

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

การจัดเส้นทางรถเดินรถเป็นปัญหาที่มีความสำคัญต่อธุรกิจและอุตสาหกรรมในปัจจุบัน 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 ผู้วิจัยนำเสนอการแก้ปัญหาการเดินรถโดยใช้วิธีอาณานิคมเนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพในการค้นหาเส้นทาง อีกทั้งยังสามารถพัฒนาให้ค้นหาคำตอบบนระบบคอมพิวเตอร์แบบขนานได้ง่าย

## 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้ความไม่แน่นอน
2. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีที่สามารถแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้ความไม่แน่นอนในระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

## 1.3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้ความต้องการของอุปสงค์ที่มีค่าไม่แน่นอน
2. พัฒนาขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยใช้ระบบการประมวลผลแบบขนาน
3. เปรียบเทียบผลการทดลองกับปัญหาที่เกี่ยวข้องในวรรณกรรมทั้งในด้านของคุณภาพของคำตอบและเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

## 1.4. ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่ง เพื่อให้ได้ลำดับการเดินทางที่มีประสิทธิภาพ
2. สามารถลดต้นทุนในการขนส่ง รวมทั้งเวลาในการขนส่งได้

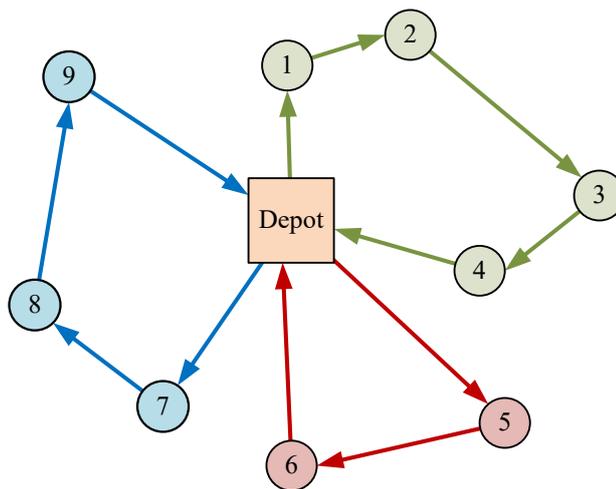
## บทที่ 2

# ปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง

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

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



รูปที่ 1 ตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง ซึ่งประกอบด้วยคลังสินค้าหนึ่งแห่งและเส้นทางส่งสินค้าสามเส้นทาง 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 การแก้ปัญหการจัดเส้นทางการเดินทางแบบระบุรอบเวลาจึงมีความซับซ้อนมากกว่าปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบธรรมดา

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

## 2.3 ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบแบบพลวัต

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแบบทั่วไปไม่ได้พิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลที่อาจแปรผันตามเวลา เช่น ปริมาณความต้องการของลูกค้า ระยะเวลาในการเดินทาง ฯลฯ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นจริง

ในปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารและระบบสารสนเทศที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ข้อมูลต่างๆ สามารถถูกรวบรวมและแบ่งปันได้ทันที เช่น ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต้องการของลูกค้า ข้อมูลสภาพการจราจร ฯลฯ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำข้อมูลที่มีการปรับเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเป็นที่มาของปัญหาการจัดเส้นทางแบบพลวัต (Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP) ซึ่งพิจารณาปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางที่มีข้อมูลแปรผันไปตามเวลา

ปัญหาการจัดเส้นทางแบบพลวัตยังครอบคลุมถึงข้อมูลที่เป็นแบบสโทแคสติก (Stochastic) หรือข้อมูลเชิงน่าจะเป็น (Probabilistic Information) เช่น การมีอยู่หรือการขาดไปของลูกค้า ปริมาณความต้องการของลูกค้าแบบสโทแคสติก (Stochastic Demands) และเวลาเดินทางแบบสโทแคสติก (Stochastic Travel Time) เป็นต้น โดยปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางที่มีข้อมูลแบบสโทแคสติกอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าปัญหาการจัดเส้นทางแบบสโทแคสติก (Stochastic Vehicle Routing problem, SVRP)

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

## 2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทาง (Vehicle routing problems: VRP) ได้เริ่มมีการศึกษาโดย Danzig et al (Dantzig, Fulkerson, & Johnson, 1954) โดยได้นำวิธีแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem, TSP) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีลักษณะคล้ายกันมาประยุกต์ใช้คำว่า vehicle routing ถูกนำมาใช้เกี่ยวกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางครั้งแรกในปี 1977 โดย Golden, Magnati, and Nguyen (Golden, Magnanti, & Nguyen, 1977) และหลังจากนั้นได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทาง เช่น Solomon (Solomon, 1987) ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางแบบระบุรอบเวลา (VRPTW) ซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องเวลาในการรับส่งสินค้า Nagy and Salhi (Nagy & Salhi, 2005) ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางแบบรับและส่ง (VRPPD) ที่มีการรับและส่งสินค้าในเวลาเดียวกัน และ Ahn and Shin (Ahn & Shin, 1991), Rego and Roucairol (Rego & Roucairol, 1995) ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางแบบพลวัต ที่พิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เป็นต้น

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางเป็นปัญหาที่ซับซ้อน ทำให้การหาคำตอบทำได้ยาก โดยเฉพาะกับปัญหาจริงที่มีขนาดใหญ่ การแก้ปัญหาโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) หรือวิธีแบบแม่นยำ (Exact Solution Methods) มักทำได้กับปัญหาที่มี

ขนาดเล็กเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้มีการพัฒนาวิธีแก้ปัญหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Methods) ซึ่งอาศัยวิธีแบบสามัญสำนึกขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้คำตอบที่ยอมรับได้ในเวลาที่จำกัด ตัวอย่างของวิธีฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมได้แก่ วิธี Clark and Wright (Clarke & Wright, 1964) นอกจากนี้ ยังมีวิธีฮิวริสติกอื่นๆ ที่ใช้แก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง เช่น การอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing, SA) (Osman, 1993) การค้นหาแบบทาบู (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) วิธีบริวนซ์แอนด์บาว (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 วิธีฮิวริสติกที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาคำตอบการเดินทาง การเดินทางในปัจจุบันมีดังนี้

### 2.4.2.1. การค้นหาแบบทาบู (Tabu search)

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

### 2.4.2.2. การอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing)

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

### 2.4.2.3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetics Algorithm)

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

### 2.4.2.4. วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO)

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของกลุ่มมด ซึ่งมดจะออกหาอาหารเป็นกลุ่มและมีการสำรวจเส้นทางแบบสุ่ม เมื่อมดตัวหนึ่งพบแหล่งอาหาร มันจะทิ้งสารเคมีที่เรียกว่าฟีโรโมน (Pheromone) ไว้ระหว่างทางกลับไปสู่รังเพื่อให้มดตัวอื่นๆ สามารถตามรอยไปยังแหล่งอาหารได้ โดยมดจะเลือกเส้นทางที่มีความเข้มข้นของสารฟีโรโมนสูงกว่าซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นกว่าเนื่องจากการปล่อยสารฟีโรโมนเสริมที่ถี่กว่าเส้นทางที่ยาวกว่า 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) ที่สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลหลายหน่วยพร้อมกันสามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหการจัดเส้นทางการเดินทางเพื่อเร่งเวลาในการค้นหาคำตอบโดยเฉพาะกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ วิธีฮิวริสติกหลายๆวิธีตามที่ได้กล่าวมาแล้วมีข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งคือสามารถพัฒนาให้ทำงานแบบขนานได้ง่าย เนื่องจากหน่วยประมวลผลสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างอิสระต่อกัน และแบ่งปันข้อมูลร่วมกันเพื่อให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ขั้นตอนวิธีแบบขนานในการค้นหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางเช่น ได้แก่ ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดแบบขนาน (Doerner et al., 2004) การบ่อน้ำจาลองแบบขนาน (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

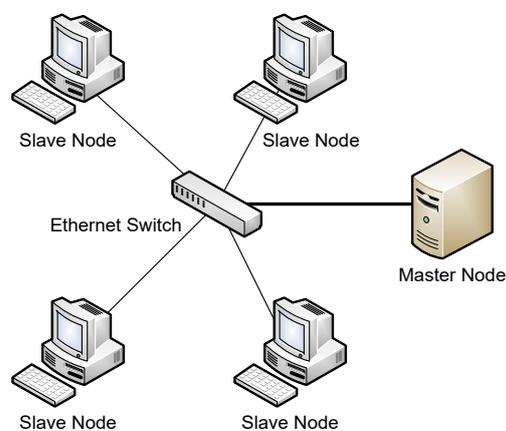
## วิธีการดำเนินวิจัย

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 เมื่อได้เส้นทางเดินทางแล้ว เส้นทางต่างๆ ที่ได้จะถูกนำไปประเมินค่าใช้จ่ายรวม เพื่อเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด แล้วนำไปปรับปรุงวิธีการค้นหาคำตอบในรอบถัดไป เนื่องจากการประเมินเส้นทางจะต้องคำนวณภายใต้ความไม่แน่นอน และด้วยขนาดของเซตของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มาก ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างในการประเมินเส้นทางแทน ซึ่งความคลาดเคลื่อนในการประเมินค่าใช้จ่ายจะแปรผันตามจำนวนของตัวอย่างที่ทำการสุ่ม โดยการหาเส้นทางและการประเมินเส้นทาง จะใช้การประมวลผลแบบขนาน เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบลง

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

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, & Colorni, 1996) ได้นำเสนอแนวคิดในการหาคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (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

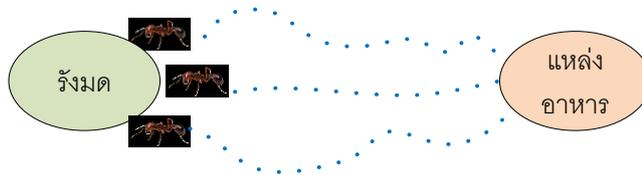
การค้นหาเส้นทางของมดในธรรมชาติอาศัยการปล่อยสารฟีโรโมนตามเส้นทางที่มดเดินผ่าน และมดตัวอื่นๆจะเลือกเส้นทางการเดินโดยพิจารณาจากความเข้มข้นของสารฟีโรโมนที่ตัวอื่นปล่อยทิ้งไว้ เนื่องจากสารฟีโรโมนเป็นสารที่สามารถระเหยได้ ดังนั้น มดจึงต้องมีการปล่อยสารฟีโรโมนเสริมบนเส้นทางที่เดินผ่านเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารฟีโรโมนบนเส้นทางนั้นๆ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



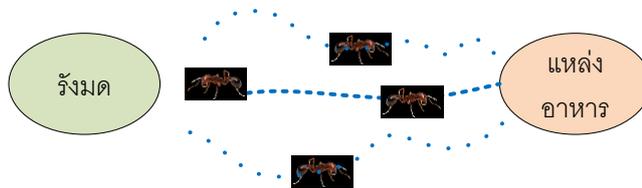
รูปที่ 3.2 การออกเดินทางค้นหาแหล่งอาหารของมด



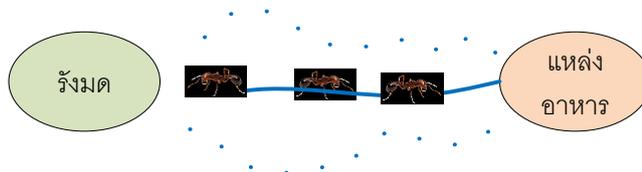
รูปที่ 3.3 เมื่อมดพบแหล่งอาหาร



รูปที่ 3.4 การทิ้งสารฟีโรโมนบนเส้นทางกลับรัง



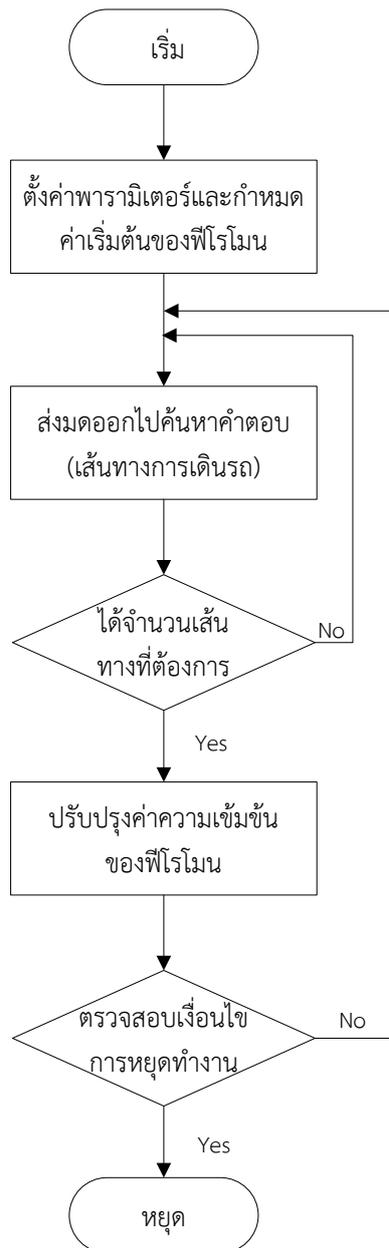
รูปที่ 3.5 การตามรอยสารฟีโรโมนของมดไปสู่แหล่งอาหาร



รูปที่ 3.6 การเลือกเส้นทางของมดตามความเข้มข้นของสารฟีโรโมน

### 3.1.1 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง

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



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง

กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดเริ่มจากการตั้งค่าพารามิเตอร์และกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่าความเข้มข้นของไฟโรโมน ตัวอย่างของค่าพารามิเตอร์เช่น จำนวนมดที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ จากนั้นทำการส่งมอดอกไปค้นหาคำตอบ ซึ่งในที่นี้คือลำดับของการจัดส่งสินค้าไปให้กับลูกค้าของรถแต่ละคัน โดยรถบรรทุกจะเริ่มจากศูนย์กระจายสินค้า ไปส่งสินค้าให้ลูกค้า แล้วกลับมาที่ศูนย์กระจายสินค้า เมื่อได้จำนวนคำตอบตามที่ต้องการแล้ว จะนำคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ ไปปรับปรุงค่าความเข้มข้นของไฟโรโมน และทำการทำซ้ำจนกว่าจะถึงเงื่อนไขการหยุดทำงาน โดยรายละเอียดของ

ขั้นตอนการค้นหาคำตอบและการปรับปรุงค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1.2 และ 3.1.3

### 3.1.2 การค้นหาคำตอบ

การค้นหาคำตอบในที่นี้หมายถึงการหาลำดับก่อนหลังของการส่งสินค้าให้แก่ลูกค้าสำหรับรถบรรทุกแต่ละคัน โดยมดจะทำการเลือก node (หมายเลขของลูกค้า) โดยพิจารณาจากปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้าที่เหลืออยู่ว่าจะมีสินค้าเพียงพอที่จะส่งให้ลูกค้าหรือไม่ ในกรณีของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางภายใต้ความต้องการที่ไม่แน่นอน ปริมาณความต้องการของลูกค้าจะได้รับการสุ่ม ซึ่งอาจจะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละรอบการสุ่ม การค้นหาคำตอบจะกระทำกับรถบรรทุกทีละคัน เมื่อรถบรรทุกมีสินค้าคงเหลือไม่เพียงพอที่จะส่งให้กับลูกค้า รถคันนั้นก็ต้องกลับไปศูนย์กระจายสินค้า 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  $i$
- $\eta_{ij}$  = ค่าฮิวริสติกในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า  $j$  ต่อจาก  $i$
- $\tau_{ij}$  = ค่าฟีโรโมนในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า  $j$  ต่อจาก  $i$
- $\alpha$  = ค่าน้ำหนักของฟีโรโมน
- $\beta$  = ค่าน้ำหนักของฮิวริสติก

ค่าฮิวริสติกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกเส้นทาง มีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการหาค่าของ  $\eta$  มากมาย เช่น ในงานวิจัยของ Dorigo et. al. (Dorigo et al., 1996) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travel Salesman Problem, TSP) โดยกำหนดค่า ของ  $\eta_{ij}$  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

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \text{ระยะทางจาก node } i \text{ ไปยัง node } j \\ c &= \text{ค่าคงที่} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t+1) &= \text{ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนจากลูกค้า } i \text{ ไป } j \text{ ในรอบถัดไป} \\ \tau_{ij}(t) &= \text{ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนจากลูกค้า } i \text{ ไป } j \text{ ในรอบปัจจุบัน} \\ \rho &= \text{อัตราการระเหยของฟีโรโมน} \end{aligned}$$

### 3.1.4 การสิ้นสุดการทำงาน

วิธีที่ง่ายที่สุดในการหยุดการทำงานของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดคือการกำหนดรอบการทำงาน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด นอกจากนี้ การกำหนดวิธีการหยุดทำงานยังสามารถทำได้โดย

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

การพัฒนาขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหการจัดเส้นทางเดินทางแบบสโตแคสติกอาศัยการทำงานของระบบจัดการงาน (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

หน้าที่ในการประมวลผล ซึ่งเรียกว่าเครื่อง Clients เมื่อผู้ใช้งานส่งงาน (Submit Jobs) เข้ามาประมวลผลในระบบ เครื่อง Master จะตรวจสอบสถานะของเครื่อง Clients ต่างๆ ว่ามีเครื่องใดบ้างที่สามารถประมวลผลงานที่ได้รับ และถ้าเครื่อง Client มีสถานะว่าง ก็จะจัดส่งงานไปประมวลผลบนเครื่อง Client นั้นๆ HTCondor เป็นระบบจัดการงานที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเจ้าของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาเข้าระบบสามารถกำหนดนโยบายในการใช้งานได้ 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

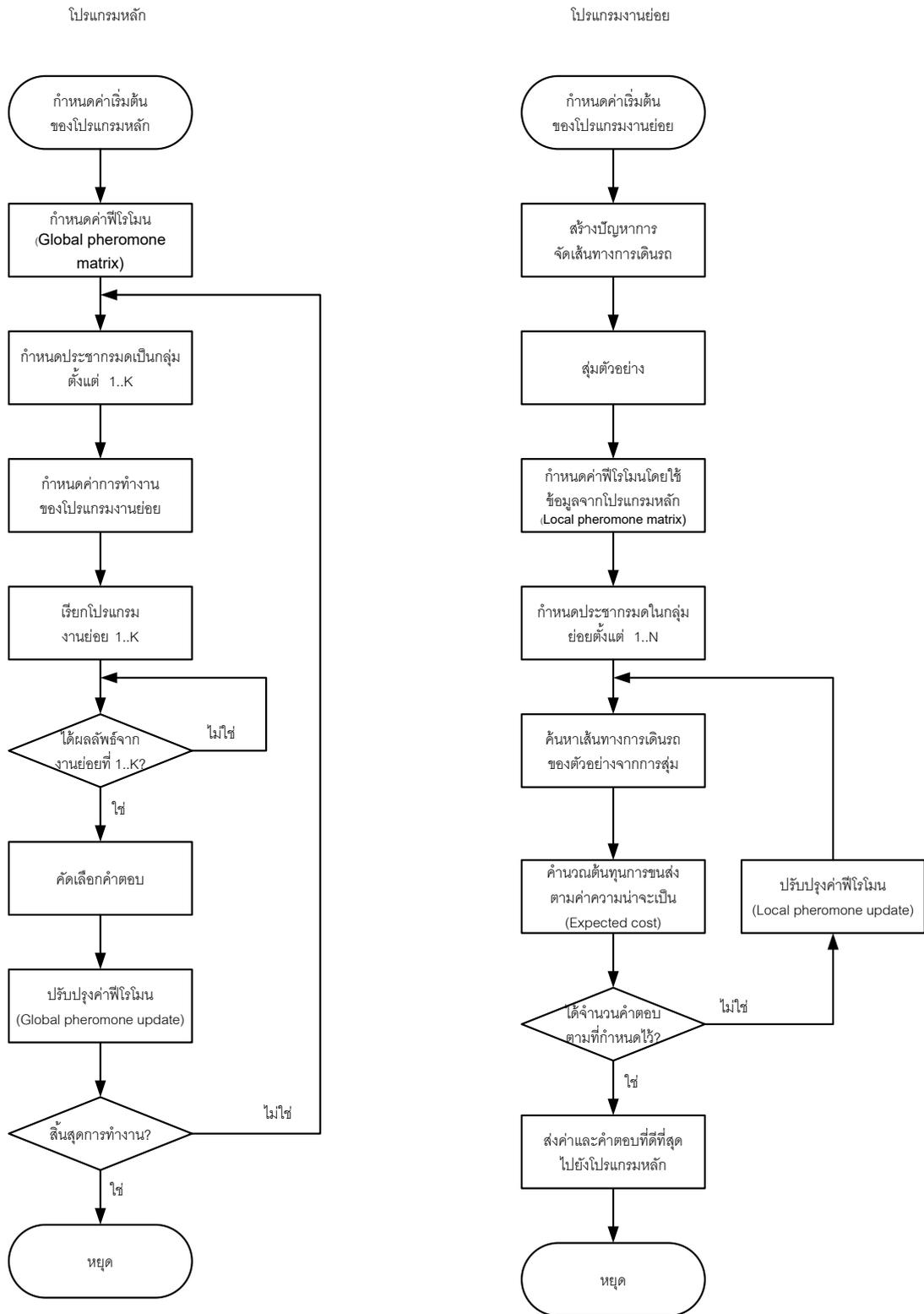
เนื่องจากการเก็บค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนส่วนกลางเฉพาะที่ ดังนั้น ในการนำค่าฟีโรโมนไปใช้งาน จะต้องกำหนดสัดส่วนของค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนส่วนกลางเฉพาะที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ (3.4)

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

โดยที่

- $\tau_{ij}^G$  = ค่าฟีโรโมนส่วนกลางในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า  $j$  ต่อจาก  $i$
- $\tau_{ij}^L$  = ค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ในการเลือกลำดับการจัดส่งของลูกค้า  $j$  ต่อจาก  $i$
- $\lambda$  = สัดส่วนของการใช้ค่าฟีโรโมนส่วนกลาง

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



รูปที่ 3.8 ผังการทำงานของโปรแกรมหลักและโปรแกรมงานย่อย

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

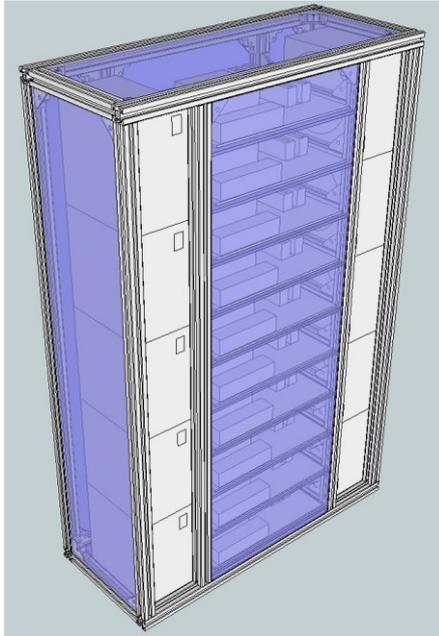
ในบทนี้เป็น การนำขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอและพัฒนาขึ้นมาทดสอบกับตัวอย่างปัญหาจากงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการทดลองกับคำตอบจากงานวิจัยอื่น ทั้งในแง่ของคุณภาพของคำตอบและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

#### 4.1 ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

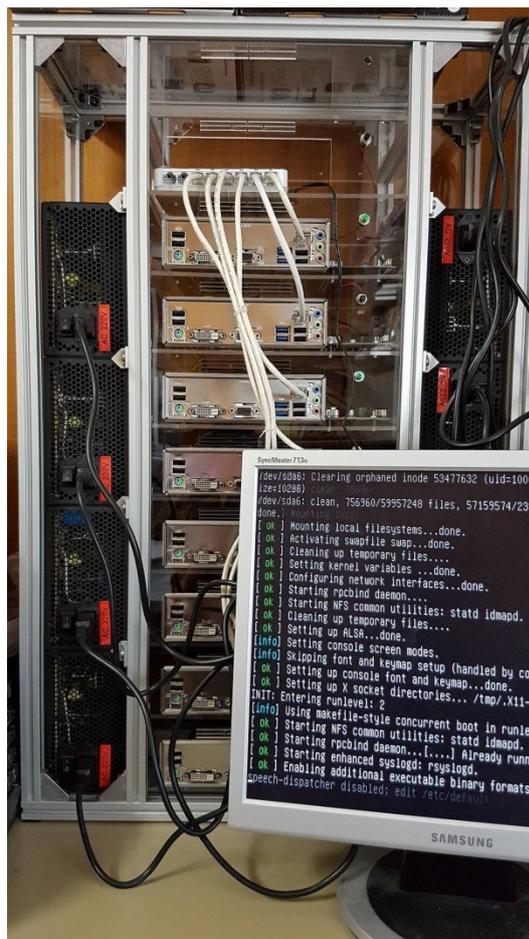
ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกันด้วยระบบเครือข่ายความเร็วสูง (Gigabit Ethernet) เพื่อให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ประหยัดพื้นที่และงานในการติดตั้ง ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมดอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน โดยใช้โปรแกรม CAD/CAM ในการออกแบบโครงสร้างเชิงกลก่อนที่จะทำการสร้างจริง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

#### 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

### 4.3 การทดลองและผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลองผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ทำการทดลองแก้ปัญหา การจัดเส้นทางรถแบบเชิงกำหนด (Deterministic) และแบบสโโทแคสติก ในกรณีของการแก้ปัญหาแบบเชิงกำหนด ค่าความต้องการสินค้าของลูกค้าแต่ละรายจะใช้ค่าเดิมตามที่กำหนดใน ตัวอย่างปัญหา ในกรณีของการแก้ปัญหาแบบสโโทแคสติก ค่าความต้องการสินค้าของลูกค้าแต่ละราย จะถูกแทนที่ด้วยตัวแปรสุ่มแบบเอกรูป โดยกำหนดให้สัดส่วนของค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.1 และ 0.2 ตามลำดับ และใช้การสุ่มตัวอย่างในการประเมินค่าต้นทุนการขนส่ง โดยทำการสุ่มที่ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 50 200 และ 1000 ตามลำดับ

สำหรับวิธีการทดลอง ในแต่ละการทดลอง ผู้วิจัยใช้วิธีการทำทดลองซ้ำ 10 ครั้ง และบันทึก ผลการทดลองและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนาน (Parallel Performance) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงการใช้ประโยชน์จากเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมด สำหรับ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

No	พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
1	จำนวนงานย่อย	24
2	จำนวนรอบ	200
3	ประชากรมด	500
4	อัตราการระเหย ( $\rho$ )	0.04
5	ปริมาณการเพิ่มค่าฟีโรโมน ( $\Delta$ )	0.04
6	ค่าน้ำหนักของฟีโรโมน ( $\alpha$ )	1
7	ค่าน้ำหนักของฮิวริสติก ( $\beta$ )	2
8	สัดส่วนของฟีโรโมนส่วนกลาง	0.5

ตารางที่ 4.3-4.5 แสดงผลการทดลองโดยนำเสนอในรูปแบบของค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้ง 10 ครั้ง ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าวัตถุประสงค์ที่ได้จากการทดลอง ส่วนตารางที่ 4.4 และ 4.5 เป็นค่าเฉลี่ยของสถิติที่ใช้ในการประมวลผลด้วยวิธีเชิงกำหนดและวิธีสโโทแคสติกตามลำดับ จาก ตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ค่าวัตถุประสงค์ที่ได้จากการแก้ปัญหา (คอลัมน์ “Solve”) และค่าที่ได้จากการประเมิน (คอลัมน์ “Evaluate”) ในกรณีของคำตอบแบบเชิงกำหนด (คอลัมน์ “Deterministic”) มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในกรณีของคำตอบแบบสโโทแคสติก (คอลัมน์ “Deterministic”) มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่า คำตอบที่ได้จากวิธีแก้ปัญหาแบบเชิงกำหนด

เมื่อนำไปใช้ภายใต้สถานการณ์ที่ค่าเวลาดำเนินงานมีความไม่แน่นอน จะทำให้เวลาการดำเนินงานรวม หรือ makespan เพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งคือ ทำให้งานเสร็จช้ากว่าที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาแบบสโทแคสติกจึงมีความเหมาะสมกว่าภายใต้สถานการณ์ที่ไม่แน่นอน ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ค่าที่ประเมินได้จากคำตอบแบบสโทแคสติก (ส่วนใหญ่) จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ประเมินได้จากคำตอบแบบเชิงกำหนด ยกเว้นในตัวอย่างปัญหา “la04” และ “la15” โดยค่าในคอลัมน์ “VSS” เป็นค่าแสดงร้อยละของความแตกต่างจากการประเมินระหว่างคำตอบแบบเชิงกำหนดและแบบสโทแคสติก ตามทฤษฎีแล้ว ค่า VSS ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 นั้นหมายความว่า คำตอบแบบสโทแคสติกไม่ควรจะ “แย่กว่า” คำตอบแบบเชิงกำหนด แต่เนื่องจากวิธีการค้นหาคำตอบในงานวิจัยนี้เป็นแบบฮิวริสติก ซึ่งไม่สามารถรับประกันคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่ค่า VSS จากการทดลองมีค่าเป็นลบ

ในด้านของสถิติการประมวลผล จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ปัญหาส่วนใหญ่ใช้เวลาในการแก้ปัญหาและการประเมินผลค่อนข้างน้อย (ยกเว้นตัวอย่างปัญหา “la31”) และสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนานมีค่าค่อนข้างต่ำ สาเหตุเนื่องจากปัญหาส่วนใหญ่ค่อนข้างง่าย จึงทำให้การใช้งานหน่วยประมวลผลไม่ได้เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหามีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าแต่ละปัญหาจะมีจำนวนงานและเครื่องจักรต่างกัน

ในส่วนของการแก้ปัญหาแบบสโทแคสติก จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาเพิ่มขึ้นตามขนาดของปัญหา (จำนวนงานและเครื่องจักร) และสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนานมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้หน่วยประมวลผลอย่างเต็มประสิทธิภาพ และจากเวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการค้นหาคำตอบแบบเชิงกำหนด แสดงให้เห็นถึงระดับความยากที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาถึงความไม่แน่นอนในการแก้ปัญหา

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของค่าวัตถุประสงค์ (เวลาดำเนินการรวม) จากการทดลอง

No	Instance	Deterministic		Stochastic		VSS(%)
		Solve	Evaluate	Solve	Evaluate	
1	la01	666.0	731.3	716.4	716.1	2.13
2	la04	596.4	665.3	677.4	677.0	-1.73
3	la05	593.0	630.0	609.1	609.1	3.43
4	la06	926.0	997.9	963.2	962.9	3.64
5	la08	863.0	950.2	925.4	925.3	2.69
6	la09	951.0	1025.8	1004.5	1004.4	2.13
7	la10	958.0	1024.3	986.5	987.5	3.73
8	la11	1222.0	1310.3	1274.2	1274.6	2.80
9	la12	1039.0	1118.9	1099.3	1099.8	1.74

10	la13	1150.0	1236.4	1210.1	1210.8	2.11
11	la14	1292.0	1360.1	1305.0	1306.4	4.11
12	la15	1216.7	1323.5	1330.1	1330.2	-0.50
13	la31	1788.4	1976.8	1968.5	1968.9	0.40

ตารางที่ 4.4 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีเชิงกำหนด

	Instance	Optimal Value	Average		Minimum		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

