

วิธีการสำรวจในช่วงเริ่มต้นเพื่อหลีกเลี่ยงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์  
ในระบบอาณานิคม

AN EARLY EXPLORATORY METHOD TO AVOID LOCAL MINIMA  
IN ANT COLONY SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-070-194

วิธีการสำรวจในช่วงเริ่มต้นเพื่อหลีกเลี่ยงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์  
ในระบบอาณานิคมมด

AN EARLY EXPLORATORY METHOD TO AVOID LOCAL MINIMA  
IN ANT COLONY SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2558  
KMITL-2015-EN-M-070-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการสำรวจในช่วงเริ่มต้นเพื่อหลีกเลี่ยงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์  
ในระบบอาณานิคมมด

AN EARLY EXPLORATORY METHOD TO AVOID LOCAL MINIMA  
IN ANT COLONY SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2558  
KMITL-2015-EN-M-070-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN EARLY EXPLORATORY METHOD TO AVOID LOCAL MINIMA  
IN ANT COLONY SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN COMPUTER ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015  
KMITL-2015-EN-M-070-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการสำรวจในช่วงเริ่มต้นเพื่อหลีกเลี่ยงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ในระบบอาณานิคมมด  
Thesis Title An Early Exploratory Method to Avoid Local Minima in Ant Colony System  
นักศึกษา นายธนศ สาธกิจชัย  
รหัสประจำตัว 54611426  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เกียรติกุล เจียรนัยธนะกิจ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-070-194

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.บุญฉีร์	เครือตราชู	บุญฉีร์ บุญฉีร์
ผศ.ดร.ชุตินิเมษฐ์	ศรีนิลทา	ชุตินิเมษฐ์ ศรีนิลทา
ผศ.ดร.จักรี	ศรีนันทฉัตร	จักรี ศรีนันทฉัตร
ผศ.ดร.สมศักดิ์	วัลย์รัชต์	สมศักดิ์ วัลย์รัชต์
รศ.ดร.เกียรติกุล	เจียรนัยธนะกิจ	เกียรติกุล เจียรนัยธนะกิจ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 เวลา 09.00-10.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ยืนยันการดำเนินการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการสำรวจในช่วงเริ่มต้นเพื่อหลีกเลี่ยงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ ในระบบอาณานิคมมด
นักศึกษา	นายธเนศ สารกิจชัย
รหัสประจำตัว	54611426
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เกียรติกุล เจียรนัยธนะกิจ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออัลกอริทึมส่วนขยายของระบบอาณานิคมมด (Ant colony system) สำหรับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem) โดยการเพิ่มกระบวนการสำรวจเข้าไปในอัลกอริทึมดั้งเดิม แนวคิดพื้นฐานของอัลกอริทึมที่นำเสนอคือการบังคับให้มดแต่ละตัวเดินสำรวจในเส้นทางที่แตกต่างกันในช่วงแรกของการสร้างคำตอบเพื่อขยายขอบเขตการค้นหา เนื่องจากระบบอาณานิคมมดเป็นอัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจากระบบมด (Ant system) ซึ่งระบบมดมักจะมีจุดอ่อนเรื่องการประสบปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (local minima) ถึงแม้ว่าระบบอาณานิคมมดจะพยายามแก้ปัญหานี้ด้วยการเพิ่มกระบวนการปรับสารฟีโรโมนแบบโลคอล (local pheromone updating) แต่ก็ยังไม่ได้ผลลัพธ์ที่ดีนัก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงดัดแปลงอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด ด้วยการเพิ่มกระบวนการสำรวจแบบบังคับเข้าไปในกระบวนการเดินของมด เพื่อบรรเทาปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ ผลการทดลองกับชุดข้อมูลแบบสมมาตรทำชุดจากคลังเปรียบเทียบสมรรถนะปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSPLIB) แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถเพิ่มคุณภาพของคำตอบให้ดีขึ้น อีกทั้งยังมีอัตราการพบคำตอบที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้นด้วย

Thesis Title	An Early Exploratory Method to Avoid Local Minima in Ant Colony System
Student	Mr.Thanet Satukitchai
Student ID.	54611426
Degree	Master of Engineering
Program	Computer Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kietikul Jearanaitanakij

### ABSTRACT

This thesis proposed an extension of Ant Colony System (ACS) for solving the Traveling salesman problem (TSP) by inserting an exploratory mechanism into the conventional ACS. The basic idea is forcing each ant to explore different paths in early stages of the solution construction phase to expand search space. Since ACS is a successor of Ant System (AS), it obtains the drawback of local minima from AS. Although ACS has added the local pheromone updating process to handle the weakness of its predecessor, but the drawback still persists. Therefore, this thesis has modified ACS algorithm, by inserting the exploration mechanism into the ant's movement for diminishing the effect of local minima. Experimental results on five symmetrical TSP benchmarks from TSPLIB indicate that our proposed method can increase both the quality of solution and the rate of optimal solution founded.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เกียรติกุล เจียรนัยธนะกิจ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำชี้แนะในแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาในการศึกษาด้วยความเมตตาเสมอมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ประสบการณ์ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการ 801 803 804 และ 607 ทุกท่านที่คอยร่วมทุกข์ร่วมสุข เป็นเพื่อนที่ดี และให้กำลังใจต่อกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกสถานที่ศึกษาเล่าเรียนและการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนเป็นที่พักพิงแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษา

สำหรับคุณงามความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพเพียง ตลอดจนครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธเนศ สาธุกิจชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดเอางานอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	5
2.1 ระยะทางแบบยุคลิด.....	5
2.1.1 นิยาม.....	5
2.2 เรื่องที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีกราฟ.....	8
2.2.1 นิยาม.....	8
2.2.2 ชนิดของกราฟ.....	9
2.2.2.1 กราฟไม่ระบุทิศทาง.....	9
2.2.2.2 กราฟระบุทิศทาง.....	9
2.2.2.3 กราฟถ่วงน้ำหนัก.....	10
2.2.2.4 กราฟบริบูรณ์.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัด IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3 ปัญหาทางเดินแอมัลตัน.....	11
2.2.3.1 ทางเดินแอมัลตัน.....	11
2.2.3.2 วัฏจักรแอมัลตัน.....	12
2.3 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP).....	13
2.3.1 นิยามของปัญหา.....	13
2.3.2 ชนิดของปัญหา TSP.....	14
2.3.2.1 TSP แบบสมมาตร.....	14
2.3.2.2 TSP แบบอสมมาตร.....	15
2.4 ระบบมด.....	16
2.4.1 ระบบมดสำหรับปัญหา TSP.....	16
2.4.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นของฟีโรโมนในระบบมด.....	16
2.4.3 องค์ประกอบหลักของอัลกอริทึมระบบมด.....	16
2.4.3.1 กระบวนการสร้างคำตอบ.....	17
2.4.3.2 กระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมน.....	19
2.5 ระบบอาณานิคมมด.....	20
2.5.1 องค์ประกอบหลักของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด.....	20
2.5.1.1 กระบวนการสร้างคำตอบ.....	20
2.5.1.2 การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล.....	23
2.5.1.3 การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล.....	23
2.5.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบอาณานิคมมด.....	24
2.5.3 วิเคราะห์สมการที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมด.....	25
2.5.3.1 สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล.....	25
2.5.3.2 สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล.....	26
2.5.3.3 ขอบเขตของค่าฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมด.....	27
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3.1.1 โมเดล ACO with Antennation.....	31
3.1.1.1 ข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนเมื่อสัมผัสหนวด.....	32
3.1.1.2 หน่วยความจำสำหรับข้อมูลแลกเปลี่ยนของมด.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1.3 กฎการเคลื่อนที่.....	33
3.1.1.4 ฟังก์ชันควบคุม.....	33
3.1.2 โมเดล Opposite Pheromone per Node (OPN).....	35
3.1.2.1 กฎการเคลื่อนที่ของวิธี OPN.....	35
3.1.2.2 ขั้นตอนการทำงานของโมเดล OPN.....	36
3.1.3 โมเดล Interacted Multiple Ant Colonies Optimization (IMACO).....	37
3.1.3.1 โครงสร้างของ IMACO.....	37
3.1.3.2 การสื่อสารระหว่างอาณานิคม.....	37
บทที่ 4 อัลกอริทึมส่วนขยายของระบบอาณานิคม.....	39
4.1 ปัญหาและสมมติฐานของงาน.....	39
4.1.1 ปัญหาของอัลกอริทึมระบบอาณานิคม.....	39
4.1.1.1 ปัญหาการให้ความสำคัญกับค่าอิวิริสติกในช่วงเริ่มต้น.....	39
4.1.1.2 ปัญหาการดึงดูดสู่ทิวรีที่ดีที่สุดเทียม.....	41
4.1.2 แนวความคิดการปรับปรุง.....	44
4.2 โมเดลที่นำเสนอ.....	45
4.2.1 ส่วนประกอบเพิ่มเติมสำหรับโมเดลที่นำเสนอ.....	45
4.2.1.1 เครื่องหมายประจำเส้นเชื่อม.....	45
4.2.1.2 หน่วยความจำก้าวการสำรวจ.....	45
4.2.1.3 ลิ้มิตของก้าวการสำรวจ.....	46
4.2.2 กฎการเคลื่อนที่ของมดแบบใหม่.....	46
4.2.3 ขั้นตอนการทำงานของโมเดลที่นำเสนอ.....	46
4.2.4 ตัวอย่างการเดินของมดในโมเดลที่นำเสนอ.....	48
บทที่ 5 การทดลองและการเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	49
5.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	49
5.2 การดำเนินงานเบื้องต้น.....	52
5.2.1 จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำ.....	52
5.2.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง.....	53
5.2.3 วิธีการดำเนินงานเบื้องต้น.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.4 ผลการดำเนินงานเบื้องต้น .....	54
5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับระบบอาณานิคมมาตรฐาน.....	55
5.3.1 วิธีการทดลอง .....	55
5.3.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบ .....	56
5.3.2.1 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล Eil51.....	56
5.3.2.2 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล Berlin52.....	57
5.3.2.3 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล Eil76.....	58
5.3.2.4 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล KroA100 .....	58
5.3.2.5 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล D198.....	58
5.3.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด .....	60
5.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดล OPN.....	61
5.4.1 วิธีการทดลอง .....	61
5.4.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบ .....	62
5.4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด .....	63
5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพื้นที่การค้นหาของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบ อาณานิคมด .....	63
5.5.1 วิธีการทดลอง.....	64
5.5.2 ผลการทดลอง.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	67
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง .....	69
ภาคผนวก และผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงฟังก์ชันควมคุมในโมเดลของ Beer.....	34
5.1 แสดงรายละเอียดของชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	49
5.2 จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำในการดำเนินงานเบื้องต้น.....	53
5.3 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง.....	53
5.4 ค่าความยาวเฉลี่ยของทัวร์ที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่า $\sigma$ ในการดำเนินงานเบื้องต้น.....	54
5.5 จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำในการดำเนินงานจริง.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงตัวอย่างของเวกเตอร์แบบยูคลิดของจุด $p$ และ $q$ ..... 6
2.2	แสดงตัวอย่างของจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนบนปริภูมิยูคลิด 2 มิติ..... 7
2.3	แสดงตัวอย่างของจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนบนปริภูมิยูคลิด 3 มิติ..... 7
2.4	ตัวอย่างกราฟไม่ระบุทิศทาง..... 9
2.5	ตัวอย่างกราฟระบุทิศทาง ..... 10
2.6	ตัวอย่างกราฟบริบูรณ์ที่มีจำนวนจุดยอดตั้งแต่ 2 ถึง 7 จุด..... 11
2.7	ตัวอย่างกราฟระบุทิศทางบริบูรณ์ที่มีจำนวนจุดยอดตั้งแต่ 2 ถึง 4 จุด..... 11
2.8	แสดงตัวอย่างทางเดินแฮมิลตันบนกราฟอย่างง่าย..... 12
2.9	แสดงตัวอย่างของวัฏจักรแฮมิลตันบนกราฟอย่างง่าย..... 12
2.10	แสดงตัวอย่างของปัญหา TSP..... 14
2.11	แสดงตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบสมมาตร..... 15
2.12	แสดงตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบอสมมาตร ..... 15
2.13	แสดงตัวอย่างสถานการณ์การเดินทางของมดในระบบมด ..... 18
2.14	กราฟวงกลมแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ที่เมืองต่าง ๆ จะถูกเลือกจากตัวอย่างของระบบมด... 19
2.15	กราฟวงกลมแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ที่เมืองต่าง ๆ จะถูกเลือกจากตัวอย่างของระบบ อาณานิคมมด ..... 22
2.16	แสดงการเข้าสู่ของค่าฟีโรโมนในสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล..... 26
2.17	แสดงการเข้าสู่ของค่าฟีโรโมนในสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล ..... 27
2.18	ขอบเขตของค่าฟีโรโมนกรณีที่ 1 ..... 28
2.19	ขอบเขตของค่าฟีโรโมนกรณีที่ 2..... 28
2.20	ขอบเขตของค่าฟีโรโมนกรณีที่ 3..... 29
2.21	การเปลี่ยนแปลงขอบบน-ขอบล่างของฟีโรโมน ..... 30
3.1	ขนาดของมด ..... 31
3.2	แสดงการสัมผัสขนาดเพื่อสื่อสารกันของมด..... 31
3.3	หน่วยความจำพิเศษของมด..... 33
4.1	ตัวอย่างการเดินทางของมดในระบบอาณานิคมมดในรอบการวนซ้ำช่วงเริ่มต้น ..... 40
4.2	ตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบสมมาตรที่มี 4 โหนด..... 40
4.3	แผนภาพเวกเตอร์แสดงกลุ่มของเส้นเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากการปรับปรุงสารฟีโรโมน..... 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงข้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	การเปลี่ยนแปลงระดับพีโรโมนของเส้นเชื่อมประเภทต่าง ๆ ..... 42
4.5	ตัวอย่างเครื่องหมายประจำเส้นเชื่อม ..... 45
4.6	หน่วยความจำก้าวการสำรวจของมด..... 45
4.7	ผังการทำงานของวิธีการที่นำเสนอ..... 47
4.8	ตัวอย่างการเดินของมด..... 48
5.1	ชุดข้อมูล Eil51..... 50
5.2	ชุดข้อมูล Berlin52..... 50
5.3	ชุดข้อมูล Eil76..... 51
5.4	ชุดข้อมูล KroA100..... 51
5.5	ชุดข้อมูล D198 ..... 52
5.6	ตัวอย่างของผลการดำเนินงานเบื้องต้น ..... 54
5.7	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูล Eil51 ..... 56
5.8	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูล Berlin52..... 57
5.9	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูล Eil76 ..... 58
5.10	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูล KroA100..... 59
5.11	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูล D198..... 59
5.12	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบจำนวนการพบคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง ..... 60
5.13	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดล OPN ด้วยค่าอัตราส่วนมัธยฐานบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง ..... 62
5.14	แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบจำนวนการเพิ่มขึ้นของการพบคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดล OPN บนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง..... 63
5.15	ค่าเฉลี่ยของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอานานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง ..... 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 ค่ามัธยฐานของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอานานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง.....	65
5.17 ค่าน้อยสุดของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอานานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง.....	65
5.18 ค่ามากที่สุดของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอานานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดXIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นเวลานานมาแล้วที่นักชีววิทยาสังเกตพฤติกรรมของมดตามธรรมชาติ และค้นพบว่ามดมีความสามารถในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างรังของมันกับแหล่งอาหารได้ โดยอาศัยสื่อผ่านทางซึ่งเป็นสารเคมีที่มดปล่อยออกมาขณะเดินสำรวจเส้นทางที่เรียกว่าฟีโรโมน (pheromone) สำหรับติดต่อสื่อสารกัน ต่อมาเมื่อนักวิจัยเกิดแนวคิดว่าพฤติกรรมนี้ของมดน่าจะนำมาพัฒนาเป็นอัลกอริทึมสำหรับการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization algorithm) ได้

อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization – ACO) [1,4] ซึ่งถูกจัดเป็นความฉลาดแบบกลุ่ม (swarm intelligence) รูปแบบหนึ่งในเรื่องปัญญาประดิษฐ์ ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยการพยายามเลียนแบบพฤติกรรมของมดที่อยู่เป็นนิคมตามธรรมชาติ ประกอบกับเทคนิคทางด้านความน่าจะเป็น เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงคำนวณ (computational problem) ที่สามารถลดรูปให้อยู่ในรูปของการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการหาได้ เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem - TSP) ซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (combinatorial optimization problem) และจัดเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard problem) เป็นต้น อัลกอริทึมแรกที่ถูกนำเสนอในตระกูลของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมมดคืออัลกอริทึมระบบมด (Ant System – AS) ซึ่งถูกนำไปพัฒนาปรับปรุงและต่อยอดอย่างกว้างขวางเกิดเป็นอัลกอริทึมสิบทอดเป็นจำนวนมาก หนึ่งในนั้นที่มีชื่อเสียงและประสบความสำเร็จคืออัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด (Ant Colony System – ACS)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดจะสามารถแก้ปัญหา TSP ได้ดี แต่ก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (local minima) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่สืบทอดมาจากอัลกอริทึมระบบมด ถึงแม้ว่าอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดจะพยายามลดทอนปัญหานี้ด้วยการนำเสนอกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบใหม่เรียกว่า การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล ซึ่งช่วยลดการกระจุกตัวของการค้นหาไม่ให้อยู่แต่ในบริเวณเดิม แต่ผลลัพธ์ที่ได้ก็ยังไม่สมบูรณ์แบบและปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ก็ยังคงพบได้อยู่ กล่าวคือยังมีช่องว่างให้สามารถพัฒนาประสิทธิภาพต่อได้อีก จากปัญหาดังที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนออัลกอริทึมส่วนขยายของระบบอาณานิคมมด (ACS Extension) ซึ่งปรับปรุงอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดแบบมาตรฐาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบและลดทอนปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ ทำให้อัตราการค้นพบคำตอบที่ดีเพิ่มมากขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด ให้มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีขึ้นและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดทอนปัญหาที่เกิดจากจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ โดยการปรับปรุงนี้เพื่อเป็นการแก้ไขจุดอ่อนที่เกิดกับอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด ดังนี้

- 1) ลักษณะการค้นหาเป็นการเน้นและเพิ่มความสำคัญกับคำตอบ(ตัว)ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบเท่านั้น ผ่านทางกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล ซึ่งถ้าคำตอบนั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเยี่ยม จะทำให้เกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ได้
- 2) กฎการเคลื่อนที่ของมดในระบบอาณานิคมมีลักษณะที่ให้ความสำคัญกับข้อมูลที่เรียนรู้มาในรอบก่อนหน้ามาก ทำให้เมื่อเกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์แล้วหลุดพ้นออกมาได้ยาก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและนำเสนอการปรับปรุงอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด โดยการเพิ่มกระบวนการสำรวจแบบบังคับเข้าไป และทำการทดลองผลเพื่อยืนยันว่าอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดที่ถูกปรับปรุงสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดมากกว่า รวมถึงมีอัตราการการค้นหาคำตอบที่ดีมากกว่าในทางสถิติ

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากปัญหาที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนและกฎการเคลื่อนที่ของมดในระบบอาณานิคมมดที่กล่าวไปข้างต้นนั้น จะทำให้มดส่วนใหญ่ถูกดึงดูดให้เดินสำรวจบนเส้นทางที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกัน ซึ่งการที่มดเกือบทั้งหมดเดินสำรวจบนเส้นทางเหมือนกันไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการค้นหาคำตอบเพราะไม่เกิดการกระจายตัว ถือเป็นการใช้ทรัพยากร(มด)ในการค้นหาอย่างไม่มีประสิทธิภาพ สมมติฐานของวิทยานิพนธ์นี้คือการเพิ่มกระบวนการสำรวจแบบบังคับเข้าไปในระบบอาณานิคมมดมาตรฐาน โดยการบังคับให้มดเดินสำรวจในเส้นทางที่แตกต่างกันจะช่วยลดโอกาสในการเกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ และช่วยเพิ่มขอบเขตของการค้นหาทำให้มีโอกาสพบคำตอบที่ดีเพิ่มขึ้น

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

#### 1.4.1 ทฤษฎีกราฟที่เกี่ยวข้อง (Related topics in graph theory)

##### 1.4.1.1 กราฟไม่ระบุทิศทาง (Undirected graph)

##### 1.4.1.2 กราฟระบุทิศทาง (Directed graph or Digraph)

##### 1.4.1.3 กราฟถ่วงน้ำหนัก (Weighted graph)

##### 1.4.1.4 กราฟบริบูรณ์ (Complete graph)

#### 1.4.2 ปัญหาทางเดินแฮมิลตัน (Hamiltonian path problem)

#### 1.4.3 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem)

#### 1.4.4 ระบบมด (Ant System: AS)

##### 1.4.4.1 การกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้น

##### 1.4.4.2 กระบวนการสร้างคำตอบ (Tour construction)

##### 1.4.4.3 กฎการเคลื่อนที่ตามสัดส่วนแบบกลุ่ม (Random proportional rule)

##### 1.4.4.4 การปรับปรุงสารฟีโรโมน (Update of pheromone trails)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4.5 ระบบอาณานิคมมด (Ant Colony System: ACS)

1.4.5.1 กฎการเคลื่อนที่ตามสัดส่วนแบบกลุ่มเทียม (Pseudorandom proportional rule)

1.4.5.2 การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล (Global pheromone trail update)

1.4.5.3 การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล (Local pheromone trail update)

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถอธิบายเป็นข้อ ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1.5.1 ทำการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพในการหาคำตอบของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด (Ant Colony System) สำหรับปัญหา TSP

1.5.2 การศึกษามุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งโมเดลต้นแบบ โมเดลที่นำเสนอ และโมเดลอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ จะไม่มีส่วนของกระบวนการค้นหาแบบโลคอล (local search) เพราะไม่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

1.5.3 โมเดลที่นำเสนอสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ได้กับเฉพาะชุดข้อมูลของปัญหา TSP แบบสมมาตร (Symmetric TSP) เท่านั้น ดังนั้นปัญหา TSP แบบอสมมาตร (Asymmetric TSP) จึงอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้

1.5.4 ใช้ชุดข้อมูลมาตรฐานจากคลังเปรียบเทียบสมรรถนะ TSPLIB ซึ่งเป็นชุดข้อมูลมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

1.5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอ จะเทียบกับโมเดลอื่นที่ปรับปรุงมาจากระบบอาณานิคมมดแบบมาตรฐานเช่นเดียวกัน

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของการวิจัยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1.6.1 ศึกษาหาความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมมด ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย เป็นต้น

1.6.2 ทบทวนหัวข้อหรือประเด็นที่สนใจจะทำการศึกษาวิจัย

1.6.3 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผู้นำเสนอมาแล้ว ทำการวิเคราะห์ประเด็นที่น่าสนใจของงานวิจัยนั้น ๆ ที่สามารถนำมาปรับปรุงและประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์กับงานวิจัยนี้

1.6.4 ออกแบบแนวความคิดพื้นฐานที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาพร้อมทั้งหาเหตุผลเพื่อสนับสนุนแนวความคิดพื้นฐานนั้น

1.6.5 ออกแบบโครงสร้างพิเศษเพิ่มเติม เช่น หน่วยความจำสถานะการถูกเดินผ่านของเส้นเชื่อม และจำนวนครั้งการก้าวเดินสำรวจของมด เพื่อให้รองรับและสอดคล้องกับแนวความคิดพื้นฐาน

1.6.6 ออกแบบอัลกอริทึมที่เพิ่มกระบวนการเดินสำรวจแบบบังคับตามแนวคิดพื้นฐาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.6.7 พัฒนาโปรแกรมตามที่ได้ออกแบบไว้
- 1.6.8 ทำการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันกับงานวิจัยอื่น
- 1.6.9 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่ออธิบายถึงเหตุผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น
- 1.6.10 สรุปผลการทดลอง
- 1.6.11 ส่งบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

- 1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์พกพาส่วนบุคคล หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i5-2410M หน่วยความจำ (RAM) 4 กิกะไบต์ (GB) จำนวน 1 เครื่อง
- 1.7.2 ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 8.1 รุ่น professional
- 1.7.3 โปรแกรมไมโครซอฟท์ วิซวล สตูดิโอ (Microsoft Visual Studio) รุ่น Express 2012
- 1.7.4 โปรแกรมแมทแลป (Matlab) รุ่น R2012b
- 1.7.5 พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C# และ Matlab

## 1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท แต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนของการศึกษา รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และโครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบด้วย ระยะเวลาแบบยุคลิต เรื่องที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีกราฟ ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ระบบมด และระบบอาณานิคมมด

บทที่ 3 เป็นการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น วิธี ACO with Antennation, วิธี OPN และวิธี IMACO

บทที่ 4 กล่าวถึงแนวความคิดในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมดสำหรับปัญหา TSP และการลดทอนโอกาสในการเกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพันธ์ โดยนำเสนอเป็นโมเดลส่วนขยายของระบบอาณานิคมมดที่เพิ่มกระบวนการค้นหาแบบบังคับเข้าไป

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยการทดลองประกอบด้วย การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับระบบอาณานิคมมดดั้งเดิม การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลอื่นที่มีพื้นฐานมาจากระบบอาณานิคมมด โดยการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบที่พบ อัตราการค้นพบคำตอบที่มีคุณภาพ และพื้นที่การค้นหา

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุงในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 2.1 ระยะทางแบบยุคลิด (Euclidean distance)

ระยะทางแบบยุคลิดคือ ระยะทางปกติ (ordinary distance) ในแนวเส้นตรงระหว่างจุดสองจุด ในปริภูมิแบบยุคลิด (Euclidean space) ซึ่งไม่มีความโค้งและไม่สามารถทำให้โค้งงอได้

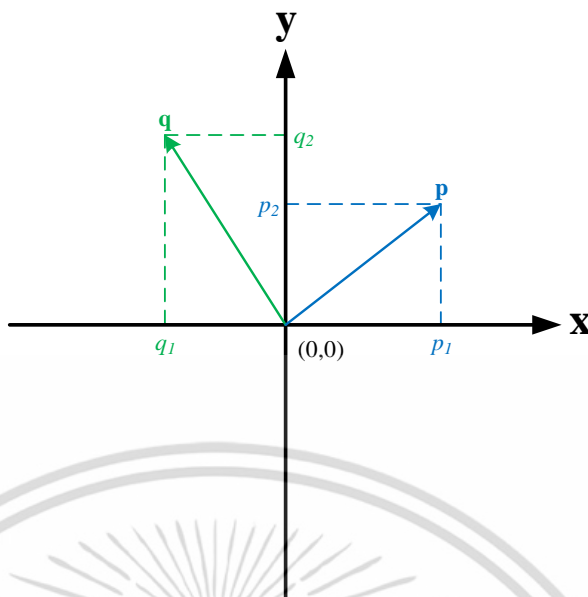
#### 2.1.1 นิยาม

ระยะทางแบบยุคลิดระหว่างจุด  $p$  และ  $q$  คือความยาวของส่วนของเส้นตรง  $\overline{pq}$  ที่เชื่อมจุดทั้งสอง

ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) ถ้า  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  และ  $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  เป็นจุดสองจุดบนปริภูมิยุคลิด  $n$  มิติแล้ว ระยะทาง (distance) จากจุด  $p$  ไป  $q$  หรือจากจุด  $q$  ไป  $p$  คำนวณได้จากสูตรของพีทาโกรัส ดังนี้

$$\begin{aligned}d(p, q) = d(q, p) &= \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2 + \dots + (q_n - p_n)^2} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}\end{aligned}\tag{2.1}$$

ตำแหน่งของจุดบนปริภูมิยุคลิด  $n$  มิติคือ เวกเตอร์แบบยุคลิด (Euclidean vector) ดังนั้นจุด  $p$  และ  $q$  จึงเป็นเวกเตอร์แบบยุคลิดที่มีจุดเริ่มต้นที่จุดกำเนิดของปริภูมิคือจุด  $(0,0)$  และมีจุดปลายที่ตำแหน่งของจุด  $p$  และ  $q$  รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ของจุด  $p$  และ  $q$  บนปริภูมิยุคลิด 2 มิติ



รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของเวกเตอร์แบบยูคลิดของจุด  $\mathbf{p}$  และ  $\mathbf{q}$

ค่าบรรทัดฐานแบบยูคลิด (Euclidean norm) คือขนาด (magnitude) หรือความยาว (length) ของเวกเตอร์  $\mathbf{p}$  ใดๆ สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

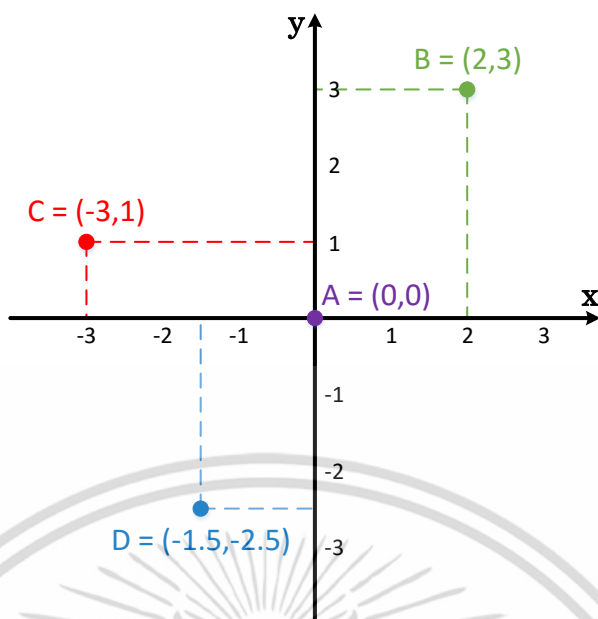
$$\|\mathbf{p}\| = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2} = \sqrt{\mathbf{p} \cdot \mathbf{p}} \quad (2.2)$$

ซึ่งสมการตัวหลังเกี่ยวข้องกับผลคูณจุด (dot product) ของเวกเตอร์ ดังนั้นระยะทางแบบยูคลิดจึงสามารถนิยามได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังนี้

$$\|\mathbf{q} - \mathbf{p}\| = \sqrt{(\mathbf{q} - \mathbf{p}) \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p})} = \sqrt{\|\mathbf{p}\|^2 + \|\mathbf{q}\|^2 - 2\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}} \quad (2.3)$$

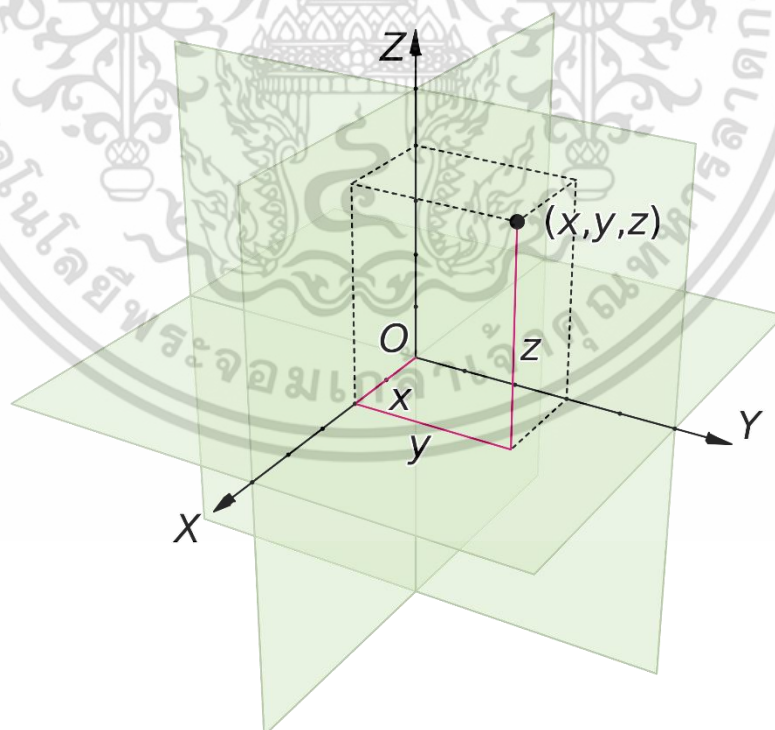
เมื่อ  $\mathbf{p}, \mathbf{q}$  คือ เวกเตอร์ใด ๆ

จุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนบนปริภูมิยูคลิด 2 มิติ จะมีเลขบอกพิกัดอยู่ 2 ค่า คือค่า  $x$  และค่า  $y$  รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของจุด 4 จุด คือ จุด A อยู่ที่พิกัด (0,0) จุด B อยู่ที่พิกัด (2,3) จุด C อยู่ที่พิกัด (-3,1) และ D อยู่ที่พิกัด (-1.5,-2.5)



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนบนปริภูมิยูคลิด 2 มิติ

ส่วนจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนบนปริภูมิยูคลิด 3 มิติ จะมีเลขบอกพิกัดอยู่ 3 ค่า แทนด้วยตัวแปร  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนบนปริภูมิยูคลิด 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เรื่องที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีกราฟ (Graph and related topics)

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงทฤษฎีกราฟเบื้องต้น [2] เนื่องจากทฤษฎีกราฟมีเนื้อหาที่กว้างและมีรายละเอียดมาก ดังนั้นเราจึงยกมาแนะนำเฉพาะส่วนที่เป็นพื้นฐานและส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (traveling salesman problem) ซึ่งจะถูกอ้างถึงในทฤษฎีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยของเรา

### 2.2.1 นิยาม (Definitions)

กราฟคือคู่อันดับ  $G = (V, E)$  ประกอบด้วยเซตจำกัด 2 เซต คือ

- เซต  $V$  ของจุดยอด (vertices) หรือโหนด (nodes) โดย  $V$  จะต้องไม่เป็นเซตว่าง
- เซต  $E$  ของเส้นเชื่อม (edges) ซึ่งเป็นคู่อันดับ (unordered pair) ของจุดยอดของกราฟ  $G$  โดย  $E$  จะเป็นเซตว่างก็ได้

โดยปกติแล้ว  $V$  และ  $E$  จะเป็นเซตจำกัด เนื่องจากนิยามหลาย ๆ นิยามจะใช้ไม่ได้ในกรณีที่  $V$  และ  $E$  เป็นเซตอนันต์ อนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงความกำกวม นิยามที่กล่าวไปข้างต้นเป็นเพียงประเภทหนึ่งของกราฟที่เรียกว่า กราฟไม่ระบุทิศทาง (undirected graph) และเป็นกราฟอย่างง่าย (simple graph)

กราฟประเภทอื่น ๆ จะมีรายละเอียดของเซตเส้นเชื่อม  $E$  ที่แตกต่างกัน เช่น สังเกตว่านิยามข้างต้นจะไม่สามารถมีเส้นเชื่อมในกราฟสองเส้นที่เชื่อมจุดยอดสองจุดเดียวกันได้ เนื่องจาก  $E$  เป็นเซต ซึ่งสมาชิกที่เหมือนกันจะถูกมองเป็นตัวเดียวกัน หากเปลี่ยน  $E$  ให้เป็นมัลติเซต (multiset) ของคู่อันดับของจุดยอด เราจะได้มัลติกราฟ (multigraph) หรือกราฟเทียม (pseudograph) ซึ่งอยู่นอกเหนือจากเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับประเภทของกราฟต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์จะถูกนำเสนอในหัวข้อ 2.2.2 ชนิดของกราฟ

#### นิยามเพิ่มเติม

- จุดยอดที่อยู่ปลายทางของเส้นเชื่อมจะเรียกว่าจุดยอดปลาย (endpoint) ของเส้นเชื่อม แต่จุดยอดทุกจุดไม่จำเป็นต้องเป็นจุดยอดปลาย (ในกรณีที่จุดยอดนั้นไม่มีเส้นเชื่อมมาต่อเลย)
- อันดับ (order) ของกราฟ  $|V|$  คือ จำนวนจุดยอดของกราฟ
- ขนาด (size) ของกราฟ  $|E|$  คือ จำนวนของเส้นเชื่อมในกราฟ
- ดีกรี (degree) ของจุดยอด คือ จำนวนเส้นเชื่อมที่ต่อกับจุดยอดนั้น ๆ ในกรณีที่ มีเส้นเชื่อมที่มีปลายทั้งสองด้านต่อเข้ากับจุดยอดเดียวกัน หรือที่เรียกว่าลูป (loop) ให้นับดีกรีเพิ่มไปอีก 1 สำหรับแต่ละลูป
- เส้นเชื่อม  $\{u, v\}$  บางครั้งอาจเขียนให้สั้นลงแทนด้วย  $uv$  ได้

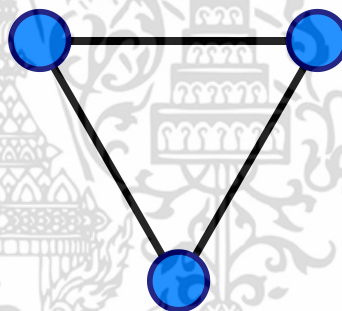
## 2.2.2 ชนิดของกราฟ

ความจริงแล้วกราฟถูกแบ่งออกเป็นหลายชนิดและมีวิธีการแบ่งหลายวิธี แต่ในหัวข้อนี้เราจะยกมาเฉพาะชนิดของกราฟที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (traveling salesman problem) ที่จะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 2.3

### 2.2.2.1 กราฟไม่ระบุทิศทาง (Undirected graph)

กราฟไม่ระบุทิศทาง คือ กราฟที่ทุกเส้นเชื่อมไม่มีทิศทาง นั่นคือเส้นเชื่อม  $(a,b)$  เป็นเส้นเดียวกันกับเส้นเชื่อม  $(b,a)$  หมายความว่าเส้นเชื่อมใด ๆ เป็นคู่ไม่อันดับ  $\{a,b\}$  ของจุดยอด

กราฟไม่ระบุทิศทางจะถูกเรียกว่ากราฟอย่างง่าย (simple graph) ก็ต่อเมื่อ กราฟนั้นไม่มีลูป และไม่มีจุดยอดคู่ใดที่มีเส้นเชื่อมมากกว่า 1 เส้น รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของกราฟไม่ระบุทิศทางอย่างง่ายที่มีจุดยอด 3 จุดและเส้นเชื่อม 3 เส้น โดยจุดยอดแต่ละจุดมีดีกรีเป็น 2



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟไม่ระบุทิศทาง

จำนวนเส้นเชื่อมสูงสุดในกราฟไม่ระบุทิศทางอย่างง่ายเท่ากับ  $n(n-1)/2$  เมื่อ  $n = |V|$  คืออันดับของกราฟ

### 2.2.2.2 กราฟระบุทิศทาง (Directed graph or Digraph)

กราฟระบุทิศทางเป็นกราฟที่แต่ละเส้นเชื่อมจะมีทิศทางกำกับอยู่ นิยามอย่างเป็นทางการของกราฟระบุทิศทาง คือ คู่อันดับ  $G = (V,E)$  โดยที่

- $V$  เป็นเซตที่มีสมาชิกเป็นจุดยอด หรืออาจเรียกว่าโหนด
- $E$  เป็นเซตของคู่อันดับของจุดยอด เรียกว่าเส้นเชื่อมมีทิศทาง (directed edge) หรือลูกศร (arrow)

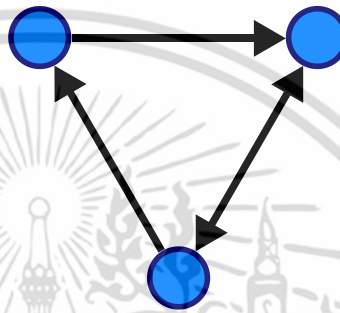
จุดที่ทำให้กราฟระบุทิศทางแตกต่างจากกราฟทั่วไป(กราฟไม่ระบุทิศทาง)

คือ เซต  $E$  ของกราฟระบุทิศทางถูกนิยามในพจน์ของคู่อันดับ (ordered pair) ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษา เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดยอด ในขณะที่เซต  $E$  ของกราฟไม่ระบุทิศทางถูกนิยามในพจน์ของคู่อันดับ (unordered pair) ของจุดยอด

กราฟระบุทิศทางจะถูกเรียกเป็นกราฟอย่างง่ายก็ต่อเมื่อ มันไม่มีลูปภายในกราฟ และ ไม่มีเส้นเชื่อมที่มีจุดเริ่มและจุดปลายซ้ำกัน รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของกราฟระบุทิศทางอย่างง่ายที่มีจุดยอด 3 จุด และมีเส้นเชื่อม 4 เส้น โดยหัวลูกศรหนึ่งหัวแทนเส้นเชื่อมหนึ่งเส้น ดังนั้นเส้นเชื่อมที่มีหัวลูกศรสองหัวหมายถึงมีสองเส้นเชื่อม



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของกราฟระบุทิศทาง

จำนวนเส้นเชื่อมสูงสุดในกราฟระบุทิศทางอย่างง่ายเท่ากับ  $n(n-1)$  เมื่อ  $n = |V|$  คืออันดับของกราฟ

### 2.2.2.3 กราฟถ่วงน้ำหนัก (Weighted graph)

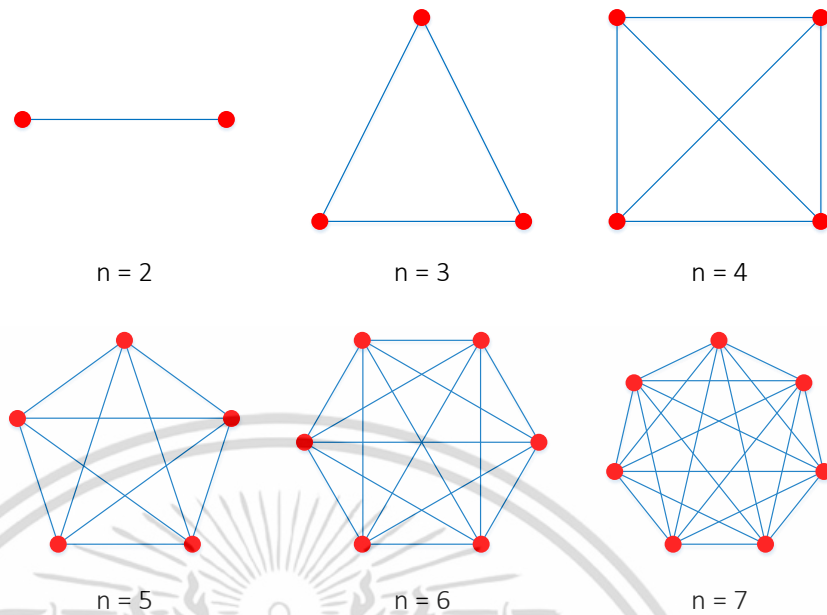
กราฟถ่วงน้ำหนัก คือ กราฟที่เส้นเชื่อมแต่ละเส้นจะมีการกำหนดค่ากำกับไว้ค่าหนึ่งเรียกว่าค่าน้ำหนัก (weight) ซึ่งอาจจะเป็นค่าใช้จ่าย (cost), ความยาว (length) หรืออื่น ๆ ขึ้นกับการใช้งาน โดยทั่วไปค่าน้ำหนักที่ถ่วงจะถือเป็นจำนวนจริง แต่ในบางครั้งก็อาจใช้เป็นจำนวนตรรกยะหรือจำนวนเต็มก็ได้ กราฟถ่วงน้ำหนักถูกนำไปใช้แก้ปัญหาหลาย ๆ ปัญหา เช่น ปัญหาวิถีสั้นสุด (shortest paths) เป็นต้น

โดยทั่วไปหากกล่าวถึงกราฟจะหมายถึงกราฟไม่ถ่วงน้ำหนัก (unweighted graph) ซึ่งไม่มีน้ำหนักถ่วงที่เส้นเชื่อม

### 2.2.2.4 กราฟบริบูรณ์ (Complete graph)

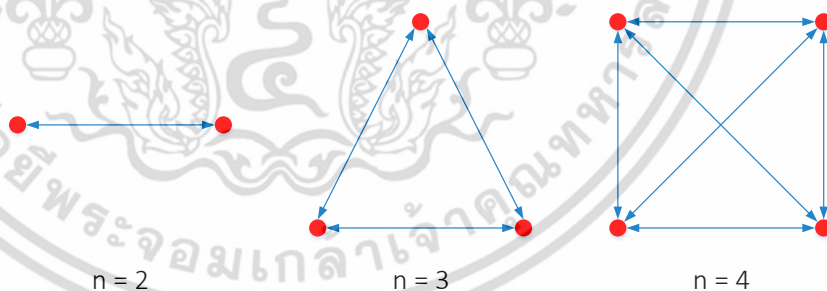
กราฟบริบูรณ์ เป็นกราฟไม่ระบุทิศทางอย่างง่ายที่ทุก ๆ คู่ของจุดยอด จะถูกเชื่อมต่อด้วยเส้นเชื่อมเสมอ กราฟบริบูรณ์ที่มีจำนวนจุดยอด  $n$  จุด จะมีเส้นเชื่อมจำนวน  $n(n-1)/2$  เส้นเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟบริบูรณ์ที่มีจำนวนจุดยอดตั้งแต่ 2 ถึง 7 จุด

กราฟระบุดิทิศทางบริบูรณ์ (complete digraph) คือ กราฟระบุดิทิศทางอย่างง่ายที่ทุก ๆ คู่ของจุดยอดจะถูกเชื่อมต่อกับคู่ของเส้นเชื่อมในทิศทางตรงข้ามกันเสมอ กราฟระบุดิทิศทางบริบูรณ์ที่มีจำนวนจุดยอด  $n$  จุด จะมีเส้นเชื่อมจำนวน  $n(n-1)$  เส้นเชื่อม



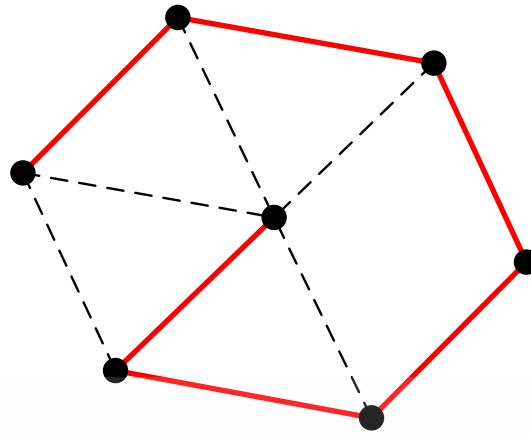
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟระบุดิทิศทางบริบูรณ์ ที่มีจำนวนจุดยอดตั้งแต่ 2 ถึง 4 จุด

### 2.2.3 ปัญหาทางเดินแฮมิลตัน (Hamiltonian path problem)

#### 2.2.3.1 ทางเดินแฮมิลตัน (Hamiltonian path)

ในทฤษฎีกราฟ ทางเดินแฮมิลตันคือ เส้นทางในกราฟไม่ระบุทิศทางหรือกราฟระบุทิศทาง ที่ผ่านจุดยอดทุกจุดโดยผ่านแต่ละจุดเพียงครั้งเดียวเท่านั้น กราฟที่มีทางเดินแฮมิลตันจะถูกเรียกว่ากราฟที่ตามรอยได้ (traceable graph)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

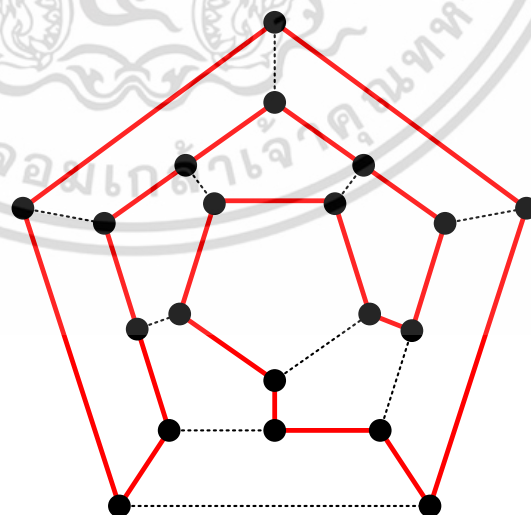


รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างทางเดินแฮมิลตันบนกราฟอย่างง่าย

### 2.2.3.2 วัฏจักรแฮมิลตัน (Hamiltonian cycle)

วัฏจักรแฮมิลตันคือ วัฏจักร (cycle or closed walk) (วัฏจักรคือ ลำดับของจุดยอดที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายเป็นจุดเดียวกัน) ในกราฟไม่ระบุทิศทางหรือกราฟระบุทิศทาง ที่ผ่านจุดยอดทุกจุดโดยผ่านแต่ละจุดเพียงครั้งเดียวเท่านั้น (ยกเว้นจุดยอดที่เป็นทั้งจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้าย ซึ่งโดนผ่านสองครั้ง) กราฟที่มีวัฏจักรแฮมิลตันจะถูกเรียกว่า กราฟแฮมิลตัน (Hamiltonian graph) รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างวัฏจักรแฮมิลตันของกราฟ

สังเกตว่าวัฏจักรแฮมิลตันคือทางเดินแฮมิลตันที่มีการเพิ่มเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดแรกและจุดยอดสุดท้ายทำให้เกิดเป็นวัฏจักรขึ้น และในทางตรงกันข้ามถ้าเรานำเส้นเชื่อม 1 เส้นออกจากวัฏจักรแฮมิลตัน เราจะได้ทางเดินแฮมิลตัน



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของวัฏจักรแฮมิลตันบนกราฟอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem)

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem) [3] หรือที่นิยมเรียกชื่อย่อว่า TSP เป็นปัญหาเก่าแก่ที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยมาอย่างยาวนาน เพื่อหาวิธีการในการหาคำตอบของปัญหานี้ให้ดีและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-hard problem) ในเรื่องการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัด (combinatorial optimization) ทั้งยังเป็นปัญหาสำคัญในแวดวงการวิจัยดำเนินงาน (operation research) และวิทยาการคอมพิวเตอร์เชิงทฤษฎี (theoretical computer science) อีกด้วย

### 2.3.1 นิยามของปัญหา

ปัญหา TSP เป็นปัญหาเกี่ยวกับพนักงานขาย (salesman) ผู้ซึ่งต้องการค้นหาเส้นทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด (shortest tour) ในการเดินทางผ่านเซต (set) ของเมืองของลูกค้านับจำนวน  $n$  เมือง โดยเป็นการเดินทางเป็นวงรอบ (cycle) ที่เมืองเริ่มต้นและเมืองสุดท้ายเป็นเมืองเดียวกัน และมีเงื่อนไขว่าจะต้องเดินทางผ่านเมืองทุก ๆ เมือง โดยแต่ละเมืองจะถูกเดินทางผ่านเพียงแค่ 1 ครั้งเท่านั้น

นิยามที่เป็นทางการของปัญหา TSP สามารถนำเสนอในเชิงคณิตศาสตร์ด้วยกราฟถ่วงน้ำหนักบริบูรณ์ (complete weighted graph) ได้ดังนี้

$$G = (N, A) \quad (2.4)$$

โดยที่  $N$  คือ เซตของโหนด (node) ที่แทนเมืองต่าง ๆ

$A$  คือ เซตของเส้นเชื่อม (edge) ที่แทนทางเชื่อมระหว่างเมืองคู่ใด ๆ

ในแต่ละเส้นเชื่อม  $(i, j) \in A$  จะถูกกำหนดให้มีค่า  $c_{i,j}$  ค่าหนึ่ง ซึ่งก็คือค่าใช้จ่าย (cost) ในการเดินทางจากเมือง  $i$  ไปเมือง  $j$  โดยที่  $i, j \in N$

เป้าหมายหลักของปัญหา TSP คือ การหาวัฏจักรแฮมิลตัน (Hamiltonian cycle) ที่มีค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุดในกราฟ วัฏจักรแฮมิลตันคือเส้นทางปิด (closed path) ที่ผ่านโหนดจำนวน  $n = |N|$  โหนด โดยผ่านแต่ละโหนดเพียงครั้งเดียวเท่านั้น (หัวข้อที่ 2.2.3.2) ดังนั้นคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ของปัญหา TSP คือการเรียงสับเปลี่ยน (permutation)  $\pi$  ของดัชนีโหนด  $\{1, 2, \dots, n\}$  ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวม  $f(\pi)$  มีค่าน้อยที่สุด เมื่อ  $f(\pi)$  ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$f(\pi) = \left[ \sum_{i=1}^{n-1} c_{\pi(i), \pi(i+1)} \right] + c_{\pi(n), \pi(1)} \quad (2.5)$$

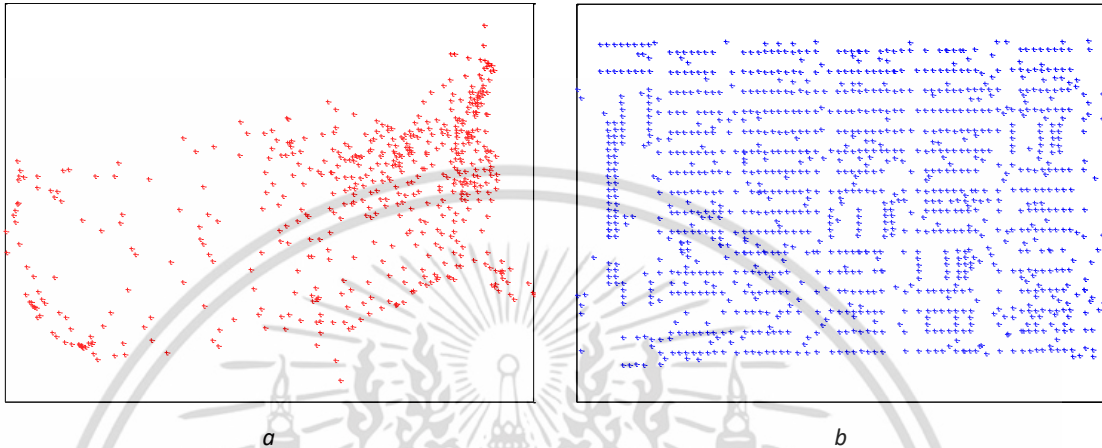
เมื่อ  $n$  คือ จำนวนเมืองทั้งหมด

คือ ค่าใช้จ่ายของเส้นเชื่อมระหว่างโหนด  $i$  และโหนด  $j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\pi$  คือ ลำดับของดัชนีโหนดที่ถูกเรียงสับเปลี่ยน

ในกรณีที่มีเมือง  $i \in N$  ถูกกำหนดให้มีค่าพิกัด  $(x_i, y_i)$  และค่าใช้จ่าย  $c_{i,j}$  ถูกกำหนดให้เป็นระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance) ระหว่างเมือง  $i$  และเมือง  $j$  แล้วเราจะเรียกปัญหา TSP นี้ว่า ปัญหา TSP แบบยูคลิด (Euclidean TSP)



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของปัญหา TSP

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลของปัญหา TSP 2 ชุด จากคลังเปรียบเทียบสมรรถนะ TSPLIB ซึ่งเป็นคลังชุดข้อมูลมาตรฐานสำหรับปัญหา TSP โดยรูปทางด้านซ้าย (a) คือชุดข้อมูล att532 ซึ่งประกอบด้วยเมือง 532 เมืองในประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนรูปทางด้านขวา (b) คือชุดข้อมูล pcb1173 ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของรู 1173 รูที่จะถูกเจาะบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)

### 2.3.2 ชนิดของปัญหา TSP

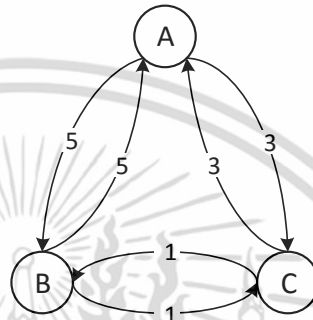
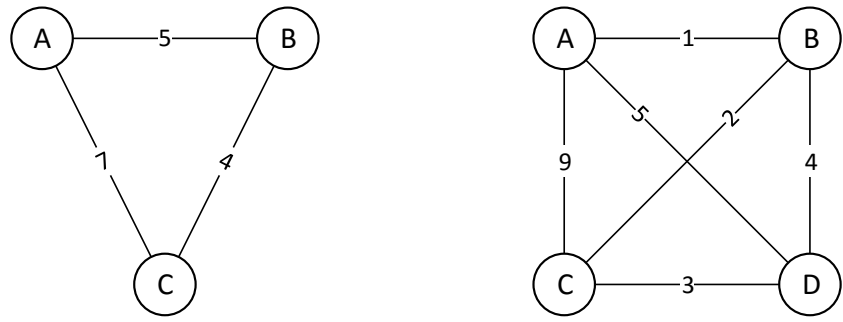
ปัญหา TSP สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

#### 2.3.2.1 TSP แบบสมมาตร (Symmetric TSP)

เป็นปัญหา TSP ที่ค่าใช้จ่าย (cost) จากโหนด  $i$  ไปโหนด  $j$  มีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายจากโหนด  $j$  ไปโหนด  $i$  นั่นคือ  $c_{i,j} = c_{j,i}$  ในทุก ๆ  $(i, j) \in A$

กราฟของปัญหา TSP แบบสมมาตร จะเป็นกราฟถ่วงน้ำหนักบริบูรณ์ไม่ระบุทิศทางหรือระบุทิศทางก็ได้ แต่ต้องตรงกับเงื่อนไข  $c_{i,j} = c_{j,i}$  ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

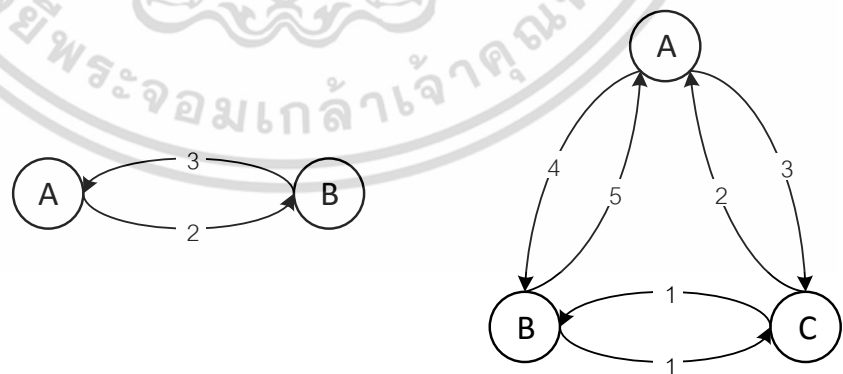


รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบสมมาตร

2.3.2.2 TSP แบบอสมมาตร (Asymmetric TSP or ATSP)

มีความแตกต่างกับปัญหา TSP แบบสมมาตรคือ จะต้องมีส่วนเชื่อม  $(i, j) \in A$  อย่างน้อยหนึ่งเส้นเชื่อมที่มีค่าใช้จ่าย  $c_{ij} \neq c_{ji}$

กราฟของปัญหา TSP แบบอสมมาตร จะเป็นกราฟวงน้ำหนักริบรูณธ์ระบุทิศทาง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบอสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ระบบมด (Ant System)

ระบบมด (Ant System: AS) ได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยถูกคิดค้นและพัฒนาโดย Marco Dorigo และคณะ [5-7] โดยแรกเริ่มแล้วระบบมดได้มีอยู่ 3 แบบด้วยกัน คือ ant-density, ant-quantity และ ant-cycle ในระบบ ant-density และระบบ ant-quantity นั้นจะมีการปรับปรุงสารฟีโรโมนทันทีในขณะที่มดเดินทางจากเมืองหนึ่งไปยังอีกเมืองหนึ่ง ขณะที่ระบบ ant-cycle นั้นจะปรับปรุงสารฟีโรโมนหลังจากที่มดเดินทางครบทุกเมืองแล้ว โดยที่ปริมาณของสารฟีโรโมนที่จะปรับปรุงนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ต่อระยะทางหรือคุณภาพของผลเฉลยที่ได้ ท้ายที่สุดแล้วระบบ ant-density และระบบ ant-quantity ก็ไม่ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาต่อไปอีก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหาเส้นทางหรือผลเฉลยที่น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบ ant-cycle ดังนั้นในปัจจุบัน เมื่อก้าวถึงระบบมดจะหมายถึงระบบ ant-cycle นั้นเอง

### 2.4.1 ระบบมดสำหรับปัญหา TSP

อัลกอริทึมระบบมดสามารถนำไปใช้แก้ปัญหา TSP ที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อที่ผ่านมาได้อย่างตรงไปตรงมา โดยกำหนดให้ปัญหา TSP แทนด้วยกราฟ  $G = (N, A)$  เมื่อ  $N$  และ  $A$  แทนเซตของเมืองและเซตของเส้นทางเชื่อมระหว่างเมืองตามลำดับ โดยทุกเส้นเชื่อม  $(i, j)$  ใด ๆ จะมีค่าฟีโรโมน  $\tau_{ij}$  ประจำอยู่ และค่าใช้จ่าย (cost) หรือเรียกว่าน้ำหนัก (weight) ของเส้นเชื่อมจะใช้เป็นค่าฮิวริสติก  $n_{ij} = 1/d_{ij}$  นั่นคือส่วนกลับของระยะทางแบบยูคลิดระหว่างเมือง  $i$  และเมือง  $j$

### 2.4.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นของฟีโรโมนในระบบมด

ฮิวริสติก (heuristic) ในการกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้นที่ดีที่สุดคือ ควรกำหนดให้ฟีโรโมนเริ่มต้นมีค่ามากกว่าปริมาณฟีโรโมนที่คาดว่าจะถูกปล่อยโดยมดในหนึ่งรอบการวนซ้ำ (iteration) เล็กน้อย ค่าประมาณแบบหยาบคือกำหนดให้  $\forall (i, j) \in A, \tau_{ij} = \tau_0 = m/C^m$  เมื่อ  $m$  คือจำนวนมด และ  $C^m$  คือความยาวของทัวร์ที่ถูกสร้างด้วยอัลกอริทึมการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest-neighbor heuristic) เหตุผลในการกำหนดค่าแบบนี้ก็คือ ถ้าฟีโรโมนเริ่มต้นมีค่าน้อยเกินไป การค้นหาจะถูกไบแอส (bias) ไปยังทัวร์แรกที่ถูกสร้างโดยมดอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้าม ถ้าฟีโรโมนเริ่มต้นมีค่ามากเกินไป จะต้องเสียเวลาหลายรอบวนซ้ำจนกว่าฟีโรโมนจะระเหยไปเป็นปริมาณเพียงพอ ดังนั้นปริมาณฟีโรโมนที่ถูกเพิ่มโดยมดในรอบวนซ้ำแรก ๆ จึงเกิดไบแอสขึ้น

### 2.4.3 องค์ประกอบหลักของอัลกอริทึมระบบมด

อัลกอริทึมระบบมดประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการสร้างคำตอบของมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารและกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3.1 กระบวนการสร้างคำตอบ (Tour Construction)

