

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดใน  
เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

MECHANISM FOR IMPROVING ANT COLONY OPTIMIZATION ROUTING  
ALGORITHM IN WIRELESS SENSOR NETWORKS



T141256



อพ.  
ว/93ก  
2558

b. 18 พฤศจิกายน 2558  
i. ....

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 141256  
วัน,เดือน,ปี 8 ต.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-070-198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANISM FOR IMPROVING ANT COLONY OPTIMIZATION ROUTING  
ALGORITHM IN WIRELESS SENSOR NETWORKS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN COMPUTER ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

KMITL-2015-EN-M-070-198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2015**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย
นักศึกษา	นายรณชัย สั้งหมื่นเม้า
รหัสประจำตัว	54611409
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ศักดิ์ชัย ทิพย์จักร์รัตน์

### บทคัดย่อ

กระบวนการหนึ่งที่สำคัญในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายก็คือ การค้นหาเส้นทาง อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดเวลาประวิง (ดีเลย์) ในเครือข่ายมากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายลดน้อยลง บทความนี้เรานำเสนออัลกอริทึมเพื่อปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (เอเออาร์ไอ) โดยเราจะพิจารณาเวลาประวิงของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์และเพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่าย เราเรียกอัลกอริทึมที่เรานำเสนอนี้ว่า อัลกอริทึมการปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (ไอเอเออาร์ไอ) เราประเมินประสิทธิภาพของไอเอเออาร์ไอ ด้วยการจำลองการทำงานโดยวัดประสิทธิภาพในรูปของเวลาประวิงเฉลี่ยจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง โอเวอร์เฮดในการค้นหาเส้นทาง ทรุษุท แพ็คเก็ตที่สูญเสี่ย คิวเฉลี่ยและอายุการใช้งานของเครือข่าย จากผลการจำลองการทำงาน ไอเอเออาร์ไอ ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่า เอเออาร์ไอ ในทุกๆ ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Mechanism for Improving Ant Colony Optimization Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks
Student	Mr. Ronnachai Sangmunemao
Student ID	54611409
Degree	Master of Engineering
Program	Computer Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Ast.Prof.Dr. Sakchai Thipchaksurat

## ABSTRACT

One major process in wireless sensor networks is the routing algorithm. Most of the routing algorithms may cause the increasing delay resulting in the decreasing the performance of networks. In the paper, we propose algorithm for improving the ant routing optimization algorithm (ARO). Our proposed algorithm considers the delay between the sensor nodes and route repair mechanism. Our algorithm is called the improvement of ant colony optimization routing algorithm (IARO). We evaluate the performance of IARO by means of the simulation. We evaluate performance in the terms of average end-to-end delay, routing overhead, throughput, packet loss, average queue and network lifetime. The results show that the IARO provides the better performance than those of ARO for all performance metrics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศักดิ์ชัย ทิพย์จักรชรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะการทำการวิจัย และ ปลุกฝังจริยธรรมที่ดีตลอดจนให้ความรู้ประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ นายพุฒิพงศ์ เกิดพิพัฒน์ นายโชติวรุตม์ ปริพัฒน์อภิโชติ และเพื่อนๆ พี่ๆ และ น้องๆ ทุกคน ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรม NS-2 การทำการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการจำลอง ขอขอบคุณทุกคน ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่คอยช่วยเหลือทางด้าน กำลังทรัพย์และเป็นกำลังใจให้สามารถศึกษาจนสำเร็จลุล่วงตลอดมาสำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิด จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

รณชัย สัมหมันเม้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง.....	4
2.1 ความเป็นมาของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	4
2.2 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	5
2.2.1 ลักษณะของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	6
2.2.2 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	7
2.2.3 ส่วนประกอบหลักของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	8
2.2.4 ส่วนประกอบเพิ่มเติมของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	8
2.2.5 ซอฟต์แวร์พื้นฐานของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	9
2.3 ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	10
2.4 มาตรฐานระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	11
2.4.1 เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	11
2.4.2 การทำงานของโพรโทคอล IEEE 802.15.4.....	12
2.5 ตัวอย่างการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	16
2.5.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์การเฝ้าระวังด้วยมัลติมีเดีย (Multimedia Surveillance Sensor Networks).....	16
2.5.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดน้ำ (Floating Sensor Networks) .....	17
2.5.3 การดูแลสุขภาพขั้นสูง (Advanced health care delivery).....	17
2.6 โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง (Routing protocol).....	17
2.6.1 โพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ (Mobile Ad hoc Network Routing Protocols).....	18
2.6.2 กลุ่มของโพรโทคอลที่ทำงานด้วยตาราง (Table-Driven Routing Protocols) .....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลVต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3	กลุ่มของโพรโทคอลที่ทำงานเมื่อมีการร้องขอ (On-Demand Routing Protocols).....	19
2.7	ตัวแบบการเคลื่อนที่ (Mobility Model).....	24
2.7.1	ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ (Random Waypoint Mobility Model : RW).....	24
2.7.2	ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด (Manhattan Grid Mobility Model : MG)..	24
บทที่ 3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	26
3.1	การค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด .....	26
3.1.1	ประวัติความเป็นมาของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด .....	26
3.1.2	โครงสร้างของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด .....	27
3.2	โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานเครือข่าย.....	35
3.2.1	รูปแบบของอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	35
3.2.2	การใช้พลังงานในการตรวจจับ.....	36
3.2.3	การใช้พลังงานในการสื่อสาร .....	36
3.2.4	การเริ่มต้นของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	37
3.2.5	การสร้างพฤติกรรมของมด.....	37
บทที่ 4	อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ .....	41
4.1	แนวทางในการปรับปรุงของอัลกอริทึมที่นำเสนอ .....	41
4.2	อัลกอริทึมที่นำเสนอ .....	42
4.2.1	กลไกการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism).....	42
4.2.2	เวลาประวิงในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	46
4.2.3	เวลาประวิงเกิดจากการรอคิว (Queuing Delay).....	47
4.2.4	เวลาประวิงของการแพร่กระจายข้อมูลผ่านสื่อ (Propagation Delay).....	47
4.2.5	กลไกการเลือกเส้นทาง (Route Selection Mechanism) .....	49
4.2.6	กลไกการซ่อมแซมเส้นทาง (Route Repair Mechanism).....	50
บทที่ 5	การประเมินประสิทธิภาพ .....	52
5.1	โปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	52
5.2	ตัววัดประสิทธิภาพของระบบที่ประเมิน .....	53
5.2.1	เวลาประวิงเฉลี่ย (Average End-to-End Delay).....	53
5.2.2	โอเวอร์เฮดของการค้นหาเส้นทาง (Routing Overhead) .....	54
5.2.3	ทราฟฟิค (Throughput) .....	54
5.2.4	แพ็คเกจที่สูญเสียน (Packet Loss).....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลVต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.5 คิวเฉลี่ย (Average Queue) .....	55
5.2.6 อายุการใช้งานของเครือข่าย (Network Lifetime).....	55
5.3 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองการทำงาน .....	55
5.4 ผลการจำลองการทำงาน.....	56
5.4.1 การจำลองการทำงานเพื่อพิจารณาค่า $r$ และ $d\lambda$ ที่เหมาะสม .....	57
5.4.2 การจำลองการทำงานเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมไอเออาร์ไอและ อัลกอริทึมเออาร์ไอ .....	61
บทที่ 6 บทสรุป .....	66
6.1 สรุปผลการจำลองการทำงาน .....	66
6.2 อุปสรรคและปัญหา.....	66
6.3 แนวทางการปรับปรุงในอนาคต.....	67
เอกสารอ้างอิง .....	68
ภาคผนวก.....	70
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	12
ตารางที่ 2.2 การแบ่งย่านความถี่และจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งานตามมาตรฐาน.....	14
ตารางที่ 4.1 คำนวณน้ำหนักของเส้นทางเชื่อมโยง $C_{(sn,j,bs)}$ .....	48
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองการทำงาน .....	56
ตารางที่ 5.2 ค่า $r$ และ $dw$ ที่เหมาะสมที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างๆ เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานในส่วนที่ 2 .....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีไร้สายชนิดต่างๆ.....	4
รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมและโครงสร้างของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	6
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย .....	7
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของซอฟต์แวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	9
รูปที่ 2.5 ระดับชั้นโพรโทคอลของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	10
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของสแต็กโพรโทคอลซิกบีของเทคโนโลยี IEEE 802.15.4.....	13
รูปที่ 2.7 IEEE 802.15.4 Channel Allocation.....	13
รูปที่ 2.8 ทอโพลีของเครือข่ายสำหรับโพรโทคอล IEEE 802.15.4.....	16
รูปที่ 2.9 แสดงโหนดในเครือข่ายที่ทำหน้าที่เป็นโหนดบัพก่อนและโหนดบัพหลัง .....	19
รูปที่ 2.10 รูปแบบแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางของโพรโทคอล AODV.....	20
รูปที่ 2.11 รูปแบบแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางของโพรโทคอล AODV .....	21
รูปที่ 2.12 รูปแบบแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดของโพรโทคอล AODV.....	22
รูปที่ 2.13 กระบวนการ Route Discovery ของโพรโทคอล AODV .....	23
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโหนดตามตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ ...	24
รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างถนนในตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด.....	25
รูปที่ 3.1 การหาอาหารของมดโดยเดินผ่านโหนดต่างๆ .....	27
รูปที่ 3.2 การหาอาหารของมดเมื่ออาศัยการสื่อสารด้วยสารฟีโรโมน.....	27
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทั่วไปของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด.....	29
รูปที่ 4.1 การรับส่งข้อมูลที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	41
รูปที่ 4.2 อัลกอริทึมไอเออาร์โอ.....	43
รูปที่ 4.3 รูปแบบแพ็คเก็ตในการค้นหาเส้นทาง Forward ANT (FANT).....	43
รูปที่ 4.4 กลไกการค้นหาเส้นทาง.....	44
รูปที่ 4.5 การส่งกระจายแพ็คเก็ต FANT .....	45
รูปที่ 4.6 เวลาประวิงต่างๆ ของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียง.....	46
รูปที่ 4.7 การส่งแพ็คเก็ต BANT.....	48
รูปที่ 4.8 รูปแบบแพ็คเก็ตในการตอบกลับเส้นทาง Backward ANT (BANT) .....	49
รูปที่ 4.9 กลไกการซ่อมแซมเส้นทาง .....	50
รูปที่ 4.10 รูปแบบแพ็คเก็ตในการซ่อมแซมเส้นทาง Repair Forward ANT (R_FANT) .....	51
รูปที่ 5.1 โปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เอ็นเอส-ทู .....	53
รูปที่ 5.2 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $dw$ และ $r$ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 0 เมตรต่อ วินาที.....	58
รูปที่ 5.3 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $dw$ และ $r$ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 2 เมตรต่อ วินาที.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.4 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $dw$ และ $r$ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 4 เมตรต่อวินาที.....	59
รูปที่ 5.5 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $dw$ และ $r$ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 6 เมตรต่อวินาที.....	59
รูปที่ 5.6 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $dw$ และ $r$ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 8 เมตรต่อวินาที.....	60
รูปที่ 5.7 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $dw$ และ $r$ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 10 เมตรต่อวินาที.....	60
รูปที่ 5.8 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม.....	62
รูปที่ 5.9 โอเวอร์เฮดต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม.....	63
รูปที่ 5.10 ทฤษฎีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม.....	63
รูปที่ 5.11 แพ็คเก็ตที่สูญเสียต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดแบบสุ่ม.....	64
รูปที่ 5.12 คิวเฉลี่ยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม.....	64
รูปที่ 5.13 อายุการใช้งานของเครือข่ายต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSNs) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในหลากหลายด้าน เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายถูกออกแบบและพัฒนาให้เชื่อมโยงโหนดเซ็นเซอร์จำนวนมาก เพื่อนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์เหล่านี้มาใช้เพื่อจุดประสงค์ที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ระบบเตือนภัย (Disaster Warning Systems) เพื่อพยากรณ์และเตือนภัยให้สามารถป้องกันและลดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ระบบเฝ้าตรวจสอบและควบคุมทางด้านเกษตรกรรมเพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร (Monitoring and Controlling Systems for Agriculture) [1]

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีความคล้ายกับเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Wireless Ad Hoc Networks) แต่เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีความแตกต่างจากเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจที่สำคัญคือ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะทำการเชื่อมโยงโหนดเซ็นเซอร์จำนวนมากและโหนดเซ็นเซอร์เหล่านี้มีขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่า โหนดเซ็นเซอร์ต้นทาง (Sensor Node : SN) โหนดเซ็นเซอร์ต้นทางทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูลและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานหรือโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง (Base Station : BS) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะมีข้อจำกัดมากกว่าเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ เช่น ระยะทางในการสื่อสาร ขนาดหน่วยความจำและพลังงาน เป็นต้น

ในปัจจุบันเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีทั้งเครือข่ายที่มีโหนดเซ็นเซอร์ที่มีคุณลักษณะสามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile Wireless Sensor Network) และที่ไม่มีคุณลักษณะสามารถเคลื่อนที่ได้ [2] เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทั้งสองแบบจะมีการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางเพื่อส่งข้อมูล ปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่เกิดกับเครือข่ายทั้งสองแบบนี้คือ อาจจะมีบางโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าโหนดอื่นๆ ในเครือข่าย ส่งผลให้เกิดเวลาประวิง (ดีเลย์) สูงซึ่งทำให้ทรูพุทและอายุการใช้งานของเครือข่ายลดน้อยลง [3] ดังนั้นในการออกแบบการค้นหาเส้นทางเพื่อช่วยลดเวลาประวิงที่เกิดขึ้นและเพิ่มทรูพุทให้กับเครือข่าย อาจจะช่วยโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางสามารถได้รับข้อมูลตามเวลาจริงซึ่งเป็นจุดสำคัญจุดหนึ่งในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่าย เพื่อตอบสนองความต้องการที่มีมากขึ้นต่อการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราสนใจในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (เออาร์โอ) [13] เพื่อช่วยลดเวลาประวิง (ดีเลย์) และเพิ่มทรูพุทให้กับเครือข่าย ทั้งที่เป็นโหนดที่มีการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าโหนดอื่นๆ ในเครือข่าย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดในการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานให้กับเครือข่าย
- 3) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางโดยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายตลอดจนลดเวลาประวิง ลดแพ็คเก็ตที่สูญเสี่ย ลดคิวเฉลี่ยและเพิ่มทราฟฟิคให้กับเครือข่าย

### 1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

การค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในอัลกอริทึมเออาร์ไอ สำหรับในกระบวนการของการเลือกเส้นทางนั้น อัลกอริทึมจะทำเลือกเส้นทางจากความเป็นด้วยวิธีการของมด โดยทำการพิจารณาฟีโรโมนและการใช้พลังงานต่างๆ ในเส้นทางนั้นมาเป็นน้ำหนักในการเลือกโหนดข้างเคียงเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดเวลาประวิง (ดีเลย์) แบบต่างๆ ในเครือข่ายและเกิดความคับคั่งของการส่งข้อมูลมากเกินไปส่งผลให้เกิดโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าโหนดอื่นๆ ในเครือข่ายจึงทำให้ประสิทธิภาพของการทำงานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายลดน้อยลง บนพื้นฐานความคิดนี้ เราจึงได้พิจารณาปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้สามารถช่วยลดเวลาประวิงที่เกิดขึ้นในเครือข่ายและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในด้านอื่นๆ โดยเราจะพิจารณาในการเลือกโหนดข้างเคียงจากฟีโรโมนและเวลาประวิงแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเส้นทางนั้น

ในงานวิจัยที่เราได้นำเสนอจะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเออาร์ไอ โดยเราได้ทำการพิจารณาเวลาประวิงแบบต่างๆ ที่เกิดในเส้นทางส่งข้อมูลระหว่างโหนดมาเป็นน้ำหนักในการเลือกเส้นทางด้วยวิธีการของมด เพื่อลดเวลาประวิงในเครือข่ายและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในด้านอื่นๆ และเราได้ปรับปรุงกระบวนการค้นหาเส้นทางในวิธีการของมดเพื่อลดโอเวอร์เฮดโดยมีกลไกควบคุมการกระจายของแพ็คเก็ตในการค้นหาเส้นทาง (Controlled Neighbor Broadcast : CNB) [12] ซึ่งอัลกอริทึมที่เราแนะนำเรียกว่า กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (ไอเออาร์ไอ)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ความรู้และเข้าใจการทำงานต่างๆ ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย
- 2) ได้ความรู้เกี่ยวกับโปรโตคอลค้นหาเส้นทางต่างๆ และโปรโตคอลค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ลดเวลาประวิง (ดีเลย์) ลดแพ็คเก็ตที่สูญเสี่ย ลดคิวเฉลี่ยและเพิ่มทราฟฟิคให้กับเครือข่าย
- 3) ได้รับความรู้ความเข้าใจกับกระบวนการจำลองการทำงานโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองการทำงานเครือข่าย (Network Simulator version 2 : NS2)

### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอกลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อลดปัญหาเวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายในด้านอื่นๆ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ อธิบายถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อธิบายถึง ความรู้พื้นฐานทางเครือข่าย เซ็นเซอร์ไร้สาย โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อธิบายถึง ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดและโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน

บทที่ 4 อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ อธิบายถึง กลไกและหลักการทำงานของอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เรานำเสนอ

บทที่ 5 การจำลองการทำงานและผลการจำลอง อธิบายถึง รูปแบบการจำลองการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอเทียบกับอัลกอริทึมเดิม รวมทั้งการอธิบายผลการจำลองการทำงาน

บทที่ 6 บทสรุป อธิบายถึง การสรุปและอธิบายผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอพร้อมทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำวิจัยต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

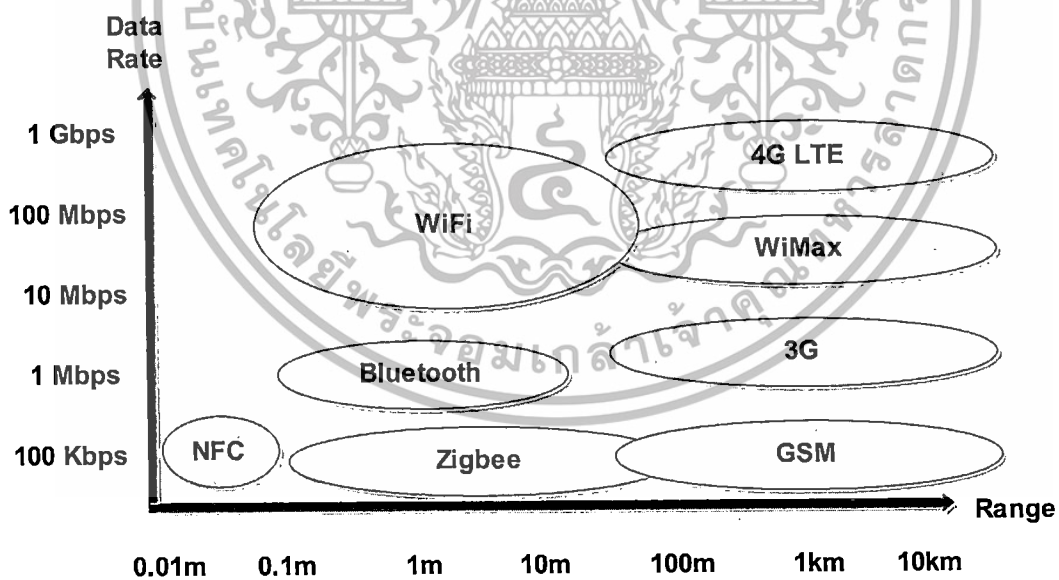
## บทที่ 2

### เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นระบบเครือข่ายที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันเนื่องจากมีขนาดเล็กและประหยัดพลังงาน ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สถาปัตยกรรมของเครือข่าย การประยุกต์ใช้งานและโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบต่างๆ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของการทำงาน ดังต่อไปนี้

#### 2.1 ความเป็นมาของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) คือเทคโนโลยีที่ช่วยให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง กลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์หรือการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์เครือข่ายคอมพิวเตอร์สามารถสื่อสารกันโดยใช้คลื่นวิทยุเป็นตัวกลางในการสร้างช่องทางการสื่อสาร ประวัติความเป็นมาในปี ค.ศ. 1970, prof.N. Abramson แห่งมหาวิทยาลัยฮาวายได้พัฒนาเครือข่ายสื่อสารแบบไร้สายขึ้นเป็นครั้งแรกของโลก ในชื่อ ALOHAnet โดยใช้คลื่นของวิทยุสมัครเล่นแบบต้นทุนต่ำ และต่อมาได้มีการพัฒนาแลนไร้สายรุ่นใหม่ขึ้นมา และมีการปรับปรุงเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ โดยแบ่งตามความเร็วในการใช้งานและระยะทาง ในการรับส่งข้อมูล



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีไร้สายชนิดต่างๆ

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks : WSNs) เป็นเครือข่ายที่ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมที่สนใจและประมวลผลข้อมูลเหล่านั้น ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่มีหน่วยประมวลผลที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ รวมถึงขนาดของเสาอากาศและอุปกรณ์ที่เชื่อมต้อมีขนาดเล็ก เครือข่ายจะทำการวัดค่าและเก็บข้อมูลจากสถานที่ที่ต้องการและสามารถประมวลผลได้ด้วยตัวเอง

ในการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะใช้โหนดเซ็นเซอร์ (Sensor Node : SN) ที่มีขนาดเล็กจำนวนมากฝังตัวในบริเวณที่ต้องการตรวจวัดข้อมูล และข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกส่งผ่านระบบเครือข่าย ซึ่งเครือข่ายนี้สร้างจากโหนดเซ็นเซอร์และแต่ละโหนดในเครือข่ายจะทำงานร่วมกันในการส่งข้อมูล โดยการส่งข้อมูลอาจเป็นการส่งระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ที่อยู่ในระยะติดต่อสื่อสารโดยตรงหรือในกรณีที่โหนดเซ็นเซอร์ต้นทางและโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง (Base Station : BS) ไม่อยู่ในระยะติดต่อสื่อสารได้โดยตรง ข้อมูลจะส่งผ่านโหนดเซ็นเซอร์ที่อยู่ระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง ระบบการเก็บข้อมูลแบบนี้เรียกว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับวิวัฒนาการของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีดังต่อไปนี้

เครือข่ายเซ็นเซอร์ในยุคแรกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสงครามในช่วงสงครามเย็น (Sound Surveillance System : SOSUS) [4] ซึ่งสหรัฐใช้ในมหาสมุทรเพื่อตรวจจับเรือดำน้ำของสหภาพโซเวียตโดยใช้ระบบแถวเซ็นเซอร์ไฮโดรโฟน (Hydrophone Array) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้าใต้น้ำและส่งข้อมูลด้วยสายเคเบิลใต้น้ำ ในช่วงเวลาเดียวกัน ระบบเครือข่ายเรดาร์ทางอากาศ (Networks of air defense radars) ได้รับการพัฒนาเพื่อป้องกันภาคพื้นสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ในยุคแรกระบบเครือข่ายมีรูปแบบเป็นลำดับชั้น (Hierarchical) การประมวลผลจะทำตามลำดับชั้นและใช้มนุษย์เป็นหลักในการประมวลผลและทำงาน