ตารางที่ 4.5 สถิติจากการประมวลผลด้วยวิธีสโตนแคสติง

Instance	Solve			Evaluate		
	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance
la01	28.0	735.2	0.934	21.8	116.7	0.670
la04	28.0	738.9	0.936	23.5	108.8	0.621
la05	28.0	737.4	0.937	23.6	103.7	0.655
la06	28.0	1081.4	0.955	26.3	118.5	0.650
la08	28.0	1107.9	0.951	26.2	119.4	0.642
la09	28.0	1073.4	0.954	26.3	119.8	0.639

la10	28.0	1087.5	0.954	26.2	119.3	0.642
la11	28.0	1466.6	0.957	28.0	130.1	0.634
la12	28.0	1454.0	0.957	27.9	130.6	0.621
la13	28.0	1465.4	0.956	27.8	129.4	0.644
la14	28.0	1458.9	0.963	27.6	127.2	0.657
la15	28.0	1479.1	0.962	27.4	131.9	0.640
la31	28.0	5429.4	0.973	28.0	264.6	0.643

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางตามงานแบบสโทแคสติก ซึ่งมีเวลาของการดำเนินงานเป็นเวลาที่มั่วไม่แน่นอน การพิจารณาความไม่แน่นอนของตัวแปรเวลาทำให้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางมีความซับซ้อนขึ้นมาก และทำให้วิธีการแก้ปัญหาที่มีอยู่ทั่วไปสามารถทำได้ยาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำระบบคอมพิวเตอร์แบบกริดเข้ามาช่วยแก้ปัญหาเพื่อร่นเวลาในการค้นหาคำตอบ โดยพัฒนาโปรแกรมให้สามารถทำงานแบบขนานบนระบบคอมพิวเตอร์แบบกริด การทำงานของโปรแกรมอาศัยระบบการจัดการงานของ HTCCondor โดยมีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ ”นาย-บ่าว” (Master-Workers) โปรแกรมการทำงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โปรแกรมหลักและโปรแกรมงานย่อย โดยโปรแกรมหลักทำหน้าที่แบ่งงานเพื่อส่งไปประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์สถานีลูก รวมทั้งการรวบรวมผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมงานย่อยเพื่อใช้ในการปรับค่าของโปรแกรมให้เป็นปัจจุบัน (Update) และแบ่งปันข้อมูลสำหรับโปรแกรมงานย่อยเพื่อใช้ในการประมวลผล ส่วนโปรแกรมงานย่อยทำหน้าที่สุ่มตัวอย่างและค้นหาคำตอบตามงานที่ได้รับมอบหมายจากโปรแกรมหลัก และส่งผลลัพธ์ที่ได้กลับไปยังโปรแกรมหลัก

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองแก้ปัญหาจากตัวอย่างปัญหาของ OR-Library ทั้งหมด 13 ตัวอย่างปัญหา โดยการปรับเปลี่ยนเวลาดำเนินงานของปัญหาให้เป็นแบบสโทแคสติกและใช้รูปแบบการแจกแจงแบบปกติปลายตัด โดยทำการทดลองแก้ปัญหาแบบเชิงกำหนด (โดยไม่พิจารณาความไม่แน่นอน) และแบบสโทแคสติก และทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ระหว่างปัญหาแบบเชิงกำหนดและแบบสโทแคสติกโดยการประเมินคำตอบที่ได้ จากการทดลองพบว่า คำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาแบบสโทแคสติกมีเวลารวมที่น้อยกว่าคำตอบจากการแก้ปัญหาแบบเชิงกำหนดภายใต้สถานการณ์ของเวลาการดำเนินงานที่มั่วไม่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาแบบสโทแคสติกมีความเหมาะสมกว่าในการนำไปใช้งานจริงภายใต้สถานการณ์ความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม การคำนึงถึงความไม่แน่นอนของปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางทำให้ต้องใช้เวลาในการแก้ปัญหาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

### 5.2 ทิศทางการทำวิจัยในอนาคต

แนวทางหนึ่งในการทำงานวิจัยต่อไปคือการพิจารณารูปแบบการแจกแจงอื่นๆ ของเวลาการดำเนินการ เช่น การแจกแจงแบบสามเหลี่ยม (Triangular distribution) การแจกแจงแบบบีตา (Beta distribution) ซึ่งเป็นรูปแบบการแจกแจงที่ใช้กันทั่วไปสำหรับข้อมูลที่เป็นเวลา

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

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังมีแนวคิดในการนำวิธีการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ไปใช้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการขยายระบบคอมพิวเตอร์แบบกริดให้ใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม จำนวนคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้สมรรถนะในการประมวลผลแบบขนานลดลงเนื่องจากต้องมีการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์มากขึ้น แต่ผลกระทบคงจะมีไม่มากเนื่องจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ สมรรถนะในการประมวลผลแบบขนานยังมีค่าที่สูงเมื่อทำการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ การเพิ่มสมรรถนะในการประมวลผลแบบขนานที่สามารถทำได้วิธีหนึ่งคือการใช้การรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์แบบไม่ประสานเวลา (Asynchronous) ซึ่งสามารถทำได้ภายใต้กรอบของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด ซึ่งหมายความว่าโปรแกรมหลักสามารถทำงานต่อได้โดยไม่จำเป็นต้องรอให้การประมวลผลจากโปรแกรมงานย่อยเสร็จสิ้นทั้งหมดก่อน

## 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](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](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](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](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](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. Yıldırım, 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](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](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>

**ภาคผนวก**  
**ตารางผลการทดลอง**

ตารางที่ ผ1. ผลจากการแก้ปัญหาเชิงกำหนดและค่าจากการประเมิน

		Deterministic							
		Makespan		Solve			Evaluate		
Instance	Trial	Solve	Evaluate	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance
la01	0	666	732.55	26	118.12	0.17	24	106.89	0.64
	1	666	726.16	26	118.29	0.17	25	111.64	0.60
	2	666	732.00	26	119.51	0.16	23	105.37	0.66
	3	666	730.74	26	122.50	0.17	24	107.39	0.64
	4	666	725.15	28	133.16	0.14	24	108.34	0.63
	5	666	737.45	26	115.24	0.16	25	111.91	0.61
	6	666	738.56	26	118.66	0.17	24	110.09	0.61
	7	666	737.77	26	118.17	0.17	22	99.68	0.71
	8	666	727.93	26	118.16	0.17	23	102.71	0.68
	9	666	724.68	26	118.45	0.16	24	105.62	0.66
<b>Avg</b>		<b>666.0</b>	<b>731.30</b>	<b>26.2</b>	<b>120.03</b>	<b>0.16</b>	<b>23.8</b>	<b>106.97</b>	<b>0.64</b>
la04	0	598	669.06	26	104.35	0.17	23	100.85	0.71
	1	598	668.93	27	121.41	0.16	24	108.15	0.63
	2	598	672.12	26	120.02	0.17	23	99.45	0.70
	3	598	673.01	26	121.24	0.17	24	106.24	0.65
	4	590	649.99	27	128.95	0.17	23	102.84	0.67
	5	598	668.85	26	106.64	0.17	24	111.58	0.62
	6	590	651.99	26	119.58	0.17	23	102.26	0.68
	7	598	669.28	26	122.44	0.18	25	111.67	0.60
	8	598	671.58	27	126.82	0.17	24	106.01	0.65
	9	598	658.19	26	106.46	0.17	25	111.62	0.60
<b>Avg</b>		<b>596.4</b>	<b>665.30</b>	<b>26.3</b>	<b>117.79</b>	<b>0.17</b>	<b>23.8</b>	<b>106.07</b>	<b>0.65</b>
la05	0	593	618.40	26	118.68	0.17	25	110.59	0.61
	1	593	640.68	26	159.95	0.17	23	100.31	0.72
	2	593	648.41	26	111.84	0.17	22	98.24	0.74
	3	593	624.42	25	119.13	0.17	22	99.35	0.72
	4	593	621.84	26	118.71	0.17	23	103.24	0.68
	5	593	633.61	26	120.05	0.17	24	109.00	0.62
	6	593	625.49	26	123.04	0.16	25	114.34	0.58
	7	593	640.87	27	125.62	0.17	24	108.28	0.62
	8	593	619.30	26	107.09	0.17	24	106.36	0.65
	9	593	626.98	26	119.05	0.17	24	106.45	0.63
<b>Avg</b>		<b>593.0</b>	<b>630.00</b>	<b>26.0</b>	<b>122.31</b>	<b>0.17</b>	<b>23.6</b>	<b>105.61</b>	<b>0.66</b>
la06	0	926	1006.29	27	120.42	0.29	26	118.90	0.63
	1	926	984.69	27	124.25	0.29	26	119.30	0.65
	2	926	1006.86	26	123.11	0.30	27	121.15	0.63

		Deterministic							
		Makespan		Solve			Evaluate		
Instance	Trial	Solve	Evaluate	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance
	3	926	988.43	26	104.14	0.30	26	115.49	0.68
	4	926	988.30	26	116.67	0.30	25	114.77	0.69
	5	926	988.75	27	120.60	0.29	26	118.37	0.65
	6	926	991.52	27	122.95	0.30	24	109.93	0.75
	7	926	1006.86	26	122.91	0.30	26	117.10	0.66
	8	926	1022.97	26	125.17	0.29	26	116.94	0.67
	9	926	994.61	26	106.97	0.31	26	118.16	0.66
	<b>Avg</b>	<b>926.0</b>	<b>997.93</b>	<b>26.4</b>	<b>118.72</b>	<b>0.30</b>	<b>25.8</b>	<b>117.01</b>	<b>0.67</b>
la08	0	863	944.98	27	124.76	0.34	25	113.98	0.69
	1	863	958.75	26	106.23	0.35	26	119.04	0.65
	2	863	954.76	26	116.26	0.36	25	114.29	0.70
	3	863	942.20	26	120.32	0.36	26	119.91	0.64
	4	863	960.13	26	121.25	0.36	27	121.66	0.62
	5	863	950.97	27	125.18	0.36	27	121.62	0.62
	6	863	942.39	26	105.67	0.36	27	120.39	0.63
	7	863	952.86	26	119.58	0.35	27	121.25	0.62
	8	863	938.04	26	120.68	0.36	27	120.33	0.63
	9	863	956.52	26	124.06	0.36	27	120.61	0.62
	<b>Avg</b>	<b>863.0</b>	<b>950.16</b>	<b>26.2</b>	<b>118.40</b>	<b>0.36</b>	<b>26.4</b>	<b>119.31</b>	<b>0.64</b>
la09	0	951	1034.88	26	106.76	0.27	27	122.75	0.61
	1	951	1020.55	26	119.89	0.27	27	121.78	0.63
	2	951	1031.60	26	122.27	0.27	26	117.79	0.65
	3	951	1018.43	26	123.58	0.27	24	109.83	0.73
	4	951	1019.49	26	105.26	0.27	26	119.49	0.65
	5	951	1032.38	26	120.11	0.27	25	112.73	0.69
	6	951	1024.63	27	125.86	0.27	26	117.25	0.67
	7	951	1025.67	27	127.07	0.27	27	121.70	0.62
	8	951	1026.91	27	107.25	0.27	26	119.33	0.65
	9	951	1023.66	26	116.35	0.27	27	121.76	0.63
	<b>Avg</b>	<b>951.0</b>	<b>1025.82</b>	<b>26.3</b>	<b>117.44</b>	<b>0.27</b>	<b>26.1</b>	<b>118.44</b>	<b>0.65</b>
la10	0	958	1021.63	27	122.07	0.31	28	125.72	0.59
	1	958	1021.77	26	122.83	0.32	27	121.22	0.63
	2	958	1034.07	27	125.82	0.33	26	118.51	0.64
	3	958	1012.69	26	107.23	0.32	25	112.30	0.72
	4	958	1018.92	27	122.92	0.31	26	119.36	0.65
	5	958	1030.32	27	123.16	0.32	26	119.21	0.64
	6	958	1040.09	26	122.20	0.33	26	116.04	0.68
	7	958	1025.13	27	124.63	0.32	26	115.38	0.67
	8	958	1006.15	27	108.78	0.30	25	113.47	0.70
	9	958	1032.66	26	116.19	0.33	26	119.48	0.64
	<b>Avg</b>	<b>958.0</b>	<b>1024.34</b>	<b>26.6</b>	<b>119.58</b>	<b>0.32</b>	<b>26.1</b>	<b>118.07</b>	<b>0.66</b>
la11	0	1222	1324.75	28	141.36	0.51	28	133.11	0.62
	1	1222	1284.06	28	135.96	0.54	25	135.78	0.69

		Deterministic							
		Makespan		Solve			Evaluate		
Instance	Trial	Solve	Evaluate	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance
	2	1222	1314.04	28	139.77	0.54	28	128.24	0.66
	3	1222	1317.11	28	140.79	0.54	28	130.94	0.64
	4	1222	1298.67	28	119.97	0.54	28	135.35	0.58
	5	1222	1301.59	28	137.93	0.54	28	125.13	0.65
	6	1222	1294.21	28	139.72	0.53	27	124.52	0.69
	7	1222	1317.04	28	145.67	0.54	28	132.82	0.63
	8	1222	1335.72	28	135.39	0.54	27	121.67	0.70
	9	1222	1315.60	28	136.78	0.54	28	132.73	0.63
	<b>Avg</b>	<b>1222.0</b>	<b>1310.28</b>	<b>28.0</b>	<b>137.33</b>	<b>0.54</b>	<b>27.5</b>	<b>130.03</b>	<b>0.65</b>
la12	0	1039	1117.43	28	133.37	0.50	28	134.86	0.59
	1	1039	1121.79	28	132.90	0.51	28	131.59	0.58
	2	1039	1140.22	28	136.89	0.51	28	118.93	0.66
	3	1039	1114.60	28	118.89	0.50	28	137.31	0.60
	4	1039	1122.20	28	129.97	0.51	28	128.21	0.64
	5	1039	1112.36	28	133.90	0.51	28	134.17	0.61
	6	1039	1125.45	28	135.42	0.51	28	131.96	0.60
	7	1039	1111.21	28	138.85	0.50	28	124.51	0.65
	8	1039	1119.58	28	118.93	0.51	28	130.63	0.64
	9	1039	1104.63	28	136.60	0.49	28	146.81	0.57
	<b>Avg</b>	<b>1039.0</b>	<b>1118.95</b>	<b>28.0</b>	<b>131.57</b>	<b>0.50</b>	<b>28.0</b>	<b>131.90</b>	<b>0.61</b>
la13	0	1150	1241.60	28	138.04	0.53	28	134.15	0.66
	1	1150	1238.96	28	139.53	0.53	28	132.92	0.63
	2	1150	1231.87	28	121.31	0.53	27	121.40	0.69
	3	1150	1235.18	28	133.12	0.54	27	111.88	0.71
	4	1150	1242.09	28	136.43	0.53	28	126.80	0.68
	5	1150	1231.32	28	138.23	0.53	27	125.32	0.70
	6	1150	1243.31	28	123.17	0.53	28	126.16	0.66
	7	1150	1227.48	28	132.95	0.53	27	125.14	0.69
	8	1150	1226.49	28	135.75	0.54	28	130.33	0.63
	9	1150	1245.48	28	141.71	0.51	28	129.79	0.65
	<b>Avg</b>	<b>1150.0</b>	<b>1236.38</b>	<b>28.0</b>	<b>134.02</b>	<b>0.53</b>	<b>27.6</b>	<b>126.39</b>	<b>0.67</b>
la14	0	1292	1351.05	28	121.33	0.54	28	131.94	0.64
	1	1292	1363.54	28	134.95	0.54	28	124.65	0.69
	2	1292	1363.27	28	135.38	0.54	28	131.86	0.64
	3	1292	1347.06	28	137.65	0.54	28	128.69	0.64
	4	1292	1352.70	28	139.71	0.54	28	132.42	0.64
	5	1292	1359.69	28	120.10	0.54	28	129.95	0.62
	6	1292	1364.89	28	134.41	0.54	28	130.88	0.64
	7	1292	1361.31	28	135.64	0.55	28	124.59	0.68
	8	1292	1379.75	28	136.12	0.54	28	132.84	0.64
	9	1292	1357.32	28	138.28	0.55	28	124.76	0.68
	<b>Avg</b>	<b>1292.0</b>	<b>1360.06</b>	<b>28.0</b>	<b>133.36</b>	<b>0.54</b>	<b>28.0</b>	<b>129.26</b>	<b>0.65</b>
la15	0	1212	1324.46	28	138.97	0.56	28	134.52	0.64

		Deterministic							
		Makespan		Solve			Evaluate		
Instance	Trial	Solve	Evaluate	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance
	1	1223	1332.00	28	141.58	0.56	28	130.65	0.62
	2	1217	1301.70	28	140.63	0.56	27	113.65	0.71
	3	1218	1312.62	28	122.50	0.56	28	132.16	0.63
	4	1225	1328.53	28	136.53	0.56	28	125.69	0.66
	5	1226	1329.55	28	140.15	0.56	28	125.81	0.65
	6	1207	1302.00	28	142.16	0.56	28	133.00	0.63
	7	1207	1343.46	28	144.00	0.55	28	122.75	0.68
	8	1222	1341.91	28	124.18	0.56	28	131.32	0.64
	9	1210	1319.22	28	136.95	0.56	28	122.28	0.71
	<b>Avg</b>	<b>1216.7</b>	<b>1323.54</b>	<b>28.0</b>	<b>136.77</b>	<b>0.56</b>	<b>27.9</b>	<b>127.18</b>	<b>0.66</b>
la31	0	1787	1981.56	28	526.86	0.90	28	258.01	0.64
	1	1800	1985.09	28	525.50	0.90	28	253.12	0.64
	2	1784	1973.47	28	528.06	0.89	28	253.89	0.65
	3	1787	1972.33	28	525.47	0.90	28	253.25	0.64
	4	1784	1969.66	28	536.29	0.88	28	250.98	0.64
	5	1784	1971.22	28	526.33	0.90	28	262.32	0.64
	6	1786	1984.41	28	532.57	0.90	28	258.98	0.64
	7	1795	1989.84	28	531.86	0.89	28	257.88	0.64
	8	1784	1974.35	28	528.50	0.90	28	258.10	0.65
	9	1793	1966.17	28	528.02	0.90	28	254.15	0.65
	<b>Avg</b>	<b>1788.4</b>	<b>1976.81</b>	<b>28.0</b>	<b>528.95</b>	<b>0.90</b>	<b>28.0</b>	<b>256.07</b>	<b>0.64</b>

ตารางที่ ผ2. ผลจากการแก้ปัญหาสโทแคสติกและค่าจากการประเมิน

		Stochastic							
		Makespan		Solve			Evaluate		
Instance	Trial	Solve	Evaluate	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance	Number of workers	Wall time (secs)	Parallel performance
la01	0	715.01	716.10	28	728.32	0.93	14	185.84	0.84
	1	715.22	715.49	28	736.93	0.93	24	106.60	0.63
	2	718.21	716.86	28	732.64	0.93	23	103.52	0.67
	3	715.69	714.04	28	746.79	0.93	20	111.42	0.66
	4	721.30	719.51	28	740.20	0.93	24	109.23	0.62
	5	715.60	715.68	28	730.63	0.94	23	104.76	0.64
	6	719.34	718.87	28	736.85	0.94	24	107.59	0.63
	7	714.34	714.67	28	728.01	0.94	18	128.41	0.75
	8	713.78	713.60	28	738.61	0.94	24	102.63	0.62
	9	715.58	715.99	28	733.01	0.93	24	107.14	0.63
	<b>Avg</b>	<b>716.41</b>	<b>716.08</b>	<b>28.0</b>	<b>735.20</b>	<b>0.93</b>	<b>21.80</b>	<b>116.71</b>	<b>0.67</b>
la04	0	679.76	678.77	28	753.87	0.93	24	107.55	0.61
	1	680.27	679.90	28	744.43	0.93	24	111.19	0.62

2	674.04	672.23	28	744.21	0.94	24	107.78	0.62	
3	674.39	673.69	28	736.26	0.94	24	106.31	0.64	
4	675.13	673.82	28	731.77	0.94	23	104.43	0.64	
5	668.29	667.67	28	740.54	0.94	23	108.53	0.64	
6	678.11	681.04	28	733.47	0.94	24	107.88	0.63	
7	680.43	679.03	28	729.21	0.94	24	107.59	0.63	
8	679.94	680.15	28	739.91	0.94	24	110.03	0.61	
9	684.05	683.94	28	734.83	0.94	21	116.41	0.58	
	<b>677.44</b>	<b>677.02</b>	<b>28.0</b>	<b>738.85</b>	<b>0.94</b>	<b>23.50</b>	<b>108.77</b>	<b>0.62</b>	
la05	0	610.50	609.36	28	743.29	0.94	25	110.38	0.61
	1	609.08	609.97	28	740.23	0.93	22	99.11	0.72
	2	608.06	607.90	28	729.63	0.94	23	104.38	0.67
	3	609.95	609.59	28	733.92	0.94	23	101.66	0.69
	4	609.55	610.62	28	738.47	0.94	24	89.93	0.61
	5	608.95	608.54	28	729.33	0.94	24	97.27	0.64
	6	608.49	609.84	28	735.42	0.94	23	102.94	0.68
	7	611.79	608.83	28	738.74	0.93	23	102.18	0.69
	8	608.36	608.12	28	745.76	0.94	25	120.40	0.62
	9	606.17	608.25	28	738.91	0.94	24	109.20	0.61
		<b>609.09</b>	<b>609.10</b>	<b>28.0</b>	<b>737.37</b>	<b>0.94</b>	<b>23.60</b>	<b>103.75</b>	<b>0.65</b>
la06	0	962.35	962.99	28	1072.33	0.96	27	122.08	0.61
	1	958.55	957.04	28	1095.73	0.95	26	119.57	0.65
	2	969.92	967.70	28	1080.86	0.96	26	117.19	0.67
	3	963.03	963.42	28	1079.68	0.96	26	118.20	0.65
	4	965.98	968.08	28	1078.38	0.96	26	117.26	0.66
	5	955.23	956.70	28	1080.35	0.96	27	120.33	0.64
	6	961.61	960.61	28	1081.54	0.96	27	122.61	0.61
	7	962.23	962.11	28	1083.76	0.95	25	110.10	0.73
	8	967.14	966.36	28	1082.96	0.95	26	117.41	0.66
	9	965.58	963.82	28	1078.52	0.96	27	120.35	0.63
		<b>963.16</b>	<b>962.88</b>	<b>28.0</b>	<b>1081.41</b>	<b>0.95</b>	<b>26.30</b>	<b>118.51</b>	<b>0.65</b>
la08	0	930.09	929.84	28	1096.54	0.96	26	119.33	0.65
	1	926.35	930.54	28	1121.24	0.96	26	117.71	0.65
	2	930.76	926.55	28	1165.08	0.95	27	122.56	0.61
	3	924.05	922.90	28	1087.77	0.95	27	123.34	0.61
	4	916.01	915.36	28	1101.11	0.95	25	113.83	0.70
	5	926.43	926.91	28	1086.26	0.96	26	120.05	0.64
	6	919.02	921.56	28	1138.28	0.92	26	117.56	0.64
	7	932.11	928.61	28	1095.78	0.95	26	118.32	0.66
	8	923.24	925.57	28	1093.02	0.95	27	121.44	0.62
	9	925.99	925.08	28	1093.72	0.96	26	119.41	0.65
		<b>925.41</b>	<b>925.29</b>	<b>28.0</b>	<b>1107.88</b>	<b>0.95</b>	<b>26.20</b>	<b>119.36</b>	<b>0.64</b>
la09	0	1004.01	1003.84	28	1082.05	0.95	27	122.65	0.62
	1	1001.48	999.80	28	1072.08	0.96	26	116.44	0.68
	2	1005.10	1004.52	28	1072.64	0.95	27	122.78	0.62
	3	1005.89	1005.89	28	1071.12	0.96	27	123.22	0.60
	4	1004.11	1004.66	28	1071.60	0.96	26	119.76	0.64

	5	1005.52	1004.58	28	1069.65	0.96	26	118.90	0.63
	6	1002.45	1004.17	28	1079.19	0.95	26	117.92	0.66
	7	1006.23	1006.15	28	1074.02	0.95	26	119.59	0.64
	8	1003.87	1004.11	28	1070.74	0.96	26	118.56	0.64
	9	1006.67	1006.58	28	1070.69	0.96	26	118.05	0.66
		<b>1004.53</b>	<b>1004.43</b>	<b>28.0</b>	<b>1073.38</b>	<b>0.95</b>	<b>26.30</b>	<b>119.79</b>	<b>0.64</b>
la10	0	985.77	989.28	28	1093.79	0.95	26	119.21	0.64
	1	984.55	989.31	28	1093.86	0.95	26	119.58	0.65
	2	980.23	981.50	28	1086.40	0.95	26	118.25	0.64
	3	987.41	986.50	28	1085.84	0.96	26	115.80	0.64
	4	989.95	985.33	28	1086.18	0.96	26	118.92	0.65
	5	986.12	987.61	28	1084.67	0.96	26	118.45	0.65
	6	988.36	988.37	28	1087.16	0.95	27	122.77	0.62
	7	990.11	990.98	28	1086.91	0.96	26	119.38	0.65
	8	984.82	987.40	28	1086.06	0.95	27	121.54	0.63
	9	988.07	988.87	28	1084.27	0.96	26	118.73	0.66
		<b>986.54</b>	<b>987.51</b>	<b>28.0</b>	<b>1087.51</b>	<b>0.95</b>	<b>26.20</b>	<b>119.26</b>	<b>0.64</b>
la11	0	1268.58	1270.18	28	1464.85	0.96	28	138.22	0.59
	1	1275.25	1274.92	28	1453.54	0.96	28	126.22	0.66
	2	1280.55	1283.20	28	1459.36	0.96	28	133.82	0.62
	3	1274.68	1277.68	28	1450.63	0.96	28	132.43	0.60
	4	1276.77	1276.69	28	1452.61	0.96	28	124.05	0.64
	5	1274.66	1271.53	28	1459.04	0.96	28	136.42	0.60
	6	1275.20	1273.75	28	1538.28	0.91	28	125.11	0.67
	7	1276.63	1274.15	28	1471.67	0.96	28	128.61	0.66
	8	1262.67	1265.92	28	1459.01	0.96	28	127.37	0.66
	9	1276.62	1278.20	28	1456.60	0.96	28	128.92	0.64
		<b>1274.16</b>	<b>1274.62</b>	<b>28.0</b>	<b>1466.56</b>	<b>0.96</b>	<b>28.00</b>	<b>130.12</b>	<b>0.63</b>
la12	0	1097.05	1101.32	28	1444.74	0.97	28	127.94	0.67
	1	1098.95	1099.01	28	1442.60	0.96	27	119.60	0.70
	2	1100.27	1099.76	28	1439.25	0.97	28	132.95	0.63
	3	1098.21	1099.64	28	1449.44	0.96	28	132.20	0.61
	4	1102.63	1101.66	28	1541.80	0.90	28	126.60	0.63
	5	1099.13	1099.72	28	1455.04	0.96	28	137.20	0.59
	6	1103.04	1099.35	28	1440.97	0.96	28	129.54	0.62
	7	1098.15	1097.28	28	1441.54	0.96	28	127.20	0.58
	8	1097.11	1097.54	28	1444.60	0.96	28	137.62	0.59
	9	1098.05	1102.48	28	1440.47	0.96	28	135.35	0.60
		<b>1099.26</b>	<b>1099.78</b>	<b>28.0</b>	<b>1454.04</b>	<b>0.96</b>	<b>27.90</b>	<b>130.62</b>	<b>0.62</b>
la13	0	1206.42	1209.45	28	1552.39	0.90	28	125.28	0.65
	1	1206.48	1206.33	28	1455.59	0.96	28	128.43	0.66
	2	1212.52	1211.81	28	1453.32	0.96	28	133.28	0.62
	3	1210.99	1212.14	28	1455.94	0.96	28	135.26	0.59
	4	1209.27	1208.00	28	1465.82	0.96	27	117.98	0.70
	5	1211.26	1212.84	28	1449.68	0.96	28	138.05	0.59
	6	1211.76	1211.34	28	1458.98	0.96	28	127.37	0.65
	7	1213.33	1213.28	28	1445.36	0.96	28	125.80	0.69

	8	1207.17	1210.38	28	1456.81	0.96	27	123.20	0.71
	9	1211.69	1212.84	28	1459.99	0.96	28	139.53	0.58
		<b>1210.09</b>	<b>1210.84</b>	<b>28.0</b>	<b>1465.39</b>	<b>0.96</b>	<b>27.80</b>	<b>129.42</b>	<b>0.64</b>
la14	0	1302.19	1304.63	28	1476.19	0.95	28	132.78	0.63
	1	1311.01	1307.91	28	1459.23	0.97	28	133.06	0.60
	2	1301.76	1307.18	28	1454.74	0.96	28	123.89	0.64
	3	1301.15	1305.17	28	1453.87	0.97	28	135.97	0.60
	4	1306.34	1305.88	28	1460.91	0.96	28	128.17	0.64
	5	1304.42	1305.22	28	1450.82	0.96	27	115.11	0.70
	6	1304.02	1307.96	28	1457.10	0.96	27	124.36	0.71
	7	1308.96	1307.28	28	1454.86	0.96	27	124.75	0.70
	8	1304.86	1305.60	28	1456.90	0.96	28	129.11	0.65
	9	1305.36	1306.77	28	1464.84	0.96	27	124.79	0.70
		<b>1305.01</b>	<b>1306.36</b>	<b>28.0</b>	<b>1458.95</b>	<b>0.96</b>	<b>27.60</b>	<b>127.20</b>	<b>0.66</b>
la15	0	1322.86	1326.67	28	1473.82	0.96	28	128.74	0.66
	1	1333.36	1331.44	28	1482.31	0.96	28	130.14	0.66
	2	1313.24	1313.32	28	1479.60	0.96	26	144.69	0.62
	3	1340.05	1338.88	28	1480.40	0.96	28	131.77	0.64
	4	1329.85	1328.28	28	1483.42	0.96	28	127.14	0.65
	5	1335.76	1338.65	28	1468.08	0.96	24	130.15	0.66
	6	1332.75	1334.88	28	1481.13	0.96	28	131.01	0.65
	7	1327.02	1326.49	28	1485.36	0.96	28	135.33	0.59
	8	1330.60	1328.81	28	1481.17	0.96	28	122.96	0.67
	9	1335.62	1334.68	28	1476.15	0.96	28	137.15	0.61
		<b>1330.11</b>	<b>1330.21</b>	<b>28.0</b>	<b>1479.15</b>	<b>0.96</b>	<b>27.40</b>	<b>131.91</b>	<b>0.64</b>
la31	0	1947.81	1950.42	28	5420.91	0.97	28	258.99	0.65
	1	1962.14	1962.65	28	5472.84	0.97	28	255.54	0.65
	2	1967.82	1967.37	28	5416.79	0.97	28	252.17	0.64
	3	1960.00	1958.49	28	5449.70	0.97	28	246.58	0.65
	4	1972.38	1977.68	28	5453.40	0.97	28	260.97	0.64
	5	1982.64	1981.13	28	5409.57	0.98	28	257.93	0.64
	6	1990.32	1991.12	28	5426.75	0.97	28	329.57	0.66
	7	1984.84	1985.40	28	5414.75	0.97	28	258.28	0.64
	8	1948.60	1947.82	28	5411.71	0.97	28	262.61	0.64
	9	1968.06	1967.41	28	5418.00	0.97	28	263.48	0.64
		<b>1968.46</b>	<b>1968.95</b>	<b>28.0</b>	<b>5429.44</b>	<b>0.97</b>	<b>28.00</b>	<b>264.61</b>	<b>0.64</b>