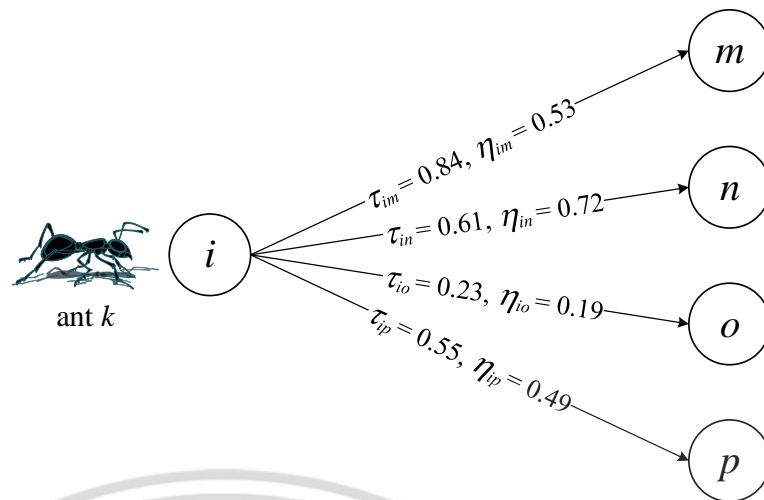
ในระบบมด มดเทียมจำนวน  $m$  ตัวจะสร้างคำตอบหรือทัวร์ (Tour) ของปัญหา TSP ไปพร้อมกัน เริ่มแรกมดแต่ละตัวจะถูกวางที่เมืองต่าง ๆ แบบสุ่ม แต่ละขั้น (step) ของการเดินทาง มดตัวที่  $k$  จะใช้กฎตามสัดส่วนแบบสุ่ม (*random proportional rule*) ในการเลือกเมืองที่จะเดินต่อไป กล่าวโดยละเอียดคือ ความน่าจะเป็นที่มดตัวที่  $k$  ซึ่งปัจจุบันอยู่ที่เมือง  $i$  จะเลือกเดินไปยังเมือง  $j$  คือ

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, \quad \text{if } j \in N_i^k, \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$  คือค่าฮิวริสติกที่ถูกกำหนดมาแล้ว ( $d_{ij}$  คือระยะทางแบบยุคลิดระหว่างเมือง  $i$  และเมือง  $j$ ) ค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  คือตัวแปรที่กำหนดอิทธิพลของค่าฟีโรโมนและค่าฮิวริสติกตามลำดับ ส่วน  $N_i^k$  คือเซตของเมืองข้างเคียงที่มด  $k$  ยังไม่เคยเดินผ่าน (ความน่าจะเป็นของการเลือกเมืองที่อยู่นอกเซต  $N_i^k$  มีค่าเท่ากับ 0) มดตัวที่  $k$  ใด ๆ จะมีหน่วยความจำ  $M^k$  สำหรับบันทึกเมืองที่มันเคยเดินผ่าน หน่วยความจำนี้ใช้ในการระบุสมาชิกของเซตของเมืองข้างเคียง  $N_i^k$  จากสมการที่ 2.6 โดยที่  $N_i^k = A - M^k$  เมื่อ  $A$  คือเซตของเมืองทั้งหมด และ  $M^k$  คือเซตของเมืองที่มดตัวที่  $k$  เคยเดินผ่านแล้ว

#### ก. ตัวอย่างการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเดินของมดในระบบมด

สมมติให้มดตัวที่  $k$  ในระบบมดอยู่ที่เมือง  $i$  และ  $N_i^k = \{m, n, o, p\}$  โดยที่ค่า  $\tau$  และ  $\eta$  ของเส้นเชื่อม  $(i, m)$ ,  $(i, n)$ ,  $(i, o)$  และ  $(i, p)$  มีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างสถานการณ์การเดินทางของมดในระบบมด

และกำหนดให้ค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ ความน่าจะเป็นที่มด  $k$  ที่อยู่ ณ เมือง  $i$  จะเดินทางไปเมืองต่าง ๆ คำนวณได้จากสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$\begin{aligned} \sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta &= (0.84) \times (0.53)^2 + (0.61) \times (0.72)^2 + (0.23) \times (0.19)^2 \\ &\quad + (0.55) \times (0.49)^2 \\ &= 0.6925 \end{aligned}$$

$$p_{im}^k = \frac{[\tau_{im}]^\alpha [\eta_{im}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} = \frac{(0.84) \times (0.53)^2}{0.6925} = 0.3407$$

$$p_{in}^k = \frac{[\tau_{in}]^\alpha [\eta_{in}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} = \frac{(0.61) \times (0.72)^2}{0.6925} = 0.4566$$

$$p_{io}^k = \frac{[\tau_{io}]^\alpha [\eta_{io}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} = \frac{(0.23) \times (0.19)^2}{0.6925} = 0.0120$$

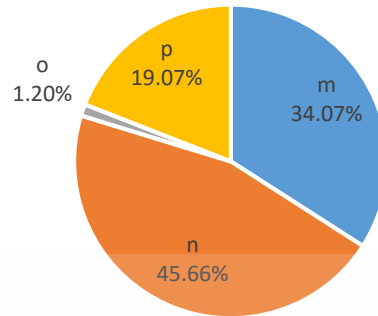
$$p_{ip}^k = \frac{[\tau_{ip}]^\alpha [\eta_{ip}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} = \frac{(0.55) \times (0.49)^2}{0.6925} = 0.1907$$

จากผลการคำนวณจะพบว่ามด  $k$  มีโอกาสเลือกเดินทางไปเมือง  $n$  มากที่สุดด้วยความน่าจะเป็น 0.4566 รองลงมาคือเมือง  $m, p$  และ  $o$  ที่ความน่าจะเป็น 0.3407, 0.1907 และ 0.0120 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมืองที่มีเส้นเชื่อมที่มีค่า  $\tau$  และ  $\eta$  สูงจะมีโอกาสถูกเลือกมากกว่า

รูปที่ 2.14 แสดงกราฟวงกลม (pie chart) แสดงความน่าจะเป็นที่เมืองจะถูกเลือกจากการคำนวณให้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AS selection probability



รูปที่ 2.14 กราฟวงกลมแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ที่เมืองต่าง ๆ จะถูกเลือกจากตัวอย่างของระบบมด

### 2.4.3.2 กระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมน (Update of Pheromone Trails)

หลังจากที่มดทุกตัวสร้างคำตอบของมันเสร็จแล้ว ปริมาณฟีโรโมนบนเส้นทางจะถูกปรับปรุง เริ่มจากลดปริมาณฟีโรโมนบนทุกเส้นเชื่อมด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นจึงทำการเพิ่มปริมาณฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่ถูกมดเดินผ่าน การลดปริมาณหรือการระเหยฟีโรโมน กระทำโดยสมการต่อไปนี้

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A, \quad (2.7)$$

เมื่อ  $0 < \rho \leq 1$  คืออัตราการระเหยของฟีโรโมน โดยตัวแปร  $\rho$  ถูกใช้เพื่อป้องกันการสะสมของฟีโรโมนอย่างไม่จำกัดบนเส้นทางใด ๆ โดยทำให้อัลกอริทึม “ลืม” การตัดสินใจที่แย่ในรอบที่ผ่าน ๆ มาได้ ซึ่งถ้าเส้นเชื่อมเส้นใดไม่ถูกมดเลือกเลยในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ค่าฟีโรโมนของเส้นเชื่อมนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านแต่ละรอบการวนซ้ำ

หลังจากการระเหยฟีโรโมน มดทุกตัวจะปล่อยฟีโรโมนไปบนเส้นเชื่อมที่มันเคยเดินผ่านในทัวร์ของมัน ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k, \quad \forall (i, j) \in A, \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\Delta \tau_{ij}^k$  คือ ปริมาณฟีโรโมนที่มด  $k$  ปล่อยไปบนเส้นเชื่อมที่มันเดินผ่าน ซึ่งถูกนิยามดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta t_{ij}^k = \begin{cases} 1/C^k, & \text{if edge } (i, j) \text{ belongs to } T^k; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $C^k$  คือความยาวของทัวร์  $T^k$  ที่ถูกสร้างโดยมด  $k$  โดยคำนวณจากผลรวมของความยาวของเส้นเชื่อมของทัวร์  $T^k$  จากสมการบอกเราว่ายิ่งทัวร์มีคุณภาพดีเท่าไร ฟิโรโมนของเส้นเชื่อมบนทัวร์นั้นก็จะถูกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเส้นเชื่อมเหล่านั้นก็จะมีโอกาสถูกมดเลือกมากขึ้นในรอบการวนซ้ำถัดไป

## 2.5 ระบบอาณานิคมมด (Ant Colony System)

ระบบอาณานิคมมดถูกพัฒนาต่อยอดมาจากระบบมด โดย Dorigo และ Gambardella ในปี ค.ศ. 1997 [8,9] โดยระบบอาณานิคมมดมีจุดหลัก ๆ ที่แตกต่างจากระบบมดอยู่ 3 จุด คือ

- 1) มันมีแนวโน้มในการมุ่งสำรวจบริเวณของคำตอบจากผลลัพธ์ของข้อมูลที่เรียนรู้มาในรอบก่อนหน้า (exploitation) มากกว่าระบบมด ด้วยกฎการเลือก (selection rule) แบบใหม่
- 2) ฟิโรโมนจะถูกปล่อยเฉพาะบนเส้นเชื่อมที่อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุด (global best-so-far tour) เท่านั้น
- 3) ทุกครั้งที่มดเดินผ่านเส้นเชื่อมใด ๆ มันจะลดค่าฟิโรโมนของเส้นเชื่อมนั้นลงบางส่วน เพื่อเพิ่มโอกาสในการสำรวจเส้นทางอื่น

### 2.5.1 องค์ประกอบหลักของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด

#### 2.5.1.1 กระบวนการสร้างคำตอบ (Tour Construction)

ในระบบอาณานิคมมด เมื่อมด  $k$  อยู่ที่เมือง  $i$  มันจะเลือกเมืองถัดไปคือเมือง  $j$  ด้วยกฎตามสัดส่วนแบบสุ่มเทียม (pseudorandom proportional rule) ดังต่อไปนี้

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in N_i^k} \{\tau_{il} [\eta_{il}]^\beta\}, & \text{if } q \leq q_0; \\ J, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $q$  คือตัวแปรสุ่มที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในช่วง  $[0,1]$   
 $q_0$  คือพารามิเตอร์ โดยที่  $0 \leq q_0 \leq 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J$  ตัวแปรที่ถูกสุ่มเลือกมาจากการแจกแจงความน่าจะเป็นตามสมการที่ 2.6 (ด้วยค่า  $\alpha = 1$ )

กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ  $q_0$  มดจะเลือกเดินทางที่ดีที่สุดจากปริมาณฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมและข้อมูลฮิวริสติก ในกรณีนี้มดจะใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้เรียนรู้มา ในขณะที่ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ  $(1 - q_0)$  มันจะทำการสำรวจเส้นทาง การปรับค่าพารามิเตอร์  $q_0$  ทำให้เราสามารถปรับความเข้มข้นของการสำรวจได้ว่าจะมุ่งเน้นค้นหาบริเวณคำตอบที่ดีที่สุดที่พบหรือจะสำรวจทั่วอื่น ๆ

ก. ตัวอย่างการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเดินของมดในระบบอาณานิคมมด

สมมติให้มดตัวที่  $k$  ในระบบอาณานิคมมดอยู่ที่เมือง  $i$  และ  $N_i^k = \{m, n, o, p\}$  โดยที่ค่า  $\tau$  และ  $\eta$  ของเส้นเชื่อม  $(i, m)$ ,  $(i, n)$ ,  $(i, o)$  และ  $(i, p)$  มีค่าเหมือนกันกับสถานการณ์ของระบบมดในรูปที่ 2.13 และกำหนดให้ค่า  $\beta$  มีค่าเท่ากับ 2.0 และ  $q_0$  มีค่าเท่ากับ 0.9 ตามลำดับ

ความน่าจะเป็นที่มด  $k$  ในระบบอาณานิคมมด ที่อยู่ ณ เมือง  $i$  จะเดินไปเมืองต่าง ๆ คำนวณได้จากสมการที่ 2.10 ดังนี้

$$\text{หาค่า } \arg \max_{l \in N_i^k} \{ \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta \} = n$$

$$\begin{aligned} \sum_{l \in N_i^k} \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta &= (0.84) \times (0.53)^2 + (0.61) \times (0.72)^2 + (0.23) \times (0.19)^2 \\ &\quad + (0.55) \times (0.49)^2 \\ &= 0.69254 \end{aligned}$$

$$p_{im}^k = (1 - q_0) \times \frac{\tau_{im} [\eta_{im}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta} = (1 - 0.9) \times \frac{(0.84) \times (0.53)^2}{0.69254} = 0.0341$$

$$\begin{aligned} p_{in}^k &= q_0 + \left[ (1 - q_0) \times \frac{\tau_{in} [\eta_{in}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta} \right] \\ &= 0.9 + \left[ (1 - 0.9) \times \frac{(0.61) \times (0.72)^2}{0.69254} \right] = 0.9456 \end{aligned}$$

$$p_{io}^k = (1 - q_0) \times \frac{\tau_{io} [\eta_{io}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta} = (1 - 0.9) \times \frac{(0.23) \times (0.19)^2}{0.69254} = 0.0012$$

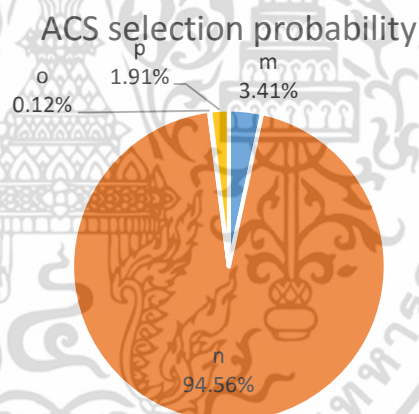
$$p_{ip}^k = (1 - q_0) \times \frac{\tau_{ip} [\eta_{ip}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta} = (1 - 0.9) \times \frac{(0.55) \times (0.49)^2}{0.69254} = 0.0191$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณจะพบว่ามต  $k$  มีโอกาสเลือกเดินไปเมือง  $n$  มากที่สุด ด้วยความน่าจะเป็น 0.9457 รองลงมาคือเมือง  $m, p$  และ  $o$  ที่ความน่าจะเป็น 0.0341, 0.0191 และ 0.0012 ตามลำดับ

สังเกตได้ว่าภายใต้สถานการณ์สภาพแวดล้อมเดียวกัน ระบบอานานิคมมต มีโอกาสเลือกเมืองที่มีเส้นเชื่อมที่มีผลคูณของพีโรโมนและค่าฮิวริสติกมากที่สุด ซึ่งในตัวอย่างนี้คือเมือง  $n$  ถึง 94.56% ซึ่งมากกว่าในระบบมตซึ่งมีโอกาสเลือกเมือง  $n$  เพียง 45.66% ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากกฎการเลือกเมืองแบบใหม่ ที่ให้ความสำคัญกับผลลัพธ์ของข้อมูลที่ได้เรียนรู้มาในรอบก่อนหน้า (exploitation) มากขึ้นนั่นเอง โดยสามารถปรับระดับความสำคัญได้ด้วยพารามิเตอร์  $q_0$  ซึ่งในกรณีที่ค่า  $q_0$  มีค่าเป็นศูนย์ สมการที่ 2.10 จะประพฤติตัวเหมือนกับสมการที่ 2.6 (ด้วยค่าพารามิเตอร์  $\alpha = 1$ )

รูปที่ 2.15 แสดงกราฟวงกลม (pie chart) แสดงความน่าจะเป็นที่เมืองจะถูกเลือกจากการคำนวณให้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.15 กราฟวงกลมแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ที่เมืองต่าง ๆ จะถูกเลือกจากตัวอย่างของระบบอานานิคมมต

### 2.5.1.2 การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล (Global Pheromone Trail Update)

ในระบบอาณานิคมมด มีมดที่ดีที่สุด (the best-so-far ant) เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่ได้รับอนุญาตให้เพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนหลังจากจบแต่ละรอบวนซ้ำได้ การปรับปรุงถูกกระทำด้วยสมการต่อไปนี้

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}^{bs}, \quad \forall (i,j) \in T^{bs}, \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\Delta\tau_{ij}^{bs} = 1/C^{bs}$

โดยที่  $T^{bs}$  คือ ทัวร์ที่ดีที่สุดที่มดเคยค้นพบ (best-so-far tour)

$C^{bs}$  คือ ความยาวของทัวร์  $T^{bs}$

$\rho$  คือ พารามิเตอร์สำหรับอัตราการระเหยของฟีโรโมน

มีข้อสังเกตว่า ในกระบวนการปรับปรุงฟีโรโมนของระบบอาณานิคมมด ทั้งการระเหยและการปล่อยฟีโรโมนจะถูกทำกับเฉพาะเส้นเชื่อมของ  $T^{bs}$  เท่านั้น ไม่ใช่กับทุกเส้นเชื่อมเหมือนในระบบมด สำหรับพารามิเตอร์  $\rho$  ก็จะแตกต่างจากในระบบมดเช่นกัน กล่าวคือฟีโรโมนที่ถูกปล่อยจะถูกลดปริมาณลงด้วยตัวคูณ  $\rho$  ส่งผลให้ค่าฟีโรโมนใหม่เป็นค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างค่าฟีโรโมนเก่าและปริมาณฟีโรโมนที่ถูกปล่อยเพิ่ม

Dorigo ได้เคยทำการทดลอง โดยใช้ทัวร์ที่ดีที่สุดในรอบวนซ้ำปัจจุบัน (iteration-best tour) แทนทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบ (best-so-far tour) สำหรับกระบวนการปรับปรุงฟีโรโมน ผลปรากฏว่าสำหรับปัญหา TSP ขนาดเล็กที่มีจำนวนเมืองไม่มาก คุณภาพของทัวร์สุดท้ายที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สำหรับปัญหา TSP ที่มีจำนวนเมืองเกิน 100 เมือง พบว่าการใช้ทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ามาก

### 2.5.1.3 การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล (Local Pheromone Trail Update)

นอกเหนือจากการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลแล้ว ระบบอาณานิคมมดยังได้มีการเพิ่มการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล ซึ่งจะกระทำทันทีหลังจากที่มดได้เดินผ่านเส้นเชื่อม  $(i,j)$  ในระหว่างกระบวนการสร้างคำตอบ ด้วยสมการ

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\xi) \cdot \tau_{ij} + \xi \cdot \tau_0 \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\xi, 0 < \xi < 1$  และ  $\tau_0$  คือพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ  $\tau_0$  ถูกตั้งให้มีค่าเดียวกันกับค่าฟีโรโมนเริ่มต้นของเส้นเชื่อม การทดลองพบว่าค่าที่ดีที่สุดของ  $\xi$  คือค่า 0.1 ในขณะที่ค่าที่ดีที่สุดของ  $\tau_0$  คือค่า  $1/n \cdot C^{max}$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนเมืองของชุดข้อมูล TSP และ  $C^{max}$  คือความยาวของทัวร์ที่ได้จาก อัลกอริทึมการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest-neighbor algorithm) ผลของการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลคือ ทุก ๆ ครั้งที่มีดเลือกเดินผ่านเส้นเชื่อม  $(i,j)$  ปริมาณสารฟีโรโมน  $\tau_{ij}$  ในเส้นเชื่อมนั้นจะถูกลดจำนวนลง ดังนั้นเส้นเชื่อมนั้นจะเป็นที่ต้องการน้อยลงสำหรับมดตัวอื่น นั่นคือมันช่วยเพิ่มอัตราการสำรวจเส้นเชื่อมที่ยังไม่เคยถูกเดินผ่านเลย ในทางปฏิบัติแล้วมันช่วยทำให้อัลกอริทึมไม่แสดงพฤติกรรมชะงักงัน (stagnation) กล่าวคือพฤติกรรมที่มดเดินซ้ำบนเส้นทางเดียวกันทุกตัวในหลาย ๆ รอบการวนซ้ำ

## 2.5.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบอาณานิคมมด

ขั้นตอนการทำงานของระบบอาณานิคมมดสามารถอธิบายได้ด้วยอัลกอริทึมดังต่อไปนี้

### ช่วงการตั้งค่าเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 1. กำหนดค่าให้ฟีโรโมน  $\tau$  ของทุกเส้นเชื่อมมีค่าเท่ากับ  $\tau_0$

ขั้นตอนที่ 2. สุ่มเลือกเมืองเริ่มต้นให้กับมดแต่ละตัว

### ช่วงการสร้างคำตอบของมด

ขั้นตอนที่ 3. มดแต่ละตัวเลือกเมืองที่จะเดินต่อไปด้วยสมการ 2.10 และ 2.6

ขั้นตอนที่ 4. ปรับค่าฟีโรโมนของเส้นเชื่อมที่เพิ่งถูกมดเดินผ่าน ด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล (สมการที่ 2.12)

ขั้นตอนที่ 5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 4 จนกระทั่งมดทุกตัวเดินผ่านเมืองครบทุกเมือง

ขั้นตอนที่ 6. มดแต่ละตัวเดินกลับไปที่เมืองเริ่มต้นของตัวเอง พร้อมทั้งปรับค่าฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่มันเพิ่งเดินผ่าน ด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล (สมการที่ 2.12)

### ช่วงการปรับปรุงสารฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมแบบโกลบอล

ขั้นตอนที่ 7. คำนวณหาค่าความยาวของทัวร์ของมดแต่ละตัว

ขั้นตอนที่ 8. ปรับค่าฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบ ด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล (สมการที่ 2.11)

ขั้นตอนที่ 9. ถ้า บรรลุเงื่อนไขการหยุด แล้ว ให้ส่งผลลัพธ์คือทัวร์ที่ดีที่สุดออกมา  
ไม่เช่นนั้น ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 วิเคราะห์สมการที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมด

จากหัวข้อที่ 2.5.1 เราจะพบว่าระบบอาณานิคมมดมีสมการที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงฟีโรโมนอยู่ทั้งหมด 2 สมการ นั่นคือ สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล และ สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล โดยเราจะวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแต่ละสมการดังนี้

#### 2.5.3.1 สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล

ในรูปปกติจะมีรูปแบบดังสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \xi) \cdot \tau_{ij} + \xi \cdot \tau_0$$

เราสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} - \xi \tau_{ij} + \xi \cdot \tau_0$$

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \xi(\tau_0 - \tau_{ij})$$

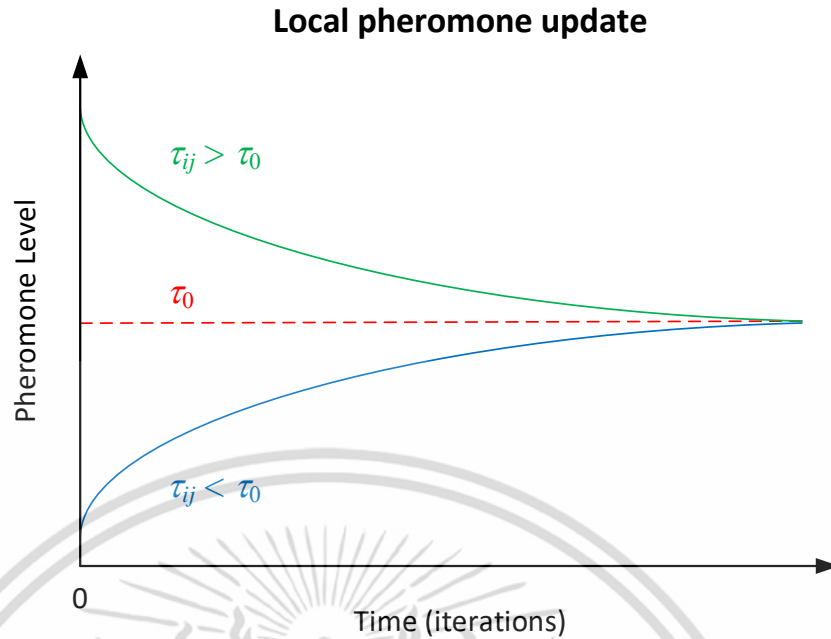
จะพบว่า เมื่อ  $\tau_{ij} = \tau_0$  ค่าฟีโรโมนจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

$\tau_{ij} > \tau_0$  ค่าฟีโรโมนจะลดลงไปหาค่า  $\tau_0$

$\tau_{ij} < \tau_0$  ค่าฟีโรโมนจะเพิ่มขึ้นไปหาค่า  $\tau_0$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล ทำให้ค่าฟีโรโมนเข้าสู่ค่า  $\tau_0$  ด้วยความเร็วเท่ากับสัดส่วน  $\xi$  ระหว่างค่าฟีโรโมนปัจจุบันกับค่า  $\tau_0$

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างการเข้าสู่ของฟีโรโมนในสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล โดยที่เส้นประสีแดงแสดงระดับของค่า  $\tau_0$  เส้นสีเขียวแสดงถึงค่าฟีโรโมนในกรณีที่มีค่ามากกว่าค่า  $\tau_0$  และเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงค่าฟีโรโมนในกรณีที่มีค่าน้อยกว่าค่า  $\tau_0$  จะเห็นว่าเมื่อเวลา (รอบการวนซ้ำ) ผ่านไปค่าฟีโรโมนของทั้งเส้นสีเขียวและเส้นสีน้ำเงินจะเข้าสู่เส้นประสีแดงซึ่งก็คือค่า  $\tau_0$



รูปที่ 2.16 แสดงการลู่เข้าของค่าฟีโรโมนในสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล

### 2.5.3.2 สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล

ในรูปปกติจะมีรูปแบบดังสมการที่ 2.11 ดังนี้

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \frac{1}{C^{bs}}$$

เราสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} - \rho \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \frac{1}{C^{bs}}$$

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \rho \cdot \left( \frac{1}{C^{bs}} - \tau_{ij} \right)$$

จะพบว่า เมื่อ  $\tau_{ij} = (C^{bs})^{-1}$  ค่าฟีโรโมนจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

$\tau_{ij} > (C^{bs})^{-1}$  ค่าฟีโรโมนจะลดลงไปหาค่า  $(C^{bs})^{-1}$

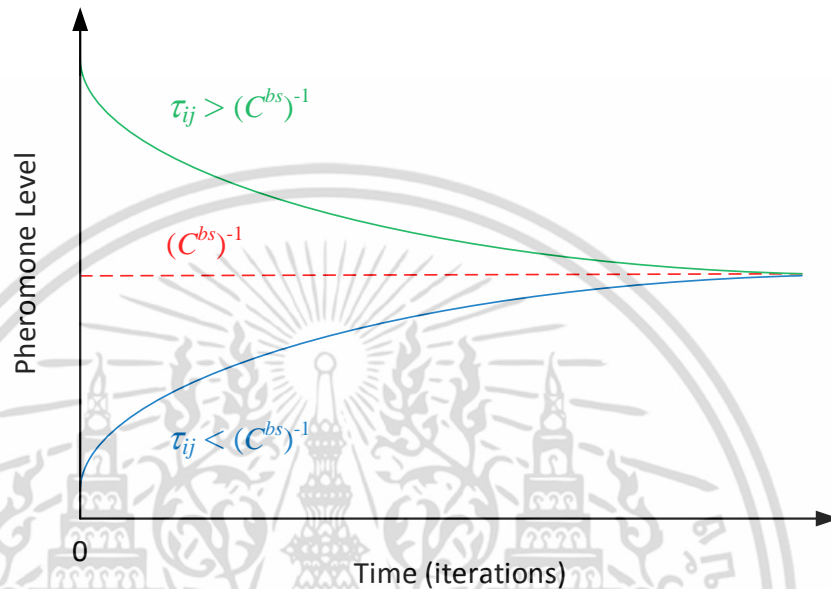
$\tau_{ij} < (C^{bs})^{-1}$  ค่าฟีโรโมนจะเพิ่มขึ้นไปหาค่า  $(C^{bs})^{-1}$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล ทำให้ค่าฟีโรโมนลู่เข้าสู่ค่า  $(C^{bs})^{-1}$  ด้วยความเร็วเท่ากับสัดส่วน  $\rho$  ระหว่างค่าฟีโรโมนปัจจุบันกับค่า  $(C^{bs})^{-1}$

รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างการลู่เข้าของฟีโรโมนในสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล โดยที่เส้นประสีแดงแสดงระดับของค่า  $(C^{bs})^{-1}$  เส้นสีเขียวแสดงถึงค่าฟีโรโมนใน

กรณีที่มีค่ามากกว่าค่า  $(C^{bs})^{-1}$  และเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงค่าฟีโรโมนในกรณีที่มีค่าน้อยกว่าค่า  $(C^{bs})^{-1}$  จะเห็นว่าเมื่อเวลา (รอบการวนซ้ำ) ผ่านไปค่าฟีโรโมนของทั้งเส้นสีเขียวและเส้นสีน้ำเงินจะลู่เข้าสู่เส้นประสีแดงซึ่งก็คือค่า  $(C^{bs})^{-1}$

### Global pheromone update



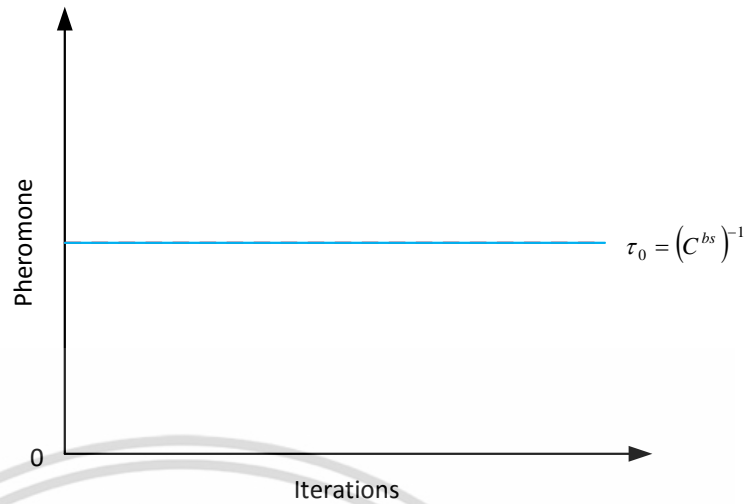
รูปที่ 2.17 แสดงการลู่เข้าของค่าฟีโรโมนในสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล

#### 2.5.3.3 ขอบเขตของค่าฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมด

ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว ค่าฟีโรโมนของเส้นเชื่อมในระบบอาณานิคมมดจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยสมการ 2 สมการ (สมการ 2.11 และ 2.12) และเราทราบว่าฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมดมีจุดลู่เข้าอยู่ 2 จุด คือ  $\tau_0$  และ  $(C^{bs})^{-1}$  เนื่องจากค่าฟีโรโมนเริ่มต้นของทุกเส้นเชื่อมมีค่าเท่ากับ  $\tau_0$  ทำให้เกิดขอบเขตของค่าฟีโรโมนที่เป็นไปได้ 3 กรณี ดังนี้

