เป็นปัญหาที่จัดอยู่ในกลุ่ม NP-hard ซึ่งเป็นชุดข้อมูลปัญหาขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าเหมาะที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time) [41] วิธีที่เหมาะสมและสมเหตุสมผลมากขึ้นคือ การหาขั้นตอนวิธีการประมาณค่า (Approximation Algorithm) m ที่ดำเนินงาน (Runs) ได้ในเวลาแบบพหุนามระดับต่ำ (Low-order Polynomial Time) และสำหรับทุกอินสแตนซ์ (Instance: I) หรือ $m_{APPROX}(I)$ ค่าดังกล่าวจะมีค่าใกล้เคียงกับ $m_{OTP}(I)$ ซึ่ง $m_{APPROX}(I)$ คือการประมาณค่าคำตอบสำหรับอินสแตนซ์ที่กำหนด และ $m_{OTP}(I)$ คือผลเฉลยเหมาะที่สุด (Optimal Solution) สำหรับอินสแตนซ์ที่กำหนด นอกจากนี้ $m_{OTP}(I)$ ยังสามารถเขียนอยู่ในรูป $m^*(I)$ [42] โดยส่วนใหญ่ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของจำนวนกล่องที่จะใช้ในการบรรจุวัสดุคงคลังน้อยที่สุดทำให้ในยุคแรกได้มีการใช้ขั้นตอนวิธีการทางฮิวริสติกในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว ดังแสดงตามรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 การหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยขั้นตอนวิธีการแบบสามัญสำนึก

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [40]

2.2.1 ฮิวริสติกสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

ฮิวริสติกสำหรับปัญหาการบรรจุแบบหนึ่งมิติ โดยทั่วไปแล้วฮิวริสติกที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนวิธีการ ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการออฟไลน์ (Online Bin Packing Problems) และขั้นตอนวิธีการออนไลน์ (Offline Bin Packing Problems) [43]

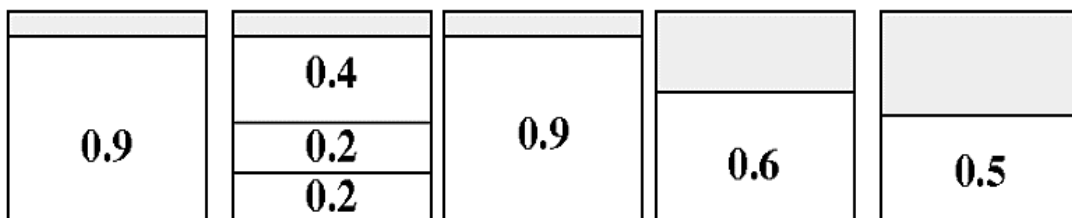
ขั้นตอนวิธีการออฟไลน์เป็นการจัดเรียงวัสดุคงคลังใส่กล่องตามลำดับ โดยไม่สามารถทราบลักษณะของวัสดุคงคลังขึ้นต่อไปหลังจากบรรจุวัสดุคงคลังชิ้นปัจจุบันใส่ในกล่องหรือไม่สามารถสลับวัสดุคงคลังในการใส่กล่องได้ ปัญหาในลักษณะนี้มักจะเกิดขึ้นกับขั้นตอนการบรรจุผลิตรภัณฑ์ใส่กล่องเพื่อขนย้ายของสายการผลิตเป็นต้น ซึ่งสามารถจำแนกขั้นตอนวิธีการออฟไลน์ออกเป็น 2 ขั้นตอนวิธีการ ดังนี้

(1) ขั้นตอนวิธีการพื้นที่ว่างเล็กสุด (First Fit Algorithm)

เป็นขั้นตอนวิธีการที่ง่ายที่สุด เริ่มต้นการบรรจุจากวัสดุคงคลังชิ้นแรกก่อนเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อกำหนดให้ x ของการบรรจุผลิตรภัณฑ์แบบออฟไลน์ (Offline Bin Packing) ขั้นตอนวิธีการพื้นที่ว่างเล็กสุดจะเป็นการส่งกลับผลลัพธ์ด้วยค่า $m_{FF}(x)$ ยกตัวอย่างเช่น $m_{FF}(x) \leq 1.7 m_{OPT}(x) + 2$ เมื่อ $m_{OPT}(x)$ หมายถึงผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) ของอินสแตนซ์ x และตัวเลข 2 คือค่าคงที่การบวก [43] ดังแสดงตามขั้นตอนวิธีการดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

(2) ขั้นตอนวิธีการลดพื้นที่ว่างเล็กสุด (First Fit Decreasing Algorithm)

เป็นขั้นตอนวิธีการที่คล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธีการแรก แต่ขั้นตอนวิธีการนี้จะเริ่มต้นโดยการเรียงลำดับความจุของวัสดุคงคลังจากมากไปน้อยก่อนแล้วจึงนำมาบรรจุใส่กล่อง [43] ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยขั้นตอนวิธีการพื้นที่ว่างเล็กสุด (First Fit Algorithm)

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [44]

Consider bins b_j where $j \in (1, 2, \dots, n)$

Consider an instance x containing items a_i where $i \in (1, 2, \dots, n)$

Begin

for $i := 1$ to n do

for $j := 1$ to n do

if item a_i can fit in the b_j

then

Insert a_i into the bin

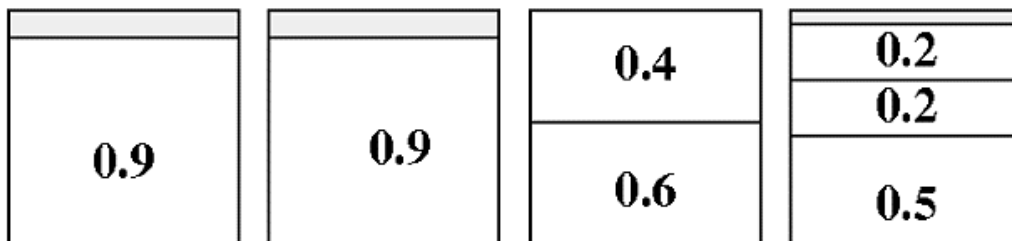
Break; //exit for j loop

//continue for i loop

End

รูปที่ 2.10 ขั้นตอนวิธีการพื้นที่ว่างเล็กสุดสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [43]

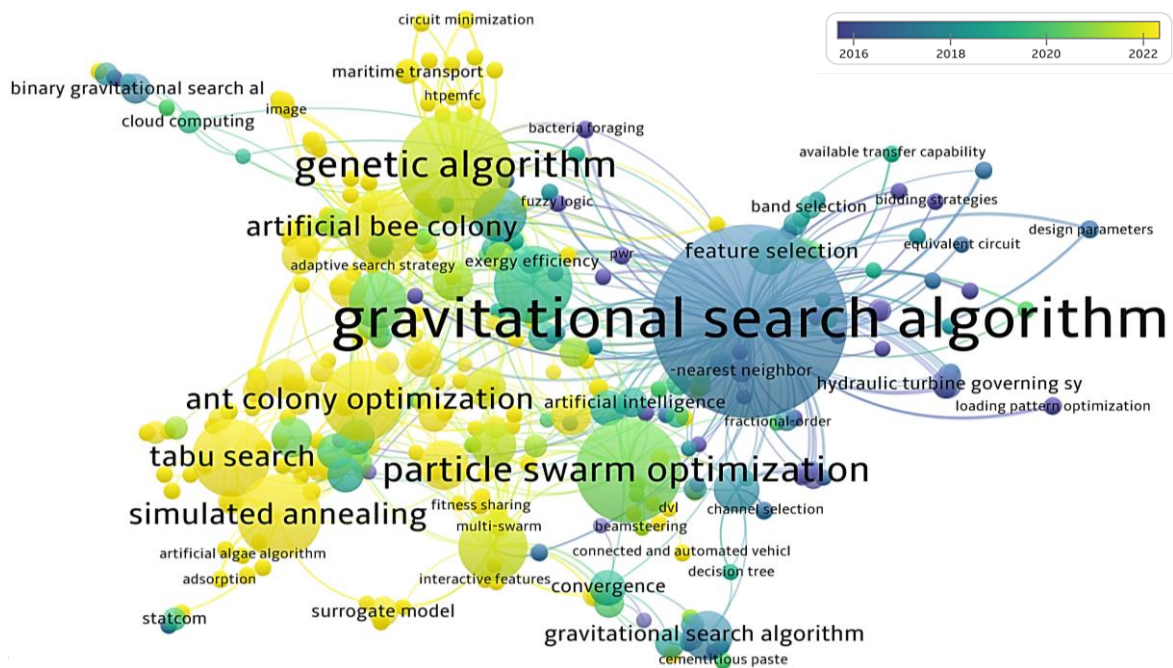


รูปที่ 2.11 การหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติโดยขั้นตอนวิธีการลดพื้นที่ว่างเล็กสุด (First Fit Decreasing Algorithm)

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [44]

2.3 ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง

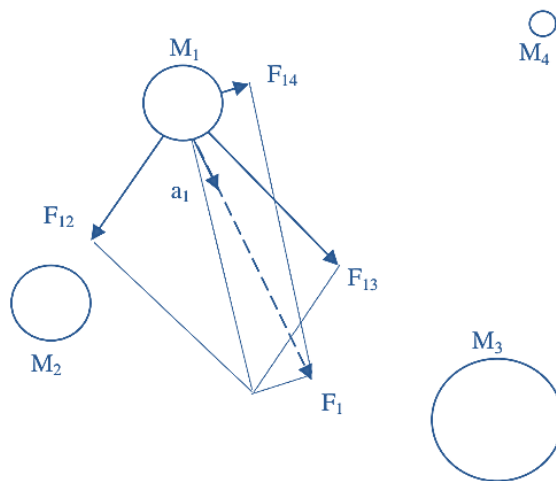
ปัญหาการบรรจุผลึกภัณฑ์ (Bin Packing Problem: BPP) เป็นแบบจำลองเชิงกำหนด (Deterministic Model) ที่สามารถค้นหาคำตอบได้โดยขั้นตอนวิธีการทางสโตนแคสติคหรือขั้นตอนวิธีการสุ่มค่าคำตอบ (Stochastic Algorithms) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีการค้นหาคำตอบแบบสุ่มค่าที่เหมาะสมที่สุดวนซ้ำไปเรื่อย ๆ (Iteration) จนกว่าจะได้คำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด [45] ทำให้ข้อดีของการสุ่มคำตอบสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่มีลักษณะแบบเฉพาะที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optima) และเข้าสู่คำตอบที่มีลักษณะแบบเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) แต่ไม่รับประกันว่าจะพบคำตอบที่ดีที่สุด เช่น การค้นหาทาบู (Tabu Search) ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) ขั้นตอนวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) ขั้นตอนวิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm: EA) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เป็นต้น ซึ่งเรียกขั้นตอนวิธีการเหล่านี้คือการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยขั้นตอนวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Optimization Algorithms) [46]



รูปที่ 2.12 การวิเคราะห์เครือข่ายบรรณานุกรมของขั้นตอนวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการหาค่าเหมาะที่สุดโดยขั้นตอนวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เครือข่ายบรรณานุกรม (Bibliographic Network Analysis) [47] ซึ่งเป็นวิธีการช่วยในการตัดสินใจและกำหนดทิศทางการศึกษาข้อมูลวรรณกรรมขนาดใหญ่เพื่ออธิบายความสัมพันธ์และแนวโน้มขั้นตอนวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าในช่วงปี ค.ศ. 2016-2022 ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีกลุ่มของขั้นตอนวิธีการนี้ปรากฏอยู่ในเครือข่ายมากที่สุด รองลงมาคือขั้นตอนวิธีการตัดต่อโครโมโซม (GA) เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) และขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) ให้มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP) ได้ดียิ่งขึ้น

ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 2009 โดย Rashedi, Nezamabadi-Pour and Saryazdi [19] ซึ่งได้นำแนวคิดมาจากความโน้มถ่วง (Gravity) และกฎแรงโน้มถ่วง (The Law of Gravity) ที่เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติทำให้วัตถุกายภาพทั้งหมดดึงดูดเข้าหากัน ซึ่งความโน้มถ่วงสามารถทำให้วัตถุกายภาพมีน้ำหนัก และตกลงสู่พื้นเมื่อปราศจากการยึดเหนี่ยวจากสิ่งอื่นใด โดยทั่วไปกฎแรงโน้มถ่วงสากลของนิวตัน (Newton's Law of Universal Gravitation) ได้ระบุเกี่ยวกับกฎแรงโน้มถ่วงไว้ว่า วัตถุในเอกภพจะมีแรงโน้มถ่วงในการดึงดูดวัตถุอื่น ๆ ด้วยแรงที่มีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของมวลของวัตถุทั้งสอง และแปรผกผันกับค่ายกกำลังสองของระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ [48] ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างมวลของวัตถุแต่ละวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แรงดึงดูดระหว่างมวลของวัตถุแต่ละวัตถุ

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [19]

เมื่อ
$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

โดยที่

F คือ แรงดึงดูดระหว่างมวล

G คือ ค่าคงที่โน้มถ่วงสากล

M_1 คือ มวลของวัตถุก้อนแรก

M_2 คือ มวลของวัตถุก้อนที่สอง

r คือ ระยะห่างระหว่างมวลวัดจากจุดศูนย์กลางของวัตถุแต่ละวัตถุ

จากพื้นฐานของกฎแรงโน้มถ่วงสากลของนิวตัน ซึ่งการหาค่าเหมาะที่สุดในทาง ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ได้พิจารณาจำนวนวัตถุต่าง ๆ แทนด้วย N วัตถุ (มวล) x_i^d แทนตำแหน่งของวัตถุแต่ละวัตถุเป็น ith ในมิติ (Dimension) dth [19] โดยที่

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \text{ เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N$$

ที่เวลาจำเพาะ (Specific Time) t สามารถนิยามแรงระหว่างวัตถุ i และ j ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t))$$

เมื่อ M_{aj} คือ ความสัมพันธ์ของความโน้มถ่วงระหว่างมวลที่มากกระทำกับวัตถุ j (The Active Gravitational Mass) M_{pi} คือ ความสัมพันธ์ของความโน้มถ่วงระหว่างมวลที่ถูกกระทำกับวัตถุ i (The Passive Gravitational Mass) $G(t)$ คือ ค่าคงที่ความโน้มถ่วงที่เวลา t (Gravitational Constant) ε คือ ค่าคงที่ขนาดเล็ก (Small Constant) และ R_{ij} คือ ระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean Distance) เป็นระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางของสองวัตถุ i และ j ซึ่งสามารถคำนวณระยะทางแบบยูคลิดได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2$$

เมื่อลักษณะการสุ่ม (Stochastic Characteristic) ของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) สามารถหาค่าแรงโน้มถ่วงรวมของวัตถุ i ในมิติ d โดยผลรวมการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (Random Weighted Sum) ของส่วนประกอบใน dth ของแรงที่กระทำจากวัตถุอื่น ๆ เมื่อ $rand_j$ คือ จำนวนสุ่มที่อยู่ระหว่างช่วงเวลา (The Interval) $[0,1]$ ดังสมการต่อไปนี้

$$F_i^d(i) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t)$$

ดังนั้น จากกฎการเคลื่อนที่ (The Law of Motion) สามารถกำหนดความเร่ง $a_i^d(t)$ ของวัตถุ i ที่เวลา t และทิศทางการเคลื่อนที่ dth เมื่อ $M_{ii}(t)$ คือ มวลเฉื่อย (The Inertial Mass) ของวัตถุ i th ดังสมการต่อไปนี้

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)}$$

นอกจากนี้ ความเร็วต่อไป (The Next Velocity) ของวัตถุยังต้องพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของความเร็วปัจจุบัน (Current Velocity) รวมกับความเร่ง (Acceleration) ดังนั้น ตำแหน่งและความเร็วของวัตถุที่จะเคลื่อนที่ไป เมื่อ $rand_i$ คือ จำนวนสุ่มที่อยู่ระหว่างช่วงเวลา (The Interval) $[0,1]$ ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้

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

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1)$$

ค่าคงที่ความโน้มถ่วง G เป็นค่าเริ่มต้นและจะลดลงตามเวลาเพื่อควบคุมความแม่นยำในการค้นหา เพราะฉะนั้น (G_0) จึงเป็นฟังก์ชันค่าเริ่มต้นแปรผันตามเวลา (t)

$$G(t) = G(G_0, t)$$

ความโน้มถ่วง และมวลเฉื่อยสามารถคำนวณโดยการประเมินความเหมาะสม (The Fitness Evaluation) มวลที่หนักกว่าหมายถึงเป็นวัตถุที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งหมายความว่าวัตถุที่ดีกว่านั้นจะมีแรงดึงดูดที่สูงกว่า และเคลื่อนที่ได้ช้ากว่า โดยที่ $fit_i(t)$ คือ ค่าเหมาะสม (Fitness) ของวัตถุ i ณ เวลา t ส่วนค่า $best(t)$ คือ ค่าเหมาะสม (Fitness) ที่ดีที่สุดของวัตถุในทุกวัตถุ และ $worst(t)$ คือ ค่าเหมาะสม (Fitness) ของวัตถุที่แย่ที่สุด ณ เวลา t ดังนั้น สามารถทำการคำนวณความโน้มถ่วง และมวลเฉื่อยได้ดังนี้

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i \text{ เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N$$

$$m_i = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)}$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)}$$

สำหรับปัญหาที่ต้องการหาค่าคำตอบน้อยที่สุด (Minimization Problems) ให้กำหนดค่าเหมาะสม (Fitness) ที่ดีที่สุดของวัตถุในทุกวัตถุ ($best(t)$) และค่าเหมาะสม (Fitness) ของวัตถุที่แย่ที่สุด ณ เวลา t ($worst(t)$) ดังสมการต่อไปนี้

$$best(t) = \min fit_j(t) \text{ โดยที่ } j \in \{1, \dots, N\}$$

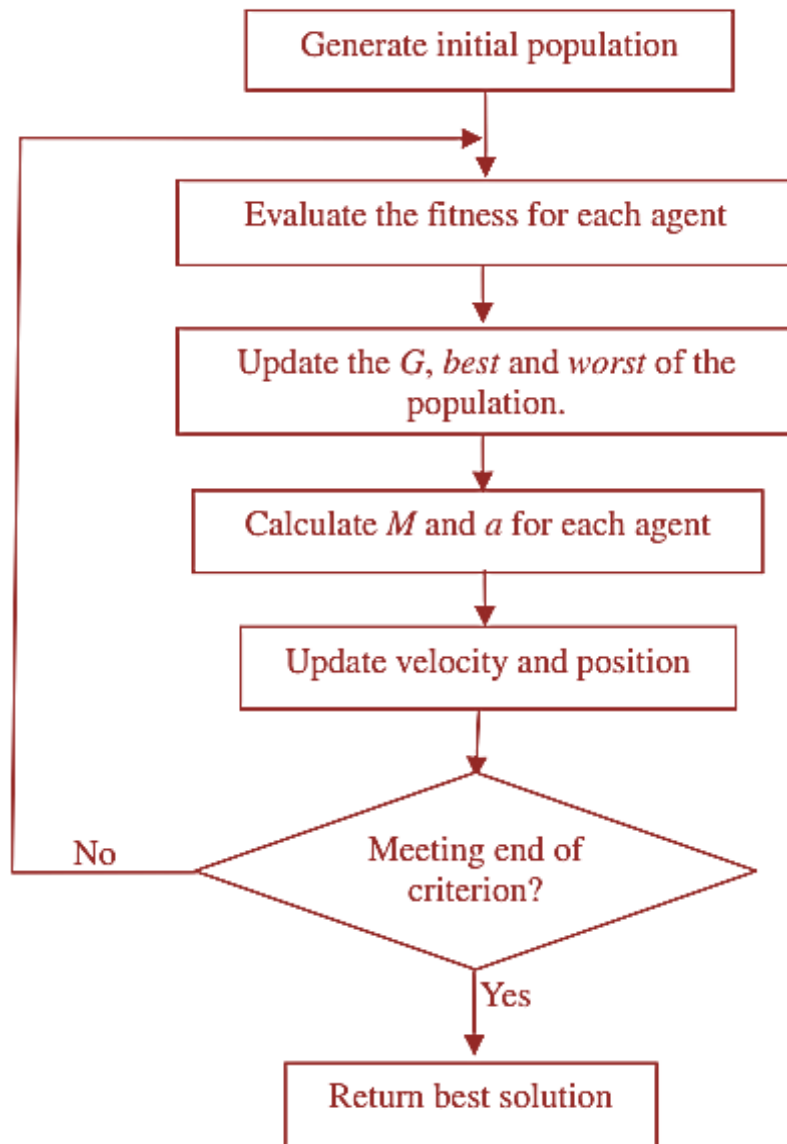
$$worst(t) = \max fit_j(t) \text{ โดยที่ } j \in \{1, \dots, N\}$$

และในทางกลับกันหากปัญหาที่ต้องการหาค่าคำตอบมากที่สุด (Maximization Problems) ให้กำหนดค่าเหมาะสม (Fitness) ที่ดีที่สุดของวัตถุในทุกวัตถุ ($best(t)$) และค่าเหมาะสม (Fitness) ของวัตถุที่แย่ที่สุด ณ เวลา t ($worst(t)$) ดังสมการต่อไปนี้

$$best(t) = \max fit_j(t) \text{ โดยที่ } j \in \{1, \dots, N\}$$

$$worst(t) = \min fit_j(t) \text{ โดยที่ } j \in \{1, \dots, N\}$$

โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ 1) สร้างประชากรชุดคำตอบแบบสุ่ม 2) ประเมินหาความเหมาะสม (Fitness Function) ของแต่ละวัตถุ (Agent) 3) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วง (G) ค่าดีที่ดีที่สุด (Best) และค่าที่แย่ที่สุด (Worst) ของประชากรทั้งหมด 4) คำนวณค่าความเร่งและมวลเฉลี่ยของแต่ละวัตถุ 5) ทำการอัปเดตความเร็วและตำแหน่งที่วัตถุแต่ละวัตถุจะเคลื่อนที่ไป 6) คำนวณวนกลับมาขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ (Iteration) จนกว่าจะได้คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดถึงจะหยุดการคำนวณ



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA)

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [19]

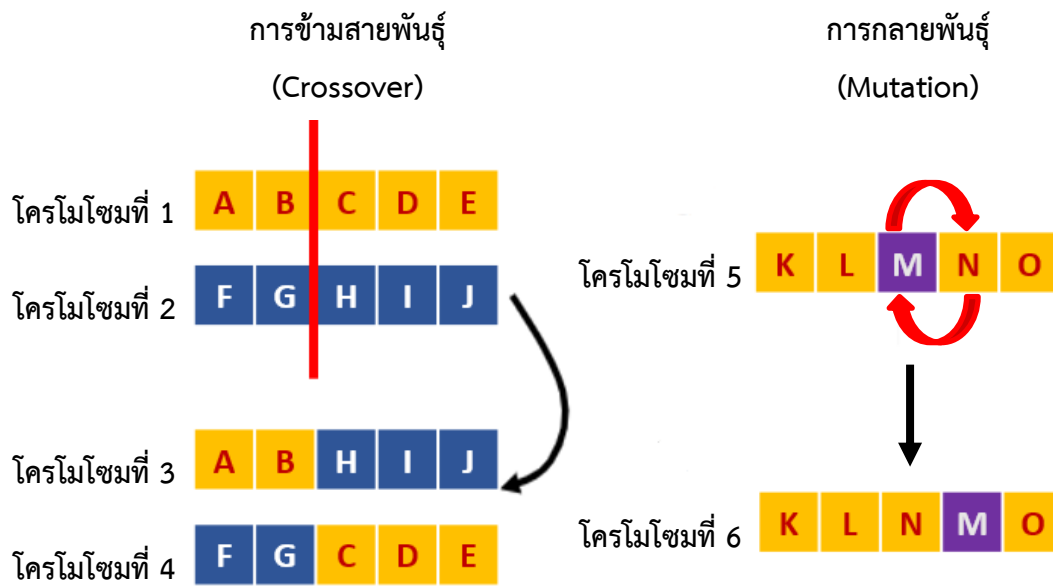
ต่อมาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในทางวิศวกรรม (Engineering Optimization Problem) สำหรับปัญหาที่มีลักษณะแบบ NP-hard มากขึ้น เช่น วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (Power Engineering) การรู้จำแบบ (Pattern Recognition) วิศวกรรมสื่อสาร (Communication Engineering) วิศวกรรมระบบควบคุม (Control Engineering) วิศวกรรมโยธา (Civil Engineering) วิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering) วิศวกรรมเคมี (Chemical Industry) การจัดการอุตสาหกรรม (Industrial Management) เป็นต้น [49]

การหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (Power Engineering) ซึ่งมีความท้าทายงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเป็นการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการดำเนินงาน และการวางแผนกระบวนการของระบบไฟฟ้าให้มีความทันสมัยตามกาลเวลา [50] เช่น การไหลของไฟฟ้ากำลังเหมาะที่สุด (Optimal Power Flow) เศรษฐศาสตร์การจ่ายไฟฟ้ากำลัง (Economic Load Dispatch) การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Commitment) การออกแบบและควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Systems Designing and Control) การจัดสรรและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง (Power Devices Allocating and Control) และการจัดตารางระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Scheduling) เป็นต้น [51]-[52] การรู้จำแบบ (Pattern Recognition) เป็นกระบวนการจดจำรูปแบบข้อมูลที่มีการใช้วิธีการรู้จำของเครื่องจักร (Machine Learning Methods) ซึ่งการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ได้นำมาแก้ไขปัญหาการนำเสนอคุณลักษณะของเวกเตอร์ต่าง ๆ ที่จะถูกดึงออกมาจากข้อมูล หลังจากนั้นจึงใช้ขั้นตอนวิธีการ (Algorithms) ในการจำแนกประเภท หรือการจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของเวกเตอร์เพื่อส่งผ่านข้อมูลที่สามารถอยู่ในรูปแบบของภาพและเสียงที่ใช้ทางการแพทย์ หรือในทางอื่น ๆ [49] การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ในการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาทางด้านวิศวกรรมสื่อสาร (Communication Engineering) ส่วนมากจะนำขั้นตอนวิธีการดังกล่าวมาเป็นแบบจำลองสำหรับตัวกรองสัญญาณ อาทิเช่น การกำหนดช่องสัญญาณ (Channel Assignment) การจำกัดวงเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network Localization) การจัดกลุ่มบัพเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network Node Clustering) และการจัดเส้นทางเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network Routing) [53]-[55] การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ในการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาทางด้านวิศวกรรมการควบคุม (Control Engineering) การออกแบบระบบควบคุมที่สามารถหาค่าเหมาะที่สุดจะให้ความสำคัญกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบโดยการปรับแต่งตัวควบคุมแบบวิถันัย (Fuzzy Controller Tuning) และการออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ (Designing Proportion Integral Derivative Controller) [56]-[58] ทางด้านวิศวกรรมโยธา (Civil Engineering) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทางด้านความปลอดภัยในโครงสร้าง และการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการปรับความเสถียรภาพในการสร้างถนนลาดชัน และยังได้มีการนำไปใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมในการคำนวณขนาดของโครงสร้างอาคาร และโครงสร้างเหล็กที่ต้องมีการถักโครงสร้างตามข้อจำกัดของธรรมชาติ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีลักษณะ

ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Function) นอกจากนี้การผสมกับขั้นตอนวิธีการระหว่างขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) กับวิธีการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) เพื่อหาค่าเหมาะที่สุดในการค้นหาคำตอบของรูปร่างของมุมที่เหมาะสมที่สุดของรากฐานโครงสร้างเชื่อมคอนกรีตในการรองรับน้ำและแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [20], [59] ในทางวิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering) ได้นำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) มาวิเคราะห์สภาพปัญหาเครื่องตัดเพื่อให้สามารถปรับค่าที่เหมาะสมที่สุดในการตัดชิ้นงาน อัตราการป้อนชิ้นงาน และระยะการเฉือนชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม และยังได้นำขั้นตอนวิธีการนี้ไปใช้ในการออกแบบคานเชื่อมประกอบ (Design for Welded Beam) การออกแบบภาชนะรับความดัน (Pressure Vessel) เป็นต้น [60]-[61] ยิ่งไปกว่านั้นขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับขั้นตอนวิธีการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ยังได้นำมาประยุกต์ใช้กับการจัดการอุตสาหกรรม (Industrial Management) เพื่อวางแผนการจัดลำดับงานที่เหมาะสม (Job Shop Scheduling Problem) ในสายการผลิตและการออกแบบผลิตภัณฑ์ และยังใช้ในการแก้ไขปัญหาการจัดลำดับงานในห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Scheduling Problem) เพื่อหาค่าช่วงกว้างของเวลาการทำงาน (Make Span) ที่สั้นที่สุด [62]-[64] อีกหนึ่งปัญหาที่เป็นปัญหาสำคัญมากที่เกิดขึ้นทุกช่วงกิจกรรมในห่วงโซ่อุปทานที่สามารถแก้ไขปัญหาได้ยาก คือ ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP) ซึ่งปัญหาที่ต้องเสียต้นทุนในการบริหารจัดการเป็นจำนวนมาก และหลายองค์กรยังไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

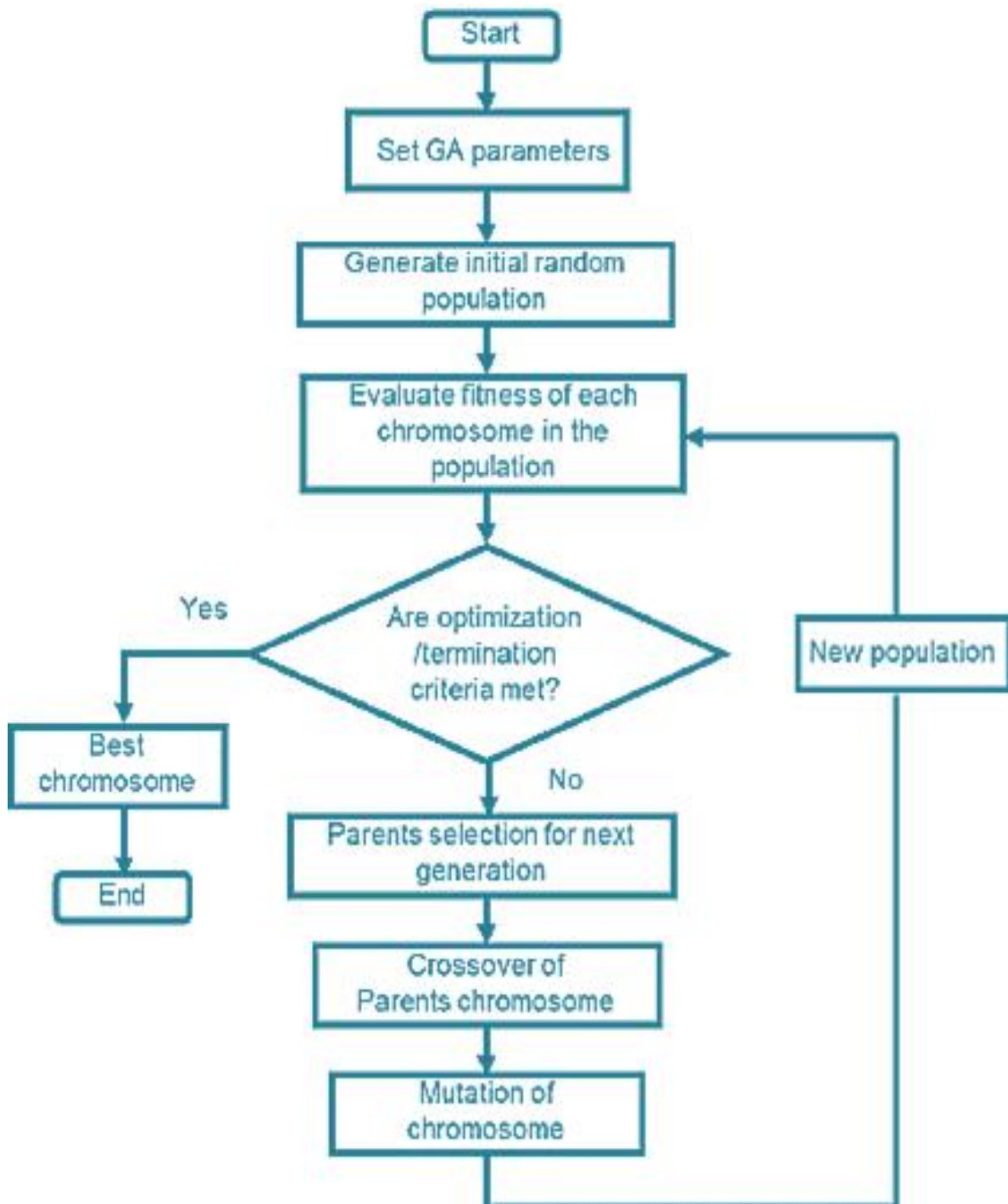
2.4 ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีการที่มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบสูง ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากวิวัฒนาการคัดเลือกสายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ [65] เป็นขั้นตอนวิธีการที่ค้นหาคำตอบโดยอ้างอิงจากโครโมโซม (Chromosome) ที่เหมาะสมที่สุดในการดำรงชีวิตเพื่ออยู่รอดของประชากร [66] ซึ่งประชากรใหม่จะถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการเชิงพันธุกรรมแบบซ้ำ ๆ กับประชากรเดิม ในขั้นตอนแรกของขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) คือ การคำนวณประชากรเริ่มต้นโดยการสุ่ม (Random Population) และการเข้ารหัสในการแก้ไขปัญหาคือหรือข้อบกพร่องของโครโมโซม [67] หลังจากนั้น จะเข้าสู่วิธีการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่ดำรงอยู่ต่อไป [68] ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้นในทางเทคนิคประชากรแต่ละกลุ่มในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) มี 4 วิธีการหลัก ๆ สำหรับการดำเนินงานในระหว่างกระบวนการค้นหาคำตอบ ได้แก่ การเข้ารหัส (Encoding) การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) [27] ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 วิวัฒนาการเชิงพันธุกรรม (GA)

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [68]



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA)

ที่มา: แหล่งที่อ้างอิง [27]

วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) ของขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) เป็นขั้นตอนที่สำคัญและเป็นการประเมินความเหมาะสม (The Fitness Evaluation) ซึ่งในการคัดเลือกจะเป็นตัวกำหนดประเภทข้อมูลแบบข้อความที่ประกอบไปด้วยหลายตัวอักษรหรือตัวแปรแบบสตริง (String of Variables) บางตัวเข้าร่วมในกระบวนการว่ามีโครโมโซมที่ซ้ำซ้อนกันหรือไม่ หากโครโมโซมที่มีการซ้ำซ้อนกันจะต้องถูกคัดออกให้เหลือเพียงหนึ่งโครโมโซมที่จะนำมาเข้าสู่การคำนวณในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) ซึ่งวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ที่นิยมนำมาใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์แบบวงล้อรูเล็ตต์ (Roulette Wheel Selection) การคัดเลือกสายพันธุ์แบบจัดอันดับ (Rank Selection) การคัดเลือกสายพันธุ์แบบจัดการแข่งขัน (Tournament Selection) การคัดเลือกสายพันธุ์แบบโบลต์ซมันน์ (Boltzmann Selection) และการคัดเลือกสายพันธุ์แบบการสุ่มครอบคลุมจักรวาล (Stochastic Universal Sampling: SUS) [26]-[27] หลังจากการคัดเลือกสายพันธุ์แล้วจึงจะเข้าสู่วิธีการข้ามสายพันธุ์ ซึ่งวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์เพื่อให้เกิดประชากรเป็นโครโมโซมสำหรับรุ่นต่อไป (Chromosome for Next Generation) ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการคัดเลือกโครโมโซม พบว่า วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์แบบจัดการแข่งขัน มีสมรรถนะในการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้เร็วกว่าวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์แบบวงล้อรูเล็ตต์ [69] นอกจากนี้ ยังพบว่าการเลือกสายพันธุ์โดยวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์แบบวงล้อรูเล็ตต์ ส่งผลให้การคัดเลือกสายพันธุ์มีความไม่หลากหลายและโครโมโซมที่ด้อยจะไม่ถูกคัดเลือกไปเป็นโครโมโซมสำหรับรุ่นต่อไป Goldberg and Smith [70] จึงได้ใช้วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์แบบจัดการแข่งขันเพื่อลดปัญหาความเหลื่อมล้ำและลดความลำเอียงของปัญหาดังกล่าว ในการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อเป็นโครโมโซมสำหรับรุ่นต่อไป

วิธีการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) เป็นขั้นตอนดำเนินการรวมข้อมูลทางพันธุกรรมของต้นกำเนิดสายพันธุ์ (Parents) ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไปเพื่อผลิตโครโมโซมของสายพันธุ์ใหม่ (Produce Offspring) ซึ่งวิธีการข้ามสายพันธุ์ที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่ การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว (Single-point Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบสองจุด (Two-point Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบ K จุด (K-point Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบเอกรูป (Uniform Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบจัดคู่บางส่วน (Partially Matched Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบสั่งการ (Order Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบรักษาลำดับความสำคัญ (Precedence Preserving Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบสับเปลี่ยน (Shuffle Crossover) การข้ามสายพันธุ์แบบลดตัวแทน (Reduced Surrogate Crossover) และการข้ามสายพันธุ์แบบวงจร (Cycle Crossover) [27], [71] สำหรับขั้นตอนต่อไปคือวิธีการกลายพันธุ์ อย่างไรก็ตาม การข้ามสายพันธุ์หลายจุดเกินไปนั้น ไม่เหมาะกับการค้นหาคำตอบในปัญหาที่มีลักษณะซับซ้อน ซึ่งจะมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมเพื่อเป็นโครโมโซมสำหรับรุ่นต่อไปมากเกินไปจนความจำเป็นส่งผลให้มีโอกาสเกิดการเบี่ยงเบนของคำตอบได้มากกว่าการข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว [22]

วิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นวิธีการสำคัญในกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมเป็นการข้ามสายพันธุ์ของโครโมโซมของประชากรจากกลุ่มหนึ่งไปยังอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้โครโมโซมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีการกลายพันธุ์ที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่ การกลายพันธุ์

แบบมียีนเพิ่มขึ้นบนโครโมโซม (Displacement Mutation) การกลายพันธุ์แบบสลับตำแหน่งของยีนบนโครโมโซม (Simple Inversion Mutation) และ การกลายพันธุ์แบบแข่งขันกันของยีนเด่นบนโครโมโซม (Scramble Mutation) นอกจากนี้วิธีการกลายพันธุ์แบบมียีนเพิ่มขึ้นบนโครโมโซมจะแทนที่ตัวแปรแบบสตริงย่อย (String of Variables) ของคำตอบที่เกิดขึ้นในแต่ละโครโมโซมสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยตัวเอง และตำแหน่งสำหรับการกลายพันธุ์แบบมียีนเพิ่มขึ้นบนโครโมโซมจะถูกสุ่มเลือกจากตัวแปรสตริงย่อยที่ระบุ เพื่อให้การแก้ปัญหาขั้นสุดท้ายถูกต้องตามกฎของการกลายพันธุ์ ตัวแปรในการกลายพันธุ์แบบมียีนเพิ่มขึ้นบนโครโมโซม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การกลายพันธุ์แบบแลกเปลี่ยนยีนบนโครโมโซม (Exchange Mutation) และการกลายพันธุ์แบบแทรกยีนบนโครโมโซม (Insertion Mutation) ซึ่งในการดำเนินงานของตัวแปรในการกลายพันธุ์ทั้งสองประเภทนั้น ส่วนหนึ่งของคำตอบในแต่ละโครโมโซมจะถูกแลกเปลี่ยนหรือสลับกับโครโมโซมอื่นหรือแทรกในโครโมโซมอื่นก็ได้เช่นเดียวกัน [26]-[27] ทำให้วิธีการกลายพันธุ์เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถแลกเปลี่ยน หรือแทรกคำตอบได้ และมีความรวดเร็วในการคำนวณที่สามารถมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะที่สุดดวงกว้าง (Global Search) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม

การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมนั้น มีข้อดีคือขั้นตอนวิธีการเกิดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงคำตอบโดยการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) เข้าสู่การค้นหาค่าเหมาะที่สุดดวงกว้าง (Global Search) ได้อย่างรวดเร็ว แต่ในการผสมกันระหว่างขั้นตอนวิธีการนั้นมีข้อเสีย คือ มีขั้นตอนในการคำนวณหลายขั้นตอน นอกจากนี้ ด้วยข้อดีของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) คือ มีความสามารถในการสำรวจคำตอบ (Exploration) ที่ดี แต่มีข้อเสีย คือ มีการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) ที่ต่ำ ทำให้นักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนาสมรรถนะในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) ของ Khatibinia and Khosravi [20] ซึ่งได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับวิธีการข้ามสายพันธุ์แบบมุมฉาก (Orthogonal Crossover) เพื่อค้นหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก พบว่า มีความสามารถในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ (Exploration) ในระยะแรกเพื่อเพิ่มอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบ และ Yin et al. [21] ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับวิธีการข้ามสายพันธุ์ พบว่า วิธีการที่นักวิจัยได้นำเสนอมีความสามารถในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบในระยะแรกเพื่อเพิ่มอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ ดังแสดงตามรายละเอียดในตารางที่ 2.1

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ (Exploration) และเพิ่มขีดความสามารถในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และมีอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบสำหรับ Economic Load Dispatch (ELD) [23] รวมถึงการแก้ไขปัญหาค่าการจัดลำดับงานแบบเวลาคงที่และการแปรผันในระยะสั้นทางเศรษฐกิจ

สิ่งแวดล้อมของพลังงานแบบคงที่สองหัว [72] ยิ่งไปกว่านั้น Feng et al. [24] ยังได้ผสมกับวิธีการเรียนรู้ของฝ่ายค้าน (The Opposition Learning Strategy) เพื่อเพิ่มความเร็วของอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบ และวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อเพิ่มความหลากหลายของคำตอบที่ได้ และยังพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงผสมกับขั้นตอนวิธีการโอบบินของผีเสื้อ (Lévy Flight) เพื่อเพิ่มความสามารถในการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) และการค้นหาค่าเหมาะที่สุดดวงกว้าง (Global Search) จากนั้นจึงผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) และใช้อักษรย่อคือ MGSA เพื่อเพิ่มความหลากหลายแบบฝูง ในกระบวนการวิวัฒนาการ พบว่า ขั้นตอนวิธีการที่นักวิจัยได้นำเสนอมานั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ (Exploration) ได้เป็นอย่างดี [73] ตลอดจนการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบฟuzzy (GSA-Fuzz) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลู่คำตอบ ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาค่าเหมาะที่สุดดวงกว้าง [25] ดังแสดงตามรายละเอียดในตารางที่ 2.1

สำหรับการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบนั้น ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่านได้ทดสอบกับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับวิธีการเรียนรู้ของฝ่ายค้าน (Opposition-based Learning) สำหรับการลู่ประชากรชุดคำตอบเริ่มต้น [74] การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบรวมฝูง (Co-swarm GSA) ผสมกับขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (Differential Evolution) [75] การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการสร้างสายพันธุ์ของประชากรโดยใช้วิธีการเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Method) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) แบบเจาะกลุ่ม [76] และการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสำรวจคำตอบ และการแสวงหาคำตอบที่สมดุลกัน [28] แต่ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะกับฟังก์ชันภูมิภาฐานนิยมเดี่ยว (Unimodal Landscape Function) เท่านั้น สำหรับฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Function) ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอยังมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ดังแสดงตามรายละเอียดในตารางที่ 2.1

จากการสำรวจวรรณกรรมที่นักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอไว้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่านักวิจัยแต่ละท่านได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบผสมผสานกับวิธีการต่าง ๆ ที่แตกต่างกันในเชิงเทคนิค รวมถึงการพัฒนาฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงให้เกิดการสำรวจคำตอบ และการแสวงหาคำตอบที่สมดุลกัน แต่ยังไม่สามารถค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาแบบฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงสนใจพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วง ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการค้นหาคำตอบของปัญหาในกลุ่ม NP-hard ซึ่งการวิจัยนี้ ได้นำขั้นตอนวิธีการดังกล่าว ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ เพื่อเพิ่มความเร็วของอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่มีค่าเหมาะที่สุดดวงกว้าง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.1 วรรณกรรมเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงและวิธีการในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม

วิธีการ/ การทดสอบ	ผู้วิจัย	ปี	ชื่อเรื่อง	รายละเอียด
GSA with Crossover	M. Khatibinia, S. Khosravi	2014	A hybrid approach based on an improved gravitational search algorithm and orthogonal crossover for optimal shape design of concrete gravity dams	นักวิจัยได้เสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับวิธีการข้ามสายพันธุ์แบบมุมฉาก (Orthogonal Crossover) เพื่อค้นหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก พบว่าวิธีการที่นักวิจัยได้นำเสนอมีความสามารถในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ (Exploration) ในระยะแรกเพื่อเพิ่มอัตราการเข้าสู่คำตอบ เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ
	B. Yin, Z. Guo, Z. Liang, X. Yue	2018	Improved gravitational search algorithm with crossover	นักวิจัยได้เสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับวิธีการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) เนื่องจากขั้นตอนวิธีการ GSA มีความสามารถในการสำรวจคำตอบ (Exploration) ที่ดี แต่มีการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) ที่ต่ำ นักวิจัยจึงได้นำขั้นตอนวิธีการ GSA ผสมกับวิธีการข้ามสายพันธุ์ (CROGSA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแสวงหาคำตอบ พบว่า CROGSA มีความสามารถในการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark functions) ได้เหมาะกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ
GSA with Mutation	A. Chatterjee, S. P. Ghoshal, V. Mukherjee	2012	A maiden application of gravitational search algorithm with wavelet mutation for the solution of economic load dispatch problems	นักวิจัยได้เสนอขั้นตอนวิธีการใหม่ GSAWM โดยนำขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์แบบเวฟเล็ต (Wavelet Mutation) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ (Exploration) พบว่า GSAWM มีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และมีอัตราการเข้าสู่คำตอบสำหรับ Economic Load Dispatch (ELD) ได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

วิธีการ/ การทดสอบ	ผู้วิจัย	ปี	ชื่อเรื่อง	รายละเอียด
	G. Nadakuditi, V. Sharma, R. Naresh	2016	Non-dominated Sorting Disruption- based Gravitational Search Algorithm with Mutation Scheme for Multi- objective Short-Term Hydrothermal Scheduling	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting disruption-based GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) (NSDGSA-M) เพื่อแก้ไขปัญหาค่าการจัดลำดับงานแบบเวลาคงที่และการแปรผันในระยะสั้นทางเศรษฐกิจสิ่งแวดล้อมของพลังน้ำแบบคงที่สองหัว สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนสองแห่ง และโรงไฟฟ้าพลังน้ำสองแห่ง และโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนสี่แห่ง และโรงไฟฟ้าพลังน้ำสี่แห่งและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนสามแห่ง พบว่าขั้นตอนที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาค่าได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ
GSA with Mutation	Z. K. Feng, S. Liu, W. J. Niu, Z. Q. Jiang, B. Luo, S. M. Miao	2019	Multi-Objective Operation of Cascade Hydropower Reservoirs Using TOPSIS and Gravitational Search Algorithm with Opposition Learning and Mutation	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบปรับปรุงใหม่ (Enhanced GSA) นอกจากนี้ ยังได้ผสมกับวิธีการเรียนรู้ของฝ้ายค้าน (The Opposition Learning Strategy) เพื่อเพิ่มความเร็วของอัตราการเข้าสู่คำตอบและวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อเพิ่มความหลากหลายของคำตอบที่ได้ พบว่าขั้นตอนวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถจัดลำดับตารางเวลาในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

วิธีการ/ การทดสอบ	ผู้วิจัย	ปี	ชื่อเรื่อง	รายละเอียด
	Z. K. Feng, S. Liu, W. J. Niu, S. S. Li, H. J. Wu, J. Y. Wang	2020	Ecological operation of cascade hydropower reservoirs by elite-guide gravitational search algorithm with Lévy flight local search and mutation	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบหลายกลยุทธ์ (Multi-strategy GSA) ผสมกับขั้นตอนวิธีการโฉบบินของผีเสื้อ (Lévy Flight) เพื่อเพิ่มความสามารถในการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) และการค้นหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้าง (Global Search) จากนั้น จึงผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยใช้อักษรย่อคือ MGSA เพื่อเพิ่มความหลากหลายแบบฝูงในกระบวนการวิวัฒนาการ พบว่า ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอเพิ่มความสามารถในการค้นหาแบบการสำรวจคำตอบ (Exploration) ได้เป็นอย่างดี เมื่อทดสอบกับการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ได้เหมาะกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ
	M. Lin, Y. Zeng, T. Wu, Q. Wang, L. Fang, S. Guo	2022	GSA-Fuzz: Optimize Seed Mutation with Gravitational Search Algorithm	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบฟัซซี (GSA-Fuzz) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสุ่มชุดคำตอบ ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาค่าเหมาะที่สุดวงกว้าง (Global Search) พบว่า ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ได้เหมาะกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

วิธีการ/ การทดสอบ	ผู้วิจัย	ปี	ชื่อเรื่อง	รายละเอียด	
	B. Shaw, V. Mukherjee, S. P. Ghoshal	2012	A novel opposition-based gravitational search algorithm for combined economic and emission dispatch problems of power systems	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับวิธีการเรียนรู้ของฝ้ายค้าน (Opposition-based Learning) สำหรับการสุ่มประชากรชุดคำตอบเริ่มต้น พบว่าขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ได้เหมาะสมกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ	
	Improved GSA for Unimodal and Multimodal function	S. Yazdani, H. Nezamabadi-Pour, S. Kamyab	2014	A gravitational search algorithm for multimodal optimization	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงแบบรวมฝูง (Co-swarm GSA) ผสมกับขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (Differential Evolution) พบว่า ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ได้เหมาะสมกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ
		P. Haghbayan, H. Nezamabadi-Pour, S. Kamyab	2017	A niche GSA method with nearest neighbor scheme for multimodal optimization	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการสร้างสายพันธุ์ของประชากรโดยใช้วิธีการเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Method) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) แบบเจาะกลุ่ม พบว่า ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ได้เหมาะสมกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

วิธีการ/ การทดสอบ	ผู้วิจัย	ปี	ชื่อเรื่อง	รายละเอียด
	P. Tharawetcharak, T. Karot, C. Pornsing	2019	An Improved Gravitational Coefficient Function for Enhancing Gravitational Search Algorithm's Performance	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความ โน้มถ่วง (GSA) ที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการ หาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่เพื่อ เพิ่มประสิทธิภาพในการสำรวจคำตอบ (Exploration) และการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) ที่สมดุลกัน พบว่า ขั้นตอน วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการค้นหา คำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบ สมรรถนะ (Benchmark Functions) แบบ Unimodal Landscape Function ได้เหมาะ กว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ แต่ในทางกลับกัน ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอด้อยกว่าขั้นตอน วิธีการอื่น ๆ เมื่อทดสอบกับฟังก์ชันการวัด เปรียบเทียบสมรรถนะแบบ Multimodal Landscape Function
Proposed NGCFGSA with Mutation	P. Tharawetcharak	-	Development of the Gravitational Search Algorithm with Mutation for the Bin Packing Problems	นักวิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการค้นหาความ โน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่า สัมประสิทธิ์ ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (NGCFGSA) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการ สำรวจคำตอบ (Exploration) และการ แสวงหาคำตอบ (Exploitation) ที่สมดุลกัน ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อ เพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนแปลงคำตอบ ที่หลุดพ้นจากการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเฉพาะ แห่ง (Local Search) เข้าสู่การค้นหาค่า เหมาะที่สุดวงกว้าง (Global Search)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้ได้แบ่งการดำเนินงานวิจัยเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการวิจัยทางด้านคณิตศาสตร์ (Mathematics) ที่มุ่งเน้นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Problems) ในกลุ่มปัญหาแบบ NP-hard ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) โดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่ค่าเหมาะที่สุดวงกว้าง (Global Search) และส่วนที่ 2 เป็นการวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering) ที่มุ่งเน้นปัญหาทางด้านการจัดการห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Management) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการใหม่มาปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problem: BPP) ดังนั้น การวิจัยนี้ได้เริ่มจากการพัฒนาขั้นตอนวิธีการดังกล่าว และการวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบ หลังจากนั้นจึงนำขั้นตอนวิธีการที่ผ่านการพัฒนาแล้วไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 การพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM

การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) ดังแสดงตามสมการที่ (1) [28] มาผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งการพัฒนาขั้นตอนวิธีการในงานวิจัยนี้ได้เรียกว่า ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (New Gravitational Coefficient Function of Gravitational Search Algorithm with Mutation: NGCFGSAM) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีขั้นตอนในการพัฒนาขั้นตอนวิธีการ (Algorithms) แบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การระบุพื้นที่การค้นหาคำตอบ (Identification of search space)

ขั้นตอนที่ 2 สร้างประชากรชุดคำตอบแบบสุ่ม (Generate the initial population)

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินหาความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคในประชากรชุดคำตอบ (Evaluate the fitness function for each particle in population)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (Update the gravitational coefficient value by using NGCFGSA) เมื่อ $G(t_0)$ คือ ค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) ที่เกิดขึ้นในช่วงควอนตัมจักรวาลแรก (The First Cosmic Quantum-interval) ณ เวลา t_0 และ $G(t)$ คือ ค่าความโน้มถ่วงคงที่แปรผันตามเวลา (t) ซึ่ง t คือ จำนวนค่าการคำนวณซ้ำในปัจจุบัน (The Current Iteration Number) T คือ จำนวนค่า

การคำนวณซ้ำสูงสุด (The Maximum Iteration Number) และ β คือ จำนวนค่าคงที่ ดังแสดงตามสมการที่ (1) สมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$G(t) = G(G_0, t) \exp^{(t/T)^\beta} \quad (1)$$

$$Best(t) = \min_{i \in \{1, \dots, N\}} Fit_i(t) \quad (2)$$

$$Worst(t) = \max_{i \in \{1, \dots, N\}} Fit_i(t) \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณแรงทั้งหมดที่มากกระทำในทิศทางที่ต่างกัน ณ เวลา t โดยคำนวณจากค่า $M_i(t)$ และ $a_i^d(t)$ คือ ค่าความเร่ง ณ เวลา t โดยใช้ M_{aj} คือ มวลความโน้มถ่วงที่มากกระทำกับเอเจนต์ (Agent) j และ ε 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 (4) สมการที่ (5) และสมการที่ (6)

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_i(t)}, \text{ เมื่อ } m_i = \frac{Fit_i(t) - Worst(t)}{Best(t) - Worst(t)} \quad (4)$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ij}(t)}, \text{ เมื่อ } F_i^d(t) = \sum_{j=1, i \neq j}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (5)$$

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (6)$$

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 (7) และสมการที่ (8)

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (7)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (8)$$

ขั้นตอนที่ 7 การดำเนินการเลือกอนุภาค (Particle Selection Operation) โดยจับกันเป็นคู่อนุภาคที่ไม่ซ้ำกันของจำนวนประชากรทั้งหมดตามค่าความเหมาะสม (Fitness Values) ด้วยวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์แบบจัดการแข่งขัน (Tournament Selection)

ขั้นตอนที่ 8 การดำเนินการกลายพันธุ์ (Mutation) แบบไม่ต่อเนื่องของแต่ละอนุภาคในประชากรทั้งหมด (Discrete mutation operation of each particle in population) โดยการกลายพันธุ์แบบแลกเปลี่ยนยีนบนโครโมโซม (Exchange Mutation) เพื่อให้โครโมโซมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังรหัสเทียมต่อไปนี้

For $i = 1$ to N

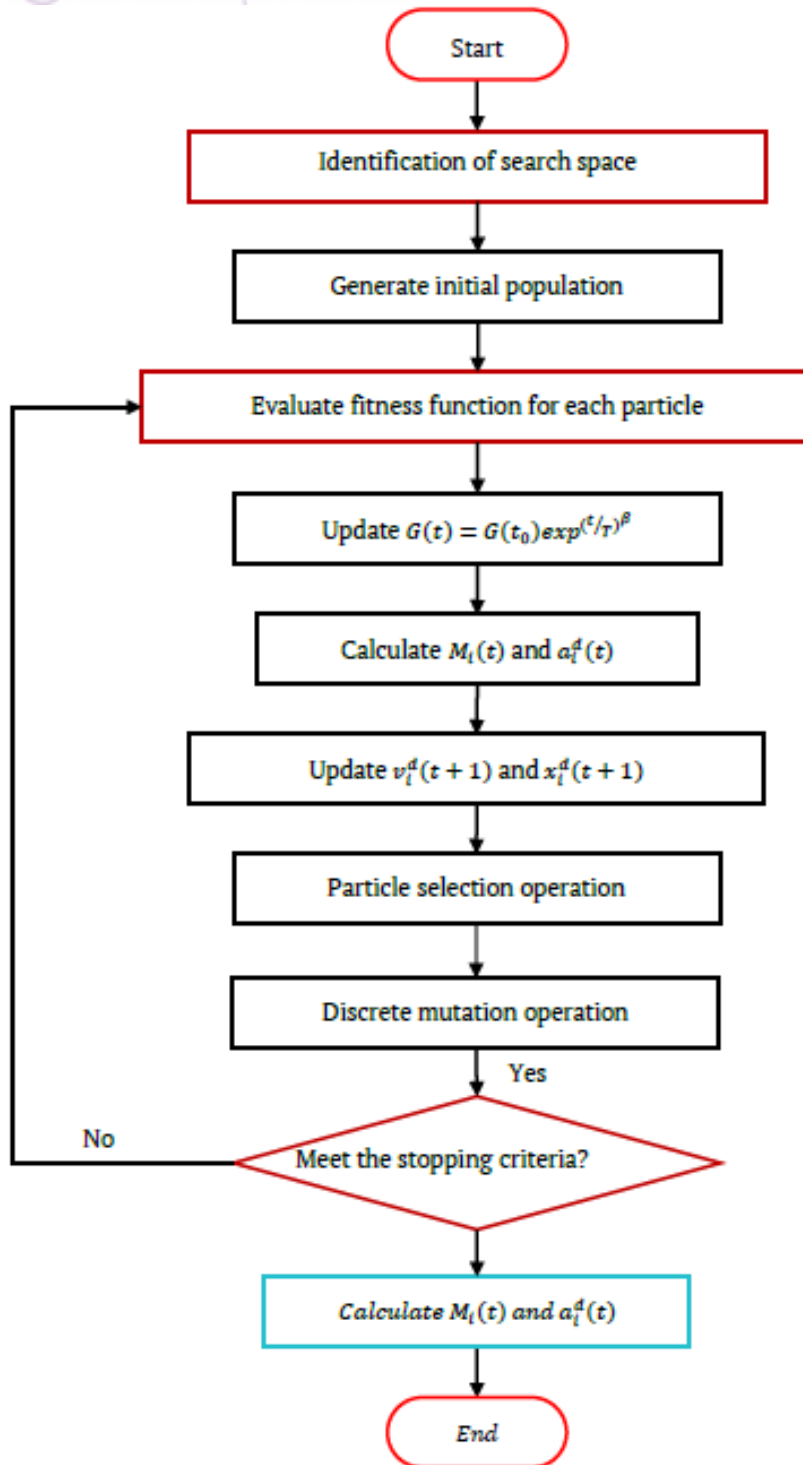
IF $rand_j \leq particle(i)$ (1, dimension)

$mutation = [upper\ bound(j) - lower\ bound(j)] \times particle(i)$

ENDIF

ENDFOR

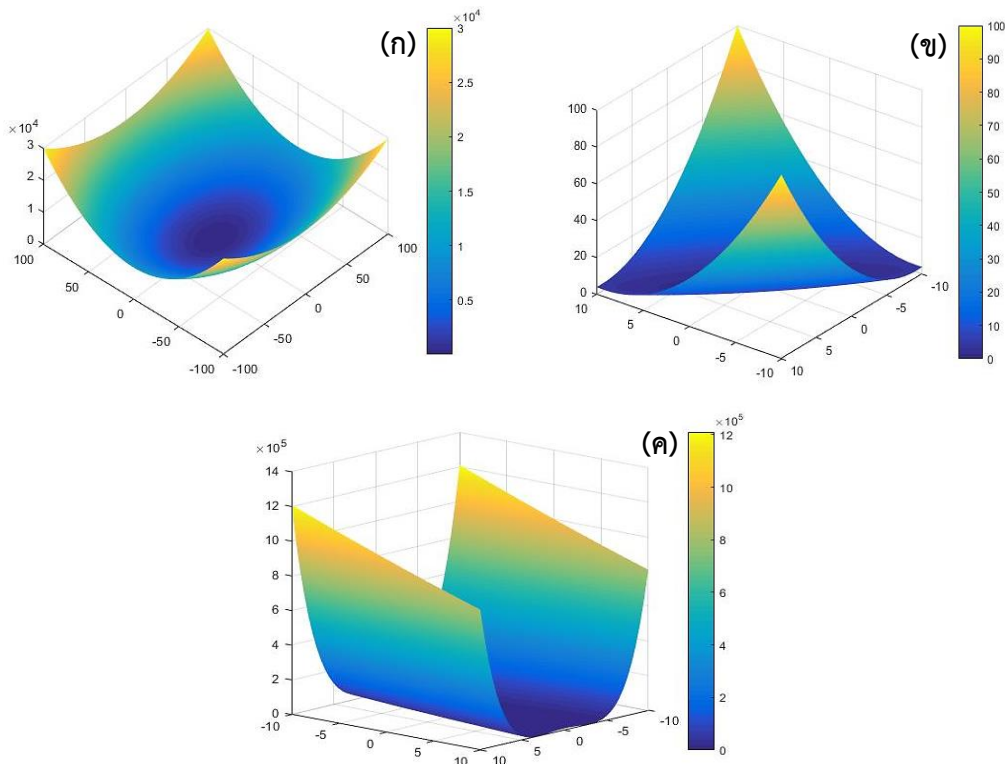
ขั้นตอนที่ 9 คำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 8 และหยุดการคำนวณจนกว่าจะถึงเกณฑ์การหยุด



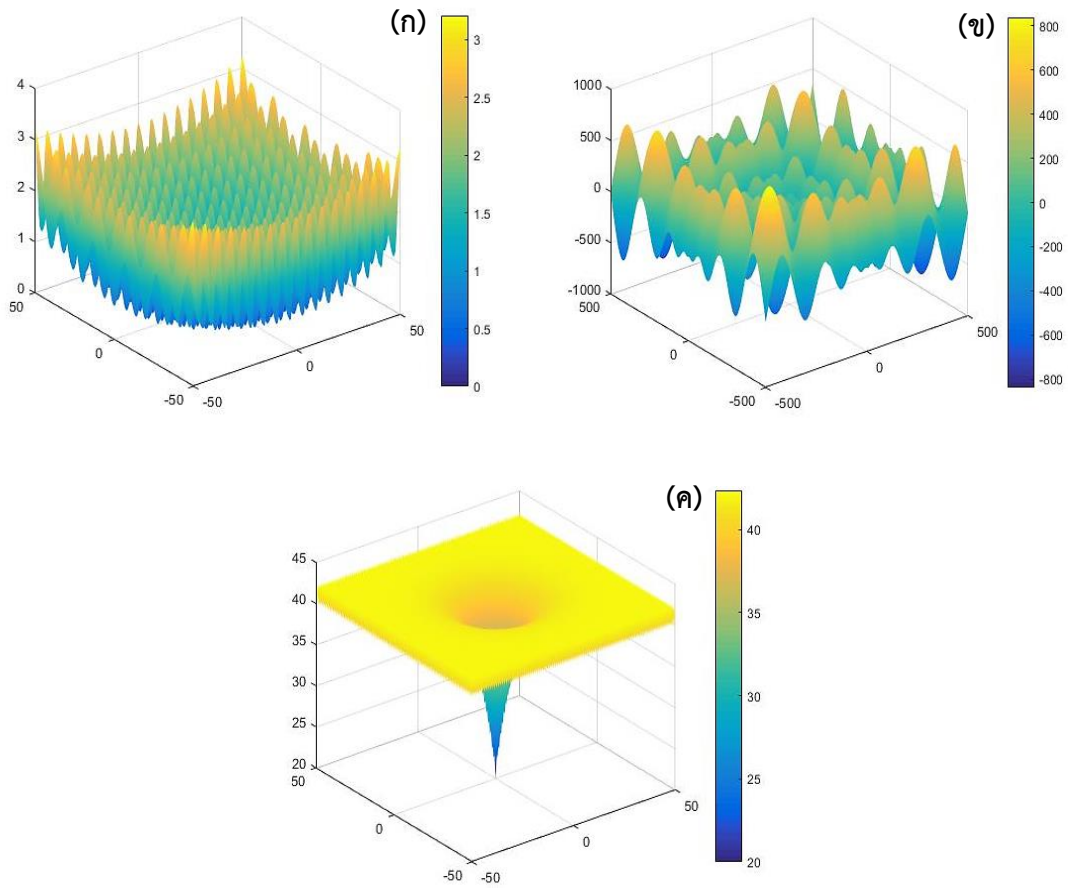
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM)

3.2 การวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM

การวิจัยนี้ได้ใช้การวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) โดยการทดลองทางคอมพิวเตอร์ (The Computational Experiments) ผ่านโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2016A ในการจำลองสถานการณ์ (Simulate) บนคอมพิวเตอร์ Intel Core i5-8250U CPU @ 1.80 GHz Processor and 8 GB RAM ซึ่งในการวิจัยนี้ได้แบ่งฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Functions) ออกเป็น 2 ส่วน [77] ได้แก่ ส่วนที่ 1 จะเป็นการวัดสมรรถนะกับปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาคนิยมเดียว (Unimodal Landscape Function) จำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Sphere Function Matyas function และ Rosenbrock Function ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นการวัดสมรรถนะกับปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) จำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Griewank Function Schwefel Function และ Ackley Function ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 3.1 และคำตอบที่ดีที่สุด (X^*) ของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันภูมิภาคนิยมเดียว (ก) Sphere Function (ข) Matyas Function และ (ค) Rosenbrock Function



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (ก) Griewank Function (ข) Schwefel Function และ (ค) Ackley Function

ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM

ชื่อฟังก์ชัน (Function Name)	รายการอธิบายสมการของแต่ละฟังก์ชัน (Description)	ช่วงการค้นหาคำตอบ (Search Range)
1. Sphere	$f(X) = \sum_{i=1}^d x_i^2$	$[-100,100]^d$
2. Matyas	$f(X) = 0.26(x_1^2 + x_2^2) - 0.48x_1x_2$	$[-10,10]^d$
3. Rosenbrock	$f(X) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$	$[-10,10]^2$
4. Griewank	$f(X) = \sum_{i=1}^d \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$[-600,600]^d$
5. Schwefel	$f(x) = 418.9829d - \sum_{i=1}^d x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	$[-500,500]^d$
6. Ackley	$f(X) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(2\pi x_i)}\right) + 20 + \exp(1)$	$[-32.768,32.768]^d$

ที่มา: แหล่งที่อ้างถึง [19], [28]

ตารางที่ 3.2 คำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM

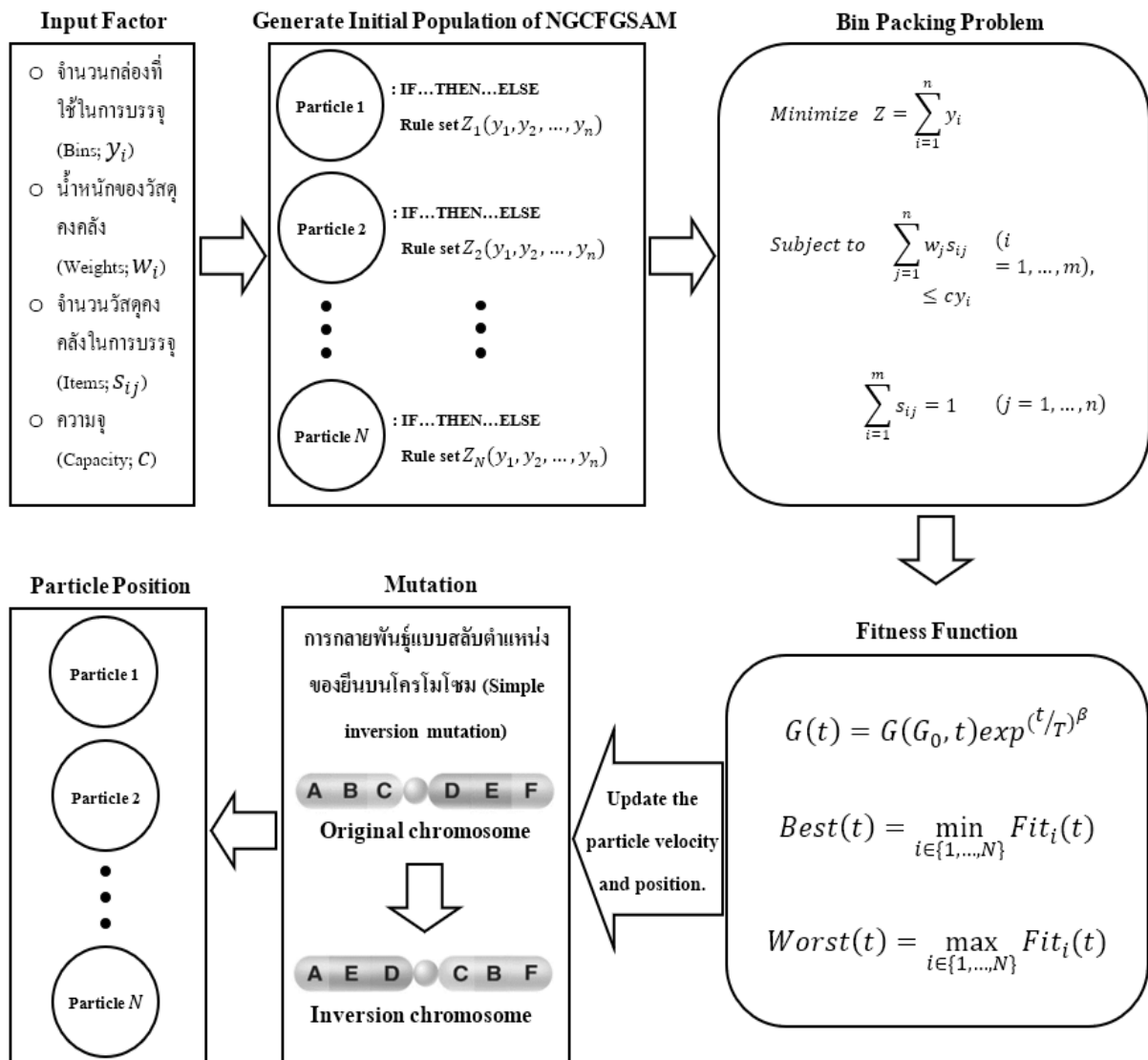
ชื่อฟังก์ชัน (Function Name)	คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution)	
	$f(X^*)$	X^*
1. Sphere	0	(0, ...,0)
2. Matyas	0	(0,0)
3. Rosenbrock	0	(1, ...,1)
4. Griewank	0	(0, ...,0)
5. Schwefel	0	(420.9687, ...,420.9687)
6. Ackley	0	(0, ...,0)

ที่มา: แหล่งที่อ้างถึง [19], [28]

3.3 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

การวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) ที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameter) เพื่อให้มีความสามารถในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นปัญหาการบรรจุเป็นปัญหาสำคัญในการจัดการห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Management) โดยมีปัจจัยนำเข้า (Input Factor) ได้แก่ จำนวนกล่องที่ใช้ในการบรรจุ น้ำหนักของวัสดุคงคลังที่ใช้บรรจุ จำนวนวัสดุคงคลังในการบรรจุ และความจุ ด้วยปัญหานี้ประกอบไปด้วยปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัยทำให้ปัญหาดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบ NP-hard ที่มีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่ จึงทำให้การค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time)

ดังนั้นการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการดังกล่าวกับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ การวิจัยนี้ได้ใช้ปัญหาการบรรจุจากชุดข้อมูลตัวอย่างปัญหาของ Scholl and Klein [78] ในการจำลองสถานการณ์ และมีการกำหนดให้พารามิเตอร์ n คือ จำนวนของวัสดุคงคลัง (Number of Items) w_j คือ น้ำหนักของวัสดุคงคลัง j (Weight of Items j) ($j = 1, \dots, n$) c ความจุของกล่องแต่ละกล่อง (Capacity of Each Bin) m^* คือ จำนวนของกล่องที่ใช้น้อยที่สุด (Minimal Number of Bins Used) และ m คือ จำนวนของกล่องที่ใช้ (Number of Bins Used) นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ (1) กรณีปัญหาแบบง่ายจำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ $NxCyWz_v$ เมื่อ $x=1$ (สำหรับ $n=50$), $x=2$ ($n=100$), $x=3$ ($n=200$), $x=4$ ($n=500$), $y=1$ (สำหรับ $c=100$), $y=2$ ($c=120$), $y=3$ ($c=150$), $z=1$ (สำหรับ w_j จาก [1, 100]), $z=2$ ([20, 100]), $z=3$ ([30, 100]), $z=4$ ([30, 100]) และ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (A ... 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 $c=1,000$), $y=2$ ($c=1,000$), $y=3$ ($c=1,000$), $y=4$ ($c=1,000$), $z=1$ (สำหรับ w_j จาก [200, 400]), $z=2$ ([200, 300]) และ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (0...9) (Instances of Each Class) และ (3) กรณีปัญหาแบบยาก จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ **HARDv** เมื่อ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (0...9) (Instances of Each Class) [78]-[79]



รูปที่ 3.4 การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (BPP)

3.4 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSA) เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (NGCFGSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษา บริษัทขนส่งมาตรฐานรายใหญ่แห่งหนึ่งในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ของประเทศไทย เพื่อทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ในภาคอุตสาหกรรมจริง ซึ่งประกอบด้วยกล่องหรือวัสดุคงคลังที่มีน้ำหนักปริสูทธิ จำนวน 6 ขนาด ได้แก่ กล่อง No.1 ขนาด 30 x 100 x 30 เซนติเมตร มีน้ำหนักปริสูทธิไม่เกิน 20 กิโลกรัม กล่อง No.2 ขนาด 31 x 36 x 13 เซนติเมตร มีน้ำหนักปริสูทธิไม่เกิน 5 กิโลกรัม กล่อง No.3 ขนาด 31 x 36 x 26 เซนติเมตร มีน้ำหนักปริสูทธิไม่เกิน 10 กิโลกรัม กล่อง No.4 ขนาด 55 x 100 x 55 เซนติเมตร มีน้ำหนักปริสูทธิไม่เกิน 30 กิโลกรัม กล่อง No.5 ขนาด 40 x 45 x 35 เซนติเมตร มีน้ำหนักปริสูทธิไม่เกิน 15 กิโลกรัม และ กล่อง No.6 ขนาด 45 x 55 x 40 เซนติเมตร มีน้ำหนักปริสูทธิไม่เกิน 25 กิโลกรัม โดยกล่องขนาดต่าง ๆ ได้ถูกลำเลียงใส่รถบรรทุกโดยเจาะจงไปที่รถบรรทุกแบบตู้ทึบของบริษัท ได้แก่ รถบรรทุกตู้ทึบ 4 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 1,500 กิโลกรัม รถบรรทุกตู้ทึบ 6 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 9,000 กิโลกรัม รถบรรทุกตู้ทึบ 10 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 16,000 กิโลกรัม และรถบรรทุกตู้ทึบกึ่งพวง 18 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม [80]-[82]

ในการจำลองสถานการณ์ของงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้พารามิเตอร์ n คือ จำนวนของกล่องหรือวัสดุคงคลัง (Number of Items) w_j คือ น้ำหนักของกล่องหรือวัสดุคงคลัง j (Weight of Items j) ($j = 1, \dots, n$) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (Kilogram: Kg.) c ความจุของรถบรรทุกแต่ละคัน (Capacity of Each Truck) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (Kilogram: Kg.) m^* คือ จำนวนการใช้รถบรรทุกที่น้อยที่สุด (Minimal Number of Trucks Used) มีหน่วยเป็นคัน และ m คือ จำนวนรถบรรทุกที่ใช้ (Number of Trucks Used) มีหน่วยเป็นคัน นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาออกเป็น 3 กรณี ตามขนาดของรถบรรทุกที่ใช้งานจริงในบริษัท ได้แก่ (1) กรณีปัญหาแบบง่าย จำนวน 2 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=1$ (สำหรับ $n=500$), $x=2$ ($n=1,300$), $y=1$ (สำหรับ $c=1,500$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก [5, 30]) (2) กรณีปัญหาแบบปานกลาง จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=3$ (สำหรับ $n=1,000$), $x=4$ ($n=10,000$), $y=2$ (สำหรับ $c=9,000$), $y=3$ ($c=16,000$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก [5, 30]) และ (3) กรณีปัญหาแบบยาก จำนวน 2 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=5$ (สำหรับ $n=10,000$), $x=6$ ($n=20,000$), $y=4$ (สำหรับ $c=25,000$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก [5, 30]) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย

ปัญหา แบบง่าย	จำนวนกล่องหรือวัสดุคงคลัง (ชิ้น)						จำนวนการใช้รถบรรทุก ที่น้อยที่สุด m^* (คัน)
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
N1C1W1	40	120	150	30	110	50	5
N2C1W1	120	160	450	90	330	150	13

ตารางที่ 3.4 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบปานกลาง

ปัญหา แบบปานกลาง	จำนวนกล่องหรือวัสดุคงคลัง (ชิ้น)						จำนวนการใช้รถบรรทุก ที่น้อยที่สุด m^* (คัน)
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
N3C2W1	80	240	300	60	220	100	2
N3C3W1	80	240	300	60	220	100	1
N4C2W1	800	2,400	3,000	600	2,200	1,000	15
N4C3W1	800	2,400	3,000	600	2,200	1,000	9

ตารางที่ 3.5 ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยาก

ปัญหา แบบยาก	จำนวนกล่องหรือวัสดุคงคลัง (ชิ้น)						จำนวนการใช้รถบรรทุก ที่น้อยที่สุด m^* (คัน)
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
N5C4W1	800	2,400	3,000	600	2,200	1,000	6
N6C4W1	1,600	4,800	6,000	1,200	4,400	2,000	11

บทที่ 4 ผลการวิจัย

การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แบบใหม่ของขั้นตอนวิธีการดังกล่าว (Gravitational Coefficient Function of GSA) มาผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งการพัฒนาขั้นตอนวิธีการของการวิจัยนี้ได้นำเสนอชื่อว่า “ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (New Gravitational Coefficient Function of Gravitational Search Algorithm with Mutation: NGCFGSAM)” นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ทดสอบสมรรถนะในการค้นหาคำตอบ (Search Performance) โดยใช้ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Function) กับปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาคฐานนิยมเดี่ยว (Unimodal Landscape Function) และปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาคหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) ยิ่งไปกว่านั้นยังได้เปรียบเทียบอัตราการเข้าสู่คำตอบ (Convergence Rate) กับขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ เพื่อวิเคราะห์การสำรวจคำตอบ (Exploration) และการแสวงหาคำตอบ (Exploitation) การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) และการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) หลังจากนั้นได้นำขั้นตอนวิธีการที่ผ่านการพัฒนาไปทดสอบใช้กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ (Bin Packing Problem: BPP) ในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งสามารถอธิบายการวิเคราะห์ผลการวิจัยได้แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM

ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ได้ทำการศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ (Parameter) จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการทดลองทางคอมพิวเตอร์ (The Computational Experiments) [19], [28] ผ่านโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2016A เพื่อค้นหาคำตอบของฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันความโน้มถ่วงแบบเดิม (The Conventional of Gravitational Coefficient Function) $G(t)$ ได้แก่ ค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) ที่เกิดขึ้นในช่วงควอนตัมจักรวาลแรก (The First Cosmic Quantum-interval) ณ เวลา $t_0 = 1000$ จำนวนค่าคงที่ $\beta = 0.01$ ค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) $G(t_0) = 100$ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) $G(t)$ ได้แก่ จำนวนค่าการคำนวณซ้ำสูงสุด (The Maximum Iteration Number) $T = 1000$ จำนวนค่าคงที่ $\beta = 2$ และค่าความโน้มถ่วงคงที่ (The Gravitational Constant Value) $G(t_0) = 100$ จำนวนเอเจนต์ (The Number of Agents) $N=50$ เนื่องจากขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM เป็นเทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม (Stochastic Searching Technique) ทำการทดสอบแต่ละชุด

สำหรับการทดลองนั้นเป็นการสุ่มแบบอิสระ 30 ครั้ง เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มสำหรับการใช้ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะในการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA

นอกจากนี้ ผลการวิจัยนี้ได้วัดสมรรถนะเชิงเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับขั้นตอนวิธีการอื่น ๆ ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (NGCFGSA) ซึ่งแบ่งการวัดสมรรถนะโดยใช้ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 จะเป็นการวัดสมรรถนะกับปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาพฐานนิยมเดียว (Unimodal Landscape Function) จำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Sphere Function Matyas Function และ Rosenbrock Function สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นการวัดสมรรถนะกับปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดแบบฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) จำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Griewank Function Schwefel Function และ Ackley Function ซึ่งผลการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับฟังก์ชันเชิงเปรียบเทียบได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ

ชื่อฟังก์ชัน (Function Name)	ผลลัพธ์ที่น้อยที่สุด (Minimization Result)	ขั้นตอนวิธีการ (Algorithms)				การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (P-value)
		GA	GSA	NGCFGSA	NGCFGSAM	
1. Sphere	Average mean fitness	6.3×10^{-11}	7.3×10^{-11}	9.7×10^{-17}	<u>4.8×10^{-17}</u>	3.82×10^{-2}
	Average best-so-far	6.2×10^{-11}	7.1×10^{-11}	4.8×10^{-17}	<u>4.7×10^{-17}</u>	3.74×10^{-2}
2. Matyas	Average mean fitness	$5.6 \times 10^{+3}$	$0.16 \times 10^{+3}$	$0.15 \times 10^{+3}$	<u>$0.95 \times 10^{+2}$</u>	4.76×10^{-2}
	Average best-so-far	$5.6 \times 10^{+3}$	$0.15 \times 10^{+3}$	$0.12 \times 10^{+3}$	<u>$0.95 \times 10^{+2}$</u>	4.41×10^{-2}
3. Rosenbrock	Average mean fitness	$1.1 \times 10^{+3}$	$0.25 \times 10^{+2}$	$0.23 \times 10^{+2}$	<u>$0.21 \times 10^{+2}$</u>	3.37×10^{-2}
	Average best-so-far	$1.0 \times 10^{+3}$	$0.25 \times 10^{+2}$	$0.22 \times 10^{+2}$	<u>$0.19 \times 10^{+2}$</u>	3.34×10^{-2}
4. Griewank	Average mean fitness	1.16	0.29	1.32	<u>0.08</u>	1.62×10^{-2}
	Average best-so-far	1.14	0.04	1.31	<u>0.02</u>	1.53×10^{-2}

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ชื่อฟังก์ชัน (Function Name)	ผลลัพธ์ที่น้อยที่สุด (Minimization Result)	ขั้นตอนวิธีการ (Algorithms)				การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (P-value)
		GA	GSA	NGCFGSA	NGCFGSAM	
5. Schwefel	Average mean fitness	$-1.2 \times 10^{+4}$	$-2.8 \times 10^{+3}$	$-3.1 \times 10^{+3}$	<u>$-3.0 \times 10^{+3}$</u>	4.84×10^{-2}
	Average best-so-far	$-1.2 \times 10^{+4}$	$-2.6 \times 10^{+3}$	$-2.7 \times 10^{+3}$	<u>$-2.7 \times 10^{+3}$</u>	4.54×10^{-2}
6. Ackley	Average mean fitness	2.16×10^{-4}	6.9×10^{-6}	3.5×10^{-5}	<u>4.8×10^{-6}</u>	2.83×10^{-2}
	Average best-so-far	2.13×10^{-4}	6.9×10^{-6}	3.5×10^{-5}	<u>4.8×10^{-6}</u>	2.64×10^{-2}

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะตามที่ขีดเส้นใต้ทั้ง 6 ฟังก์ชัน ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น เนื่องจากขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ให้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่น้อยที่สุด (Minimization Result) สำหรับฟังก์ชันภูมิภาพฐานนิยมเดี่ยว (Unimodal Landscape Function) และฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) นอกจากนี้ ยังส่งผลทำให้ระดับความไม่แน่นอนลดลงด้วย (Lower Level of Uncertainty) ซึ่งหมายความว่าพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ที่นำเสนอในการวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือในการค้นหาคำตอบมากกว่าขั้นตอนวิธีการอื่นซึ่งมีผลลัพธ์ที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับความแน่นอน อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้ยังได้ทดสอบสมมติฐานทางสถิติ โดยประยุกต์ใช้การทดสอบแบบ เพื่อยืนยันสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ซึ่งสามารถตั้งสมมติฐานและทดสอบสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

ตั้งสมมติฐาน คือ สมรรถนะการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ GA GSA NGCFGSA และ NGCFGSAM แตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานหลัก คือ สมรรถนะการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ GA GSA NGCFGSA และ NGCFGSAM ไม่มีความแตกต่างกัน

$$H_0: \mu_{GA(1)} = \mu_{GSA(2)} = \mu_{NGCFGSA(3)} = \mu_{NGCFGSAM(4)}$$

สมมติฐานอื่น ๆ คือ สมรรถนะการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ GA GSA NGCFGSA และ NGCFGSAM มีความแตกต่างกัน

$$H_1: \mu_{\text{algorithm}(i)} \neq \mu_{\text{algorithm}(j)}$$

โดยที่

$$\forall_{\text{algorithm}(i)} \in \{1, 2, 3, 4\} \text{ และ}$$

$$\forall_{\text{algorithm}(j)} \in \{1, 2, 3, 4\}$$

ทดสอบสมมติฐานที่ระดับนัยสำคัญ (Significant Level) 5 % ($\alpha=0.05$ หรือ 5.00×10^{-2})

เมื่อวิเคราะห์ค่า P-value ตามผลการทดสอบสมมติฐานที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ทุกการทดสอบกับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะทั้ง 6 ฟังก์ชัน ดังนั้น จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก [$H_0: \mu_{GA(1)} = \mu_{GSA(2)} = \mu_{NGCFGSA(3)} = \mu_{NGCFGSAM(4)}$] และยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ [$H_1: \mu_{\text{algorithm}(i)} \neq \mu_{\text{algorithm}(j)}$] ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสรุปได้ว่าสมรรถนะการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ GA GSA NGCFGSA และ NGCFGSAM มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่แตกต่างกับขั้นตอนวิธีการอื่น

เมื่อพิจารณาผลของสมรรถนะและการทดสอบสมมติฐานในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่นแล้ว ยังพบว่า การเพิ่มขั้นตอนด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) ยังสามารถปรับปรุงขั้นตอนในการค้นหาคำตอบได้เป็นอย่างดี และทำให้มั่นใจได้ว่าการดำเนินการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถหลุดพ้นจากคำตอบที่มีลักษณะเป็นการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม โดยเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวิจิฉัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน ก่อนที่มุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ได้อย่างเป็นระบบ

ดังนั้น ผลจากการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะแสดงให้เห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีชุดข้อมูลขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ยาก และไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time)

4.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์

ปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์แบบหนึ่งมิติมีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม ซึ่งการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM นี้ได้ทำการทดสอบตามวิธีดำเนินการวิจัย 9 ขั้นตอน โดยการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB Version R2016A และสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation) ผ่านคอมพิวเตอร์ Intel Core i5-8250U CPU 1.80 GHz Processor 8 GB RAM สำหรับทดสอบสมรรถนะการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตรภัณฑ์

แบบหนึ่งมิติ โดยใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ในการทดสอบได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ ฟังก์ชัน $G(t)$ กำหนดให้ $t_0 = 1000$ $\beta = 0.01$ และ $G(t_0) = 100$ สำหรับฟังก์ชัน $G(t)$ แบบใหม่กำหนดให้ $T = 1000$ $\beta = 2$ และ $G(t_0) = 100$ และจำนวนเอเจนต์ $N = 50$

การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติได้ใช้ชุดข้อมูลตัวอย่างปัญหาในการจำลองสถานการณ์ และมีการกำหนดให้พารามิเตอร์ 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 จำนวนของกล่องที่ใช้ น้อยที่สุด (Minimal Number of Bins Used) และ m คือ จำนวนของกล่องที่ใช้ (Number of Bins Used) นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาออกเป็น 3 กรณี คือ (1) กรณีปัญหาแบบง่ายจำนวน 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 $c=100$), $y=2$ ($c=120$), $y=3$ ($c=150$), $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[1, 100]$), $z=2$ ($[20, 100]$), $z=3$ ($[30, 100]$), $z=4$ ($[30, 100]$) และ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (A ... 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 $c=1,000$), $y=2$ ($c=1,000$), $y=3$ ($c=1,000$), $y=4$ ($c=1,000$), $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[200, 400]$), $z=2$ ($[200, 300]$) และ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (0...9) (Instances of Each Class) และ (3) กรณีปัญหาแบบยาก จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ $HARDv$ เมื่อ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (0...9) (Instances of Each Class) และยังได้ทดสอบเชิงเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการ (Algorithms) จำนวน 3 ขั้นตอนวิธีการ ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (QEA) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (1DBPP)

ผลการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการแบบอื่น พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ในกรณีปัญหาแบบง่ายและปัญหาแบบปานกลาง ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่าคำตอบใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution: m^*) เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการแบบอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ส่วนการแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ในกรณีปัญหาแบบยากนั้น ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธีการอื่น แต่ข้อดีของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวิจิฉัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน ส่งผลให้ได้คำตอบที่มีลักษณะเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optimum) และคำตอบที่มีลักษณะที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ดังนั้น ผลจากการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ขั้นตอนวิธีการดังกล่าวมีสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาคำตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อน และปัญหาขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าเหมาะที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนามได้เป็นอย่างดี แต่ในทางกลับกันการทดสอบขั้นตอนวิธีการดังกล่าวกับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่สามารถยืนยันสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ได้ งานวิจัยนี้จึงนำขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบง่าย

ชื่อปัญหา ตัวอย่าง แบบง่าย	จำนวน สิ่งของ สำหรับ การบรรจุ (Items)	ความจุของ กล่องแต่ละ กล่อง (Capacity of Each Bin)	คำตอบที่ดี	คำตอบที่	คำตอบที่	คำตอบที่	คำตอบที่ได้	คำตอบที่ได้
			ที่สุด (Best Solution) (m^*)	ได้จาก ขั้นตอน วิธีการ QEA (m)	ได้จาก ขั้นตอน วิธีการ PSO (m)	ได้จาก ขั้นตอน วิธีการ GSA (m)	จากขั้นตอน วิธีการ NGCFGSA (m)	จากขั้นตอน วิธีการ NGCFGSAM (m)
N1C1W1 _C	50	100	20	25	24	25	23	<u>22</u>
N1C2W1 _B	50	120	26	27	27	26	26	<u>26</u>
N2C1W1 _A	100	100	48	50	49	49	49	<u>48</u>
N2C2W2 _A	100	120	52	53	53	53	53	<u>53</u>

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบปานกลาง

ชื่อปัญหา ตัวอย่าง แบบปานกลาง	จำนวน สิ่งของ สำหรับการบรรจุ (Items)	ความจุของ กล่องแต่ละ กล่อง (Capacity of Each Bin)	คำตอบที่ดี ที่สุด (Best Solution) (m^*)	คำตอบที่ ได้จาก ขั้นตอน วิธีการ QEA (m)	คำตอบที่ ได้จาก ขั้นตอน วิธีการ PSO (m)	คำตอบที่ จาก ขั้นตอน วิธีการ GSA (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ NGCFGSA (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ NGCFGSA (m)
N2W1B1R0	100	1,000	34	34	34	34	34	<u>34</u>
N3W1B1R1	200	1,000	67	68	69	68	67	<u>67</u>
N3W2B2R2	200	1,000	39	39	39	39	39	<u>39</u>
N4W3B1R2	500	1,000	71	75	74	74	72	<u>71</u>

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบยาก

ชื่อตัวอย่าง ปัญหา แบบยาก	จำนวน สิ่งของ สำหรับการบรรจุ (Items)	ความจุของ กล่องแต่ละ กล่อง (Capacity of Each Bin)	คำตอบที่ดี ที่สุด (Best Solution) (m^*)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ QEA (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ PSO (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ GSA (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ NGCFGSA (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ NGCFGSA (m)
HARD0	200	100,000	56	57	59	59	60	<u>57</u>
HARD4	200	100,000	57	57	57	57	57	<u>57</u>

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง ปัญหา แบบยาก	จำนวน สิ่งของ สำหรับการบรรจุ (Items)	ความจุของ กล่องแต่ละ กล่อง (Capacity of Each Bin)	คำตอบที่ดี ที่สุด (Best Solution) (m^*)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ (QEA) (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ (PSO) (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ (GSA) (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ (NGCFGSA) (m)	คำตอบที่ได้ จากขั้นตอน วิธีการ (NGCFGSAM) (m)
HARD6	200	100,000	57	59	62	63	62	<u>57</u>
HARD9	200	100,000	56	56	56	56	56	<u>56</u>

4.3 ผลการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ ในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (NGCFGSAM) เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (NGCFGSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ประกอบด้วยกล่องหรือวัสดุคงคลังที่มีน้ำหนักบริสุทธิ์ จำนวน 6 ขนาด ได้แก่ กล่อง No.1 ขนาด 30 x 100 x 30 เซนติเมตร มีน้ำหนักบริสุทธิ์ไม่เกิน 20 กิโลกรัม กล่อง No.2 ขนาด 31 x 36 x 13 เซนติเมตร มีน้ำหนักบริสุทธิ์ไม่เกิน 5 กิโลกรัม กล่อง No.3 ขนาด 31 x 36 x 26 เซนติเมตร มีน้ำหนักบริสุทธิ์ไม่เกิน 10 กิโลกรัม กล่อง No.4 ขนาด 55 x 100 x 55 เซนติเมตร มีน้ำหนักบริสุทธิ์ไม่เกิน 30 กิโลกรัม กล่อง No.5 ขนาด 40 x 45 x 35 เซนติเมตร มีน้ำหนักบริสุทธิ์ไม่เกิน 15 กิโลกรัม และ กล่อง No.6 ขนาด 45 x 55 x 40 เซนติเมตร มีน้ำหนักบริสุทธิ์ไม่เกิน 25 กิโลกรัม โดยกล่องขนาดต่าง ๆ ได้ถูกลำเลียงใส่รถบรรทุกโดยเจาะจงไปที่รถบรรทุกแบบตู้ทึบของบริษัท ได้แก่ รถบรรทุกตู้ทึบ 4 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 1,500 กิโลกรัม รถบรรทุกตู้ทึบ 6 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 9,000 กิโลกรัม รถบรรทุกตู้ทึบ 10 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 16,000 กิโลกรัม และรถบรรทุกตู้ทึบกึ่งพวง 18 ล้อ บรรทุกได้ไม่เกิน 25,000 กิโลกรัม

ในการศึกษาสมรรถนะเพื่อจำลองสถานการณ์ได้คำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB Version R2016A และสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation) ผ่านคอมพิวเตอร์ Intel Core i5-8250U CPU 1.80 GHz Processor 8 GB RAM โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ n คือ จำนวนของกล่องหรือวัสดุคงคลัง (Number of

Items) w_j คือ น้ำหนักของกล่องหรือวัสดุคงคลัง j (Weight of Items j) ($j = 1, \dots, n$) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (Kilogram: Kg.) c ความจุของรถบรรทุกแต่ละคัน (Capacity of Each Truck) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (Kilogram: Kg.) m^* คือ จำนวนการใช้รถบรรทุกที่น้อยที่สุด (Minimal Number of Trucks Used) มีหน่วยเป็นคัน และ m คือ จำนวนรถบรรทุกที่ใช้ (Number of Trucks Used) มีหน่วยเป็นคัน นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาออกเป็น 3 กรณี ตามขนาดของรถบรรทุกที่ใช้งานจริงในบริษัท ได้แก่ (1) กรณีปัญหาแบบง่าย จำนวน 2 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=1$ (สำหรับ $n=500$), $x=2$ ($n=1,300$), $y=1$ (สำหรับ $c=1,500$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[5, 30]$) (2) กรณีปัญหาแบบปานกลาง จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=3$ (สำหรับ $n=1,000$), $x=4$ ($n=10,000$), $y=2$ (สำหรับ $c=9,000$), $y=3$ ($c=16,000$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[5, 30]$) และ (3) กรณีปัญหาแบบยาก จำนวน 2 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=5$ (สำหรับ $n=10,000$), $x=6$ ($n=20,000$), $y=4$ (สำหรับ $c=25,000$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[5, 30]$)

ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ พบว่า ขั้นตอนดังกล่าวมีความสามารถในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวินิจฉัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกันผ่านขั้นตอนการกลายพันธุ์ ซึ่งส่งผลให้ได้คำตอบที่มีลักษณะเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optimum) และคำตอบที่มีลักษณะที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) นอกจากนี้ ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถลดจำนวนการใช้รถบรรทุกได้น้อยกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น จึงทำให้สามารถลดต้นทุนการใช้ทรัพยากรรถบรรทุกเพื่อการขนส่งและการกระจายสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในแต่ละครั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สามารถค้นหาคำตอบได้เท่ากับคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่ายดังแสดงในตารางที่ 4.5 และชื่อปัญหา $N3C2W1$ และ $N3C3W1$ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และสามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ชื่อปัญหา $N4C2W1$ และ $N4C3W1$ และตารางที่ 4.7 ตามลำดับ

ดังนั้น ผลจากการวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ขั้นตอนวิธีการดังกล่าวมีสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งในหัวข้อต่อไปในงานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์ถึงอัตราการใช้ประโยชน์ (Utilization Rate) เพื่อประเมินขีดความสามารถของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการคำนวณผ่านขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM กับระดับผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีที่สุด (m^*) จากค่าต่ำสุดของดรรชนีขอบเขตล่างสุด (Lower Bound)

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย

ชื่อปัญหา แบบง่าย	จำนวน สิ่งของสำหรับ การบรรจุ (Items) (ชิ้น)	ความจุของ รถบรรทุกแต่ละ คัน (Capacity of Each Bin) (คัน)	คำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ GSA (m) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA (m) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA (m) (คัน)
N1C1W1	500	1,500	5	8	6	<u>5</u>
N2C1W1	5,000	1,500	13	18	15	<u>14</u>

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบปานกลาง

ชื่อปัญหา แบบปานกลาง	จำนวน สิ่งของสำหรับ การบรรจุ (Items) (ชิ้น)	ความจุของ รถบรรทุกแต่ละ คัน (Capacity of Each Bin) (คัน)	คำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ GSA (m) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA (m) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA (m) (คัน)
N3C2W1	1,000	9,000	2	7	5	<u>2</u>
N3C3W1	1,000	16,000	1	1	1	<u>1</u>
N4C2W1	10,000	9,000	15	19	18	<u>15</u>
N4C3W1	10,000	16,000	9	14	13	<u>11</u>