ยุคที่สองเกิดขึ้นหลังจากการพัฒนาอินเทอร์เน็ตประมาณ พ.ศ. 2553 เป็นยุคของการพัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบกระจายตัว (Distributed Sensor Network) เป็นโครงการวิจัยของ (Defense Advanced Research Projects Agency : DARPA) โดยเน้นที่การพัฒนาการประมวลผลข้อมูลแบบกระจายตัว การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) การติดตามวัตถุ เครือข่ายใช้โพรโทคอลสื่อสารระดับสูง แต่ด้วยเทคโนโลยีในยุคนั้นทำให้โหนดเซ็นเซอร์มีขนาดใหญ่และถูกออกแบบให้เป็นรถเซ็นเซอร์เพื่อให้เป็นโหนดเซ็นเซอร์แบบเคลื่อนที่ได้

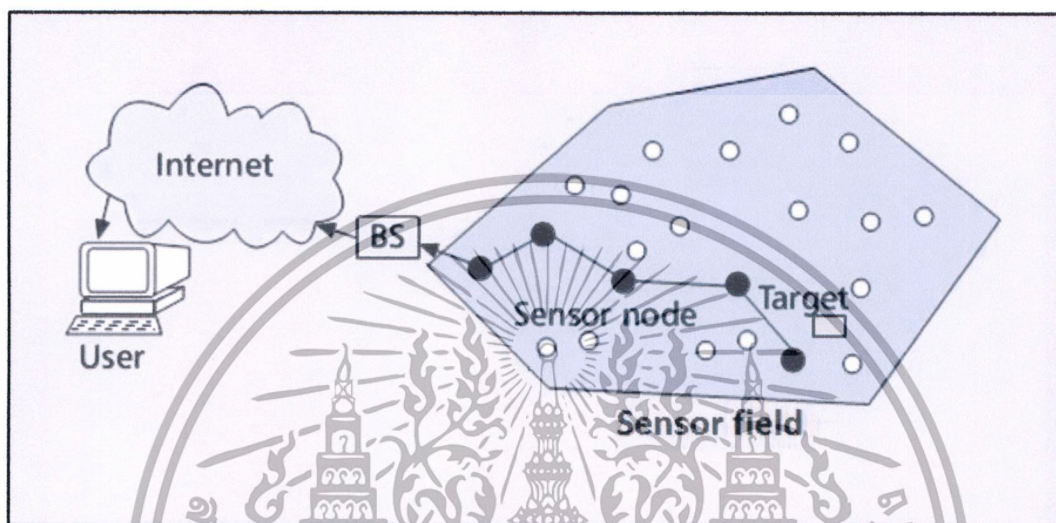
เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในยุคปี พ.ศ. 2550 เทคโนโลยีการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาถึงระดับที่สามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และประหยัดพลังงาน ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างหน่วยประมวลผล และหน่วยส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์ไร้สาย และด้วยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลจุลภาค การสร้างเซ็นเซอร์ขนาดเล็กและวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นได้จริง ทำให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายยุคนี้เข้าใกล้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในจินตนาการของนักวิจัยยุคก่อนๆ อย่างไรก็ตามเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนี้ยังมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง

## 2.2 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

สถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ ได้แก่ โหนดเซ็นเซอร์ต้นทาง (Sensor Node) โหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง (Base Station) [1] ดังรูปที่ 2.2 โหนดเซ็นเซอร์จำนวนมากฝังตัวในสภาพแวดล้อมเพื่อเก็บข้อมูล โดยแต่ละโหนดเซ็นเซอร์ติดต่อสื่อสารแบบไร้สายกับโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับส่งแบบไร้สาย แต่ละโหนดเซ็นเซอร์จะควบคุมและจัดการงานของตัวเอง (Self-organize) ทุกๆ โหนดเซ็นเซอร์ที่ติดต่อกันจะทำงานร่วมกัน (Collaboration) เป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำให้แต่ละโหนดเซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลไปหากันได้แม้ว่าโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางไม่สามารถติดต่อกับโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยให้โหนดเซ็นเซอร์ระหว่างทางช่วยส่งข้อมูลต่อๆ กันตั้งแต่ต้นทางถึงปลายทาง วิธีการส่งแบบนี้เรียกว่าการส่งแบบมัลติฮอป (Multi-hop) โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางทำหน้าที่รับส่งข้อมูล ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยที่โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางอาจเป็นโหนดเซ็นเซอร์ธรรมดาหรือเป็นโหนดเซ็นเซอร์ที่มีความสามารถพิเศษในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่วัดได้จากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ควบคุมการทำงานและติดต่อกับผู้ใช้งาน หรืออาจติดต่อกับเครือข่ายอื่นๆ เช่น เครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมและโครงสร้างของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เนื่องจากการทำงานแบบไร้สายทำให้แต่ละโหนดเซ็นเซอร์ใช้แหล่งพลังงานภายในโหนดเซ็นเซอร์เองหรือในบางกรณีอาจใช้แหล่งกำเนิดพลังงานอื่นๆ เพื่อให้โหนดเซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ทำให้เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจาก โหนดเซ็นเซอร์อาจหยุดทำงานเพราะพลังงานหมดหรือกลับขึ้นมาทำงานได้อีกครั้งเมื่อมีพลังงานเพียงพอ รวมไปถึงในบางเครือข่าย ที่มีโหนดเซ็นเซอร์ที่เคลื่อนที่ได้ การเปลี่ยนแปลงของโหนดเซ็นเซอร์นั้นมีผลต่อโครงสร้าง (Topology) ของเครือข่ายและส่งผลถึงเส้นทางในการส่งข้อมูลของโหนดเซ็นเซอร์ โดยเส้นทางในการส่งข้อมูล ในแต่ละโครงสร้งนั้นขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมค้นหาเส้นทาง (Routing Algorithm) ซึ่งอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางในแต่ละเครือข่ายจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของเครือข่านั้นๆ

### 2.2.1 ลักษณะของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

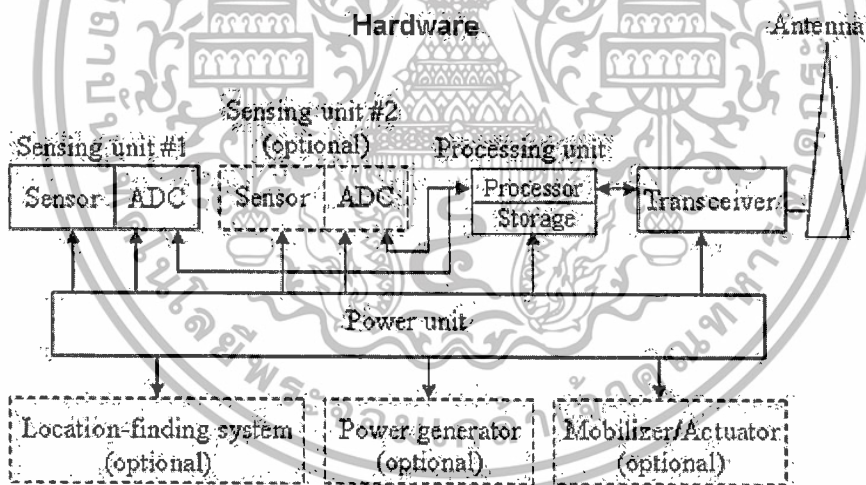
- 1) โหนดเซ็นเซอร์มีราคาต่ำเพื่อการสร้างเครือข่ายที่ต้องใช้โหนดเซ็นเซอร์จำนวนมากและเหมาะสำหรับการนำไปใช้ครั้งเดียวโหนดเซ็นเซอร์มีขนาดเล็กเพื่อฝังตัวในสภาพแวดล้อม
- 2) โหนดเซ็นเซอร์มีแหล่งพลังงานและความสามารถในการประมวลผลจำกัด
- 3) โหนดเซ็นเซอร์และเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถจัดการตัวเองได้ โดยไม่ต้องมีมนุษย์เข้าไปควบคุมหรือช่วยเหลือ
- 4) โหนดเซ็นเซอร์จำนวนมากจะกระจายตัวครอบคลุมบริเวณทำการของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทนทานต่อความเสียหายเมื่อโหนดเซ็นเซอร์บางส่วนทำงานไม่ได้
- 6) โครงสร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นโครงสร้างที่ไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา

### 2.2.2 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

การทำงานของโหนดเซ็นเซอร์คือการวัดและเก็บข้อมูลที่ได้จากสภาพแวดล้อม นำข้อมูลไปประมวลผล สร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและส่งข้อมูล การออกแบบเครือข่ายไร้สาย จำเป็นต้องสนับสนุนการดำเนินการของสัญญาณประกอบด้วยประมวลผลของสัญญาณดิจิทัล การบีบอัดเข้าสู่การแก้ไขปัญหา ถอดรหัสควบคุมและกระตุ้นให้ตอบสนอง วิธีการคำนวณ การสื่อสาร การหาเส้นทางไปยังปลายทางและการจัดการการเชื่อมต่อ ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วย หน่วยรับ-ส่งสัญญาณ หน่วยประมวลผล หน่วยของกระบวนการ หน่วยของพลังงานและอื่นๆ ปัจจัยหลักที่ควรคำนึงของโหนดเซ็นเซอร์คือ ชนิดของโหนด การบริโภคพลังงานของโหนดเซ็นเซอร์ ภาวะแวดล้อมของการทำงาน วิธีการคำนวณและประสิทธิภาพของการตรวจจับสัญญาณ ประสิทธิภาพการดำเนินการ การเชื่อมต่อและอุปกรณ์ในการควบคุมการติดต่อ ทำให้โหนดเซ็นเซอร์มีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.3



ADC = Analog-to-Digital Converter

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

ส่วนประกอบของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย [5] แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มส่วนประกอบหลักที่จำเป็นเพื่อให้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้ โดยในรูปที่ 2.3 จะเป็นส่วนประกอบที่มีเส้นรอบรูปเป็นเส้นทึบและกลุ่มส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับโหนดเซ็นเซอร์จะเป็นส่วนประกอบที่มีเส้นรอบรูปเป็นเส้นประ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ส่วนประกอบหลักของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

ส่วนประกอบหลักที่จำเป็นเพื่อให้โหนดเซ็นเซอร์ไร้สายสามารถทำงานได้ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) เซ็นเซอร์ (Sensing unit) ทำหน้าที่วัดค่าต่างๆ จากสภาพแวดล้อมตามแต่ชนิดของเซ็นเซอร์ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ควีน ความเร่ง แรงสั่นสะเทือน ความเคลื่อนไหว ความลึก ความเป็นกรดหรือด่าง เป็นต้น

2) หน่วยรับ-ส่งข้อมูลไร้สาย (Transmission unit) ทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายในย่านความถี่สาธารณะ (ISM band) เพื่อรับ-ส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียง

3) หน่วยประมวลผล (Processing unit) ติดต่อกับเซ็นเซอร์เพื่อสั่งงานหรือรับข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูล จัดเก็บลงในหน่วยความจำ รอกการร้องขอข้อมูลหรืออาจส่งข้อมูลทันทีผ่านทางหน่วยรับ-ส่งข้อมูลไร้สาย หน่วยประมวลผลกลางอาจรับข้อมูลจากระบบระบุตำแหน่งเพื่อช่วยในการประมวลผลต่างๆ หรือหน่วยประมวลผลกลางอาจทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ผ่านทางระบบเคลื่อนที่ นอกจากนี้หน่วยประมวลผลกลางยังทำหน้าที่ประมวลผลเครือข่ายและหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของโหนดเซ็นเซอร์

4) แหล่งพลังงาน (Power unit) เก็บสะสมพลังงานและให้พลังงานกับทุกส่วนประกอบบนโหนดเซ็นเซอร์ แหล่งพลังงานจะรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานหากโหนดเซ็นเซอร์มีแหล่งกำเนิดพลังงาน

### 2.2.4 ส่วนประกอบเพิ่มเติมของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

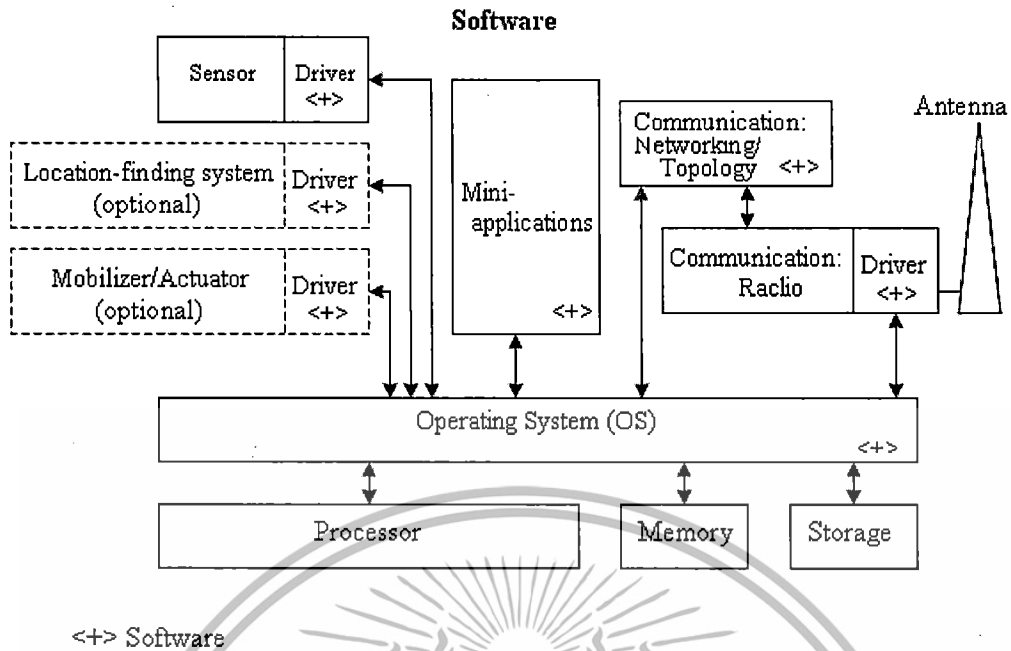
ส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับโหนดเซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ระบบระบุตำแหน่ง (Positioning unit) เป็นหน่วยระบุตำแหน่งของโหนดเซ็นเซอร์โดยใช้ GPS เพื่อนำข้อมูลตำแหน่งไปใช้ประมวลผล เช่น หาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูล หาตำแหน่งสำหรับการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ เป็นต้น

2) ระบบเคลื่อนที่ (Mobilizing unit) ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งของโหนดเซ็นเซอร์เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น จัดรูปแบบโครงสร้างเครือข่าย ติดตามวัตถุ เคลื่อนที่หาสัญญาณสื่อสาร เป็นต้น

3) แหล่งกำเนิดพลังงาน (Power generator unit) ทำหน้าที่กำเนิดพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานลม ความร้อน ปฏิกิริยาเคมี การสั่นสะเทือน เป็นต้น ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมและใช้ต่อไป เพื่อชดเชยพลังงานที่ถูกใช้ไป ทำให้ตัวโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้เป็นเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของซอฟต์แวร์ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

### 2.2.5 ซอฟต์แวร์พื้นฐานของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

ซอฟต์แวร์บนโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีหน้าที่ควบคุมการใช้พลังงานและปฏิบัติการต่างๆ ของโหนดเซ็นเซอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าใช้พลังงานค่อนข้างมากซอฟต์แวร์จะทำหน้าที่เป็นจัดการเพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยแบ่งเป็นแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

1) Operating System (OS) microcode เป็นระบบปฏิบัติการที่ถูกออกแบบมาสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็น OS ที่นำมาใช้ประโยชน์ซึ่งสามารถทำได้รวดเร็วและมีขนาดเล็กมาก TinyOS เป็นตัวอย่างที่ถูกนำมาใช้เป็น OS ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย

2) Sensor Driver เป็นส่วนประกอบของซอฟต์แวร์ซึ่งเป็นหน้าที่พื้นฐานของการรับ-ส่ง (รับและส่งในตัวเดียวกัน) เซ็นเซอร์อาจจะเป็นชนิดที่สามารถปรับตัวเข้าหากันได้ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความเหมาะสม มีองค์ประกอบที่เหมาะสมที่จะติดตั้งให้กับเซ็นเซอร์

3) Communication Processors มีหน้าที่เป็นตัวจัดการการสื่อสารซึ่งประกอบด้วย การหาเส้นทาง การรอแพ็คเกจ (Packet) เพื่อส่งต่อ Topology Maintenance ควบคุมการเข้าถึงและถอดรหัส

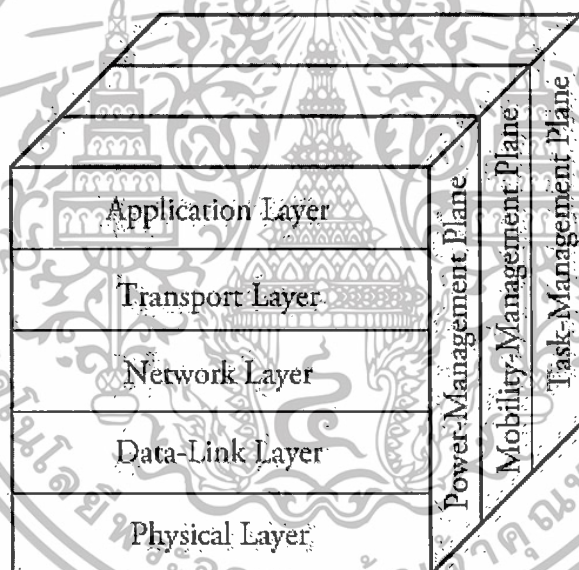
4) Communication Driver เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจัดการส่วนเล็กๆ น้อยๆ ของช่องทางการเชื่อมต่อ ประกอบด้วย การทำให้เกิดจังหวะ การเข้ารหัสสัญญาณ การคืนสู่สภาพเดิม การนับบิต ระดับสัญญาณและการลดหย่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) Data Processing Mini-Apps มีลักษณะเป็นตัวเลขการดำเนินการกับข้อมูล เก็บค่าของสัญญาณและการจัดการ หรือการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ซึ่งสนับสนุนกับการดำเนินการบนเครือข่าย

### 2.3 ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เนื่องจากข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจึงมีระบบเครือข่ายที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ในระบบเตือนภัย ระบบเครือข่ายต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูลและจะส่งข้อมูลเมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้นเท่านั้นเพื่อประหยัดพลังงาน ในระบบวัดและควบคุมทางการเกษตร ระบบเครือข่ายไม่ต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูล แต่จะส่งข้อมูลตลอดเวลาโดยอาจมีการรวมข้อมูล (Data fusion) ในระหว่างเส้นทางการเดินทางของข้อมูลเพื่อลดจำนวนครั้งของการสื่อสารและประหยัดพลังงาน ดังนั้นการเลือกชนิดและออกแบบเครือข่ายจะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งาน



รูปที่ 2.5 ระดับชั้นโพรโทคอลของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้ความสำคัญกับพลังงานมาก เพราะโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายมักมีแหล่งพลังงานที่จำกัด ทำให้พลังงานมีผลมากกับโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายและเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในด้านการออกแบบจึงปรับปรุงโพรโทคอลสแตคของ Open Systems Interconnection (OSI) model โดยแบ่งเป็นห้าชั้นและสามระนาบดังรูปที่ 2.5 แต่ละชั้นจะทำหน้าที่เฉพาะของตัวเอง คอยให้ความช่วยเหลือชั้นบนและขอความช่วยเหลือจากชั้นล่างที่ติดกับชั้นตัวเอง ส่วนระนาบซึ่งเชื่อมโยงกับทุกชั้นจะควบคุมบริหารจัดการในทุกๆ ชั้นให้ทำงานตามวัตถุประสงค์ของระนาบนั้นๆ อย่างไรก็ตามการใช้งานที่แตกต่างกันก็ส่งผลถึงรูปแบบโพรโทคอลสแตคที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั้นกายภาพ (Physical layer) รับผิดชอบการรับ-ส่งสัญญาณไร้สายในด้านกายภาพ เช่น ช่วงความถี่สัญญาณ การมอดูเลต (Modulation) การเข้ารหัสระดับช่องสัญญาณ (Channel coding) ชั้นกายภาพในประเทศไทยจะใช้ช่วงความถี่สาธารณะและกำลังส่งตามกฎหมายกำหนด
- ชั้นเชื่อมต่อข้อมูล (Data Link Layer) รับผิดชอบการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์ข้างเคียง การเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Medium Access Control : MAC) การควบคุมข้อผิดพลาด (Error control) ของข้อมูล เพื่อให้การสื่อสารระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ถูกต้องและเชื่อถือได้ ปัจจุบันการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโหนดเซ็นเซอร์จะเป็นแบบสุ่มเข้าใช้งาน (Random Access) ที่เป็นเช่นนี้เพราะการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบไปด้วยโหนดเซ็นเซอร์อยู่เป็นจำนวนมากและไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนทำให้การควบคุมแบบรวมศูนย์ทำได้ยาก และการใช้ช่องสัญญาณแบบสุ่มทำให้เกิดความเท่าเทียมกันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ
- ชั้นเครือข่าย (Network layer) รับผิดชอบการรับ-ส่งข้อมูลระดับเครือข่าย เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายใช้การส่งข้อมูลแบบมัลติฮอป เพื่อส่งข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง การคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลเป็นหน้าที่หลักของชั้นนี้
- ชั้นสื่อสารนำส่งข้อมูล (Transport layer) ชั้นนี้เป็นสิ่งจำเป็นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเครือข่ายต้องการที่จะเข้าถึงได้ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตหรือเครือข่ายภายนอก
- ระนาบพลังงาน (Power plane) รับผิดชอบควบคุมการใช้พลังงานในชั้นต่างๆ ของโหนดเซ็นเซอร์ และเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีประสิทธิภาพ โดยอาจประสานงานข้ามชั้น (Cross layer) เช่น โหนดเซ็นเซอร์ที่เหลือพลังงานน้อย อาจลดพลังงานในการส่งข้อมูลในชั้นกายภาพโดยประสานงานกับชั้นเครือข่ายเพื่อเลือกเส้นทางที่ควรส่งข้อมูลในกรณีที่ระยะส่งข้อมูลลดลงเนื่องการลดพลังงานในการส่งข้อมูล

## 2.4 มาตรฐานระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

มาตรฐานระบบเครือข่ายที่ใช้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะเป็นมาตรฐานเฉพาะกลุ่มที่พัฒนาขึ้นและเริ่มใช้ในงานวิจัยและงานจริง เพื่อกำหนดรายละเอียดของการทำงานในส่วนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

### 2.4.1 เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

หลายมาตรฐานในขณะนี้ได้รับการอนุมัติภายใต้การพัฒนาสำหรับเครือข่ายส่งสัญญาณไร้สาย มีรูปแบบมาตรฐานดังต่อไปนี้

- WirelessHART เป็นการพัฒนาขึ้นของ Highway Addressable Remote Transducer Protocol (HART) โพรโทคอล และเจาะจงออกแบบเพื่อกิจกรรมทางอุตสาหกรรม เช่น หน้าจอแสดงกระบวนการและควบคุม
- Zigbee เป็นมาตรฐานเครือข่ายตาข่าย (Mesh-networking) ที่มีเจตนาเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลทางการแพทย์ อุปกรณ์สำหรับผู้บริโภค เช่น รีโมทโทรทัศน์และเครื่องใช้อัตโนมัติในบ้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6LoWPAN เป็นเส้นทางมาตรฐานของ Internet Engineering Task Force (IETF) พัฒนาขึ้นเพื่อเจาะจงให้ เชื่อมโยง IPv6 กับ IEEE802.15.4 (IP-to-MAC-Layer)