- 1)  $\tau_0 = (C^{bs})^{-1}$

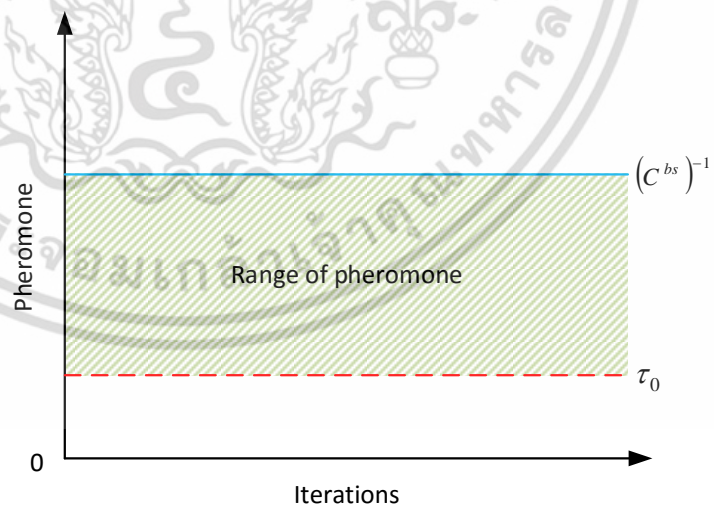
ในกรณีนี้ค่าฟีโรโมนของทุกเส้นเชื่อมจะถูกดึงดูดเข้าสู่ค่าเดียวกันหมดจนกลายเป็นค่าเดียวกัน ทำให้ไม่เกิดความแตกต่างของระดับฟีโรโมนในแต่ละเส้นเชื่อม ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ขอบเขตของค่าฟีโรโมนกรณีที่ 1

$$2) \tau_0 < (C^{bs})^{-1}$$

ในกรณีนี้ค่า  $\tau_0$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและถูกดึงดูดด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลจะเป็นขอบล่างของค่าฟีโรโมน ส่วนค่า  $(C^{bs})^{-1}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าและถูกดึงดูดด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลจะเป็นขอบบน ดังรูปที่ 2.19

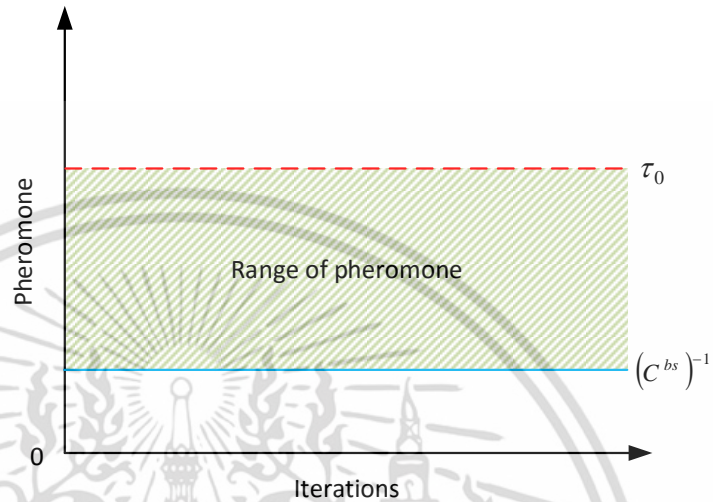


รูปที่ 2.19 ขอบเขตของค่าฟีโรโมนกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$3) \tau_0 > (C^{bs})^{-1}$$

กรณีนี้จะตรงข้ามกับกรณีที่ 2 กล่าวคือ ค่า  $\tau_0$  จะกลายเป็นขอบบนของค่าฟีโรโมนแทน ส่วนค่า  $(C^{bs})^{-1}$  จะกลายเป็นขอบล่าง ดังรูปที่ 2.20



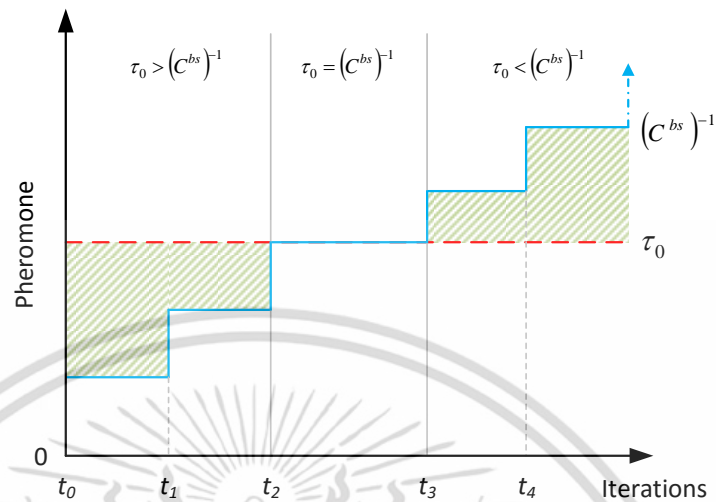
รูปที่ 2.20 ขอบเขตของค่าฟีโรโมนกรณี 3

ในทางปฏิบัติแล้วกรณี 1 และ 3 มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมาก เนื่องจากในระบบมดโดยปกติแล้วนิยามกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้น  $\tau_0 = 1/n \cdot C^{mn}$  เมื่อ  $C^{mn}$  คือความยาวของทัวร์ที่หามาจากอัลกอริทึมการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด และ  $n$  คือจำนวนเมืองทั้งหมดของปัญหา เมื่อพิจารณาจากสมการจะพบว่า  $\frac{1}{n \cdot C^{mn}}$  ซึ่งเป็นค่าฟีโรโมนเริ่มต้นและมี  $n$  เป็นตัวหาร มีโอกาสสูงมากที่จะมีค่าน้อยกว่า  $\frac{1}{C^{bs}}$  ซึ่งหาได้จากความยาวของทัวร์ที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ทั้งนี้ก็เพราะว่าทั้ง  $C^{mn}$  และ  $C^{bs}$  ต่างก็เป็นความยาวของทัวร์ที่เป็นคำตอบของปัญหาเดียวกันซึ่งมีโอกาสน้อยมากที่ความยาวจะต่างกันถึง  $n$  เท่า

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยแต่ก็ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดกรณีที่ 1 หรือ 3 ขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราใช้วิธีการอื่นที่นอกเหนือจากวิธีที่กล่าวไปข้างต้นในการกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามระบบอาณานิคมมดจะมีวิธีการปรับขอบเขต (range) ของฟีโรโมนให้กลายเป็นแบบกรณีที่ 2 เอง ดังที่จะอธิบายต่อไป

เนื่องจากค่า  $\tau_0$  เป็นค่าคงที่ที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อจำนวนรอบการวนซ้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับค่า  $(C^{bs})^{-1}$  ซึ่งไม่คงที่ กล่าวคือ ทุก ๆ ครั้งที่ระบบอาณานิคมมดค้นพบทัวร์ที่ดีที่สุดทัวร์ใหม่ ค่า  $C^{bs}$  หรือความยาวของทัวร์ใหม่ที่ดีที่สุดที่ค้นพบนั้นจะต้องมีค่าน้อยลงกว่า

ค่าเก่า ส่งผลให้ค่า  $(C^{bs})^{-1}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อจำนวนรอบการวนซ้ำผ่านไปค่า  $(C^{bs})^{-1}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้กรณีที่ 1 และ 3 กลายเป็นกรณีที่ 2 ในท้ายที่สุด



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงขอบบน-ขอบล่างของฟีโรโมน

รูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างของคำอธิบายดังกล่าว สมมติให้ที่เวลา  $t_0, t_1, t_2, t_3$  และ  $t_4$  คือจุดที่มีการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดใหม่ที่ทำให้เกิดการยกตัวขึ้นของค่า  $(C^{bs})^{-1}$  (เส้นสีฟ้า) จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นคือ  $t_0$  ถึง  $t_2$  ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\tau_0$  และค่า  $(C^{bs})^{-1}$  เป็นแบบกรณีที่ 3 คือ  $\tau_0$  (เส้นประสีแดง) มีค่ามากกว่า  $(C^{bs})^{-1}$  จนเมื่อค่า  $(C^{bs})^{-1}$  ยกตัวสูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับ  $\tau_0$  ที่จุด  $t_2$  จะกลายเป็นความสัมพันธ์แบบกรณีที่ 1 และเมื่อเวลาผ่านไปมีการค้นพบคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเก่าที่จุด  $t_3$  ค่า  $(C^{bs})^{-1}$  ก็จะยกตัวลอยเหนือค่า  $\tau_0$  ทำให้กลายเป็นกรณีที่ 2 ในท้ายที่สุด

จึงสรุปได้ว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\tau_0$  และค่า  $(C^{bs})^{-1}$  มีแนวโน้มเป็นแบบกรณีที่ 2 ทั้งหมด นั่นจึงทำให้ค่า  $\tau_0$  เป็นขอบล่าง ส่วนค่า  $(C^{bs})^{-1}$  เป็นขอบบน ของระดับฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมด

## บทที่ 3

# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

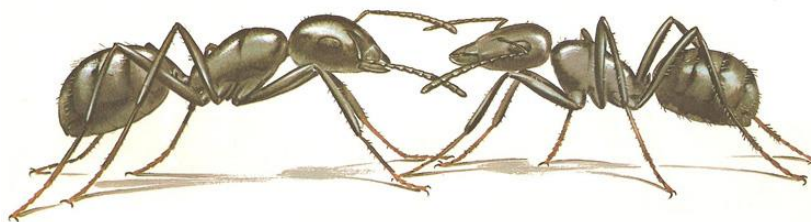
มีงานวิจัยหลายงานที่พยายามปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในตระกูลของระบบมดสำหรับการแก้ปัญหา TSP โดยใช้แนวคิดที่แตกต่างกันในการพยายามเพิ่มการกระจายตัวของการค้นหา เพื่อลดทอนปัญหาที่เกิดจากจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ และเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริงของปัญหา ในบทนี้เราจะทบทวนงานวิจัยเหล่านั้นบางส่วนที่มีแนวคิดที่น่าสนใจดังนี้

#### 3.1.1 โมเดล ACO with Antennation

Beer และคณะ [10] ได้นำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงอัลกอริทึมในตระกูลการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมมด (ACO) ในปี ค.ศ. 2012 โดยสามารถนำไปใช้ได้กับอัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจากระบบมดรวมถึงระบบอาณานิคมมดด้วย แนวความคิดมาจากการสังเกตพฤติกรรมของแมลงที่อยู่รวมกันเป็นสังคมบางชนิด และค้นพบว่าพวกมันแต่ละตัวสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีให้กับตัวอื่นได้โดยตรงผ่านทางอวัยวะที่เรียกว่าหนวดซึ่งเป็นเสมือนเครื่องมือสำหรับการติดต่อสื่อสารและมดก็จัดเป็นแมลงประเภทนี้ โดยมดสามารถใช้การสัมผัสหนวดเพื่อแจ้งเตือนมดตัวอื่นว่ามีอาหารอยู่ที่ใด ภาพที่ 3.1 และ 3.2 แสดงตัวอย่างหนวดของมดและการที่มดติดต่อสื่อสารกันผ่านทางหนวด



รูปที่ 3.1 หนวดของมด



รูปที่ 3.2 แสดงการสัมผัสหนวดเพื่อสื่อสารกันของมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้วมดในระบบมดและในอัลกอริทึมสืบทอดอื่น ๆ จะสื่อสารกันทางอ้อมผ่านทางสารฟีโรโมนที่ปล่อยไว้บนเส้นทาง แต่โมเดลของ Beer นี้จะเพิ่มการสื่อสารผ่านการสัมผัสหมวดซึ่งเป็น การสื่อสารทางตรง โดยในงานวิจัยของ Beer ได้แบ่งสิ่งที่มีผลขึ้นนำการเลือกเดินของมดในโมเดลใหม่นี้ เป็น 3 ระดับ ได้แก่

- 1) อิวริสติกระยะสั้น (short-term heuristic) คือ ระยะทางระหว่างเมือง
- 2) อิวริสติกระยะกลาง (mid-term heuristic) คือ ข้อมูลจากการสัมผัสหมวด
- 3) อิวริสติกระยะยาว (long-term heuristic) คือ สารฟีโรโมน

โดยอิวริสติกระยะกลางเป็นการแลกเปลี่ยนสื่อสารและเรียนรู้เฉพาะกับมดภายในรุ่นเดียวกัน เท่านั้น (intra-generation) โดยที่ข้อมูลที่ได้จะถูกกลบเมื่อมดสร้างทิวร์เสร็จและเก็บข้อมูลใหม่ทุกครั้ง ที่สร้างทิวร์ใหม่ กล่าวคือข้อมูลจะถูกเก็บรักษาไว้ตลอดจนกระทั่งจบรุ่น (รอบการวนซ้ำ - iteration) ซึ่งแตกต่างกับอิวริสติกระยะสั้นที่ข้อมูลจะไม่ถูกนำมาแลกเปลี่ยนกันภายในรุ่น และอิวริสติกระยะยาว ที่ข้อมูลจะถูกส่งผ่านสู่รุ่นถัดไป

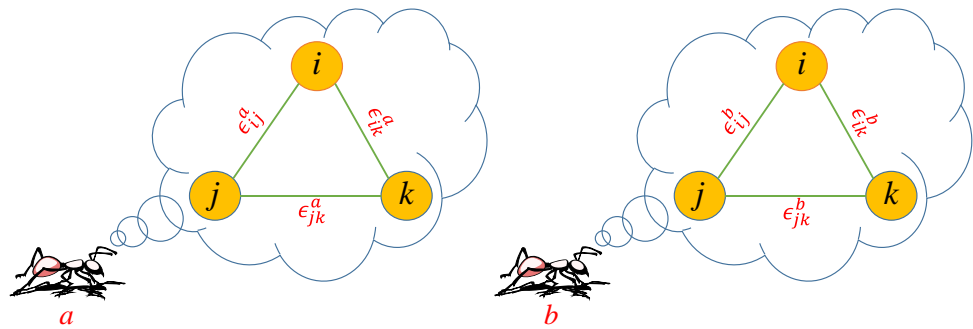
จุดประสงค์ของการสื่อสารทางตรงผ่านการสัมผัสหมวดที่เพิ่มเข้ามาในโมเดลนี้ ก็เพื่อผลักดัน ให้เกิดความหลากหลาย (diversification) ในเส้นทางเดินของมด โดยเพิ่มอิทธิพลของการสำรวจ (exploration) ให้มากขึ้น

#### 3.1.1.1 ข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนเมื่อสัมผัสหมวด

มดในโมเดลนี้จะแบ่งปันข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่การค้นหาที่มันได้เรียนรู้มาให้กับมดตัวอื่น โดย ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่การค้นหาในโมเดลนี้จะหมายถึงปริมาณการสัญจรของมดบนเส้นทางใด ๆ ที่มดตัว นั้นได้รับรู้ กลไกการติดต่อสื่อสารที่นำมาประยุกต์ใช้ในโมเดลนี้จะพยายามเลียนแบบให้เหมือนกับ กลไกการติดต่อสื่อสารของมดจริงตามธรรมชาติมากที่สุด กล่าวคือข้อมูลจะไม่ถูกแบ่งปันเป็นวงกว้าง ให้กับมดทุกตัว เฉพาะมดที่อยู่เมืองเดียวกันในเวลาเดียวกันเท่านั้นที่จะแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้

#### 3.1.1.2 หน่วยความจำสำหรับข้อมูลแลกเปลี่ยนของมด

มดแต่ละตัวในโมเดลนี้จะมีหน่วยความจำพิเศษเอาไว้สำหรับจดจำพื้นที่การค้นหาที่มันเคย สืบทอดและได้รับข้อมูลมาจากมดตัวอื่น โดยหน่วยความจำนี้เป็นสิ่งที่ถูกเพิ่มเข้ามาในโมเดลนี้และไม่มี ในอัลกอริทึมระบบมดปกติ กล่าวคือสำหรับมด  $a$  ใด ๆ จะมีหน่วยความจำ  $e_{ij}^a$  สำหรับทุก ๆ เส้น เชื่อม  $(i, j) \in A$  เมื่อ  $A$  คือเซตของเส้นเชื่อมทั้งหมด โดย  $e_{ij}^a$  จะเก็บจำนวนของมดที่เดินผ่านเส้น เชื่อม  $(i, j)$  ที่มด  $a$  เคยเห็น รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัวอย่างของหน่วยความจำที่มีอยู่ในมดแต่ละตัว โดยสมมติให้ปัญหา TSP มี 3 โหนด คือ  $i, j$  และ  $k$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 หน่วยความจำพิเศษของมด

## 3.1.1.3 กฎการเคลื่อนที่

โมเดลของ Beer ที่นำเสนอนี้ทำการดัดแปลงกฎการเคลื่อนที่ของมดในระบบมดและในอัลกอริทึมสืบทอด โดยดัดแปลงกฎตามสัดส่วนแบบสุ่ม (random proportional rule) ในสมการที่ 2.6 เป็นดังนี้

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^a \cdot [\eta_{ij}]^\beta \cdot (1 - f_{type}(A_f, \epsilon_{ij}^k, \gamma^k))}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^a \cdot [\eta_{il}]^\beta \cdot (1 - f_{type}(A_f, \epsilon_{il}^k, \gamma^k))}, \quad \text{if } j \in N_i^k, \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- $A_f$  คือตัวแปรควบคุมน้ำหนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง  $0 < A_f \leq 1$
  - $\epsilon_{ij}^k$  คือจำนวนของมดที่ถูกเห็นว่าเดินผ่านเส้นเชื่อม  $(i, j)$  โดยมด  $k$
  - $\gamma^k$  คือจำนวนมดทั้งหมดที่มด  $k$  ได้พบ
  - $f_{type}$  คือฟังก์ชันควบคุมที่กำหนดระดับแรงจูงใจของมดที่มีต่อค่า  $\epsilon_{ij}^k$

จากกฎการเคลื่อนที่ในสมการที่ 3.1 นี้ มดจะมีแนวโน้มที่จะไม่เลือกเดินผ่านเส้นเชื่อม  $(i, j)$  ในกรณีที่ฟังก์ชันควบคุม  $f_{type}$  ที่คำนวณได้จากเส้นเชื่อมนั้นมีค่ามาก ซึ่งค่าตัวแปรที่มีผลต่อฟังก์ชันควบคุมนี้คือ  $\epsilon_{ij}^k$  โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของฟังก์ชันควบคุมนี้ในหัวข้อถัดไป

## 3.1.1.4 ฟังก์ชันควบคุม

ในงานวิจัยของ Beer ได้ทำการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันควบคุม 3 ฟังก์ชัน คือฟังก์ชัน Boolean, Linear และ  $1/\mathcal{E}$  โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงฟังก์ชันควบคุมในโมเดลของ Beer

Function name	Return value
Boolean	$f_{type}(A_f, \varepsilon_{ij}, \gamma) = \begin{cases} 0, & \text{if } \varepsilon_{ij} = 0; \\ A_f, & \text{otherwise;} \end{cases}$
Linear	$f_{type}(A_f, \varepsilon_{ij}, \gamma) = A_f \cdot \frac{\varepsilon_{ij}}{\gamma}$
$1/\mathcal{E}$	$f_{type}(A_f, \varepsilon_{ij}, \gamma) = \frac{A_f \cdot \varepsilon_{ij}}{1 + A_f \times \varepsilon_{ij}}$

ฟังก์ชัน Boolean เป็นฟังก์ชันที่เรียบง่ายที่สุด กล่าวคือ ถ้ามีข้อมูลว่ามีอย่างน้อย 1 ตัวเคยเดินผ่านเส้นเชื่อม  $(i, j)$  แรงงูใจของเส้นเชื่อมเส้นนั้นจะลดลงทันที ฟังก์ชัน Boolean นี้มีข้อดีเรื่องความเร็วในการเปลี่ยนแปลงแรงงูใจของเส้นเชื่อม แต่มีข้อจำกัดที่ว่าแรงงูใจนี้ไม่สามารถเพิ่มขึ้นตามจำนวนมดที่เดินผ่านเส้นเชื่อมได้

ฟังก์ชัน Linear ใช้อัตราส่วนระหว่างค่า  $\gamma$  และ  $\varepsilon_{ij}$  ในการควบคุมผลของแรงงูใจ ตัวอย่างเช่น ในขณะที่ค่า  $\gamma$  เพิ่มขึ้นระหว่างสร้างทัวร์ ค่าที่ได้จาก  $f_{type}$  จะลดลง เว้นเสียแต่ว่าค่า  $\varepsilon_{ij}$  จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่ากันด้วย โดยฟังก์ชัน Linear สามารถปรับค่าเอาท์พุทให้มีหลายระดับมากกว่าฟังก์ชัน Boolean

ฟังก์ชัน  $1/\mathcal{E}$  จะแตกต่างกับสองฟังก์ชันก่อนหน้านี้ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตของเอาท์พุทไว้เท่ากับ  $A_f$  แต่ฟังก์ชัน  $1/\mathcal{E}$  จะถูกจำกัดขอบเขตของเอาท์พุทไว้เท่ากับ 1 โดยมีข้อดีคือมันสามารถปรับเปลี่ยนแรงงูใจได้เร็วเมื่อเทียบกับฟังก์ชัน Linear ในขณะที่มีค่าเอาท์พุทได้หลายระดับมากกว่าฟังก์ชัน Boolean

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าฟังก์ชันควบคุมทุกฟังก์ชันแปรผันตรงกับตัวแปรอินพุต  $\varepsilon_{ij}$  กล่าวคือ ถ้าค่าตัวแปร  $\varepsilon_{ij}$  มีค่ามาก ฟังก์ชันควบคุมก็จะให้ค่าเอาท์พุทมากด้วย ซึ่งส่งผลต่อสมการที่ 3.1 ทำให้ถ้าเส้นเชื่อมใดมีค่า  $\varepsilon_{ij}$  มาก (มีจำนวนมดเดินผ่านมาก) จะมีโอกาสถูกเลือกน้อยลง ส่งผลให้เกิดการกระจายตัว (diversification) ของทัวร์มากขึ้น

อย่างไรก็ตามโมเดลนี้ก็มีข้อด้อยในด้านการใช้หน่วยความจำที่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขนาดของปัญหา TSP มีขนาดใหญ่ขึ้น (จำนวนโหนดมาก) มดแต่ละตัวจะต้องใช้พื้นที่หน่วยความจำมากขึ้น และเนื่องจากมดแต่ละตัวมีพื้นที่หน่วยความจำเป็นของตนเอง ดังนั้นถ้ามีจำนวนมดในระบบมากก็จะยิ่งใช้พื้นที่หน่วยความจำมากขึ้นตามไปด้วย ข้อด้อยอีกประการหนึ่งคือการที่มีค่าพารามิเตอร์  $A_f$  ที่ผู้ใช้จำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหาเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 โมเดล Opposite Pheromone per Node (OPN)

Malisia และ Tizhoosh [11] ได้นำเสนอส่วนขยายของอัลกอริทึมในตระกูลการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยอาณานิคมมด โดยมีพื้นฐานมาจากแนวความคิดเรื่องฝ้ายค้ำ (opposition) ที่พยายามทำสิ่งตรงข้ามกับเสียงส่วนใหญ่ เพื่อพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของการสำรวจพื้นที่ของคำตอบให้มากขึ้น

แนวความคิดเรื่องการเรียนรู้โดยฝ้ายค้ำ (opposition-based learning: OBL) เป็นแนวความคิดที่ได้ถูกนำเสนอและนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนขยายของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) มาแล้วหลายอัลกอริทึม แนวคิดหลักคือการพิจารณาถึงสิ่งที่ตรงข้ามกับค่าประมาณ การกระทำ หรือสถานะ ที่จะมียผลทำให้เพิ่มขอบเขตของการหาคำตอบและลดเวลาในการค้นหาลง

ในงานวิจัยของ Malisia และ Tizhoosh ได้นำเสนออัลกอริทึมที่เป็นส่วนขยายของระบบอาณานิคมมดที่แตกต่างกัน 5 อัลกอริทึม โดยทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดเรื่องฝ้ายค้ำ แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์ ซึ่งอัลกอริทึมที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือ OPN โดยอัลกอริทึมส่วนขยาย OPN จะทำการแก้ไขปรับปรุงในส่วนของการสร้างคำตอบของระบบอาณานิคมมด โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการตัดสินใจเดินของมด (เช่น ฟิโรโมน หรือ ค่าฮิวริสติก) ซึ่งในกรณีนี้คือฟิโรโมน โดยวิธี OPN ได้นำเสนอฟิโรโมนแบบใหม่เรียกว่า ฟิโรโมนฝ้ายค้ำ (opposite pheromone)

#### 3.1.2.1 กฎการเคลื่อนที่ของวิธี OPN

กฎการเคลื่อนที่ของวิธี OPN จะแตกต่างกับกฎการเคลื่อนที่ของระบบอาณานิคมมดมาตรฐาน คือทุก ๆ ครั้งที่มดจะต้องเลือกเมืองที่จะเดินถัดไปจะมีความน่าจะเป็นเท่ากับอัตราการค้ำ (opposition rate)  $\lambda_0$  ที่มดจะเลือกใช้ฟิโรโมนฝ้ายค้ำมาพิจารณาแทนที่จะใช้ฟิโรโมนปกติ ดังนี้

กำหนดให้  $\lambda$  เป็นตัวเลขที่ถูกสุ่มแบบกระจายตัวสม่ำเสมอในช่วง  $[0,1]$  ถ้า  $\lambda < \lambda_0$  แล้ว มดจะเลือกเดินโดยใช้กฎการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 3.2 มิเช่นนั้นแล้ว มดจะเลือกเดินโดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของระบบอาณานิคมมดปกติ (สมการที่ 2.10)

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in N_i^k} \{ \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta \}, & \text{if } q < q_0; \\ J, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\tau_{il}$  คือฟิโรโมนฝ้ายค้ำบนเส้นเชื่อม  $(i,l)$

$J$  คือตัวแปรที่ถูกสุ่มเลือกมาจากการแจกแจงความน่าจะเป็นจากสมการที่

3.3

สมการที่ 3.3 ดัดแปลงมาจากสมการที่ 2.6 โดยเปลี่ยนจากฟิโรโมนปกติเป็นฟิโรโมนฝ้ายค้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_{ij}^k = \frac{[\tilde{\tau}_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tilde{\tau}_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, \quad \text{if } j \in N_i^k, \quad (3.3)$$

โดยที่พีโรโมนฝ่ายค้าน  $\tilde{\tau}$  ถูกนิยามดังสมการต่อไปนี้

$$\tilde{\tau} = \tau_0 + \frac{1}{C^{bs}} - \tau \quad (3.4)$$

สาเหตุที่สมการของพีโรโมนฝ่ายค้านมีการคำนวณจากค่า  $\tau_0$  และค่า  $C^{bs}$  ก็เพื่อทำให้อยู่ในช่วงของขอบบนและขอบล่างของระดับพีโรโมนในระบบอาณานิคมมดปกติ (หัวข้อ 2.5.3.3)

จะเห็นว่านิยามของพีโรโมนฝ่ายค้านจะทำให้เกิดผลตรงกันข้ามกับพีโรโมนปกติ กล่าวคือ เส้นเชื่อมที่มีค่าพีโรโมนฝ่ายค้านมากจะมีแรงดึงดูดให้มดเลือกเดินผ่านน้อย หรือกล่าวได้ว่าค่าพีโรโมนฝ่ายค้านแสดงถึงความไม่นิยมในเส้นเชื่อนั้น ดังนั้นการที่มดในโมเดล OPN บางครั้งเลือกใช้พีโรโมนฝ่ายค้าน (ตามความน่าจะเป็น  $\lambda_0$ ) จะทำให้มดเลือกเดินในเส้นทางที่แตกต่างกับมดส่วนใหญ่หรือทางที่ไม่เคยถูกเลือกมาก่อน ส่งผลให้มีการกระจายตัวของการสำรวจมากขึ้นและครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบมากขึ้น

หมายเหตุ โมเดล OPN นี้เป็นการดัดแปลงเฉพาะส่วนของอัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด ในส่วนของสมการปรับปรุงสารพีโรโมนแบบโลคอลและแบบโกลบอลยังคงมีอยู่และไม่เปลี่ยนแปลงจากระบบอาณานิคมมดปกติ

### 3.1.2.2 ขั้นตอนการทำงานของโมเดล OPN

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม OPN สามารถสรุปได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1. กำหนดค่าเริ่มต้น ให้ค่าพีโรโมนทุกเส้นเชื่อมมีค่าเท่ากับ  $\tau_0$   
สำหรับมดแต่ละตัว ทำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6
- ขั้นตอนที่ 2. ถ้า  $\lambda < \lambda_0$  แล้ว ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 4
- ขั้นตอนที่ 3. คำนวณหาค่าพีโรโมนฝ่ายค้านจากสมการที่ 3.4  
เลือกเมืองที่จะเดินจากสมการที่ 3.2  
ข้ามไปขั้นตอนที่ 5
- ขั้นตอนที่ 4. เลือกเมืองถัดไปด้วยวิธีของระบบอาณานิคมมดปกติ (สมการที่ 2.10)
- ขั้นตอนที่ 5. ปรับปรุงสารพีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่มดเดินผ่าน ด้วยสมการปรับปรุงสารพีโรโมนแบบโลคอล (2.12)
- ขั้นตอนที่ 6. **ทำซ้ำ** ขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่ง มดทุกตัวสร้างทัวร์เสร็จ
- ขั้นตอนที่ 7. หาทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบจนถึงปัจจุบัน และปรับปรุงสารพีโรโมนบนทัวร์นั้น ด้วยสมการปรับปรุงสารพีโรโมนแบบโกลบอล (2.11)
- ขั้นตอนที่ 8. **ทำซ้ำ** ขั้นตอนที่ 2 ถึง 7 จนกระทั่ง บรรลุเงื่อนไขการหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 โมเดล Interacted Multiple Ant Colonies Optimization (IMACO)

Aljanaby และคณะ [12] ได้นำเสนอขอบข่าย (framework) ของการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยอาณานิคมมด (ACO) รูปแบบใหม่ ที่นำเอาแนวคิดของ Multiple Ant Colonies Optimization (MACO) มาต่อยอด โดยแนวคิดของ MACO คือการที่มีอาณานิคมมดหลายนิคมทำงานร่วมกันในการหาค่าตอบของปัญหาการค่าเหมาะที่สุด ทำให้มีการสำรวจพื้นที่การค้นหาที่กว้างขึ้นกว่าการใช้มดเพียงนิคมเดียว จึงเพิ่มโอกาสในการพบคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้น ดังนั้นแนวคิดของ MACO จึงถูกคาดหวังว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบของอัลกอริทึมในตระกูลการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยอาณานิคมมดได้

โมเดลของ Aljanaby และคณะมีชื่อย่อว่า IMACO ได้นำแนวคิด MACO มาเป็นพื้นฐาน และใช้เทคนิคการสื่อสารระหว่างกันของอาณานิคมมดที่คิดค้นขึ้นมาในการเพิ่มอัตราการสำรวจพื้นที่ของคำตอบให้มากขึ้น โดยการกำกับการค้นหาของมดแต่ละนิคมให้ค้นหาคำตอบในบริเวณย่อยที่แตกต่างกันจากบริเวณของคำตอบทั้งหมด

#### 3.1.3.1 โครงสร้างของ IMACO

โมเดล IMACO ประกอบด้วยกลุ่มของนิคมมดจำนวน  $M$  นิคม โดยพฤติกรรมของแต่ละนิคมจะใช้อัลกอริทึมระบบอาณานิคมมด (ACS) เป็นพื้นฐาน และแต่ละนิคมจะมีชุดฟีโรโมนเป็นของตัวเองเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกันภายในนิคม

#### 3.1.3.2 การสื่อสารระหว่างอาณานิคมมด

สำหรับการติดต่อสื่อสารกันระหว่างนิคม มดจะพิจารณาค่าฟีโรโมนจากนิคมอื่นร่วมด้วย โดยในกระบวนการสร้างคำตอบ จะใช้กฎการเคลื่อนที่ที่แตกต่างจากระบบอาณานิคมมดปกติ โดยเปลี่ยนจากสมการที่ 2.10 เป็นดังนี้

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in N_i^{kv}} \{f(\tau_{il}) \cdot [\eta_{il}]^\beta\}, & \text{if } q \leq q_0; \\ S, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $f(\tau_{il})$  คือ ฟังก์ชันประเมินค่า (evaluation function) ของฟีโรโมนบนเส้นเชื่อม  $N_i^{kv}$  คือ เซตของเมืองข้างเคียงที่มดตัวที่  $k$  ของนิคม  $v$  ยังไม่เคยเดินผ่าน  $S$  คือ ตัวแปรที่ถูกสุ่มเลือกจากการแจกแจงความน่าจะเป็นตามสมการที่ 3.6

$$S = \begin{cases} \frac{f(\tau_{ij}) \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} f(\tau_{il}) \cdot [\eta_{il}]^\beta}, & \text{if } j \in N_i^{kv}; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันประเมินค่าฟีโรโมนจะประเมินค่าฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมจากค่าฟีโรโมนภายในนิคมของมดเองกับค่าฟีโรโมนจากนิคมอื่น โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนประกอบ  $\lambda$  ตัวอย่างเช่น ถ้าค่า  $\lambda = 0.5$  มดจะให้น้ำหนักในการตัดสินใจ 50% จากความรู้ (ฟีโรโมน) ภายในนิคมของตนเอง และอีก 50% ที่เหลือจากความรู้ของนิคมอื่น โดยพิสัยของ  $\lambda$  อยู่ในช่วง  $[0, 1]$  และฟังก์ชันประเมินค่าฟีโรโมนถูกนิยามไว้ดังนี้

$$f(\tau_{ij}) = \lambda \tau_{ij}^s \times (1 - \lambda) \cdot \frac{\sum_{v=1}^M \tau_{ij}^v}{M} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\tau_{ij}^s$  คือ ค่าฟีโรโมนบนเส้นเชื่อม  $(i, j)$  ของนิคม  $s$

สำหรับการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลและแบบโกลบอลในโมเดลนี้จะยังใช้แบบปกติเหมือนกับในอัลกอริทึมอาณานิคมมด กล่าวคือเมื่อมดทุกตัวในทุกนิคมสร้างทิวร์ของมันเสร็จ ในแต่ละนิคมจะทำการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลจากทิวร์ที่ดีที่สุด在那个นิคมนั้น และในขณะที่มดกำลังเดินเพื่อสร้างทิวร์ก็จะทำการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลเหมือนกับในระบบอาณานิคมมดปกติ

## บทที่ 4

# อัลกอริทึมส่วนขยายของระบบอานานิคม

ในบทนี้จะนำเสนออัลกอริทึมส่วนขยายของระบบอานานิคมที่ปรับปรุงประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของอัลกอริทึมระบบอานานิคมดั้งเดิม และแก้ปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์

### 4.1 ปัญหาและสมมติฐานของงาน

#### 4.1.1 ปัญหาของอัลกอริทึมระบบอานานิคม

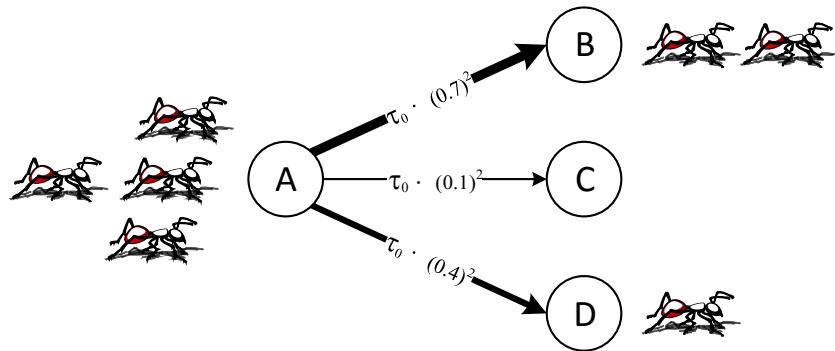
ระบบอานานิคมเป็นอัลกอริทึมที่ต่อยอดมาจากระบบมด ซึ่งในระบบมดนั้นมีจุดอ่อนหลักคือการทำมันมักจะเกิดปัญหาการติดอยู่ในจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (local minima) ระบบอานานิคมได้พัฒนาต่อยอดและลดทอนโอกาสในการเกิดปัญหานี้ ด้วยการนำเสนอกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบใหม่ซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลและการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล (สมการที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ) ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.5 โดยในกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล ทุก ๆ ครั้งที่มดเดินผ่านเส้นเชื่อมใด ๆ มันจะทำการลดปริมาณของสารฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมนั้นให้น้อยลง และเนื่องจากปริมาณสารฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมใด ๆ มีผลต่อโอกาสในการเลือกเดินผ่านเส้นเชื่อมนั้นของมดในระบบอานานิคม (สมการที่ 2.6 และ 2.10) ดังนั้นการลดปริมาณสารฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมลง ส่งผลป้องกันไม่ให้เส้นเชื่อมนั้นเป็นที่ดึงดูดมากเกินไปจนทำให้มดทุกตัวเดินผ่านแต่เฉพาะเส้นเชื่อมนั้น (stagnation) ทำให้เพิ่มโอกาสในการสำรวจพื้นที่ของคำตอบ (search space) มากขึ้น และช่วยลดโอกาสในการเกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีกระบวนการที่กล่าวไปข้างต้น แต่ระบบอานานิคมก็ยังมีจุดอ่อนอยู่บางประการ ดังนี้

##### 4.1.1.1 ปัญหาการให้ความสำคัญกับค่าฮิวริสติกในช่วงเริ่มต้น

ในตอนเริ่มต้นของระบบอานานิคม ค่าฟีโรโมนบนทุกเส้นเชื่อมจะถูกตั้งให้มีค่าเท่ากันทั้งหมด เป็นจำนวนเต็มบวกที่มีค่าน้อย ๆ เท่ากับ  $\tau_0$  (หัวข้อ 2.5.1.3) เนื่องจากค่าฟีโรโมนและค่าฮิวริสติกเป็นสองปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกเส้นทางเดินของมด (สมการที่ 2.6 และ 2.10) ดังนั้นในรอบการวนซ้ำช่วงแรก ๆ (early iterations) ซึ่งค่าฟีโรโมนมีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกเส้นเชื่อม ทำให้ค่าฮิวริสติกกลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเดินของมดมากที่สุด ส่งผลให้มดส่วนใหญ่มีแนวโน้มเลือกเดินแต่เส้นทางที่มีค่าฮิวริสติกที่ดี (greedy selection)

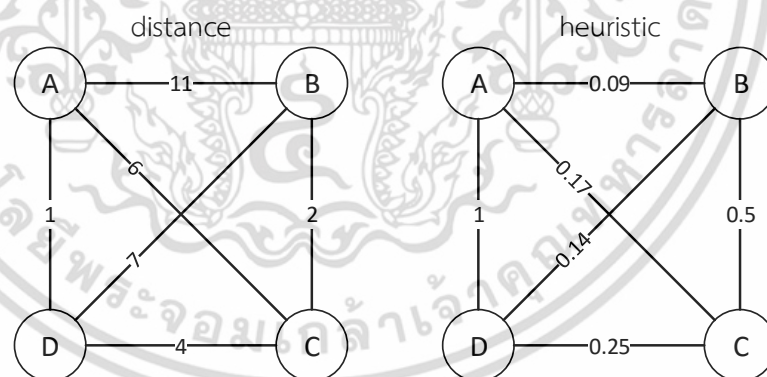
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการเดินของมดในระบบอาณานิคมมดในรอบการวนซ้ำช่วงเริ่มต้น

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการเดินของมดในระบบอาณานิคมมด โดยแสดงการเดินผ่านของมดจากเมือง A ไปยังเมือง B, C และ D สมมติให้ค่าฟีโรโมนของทุกเส้นเชื่อมมีค่าเท่ากันคือ  $\tau_0$  มดส่วนใหญ่ในระบบอาณานิคมมดมีแนวโน้มจะเลือกเดินผ่านเส้นเชื่อมที่มีค่าฮิวริสติกสูงที่สุด (สมการที่ 2.10) ในตัวอย่างนี้คือเส้นเชื่อม (A,B) รองลงมาคือเส้นเชื่อม (A,D) และ (A,C) ตามลำดับ ความหนาของเส้นเชื่อมแสดงถึงความน่าจะเป็นที่เส้นเชื่อมนั้นจะถูกมดเดินผ่าน โดยเส้นเชื่อมที่มีความหนามากหมายถึงมีความน่าจะเป็นมาก

ด้วยลักษณะการเลือกเดินแบบนี้ มดอาจจะสร้างทัวร์ที่ดีที่สุดเทียม (suboptimal solutions) ซึ่งเกิดจากการประกอบกันของเส้นเชื่อมมีค่าฮิวริสติกที่ดี โดยทัวร์ที่มีเส้นเชื่อมที่มีค่าฮิวริสติกที่ดีอยู่มากอาจไม่ใช่ทัวร์ที่ดีที่สุดที่แท้จริงของปัญหาก็ได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบสมมาตรที่มี 4 โหนด

รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างกราฟของปัญหา TSP แบบสมมาตรที่มีจำนวนเมือง 4 เมือง คือ A, B, C และ D ในรูปด้านซ้ายค่าตัวเลขที่กำกับอยู่บนแต่ละเส้นเชื่อมแสดงถึงระยะทางแบบยูคลิดระหว่างเมืองที่ถูกเชื่อมโดยเส้นเชื่อมนั้น สำหรับในรูปทางขวาตัวเลขที่กำกับอยู่บนแต่ละเส้นเชื่อมแสดงถึงค่าฮิวริสติก (ส่วนกลับของระยะทางแบบยูคลิด) ของเส้นเชื่อมนั้น โดยรูปทางซ้ายและขวาคือเป็นกราฟของปัญหาเดียวกันเพียงแต่มองคนละมุม (ระยะทางกับ

ค่าฮิวริสติก) จำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา TSP แบบสมมาตรนี้เท่ากับ  $\frac{(4-1)!}{2} = 3$  คำตอบดังนี้

คำตอบแบบที่ 1:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$  ระยะทางรวม = 19

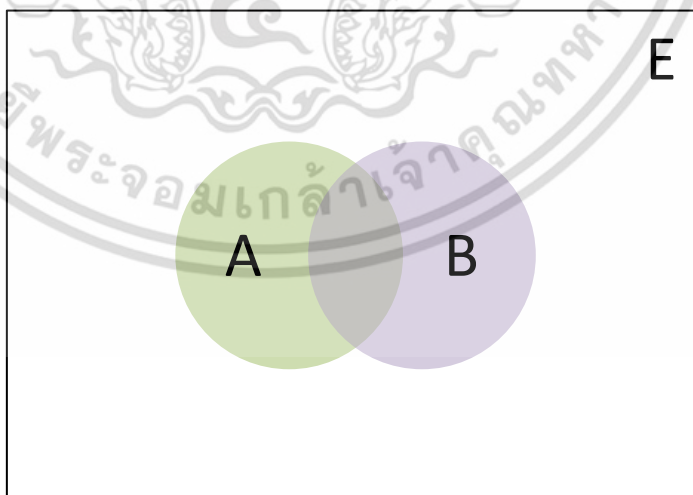
คำตอบแบบที่ 2:  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow A$  ระยะทางรวม = 16

คำตอบแบบที่ 3:  $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow A$  ระยะทางรวม = 28

ดังที่กล่าวไปข้างต้น มดในระบบอาณานิคมมดในช่วงรอบการวนซ้ำแรก ๆ จะประพฤติตัวเสมือนว่าพิจารณาเลือกเดินโดยให้ความสำคัญกับเส้นเชื่อมที่มีค่าฮิวริสติกดี ดังนั้นถ้ามดตัวใดเริ่มต้นที่เมือง A หรือเมือง B จะมีโอกาสสูงที่จะให้คำตอบออกมาเป็นคำตอบในแบบที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยเส้นเชื่อมที่มีค่าฮิวริสติกดีอยู่หลายเส้นแต่เมื่อรวมกันแล้วสุดท้ายไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดกรณีนี้คือคำตอบแบบที่ 2 ซึ่งในชุดข้อมูลของปัญหา TSP ที่มีขนาดใหญ่ (จำนวนเมืองมาก) ก็จะมีโอกาสเกิดกรณีเช่นนี้ได้มากขึ้น เพราะจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้ (search space) จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นทวีคูณตามจำนวนของเมืองที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการให้ความสำคัญกับค่าฮิวริสติกในการเดินช่วงเริ่มต้นของมดในระบบมด อาจทำให้เกิดทัวร์ที่ดีที่สุดเทียมได้

#### 4.1.1.2 ปัญหาการดึงดูดสู่ทัวร์ที่ดีที่สุดเทียม

ฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมของปัญหา TSP ในระบบอาณานิคมมดจะได้รับอิทธิพลจากสมการ 2 สมการคือ สมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลและสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล เราสามารถจัดกลุ่มเส้นเชื่อมตามอิทธิพลของการปรับปรุงสารฟีโรโมนที่เส้นเชื่อมนั้นได้รับ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 แผนภาพเวนนแสดงกลุ่มของเส้นเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากการปรับปรุงสารฟีโรโมน

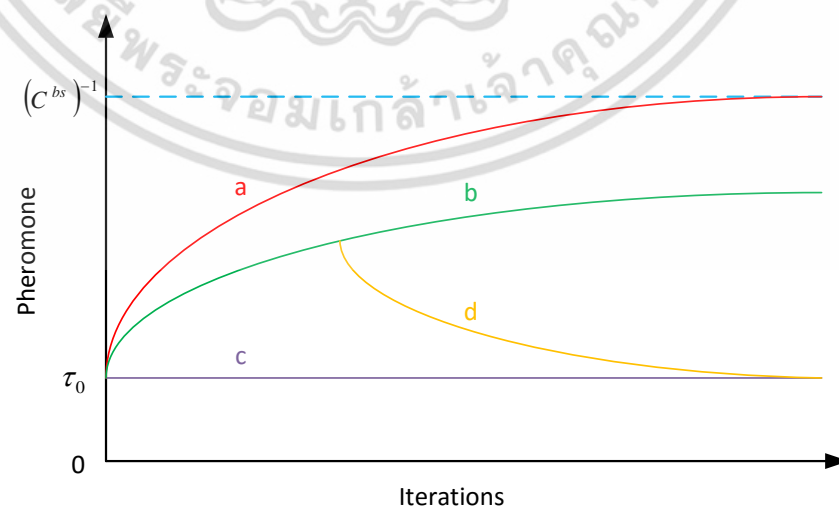
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพเวรน์ของการจัดกลุ่มเส้นเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนในระบบอานาคิมมด โดยกำหนดให้

- E คือ เอกภพสัมพัทธ์แทนเซตของเส้นเชื่อมทั้งหมดในชุดข้อมูลของปัญหา TSP ใด ๆ
- A คือ เซตของเส้นเชื่อมที่ถูกมดเดินผ่าน และถูกปรับปรุงด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอล
- B คือ เซตของเส้นเชื่อมที่อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบ (best-so-far tour) และถูกปรับปรุงด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล

จากแผนภาพเวรน์เราสามารถแบ่งกลุ่มของเส้นเชื่อม  $e \in E$  ได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

- 1) เส้นเชื่อม  $e \in A - B$   
คือเส้นเชื่อมที่ถูกปรับปรุงด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลเพียงอย่างเดียว
- 2) เส้นเชื่อม  $e \in B - A$   
คือเส้นเชื่อมที่ถูกปรับปรุงด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลเพียงอย่างเดียว
- 3) เส้นเชื่อม  $e \in A \cap B$   
คือเส้นเชื่อมที่ถูกปรับปรุงด้วยทั้งสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลและแบบโกลบอล
- 4) เส้นเชื่อม  $e \notin A \cup B$   
คือเส้นเชื่อมที่ไม่ถูกปรับปรุงด้วยสมการใดเลย



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงระดับฟีโรโมนของเส้นเชื่อมประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างของระดับฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมของกลุ่มต่าง ๆ เทียบกับเวลา (รอบการวนซ้ำ) โดยเส้น a แสดงถึงระดับฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดแต่ไม่ถูกมดเดินผ่าน จึงได้รับผลของสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลเพียงอย่างเดียว ทำให้ลู่เข้าสู่ค่า  $(C^{bs})^{-1}$ , เส้น b แสดงถึงระดับฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดและถูกมดเดินผ่าน จึงได้รับผลของสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนทั้งแบบโกลบอลและแบบโลคอล ทำให้ลู่เข้าสู่จุดสมดุลระหว่างค่า  $\tau_0$  และค่า  $(C^{bs})^{-1}$  (ขึ้นอยู่กับจำนวนมดที่เดินผ่าน), เส้น c แสดงถึงระดับฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่ไม่ได้อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดและไม่เคยถูกมดเดินผ่านเลย จึงไม่ได้รับผลของสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนใด ๆ ทำให้มีค่าเท่าเดิม ส่วนเส้น d แสดงถึงระดับฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่ไม่ได้อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดแต่ถูกมดเดินผ่าน จึงได้รับผลของสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโลคอลเพียงอย่างเดียว ทำให้ลู่เข้าสู่ค่า  $\tau_0$

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเฉพาะเส้นเชื่อมที่อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบเท่านั้นที่มีฟีโรโมนอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับเส้นเชื่อมอื่น ๆ ดังเช่นเส้น a และ b ส่วนเส้นเชื่อมอื่น ๆ ที่ไม่ได้อยู่ในทัวร์ที่ดีที่สุดและไม่ได้ถูกปรับปรุงด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอลจะมีค่าระดับฟีโรโมนคงที่หรือไม่ก็ลดลง ดังเช่นเส้น c และ d ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมทั้งสองกลุ่มอย่างมาก

ทัวร์ที่ดีที่สุดเทียบจากหัวข้อ 4.1.1.1 อาจกลายเป็นทัวร์ที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบ (best-so-far tour) ในรอบการวนซ้ำช่วงแรก ๆ ทำให้ปริมาณฟีโรโมนของเส้นเชื่อมในทัวร์นี้ถูกเพิ่มในรอบการวนซ้ำต่อ ๆ มาด้วยสมการปรับปรุงสารฟีโรโมนแบบโกลบอล (สมการ 2.11) ถ้าไม่มีมดตัวใดสามารถหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่เคยค้นพบในปัจจุบันได้ภายในรอบการวนซ้ำจำกัดช่วงหนึ่ง จะทำให้ปริมาณฟีโรโมนของทัวร์นั้นเพิ่มขึ้นมาก ประกอบกับวิธีการเลือกเส้นทางของมดในระบบอาณานิคมมดจะให้ความสำคัญกับผลลัพธ์ของข้อมูลที่เรียนรู้มาในรอบการวนซ้ำก่อนหน้า (สมการ 2.10) ซึ่งข้อมูลที่ได้เรียนรู้มานี้อยู่ในรูปของฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมนั่นเอง จนทัวร์นั้นมีแรงดึงดูดมากพอที่จะดึงดูดมดทุกตัวให้เดินบนเส้นทางเดียวกันหมด และทำให้มดไม่สามารถหลุดพ้นจากแรงดึงดูดของทัวร์นั้นเพื่อสำรวจเส้นทางหาทัวร์ที่ดีกว่าปัจจุบันได้

ดังนั้นจึงนำไปสู่สมมติฐานที่ว่า การที่ในช่วงแรกมดส่วนใหญ่เลือกเดินโดยสนใจแต่ค่าฮิวริสติกเพียงอย่างเดียว ถ้าค่าฮิวริสติกนั้นนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดเทียบ (suboptimal solutions) และไม่มีมดตัวใดสามารถหาคำตอบที่ดีกว่าได้ภายในเวลาที่จำกัด จะทำให้คำตอบที่ดีที่สุดเทียบนั้นมีอิทธิพลมากขึ้นอันเนื่องมาจากการถูกเพิ่มฟีโรโมน จนในท้ายที่สุดค่าฟีโรโมนนั้นส่งผลดึงดูดมดมากเกินไปจนไม่มีมดตัวใดสามารถหลุดออกจากเส้นทางที่ดีที่สุดเทียบนี้ได้ ทำให้ระบบอาณานิคมมดเกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ได้

#### 4.1.2 แนวความคิดการปรับปรุง

จากปัญหาที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.1.1 เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว เราจึงนำเสนอแนวความคิดที่จะแก้ไขปัญหาดังนี้

- 1) *เพิ่มกระบวนการสำรวจ* ในระหว่างที่มดกำลังสร้างทิวาร์ เพื่อขยายขอบเขตการค้นหา (search space) ให้มากขึ้น การที่ขอบเขตการค้นหากว้างขึ้นย่อมส่งผลให้มีโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (global optima) มากขึ้นด้วย หรืออย่างน้อยก็ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงมากขึ้น ทำให้คำตอบที่ได้มีคุณภาพมากขึ้น
- 2) *กระบวนการสำรวจเป็นแบบบังคับ* ให้มดต้องเดินไปบนเส้นทางย่อยที่แตกต่างกัน เหตุผลของการบังคับแบบนี้ก็เพื่อช่วยแก้ปัญหาในกรณีที่ระบบอาณานิคมมดติดกับดักจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ กระบวนการบังคับให้ไปสำรวจเส้นทางอื่นที่ไม่เคยสำรวจมาก่อน เสมือนการกระโดดออกจากหลุมกับดัก หรือเปรียบได้กับกระบวนการกลายพันธุ์ (mutation) ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)
- 3) *การจำกัดปริมาณของการสำรวจแบบบังคับ* เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสำรวจกระจายตัวมากเกินไป แม้ว่าการสำรวจที่มากขึ้นจะมีข้อดีในด้านการเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะขัดขวางการมุ่งเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุด กลับกลายเป็นส่งผลให้คำตอบที่ได้มีผลลัพธ์ที่ไม่ดี กล่าวคือจะทำให้ระบบลู่อู่เข้า (convergence) ช้าลง ยิ่งความเข้มข้นการสำรวจเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งใช้เวลาในการค้นพบคำตอบที่ดีมากขึ้น จึงต้องมีการจำกัดปริมาณเพื่อรักษาสมดุลระหว่างการสำรวจ (exploration) และการมุ่งเข้าสู่คำตอบ (exploitation) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีในเวลาที่เหมาะสม
- 4) *การไถ่ถอนการสำรวจแบบบังคับ* อย่างไรก็ตามการสำรวจโดยไร้ทิศทางย่อมยากที่จะบรรลุจุดหมายได้ โดยปกติแล้วมดในระบบอาณานิคมมดจะถูกชี้นำโดย 2 ปัจจัยคือ ปริมาณฟีโรโมนบนเส้นทางเชื่อม และค่าฮิวริสติกซึ่งคำนวณจากระยะทางจริงของเส้นทางเชื่อมนั้น แต่เนื่องจากกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนในระบบอาณานิคมมดเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถส่งผลให้เกิดปัญหาโลคอลออปติมาได้ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.1.1 ดังนั้นในระหว่างขั้นตอนการสำรวจแบบบังคับของเราจะตัดปัจจัยด้านฟีโรโมนออกไปจากการตัดสินใจเลือกทางเดินของมด เหลือเพียงเฉพาะค่าฮิวริสติกซึ่งคำนวณจากระยะทางจริงของเส้นทางเชื่อมเพื่อไม่ให้ฟีโรโมนมีอิทธิพลกับมดมากเกินไปในรอบการวนซ้ำช่วงท้าย อนึ่งการตัดปัจจัยด้านฟีโรโมนออกไปไม่ได้ทำตลอดทุกครั้งที่มีมติตัดสินใจเลือกทางเดิน จะกระทำเฉพาะเมื่ออยู่ในช่วงการสำรวจแบบบังคับเท่านั้น

## 4.2 โมเดลที่นำเสนอ (Proposed Model)

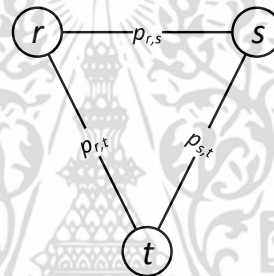
เรานำเสนออัลกอริทึมส่วนขยายของระบบอาณาณิคมมต โดยดัดแปลงกระบวนการเลือกเดินของมดในระบบอาณาณิคมมต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.2.1 ส่วนประกอบเพิ่มเติมสำหรับโมเดลที่นำเสนอ

โมเดลที่นำเสนอต้องการส่วนประกอบเพิ่มเติมจากนอกเหนือจากระบบอาณาณิคมมตแบบมาตรฐานก่อนที่จะทำการรัน โดยส่วนประกอบมีดังต่อไปนี้

#### 4.2.1.1 เครื่องหมายประจำเส้นเชื่อม

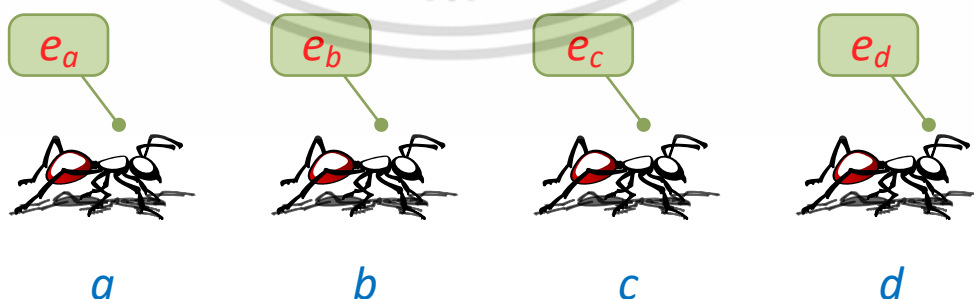
ทุก ๆ เส้นเชื่อม  $(j,k)$  จะมีเครื่องหมาย  $p_{j,k}$  เพื่อบอกสถานะว่าเส้นเชื่อมเส้นนั้นเคยถูกมดเดินผ่านหรือไม่ โดยค่าเริ่มต้นของ  $p_{j,k}$  คือ false รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างกราฟแบบสมมาตรที่มี 3 โหนด คือโหนด  $r, s$  และ  $t$  และมี 3 เส้นเชื่อม จะเห็นว่าแต่ละเส้นเชื่อมจะมีเครื่องหมายกำกับอยู่คือ  $p_{r,s}$ ,  $p_{s,t}$  และ  $p_{r,t}$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเครื่องหมายประจำเส้นเชื่อม

#### 4.2.1.2 หน่วยความจำก้าวการสำรวจ

มด  $a$  แต่ละตัวจะมีหน่วยความจำ  $e_a$  เอาไว้สำหรับจดจำจำนวนครั้งในการค้นหาแบบบังคับของตัวเอง ดังรูปที่ 4.6 โดยค่าเริ่มต้นของหน่วยความจำ  $e_a$  มีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 4.6 หน่วยความจำก้าวการสำรวจของมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.3 ลิมิตของก้าวการสำรวจ

คือพารามิเตอร์  $\sigma$  ซึ่งเป็นค่าคงที่แบบโกลบอล ไว้สำหรับกำหนดจำนวนครั้งสูงสุดที่มดจะเดินสำรวจแบบบังคับ ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์  $\sigma$  หาได้จากดำเนินการขั้นต้น (preliminary runs) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

#### 4.2.2 กฎการเคลื่อนที่ของมดแบบใหม่

กฎการเคลื่อนที่ของมดในโมเดลที่นำเสนอมีความแตกต่างกับในระบบอาณานิคมมาตรฐาน โดยมีกระบวนการเพิ่มเติมที่ถูกเพิ่มเข้ามาต่อหุ้มกระบวนการเดิมคือสมการที่ 2.10 เอาไว้อีกหนึ่งชั้น ดังสมการที่ 4.1

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in U_i^k} \{[\eta(r, u)]^\beta\} & , \text{if } e_k < \sigma \text{ and } U_i^k \neq \emptyset \\ \text{choose from ACS state} & , \text{otherwise} \\ \text{transition rule} & \end{cases} \quad (4.1)$$

โดยที่ เซต  $U_i^k = \{u \in N_i^k : p_{i,u} = \text{false}\}$

กระบวนการเพิ่มเติมที่ถูกเพิ่มเข้ามานี้ช่วยเพิ่มอัตราการสำรวจให้กับระบบอาณานิคมมด โดยถ้าค่าของหน่วยความจำก้าวการสำรวจน้อยกว่าลิมิตที่กำหนด และมีเส้นเชื่อมที่ยังไม่ถูกเดินผ่านโดยมดตัวใดเลย มดจะเลือกเส้นทางจากเส้นเชื่อมที่มีค่าอิวิริสติกสูงที่สุด นอกเหนือจากกรณีนี้มดจะเลือกเดินโดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของระบบอาณานิคมมดมาตรฐาน (สมการ 2.10)

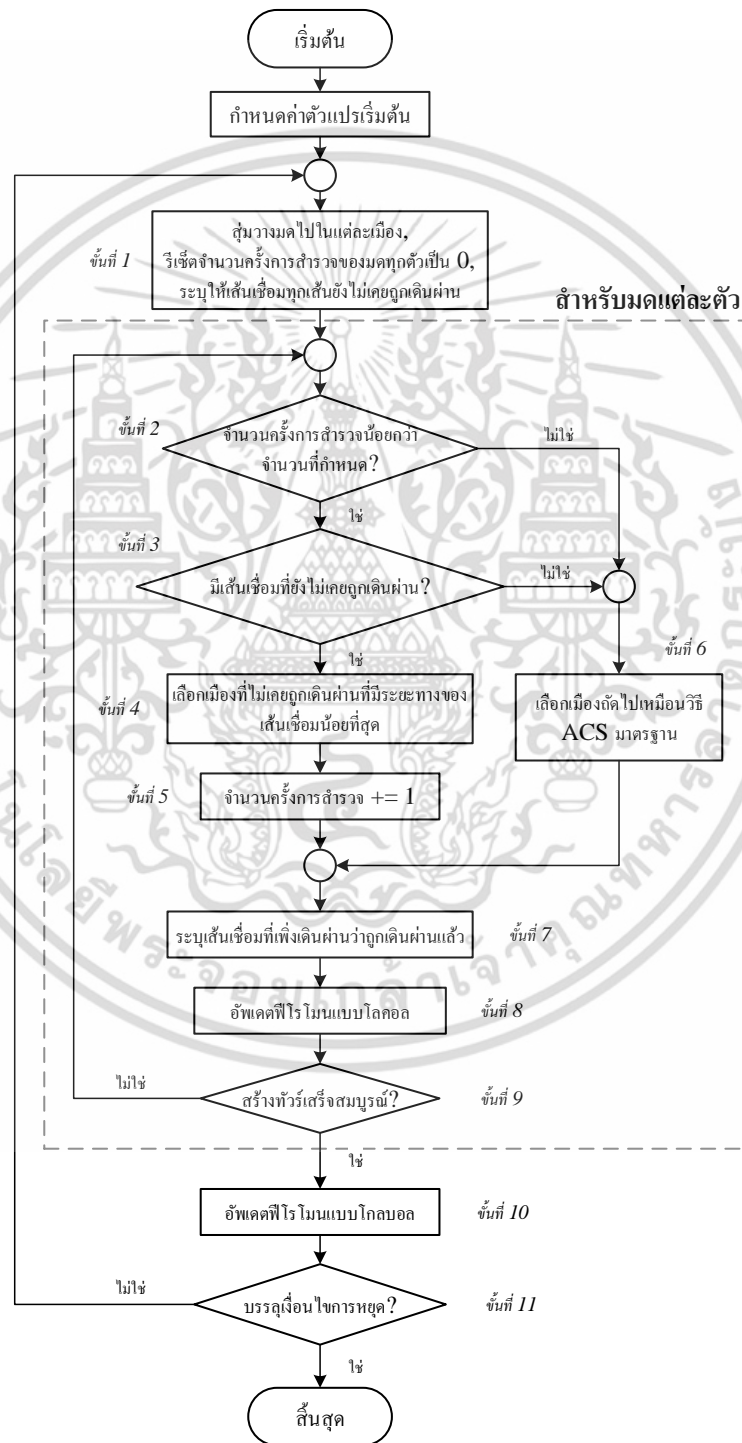
#### 4.2.3 ขั้นตอนการทำงานของโมเดลที่นำเสนอ

ขั้นตอนการทำงานของโมเดลที่นำเสนอสามารถอธิบายได้ด้วยอัลกอริทึมดังต่อไปนี้ พร้อมด้วยผังการทำงานในรูปที่ 4.7

- ขั้นตอนที่ 1. รีเซ็ตเครื่องหมายประจำเส้นเชื่อม ( $p$ ) ของทุกเส้นเชื่อมให้เป็นค่า false, รีเซ็ตหน่วยความจำก้าวการสำรวจ ( $e$ ) ของมดทุกตัวให้มีค่าเป็นศูนย์, สุ่มวางมดแต่ละตัวไปยังเมืองต่าง ๆ
- ขั้นตอนที่ 2. สำหรับมด  $a$  แต่ละตัวจากเซตของมดทั้งหมด ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 7
- ขั้นตอนที่ 3. ถ้า ค่าหน่วยความจำก้าวการสำรวจของมด  $a$  มากกว่าลิมิต  $\sigma$  แล้ว ข้ามไปขั้นตอนที่ 7
- ขั้นตอนที่ 4. ถ้า เซต  $U_i^a$  เท่ากับเซตว่าง แล้ว ข้ามไปขั้นตอนที่ 7
- ขั้นตอนที่ 5. มด  $a$  เลือกเมืองถัดไปจากเส้นเชื่อมที่มีระยะทางน้อยที่สุด
- ขั้นตอนที่ 6. เพิ่มค่าหน่วยความจำก้าวการสำรวจของมด  $a$  ขึ้นอีก 1
- ขั้นตอนที่ 7. มด  $a$  เลือกเมืองถัดไปโดยใช้กฎการเคลื่อนที่แบบปกติของระบบอาณานิคมมด
- ขั้นตอนที่ 8. ระบุให้เครื่องหมายประจำเส้นเชื่อมที่เพิ่งถูกมด  $a$  เดินผ่าน ให้เป็น true

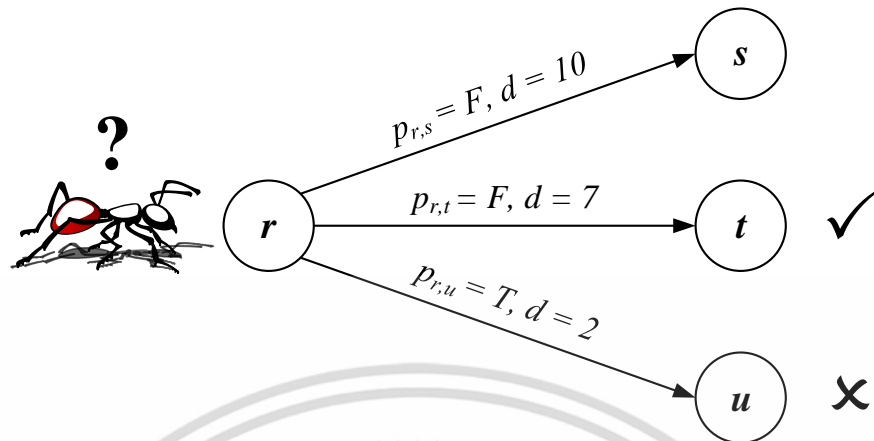
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ชนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนที่ 9. ปรับพีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่เพิ่งถูกเดินผ่านด้วยสมการปรับปรุงสารพีโรโมนแบบโลคอล
- ขั้นตอนที่ 10. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 9 จนกระทั่งมดทุกตัวสร้างทิวร์ของมันเสร็จ
- ขั้นตอนที่ 11. ปรับพีโรโมนบนเส้นเชื่อมที่อยู่ในทิวร์ที่ดีที่สุดด้วยสมการปรับปรุงสารพีโรโมนแบบโกลบอล
- ขั้นตอนที่ 12. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 11 จนกระทั่งบรรลุนโยบายการหยุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 4.7** ผังการทำงานของวิธีการที่นำเสนอ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.4 ตัวอย่างการเดินทางของมดในโมเดลที่นำเสนอ



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการเดินทางของมด

รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างการตัดสินใจเลือกเดินของมดในโมเดลที่นำเสนอในกรณีที่มีจำนวนก้าวการสำรวจของมดน้อยกว่าค่าลิมิต  $\sigma$  สมมติให้มดปัจจุบันอยู่ที่เมือง  $r$  และมีเมืองข้างเคียงที่สามารถเดินไปได้ 3 เมือง คือเมือง  $s$ ,  $t$  และ  $u$  ตามลำดับ เนื่องจากเส้นเชื่อม  $(r, u)$  ได้ถูกเดินผ่านโดยมดตัวอื่นในรอบการวนซ้ำปัจจุบัน จึงทำให้เครื่องหมายประจำเส้นเชื่อม  $p_{r,u}$  มีค่าเป็น true ดังนั้นเมือง  $u$  ถึงถูกตัดออกจากตัวเลือก มดจึงเลือกเมือง  $t$  ให้เป็นเมืองถัดไปที่จะเดินเพราะว่าระยะทางของเส้นเชื่อม  $(r, t)$  น้อยกว่าระยะทางของเส้นเชื่อม  $(r, s)$

## บทที่ 5

### การทดลองและการเปรียบเทียบผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม การทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณาจักรมาตรฐานและโมเดล OPN โดยเปรียบเทียบทั้งคุณภาพของคำตอบที่ได้และอัตราการพบคำตอบที่ดี รวมถึงการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่การค้นหา

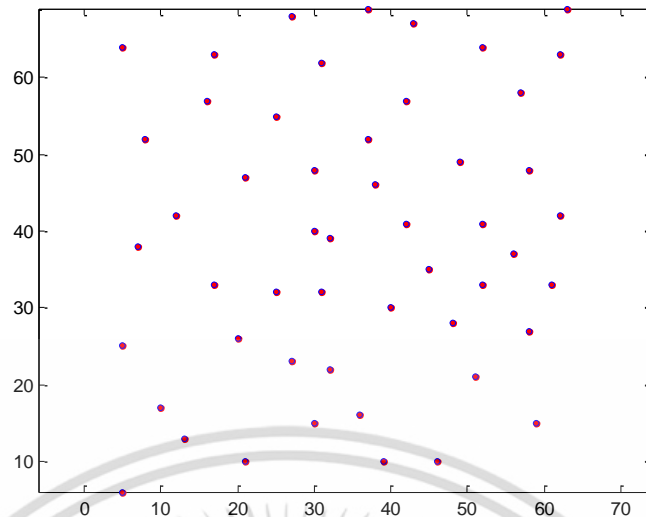
#### 5.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ จะใช้ชุดข้อมูลมาตรฐานของปัญหา TSP จากคลังเปรียบเทียบสมรรถนะ TSPLIB [13] ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเราได้เลือกชุดข้อมูลของปัญหา TSP แบบสมมาตร (Symmetric TSP) มาทั้งหมด 5 ชุดข้อมูล ที่มีขนาด (จำนวนโหนด) ต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดค่อนข้างใหญ่ เพื่อให้การทดสอบประสิทธิภาพครอบคลุมทุก ๆ ขนาดของปัญหา ได้แก่ชุดข้อมูล EIL51, Berlin52, Eil76, KroA100 และ D198 โดยรายละเอียดของแต่ละชุดข้อมูลแสดงในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1-5.5 แสดงภาพรายละเอียดตำแหน่งของโหนดของแต่ละชุดข้อมูล

ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดของชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

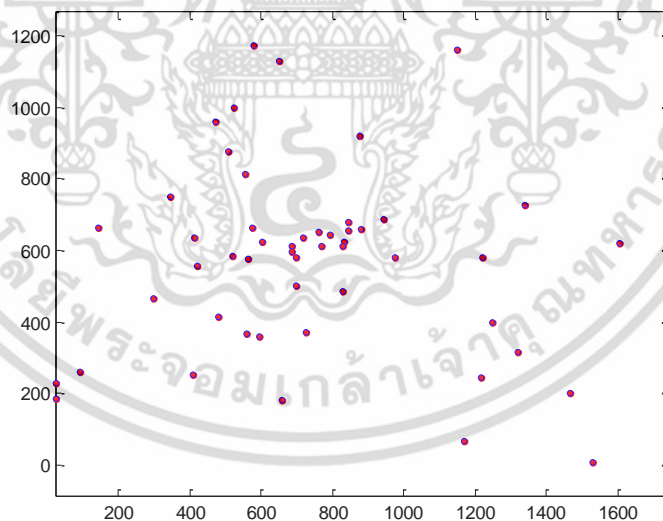
ชื่อชุดข้อมูล	จำนวนโหนด	ความยาวของทัวร์ที่ดีที่สุด (ในรูปของจำนวนจริง)
EIL51	51	428.87
Berlin52	52	7544.37
Eil76	76	544.37
KroA100	100	21285.44
D198	198	15808.65

หมายเหตุ ค่าความยาวของทัวร์ที่ดีที่สุดในตารางที่ 5.1 เป็นค่าความยาวที่ได้จากทัวร์ที่ดีที่สุดที่ถูกเผยแพร่และรับรู้เป็นวงกว้างอย่างเป็นทางการ จากเว็บไซต์ของ TSPLIB [13]



รูปที่ 5.1 ชุดข้อมูล EiL51

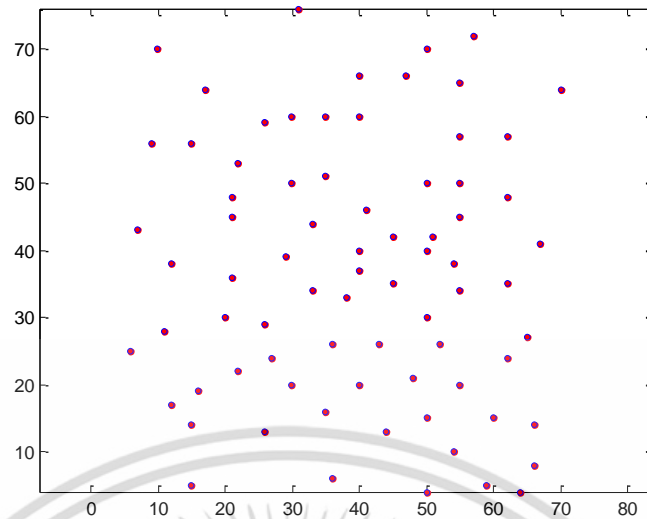
ชุดข้อมูล EiL51 จัดเป็นชุดข้อมูลขนาดเล็ก และเป็นชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยโหนดจำนวน 51 โหนด จัดวางในตำแหน่งที่มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.2 ชุดข้อมูล Berlin52

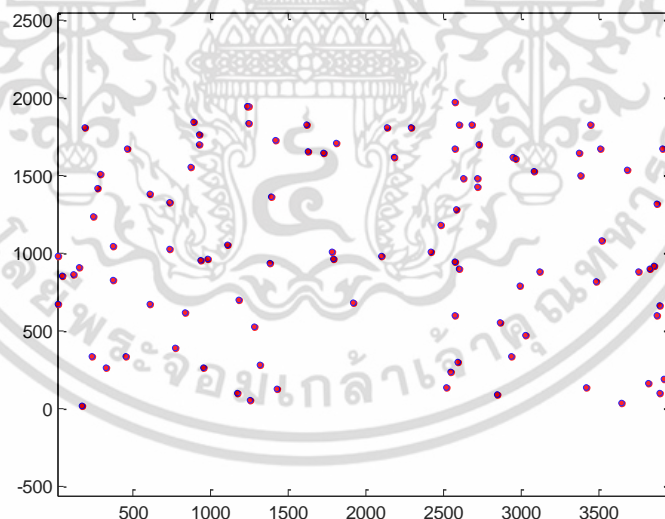
ชุดข้อมูล Berlin52 จัดเป็นชุดข้อมูลขนาดเล็กอีกชุดข้อมูลหนึ่ง ที่มีขนาดใกล้เคียงกับชุดข้อมูล EiL51 คือมีจำนวนโหนด 52 โหนด แต่มีความแตกต่างในการจัดวางตำแหน่งของโหนด นั่นคือชุดข้อมูล Berlin52 จะมีการกระจายตัวของโหนดอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยมีบางพื้นที่ที่โหนดกระจุกตัวหนาแน่นในขณะที่บางพื้นที่มีโหนดกระจายตัวอยู่อย่างเบาบาง ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ชุดข้อมูล Eil76

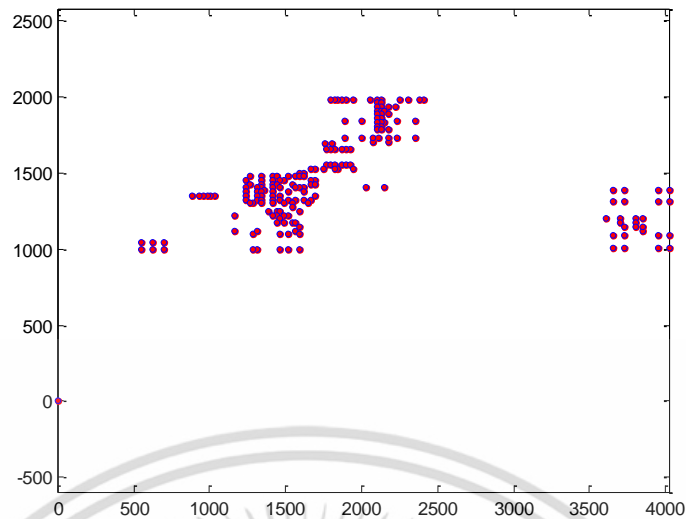
ชุดข้อมูล Eil76 จัดเป็นชุดข้อมูลขนาดเล็กก่อนไปทางขนาดกลางที่ถูกใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยโหนดจำนวน 76 โหนด ที่มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยจะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างแต่ละโหนดส่วนใหญ่มีระยะที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.4 ชุดข้อมูล KroA100

ชุดข้อมูล KroA100 จัดเป็นชุดข้อมูลขนาดกลางที่ใช้ในการทดลองนี้ ประกอบด้วยโหนดจำนวน 100 โหนด ที่มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยทวิร์ของชุดข้อมูลนี้จะมีความยาวที่ค่อนข้างมาก เนื่องจากตำแหน่งของโหนดกระจายตัวอยู่ในช่วง (range) ที่กว้าง ดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ชุดข้อมูล D198

ชุดข้อมูล D198 จัดเป็นชุดข้อมูลขนาดกลางค่อนข้างใหญ่ และเป็นชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่ถูกใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยโหนดจำนวน 198 โหนด มีลักษณะเด่นคือมีช่วง (range) ตำแหน่งของโหนดที่กว้าง มีการกระจายตัวของโหนดออกเป็นหลายกลุ่มแยกออกจากกัน โดยแต่ละกลุ่มจะมีความหนาแน่นและจำนวนของโหนดที่แตกต่างกันออกไป อีกทั้งแต่ละกลุ่มยังมีกลุ่มย่อยประกอบอยู่อีกด้วย รวมถึงมีกลุ่มที่แยกตัวออกห่างไกลจากกลุ่มอื่นมาก ดังบริเวณด้านขวามือของรูปที่ 5.5

## 5.2 การดำเนินงานเบื้องต้น (Preliminary Runs)

เนื่องจากโมเดลที่เรานำเสนอมีพารามิเตอร์เพิ่มเติมจากโมเดลระบบอาณานิคมแบบมาตรฐาน คือค่าลิมิตของก้าวการสำรวจ (exploratory steps limit)  $\sigma$  ซึ่งต้องการการกำหนดค่าก่อนการดำเนินงาน ดังนั้นเราจึงจัดทำการทำงานเบื้องต้นเพื่อที่จะประมาณค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์  $\sigma$  อย่างคร่าว ๆ กับทุกชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งการทำงานเบื้องต้นนี้โดยทั่วไปแล้วจะใช้จำนวนของรอบการวนซ้ำ (iterations) และรอบการทดลองซ้ำ (trials) น้อยกว่าการทำงานจริง (actual runs)

### 5.2.1 จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำ

ในการดำเนินงานเบื้องต้นนี้ โดยปกติแล้วเราจะใช้รอบการวนซ้ำและรอบการทดลองซ้ำประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของการดำเนินงานจริง ตารางที่ 5.2 แสดงจำนวนรอบการวนซ้ำและรอบการทดลองซ้ำของแต่ละชุดข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินงานเบื้องต้นนี้ โดยชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ เช่น KroA100 และ D198 จะต้องการจำนวนรอบในการวนซ้ำเพื่อหาค่า  $\sigma$  มากกว่าชุดข้อมูลขนาดเล็ก (Eil51, Berlin52 และ Eil76) เนื่องจากมีขนาดของพื้นที่การค้นหา (search space) ที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำในการดำเนินงานเบื้องต้น

ชุดข้อมูล	จำนวนรอบการวนซ้ำ	จำนวนรอบการทดลองซ้ำ
Eil51	500	25
Berlin52	500	25
Eil76	500	25
KroA100	1000	25
D198	1000	15

### 5.2.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากโมเดลที่เรานำเสนอรวมทั้งโมเดลที่เราจะนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ต่างก็มีพื้นฐานมาจากโมเดลระบบอานานิคมมด ดังนั้นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในส่วนของโมเดลระบบอานานิคมมด (ACS part) ที่อยู่ในทุกโมเดลจะถูกตั้งค่าเริ่มต้นให้เหมือนกันทั้งหมดสำหรับการดำเนินงานเบื้องต้น และทุกการทดลองต่อไปในบทนี้ โดยค่าพารามิเตอร์จะถูกตั้งให้สอดคล้องกับค่าในงานวิจัยต้นฉบับของระบบอานานิคมมดมาตรฐาน [8] ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่ใช้
$m$	จำนวนมด	10
$q_0$	อัตราการเลือกสำรวจจากผลลัพธ์ของข้อมูลที่เรียนรู้มา	0.9
$\rho$	พารามิเตอร์ของการปรับค่าฟีโรโมนแบบไกลบอล	0.1
$\zeta$	พารามิเตอร์ของการปรับค่าฟีโรโมนแบบโลคอล	0.1
$\beta$	ค่าน้ำหนักของฮิวริสติก	2
$\tau_0$	ค่าฟีโรโมนเริ่มต้น	$1/(n \cdot C^m)$

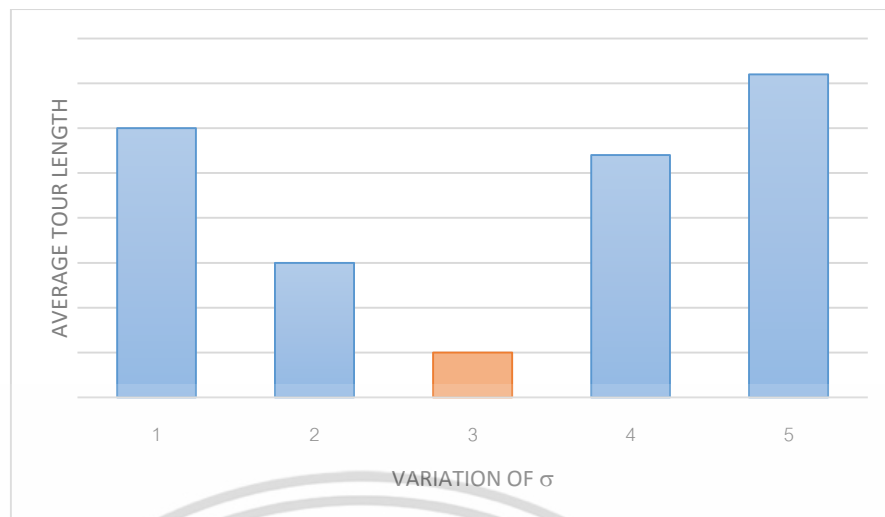
เมื่อ  $C^m$  คือ ความยาวของทัวร์ที่ได้จากอัลกอริทึมการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbor algorithm) และ  $n$  คือจำนวนเมือง (โหนด) ของชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

### 5.2.3 วิธีการดำเนินงานเบื้องต้น

ในการดำเนินงานเบื้องต้นเราจะดำเนินงาน (run) อัลกอริทึมที่นำเสนอกับแต่ละชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง โดยเริ่มต้นจากค่าลิมิตของก้าวการสำรวจ  $\sigma$  เท่ากับ 1 และค่อย ๆ เพิ่มค่า  $\sigma$  ทีละ 1 โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 5.3 และใช้จำนวนรอบการวนซ้ำและรอบการทดลองซ้ำตามตารางที่ 5.2 แล้วบันทึกค่าความยาวเฉลี่ยของทัวร์ที่ได้จากแต่ละค่าของ  $\sigma$  ถ้าไม่เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวเฉลี่ยของทัวร์ที่เพิ่มขึ้น (การพบทัวร์ที่สั้นลง) ในช่วงจำกัดของ  $\sigma$  ช่วงหนึ่ง (เช่น 1 ถึง 5) เราจะหยุดการดำเนินงานเบื้องต้นและนำค่า  $\sigma$  ที่ให้ความยาวเฉลี่ยของทัวร์ดีที่สุดในแต่ละชุดข้อมูลมาใช้ในการ

ดำเนินงานจริงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างของผลการดำเนินงานเบื้องต้น

สมมติให้การดำเนินงานเบื้องต้นกับชุดข้อมูลชุดหนึ่ง มีช่วงของค่า  $\sigma$  ที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 และค่าความยาวเฉลี่ยของทัวร์ที่ได้สำหรับแต่ละค่าของ  $\sigma$  มีค่าดังแสดงในแผนภูมิแท่งในรูปที่ 5.6 โดยแท่งที่สูงกว่าหมายถึงมีความยาวเฉลี่ยของทัวร์มากกว่า ในกรณีนี้เราจะเลือกค่า  $\sigma = 3$  เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับชุดข้อมูลนั้นเพราะทำให้ความยาวเฉลี่ยของทัวร์น้อยที่สุด และนำค่านี้ไปใช้กับการดำเนินงานจริงต่อไป

#### 5.2.4 ผลการดำเนินงานเบื้องต้น

ผลการดำเนินงานเบื้องต้นด้วยโมเดลที่นำเสนอกับชุดข้อมูลในหัวข้อ 5.1 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ลิ้มของก้าวการสำรวจ  $\sigma$  ได้ผลดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าความยาวเฉลี่ยของทัวร์ที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่า  $\sigma$  ในการดำเนินงานเบื้องต้น

$\sigma$	ชุดข้อมูล				
	Eil51	Eil76	Berlin52	KroA100	D198
1	434.98	559.90	7653.57	21680.41	16484.83
2	432.46	556.84	7693.45	21629.27	16364.61
3	431.10	556.88	7699.62	21607.75	16420.42
4	431.80	557.51	7702.03	21544.91	16495.41
5	433.46	558.83	7720.79	21704.88	16434.90

จากตารางที่ 5.4 เราจะได้ค่า  $\sigma = 3$  สำหรับชุดข้อมูล Eil51,  $\sigma = 2$  สำหรับชุดข้อมูล Eil76,  $\sigma = 1$  สำหรับชุดข้อมูล Berlin52,  $\sigma = 4$  สำหรับชุดข้อมูล KroA100 และ  $\sigma = 2$  สำหรับชุดข้อมูล D198 โดยค่า  $\sigma$  ที่ได้เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการดำเนินงานจริงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลอื่นในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับระบบอาณานิคมมาตรฐาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานแบบมาตรฐาน (conventional ACS) โดยเปรียบเทียบทั้งคุณภาพของคำตอบที่ได้ (tour length) และอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด (number of optimal solution founded)

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบอย่างยุติธรรม เราจึงเปรียบเทียบเฉพาะแกนของอัลกอริทึม ดังนั้นโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบและที่เป็นส่วนหนึ่งของโมเดลที่นำเสนอ จะถูกดำเนินการ (implement) โดยปราศจากขั้นตอนการค้นหาแบบโลคอล (local search) และโครงสร้างข้อมูล candidate list (candidate list เป็นโครงสร้างข้อมูลแบบเฉพาะสำหรับระบบอาณานิคมมาตรฐาน ที่ถูกคิดค้นมาเพื่อช่วยเพิ่มความเร็วในการหาคำตอบเมื่อต้องเจอกับชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่เป็นพิเศษ)

#### 5.3.1 วิธีการทดลอง

- 1) ดำเนินการ (implement) โมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานและโมเดลที่นำเสนอ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากตารางที่ 5.3
- 2) ค่าพารามิเตอร์  $\sigma$  ของโมเดลที่นำเสนอ จะใช้ค่าจากตารางที่ 5.4 สำหรับแต่ละชุดข้อมูล
- 3) นำแต่ละโมเดลไปดำเนินการ (run) กับ 5 ชุดข้อมูลจากตารางที่ 5.1 และใช้จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำสำหรับแต่ละชุดข้อมูลด้วยค่าจากตารางที่ 5.5
- 4) นำค่าความยาวของทัวร์ที่ดีที่สุดที่ได้จากแต่ละรอบการทดลองซ้ำ (trials) มาหาค่าเฉลี่ย (average), ค่ามัธยฐาน (median), ค่าน้อยสุด (min) และค่ามากที่สุด (max) รวมถึงนับจำนวนครั้งที่พบทัวร์ที่ดีที่สุด (optimal tour) โดยเปรียบเทียบความยาวของทัวร์กับค่าในตารางที่ 5.1 แล้วบันทึกผล
- 5) นำผลที่ได้จากข้อ 4 มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์สำหรับแต่ละชุดข้อมูล

ตารางที่ 5.5 จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำในการดำเนินการจริง

ชุดข้อมูล	จำนวนรอบการวนซ้ำ	จำนวนรอบการทดลองซ้ำ
Eil51	5000	100
Berlin52	5000	100
Eil76	5000	100
KroA100	5000	100
D198	5000	70

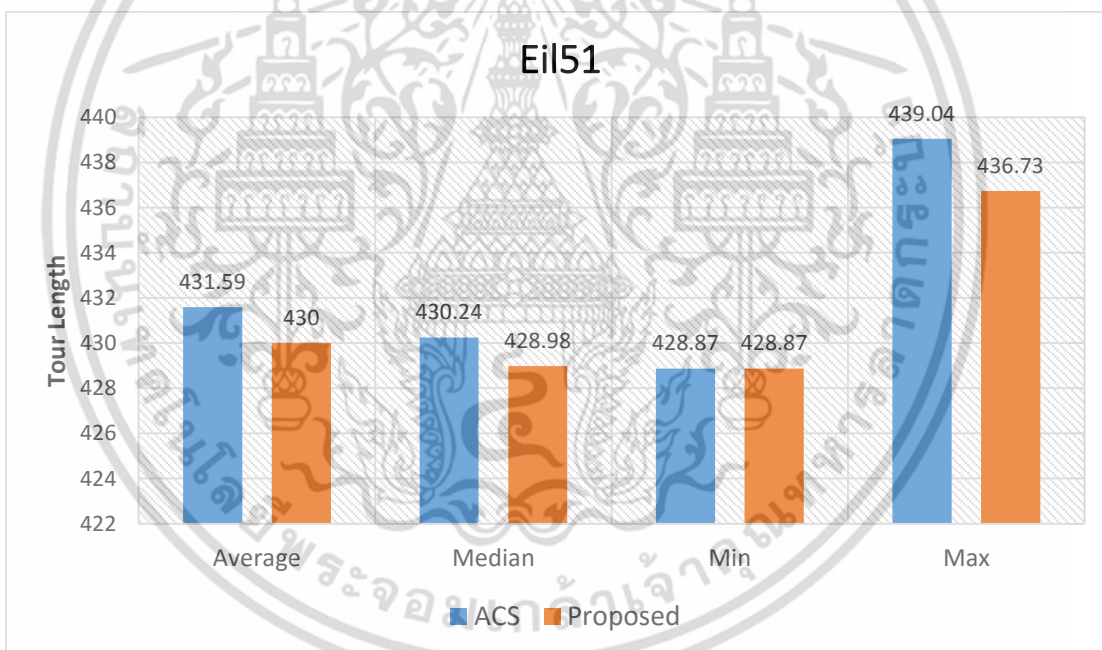
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบ

ผลการทดลองทางสถิติเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบที่ได้จากโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลอาณานิคมมาตรฐาน ด้วยค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน ค่าน้อยสุด และค่ามากที่สุด ให้ผลกับแต่ละชุดข้อมูลดังนี้

#### 5.3.2.1 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล Eil51

รูปที่ 5.7 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานบนชุดข้อมูล Eil51 จะพบว่าโมเดลที่นำเสนอมีคุณภาพของคำตอบมากกว่าโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐาน ดังจะเห็นได้จากค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของความยาวของทัวร์ที่ได้มีค่าน้อยกว่า โดยแท่งที่ต่ำกว่าหมายถึงดีกว่า อีกทั้งช่วง (range) ระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุด (max-min) ของความยาวของทัวร์ยังอยู่ในช่วงที่แคบกว่า ดังจะเห็นได้จากที่ทั้งสองโมเดลมีค่าน้อยสุดเท่ากัน แต่ค่ามากที่สุดของโมเดลที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่า ซึ่งหมายความว่ามีการเบี่ยงเบนคุณภาพของคำตอบน้อยกว่า



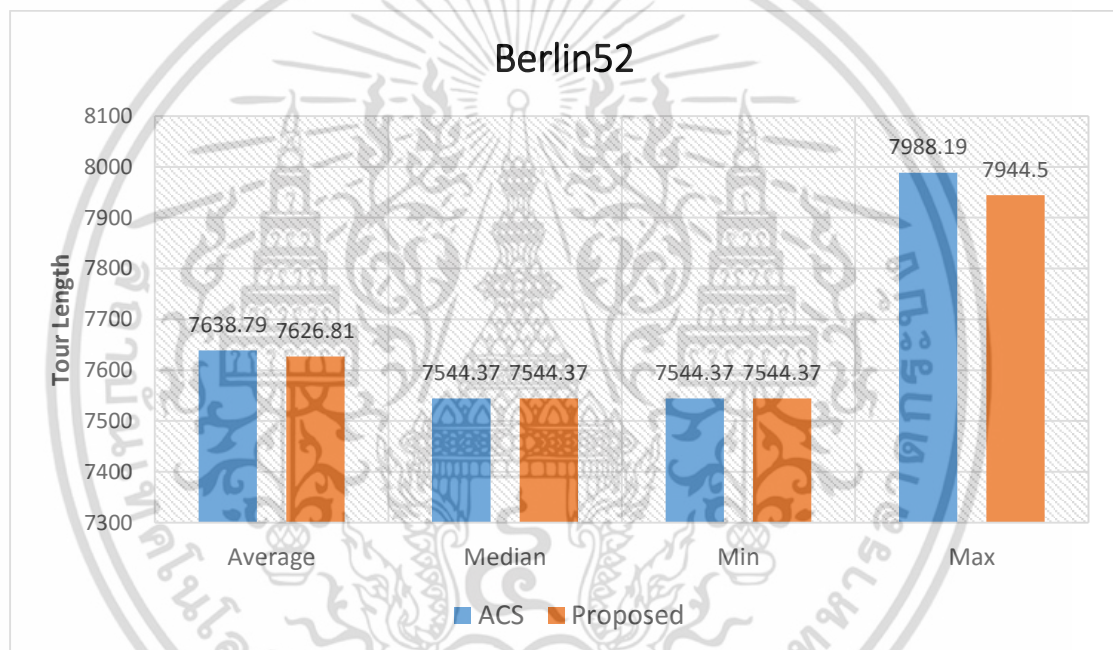
รูปที่ 5.7 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานบนชุดข้อมูล Eil51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2.2 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล Berlin52

ผลการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคมมดบนชุดข้อมูล Berlin52 แสดงเป็นแผนภูมิแท่งได้ดังรูปที่ 5.8 พบว่าโมเดลที่นำเสนอให้คุณภาพที่ดีกว่าโมเดลระบบอาณานิคมมดเล็กน้อย โดยจะเห็นได้จากค่าเฉลี่ยที่น้อยกว่า (ดีกว่า) เล็กน้อย และค่ามัธยฐานที่มีค่าเท่ากัน อีกทั้งยังมีช่วงของคำตอบที่แคบกว่าอันเนื่องมาจากที่มีค่ามากที่สุดของความยาวทัวร์น้อยกว่า หมายความว่าคำตอบส่วนใหญ่ของโมเดลที่นำเสนอมีคุณภาพดีกว่าโมเดลระบบอาณานิคมมด

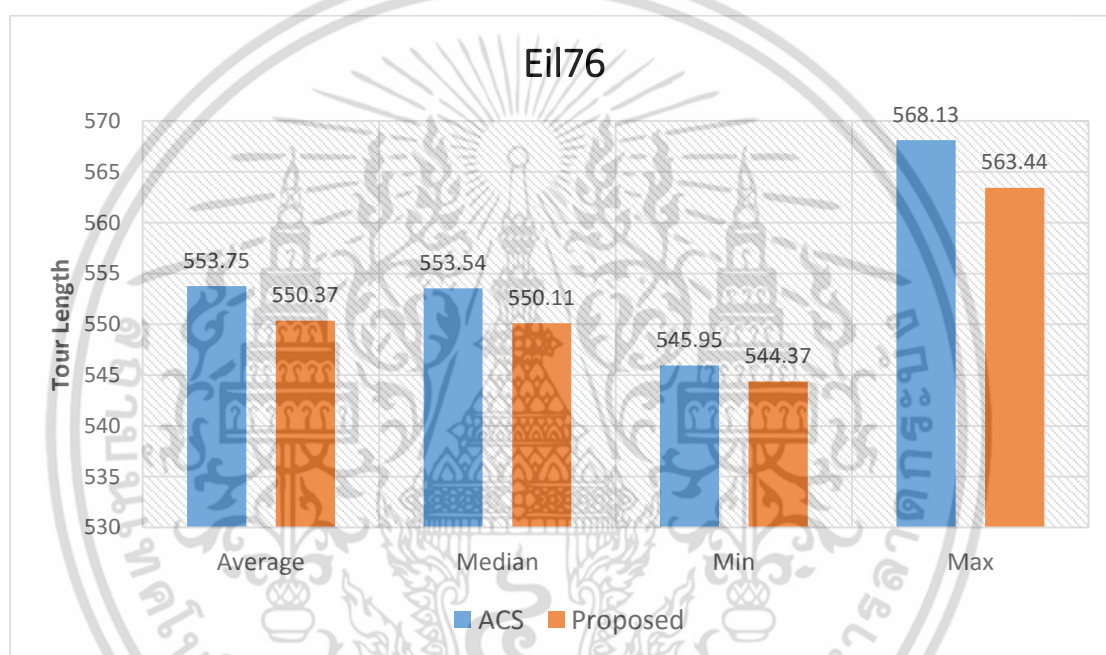
เนื่องจากชุดข้อมูล Berlin52 เป็นชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็ก จึงเป็นเรื่องง่ายที่ทั้งสองโมเดลจะสามารถพบคำตอบที่ดีที่สุด (optimal tour) ของปัญหานี้ได้ ดังจะเห็นได้จากค่ามัธยฐานและค่าน้อยสุดมีค่าเท่ากับกับคำตอบที่ดีที่สุดทั้งสองโมเดล



รูปที่ 5.8 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคมมดมาตรฐานบนชุดข้อมูล Berlin52

### 5.3.2.3 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล Eil76

ในชุดข้อมูล Eil76 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลขนาดกลาง เราพบว่าโมเดลที่นำเสนอมีคุณภาพของคำตอบที่ดีกว่าโมเดลระบบอานานิคมมตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยแสดงดังแผนภูมิแท่งในภาพที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าทั้งค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของโมเดลที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าโมเดลระบบอานานิคมมต อีกทั้งช่วงระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดของความยาวของทัวร์ยังอยู่ในช่วงที่มีค่าน้อยกว่า กล่าวคือ ค่ามากที่สุดของความยาวทัวร์ของโมเดลที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าค่ามากที่สุดของระบบอานานิคมมต และค่าน้อยสุดของความยาวทัวร์ของโมเดลที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าค่าน้อยสุดของระบบอานานิคมมต ทำให้สรุปได้ว่าคำตอบส่วนใหญ่ของโมเดลที่นำเสนอมีคุณภาพที่ดีกว่าโมเดลระบบอานานิคมมต



รูปที่ 5.9 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมตมาตรฐานบนชุดข้อมูล Eil76

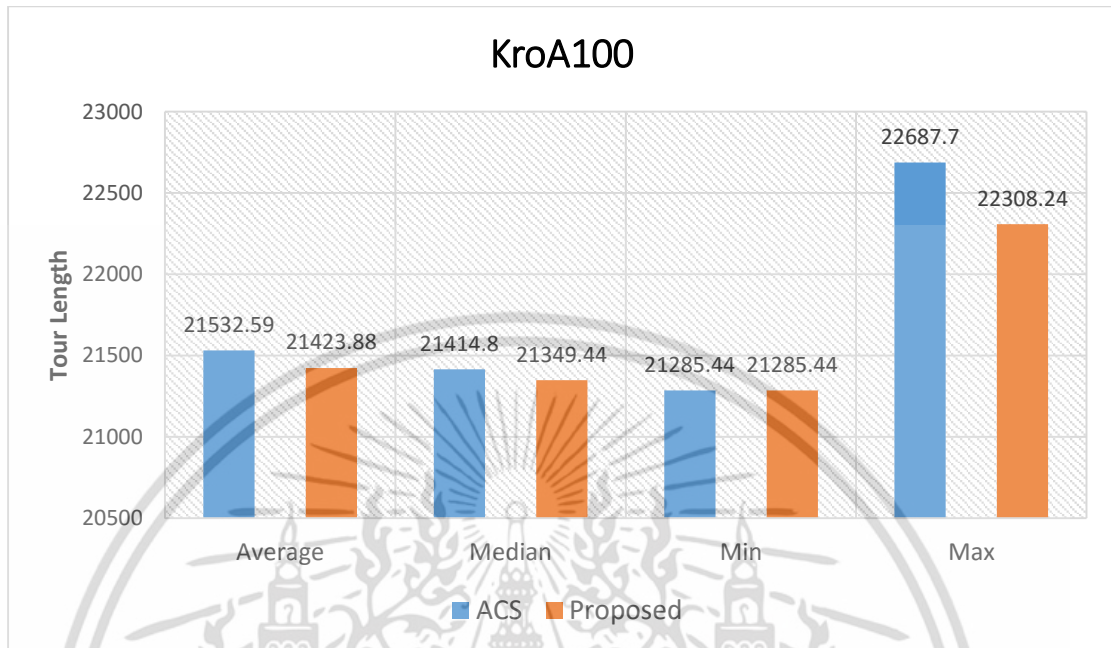
### 5.3.2.4 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล KroA100

ผลการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมตบนชุดข้อมูล KroA100 แสดงเป็นแผนภูมิแท่งได้ดังรูปที่ 5.10 พบว่าโมเดลที่นำเสนอให้คำตอบที่มีคุณภาพมากกว่าโมเดลระบบอานานิคมมต ถึงแม้ว่าทั้งสองโมเดลจะเจอคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาเหมือนกัน แต่โมเดลที่นำเสนอมีค่าบ่งชี้ทางสถิติที่ดีกว่าทั้งค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่ามากที่สุด ที่มีค่าที่ดีกว่าอย่างชัดเจน

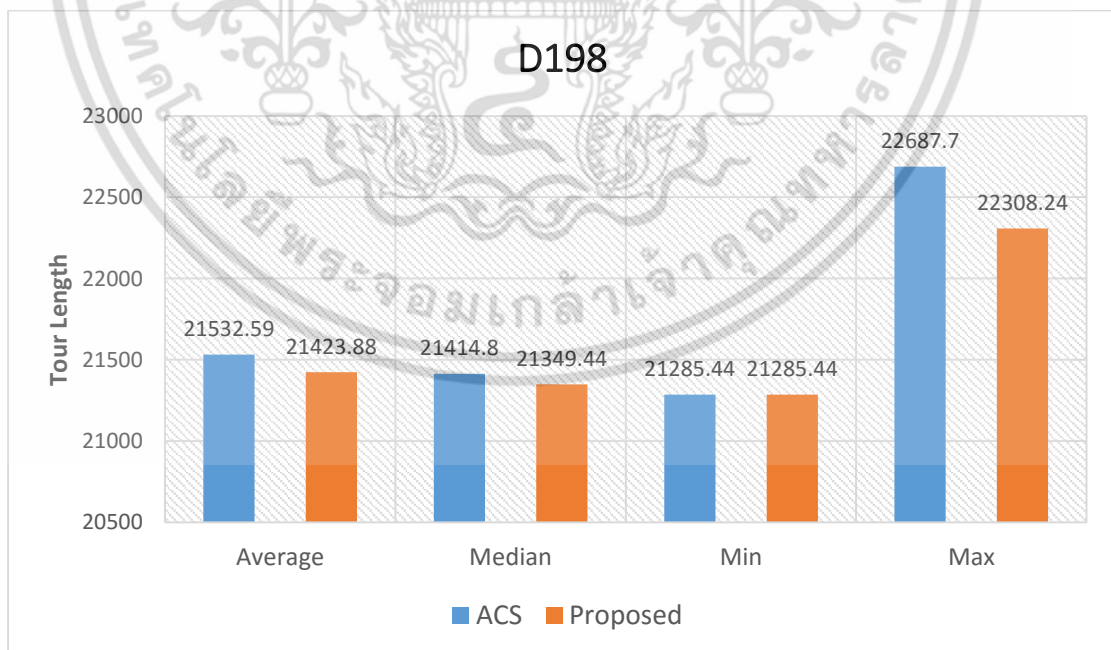
### 5.3.2.5 ผลการทดลองกับชุดข้อมูล D198

ผลการทดลองกับชุดข้อมูล D198 ให้ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการทดลองกับชุดเอกสารนี้ ข้อมูลก่อนหน้า รูปที่ 5.11 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมต พบว่าโมเดลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีกว่าอย่างเด่นชัด ทั้งค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่ามากที่สุด



รูปที่ 5.10 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมตมาตรฐานบนชุดข้อมูล KroA100



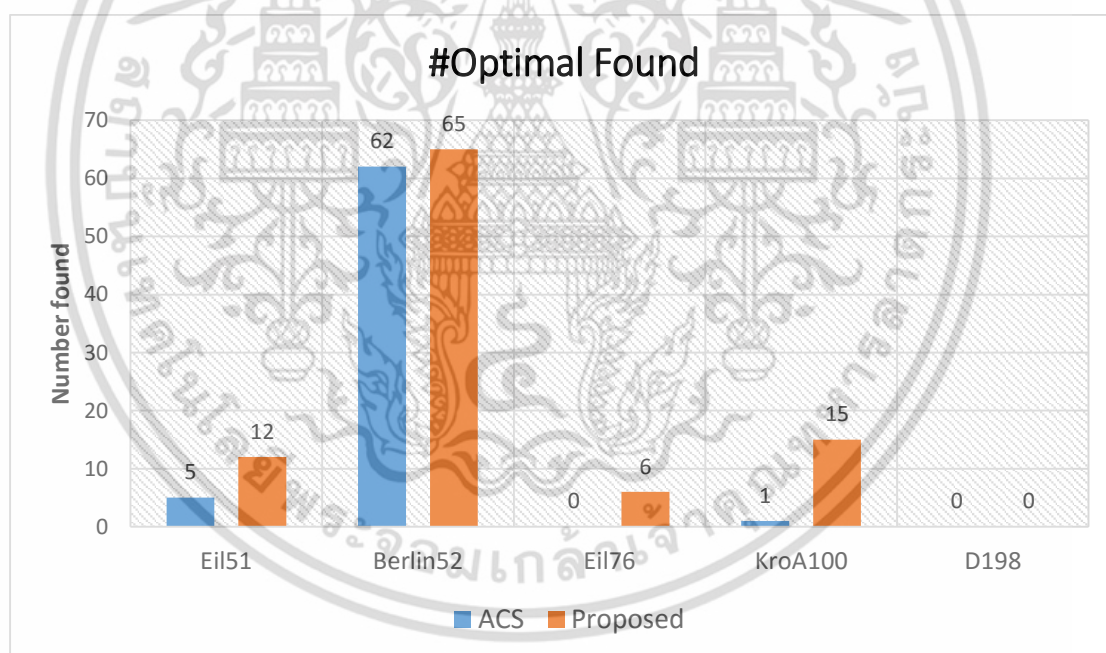
รูปที่ 5.11 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอานานิคมมตมาตรฐานบนชุดข้อมูล D198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด

ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐาน แสดงในรูปของแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 5.12 จะพบว่าโมเดลที่นำเสนอมีอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานในทุกชุดข้อมูล (แท่งสูงกว่าหมายถึงดีกว่า) ยกเว้นชุดข้อมูล D198 ซึ่งทั้งสองโมเดลไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดเลยในทุกรอบการทดลองซ้ำ อาจเนื่องมาจากเพราะเป็นชุดข้อมูลที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงทำให้พื้นที่การค้นหาที่กว้างมาก และทั้งสองโมเดลใช้จำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนมิติไม่มากพอ จึงทำให้ทั้งสองโมเดลไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดของชุดข้อมูลนี้เลย อย่างไรก็ตามในชุดข้อมูล Eil76 และ KroA100 ที่เป็นชุดข้อมูลขนาดกลาง พบว่าโมเดลที่นำเสนอมีจำนวนการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าวิธีระบบอาณานิคมมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ

**หมายเหตุ** จำนวนการพบคำตอบที่ดีที่สุดที่แสดงในแผนภูมิแท่งของรูปที่ 5.12 คำนวณมาจากในทุก ๆ รอบการทดลองซ้ำ (trials) นำความยาวของทัวร์ที่ได้ (ดีที่สุดในรอบการทดลองนั้น) จากแต่ละโมเดลมาเทียบกับความยาวของทัวร์ที่ดีที่สุดในการตารางที่ 5.1 ถ้ามีความยาวเท่ากันให้บวกจำนวนการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดของโมเดลนั้นเพิ่มครั้งละ 1



รูปที่ 5.12 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบจำนวนการพบคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างโมเดลที่นำเสนอ กับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐานบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

## 5.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดล OPN

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอ กับโมเดล Opposite Pheromone per Node (OPN) โดย Malisia และคณะ [11] โดยเปรียบเทียบ ทั้งคุณภาพของคำตอบที่ได้ และอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบที่ยุติธรรม ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของทั้งโมเดลที่นำเสนอและโมเดล OPN รวมถึงจำนวนรอบการวนซ้ำและจำนวนรอบการทดลองซ้ำ จะถูกตั้งค่าให้เหมือนกันด้วยค่าจาก ตารางที่ 5.3 และ 5.5 ตามลำดับ

เนื่องด้วยโมเดลที่นำมาเปรียบเทียบทั้งสองโมเดลต่างทำงานอยู่บนแพลตฟอร์มของเครื่องที่ แตกต่างกัน เราจึงใช้ค่าอัตราส่วนมัธยฐาน (median ratio) ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง สองโมเดล โดยค่าอัตราส่วนมัธยฐานซึ่งมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจาก ระบบอณานิคมมดใด ๆ เทียบกับอัลกอริทึมระบบอณานิคมมดมาตรฐาน ถูกนิยามดังสมการที่ 5.1

$$\text{MedianRatio}(x) = \frac{\text{Median}(\text{ACS}) - \text{Median}(x)}{\text{Median}(\text{ACS}) - \text{Optimal}} \times 100 \quad (5.1)$$

โดยที่ *Optimal* คือ ความยาวของทัวร์ที่ดีที่สุดของชุดข้อมูลใด ๆ (ดังตารางที่ 5.1)

สาเหตุที่ต้องใช้ค่าอัตราส่วนมัธยฐานในการเปรียบเทียบ เนื่องมาจากในเอกสารงานวิจัยของ Malisia [11] ใช้ค่ามัธยฐาน (median) ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมที่เขานำเสนอ กับ อัลกอริทึมระบบอณานิคมมดมาตรฐาน ดังนั้นเราจึงใช้การเปรียบเทียบแบบสัมพัทธ์โดยการวัด ค่ามัธยฐานของอัลกอริทึมที่จะนำมาเปรียบเทียบ ว่าดีขึ้นกี่เปอร์เซ็นต์ (เข้าใจค่าที่ดีที่สุดมากขึ้น) เมื่อ เทียบกับระบบอณานิคมมดมาตรฐาน

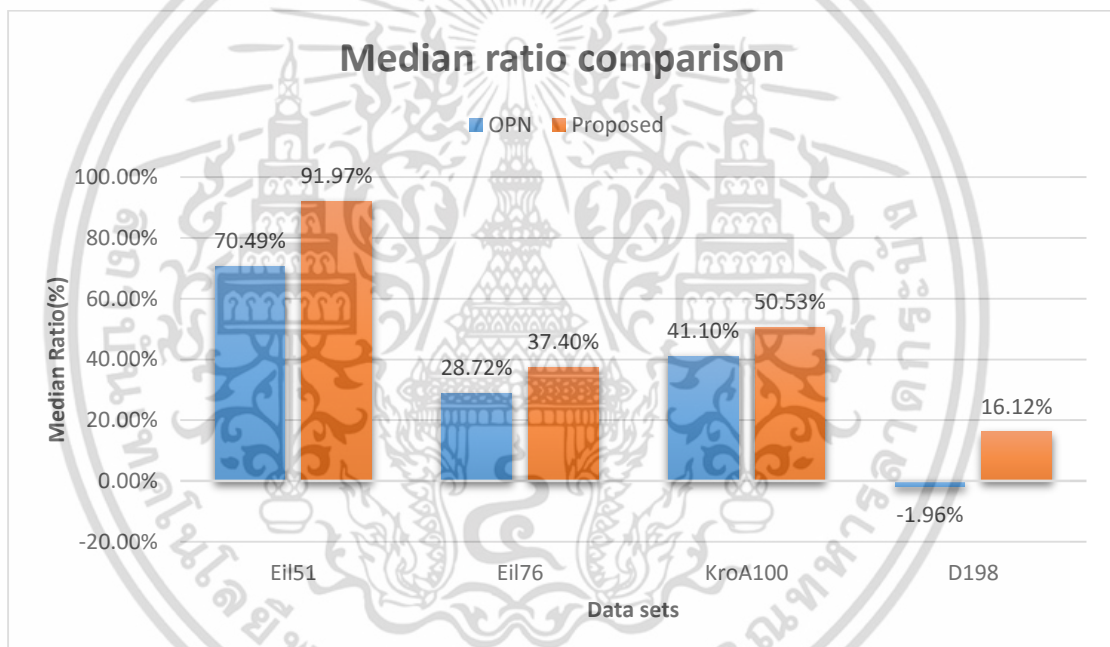
### 5.4.1 วิธีการทดลอง

- 1) นำค่ามัธยฐานของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอณานิคมมดมาตรฐาน จากผล ของการทดลองในหัวข้อที่ 5.3 มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนมัธยฐานด้วยสมการที่ 5.1
- 2) นำค่ามัธยฐานของโมเดล OPN และโมเดลระบบอณานิคมมดมาตรฐาน จากผลการ ทดลองในงานวิจัยของ Malisia และคณะ [11] มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนมัธยฐาน ด้วยสมการที่ 5.1
- 3) นับจำนวนการเพิ่มขึ้นของอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุดของโมเดลที่นำเสนอเทียบกับ โมเดลระบบอณานิคมมดมาตรฐาน จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.3
- 4) นับจำนวนการเพิ่มขึ้นของอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุดของโมเดล OPN เทียบกับ โมเดลระบบอณานิคมมดมาตรฐาน จากผลการทดลองในงานวิจัยของ Malisia [11]

- 5) นำค่าอัตราส่วนมัธยฐานที่ได้จากข้อ 1 และข้อ 2 และจำนวนการเพิ่มขึ้นของอัตรา การพบคำตอบที่ดีที่สุดจากข้อ 3 และข้อ 4 มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลสำหรับ แต่ละชุดข้อมูล

#### 5.4.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบ

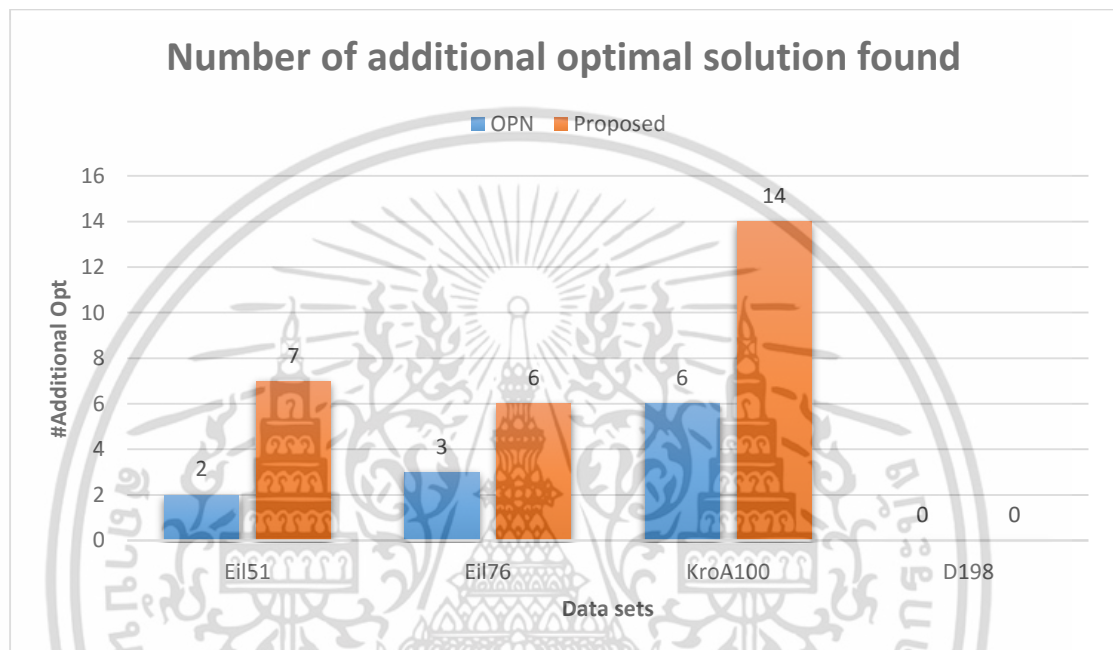
แผนภูมิแท่งในรูปที่ 5.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ามัธยฐานของแต่ละโมเดลเมื่อ เทียบกับโมเดลระบบอานานิคมมาตรฐาน โดยแท่งที่สูงกว่าหมายถึงดีกว่า (ค่ามัธยฐานเข้าใกล้จุด ต่ำสุดมากกว่า) จะเห็นได้ว่าโมเดลที่นำเสนอให้คำตอบที่มีคุณภาพ (โดยวัดจากค่ามัธยฐาน) ดีกว่า โมเดล OPN อย่างชัดเจนในทุกชุดข้อมูล สังเกตว่าค่าอัตราส่วนมัธยฐานของโมเดล OPN กับชุดข้อมูล D198 มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงค่ามัธยฐานของโมเดล OPN มีค่ามากกว่าค่ามัธยฐานของระบบ อานานิคมมาตรฐาน (หรืออยู่ห่างจากจุดต่ำสุดมากกว่า) จึงให้ผลที่แยกว่า



รูปที่ 5.13 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอ กับโมเดล OPN ด้วยค่าอัตราส่วนมัธยฐานบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

### 5.4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด

ในด้านของอัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุด พบว่าโมเดลที่นำเสนอมีปริมาณการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐาน เพิ่มขึ้นมากกว่าโมเดล OPN ในทุกชุดข้อมูล ยกเว้นในชุดข้อมูล D198 ที่ทั้งสองโมเดลให้ม้อัตราการพบคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับโมเดลระบบอาณานิคมมาตรฐาน คือไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดเลย ดังที่แสดงเป็นแผนภูมิแท่งในรูปที่ 5.14 โดยแท่งที่สูงกว่าหมายถึงดีกว่า



รูปที่ 5.14 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบจำนวนการเพิ่มขึ้นของการพบคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดล OPN บนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

### 5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพื้นที่การค้นหาของโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการค้นหาคำตอบระหว่างโมเดลที่นำเสนอกับโมเดลระบบอาณานิคม ว่าโมเดลใดสามารถสำรวจพื้นที่การค้นหได้กว้างกว่าภายในรอบการวนซ้ำที่เท่ากัน ทั้งนี้การที่วิธีใดสามารถสำรวจพื้นที่การค้นหได้กว้างกว่า ย่อมทำให้มีโอกาสมากกว่าในการพบคำตอบที่ดีที่สุด

เราจะใช้วิธีการนับจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำกัน (distinct solution) ในจำนวนรอบการวนซ้ำครั้งที่ใด ๆ เพื่อวัดขนาดของพื้นที่การค้นหา โดยโมเดลใดที่มีจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำกันมากกว่า แสดงว่าโมเดลนั้นสามารถสำรวจพื้นที่การค้นหได้กว้างกว่า

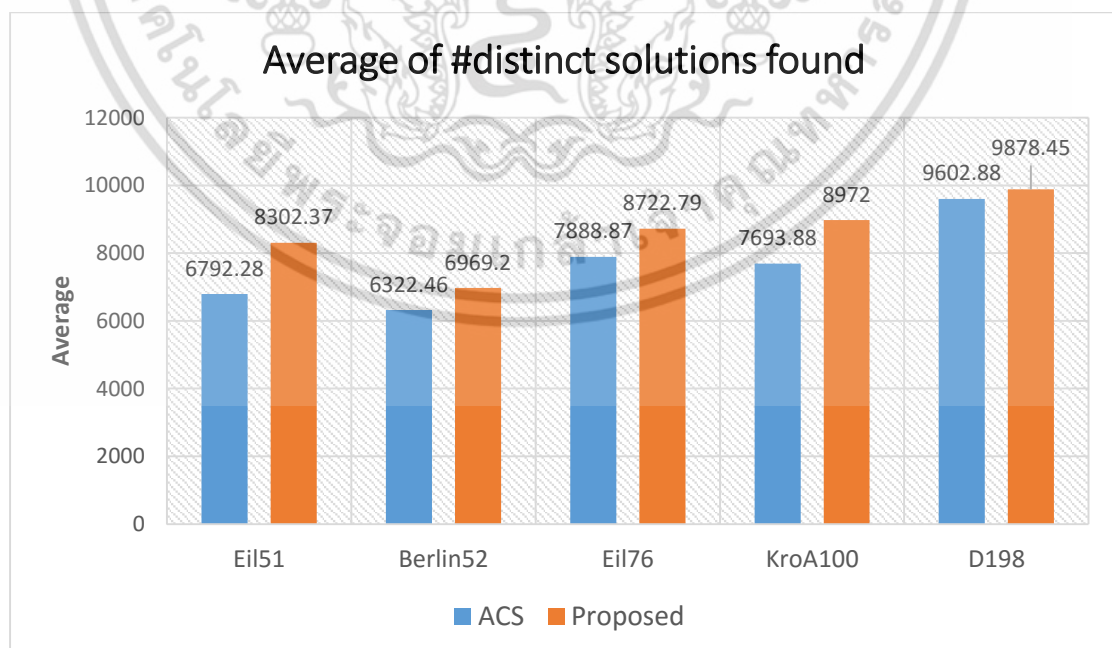
### 5.5.1 วิธีการทดลอง

- 1) ดำเนินการ (implement) โมเดลระบบอาณานิคมมดและโมเดลที่นำเสนอ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากตารางที่ 5.3
- 2) นำแต่ละโมเดลไปดำเนินงาน (run) กับ 5 ชุดข้อมูลจากตารางที่ 5.1 และใช้จำนวนรอบการวนซ้ำ 1000 รอบ และจำนวนรอบการทดลองซ้ำ 100 รอบ สำหรับทุกชุดข้อมูล
- 3) ในทุก ๆ รอบการวนซ้ำให้ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้ซ้ำกับคำตอบที่เคยได้ในรอบการวนซ้ำก่อนหน้าหรือไม่ ถ้าไม่ ให้บวกจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำของโมเดลนั้นเพิ่มขึ้น 1
- 4) นำจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำ (distinct solutions) ที่ได้จากแต่ละรอบการทดลองซ้ำ (trials) ของแต่ละโมเดล มาหาค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน ค่าน้อยสุด และค่ามากที่สุด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

### 5.5.2 ผลการทดลอง

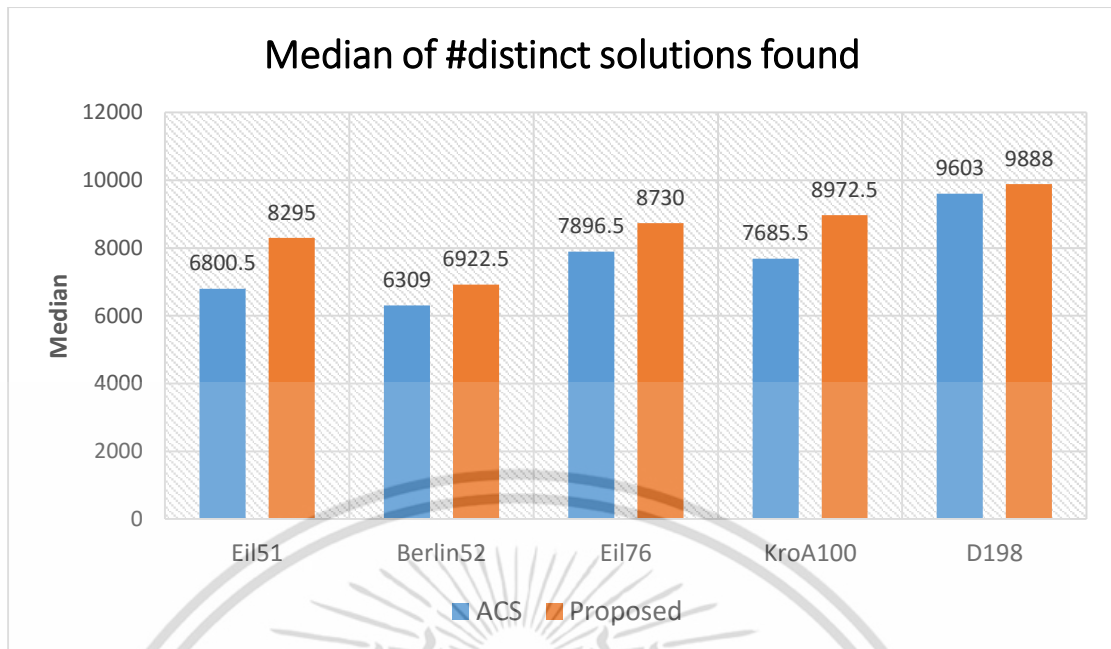
ผลการทดลองกับชุดข้อมูล 5 ชุดจากตารางที่ 5.1 พบว่าโมเดลที่นำเสนอสามารถสำรวจพื้นที่การค้นหาได้กว้างกว่าโมเดลระบบอาณานิคมมดภายในรอบการวนซ้ำที่เท่ากัน โดยดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน ค่าน้อยสุด และค่ามากที่สุดในทุกชุดข้อมูล ดังรูปที่ 5.15 ถึง 5.18 ตามลำดับ จึงเป็นข้อสนับสนุนที่ว่าโมเดลที่นำเสนอให้คุณภาพของคำตอบที่ดีกว่า เพราะมีการสำรวจพื้นที่ของคำตอบที่กว้างกว่าทำให้มีโอกาสพบคำตอบที่ดีมากกว่า

หมายเหตุ เนื่องจากเราใช้มด 10 ตัว และใช้รอบการวนซ้ำ 1000 รอบ ดังนั้นจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่แต่ละโมเดลสามารถเจอได้สูงสุดใน 1 รอบการทดลองซ้ำ คือ  $10 \times 1,000 = 10,000$  คำตอบ

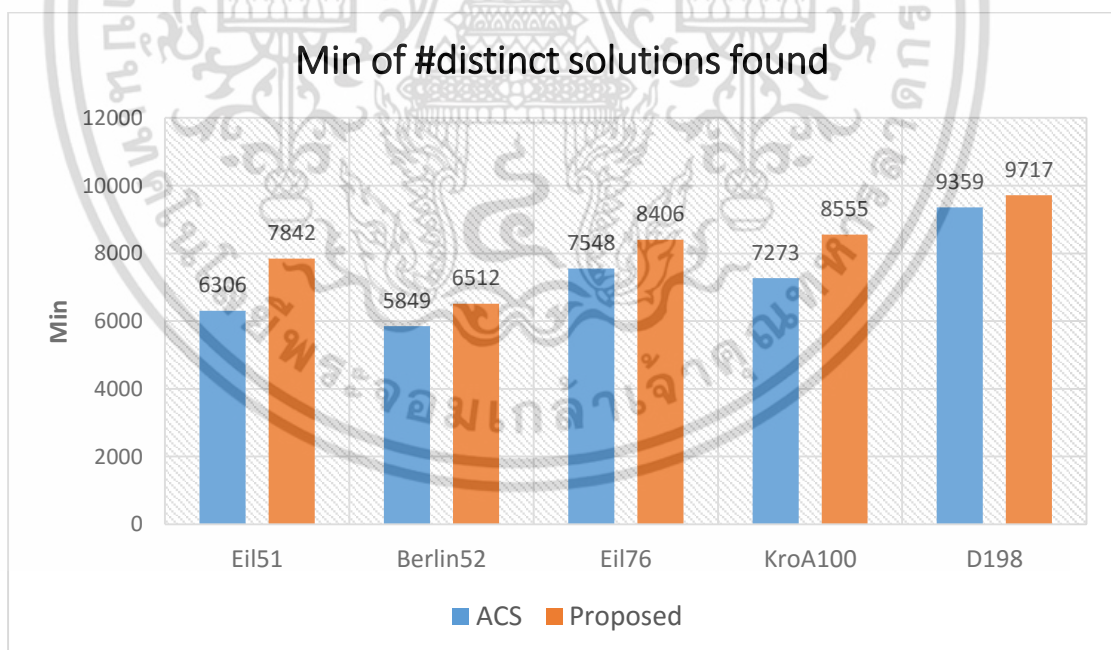


รูปที่ 5.15 ค่าเฉลี่ยของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับโมเดลระบบอาณานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลองไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

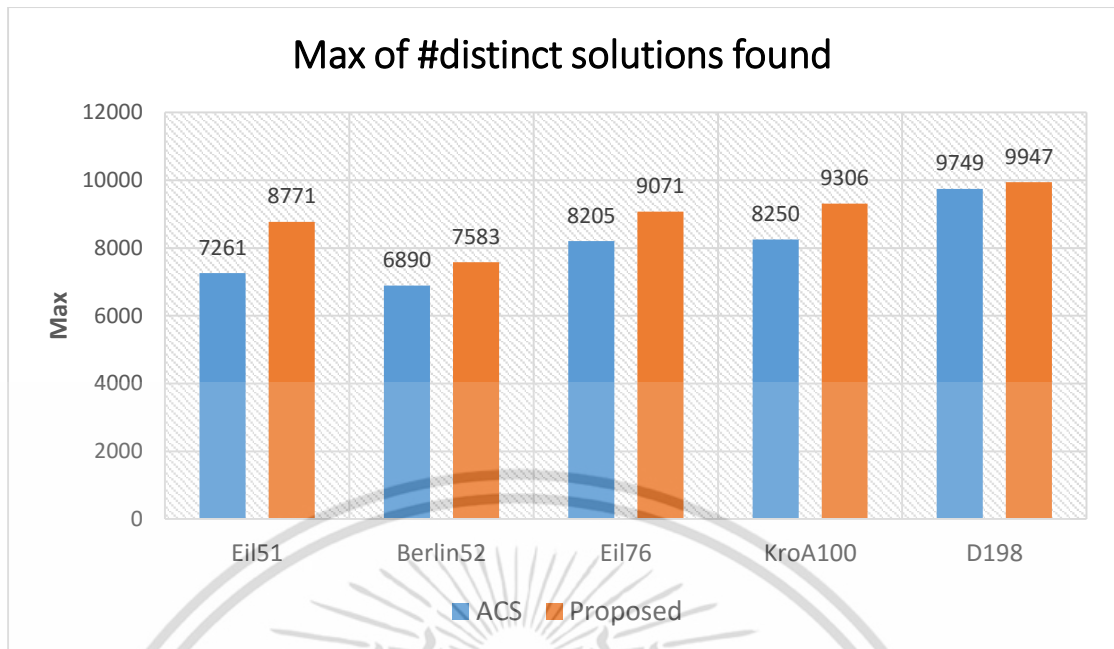


รูปที่ 5.16 ค่ามัธยฐานของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอานานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 5.17 ค่าน้อยสุดของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอานานิคมมดบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ค่ามากที่สุดของจำนวนคำตอบที่ไม่ซ้ำที่ค้นพบของโมเดลที่นำเสนอและโมเดลระบบอำนวยการตัดสินใจบนชุดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

อัลกอริทึมระบบอาณาณิคมมต (ACS) เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของมดที่อยู่ตามธรรมชาติ และประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยมันได้เลียนแบบกระบวนการสื่อสารกันผ่านทางสารฟีโรโมนของมดจริงตามธรรมชาติในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด อย่างไรก็ตามจากข้อด้อยของอัลกอริทึมระบบอาณาณิคมมตเกี่ยวกับการเกิดปัญหาจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (local minima) ได้ง่าย และการประสพภาวะหยุดนิ่งในการค้นหาคำตอบ (stagnation) งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการในการปรับปรุงอัลกอริทึมระบบอาณาณิคมมตให้มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีขึ้น จากสมมติฐานที่ว่าวิธีการเลือกเดินเพื่อสร้างคำตอบ (selection rule) ของมดในระบบอาณาณิคมมตสามารถทำให้เกิดคำตอบที่เป็นจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ได้อีกทั้งกระบวนการปรับปรุงสารฟีโรโมนในระบบอาณาณิคมมต ในบางครั้งยังเป็นต้นตอของการที่มดไม่สามารถหลุดออกมาจากจุดต่ำสุดสัมพัทธ์นั้นได้

เราจึงทำการดัดแปลงขั้นตอนการสร้างคำตอบของมด (tour construction) ด้วยการเพิ่มกระบวนการค้นหาแบบบังคับเข้าไปในช่วงต้นของแต่ละรอบการวนซ้ำ เพื่อเสริมการสำรวจ (exploration) หาคำตอบในบริเวณพื้นที่การค้นหาที่ไม่เคยสำรวจมาก่อน ส่งผลทำให้เกิดความหลากหลาย (diversification) ของคำตอบมากขึ้น ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาของระบบอาณาณิคมมตดังกล่าวมาข้างต้นได้ เพราะการสำรวจพื้นที่เป็นบริเวณกว้างขึ้นย่อมทำให้มีโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด (global minima) เพิ่มมากขึ้น และการบังคับการสำรวจทำให้สามารถหลุดออกจากภาวะหยุดนิ่งในการค้นหาคำตอบ (stagnation) ได้ โดยขั้นตอนที่นำเสนอจะบรรลุได้โดยอาศัย 3 โครงสร้างข้อมูลพิเศษที่เพิ่มเข้ามา ได้แก่ หน่วยความจำการสำรวจสำหรับมดแต่ละตัว, ตัวแปรสำหรับจำกัดความเข้มข้นในการสำรวจ และเครื่องหมายประจำเส้นเชื่อมสำหรับเก็บสถานะของการถูกเดินผ่านโดยมด

วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโมเดลที่นำเสนอที่เหนือกว่าอัลกอริทึมระบบอาณาณิคมมตมาตรฐาน (ACS) และอัลกอริทึม OPN ซึ่งผลการทดลองกับชุดข้อมูล 5 ชุดที่มีขนาดและคุณลักษณะที่ต่างจากคลั่งเปรียบเทียบสมรรถนะมาตรฐาน (TSPLIB) แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่า ทั้งด้านคุณภาพของคำตอบที่ได้ อัตราการค้นพบคำตอบที่ดี และการสำรวจครอบคลุมพื้นที่การค้นหาที่กว้างกว่า กับทุกชุดข้อมูลที่ทำการทดสอบ ยกเว้นชุดข้อมูล D198 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงมีพื้นที่การค้นหา (search space) ที่กว้างมากพบว่าไม่มีโมเดลใดที่พบคำตอบที่ดีที่สุด (global minima) เลย ถึงแม้ว่าโมเดลที่นำเสนอจะพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบที่ดีที่สุดเคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าอีก 2 โมเดลก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้จำนวนมดที่น้อยเกินไป และใช้จำนวนรอบในการวนซ้ำ (iteration) ไม่มากพอ ซึ่งจะต้องศึกษาต่อไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จุดด้อยที่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้คือ การสร้างกระบวนการที่สามารถหาค่าที่เหมาะสมของค่าลิมิตของก้าวการสำรวจ  $\sigma$  ได้อย่างอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้การดำเนินงานเบื้องต้นในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชุดข้อมูล วิธีการหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้คือ การตั้งให้ค่าลิมิตของก้าวการสำรวจ  $\sigma$  เป็นตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ระหว่างการดำเนินงาน (run) โดยเริ่มต้นที่ค่าน้อย ๆ (เช่น 1) และมีตัวชี้วัด (indicator) ที่คำนวณว่าปัจจุบันคำตอบที่ได้จากมดส่วนใหญ่มีความเหมือนกันมากหรือไม่ ถ้ามีความเหมือนกันมากให้ค่อย ๆ เพิ่มค่า  $\sigma$  จนกระทั่งมดมีการกระจายตัวของการค้นหาอย่างเหมาะสม

ข้อด้อยอีกประการของวิธีการที่นำเสนอคือ ยังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้อย่างมีนัยสำคัญ ในปัญหา TSP ที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนในการกระจายตัวของโหนดอย่างยิ่งวด ดังเช่นชุดข้อมูล D198 ซึ่งมีกลุ่มของโหนดที่อยู่ห่างออกไปหลายกลุ่มและกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยแต่ละกลุ่มยังสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยภายในได้อีก ซึ่งต้องศึกษาปรับปรุงต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Dorigo and T. Stützle. **Ant Colony Optimization**. Cambridge : MIT Press. 2004.
- [2] G. Chartrand, L. Lesniak and P. Zhang. **Graph & Digraphs**. 4<sup>th</sup> Edition. Chapman and Hall/CRC. 2004.
- [3] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvátal and W. J. Cook. **The Traveling Salesman Problem: A Computational Study**. 2<sup>nd</sup> Edition. Princeton University Press. 2007.
- [4] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stützle, “Ant colony optimization: Artificial ants as a computational intelligence technique,” **IEEE Computational Intelligence Magazine**, USA, Vol. 1, No.4, pp.28-39, 2006.
- [5] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, “The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents,” **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Vol. 26, No.1, pp. 29-41, 1996.
- [6] M. Dorigo. “**Optimization, Learning and Natural Algorithms.**” Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy. 1992.
- [7] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Coloni. “**Positive feedback as a search strategy.**” Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, Tech. Report n. 91-016. 1991.
- [8] M. Dorigo and L. M. Gambardella, “Ant colony system: A cooperative learning approach to the travelling salesman problem,” **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Vol. 1, No.1, pp.53–66, 1997.
- [9] M. Dorigo and L.M. Gambardella, “Ant colonies for the travelling salesman problem,” **BioSystems**, vol. 43, no. 2, pp. 73–81, 1997.
- [10] C. Beer, T. Hendtlass, and J. Montgomery, “Improving exploration in ant colony optimization with antennation,” **IEEE World congress on Computational Intelligence**, Brisbane, Australia, pp. 1-8, 2012.
- [11] A. R. Malisia and H. R. Tizhoosh, “Applying opposition-based ideas to the ant colony system,” **IEEE Swarm Intelligence Symposium**, Honolulu, HI, pp.182-189, 2007.
- [12] A. Aljanaby, K.R. Ku-Mahamud and N.M. Norwawi, “An Exploration Technique for the Interacted Multiple Ant Colonies Optimization Framework,” **International Conference on Intelligent System, Modelling and Simulation (ISMS 2010)**, Liverpool, United Kingdom, pp.92-95, 2010.

- [13] Heidelberg University. “TSPLIB.” [Online]. Available :  
<http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# An Early Exploratory Method to Avoid Local Minima in Ant Colony System

Thanet SATUKITCHAI

Department of Computer Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
alphanct.lck@gmail.com

Kietikul JEARANAITANAKIJ

Department of Computer Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
kjkictik@kmitl.ac.th

**Abstract**— Ant colony optimization (ACO) is a famous technique for solving the traveling salesman problem (TSP). However, one of its disadvantages is that it can be easily trapped into local optima. Although there is an attempt by Ant Colony System (ACS) to improve the local optima by introducing local pheromone updating rule, the chance of being trapped into local optima still persists. This paper presents an extension of ACS algorithm by modifying the construction solution phase of the algorithm, the phase that ants move and build their tours, for reducing the duplication of tours produced by ants. This modification forces ants to select unique path which has never visited by other ants in the current iteration. As a result, the modified ACS can explore more search space than the conventional ACS. The experimental results on five standard data sets from TSPLIB show improvements on both the quality and the number of optimal solutions founded.

**Keywords**—ant colony optimization; ant colony system; traveling salesman problem; local optima; exploration;

## I. INTRODUCTION

Ant colony optimization (ACO) [1-2] is a swarm intelligence that simulates behavior of ant colony in nature. It has ability to find the shortest path between their anthill and a food source. Ants use indirect communication via a chemical substance called pheromone. While searching the path from a nest to a food source, an ant deposits pheromone on a path that it moves through. The pheromone intensity then attracts other ants to follow that path. ACO can be successfully applied to solve computational problems which can be reduced to find good path through graphs, e.g., the travelling salesman problem (TSP). TSP is a famous NP-hard combinatorial optimization problem. The goal is to find the shortest cyclic tour that composes of all cities, each of which is visited exactly once.

The first ACO algorithm is Ant System (AS), published by Dorigo et al. [3]. The major drawback of AS is that it can get stuck in local optima easily. There are some research works trying to solve the problem. One of the most successful solutions is Ant Colony System (ACS) [4]. Although it has the local pheromone update mechanism that can decrease the chance of local optima, ACS is still not perfect. Other research works improve the performance of ACS by inserting the exploratory mechanism. Beer et al. [5] proposed the idea of

direct interactions between ants by antennation. When ants meet at a node, they share information about the search space. Malisia and Tizhoosh [6] proposed several extensions of ACS that based on the idea of opposition to increase efficiency of the solution space.

We propose another modified version of ACS by adding an exploratory mechanism in the construction solution phase to improve both the quality and the quantity of good solutions founded. Since ACS tends to favor exploitation over exploration, it is likely that the algorithm will be trapped in to the local optima. We introduce the exploratory steps that force ants to expand their search space. When an ant selects the next city to move to, it is forced to move through a unique edge that has never visited by any ant. However, the exploratory steps for each ant are restricted in order to prevent too excessive dispersion of search that may cause bad quality solutions. The experimental results on five symmetric TSP data sets from TSPLIB [7] show that our proposed method produces better quality of solution and finds more optimal solutions than conventional ACS and other related methods. The rest of this paper is organized as follows. Section 2 introduces the background of ACS. Section 3 describes the detail of our proposed method. The experimental results and the comparisons with other algorithms are discussed in section 4. Finally, conclusions are provided in section 5.

## II. ACS ALGORITHM

The conventional ACS algorithm that use to solve the traveling salesman problem is explained in this section. Initially,  $m$  ants are randomly distributed to  $n$  cities. Each ant creates a tour (a solution of TSP) by selecting the next city to move with the state transition rule as follow.

When an ant  $k$  is at a city  $r$ , it selects the next city  $s$  to move by the following rule.

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(r)} \{[\tau(r,u)] \cdot [\eta(r,u)]^\beta\}, & \text{if } q \leq q_0 \\ \text{randomly choose from } J_k(r) & \text{otherwise} \\ \text{with probability } p_k(r,s), & \end{cases} \quad (1)$$

Where

$J_k(r)$	is a set of neighbors of the city $r$ which an ant $k$ never moves to
$\tau(r, u)$	is an amount of pheromone on an edge that connects from city $r$ to city $u$
$\eta(r, u)$	is a heuristic function (inverse of distance) of an edge that connects from city $r$ to city $u$
$\beta$	is a parameter for bias value of heuristic function
$q$	is a uniformly distributed random number in range $[0, 1]$
$q_0$	is an exploitation probability parameter ( $0 \leq q_0 \leq 1$ )

In (1), when  $q \leq q_0$ , ant chooses the next city by greedy selection, i.e., it chooses the city that has the largest product between pheromone amount  $\tau$  and heuristic function  $\eta$ . Otherwise, it randomly chooses a city from a set of neighborhood  $J_k(r)$  with probability function  $p_k$ , as shown in (2). The city that is connected by an edge with a high level of pheromone and a short distance will be more likely to be selected.

$$p_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)] \cdot [\eta(r, s)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)]^\beta}, & \text{if } s \in J_k(r) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

While an ant builds a solution (a tour), it moves through an edge and decreases the pheromone level on that edge by the local updating rule as following.

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(r, s) + \rho \cdot \tau_0 \quad (3)$$

Where  $\tau_0$  is an initial pheromone value and  $\rho$  is an evaporation rate ( $0 \leq \rho \leq 1$ ). After all ants complete their tours, only pheromone on edges of the global best-so-far tour will be increased by the following global updating rule.

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot \tau(r, s) + \alpha \cdot \Delta\tau(r, s) \quad (4)$$

Where  $\Delta\tau(r, s) = \begin{cases} 1/L_{gb}, & \text{if } (r, s) \in \text{global best tour} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$\alpha$  is a deposit rate ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )  
 $L_{gb}$  is the length of global-best tour

The steps of ACS algorithm can be summarized in Fig 1.

Set parameters, Initialize pheromone  
**Loop** // each loop is called an iteration  
  Each ant is randomly positioned on a starting city  
  **Loop** // each loop is called a step  
    Each ant selects the next city by state transition rule (1) and then applies a local pheromone updating rule (3)  
  **Until** all ants have built a complete solution  
  Apply a global pheromone updating rule (4)  
**Until** termination condition is met

Fig. 1. The procedure of ACS algorithm

### III. THE PROPOSED METHOD

In ACS, there are two main factors on an edge that attract ants to move through. The first factor is the distance of an edge. It is hard to improve this factor since the distance of an edge is constant. Another factor is the pheromone level of an edge. The pheromone level is decreased when an edge is visited by an ant and increased when an edge belongs to the current global best-so-far tour. In the early iteration, the global best-so-far tour may compose of edges that have fairly good heuristic values. However, ACS might end up with a sub-optimal solution since ACS tends to favor exploitation over exploration, due to the  $q_0$  parameter in (1) usually closes to 1, e.g., 0.9. At the beginning, the pheromone levels of all paths are set to an identical value. ACS may find the suboptimal tour based on the distance of each edge. The pheromone level along that tour will increase in later iterations. If there is no ant can find a better best-so-far tour within a limited number of iterations, all ants tend to build a similar tour. This could lead to a local optima phenomenon.

Our proposed method aims to modify the solution construction phase of the ACS algorithm. The basic idea is to force ants to be more exploratory during the early stage by considering only the distances of all unvisited paths connected to the current city. This modification will expand the coverage area of the search space and reduce the possibility of local optima.

The following additional structures are required before running the proposed method.

- Every edge  $(r, s)$  has a flag  $p_{r,s}$  that keeps the status whether the edge has been passed by any ant or not. The initial value of  $p_{r,s}$  is false.
- Each ant  $a$  has a memory  $e_a$  to counts its own exploratory steps. The initial value of  $e_a$  is zero.

The proposed method can be described by the following algorithm along with the flowchart in Fig. 2.

#### Algorithm

**Step1.** The  $p$  flags of all edges are reset to false, the exploratory steps ( $e_a$ ) of all ants are reset to zero and all ants are randomly placed to starting cities.

**Step2.** **If not** ( $e_a < \sigma$ ) **Then** goto step 6.

**Step3.** **If** there exist **no**  $s \in J_a(r)$  such that  $p_{r,s} = \text{false}$  where  $\sigma$  is a limit of exploratory steps,  $r$  is the current node of an ant  $a$ ,  $J_a(r)$  is set of neighbors of node  $r$  that an ant  $a$  has not visited yet.

**Then** goto step 6.

**Step4.** Ant chooses an edge  $(r, s)$  which has the shortest distance.

**Step5.** Increase the exploratory steps of ant  $a$  by one ( $e_a = e_a + 1$ ) and goto step 7.

**Step6.** Ant chooses the next city by using ACS's state transition rule (1).

- Step7.** Mark  $p_{r,s} = \text{true}$ , where  $(r, s)$  is an edge that an ant  $a$  just moves through.
- Step8.** Apply local pheromone updating rule (3).
- Step9.** Repeat steps 2 to 8 until all ants have completed their tour.
- Step10.** Apply global pheromone updating rule (4).
- Step11.** Repeat steps 1 to 11 until the termination condition is met.

Fig. 3 illustrates an example of ant's state transition when its exploratory steps do not exceed the limit. Suppose that the ant is at node  $r$  and there are three available adjacent nodes  $s$ ,  $t$  and  $u$ . Because edge  $(r, u)$  is already passed by another ant in this iteration,  $p_{r,u}$  is set to be true and node  $u$  is eliminated from available choices. The ant then selects node  $t$  as the next node since it has the shortest distance.

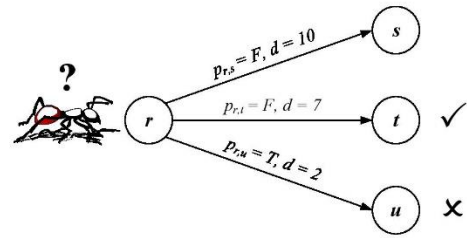


Fig. 3. An example of ant's move

#### IV. EXPERIMENTS

##### A. Data sets

We select five symmetric TSP benchmarks, which have various numbers of cities, from TSPLIB [7]. The descriptions of each data set are shown in Table I.

TABLE I. BENCHMARK TSP INSTANCES USED IN EXPERIMENTS

Benchmark	Number of cities	Optimal Tour Length (real value)
Eil51	51	428.87
Berlin52	52	7544.37
Eil76	76	544.37
KroA100	100	21285.44
D198	198	15808.65

##### B. Preliminary run

In order to roughly estimate a suitable value of the parameter  $\sigma$  (exploratory steps limit), we perform the preliminary run on every benchmark. This preliminary run spends fewer number of iterations and trials than the actual run.

We run our algorithm 25 trials with 500 iterations for Eil51 and Eil76, 25 trials with 1000 iterations for KroA100, and 15 trials with 1000 iterations for D198. In general, the number of trials and iterations in preliminary run is approximately 10-15 percent of the value used in the actual run. Table II shows suitable values of the parameter  $\sigma$  for each benchmark. It is worth to note here that we gradually increase  $\sigma$  by one and observe the tour length in the preliminary run. If we do not notice the new best tour length for some considerable value of  $\sigma$ , we stop the preliminary run and return the value of  $\sigma$  which gives the shortest tour in each benchmark.

TABLE II. AVERAGE TOUR LENGTHS FROM VARIATION OF  $\sigma$  IN PRELIMINARY RUN

$\sigma$	Data sets				
	Eil51	Eil76	Berlin52	kroA100	D198
1	434.98	559.90	7653.57	21680.41	16484.83
2	432.46	556.84	7693.45	21629.27	16364.61
3	431.10	556.88	7699.62	21607.75	16420.42
4	431.80	557.51	7702.03	21544.91	16495.41
5	433.46	558.83	7720.79	21704.88	16434.90

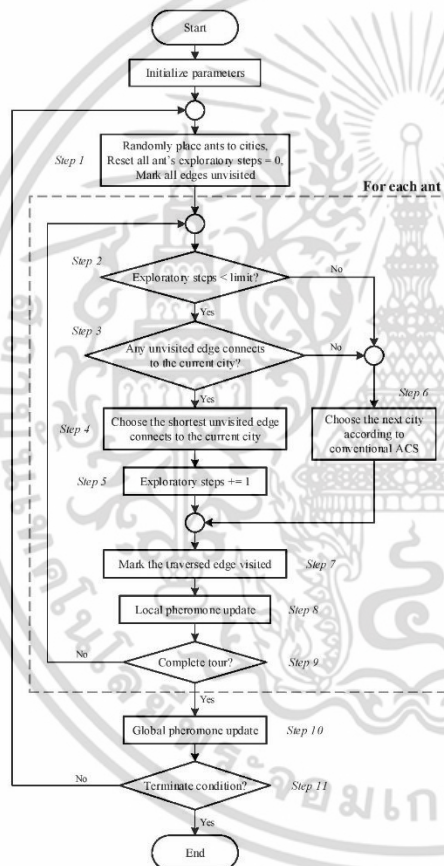


Fig. 2. Flow chart of the proposed method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IV. BENCHMARK RESULTS BETWEEN CONVENTIONAL ACS AND THE PROPOSED METHOD

Measurement	Method	Eil51	Berlin52	Eil76	KroA100	D198
Average	ACS	431.59	7638.79	553.75	21532.59	16138.39
	Proposed	430.00	7626.81	550.37	21423.88	16077.29
Median	ACS	430.24	7544.37	553.54	21414.80	16112.92
	Proposed	428.98	7544.37	550.11	21349.44	16063.86
Min	ACS	428.87	7544.37	545.95	21285.44	15971.93
	Proposed	428.87	7544.37	544.37	21285.44	15873.92
Max	ACS	439.04	7988.19	568.13	22687.70	16916.18
	Proposed	436.73	7944.50	563.44	22308.24	16420.43
#Optimal found	ACS	5	62	0	1	0
	Proposed	12	65	6	15	0

TABLE III. PARAMETERS SETTING IN THIS PAPER

Parameter	Description	Value
$m$	Number of ant	10
$q_0$	Exploitation probability	0.9
$\alpha$	Global update's parameter	0.1
$\rho$	Local update's parameter	0.1
$\beta$	Weight bias of heuristic function	2
$\tau_0$	Initial pheromone value	$1 / (n \cdot L_{min})^2$

<sup>a</sup>  $L_{min}$  is the tour length produced by the nearest neighbor heuristic and  $n$  is the number of cities.

Other parameters used in ACS of our proposed method are conformed to those used in the conventional ACS [4], as shown in Table III.

#### C. Comparisons between our proposed method and conventional ACS

The comparison between the proposed method and the conventional ACS algorithm [4] is discussed in this section. The ACS algorithm and ACS part in our proposed method are implemented without local search and candidate list. Table IV indicates that the proposed method achieves better quality of solutions in terms of both average and median value of the tour length. Moreover, the number of optimal solutions founded in the proposed method is also more than those of the conventional ACS in every data set, except for the large data set D198 which neither method reaches an optimal solution.

#### D. Comparisons between our proposed method and ACS extension

In this subsection, we compare the proposed method with an opposition-based ACS extension approach called Opposite Pheromone per Node (OPN), proposed by Malisia et al. [6]. In order to be a fair comparison, all common parameters, including the number of trials and iterations, used in the proposed method are identical to those used in OPN.

Due to the different machine platform and implementation, we use the median ratio to compare the performance of two methods. The median ratio between the ACS-based algorithm  $x$  and conventional ACS is defined in (5), where *Optimal* is the optimal tour length of a particular data set (as shown in Table I).

TABLE V. COMPARISON BETWEEN THE PROPOSED METHOD AND OPN

Benchmark	Measure	Proposed Method	OPN
Eil51	Median Ratio	91.97%	70.49%
	#Additional Opt	7	2
Eil76	Median Ratio	37.40%	28.72%
	#Additional Opt	6	3
KroA100	Median Ratio	50.53%	41.10%
	#Additional Opt	14	6
D198	Median Ratio	16.12%	-1.96%
	#Additional Opt	0	0

$$\text{MedianRatio}(x) = \frac{\text{Median}(\text{ACS}) - \text{Median}(x)}{\text{Median}(\text{ACS}) - \text{Optimal}} \times 100 \quad (5)$$

The reason of using median in (5) is that OPN [6] uses median value to benchmark their algorithm. Besides the median ratio, we also compare the difference of the number of optimal solutions found between the each method and the conventional ACS, i.e., #Additional Opt.

Table V shows that the proposed method has better performance in terms of median ratio in all data sets. Furthermore, the proposed method achieves more number of optimal solutions found. The median ratio of the OPN method in data set D198 is negative because its median value is larger than the conventional ACS's median.

## V. CONCLUSIONS

We proposed the extension of ACS by enhancing the exploratory search. The proposed method forces ants to move differently in early stage of iterations. Two additional structures are required to limit the number of ant's exploratory steps and to keep the visiting status for each edge. The experimental results on five symmetric TSPLIB data sets indicate better performance of the proposed method over conventional ACS and OPN. The drawback of the proposed method is a need for preliminary run to find the proper value of a limit of exploratory steps  $\sigma$ . One of the future works is to create a process which can find the value of  $\sigma$  automatically.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## REFERENCES

- [1] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*, MIT Press, Cambridge, 2004.
- [2] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stützle, "Ant colony optimization: Artificial ants as a computational intelligence technique," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, USA, vol. 1, no. 4, pp.28-39, November 2006.
- [3] M. Dorigo, V. Maniczzo, and A. Colomi, "The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, February 1996.
- [4] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp.53-66, April 1997.
- [5] C. Beer, T. Hendtlass, and J. Montgomery, "Improving exploration in ant colony optimization with antennation," *IEEE World congress on Computational Intelligence*, Brisbane, Australia, pp. 1-8, June 2012.
- [6] A. R. Malisia and H. R. Tizhoosh, "Applying opposition-based ideas to the ant colony system," *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Honolulu, HI, pp. 182-189, April 2007.
- [7] TSPLIB: <http://www.fwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/tspl/>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธเนศ สารกิจชัย
วัน เดือน ปีเกิด	18 พฤศจิกายน 2531
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 7/1 ถนน สุขุมวิท อำเภอ ชลุม จังหวัด จันทบุรี 22110
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้