

ชื่อโครงการวิจัย: ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดแบบขนานสำหรับการหาเส้นทางการเดินทางได้ความไม่แน่นอน

หัวหน้าโครงการวิจัย: อาจารย์ รณน เจียรตระกูล

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดแบบขนานสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบสโทแคสติก ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบสโทแคสติกเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับในการส่งสินค้าของรถบรรทุกสินค้า เพื่อให้มีต้นทุนการขนส่งที่น้อยที่สุด ภายใต้ความจุของรถบรรทุก และปริมาณความต้องการของลูกค้าที่ไม่ทราบค่าล่วงหน้า ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดใช้หลักการเลียนแบบการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของมด ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาโดยใช้ภาษา C++ ภายใต้ระบบคอมพิวเตอร์แบบกริด (Computational Grid) โดยอาศัยหลักการทำงานแบบนาย-บ่าว (Master-Workers) ทำการประมวลผลแบบขนานบนเครื่องคอมพิวเตอร์หลายๆ เครื่อง โดยการส่งมดจำลองหลายตัวออกไปค้นหาคำตอบพร้อมกัน และทำการประเมินต้นทุนการขนส่งด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอโดยใช้ตัวอย่างปัญหาจากรถบรรทุกที่เกี่ยวข้อง โดยใช้รูปแบบการแจกแจงแบบเอกรูปสำหรับปริมาณความต้องการสินค้าที่ไม่ทราบค่าแน่นอน ซึ่งได้ผลที่อยู่ในระดับดีมาก

600272799

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Topic: Parallel ant colony optimization algorithm for the vehicle routing problem under uncertainty

Head of Research Team: Mr. Ranon Jientrakul

Industrial Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

In this paper, an ant colony optimization (ACO) method for solving the vehicle routing problem with stochastic demands (VRPSD) is presented. The vehicle routing problem with stochastic demands concerns with finding the sequence of customers for product delivery within the vehicle routes. The objective is to minimize the total transportation cost, subject to the vehicle capacity and the unknown customer demands. The algorithm mimics the behavior of ants in finding the shortest path for food. The algorithm is implemented in C++ on a computational grid environment by using the Master-Worker (MW) framework. In the parallel implementation of the ACO algorithm, multiple artificial ants are sent for constructing solution on multiple processors, and the solution is evaluated by using the Monte-carlo sampling technique. Problem instances from the related literatures are used for testing the performance of the algorithm. The uniform distribution is used to generate the random demands from the customers. Computational results showed that our method is very effective.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 ปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง	3
2.2 ประเภทของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางทั่วไป	4
2.3 ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบพลวัต	4
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)	5
2.4.1 การแก้ปัญหา VRP	6
2.4.2 การแก้ปัญหา VRP ด้วยวิธีฮิวริสติก	7
2.4.1 การแก้ปัญหา VRP ด้วยขั้นตอนวิธีแบบขนาน	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	9
3.1 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO)	11
3.1.1 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง	12
3.1.2 การค้นหาคำตอบ	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การปรับปรุงค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน (Pheromone update).....	15
3.1.4 การสิ้นสุดการทำงาน.....	15
3.2 การสุ่มตัวอย่าง (Sampling Method).....	16
3.3 การพัฒนาขั้นตอนวิธีในระบบคอมพิวเตอร์แบบขนาน.....	16
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	19
4.1 ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล.....	19
4.2 ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	21
4.3 การทดลองและผลการทดลอง.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	32
5.2 ทิศทางการทำวิจัยในอนาคต.....	33
บรรณานุกรม.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของปัญหาทดสอบ.....	21
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างรูปแบบของปัญหา.....	22
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ.....	23
ตารางที่ 4.4 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีเชิงกำหนด.....	25
ตารางที่ 4.5 สถิติการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.1 ขนาดตัวอย่าง 50	26
ตารางที่ 4.6 สถิติการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.1 ขนาดตัวอย่าง 200	27
ตารางที่ 4.7 สถิติการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.1 ขนาดตัวอย่าง 1000 ...	28
ตารางที่ 4.8 สถิติการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.2 ขนาดตัวอย่าง 50	29
ตารางที่ 4.9 สถิติการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.2 ขนาดตัวอย่าง 200	30
ตารางที่ 4.10 สถิติการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.2 ขนาดตัวอย่าง 1000.	31



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง 3	3
รูปที่ 3.1 ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์..... 10	10
รูปที่ 3.2 การออกเดินทางค้นหาแหล่งอาหารของมด 11	11
รูปที่ 3.3 เมื่อมดพบแหล่งอาหาร 12	12
รูปที่ 3.4 การทิ้งสารฟีโรโมนบนเส้นทางกลับรัง 12	12
รูปที่ 3.5 การตามรอยสารฟีโรโมนของมดไปสู่แหล่งอาหาร..... 12	12
รูปที่ 3.6 การเลือกเส้นทางของมดตามความเข้มข้นของสารฟีโรโมน..... 12	12
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง..... 13	13
รูปที่ 3.8 ผังการทำงานของโปรแกรมหลักและโปรแกรมงานย่อย..... 18	18
รูปที่ 4.1 แบบโครงสร้างของระบบคอมพิวเตอร์..... 20	20
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น..... 20	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

การจัดเส้นทางรถเดินทางเป็นปัญหาที่มีความสำคัญต่อธุรกิจและอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เนื่องจากการขนส่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับกิจกรรมหลายๆ ส่วน ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต และการจัดจำหน่าย การบริหารจัดการเส้นทางรถที่ดี ย่อมทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง ทำให้เพิ่มศักยภาพในการแข่งขันในเชิงธุรกิจและอุตสาหกรรม

การวางแผนเส้นทางรถที่มีศักยภาพจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่น่าเชื่อถือ รวมทั้งเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการสนับสนุนการตัดสินใจ อย่างไรก็ตาม ในสภาพความเป็นจริง ปัจจัยความไม่แน่นอนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ อาทิเช่น ปริมาณอุปสงค์ของลูกค้าที่อาจมีการเปลี่ยนแปลง สภาพการจราจรที่ได้รับผลกระทบจากสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นต้น ดังนั้น ผู้ประกอบการจึงต้องมีทรัพยากรสำรองเพื่อรับมือกับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับผู้ประกอบการทั้งในด้านการผลิตและการขนส่ง รวมทั้งทำให้ประสิทธิภาพหรือระดับในการให้บริการลูกค้าลดลง นอกจากนี้ การวางแผนเส้นทางรถยังต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้วางแผนที่สูง โดยเฉพาะในระบบโลจิสติกส์ (Logistics) ที่ประกอบด้วยยานพาหนะเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ช่วยในการวางแผนและสนับสนุนการตัดสินใจ อาทิเช่น การจำลองสถานการณ์ การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการตัดสินใจ เป็นต้น

แบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่นิยมนำมาช่วยแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถ เนื่องจากสามารถหาคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดได้ (Optimal Solution) อย่างไรก็ตาม การแก้ปัญหาโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ยังคงมีปัญหาสำหรับปัญหาการเดินรถที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากไม่สามารถหาคำตอบได้ในเวลาที่จำกัด หรืออาจไม่สามารถหาคำตอบได้ โดยเฉพาะกับปัญหาการจัดเส้นทางรถที่คำนึงถึงปัจจัยความไม่แน่นอน ซึ่งมีความซับซ้อนอย่างมากเมื่อเทียบกับการจัดเส้นทางรถทั่วไป เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิธีการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Methods) จึงได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการเดินรถและได้รับความนิยมในเชิงปฏิบัติ

วิธีการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติกมีหลากหลายวิธี อาทิเช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) การค้นหาแบบทาบู (Tabu Search) ขั้นตอนวิธีอาณานิคม เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยนำเสนอการแก้ปัญหาการเดินรถโดยใช้วิธีอาณานิคม เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพในการค้นหาเส้นทาง อีกทั้งยังสามารถพัฒนาให้ค้นหาคำตอบบนระบบคอมพิวเตอร์แบบขนานได้ง่าย

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัญหาการกำหนดเส้นทางการเดินรถภายใต้ความไม่แน่นอน
2. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีที่สามารถแก้ปัญหาการเดินรถภายใต้ความไม่แน่นอนในระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาการกำหนดเส้นทางการเดินรถภายใต้ความต้องการของอุปสงค์ที่มีค่าไม่แน่นอน
2. พัฒนาขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการกำหนดเส้นทางการเดินรถโดยใช้ระบบการประมวลผลแบบขนาน
3. เปรียบเทียบผลการทดลองกับปัญหาที่เกี่ยวข้องในวรรณกรรมทั้งในด้านของคุณภาพของคำตอบและเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

1.4. ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการกำหนดเส้นทางการขนส่ง เพื่อให้ได้ลำดับการเดินรถที่มีประสิทธิภาพ
2. สามารถลดต้นทุนในการขนส่ง รวมทั้งเวลาในการขนส่งได้

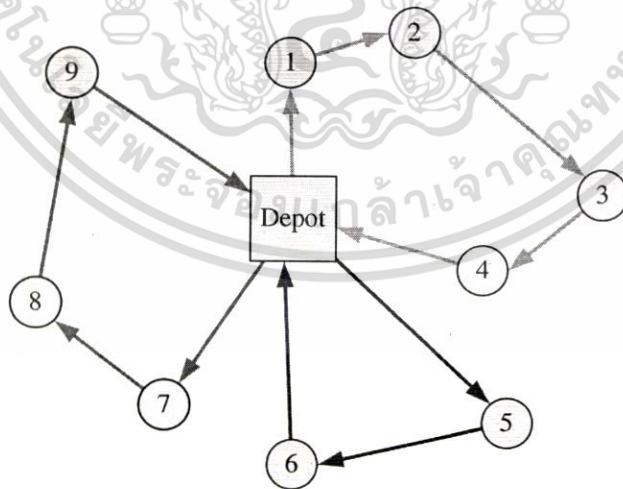
บทที่ 2

ปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาการจัดเส้นทางรถ

ปัญหาการจัดเส้นทางรถ (Vehicle Routing Problem, VRP) เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งสินค้าระหว่างคลังสินค้า (Depot) และลูกค้าโดยใช้นยานพาหนะหรือรถบรรทุก ตัวอย่างเช่น การขนส่งพัสดุ การจัดเก็บขยะ การรับส่งนักเรียน การรับส่งพนักงาน เป็นต้น ปัญหาการจัดเส้นทางรถถือเป็นปัญหาที่มีความสำคัญในระบบห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain System) เนื่องจากมีผลกระทบต่อต้นทุนของสินค้าและบริการที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น การหาเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายต่ำจึงเป็นประเด็นสำคัญในการวางแผนทรัพยากรองค์กร (Enterprise Resource Planning) ซึ่งได้มีการศึกษาและพัฒนาซอฟต์แวร์อย่างจริงจังในต้นทศวรรษ 1990 (Aksoy & Derbez, 2003)

ปัญหาการจัดเส้นทางรถจัดอยู่ในประเภทของปัญหาเชิงการจัด (Combinatorial Optimization Problems) โดยมีเป้าหมายเพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการขนส่งสินค้าไปให้กับลูกค้า ซึ่งเป้าหมายที่ดีที่สุดอาจแตกต่างกันไปตามลักษณะของปัญหาและการนำไปใช้งาน เช่น เพื่อให้ระยะทางรวมที่สั้นที่สุด เพื่อให้ต้นทุนการขนส่งน้อยที่สุด หรือเพื่อใช้จำนวนรถหรือเวลาในการขนส่งน้อยที่สุด เป็นต้น การจัดเส้นทางรถจะต้องเป็นไปตามที่เงื่อนไขบังคับ (Constraints) ยกตัวอย่างเช่น เงื่อนไขความจุของยานพาหนะ (Vehicle Capacity Constraint) เงื่อนไขของกรอบเวลาในการรับส่งสินค้า (Time Window Constraint) เงื่อนไขของระยะทาง (Distance Constraint)