เครื่องมือสื่อสาร WirelessHART ใช้ Time Division Multiple Access (TDMA) ทุกเครื่องมือ WirelessHART คงไว้ซึ่งความแม่นยำทางเวลาและยังคงใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ในบ้านได้ทั้งหมด ทุกเครื่องมือถูกทำเป็นสำเร็จรูปในสร้างหน้าต่างการจัดตารางเวลาล่วงหน้า ZigBee WirelessHART และ 6LoWPAN ทั้งหมดนี้มีพื้นฐานเดียวกัน คือในมาตรฐานวิทยุ IEEE 802.15.4

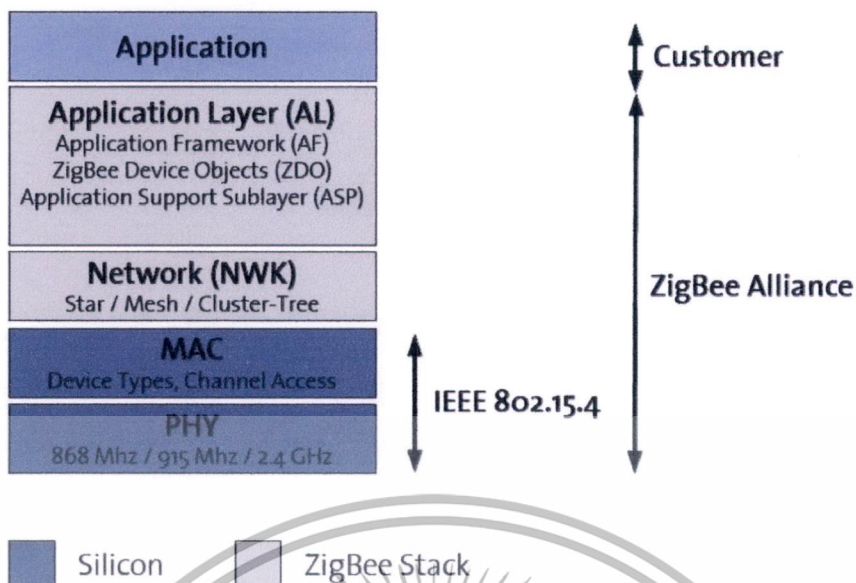
#### ตารางที่ 2.1 เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

มาตรฐาน	ZigBee	6LoWPAN	WirelessHART
โปรแกรมประยุกต์หลัก	ควบคุมและแสดงผล	ควบคุมและแสดงผล	ควบคุมอุตสาหกรรมและแสดงผล
หน่วยความจำ	4 - 32 kb	4 - 32 kb	-
อายุแบตเตอรี่ (วัน)	1	10	16
ขอบเขต (เมตร)	1 - 75	1 - 100	1 - 100
คุณลักษณะหลัก	พลังงานต่ำ, ค่าใช้จ่ายต่ำ	IPv6 ร่วมกับ IEEE 802.15.4	นำเชื่อถือ

#### 2.4.2 การทำงานของโปรโตคอล IEEE 802.15.4

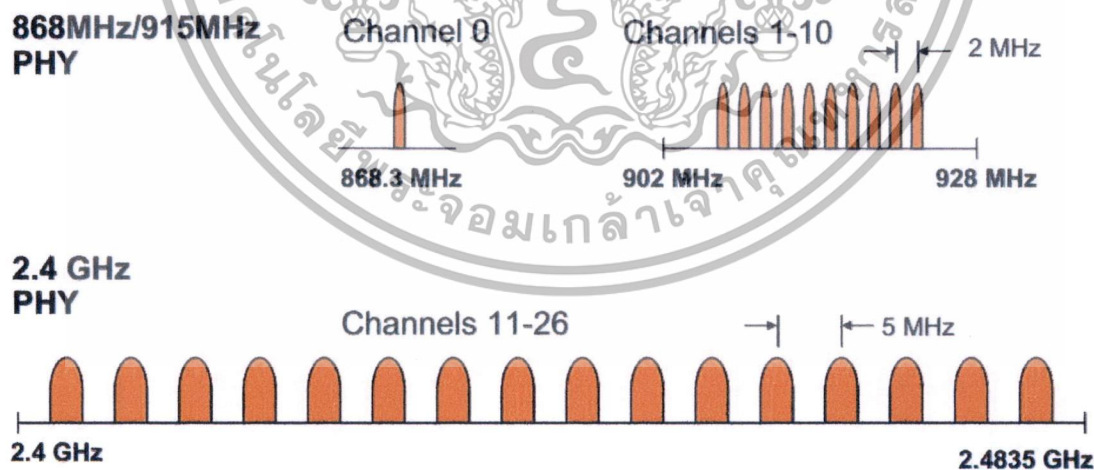
การทำงานของโปรโตคอล IEEE 802.15.4 ในระดับชั้นกายภาพ (Physical layer) นั้นมีการกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ขึ้นสำหรับการรับส่งข้อมูลเบื้องต้นในวงจรเครื่องรับส่งวิทยุในชั้นกายภาพ และการควบคุมการรับส่งในชั้นเชื่อมโยง (Link layer) โดยมุ่งเน้นไปที่ความน่าเชื่อถือในการใช้งาน (Reliability) ความสะดวกต่อการใช้งาน (Simplicity) การบริโภคพลังงานต่ำ (Low power) และต้นทุนต่ำ (Low cost) ดังต่อไปนี้ การสื่อสารใช้คลื่นวิทยุความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) แบ่งออกเป็น 16 ช่องสัญญาณๆ ละ 5 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) สำหรับความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) แบ่งออกเป็น 10 ช่องสัญญาณๆ ละ 2 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ใช้การกล้ำสัญญาณ (Modulation) แบบ (Offset QuadraturePhase Shift Keying : O-QPSK) และใช้การแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแบบ (Direct Sequence Spread Spectrum : DSSS) ที่มีอัตราการสเปรดดิ้ง (Spreading) 2 เมกะชิพต่อวินาที (Mchip/sec) ควบคุมการรับส่งข้อมูลโดยใช้โปรโตคอลแบบ (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance : CSMA/CA) และเพื่อให้การสื่อสารเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงกำหนดมาตรฐานเพิ่มสำหรับการเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายที่ใช้งานระดับชั้นเครือข่าย และการนำไปใช้งานที่ใช้งานระดับชั้นโปรแกรมประยุกต์ (Application layer) ร่วมกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานใหม่ที่กำหนดโดยองค์กร ZigBee Alliance ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของสแต็คโพรโทคอลซิกบีของเทคโนโลยี IEEE 802.15.4

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีการกำหนดไว้ในชั้นกายภาพ กำหนดให้มีการใช้งานในย่านความถี่ที่เป็นความถี่สาธารณะ (license-free Industrial Scientific Medical frequency bands : ISM) อยู่ 3 ความถี่โดยที่ความถี่ 2.4 - 2.4835 GHz สามารถใช้งานได้ทั่วโลก และความถี่ 868-870 MHz และ 902-928 MHz ใช้งานได้ในพื้นที่ของทวีปอเมริกาเหนือ ทวีปยุโรป ประเทศออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และรายละเอียดเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ตามชนิดของช่วงความถี่ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งาน ดังนี้



รูปที่ 2.7 IEEE 802.15.4 Channel Allocation

- 1) ที่ความถี่ 2.4-2.4835 GHz โดยมีอัตราบิต (bit rate) 250 kb/s มีจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งานทั้งหมด 16 ช่อง คือ ช่องสัญญาณที่ 11-26
  - 2) ที่ความถี่ 868-870 MHz โดยมีอัตราบิต 20 kb/s มีจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งาน 1 ช่องสัญญาณ คือ ช่องสัญญาณที่ 0
- การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ที่ความถี่ 902-928 MHz โดยมีอัตราบิต 40 kb/s มีจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งานทั้งหมด 10 ช่องสัญญาณ คือ ช่องสัญญาณที่ 1-10

## ตารางที่ 2.2 การแบ่งย่านความถี่และจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งานตามมาตรฐาน

Options for Frequency Assignments			
Geographical regions	Europe	Americas	Worldwide
Frequency assignment	868 to 868.6 MHz	902 to 928 MHz	2.4 to 2.4835 MHz
Number of Channels	1	10	16
Channel bandwidth	600 kHz	2 MHz	5 MHz
Data rate	20 kbits/s	40 kbits/s	250 kbits/s

การทำงานของโพรโทคอล IEEE 802.15.4 ที่เกี่ยวข้องกับระดับชั้นกายภาพ ได้แก่

1) การเลือกใช้งานหรือไม่ใช้งานของภาครับและส่งคลื่นวิทยุ (Enable/Disable the radio transceiver) ซึ่งจะทำให้การเลือกใช้งานว่า จะใช้งานช่องสัญญาณใด ที่อยู่ในพื้นที่ใช้งานบริเวณนั้นๆ ที่เหมาะสม

2) คุณภาพของการเชื่อมโยง (Link Quality Indication : LQI) สำหรับแพ็คเก็ตที่ได้รับได้ เครื่องมือที่ใช้วัดคุณภาพของการเชื่อมโยง คือ คุณลักษณะของคุณภาพของแพ็คเก็ตที่ได้รับได้โดยเครื่องมือวัดนี้จะสร้างขึ้นโดยใช้การตรวจจับพลังงานที่ภาครับ การประเมินค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise estimation) หรือ อาจจะใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน ผลที่ได้จากการใช้คุณภาพของการเชื่อมโยงนี้จะขึ้นอยู่กับระดับชั้นเครือข่ายหรือชั้นโปรแกรมประยุกต์

3) การตรวจจับพลังงาน (Energy Detection : ED) ที่อยู่ภายในช่องสัญญาณปัจจุบัน เครื่องมือวัดการตรวจจับพลังงานที่ภาครับนั้นมีความมุ่งหมายที่จะนำมาใช้สำหรับระดับชั้นเครือข่ายที่เป็นส่วนหนึ่งของอัลกอริทึมการเลือกช่องสัญญาณ มันจะเป็นการประเมินกำลังงานของสัญญาณที่ภาครับภายในย่านความถี่ของช่องสัญญาณของ IEEE 802.15.4 ช่วงเวลาที่ใช้ตรวจจับพลังงานจะประมาณ 8 ช่วงสัญลักษณ์ (Symbol period)

4) การประเมินช่องสัญญาณ (Clear Channel Assessment : CCA)

- ถ้าค่าพลังงานสูงกว่าค่าขีดแบ่ง (threshold) แล้วการประเมินช่องสัญญาณจะรายงานพลังงาน
- ตรวจจับได้จากตัวกลาง (Medium) นั้นมีค่าสูงกว่าค่าขีดแบ่งของการตรวจจับพลังงาน (Energy detection threshold)

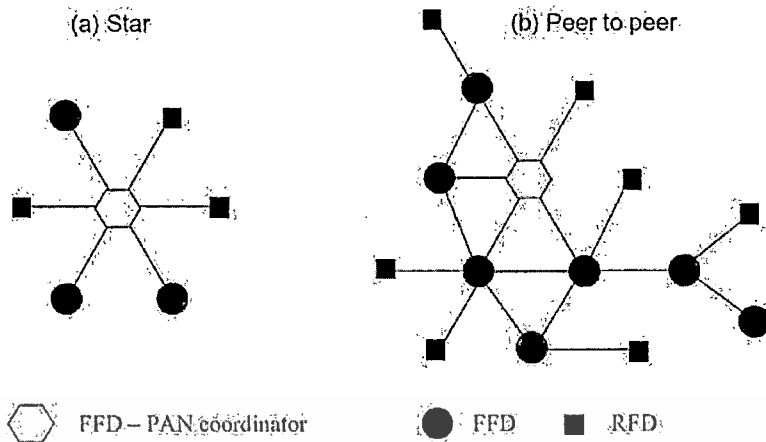
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้ามีค่าจากคลื่นพาห์เพียงอย่างเดียว แล้วการประเมินช่องสัญญาณจะรายงานเฉพาะการตรวจจับสัญญาณที่มีการกล้ำสัญญาณและคุณลักษณะการสเปกตรัมของ IEEE 802.15.4 โดยสัญญาณที่ได้อาจจะมีความสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าขีดแบ่งของการตรวจจับพลังงาน
- ถ้ามีค่าจากคลื่นพาห์กับพลังงานมีความสูงกว่าค่าขีดแบ่ง แล้วการประเมินช่องสัญญาณจะรายงานเฉพาะการตรวจจับสัญญาณที่มีการกล้ำสัญญาณและคุณลักษณะการสเปกตรัมของ IEEE 802.15.4 โดยพลังงานที่ได้จะมีความสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าขีดแบ่งของการตรวจจับพลังงาน

การทำงานของโพรโทคอล IEEE 802.15.4 ระดับชั้นแม็ค นั้นจะให้บริการ 2 ชนิด ได้แก่

- 1) บริการที่เกี่ยวข้องกับข้อมูล (MAC data service) ช่วยให้ข้อมูลของการรับและส่งของหน่วยโพรโทคอล (MAC protocol data units : MPDU) ข้ามไปยังบริการข้อมูลของชั้นกายภาพได้
- 2) บริการที่เกี่ยวกับการบริหารจัดการระดับชั้นย่อยที่เชื่อมต่อกับบริการที่เกี่ยวกับการบริหารจัดการเอนทิตีกับจุดเข้าถึง (MAC sublayer management entity service access point : MLME-SAP) โดยมีรูปแบบที่เกี่ยวกับระดับชั้นย่อย คือ การบริหารจัดการตัวบอกตำแหน่ง (Beacon Management) การเข้าถึงช่องสัญญาณ (Channel Access) การบริหารจัดการช่วงเวลาที่มีการรับรอง (Guaranteed Time Slot management) เฟรมที่ถูกต้อง (Frame validation) การประกาศการส่งเฟรมที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้อง (Acknowledged Frame Delivery Association and Disassociation)

ทอโพลยีที่เชื่อมต่อเป็นเครือข่ายเพื่อใช้งาน (Network Topologies) ของโพรโทคอล IEEE 802.15.4 ที่ใช้งานในเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำ (LR-WPAN) นั้นจะทำงาน 2 แบบ คือ แบบดาว (Star) หรือแบบระดับเดียวกัน (Peer-to-Peer) โดยจะมีหน้าที่ทำงานแบบใดแบบหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.8 การเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายของโพรโทคอล IEEE 802.15.4 โดยมีการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ไร้สายชนิดที่มีโพรโทคอล IEEE 802.15.4 สามารถทำได้โดยผ่านอุปกรณ์แพนโคออดิเนเตอร์ (Personal Area Network coordinator หรือ PAN coordinator) หรือ โหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง (Base Station) สำหรับการเชื่อมต่อแบบระดับเดียวกันเป็นการเชื่อมต่อเพื่อขยายโครงข่ายให้กว้างออกไป



รูปที่ 2.8 ทอโพลีของเครือข่ายสำหรับโพรโทคอล IEEE 802.15.4

ส่วนสำคัญสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือกลไกการประหยัดพลังงานซึ่งโหนดเซ็นเซอร์สามารถกำหนดระยะเวลาในการเข้าสู่การหลับหรือพักการทำงาน (Sleep Mode) โดยตัวอุปกรณ์จะทำหน้าที่ลดการใช้พลังงานให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน การกำหนดการหลับนี้ทำได้โดยการร้องขอไปที่อุปกรณ์ Full Function Device เพื่อบอกระยะเวลาที่จะทำการหลับและเมื่อมีการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ตัวอื่นมายังอุปกรณ์ที่หลับอยู่ อุปกรณ์ Full Function Device จะเก็บข้อมูลไว้ให้ชั่วคราวและถามหาอุปกรณ์ตัวนั้นเป็นระยะเมื่ออุปกรณ์ตัวนั้นตื่นหรือพร้อมทำงานต่อจะได้รับการถามหา อุปกรณ์ตัวนั้นจึงส่งการร้องขอข้อมูลที่ได้เก็บไว้ให้และจึงทำการรับส่งข้อมูลจนได้รับข้อมูลครบสมบูรณ์ต่อไป

## 2.5 ตัวอย่างการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

คุณภาพการให้บริการที่ระดับโปรแกรมประยุกต์จะต้องประกอบขึ้นตอนการติดต่อสื่อสารและการประมวลผลภายในเครือข่ายของข้อมูลนั้นจะอธิบายถึงปรากฏการณ์ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะนำไปใช้งานในโปรแกรมประยุกต์ใหม่ๆ ซึ่งต้องอาศัยการออกแบบการทำงานในด้านต่างๆ ให้มีคุณภาพของการให้บริการ (QoS) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีความยืดหยุ่นทั้งในกรณีที่เครือข่ายเคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่ดังตัวอย่างของการใช้งานดังต่อไปนี้

### 2.5.1 เครือข่ายเซ็นเซอร์การเฝ้าระวังด้วยมัลติมีเดีย (Multimedia Surveillance Sensor Networks)

เครือข่ายตัวรับรู้วิดีโอไร้สาย จะประกอบด้วยแบตเตอรี่สำหรับกล้องวิดีโอขนาดเล็กความสามารถในการประมวลผลของภาครับและส่งไร้สาย ข้อมูลที่ทำการรับและส่ง ตัวรับรู้ของทั้งภาพวิดีโอและเสียงจะนำมาใช้เพื่อปรับปรุงและเสริมระบบการเฝ้าระวังที่มีอยู่แล้วต่ออาชญากรรมและการโจมตีของผู้ก่อการร้ายเครือข่ายขนาดใหญ่ของตัวรับรู้วิดีโอสามารถขยายความสามารถของหน่วยงานบังคับใช้กฎหมายในการตรวจสอบติดตามพื้นที่ เหตุการณ์ที่เกิดในที่สาธารณะ ขอบเขตและคุณสมบัติความเป็นส่วนตัวที่ช่วยให้สรุปและบันทึกกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง (เช่น ขโมย อุบัติเหตุทางรถยนต์ การละเมิดกฎจราจร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดน้ำ (Floating Sensor Networks)

เป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดน้ำ เครือข่ายชนิดนี้ สามารถปล่อยให้ลอยไปกับน้ำได้ โดยมันจะอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการทำงาน มันจะเก็บข้อมูลต่างๆ ของน้ำ เช่น คุณภาพและความสะอาดของน้ำ สามารถทำงานแบบเดี่ยวหรือทำงานเป็นฝูง (Swarm) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปปล่อยลงน้ำ แล้วสามารถอยู่ได้ด้วยตัวเอง (Self-dependent) สามารถหาพลังงานใช้เองได้ และมีระบบขับเคลื่อนที่สามารถสั่งการให้ไปยังจุดใดจุดหนึ่งได้ สามารถทำงานได้ทั้งในแม่น้ำ ทะเลสาบ ทะเลเปิด นาข้าว นากุ้ง โดยสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์ได้หลายชนิด สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งในยามสงบ เช่น ใช้ตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำ ลำคลอง แหล่งน้ำทิ้ง ฟาร์มสัตว์น้ำ หรือในยามสงคราม เช่น ใช้เป็นทุ่นระเบิด เซ็นเซอร์ตรวจจับข้าศึก ใช้ในงานตรวจวัดช่วงน้ำท่วม หรือ มีอุปกรณ์ เช่น น้ำมันรั่ว สารเคมีรั่วลงแหล่งน้ำ เป็นต้น ปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นไม่ได้ทำในบ่อเลี้ยงเหมือนแต่ก่อน แต่ไปเลี้ยงกันในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งในแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล เทคโนโลยีนี้ สามารถนำไปใช้สำหรับสิ่งที่เรียกว่า Smart Aquaculture หรือฟาร์มสัตว์น้ำอัจฉริยะ ซึ่งจะช่วยให้ผู้เลี้ยงสามารถตรวจวัดความเป็นไปต่างๆ ในน้ำจากระยะไกล ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

### 2.5.3 การดูแลสุขภาพขั้นสูง (Advanced health care delivery)

เครือข่ายตัวรับรู้ทางโทรเวชกรรม (Telemedicine sensor network) เป็นการบูรณาการด้วยเครือข่ายมัลติมีเดีย 3 G เพื่อให้บริการสำหรับการดูแลสุขภาพได้อย่างแพร่หลาย โดยที่ตัวผู้ป่วยจะมีตัวรับรู้ที่เกี่ยวข้องกันทางแพทย์ (Medical Sensors) เพื่อที่จะติดตามตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิร่างกาย ความดันเลือด การวัดความอิ่มตัวของออกซิเจนของฮีโมโกลบินจากชีพจร (Pulse Oximetry) คลื่นไฟฟ้าของหัวใจ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (Breathing) อย่างไรก็ตาม ศูนย์การแพทย์ทางไกลจะทำการติดตามผลทางไกลของค่าตัวแปรต่างๆ ของผู้ป่วยผ่านตัวรับรู้ทางภาพเคลื่อนไหวและเสียง ตัวรับรู้ตำแหน่ง ตัวรับรู้การเคลื่อนไหวซึ่งสามารถที่จะฝังตัวไปกับอุปกรณ์ที่ติดกับข้อมือได้ เครือข่ายของตัวรับรู้สามารถที่จะลงความเห็นสำหรับสถานการณ์เร่งด่วนที่เป็นอันตรายและจะทำการติดต่อกับผู้ดูแลหรือญาติของผู้ป่วยเพื่อให้บริการความช่วยเหลือทางไกลได้ทันที

## 2.6 โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง (Routing protocol)

โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง คือ โพรโทคอลที่ใช้ในการแลกเปลี่ยน Routing table ระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายต่างๆ ที่ทำงานในระดับ Network Layer (Layer 3) เช่น Router เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านี้สามารถส่งข้อมูล (IP packet) ไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทางได้อย่างถูกต้อง โดยที่ผู้ดูแลเครือข่ายไม่ต้องแก้ไขข้อมูล Routing table ของอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดเวลา เรียกว่าการทำงานของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง ทำให้เกิดการใช้งาน Dynamic routing ต่อระบบเครือข่ายในระยะเริ่มแรกนั้น โพรโทคอลสำหรับระบบเครือข่าย ก็คือ โพรโทคอลเลือกเส้นทางแบบตารางระยะทาง (RIP) ที่มีพื้นฐานมาจากอัลกอริทึมของ Bellman-Ford วิธีการนี้สามารถทำงานได้ดีในระบบขนาดเล็ก แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมทั้งมีปัญหาที่เรียก “Cout-to-infinity” และปัญหาความล่าช้าในการค้นหาคำตอบ วิธีนี้ถูกทดแทนด้วยโพรโทคอลแสดงสถานการณ์เชื่อมต่อในราวปี ค.ศ. 1979 ต่อมาในปี ค.ศ. 1988 คณะทำงาน “The Internet Engineering Task Force” ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาอัลกอริทึมที่ดีกว่ามาทดแทน เรียกว่า “OSPF (Open Shortest Path First)” และได้กลายเป็นมาตรฐานไปในปีค.ศ. 1990 ผู้ผลิตอุปกรณ์เราเตอร์ได้สร้างอุปกรณ์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตนให้เป็นไปตามมาตรฐานนี้ และเป็นที่คาดหวังว่าวิธีการ OSPF จะกลายเป็นโพรโทคอลหลักสำหรับการเลือกเส้นทางเดินข้อมูลของเกตเวย์ภายในระบบเครือข่ายในอนาคต

### 2.6.1 โพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ (Mobile Ad hoc Network Routing Protocols)

เครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ (Mobile Ad hoc Network : MANET) เป็นเครือข่ายของอุปกรณ์คำนวณแบบเคลื่อนที่ได้ ที่เชื่อมต่อเพื่อรับส่งข้อมูลระหว่างกันโดยไม่อาศัยโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง ไม่มีจุดศูนย์กลางในการให้บริการเชื่อมต่อ ไม่มีการกำหนดเส้นทางที่ใช้เชื่อมต่อกันในเครือข่าย ทุกๆ โหนดสามารถเคลื่อนที่และเชื่อมต่อกับโหนดใดๆ ที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุม (Coverage area) ของตนเองได้อย่างอิสระ ส่งผลให้ทอพอโลยี (Topology) หรือ รูปแบบการต่อเชื่อมของโหนดภายในเครือข่ายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา อัตราความเร็วในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการต่อเชื่อม ขึ้นกับความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนที่ของโหนดต่างๆ ภายในเครือข่าย

โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ถูกพัฒนาสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มของโพรโทคอลที่ทำงานด้วยตาราง (Table-Driven) และกลุ่มของโพรโทคอลที่ทำงานเมื่อมีการร้องขอ (On-Demand)

#### 2.6.2 กลุ่มของโพรโทคอลที่ทำงานด้วยตาราง (Table-Driven Routing Protocols)

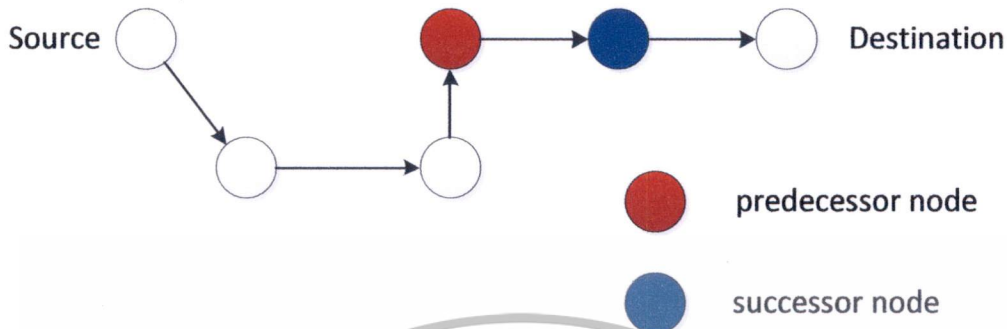
กลุ่มของโพรโทคอลที่ทำงานด้วยตารางมีลักษณะร่วมที่สำคัญคือเป็นโพรโทคอลที่ทำงานแบบโพรแอกทีฟ (Proactive) กล่าวคือ โหนดแต่ละโหนดในเครือข่ายจัดเตรียมตารางซึ่งบรรจุข้อมูลเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจัดส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางใดๆ ภายในเครือข่ายไว้ล่วงหน้า และมีการปรับเปลี่ยนข้อมูลในตารางให้ทันต่อเหตุการณ์อยู่เสมอตามช่วงเวลาที่กำหนด (Period) ข้อดีของโพรโทคอลในกลุ่มนี้ คือ เนื่องจากมีการเตรียมข้อมูลเส้นทางไว้ล่วงหน้าแล้ว เวลาที่ต้องเสียไปสำหรับประมวลผลที่แต่ละโหนดจึงมีค่อนข้างน้อย ซึ่งก็จะส่งผลต่อเนื่องให้ค่าการหน่วงตลอดเส้นทาง (End-to-End Delay) มีค่าน้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตามโพรโทคอลในกลุ่มนี้มีข้อเสียที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ การสิ้นเปลืองพื้นที่สำหรับจัดเก็บตารางข้อมูลเส้นทางที่ทุกๆ โหนดในเครือข่าย โดยขนาดของตารางจะแปรผันตรงกับจำนวนโหนดในเครือข่าย นอกจากนี้การอัปเดตข้อมูลเส้นทางในตารางตามช่วงเวลาที่กำหนดก็จัดเป็นโอเวอร์เฮด (Overhead) หรือค่าใช้จ่ายสำหรับโพรโทคอลในกลุ่มนี้อีกด้วย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างของโพรโทคอลที่ทำงานด้วยตาราง ได้แก่ โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง (Wireless Routing Protocol : WRP) (Murthy & Garcia-Luna-Aceves, 1996)

- โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง Wireless Routing Protocol (WRP) [10] เป็นโพรโทคอลที่ทำงานบนพื้นฐานอัลกอริทึมเวกเตอร์ระยะทาง (Distancevector) ซึ่งกำหนดให้โหนดในเครือข่ายทำการสร้างตารางข้อมูลต่างไว้ 4 ตารางด้วยกัน คือ ตารางระยะทาง (Distance table) เก็บข้อมูลระยะทางจากโหนดเพื่อนบ้านของโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการตารางเส้นทาง (Routing table) เก็บข้อมูลระยะทางจากโหนดต้นทาง (Source node) ไปยังโหนดปลายทาง (Destination node) โหนดบัพก่อน (Predecessor node) และโหนดบัพหลัง (Successor node) ดังรูปที่ 2.9 ตารางค่าใช้จ่ายของลิงค์ (Link-cost table) ประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายของลิงค์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงไปยังโหนดเพื่อนบ้าน และตารางเมสเสจรีทรานสมิซชันลิสต์ (Message Retransmission List table : MRL) เก็บข้อมูลโหนดเพื่อนบ้านซึ่งยังไม่ได้ตอบกลับมาภายในเวลาที่กำหนด



รูปที่ 2.9 แสดงโหนดในเครือข่ายที่ทำหน้าที่เป็นโหนดบัพก่อนและโหนดบัพหลัง

เมื่อถึงเวลาที่กำหนด หรือเมื่อค่าใช้จ่ายของลิงค์มีการเปลี่ยนแปลง ทุกโหนดจะทำการแลกเปลี่ยนตารางเส้นทาง (Routing table) กับโหนดเพื่อนบ้าน หลังจากนั้นทำการปรับปรุงข้อมูลในตารางเส้นทาง (Routing table) และตารางระยะทาง (Distance table) หากข้อมูลที่ได้รับมาใหม่แสดงเส้นทางที่ดีกว่า

ข้อดีของโปรโตคอล WRP คือ ไม่เกิดลูปในเส้นทางที่ทำการจัดส่งข้อมูลและเมื่อเส้นทางเชื่อมต่อขาดสามารถเชื่อมต่อเส้นทางใหม่ได้รวดเร็ว ข้อเสียของโปรโตคอลนี้ก็คือ สิ้นเปลืองพื้นที่สำหรับจัดเก็บตารางข้อมูลจำนวน 4 ตารางที่ทุกๆ โหนดในเครือข่าย และสิ้นเปลืองแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนตารางข้อมูล

### 2.6.3 กลุ่มของโปรโตคอลที่ทำงานเมื่อมีการร้องขอ (On-Demand Routing Protocols)

กลุ่มของโปรโตคอลที่ทำงานเมื่อมีการร้องขอมีลักษณะร่วมที่สำคัญคือ จะทำการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางใดๆ เมื่อโหนดต้นทางต้องการจัดส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น ไม่มีการจัดเตรียมตารางเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจัดส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางใดๆ ภายในเครือข่ายไว้ก่อนล่วงหน้า ข้อดีของโปรโตคอลในกลุ่มนี้ คือ โอเวอร์เฮด (Overhead) หรือค่าใช้จ่ายในการค้นหาเส้นทางลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มโปรโตคอลที่ทำงานแบบขับเคลื่อนด้วยตาราง อย่างไรก็ตาม โปรโตคอลในกลุ่มนี้มีข้อเสีย คือ เสียเวลาในการค้นหาเส้นทางถ้าโหนดปลายทางไม่เคยถูกทวงถามมาก่อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างของโปรโตคอลที่ทำงานแบบเมื่อถูกทวงถาม ได้แก่ โปรโตคอลค้นหาเส้นทาง (Ad hoc On-demand Distance Vector Routing : AODV)

- โปรโตคอลค้นหาเส้นทาง (Ad hoc On-demand Distance Vector Routing : AODV) [11] จะทำการค้นหาเส้นทางเมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางโดยการกระจายแพ็คเกจร้องขอเส้นทางหรือ Route Request (RREQ) ออกไปในเครือข่ายเพื่อค้นหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทางไปยังโหนดปลายทางเมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็คเกจร้องขอเส้นทางจะทำการส่งแพ็คเกจตอบรับเส้นทางหรือ Route Reply (RREP) กลับไปยังโหนดต้นทางจึงจะได้เส้นทางในการติดต่อสื่อสารขึ้นมา และบำรุงรักษาเส้นทางเฉพาะโหนดที่อยู่ในเส้นทางของการส่งข้อมูลไปยังปลายทางเท่านั้น โหนดข้างเคียงอื่นๆ ไม่จำเป็นต้องมาจัดการบำรุงรักษาเส้นทาง ซึ่งเมื่อเกิดกรณีโหนดที่ติดต่อสื่อสารเคลื่อนที่ออกนอกรัศมีการรับส่งข้อมูลกัน จะทำให้เส้นทางเกิดการผิดพลาด (Link failure) โพรโทคอล AODV ก็จะส่งแพ็คเกจแจ้งความผิดพลาดของเส้นทางหรือ Route Error (RERR) กลับไปยังโหนดต้นทางเพื่อเริ่มกระบวนการบำรุงรักษาเส้นทางใหม่อีกครั้ง และในโพรโทคอล AODV ได้มีการใช้หมายเลขลำดับ (Sequence Number) เพื่อไม่ให้เกิดลูปของเส้นทางและได้เส้นทางที่มีความทันสมัย โดยในโพรโทคอล AODV มีแพ็คเกจอยู่ 3 ประเภทดังนี้

1) แพ็คเกจร้องขอเส้นทางหรือ Route Request Packet (RREQ) เมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะทำการ บรอดคาสต์หรือกระจายแพ็คเกจร้องขอเส้นทางออกไปในเครือข่ายเพื่อค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โดยรูปแบบของแพ็คเกจร้องขอเส้นทางของโพรโทคอล AODV ดังแสดงในรูปที่ 2.10

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Sequence Number							
Source IP Address							
Source Sequence Number							

รูปที่ 2.10 รูปแบบแพ็คเกจร้องขอเส้นทางของโพรโทคอล AODV

เมื่อ Type หมายถึง ชนิดของแพ็คเกจในที่นี้คือแพ็คเกจร้องขอเส้นทาง

J หมายถึง Join Flag สงวนไว้สำหรับ Multicast

R หมายถึง Repair Flag สงวนไว้สำหรับ Multicast

G หมายถึง Gratuitous RREP Flag เป็นการกำหนดให้โหนดทำการตอบรับเส้นทางแทนโหนดปลายทางได้ถ้าโหนดนั้นทราบเส้นทาง

D หมายถึง Destination Only Flag เป็นการกำหนดให้เฉพาะโหนดปลายทางทำการตอบรับเส้นทางเท่านั้น

U หมายถึง ไม่ทราบ Sequence Number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reserved หมายถึง ส่วนที่กำหนดเอาไว้ใช้งานอื่นๆ

Hop Count หมายถึง จำนวนฮอปที่แพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางผ่าน

RREQ ID หมายถึง หมายเลขไอดีของแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง

Destination IP Address หมายถึง หมายเลขไอพีของโหนดปลายทาง

Destination Sequence Number หมายถึง หมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง

Source IP Address หมายถึง หมายเลขไอพีของโหนดต้นทาง

Source Sequence Number หมายถึง หมายเลขลำดับของโหนดต้นทาง

2) แพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางหรือ Route Reply Packet (RREP) เมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง จะทำการส่งแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทาง โดยแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางจะถูกส่งผ่านเส้นทางที่ได้รับแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางเข้ามา จนเมื่อโหนดต้นทางได้รับแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทาง จึงจะสามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นทางนี้ได้ รูปแบบของแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางของโพรโทคอล AODV ดังแสดงในรูปที่ 2.11

Type	R	A	Reserved	Prefix Sz	Hop Count
Destination IP Address					
Destination Sequence Number					
Source IP Address					
Lifetime					

รูปที่ 2.11 รูปแบบแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางของโพรโทคอล AODV

เมื่อ Type หมายถึง ชนิดของแพ็คเก็ตในที่นี้คือแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทาง

R หมายถึง Repair Flag สงวนไว้สำหรับ Multicast

A หมายถึง Acknowledgement Required เป็นการกำหนดให้โหนดก่อนหน้าทำการ Acknowledgement ให้กับโหนดที่ทำหน้าที่ส่งแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทาง

Reserved หมายถึง ส่วนที่สงวนไว้ใช้งานอื่นๆ

Prefix Sz หมายถึง การกำหนดขนาดสำหรับการจัดทำ Subnet

Hop Count หมายถึง จำนวนฮอปที่แพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางผ่าน

Destination IP Address หมายถึง หมายเลขไอพีของโหนดปลายทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Destination Sequence Number หมายถึง หมายเลขลำดับของโหนดปลายทาง

Source IP Address หมายถึง หมายเลขไอพีของโหนดต้นทาง

Lifetime หมายถึง เวลาที่บอกถึงอายุการใช้งานของแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทาง

3) แพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดหรือ Route Error Packet (RERR) แพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดจะถูกส่งออกมาเมื่อเส้นทางที่เชื่อมต่ออยู่ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยโหนดที่พบความผิดพลาดจะเป็นผู้ส่งแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดโดยทำการกระจายแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดออกไปยังโหนดข้างเคียงเพื่อเริ่มกระบวนการบำรุงรักษาเส้นทางหรือ Route Maintenance ต่อไป รูปแบบแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดของโพรโทคอล AODV ดังแสดงในรูปที่ 2.12

Type	N	Reserved	DestCount
Unreachable Destination IP Address			
Unreachable Destination Sequence Number			

รูปที่ 2.12 รูปแบบแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดของโพรโทคอล AODV

เมื่อ Type หมายถึง ชนิดของแพ็คเก็ตในที่นี้คือแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดของเส้นทาง

N หมายถึง No Delete Flag ที่กำหนดเมื่อมีการซ่อมแซมเส้นทาง

Reserved หมายถึง ส่วนที่สงวนไว้ใช้งานอื่นๆ

DestCount หมายถึง จำนวนที่ไม่สามารถเข้าถึงโหนดปลายทางได้

Unreachable Destination IP Address หมายถึง หมายเลขไอพีของโหนด

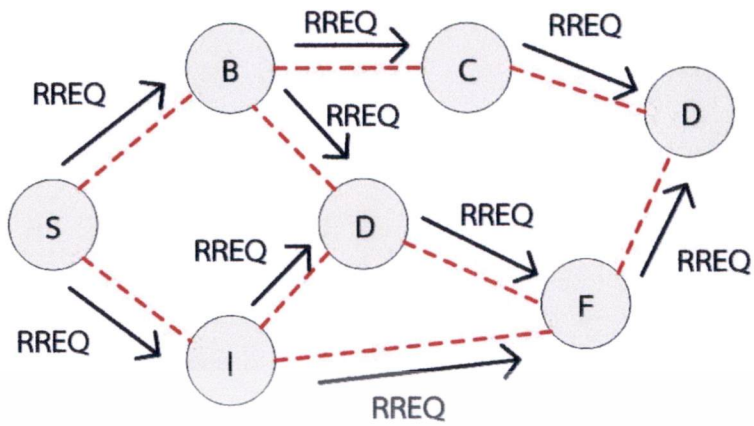
ปลายทางที่ไม่สามารถเข้าถึงได้

Unreachable Destination Sequence Number หมายถึง หมายเลขลำดับ

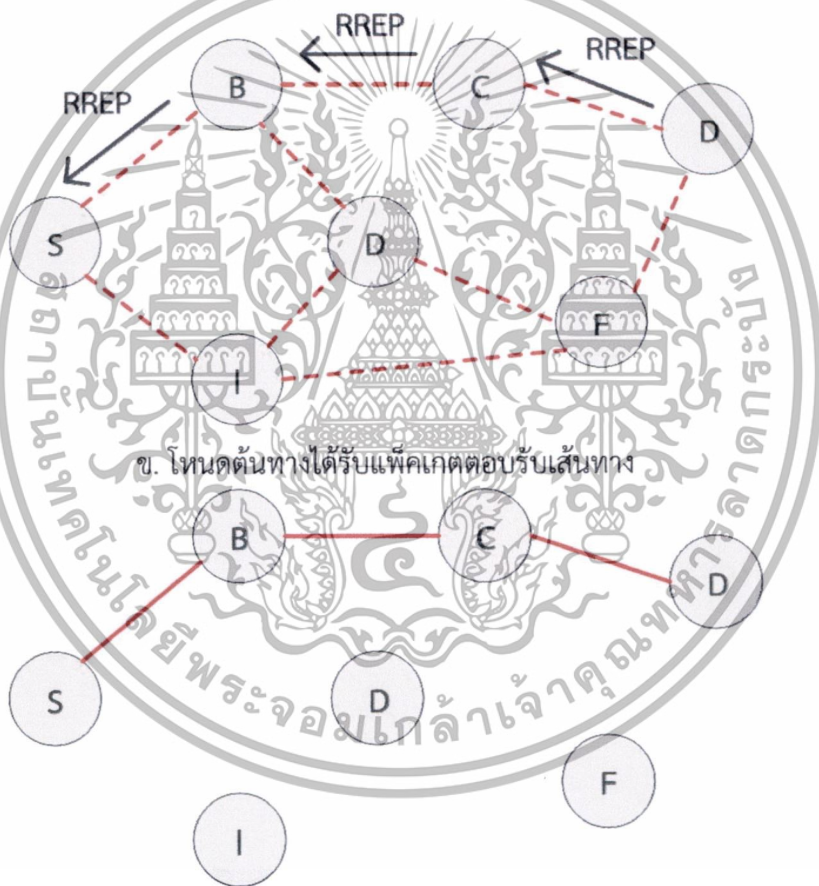
ของโหนดปลายทางที่ไม่สามารถเข้าถึงได้

ในกระบวนการค้นหาเส้นทางหรือเรียกว่า Route Discovery ของโพรโทคอล AODV นั้น เมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะส่งแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางหรือ Route Request Packet (RREQ) กระจายออกไปในเครือข่ายจนเมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางแรก จึงส่งแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทางหรือ Route Reply Packet (RREP) กลับไปยังโหนดต้นทางจึงทำให้ได้เส้นทางขึ้นมา ตัวอย่างกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทาง S ไปยังโหนดปลายทาง D ดังแสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. โหนดต้นทางกระจายแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทาง



ข. โหนดต้นทางได้รับแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทาง

ค. สร้างเส้นทางสำเร็จ (Path creation successful)

รูปที่ 2.13 กระบวนการ Route Discovery ของโปรโตคอล AODV

การบำรุงรักษาเส้นทางหรือ Route Maintenance จะเกิดขึ้นเมื่อเส้นทางที่เชื่อมต่ออยู่นั้นเกิดความผิดพลาดหรือไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โหนดที่พบความผิดพลาดจะทำการแจ้งความผิดพลาดของเส้นทางนั้นโดยการส่งแพ็คเก็ตแจ้งความผิดพลาดหรือ Route Error (RERR) ออกไปยังโหนดเพื่อนบ้านเพื่อแจ้งให้ ทราบว่าไม่สามารถเข้าถึงโหนดนั้นๆ ได้แล้ว จากนั้นโหนดต้นทางจะเริ่มค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางใหม่อีกครั้งจากกระบวนการ Route Discovery

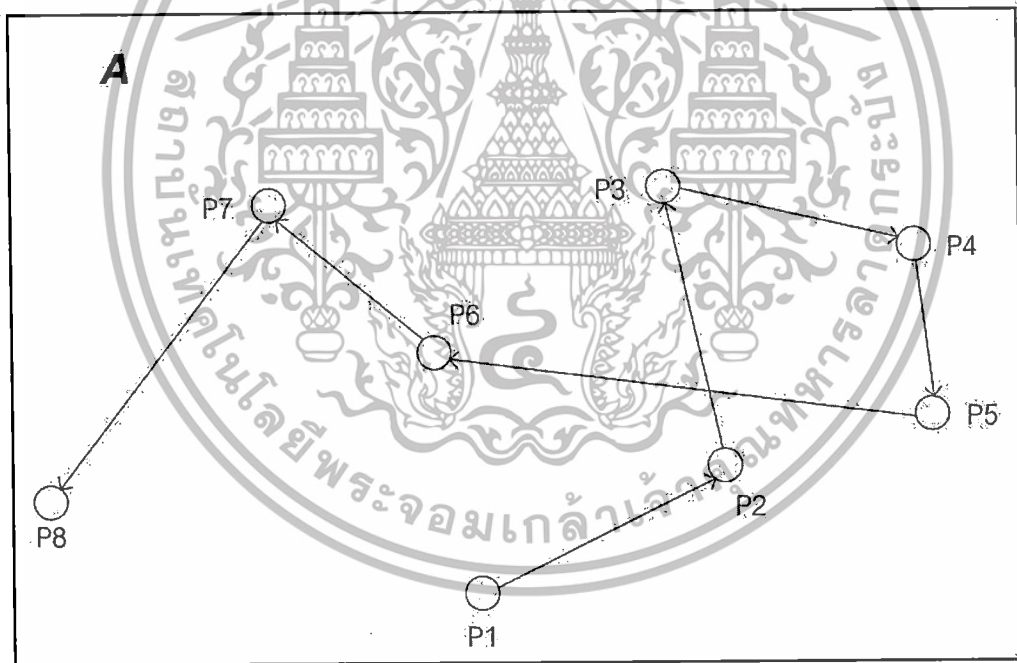
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ตัวแบบการเคลื่อนที่ (Mobility Model)

สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่โดยมีพฤติกรรมหรือกิจกรรมการเคลื่อนที่สามารถอธิบายโดยใช้ทั้งการวิเคราะห์และแบบจำลอง โดยที่การใส่รูปแบบการเคลื่อนที่จะช่วยลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์ การพิจารณาแบบจำลองสถานการณ์ต่างๆ ของการเคลื่อนที่ดังตัวอย่างรูปแบบการเคลื่อนที่ต่อไปนี้

### 2.7.1 ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ (Random Waypoint Mobility Model : RW)

ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ (RW, 2011) เป็นโมเดลที่ประกอบไปด้วยโหนดที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งปลายทางใดก็ได้โดยอิสระด้วยการสุ่มตำแหน่งปลายทางและความเร็ว หลังจากนั้นเมื่อโหนดเคลื่อนไปถึงตำแหน่งปลายทางแล้วจะหยุดรอเป็นระยะเวลาหนึ่งและทำการสุ่มเลือกตำแหน่งใหม่ไปเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโหนดตามตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ การเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์ (RW) นี้ก็นำไปใช้ในการวัดสมรรถนะโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่เฉพาะกิจ (MANET) เนื่องจากเป็นโมเดลที่ง่ายและถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย

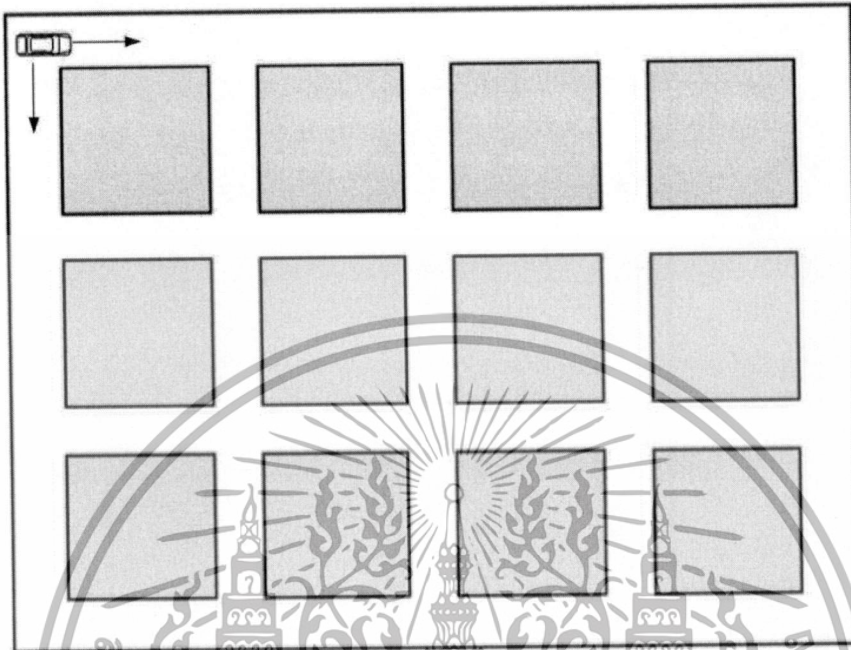


รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโหนดตามตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแรนดอมเวย์พอยต์

### 2.7.2 ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด (Manhattan Grid Mobility Model : MG)

ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด (MG, 2011) เป็นโมเดลอีกหนึ่งในหลายโมเดลที่ถูกนำไปใช้ในการวัดสมรรถนะโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายยานพาหนะ (VANET) ตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริดเป็นโมเดลการเคลื่อนที่ของโหนดซึ่งเคลื่อนที่อยู่บนถนนที่เป็นระเบียบลักษณะเป็นกริดดังแสดงตามรูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของโหนดในตัวแบบการเคลื่อนที่แบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมนฮัตตันกริด (MG) สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางด้วยกันคือ แนวตั้งและแนวนอนตามเส้นทางบนถนน เมื่อโหนดเคลื่อนที่มาถึงทางแยกโหนดจะสุ่มเลือกทิศทางที่จะมุ่งหน้าไป เช่น เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา หรือเคลื่อนที่ตรงไป โดยใช้ความน่าจะเป็นเข้ามาช่วยในการเลือกทิศทางของโหนด



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างถนนในตัวแบบการเคลื่อนที่แบบแมนฮัตตันกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้มีการกล่าวถึงความเป็นมาของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย และโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบต่างๆ ในระบบเครือข่ายไปแล้ว ในส่วนนี้ของวิทยานิพนธ์จะเป็นการนำเสนอเกี่ยวกับงานวิจัยที่ให้ความสนใจ นำเสนอเกี่ยวกับการโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดที่ถูกใช้ในเครือข่ายเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบต่างๆ และนำเสนอรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ศึกษาและนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพต่อไป

### 3.1 การค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด

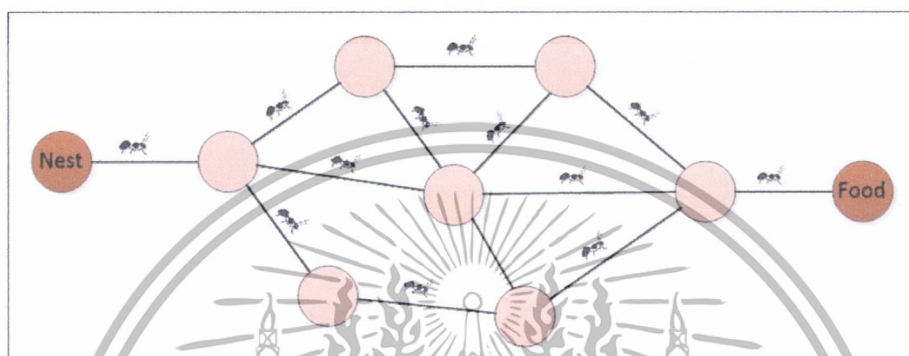
การค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด (Ant Colony Optimization : ACO) เป็นกลุ่มอัลกอริทึมแบบ Meta-heuristic ที่อยู่ในกลุ่มของอัลกอริทึม Ant Colony ซึ่งอัลกอริทึมนี้มีเป้าหมายที่จะค้นหาเส้นทางที่เหมาะสม เป็นการค้นหาคำตอบโดยอาศัยการเลียนแบบธรรมชาติการหาอาหารของมด ซึ่งอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดนั้น ในการค้นหาคำตอบจะกำหนดให้มีจำนวนของมดที่จะเดินหาคำตอบ และค่าคำตอบจะเท่ากับจำนวนของมด ซึ่งมดหนึ่ง ตัวจะแทนค่าคำตอบหนึ่งคำตอบ ในส่วนของประวัติความเป็นมาและหลักการทำงานของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 3.1.1 ประวัติความเป็นมาของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด

ในปี ค.ศ. 1991 Marco Dorigo และคณะได้คิดค้นวิธีการแก้ปัญหาโดยได้เลียนแบบพฤติกรรมทางธรรมชาติของมดในการหาระยะทางที่สั้นที่สุดจากแหล่งอาหารสู่รัง [6],[7] โดยทั่วไปแล้ว อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดจัดอยู่ในกลุ่มของความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm intelligence : Si) จะใช้หลักการจัดระบบด้วยตนเอง (Self-Organising Principles) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพของมดเช่น พฤติกรรมหาอาหาร (Foraging) การแบ่งประเภทงาน (Division of Labor) การช่วยกัน ขนย้าย (Cooperative Transport) เป็นต้น โดยมดจะใช้การติดต่อสื่อสารระหว่างกันโดยใช้สารเคมีชนิดหนึ่งที่ เรียกกันว่า "สารฟีโรโมน (Pheromone)" กล่าวคือขณะที่มดเดินทางหาอาหารอยู่นั้น มดจะทิ้งสารฟีโรโมนเอาไว้บนเส้นทางที่มดตัวนั้นเดิน เมื่อมดตัวอื่นที่อยู่บริเวณใกล้เคียงได้กลิ่นสารฟีโรโมนที่ทิ้งไว้แล้วก็จะมีความเป็นไปได้ (Probability) ที่จะเลือกเส้นทางดังกล่าวตามเส้นทางของมดตัวแรก มากกว่าที่จะเลือกเส้นทางอื่น หลังจากที่มีมดเลือกเส้นทางเดินได้แล้วก็จะทำการทิ้งสารฟีโรโมนทับลงบนเส้นทางที่มดตัวที่สองเลือกเดิน ทำให้ปริมาณของสารฟีโรโมนบนเส้นทางนั้นมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นซึ่งกลไกนี้เรียกว่า กระบวนการป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback or Autocatalytic Mechanism) ในขณะเดียวกันธรรมชาติของ สารฟีโรโมนก็มีการระเหยอยู่ตลอดเวลา (Pheromone Decay) กล่าวคือถ้าเส้นทางใดที่มีมดไม่มีการเลือกเดินบนเส้นทางนั้นก็จะมีปริมาณของสารฟีโรโมนน้อยลง ความเป็นไปได้ที่มีมดจะเลือกเส้นทางดังกล่าวจึงมีน้อยลง จนในที่สุดปริมาณสารฟีโรโมนบนเส้นทางนั้นก็จะถูกระเหยไปจนหมด ซึ่งเรียกกลไกนี้ว่า กระบวนการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) ซึ่งทั่วไปแล้วเราจะ

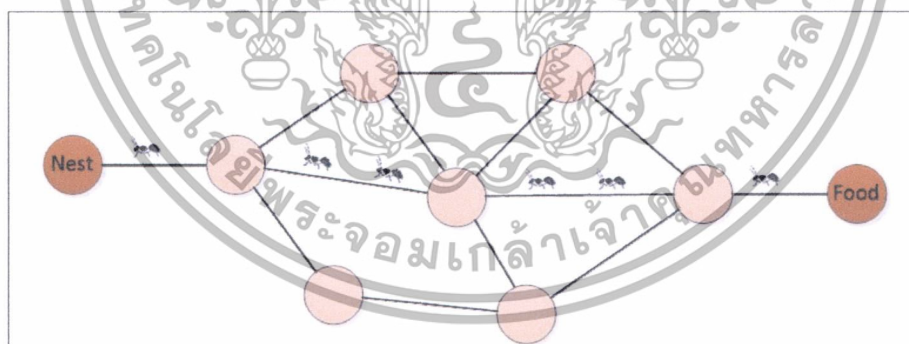
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตเห็นได้ว่าเมื่อกลุ่มมดเริ่มเดินทางหาอาหารในตอนแรกจะมีการกระจายของเส้นทางเดินของมด แต่เมื่อเวลาผ่านไปเส้นทางของมดที่เดินทางหาอาหารสุ่งจะเหลืออยู่เพียงเส้นทางเดียวและเส้นทางนั้นจะมีมดเดินเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจึงได้ยกตัวอย่างอธิบายพฤติกรรมการเลือกเส้นทางเดินที่สั้นกว่าของมดในการหาอาหารโดยมีการจำลองเมืองแต่ละเมืองให้แทนด้วยโหนด (Node) คือ จุดต่างๆ ที่มดใช้เดินแต่ละจุดในการหาอาหารแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นให้มดเดินทางคำตอบด้วยการเดินที่ละโหนดจนเดินครบจำนวนโหนดที่กำหนดไว้ระยะทางทั้งหมดที่หาได้คือ ระยะทางทั้งหมดระหว่างโหนดที่มดเดินร่วมกันนั่นเอง



รูปที่ 3.1 การหาอาหารของมดโดยเดินผ่านโหนดต่างๆ

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงการหาอาหารของมดโดยเดินผ่านโหนดต่างๆ จะเห็นได้ว่ามีหลายเส้นทางที่มดเลือกเดิน แต่ท้ายที่สุดแล้วเมื่อมดอาศัยสารฟีโรโมนในการสื่อสารกันจะทำให้มีเส้นทางเหลืออยู่เพียง 1 เส้นทางเท่านั้นที่มดจะเลือกเดินนั้นคือเส้นทางที่สั้นที่สุดดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การหาอาหารของมดเมื่ออาศัยการสื่อสารด้วยสารฟีโรโมน

จากแนวคิดของ Marco Dorigo และคณะ ทำให้มีงานวิจัยต่อมาได้นำเอาอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะปัญหาแบบ NP-hard ซึ่งแต่ละปัญหาก็ มีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป แต่โดยมากแล้วจะนำไปแก้ปัญหาที่มีจุดประสงค์เพื่อลดหรือจัดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ และจัดการกับความยุ่งยากที่เกิดขึ้นของปัญหานั้นๆ

### 3.1.2 โครงสร้างของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาและประยุกต์อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดโดยระบบมด (Ant system: AS) ได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยได้ถูกคิดค้นและ  
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาขึ้นโดย Marco Dorigo และคณะ ซึ่งเป็นการนำเอาระบบมด (AS) มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) เป็นปัญหาแรกเพื่อใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการเดินทางของพนักงานขายซึ่งประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก

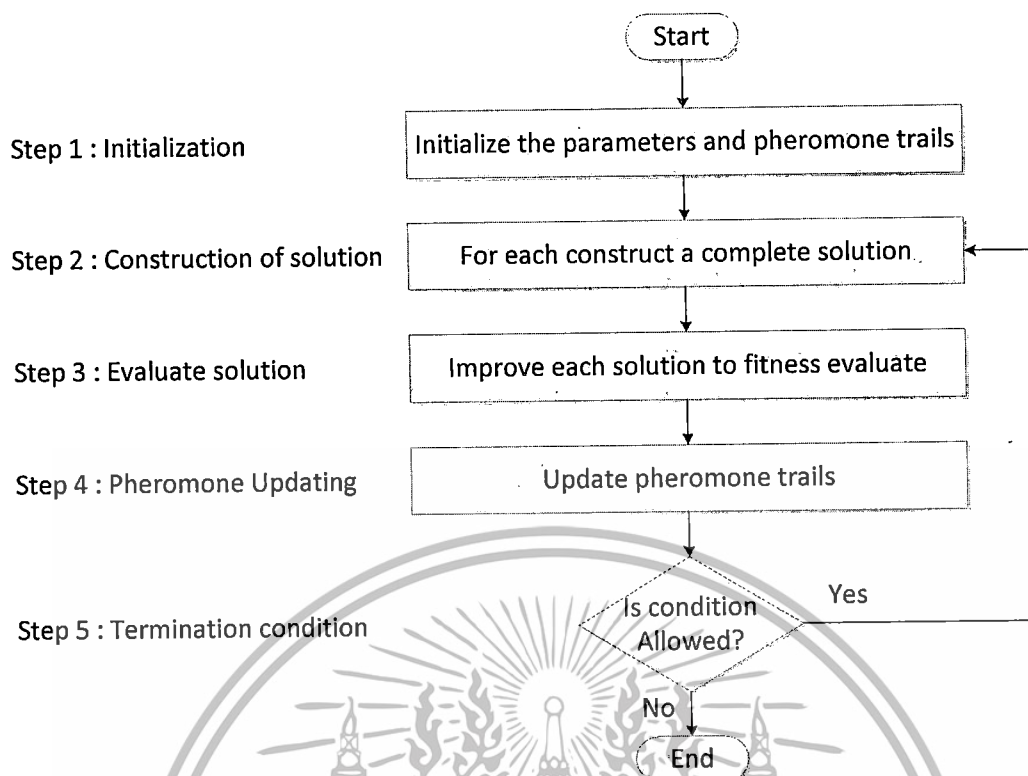
วิธีค้นหาคำตอบของปัญหาโดยอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดมีวิวัฒนาการมาเป็นลำดับซึ่งสามารถ แยกออกเป็นวิธีต่างๆ ได้ดังนี้

- Ant System (AS)
- Elitist Ant System (EAS)
- Rank-base Ant System (AS-rank)
- Max-Min Ant System (MMAS)
- Ant Colony System (ACS)

โดยพื้นฐานอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดใช้เทคนิคการค้นหา (Searching) คำตอบของปัญหา โดยเลียนแบบพฤติกรรมการสร้างเส้นทางค้นหาแหล่งอาหารและเดินทางกลับรังของฝูงมด วิธีนี้ถือเป็นวิธีฮิวริสติกส์แบบ Solution Construction โดยเมื่อประยุกต์กับปัญหาการเดินทางที่สั้นที่สุดในโครงข่ายฝูงมดเทียม (Artificial Ants) ประกอบด้วย มดจำนวน  $m$  ตัว จากจุดเริ่มต้น (อาณาจักรมด) จะสร้างเส้นทางไปกลับ จากรังไปยังแหล่งอาหารโดยมดแต่ละตัวจะเลือกทิศทางตามค่าความน่าจะเป็นซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสารฟีโรโมน (Pheromone) บนลิงค์เชื่อมต่อ เดินทางต่อเนื่องจากลิงค์สู่ลิงค์ถึงแหล่งอาหารและเลือกเส้นทางกลับจากเส้นทางที่สั้นที่สุดจากการค้นพบของมดทั้งหมด ในระหว่างเดินทางกลับมดจะปล่อยสารฟีโรโมนลงบนลิงค์ของเส้นทาง (Pheromone Update) ในขั้นตอนต่อไป การสร้างเส้นทางไปกลับ เป็นไปในหลักการดังกล่าวข้างต้น แต่เส้นทางใหม่จะเปลี่ยนไปตามผลของค่าฟีโรโมนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบนลิงค์ที่เป็นส่วนของเส้นทางที่สั้นที่สุดและมีการปรับค่าฟีโรโมนบนเส้นทางที่ดี (Good Solution) ซึ่งเมื่อจำนวนการทำซ้ำเพิ่มขึ้นจะได้คำตอบ (เส้นทางไปกลับ) ที่ดีที่สุด (Global Solution) วิธีต่างๆ ของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด มีความคล้ายกันในส่วนการเลือกทิศทางโดยเลือกแบบสุ่มด้วยค่าความน่าจะเป็นที่ได้มาจากปริมาณฟีโรโมนของลิงค์ต่อเนื่อง ความแตกต่างของแต่ละวิธีอยู่ที่การอัปเดต (Update) ฟีโรโมน ในเส้นทางขากลับ (จากแหล่งอาหารสู่อรัง) โดยวิธี ระบบมด ถือเป็นต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมารายละเอียดเทคนิคการสร้างทาง (Solution Construction) และการอัปเดตฟีโรโมน (Pheromone Update) ของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดทั้ง 5 รูปแบบได้อธิบายไว้โดย Dorigo

หลักการการทำงานของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดทั้ง 5 รูปแบบวิธีการในแต่ละแบบนี้มีขั้นตอนการทำงานที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งมีพื้นฐานหลักๆ มาจากวิธีแบบระบบมด (AS) คือ ขั้นตอนการทำงานของโครงสร้างของมด (Solution Construction) และขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของสารฟีโรโมน (Pheromone update) โดยมีโครงสร้างทั่วไป ในการทำงานของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างทั่วไปของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด

หลักการการทำงานของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด โดยทั่วไปมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 : Initialization เป็นการเริ่มต้นการทำงานโดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดคือจำนวนมด (Number of Ants :  $A$ ) จำนวนรอบการวนซ้ำ (Number of Iterations :  $I$ ) ค่าถ่วงน้ำหนักของปริมาณฟีโรโมน (Pheromone Trail Weight :  $\alpha$ ) ค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลที่ใช้สุ่มอย่างมีเหตุผล (Heuristic Information Weight:  $\beta$ ) อัตราการระเหยของฟีโรโมน (Pheromone Evaporation Rate :  $\rho$ ) การคำนวณค่าสารฟีโรโมนเริ่มต้น (Initial Pheromone :  $\tau_0$ ) และข้อมูลที่ใช้สุ่มอย่างมีเหตุผล (Heuristics Information :  $\eta$ )

ขั้นตอนที่ 2 : Construction of Solution ซึ่งขั้นตอนนี้สำหรับอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ทั้ง 5 รูปแบบคือ AS, EAS, RAS, MMAS และ ACS โดยมีลำดับขั้นตอนที่เหมือนกัน ซึ่งหลังจากกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดในแต่ละแบบแล้ว ก็ทำการสร้างค่าคำตอบโดยการให้มดตัวที่  $k$  สุ่มเลือกโหนด (Node) เริ่มต้นขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นจะทำการเลือกโหนดถัดไป โดยในแต่ละครั้งของการเลือกจะใช้กฎความเป็นไปได้ (Probability) ในการเลือกโหนดถัดไปเรียกว่า กฎการสุ่มโดยสัดส่วนความน่าจะเป็น (Random Proportional Rule) โดยทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นทุกๆ โหนดที่มดตัวที่  $k$  ยังไม่ได้เดินทางผ่าน ซึ่งสามารถคำนวณความน่าจะเป็นของแต่ละโหนดได้ดังสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in N_i^k} [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}, \text{ if } j \in N_i^k \quad (3.1)$$

โดยที่  $i$  คือ โหนดปัจจุบัน

$j$  คือ โหนดถัดไป

$P_{ij}^k$  คือ ความน่าจะเป็นที่มดตัวที่ จะเดินจากโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$

$N_i^k$  คือ จำนวนเมืองหรือโหนด  $i$  ทั้งหมดที่อยู่รอบๆ โดยที่มดตัวที่  $k$  สามารถที่จะ

เลือกเดินไปได้และยังไม่ได้เดินผ่าน

$\eta_{ij}$  คือ ค่าข้อมูลที่ใช้สุ่มอย่างมีเหตุผลระหว่างโหนด  $i$  กับโหนด  $j$  มีค่าเท่ากับส่วนกลับของระยะทาง  $(1/d_{ij})$  ระหว่างโหนด  $i$  กับโหนด  $j$

$\tau_{ij}$  คือ ปริมาณสารฟีโรโมนระหว่างโหนด  $i$  กับโหนด  $j$

$\alpha$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของปริมาณสารฟีโรโมน

$\beta$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลที่ใช้สุ่มอย่างมีเหตุผล

แต่สำหรับรูปแบบ ACS นั้นจะใช้กฎ Pseudorandom Proportional Rule ในการตัดสินใจเลือกโหนดถัดไป ต่างออกไปจากอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ในรูปแบบอื่น ดังสมการที่ 3.2

$$J = \begin{cases} \arg \max I \in \{\tau_{ij} [\eta_{ij}]^\beta\}, & \text{if } q \leq q_0 \\ J, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

โดยที่  $J$  คือ ใช้แทนสมการที่ 3.1 ในขณะที่ตัวแปร  $q$  คือ เลขสุ่มที่ซึ่งมีกระจายอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ( $q \in [0,1]$ ) และ คือ ค่าช่วงของการสุ่ม ( $0 \leq q_0 \leq 1$ ) เป็นตัวกำหนดการตัดสินใจว่าจะเลือกทางเดินถัดไปโดยใช้วิธีการสำรวจเส้นทางใหม่ๆ ( $J$ ) ซึ่งมีความเป็นไปได้เท่ากับ  $1 - q_0$  หรือถ้าค่าการสุ่ม  $q \leq q_0$  จะใช้ประโยชน์จากข้อมูลการเดินทางของมดที่ผ่านมาหรือเลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดก็คือ  $\arg \max$  ในการเลือกโหนดหรือเมืองถัดไปทันที โดยไม่ใช้วงล้อเสี่ยงทาย (Roulette Wheel Selection Rule) แต่ใช้หลักการความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Probability Selection Rule) ในการคัดเลือกโหนดถัดไปแทน และจะมีการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมนแบบเฉพาะที่ (Local Pheromone Trails Update) ทันทีในทุกๆ ขั้นตอนของการเลือกเส้นทางเดินถัดไปของมดเทียมดังสมการที่ 3.3

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \xi)\tau_{ij} + \xi\tau_0 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\xi$  คืออัตราการระเหยฟีโรโมนแบบเฉพาะที่ซึ่งมีค่าเป็น  $0 < \xi < 1$  ซึ่งผลการทดลองของ Dorigo ได้เสนอว่าค่า  $\xi$  ที่เหมาะสมควรกำหนดให้เป็น 0.1 และ  $\tau_0$  เป็นค่าเดียวกันกับค่าฟีโรโมนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ขั้นตอนที่ 3 : Evaluate Solution** ขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณค่าคำตอบของมดตัวที่  $k$  ใดๆ เพื่อให้ได้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ตามฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ให้ได้ตรงกับจุดประสงค์ของแต่ละปัญหา

หลังจากนั้นตรวจสอบว่ามดได้เดินหาคำตอบครบทุกตัวตาม (Number of Ants:  $A$ ) ที่ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ไว้ในขั้นตอนที่ 1 หรือไม่ ถ้ายังไม่ครบให้วนซ้ำขั้นตอนที่ 2 ต่อไปจนครบ ถ้าครบแล้วจะดำเนินการในขั้นตอนที่ 4 ต่อไป

**ขั้นตอนที่ 4 : การ Update Pheromone Traits** ขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมนตามเส้นทางที่มดได้เดินผ่าน ซึ่งจะต้องมีการระเหยของปริมาณสารฟีโรโมน (Pheromone Evaporation) ก่อนที่จะมีการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมน (Pheromone Deposition) ทุกครั้งซึ่งในการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมนของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ทั้ง 5 รูปแบบ คือ AS, EAS, RAS, MMAS และ ACS ก็จะมี ความแตกต่างกันออกไป ดังนี้

1. วิธีแบบระบบมด (AS) หลังจากที่มีมดทุกตัวได้เดินทางครบทุกโหนดหรือทุกเมืองแล้วก็จะคำนวณหาระยะทางของมดแต่ละตัวซึ่งในวิธีแบบระบบมดนี้ จะกำหนดให้มดแต่ละตัวมีการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนบนเส้นทางของมดทุกๆ ตัวหลังจากที่ได้เดินทางผ่านเส้นทางนั้นๆ มาทันทีและพร้อมกับการระเหยของฟีโรโมนในทุกๆ เส้นทางอีกด้วย ซึ่งสมการของการระเหยของสารฟีโรโมนแสดงดังสมการที่ 3.4

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}, \forall (i, j) \in L \quad (3.4)$$

เมื่ออัตราการระเหยของสารฟีโรโมน ( $\rho$ ) มีค่าระหว่าง  $0 < \rho < 1$  ซึ่งอัตราการระเหยของสารฟีโรโมนนั้นมีเพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมของปริมาณสารฟีโรโมนบนเส้นทางที่มากเกินไป เพราะจะทำให้มดนั้นไม่เกิดการหาเส้นทางใหม่ๆ ที่อาจจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมกว่าได้ ดังนั้นวิธีแบบระบบมดจึงมีการระเหยของสารฟีโรโมน และการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนพร้อมๆ กันบนเส้นทางที่มดแต่ละตัวได้เดินผ่านแสดงดังสมการที่ 3.5

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \forall (i, j) \in L \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\Delta\tau_{ij}^k$  คือปริมาณของสารฟีโรโมนที่มดตัวที่  $k$  จะเพิ่มให้กับเส้นทางที่ได้เดินผ่านมาแล้ว โดยปริมาณของสารฟีโรโมนที่มดตัวที่  $k$  ที่จะเพิ่มให้กับเส้นทางนั้นสามารถหาได้จาก สมการที่ 3.6

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{C^k}, & \text{if } \text{arc}(i, j) \text{ belong to } T^k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $C^k$  เป็นผลเฉลี่ยหรือระยะทางทั้งหมดของมดตัวที่  $k$  ได้เดินทางผ่านเส้นทางนั้นๆ ซึ่งคำนวณได้จากระยะทางระหว่างโหนดในแต่ละโหนดไปจนครบทุกโหนดของ  $T^k$

2. วิธีแบบ Elitist Ant System (EAS) การเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมน (Update Pheromone Trails) ของวิธีแบบ EAS นั้น ในส่วนของขั้นตอนการระเหยของสารฟีโรโมน แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Pheromone Evaporation) นั้นยังคงใช้วิธีการเดียวกันกับวิธีแบบระบบมด ดังสมการที่ 3.4 แต่ในส่วนของการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมน (Pheromone Deposition) นั้นจะมีความแตกต่างไปจากสมการที่ 3.5 ของวิธีแบบระบบมด ตรงที่มีการเพิ่มปริมาณของสารฟีโรโมน ( $\Delta\tau_{ij}^{bs}$ ) ลงบนเส้นทางของมดตัวที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Beat-so-far Tour :  $T^{bs}$ ) ในแต่ละรอบของการประมวลผล (Iteration) ดังสมการที่ 3.7

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k + e\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\Delta\tau_{ij}^k$  คือปริมาณของสารฟีโรโมนที่มดตัวที่  $k$  จะเพิ่มให้กับเส้นทางที่ได้เดินผ่านมาแล้วดังสมการที่ 3.6 และปริมาณของสารฟีโรโมน  $\Delta\tau_{ij}^{bs}$  ที่จะเพิ่มให้กับเส้นทางของมดตัวที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด สามารถหาได้จากสมการที่ 3.8

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = \begin{cases} \frac{1}{C^{bs}}, & \text{if } \text{arc}(i, j) \text{ belong to } T^{bs} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.8)$$

โดยค่าพารามิเตอร์  $e$  คือ ค่าน้ำหนักของสารฟีโรโมนที่เกิดจากค่าคำตอบที่ดีที่สุดซึ่ง Marco Dorigo ได้กำหนดค่า  $e$  ที่เหมาะสมไว้ที่  $e = n$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนโหนดหรือเมืองสำหรับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) และ  $C^{bs}$  คือระยะทางที่สั้นที่สุดซึ่งอยู่บนเส้นทางของมดตัวที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Beat-so-far Tour :  $T^{bs}$ )

3. วิธีแบบ Rank-based Ant System (RAS) การเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมน (Update Pheromone Trails) ของวิธีแบบ RAS นั้น ในส่วนของขั้นตอนการระเหยของสารฟีโรโมน (Pheromone Evaporation) นั้นยังคงใช้วิธีการเดียวกันกับวิธีแบบระบบมด ดังสมการที่ 3.4 แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมน (Pheromone Deposition) ในสมการที่ 3.5 ของวิธีแบบระบบมด ตรงที่ในแต่ละรอบของการประมวลผล (Iteration) มดแต่ละตัวจะมีการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนที่ไม่เท่ากันไว้บนเส้นทางของตนโดยจะกำหนดช่วง (Rank) ของจำนวนมดในการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมน โดยที่จำนวนมดในช่วงนั้นสามารถคำนวณได้จาก  $r = (w - 1)$  และมดตัวที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดในรอบนั้นๆ จะถูกกำหนดความสำคัญไว้เป็นอันดับที่ 1 เสมอตามลำดับ เช่นถ้า มีค่าของช่วง (Rank) เท่ากับ 5 แล้วแสดงว่าในรอบนั้น มดตัวที่มีอันดับความสำคัญของคำตอบที่ดีที่สุดให้อันดับ 1 ถึง 5 จะทำการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนในสัดส่วนที่ลดลงตามลำดับช่วงของจำนวนมด (Rank) นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมน ( $w\Delta\tau_{ij}^{bs}$ ) ลงไปบนเส้นทางของมดตัวที่มีค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Beat-so-far Tour :  $T^{bs}$ ) ในแต่ละรอบ (Iteration) การประมวลผลอีกด้วย แสดงดังสมการที่ 3.9

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{r=1}^{w-1} (w - r)\Delta\tau_{ij}^r + w\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\Delta\tau_{ij}^{bs}$  คือปริมาณของสารฟีโรโมนบนเส้นทางของมดตัวที่หาคำตอบที่ดีที่สุด และ  $\Delta\tau_{ij}^r$  คือ ปริมาณของสารฟีโรโมนของมดตัวที่  $r$  ที่อยู่ในช่วง (Rank) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.10 ตามลำดับ

$$\Delta\tau_{ij}^r = \begin{cases} \frac{1}{C^r}, & \text{if } arc(i, j) \text{ belong to } T^r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.10)$$

โดยค่า  $w$  คือ ค่าน้ำหนักของการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนซึ่ง Bullnheimer และคณะได้กำหนดค่า  $w$  ที่เหมาะสมไว้ที่  $w = 6$  สำหรับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) และ  $C^r$  เป็นระยะทางทั้งหมดของมดตัวที่  $r$  ที่อยู่ในช่วง (Rank)

4. วิธีแบบ MAX-MIN Ant System (MMAS) การเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมน (Update Pheromone Trails) ของวิธีแบบ MMAS นั้นในส่วนของขั้นตอนการระเหยของสารฟีโรโมน (Pheromone Evaporation) นั้นยังคงใช้วิธีการเดียวกันกับวิธีแบบระบบมด ดังสมการที่ 3.4 แต่ในส่วนของขั้นตอนการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมน (Pheromone Deposition) นั้นจะมีความแตกต่างจากวิธีแบบระบบมด ตรงที่จะมีการเพิ่มปริมาณของสารฟีโรโมน ( $\Delta\tau_{ij}^{bs}$ ) ลงบนเส้นทางของมดตัวที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Beat-so-far Tour :  $T^{bs}$ ) เท่านั้น แสดงดังสมการที่ 3.11 โดยจะมีการจำกัดช่วงของปริมาณสารฟีโรโมนระหว่าง  $[\tau_{min}, \tau_{max}]$  บนทุกๆ เส้นทาง แสดงดังสมการที่ 3.12 เพื่อหลีกเลี่ยงการยึดติดกับคำตอบที่ไม่ใช่ คำคำตอบที่ดีที่สุดนอกจากนี้ยังกำหนดปริมาณสารฟีโรโมนเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ  $\tau_{max}$  พร้อมทั้งกำหนดให้อัตราการระเหยของสารฟีโรโมนนั้นมีค่าน้อยๆ เพื่อให้เกิดความเป็นได้ในการค้นหาเส้นทางอื่นเพิ่มขึ้น

$$\tau_{ij} \leftarrow [(1-\rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{bs}]_{\tau_{min}^{\max}} \quad (3.11)$$

$$[\tau_{ij}]_{\tau_{min}^{\max}} = \begin{cases} \tau_{max}, & \text{if } \tau_{ij} > \tau_{max} \\ \tau_{min}, & \text{if } \tau_{ij} < \tau_{min} \\ \tau_{ij}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\tau_{max} = \frac{1}{\rho C^{bs}} \quad (3.13)$$

และ

$$\tau_{min} = \frac{(1-\sqrt{0.05})}{((avg-1)(\sqrt{0.05}))} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\tau_{\max}$	คือ ขอบเขตบน (Upper Limit or Upper Bound) ของปริมาณฟีโรโมน
$\tau_{\min}$	คือ ขอบเขตล่าง (Lower Limit or Lower Bound) ของปริมาณฟีโรโมน
$\rho$	คือ อัตราการระเหยของปริมาณฟีโรโมน
$C^{bs}$	คือ ระยะทางทั้งหมดที่สั้นที่สุดที่มดทำได้ (Beat-so-far Tour : $T^{bs}$ )
$avg$	คือ จำนวนโหนดเฉลี่ย ( $n/2$ )
$n$	คือ จำนวนโหนดทั้งหมด

5. วิธีแบบ Ant Colony System (ACS) การเปลี่ยนแปลงร่องรอยของปริมาณสารฟีโรโมน (Update Pheromone Trails) ของวิธีแบบ ACS นั้น จะมีความแตกต่างไปจากรูปแบบของ อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด อื่นๆ ตรงที่จะมีการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของฟีโรโมน 2 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของสารฟีโรโมนแบบเฉพาะที่ (Local Pheromone Trail Update) ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้หลังจากที่มดได้เลือกเมืองถัดไปแล้ว และจะทำการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของฟีโรโมนแบบเฉพาะที่ทันทีในทุกๆ ขั้นตอนของการเลือกเส้นทางเดินถัดไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของฟีโรโมนแบบเฉพาะที่แสดงในสมการที่ 3.3
- ขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงร่องรอยของสารฟีโรโมนแบบกว้าง (Global Pheromone Trail update) ของวิธีแบบ ACS นั้น จะมีการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนลงบนเฉพาะเส้นทางของมดตัวที่หาคำตอบที่ดีที่สุด (Beat-so-far Tour:  $T^{bs}$ ) ในทุกๆ รอบของการประมวลผล (Iteration) เท่านั้น แสดงดังสมการที่ 3.15

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij} + \rho\Delta_{ij}^{bs}, \forall (i,j) \in T^{bs} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $\Delta_{ij}^{bs}$  คือปริมาณของสารฟีโรโมนบนเส้นทางของมดตัวที่หาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.8 และ  $\rho$  คืออัตราการระเหยของปริมาณสารฟีโรโมนโดยจะเห็นว่าวิธีแบบ ACS จะมีการระเหยของปริมาณสารฟีโรโมนตรงส่วนการเพิ่มปริมาณสารฟีโรโมนใหม่ด้วย โดยค่าพารามิเตอร์  $\rho$  จะเป็นตัวกำหนดการถ่วงดุลระหว่างปริมาณการระเหยของสารฟีโรโมนเก่าและปริมาณการเพิ่มของสารฟีโรโมนใหม่ซึ่งต่างจากอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ในรูปแบบอื่น

**ขั้นตอนที่ 5 : Termination Condition** ซึ่งเงื่อนไขของการหยุดนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบการวนซ้ำ (Number of Iterations :  $i$ ) ว่าครบตามที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 หรือไม่ ถ้ายังให้วนซ้ำขั้นตอนที่ 2 จนครบ ซึ่งขั้นตอนต่างๆ กล่าวมานี้จะใช้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานเครือข่าย

อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดได้รับความสำเร็จในด้านต่างๆ ในเครือข่ายแบบมีสาย Caro และ Dorigo [8],[9] แนะนำวิธีการที่เรียกว่า AntNet เพื่อการเรียนรู้การปรับตัวของตารางการค้นหาเส้นทางผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า AntNet เกือบตลอดเวลาที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า โพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น OSPF และ SPF ในการทดสอบในระบบเครือข่ายแบบมีสายจะไม่มีเรื่องของพลังงานที่จำกัด มันจึงไม่เหมาะสมที่จะนำเอา AntNet มาใช้กับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย อย่างไรก็ตามความสำเร็จของ AntNet แสดงให้เห็นว่ารูปแบบวิธีการของมดสามารถที่จะมีศักยภาพได้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจาก AntNet, Chen et al. ได้นำเสนอโพรโทคอลด้วยวิธีการของมดโดยใช้ชนิดของมดในการค้นหาและกฎการลงใหม่อีกครั้งเพื่อหลีกเลี่ยงการติดตาย การปรับเส้นทาง (AR) และมีการปรับปรุงโดย Ghasem Aghaei et al. รวมทั้งเสริมการเรียนรู้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำหนดเส้นทาง Zhang et al. กล่าวถึงวิธีที่จะปรับอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดให้กับเครือข่ายเซ็นเซอร์และนำเสนออัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดใหม่ แม้จะมีอัลกอริทึมดังที่กล่าวมานี้ได้มีปรับปรุงบางส่วนของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด บทความเหล่านี้ยังละเลยการใช้พลังงานจริงที่ใช้จริงของเซ็นเซอร์โหนด สำหรับ Xiao-Min Hu และ Jun Zhang อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายหรือ Ant Routing Optimization Algorithm for Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks (ARO) [13] ในอัลกอริทึมเออาร์โอได้ปรับปรุงการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดโดยได้มีการพิจารณาการใช้พลังงานจริงของเซ็นเซอร์โหนดอยู่ 2 ชนิดคือ

- สำหรับการตรวจจับ
- การส่งข้อมูลและการรับข้อมูล

#### 3.2.1 รูปแบบของอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

นิยามที่ 1 : สมมติว่ามี  $K$  กลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์และแต่ละกลุ่มสามารถทำงานได้ สำหรับเวลาให้เป็น  $T_g$ ,  $g = 1, 2, \dots, K$ , แล้วอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้เป็น

$$T_{WSN} = \sum_{g=1}^K T_g \quad (3.16)$$

อายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของแต่ละกลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์ที่ดำเนินการทำงาน

นิยามที่ 2 : ตามที่ให้นิยามที่ 1 อายุการใช้งานของกลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์  $S_g = \{s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{j|s_g|}\}$  จะถูกพิจารณาโดยโหนดเซ็นเซอร์ที่มีอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ

$$T_g = (t_1^g, t_2^g, \dots, t_{|s_g|}^g) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $T_g$  หมายถึงอายุการใช้งานของกลุ่ม  $g$  และ  $t_i^s$  เป็นอายุการใช้งานของโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  ระหว่างในการดำเนินงานในกลุ่ม  $g$  และ  $i = 1, 2, \dots, |S_g|$

อายุการใช้งานของโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  ระหว่างในการดำเนินงานในกลุ่ม  $g$  จะได้รับผลกระทบโดยพลังงานที่ยังคงเหลืออยู่  $E_i$  และเส้นทางที่ใช้พลังงาน นอกจากนี้ยังสามารถตรวจจับและทำการสื่อสาร การจัดเก็บข้อมูลและการประมวลผลก็ยังคงต้องใช้พลังงาน เพื่อมีการแสดงรูปแบบที่เรียบง่าย รายละเอียดในการใช้พลังงานของส่วนการตรวจจับและส่วนของการสื่อสารสำหรับอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

### 3.2.2 การใช้พลังงานในการตรวจจับ

เซ็นเซอร์แต่ละตัวจะมีระยะในการตรวจจับ  $R_i$  ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ในระยะหนึ่ง ในการครอบคลุมเป็นจุดหรือครอบคลุมเป็นพื้นที่ โหนดเซ็นเซอร์ที่ถูกใช้งานในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จะต้องเก็บข้อมูลในพื้นที่เป้าหมายภายใต้การตรวจในเวลาใดๆ ดังนั้นการครอบคลุมของโหนดเซ็นเซอร์มีผลต่อการเก็บข้อมูลของโหนดเซ็นเซอร์ภายในกลุ่ม เมื่อโหนดเซ็นเซอร์มีการใช้งานแบบสุ่ม ตัวอย่างเช่น วางโหนดเซ็นเซอร์โดยเครื่องบิน การที่จะทำให้ประสิทธิภาพที่เป็นประโยชน์สำหรับการเลือกโหนดเซ็นเซอร์ในกลุ่มโดยเปลี่ยนเป็นการตรวจสอบเป้าหมาย

ระยะการตรวจจับของเซ็นเซอร์ได้มีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานโดยการตรวจจับพลังงานที่ใช้โดยเซ็นเซอร์  $s_i$  สำหรับในการรวบรวมข้อมูลในการระยะการตรวจจับ  $R_i$  สามารถที่จะคำนวณได้เป็น

$$e_i^{sen} = w^{sen} R_i^v \quad (3.18)$$

หรือ

$$e_i^{sen} = w^{sen} \exp(vR_i) \quad (3.19)$$

เมื่อ  $w^{sen}$  และ  $v$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณและคุณสมบัติของสื่อกลาง ระยะที่มีขนาดใหญ่ของเซ็นเซอร์ทำให้การใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น แต่จำนวนกลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์ที่ครอบคลุมทุกพื้นที่อาจจะมีความใหญ่และทำให้อายุการใช้งานโดยรวมของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีระยะเวลานานขึ้น

### 3.2.3 การใช้พลังงานในการสื่อสาร

เมื่อกลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์ครอบคลุมทุกพื้นที่ถูกสร้างขึ้น แต่ละโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับในกลุ่มเก็บรวบรวมข้อมูลและส่งไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง เหมือนกับการตรวจจับ การใช้พลังงานโดยเซ็นเซอร์  $s_i$  สำหรับการส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์อื่น  $s_j$  ที่มีระยะทางไกลกันระหว่างสองโหนดเซ็นเซอร์ การใช้พลังงานสามารถคำนวณเป็น

$$e_{ij}^{tran} = e_{tran} + bd_{ij}^v \quad (3.20)$$

เมื่อ  $e_{tran}$ ,  $b$  และ  $v$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางของการสื่อสาร  $d_{ij}$  หมายถึงระยะทางแบบยูคลิดระหว่างโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  และ  $s_j$  เมื่อโหนดเซ็นเซอร์  $s_j$  เป็นตัวรับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโหนดเซ็นเซอร์  $s_j$  เป็นโหนดรับข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานของโหนดเซ็นเซอร์ โดยทั่วไปพลังงานที่ใช้สำหรับการรับข้อมูลถือว่าเป็นค่าคงที่ ให้  $e_i^{rec}$  แสดงถึงการใช้พลังงานโดยโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  สำหรับการรับข้อมูล

สามารถสังเกตได้ว่าการใช้พลังงานโดยการสื่อสารขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างโหนดเซ็นเซอร์สองตัวที่สื่อสารกันและจำนวนของข้อมูลที่ส่งหรือได้รับ ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โหนดเซ็นเซอร์จะสื่อสารผ่านสัญญาณไร้สาย อัลกอริทึมใหม่สำหรับการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์และเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.2.4 การเริ่มต้นของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เมื่อกลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์ครอบคลุมทุกพื้นที่แล้วจะพิจารณาพลังงานของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์และรู้ตำแหน่งของโหนดเซ็นเซอร์ จึงทำให้เกิดกราฟของโหนดเซ็นเซอร์ภายในกลุ่ม สมมติว่าระยะทางในการส่งข้อมูลของโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  เป็น  $r_i$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, |S_g|$  โหนดเซ็นเซอร์ที่อยู่ในพื้นที่ของ  $r_i$  อยู่ใกล้เคียงโหนดเซ็นเซอร์  $s_i$  เป็นโหนดข้างเคียงของ  $s_i$  โหนดเซ็นเซอร์ใดสามารถที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียงและมีขอบเขตระหว่างสองโหนดในรูปแบบกราฟ

ในอัลกอริทึมมดแต่ละตัวมันจะเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างเพื่อเลือกองค์ประกอบสำหรับแก้ปัญหา เริ่มต้นแต่ละเส้นทางก็จะมีค่าฟีโรโมนเริ่มต้นของแต่ละเส้นทาง ซึ่งใช้ในการตัดสินใจของมดในการเลือกเส้นทาง

### 3.2.5 การสร้างพฤติกรรมของมด

สำหรับกลุ่มของโหนดเซ็นเซอร์ที่  $n_1$  เป็นโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับและ  $n_2$  เป็นโหนดส่งต่อมดแต่ละตัว  $a$  ชุดแรกเป็น  $F_a$  เริ่มต้นทุกโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับ มดจะสร้างเส้นทางที่มีโครงสร้างแบบต้นไม้บนโหนดที่อยู่ในชุดแรกและเสร็จสิ้นการทำงานเมื่อมดชุดแรกหมด พฤติกรรมต่างๆ ของมดในการแก้ปัญหาจะอธิบายดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 : สุ่มเลือกโหนดเซ็นเซอร์จากชุด  $F_a$  สมมติว่าโหนดเซ็นเซอร์ที่ถูกเลือกเป็น  $s_k$

ขั้นตอนที่ 2 : สร้างตัวเลือกของโหนดรับข้อมูลเป็นชุด  $Z_k$  สำหรับ  $s_k$  ชุดของ  $Z_k$  ประกอบด้วยโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง  $s_0$  และโหนดเซ็นเซอร์ที่ทำงาน

$$E_i > \varepsilon \text{ and } d_{kl} < r_k \text{ and } d_{i0} < d_{k0} \text{ and } d_{kl} < d_{k0} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $s_i = Z_k$  กล่าวคือโหนดเซ็นเซอร์ใน  $Z_k$  จะต้องมีพลังงานที่เพียงพอ ( $E_i > \varepsilon$ ) และเป็นโหนดข้างเคียงของ  $s_k$  ( $d_{kl} < r_k$ ) และต้องอยู่ใกล้กับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางมากกว่า  $s_k$  จะได้ ( $d_{i0} < d_{k0}$ ) และ  $s_k$  จะต้องอยู่ใกล้กับเซ็นเซอร์มากกว่าโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง ( $d_{kl} < d_{k0}$ )

ขั้นตอนที่ 3 : ถ้า  $Z_k = \phi$  ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 11 ถ้าไม่ใช่ให้คำนวณค่าฮิวริสติกสำหรับโหนดเซ็นเซอร์แต่ละตัวใน  $Z_k$  ที่รับข้อมูลจาก  $s_k$  ค่าฮิวริสติกมีสองชนิดของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์

สำหรับโหนดเซ็นเซอร์ใดๆ  $s_l \in Z_k$  ค่าฮิวริสติก  $h_{1l}$  จะเป็นหลักการง่ายๆ ขึ้นอยู่กับโหนดเซ็นเซอร์  $s_l$  ว่าเป็นโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับหรือโหนดส่งต่อ

$$h_{1l} = \begin{cases} 1, & \text{if } s_l \text{ is a sensing sensor} \\ w, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $w$  คือเสริมน้ำหนักกับค่าที่กำหนดไว้โดยที่  $w \geq 1$

ค่า  $h_{2l}$  ใช้ในการวัดอิทธิพลของการเลือก  $s_l$  ที่รับข้อมูลจาก  $s_k$  มันเท่ากับอายุการใช้งานน้อยที่สุดของ  $s_k$  และ  $s_l$  เมื่อ  $s_l$  ถูกเลือกเป็นผู้รับข้อมูล

$$h_{2l} = \min(\tilde{t}_k, \tilde{t}_l) \quad (3.23)$$

เมื่อ  $\tilde{t}_k$  และ  $\tilde{t}_l$  เป็นการประมาณอายุการใช้งานของ  $s_k$  และ  $s_l$

สำหรับโหนดเซ็นเซอร์  $s_k$  ถ้าเป็นโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับและยังไม่มีมิตเข้ามา ในขณะที่ต้องการที่ส่งข้อมูล  $c_k^{sen}$  ไปยัง  $s_l$  อัตราการส่งข้อมูลผ่านทางเส้นทางจาก  $s_k$  และ  $s_l$  เป็น

$$\tilde{c}_{kl} = c_k^{sen} \quad (3.24)$$

ก็จะประมาณอายุการใช้งานสำหรับการส่งข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก

$$\tilde{t}_k = \frac{E_k}{c_k^{sen} e_k^{sen} + c_k^{sen} e_{kl}^{tran}} \quad (3.25)$$

ถ้าโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับ  $s_k$  ถูกเยี่ยมโดยมิต มันมีหน้าที่ประมาณอายุการใช้งานเป็น  $t_k$  และอัตราการไหลเข้าของข้อมูลทั้งหมด  $F_k^{in}$  โดยการเพิ่มข้อมูลตรวจจับของตัวเอง ข้อมูลที่ผ่านจาก  $s_k$  และ  $s_l$  เป็น

$$\tilde{c}_{kl} = F_k^{in} + c_k^{sen} \quad (3.26)$$

การประมาณอายุการใช้งานของ  $s_k$  โดยเลือกจาก  $s_l$  เป็นผู้รับข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก

$$\tilde{t}_k = \frac{1}{\frac{1}{t_k} + \frac{c_k^{sen} e_{kl}^{tran}}{E_k}} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้า  $s_k$  เป็นโหนดเซ็นเซอร์ส่งต่อ ขึ้นอยู่กับการสร้างของมดชุดแรก โหนดเซ็นเซอร์  $s_l$  ต้องเคยได้รับเลือกจากมดและมีหน้าที่ในการประมาณอายุการใช้งาน  $t_k$  มีเฉพาะโหนดเซ็นเซอร์ส่งต่อที่ไม่ต้องข้อมูลใหม่ อัตราข้อมูลที่ผ่านจาก  $s_k$  และ  $s_l$  เท่ากับอัตราข้อมูลที่เข้า คือ

$$\tilde{c}_{kl} = F_k^{in} \quad (3.28)$$

และจะประมาณอายุการใช้งานใหม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.27 สำหรับโหนดเซ็นเซอร์  $s_l$  ถ้ามันเป็นโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางอายุการใช้งานก็จะให้เป็นไม่จำกัด คือ  $\tilde{t}_l = \infty$  ถ้าไม่ใช่ก็จะเพิ่มพลังงานในการรับข้อมูล เราใช้  $E_l^{in}$  หมายถึงอัตราการใช้พลังงานสำหรับการรับข้อมูลก่อนพิจารณาข้อมูลจาก  $s_k$  ถ้า  $s_l$  เป็นโหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับการประเมินอายุการใช้งานใหม่ของ  $s_l$  เป็น

$$\tilde{t}_l = \frac{E_l}{E_l^{in} + \tilde{c}_{kl} e_l^{rec} + c_k^{sen} e_k^{sen} + (F_l^{in} + c_k^{sen} + \tilde{c}_{kl}) e_{l,p(l)}^{tran}} \quad (3.29)$$

ถ้า  $s_l$  เป็นโหนดเซ็นเซอร์ส่งต่อการประเมินอายุการใช้งานใหม่ของ  $s_l$  เป็น

$$\tilde{t}_l = \frac{E_l}{E_l^{in} + \tilde{c}_{kl} e_l^{rec} + (F_l^{in} + \tilde{c}_{kl}) e_{l,p(l)}^{tran}} \quad (3.30)$$

เมื่อ  $p(l)$  เป็นดัชนีของโหนดรับข้อมูลของ  $s_l$  เริ่มต้นโหนดเซ็นเซอร์  $s_l$  ไม่มีการกำหนดโหนดรับข้อมูลแล้วมันอยากได้โหนดข้างเคียงที่ดีที่สุดจาก  $p(l)$  ในสมการที่ 3.29 และ 3.30 และถ้าโหนดเซ็นเซอร์  $s_l$  เป็นโหนดรับข้อมูลอัตราข้อมูลใหม่จาก  $s_k$  ถึง  $s_l$  นอกจากนี้ยังมีความต้องการเพิ่มเส้นทางที่ถูกเยี่ยมและอายุการใช้งานของโหนดเซ็นเซอร์ได้ผ่านคำนวณมาแล้ว ถ้ามีการประเมินอายุการใช้งานใหม่ของอย่างใดอย่างหนึ่งของโหนดเซ็นเซอร์จะสั้นกว่าของ  $s_l$  อายุการใช้งานสั้นที่สุดให้ใช้เป็นค่าของ  $\tilde{t}_l$

ขั้นตอนที่ 4 : นักกฎการเปลี่ยนแปลงของสถานะเพื่อเลือกโหนดในการรับข้อมูลสำหรับ  $s_k$  เหมือนกับในระบบอาณานิคมมด กฎการเปลี่ยนแปลงของสถานะจะคำนึงทั้งการใช้ประโยชน์และการใช้ประโยชน์สำหรับการเลือก

$$l = \begin{cases} \arg \max_{s_l \in Z_k} \{h_{1l}, h_{2l}, \tau_{kl}\}, & \text{if } q < q_0 \text{ (exploitation)} \\ L, & \text{otherwise (biased exploration)} \end{cases} \quad (3.31)$$

เมื่อ  $l$  เป็นดัชนีของการเลือกโหนดเซ็นเซอร์และ  $q$  เป็นค่าที่ได้จากสุ่มโดยเป็น 0 หรือ 1 ตัวแปร  $q_0$  ควบคุมความน่าจะเป็นของมดในการเลือกโหนดข้างเคียงนั้นมีผลที่ดีที่สุดของค่าฮิวริสติกและค่าฟีโรโมนหรือสุ่มเลือกโหนดเซ็นเซอร์จาก  $Z_k$  ตามความน่าจะเป็นดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(s_i) = \frac{h_{1i} h_{2i} \tau_{ki}}{\sum_{s_l \in Z_k} h_{1i} h_{2i} \tau_{ki}}, s_i \in Z_k \quad (3.32)$$

ขั้นตอนที่ 5 : สมมติว่าการโหนดเซ็นเซอร์ที่เลือกจะถูก  $s_i$  แล้ว จะปรับปรุงอายุการทำงาน  
ของเครือข่ายและอัตราการส่งข้อมูลตามที่ได้รับผลกระทบ ยกเว้นว่าค่าปรับปรุงของอายุการทำงาน  
ของเครือข่ายและอัตราการส่งข้อมูลจะถูกกำหนดให้  $\tau_k, \tau_l, c_{kl}$  และที่สอดคล้องกันกับการเลือก  
โหนดเซ็นเซอร์ในการเชื่อมต่อเส้นทาง  $s_i$  ถ้า  $s_i$  ที่ไม่เคยเป็นโหนดรับข้อมูล ค่าของ  $e_{i,p(l)}^{tran}$  ให้เป็น 0

ขั้นตอนที่ 6 : ทำการลบ  $s_k$  ออกจากชุดแรก ตัวอย่างเช่น  $F_a \leftarrow F_a - \{s_k\}$

ขั้นตอนที่ 7 : ถ้า  $s_i$  เป็นโหนดเซ็นเซอร์ส่งต่อและไม่เคยมีมตเข้ามาและไม่ได้โหนดรับ  
ข้อมูลก็จะเพิ่มเข้าไปในชุดแรก ตัวอย่างเช่น  $F_a \leftarrow F_a + \{s_i\}$

ขั้นตอนที่ 8 : ให้  $s_i$  เป็นเส้นทาง  $(s_k, s_i)$  เคยมีมตเข้าไปแล้วและกำหนดให้เป็นโหนดรับ  
ข้อมูลของ  $s_k$  ที่  $s_i$

ขั้นตอนที่ 9 : ทำการปรับปรุงค่าพีโรโมนท้องถิ่นในเส้นทางทำการเลือก

$$\tau_{ki} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ki} + \rho\tau_0 \quad (3.33)$$

เมื่อ  $\rho$  เป็นอัตราการระเหยของพีโรโมนและ  $\tau_0$  เป็นค่าพีโรโมนเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 10 : ถ้า  $F_a \neq \emptyset$  ก็จะกลับไปยังขั้นตอนที่ 1 ถ้าไม่ใช่ให้ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 : ถ้าไม่ครบรอบการเรียนรู้ให้ไปยังขั้นตอนที่ 1 และทำการสร้างเส้นทางอื่นใน  
เงื่อนไขของพลังงานที่เหลืออยู่ของแต่ละโหนด หรือไม่มตก็จบการทำงานและเส้นทางถูกสร้างอย่าง  
สมบูรณ์

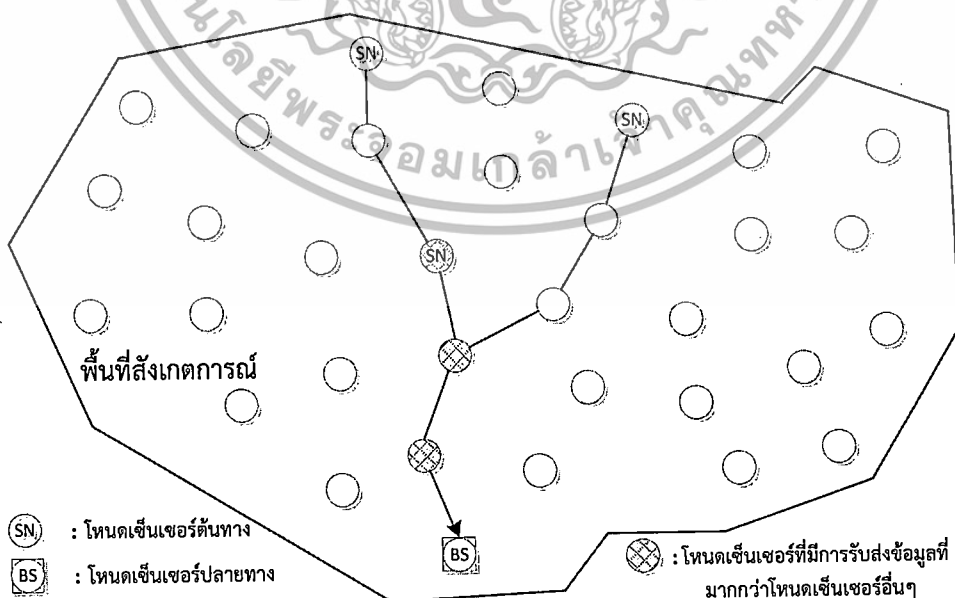
## บทที่ 4

### อัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่นำเสนอ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กล่าวไว้ในส่วนที่แล้วของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ทางผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอและแสดงถึงแนวคิดที่มา วิธีการทำงานในกระบวนการต่างๆ ของอัลกอริทึมดังต่อไปนี้

#### 4.1 แนวทางในการปรับปรุงของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่โหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่ ก็จะประกอบไปด้วยโหนดเซ็นเซอร์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเองหรือเคลื่อนที่ตามกายภาพของพื้นที่สังเกตการณ์ มีการเก็บข้อมูลต่างๆ และรับส่งข้อมูลเหมือนกันกับเครือข่ายที่โหนดเซ็นเซอร์ไม่เคลื่อนที่แต่สิ่งแตกต่างที่สำคัญคือ เครือข่ายที่โหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่จะต้องมีการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางเป็นแบบพลวัต ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งสำหรับเครือข่ายแบบนี้คือเกิดโหนดเซ็นเซอร์ที่มีการรับส่งข้อมูลมากกว่าโหนดเซ็นเซอร์อื่นๆ เนื่องจากโหนดเซ็นเซอร์ต้องทำการส่งต่อข้อมูลโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางอื่นๆ เพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางพร้อมกับต้องทำการส่งข้อมูลของตัวเอง จึงทำให้โหนดเซ็นเซอร์เหล่านี้ในเครือข่ายเกิดเวลาประวิง (ดีเลย์) และแพ็คเก็ตที่สูญเสียนสูง ทुरुพุดและอายุการใช้งานของเครือข่ายลดน้อยลง ดังนั้นในการออกแบบอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางเพื่อให้โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางได้รับข้อมูลโดยทันทีและมีประสิทธิภาพคือจุดสำคัญจุดหนึ่งในการออกแบบและเพื่อตอบสนองการใช้งานที่มีความหลากหลายในปัจจุบันของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.1 การรับส่งข้อมูลที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอัลกอริทึมค้นหาเส้นทาง โดยที่มดแต่ละตัวมันทำการค้นหาเส้นทางจากต้นทางไปยังปลายทางเปรียบเสมือนกับกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อสร้างเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังปลายทาง โดยที่ในการเลือกเส้นทางส่งข้อมูลนั้นจะมีกระบวนการเลือกเส้นทางที่ทำให้เกิดเวลาประวิงน้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพการทำงานในด้านอื่นๆ มากที่สุด เริ่มต้นในแต่ละเส้นทางจะมีกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้นและเวลาประวิงเพื่อใช้ในกระบวนการเลือกเส้นทาง สำหรับการพิจารณาของมดในการเลือกเส้นทางส่งข้อมูลจะมีพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อควบคุมในกระบวนการเรียนรู้และเลือกเส้นทางที่เหมาะสม สำหรับอัลกอริทึมที่เรานำเสนอได้เพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทางเพื่อให้เครือข่ายมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น สำหรับอัลกอริทึมที่เรานำเสนอมีรายละเอียดการทำงาน of กระบวนการต่างๆ ดังต่อไปนี้

## 4.2 อัลกอริทึมที่นำเสนอ

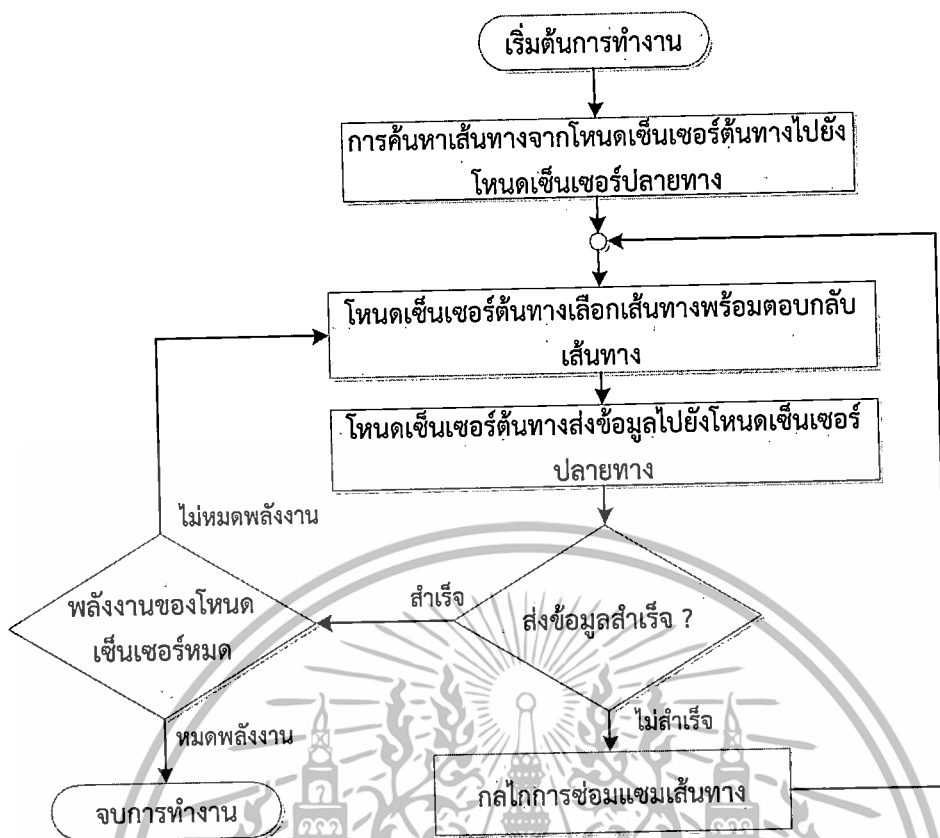
ในงานวิจัยนี้เราได้นำเสนออัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่ได้มีการปรับปรุงจากแนวคิดของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทาง เออาร์ไอ โดยที่อัลกอริทึมที่เรานำเสนอได้พิจารณาเวลาประวิง (ดีเลย์) ที่เกิดขึ้นในเส้นทางระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ส่งข้อมูลกับโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียงมาเป็นน้ำหนักในกลไกของการเลือกเส้นทางและเพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง เราเรียกอัลกอริทึมที่เรานำเสนอว่า กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (ไอเออาร์ไอ) โดยมีขั้นตอนการทำงานต่างๆ ของอัลกอริทึมจะถูกนำเสนอในหัวข้อนี้ แบ่งออกเป็นส่วนๆ คือ

- กลไกการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)
- กลไกการเลือกเส้นทาง (Route Selection Mechanism)
- กลไกการซ่อมแซมเส้นทาง (Route Repair Mechanism)

กลไกการทำงานในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 4.2.1 กลไกการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism)

อัลกอริทึม ไอเออาร์ไอ ที่เรานำเสนอในกระบวนการทำงานต่างๆ ของอัลกอริทึมจะอยู่บนพื้นฐานของการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด (เอซีไอ) [7] สำหรับอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ จะนำเอากลไกควบคุมการกระจายของแพ็คเก็ตในการค้นหาเส้นทาง (Controlled Neighbor Broadcast : CNB) [12] มาปรับปรุงใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เริ่มต้นการทำงานของอัลกอริทึมเมื่อมีโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายกระจายอยู่ทั่วพื้นที่สังเกตการณ์ และโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายในเครือข่ายสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้และรู้ตำแหน่งของทุกๆ โหนดที่อยู่ในเครือข่าย สำหรับการค้นหาเส้นทางจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 4.4 และมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 อัลกอริทึมไอเอเออาร์ไอ

ขั้นตอนที่ 1 : อัลกอริทึมที่นำเสนอ ไอเอเออาร์ไอ จากรูปที่ 4.4 เริ่มต้นการทำงานกลไกค้นหาเส้นทางโหนดเซ็นเซอร์ไร้สายจะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในกระบวนการค้นหาเส้นทาง เช่น อัตราการสร้างแพ็คเกตในการค้นหาเส้นทาง  $FANT\ transmission\ rate : r$  และค่าน้ำหนักที่ใช้สำหรับประกอบการพิจารณาในกระบวนการเลือกเส้นทาง  $Delay\ weight\ factor : dw$  เป็นต้น โหนดเซ็นเซอร์จะทำการส่งกระจายแพ็คเกตในการค้นหาเส้นทาง Forward ANT (FANT) โดยที่แพ็คเกตในการค้นหาเส้นทาง FANT คือแพ็คเกตที่ใช้สำหรับการค้นหาเส้นทางที่เป็นไปได้เพื่อส่งข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง โดยมีรายละเอียดของแพ็คเกต FANT ดังรูปที่ 4.3

Type pkt FANT		
FANT_ID		
Source Address		
Destination Address		
Node Address		
Seq_num		
Next	N_Hop	P_id

รูปที่ 4.3 รูปแบบแพ็คเกตในการค้นหาเส้นทาง Forward ANT (FANT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ FANT หมายถึง ชนิดของแพ็คเกจในที่นี้คือแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง  
 FANT\_ID หมายถึง หมายเลขไอดีของแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง  
 Source Address หมายถึง หมายเลขโหนดต้นทาง  
 Node Address หมายถึง หมายถึง หมายเลขโหนด  
 Destination Address หมายถึง หมายเลขโหนดปลายทาง  
 Seq\_num หมายถึง ลิสต์ของเส้นทางที่แพ็คเกจ FANT ผ่าน  
 Next หมายถึง โหนดข้างเคียง  
 N\_Hop หมายถึง จำนวนฮอปที่แพ็คเกจ FANT ผ่าน  
 P\_id หมายถึง หมายเลขไอดีของเส้นทาง



รูปที่ 4.4 กลไกการค้นหาเส้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

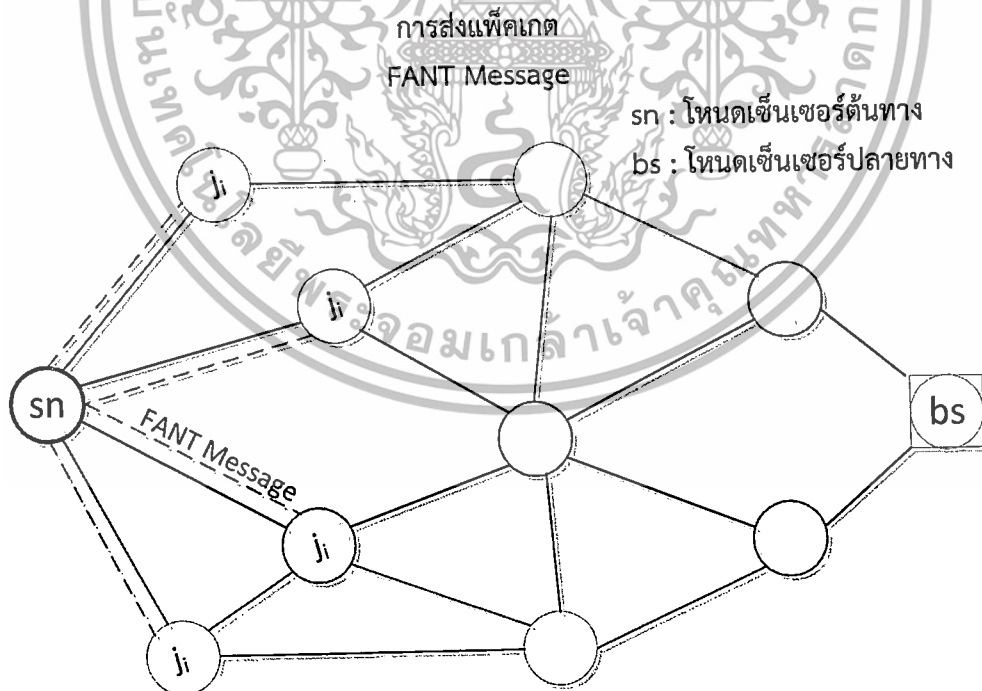
ขั้นตอนที่ 2 : เลือกโหนดเซ็นเซอร์ส่งต่อกระจายแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง Forward ANT (FANT) ดังรูปที่ 4.5 ไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง ตามเงื่อนไขคือ โหนดข้างเคียงต้องอยู่ระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางกับโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางและกลไกควบคุมการกระจายของแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง ซีเอ็นบี ซึ่งจะมีโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียงเพียงหนึ่งเดียวที่สามารถส่งกระจายแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง FANT อีกครั้งเพื่อสร้างเส้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง โดยเลือกโหนดกระจายแพ็คเกจ FANT จากความน่าจะเป็น  $p_{(sn,j_i,bs)}$  ดังสมการที่ 4.1

$$P_{(sn,j_i,bs)} = \frac{C_{(sn,j_i,bs)} \delta_{(sn,j_i,bs)}}{\sum_{k=0}^M C_{(sn,j_k,bs)} \delta_{(sn,j_k,bs)}} \quad (4.1)$$

โดยที่

$$C_{(sn,j_i,bs)} = \frac{1}{1+n} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $C_{(sn,j_i,bs)}$  คือ น้ำหนักของแต่ละเส้นทางเชื่อมโยงโหนด  $sn$  ไปยังโหนด  $j_i$   
 $\delta_{(sn,j_i,bs)}$  คือ เวลาประวิงของโหนดข้างเคียง  $j_i$  เมื่อ  $M$  เป็นจำนวนของโหนดข้างเคียง  
 $n$  คือ คำนวณน้ำหนักโดยคิดจากจำนวนในการเลือกเป็นโหนดข้างเคียง  
 $bs$  คือ โหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง



รูปที่ 4.5 การส่งกระจายแพ็คเกจ FANT

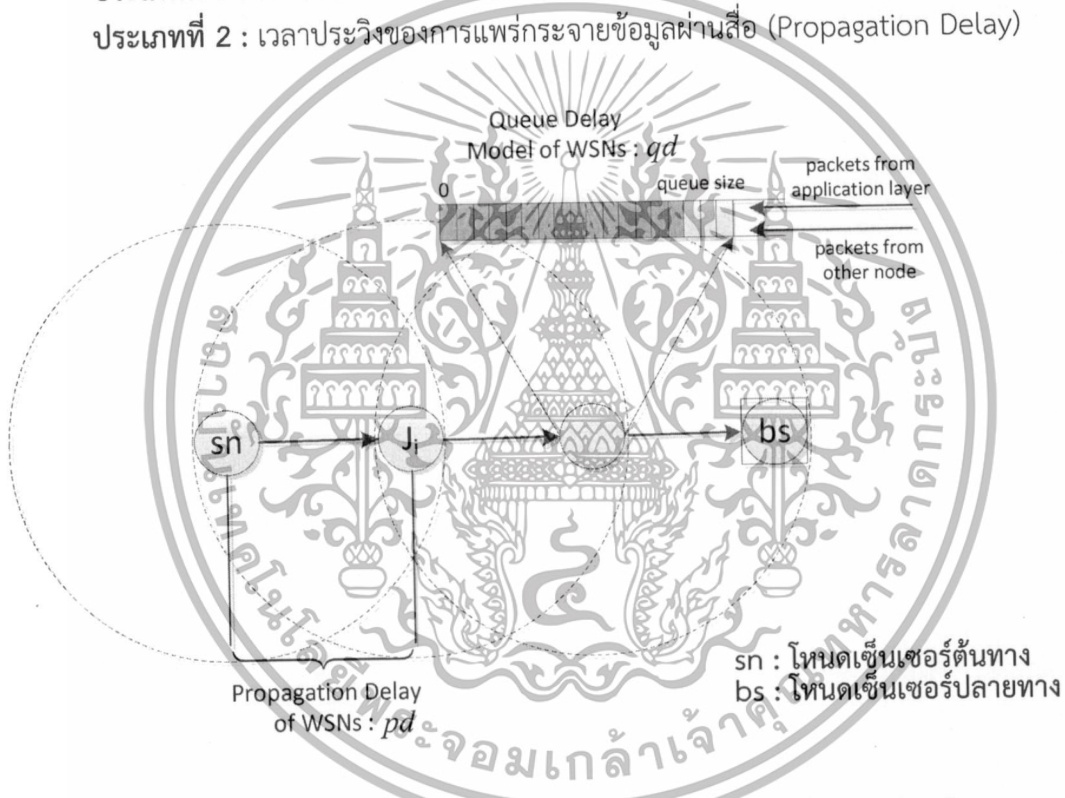
สำหรับอัลกอริทึมที่น่าเสนอ อัลกอริทึมไอเออาร์โอ ได้กำหนดรูปแบบเวลาประวิงต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างลิงค์เชื่อมโยงโหนดส่งข้อมูลกับโหนดรับข้อมูลมีดังต่อไปนี้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 เวลาประวิงในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีต้องการรับข้อมูลได้ทันทีมีเพิ่มมากขึ้น อัลกอริทึมที่นำเสนอไอเออาร์ไอเอ็นได้การมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในด้านเวลาประวิง (ดีเลย์) อีกทั้งยังช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในด้านอื่นๆ ได้ซึ่งในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโหนดเซ็นเซอร์ที่มีค่าเวลาประวิงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าจะเพิ่มโอกาสเพื่อกำหนดเป็นโหนดในการส่งต่อข้อมูล สำหรับเวลาประวิงที่เกิดขึ้นในเส้นทางส่งข้อมูลคือเวลาที่ใช้ในการเดินทางของข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียง ในอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้สามารถแยกเวลาประวิง เป็น 2 ประเภทดังรูปที่ 4.6 ได้แก่

ประเภทที่ 1 : เวลาประวิงเกิดจากการรอคิว (Queuing Delay)

ประเภทที่ 2 : เวลาประวิงของการแพร่กระจายข้อมูลผ่านสื่อ (Propagation Delay)



รูปที่ 4.6 เวลาประวิงต่างๆ ของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียง

สำหรับในแต่ละโหนดเซ็นเซอร์จะทำการปรับปรุงเวลาประวิงต่างๆ อย่างต่อเนื่องและแลกเปลี่ยนปรับปรุงข้อมูลต่างๆ ให้กับโหนดข้างเคียง ตัวอย่างเช่น ไอดีและเวลาประวิงต่างๆ เป็นต้น สามารถเขียนเป็นสมการเวลาประวิงระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางโดยผ่านโหนดข้างเคียง ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$\delta_{(sn,j_i,bs)} = \left( \frac{1}{pd_{(sn,j_i,bs)} + qd_{(sn,j_i,bs)}} \right)^{dw} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $pd_{(sn,j_i,bs)}$  คือ เวลาประวิงของการแพร่กระจายข้อมูลระหว่างโหนด  
 $qd_{(sn,j_i,bs)}$  คือ เวลาประวิงที่เกิดจากการรอคิวที่โหนด  $j_i$   
 $dw$  คือ พารามิเตอร์ควบคุมน้ำหนักของเวลาประวิง

#### 4.2.3 เวลาประวิงเกิดจากการรอคิว (Queuing Delay)

เวลาประวิง (ดีเลย์) ที่เกิดจากการรอคิว คือ เวลาที่ข้อมูลรออยู่ในคิวจนกว่าจะสามารถดำเนินการได้ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดเวลาประวิงในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ดังสมการที่ 4.4

$$qd_{(sn,j_i,bs)} = q_{(sn,j_i,bs)} + ds \quad (4.4)$$

ซึ่ง  $qd_{(sn,j_i,bs)}$  คือ เวลาประวิงเกิดจากการรอคิวของโหนด  $j_i$   
 $q_{(sn,j_i,bs)}$  คือ เวลาประวิงในการเดินทางของข้อมูลไปยังหัวคิวของโหนด  $j_i$   
 $ds$  คือ เวลาประวิงในการให้บริการของโหนด  $j_i$

#### 4.2.4 เวลาประวิงของการแพร่กระจายข้อมูลผ่านสื่อ (Propagation Delay)

เวลาประวิง (ดีเลย์) ของการแพร่สัญญาณข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย คือ เวลาที่สัญญาณต้องเดินทางผ่านสื่อกลาง (Transmission Medium) จากผู้ส่งข้อมูลไปยังผู้รับข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$pd_{(sn,j_i,bs)} = \frac{d_{(sn,j_i,bs)}}{s} \quad (4.5)$$

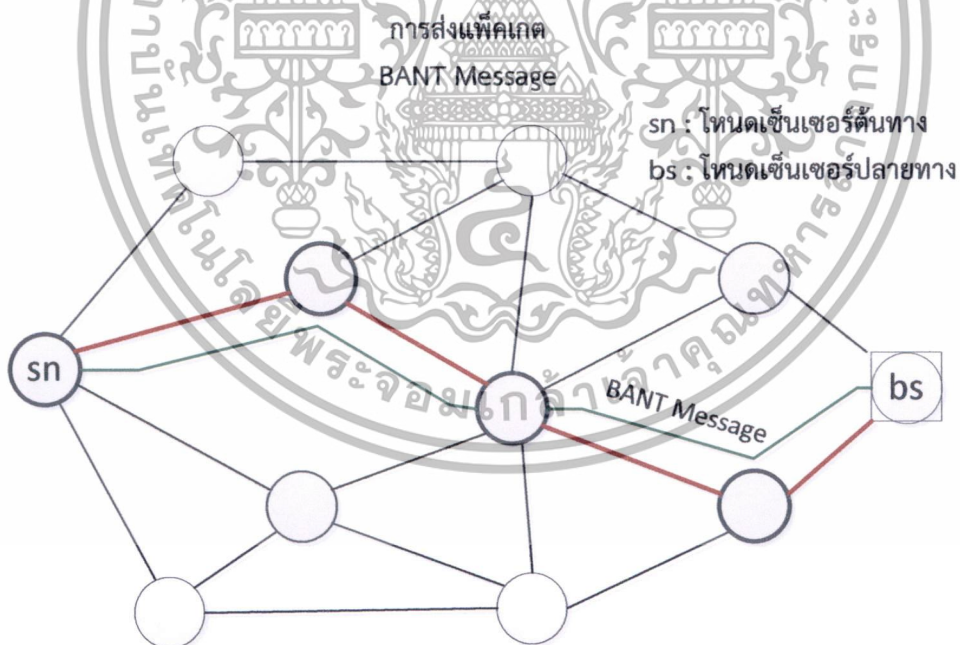
ซึ่ง  $pd_{(sn,j_i,bs)}$  คือ เวลาประวิงของการแพร่กระจายข้อมูลผ่านสื่อระหว่างโหนด  $sn$  กับโหนด  $j_i$   
 $d_{(sn,j_i,bs)}$  คือ ระยะทางระหว่างโหนดเซ็นเซอร์  $sn$  กับโหนดเซ็นเซอร์  $j_i$   
 $s$  คือ ความเร็วของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูล

เมื่อโหนดเซ็นเซอร์เริ่มสร้างเส้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง โหนดเซ็นเซอร์จะทำการส่งแพ็คเกจ FANT จากนั้นโหนดเซ็นเซอร์จะทำการพิจารณาเพื่อเลือกโหนดเซ็นเซอร์ที่ใช้ส่งต่อแพ็คเกจ FANT ตามเงื่อนไขดังสมการที่ 4.1 แต่ถ้ามีความน่าจะเป็นเท่ากันจะทำการสุ่มเลือกโหนดข้างเคียง สำหรับการส่งต่อแพ็คเกจ FANT โหนดเซ็นเซอร์ที่ใช้เป็นโหนดส่งต่อแพ็คเกจ FANT จะมีค่าน้ำหนักลดลงตามจำนวนที่เพิ่มขึ้นในการเลือกใช้เป็นโหนดส่งต่อแพ็คเกจ FANT ตารางที่ 4.1 กับเวลาประวิงต่างๆ ของการส่งข้อมูล

ตารางที่ 4.1 คำนวณน้ำหนักของเส้นทางเชื่อมโยง  $C_{(sn,j_i,bs)}$

จำนวนครั้งในการเลือก	ค่าน้ำหนักของ $C_{(sn,j_i,bs)}$
1	0.5
2	0.33
3	0.25
4	0.2
...	...
$n$	$\frac{1}{1+n}$

ขั้นตอนที่ 3 : หลังจากนั้นเมื่อโหนดข้างเคียงได้รับแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง FANT แล้วก็จะทำการสร้างเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างโหนดและทำการส่งได้รับแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง FANT ไปยังโหนดถัดไปจนกระทั่งถึงโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง เมื่อโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางได้รับแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง FANT โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางจะทำการส่งแพ็คเกจตอบกลับ Backward ANT (BANT) ไปยังเส้นทางเชื่อมโยงต่างๆ ที่ถูกสร้างขึ้นโดยแพ็คเกจ FANT เมื่อโหนดเซ็นเซอร์ได้รับแพ็คเกจ BANT โหนดเซ็นเซอร์จะทำการสร้างตารางเส้นทางตามขั้นตอนดังรูปที่ 4.7 โดยมีรายละเอียดของแพ็คเกจ BANT ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 การส่งแพ็คเกจ BANT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type pkt BANT		
BANT_ID		
Source Address		
Destination Address		
Seq_num		
Next	N_Hop	P_id

รูปที่ 4.8 รูปแบบแพ็คเก็ตในการตอบกลับเส้นทาง Backward ANT (BANT)

เมื่อ BANT หมายถึง ชนิดของแพ็คเก็ตในที่นี้คือแพ็คเก็ตตอบกลับเส้นทาง  
 BANT\_ID หมายถึง หมายเลขไอดีของแพ็คเก็ตตอบกลับเส้นทาง  
 Source Address หมายถึง หมายเลขโหนดต้นทาง  
 Destination Address หมายถึง หมายเลขโหนดปลายทาง  
 Seq\_num หมายถึง ลิสต์ของเส้นทางที่แพ็คเก็ต BANT ผ่าน  
 Next หมายถึง โหนดข้างเคียง  
 N\_Hop หมายถึง จำนวนฮอปที่แพ็คเก็ต BANT ผ่าน  
 P\_id หมายถึง หมายเลขไอดีของเส้นทาง

4.2.5 กลไกการเลือกเส้นทาง (Route Selection Mechanism)

หลังจากผ่านกระบวนการของกลไกการค้นหาเส้นทางแล้ว สำหรับในการส่งข้อมูลไปยังโหนด เซ็นเซอร์ปลายทาง การเลือกเส้นทางส่งข้อมูลเป็นกระบวนการที่สำคัญเพราะสามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายเมื่อมีการเลือกเส้นทางที่เหมาะสม เมื่อเส้นทางที่ส่งข้อมูลไปยัง โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางมีหลายเส้นทาง อัลกอริทึมเอเออาร์โอ จะมีขั้นตอนการเลือกเส้นทางดังรูปที่ 4.5 เมื่อโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง จากนั้นจะทำการเลือก โหนดรับข้อมูลจากโหนดข้างเคียง โดยในแต่ละครั้งของการเลือกจะใช้กฎความน่าจะเป็น (Probability) ในการเลือกโหนดรับข้อมูล สำหรับอัลกอริทึมที่น่าเสนอนี้จะพิจารณาเวลาประวิงแบบ ต่างๆ ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของฟีโรโมนในแต่ละเส้นทางมาเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่ง สามารถคำนวณความน่าจะเป็นของแต่ละโหนดข้างเคียงได้ดังสมการที่ 4.6

$$ph_{(sn,j,bs)} = \frac{\tau_{(sn,j,bs)} \delta_{(sn,j,bs)}}{\sum_{k=0}^{k=M} \tau_{(sn,j_k,bs)} \delta_{(sn,j_k,bs)}} \tag{4.6}$$

- $ph_{(sn,j,bs)}$  คือ ความน่าจะเป็นในการเลือกโหนดรับข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง
- $\tau_{(sn,j,bs)}$  คือ ความสัมพันธ์กับค่าฟีโรโมนของโหนดข้างเคียง
- $\delta_{(sn,j,bs)}$  คือ เวลาประวิงของโหนดข้างเคียง  $j_i$  เมื่อ  $M$  เป็นจำนวนของโหนดข้างเคียง

ขั้นตอนในการปรับปรุงระดับของฟีโรโมน หลังจากทำการเลือกเส้นทางเพื่อส่งแพ็คเก็ตข้อมูล ไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางจะทำการปรับปรุงระดับฟีโรโมน สำหรับระดับของฟีโรโมนจะเป็นตัวบ่ง เกษารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชี้คุณภาพของเส้นทาง เส้นทางที่มีคุณภาพสูงจะมีระดับของฟีโรโมนที่สูงขณะที่เส้นทางที่มีคุณภาพต่ำระดับของฟีโรโมนก็จะต่ำตามไปด้วย ในกระบวนการปรับระดับของฟีโรโมนและพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการเรียนรู้เส้นทางที่เหมาะสม การคำนวณปรับระดับของฟีโรโมนจะเหมือนกับอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดทั่วไปดังสมการที่ 4.7

$$\tau_{(sm,j_i,bs)} = (1 - \rho)\tau_{(sm,j_i,bs)} + \rho\tau_0 \quad (4.7)$$

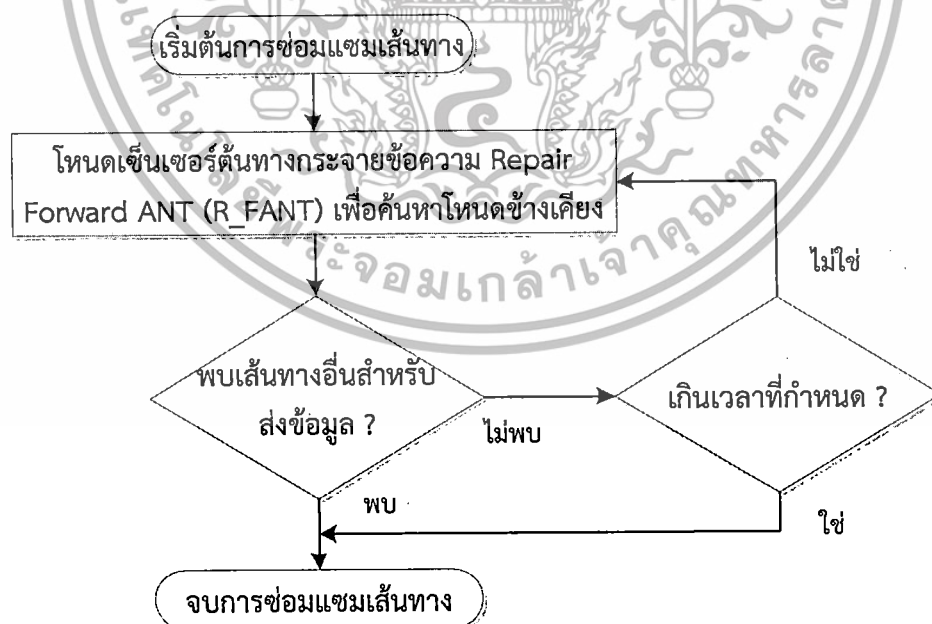
เมื่อ  $\rho$  เป็นอัตราการระเหยของฟีโรโมน

$\tau_0$  เป็นค่าฟีโรโมนเริ่มต้น

สำหรับโหนดเซ็นเซอร์ข้างเคียงที่ถูกเลือกเพื่อใช้เป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางจะอยู่บนพื้นฐานที่มีเวลาประวิงระหว่างเส้นทางเชื่อมโยงมีค่าน้อยและระดับของฟีโรโมนที่สูง

#### 4.2.6 กลไกการซ่อมแซมเส้นทาง (Route Repair Mechanism)

ในกระบวนการซ่อมแซมเส้นทางนั้นเป็นกระบวนการที่เริ่มเมื่อตรวจพบเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างสองโหนดเซ็นเซอร์มีความเสียหาย เส้นทางที่มีความเสียหายนั้นสามารถเกิดขึ้นเนื่องจากโหนดหยุดการทำงานจากข้อผิดพลาดในการส่งสัญญาณวิทยุหรือเกิดการชนกันของข้อมูลมีจำนวนมาก ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่มีโหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่อาจเกิดเส้นทางเสียหายบ่อยครั้ง แต่ขั้นตอนในการซ่อมแซมเส้นทางจะต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วด้วยค่าใช้จ่ายที่ต่ำ



รูปที่ 4.9 กลไกการซ่อมแซมเส้นทาง

ในการซ่อมแซมเส้นทางอัลกอริทึมไอเออาร์ไอจะพยายามหาเส้นทางอื่นในพื้นที่ใกล้เคียงของเส้นทางที่เสียหายเพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง โดยการส่งกระจายแพ็คเก็ต Repair เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Forward ANT (R\_FANT) ดังรูปที่ 4.9 เพื่อค้นหาเส้นทางอื่นที่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางได้ โดยมีรายละเอียดของแพ็คเกจ R\_FANT ดังรูปที่ 4.10

Type pkt R_FANT
R_FANT_ID
Source Address
Destination Address
Node Address
Next = Broadcast

รูปที่ 4.10 รูปแบบแพ็คเกจในการซ่อมแซมเส้นทาง Repair Forward ANT (R\_FANT)

เมื่อ R\_FANT หมายถึง ชนิดของแพ็คเกจในที่นี้คือแพ็คเกจในการซ่อมแซมเส้นทาง  
 R\_FANT\_ID หมายถึง หมายเลขไอดีของแพ็คเกจในการซ่อมแซมเส้นทาง  
 Source Address หมายถึง หมายเลขโหนดต้นทาง  
 Destination Address หมายถึง หมายเลขโหนดปลายทาง  
 Node Address หมายถึง หมายเลขโหนด  
 Next หมายถึง โหนดข้างเคียง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การประเมินประสิทธิภาพ

ในบทนี้เราได้ทำการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของกลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมตในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายหรือเรียกว่า ไอเอเออาร์ไอ โดยทำการจำลองการทำงานเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับอัลกอริทึมเดิม เอเออาร์ไอ ซึ่งในการประเมินประสิทธิภาพ การทำงานทั้งหมดจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ประสิทธิภาพที่ทำการประเมินและวิธีการคำนวณประสิทธิภาพ พารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน ผลการจำลองการทำงานในรูปของกราฟ และอธิบายผลการจำลองการทำงานในด้านต่างๆ ที่แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมเดิม

### 5.1 โปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การทดสอบการทำงานของระบบเครือข่ายเป็นการยากที่จะทดสอบการทำงานของระบบเครือข่ายโดยการทดสอบผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากการวางระบบเครือข่ายนั้นเป็นสิ่งที่ใช้งบประมาณและเวลามากจึงไม่คุ้มที่จะทดสอบการทำงานของระบบเครือข่ายโดยการทดสอบผ่านอุปกรณ์ที่ใช้ในความเป็นจริง จึงเกิดความจำเป็นที่จะต้องมีการจำลองการทำงานของระบบเครือข่ายเพื่อที่จะได้ทำการศึกษาการทำงานของระบบเครือข่ายในด้านต่างๆ ทั้งพฤติกรรมของการขนส่งแพ็คเก็ต การศึกษาการทำงานของปริมาณข้อมูลบนระบบเครือข่าย การศึกษาการทำงานของอัลกอริทึมที่ใช้ในการส่งผ่านแพ็คเก็ต เป็นต้น โปรแกรมเอ็นเอส-ทู (Network Simulator version 2 : NS2) [14] เป็นโอเพนซอร์สและสามารถทำงานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Linux FreeBSD SunOS Solaris และ Window ถูกพัฒนาขึ้นโดย ISI (Information Sciences Institute) ดังรูปที่ 5.1

เอ็นเอส-ทูเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครือข่ายในแบบที่เป็น Discrete Event Simulator ซึ่งสนับสนุนการจำลองการเลือกเส้นทางในการขนส่งแพ็คเก็ต จำลองการทำงานของมัลติคาสต์โพรโทคอลและไอพีโพรโทคอล เช่น UDP, TCP, RTP, SRM ที่อยู่บนเครือข่ายประเภทที่เป็นสายและไร้สาย ซึ่งเอ็นเอส-ทูเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากทั้งยังสนับสนุนมัลติโพรโทคอลและยังมีความสามารถในการแสดงรายละเอียดของปริมาณข้อมูลบนระบบเครือข่ายออกมาในรูปแบบของกราฟฟิค รวมทั้งยังสนับสนุนอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางและคิว เช่น FIFO, