ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

ปริญญา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขา **ภาควิชา**

เรื่อง การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหนะสำหรับขนส่งข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือ ในเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน

Reliable Route Design of Message Ferries in Disconnected Networks

นามผู้วิจัย นายภาสกร ทิวัฑฒานนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพร ใจแก้ว, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตร์ทัศน์ ฝักเจริญผล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภุชงค์ อุทโยภาศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหนะ สำหรับขนส่งข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือ ในเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน

Reliable Route Design of Message Ferries in Disconnected Networks

โดย

นายภาสกร ทิวัฑฒานนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)
พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาสกร ทิวัฑฒานนท์ 2554: การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหนะสำหรับขนส่งข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือในเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพร ใจแก้ว, Ph.D. 76 หน้า

งานวิจัยยานพาหนะขนส่งข้อมูลแก้ปัญหาเครือข่ายเชื่อมโยงไม่ถึงกัน ที่ไม่สามารถสื่อสารระหว่างกันทั้งผ่านเครือข่ายไร้สายหรือมีสาย ได้รับความสนใจในประเด็นอัตรารับส่งหรือความล่าช้าของข้อมูลระหว่างสถานี แต่ถ้ายานพาหนะขนส่งข้อมูลบางส่วนหยุดให้บริการประเด็นความน่าเชื่อถือที่แต่ละสถานีจะได้รับบริการจึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้ขอนำเสนอขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางสำหรับกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล ให้สถานีในเครือข่ายได้รับบริการขั้นต่ำตามจำนวนยานพาหนะที่ถูกกำหนด พร้อมกับพยายามประหยัดพลังงานให้มากที่สุด

ปัญหาดังกล่าวถูกวิเคราะห์ จำลองในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีกราฟ เพื่อแก้ปัญหาในสองเป้าหมายหลักคือ ต้องการกลุ่มเส้นทางที่ระยะทางรวมสั้นที่สุด และต้องการให้เส้นทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มเส้นทางมีระยะทางสั้นที่สุด จึงนำเสนอขั้นตอนวิธีแบ่งเป็นสองแนวทาง (1) ขั้นตอนวิธีออกแบบกลุ่มเส้นทางให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด และ (2) ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มที่อาศัยศึกษาสำนึก (Heuristic) ให้ระยะเวลาประมวลผลเหมาะสมตามสถานการณ์จริง ซึ่งทั้งสองขั้นตอนวิธีถูกสร้างเป็นชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์ ทดสอบกับข้อมูลจำลองจากสถานที่เกิดซึนามิ จ. ภูเก็ต พ.ศ.2547 และจำลองแบบสุ่ม เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาประมวลผล ระยะทางรวม และระยะทางเส้นทางที่ยาวที่สุดของคำตอบ

ผลการทดลองระบุว่าขั้นตอนวิธีออกแบบกลุ่มเส้นทางที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดนั้นใช้เวลานานที่สุดประมาณ 5 ชั่วโมง แต่ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มใช้เวลา 0.039 วินาที ในการคำนวณเส้นทางกลุ่มยานพาหนะ 6 คัน 7 สถานี โดยที่คำตอบที่ได้จากทั้งสองขั้นตอนวิธีส่วนใหญ่แล้วเท่ากัน มีบางกรณีเท่านั้นที่ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มทำได้ดีไม่เท่า มีระยะทางมากกว่าผลจากขั้นตอนวิธีประหยัดพลังงานมากที่สุด สูงสุด 27% ตามจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ทดลอง

_____ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pasakorn Tiwatthanont 2011: Reliable Route Design of Message Ferries in Disconnected Networks. Master of Engineering (Computer Engineering), Major Field: Computer Engineering, Department of Computer Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Chaiporn Jaikaeo, Ph.D. 76 pages.

In a disconnected network scenario, regular vehicles can be used for data transportation instead of actual network links. These vehicles, called message ferries, emulate the communication medium between two disconnected network sections whose connection cannot be established easily with typical wired or wireless links. Previous research work mostly considered data rate, data buffer in a message ferry, or delay time in data transportation. None of them concern about reliability of data transportation in situations where message ferries may fail to operate. This research, therefore, proposes a method to determine message ferry routes that minimizes operational cost in terms of energy consumption, while guaranteeing a minimum service level at each disconnected station.

The research problem is analyzed and mathematically modeled using graph theory with two different objective functions, minimizing total routing tours and minimizing maximum-length tour. Then, two methods are proposed: (1) the brute force method that aims to compute the optimal solutions, and (2) the grouping method which attempts to reduce computing time while giving comparable tour lengths. Both methods are implemented in a computer simulation program for experiments. Computing time and distance of routing tours are used as performance metrics.

Simulation results show that the maximum brute force's computing time is 5 hours but use only 0.039 seconds for grouping method's computing in the same scenario, 7 stations and 6 message ferries. Most results from the grouping method yield the same cost as those from the brute force method. While some results are of greater costs, the cost difference is at most 27%.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. ชัยพร ใจแก้ว ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานพนธ์ ผศ. ดร. จิตร์ทัศน์ ฝักเจริญผล รศ. ดร. อนันต์ ผลเพิ่ม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน ค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชย์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ผู้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ภาสกร ทิวัฑฒานนท์

มกราคม 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	16
อุปกรณ์	16
วิธีการ	16
ผลและวิจารณ์	32
ผล	32
วิจารณ์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก จำนวนวิธีของการเลือกแบบซ้ำได้	72
ภาคผนวก ข จำนวนวิธีในการแบ่งสิ่งของออกเป็นกลุ่ม	74
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	76

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบงานวิจัยยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ได้กล่าวมา	15
2	ระยะทาง (กิโลเมตร) ระหว่างสถานีภายในเครือข่ายจำลองที่ใช้ทดสอบ	31
3	ผลการทดลองระยะเวลาในการคำนวณแต่ละขั้นตอนวิธี	35
4	ผลการทดลองระยะทางรวมที่ได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี	38
5	ผลการทดลองระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดของแต่ละขั้นตอนวิธี	41

ตารางผนวกที่

ก1	ลักษณะวิธีการเลือกตักของเหลว 3 ชนิด จำนวน 2 ครั้ง	73

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เหตุการณ์สึนามิ จังหวัดภูเก็ต พ.ศ. 2547	1
2	เหตุการณ์จำลองภูเขาไฟระเบิด	2
3	การสื่อสารระหว่างสถานีโลกไปยังดาวอังคาร	3
4	เครือข่ายยานพาหนะขนส่งข้อมูลในสภาพแวดล้อมเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน	17
5	ตัวอย่างเครือข่ายที่มี $n=7$ m=3	20
6	กราฟสมบูรณ์ $n=7$	23
7	ซับกราฟจากกราฟสมบูรณ์ $n=4$	23
8	จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา สำหรับขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด และขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี	27
9	แผนที่ทดสอบ ณ จังหวัดภูเก็ต 7 สถานี	30
10	จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี	34
11	เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี	36
12	ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี	39
13	เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี	42
14	จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี	44
15	เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี	45
16	ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี	46
17	เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี	47
18	จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี	48
19	เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี	49
20	ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี	50
21	เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี	51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี	52
23	เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี	53
24	ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี	54
25	เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี	55
26	จำนวนเท่าของเวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธี Opt All หารด้วย GM All ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม	57
27	จำนวนเท่าของเวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธี Opt Max หารด้วย GM Max ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม	58
28	จำนวนเท่าของระยะทางรวมจากคำตอบของขั้นตอนวิธี GM All หารด้วย Opt All ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม	59
29	จำนวนเท่าของระยะทางเส้นทางที่ยาวที่สุดจากคำตอบของขั้นตอนวิธี GM Max หารด้วย Opt Max ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม	60

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

DTN	=	Delay Tolerant Networks
GM	=	Grouping Method Algorithm
GM All	=	Grouping Method Algorithm for All-tour Lengths Summary Minimization
GM Max	=	Grouping Method Algorithm for Maximum-tour Length Minimization
IPN	=	Inter Planetary Internet
MANET	=	Mobile Ad-Hoc Networks
MF	=	Message Ferry
MTSP	=	Multiple-Traveling Salesmen Problem
Opt	=	Optimal Solution Algorithm
Opt All	=	Optimal Solution Algorithm for All-tour Lengths Summary Minimization
Opt Max	=	Optimal Solution Algorithm for Maximum-tour Length Minimization
TSP	=	Traveling Salesman Problem

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหนะสำหรับขนส่งข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือในเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน

Reliable Route Design of Message Ferries in Disconnected Networks

คำนำ

ผลกระทบอันเกิดจากภัยพิบัติทางธรรมชาตินั้นยากแก่การป้องกัน สร้างความสูญเสียให้กับมนุษย์และทรัพย์สิน สร้างความเสียหายแก่ระบบสาธารณูประโภค ไฟฟ้า น้ำประปา จนไม่สามารถทำงานต่อไปได้ การให้ความช่วยเหลือต้องกระทำด้วยความเร่งด่วน เข้าถึงแต่ละจุดของพื้นที่ประสบภัยได้อย่างทั่วถึง

ภาพที่ 1 เหตุการณ์สึนามิ จังหวัดภูเก็ต พ.ศ. 2547

ที่มา: สำนักข่าวรอยเตอร์ส (Reuters, 2547)

ขอยกตัวอย่างเหตุการณ์เกิดคลื่นยักษ์สึนามิ ณ จังหวัดภูเก็ต พ.ศ. 2547 ในภาพที่ 1 แสดงสภาพพื้นที่ภายหลังน้ำทะเลยกตัวสูงเข้าท่วมพื้นที่แถบชายทะเล ถึงแม้ถนนไม่เสียหายแต่บ้านเรือนถูกทำลาย มีผู้สูญหายและผู้เสียชีวิตรอรับความช่วยเหลืออยู่อีกจำนวนมาก ซึ่งการค้นหาผู้บาดเจ็บ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ แจกจ่ายเครื่องบรรเทาสาธารณะภัย จำเป็นต้องกระทำด้วยความเร่งด่วน การบูรณาการบริหารจัดการทุกภาคส่วนให้ทำงานได้อย่างสอดคล้อง จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง

ตัวอย่างต่อมา ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 2 เป็นสถานการณ์สมมติภูเขาไฟระเบิดใกล้เคียงพื้นที่ชุมชนกระจายตัวอยู่ตามป่า สภาพอากาศนอกจากจะมีฝนตกหนักแล้วยังคละคลุ้งไปด้วยเถ้าหิน ภูเขาไฟลอยปกคลุมบรรยากาศโดยรอบ

ภาพที่ 2 เหตุการณ์จำลองภูเขาไฟระเบิด

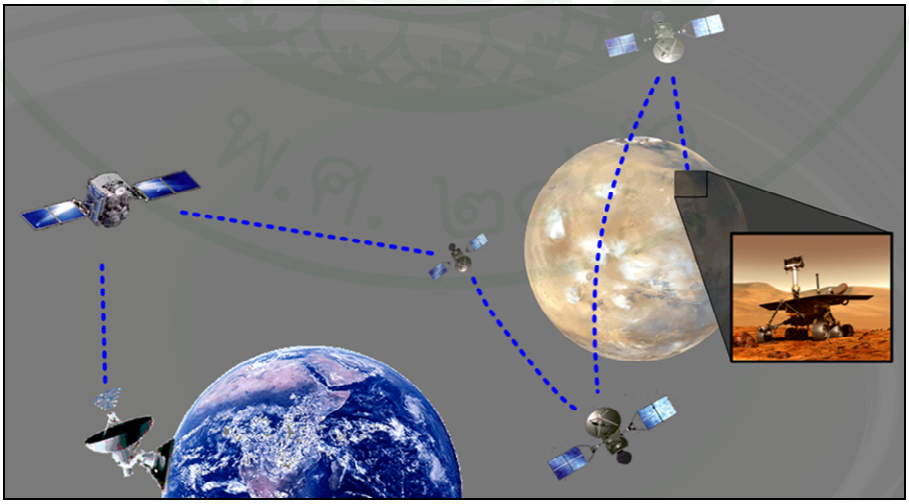
สำหรับการช่วยเหลือ ทางหน่วยงานบรรเทาสาธารณะภัยตั้งสถานีย่อยแต่ละจุดในพื้นที่เพื่อดูแลผู้บาดเจ็บเบื้องต้น และแจกจ่ายปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตแก่ผู้ประสบภัย พร้อมกับประสานงานกับสถานีหลัก ในด้านการส่งต่อผู้ป่วย ลำเลียงอาหาร และเครื่องมือที่จำเป็น ดังนั้น ข้อมูลจากสถานีย่อยแต่ละแห่งจึงจำเป็นต่อสถานีหลัก ตัวอย่างเช่น จำนวนผู้ประสบภัย ชนิด ปริมาณของยารักษาโรค ผู้บาดเจ็บเร่งด่วน หรือแม้กระทั่งปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ในสถานีย่อย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ทราบถึงภาพรวมของสถานการณ์อันจะนำไปสู่การให้ความช่วยเหลืออย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งโดยตรงจากสถานีหลักหรือโดยอ้อมจากสถานีย่อยแห่งอื่นโดยรอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อย่างไรก็ตาม ความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้ระบบสื่อสารในพื้นที่ถูกตัดขาด โครงข่ายสื่อสารทั้งแบบใช้สายและไร้สายหยุดทำงาน โดยที่การดำเนินการก่อสร้างใหม่นั้นจำเป็นต้องอาศัยเงินทุนจำนวนมากในเวลาที่จำกัด กอปรกับสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการสื่อสารไร้สายระยะไกล ทำให้ต้องอาศัยวิธีสื่อสารที่ต่างออกไป เช่นการสื่อสารโดยอาศัยยานพาหนะเป็นสื่อใช้ขนส่งข้อมูล

พิจารณาขั้นตอนการทำงานระหว่างสถานีหลักกับสถานีย่อย พบว่าทุกสถานีมีการเชื่อมโยงถึงกันอยู่แล้วบนเส้นทางคมนาคมที่ยังคงใช้การได้ โดยยานพาหนะหลากหลายประเภท ทั้งทางบก ทางน้ำ หรือทางอากาศ ต่างทำงานปฏิบัติหน้าที่ตามแผนที่หน่วยงานบรรเทาสาธารณะภัยได้วางไว้ ดังนั้นหากแต่อาศัยยานพาหนะดังกล่าวขนส่งข้อมูลที่สำคัญ ภายใต้การกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมกับทั้งการสื่อสารและงานบริการช่วยเหลือ ก็จะสามารถสร้างเครือข่ายสื่อสารข้อมูลโดยอาศัยพาหนะเป็นสื่อเพื่อแก้ไขปัญหาการสื่อสารที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้

จากการศึกษาค้นคว้า แนวคิดเรื่องการใช้ยานพาหนะแทนสื่อขนส่งข้อมูลได้ถูกกล่าวถึงตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ.2000 (พ.ศ.2543) เริ่มต้นจากปัญหาที่มีชื่อเรียกว่า Delay-Tolerance Networks (DTN) ที่มีลักษณะของการสื่อสารพบกับอุปสรรคสองประการคือ ไม่สามารถสื่อสารได้ตลอดเวลาและระยะเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลแต่ละรอบนานเกินกว่าการสื่อสารข้อมูลโดยทั่วไปมาก เนื่องจากระยะทางหรือมีวัตถุบดบังแนวของสัญญาณ (Fall, 2003)



ภาพที่ 3 การสื่อสารระหว่างสถานีโลกไปยังดาวอังคาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังตัวอย่างที่ได้แสดงในภาพที่ 3 เป็นกรณีของการสื่อสารระหว่างสถานีบนพื้นโลกกับหุ่นยนต์ที่ปฏิบัติงานอยู่บนดาวอังคาร ซึ่งต้องประสบปัญหาในบางขณะที่เส้นทางโคจรของโลกกับดาวอังคารบดบังเส้นทางสื่อสาร จึงแก้ปัญหาด้วยการใช้เครือข่ายดาวเทียมเป็นสถานีพักข้อมูลรอจนกระทั่งสามารถส่งต่อจนถึงปลายทางได้เมื่อมีโอกาส

นอกจากนี้ยังมีอีกปัญหาหนึ่งในงานวิจัยการสื่อสารไร้สายประเภท Mobile Ad Hoc Networks (MANET) ที่ได้รับการสนใจคือ จะทำอย่างไรหากต้องการสื่อสารระหว่างเครือข่ายไร้สายที่ไม่เชื่อมถึงกัน (Disconnected Networks) สถานีภายในมีลักษณะตัดขาดออกจากกันเป็นกลุ่มที่มีชื่อเรียกต่างกันเช่น Disconnected Networks, Sparse Networks, หรือ Partitioned Networks เป็นต้น ซึ่งก็มีงานวิจัยโดย Zhao (2003) เสนอแนวทางการแก้ไขว่า ให้ใช้ยานพาหนะเป็นสื่อขนส่งข้อมูล เชื่อมโยงเครือข่ายทุกส่วนที่ไม่สามารถเชื่อมโยงถึงกัน ซึ่งให้ชื่อยานพาหนะนี้ว่า Message Ferry (MF) หรือในบางงานวิจัย อาจใช้ชื่ออื่น เช่น Data Mule

ที่ผ่านมา งานวิจัยที่ได้กล่าวถึงการแก้ปัญหาเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกันโดยการใช้ยานพาหนะขนส่งข้อมูล มุ่งเน้นประเด็นที่พยายามทำให้ความล่าช้าในการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีมีอยู่น้อยที่สุด แต่สำหรับบางสถานการณ์ความล่าช้าไม่ได้เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง หากแต่ความพยายามทำให้ทุกสถานีสามารถสื่อสารถึงกันได้อย่างต่อเนื่องนั้นกลับเป็นเรื่องที่ควรตระหนักมากกว่า ยกตัวอย่างเช่น ถ้าในบางโอกาสระหว่างทางยานพาหนะจำเป็นต้องหยุดพัก พลังงานในการเดินทางมีจำกัด หรือจำเป็นต้องปฏิบัติงานหน้าที่พิเศษกระทันหัน (มีความจำเป็นเร่งด่วนต้องไปรับผู้บาดเจ็บ) ทำให้การสื่อสารในเครือข่ายหยุดชะงักลงได้ ขาดความน่าเชื่อถือในการสื่อสาร ทั้งอาจนำมาซึ่งผลเสียของปฏิบัติการกู้ภัยครั้งนี้อีกด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นไปที่ความพยายามที่จะรักษาการสื่อสารในเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน ให้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องและเชื่อถือได้ ด้วยการออกแบบเส้นทางให้แต่ละสถานีได้รับบริการจากกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล ตามจำนวนที่คาดว่า ถึงแม้ยานพาหนะส่วนหนึ่งหยุดให้บริการก็ตาม แต่ทุกสถานีจะยังคงได้รับบริการจากพาหนะขนส่งข้อมูล อย่างน้อย 1 คัน ทำให้ไม่กระทบต่อการสื่อสารของทุกสถานีในเครือข่าย พร้อมกับมุ่งเน้นออกแบบเส้นทางโดยรวมให้สั้นที่สุด เพื่อประหยัดพลังงานมากที่สุดอีกด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. นำเสนอขั้นตอนวิธีเพื่อออกแบบเส้นทางการให้บริการ ของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล โดยยังคงรับประกันว่าแต่ละสถานีจะได้รับบริการขั้นต่ำตามที่ได้กำหนด พร้อมกับประหยัดพลังงานมากที่สุด

2. นำเสนอขั้นตอนวิธีเพื่อออกแบบเส้นทางการให้บริการ ของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล โดยยังคงรับประกันว่าแต่ละสถานีจะได้รับบริการขั้นต่ำตามที่ได้กำหนด พร้อมกับคำนึงถึงระยะเวลาในการคำนวณ ร่วมกับการประหยัดพลังงาน เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในสถานการณ์จริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

เครือข่ายการสื่อสารที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับเครือข่ายไม่เชื่อมถึงกัน (Disconnected Networks) คือ Delay-Tolerance Networks (DTN) ถูกให้คำจำกัดความครั้งแรกโดยงานวิจัยของ Kevin Fall (Fall, 2003) ว่าเป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลที่แตกต่างกันในด้านคุณสมบัติ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ถูกรบกวน เนื่องจากระยะทาง สิ่งกีดขวางบดบังจนการสื่อสารเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง หรือล่าช้าจนไม่สามารถคาดการณ์ โดยนำเอาคุณลักษณะดังกล่าว มาจากปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการที่ได้รับการสนับสนุนจากองค์การนาซ่า (NASA) ร่วมกับกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา มีชื่อว่า Interplanetary Internet (IPN) (McMahon and Farrell, 2009)

โครงการ IPN เริ่มต้นโดย Vint Cerf (ผู้ร่วมก่อตั้งระบบ Internet) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 มีจุดมุ่งหมายเพื่อกำหนดโครงสร้างการสื่อสารในอวกาศ มีความสำคัญต่อโครงการอื่นในการสำรวจอวกาศ ยกตัวอย่างโครงการที่เกี่ยวข้องคือ โครงการสำรวจดาวอังคารที่ทางองค์การนาซ่าดำเนินการในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งในครั้งนั้น โครงการดังกล่าวได้ประสบปัญหาอยู่สองเรื่องคือ ไม่สามารถทำการสื่อสารระหว่างสถานีโลกกับหุ่นยนต์บนดาวอังคารได้ เนื่องจากดาวของทั้งคู่บดบังทิศทางสัญญาณ สำหรับอีกกรณีคือเกิดความล่าช้าในการรับส่งข้อมูล และเนื่องจากระยะทางระหว่างดาวทั้งสองดวงไกลกัน

อย่างไรก็ดีทั้ง DTN และ IPN นั้นต่างก็มีช่วงเวลาบางขณะที่การสื่อสารสามารถกระทำได้ แต่กับเครือข่ายที่ลักษณะใกล้เคียงกันอย่างเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกันนั้น การสื่อสารจะไม่สามารถกระทำได้เลยทั้งการอาศัยสื่อแบบมีสายหรือไร้สาย ทำให้มีการนำเสนอวิธีการหนึ่ง เพื่อแก้ปัญหา คือ อาศัยพาหนะที่เรียกว่า ยานพาหนะขนส่งข้อมูล หรือ Message Ferry (Zhao, 2003) เป็นตัวกลางในการขนส่งข้อมูลระหว่างกัน ซึ่งจะมุ่งประเด็นความสนใจไปที่การกำหนดปัญหา นำเสนอกลไกการทำงานของทั้งสถานีและยานพาหนะขนส่งข้อมูล เพื่อรองรับความต้องการในการสื่อสารอย่างเช่นต้องการให้ระยะเวลาที่ใช้ในการขนส่งข้อมูล ถูกหน่วงน้อยที่สุด เป็นต้น

จุดที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งคือ ในเรื่องขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูล มีความคล้ายคลึงกันกับปัญหา Traveling Salesman Problem (TSP) (Reinelt, 1994) ที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ต้องการให้บุรษไปรษณีย์ เดินทางจากจุดเริ่มต้นไปตามจุดที่กำหนดไว้ในกราฟแผนที่ แล้ววกกลับมายังจุดเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง โดยพยายามให้เส้นทางดังกล่าวมีระยะทางสั้นที่สุด (Johnson et al., 1997) ดังนั้นจะเห็นว่าในหลายงานวิจัยที่อาศัยยานพาหนะขนส่งข้อมูลแก้ปัญหาเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน ได้อาศัยขั้นตอนวิธีที่ได้วิจัยไว้แล้วในปัญหา TSP และยิ่งกว่านั้น การอาศัยกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล ก็อาศัยขั้นตอนวิธีที่ใช้กับการแก้ปัญหา Multiple Traveling Salesman (MTSP) เช่นกัน (Bektas, 2006)

งานวิจัยขั้นตอนการแก้ปัญหาในเครือข่ายไม่เชื่อมถึงกันด้วยยานพาหนะขนส่งข้อมูล

เป้าหมายในการทำวิจัยในประเด็นการแก้ปัญหาเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน โดยอาศัยยานพาหนะขนส่งข้อมูล เกือบทั้งหมดจะพุ่งเป้าที่พยายามหาขั้นตอนวิธีในการหาเส้นทาง หรือแม้แต่กำหนดกลไกข้อตกลงร่วม ในการทำงานของยานพาหนะ ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดให้ยานพาหนะทำงานโดยอัตโนมัติหรือต้องถูกร้องขอ หรืออาศัยการเพิ่มจำนวนของยานพาหนะในการให้บริการ ซึ่งทั้งหมดก็เพื่อต้องการผลลัพธ์คือประสิทธิภาพในการทำงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาตามระยะเวลาที่งานวิจัยในประเด็นนี้ได้ถูกตีพิมพ์ จะเห็นได้ว่า สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มงานวิจัยที่ใช้ยานพาหนะขนส่งข้อมูลเพียงคันเดียว กับกลุ่มงานวิจัยที่ใช้กลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล ในการให้บริการกับแต่ละสถานีในเครือข่าย

1. งานวิจัยที่ใช้ยานพาหนะขนส่งข้อมูลเพียงคันเดียว

1.1. งานวิจัยของ Zhao (2003) ถือเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาเครือข่ายไม่เชื่อมถึงกันด้วยเทคนิคใช้ยานพาหนะขนส่งข้อมูล โดยนำเสนอความหลากหลายในรูปแบบการให้บริการ แยกแยะส่วนประกอบของระบบ และเสนอแนะแนวทางวิธีออกแบบเบื้องต้น นอกจากนี้ ยังได้เสนอวิธีการออกแบบเส้นทางที่เหมาะสม ตามแบบจำลองชี้วัดประสิทธิภาพตามค่าความหน่วงเวลาระหว่างรับส่งข้อมูล ภายใต้ข้อกำหนดขนาดช่องสัญญาณสื่อสาร (Bandwidth) เฉพาะในรูปแบบเครือข่ายที่กำหนดอีกด้วย

ขอบเขตงานวิจัยกำหนดรูปแบบเครือข่าย ให้แต่ละสถานีไม่สามารถเคลื่อนที่ และไม่สามารถสื่อสารระหว่างกันได้ ขณะที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลเพียงคันเดียว เคลื่อนที่ด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความเร็วคงที่ ผ่านจุดนัดพบตามเส้นทางที่จะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงจากที่ได้รับตั้งแต่ต้น โดยยานพาหนะขนส่งข้อมูลจะขนถ่ายข้อมูลกับสถานี ผ่านการสื่อสารไร้สายในระยะทางที่จำกัด ณ จุดนัดพบ ในลักษณะรับและส่งได้พร้อมกัน (Full duplex) เพียงครั้งละหนึ่งสถานีเท่านั้น ซึ่งในบริเวณเดียวกันหากมีมากกว่าหนึ่งสถานี จำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการนัดหมาย จัดลำดับให้บริการ

ขั้นตอนวิธีในการออกแบบเส้นทางได้หยิบยืมมาจากงานวิจัย TSP โดยเริ่มต้นจากสร้างเส้นทางด้วยวิธี Nearest Neighbor, Greedy, หรือ Lin-Kernighan heuristic (LKH) อย่างใดอย่างหนึ่ง ตามด้วยขั้นตอนวิธีทดลองสลับสับเปลี่ยนเส้นทาง เพื่อลดค่าหน่วงเวลาเฉลี่ยในการขนส่งข้อมูลลง ด้วยวิธีที่ได้ปรับปรุงมาจาก 2-Opt และ 2H-Opt คือ 2-Opt-Delay และ 2H-Opt-Delay ตามลำดับ จึงทำให้ได้เส้นทางที่มีค่าความหน่วงเวลาน้อยที่สุด จากนั้นจึงกลับมาคิดเรื่องทำอย่างไรให้ทุกสถานีในเครือข่ายได้รับความกว้างของช่องทางการสื่อสารตามที่ต้องการ โดยการเพิ่มอัตราส่วนเวลาในการสื่อสาร ระหว่างสถานีกับยานพาหนะขนส่งข้อมูล หรือก็คือปรับตารางเวลาหมายกำหนดการของยานพาหนะขนส่งข้อมูล ในการให้บริการกับแต่ละสถานี ซึ่งต้องแลกเปลี่ยนกับความยาวของเส้นทางให้บริการ หรือค่าหน่วงเวลาที่จะเพิ่มขึ้นตามมา

1.2. ในปีถัดมา Zhao (2004) เพิ่มความสนใจในประเด็นปัญหาเส้นทางยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ถูกกำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มปฏิบัติงาน ไม่สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงระหว่างทางได้ โดยนำเสนอ 2 กลวิธี วิธีแรกชื่อว่า Node-Initiated Message Ferrying Scheme (NIMF) เสนอให้ยานพาหนะขนส่งข้อมูลทำการเคลื่อนที่ตามแผนที่เส้นทางการให้บริการ ที่ได้รับตั้งแต่เริ่มต้นปฏิบัติงาน พร้อมกับประกาศเส้นทาง จุดนัดหมาย และการมาถึง ผ่านการสื่อสารไร้สายระยะไกลให้สถานีที่สามารถเคลื่อนที่ได้รับรู้ ถ้าหากสถานีใดต้องการขนถ่ายข้อมูลจะทำการร้องขอ และเคลื่อนที่ไปยังจุดนัดหมายที่ถูกกำหนดไว้ ส่วนวิธีที่สองให้ชื่อว่า Ferry-Initiated Message Ferrying Scheme (FIMF) กำหนดให้สถานีทำการร้องขอการขนถ่ายข้อมูล พร้อมกับประกาศตำแหน่งที่ตั้งของสถานีผ่านการสื่อสารไร้สายระยะไกล จากนั้นยานพาหนะขนส่งข้อมูลจะปรับเส้นทางการเคลื่อนที่ เข้าหาจุดนัดพบซึ่งใกล้ที่ตั้งของสถานี เพื่อทำการแลกเปลี่ยนข้อมูล

งานวิจัย มุ่งจำลองเครือข่ายที่ใช้ทดสอบให้มีสมมติฐานเดียวกับระบบเครือข่ายตรวจสอบไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ทั้งข้อจำกัดด้านพลังงาน พื้นที่บรรจุข้อมูลภายในสถานี และระยะทางที่สัญญาณไร้สายสามารถสื่อสารถึงกันได้ แต่จะแตกต่างกันที่วิธีแก้ไขปัญหาการสื่อสาร ทำให้เกิดข้อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลต่อพลังงานที่ใช้ ระหว่างวิธีที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาศัยยานพาหนะขนส่งข้อมูล กับวิธีปรกติที่ใช้ในระบบเครือข่ายตรวจสอบไร้สาย ในการทดลองต่อไป

การทดลองกำหนดสภาวะแวดล้อมให้ยานพาหนะขนส่งข้อมูลไม่มีข้อจำกัดด้านพลังงานและขนาดพื้นที่ความจุของข้อมูล เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ได้รับมอบหมาย แตกต่างกับสถานีที่ได้รับบริการ ที่จะเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อต้องการจะสื่อสารขนถ่ายข้อมูล อีกทั้งยังมีพลังงานและขนาดพื้นที่ความจุข้อมูลที่จำกัด

ในแต่ละสถานี แบ่งเวลาออกเป็น 2 ส่วนคือ เพื่อปฏิบัติตามภาระกิจที่ได้รับมอบหมาย และเพื่อการสื่อสาร ขนถ่ายข้อมูลกับยานพาหนะขนส่งข้อมูล ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในกลไก NIMF หรือ FIMF ก็ดี บวกกับข้อจำกัดของขนาดพื้นที่บรรจุข้อมูลที่จำกัดภายในตัวสถานีเอง ทำให้ข้อมูลที่ต้องการจะส่ง อาจมีอันต้องครบระยะเวลาตามที่ได้กำหนดไว้ ยานพาหนะขนส่งข้อมูลหรือสถานีจึงทำการทิ้งข้อมูลดังกล่าวโดยทันที

บทสรุปตอนท้ายระบุว่า ผลการทดลองกลไกการปรับปรุงเส้นทางที่ถูกนำเสนอนั้น มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลต่อหน่วยพลังงาน ดีกว่าวิธีการสื่อสารแบบเครือข่ายตรวจสอบไร้สายเฉพาะกิจ (Wireless Sensor - Ad Hoc Networks) ถึง 7 เท่า ทั้งกลไกแบบ NIMF และ FIMF พร้อม พร้อมกับทิ้งท้ายถึงโครงการที่กำลังพัฒนาคือ โครงการประยุกต์กรรมวิธียานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ถูกนำเสนอ เข้ากับระบบรถโดยสารภายในมหาวิทยาลัย โดยมีคอมพิวเตอร์พกพาส่วนตัวของนักศึกษาเสมือนสถานี

1.3. Yang (2005) สนใจในประเด็นความเสี่ยง ที่ทำให้เครือข่ายยานพาหนะขนส่งข้อมูลไม่สามารถสื่อสารกันได้ จากกรณีที่เครือข่ายได้รับบริการโดยยานพาหนะขนส่งข้อมูลเพียงคันเดียว ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องหยุดให้บริการลง เพราะได้รับแจ้งให้ทำภาระกิจใหม่หรืออาจเกิดขัดข้องโดยไม่ทราบล่วงหน้า จึงเสนอกลไกแก้ปัญหาโดยกำหนดให้สถานีแต่ละสถานีในเครือข่ายมีความสามารถปรับเปลี่ยนหน้าที่ทดแทนยานพาหนะขนส่งข้อมูลเดิมได้

ทุกสถานีในเครือข่ายได้รับข้อมูลจากยานพาหนะขนส่งข้อมูล ทำให้สามารถทราบตำแหน่ง เส้นทาง จุดนัดพบ คำสั่งและสถานะของยานพาหนะ ผ่านการช่องทางการสื่อสารอื่นเช่น การสื่อสารไร้สายระยะไกล นอกเหนือจากการสื่อสารผ่านยานพาหนะ จึงสามารถเคลื่อนที่เข้าหา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จุดนัดพบเพื่อขนถ่ายข้อมูล หรือปฏิบัติตามกลไกทดแทนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ Yang (2005) นำเสนอทั้ง 2 กลไก ดังต่อไปนี้

กลไกแรกมีชื่อว่า Successor Designation Scheme ถูกออกแบบสำหรับสถานการณ์ที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูล ต้องการจะส่งมอบหน้าที่ให้กับสถานีใดสถานีหนึ่งภายในเครือข่าย จึงทำการคัดเลือกแต่งตั้งสถานีขึ้นเป็นตัวแทนไว้ล่วงหน้า ทำหน้าที่ตรวจสอบความมีอยู่ของยานพาหนะและเข้าทดแทนเมื่อยานพาหนะหยุดให้บริการ โดยอาจใช้คุณสมบัติในด้านทรัพยากรณ์ของแต่ละสถานี เป็นเกณฑ์การพิจารณา เช่น เลือกสถานีที่เคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด มีหน่วยความจำมากที่สุด มีพลังงานเหลือมากที่สุด หรือสามารถสื่อสารระยะไกลได้ เป็นต้น

ส่วนกลไกที่สองมีชื่อว่า Distributed Election Scheme ถูกออกแบบสำหรับสถานการณ์ที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลหยุดให้บริการไปโดยไม่อาจแจ้งล่วงหน้า ไม่มีตัวแทนที่ถูกแต่งตั้ง ทำให้สถานีที่เหลืออยู่ในเครือข่ายต้องร่วมออกเสียง แต่งตั้งสถานีที่ถึงพร้อมด้วยคุณสมบัติขึ้นเป็นยานพาหนะขนส่งข้อมูลแทนหลังจากที่มีสถานีใดใดตรวจสอบพบว่า ยานพาหนะขนส่งข้อมูลหยุดให้บริการ วิธีการออกเสียงดังกล่าว เริ่มต้นจากสถานีที่ตรวจพบว่าพาหนะขนส่งข้อมูลหยุดให้บริการ นับถอยหลังเพื่อเปลี่ยนหน้าที่เป็นผู้สมัคร (Candidate) รับเลือกตั้งชิงตำแหน่งยานพาหนะขนส่งข้อมูล ตามคุณสมบัติทรัพยากรณ์ที่ตัวเองมี เช่นถ้าหน่วยความจำมาก จะมีจำนวนนับถอยหลังน้อยกว่าสถานีที่มีหน่วยความจำน้อยกว่า เป็นต้น จากนั้นจะออกเดินทางตามเส้นทางให้บริการที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลเดิมใช้งาน เพื่อพบปะสถานีผู้เลือกจนกระทั่งครบทุกสถานี แต่ถ้าหากว่าในขณะที่กำลังนับถอยหลังอยู่นั้น มีสถานีอื่นเคลื่อนที่ผ่านมาแล้วทำการประกาศตัวเป็นผู้สมัคร สถานีที่กำลังนับถอยหลังจะปรับเปลี่ยนตัวเองเป็นผู้เลือก (Elector) แทน

ในการทดลอง ระยะเวลาที่เครือข่ายไม่สามารถสื่อสารได้ จนกระทั่งคืนสู่สภาวะปรกติ (Networks Recovery Time) เป็นคุณสมบัติหลักที่ถูกตรวจสอบจากกลไกทั้ง 2 ของ เนื่องจากในแต่ละขั้นตอน ทั้งก่อนตรวจพบยานพาหนะขนส่งข้อมูลหยุดให้บริการ และกระบวนการเลือกตั้งสถานีขึ้นทดแทน ต่างก็ต้องใช้เวลาพอสมควร ถึงแม้ปรับให้น้อยลงได้ ก็จำเป็นต้องยอมแลกกับการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องกระจายข่าวแจ้งการมีอยู่ของยานพาหนะขนส่งข้อมูลให้บ่อยขึ้น หรือสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากบังคับให้ผู้สมัครเป็นยานพาหนะนับถอยหลังน้อยลงเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่วนคุณสมบัติอื่นที่เกี่ยวเนื่องในการทดลองคือ โอกาสที่กลไก Distributed

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Election Scheme จะทำงานไม่สำเร็จ เนื่องจากในบางกรณี ทุกสถานีทำตัวเป็นเข้าสมัคร ไม่มีผู้เลือกเลย ทำให้จำเป็นต้องทำกลไก Successor Designed Scheme ปิดท้ายตามมา

1.4. งานของ Bin Tariq (2006) สนใจในประเด็น ยานพาหนะขนส่งข้อมูลให้บริการภายในเครือข่ายที่สถานีสามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้ยากแก่การกำหนดจุดขนถ่ายข้อมูล (Way-point) พร้อมกับพยายามบริหารระยะเวลาที่ถูกหน่วงในการขนส่งข้อมูลให้น้อยที่สุด ดังนั้นจึงนำเสนอขั้นตอนการออกแบบเส้นทางของยานพาหนะ เพื่อให้บริการกับสถานีที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ (Node Mobility Model) อย่างชัดเจน โดยใช้ชื่อว่า Optimized Way-Point (OPWP)

รูปแบบการเคลื่อนที่ของสถานี ถูกนำเข้าสู่กระบวนการออกแบบเส้นทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูล ตามวิธี OPWP ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก แบ่งพื้นที่ของทั้งเครือข่ายออกเป็นตาราง ใช้จุดตัดทั้งหมดสร้างขึ้นเป็นชุดตัวเลือกของจุดขนถ่ายข้อมูล ค้นหาเซตของจุดขนถ่ายข้อมูล และระยะเวลาที่สามารถใช้ขนถ่ายข้อมูล (Waiting Time) จากรูปแบบการเคลื่อนที่ของสถานีที่ได้รับ ต่อจากนั้นในขั้นตอนที่สอง นำเซตจุดขนถ่ายข้อมูลที่ได้มาทำการเรียงลำดับเข้าถึงก่อนหลัง เพื่อให้เกิดเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขนส่งข้อมูล ให้บริการกับสถานีภายในเครือข่ายด้วยค่าความหน่วงเวลาน้อยที่สุด โดยอาศัยขั้นตอนวิธีศึกษาสำนึก (Heuristic) จากงานวิจัยปัญหา TSP

จากการทดลองกับชุดรูปแบบการเคลื่อนที่ของสถานีภายในเครือข่าย ผลที่ได้ระบุว่าเส้นทางในการใช้บริการของยานพาหนะขนส่งข้อมูล สามารถให้บริการด้วยค่าความหน่วงเวลาและจำนวนข้อมูลที่ถูกละทิ้ง ดีกว่าขั้นตอนวิธีทั่วไปที่ได้นำเสนอ พร้อมกับฝากข้อสังเกตไว้ว่า จากการที่ต้องการปรับค่าความหน่วงเวลาให้ลดลง อาจกระทำผ่านการเพิ่มความเร็วให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูล แต่จะกระทบกับระยะเวลาที่หยุดให้บริการในแต่ละจุดขนถ่ายข้อมูล ต่อเนื่องถึงโอกาสที่แต่ละสถานีจะได้รับบริการลดลงตามมา

ข้อดีในเรื่องขั้นตอนวิธีที่นำเสนอคือ ไม่รบกวนการทำงานของสถานีที่เคลื่อนที่ได้ระหว่างเครือข่ายกำลังทำงาน และสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพขั้นตอนออกแบบเส้นทางการให้บริการของยานพาหนะขนส่งข้อมูลโดยอาศัยข้อมูลการเคลื่อนที่ของแต่ละสถานีภายในเครือข่าย เลือกจุดขนถ่ายข้อมูลที่เหมาะสมจากจุดขนถ่ายข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดในเครือข่าย ผ่านขั้นตอนวิธีพื้นฐานจากปัญหา TSP

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อเริ่มงานวิจัยที่อาศัยยานพาหนะขนส่งข้อมูลเดี่ยว ในการแก้ปัญหาเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกันเกิดขึ้นมาได้สักระยะ ก็มีงานวิจัยต่อเนื่อง นำเสนอการใช้กลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล เพื่อช่วยเสริม หรือแก้ปัญหาในประเด็นที่แตกต่างไป

2. งานวิจัยที่ใช้กลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล

2.1. งานของ Zhao (2005) มีเป้าหมายคล้ายกับงาน Zhao (2003) กล่าวคือ ต้องการแก้ปัญหาเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน โดยนำเสนอขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางสำหรับยานพาหนะขนส่งข้อมูล เพื่อให้บริการขนส่งข้อมูลระหว่างสถานีภายในเครือข่ายตรงตามปริมาณความต้องการของทุกสถานีในเครือข่าย โดยเป้าหมายให้เกิดความล่าช้าในการขนส่งข้อมูลน้อยที่สุด แตกต่างกันที่จำนวนยานพาหนะที่ให้บริการสามารถมีได้มากกว่าหนึ่ง และข้อมูลสามารถสืบทอดโดยอาศัยสถานีหรือยานพาหนะระหว่างต้นทางกับปลายทางได้

ลำดับการทำงานของขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล เริ่มต้นจากกำหนดสถานีให้กับยานพาหนะ โดยที่แต่ละสถานีสามารถได้รับบริการจากยานพาหนะได้มากกว่าหนึ่ง จากนั้นจึงทำการคำนวณเส้นทางของยานพาหนะในการให้บริการกับสถานีที่ได้รับมอบหมาย โดยไม่คำนึงถึงความกว้างของช่องทางการสื่อสารที่แต่ละการเชื่อมต่อระหว่างคู่สถานีต้องการ และสุดท้าย ทำการปรับปรุงเส้นทางการให้บริการของทุกยานพาหนะขนส่งข้อมูลให้ความกว้างของช่องทางการสื่อสารในแต่ละการเชื่อมต่อระหว่างคู่สถานี พอเพียงต่อความความต้องการ

จากรูปแบบการให้บริการโดยกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล และความสามารถในการสืบทอดข้อมูลระหว่างสถานีต้นทางกับปลายทาง Zhao (2005) จึงได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบเส้นทาง ตามสมมติฐานการมีปฏิสัมธ์ของยานพาหนะขนส่งข้อมูล 4 แบบ ดังนี้ Single-Route Algorithm (SIRA) ทุกสถานีได้รับบริการ โดยยานพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดในเครือข่ายใช้เส้นทางเดียวกัน แต่ให้บริการในเวลาที่ต่างกัน Multi-Route Algorithm (MURA) มีการกำหนดสถานีให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูล ที่มีเส้นทางให้บริการแตกต่างกัน และไม่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ Node-Relaying Algorithm (NRA) มีการกำหนดสถานีให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูล ที่มีเส้นทางให้บริการแตกต่างกัน และไม่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ แต่จะอาศัยสถานีระหว่างต้นต้นทางกับปลายทาง เป็นสถานีพักข้อมูล (Relay Node) รอให้ยานพาหนะอื่นสืบทอดข้อมูลต่อไป Ferry-Relaying Algorithm (FRA) มีการกำหนดสถานีให้กับยานพาหนะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขนส่งข้อมูล ที่มีเส้นทางให้บริการแตกต่างกัน และสามารถสืบทอดข้อมูลระหว่างกันจนกระทั่งนำข้อมูลไปถึงปลายทางได้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ ต้นทุนตามจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ให้บริการ กับประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น เช่น ปริมาณข้อมูลต่อช่วงเวลา ค่าความหน่วงในการขนส่งข้อมูล และความต้องการด้านทรัพยากรณ์ในระบบ เป็นต้น ทำให้ทราบว่า ขั้นตอนวิธี MURA และ SIRA ต่างก็ทำงานได้ดี มีค่าความหน่วงเวลาต่ำ แต่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรณ์ในแต่ละสถานีสูง แตกต่างจาก NRA และ FRA ที่ใช้ทรัพยากรณ์ประหยัดกว่า

การใช้ยานพาหนะขนส่งข้อมูลจำนวนมากกว่าหนึ่งในการให้บริการ นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการแล้ว ยังเพิ่มความทนทานให้กับเครือข่าย ต่อความเสี่ยงที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลบางส่วนจะไม่สามารถให้บริการได้ แต่อย่างไรก็ดี ในส่วนของการออกแบบ และการทดลอง ไม่ได้มุ่งเน้นความทนทาน ความน่าเชื่อถือในการได้รับบริการของสถานีภายในเครือข่ายแต่ประการใด

2.2. งานของ Zhang (2007) นำเสนอขั้นตอนวิธีในการออกแบบเส้นทาง ให้กับปัญหาเดียวกับงานวิจัยของ Zhao (2005) จำนวน 3 วิธี แบ่งตามโครงสร้างการเชื่อมต่อคือ Single Route Topology (SRT) Multiple Route of Tree Topology (MRT-Tree) และ Multiple Route of Grid Topology (MRT-Grid) ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้ถูกออกแบบในงานเดียวกันนี้ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล กับประสิทธิภาพที่ได้ ความหน่วงเวลาในการขนส่งข้อมูล และขนาดความจุของสื่อบันทึกข้อมูล คือตัวแปรที่ใช้ความสนใจ

ขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางแบบ SRT คือการที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดถูกกำหนดให้ใช้เส้นทางเดียวกัน เว้นระยะห่างเท่ากัน และกระจายตัวตลอดเส้นทาง ให้บริการกับสถานีทั้งหมดในเครือข่ายโดยไม่อาศัยสถานีระหว่างทางเป็นสถานีพักข้อมูลระหว่างทาง ต่างกับขั้นตอนวิธี MRT ทั้งสองแบบที่เหลือ กล่าวคือ จะพยายามแบ่งกลุ่มสถานีให้ได้เท่ากับจำนวนของยานพาหนะขนส่งข้อมูล จากนั้นจึงทำการกำหนดสถานีพักข้อมูล ที่มียานพาหนะขนส่งข้อมูลมากกว่าหนึ่งคันให้บริการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อที่จะลดค่าหน่วงเวลาในการขนส่งข้อมูล ขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางแบบ MRT จึงมีหลักการในการเลือกสถานีพักข้อมูลว่า พยายามให้คู่สถานีสื่อสารพึ่งพายานพาหนะขนส่งข้อมูลจำนวนน้อยคันมากที่สุด และพยายามให้ส่วนของเส้นทางซ้อนทับกันให้น้อยที่สุด ซึ่งนำเสนอออกมา 2 รูปแบบคือ MRT-Tree ที่อาศัยสถานีเดียวในการเชื่อมระหว่างคู่เส้นทางให้บริการของยานพาหนะขนส่งข้อมูล และแบบ MRT-Grid ที่เพิ่มเติมขั้นตอนวิธีอีกว่า ทุกสถานีที่สามารถผ่านได้มากกว่าหนึ่ง ให้กำหนดเป็นสถานีพักข้อมูล เชื่อมระหว่างกลุ่มเส้นทางให้บริการ

ผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นถึงข้อเปรียบเทียบของแต่ละขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอ ภายใต้คุณสมบัติค่าหน่วงเวลาในการขนส่งข้อมูล และขนาดความจุข้อมูลที่จำเป็นในยานพาหนะขนส่ง ที่ขึ้นกับรูปแบบปริมาณข้อมูลที่จำลองมา อย่างขั้นตอนวิธี SRT พบว่ามีข้อดีคือไม่ต้องการขนาดความจุข้อมูลมาก เนื่องจากมียานพาหนะขนส่งข้อมูลให้บริการอย่างต่อเนื่อง แบ่งแย่งให้บริการกับสถานี แต่จะมีข้อเสียที่ค่าความหน่วงเวลาในการขนส่งข้อมูลนั้น ไม่สามารถทำได้ดีเท่าขั้นตอนวิธีอื่นที่นำเสนอ ส่วนขั้นตอนวิธี MRT-Tree นั้นค่าความหน่วงเวลาจะน้อยที่สุดตามมาด้วยขั้นตอนวิธี MRT-Grid แต่กลับจำเป็นต้องใช้ขนาดความจุข้อมูลมากกว่าขั้นตอนวิธี SRT เช่นกัน

ข้อสังเกตจากขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางให้กับยานพาหนะที่นำเสนอ วิธีแบ่งกลุ่มสถานีให้กับเส้นทาง และวิธีเลือกสถานีพักข้อมูล เพื่อให้ทุกเส้นทางเชื่อมต่อเครือข่ายทั้งหมดได้ ไม่ได้เน้นเรื่องการคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดแต่อย่างใด

งานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกันโดยการอาศัยยานพาหนะขนส่งข้อมูล ถึงแม้จะสนใจในประเด็นที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Zhao (2004) ต้องการให้ยานพาหนะขนส่งข้อมูลสามารถปรับเส้นทางได้ขณะให้บริการ ขณะที่ Yang (2005) ต้องการให้มียานพาหนะขนส่งข้อมูลใหม่มาทำหน้าที่แทนเมื่อยานพาหนะเดิมไม่สามารถให้บริการได้ ส่วนงานของ Bin Tariq (2006) มุ่งเน้นในการกำหนดจุดขนถ่ายข้อมูลที่เหมาะสม เป็นต้น แต่ก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันดังที่ได้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย ใช้กลุ่มยานพาหนะในการให้บริการ เน้นปรับปรุงประสิทธิภาพการขนส่งข้อมูลให้ค่าความหน่วงเวลาน้อยที่สุด เน้นเรื่องความน่าเชื่อถือได้ที่แต่ละสถานีจะได้รับบริการ และต้องการประหยัดพลังงานในสถานี ในยานพาหนะ หรือทั้งหมดของเครือข่าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบงานวิจัยยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ได้กล่าวมา

งานวิจัย	ลักษณะที่ปรากฏ			
	กลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล	ลดค่าความหน่วงเวลาขนส่ง	เพิ่มความน่าเชื่อถือ	ประหยัดพลังงาน
Zhao (2003)		X		
Zhao (2004)		X		X
Yang (2005)		X	X	
Bin Tariq (2006)		X		
Zhao (2005)	X	X		
Zhang (2007)	X	X		
งานวิจัยนี้	X		X	X

สำหรับงานวิจัยนี้ ให้ความสนใจในประเด็นเรื่องความน่าเชื่อถือได้ ที่แต่ละสถานียังคงได้รับบริการยานพาหนะขนส่งข้อมูลอื่น เมื่อบางส่วนของยานพาหนะในกลุ่มไม่สามารถให้บริการได้ตามปรกติ พร้อมกับให้ความสำคัญกับการประหยัดพลังงานในการทำงานของยานพาหนะขนส่งข้อมูล ซึ่งแตกต่างจากงานของ Zhao (2004) ที่มุ่งประหยัดพลังงานในแต่ละสถานี ดังนั้นจึงให้ความสนใจในการออกแบบเส้นทางสำหรับกลุ่มยานพาหนะให้เหมาะสมที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูง
   1.1 หน่วยประมวลผล Intel(R), Core(TM) 2 Quad, Q6600, 2.40 GHz
   1.2 หน่วยความจำ 4 GB

2. ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux) รุ่น 2.6.24-27-Server SMP

3. ตัวแปลภาษาไพธอน (Python) รุ่น 2.5.2

วิธีการ

เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ปัญหา จำลองรูปแบบปัญหา นำเสนอวิธีการแก้ไข และทดสอบสิ่งที่ได้นำเสนอในตอนท้าย

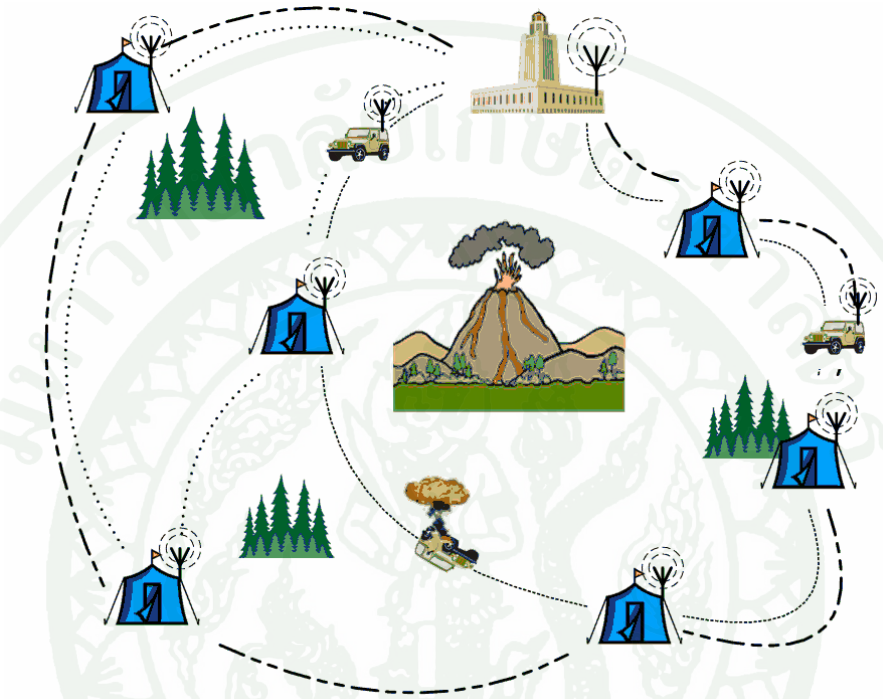
1. นิยามปัญหา

ในสภาพแวดล้อมเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกันที่มีพลังงานจำกัด การสูญเสียยานพาหนะขนส่งข้อมูล อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสื่อสารระหว่างสถานีบางส่วนหรือทั้งหมด ดังนั้นจึงมุ่งเน้นไปที่การค้นหาขั้นตอนวิธีสังเคราะห์เส้นทางที่ยืนยันได้ว่า หากยานพาหนะสูญหายไปจำนวนหนึ่งแล้ว เครือข่ายจะยังคงสื่อสารข้อมูลได้อย่างทั่วถึง พร้อมกับช่วยให้การใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุดอีกด้วย

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาในบทก่อนหน้านี้สามารถจำลองได้ดังภาพที่ 4 โดยยานพาหนะขนส่งข้อมูลเริ่มต้นที่สถานีหลัก ได้รับแจกจ่ายเส้นทางที่ถูกคำนวณเพียงครั้งแรกครั้งเดียว แล้วให้บริการกับสถานีในเครือข่ายตามเส้นทางจนกระทั่งกลับมาจบการทำงานในหนึ่งเส้นทางที่สถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลักอีกครั้ง ซึ่งในสภาวะการปรกติจะสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่หากเกิดปัญหาขึ้นกับยานพาหนะขนส่งข้อมูลจะยังคงรักษาความสามารถในการเชื่อมต่อเครือข่ายของทุกสถานีได้ โดยอนุมานว่าสถานีและเส้นทางไม่ถูกทำลาย



ภาพที่ 4 เครือข่ายยานพาหนะขนส่งข้อมูลในสภาพแวดล้อมเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน

รูปแบบการใช้พลังงานในเครือข่ายยานพาหนะขนส่งข้อมูล สามารถแยกแยะออกได้หลายส่วน เช่นส่วนของสถานีหลักที่ให้การรักษาพยาบาล ส่วนของสถานีย่อยที่ต้องดูแลแต่ละพื้นประสบภัยเบื้องต้น หรือในส่วนของการเดินทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ถือเอาส่วนสุดท้ายที่กล่าวมา เป็นประเด็นเป้าหมายหมายหลักเพื่อออกแบบเส้นทางให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด โดยกำหนดให้รูปแบบการใช้พลังงานจากยานพาหนะขนส่งข้อมูล แปรผันโดยตรงกับระยะทางการให้บริการที่ได้รับ กำหนดให้ระยะทางทั้งขาไปและขากลับระหว่างสถานีมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากัน ถึงแม้ในทางปฏิบัติจะไม่เป็นเช่นนั้นก็ตาม (การเดินทางจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำและกลับกันนั้น ใช้พลังงานไม่เท่ากัน) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา

ในสถานการณ์จริง ทางที่เชื่อมต่อระหว่างทุกคู่สถานีอาจมีไม่ครบทั้งหมด บางครั้งการเดินทางจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทาง จำเป็นต้องผ่านบางสถานีระหว่างทางเสียก่อน ทำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ให้ซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นในการงานวิจัยนี้จึงตั้งสมมติฐานเบื้องต้นว่า ทุกสถานีในเครือข่ายมีทางเชื่อมระหว่างคู่สถานีทั้งหมด ซึ่งถึงแม้ว่าในสถานการณ์จริงจะไม่เป็นดังนั้น ก็สามารถอาศัยขั้นตอนวิธี All-pairs Shortest Paths (Floyd, 1962) เพื่อปรับปรุงเครือข่ายให้เชื่อมถึงกันทุกคู่สถานีก่อนการคำนวณได้

ส่วนยานพาหนะขนส่งข้อมูลนั้น มีพื้นที่เก็บข้อมูลและพลังงานไม่จำกัด เมื่อได้รับมอบเส้นทางการเคลื่อนที่จากสถานีหลักแล้วจะให้บริการกับสถานีภายในเครือข่ายเป็นวงรอบอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วคงที่ มีต้นทางและปลายทางที่สถานีศูนย์บัญชาการ

วัตถุประสงค์ของปัญหาที่ได้นิยามข้างต้นคือ การออกแบบเส้นทางกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด ซึ่งหากนำเสนอวิธีแก้ปัญหาแบบตรงไปตรงมา คือการออกแบบให้ทุกเส้นทางสำหรับแต่ละยานพาหนะขนส่งข้อมูลมีระยะทางที่สั้นที่สุด แต่ทว่าหากคำนึงถึงแนวทางปฏิบัติโดยตรงแล้ว อาจมียานพาหนะขนส่งข้อมูลบางคันให้บริการกับสถานีอย่างล่าช้าหรือพลังงานหมดอย่างรวดเร็ว เพราะได้รับเส้นทางที่ยาวกว่าเส้นทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูลอื่น ก็เป็นไปได้

ดังนั้นขอนำเสนอแนวทางแก้ปัญหาออกเป็น 2 วัตถุประสงค์คือ แนวทางแรกต้องการให้ระยะทางรวมของทุกเส้นทางมีค่าน้อยที่สุด ส่วนในอีกแนวทางหนึ่งต้องการให้ระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มเส้นทางมีระยะทางน้อยที่สุด เป็นสองแนวทางที่เน้นวัตถุประสงค์การประหยัดพลังงานต่างกัน

ทั้งหมดนี้เป็นสมมติฐานลักษณะการทำงานของเครือข่ายสำหรับงานวิจัยนี้ ต่อไปจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอได้ ต่อไป

2. จำลองปัญหาในรูปแบบคณิตศาสตร์

ปัญหาที่กล่าวมาสามารถสร้างแบบจำลองได้ตามทฤษฎีกราฟ โดยนิยามให้ V แทนเซตของทุกสถานีทั้งหมดในเครือข่าย อันประกอบด้วย $v_1, v_2, \ldots, v_n$ รวมทั้งสิ้น n สถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$V = \{ v_1, v_2, \ldots, v_n \} \quad (1)$$

ในแต่ละสถานีมีทางเชื่อมต่อกันหรือไม่นั้น หาได้จากเซตของทางเชื่อมต่อระหว่างคู่สถานี E เช่น ระหว่างสถานี v_1 กับ v_3 จะมีทางเชื่อมต่อเมื่อมีคู่ลำดับ (v_1, v_3) เป็นสมาชิกอยู่ภายในเซต E

$$E = \{ (v_i, v_j) \mid \text{ถ้ามีเส้นเชื่อมระหว่างสถานี } v_i \text{ ถึง } v_j \} \quad (2)$$

ระยะทางระหว่างคู่สถานีใดใดสามารถหาได้จากฟังก์ชันแสดงระยะทาง d โดยสอดคล้องกับสมมติฐานตามแบบจำลองในงานวิจัยนี้คือ $d(v_i, v_j) = d(v_j, v_i)$ เป็นไปในลักษณะของ Undirected Graph (ซึ่งหากในงานวิจัยต่อไปต้องการปรับให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริง ก็สามารถปรับเปลี่ยนได้ในจุดนี้)

$$d : E \to \Re^+ \mid d(v_i, v_j) = \text{ระยะทางระหว่างสถานี } v_i \text{ ถึง } v_j \quad (3)$$

เมื่อรวมนิยามกล่าวมาในสมการที่ผ่านมาเข้ากับค่าอื่นที่ถูกกำหนดด้วยความต้องการจากผู้ที่ต้องการออกแบบเส้นทาง คือ จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดของเครือข่าย m จำนวนพาหนะขนส่งข้อมูลขั้นต่ำที่ให้บริการกับสถานี k และสถานีหลักที่เส้นทางของทุกพาหนะขนส่งข้อมูลต้องเริ่มและจบที่สถานีนี้ h ทำให้ได้ข้อมูลในการประมวลผลตามขั้นตอนวิธี เป็นชุดสิ่งอันดับดังนี้คือ

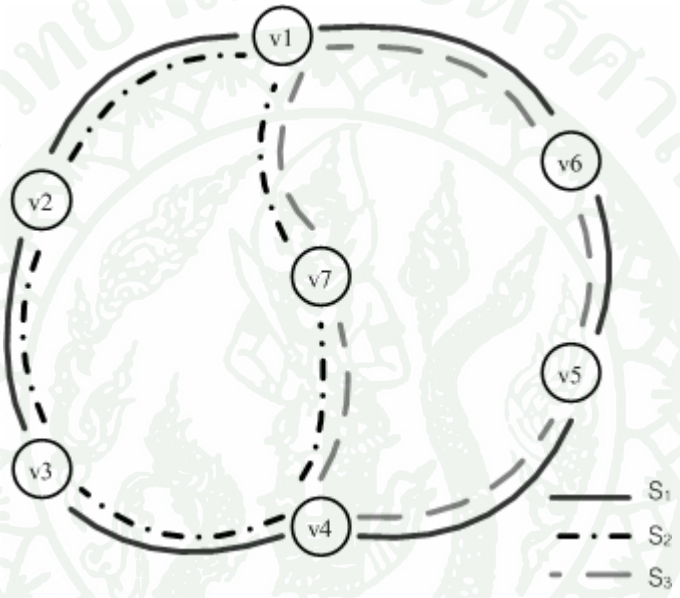
$$(V, E, d, m, k, h) \quad (4)$$

ขั้นตอนวิธีมุ่งเน้นออกแบบเส้นทางสำหรับพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดให้สั้นที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ใช้พลังงานรวมน้อยที่สุด พร้อมกับสามารถบริการแต่ละสถานีได้ตามความต้องการขั้นต่ำด้วย จึงจำเป็นต้องนิยามฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (Constraint Function) เพื่อการคำนวณ ดังนั้นจึงขอเริ่มต้นจากนิยามให้ S_j แทนคู่ลำดับของสถานีในเส้นทางของพาหนะขนส่งข้อมูลที่ j อันประกอบด้วยสมาชิกระบุสถานีที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลผ่านตามลำดับ $v_{j,1}, v_{j,2}, \ldots, v_{j,n_j}$ เมื่อ n_j คือจำนวนของสถานีในแต่ละเส้นทาง

$$S_j = (v_{j,1}, v_{j,2}, \ldots, v_{j,n_j}) \quad (5)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังเช่นภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างเส้นทางที่มอบให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูลจำนวน $m = 3$ เพื่อให้บริการกับสถานีทั้งเครือข่าย $n = 7$ และต้องให้บริการขั้นต่ำ $k = 2$ จะเห็นได้ว่า หากให้เส้นทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ $j = 1$ จะได้ S_1 ประกอบด้วย $v_{1,1}=v_1$, $v_{1,2}=v_2$, $v_{1,3}=v_3$, $v_{1,4}=v_4$, $v_{1,5}=v_5$, $v_{1,6}=v_6$, $v_{1,7}=v_1$ หากให้เส้นทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ $j = 2$ จะได้ S_2 ประกอบด้วย $v_{2,1}=v_1$, $v_{2,2}=v_2$, $v_{2,3}=v_3$, $v_{2,4}=v_4$, $v_{2,5}=v_7$, $v_{2,6}=v_1$ และหากให้เส้นทางของยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ $j = 3$ จะได้ S_3 ประกอบด้วย $v_{3,1}=v_1$, $v_{3,2}=v_7$, $v_{3,3}=v_4$, $v_{3,4}=v_5$, $v_{3,5}=v_6$, $v_{3,6}=v_1$



ภาพที่ 5 ตัวอย่างเครือข่ายที่มี n=7 m=3 k=2

ต่อมาทำการกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขโดยอาศัยฟังก์ชัน r เพื่อตรวจสอบว่าพาหนะขนส่งข้อมูลที่ให้บริการในเส้นทาง S_j ได้ให้บริการสถานี v_i หรือไม่

$$r(v_i, S_j) = \begin{cases} 1, & v_i \in S_j \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{6}$$

ซึ่งเมื่อนับรวมครบทุกเส้นทางแล้วก็จะได้จำนวนพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดที่ให้บริการสถานี v_i ดังนี้

$$\forall_{v_i \in V} \sum_{1 \le j \le M} r(v_i, S_j) \ge k \tag{7}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ท้ายสุดจึงได้ฟังก์ชันเป้าหมายที่พยายามให้ความยาวโดยรวมของทุกเส้นทางมีค่าน้อยที่สุด คือ

$$\min \sum_{1\le j\le m} \sum_{1\le i\le n_j} d\left(v_{j,i}, v_{j,i+1}\right) \tag{8}$$

ส่วนฟังก์ชันเป้าหมายที่พยายามให้เส้นทางที่ยาวที่สุดมีระยะทางสั้นที่สุดจะได้ว่า

$$\min\left(\max\left(\sum_{1\le i\le n_j} d\left(v_{j,i}, v_{j,i+1}\right) \right)\Bigg|_{1\le j\le m} \right) \tag{9}$$

ทั้งนี้เส้นทางให้บริการของทุกยานพาหนะขนส่งข้อมูลมีลักษณะ 3 ประการได้แก่ ทางเชื่อมระหว่างคู่สถานีในทุกเส้นทางจะต้องเป็นสมาชิกของเซต E โดยที่ทุกสถานีในเส้นทางจะต้องอยู่ภายในเครือข่าย และมีสถานีเริ่มต้นกับสถานีสุดท้ายเป็นสถานีเดียวกัน ดังนี้

$$\forall_{1\le i\le n_j} \left(v_{j,i}, v_{j,i+1}\right) \in E \tag{10}$$

$$S_j \subset V \tag{11}$$

$$v_{j,1} = v_{j,n_j} = h \tag{12}$$

3. ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในการออกแบบเส้นทาง

การคำนวณเส้นทางให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดนั้น ต้องอาศัยการพิจารณาเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้เรียกว่า Brute Force Algorithm (Friedman, 1997) ถึงแม้จำนวนสถานีเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการคำนวณนานขึ้นตามอย่างมหาศาลก็ตาม แต่คำตอบที่ได้ก็รับประกันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดแน่นอน จึงขอเรียกว่า*ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Method)* แต่สำหรับงานวิจัยนี้ขอนำเสนอ Heuristic Algorithm (Pearl, 1985) ที่มีชื่อเรียกว่า *ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม (Grouping Method)* สำหรับคำนวณหาเส้นทางดังกล่าวในระยะเวลาที่เหมาะสม โดยอาศัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แนวความคิดที่ว่า หากลดจำนวนของยานพาหนะขนส่งข้อมูลในการคำนวณลงได้จำนวนของคำตอบย่อมลดลง เป็นผลให้ระยะเวลาในการคำนวณลดลงในที่สุด

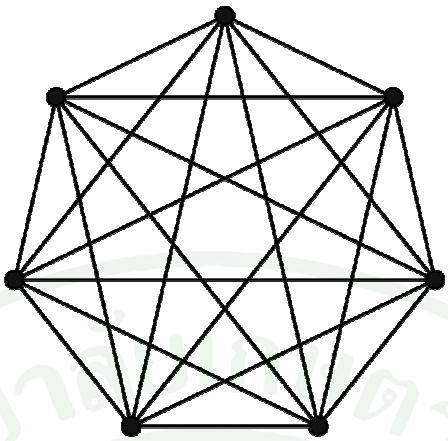
สำหรับวัตถุประสงค์ในการประหยัดพลังงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ความต้องการให้ระยะทางรวมของกลุ่มเส้นทางการให้บริการของยานพาหนะขนส่งข้อมูลสั้นที่สุด กับความต้องการให้เส้นทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มมีระยะทางสั้นที่สุดนั้น ต่างก็สามารถอาศัยขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นได้เหมือนกัน จึงขอนิยามชื่อขั้นตอนวิธีทั้งสองสำหรับสองวัตถุประสงค์ที่แตกต่างได้เป็น 4 ขั้นตอนวิธีดังต่อไปนี้คือ ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (Opt All) ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (GM All) ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (Opt Max) และขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (GM Max) ซึ่งจะถูกอ้างอิงถึงในหัวข้อถัดไป

3.1. ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Method)

คำตอบที่ดีที่สุดคือ เซตของเส้นทางให้บริการของทุกพาหนะขนส่งข้อมูลที่มีระยะทางรวมสั้นที่สุด และทำให้แต่ละสถานีมีจำนวนพาหนะขนส่งข้อมูลให้บริการขั้นต่ำเป็นไปตามเงื่อนไข ทั้งนี้เกิดจากการแจกแจงทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ในรูปของลำดับการให้บริการสถานีแล้วกำหนดเส้นทางเหล่านั้นให้กับแต่ละพาหนะขนส่งข้อมูล จนเกิดขึ้นเป็นหนึ่งคำตอบ ก่อนจะนำแต่ละคำตอบมาเปรียบเทียบระยะทางรวมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดต่อไป

เบื้องต้น ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ว่าเครือข่ายที่ได้รับเพื่อใช้ออกแบบเส้นทาง อาจไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อถึงกันทั้งหมด แต่ในขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดนี้ ต้องการสร้างกราฟสมบูรณ์ (Complete Graph) ดังตัวอย่างในภาพที่ 6 อันประกอบด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุดจากทุกคู่สถานีภายในกราฟเริ่มต้น เพื่อประโยชน์ในการอ้างอิงระยะทางระหว่างคู่สถานีที่ทำการสื่อสารกัน ดั้งนั้นจึงต้องอาศัยขั้นตอนวิธี All-pairs Shortest Paths (Floyd, 1962) ซึ่งมีความซับซ้อนในแบบ $\Theta(n^3)$ อันถือว่าน้อยกว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนออยู่ขณะนี้มากจนสามารถละเว้นในการคำนวณระยะเวลาการทำงานของขั้นตอนวิธีโดยรวมได้ นอกจากนี้ขั้นตอนวิธีดังกล่าวยังทำให้จำนวนเส้นเชื่อมระหว่างสถานี (Edge) จากข้อมูลเครือข่ายต้นฉบับที่ถูกป้อน ไม่มีผลต่อความซับซ้อนของขั้นตอนวิธี

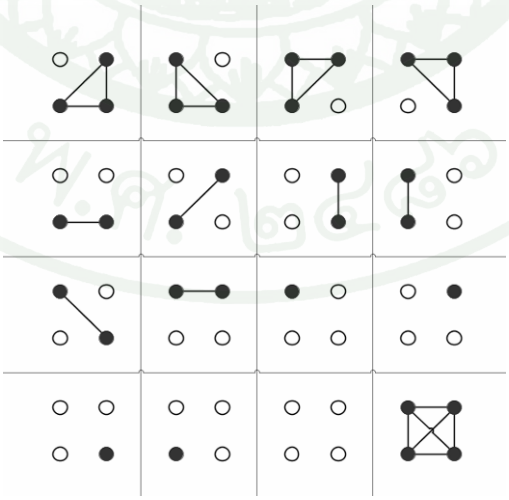
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 กราฟสมบูรณ์ n=7

จากนั้น เพื่อหาเส้นทางการให้บริการที่เป็นไปได้ จึงทำการแจกแจงจัดกลุ่มสถานีออกมาเป็นซับเซตที่เป็นไปได้ทั้งหมดของกราฟเริ่มต้น เรียกว่าซับกราฟ (Subgraph) ดังตัวอย่างในภาพที่ 7 แสดงซับกราฟของกราฟสมบูรณ์ที่ n=4 นำมาจัดเก็บในรูปเพาเวอร์เซต (Power Set) ของกราฟเริ่มต้น ที่สามารถแจกแจงได้ถึง 2^n เส้นทาง แต่ถ้าหากไม่นับรวมเส้นทางที่ปราศจากสถานีใดใดและไม่รวมเส้นทางที่ปราศจากสถานีหลักแล้ว จะได้เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด t เส้นทางคือ

$$t = 2^{n-1} - 1 \qquad (13)$$



ภาพที่ 7 ซับกราฟจากกราฟสมบูรณ์ n=4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายยานพาหนะขนส่งข้อมูลทุกคันจะทำการเลือกเส้นทางให้บริการจากเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยที่แต่ละยานพาหนะขนส่งข้อมูลสามารถเลือกเส้นทางซ้ำกันได้ ยกตัวอย่างเช่นสมมติว่ามีเส้นทางที่เป็นได้ทั้งหมดสามเส้นทางคือ { a, b, c } จะมีกลุ่มเส้นทางที่เป็นไปได้เมื่อเลือกมาสองเส้นทางคือเซต { $\{a, a\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, b\}, \{b, c\}, \{c, c\}$ } ซึ่งลักษณะดังที่กล่าวมานี้ถูกเรียกว่า การจัดกลุ่มแบบเลือกซ้ำได้ (Combinations with Repetition) (Gossett, 2009) คือการเลือกเส้นทางจำนวน n เส้นทางออกมาให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูล m โดยในแต่ละครั้งของการเลือกนั้นสามารถเลือกเส้นทางซ้ำกันได้

ภาคผนวก ก ได้สรุปความสัมพันธ์ของจำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณาจากขึ้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด $OPT(n, m)$ ซึ่งมีจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m และจำนวนสถานีในเครือข่าย n ดังนี้

$$\begin{aligned} OPT(n,m) &= \binom{t+m-1}{m} \\ &= \binom{2^{n-1}-1+m-1}{m} \\ &= \frac{\left(2^{n-1}-2+m\right)!}{\left(2^{n-1}-2\right)!\,m!} \end{aligned} \tag{14}$$

ต่อจากนี้ไป คำตอบทั้งหมดที่เป็นไปได้จะถูกนำมากลั่นกรองด้วยฟังก์ชันเงื่อนไข ซึ่งถ้าเซตของเส้นทางสามารถพาพาหนะขนส่งข้อมูลให้บริการกับแต่ละสถานีได้ไม่น้อยกว่าจำนวนที่กำหนด จึงนำคำตอบดังกล่าวมาพิจารณาเปรียบเทียบว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดหรือไม่ต่อไป

3.2. ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม (Grouping Method)

ข้อสังเกตคือ จำนวนสถานีเป็นตัวกำหนดจำนวนเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ของพาหนะขนส่งข้อมูล และคำตอบที่เป็นไปได้เกิดจากการนำเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้มาจัดหมู่ให้ได้เซตที่มีสมาชิกเท่ากับจำนวนพาหนะขนส่งข้อมูล จึงสามารถกล่าวได้ว่า ตัวแปรที่กำหนดความซับซ้อนในขั้นตอนวิธีการคำนวณออกแบบเส้นทาง เกิดจากจำนวนสถานีและจำนวนของพาหนะขนส่งข้อมูล ซึ่งหากละเว้นเป้าหมายคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ย่อมลดจำนวนคำตอบที่ต้องพิจารณาลง จะทำให้ลดระยะเวลาการทำงานของขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางลงได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังนั้นเพื่อลดจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลในการคำนวณขั้นตอนวิธีแต่ละครั้ง จึงได้เสนอวิธีคิดให้แบ่งพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็นกลุ่ม เท่ากับจำนวนความต้องการขั้นต่ำที่แต่ละสถานีต้องได้รับบริการ โดยที่สถานีทั้งหมดในเครือข่ายจะได้รับบริการจากแต่ละกลุ่มเพียงหนึ่งยานพาหนะขนส่งข้อมูลเท่านั้น ซึ่งเมื่อรวมการให้บริการจากทุกกลุ่มแล้ว เป็นผลให้แต่ละสถานีในเครือข่ายได้รับบริการตามความต้องการขั้นต่ำตามต้องการ

$$m_g = \begin{cases} \lfloor m/k \rfloor + 1 & , g \le m \bmod k \\ \lfloor m/k \rfloor & , otherwise \end{cases} \tag{15}$$

จำนวนสมาชิกในแต่ละกลุ่มถูกกำหนดโดยสมการข้างต้นเมื่อ m_g แทนจำนวนพาหนะขนส่งข้อมูลภายในกลุ่ม และ g แทนลำดับของกลุ่มมีค่าตั้งแต่ 1..k พบว่าจำนวนสมาชิกพาหนะขนส่งข้อมูลในแต่ละกลุ่มมีค่าที่เป็นไปได้ไม่เกินสองค่า จึงสามารถเลือกที่จะคำนวณหาเส้นทางที่ดีที่สุดเพียงแค่สองกลุ่มที่จำนวนสมาชิกพาหนะขนส่งข้อมูลแตกต่างกันเท่านั้น ส่วนที่เหลือก็ใช้คำตอบเดียวกันกับแต่ละกลุ่มที่มีจำนวนพาหนะขนส่งข้อมูลเท่ากัน ทำให้ลดระยะเวลาการทำงานลงไปได้ ยกตัวอย่างมียานพาหนะขนส่งข้อมูลจำนวน m เท่ากับเจ็ด ต้องการให้สถานีในเครือข่ายได้รับบริการขั้นต่ำ k เท่ากับสี่ จะได้ m_g ตามสมการ 15 จะได้คู่ลำดับของจำนวนยานพาหนะในแต่ละกลุ่มดังนี้ (m_1=2, m_2=2, m_3=2, m_4=1)

สำหรับปัญหาการคำนวณหาเส้นทางให้กับกลุ่มย่อยของยานพาหนะซึ่งมีจำนวน m_g คันเพื่อให้แต่ละสถานีได้รับบริการจากเพียงหนึ่งยานพาหนะ มีลักษณะเดียวกับปัญหา Multiple Traveling Salesman (MTSP) (Gavish and Srikanth, 1986) นั่นคือการค้นหาว่า มีกี่วิธีในการแบ่งกลุ่มสถานีให้กับแต่ละยานพาหนะเท่ากับจำนวน m_g คัน โดยไม่จำเป็นต้องเท่ากัน แต่ทุกคันต้องให้บริการกับอย่างน้อยหนึ่งสถานี (ยกเว้นสถานีหลัก เพราะทุกยานพาหนะต้องเริ่มต้นที่นี่ ดังนั้นในที่นี้จะใช้ $n' = n$-1 แทนจำนวนสถานีที่ถูกจัดแบ่งให้กับแต่ละยานพาหนะขนส่งข้อมูล) เพื่อที่หลังจากนั้นจะนำกลุ่มสถานีในเส้นทางไปหาลำดับจนเกิดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ภาคผนวก ข สามารถสรุปความสัมพันธ์ $g(n',m')$ ของจำนวนวิธีแบ่งกลุ่มสถานีเมื่อไม่รวมสถานีหลัก จำนวน n' สถานี และจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ผ่านการแบ่งแล้วจากสมการ 15 ให้ m' เท่ากับ m_g จะได้ว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$g(n',m')=\begin{cases}0 & ,m'>n' \\ 1 & ,m'=n' \vee m'=1 \\ \sum_{i=0}^{n'-m'}\binom{n'-1}{i}\cdot g(n'-1-i,m'-1) & ,otherwise\end{cases} \quad (16)$$

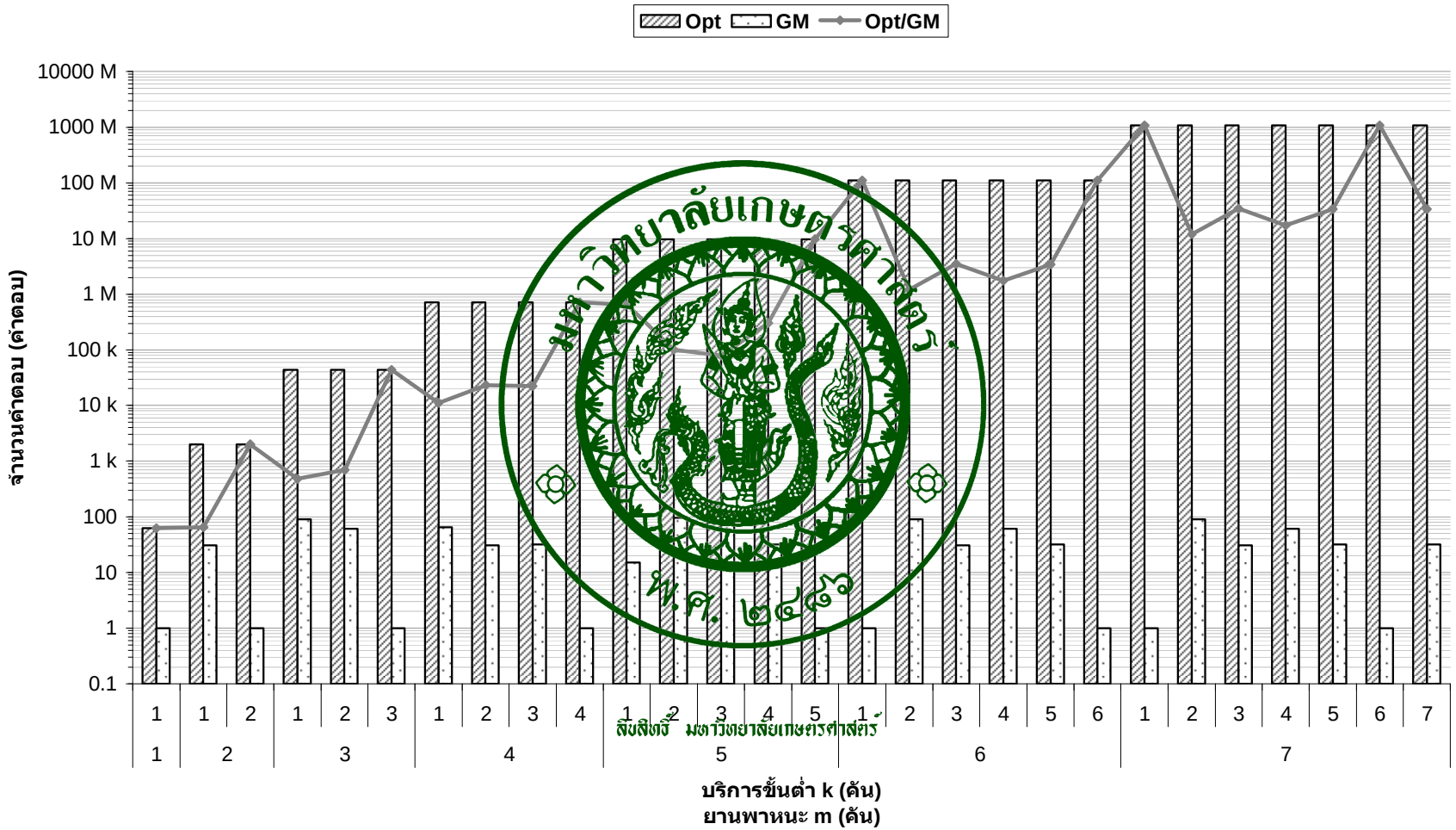
จากสมการข้างต้น เมื่อคำนึงถึงจำนวนสถานีทั้งหมดในเครือข่าย $n = n' + 1$ จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมด $m = m' \times k$ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคำตอบที่ต้องพิจารณาของขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มทั้งหมด G ได้คือ

$$G(n,m) = g(\, n-1, \left\lfloor \frac{m}{k} \right\rfloor) + g(\, n-1, \left\lfloor \frac{m}{k} \right\rfloor + 1\,) \quad (17)$$

ขั้นตอนวิธีแบบจัดกลุ่มสามารถลดความซับซ้อนของปัญหาลงโดยไม่ขึ้นกับฟังก์ชันเป้าหมาย กล่าวคือหากเปลี่ยนจากความต้องการหาเส้นทางให้บริการรวมสั้นที่สุดเป็นความต้องการอื่นเช่น ต้องการเส้นทางที่ยาวที่สุดที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลหนึ่งได้รับให้สั้นที่สุด หรือความต้องการให้ทุกเส้นทางที่แต่ละยานพาหนะขนส่งข้อมูลได้รับมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันมากที่สุดนั้น ก็สามารถจะทำได้ ซึ่งถือเป็นข้อดีประการหนึ่งของขั้นตอนวิธีนี้

ในภาพที่ 8 อัตราส่วนจำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ที่เกิดจากขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดหารด้วยจำนวนคำตอบขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม อันเกิดจากสมการ 14 และสมการ 17 เมื่อจำนวนสถานีภายในเครือข่ายเท่ากับ 7 สถานี และมีจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลตั้งแต่ 1 ถึง 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา สำหรับขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด และขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี

4. การทดลอง ชุดคำสั่ง และวิธีประเมินผล

4.1. การทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนเพื่อค้นหาเส้นทางที่ประหยัดพลังงานที่สุดสำหรับทุกยานพาหนะขนส่งข้อมูล เพื่อให้บริการกับแต่ละสถานีในเครือข่าย ให้ได้รับบริการอย่างน้อยตามจำนวนที่กำหนดได้ ซึ่งได้แจกแจงให้เห็นชัดเจนแล้วว่า หากอาศัยขั้นตอนวิธีทั่วไปเพื่อให้คำตอบที่ดีที่สุดแล้วนั้น ระยะเวลาในการคำนวณตามขั้นตอนวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ระยะเวลามาก แต่ถ้าอาศัยขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มที่นำเสนอจะทำให้ระยะเวลาในการคำนวณสามารถลดลงได้ ซึ่งต้องแลกกับคุณภาพของคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าแนวทางในการประหยัดพลังงานนั้นได้นำเสนอในสองวัตถุประสงค์คือ แนวทางแรกมีวัตถุประสงค์ต้องการให้ระยะทางรวมของทุกเส้นทางมีค่าน้อยที่สุด ส่วนในอีกแนวทางหนึ่งต้องการให้ระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มเส้นทางที่ให้บริการมีระยะทางน้อยที่สุด ทำให้ได้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบดังต่อไปนี้

4.1.1. ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด ระยะทางรวมทุกเส้นทาง สั้นที่สุด (Opt All)

4.1.2. ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม ระยะทางรวมทุกเส้นทาง สั้นที่สุด (GM All)

4.1.3. ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เส้นทางให้บริการยาวที่สุด สั้นที่สุด (Opt Max)

4.1.4. ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม เส้นทางให้บริการยาวที่สุด สั้นที่สุด (GM Max)

จากขั้นตอนวิธีที่ถูกทดสอบ ทำให้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพตัวแรกของขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มคือระยะเวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ร่วมพิจารณากับตัววัดประสิทธิภาพสองตัวต่อมาคือ คุณภาพของคำตอบที่ได้ ซึ่งได้แก่ระยะทางรวมของทุกเส้นทางจากคำตอบ และระยะทางที่ยาวที่สุดจากเส้นทางให้บริการของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล

เมื่อได้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพดังที่กล่าวมาแล้ว ในการทดลองจะทำการควบคุมตัวแปรต้นอันประกอบด้วยจำนวนของสถานีภายในเครือข่ายที่ไม่เชื่อมถึงกัน จำนวนของยานพาหนะขนส่งข้อมูล และจำนวนเส้นทางที่ต้องได้รับบริการขั้นต่ำจากยานพาหนะขนส่งข้อมูลในแต่ละสถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบจำลองแผนที่เกิดภัยพิบัติแต่ละชุดผ่านการทดลองเพื่อเก็บผลเพียงครั้งเดียว เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า แต่ละครั้งของการทดลองที่มีตัวแปรต้นเหมือนกันนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลแตกต่างกันน้อยมาก จนค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อยไม่รบกวนผลการทดลอง หรือหากเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ก็จะพบว่าเหมือนเดิมทุกการทดลอง เนื่องจากในแต่ละขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบไม่มีขั้นตอนใดประกอบด้วยการสุ่มค่า ดังนั้นจึงทำให้สามารถประหยัดเวลาในการทดลองลงไปได้มาก

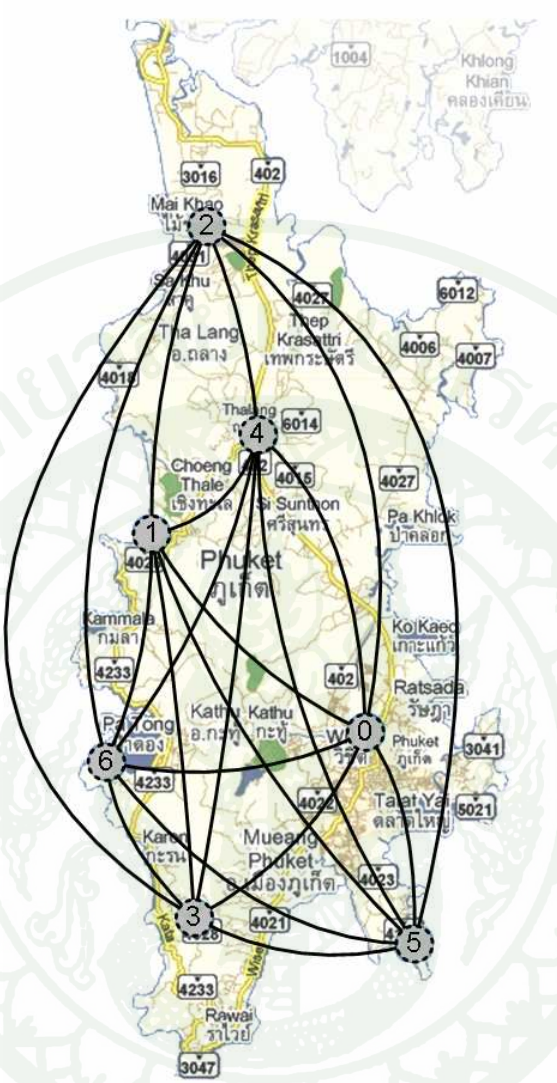
4.2. ชุดคำสั่ง

ในการทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกระทำผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองที่พัฒนาขึ้นจากภาษาไพธอนทั้งหมด และเพื่อแยกความแตกต่างเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดกับขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม จึงออกแบบให้โปรแกรมดังกล่าวให้ใช้งานร่วมกันในส่วนของโปรแกรมย่อยที่ทำงานเหมือนกัน เพื่อให้เวลารวมการทำงานของแต่ละขั้นตอนวิธีแตกต่างกันเนื่องจากขั้นตอนที่ต่างกันเท่านั้น

4.3. การประเมินผล

ตัววัดประสิทธิภาพประกอบด้วย ระยะเวลาที่ขั้นตอนวิธีใช้ในการคำนวณ ระยะทางรวมของทุกเส้นทางจากคำตอบที่ยานพาหนะให้บริการ และระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุด มีตัวแปรต้นคือจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m และค่าความน่าเชื่อถือได้ k (หรือจำนวนยานพาหนะขั้นต่ำที่แต่ละสถานีต้องได้รับบริการ) โดยมีสมมติฐานเบื้องต้นว่า ระยะเวลาในการคำนวณหาเส้นทางจะขึ้นกับจำนวนของยานพาหนะขนส่งข้อมูลค่อนข้างแน่นอน แต่จะส่งผลต่อแตกต่างมากน้อยเพียงใดตามขั้นตอนวิธีจำเป็นต้องดูผลการทดลองต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 แผนที่ทดสอบ ณ จังหวัดภูเก็ต 7 สถานี

ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายให้ความรู้ที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ได้ในสถานการณ์จริง พร้อมกับสามารถเปรียบเทียบขั้นตอนที่ได้นำเสนอ จึงกำหนดเครือข่ายที่ใช้ทดสอบ 2 รูปแบบคือ 1) ให้เข้ากับเหตุการณ์และสถานที่จริงคือ เหตุการณ์ภัยพิบัติทางธรรมชาติ สึนามิ ในปี พ.ศ. 2547 ณ จังหวัดภูเก็ต ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 9 จำนวนห้าแผนที่ที่แตกต่างกันในแง่จำนวนสถานี เท่ากับ 5, 6, 7 และ 9 สถานี (แต่ระยะทางระหว่างสถานีในเครือข่ายเหมือนกัน) และ 2) สร้างแผนที่ที่มีจำนวนสถานีภายในเครือข่าย 4, 5, 6, 7 และ 8 สถานี จากการสุ่มระยะทางระหว่างสถานีในลักษณะการกระจายตัวอย่างมีรูปแบบ (Uniform Random Distribution) ด้วยค่าตั้งแต่ 1 ถึง 100 และสุ่มจำนวน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถนนที่เชื่อมระหว่างสถานี ตามงานวิจัยของ ErdŐs และ Rényi (1959) ให้ได้แตกต่างกัน 5 แบบ ซึ่งทำให้สามารถจำแนกแผนที่ทดสอบทั้งหมดได้ 25 รูปแบบด้วยกัน

ในการทดสอบแผนที่จำลองจังหวัดภูเก็ตนั้น กำหนดให้มีจำนวนสถานีเท่ากับ 5, 6, 7 และ 9 สถานี ซึ่งน่าจะเหมาะสมทั้งในทางปฏิบัติ และเหมาะสมในแง่เวลาที่ใช้คำนวณแบบจำลอง ส่วนตำแหน่งของแต่ละสถานีในเครือข่าย เป็นเพียงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับสถานที่เกิดเหตุ หรือใกล้เคียงโรงพยาบาลภายในจังหวัดภูเก็ตเท่านั้น ไม่ใช่ข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นระยะทางระหว่างแต่ละคู่สถานี จึงถูกกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับค่าความต่างระหว่างพิกัดตำแหน่งของสองสถานีเท่านั้น ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณแปลงจากพิกัดทางภูมิศาสตร์ มาเป็นพิกัดทางเรขาคณิตแล้ว เพื่อให้เหมาะกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ทดสอบ (จำนวน 7 สถานี)

ตารางที่ 2 ระยะทาง (กิโลเมตร) ระหว่างสถานีภายในเครือข่ายจำลองที่ใช้ทดสอบ

สถานี	0	1	2	3	4	5	6
0		24.00	39.00	21.00	52.00	18.00	21.00
1	24.00		52.00	31.00	67.00	39.00	19.00
2	39.00	52.00		21.00	17.00	27.00	34.00
3	21.00	31.00	21.00		37.00	18.00	15.00
4	52.00	67.00	17.00	37.00		37.00	50.00
5	18.00	39.00	27.00	18.00	37.00		29.00
6	21.00	19.00	34.00	15.00	50.00	29.00	

สำหรับการทดสอบกับแผนที่จำลองที่เกิดจากกราฟสุ่ม ทำเพื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นตามความสำพันธ์ของจำนวนสถานีที่เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลและจำนวนความน่าเชื่อถือได้ ในช่วงที่เหมาะสมเพียงพอต่อการพิจารณาคือ 4, 5, 6 และ 7 ยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ความน่าเชื่อถือได้ (บริการขั้นต่ำ) เท่ากับสาม ซึ่งผลการทดลองน่าจะทำให้ทราบค่าจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล และจำนวนความน่าเชื่อถือได้ที่เหมาะสมกับขั้นตอนวิธีแบบจัดกลุ่ม สำหรับจำนวนสถานีที่ถูกกำหนด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการทดลองแยกตามตัวชี้วัดประสิทธิภาพได้แก่เวลาในการคำนวณ ระยะทางรวมของทุกยานพาหนะ และระยะทางยาวที่สุดของยานพาหนะที่ให้บริการ เพื่อเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีคือ ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (Opt All) ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (GM All) ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (Opt Max) และขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (GM Max)

ลำดับการเสนอเริ่มต้นจาก เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณกับจำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ต่อมาเป็นการเปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนวิธี ตามด้วยการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบที่ได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี (เปรียบเทียบระยะทางรวมของทุกเส้นทางจากคำตอบ และระยะทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มเส้นทางจากคำตอบ) และท้ายสุดผลการทดลองสมทบ เมื่อทดลองกับเครือข่ายที่จำนวนสถานีแตกต่างออกไป

กราฟจำลองเครือข่ายที่ใช้ทดสอบแยกออกเป็นสองกลุ่ม คือ 1) กลุ่มแรกเป็นส่วนของกราฟแผนที่จำลองจากจังหวัดภูเก็ต จำนวน 5, 6, 7 และ 9 สถานี มีตำแหน่งของแต่ละสถานีภายในเครือข่ายเหมือนกัน ให้บริการโดยยานพาหนะขนส่งข้อมูลจำนวน 1 ถึง 7 คัน และ 2) กลุ่มที่สองเป็นส่วนของกราฟที่ถูกสร้างขึ้นจากการสุ่มระยะทางและจำนวนถนนที่เชื่อมต่อระหว่างสถานี โดยในแต่ละจำนวนสถานีที่ถูกกำหนดจะถูกสุ่มค่าจนเกิดกราฟจำนวน 5 รูปแบบ ทำให้เกิดกราฟสุ่มที่ใช้ทดสอบจากจำนวนสถานีที่ถูกกำหนด 4, 5, 6, 7 และ 8 สถานี ทั้งสิ้น 25 รูปแบบ

1. เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณของขั้นตอนออกแบบเส้นทางที่ดีที่สุดกับจำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา จากกราฟจำลองเครือข่ายภูเก็ตจำนวน 7 สถานี

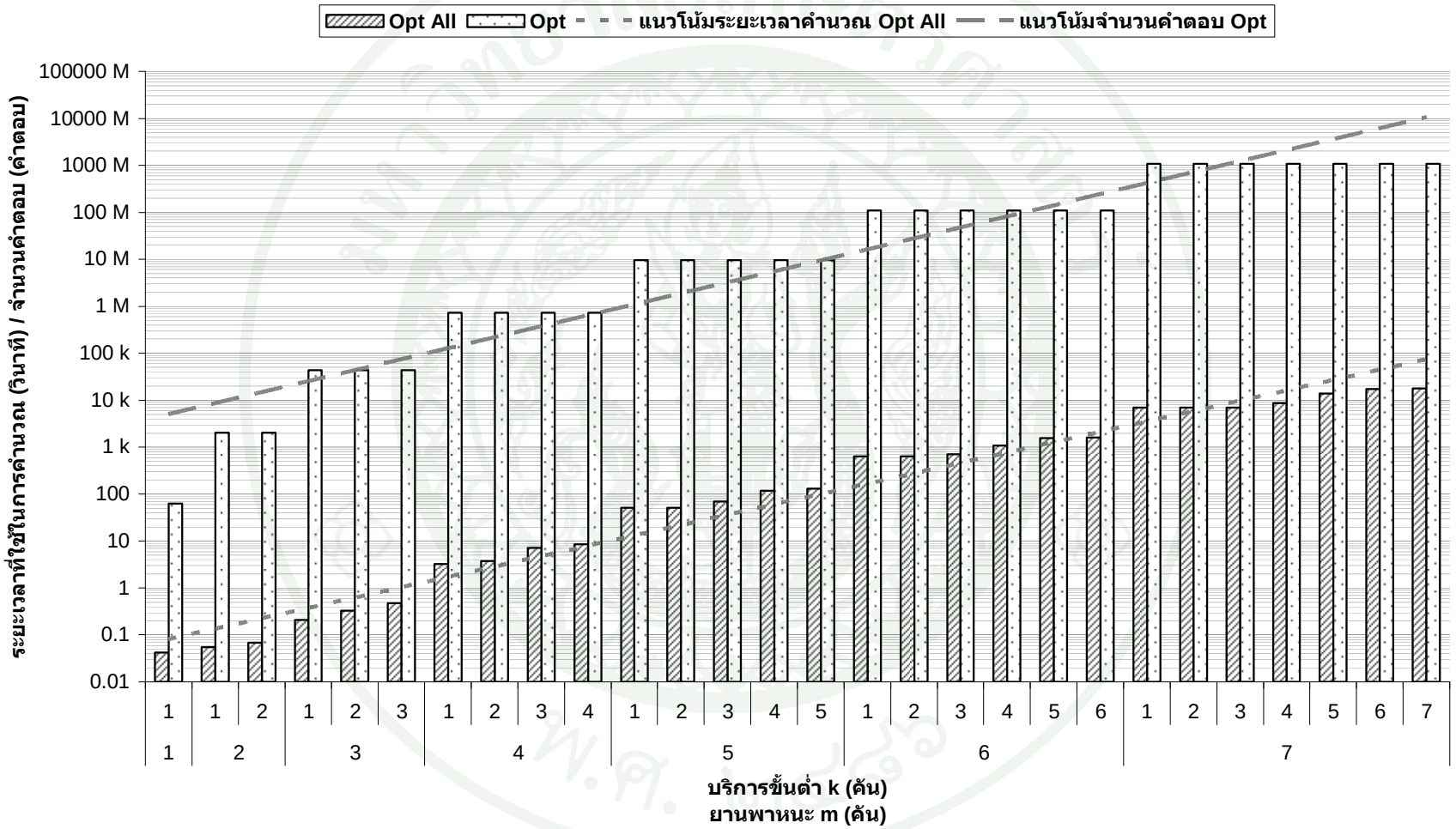
ผลการทดลองประกอบด้วยกราฟจำนวน 2 ชุด แสดงระยะเวลาที่ใช้คำนวณขั้นตอนวิธี Opt All และจำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณาที่คำนวณจากสมการ 14 โดยแกน Y ทางด้าน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซ้ายมือใช้สำหรับกราฟแท่งที่แสดงค่าระยะเวลาในการคำนวณ ส่วนแกน Y ทางด้านขวาสำหรับกราฟเส้นที่แสดงจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งทั้งสองกราฟเป็นผลจากการปรับตัวแปรต้นคือ จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m จำนวนขั้นต่ำที่แต่ละสถานีต้องได้รับบริการจากยานพาหนะ k และจำนวนสถานีที่ใช้ทดสอบ n จำนวน 7 สถานี ดังกราฟในภาพที่ 10

นอกจากนี้ในภาพที่ 10 ได้แสดงกราฟเส้นแนวโน้มของข้อมูลทั้งสองคือระยะเวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธี Opt All และจำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณาไว้ด้วย โดยอาศัยวิธีคำนวณเชิงถดถอยแบบเอ็กโปเน็นเชียล (Exponential Regression)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

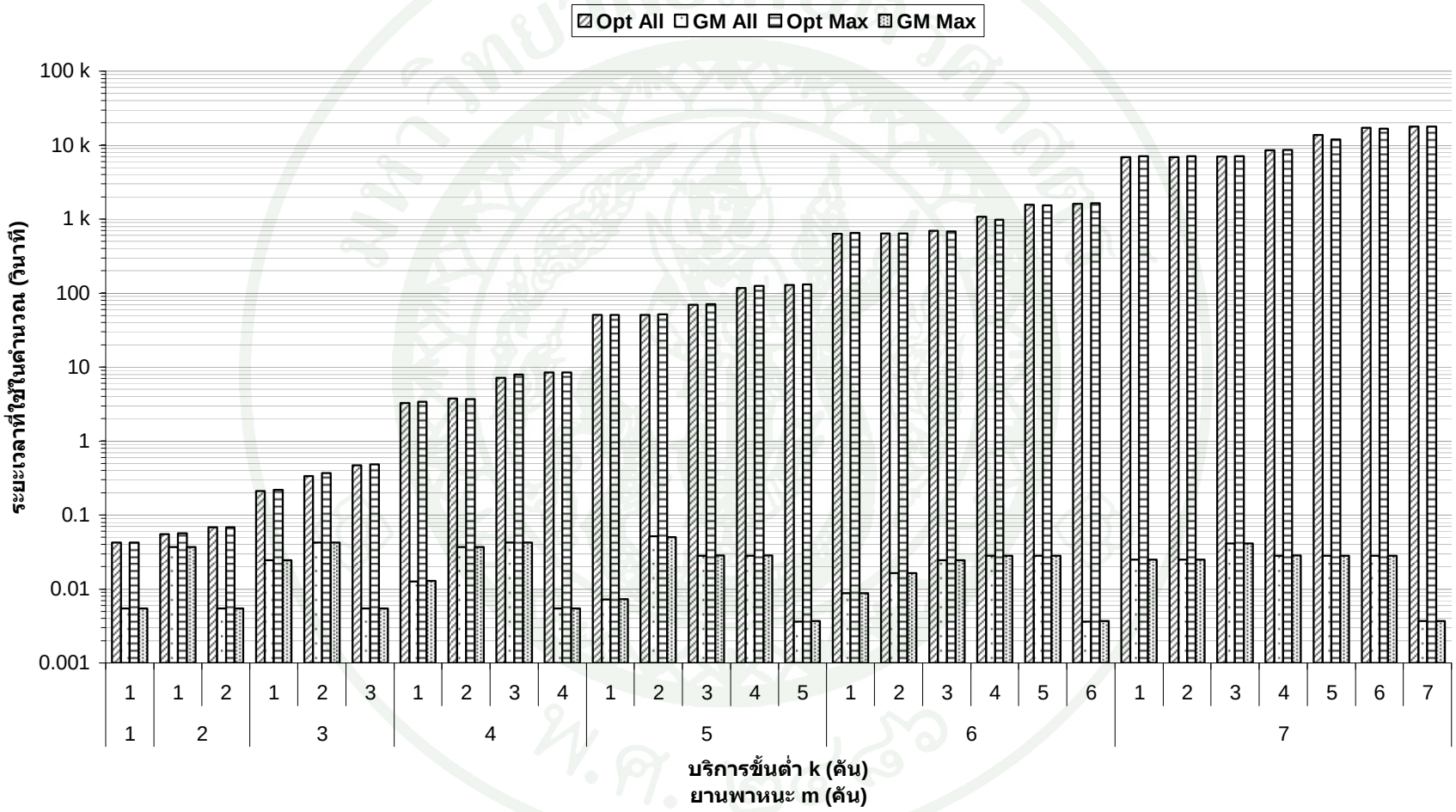
2. เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนวิธี จากกราฟจำลองเครือข่ายภูเก็ต จำนวน 7 สถานี

ตารางที่ 3 รวมถึงภาพที่ 11 เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณเส้นทางให้บริการของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลของทุกขั้นตอนวิธีที่ทดลองได้แก่ Opt All, GM All, Opt Max, และ GM Max โดยแกน Y แสดงค่าระยะเวลาในการคำนวณมีหน่วยเป็นวินาที ซึ่งทั้งสี่กราฟเป็นผลจากการปรับตัวแปรต้นคือ จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล *m* จำนวนขั้นต่ำที่แต่ละสถานีต้องได้รับบริการจากยานพาหนะ *k* และจำนวนสถานีที่ใช้ทดสอบ *n* จำนวน 7 สถานี

ตารางที่ 3 ผลการทดลองระยะเวลาในการคำนวณแต่ละขั้นตอนวิธี

m	*k*	Opt All (วินาที)	GM All (วินาที)	Opt Max (วินาที)	GM Max (วินาที)
1	1	0.0421	0.0055	0.0424	0.0055
2	1	0.0551	0.0372	0.0565	0.0371
	2	0.0683	0.0055	0.0684	0.0055
3	1	0.2101	0.0245	0.2192	0.0245
	2	0.3329	0.0424	0.3674	0.0426
	3	0.4723	0.0055	0.4822	0.0055
4	1	3.2798	0.0128	3.3752	0.0129
	2	3.7613	0.0370	3.7008	0.0370
	3	7.1696	0.0424	7.9116	0.0425
	4	8.4752	0.0055	8.4919	0.0055
5	1	50.3725	0.0072	50.9416	0.0073
	2	50.8792	0.0519	51.2350	0.0500
	3	69.9366	0.0282	70.6515	0.0283
	4	117.0975	0.0283	124.6509	0.0283
	5	129.4284	0.0036	131.3002	0.0037
6	1	635.7835	0.0087	652.8564	0.0088
	2	643.3962	0.0164	645.9414	0.0164
	3	695.7918	0.0246	684.2292	0.0246
	4	1,077.6975	0.0282	980.5725	0.0282
	5	1,560.0163	0.0282	1,545.0001	0.0282
	6	1,602.4626	0.0036	1,635.9445	0.0036
7	1	6,890.5410	0.0248	7,050.0548	0.0249
	2	6,880.7661	0.0248	7,120.1150	0.0249
	3	6,977.2996	0.0409	7,114.0859	0.0410
	4	8,527.9566	0.0282	8,622.1218	0.0283
	5	13,775.6429	0.0282	11,839.9633	0.0283
	6	17,341.7798	0.0282	16,617.0013	0.0283
	7	17,815.0795	0.0036	17,701.1063	0.0036

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. เปรียบเทียบคำตอบระยะทางรวมของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลในคำตอบจากแต่ละขั้นตอนวิธี จากกราฟจำลองเครือข่ายภูเก็ตจำนวน 7 สถานี

ภาพที่ 12 แสดงผลการทดลองในแง่ของระยะทางรวมของทุกเส้นทางจากคำตอบที่ได้ในแต่ละขั้นตอนวิธีที่ทดลองได้แก่ Opt All, GM All, Opt Max, และ GM Max โดยแกน Y ทางด้านซ้ายมือใช้สำหรับกราฟแท่งที่แสดงค่าระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร ซึ่งทั้งสี่กราฟเป็นผลจากการปรับตัวแปรต้นคือ จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m จำนวนขั้นต่ำที่แต่ละสถานีต้องได้รับบริการจากยานพาหนะ k และจำนวนสถานีที่ใช้ทดสอบ n จำนวน 7 สถานี

ในตารางที่ 4 นอกจากผลการทดลองระยะทางรวมของแต่ละขั้นตอนวิธีแล้ว ในสดมภ์ทางขวามือทั้งสองยังประกอบด้วย ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองดังกล่าวจากขั้นตอนวิธี Opt All และขั้นตอนวิธี GM All กับขั้นตอนวิธี Opt Max และขั้นตอนวิธี GM Max ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\%diff\left(\text{GM_all}, \text{Opt_all}\right) = \frac{\text{GM_all} - \text{Opt_all}}{\text{Opt_all}} \times 100 \tag{18}$$

$$\%diff\left(\text{GM_max}, \text{Opt_max}\right) = \frac{\text{GM_max} - \text{Opt_max}}{\text{Opt_max}} \times 100 \tag{19}$$

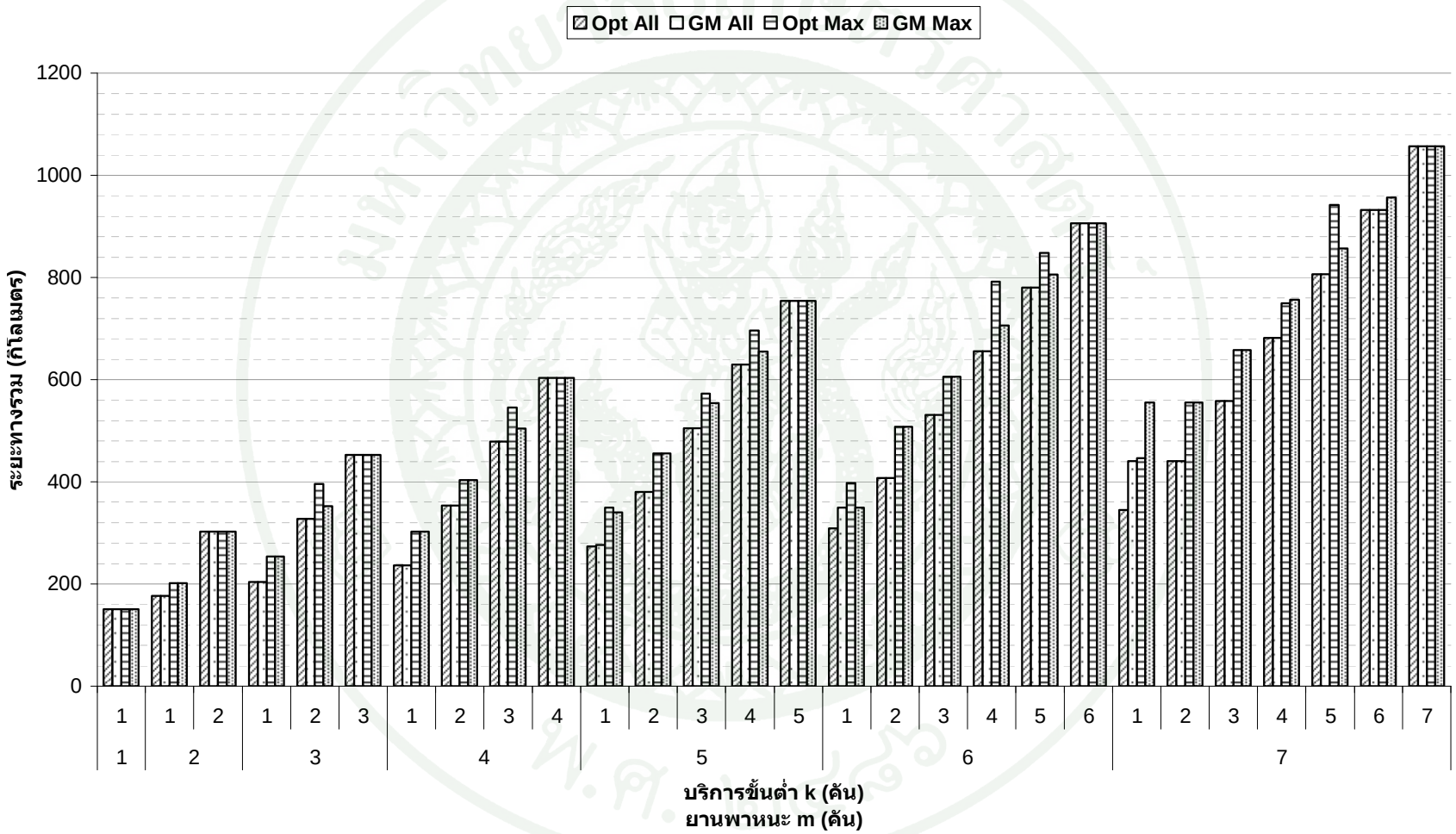
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ผลการทดลองระยะทางรวมที่ได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี พร้อมเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเปรียบเทียบ

m	*k*	Opt All (กม.)	GM All (กม.)	Opt Max (กม.)	GM Max (กม.)	%Difference Opt | GM All	%Difference Opt | GM Max
1	1	151	151	151	151	0.00	0.00
2	1	177	177	202	202	0.00	14.12
	2	302	302	302	302	0.00	0.00
3	1	204	204	254	254	0.00	24.51
	2	328	328	396	353	0.00	20.73
	3	453	453	453	453	0.00	0.00
4	1	237	237	302	302	0.00	27.43
	2	354	354	404	404	0.00	14.12
	3	479	479	546	504	0.00	13.99
	4	604	604	604	604	0.00	0.00
5	1	273	276	350	340	1.10	26.81
	2	381	381	456	456	0.00	19.69
	3	505	505	573	555	0.00	13.47
	4	630	630	697	655	0.00	10.63
	5	755	755	755	755	0.00	0.00
6	1	309	350	398	350	13.27	13.71
	2	408	408	508	508	0.00	24.51
	3	531	531	606	606	0.00	14.12
	4	656	656	792	706	0.00	20.73
	5	781	781	848	806	0.00	8.58
	6	906	906	906	906	0.00	0.00
7	1	345	441	446	556	27.83	1.13
	2	441	441	556	556	0.00	26.08
	3	558	558	658	658	0.00	17.92
	4	682	682	750	757	0.00	9.97
	5	807	807	942	857	0.00	16.73
	6	932	932	932	957	0.00	0.00
	7	1057	1057	1057	1057	0.00	0.00

หมายเหตุ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการทดลอง ถ้าค่าเป็นบวกแสดงว่า GM All หรือ GM Max ได้ระยะทางรวมมากกว่า (แย่กว่า) Opt All หรือ Opt Max ตามลำดับ และในทางตรงกับข้ามถ้าเป็นค่าลบแสดงว่า GM All หรือ GM Max ได้ระยะทางรวมน้อยกว่า (ดีกว่า) Opt All หรือ Opt Max ตามลำดับเช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. เปรียบเทียบระยะทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลในคำตอบจากแต่ละขั้นตอนวิธีจากกราฟจำลองเครือข่ายภูเก็ตจำนวน 7 สถานี

ภาพที่ 13 แสดงผลการทดลองในแง่ของระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดในคำตอบที่ได้ในแต่ละขั้นตอนวิธีที่ทดลองได้แก่ Opt All, GM All, Opt Max, และ GM Max โดยแกน Y ทางด้านซ้ายมือใช้สำหรับกราฟแท่งที่แสดงค่าระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร ซึ่งทั้งสี่กราฟเป็นผลจากการปรับตัวแปรต้นคือ จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m จำนวนขั้นต่ำที่แต่ละสถานีต้องได้รับบริการจากยานพาหนะ k และจำนวนสถานีที่ใช้ทดสอบ n จำนวน 7 สถานี

ในตารางที่ 5 นอกจากผลการทดลองระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดจากแต่ละขั้นตอนวิธีแล้ว ในสดมภ์ทางขวามือทั้งสองยังประกอบด้วย ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองดังกล่าวจากขั้นตอนวิธี Opt All และขั้นตอนวิธี GM All กับขั้นตอนวิธี Opt Max และขั้นตอนวิธี GM Max ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 18 และสมการ 19 ตามลำดับ

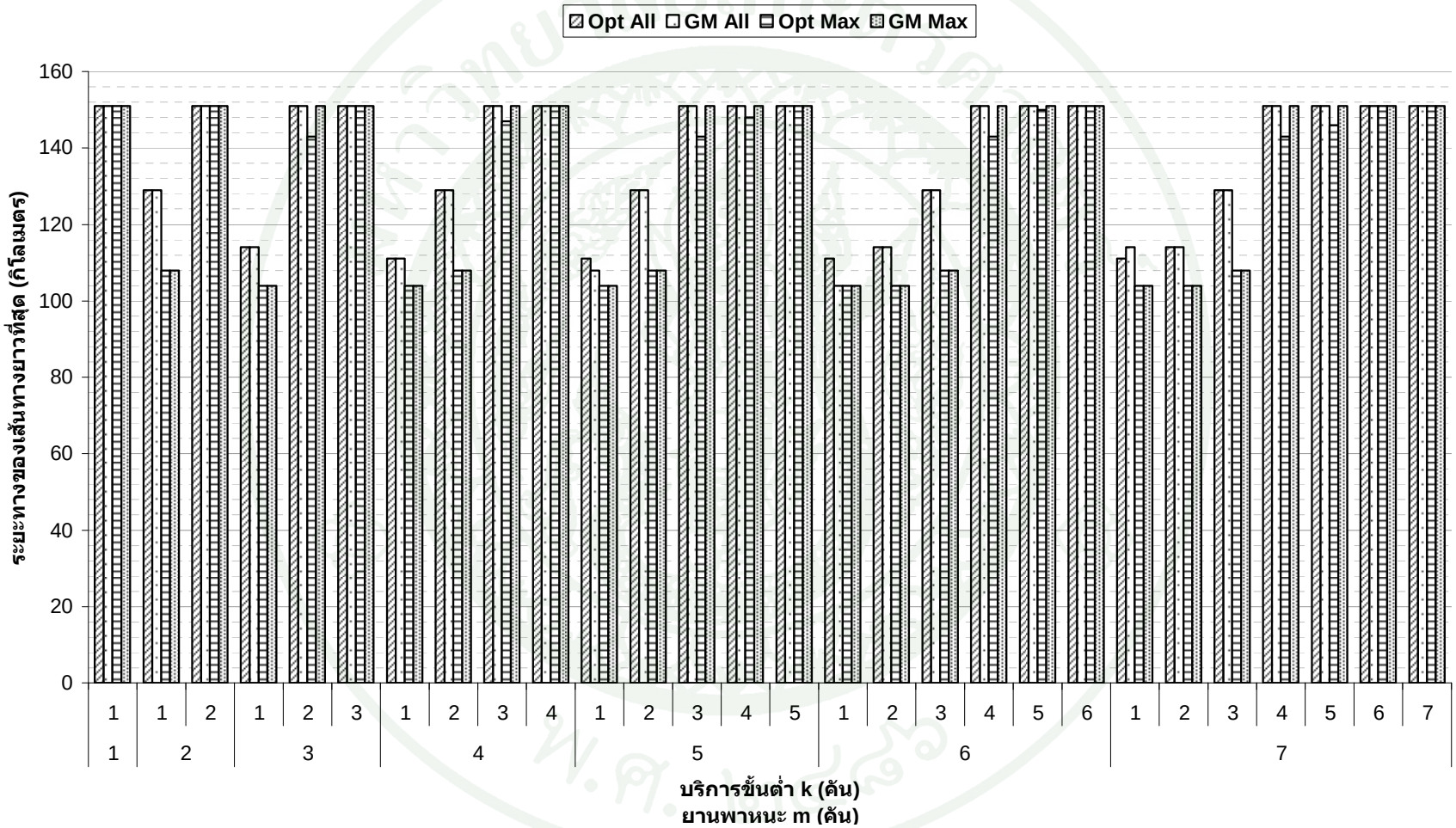
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 ผลการทดลองระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดของแต่ละขั้นตอนวิธี พร้อมเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเปรียบเทียบ

m	*k*	Opt All (กม.)	GM All (กม.)	Opt Max (กม.)	GM Max (กม.)	%Difference Opt | GM All	%Difference Opt | GM Max
1	1	151	151	151	151	0.00	0.00
2	1	129	129	108	108	0.00	-16.28
	2	151	151	151	151	0.00	0.00
3	1	114	114	104	104	0.00	-8.77
	2	151	151	143	151	0.00	-5.30
	3	151	151	151	151	0.00	0.00
4	1	111	111	104	104	0.00	-6.31
	2	129	129	108	108	0.00	-16.28
	3	151	151	147	151	0.00	-2.65
	4	151	151	151	151	0.00	0.00
5	1	111	108	104	104	-2.70	-3.70
	2	129	129	108	108	0.00	-16.28
	3	151	151	143	151	0.00	-5.30
	4	151	151	148	151	0.00	-1.99
	5	151	151	151	151	0.00	0.00
6	1	111	104	104	104	-6.31	0.00
	2	114	114	104	104	0.00	-8.77
	3	129	129	108	108	0.00	-16.28
	4	151	151	143	151	0.00	-5.30
	5	151	151	150	151	0.00	-0.66
	6	151	151	151	151	0.00	0.00
7	1	111	114	104	104	2.70	-8.77
	2	114	114	104	104	0.00	-8.77
	3	129	129	108	108	0.00	-16.28
	4	151	151	143	151	0.00	-5.30
	5	151	151	146	151	0.00	-3.31
	6	151	151	151	151	0.00	0.00
	7	151	151	151	151	0.00	0.00

หมายเหตุ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการทดลอง ถ้าค่าเป็นบวกแสดงว่า GM All หรือ GM Max ได้ระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดมากกว่า (แย่กว่า) Opt All หรือ Opt Max ตามลำดับ และในทางตรงกับข้ามถ้าเป็นค่าลบแสดงว่า GM All หรือ GM Max ได้ระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดน้อยกว่า (ดีกว่า) Opt All หรือ Opt Max ตามลำดับเช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



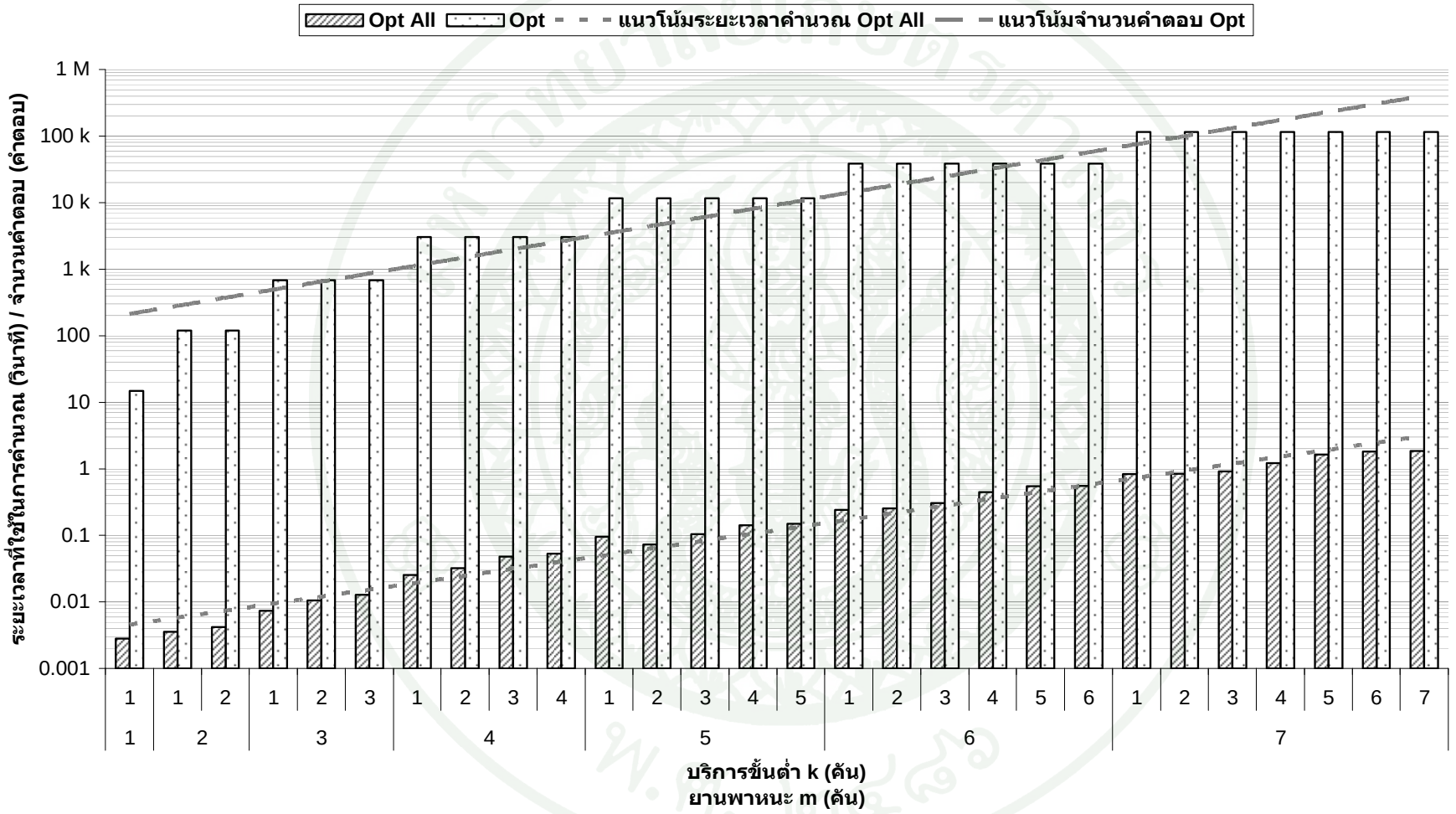
ภาพที่ 13 เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 7 สถานี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

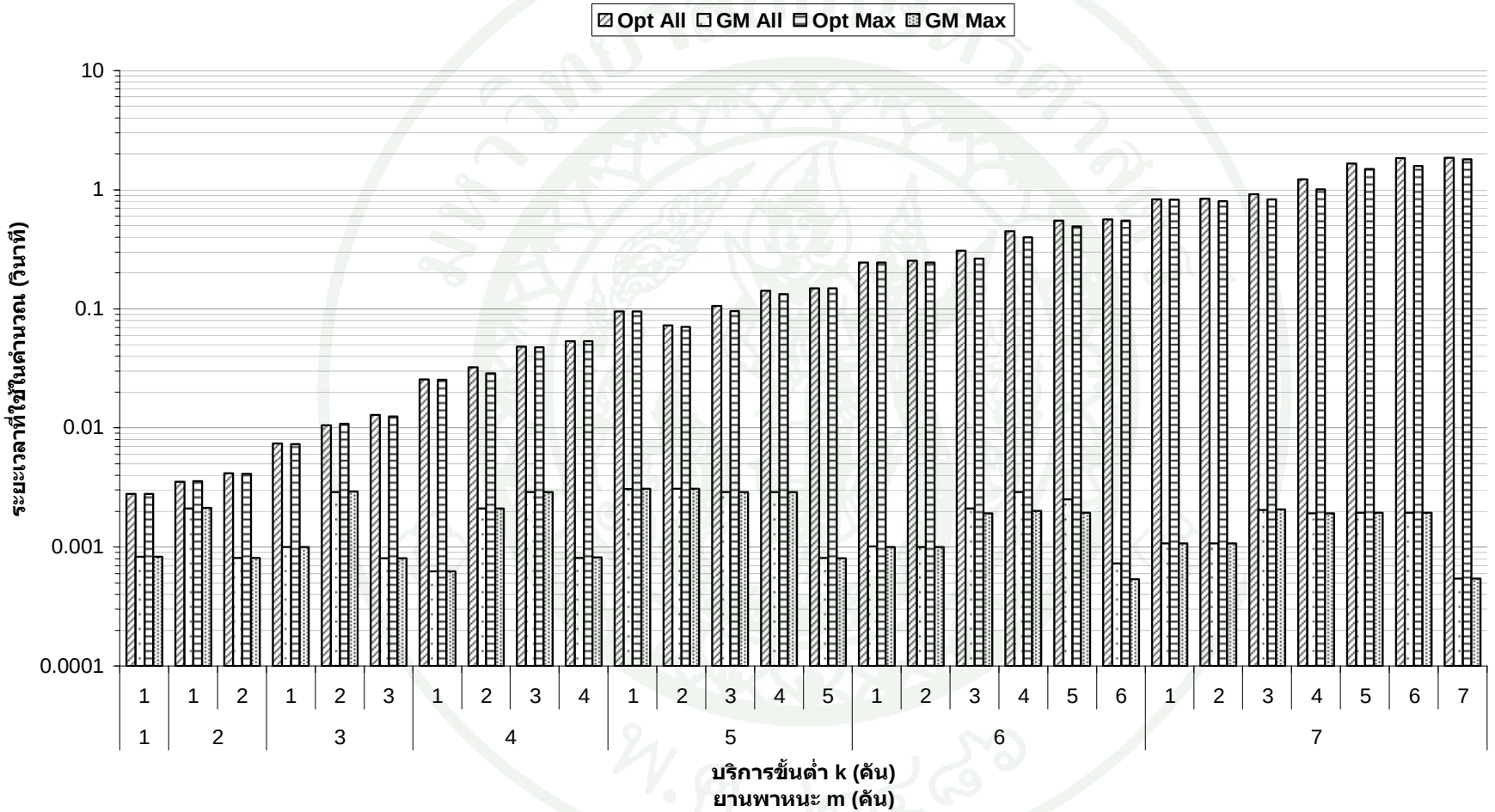
5. ผลการทดลองสมทบ จากกราฟจำลองเครือข่ายภูเก็ตจำนวน 5, 6 และ 9 สถานี

การทดลองที่ผ่านมาใช้เครือข่ายยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่มีสถานีจำนวน 7 สถานี ส่วนผลการทดลองต่อไปนี้ ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มเมื่อจำนวนสถานีเปลี่ยนไป ประกอบด้วยการทดสอบจำนวน 5, 6 และ 9 สถานี เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มจำนวนคำตอบที่เกิดขึ้น กับแนวโน้มระยะเวลาในการคำนวณ (ภาพที่ 14 ภาพที่ 18 ภาพที่ 22 ตามลำดับ) เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ (ภาพที่ 15 ภาพที่ 19 ภาพที่ 23 ตามลำดับ) เปรียบเทียบระยะทางรวมของคำตอบที่ได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี (ภาพที่ 16 ภาพที่ 20 ภาพที่ 24 ตามลำดับ) และท้ายสุด เปรียบเทียบระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดจากคำตอบที่ได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี (ภาพที่ 17 ภาพที่ 21 ภาพที่ 25 ตามลำดับ)