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยาก

ชื่อปัญหา	จำนวน สิ่งของสำหรับ การบรรจุ (Items) (ชั้น)	ความจุของ รถบรรทุกแต่ละ คัน (Capacity of Each Bin) (คัน)	คำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ GSA (m) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA (m) (คัน)	คำตอบที่ได้จาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA (m) (คัน)
N5C4W1	10,000	25,000	6	9	8	<u>7</u>
N6C4W1	20,000	25,000	11	16	14	<u>13</u>

4.4 ผลการวิเคราะห์ร้อยละอัตรารรถประโยชน์ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

การวิเคราะห์ถึงอัตรารรถประโยชน์ (Utilization Rate) งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นถึงการประเมินขีดความสามารถของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการคำนวณผ่านขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับระดับผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีที่สุด (m^*) จากค่าต่ำสุดของดรรชนีขอบเขตล่างสุด (Lower Bound) เป็นการยืนยันอัตรารรถประโยชน์ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์มีอัตรารรถประโยชน์มากกว่าขั้นตอนวิธีการอื่นหรือไม่ ซึ่งสามารถคำนวณอัตรารรถประโยชน์ในรูปแบบของร้อยละได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Utilization rate} = \frac{\text{จำนวนรถบรรทุกที่ดีที่สุด (Best Solution)}}{\text{จำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)}} \times 100$$

โดยที่ จำนวนรถบรรทุกที่ดีที่สุด (Best Solution) คือ จำนวนรถบรรทุกที่ดีที่สุด (m^*) ที่ถูกนำมาใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็น คัน ซึ่งคำนวณได้จากค่าต่ำสุดของดรรชนีขอบเขตล่างสุด (Lower Bound) และจำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) คือ จำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมที่สุดที่ถูกนำมาใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็น คัน ซึ่งคำนวณได้จากการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการ (Algorithms)

ผลการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย โดยมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยมากถึงร้อยละ 96.43 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.8 นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ยังมีสมรรถนะในการคำนวณหาคำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น โดยมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยถึงร้อยละ 95.46 เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการ GSA และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 67.95 และร้อยละ 73.14 ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ยังมีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยากได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น โดยมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยมากถึงร้อยละ 85.17 เมื่อเทียบกับอัตราผลตอบแทนของคำตอบที่ดีที่สุด พบว่า มีผลต่างจากอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดเพียงร้อยละ 14.38 เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการ GSA ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 67.71 มีผลต่างจากอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดร้อยละ 32.29 และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 76.79 มีผลต่างจากอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดร้อยละ 23.21 ดังแสดงในตารางที่ 4.10

เมื่อวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ทั้งหมด พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM มีความสามารถทำให้ลดต้นทุนการขนส่งสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ในกิจกรรมทางโลจิสติกส์ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น เนื่องจากความสามารถพิเศษทางทฤษฎีของขั้นตอนวิธีการเมตาฮิวริสติก (Metaheuristics) สามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ที่ค้นหาค่าเหมาะที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนามได้ในระยะเวลาอันสั้น แต่ไม่อาจหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เหมือนขั้นตอนวิธีการที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริง (Exact Methods) แต่ขั้นตอนวิธีการเมตาฮิวริสติกเป็นวิธีการที่นำมาซึ่งคุณภาพของคำตอบที่เป็นที่ยอมรับได้ภายในระยะเวลาในการคำนวณอันสั้นกว่าขั้นตอนวิธีการที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริงมาก

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย

ชื่อปัญหา แบบง่าย	อัตราผลตอบแทน ของคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*)	อัตรา ผลตอบแทน ของขั้นตอน วิธีการ GSA	อัตราผลตอบแทน ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA	อัตราผลตอบแทน ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA
หน่วย	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
N1C1W1	100.00	62.50	83.33	<u>100.00</u>
N2C1W1	100.00	72.22	86.67	<u>92.86</u>
เฉลี่ย	100.00	63.36	85.00	<u>96.43</u>

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบปานกลาง

ชื่อปัญหา แบบปานกลาง	อัตราผลตอบแทน ของคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*)	อัตรา ผลตอบแทน ของขั้นตอน วิธีการ GSA	อัตราผลตอบแทน ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA	อัตราผลตอบแทน ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA
หน่วย	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
N3C2W1	100.00	28.57	40.00	<u>100.00</u>
N3C3W1	100.00	100.00	100.00	<u>100.00</u>
N4C2W1	100.00	78.94	83.33	<u>100.00</u>

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ชื่อปัญหา แบบปานกลาง	อัตรารรถประโยชน์ ของคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*)	อัตรา รรถประโยชน์ ของขั้นตอน วิธีการ GSA	อัตรารรถประโยชน์ ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA	อัตรารรถประโยชน์ ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM
N4C3W1	100.00	64.28	69.23	<u>81.82</u>
เฉลี่ย	100.00	67.95	73.14	<u>95.46</u>

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบอัตรารรถประโยชน์ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยาก

ชื่อปัญหา แบบยาก	อัตรารรถประโยชน์ ของคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution) (m^*)	อัตรา รรถประโยชน์ ของขั้นตอน วิธีการ GSA	อัตรารรถประโยชน์ ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA	อัตรารรถประโยชน์ ของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM
หน่วย	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
N5C4W1	100	66.67	75.00	<u>85.71</u>
N6C4W1	100	68.75	78.57	<u>84.62</u>
เฉลี่ย	100	67.71	76.79	<u>85.17</u>

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับการกลายพันธุ์สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมให้สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับฟังก์ชันเชิงเปรียบเทียบ 2) เพื่อทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ 3) เพื่อประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

การวิจัยนี้ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนที่จะมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) และเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวินิจฉัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน เพื่อให้มีสมรรถนะในการแก้ไขปัญหาที่ประกอบไปด้วยปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัยทำให้ปัญหาดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบ NP-hard ที่มีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่ทำให้การค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ยาก และไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม (Polynomial Time) โดยการวิจัยนี้ได้นำเสนอชื่อขั้นตอนวิธีการดังกล่าว คือ ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงโดยใช้ฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ผสมกับวิธีการกลายพันธุ์ (New Gravitational Coefficient Function of Gravitational Search Algorithm with Mutation: NGCFGSAM)

หลังจากนั้น ได้นำขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ไปทดสอบสมรรถนะโดยใช้ฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark Function) ก่อนนำไปทดสอบสมรรถนะกับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Bin Packing Problem: 1DBPP) และสุดท้ายได้นำขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ไปประยุกต์ใช้ทดสอบกับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM เพื่อให้มีสมรรถนะในการแก้ไขปัญหาที่ประกอบไปด้วยปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัยที่มีชุดข้อมูลของปัญหาขนาดใหญ่และไม่สามารถแก้ได้ด้วยเวลาแบบพหุนาม ต่อมาได้นำขั้นตอนวิธีการดังกล่าวไปทดสอบกับฟังก์ชันเชิงเปรียบเทียบการแก้ปัญหาการบรรจุ

ผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ และการแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 สรุปผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับฟังก์ชันเชิงเปรียบเทียบ

การศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับฟังก์ชันการวัดเปรียบเทียบ สมรรถนะตามที่ขีดเส้นใต้ทั้ง 6 ฟังก์ชัน ได้แก่ ฟังก์ชันภูมิภาคนิยามเดี่ยว (Unimodal Landscape Function) จำนวน 3 ฟังก์ชัน คือ Sphere Function Matyas Function และ Rosenbrock Function ฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ (Multimodal Landscape Functions) จำนวน 3 ฟังก์ชัน ได้แก่ Griewank Function Schwefel Function และ Ackley Function พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีสมรรถนะในการค้นหาค่าตอบได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น คือ ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function: NGCFGSA) เนื่องจากขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ให้ผลลัพธ์ของค่าตอบที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่น้อยที่สุด (Minimization Result) สำหรับฟังก์ชันภูมิภาคนิยามเดี่ยว และฟังก์ชันภูมิภาพหลายรูปแบบ นอกจากนี้ การเพิ่มขั้นตอนด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) ยังสามารถปรับปรุงสมรรถนะในการค้นหาค่าตอบของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ได้เป็นอย่างดี และทำให้มั่นใจได้ว่าการดำเนินการค้นหาค่าตอบของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถหลุดพ้นจากค่าตอบที่มีลักษณะเป็นการค้นหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม โดยเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวิจจัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน ก่อนที่มุ่งสู่การค้นหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) ได้อย่างเป็นระบบ

5.1.2 สรุปผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

การศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ ในกรณีปัญหาแบบง่ายและปัญหาแบบปานกลาง ได้ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่าคำตอบใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Best Solution, m^*) เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการแบบอื่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (Quantum Evolutionary Algorithm: QEA) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function: NGCFGSA) ในส่วนการแก้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในกรณีปัญหาแบบยากนั้น พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถหาค่าตอบได้ใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธีการอื่น และแต่ข้อดีของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถเชื่อมโยงการค้นหาแบบการวิจจัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน ส่งผลต่อค่าคำตอบที่มีลักษณะเหมาะสมที่สุด

เฉพาะแห่ง (Local Optimum) และคำตอบที่มีลักษณะที่เหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Optimum) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.1.3 สรุปผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

การศึกษาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ พบว่า ขั้นตอนดังกล่าวมีความสามารถในการค้นหาคำตอบของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการอื่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) และขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงที่ผ่านการพัฒนาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function: NGCFGSA) นอกจากนี้ ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA สามารถลดจำนวนการใช้รถบรรทุกได้น้อยกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนการใช้ทรัพยากรรถบรรทุกเพื่อการขนส่งและการกระจายสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ในกิจกรรมโลจิสติกส์

ยิ่งไปกว่านั้น การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบง่าย โดยมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยมากถึงร้อยละ 96.43 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด และสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบปานกลาง พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ยังมีสมรรถนะในการคำนวณหาคำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น โดยมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยถึงร้อยละ 95.46 เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการ GSA และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 67.95 และร้อยละ 63.14 ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์แบบยากขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ยังมีสมรรถนะในการหาคำตอบมากกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ซึ่งขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยมากถึงร้อยละ 85.17 เมื่อเทียบกับอัตราผลตอบแทนของคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีการ GSA และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 67.71 และร้อยละ 76.79 ตามลำดับ

เนื่องจากความสามารถพิเศษทางทฤษฎีของขั้นตอนวิธีการเมตาฮิวริสติก (Metaheuristics) สามารถแก้ไขปัญหามิติสูงที่ค้นหาค่าเหมาะที่สุดได้ยากและไม่สามารถแก้ไขปัญหานั้นได้ด้วยเวลาแบบพหุนามได้ในระยะเวลาอันสั้น แต่ไม่อาจหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เหมือนขั้นตอนวิธีการที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริง (Exact Methods) แต่ขั้นตอนวิธีการเมตาฮิวริสติกเป็นวิธีการที่นำมาซึ่งคุณภาพของคำตอบที่เป็นที่ยอมรับได้ภายในระยะเวลาในการคำนวณอันสั้นกว่าขั้นตอนวิธีการที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริงมาก

5.2 อภิปรายผล

จากการวิจัยเรื่อง การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงกับการกลายพันธุ์สำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์ มีประเด็นการอภิปรายผลตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังต่อไปนี้

5.2.1 วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมให้สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (Global Search) สำหรับฟังก์ชันเชิงเปรียบเทียบ พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ที่ได้นำเสนอในการวิจัยครั้งนี้ มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จนสามารถเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการ GA ขั้นตอนวิธีการ GSA และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA เนื่องจากขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Search) อย่างครอบคลุม ก่อนมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rashedi, Nezamabadi-Pour and Saryazdi [19] ที่ได้ศึกษาขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm: GSA) พบว่า ขั้นตอนวิธีการ GSA มีจุดเด่นในด้านการค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างที่มีลักษณะการค้นหาคำตอบแบบฝูงการกระจายตัวได้ (Swarming) และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tharawetcharak, Karot and Pornsing [28] ที่ได้ศึกษาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ ความโน้มถ่วงแบบใหม่ (New Gravitational Coefficient Function) พบว่า ฟังก์ชันดังกล่าวมีจุดเด่นในด้านการค้นหาคำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่มีค่าดีที่สุดได้โดยการค้นหาแบบการวิจิฉัย (Exploration) และการแสวงหา (Exploitation) ที่สมดุลกัน

5.2.2 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จนสามารถเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการ QEA ขั้นตอนวิธีการ PSO ขั้นตอนวิธีการ GSA และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA เนื่องจาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ได้ทำการผสมขั้นตอนวิธีการระหว่าง ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับวิธีการกลายพันธุ์ส่งผลให้เกิดการค้นหาคำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่มีค่าดีที่สุดได้โดยการค้นหาแบบการวิจิฉัย และการแสวงหาที่สมดุลกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Swain, Ghosh and Borah [79] ที่ได้ศึกษาขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงควอนตัม (Quantum Evolutionary Algorithm: QEA) สำหรับแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ พบว่า หากนำขั้นตอนวิธีการ QEA ไปทำการผสมกับวิธีการ Q-bits ซึ่งเป็นการผสมผสานขั้นตอนวิธีการมากกว่าหนึ่งขั้นตอนวิธีการขึ้นไป (Hybrid Algorithms) จะสามารถนำไปแก้ไขปัญหาที่ประกอบไปด้วยปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัยทำให้ปัญหาดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบ NP-hard ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2.3 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วง (GSA) ผสมกับการกลายพันธุ์ (Mutation) ในขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้างสำหรับปัญหาการบรรจุ

ผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ พบว่า ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จนสามารถเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีการอื่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีการ QEA ขั้นตอนวิธีการ PSO ขั้นตอนวิธีการ GSA และขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA เนื่องจาก ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ได้ทำการผสมขั้นตอนวิธีการระหว่าง ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA กับวิธีการกลายพันธุ์ ส่งผลให้เกิดการค้นหาคำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่มีค่าดีที่สุดได้โดยการค้นหาแบบการวิจิณฉัย และการแสวงหาที่สมดุลกัน และทำให้คำตอบที่ได้มีค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะแห่ง อย่างครอบคลุม ก่อนมุ่งสู่การค้นหาคำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tharawetcharak, Karot and Pornsing [28] ที่ได้ศึกษาฟังก์ชันการหาค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ พบว่า ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นฟังก์ชันที่ทำให้อัตราการเข้าสู่คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง เข้าใกล้คำตอบที่มีค่าดีที่สุดได้โดยการค้นหาแบบการวิจิณฉัย และการแสวงหาที่สมดุลกัน นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh and Deep [61] ที่ได้ศึกษาการผสมขั้นตอนวิธีการค้นหาค่าความโน้มถ่วงกับขั้นตอนวิธีการถอดรหัสพันธุกรรม พบว่า การผสมขั้นตอนวิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มสมรรถนะในการเข้าสู่คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดวงกว้าง และสามารถทำให้เข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดได้อีกด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ด้วยระยะเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้มีอยู่อย่างจำกัดสำหรับข้อเสนอแนะในการวิจัยที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ควรพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ให้มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการในขั้นตอนวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในกรณีศึกษากับอุตสาหกรรมอื่นที่หลากหลาย และควรคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของขั้นตอนวิธีการนี้ในการวิจัยครั้งต่อไป ซึ่งสามารถให้ข้อเสนอแนะในการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA

การพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้นควรคำนึงถึงการพัฒนาขั้นตอนวิธีการให้มีระยะเวลาในการคำนวณน้อยลง นอกจากนี้ ยังสามารถพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ให้มีความเป็นปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพิ่มขึ้น รวมถึงการศึกษาแนววิธีที่เน้นเชิงพฤติกรรม (Behavior-oriented Approach) วิทยาการศึกษานานึก (Heuristics) และการตัดสินใจสั่งการแบบสามัญสำนึก (Spontaneous Decision) เพิ่มเติมเพื่อนำมาพัฒนาขั้นตอนวิธีการดังกล่าวให้มีความฉลาดมากขึ้น

5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ควรมีการประยุกต์ใช้ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสองมิติ (Two Dimensional Bin Packing Problem) ปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสามมิติ (Three Dimensional Bin Packing Problem) และปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหลายมิติ (Multi-dimensional Bin Packing Problems) รวมถึงปัญหาในกลุ่มการตัด (Cutting Stock Problems) นอกจากนี้ ควรมีการประยุกต์ใช้สำหรับกิจกรรมทางภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลาย หรือแม้แต่กิจกรรมในการดำเนินชีวิตประจำวัน เพื่อศึกษาข้อดีข้อเสียของกระบวนการดำเนินงานของขั้นตอนวิธีการ NGCFGSA ในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

5.3.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยครั้งต่อไปควรมีการเพิ่มเติมในส่วนของการพัฒนาขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ให้มีสมรรถนะในการแก้ไขปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบสมดุล (Load Balancing Bin Packing Problems) ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการดังกล่าวกับขั้นตอนวิธีการอื่น เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยครั้งต่อไปอาจเพิ่มจำนวนของผลิตภัณฑ์ สินค้า หรือวัสดุคงคลังตั้งต้นให้มีขนาดที่หลากหลายมากขึ้น รวมถึงเพิ่มข้อจำกัดในการทำงาน เช่น ระยะเวลาในการเดินทางบรรทุก ต้นทุนในการเดินทางบรรทุก และลำดับการออกแบบขั้นตอนวิธีการที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไปเพื่อให้ง่ายต่อการปฏิบัติงานของแรงงานฝีมือในภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้เป็นเพียงข้อเสนอแนะเพื่อนักวิจัยที่สนใจนำขั้นตอนวิธีการ NGCFGSAM ไปพัฒนาต่อยอดให้เกิดความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] D. Park and R. Rajah, “Asian Development Outlook 2017: Transcending the middleincome challenge,” [Online]. <http://hdl.handle.net/1885/117386>. (Accessed: Feb. 12, 2021).
- [2] M. Barratt, “Understanding the meaning of collaboration in the supply chain,” *Supply Chain Management: an international journal*, vol. 9, no. 1, pp. 30-42, February 2004.
- [3] J. Kondratjev, “Logistics. Transportation and warehouse in supply chain,” M.S. thesis, Industrial Management, Centria University of Applied Sciences, Kokkola, Finland, 2015.
- [4] A. Rushton, P. Croucher, and P. Baker, *The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain (5th ed.)*. Kogan Page Publishers, 2014. Accessed on: Oct. 28, 2021. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/7a12/0a09dc87f9ecda7247ca3b7c93a59abe74fa.pdf>.
- [5] J. Manyika, “A future that works: AI, automation, employment, and productivity,” McKinsey Global Institute Research [Online]. <https://www.jbs.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2020/08/170622-slides-manyika.pdf>. (Accessed: Jan. 28, 2022)
- [6] C. Paquay, S. Limbourg, M. Schyns and J. F. Oliveira, “MIP-based constructive heuristics for the three-dimensional Bin Packing Problem with transportation constraints,” *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 4, pp. 1581-1592, July 2017.
- [7] M. Abdel-Basset, G. Manogaran, L. Abdel-Fatah and S. Mirjalili, “An improved nature inspired meta-heuristic algorithm for 1-D bin packing problems,” *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 22, no. 5-6, pp. 1117-1132, October 2018.
- [8] S. Hannenhalli, “Polynomial-time algorithm for computing translocation distance between genomes,” *Discrete applied mathematics*, vol. 71, no. 1-3, pp. 137-151, December 1996.
- [9] R. Sridhar, M. Chandrasekaran and S. J. I. Raja, “Adaptive Genetic Approach for Optimization of Heterogeneous Bin Packing Problems,” *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 114, no. 12, pp. 247-255, 2017.
- [10] A. C. Alvim, C. C. Ribeiro, F. Glover and D. J. Aloise, “A hybrid improvement heuristic for the one-dimensional bin packing problem,” *Journal of Heuristics*, vol. 10, no. 2, pp. 205-229, March 2004.
- [11] A. Lodi, S. Martello and M. Monaci, “Two-dimensional packing problems: A survey,” *European journal of operational research*, vol. 141, no. 2, pp. 241-252, September 2002.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Y. Wu, W. Li, M. Goh and R. de Souza, "Three-dimensional bin packing problem with variable bin height," *European journal of operational research*, vol. 202, no. 2, pp. 347-355, April 2010.
- [13] M. Delorme, M. Iori and S. Martello, "BPPLIB: a library for bin packing and cutting stock problems," *Optimization Letters*, vol. 12, no. 2, 235-250, March 2018.
- [14] B. Yang, C. Lee, W. Xiang, J. Xie, J. H. He, R. K. Kotlanka and H. Feng, "Electromagnetic energy harvesting from vibrations of multiple frequencies," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 3, pp. 035001, March 2009.
- [15] P. Kennedy, *Preparing for the twenty-first century*. Vintage, 2011. Accessed on: Aug. 3, 2022. [Online]. Available: https://books.google.co.th/books?hl=th&lr=&id=doltXV8UN1oC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Preparing+for+the+twenty-first+century&ots=WXRv1NLkzb&sig=W2Dz8prMKQ9jovoY-8KPBS6Lb-0&redir_esc=y#v=onepage&q=Preparing%20for%20the%20twenty-first%20century&f=false.
- [16] M. Dorigo and C. Blum, "Ant colony optimization theory: A survey," *Theoretical computer science*, vol. 344, no. 2-3, pp. 243-278, November 2005.
- [17] S. L. Tilahun and J. M. T. Ngnotchouye, "Firefly algorithm for discrete optimization problems: A survey. *KSCE Journal of civil Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 535-545, February 2017.
- [18] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 4, pp. 656-667, April 1994.
- [19] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour and S. Saryazdi, "GSA: a gravitational search algorithm," *Information sciences*, vol. 179, no. 13, pp. 2232-2248, June 2009.
- [20] M. Khatibinia and S. Khosravi, "A hybrid approach based on an improved gravitational search algorithm and orthogonal crossover for optimal shape design of concrete gravity dams," *Applied Soft Computing*, vol. 16, pp. 223-233, March 2014.
- [21] B. Yin, Z. Guo, Z. Liang and X. Yue, "Improved gravitational search algorithm with crossover," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 66, pp. 505-516, February 2018.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] S. G. Varun Kumar and R. Panneerselvam, "A study of crossover operators for genetic algorithms to solve VRP and its variants and new sinusoidal motion crossover operator," *International Journal of Computational Intelligence Research*, vol. 13, no. 7, pp. 1717-1733, 2017.
- [23] A. Chatterjee, S. P. Ghoshal and V. Mukherjee, "A maiden application of gravitational search algorithm with wavelet mutation for the solution of economic load dispatch problems," *International Journal of Bio-Inspired Computation*, vol. 4, no. 1, pp. 33-46. January 2012.
- [24] Z. K. Feng, S. Liu, W. J. Niu, Z. Q. Jiang, B. Luo and S. M. Miao, "Multi-objective operation of cascade hydropower reservoirs using TOPSIS and gravitational search algorithm with opposition learning and mutation," *Water*, vol. 11, no. 10, pp. 2040, October 2019.
- [25] M. Lin, Y. Zeng, Y. Wu, Q. Wang, L. Fang, and S. Guo, "GSA-Fuzz: Optimize Seed Mutation with Gravitational Search Algorithm," *Security and Communication Networks*, pp. 1-17, Accessed on: Feb. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/scn/2022/1505842/>.
- [26] K. Jebari and M. Madiafi, "Selection methods for genetic algorithms," *International Journal of Emerging Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 333-344. December 2013.
- [27] S. Katoch, S. S. Chauhan and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 5, pp. 8091-8126, February 2021.
- [28] P. Tharawetcharak, T. Karot and C. Pornsing, "An improved gravitational coefficient function for enhancing gravitational search algorithm's performance," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 261-266, June 2019.
- [29] J. S. Sidhu, H. R. Commandeur and H. W. Volberda, "The multifaceted nature of exploration and exploitation: Value of supply, demand, and spatial search for innovation," *Organization Science*, vol. 18, no. 1, pp. 20-38, February 2007.
- [30] H. Fujiwara, *Algorithmic information. Optimization theory*, 2016. Accessed on: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: <https://hfujiwar a.weebly.com/>.
- [31] S. Srikantaiah, A. Kansal, and F. Zhao, "Energy aware consolidation for cloud computing," 2008. Accessed on: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: https://www.usenix.org/legacy/event/hotpower08/tech/full_papers/srikantaiah/srikantaiah_html/.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [32] M. Delorme, M. Iori and S. Martello, “Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms,” *European Journal of Operational Research*, vol. 255, no. 1, pp. 1-20, November 2016.
- [33] J. V. De Carvalho, “LP models for bin packing and cutting stock problems,” *European Journal of Operational Research*, vol. 141, no. 2, pp. 253-273, September 2002.
- [34] S. Ahuja and R.K. Arya, “Consistent Initialization of the Laplace Transform,” [Online]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1909/1909.07813.pdf>. (Accessed: Jul. 14, 2022).
- [35] H. Stadtler, “A comparison of two optimization procedures for 1-and 1 1/2-dimensional cutting stock problems,” *Operations Research Spectrum*, vol. 10, no. 2, pp. 97-111, June 1988.
- [36] Parallax Inc., “Bin Packing,” [Online]. <https://forums.parallax.com/discussion/154270/i-know-you-think-about-me-before-bedtime>. (Accessed: May. 24, 2022).
- [37] J. A. George, J. M. George and B. W. Lamar, “Packing different-sized circles into a rectangular container,” *European Journal of Operational Research*, vol. 84, no. 3, pp. 693-712, August 1995.
- [38] J. E. Beasley, “An exact two-dimensional non-guillotine cutting tree search procedure,” *Operations Research*, vol. 33, no. 1, pp. 49-64, January-February 1985.
- [39] C. Paquay, M. Schyns, and S. Limbourg, “Three-dimensional Bin Packing Problem applied to air cargo,” *Colloque SIL 2011, Casablanca, December 15th and 16th*, 2011, pp. 1-6. Accessed on: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/107302/1/sil_2011%20Bin%20packing.pdf.
- [40] L. M. Martínez and J.M. Viegas, “A new approach to modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies,” *Journal of Transport Geography*, vol. 26, pp. 87-96, January 2013.
- [41] E. C. Man Jr, M. R. Garey and D. S. Johnson, “Approximation algorithms for bin packing: A survey,” *Approximation algorithms for NP-hard problems*, 1996, pp. 46-93. Accessed on: Jul. 14, 2022. [Online]. <https://www.labri.fr/perso/eyraud/pmwiki/uploads/Main/BinPackingSurvey.pdf>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [42] D. S. Johnson, “Near-optimal bin packing algorithms,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1973.
- [43] Y. J. Darapuneni, “A Survey of Classical and Recent Results in Bin Packing Problem” Ph.D. dissertation, University of Nevada, Las Vegas, USA, 2012.
- [44] P. Ongkunaruk, “Asymptotic worst-case analyses for the open bin packing problem” Ph.D. dissertation, Industrial and Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Virginia, USA, 2005.
- [45] C. Munien, S. Mahabeer, E. Dzitiro, S. Singh, S. Zungu and A. E. S. Ezugwu, “Metaheuristic approaches for one-dimensional bin packing problem: A comparative performance study,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 227438-227465, December 2020.
- [46] A. M. Connor and K. A. Shea, “A comparison of semi-deterministic and stochastic search techniques,” *In Evolutionary Design and Manufacture*, London: Springer, 2000, pp. 287-298.
- [47] R. Hosoya, Z. Ding, and T. Kamioka, “A Bibliographic Network Analysis of Big Data Literature,” [Online]. <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1259&context=pacis2017>. (Accessed: Feb. 10, 2021)
- [48] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica vol. 1*, G. Brookman: T.T. et J. Tegg, Glasguae, Londini, 1833.
- [49] E. Rashedi, E. Rashedi and H. Nezamabadi-Pour, “A comprehensive survey on gravitational search algorithm,” *Swarm and evolutionary computation*, vol. 41, pp. 141-158, August 2018.
- [50] H. Alkhatib and J. Duveau, “Dynamic genetic algorithms for robust design of multimachine power system stabilizers,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 242-251, February 2013.
- [51] S. D. Beigvand, H. Abdi and M. La Scala, “A general model for energy hub economic dispatch,” *Applied Energy*, vol. 190, pp. 1090-1111, March 2017.
- [52] R. K. Khadanga and J. K. Satapathy, “Time delay approach for PSS and SSSC based coordinated controller design using hybrid PSO–GSA algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 71, pp. 262-273, October 2015.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [53] M. Doraghinejad, H. Nezamabadi-Pour and A. Mahani, "Channel assignment in multi-radio wireless mesh networks using an improved gravitational search algorithm," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 38, pp. 163-171, February 2014.
- [54] R. Krishnaprabha and A. Gopakumar, "Performance of gravitational search algorithm in wireless sensor network localization," in *2014 IEEE National Conference on Communication, Signal Processing and Networking*, Palakkad, India, October 10-12, 2014, pp. 1-6.
- [55] V. Sakthivel and E. Elias, "Design of low complexity sharp MDFT filter banks with perfect reconstruction using hybrid harmony-gravitational search algorithm," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 648-657, December 2015.
- [56] M. S. I. B. Aziz, S. W. Nawawi, S. Sudin and N. Abd Wahab, "Exploitation selection of alpha parameter in Gravitational Search Algorithm of PID controller for computational time analysis," in *2014 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Penang, Malaysia, November 28-30, 2014, pp. 112-117.
- [57] P. K. Das, H. S. Behera and B. K. Panigrahi, "A hybridization of an improved particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-robot path planning," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 28, pp. 14-28, June 2016.
- [58] P. B. DE Moura Oliveira, E. S. Pires and P. Novais, "Design of Posicast PID control systems using a gravitational search algorithm," *Neurocomputing*, vol. 167, pp. 18-23, November 2015.
- [59] M. Khajezadeh, M. R. Taha, A. El-Shafie and M. Eslami, "A modified gravitational search algorithm for slope stability analysis," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 8, pp. 1589-1597, December 2012.
- [60] S. Al-Zubaidi, J. A. Ghani and C. H. C. Haron, "Optimization of cutting conditions for end milling of Ti6Al4V Alloy by using a Gravitational Search Algorithm (GSA). *Meccanica*, vol. 48, no. 7, pp. 1701-1715, September 2013.
- [61] A. Singh and K. Deep, "Hybridizing gravitational search algorithm with real coded genetic algorithms for structural engineering design problem," *Opsearch*, vol. 54, no. 3, pp. 505-536, January 2017.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [62] A. A. R. Hosseinabadi, H. Siar, S. Shamshirband, M. Shojafar and M. H. N. M. Nasir, "Using the gravitational emulation local search algorithm to solve the multi-objective flexible dynamic job shop scheduling problem in Small and Medium Enterprises," *Annals of Operations Research*, vol. 229, no. 1, pp. 451-474, December 2015.
- [63] J. Pei, X. Liu, P. M. Pardalos, W. Fan, S. Yang and L. Wang, "Application of an effective modified gravitational search algorithm for the coordinated scheduling problem in a two-stage supply chain," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 335-348, January 2014.
- [64] C. Purcaru, R. E. Precup, D. Iercan, L. O. Fedorovici, E. M. Petriu and E. I. Voisan, "Multi-robot GSA-and PSO-based optimal path planning in static environments," in *9th International Workshop on Robot Motion and Control, IEEE*, Kuslin, Poland, July 03-05, 2013, pp. 197-202.
- [65] D. Whitley, "A genetic algorithm tutorial," *Statistics and computing*, vol. 4, no. 2, pp. 65-85, June 1994.
- [66] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. Accessed on: Aug. 12, 2022. [Online]. Available: <http://web.ist.utl.pt/adriano.simoies/tese/referencias/Michalewicz%20Z.%20Genetic%20Algorithms%20+%20Data%20Structures%20=%20Evolution%20Programs%20%283ed%29.PDF>.
- [67] K. Premalatha and A. M. Natarajan, "Hybrid PSO and GA for global maximization," *International Journal of Open Problems Compt. Math*, vol. 2, no. 4, pp. 597-608, January 2009.
- [68] Z. Michalewicz and M. Schoenauer, "Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems," *Evolutionary computation*, vol. 4, no. 1, 1-32, March 1996.
- [69] J. Zhong, X. Hu, J. Zhang and M. Gu, "Comparison of performance between different selection strategies on simple genetic algorithms," in *International conference on computational intelligence for modelling, control and automation and international conference on intelligent agents, web technologies and internet commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, IEEE, Vienna, Austria, November 28-30, 2005, pp. 1115-1121.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [70] D. E. Goldberg and R. E. Smith, "Nonstationary function optimization using genetic algorithms with dominance and diploidy," *In Genetic algorithms and their applications*, Psychology Press, pp. 59-68, August 2013.
- [71] B. R. Fox and M. B. McMahon, "Genetic operators for sequencing problems," *In Foundations of genetic algorithms*, vol. 1, pp. 284-300, 1991.
- [72] G. Nadakuditi, V. Sharma and R. Naresh, "Non-dominated sorting disruption-based gravitational search algorithm with mutation scheme for multi-objective short-term hydrothermal scheduling," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 9, pp. 990-1004, May 2016.
- [73] Z. K. Feng, S. Liu, W. J. Niu, S. S. Li, H. J. Wu and J. Y. Wang, "Ecological operation of cascade hydropower reservoirs by elite-guide gravitational search algorithm with Lévy flight local search and mutation," *Journal of Hydrology*, vol. 581, pp. 124425, February 2020.
- [74] B. Shaw, V. Mukherjee and S. P. Ghoshal, "A novel opposition-based gravitational search algorithm for combined economic and emission dispatch problems of power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 21-33, February 2012.
- [75] S. Yazdani, H. Nezamabadi-Pour and S. Kamyab, "A gravitational search algorithm for multimodal optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 14, pp. 1-14, February 2014.
- [76] P. Haghbayan, H. Nezamabadi-Pour and S. Kamyab, "A niche GSA method with nearest neighbor scheme for multimodal optimization," *Swarm and evolutionary computation*, vol. 35, pp. 78-92, August 2017.
- [77] S. Surjanovic and D. Bingham, "Virtual library of simulation experiments: Test function and datasets," [Online]. <https://www.sfu.ca/~ssurjano/index.html>. (Accessed: May. 25, 2021).
- [78] A. Scholl and R. Klein, "Bin Packing," [Online]. <https://www2.wiwi.uni-jena.de/Entscheidung/binpp/bin1dat.htm>. (Accessed: May. 25, 2021).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [79] B. Swain, R. Ghosh and P. Borah, “Quantum Evolutionary Algorithm for Solving Bin Packing Problem,” *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 3, pp. 01-07, August 2014.
- [80] ราชกิจจานุเบกษา, “พระราชบัญญัติการขนส่งทางบก 2522,” [Online]. http://fid101.ldd.go.th/Portals/0/xBlog/uploads/2020/4/13/MAN05_1_4_3.pdf. (Accessed: May. 27, 2021).
- [81] ราชกิจจานุเบกษา, “พระราชบัญญัติการขนส่งทางบก 2557 ฉบับที่ 12, 131(83ก),” [Online]. <https://dl.parliament.go.th/handle/20.500.13072/414128>. (Accessed: May. 27, 2021).
- [82] ราชกิจจานุเบกษา, กฎกระทรวง, “ออกตามความในพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก พ.ศ. 2522. ฉบับที่ 63, 138(16ก),” <https://dl.parliament.go.th/handle/20.500.13072/577431>. (Accessed: May. 27, 2021).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

ในงานวิจัยของ Scholl และ Klein (2003); Swain, Ghosh และ Borah (2014)

1. กรณีปัญหาแบบง่าย

กรณีปัญหาแบบง่าย จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ $NxCyWz_v$ เมื่อ $x=1$ (สำหรับ $n=50$), $x=2$ ($n=100$), $x=3$ ($n=200$), $x=4$ ($n=500$), $y=1$ (สำหรับ $c=100$), $y=2$ ($c=120$), $y=3$ ($c=150$), $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[1, 100]$), $z=2$ ($[20, 100]$), $z=3$ ($[30, 100]$), $z=4$ ($[30, 100]$) และ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (A ... T) (Instances of Each Class) ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์หนึ่งมิติแบบง่าย

ลำดับ	$N1C1W1_C$	$N1C2W1_B$	$N2C1W1_A$	$N2C2W2_A$
	50 items	50 items	100 items	100 items
	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin
1	92	99	99	100
2	89	96	97	100
3	87	96	95	98
4	84	96	95	95
5	82	95	94	94
6	82	95	92	94
7	81	94	91	93
8	75	90	89	93
9	73	90	86	93
10	71	88	86	92
11	67	87	85	90
12	67	84	84	90
13	63	82	80	90
14	59	78	80	89
15	57	77	80	88
16	56	77	80	87
17	52	77	80	87
18	49	75	79	86
19	48	75	76	86
20	47	70	76	84
21	46	70	75	84
22	41	69	74	83

ลำดับ	N1C1W1 _C	N1C2W1 _B	N2C1W1 _A	N2C2W2 _A
	50 items	50 items	100 items	100 items
	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin
23	39	68	73	82
24	38	56	71	82
25	36	54	71	81
26	35	53	69	80
27	34	53	65	79
28	34	50	64	79
29	30	50	64	79
30	29	49	64	77
31	26	48	63	77
32	21	47	63	76
33	20	45	62	75
34	19	38	60	75
35	18	36	59	75
36	15	35	58	75
37	15	34	57	74
38	13	28	54	73
39	11	25	53	71
40	10	21	52	69
41	10	19	51	69
42	10	18	50	68
43	9	16	48	65
44	8	13	48	63
45	8	13	48	60
46	7	7	46	59
47	6	7	44	59
48	6	6	43	58
49	6	3	43	57
50	3	3	43	57
51			43	56
52			42	56
53			41	56
54			40	56

ลำดับ	N1C1W1 _C	N1C2W1 _B	N2C1W1 _A	N2C2W2 _A
	50 items	50 items	100 items	100 items
	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin
55			40	55
56			39	55
57			38	54
58			38	54
59			38	54
60			38	54
61			37	50
62			37	50
63			37	49
64			37	48
65			36	48
66			35	48
67			34	45
68			33	45
69			32	44
70			30	44
71			29	43
72			28	43
73			26	39
74			26	38
75			26	38
76			24	37
77			23	37
78			22	37
79			21	37
80			21	36
81			19	36
82			18	33
83			17	33
84			16	31
85			16	29
86			15	28

ลำดับ	N1C1W1 _C	N1C2W1 _B	N2C1W1 _A	N2C2W2 _A
	50 items	50 items	100 items	100 items
	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin	100 Capacity of Each Bin	120 Capacity of Each Bin
87			14	27
88			13	27
89			12	26
90			12	26
91			11	26
92			9	26
93			9	25
94			8	25
95			8	25
96			7	23
97			6	23
98			6	23
99			5	22
100			1	22

2. กรณีปัญหาแบบปานกลาง

กรณีปัญหาแบบปานกลาง จำนวน 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 $c=1,000$), $y=2$ ($c=1,000$), $y=3$ ($c=1,000$), $y=4$ ($c=1,000$), $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[200, 400]$), $z=2$ ($[200, 300]$) และ v คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (0...9) (Instances of Each Class) ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์หนึ่งมิติแบบปานกลาง

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
1	393	394	299	168
2	390	393	299	168
3	390	393	298	168
4	389	392	298	168
5	386	391	296	168
6	382	391	295	167
7	381	390	295	167
8	381	389	292	167
9	381	389	291	167
10	380	389	289	167
11	379	387	289	167
12	379	387	289	167
13	377	387	288	167
14	375	387	287	167
15	372	387	287	167
16	370	387	285	167
17	368	385	285	167
18	368	384	285	167
19	367	383	282	167
20	366	382	281	167
21	366	382	280	167
22	365	382	280	166
23	365	381	278	166
24	363	380	277	166
25	361	380	277	166
26	359	380	276	166
27	359	379	275	166
28	357	378	272	166
29	357	378	271	166
30	356	378	271	166

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
31	355	378	269	166
32	355	377	269	166
33	355	376	268	165
34	353	376	265	165
35	352	374	264	165
36	352	373	261	165
37	347	373	260	165
38	347	372	260	165
39	346	371	260	165
40	344	371	260	165
41	344	371	259	165
42	341	371	258	165
43	337	370	257	164
44	336	370	255	164
45	334	370	254	164
46	334	369	251	164
47	333	369	251	164
48	333	369	250	164
49	333	368	250	163
50	332	368	247	163
51	332	367	247	163
52	329	367	240	163
53	328	365	239	163
54	326	365	238	163
55	326	364	237	162
56	324	364	237	162
57	324	364	236	162
58	319	363	236	162
59	319	363	236	162
60	318	362	236	162
61	316	362	235	162
62	312	360	234	162

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
63	312	360	234	162
64	311	360	231	162
65	310	359	231	162
66	309	359	230	161
67	307	358	227	161
68	306	357	227	161
69	305	356	227	161
70	305	356	226	161
71	301	355	225	161
72	300	354	225	161
73	299	354	225	161
74	298	353	223	161
75	298	353	223	161
76	296	352	218	161
77	296	351	217	161
78	294	349	217	161
79	292	349	216	161
80	290	348	216	161
81	289	347	215	160
82	289	346	215	160
83	286	346	214	160
84	284	343	213	160
85	284	343	212	160
86	283	342	212	160
87	281	342	210	160
88	280	342	207	160
89	278	341	207	160
90	278	341	206	160
91	277	340	204	160
92	277	340	202	160
93	273	339	202	160
94	273	339	201	160

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
95	272	338	200	159
96	271	338	198	159
97	269	338	195	159
98	268	337	194	159
99	268	336	193	159
100	267	336	191	159
101		335	191	159
102		333	188	159
103		333	188	159
104		332	186	159
105		332	185	159
106		331	185	159
107		329	183	159
108		328	183	159
109		326	181	159
110		326	179	158
111		326	179	158
112		325	177	158
113		325	176	158
114		325	175	157
115		323	174	157
116		323	174	157
117		323	173	157
118		322	170	157
119		322	169	157
120		321	169	156
121		320	166	156
122		319	166	156
123		319	165	156
124		318	163	156
125		318	161	156
126		315	161	156

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
127		315	160	156
128		314	159	156
129		314	158	156
130		313	158	155
131		313	156	155
132		311	156	155
133		310	156	155
134		310	153	155
135		309	153	155
136		309	153	155
137		309	150	155
138		309	149	155
139		308	147	155
140		308	146	155
141		307	146	154
142		306	145	154
143		306	145	154
144		306	141	154
145		305	140	154
146		305	139	154
147		302	138	153
148		301	137	153
149		299	137	153
150		299	136	153
151		299	136	153
152		299	135	153
153		298	134	153
154		297	134	153
155		296	134	152
156		296	132	152
157		296	132	152
158		296	131	152

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
159		295	130	152
160		294	130	152
161		294	130	152
162		294	129	152
163		292	128	151
164		292	128	151
165		291	128	151
166		290	127	151
167		290	126	151
168		289	125	151
169		288	124	151
170		286	124	151
171		285	122	150
172		285	121	150
173		285	121	150
174		284	121	150
175		283	119	150
176		282	119	150
177		282	117	149
178		282	117	149
179		280	116	149
180		280	116	149
181		280	114	149
182		279	114	149
183		278	114	149
184		277	113	149
185		277	112	149
186		277	112	149
187		277	111	149
188		275	111	149
189		275	110	148
190		275	110	148

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
191		274	108	148
192		273	107	148
193		273	106	148
194		272	105	148
195		272	105	148
196		271	104	148
197		270	104	148
198		270	104	148
199		269	103	148
200		268	102	148
201				147
202				147
203				147
204				147
205				147
206				147
207				147
208				147
209				147
210				146
211				146
212				146
213				146
214				146
215				146
216				146
217				146
218				146
219				146
220				146
221				146
222				146

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
223				146
224				145
225				145
226				145
227				145
228				145
229				145
230				145
231				145
232				145
233				144
234				144
235				144
236				144
237				143
238				143
239				143
240				143
241				143
242				143
243				143
244				142
245				142
246				142
247				142
248				142
249				142
250				142
251				141
252				141
253				141
254				141

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
255				141
256				141
257				141
258				141
259				141
260				141
261				141
262				141
263				141
264				141
265				141
266				140
267				140
268				140
269				140
270				140
271				139
272				139
273				139
274				139
275				139
276				139
277				139
278				139
279				138
280				138
281				138
282				138
283				138
284				138
285				138
286				138

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
287				138
288				137
289				137
290				137
291				137
292				137
293				137
294				137
295				137
296				137
297				136
298				136
299				136
300				136
301				136
302				136
303				136
304				136
305				136
306				136
307				136
308				135
309				135
310				135
311				135
312				135
313				135
314				135
315				135
316				135
317				135
318				135

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
319				134
320				134
321				134
322				134
323				134
324				134
325				134
326				134
327				134
328				134
329				134
330				134
331				134
332				134
333				134
334				133
335				133
336				133
337				133
338				133
339				133
340				133
341				133
342				133
343				132
344				132
345				132
346				132
347				132
348				132
349				132
350				131

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
351				131
352				131
353				131
354				131
355				131
356				131
357				130
358				130
359				130
360				130
361				130
362				130
363				130
364				130
365				129
366				129
367				129
368				129
369				129
370				129
371				129
372				129
373				129
374				129
375				129
376				128
377				128
378				128
379				128
380				128
381				128
382				127

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
383				127
384				127
385				127
386				127
387				126
388				126
389				126
390				126
391				126
392				126
393				126
394				126
395				126
396				126
397				125
398				125
399				125
400				125
401				125
402				125
403				124
404				124
405				124
406				124
407				124
408				124
409				124
410				124
411				124
412				124
413				124
414				124

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
415				123
416				123
417				123
418				123
419				123
420				123
421				122
422				122
423				122
424				122
425				122
426				122
427				122
428				121
429				121
430				121
431				121
432				121
433				121
434				121
435				121
436				121
437				121
438				121
439				121
440				120
441				120
442				120
443				120
444				120
445				120
446				120

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
447				120
448				120
449				119
450				119
451				119
452				119
453				119
454				119
455				119
456				119
457				119
458				118
459				118
460				118
461				118
462				118
463				118
464				118
465				118
466				118
467				118
468				118
469				118
470				118
471				118
472				118
473				118
474				117
475				117
476				117
477				117
478				117

ลำดับ	N2W1B1R0	N3W1B1R1	N3W2B2R2	N4W3B1R2
	100 items	200 items	200 items	500 items
	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin	1,000 Capacity of Each Bin
479				117
480				117
481				117
482				116
483				116
484				116
485				116
486				116
487				116
488				116
489				116
490				115
491				115
492				115
493				115
494				114
495				114
496				114
497				114
498				114
499				114
500				114

3. กรณีปัญหาแบบยาก

กรณีปัญหาแบบยาก จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อตัวอย่างปัญหา คือ **HARD_v** เมื่อ **v** คือ ลำดับของแต่ละปัญหาตัวอย่าง (0...9) (Instances of Each Class) ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์หนึ่งมิติแบบยาก

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
1	34,978	35,000	34,973	34,991
2	34,849	34,970	34,910	34,941
3	34,703	34,839	34,885	34,922
4	34,608	34,733	34,807	34,866
5	34,598	34,369	34,720	34,849
6	34,524	34,328	34,655	34,771
7	34,356	34,237	34,630	34,768
8	34,308	34,229	34,613	34,748
9	34,069	34,225	34,536	34,544
10	34,049	34,197	34,230	34,358
11	33,895	34,154	34,226	34,254
12	33,842	34,002	34,172	34,155
13	33,806	33,988	34,069	34,098
14	33,738	33,977	34,069	34,076
15	33,716	33,958	34,066	34,055
16	33,590	33,934	33,902	34,048
17	33,546	33,891	33,843	34,029
18	33,507	33,839	33,761	33,990
19	33,468	33,471	33,637	33,871
20	33,465	33,218	33,632	33,780
21	33,383	33,149	33,429	33,750
22	33,190	32,979	33,351	33,654
23	33,075	32,940	33,343	33,612
24	32,976	32,936	33,303	33,581
25	32,897	32,912	33,300	33,430
26	32,762	32,902	33,259	33,260
27	32,696	32,900	33,070	33,197
28	32,638	32,885	33,045	33,155
29	32,553	32,802	33,022	33,115
30	32,398	32,802	32,986	33,007

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
31	32,230	32,802	32,881	32,989
32	32,176	32,708	32,785	32,795
33	31,967	32,637	32,759	32,708
34	31,954	32,415	32,649	32,394
35	31,903	32,403	32,583	32,384
36	31,782	32,200	32,560	32,309
37	31,724	32,110	32,558	32,193
38	31,686	32,068	32,545	32,039
39	31,597	32,067	32,380	32,038
40	31,561	32,058	32,332	32,008
41	31,532	31,950	32,297	31,995
42	31,499	31,946	32,113	31,961
43	31,346	31,923	32,077	31,946
44	30,943	31,919	31,943	31,865
45	30,915	31,690	31,916	31,839
46	30,869	31,624	31,787	31,829
47	30,766	31,562	31,770	31,692
48	30,683	31,482	31,719	31,633
49	30,678	31,475	31,718	31,354
50	30,644	31,450	31,701	31,169
51	30,559	31,432	31,652	31,141
52	30,448	31,405	31,641	31,006
53	30,315	31,363	31,470	30,929
54	30,238	31,187	31,269	30,843
55	30,125	31,107	31,227	30,842
56	29,974	31,088	31,138	30,807
57	29,947	30,940	31,006	30,741
58	29,890	30,873	30,831	30,514
59	29,886	30,866	30,828	30,395
60	29,858	30,750	30,814	30,387
61	29,856	30,538	30,582	30,341
62	29,783	30,527	30,580	30,296

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
63	29,697	30,497	30,561	30,287
64	29,438	30,370	30,379	30,284
65	29,427	30,347	30,371	30,140
66	29,301	30,290	30,339	30,135
67	29,174	30,156	30,150	30,063
68	29,173	30,140	30,125	29,975
69	29,123	30,118	30,104	29,933
70	29,117	30,051	30,098	29,859
71	29,116	29,845	30,075	29,735
72	29,095	29,750	30,039	29,730
73	29,094	29,654	29,907	29,703
74	29,063	29,646	29,860	29,525
75	29,041	29,552	29,627	29,518
76	29,038	29,512	29,547	29,423
77	28,977	29,415	29,532	29,378
78	28,946	29,403	29,516	29,234
79	28,921	29,382	29,404	29,218
80	28,910	29,300	29,313	29,178
81	28,842	29,271	29,268	29,092
82	28,703	29,151	29,186	29,089
83	28,360	29,131	29,179	28,947
84	28,350	28,998	29,139	28,647
85	28,305	28,951	29,051	28,574
86	28,302	28,937	28,932	28,550
87	28,225	28,867	28,820	28,547
88	28,160	28,821	28,716	28,471
89	28,094	28,820	28,692	28,461
90	28,040	28,724	28,436	28,299
91	28,020	28,696	28,360	28,267
92	27,901	28,489	28,321	28,252
93	27,775	28,380	28,298	28,251
94	27,765	28,267	28,086	28,159

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
95	27,688	28,252	27,954	28,009
96	27,439	28,225	27,911	28,003
97	27,425	28,223	27,758	27,967
98	27,394	28,105	27,642	27,852
99	27,365	28,104	27,627	27,811
100	27,349	28,044	27,616	27,664
101	27,284	27,900	27,464	27,508
102	27,180	27,864	27,393	27,413
103	26,935	27,699	27,334	27,409
104	26,881	27,668	27,321	27,184
105	26,867	27,661	27,202	27,162
106	26,795	27,593	27,080	27,113
107	26,703	27,589	27,032	27,099
108	26,651	27,570	26,978	27,048
109	26,550	27,497	26,794	27,041
110	26,432	27,416	26,705	26,733
111	26,375	27,322	26,671	26,506
112	26,368	27,287	26,630	26,362
113	26,244	27,271	26,449	26,183
114	26,204	27,221	26,409	25,997
115	26,192	26,975	26,354	25,976
116	26,181	26,881	26,345	25,897
117	26,158	26,813	26,307	25,856
118	26,133	26,692	26,278	25,784
119	26,067	26,591	26,192	25,700
120	25,945	26,520	26,188	25,668
121	25,906	26,432	26,112	25,641
122	25,759	26,337	26,014	25,522
123	25,698	26,290	25,959	25,490
124	25,688	26,289	25,808	25,433
125	25,652	26,219	25,806	25,408
126	25,615	25,966	25,741	25,322

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
127	25,530	25,822	25,655	25,299
128	25,528	25,563	25,640	25,237
129	25,366	25,546	25,611	25,091
130	25,324	25,461	25,609	25,057
131	25,273	25,442	25,491	25,015
132	25,142	25,361	25,344	24,990
133	24,852	25,356	25,233	24,974
134	24,846	25,281	25,134	24,939
135	24,658	25,259	25,028	24,834
136	24,592	25,122	24,967	24,777
137	24,564	25,078	24,931	24,743
138	24,463	25,024	24,870	24,625
139	24,457	24,793	24,584	24,555
140	24,374	24,790	24,512	24,449
141	24,359	24,789	24,507	24,367
142	24,332	24,721	24,476	24,340
143	23,987	24,714	24,424	24,329
144	23,956	24,424	24,413	24,126
145	23,952	24,413	24,382	24,085
146	23,932	24,341	24,363	24,050
147	23,895	24,325	24,356	24,020
148	23,837	24,234	24,200	23,999
149	23,795	24,198	24,129	23,989
150	23,774	24,149	24,089	23,974
151	23,663	24,092	24,064	23,928
152	23,621	23,920	24,043	23,837
153	23,502	23,907	23,991	23,836
154	23,453	23,864	23,866	23,565
155	23,430	23,811	23,765	23,491
156	23,366	23,799	23,632	23,422
157	23,178	23,781	23,595	23,417
158	23,090	23,671	23,547	23,205

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
159	22,991	23,662	23,483	23,195
160	22,942	23,493	23,378	23,156
161	22,743	23,299	23,335	23,092
162	22,442	23,206	23,324	22,712
163	22,432	23,162	23,302	22,644
164	22,415	23,139	23,232	22,417
165	22,338	23,119	23,224	22,392
166	22,134	23,013	23,147	22,281
167	22,081	22,984	23,088	22,239
168	22,014	22,983	22,948	22,212
169	21,950	22,872	22,922	22,067
170	21,948	22,846	22,886	22,045
171	21,796	22,771	22,778	22,042
172	21,784	22,533	22,618	22,003
173	21,727	22,467	22,513	21,866
174	21,722	22,246	22,487	21,851
175	21,557	22,237	22,450	21,849
176	21,498	22,217	22,433	21,713
177	21,480	22,166	22,345	21,674
178	21,315	22,143	22,237	21,608
179	21,193	22,140	22,232	21,607
180	21,127	22,095	22,149	21,594
181	21,060	22,045	22,041	21,401
182	20,997	21,930	21,753	21,296
183	20,837	21,774	21,720	21,239
184	20,813	21,753	21,711	21,180
185	20,693	21,744	21,649	21,128
186	20,693	21,500	21,634	21,059
187	20,686	21,369	21,577	20,954
188	20,677	21,289	21,473	20,948
189	20,676	20,986	21,472	20,947
190	20,664	20,971	20,895	20,813

ลำดับ	HARD0	HARD4	HARD6	HARD9
	200 items	200 items	200 items	200 items
	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin	100,000 Capacity of Each Bin
191	20,663	20,920	20,817	20,755
192	20,634	20,899	20,619	20,725
193	20,616	20,897	20,613	20,693
194	20,570	20,892	20,598	20,585
195	20,566	20,788	20,565	20,513
196	20,496	20,774	20,433	20,431
197	20,441	20,738	20,395	20,338
198	20,307	20,368	20,348	20,310
199	20,226	20,299	20,081	20,296
200	20,114	20,139	20,050	20,081

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ

จากกรณีศึกษาบริษัทขนส่งมาตรฐานตัวอย่างในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

1. กรณีปัญหาแบบง่าย

กรณีปัญหาแบบง่าย จำนวน 2 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $N \times C \times W \times z$ เมื่อ $x=1$ (สำหรับ $n=500$), $x=2$ ($n=1,300$), $y=1$ (สำหรับ $c=1,500$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[5, 30]$) ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบง่ายในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

ปัญหาแบบง่าย	N1C1W1					
	500 items					
	1,500 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	40	120	150	30	110	50
ปัญหาแบบง่าย	N2C1W1					
	1,300 items					
	1,500 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	120	160	450	90	330	150

2. กรณีปัญหาแบบปานกลาง

กรณีปัญหาแบบปานกลาง จำนวน 4 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $N \times C \times W \times z$ เมื่อ $x=3$ (สำหรับ $n=1,000$), $x=4$ ($n=10,000$), $y=2$ (สำหรับ $c=9,000$), $y=3$ ($c=16,000$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[5, 30]$) ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบปานกลางในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

ปัญหา แบบปานกลาง	N3C2W1					
	1,000 items					
	9,000 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	80	240	300	60	220	100
ปัญหาแบบปานกลาง	N3C3W1					
	1,000 items					
	16,000 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	80	240	300	60	220	100
ปัญหาแบบปานกลาง	N4C2W1					
	10,000 items					
	9,000 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	800	2,400	3,000	600	2,200	1,000
ปัญหาแบบปานกลาง	N4C3W1					
	10,000 items					
	16,000 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	800	2,400	3,000	600	2,200	1,000

3. กรณีปัญหาแบบยาก

กรณีปัญหาแบบยาก จำนวน 2 ปัญหา โดยมีการกำหนดความหมายของชื่อปัญหา คือ $NxCyWz$ เมื่อ $x=5$ (สำหรับ $n=10,000$), $x=6$ ($n=20,000$), $y=4$ (สำหรับ $c=25,000$) และ $z=1$ (สำหรับ w_j จาก $[5, 30]$) ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติแบบยากในภาคอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

ปัญหาแบบยาก	N5C4W1					
	10,000 items					
	25,000 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	800	2,400	3,000	600	2,200	1,000
ปัญหาแบบยาก	N6C4W1					
	20,000 items					
	25,000 Capacity of Each Bin (Kg.)					
ชนิด items	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
น้ำหนัก items (Kg.)	20	5	10	30	15	25
จำนวน items (ชิ้น)	1,600	4,800	6,000	1,200	4,400	2,000

ภาคผนวก ค
การพัฒนาตนเอง

1. ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยเรื่อง “A Hybrid New Gravitational Coefficient Function of Gravitational Search Algorithm with Mutation for Search Performance” ในวารสาร International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 หน้า 1-12 (13A1J) อยู่ในฐานข้อมูล Web of Science ระดับ Q3
2. ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาฟังก์ชันการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความโน้มถ่วงแบบใหม่ ในขั้นตอนวิธีการค้นหาความโน้มถ่วงสำหรับปัญหาการบรรจุผลิตภัณฑ์แบบหนึ่งมิติ” ในวารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 13 ฉบับที่ 36 ประจำเดือนมกราคม-เมษายน 2566 อยู่ในฐานข้อมูล Thai-Journal Citation Index Centre: TCI กลุ่มที่ 1

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล ภัทรเวช ธาราเวชรักษ์

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมขั้นสูงและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2561 – ปัจจุบัน - ตำแหน่งอาจารย์สังกัดงานวิชาศึกษาทั่วไป
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
พ.ศ. 2561 – ปัจจุบัน - ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
พ.ศ. 2560 - พ.ศ. 2561- ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาอุตสาหกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จังหวัดราชบุรี