รูปที่ 1 ตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง ซึ่งประกอบด้วยคลังสินค้าหนึ่งแห่งและเส้นทางขนส่งสินค้าสามเส้นทาง โดยรถขนส่งสินค้าแต่ละคันจะออกจากคลังสินค้า ไปส่งสินค้าตามเส้นทางที่กำหนดไว้ แล้วกลับมาที่คลังสินค้า เช่น เส้นทางสีเขียว จะต้องไปส่งสินค้าให้แก่ลูกค้าหมายเลข 1 2 3 4 ตามลำดับ เป็นต้น

2.2 ประเภทของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางทั่วไป

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบพื้นฐานสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะเงื่อนไขของปัญหา เช่น ความจุของยานพาหนะที่ใช้ เวลาในการส่งมอบสินค้า และรูปแบบของการรับส่งสินค้า

ปัญหาการจัดเส้นทางแบบระบุความจุของยานพาหนะ (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) เป็นรูปแบบปัญหาขั้นพื้นฐานของ VRP ซึ่งยานพาหนะที่ใช้จะมีความจุในการบรรทุกสินค้าจำกัด ปริมาณความต้องการของลูกค้าจะถูกกำหนดค่าไว้ล่วงหน้า และลูกค้าแต่ละรายจะได้รับสินค้าจากยานพาหนะเพียงคันเดียวเท่านั้น โดยมีคลังสินค้าเพียงแห่งเดียว เป้าหมายของการหาเส้นทางคือต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้อยที่สุด หรือมีระยะทางรวมในการขนส่งน้อยที่สุด ปัญหาการจัดเส้นทางแบบระบุความจุของยานพาหนะถือเป็นปัญหาที่ซับซ้อน และจัดอยู่ในกลุ่มของปัญหาประเภท NP-hard

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบระบุรอบเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW) เป็นรูปแบบของ VRP ที่เพิ่มเติมจากปัญหาการจัดเส้นทางแบบระบุความจุของยานพาหนะ (CVRP) โดยมีการกำหนดกรอบเวลาในการส่งมอบสินค้าสำหรับลูกค้าแต่ละราย รวมทั้งมีการคำนึงถึงเวลาในการให้บริการลูกค้า (Service Time) เนื่องจากเวลาในการให้บริการลูกค้าส่งผลโดยตรงต่อการส่งมอบสินค้าภายในเวลาที่กำหนดให้กับลูกค้ารายถัดๆ ไป ดังนั้น การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบระบุรอบเวลาจึงมีความซับซ้อนมากกว่าปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบธรรมดา

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบรับและส่ง (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery, VRPPD) เป็นรูปแบบปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางที่มีการรับและส่งสินค้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยการส่งสินค้าจะทำได้หลังจากทำการรับสินค้าแล้วเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางทั่วไปที่มีการรับสินค้าจากคลังสินค้าตั้งแต่แรก จึงทำให้ต้องมีการพิจารณาเงื่อนไขลำดับของการรับส่งสินค้า รวมทั้งกรอบเวลาซึ่งมักจะถูกระบุในการรับและส่งสินค้าด้วย

2.3 ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบแบบพลวัต

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบทั่วไปไม่ได้พิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลที่อาจแปรผันตามเวลา เช่น ปริมาณความต้องการของลูกค้า ระยะเวลาในการเดินทาง ฯลฯ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ ด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารและระบบสารสนเทศที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ข้อมูลต่างๆ สามารถถูกรวบรวมและแบ่งปันได้ทันที เช่น ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต้องการของลูกค้า ข้อมูลสภาพการจราจร ฯลฯ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำข้อมูลที่มีการปรับเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเป็นที่มาของปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบพลวัต (Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP) ซึ่งพิจารณาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีข้อมูลแปรผันไปตามกาลเวลา

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบพลวัตยังครอบคลุมถึงข้อมูลที่เป็นแบบสโตแคสติก (Stochastic) หรือข้อมูลเชิงน่าจะเป็น (Probabilistic Information) เช่น การมีอยู่หรือการขาดไปของลูกค้า ปริมาณความต้องการของลูกค้าแบบสโตแคสติก (Stochastic Demands) และเวลาเดินทางแบบสโตแคสติก (Stochastic Travel Time) เป็นต้น โดยปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีข้อมูลแบบสโตแคสติกอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบสโตแคสติก (Stochastic Vehicle Routing problem, SVRP)

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบสโตแคสติกมักจะเกี่ยวข้องกับการวางแผนเส้นทางเดินรถในระยะยาว โดยอาศัยข้อมูลที่รวบรวมได้ในอดีต ปัญหาประเภทนี้ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในระยะหลัง ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Gendreau et al. (Gendreau, Laporte, & Séguin, 1996)

2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ (Vehicle routing problems: VRP) ได้เริ่มมีการศึกษาโดย Danzig et al (Danzig, Fulkerson, & Johnson, 1954) โดยได้นำวิธีแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem, TSP) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีลักษณะคล้ายกันมาประยุกต์ใช้ คำว่า vehicle routing ถูกนำมาใช้เกี่ยวกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถครั้งแรกในปี 1977 โดย Golden, Magnati, and Nguyen (Golden, Magnanti, & Nguyen, 1977) และหลังจากนั้นได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ เช่น Solomon (Solomon, 1987) ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบระบุรอบเวลา (VRPTW) ซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องเวลาในการรับส่งสินค้า Nagy and Salhi (Nagy & Salhi, 2005) ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบรับและส่ง (VRPPD) ที่มีการรับและส่งสินค้าในเวลาเดียวกัน และ Ahn and Shin (Ahn & Shin, 1991), Rego and Roucairol (Rego & Roucairol, 1995) ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบพลวัต ที่พิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เป็นต้น

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถเป็นปัญหาที่ซับซ้อน ทำให้การหาคำตอบทำได้ยาก โดยเฉพาะกับปัญหาจริงที่มีขนาดใหญ่ การแก้ปัญหาโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) หรือวิธีแบบแม่นยำตรง (Exact Solution Methods) มักทำได้กับปัญหาที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็กเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้มีการพัฒนาวิธีแก้ปัญหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Methods) ซึ่งอาศัยวิธีแบบสามัญสำนึกขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้คำตอบที่ยอมรับได้ในเวลาที่จำกัด ตัวอย่างของวิธีฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมได้แก่ วิธี Clark and Wright (Clarke & Wright, 1964) นอกจากนี้ ยังมีวิธีฮิวริสติกอื่นๆ ที่ใช้แก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง เช่น การอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing, SA) (Osman, 1993) การค้นหาแบบทาบู่ (Tabu Search) (Gendreau, Hertz, & Laporte, 1994) (Taillard, Badeau, Gendreau, Guertin, & Potvin, 1997) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms, GA) (van Breedam, 1996) และขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization Algorithm, ACO) (Gambardella, Taillard, & Agazzi, 1999) (Yu, Yang, & Yao, 2009)

2.4.1 การแก้ปัญหา VRP

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา VRP ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยของ Bodin (L. D. Bodin, 1975), Bodin and Golden (L. Bodin & Golden, 1981), Min et al. (Min, Jayaraman, & Srivastava, 1998), Powell and Shapiro (1999), Laporte and Osman (Laporte & Osman, 1995), และ Burak Eksioglu et al. (Eksioglu, Vural, & Reisman, 2009) การแก้ปัญหา VRP สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทหลักๆ ได้ดังนี้

2.4.1.1 วิธีแม่นยำ (Exact method) เป็นวิธีที่อาศัยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical models) เช่น โปรแกรมเชิงเส้น (Linear program) โปรแกรมจำนวนเต็ม (Integer program) โปรแกรมจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer program) หรือวิธีการอื่นๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคทางด้านคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการตัดแบบระนาบ (Cutting plane method) วิธีbranch and bound (Branch and bound method) เช่น งานวิจัยของ Laporte and Nobert (Laporte & Nobert, 1987)

2.4.1.2 วิธีฮิวริสติก (Heuristic) เป็นวิธีที่ใช้สามัญสำนึกหรือกฎที่คิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งอาจสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด แต่ไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด ข้อได้เปรียบของวิธีฮิวริสติกคือใช้เวลาสั้นกว่าวิธีการแบบแม่นยำสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) วิธีระบบมด (Ant system algorithm) วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยฝูงอนุภาค (particle swarm optimization) เช่น งานวิจัยของ Laporte et al. (1999), Nagy and Salhi (Nagy & Salhi, 2005)

2.4.1.3 การจำลองสถานการณ์ (Simulation) เป็นวิธีการจำลองปัญหาซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่มีค่าไม่แน่นอน เช่น ปริมาณความต้องการของลูกค้า ระยะเวลาเดินทาง ฯลฯ เพื่อศึกษา

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำเข้า โดยวิธีจำลองสถานการณ์ส่วนมาก จะใช้ในการพิจารณาเลือกทางเลือก ว่าทางเลือกใดให้ผลที่ดีกว่า ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Kim et al (2005)

2.4.2 การแก้ปัญหา VRP ด้วยวิธีฮิวริสติก

ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะวิธีแบบฮิวริสติกเนื่องจากสามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วกว่า ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติ วิธีฮิวริสติกที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทาง การเดินทางในปัจจุบันมีดังนี้

2.4.2.1. การค้นหาแบบทาบู (Tabu search)

การค้นหาแบบทาบูเป็นวิธีหาคำตอบโดยการค้นหาคำตอบด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่อยู่ข้างเคียงหรือการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) โดยการจดจำตำแหน่งที่เคยค้นหาไปแล้วในรายการทาบู (Tabu list) เพื่อป้องกันการค้นหาซ้ำที่เดิมหรือการวนซ้ำที่เดิม การค้นหาจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งไม่สามารถหาคำตอบที่ดีกว่าได้ หรือจนถึงจำนวนรอบการค้นหาตามที่กำหนด ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ Tabu search ในการค้นหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางได้แก่ (Brandão & Mercer, 1997; Gendreau et al., 1994; Taillard et al., 1997)

2.4.2.2. การอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing)

การอบอ่อนจำลองอาศัยหลักการจำลองการเย็นตัวของโลหะเพื่อให้ผลึกของโลหะมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่มีระดับพลังงานที่ต่ำที่สุด โดยเลียนแบบการเปลี่ยนสถานะของผลึกในการค้นหาคำตอบ ภายใต้ความไม่แน่นอนที่ขึ้นอยู่กับกลไกของโลหะ โดยใช้หลักข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่ออุณหภูมิของโลหะลดลงอย่างช้าๆ ผลึกของโลหะจะจัดเรียงตัวในลักษณะที่มีระดับพลังงานที่ต่ำที่สุด ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธี Simulated Annealing ในการค้นหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทาง การเดินทางได้แก่ (Chiang & Russell, 1996; Czech & Czarnas, 2002; Kuo, 2010; Van Breedam, 1995)

2.4.2.3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetics Algorithm)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นการหาคำตอบโดยการเลียนแบบกระบวนการเชิงพันธุกรรมของธรรมชาติ โดยการคัดเลือกประชากร (คำตอบ) ที่ดีเพื่อถ่ายทอดสายพันธุ์จากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่ง โดยประชากรที่ได้รับการคัดเลือกจะถูกนำไปผ่านกระบวนการเชิงพันธุกรรมเพื่อสร้างเป็นประชากรรุ่นถัดไป ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทาง การเดินทางได้แก่ (Masum, Shahjalal, Faruque, & Sarker, 2011; Ombuki-Berman & Hanshar, 2009; Yoo & Kim, 2010)

2.4.2.4. วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของกลุ่มมด ซึ่งมดจะออกหาอาหารเป็นกลุ่มและมีการสำรวจเส้นทางแบบสุ่ม เมื่อมดตัวหนึ่งพบแหล่งอาหาร มันจะทิ้งสารเคมีที่เรียกว่าฟีโรโมน (Pheromone) ไว้ระหว่างทางกลับไปสู่รังเพื่อให้มดตัวอื่นๆ สามารถตามรอยไปยังแหล่งอาหารได้ โดยมดจะเลือกเส้นทางที่มีความเข้มข้นของสารฟีโรโมนสูงกว่าซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าเนื่องจากการปล่อยสารฟีโรโมนเสริมที่ต่ำกว่าเส้นทางที่ยาวกว่า ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางได้แก่ (Bullnheimer, Hartl, & Strauss, 1999; Calvete, Galé, & Oliveros, 2012; Doerner, Hartl, Kiechle, Lucka, & Reimann, 2004; Gambardella et al., 1999; Lee, Lee, Lin, & Ying, 2010; Lee et al., 2010; Yu et al., 2009)

2.4.3 การแก้ปัญหา VRP ด้วยขั้นตอนวิธีแบบขนาน

ขั้นตอนวิธีแบบขนาน (Parallel algorithm) ที่สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลหลายหน่วยพร้อมกันสามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางเพื่อลดเวลาในการค้นหาคำตอบโดยเฉพาะกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ วิธีฮิวริสติกหลายๆวิธีตามที่ได้กล่าวมาแล้วมีข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งคือสามารถพัฒนาให้ทำงานแบบขนานได้ง่าย เนื่องจากหน่วยประมวลผลสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างอิสระต่อกัน และแบ่งปันข้อมูลร่วมกันเพื่อให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ขั้นตอนวิธีแบบขนานในการค้นหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางเช่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดแบบขนาน (Doerner et al., 2004) การอบอุ่นจำลองแบบขนาน (Baños, Ortega, & Gil, 2014; Czech & Czarnas, 2002) และขั้นตอนวิธีแบบขนานอื่นๆ เช่น (Ghiani, Guerriero, Laporte, & Musmanno, 2003; Juan, Faulin, Jorba, Caceres, & Marquès, 2013; Yildirim & Çatay, 2014)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัย

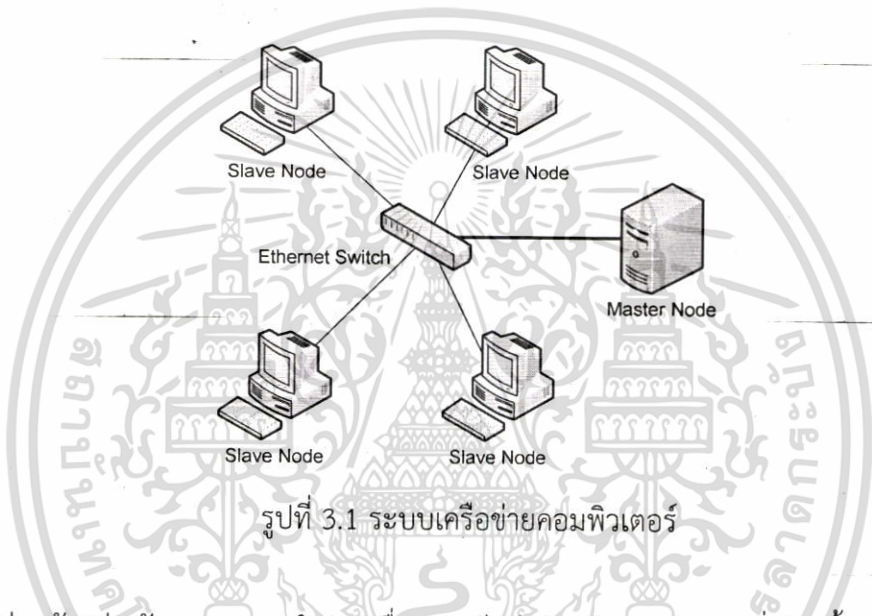
ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดถูกคิดค้นขึ้นโดย M.Dorigo (Maniezzo, 1992) ในช่วงต้นทศวรรษ 1990 ในการค้นหาคำตอบของเส้นทางบนกราฟ ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดจัดอยู่ในขั้นตอนวิธีประเภทเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) โดยใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของอาณานิคมมดซึ่งมดจะออกหาอาหารเป็นกลุ่มและมีการสำรวจเส้นทางแบบสุ่ม เมื่อมดตัวหนึ่งค้นพบแหล่งอาหาร มันจะทิ้งสารเคมีที่เรียกว่าฟีโรโมน (Pheromone) ไว้ระหว่างทางกลับไปสู่รังเพื่อให้มดตัวอื่นสามารถตามรอยไปยังแหล่งอาหารได้ โดยมดที่เดินผ่านเส้นทางไปสู่แหล่งอาหารจะปล่อยฟีโรโมนเสริมเพื่อป้องกันไม่ให้สารฟีโรโมนระเหยจนหมด เมื่อมีเส้นทางไปสู่แหล่งอาหารหลายเส้นทาง ความเข้มข้นของฟีโรโมนบนเส้นทางที่สั้นกว่าจะมีค่าสูงกว่าเนื่องจากความถี่ของมดที่เดินผ่านสูงกว่า ทำให้มดตัวอื่นมีโอกาสที่จะเลือกเส้นทางนั้นมากกว่า และในที่สุด ฟีโรโมนบนเส้นทางที่ยาวกว่าก็จะค่อยๆ จางหายไปจนทำให้เส้นทางนั้นถูกละทิ้งไปโดยปริยาย

ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์ ผู้วิจัยจะทำการแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนของการหาเส้นทาง และ 2) ส่วนของการประเมินเส้นทาง กระบวนการในการค้นหาคำตอบจะเป็นแบบทำซ้ำ (Iterative Method) ในส่วนของการหาเส้นทาง การเดินทาง จะใช้ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดตามที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยการส่งมดออกไปค้นหาคำตอบพร้อมกัน เมื่อได้เส้นทางการเดินทางแล้ว เส้นทางต่างๆ ที่ได้จะถูกนำไปประเมินค่าใช้จ่ายรวม เพื่อเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด แล้วนำไปปรับปรุงวิธีการค้นหาคำตอบในรอบถัดไป เนื่องจากการประเมินเส้นทางจะต้องคำนวณภายใต้ความไม่แน่นอน และด้วยขนาดของเซตของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มาก ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างในการประเมินเส้นทางแทน ซึ่งความคลาดเคลื่อนในการประเมินค่าใช้จ่ายจะแปรผันตามจำนวนของตัวอย่างที่ทำการสุ่ม โดยการหาเส้นทางและการประเมินเส้นทาง จะใช้การประมวลผลแบบขนาน เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบลง

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดเป็นขั้นตอนวิธีที่สามารถพัฒนาให้ประมวลผลแบบขนานได้ง่าย เนื่องจากการค้นหาคำตอบของมดแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน การค้นหาคำตอบของมดจะใช้ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลของฟีโรโมนและข้อมูลทางด้านฮิวริสติกประกอบกัน ความเข้มข้นของฟีโรโมนจะถูกจัดเก็บในรูปของฟีโรโมนเมทริกซ์ (Pheromone Matrix) ซึ่งเส้นทางที่มีความเข้มข้นของฟีโรโมนมากกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกมากกว่า ค่าของฟีโรโมนเมทริกซ์จะถูกปรับ (Update) ในระหว่างรอบการค้นหาคำตอบ โดยฟีโรโมนทั้งหมดจะมีค่าลดลงตามอัตราการระเหยที่กำหนดไว้ และฟีโรโมนที่ส่วนของคำตอบที่ดีจะถูกปรับให้มีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาขั้นตอนวิธีอณานิคมแบบขนานจะใช้หลักของการทำงานแบบ "นาย-บ่าว" (Master-Slave) ซึ่งเหมาะสำหรับระบบคอมพิวเตอร์ที่มีจำนวนหน่วยประมวลผลไม่มากนัก โดยคอมพิวเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยระบบเครือข่ายความเร็วสูง (Gigabit Ethernet) ทำให้การส่งผ่านข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว รูปที่ 3.1 แสดงถึงรูปแบบการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์สถานีแม่ (Master Node) 1 เครื่อง และเครื่องคอมพิวเตอร์สถานีลูก (Slave Node) อีกจำนวนหนึ่งที่เชื่อมต่อกันผ่านสวิตช์เครือข่ายความเร็วสูง โดยเครื่องสถานีแม่มีหน้าที่รวบรวมคำตอบที่ได้จากเครื่องสถานีลูกเพื่อนำไปปรับค่าพีโรโมนในพีโรโมนเมทริกซ์ ส่วนเครื่องสถานีลูกมีหน้าที่ค้นหาเส้นทางการเดินทางและการประเมินค่าใช้จ่ายของเส้นทางการเดินทางที่หาได้



รูปที่ 3.1 ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์

การอ่านตัวอย่างปัญหาจะกระทำบนเครื่องสถานีแม่ และตัวอย่างปัญหาที่สร้างขึ้นจะถูกส่งไปให้กับเครื่องสถานีลูกทุกเครื่องเพื่อใช้ในการค้นหาเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสม เนื่องจากการค้นหาคำตอบต้องกระทำซ้ำๆ กันในแต่ละรอบการทำซ้ำของขั้นตอนวิธีอณานิคม ดังนั้น เพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ต้องส่งผ่านระบบเครือข่าย ตัวอย่างปัญหาจะถูกส่งไปให้กับเครื่องสถานีลูกครั้งแรกเพียงครั้งเดียว และเครื่องสถานีลูกทุกเครื่องจะทำการสำเนาตัวอย่างปัญหาที่ได้รับเพื่อใช้ต่อไป

3.1 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO)

Dorigo et.al. (Dorigo, Maniezzo, & Colormi, 1996) ได้นำเสนอแนวคิดในการหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization problem) ด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด โดยอาศัยหลักการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของมดจริง ซึ่งมดจะอาศัยสารเคมีที่เรียกว่า ฟีโรโมน (Pheromone) ที่ปล่อยไว้บนเส้นทางที่มดเดินผ่าน เพื่อใช้ในการจดจำเส้นทางและใช้ในการสื่อสารกับมดตัวอื่นๆ Dorigo ได้สรุปคุณลักษณะของวิธีการหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดไว้ดังนี้

1. เป็นขั้นตอนวิธีที่เอนกประสงค์ (Versatile) กล่าวคือสามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาได้หลากหลาย
2. มีความทนทาน (Robust) หรือทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในปัญหาต่างๆ
3. อาศัยประชากรเป็นพื้นฐาน (Population Based) คือมีการส่งใช้ประชากรมดหลายตัวในการค้นหาคำตอบพร้อมกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและสามารถพัฒนาไปสู่การค้นหาแบบขนาน (Parallel implementation) ได้ง่าย

การค้นหาเส้นทางของมดในธรรมชาติอาศัยการปล่อยสารฟีโรโมนตามเส้นทางที่มดเดินผ่าน และมดตัวอื่นๆจะเลือกเส้นทางเดินโดยพิจารณาจากความเข้มข้นของสารฟีโรโมนที่ตัวอื่นปล่อยทิ้งไว้ เนื่องจากสารฟีโรโมนเป็นสารที่สามารถระเหยได้ ดังนั้น มดจึงต้องมีการปล่อยสารฟีโรโมนเสริมบนเส้นทางที่เดินผ่านเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารฟีโรโมนบนเส้นทางนั้นๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารฟีโรโมนคือ อัตราการระเหย (Evaporation rate) ซึ่งการระเหยของสารฟีโรโมนนั้นขึ้นอยู่กับเวลา ถ้าความเร็วในการเดินของมดคงที่ และระยะทางของเส้นทางแต่ละเส้นทางแตกต่างกัน ระยะทางที่ยาวกว่าจะต้องใช้เวลาในการเดินทางนานกว่า ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารฟีโรโมนน้อยกว่าระยะทางที่สั้นกว่า ดังนั้น ความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางของมดจึงมีค่ามากกว่าบนเส้นทางที่สั้นกว่า รูปที่ 3.2-3.6 แสดงกระบวนการในการค้นหาอาหารของมด



รูปที่ 3.2 การออกเดินทางค้นหาแหล่งอาหารของมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เมื่อมดพบแหล่งอาหาร



รูปที่ 3.4 การทิ้งสารฟีโรโมนบนเส้นทางกลับรัง



รูปที่ 3.5 การตามรอยสารฟีโรโมนของมดไปสู่แหล่งอาหาร



รูปที่ 3.6 การเลือกเส้นทางของมดตามความเข้มข้นของสารฟีโรโมน

3.1.1 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง

ค่าความเข้มข้นของสารฟีโรโมนจะถูกเก็บอยู่ในรูปของเมตริกซ์ขนาด $N \times N$ โดยที่ N คือจำนวนลูกค้าและศูนย์กระจายสินค้าทั้งหมด ดังนั้น ในปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง ความเข้มข้นของสารฟีโรโมน τ_{ij} จึงเป็นตัวกำหนดความสำคัญในการจัดลำดับการส่งสินค้าจากลูกค้ารายที่ i ไปยังลูกค้ารายที่ j ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังแผนผังในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง

กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดเริ่มจากการตั้งค่าพารามิเตอร์และกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน ตัวอย่างของค่าพารามิเตอร์เช่น จำนวนมดที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ จากนั้นทำการส่งมอดอกไปค้นหาคำตอบ ซึ่งในที่นี้คือลำดับของการจัดส่งสินค้าไปให้กับลูกค้าของรถแต่ละคัน โดยรถบรรทุกจะเริ่มจากศูนย์กระจายสินค้า ไปส่งสินค้าให้ลูกค้า แล้วกลับมาที่ศูนย์กระจายสินค้า เมื่อได้จำนวนคำตอบตามที่ต้องการแล้ว จะนำคำตอบที่ดีที่สุดที่ทำได้ ไปปรับปรุงค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน และทำการทำซ้ำจนกว่าจะถึงเงื่อนไขการหยุดทำงาน โดยรายละเอียดของ

ขั้นตอนการค้นหาคำตอบและการปรับปรุงค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1.2 และ 3.1.3

3.1.2 การค้นหาคำตอบ

การค้นหาคำตอบในที่นี้หมายถึงการหาลำดับก่อนหลังของการส่งสินค้าให้แก่ลูกค้าสำหรับรถบรรทุกแต่ละคัน โดยมดจะทำการเลือก node (หมายเลขของลูกค้า) โดยพิจารณาจากปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้าที่เหลืออยู่ว่ายังมีสินค้าเพียงพอที่จะส่งให้ลูกค้าหรือไม่ ในกรณีของปัญหาการจัดเส้นทางรถบรรทุกที่ต้องการที่ไม่แน่นอน ปริมาณความต้องการของลูกค้าจะได้รับการสุ่ม ซึ่งอาจจะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละรอบการสุ่ม การค้นหาคำตอบจะกระทำกับรถบรรทุกทีละคัน เมื่อรถบรรทุกมีสินค้าคงเหลือไม่เพียงพอที่จะส่งให้กับลูกค้า รถคันนั้นก็จะต้องกลับไปที่ศูนย์กระจายสินค้า และให้ใช้รถบรรทุกคันใหม่แทน วิธีนี้เป็นเพียงวิธีที่ใช้ในการค้นหาคำตอบเท่านั้น ในทางปฏิบัติ รถทุกคันจะออกจากศูนย์กระจายสินค้าพร้อมกัน

การเลือก node หรือลูกค้าของมดต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของปริมาณสินค้าคงเหลือที่รถสามารถจัดส่งได้ โดยลูกค้าที่สามารถจัดส่งได้ทั้งหมดจะถูกเก็บอยู่ในรายการรอการจัดส่ง (Unvisited list) การเลือกลูกค้าจากรายการรอการจัดส่งสามารถทำได้โดยการสุ่มตามค่าความน่าจะเป็นที่กำหนดไว้ในสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k=1}^N \tau_{ik}^{\alpha} \cdot \eta_{ik}^{\beta}} \quad (3.1)$$

โดยที่

- p_{ij} = ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า j ต่อจาก i
- η_{ij} = ค่าฮิวริสติกในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า j ต่อจาก i
- τ_{ij} = ค่าฟีโรโมนในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า j ต่อจาก i
- α = ค่าน้ำหนักของฟีโรโมน
- β = ค่าน้ำหนักของฮิวริสติก

ค่าฮิวริสติกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกเส้นทาง มีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการหาค่าของ η มากมาย เช่น ในงานวิจัยของ Dorigo et. al. (Dorigo et al., 1996) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travel Salesman Problem, TSP) โดยกำหนดค่า ของ η_{ij} เท่ากับ $1/d_{ij}$ เมื่อ d_{ij} คือระยะทางระหว่างเมือง i และ j เนื่องจากปัญหาการจัดเส้นทางรถเป็น

ปัญหาที่มีลักษณะคล้ายกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดค่าฮิวริสติกตามระยะทางระหว่างลูกค้า i และ j โดยใช้สมการ (3.2) ดังนี้

$$\eta_{ij} = \frac{c}{d_{ij}+1} \quad (3.2)$$

โดยที่

d_{ij} = ระยะทางจาก node i ไปยัง node j
 c = ค่าคงที่

จากสมการที่ (3.2) จะเห็นได้ว่า ค่าฮิวริสติกในการเลือกลูกค้า j ต่อจากลูกค้า i จะแปรผกผันกับระยะทาง ซึ่งหมายความว่า ลูกค้าที่อยู่ใกล้กว่าจะมีลำดับความสำคัญในการถูกเลือกสูงกว่า

3.1.3 การปรับปรุงค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน (Pheromone update)

การกำหนดค่าเริ่มต้นของฟีโรโมนโดยปกติจะกำหนดให้เท่ากัน การปรับปรุงค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนจะมีการทำหลังจากมีการหาคำตอบของมดครบทุกตัว แล้วจึงนำคำตอบที่ได้ทั้งหมดไปเปรียบเทียบกัน และคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในการปรับปรุงค่าฟีโรโมน โดยพิจารณาจากเกณฑ์ดังนี้

- ถ้าตำแหน่งฟีโรโมนอยู่ในคำตอบที่ดีที่สุด ให้ทำการเพิ่มค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน
- ถ้าตำแหน่งฟีโรโมนไม่อยู่ในคำตอบที่ดีที่สุด ให้ทำการลดค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน

การปรับปรุงค่าฟีโรโมนข้างต้น สามารถเขียนแทนด้วยสมการดังนี้

$$\tau_{ij}(t+1) = \begin{cases} \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} & , \text{ถ้าอยู่ในเส้นทางที่ดีที่สุด} \\ (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) & , \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (3.3)$$

โดยที่ $\Delta\tau_{ij}$ คือปริมาณการเพิ่มขึ้นของฟีโรโมน

$\tau_{ij}(t+1)$ = ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนจากลูกค้า i ไป j ในรอบถัดไป

$\tau_{ij}(t)$ = ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนจากลูกค้า i ไป j ในรอบปัจจุบัน

ρ = อัตราการระเหยของฟีโรโมน

3.1.4 การสิ้นสุดการทำงาน

วิธีที่ง่ายที่สุดในการหยุดการทำงานของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดคือการกำหนดรอบการทำงาน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด นอกจากนี้ การกำหนดวิธีการหยุดทำงานยังสามารถทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบจากคำตอบที่ได้จากการค้นหา เช่น เมื่อคำตอบไม่ได้ดีขึ้นเป็นจำนวนรอบตามที่กำหนดไว้ หรือเมื่อคำตอบถึงค่าที่ผู้ใช้กำหนดไว้ (ซึ่งในกรณีนี้ผู้ใช้จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับตัวอย่างปัญหาที่ค้นหาคำตอบอยู่)

3.2 การสุ่มตัวอย่าง (Sampling Method)

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ นำมาจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Augerat et al., 1998; Christofides & Eilon, 1969) ซึ่งเป็นปัญหาแบบเชิงกำหนด (Deterministic) กล่าวคือ ปริมาณความต้องการของลูกค้าได้ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งต่างจากปัญหาที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นปัญหาแบบสโตแคสติก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างปริมาณความต้องการของลูกค้า โดยใช้รูปแบบการแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform distribution) เพื่อกำหนดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของปริมาณความต้องการของลูกค้าแต่ละราย โดยให้ปริมาณความต้องการสามารถเบี่ยงเบนจากค่าเดิมที่กำหนดไว้ เช่น การกำหนดค่าเบี่ยงเบนของปริมาณความต้องการเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า ปริมาณความต้องการสามารถแปรผันในช่วง $[0.9D, 1.1D]$ ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน โดย D คือปริมาณความต้องการเฉลี่ย

ในการแก้ปัญหการจัดเส้นทางเดินทางแบบสโตแคสติก เนื่องจากรูปแบบการแจกแจงของปริมาณความต้องการเป็นแบบเอกรูป ซึ่งเป็นแบบต่อเนื่อง ค่าที่เป็นไปได้จึงมีจำนวนเป็นอนันต์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีการประมาณค่าใช้จ่ายของการเดินทาง โดยการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งวิธีนี้เรียกว่าการหาค่าเฉลี่ยจากการสุ่ม (Sample average approximation) ความถูกต้องของคำตอบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ 1) จำนวนเหตุการณ์ (Number of scenarios) หรือขนาดของตัวอย่าง (Sample size) และ 2) จำนวนตัวอย่าง (Number of samples) โดยขนาดของตัวอย่างจะมีผลโดยตรงกับคุณภาพของคำตอบที่ได้ ในขณะที่จำนวนตัวอย่างจะเป็นตัวบ่งบอกถึงระดับความน่าเชื่อถือของคำตอบ ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้เป็นตัวแปรสำคัญต่อเวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบ โดยเฉพาะขนาดของตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นแบบชี้กำลัง (Exponential) เมื่อขนาดของตัวอย่างเพิ่มขึ้น

3.3 การพัฒนาขั้นตอนวิธีบนระบบคอมพิวเตอร์แบบขนาน

การพัฒนาขั้นตอนวิธีตามนิคมมดสำหรับแก้ปัญหการจัดเส้นทางเดินทางแบบสโตแคสติกอาศัยการทำงานของระบบจัดการงาน (Job Management System) HTCondor บนระบบปฏิบัติการ Linux HTCondor ถูกพัฒนาขึ้นโดยทีม HTCondor ของมหาวิทยาลัย Wisconsin-Madison สหรัฐอเมริกา ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นคอมพิวเตอร์แบบกริด (Grid Computing) ซึ่งเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยระบบเครือข่ายความเร็วสูง โดยมีเครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่องที่ทำหน้าที่ในการจัดการงานต่างๆ ซึ่งเรียกว่าเครื่อง Master และเครื่องคอมพิวเตอร์อื่นๆ ที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 16 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ในการประมวลผล ซึ่งเรียกว่าเครื่อง Clients เมื่อผู้ใช้งานต้องการส่งงาน (Submit Jobs) เข้ามาประมวลผลในระบบ เครื่อง Master จะตรวจสอบสถานะของเครื่อง Clients ต่างๆ ว่ามีเครื่องใดบ้างที่สามารถประมวลผลงานที่ได้รับ และถ้าเครื่อง Client มีสถานะว่าง ก็จะจัดส่งงานไปประมวลผลบนเครื่อง Client นั้นๆ HTCondor เป็นระบบจัดการงานที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเจ้าของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาเข้าระบบสามารถกำหนดนโยบายในการทำงานได้ โดยปกติแล้ว HTCondor จะส่งงานไปประมวลผล บนเครื่องที่ไม่ได้ถูกใช้งานเท่านั้น

ในส่วนของโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบสโทแคสติก การทำงานของโปรแกรมอาศัยหลักการแบบ “นาย-บ่าว” (Master-Workers) ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมหลัก 2 โปรแกรมคือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์หลัก (Master Program) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์งานย่อย (Worker Program) โดยในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลักจะทำหน้าที่สร้างและปรับปรุงค่าฟีโรโมนส่วนกลาง (Global pheromone) โดยใช้คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากโปรแกรมงานย่อย รวมทั้งการแบ่งงานและกำหนดการทำงานของโปรแกรมงานย่อย ส่วนโปรแกรมงานย่อยทำหน้าที่สุ่มตัวอย่างและค้นหาคำตอบตามปริมาณงานที่ได้รับมอบหมาย รวมทั้งนำคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ไปปรับปรุงค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ (Local pheromone) และส่งค่าคำตอบที่ดีที่สุดกลับไปยังโปรแกรมหลัก ผังการทำงานของโปรแกรมหลักและโปรแกรมงานย่อยแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยค่าฟีโรโมนบนโปรแกรมหลักหรือ Global pheromone ทำหน้าที่ในการแบ่งปันข้อมูล (Information sharing) เพื่อให้โปรแกรมงานย่อยสามารถเริ่มต้นจากจุดที่ดี ส่วนค่าฟีโรโมนบนโปรแกรมงานย่อยหรือ Local Pheromone จะถูกใช้ในการปรับปรุงวิธีการค้นหาคำตอบบนโปรแกรมงานย่อย

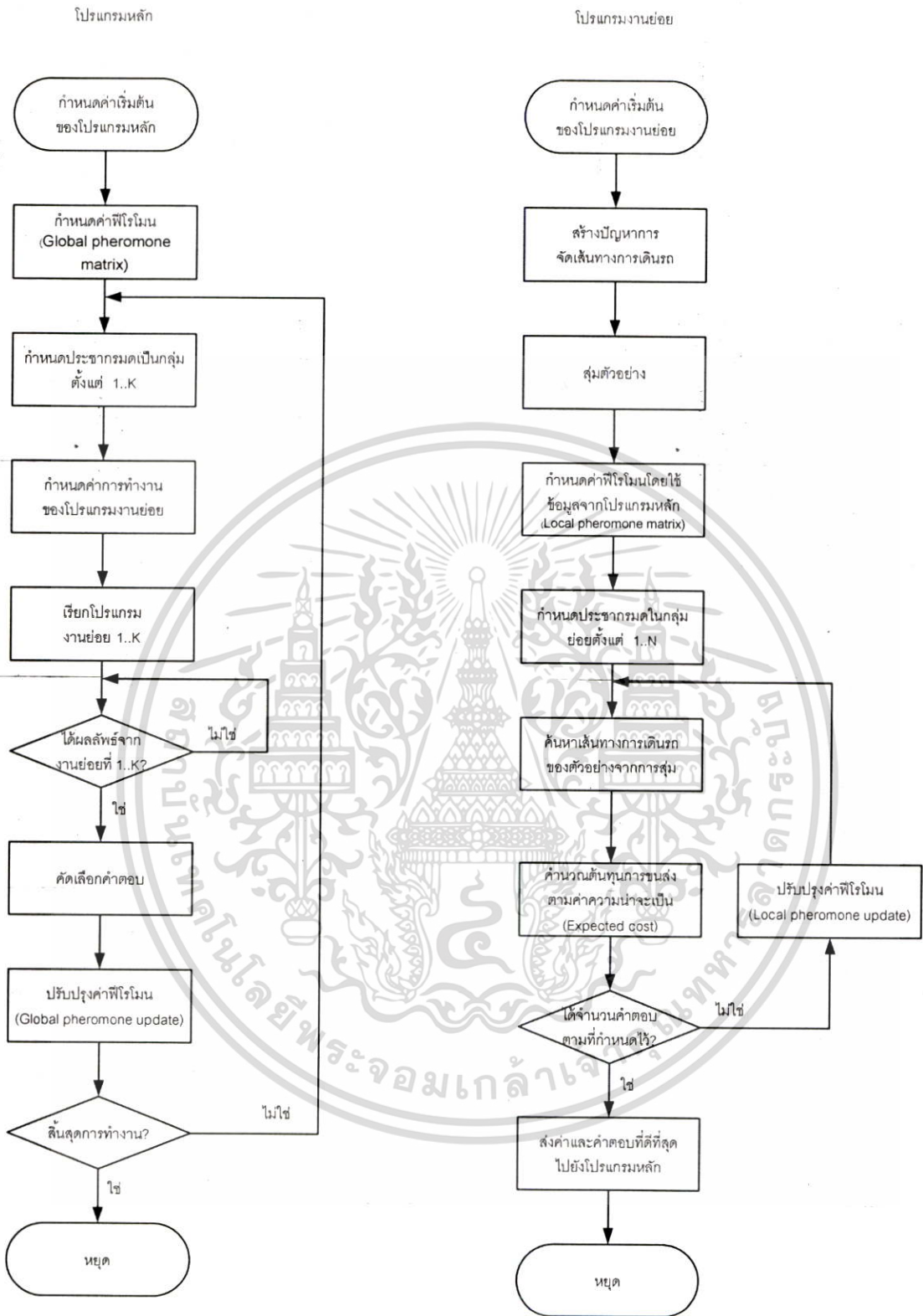
เนื่องจากการเก็บค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนส่วนกลางเฉพาะที่ ดังนั้น ในการนำค่าฟีโรโมนไปใช้งาน จะต้องกำหนดสัดส่วนของค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนส่วนกลางเฉพาะที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ (3.4)

$$\tau_{ij} = \lambda \tau_{ij}^G + (1 - \lambda) \tau_{ij}^L \quad (3.4)$$

โดยที่

- τ_{ij}^G = ค่าฟีโรโมนส่วนกลางในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า j ต่อจาก i
- τ_{ij}^L = ค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า j ต่อจาก i
- λ = สัดส่วนของการใช้ค่าฟีโรโมนส่วนกลาง

ยกตัวอย่างเช่น ค่า $\lambda = 0.4$ หมายความว่า ให้ใช้ค่าฟีโรโมนส่วนกลาง 40% และค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ 60%



รูปที่ 3.8 ผังการทำงานของโปรแกรมหลักและโปรแกรมงานย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 18 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอและพัฒนาขึ้นมาทดสอบกับตัวอย่างปัญหาจากงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการทดลองกับคำตอบจากงานวิจัยอื่น ทั้งในแง่ของคุณภาพของคำตอบและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

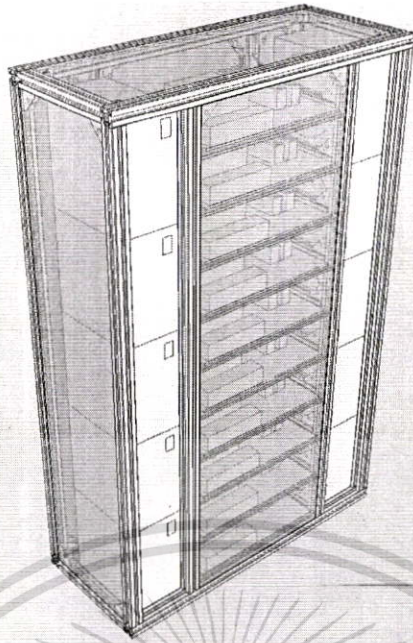
4.1 ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกันด้วยระบบเครือข่ายความเร็วสูง (Gigabit Ethernet) เพื่อให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ประหยัดพื้นที่และงานในการติดตั้ง ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมดอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน โดยใช้โปรแกรม CAD/CAM ในการออกแบบโครงสร้างเชิงกลก่อนที่จะทำการสร้างจริง รูปที่ 4.1 แสดงถึงแบบโครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้

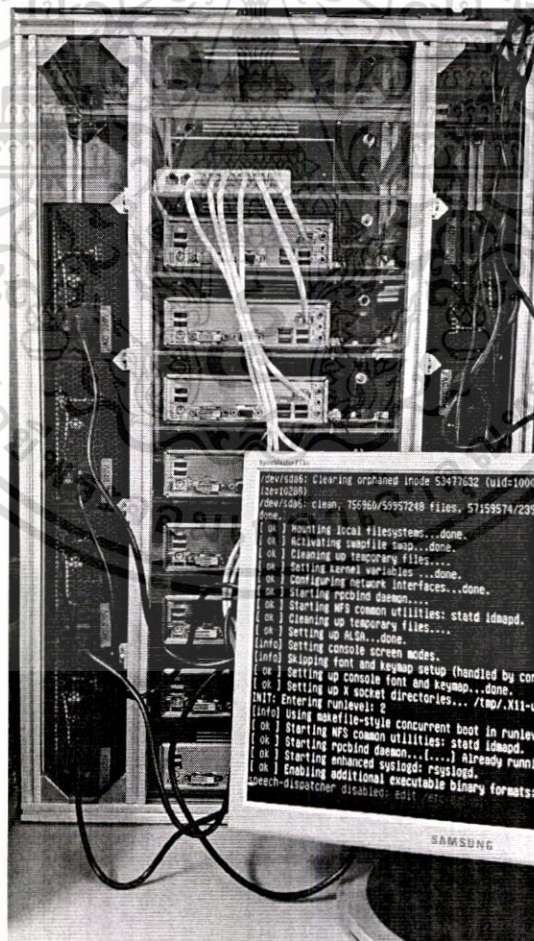
4.1 แสดงถึงแบบโครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้

เพื่อให้ง่ายในการติดตั้งซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยได้กำหนดให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมดมีส่วนประกอบพื้นฐานเหมือนกัน ซึ่งได้แก่ แผงวงจรหลัก (Mother Board) และหน่วยประมวลผลกลาง (Central processing unit) โดยแผงวงจรหลักใช้ของ ASRock รุ่น H81M-DGS และหน่วยประมวลผลกลางใช้ของ Intel รุ่น I3-4170 โดยมีหน่วยความจำขนาด 4 Gb ระบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์สถานีแม่ 1 เครื่อง และเครื่องคอมพิวเตอร์สถานีลูกอีก 7 เครื่อง ทำให้ระบบมีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU Core) ทั้งหมด 16 หน่วย หรือมีหน่วยประมวลผลกลางเสมือน (Logical Processor) ทั้งหมด 32 หน่วย

ระบบปฏิบัติการที่เลือกใช้เป็น Linux โดยใช้ distribution ของ Debian AMD 64 ส่วนซอฟต์แวร์ในการจัดการกับการประมวลผลแบบขนานใช้โปรแกรม HTCondor โดยระบบคอมพิวเตอร์ที่สร้างแล้วเสร็จแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แบบโครงสร้างของระบบคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ตัวอย่างปัญหาที่เป็นที่ยอมรับในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Augerat et al., 1998; Christofides & Eilon, 1969) เพื่อทำการทดลองและเปรียบเทียบผลการทดลอง ทั้งในด้านของคุณภาพของคำตอบที่ได้ รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ โดยทำการทดลองกับตัวอย่างปัญหาทั้งหมด 20 ตัวอย่างปัญหา ซึ่งเป็นปัญหาที่มีรถบรรทุกแบบเดียวกัน และมีศูนย์กระจายสินค้าเพียงหนึ่งแห่ง รายละเอียดของตัวอย่างปัญหาที่ใช้ทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยชื่อของตัวอย่างปัญหา จำนวนลูกค้า จำนวนรถบรรทุก และความจุของรถบรรทุก

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของปัญหาทดสอบ

	ตัวอย่างปัญหา	จำนวนลูกค้า	จำนวนรถบรรทุก	ความจุของรถ
1	A-n33-k5	32	5	100
2	A-n53-k7	52	7	100
3	A-n64-k9	63	9	100
4	A-n80-k10	79	10	100
5	B-n34-k5	33	5	100
6	B-n45-k5	44	5	100
7	B-n66-k9	65	9	100
8	B-n78-k10	77	10	100
9	E-n33-k4	32	4	8,000
10	E-n51-k5	50	5	160
11	E-n76-k7	75	7	220
12	F-n45-k4	44	4	2,010
13	F-n72-k4	71	4	30,000
14	F-n135-k7	134	7	2,210
15	M-n101-k10	100	10	200
16	M-n121-k7	120	7	200
17	P-n40-k5	39	5	140
18	P-n55-k7	54	7	170
19	P-n76-k5	75	5	280
20	P-n101-k4	100	4	400

ตารางที่ 4.2 แสดงรูปแบบของตัวอย่างปัญหา A-n33-k5 ซึ่งมีรถบรรทุก 5 คัน และรถแต่ละคันมีความจุเท่ากับ 100 หน่วย มีศูนย์กระจายสินค้าหนึ่งแห่งคือหมายเลข 1 และมีลูกค้าทั้งหมด 32 ราย โดยแต่ละตำแหน่งจะประกอบด้วยพิกัด (X,Y) และปริมาณความต้องการของสินค้า

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างรูปแบบของปัญหา

Name		A-n33-k5	
Truck Capacity		100	
Number of Trucks		5	
No	Location		Demand
	X	Y	
1	42	68	0
2	77	97	5
3	28	64	23
4	77	39	14
5	32	33	13
6	32	8	8
7	42	92	18
8	8	3	19
9	7	14	10
10	82	17	18
11	48	13	20
12	53	82	5
13	39	27	9
14	7	24	23
15	67	98	9
16	54	52	18
17	72	43	10
18	73	3	24
19	59	77	13
20	58	97	14
21	23	43	8
22	68	98	10
23	47	62	19
24	52	72	14
25	32	88	13
26	39	7	14
27	17	8	2
28	38	7	23
29	58	74	15
30	82	67	8
31	42	7	20
32	68	82	24
33	7	48	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองและผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลองผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ทำการทดลองแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถแบบเชิงกำหนด (Deterministic) และแบบสโตแคสติก ในกรณีของการแก้ปัญหาแบบเชิงกำหนด ค่าความต้องการสินค้าของลูกค้าแต่ละรายจะใช้ค่าเดิมตามที่กำหนดในตัวอย่างปัญหา ในกรณีของการแก้ปัญหาแบบสโตแคสติก ค่าความต้องการสินค้าของลูกค้าแต่ละรายจะถูกแทนที่ด้วยตัวแปรสุ่มแบบเอกรูป โดยกำหนดให้สัดส่วนของค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1 และ 0.2 ตามลำดับ และใช้การสุ่มตัวอย่างในการประเมินค่าต้นทุนการขนส่ง โดยทำการสุ่มที่ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 50 200 และ 1000 ตามลำดับ

สำหรับวิธีการทดลอง ในแต่ละการทดลอง ผู้วิจัยใช้วิธีการทำทดลองซ้ำ 10 ครั้ง และบันทึกผลการทดลองและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน (Parallel Performance) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงการใช้ประโยชน์จากเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมด สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

No	พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
1	จำนวนงานย่อย	24
2	จำนวนรอบ	200
3	ประชากรมด	500
4	อัตราการระเหย (ρ)	0.04
5	ปริมาณการเพิ่มค่าฟีโรโมน (Δ)	0.04
6	ค่าน้ำหนักของฟีโรโมน (α)	1
7	ค่าน้ำหนักของฮิวริสติก (β)	2
8	สัดส่วนของฟีโรโมนส่วนกลาง	0.5

ตารางที่ 4.4-4.10 แสดงผลการทดลองจากการทดลองทั้ง 10 ครั้ง โดยนำเสนอผลในรูปของค่าเฉลี่ยและค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองทั้ง 10 ครั้ง ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนเฉลี่ย (คอลัมน์ "Average Value") ต้นทุนน้อยที่สุดที่ได้ (คอลัมน์ "Minimum Value") เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (คอลัมน์ "Average Time") จำนวนเฉลี่ยของเครื่องสถานีลูกที่ถูกใช้งาน (คอลัมน์ "Avg # Workers") สมรรถนะของการประมวลผลแบบขนานเฉลี่ย (คอลัมน์ "Avg Parallel Performance") โดยคอลัมน์ที่ 2 แสดงชื่อของตัวอย่างปัญหาที่ใช้ทดสอบ และคอลัมน์ที่ 3 แสดงค่าต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4.4 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบเชิงกำหนด จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่เกิน 4% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 1.56% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลอง มีต้นทุนเฉลี่ยมากกว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่เกิน 2.5% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 0.68% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 75.48 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 17.5 เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนานเพียง 0.234 หรือ 23.4% ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำ ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากปัญหาแบบเชิงกำหนดสามารถแก้ได้โดยง่าย ทำให้เวลาที่ใช้ในการประมวลผลหาค่าตอบมีสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ไปทั้งหมด

ตารางที่ 4.5 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบแบบสโทแคสติก โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1 และขนาดตัวอย่างเท่ากับ 50 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 2.78% - 26.02% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 9.81% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองมีต้นทุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.30% - 18.71% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 6.56% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 92.30 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 18.7 เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน 0.327 หรือ 32.7% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีของปัญหาแบบเชิงกำหนด

ตารางที่ 4.6 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบแบบสโทแคสติก โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1 และขนาดตัวอย่างเท่ากับ 200 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 2.34% - 28.20% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 9.89% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองมีต้นทุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.76% - 24.42% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 7.55% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 100.58 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 20.7 เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน 0.493 หรือ 49.3% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 50

ตารางที่ 4.7 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบแบบสโทแคสติก โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1 และขนาดตัวอย่างเท่ากับ 1000 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 2.28% - 26.33% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 9.62% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองมีต้นทุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.16% - 22.53% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 7.45% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 196.20 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 23.9 เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน 0.565 หรือ 56.5% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 200

ตารางที่ 4.8 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบแบบสโทแคสติก โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.2 และขนาดตัวอย่างเท่ากับ 50 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 6.29% - 30.84% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 13.42% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองมีต้นทุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่าง 3.22% - 28.43% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 10.55% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 82.39 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 18.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน 0.338 หรือ 33.8% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1

ตารางที่ 4.9 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางรถแบบแบบสโทแคสติก โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.2 และขนาดตัวอย่างเท่ากับ 200 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 6.13% - 29.93% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 13.89% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองมีต้นทุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่าง 3.59% - 22.85% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 11.01% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 96.35 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 20.8 เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน 0.501 หรือ 50.1% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1

ตารางที่ 4.10 แสดงผลที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางรถแบบแบบสโทแคสติก โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.2 และขนาดตัวอย่างเท่ากับ 1000 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 5.87% - 27.94% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 13.55% และค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองมีต้นทุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่าง 3.33% - 22.32% โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกปัญหาเท่ากับ 10.99% เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหาเท่ากับ 196.36 วินาที โดยใช้เครื่องสถานีลูกเฉลี่ย 23.9 เครื่อง และมีสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน 0.564 หรือ 56.4% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1

ตารางที่ 4.4 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีเชิงกำหนด

	Instance	Optimal Value	Average		Mininum		Average time (secs.)	Avg # workers	Avg Parallel Performance
			Value	% Gap	Value	% Gap			
1	A-n33-k5	661	667.60	1.00%	661	0.00%	69.59	16.5	0.123
2	A-n53-k7	1010	1022.30	1.22%	1017	0.69%	73.54	17.2	0.178
3	A-n64-k9	1401	1429.70	2.05%	1420	1.36%	76.82	18.0	0.199
4	A-n80-k10	1763	1800.20	2.11%	1784	1.19%	78.44	18.0	0.247
5	B-n34-k5	788	788.10	0.01%	788	0.00%	72.20	16.4	0.128
6	B-n45-k5	751	764.60	1.81%	760	1.20%	72.14	16.9	0.158
7	B-n66-k9	1316	1330.20	1.08%	1324	0.61%	77.22	17.6	0.205
8	B-n78-k10	1221	1236.50	1.27%	1224	0.25%	76.52	18.0	0.246
9	E-n33-k4	835	840.90	0.71%	837	0.24%	71.29	16.3	0.120
10	E-n51-k5	521	526.30	1.02%	521	0.00%	69.75	17.0	0.170
11	E-n76-k7	682	707.90	3.80%	694	1.76%	77.70	17.7	0.237
12	F-n45-k4	724	724.00	0.00%	724	0.00%	73.43	16.7	0.155
13	F-n72-k4	237	240.30	1.39%	237	0.00%	76.22	18.1	0.221
14	F-n135-k7	1162	1179.50	1.51%	1171	0.77%	87.97	19.0	0.493
15	M-n101-k10	820	851.60	3.85%	840	2.44%	75.38	17.7	0.383
16	M-n121-k7	1034	1050.80	1.62%	1038	0.39%	80.50	19.2	0.483
17	P-n40-k5	458	462.70	1.03%	459	0.22%	70.76	16.6	0.139
18	P-n55-k7	568	580.40	2.18%	578	1.76%	76.26	17.3	0.181
19	P-n76-k5	627	639.10	1.93%	629	0.32%	77.16	17.7	0.234
20	P-n101-k4	681	692.50	1.69%	684	0.44%	76.67	17.6	0.382
				1.56%		0.68%	75.48	17.5	0.234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 25 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.1 และขนาดตัวอย่าง 50

	Instance	Optimal	Average		Minimum		Average	Avg # workers	Avg Parallel Performance
		Value	Value	% Gap	Value	% Gap	time (secs.)		
1	A-n33-k5	661	693.99	4.99%	680.00	2.87%	75.62	18.3	0.224
2	A-n53-k7	1010	1083.88	7.31%	1059.52	4.90%	78.20	17.8	0.223
3	A-n64-k9	1401	1517.16	8.29%	1476.64	5.40%	79.02	18.0	0.256
4	A-n80-k10	1763	1968.27	11.64%	1906.28	8.13%	79.93	18.0	0.355
5	B-n34-k5	788	809.94	2.78%	798.24	1.30%	76.83	18.2	0.178
6	B-n45-k5	751	826.04	9.99%	801.60	6.74%	78.02	17.9	0.178
7	B-n66-k9	1316	1408.21	7.01%	1392.36	5.80%	77.85	18.4	0.223
8	B-n78-k10	1221	1350.57	10.61%	1322.88	8.34%	79.21	18.3	0.363
9	E-n33-k4	835	859.91	2.98%	850.08	1.81%	76.74	17.7	0.201
10	E-n51-k5	521	561.12	7.70%	539.68	3.59%	79.47	18.1	0.206
11	E-n76-k7	682	784.00	14.96%	770.68	13.00%	83.46	19.1	0.516
12	F-n45-k4	724	768.32	6.12%	747.40	3.23%	79.32	18.0	0.247
13	F-n72-k4	237	260.07	9.73%	249.88	5.43%	79.29	18.0	0.360
14	F-n135-k7	1162	1330.73	14.52%	1305.68	12.36%	94.83	21.0	0.558
15	M-n101-k10	820	1033.39	26.02%	973.40	18.71%	317.64	22.3	0.354
16	M-n121-k7	1034	1169.68	13.12%	1100.24	6.41%	83.15	19.1	0.503
17	P-n40-k5	458	484.96	5.89%	465.00	1.53%	75.78	18.2	0.263
18	P-n55-k7	568	622.73	9.64%	603.48	6.25%	78.60	18.3	0.382
19	P-n76-k5	627	686.35	9.47%	659.88	5.24%	80.77	18.4	0.371
20	P-n101-k4	681	772.86	13.49%	750.76	10.24%	92.19	21.1	0.579
				9.81%		6.56%	92.30	18.7	0.327

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.1 และขนาดตัวอย่าง 200

	Instance	Optimal	Average		Minimum		Average time (secs.)	Avg # workers	Avg Parallel Performance
		Value	Value	% Gap	Value	% Gap			
1	A-n33-k5	661	690.39	4.45%	679.00	2.72%	84.35	19.2	0.519
2	A-n53-k7	1010	1078.58	6.79%	1062.04	5.15%	81.47	18.3	0.345
3	A-n64-k9	1401	1512.36	7.95%	1484.17	5.94%	83.86	19.4	0.394
4	A-n80-k10	1763	1966.65	11.55%	1923.08	9.08%	88.14	20.3	0.493
5	B-n34-k5	788	814.14	3.32%	803.60	1.98%	80.03	18.4	0.346
6	B-n45-k5	751	822.46	9.52%	807.73	7.55%	78.98	18.0	0.259
7	B-n66-k9	1316	1410.93	7.21%	1396.61	6.13%	80.15	18.4	0.272
8	B-n78-k10	1221	1348.61	10.45%	1339.04	9.67%	89.76	20.3	0.507
9	E-n33-k4	835	854.53	2.34%	849.68	1.76%	81.94	18.6	0.431
10	E-n51-k5	521	559.02	7.30%	539.40	3.53%	82.02	18.7	0.349
11	E-n76-k7	682	786.26	15.29%	767.02	12.47%	116.80	24.0	0.696
12	F-n45-k4	724	761.13	5.13%	747.80	3.29%	85.53	19.6	0.521
13	F-n72-k4	237	256.57	8.26%	251.24	6.01%	93.55	21.2	0.540
14	F-n135-k7	1162	1341.45	15.44%	1292.77	11.25%	125.02	24.0	0.590
15	M-n101-k10	820	1051.28	28.20%	1020.23	24.42%	247.83	23.7	0.586
16	M-n121-k7	1034	1188.29	14.92%	1142.77	10.52%	91.95	21.1	0.502
17	P-n40-k5	458	482.15	5.27%	473.76	3.44%	89.25	20.8	0.568
18	P-n55-k7	568	620.46	9.24%	603.47	6.24%	101.23	23.6	0.635
19	P-n76-k5	627	689.11	9.91%	672.62	7.28%	94.68	21.8	0.552
20	P-n101-k4	681	785.26	15.31%	767.18	12.65%	135.06	24.0	0.760
				9.89%		7.55%	100.58	20.7	0.493

ตารางที่ 4.7 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.1 และขนาดตัวอย่าง 1000

	Instance	Optimal Value	Average		Minimum		Average time (secs.)	Avg # workers	Avg Parallel Performance
			Value	% Gap	Value	% Gap			
1	A-n33-k5	661	683.30	3.37%	678.90	2.71%	166.02	24.0	0.726
2	A-n53-k7	1010	1086.01	7.53%	1060.44	4.99%	129.22	24.0	0.388
3	A-n64-k9	1401	1507.59	7.61%	1475.26	5.30%	148.36	24.0	0.411
4	A-n80-k10	1763	1983.87	12.53%	1899.13	7.72%	179.17	24.0	0.429
5	B-n34-k5	788	805.99	2.28%	797.15	1.16%	121.07	24.0	0.535
6	B-n45-k5	751	822.55	9.53%	806.09	7.34%	107.24	23.0	0.332
7	B-n66-k9	1316	1399.91	6.38%	1385.94	5.31%	108.15	23.9	0.314
8	B-n78-k10	1221	1349.40	10.52%	1335.66	9.39%	185.06	24.0	0.439
9	E-n33-k4	835	856.01	2.52%	850.95	1.91%	142.71	24.0	0.669
10	E-n51-k5	521	560.83	7.64%	545.73	4.75%	124.72	24.0	0.394
11	E-n76-k7	682	779.36	14.28%	764.56	12.11%	300.81	24.0	0.857
12	F-n45-k4	724	768.62	6.16%	749.60	3.54%	166.34	24.0	0.673
13	F-n72-k4	237	255.62	7.85%	252.20	6.41%	181.02	24.0	0.485
14	F-n135-k7	1162	1331.94	14.62%	1307.24	12.50%	301.86	24.0	0.522
15	M-n101-k10	820	1035.91	26.33%	1004.74	22.53%	365.26	24.0	0.815
16	M-n121-k7	1034	1170.21	13.17%	1135.24	9.79%	164.12	24.0	0.369
17	P-n40-k5	458	484.09	5.70%	472.17	3.09%	210.74	24.0	0.716
18	P-n55-k7	568	619.70	9.10%	610.27	7.44%	242.90	24.0	0.819
19	P-n76-k5	627	700.40	11.71%	688.50	9.81%	207.46	24.0	0.537
20	P-n101-k4	681	773.10	13.52%	757.28	11.20%	371.80	24.0	0.874
				9.62%		7.45%	196.20	23.9	0.565

ตารางที่ 4.8 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.2 และขนาดตัวอย่าง 50

	Instance	Optimal Value	Average		Minimum		Average time (secs.)	Avg # workers	Avg Parallel Performance
			Value	% Gap	Value	% Gap			
1	A-n33-k5	661	704.02	6.51%	690.44	4.45%	76.27	17.9	0.225
2	A-n53-k7	1010	1131.60	12.04%	1108.40	9.74%	77.04	17.9	0.210
3	A-n64-k9	1401	1610.88	14.98%	1585.00	13.13%	82.93	18.1	0.268
4	A-n80-k10	1763	2062.99	17.02%	2024.20	14.82%	81.75	18.5	0.362
5	B-n34-k5	788	874.72	11.01%	862.72	9.48%	80.01	17.5	0.187
6	B-n45-k5	751	856.06	13.99%	836.60	11.40%	77.58	17.3	0.180
7	B-n66-k9	1316	1515.97	15.20%	1469.84	11.69%	81.42	18.4	0.221
8	B-n78-k10	1221	1417.70	16.11%	1391.36	13.95%	81.32	18.4	0.370
9	E-n33-k4	835	887.53	6.29%	872.16	4.45%	79.05	18.0	0.202
10	E-n51-k5	521	566.72	8.77%	545.96	4.79%	79.21	17.6	0.207
11	E-n76-k7	682	798.71	17.11%	771.52	13.13%	82.23	19.0	0.514
12	F-n45-k4	724	770.38	6.41%	747.28	3.22%	78.80	18.1	0.245
13	F-n72-k4	237	266.02	12.25%	260.84	10.06%	78.75	18.0	0.345
14	F-n135-k7	1162	1364.97	17.47%	1324.52	13.99%	94.89	21.1	0.557
15	M-n101-k10	820	1072.88	30.84%	1053.16	28.43%	91.86	20.9	0.574
16	M-n121-k7	1034	1221.33	18.12%	1182.44	14.36%	88.19	19.0	0.501
17	P-n40-k5	458	490.54	7.10%	474.40	3.58%	77.59	17.6	0.266
18	P-n55-k7	568	629.63	10.85%	605.48	6.60%	79.89	17.6	0.387
19	P-n76-k5	627	705.02	12.44%	688.80	9.86%	81.43	18.4	0.370
20	P-n101-k4	681	775.53	13.88%	748.88	9.97%	97.53	21.9	0.562
				13.42%		10.55%	82.39	18.6	0.338

ตารางที่ 4.9 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.2 และขนาดตัวอย่าง 200

	Instance	Optimal Value	Average		Minimum		Average time (secs.)	Avg # workers	Avg Parallel Performance
			Value	% Gap	Value	% Gap			
1	A-n33-k5	661	701.50	6.13%	690.56	4.47%	84.44	19.5	0.523
2	A-n53-k7	1010	1132.47	12.13%	1107.09	9.61%	80.46	18.5	0.342
3	A-n64-k9	1401	1612.40	15.09%	1574.41	12.38%	84.57	19.2	0.375
4	A-n80-k10	1763	2057.27	16.69%	1994.95	13.16%	92.30	20.8	0.492
5	B-n34-k5	788	875.58	11.11%	862.79	9.49%	91.05	18.6	0.357
6	B-n45-k5	751	856.27	14.02%	837.53	11.52%	81.25	18.2	0.241
7	B-n66-k9	1316	1512.39	14.92%	1471.50	11.82%	82.11	18.6	0.283
8	B-n78-k10	1221	1419.69	16.27%	1394.85	14.24%	93.85	21.1	0.523
9	E-n33-k4	835	888.98	6.46%	873.08	4.56%	84.61	18.6	0.437
10	E-n51-k5	521	574.98	10.36%	553.86	6.31%	82.62	18.8	0.345
11	E-n76-k7	682	796.94	16.85%	786.00	15.25%	118.10	24.0	0.697
12	F-n45-k4	724	778.58	7.54%	749.96	3.59%	84.87	19.9	0.526
13	F-n72-k4	237	265.11	11.86%	261.07	10.16%	90.23	20.9	0.544
14	F-n135-k7	1162	1390.46	19.66%	1358.37	16.90%	126.03	24.0	0.594
15	M-n101-k10	820	1065.43	29.93%	1007.35	22.85%	133.84	24.0	0.724
16	M-n121-k7	1034	1256.66	21.53%	1212.67	17.28%	92.57	21.5	0.499
17	P-n40-k5	458	490.47	7.09%	476.42	4.02%	90.04	20.5	0.567
18	P-n55-k7	568	633.46	11.53%	623.07	9.70%	101.51	23.2	0.636
19	P-n76-k5	627	713.69	13.83%	693.01	10.53%	95.78	21.7	0.554
20	P-n101-k4	681	782.41	14.89%	764.93	12.32%	136.77	24.0	0.757
			13.89%		11.01%		96.35	20.8	0.501

ตารางที่ 4.10 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีสโทแคสติกโดยใช้ค่าเบี่ยงเบน 0.2 และขนาดตัวอย่าง 1000

	Instance	Optimal Value	Average		Minimum		Average time (secs.)	Avg # workers	Avg Parallel Performance
			Value	% Gap	Value	% Gap			
1	A-n33-k5	661	699.83	5.87%	691.03	4.54%	180.62	24.0	0.682
2	A-n53-k7	1010	1141.34	13.00%	1129.89	11.87%	127.69	24.0	0.391
3	A-n64-k9	1401	1612.67	15.11%	1589.71	13.47%	145.85	24.0	0.396
4	A-n80-k10	1763	2061.01	16.90%	2032.13	15.27%	181.76	24.0	0.418
5	B-n34-k5	788	864.65	9.73%	849.74	7.84%	123.76	24.0	0.530
6	B-n45-k5	751	858.56	14.32%	833.36	10.97%	100.13	22.7	0.306
7	B-n66-k9	1316	1523.09	15.74%	1499.73	13.96%	106.03	23.8	0.316
8	B-n78-k10	1221	1422.38	16.49%	1406.31	15.18%	187.46	24.0	0.448
9	E-n33-k4	835	887.43	6.28%	880.07	5.40%	143.26	24.0	0.665
10	E-n51-k5	521	578.75	11.08%	555.71	6.66%	131.40	24.0	0.411
11	E-n76-k7	682	787.28	15.44%	770.77	13.02%	300.98	24.0	0.858
12	F-n45-k4	724	772.07	6.64%	750.75	3.69%	166.73	24.0	0.666
13	F-n72-k4	237	264.57	11.63%	258.69	9.15%	186.74	24.0	0.499
14	F-n135-k7	1162	1376.01	18.42%	1332.19	14.65%	298.96	24.0	0.520
15	M-n101-k10	820	1049.11	27.94%	1003.06	22.32%	364.66	24.0	0.816
16	M-n121-k7	1034	1237.47	19.68%	1197.71	15.83%	161.61	24.0	0.370
17	P-n40-k5	458	489.62	6.90%	473.25	3.33%	205.33	24.0	0.735
18	P-n55-k7	568	624.52	9.95%	615.15	8.30%	234.46	24.0	0.834
19	P-n76-k5	627	718.48	14.59%	700.11	11.66%	208.29	24.0	0.533
20	P-n101-k4	681	784.72	15.23%	767.53	12.71%	371.39	24.0	0.883
			13.55%		10.99%		196.36	23.9	0.564

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบสโทแคสติก ซึ่งมีปริมาณความต้องการของลูกค้ามีค่าไม่แน่นอน การพิจารณาความไม่แน่นอนของปริมาณความต้องการทำให้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางมีความซับซ้อนขึ้นมาก และทำให้วิธีการแก้ปัญหาที่มีอยู่ไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางแบบสโทแคสติกขึ้นโดยอาศัยการสุ่มตัวอย่างของปริมาณความต้องการ เพื่อใช้ในการประเมินต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้น โดยนำระบบคอมพิวเตอร์แบบกริดเข้ามาช่วยแก้ปัญหาเพื่อเร่งเวลาในการค้นหาคำตอบ การทำงานของโปรแกรมอาศัยระบบการจัดการงานของ HTCondor โดยมีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ ”นาย-บ่าว” (Master-Workers) โปรแกรมการทำงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โปรแกรมหลักและโปรแกรมงานย่อย โดยโปรแกรมหลักทำหน้าที่แบ่งงานเพื่อส่งไปประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์สถานีลูก รวมทั้งการรวบรวมผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมงานย่อยเพื่อใช้ในการปรับค่าของโปรแกรมให้เป็นปัจจุบัน (Update) และแบ่งปันข้อมูลสำหรับโปรแกรมงานย่อยเพื่อใช้ในการประมวลผล ส่วนโปรแกรมงานย่อยทำหน้าที่สุ่มตัวอย่างและค้นหาคำตอบตามงานที่ได้รับมอบหมายจากโปรแกรมหลัก และส่งผลลัพธ์ที่ได้กลับไปยังโปรแกรมหลัก

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองแก้ตัวอย่างปัญหาจากรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Augerat et al., 1998; Christofides & Eilon, 1969) ทั้งหมด 20 ตัวอย่างปัญหา โดยทำการทดลองแก้ปัญหาแบบเชิงกำหนด (โดยไม่พิจารณาความไม่แน่นอน) และทำการทดลองแก้ปัญหาแบบสโทแคสติกโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณความต้องการของลูกค้าให้เป็นแบบสโทแคสติกและใช้รูปแบบการแจกแจงแบบเอกรูป และทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ระหว่างปัญหาแบบเชิงกำหนดและแบบสโทแคสติก จากการทดลองพบว่า คำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาเชิงกำหนดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยเพียง 0.68% ในส่วนของการแก้ปัญหาแบบสโทแคสติก ค่าใช้จ่ายรวมเฉลี่ยที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเบี่ยงเบนของปริมาณความต้องการที่ใช้ในการทดลอง กล่าวคือ ค่าใช้จ่ายรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 10% เมื่อปริมาณความต้องการมีค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1 และค่าใช้จ่ายรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 14% เมื่อปริมาณความต้องการมีค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.2 ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ เวลาจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยใช้เวลาเฉลี่ยไม่เกิน 3 นาที

5.2 ทิศทางการวิจัยในอนาคต

แนวทางหนึ่งในการทำงานวิจัยต่อไปคือการพิจารณารูปแบบการแจกแจงอื่นๆ ของปริมาณความต้องการของลูกค้า เช่น การแจกแจงแบบสามเหลี่ยม (Triangular distribution) การแจกแจงพิวซอง (Poisson Distribution) ซึ่งมีรูปแบบการแจกแจงที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาถึงปัญหาที่มีกรอบเวลาในการรับส่งสินค้า รวมทั้งสภาพการจราจร ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการขนส่งในปัจจุบัน โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและเมืองสำคัญอื่นๆ

เทคนิคการลดความแปรปรวน (Variance reduction technique) ก็เป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการทำวิจัยในอนาคต เทคนิคการลดความแปรปรวนสามารถลดความคลาดเคลื่อนของการประเมินค่าจากการสุ่มตัวอย่าง ทำให้ไม่ต้องสุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ในการแก้ปัญหา ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการค้นหาคำตอบได้ เทคนิคการลดความแปรปรวนที่รู้จักกันมากเช่น การสุ่มตัวอย่างแบบ Latin-hypercube การสุ่มตัวอย่างแบบ Quasi-Monte Carlo เป็นต้น



บรรณานุกรม

1. Ahn, B.-H., & Shin, J.-Y. (1991). Vehicle-routeing with Time Windows and Time-varying Congestion. *Journal of the Operational Research Society*, 42(5), 393–400. <https://doi.org/10.1057/jors.1991.81>
2. Aksoy, Y., & Derbez, A. (2003). Software survey: Supply chain management. *OR MS TODAY*, 30(3), 34–41.
3. Augerat, P., Belenguer, J. M., Benavent, E., Corberan, A., Naddef, D., & Rinaldi, G. (1998). *Computational Results with a Branch-and-Cut Code for the Capacitated Vehicle Routing Problem*.
4. Baños, R., Ortega, J., & Gil, C. (2014). Hybrid MPI/OpenMP Parallel Evolutionary Algorithms for Vehicle Routing Problems. In *Applications of Evolutionary Computation* (pp. 653–664). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45523-4_53
5. Bodin, L. D. (1975). A taxonomic structure for vehicle routing and scheduling problems. *Computers & Urban Society*, 1(1), 11–29. [https://doi.org/10.1016/0305-7097\(75\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0305-7097(75)90003-4)
6. Bodin, L., & Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11(2), 97–108. <https://doi.org/10.1002/net.3230110204>
7. Brandão, J., & Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100(1), 180–191. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00010-6)
8. Bullnheimer, B., Hartl, R. F., & Strauss, C. (1999). An improved Ant System algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research*, 89(0), 319–328. <https://doi.org/10.1023/A:1018940026670>

9. Calvete, H. I., Galé, C., & Oliveros, M.-J. (2012). Ant Colony Optimization for Solving the Vehicle Routing Problem with Delivery Preferences. In *Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management* (pp. 230–239). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30433-0_23
10. Chiang, W.-C., & Russell, R. A. (1996). Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Annals of Operations Research*, 63(1), 3–27. <https://doi.org/10.1007/BF02601637>
11. Christofides, N., & Eilon, S. (1969). An Algorithm for the Vehicle-dispatching Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 20(3), 309–318. <https://doi.org/10.1057/jors.1969.75>
12. Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
13. Czech, Z. J., & Czarnas, P. (2002). Parallel simulated annealing for the vehicle routing problem with time windows. In *Proceedings 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing* (pp. 376–383). <https://doi.org/10.1109/EMPDP.2002.994313>
14. Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954). Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4), 393–410. <https://doi.org/10.1287/opre.2.4.393>
15. Doerner, K. F., Hartl, R. F., Kiechle, G., Lucka, M., & Reimann, M. (2004). Parallel Ant Systems for the Capacitated Vehicle Routing Problem. In *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 72–83). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24652-7_8

16. Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41.
<https://doi.org/10.1109/3477.484436>
17. Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472–1483. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>
18. Gambardella, L. M., Taillard, E., & Agazzi, G. (1999). *MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows*. Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale.
19. Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Management Science*, 40(10), 1276–1290.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.40.10.1276>
20. Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 88(1), 3–12.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00050-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00050-X)
21. Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G., & Musmanno, R. (2003). Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*, 151(1), 1–11.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00915-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00915-3)
22. Golden, B. L., Magnanti, T. L., & Nguyen, H. Q. (1977). Implementing vehicle routing algorithms. *Networks*, 7(2), 113–148.
<https://doi.org/10.1002/net.3230070203>
23. Juan, A. A., Faulin, J., Jorba, J., Caceres, J., & Marquès, J. M. (2013). Using parallel & distributed computing for real-time solving of vehicle routing

- problems with stochastic demands. *Annals of Operations Research*, 207(1), 43–65. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0918-z>
24. Kuo, Y. (2010). Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.03.012>
25. Laporte, G., & Nobert, Y. (1987). Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem*. In G. L. Silvano Martello Michel Minoux and Celso Ribeiro (Ed.), *North-Holland Mathematics Studies* (Vol. 132, pp. 147–184). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0304-0208\(08\)73235-3](https://doi.org/10.1016/S0304-0208(08)73235-3)
26. Laporte, G., & Osman, I. H. (1995). Routing problems: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 61(1), 227–262. <https://doi.org/10.1007/BF02098290>
27. Lee, C.-Y., Lee, Z.-J., Lin, S.-W., & Ying, K.-C. (2010). An enhanced ant colony optimization (EACO) applied to capacitated vehicle routing problem. *Applied Intelligence*, 32(1), 88–95. <https://doi.org/10.1007/s10489-008-0136-9>
28. Maniezzo, A. C. M. D. V. (1992). Distributed optimization by ant colonies. In *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life* (p. 134). Mit Press.
29. Masum, A. K. M., Shahjalal, M., Faruque, F., & Sarker, I. H. (2011). Solving the vehicle routing problem using genetic algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2(7), 126–131.
30. Min, H., Jayaraman, V., & Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00172-0)

31. Nagy, G., & Salhi, S. (2005). Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 126–141.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2002.11.003>
32. Ombuki-Berman, B., & Hanshar, F. T. (2009). Using Genetic Algorithms for Multi-depot Vehicle Routing. In F. B. Pereira & J. Tavares (Eds.), *Bio-inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem* (pp. 77–99). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85152-3_4
33. Osman, I. H. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 41(4), 421–451.
34. Rego, C., & Roucairol, C. (1995). Using Tabu search for solving a dynamic multi-terminal truck dispatching problem. *European Journal of Operational Research*, 83(2), 411–429. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00016-J](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00016-J)
35. Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2), 254–265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
36. Taillard, É., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., & Potvin, J.-Y. (1997). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Transportation Science*, 31(2), 170–186.
<https://doi.org/10.1287/trsc.31.2.170>
37. Van Breedam, A. (1995). Improvement heuristics for the Vehicle Routing Problem based on simulated annealing. *European Journal of Operational Research*, 86(3), 480–490. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00064-J](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00064-J)

38. van Breedam, A. (1996). *An analysis of the effect of local improvement operators in genetic algorithms and simulated annealing for the vehicle routing problem*. RUCA. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Alex_Van_Breedam/publication/216301606_An_analysis_of_the_effect_of_local_improvement_operators_in_genetic_algorithms_and_simulated_annealing_for_the_vehicle_routing_problem/links/546d00b20cf26e95bc3cab4a.pdf
39. Yildırım, U. M., & Çatay, B. (2014). A Parallel Metaheuristic for Solving the Vehicle Routing Problems. In J. F. de Sousa & R. Rossi (Eds.), *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation* (pp. 477–489). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04630-3_35
40. Yoo, Y.-S., & Kim, J.-Y. (2010). A Genetic Algorithm for Efficient Delivery Vehicle Operation Planning Considering Traffic Conditions. In *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2010* (pp. 119–129). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12165-4_10
41. Yu, B., Yang, Z.-Z., & Yao, B. (2009). An improved ant colony optimization for vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.028>