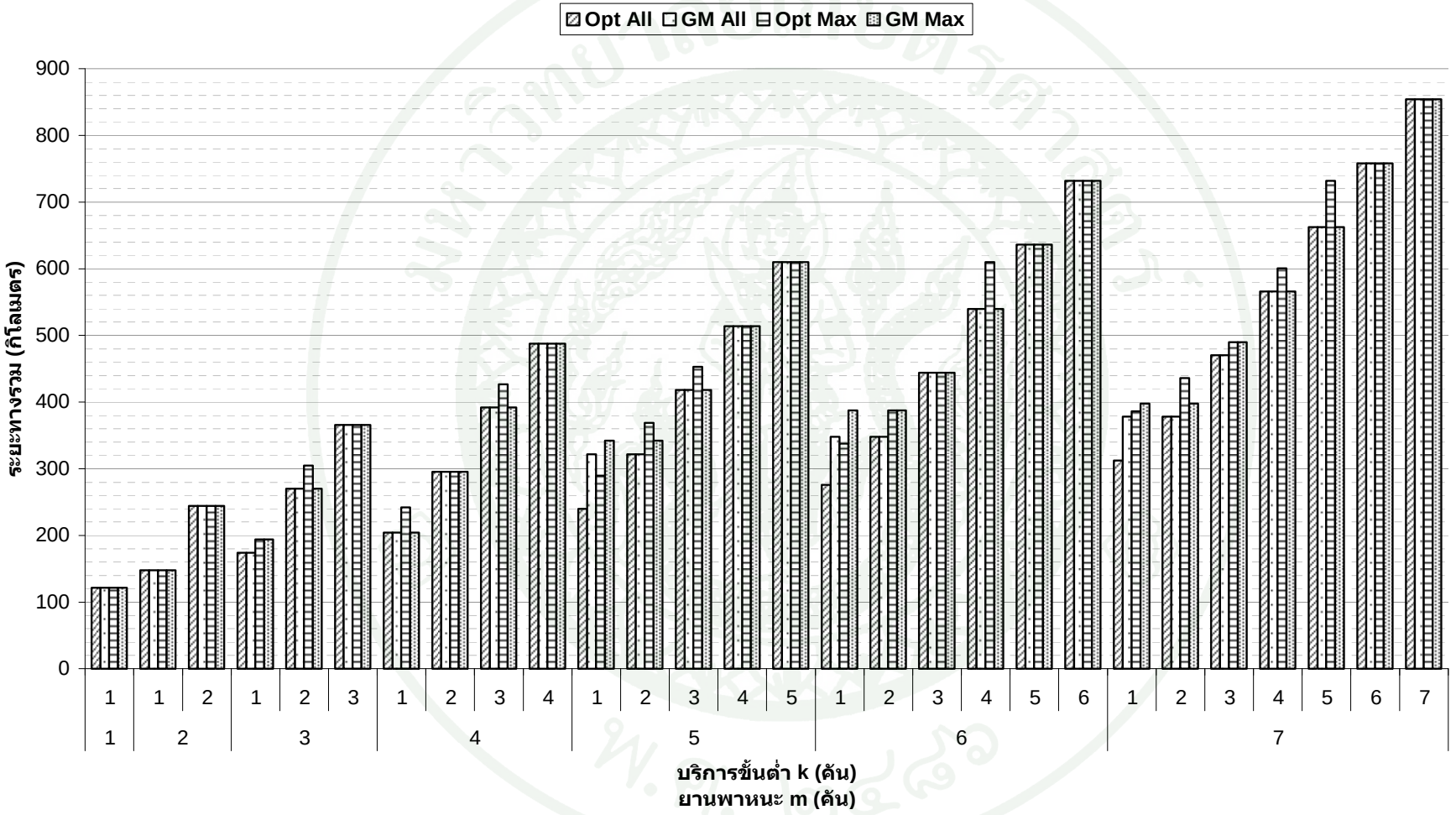
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



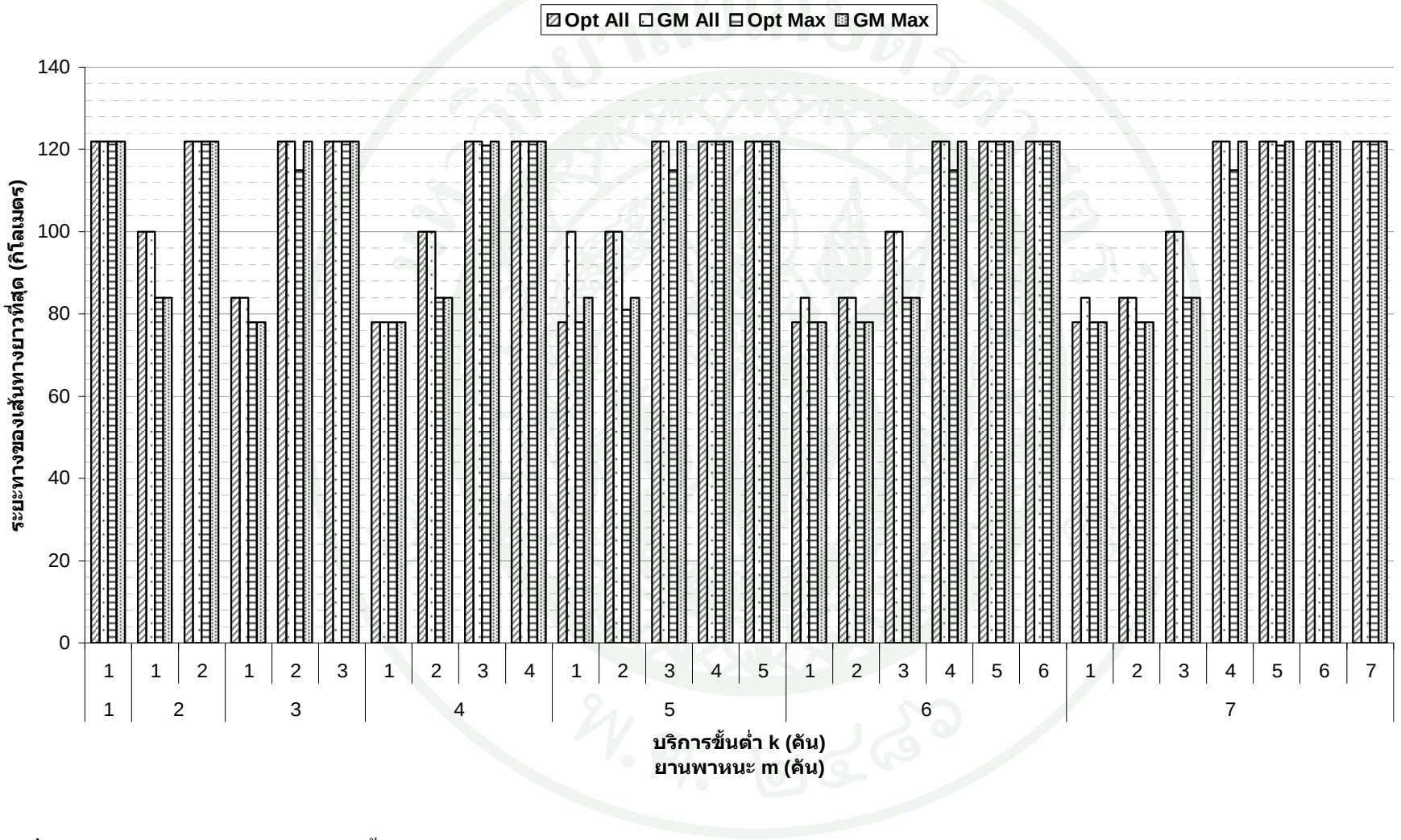
ภาพที่ 14 จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี



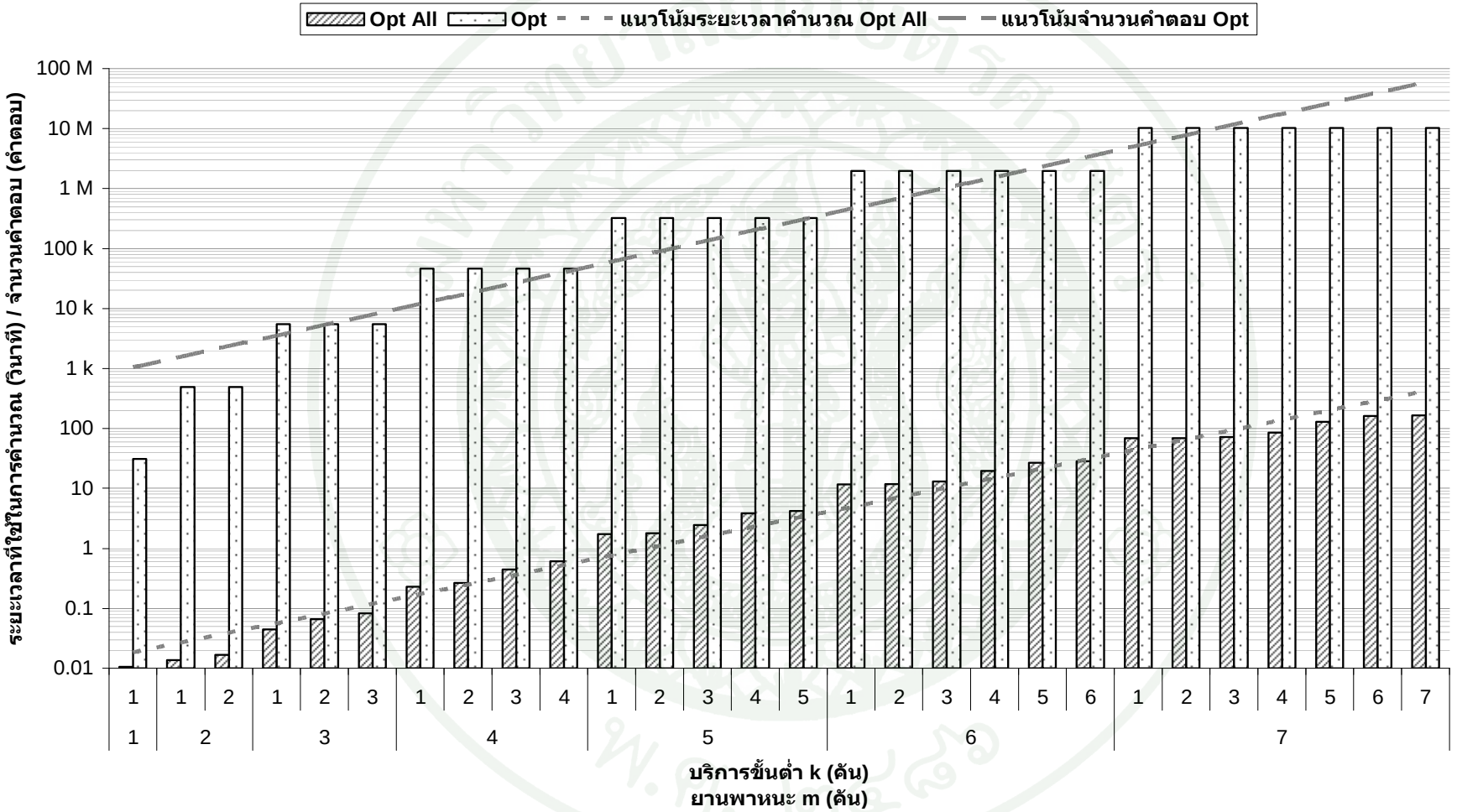
ภาพที่ 15 เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี



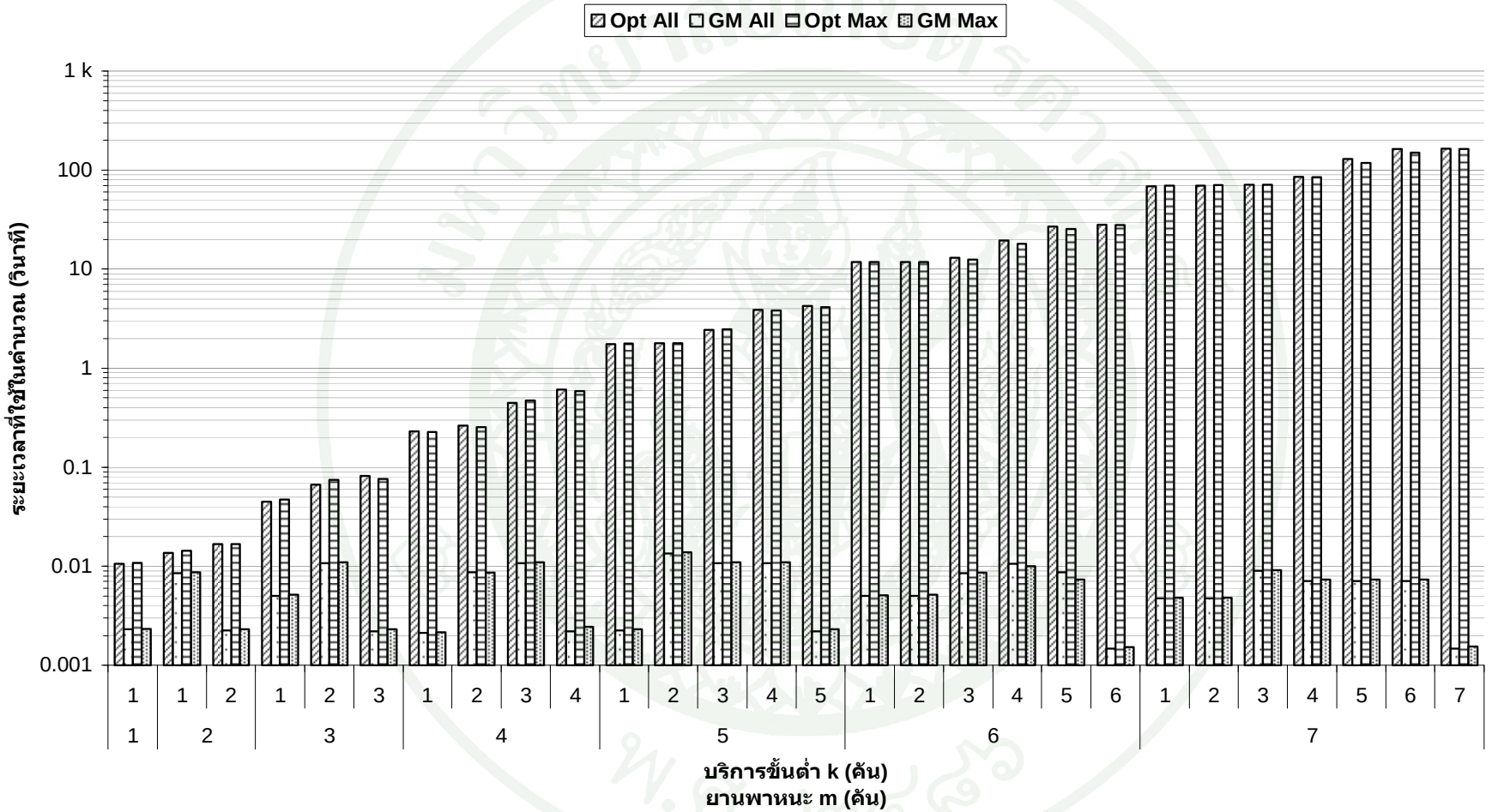
ภาพที่ 16 ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี



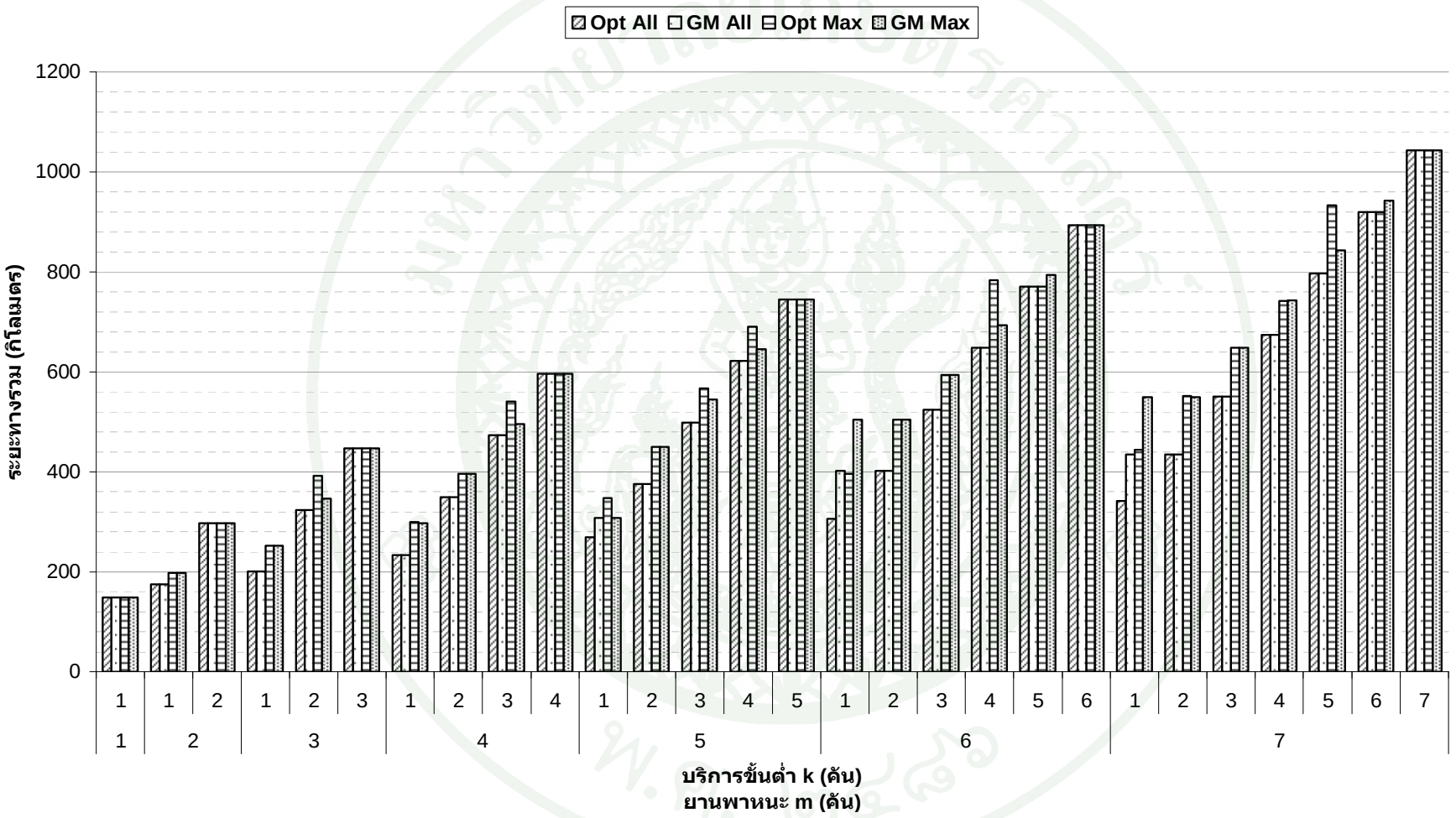
ภาพที่ 17 เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 5 สถานี



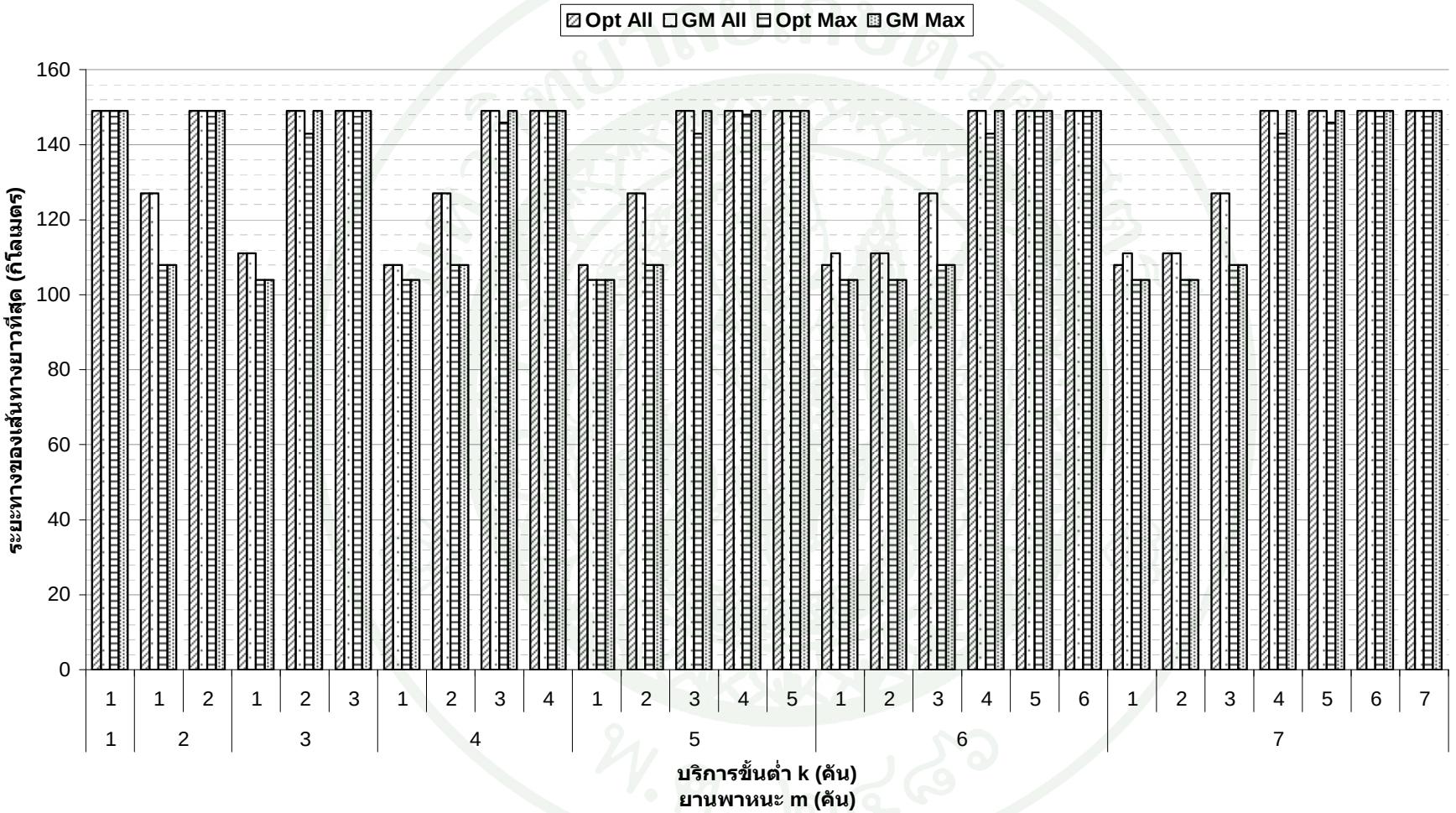
ภาพที่ 18 จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี



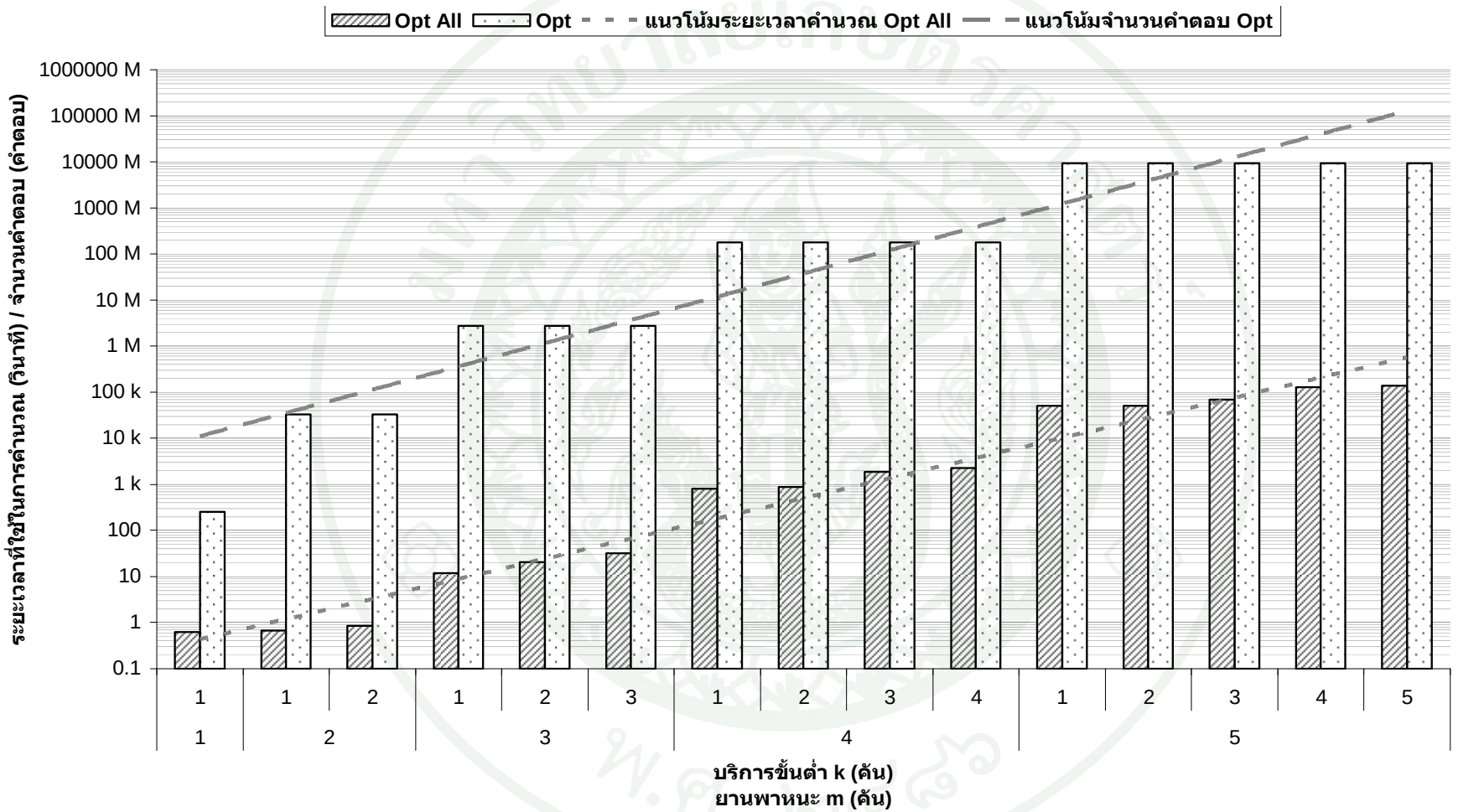
ภาพที่ 19 เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี



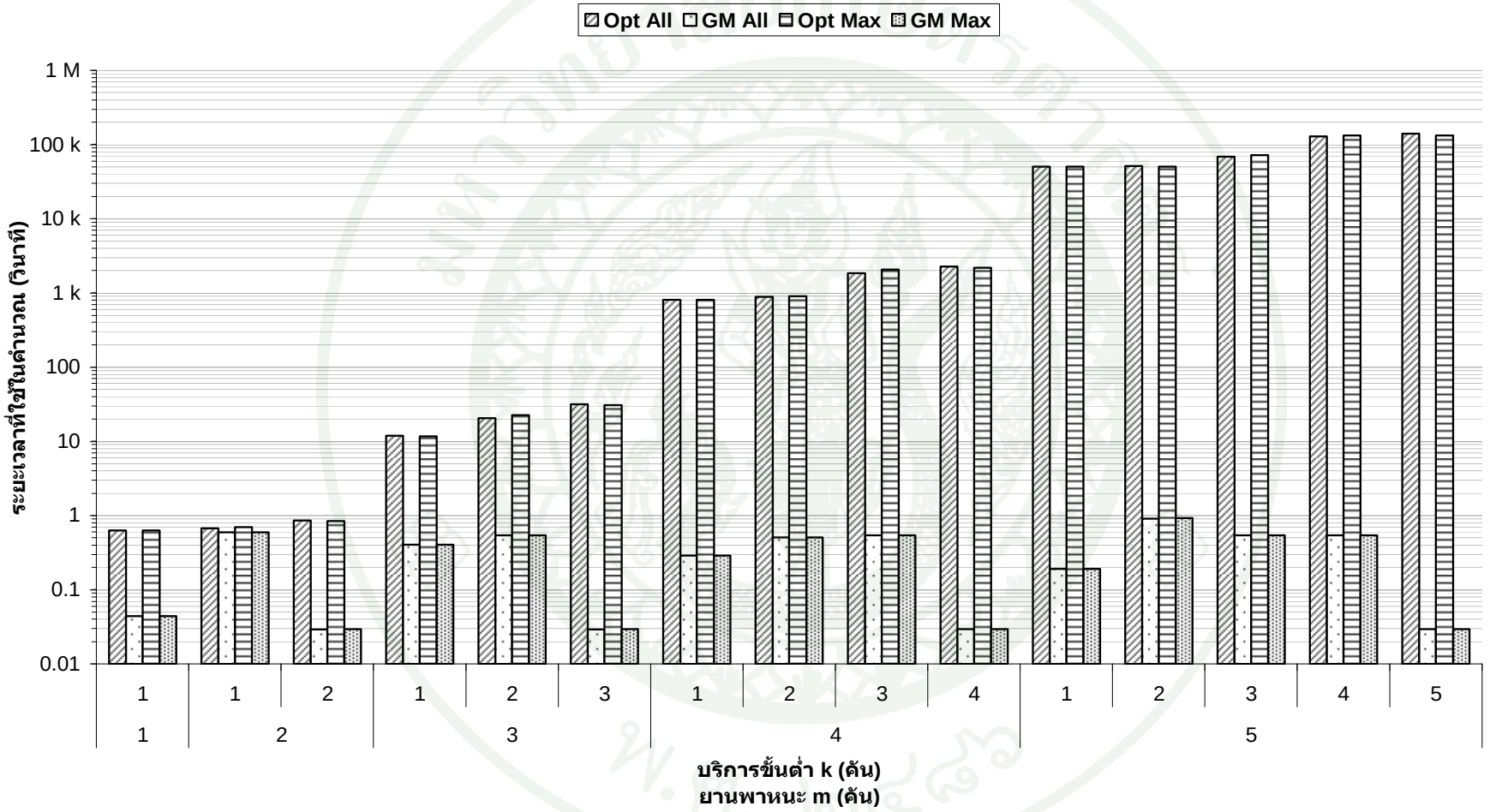
ภาพที่ 20 ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี



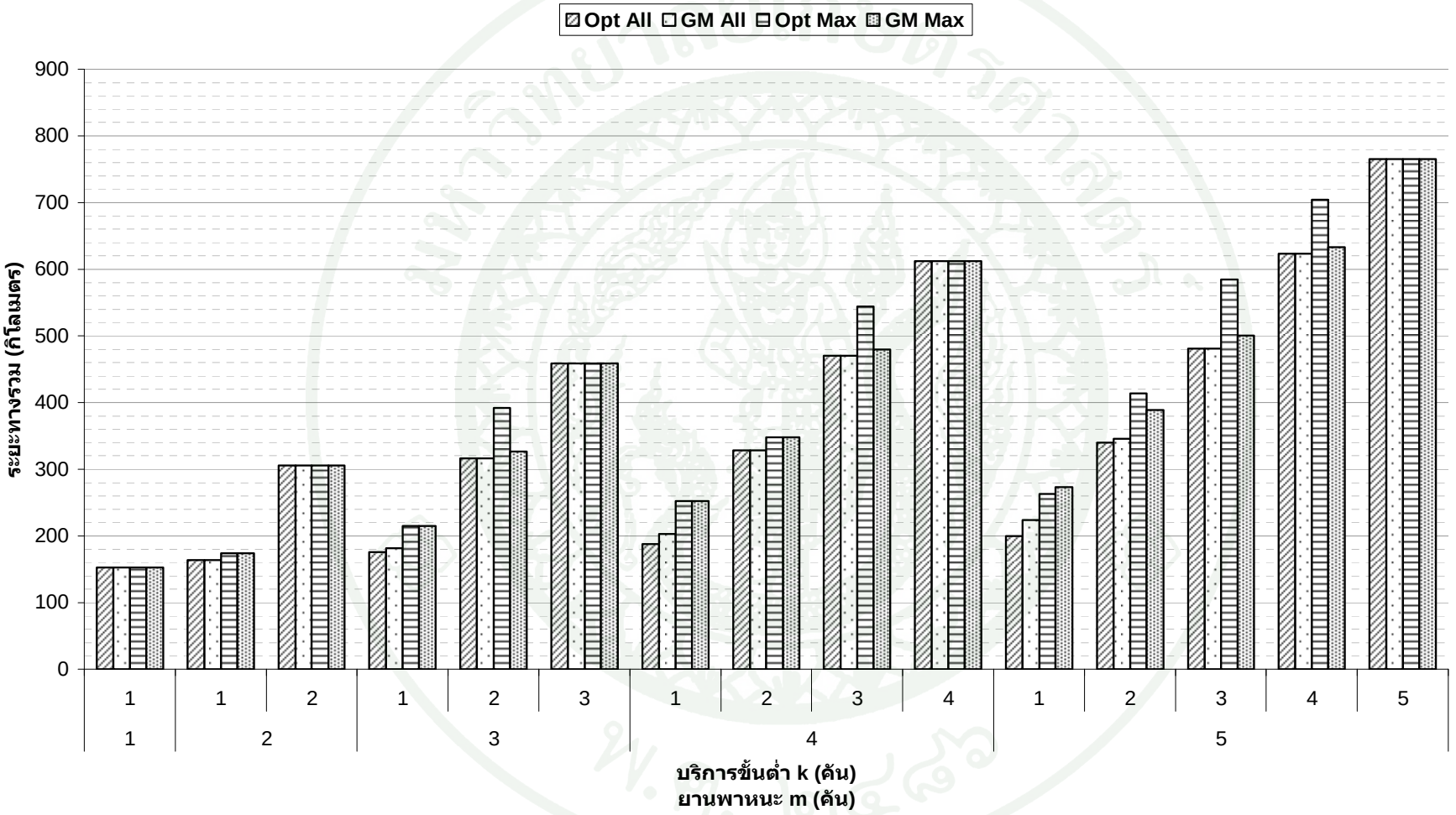
ภาพที่ 21 เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 6 สถานี



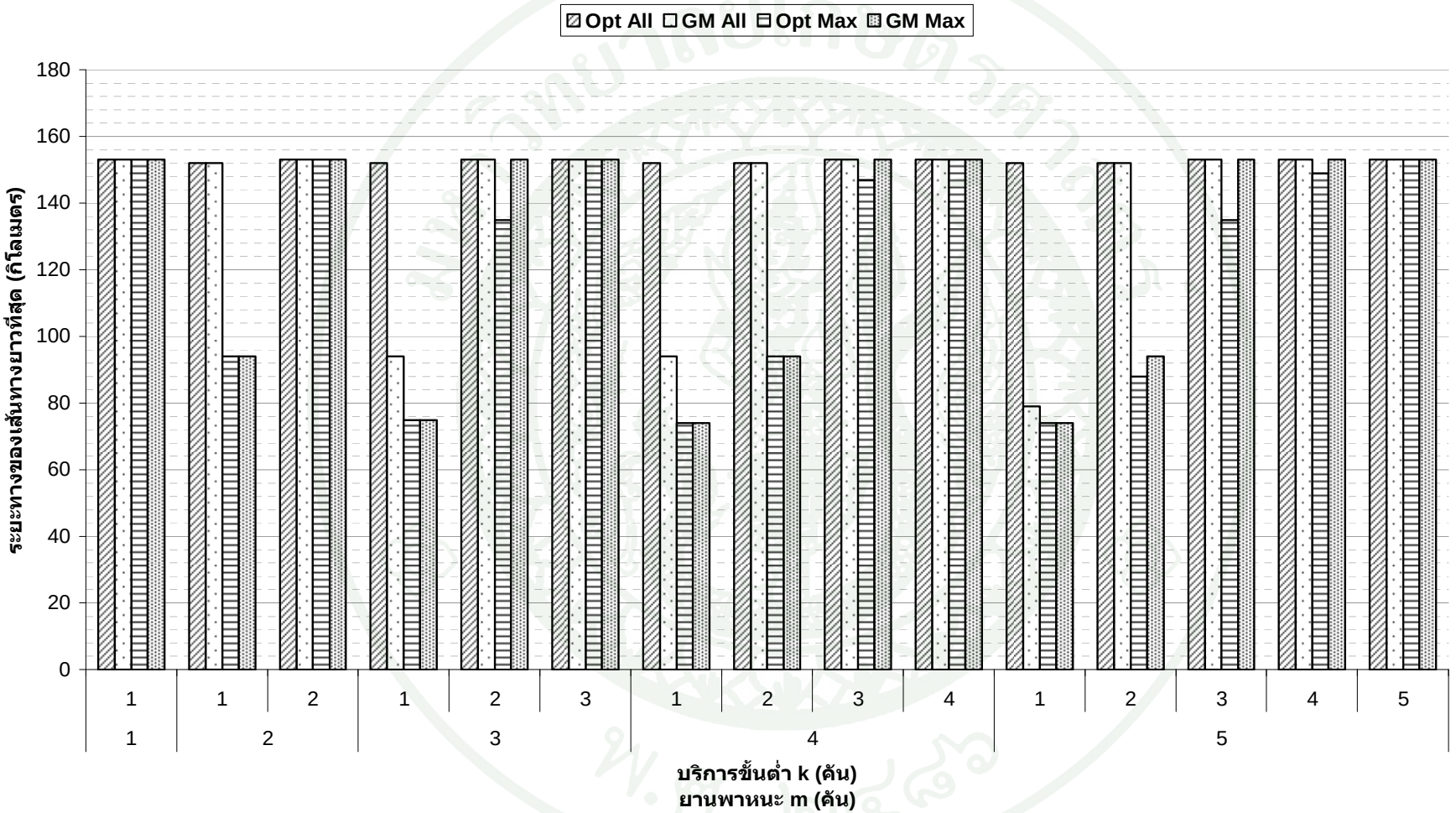
ภาพที่ 22 จำนวนคำตอบทั้งหมดที่อาจถูกพิจารณา ตามขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด เทียบกับระยะเวลาในการคำนวณ ภายในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี



ภาพที่ 23 เวลาในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี



ภาพที่ 24 ระยะทางรวมทุกเส้นทางจากแต่ละขั้นตอนวิธี ภายในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี



ภาพที่ 25 เส้นทางที่ยาวที่สุดได้จากแต่ละขั้นตอนวิธี ในเครือข่ายจำนวน 9 สถานี

6. ผลการทดลองจากแบบจำลองกราฟสุ่ม

สร้างกราฟสุ่มจำนวน 5 ชุด สำหรับแต่ละจำนวนสถานีที่ถูกกำหนด คือ 4, 5, 6, 7 และ 8 สถานี เพื่อทดสอบระหว่างขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (Opt All) กับขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (GM All) และเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (Opt Max) กับขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (GM Max)

ในแต่ละจำนวนสถานีที่กำหนด คำตอบที่ได้จากกราฟสุ่มทั้งหมดจำนวน 5 ชุด ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและแสดงภายใต้ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) 95% โดยพิจารณาในแง่ของตัวดังต่อไปนี้

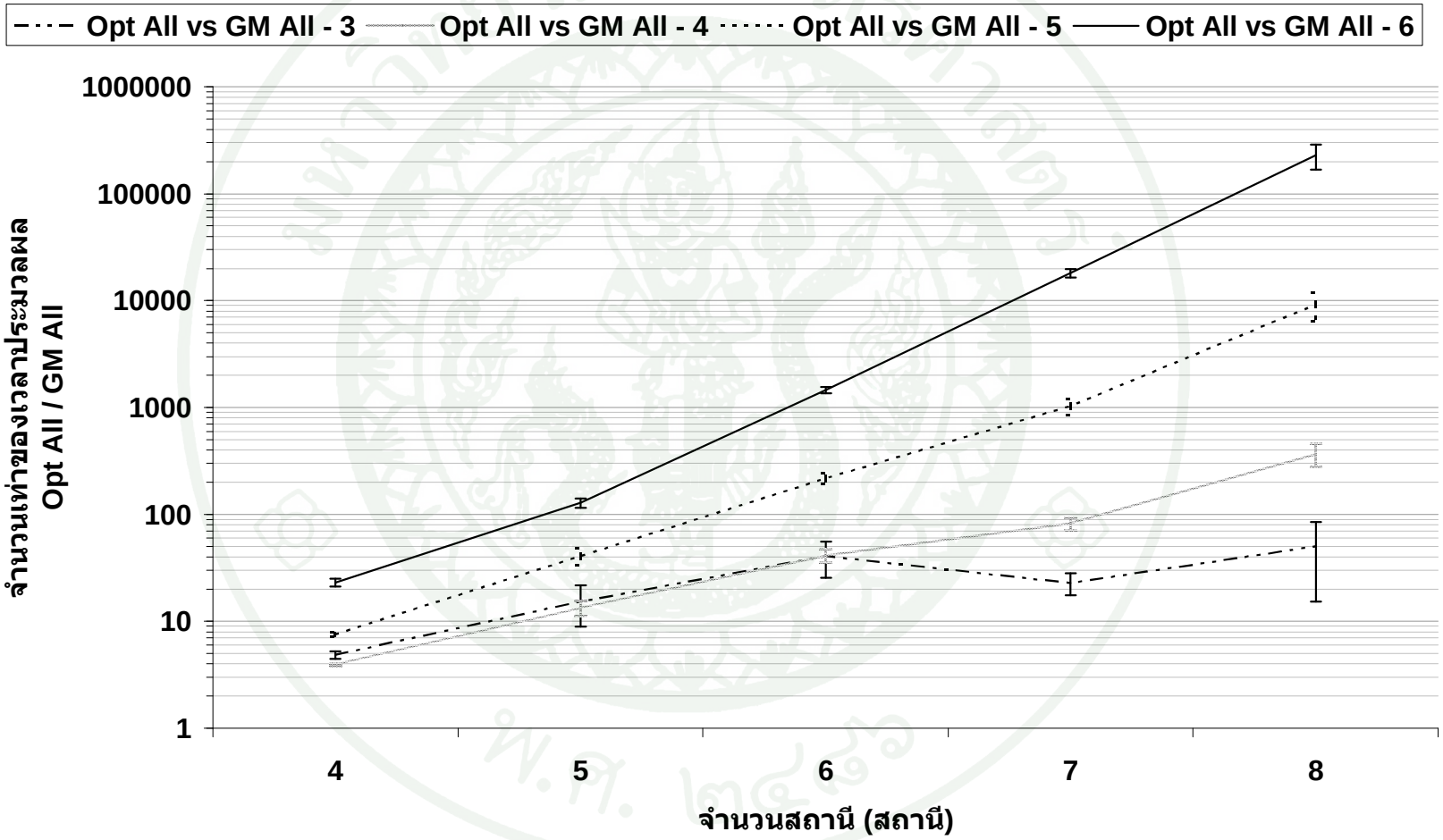
6.1. ระยะเวลาการประมวลผลระหว่าง Opt All และ GM All ดังภาพที่ 26

6.2. ระยะเวลาการประมวลผลระหว่าง Opt Max และ GM Max ดังภาพที่ 27

6.3. ระยะทางรวมของกลุ่มเส้นทางคำตอบที่ได้จาก Opt All และ GM All ดังภาพที่ 28

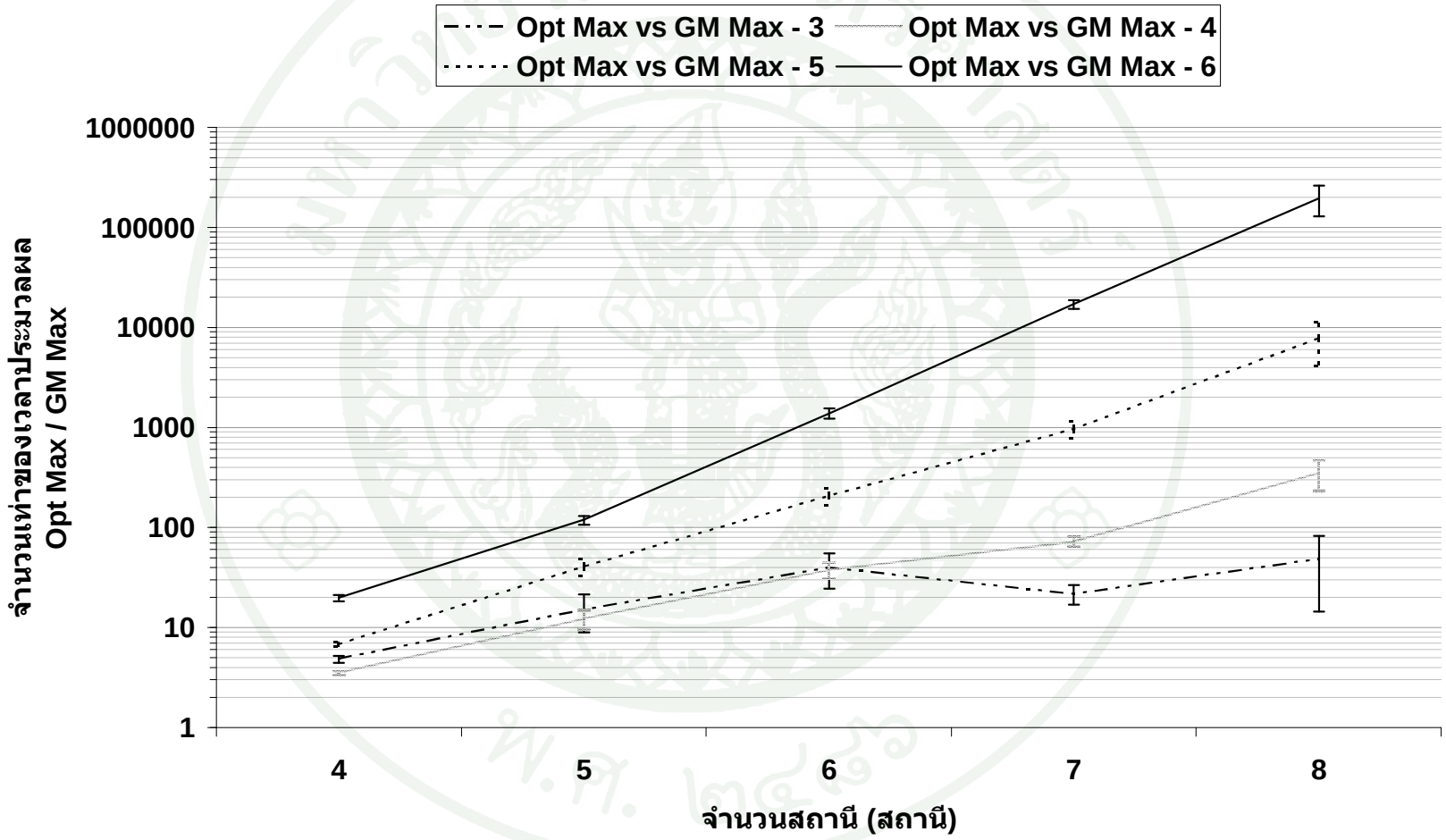
6.4. ระยะทางเส้นทางที่ยาวที่สุดจากคำตอบที่ได้จาก Opt Max และ GM Max ดังภาพที่ 29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



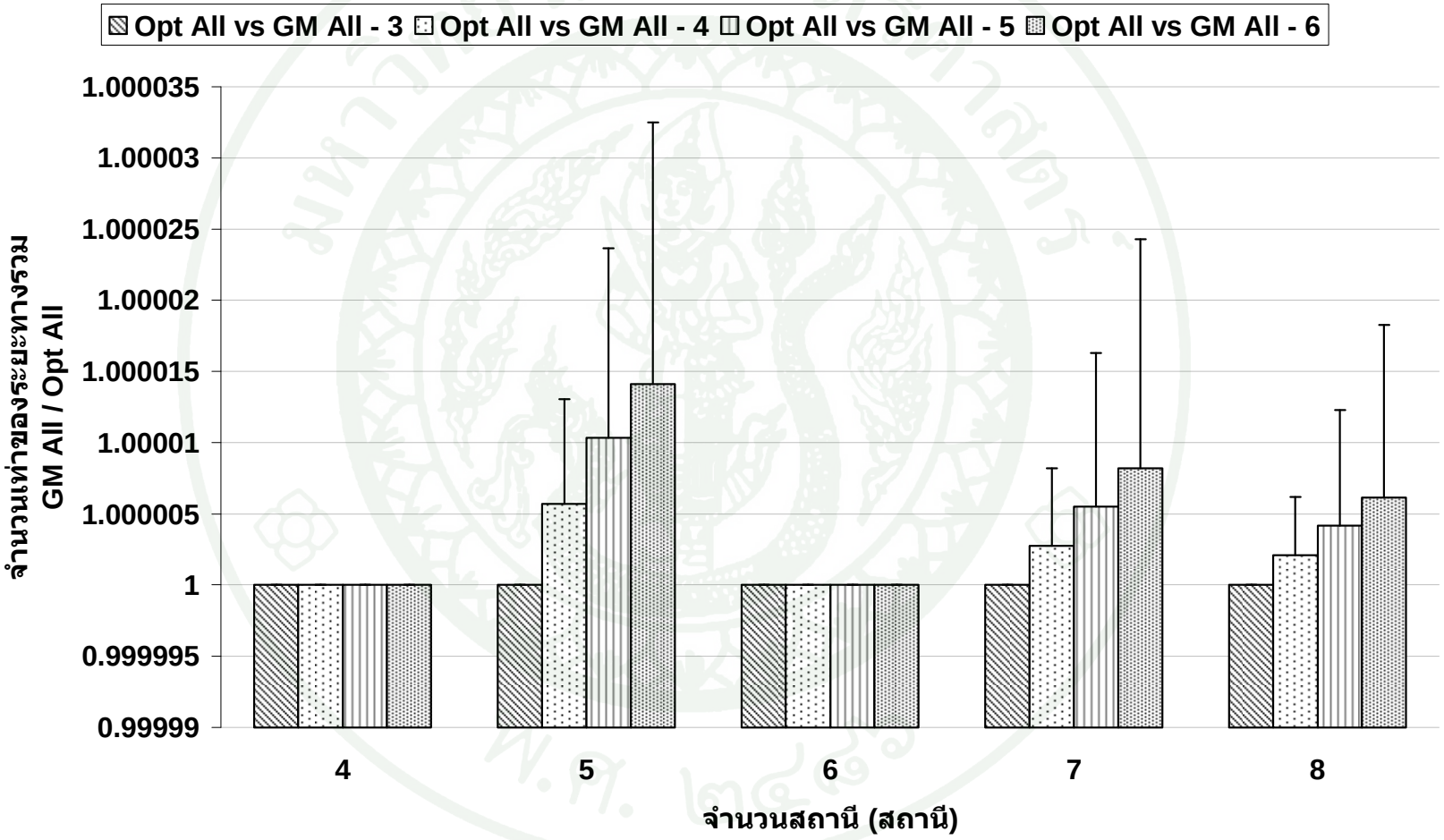
ภาพที่ 26 จำนวนเท่าของเวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธี Opt All หารด้วย GM All ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



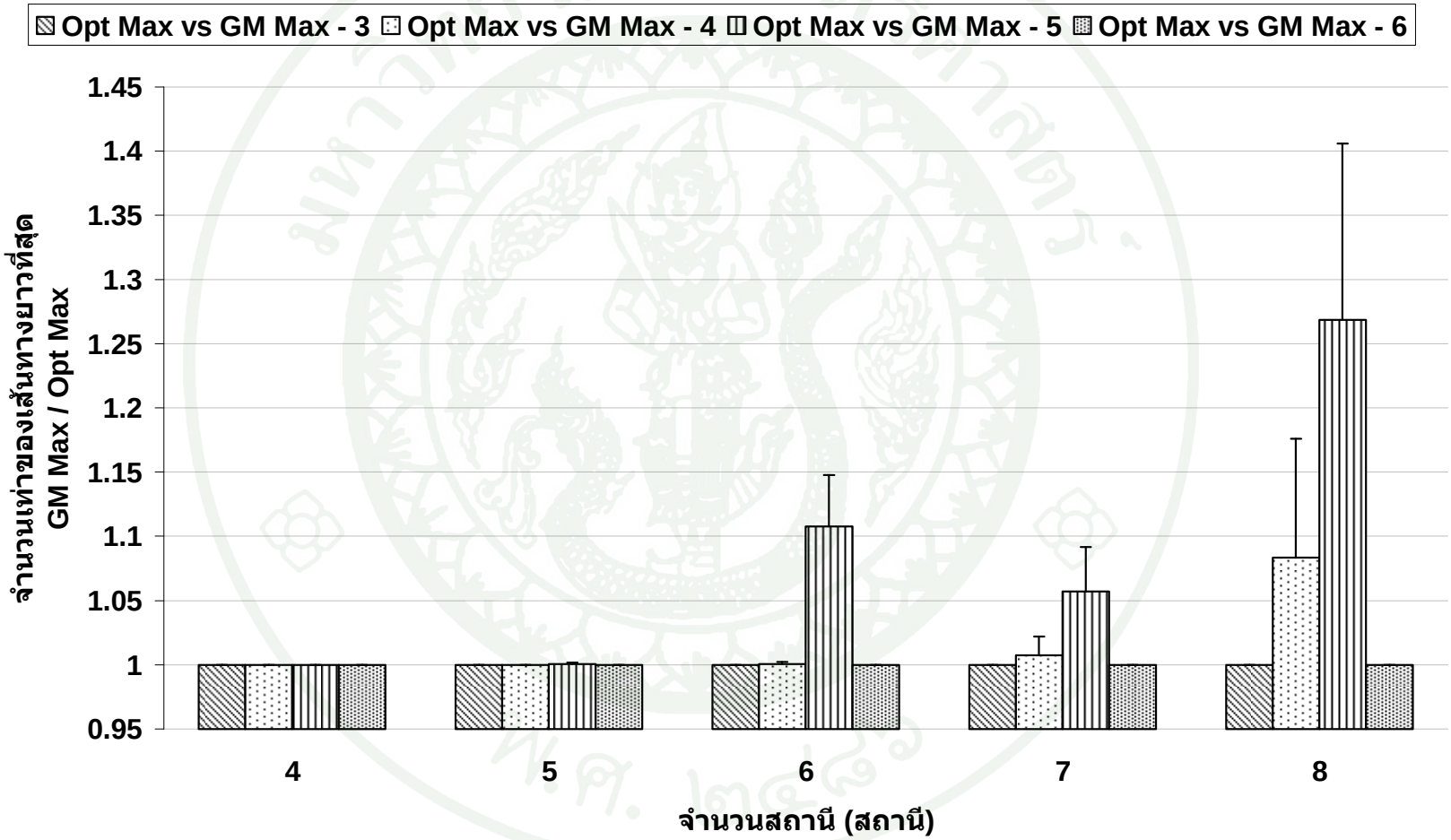
ภาพที่ 27 จำนวนเท่าของเวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธี Opt Max หารด้วย GM Max ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 28 จำนวนเท่าของระยะทางรวมจากคำตอบของขั้นตอนวิธี GM All หารด้วย Opt All ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 จำนวนเท่าของระยะทางเส้นทางที่ยาวที่สุดจากคำตอบของขั้นตอนวิธี GM Max หารด้วย Opt Max ในกราฟจำลองเครือข่ายแบบสุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม (GM) สามารถลดระยะเวลาในออกแบบเส้นทางของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลลงได้อย่างมาก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้คำนวณระหว่างขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (Opt All) กับ ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้ระยะทางรวมทุกเส้นทางสั้นที่สุด (GM All) จะเห็นได้ชัดเจนว่าแตกต่างกันมากกว่า 10 เท่าที่จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลมีจำนวนเท่ากับสาม แตกต่างกันมากกว่า 100 เท่าที่จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลเท่ากับสี่ และแตกต่าง 1,000 เท่าที่จำนวนยายพาหนะขนส่งข้อมูลมีจำนวนเท่ากับห้า เป็นต้น โดยคำตอบที่ได้ส่วนใหญ่แล้วมีระยะทางยาวรวมเท่ากัน (ยกเว้นกรณีที่ยานพาหนะขนส่งข้อมูลเท่ากับ 6 หรือ 7 และกำหนดให้บริการขั้นต่ำอย่างน้อยหนึ่ง ที่ Opt All ทำได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นทั้งหมด)

ขั้นตอนวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (Opt Max) และขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้เส้นทางให้บริการยาวที่สุดสั้นที่สุด (GM Max) ต่างใช้ระยะเวลาในการคำนวณออกแบบเส้นทางใกล้เคียงกับ Opt All และ GM All ตามลำดับ ทำให้มีความแตกต่างของระยะเวลาในการคำนวณเป็นไปในทางเดียวกันกับความแตกต่างของระยะเวลาในการคำนวณระหว่าง Opt All และ GM All ด้วยเช่นกัน แต่คำตอบที่ได้แตกต่างกันไม่เกิน 6% เท่านั้น (สังเกตได้จากตารางที่ 5)

ในการทดลองแบบจำลองแผนที่กราฟสุ่มเพื่อสังเกตระยะเวลาในการคำนวณพบว่า เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเท่าของระยะเวลาในการคำนวณระหว่าง Opt All กับ GM All และระหว่าง Opt Max กับ GM Max พบว่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนสถานี เช่นเดียวกับจำนวนเท่าของระยะทางในเส้นทางที่ยาวที่สุดจากคำตอบที่ได้ระหว่าง GM Max กับ Opt Max กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนสถานี ยกเว้นในบางกรณีที่จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลหารค่าความน่าเชื่อถือได้ลงตัว แต่ในทางกลับกันเมื่อเปรียบเทียบจำนวนเท่าของระยะทางรวมจากคำตอบที่ได้ระหว่าง GM All กับ Opt All กลับมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อจำนวนสถานีเพิ่มขึ้น (ในทุกจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล) จึงเป็นกรณีศึกษาที่น่าสนใจว่าหากฟังก์ชันวัตถุประสงค์แตกต่างออกไป ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มก็แตกต่างไปเช่นกัน

ข้อสังเกตปลีกย่อยอื่นขอกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนวิธี

ในภาพที่ 11 มีข้อน่าสังเกตที่เวลาในการคำนวณของขั้นตอนวิธี Opt All และ Opt Max ที่จำนวนการให้บริการขั้นต่ำมีค่าน้อยกว่ากลับแตกต่างกับค่าอื่นที่มากกว่า ที่จำนวนยานหนะขนส่งข้อมูลเท่ากัน ซึ่งความแตกต่างดังที่ได้กล่าวมานั้น เกิดเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วขั้นตอน Opt All และ Opt Max ต่างก็มีกลไกในการสร้างคำตอบให้เกิดขึ้นอย่างมีลำดับ โดยกำหนดให้เส้นทางที่มีจำนวนสถานีที่ได้รับบริการจำนวนน้อยถูกนำมาพิจารณาสร้างเป็นคำตอบก่อน อีกทั้งยังมีกลไกการเล็ม (Prune) คำตอบที่ถือว่าใช้ไม่ได้ หรือไม่สามารถเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ตั้งแต่ตอนต้น (กระทำทันที เพราะคำตอบดังกล่าวจะมีความยาวรวมของทุกเส้นทาง เกินกว่าคำตอบที่ดีที่สุดแน่นอน) ก่อนที่จะนำไปผ่านกรรมวิธีที่เหลือเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดต่อไป ดังนั้นหากจำนวนความต้องการขั้นต่ำในการได้รับบริการมีค่าน้อย ก็จำทำให้พบกับคำตอบที่สร้างได้รวดเร็วกว่านั่นเอง

2. เปรียบเทียบคำตอบระยะทางรวมของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลในคำตอบจากแต่ละขั้นตอนวิธี

ผลการทดลองในภาพที่ 12 ระยะทางรวมของคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี Opt All มีค่าน้อยที่สุด (ดีที่สุด) เช่นเดียวกันระยะทางรวมที่ได้จากขั้นตอนวิธี GM All ที่ให้ผลการคำนวณระยะทางเท่ากัน ที่จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m และจำนวนความต้องการได้รับบริการขั้นต่ำ k เดียวกัน

แต่อย่างไรก็ดีจากตารางที่ 4 จะเห็นว่า ในบางกรณีเมื่อกำหนดจำนวนการให้บริการขั้นต่ำ k เท่ากับหนึ่งนั้นคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี Opt All ดีกว่าคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี GM All ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าที่จำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m เท่ากับห้า ขั้นตอนวิธี Opt All สามารถให้กลุ่มเส้นทางคำตอบคือ { (0, 1), (0, 5), (0, 5), (0, 6), (0, 3, 2, 4) } แต่กลุ่มเส้นทางคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี GM All คือ { (0, 1), (0, 3), (0, 5), (0, 6), (0, 2, 4) } จึงเห็นได้ว่าบางเส้นทางในกลุ่มเส้นทางคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี Opt All นั้นมีค่าซ้ำกัน แต่กลับตรงกันข้ามกลุ่มเส้นทางคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี GM All นั้น ไม่มีเส้นทางภายในกลุ่มเส้นทางคำตอบที่ซ้ำกันเลย เนื่องจากขั้นตอนวิธี Opt All สามารถเลือกเส้นทางที่ซ้ำกันได้ ขอเพียงแต่ให้คำตอบที่ได้ออกมาดีที่สุดเท่านั้น แต่สำหรับขั้นตอนวิธี GM All จะเห็นได้ว่ามีการแบ่งจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล กระจายให้บริการกับสถานีภายในเครือข่ายอย่างเท่าเทียมและทั่วถึง ดังนั้นในบางค่าจำนวนการให้บริการขั้นต่ำ คำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี GM All จึงไม่สามารถดีเท่าขั้นตอนวิธี Opt All ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้ คำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี Opt All และขั้นตอนวิธี GM All ให้เส้นทางรวมของยานพาหนะขนส่งข้อมูลทั้งหมดในเครือข่าย สั้นกว่าขั้นตอนวิธี Opt Max และขั้นตอนวิธี GM Max เป็นไปตามที่คาดไว้ อีกทั้งระยะทางรวมทุกเส้นทางที่ได้จากคำตอบของทั้งสองขั้นตอนวิธีดังกล่าว (Opt Max, GM Max) ก็แตกต่างกันอย่างไม่แน่นอน มากกว่ากันบ้างน้อยกว่ากันบ้าง เนื่องจากการคำนวณหาคำตอบที่ต้องการระยะทางรวมทุกเส้นทางน้อยที่สุดไม่ใช่ฟังก์เป้าหมายของทั้งขั้นตอนวิธี Opt Max และขั้นตอนวิธี GM Max

3. เปรียบเทียบระยะทางที่ยาวที่สุดในกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลในคำตอบจากแต่ละขั้นตอนวิธี

จากผลการทดลองในภาพที่ 13 เห็นได้ว่าขั้นตอนวิธี Opt Max มีประสิทธิภาพ สามารถหาคำตอบที่ออกแบบให้เส้นทางที่ยาวที่สุดสั้นที่สุดได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นทั้งหมด ส่วนในกรณีของขั้นตอนวิธี GM Max นั้นถึงแม้ไม่สามารถทำได้ดีเท่าขั้นตอนวิธี Opt Max แต่ก็สามารถได้คำตอบที่มีระยะทางเส้นทางยาวที่สุดสั้นกว่าขั้นตอนวิธีที่เหลือ (Opt All และ GM All)

จากตารางที่ 5 บางกรณีขั้นตอนวิธี GM Max ไม่สามารถทำงานได้ดีเท่าขั้นตอนวิธี Opt Max เช่น เมื่อลองสำรวจคำตอบที่ได้ระหว่างขั้นตอนวิธี Opt Max และขั้นตอนวิธี GM Max เมื่อจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูล m เท่ากับสาม และจำนวนการให้บริการกับสถานีขั้นต่ำ k เท่ากับสอง ซึ่งมีระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดเท่ากับ 143 และ 151 ตามลำดับ จะพบว่าคำตอบที่ได้คือ { (0, 1, 4), (0, 5, 2, 3, 6, 1), (0, 5, 4, 2, 3, 6) } สำหรับขั้นตอนวิธี Opt Max และ { (0, 5, 4, 2, 3, 6, 1), (0, 2, 4), (0, 5, 3, 6, 1) } สำหรับขั้นตอนวิธี GM Max โดยจะสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากคำตอบ { (0, 5, 4, 2, 3, 6, 1), (0, 2, 4), (0, 5, 3, 6, 1) } ซึ่งได้จากขั้นตอนวิธี GM Max เกิดจากการหากลุ่มเส้นทางให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูล $m_1 = 3/2 = 1$ ที่จำนวนการให้บริการเท่ากับหนึ่งก่อน ทำให้ได้คำตอบ (0, 5, 4, 2, 3, 6, 1) แล้วจึงหากลุ่มเส้นทางให้กับยานพาหนะขนส่งข้อมูล $m_2 = 3/2+1 = 2$ ที่จำนวนการให้บริการเท่ากับหนึ่ง เป็นผลให้ได้คำตอบที่เหลือ (0, 2, 4), (0, 5, 3, 6, 1) ซึ่งทั้งหมดเป็นขั้นตอนวิธีพิจารณาทีละปัญหา ไม่ได้พิจารณารวมทั้งหมดในทีเดียว แตกต่างจากขั้นตอนวิธี Opt Max ที่นำทุกคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาพิจารณาเปรียบเทียบ เพื่อหาว่าในแต่ละคำตอบนั้นเส้นทางที่ยาวที่สุดมีค่าเท่าใด จนกระทั่งพบคำตอบที่เส้นทางที่ยาวที่สุดสั้นที่สุด { (0, 1, 4), (0, 5, 2, 3, 6, 1), (0, 5, 4, 2, 3, 6) }

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อสังเกตข้างต้นสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม (GM All และ GM Max) สามารถลดระยะเวลาในการคำนวณลงได้จริง จากกระบวนการที่แบ่งย่อยยานพาหนะขนส่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มเพื่อหาคำตอบของแต่ละกลุ่ม จนกระทั้งทุกกลุ่มได้คำตอบจึงรวมเป็นคำตอบของทั้งปัญหา ช่วยให้แต่ละตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มสามารถผ่านฟังก์ชันเงื่อนไขได้โดยไม่จำเป็นต้องถูกพิจารณา แต่ขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มยังคงไม่สามารถยืนยันว่าจะให้คำตอบที่ดีที่สุดเสมอไป เนื่องจากกระบวนการแบ่งย่อยกลุ่มยานพาหนะดังกล่าว อาจละทิ้งคำตอบที่ดีที่สุดได้เช่นกัน ดังกรณีของผลการทดลองที่ได้นำเสนอข้างต้น

4. เปรียบเทียบผลจากการทดสอบแบบจำลองเครือข่ายกราฟสุ่ม ที่ถูกกำหนดจำนวนสถานี

พิจารณาจากระยะเวลาในการคำนวณจาก ภาพที่ 26 และ ภาพที่ 27 ซึ่งเปรียบเทียบจำนวนเท่าของเวลาประมวลผลระหว่าง Opt All ต่อ GM All และ Opt Max ต่อ GM Max ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าระยะเวลาที่ขั้นตอน Opt ใช้ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่า GM เป็นสิบเท่าตามจำนวนสถานีที่เพิ่ม อีกทั้งจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่กำหนดแตกต่างกัน ก็ส่งผลให้จำนวนเท่าของระยะเวลาการคำนวณแตกต่างกันอีกเช่นกัน เพียงแต่ว่าจากลักษณะกราฟที่ไม่ขนานกันระหว่างแต่ละจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ถูกทดสอบคือ 3, 4, 5, และ 6 แสดงให้เห็นว่า การลู่ออกจากกันนั้นหมายถึง จำนวนสถานีที่เพิ่มขึ้นส่งผลกับจำนวนเท่าของระยะเวลาในการคำนวณระหว่าง Opt กับ GM มากกว่าจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

จำนวนเท่าของระยะทางรวมที่ได้ระหว่างคำตอบจาก GM All และ Opt All ในภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่า เมื่อจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นมีโอกาสที่ GM จะได้คำตอบที่มีระยะทางรวมเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขณะเดียวกันช่วงความเชื่อมั่นที่กว้างขึ้น แสดงถึงคำตอบที่เกิดขึ้นจากกราฟสุ่มรูปแบบต่างกัน 5 รูปแบบว่า จำนวนเท่าดังกล่าวมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามจำนวนยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงถึงความไม่แน่นอนในระยะทางรวมของคำตอบที่ GM All สร้างขึ้น แต่อย่างไรก็ดี เมื่อจำนวนสถานีเพิ่มคำตอบที่ได้มีแนวโน้มว่าระยะทางรวมจะลดลง

ข้อสังเกตจากจำนวนเท่าของระยะทางจากเส้นทางที่ยาวที่สุดระหว่างคำตอบที่ได้จาก GM Max และ Opt Max ในภาพที่ 29 คือ คำตอบที่ได้จะได้ระยะทางเส้นทางยาวที่สุดเท่ากันเมื่อจำนวนสมาชิกยานพาหนะขนส่งข้อมูลในกลุ่มย่อยตามขั้นตอนวิธีจัดกลุ่ม มีจำนวนเท่ากันทุกกลุ่มย่อย ซึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จะเป็นดังนั้นได้ก็ต่อเมื่อจำนวนความน่าเชื่อถือได้ (การให้บริการขั้นต่ำ) สามารถหารจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลในเครือข่ายลงตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดนั้น จำเป็นต้องอาศัยระยะเวลาในการคำนวณมากตามจำนวนของสถานีภายในเครือข่าย และจำนวนของยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่ให้บริการ จึงได้เสนอขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มเพื่อให้สามารถคำนวณหากลุ่มเส้นทางให้บริการได้ ภายในเวลาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มมีลักษณะพิเศษคือ ทำให้แต่ละสถานีในเครือข่ายสามารถได้รับบริการจากยานพาหนะขนส่งข้อมูลได้ตามข้อบังคับขั้นต่ำ และลดจำนวนของยานพาหนะขนส่งข้อมูลในการคำนวณออกแบบเส้นทางของแต่ละกลุ่มย่อย จึงเป็นเหตุให้ระยะเวลาในการคำนวณลดลง นอกจากนี้การที่ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มสามารถออกแบบเส้นทางของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูล โดยที่แต่ละสถานีในเครือข่ายได้รับบริการพอดีกับจำนวนการให้บริการขั้นต่ำที่กำหนด ช่วยเสริมให้คำตอบหรือกลุ่มเส้นทางที่ออกแบบได้นั้น ได้รับภารกิจในการให้บริการสถานีในจำนวนที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเส้นทาง

ขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มสามารถนำไปใช้ร่วมกับการออกแบบเส้นทางของกลุ่มยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแบบต่างๆ บนพื้นฐานแต่ละสถานีต้องได้รับบริการตามที่กำหนดได้ เช่นต้องการคำตอบที่ระยะทางรวมของทุกเส้นทางสั้นที่สุด หรือต้องการให้ระยะทางของเส้นทางที่ยาวที่สุดสั้นที่สุด ซึ่งฟังก์ชันตามวัตถุประสงค์ตามที่กล่าวมานั้น จะพบข้อสังเกตที่แตกต่างกันเพื่อการออกแบบขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้หลังจากแบ่งกลุ่ม ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อผลและวิจารณ์การทดลอง

ข้อเสนอแนะ

ในทางปฏิบัติจริง สามารถที่จะคำนวณขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางที่ดีที่สุดไว้พร้อมกับขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางแบบจัดกลุ่ม แล้วนำผลลัพธ์จากขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มที่ได้เร็วกว่ามาใช้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานในเบื้องต้นก่อน จนกระทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบเส้นทางที่ดีที่สุดเสร็จสิ้นจึงนำทางใช้ทดแทน

สำหรับส่วนของขั้นตอนวิธีจัดกลุ่มนั้น เนื่องจากประกอบด้วยการคำนวณกลุ่มย่อยของเส้นทางยานพาหนะที่ให้บริการอย่างมากเพียง 2 ครั้งเท่านั้น และในการคำนวณยังอิสระจากกันด้วย ซึ่งหากใช้การคำนวณไปพร้อมกัน (Parallel Processing) ก็ยิ่งลดระยะเวลาในการทำงานลงอีกด้วย

ท้ายที่สุดงานในอนาคตควรเพิ่มเติมขอบเขตให้กว้างขึ้นเพื่อใช้กับสถานการณ์ที่แตกต่างอย่างเหมาะสมได้มากขึ้นอีก เช่นการกำหนดให้สถานีฐานไม่ได้มีเพียงหนึ่งแต่กระจายตัวโดยรอบเครือข่ายขนส่งข้อมูลโดยยานพาหนะ หรือจำลองโครงสร้างคณิตศาสตร์เพิ่มเติมเพื่อประเมินและคาดการณ์ ปริมาณข้อมูล ระยะเวลาที่ล่าช้า หรือจำนวนยานพาหนะขนส่งข้อมูลที่เหมาะสม เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Bektas, T. 2006. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. **Omega** 34 (3): 209-326.

Bin Tariq, M.M., M. Ammar and E. Zegura. 2006. Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes, pp. 37 - 48. *In* **International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing 7th. ed.** ACM, Florence, Italy.

ErdŐs, P. and A. Rényi. 1959. On Random Graphs I, pp. 290-297. *In* **Publicationes Mathematicae 6. ed.** Debrecen, Hungary.

Fall, K. 2003. A delay-tolerant network architecture for challenged internets, pp. 27-34. *In* **Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication 2003. ed.** ACM, Karlsruhe, Germany.

Floyd, R. 1962. Algorithm 97: Shortest path. **Communications of the ACM** 5 (6): 345.

Friedman, J.H., J.L. Bentley and R.A. Finkel. 1977. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. **Mathematical Software (TOMS).** ACM Transactions Journal 3 (3): 202-209.

Gavish, B. and K. Srikanth. 1986. An optimal solution method for large-scale multiple traveling salesmen problems. **Journal Operations Research** 34 (5): 698.

Gossett, E. 2009. Combinations with Repetition, pp. 234-236. *In* **Discrete Mathematics with Proof**. 2 ed. Wiley.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Johnson, D.S. and L.A. McGeoch. 1997. The traveling salesman problem: a case study, pp. 215-310. *In* Emile Aarts and J. K. Lenstra, eds. **Local Search in Combinatorial Optimization.** Princeton University Press, United States of America.

McMahon, A. and S. Farrell. 2009. Delay- and Disruption-Tolerant Networking. **Internet Computing, IEEE** 13 (6): 82-87.

Pearl, J. 1985. Heuristics. Intelligent search strategies for computer problem solving. *In* **The Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence, Reading, Mass, 1985**. Addison-Wesley.

Reinelt, G. 1994. **The traveling salesman: computational solutions for TSP applications.** Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg - Germany.

Yang, J, Y. Chen, M. Ammar and C. Lee. 2005. Ferry replacement protocols in sparse MANET message ferrying systems, pp. 2038 - 2044. *In* **Wireless Communications and Networking Conference 2005** . IEEE, New Orleans, LA, USA

Zhang, Z. and Z. Fei. 2007. Route Design for Multiple Ferries in Delay Tolerant Networks, pp. 3460-3465. *In* **Wireless Communications and Networking Conference, 2007**. WCNC 2007 IEEE, Kowloon, Hong Kong.

Zhao, W. and M. Ammar. 2003. Message Ferrying: Proactive Routing in Highly-Partitioned Wireless Ad Hoc Networks, p. 308. *In* **IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems 9. ed.** IEEE Computer Society, Washington, DC, USA.

Zhao, W., E. Zegura, and M. Ammar. 2004. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks, pp. 187-198. *In* **International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing 5th. ed.** ACM, Roppongi Hills, Tokyo, Japan.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Zhao, W., M. Ammar and E. Zegura. 2005. Controlling the Mobility of Multiple Data Transport Ferries in a Delay-Tolerant Network, pp. 1407-1408. *In* **INFOCOM 2005 24th. ed.** IEEE Computer and Communications Societies, Miami, FL, USA.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

จำนวนวิธีของการเลือกแบบซ้ำได้

Combinations with Repetition

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จำนวนวิธีของการเลือกสิ่งของทั้งหมด r ครั้งซึ่งสามารถเลือกซ้ำได้ จากสิ่งของที่แตกต่างกันจำนวน n สิ่ง เริ่มต้นจากการพิจารณารูปแบบกระบวนการจำลองเช่น การเลือกตักของเหลวจากภาชนะจำนวน n ด้วยจำนวนการตัก r ครั้ง จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของขั้นตอนการทำงานได้ดังต่อไปนี้ เมื่อภาชนะ n=3 แทนด้วย { a, b, c } และ r=2 คือ ให้พิจารณาการเลือกตักของเหลวจากภาชนะจากซ้ายไปขวา จาก a ไป b ไป c ตามลำดับ ซึ่งเมื่อตักที่ภาชนะใดให้แทนด้วยคำว่า “ตัก” แต่ถ้าไม่ตักให้แทนด้วยคำว่า “เปลี่ยนถัง” จึงทำให้ได้จำนวนวิธีทั้งหมดที่เป็นไปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางผนวกที่ ก1 ลักษณะวิธีการเลือกตักของเหลว 3 ชนิด จำนวน 2 ครั้ง

ภาชนะที่ถูกตัก	**ขั้นตอนการตัก**				**อธิบาย**
{ a, a }	ตัก,	ตัก,	เปลี่ยนถัง,	เปลี่ยนถัง	ตักถัง a ทั้งสองครั้ง
{ a, b }	ตัก,	เปลี่ยนถัง,	ตัก,	เปลี่ยนถัง	ตักถัง a และ b
{ a, c }	ตัก,	เปลี่ยนถัง,	เปลี่ยนถัง,	ตัก	ตักถัง a และ c
{ b, b }	เปลี่ยนถัง,	ตัก,	ตัก,	เปลี่ยนถัง	ตักถัง b ทั้งสองครั้ง
{ b, c }	เปลี่ยนถัง,	ตัก,	เปลี่ยนถัง,	ตัก	ตักถัง b และ c
{ c, c }	เปลี่ยนถัง,	เปลี่ยนถัง,	ตัก,	ตัก	ตักถัง c ทั้งสองครั้ง

จากข้อสังเกตจากตารางผนวกที่ ก1 ทำให้กล่าวได้ว่าจำนวนวิธีในการเลือกตักของเหลวจากภาชนะ เท่ากับจำนวนวิธีในการเลือกตำแหน่งที่จะ “ตัก” จาก r ตำแหน่ง จากจำนวนตำแหน่งทั้งหมดที่เกิดขึ้นคือ $n + r - 1$ ตำแหน่ง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า จำนวนวิธีในการเลือกสิ่งของทั้งหมด r ครั้ง จากของจำนวน n สิ่งสามารถเลือกได้ $C_{rep}(n, r)$วิธีคือ

$$C_{rep}(n,r) = \binom{n+r-1}{r} \qquad \text{(ก.1)}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

จำนวนวิธีในการแบ่งสิ่งของออกเป็นกลุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จำนวนวิธีในการแบ่งสิ่งของจำนวน n สิ่งที่แตกต่าง ออกเป็นกลุ่มจำนวน r กลุ่มโดยแต่ละกลุ่มจำนวนอาจไม่เท่ากัน เริ่มต้นจากจำนวนวิธีในการเลือกสิ่งของจำนวน n ให้กับกลุ่มแรก คูณกับจำนวนวิธีในการเลือกสิ่งของที่เหลือให้กับกลุ่มถัดไป ซึ่งในแต่ละครั้งของการเลือก จำนวนที่สามารถเลือกได้นั้นต้องสอดคล้องกับข้อกำหนด คือทุกกลุ่มต้องไม่ว่าง ดังนั้นแล้วในการเลือกแต่ละครั้งจึงเริ่มต้นคิดได้ว่า อย่างน้อยต้องมีหนึ่งสิ่งก่อน แล้วจึงสามารถเลือกได้ว่าจะเพิ่มจำนวนอีกเท่าใด ซึ่งจำนวนที่เป็นไปได้คือตั้งแต่ศูนย์ จนกระทั่งถึงจำนวนสิ่งของที่มีอยู่ลบกับจำนวนกลุ่มที่เหลืออยู่ (เพราะต้องเหลืออย่างน้อยหนึ่งชิ้นกลุ่มที่เหลืออยู่ทุกกลุ่มด้วย) ทำให้ได้ $f(n, m)$ เป็นจำนวนวิธีในการแบ่งสิ่งของ n สิ่งที่แตกต่าง ออกเป็น m กลุ่มได้คือ

$$\begin{aligned}
f(1,1) &= 1 \\
f(2,1) &= 1 \\
&\vdots \\
f(n,1) &= 1 \\
f(n,2) &= \sum_{i=1}^{n-1} \binom{n}{i} \cdot f(n-i,1) \\
&\vdots \\
f(n,r) &= \sum_{i=1}^{n-(r-1)} \binom{n}{i} \cdot f(n-i,m-1)
\end{aligned} \qquad \text{(ข.1)}$$

อย่างไรก็ดีในขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจะพบว่า คำตอบที่ได้จากการเลือกสิ่งของทีละกลุ่มนั้นมีเรื่องของลำดับการเลือกเข้ามีเกี่ยวข้องด้วย ทำให้คำตอบที่ได้มีจำนวนมากกว่าความเป็นจริง เช่น สมมติว่ามี $\{ a, b, c, d, e \}$ ถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม จะพบว่าคำตอบที่ได้ $\{ (a, b) , (c, d, e) \}$ กับ $\{ (c, d, e) , (a, b) \}$ นั้นเป็นคำตอบเดียวกัน ซึ่งการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ การกำหนดให้มีสิ่งของชิ้นใดก็ได้หนึ่งชิ้นเป็นหลัก แล้วจึงเลือกสิ่งของที่เหลือมาร่วมกลุ่มด้วย คล้ายกับแนวคิดเรื่องกับสับเปลี่ยนแบบวงกลม (Circular Permutation) จึงได้ว่า

$$\begin{aligned}
f(n,m) &= \sum_{i=0}^{(n-1)-(m-1)} \binom{n-1}{i} \cdot f(n-1-i,m-1) \\
&= \sum_{i=0}^{n-m} \binom{n-1}{i} \cdot f(n-1-i,m-1)
\end{aligned} \qquad \text{(ข.2)}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ภาสกร ทิวัฑฒานนท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 กุมภาพันธ์ 2523
สถานที่เกิด	อำเภอมโนรมณ์ จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย 2
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิคและคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์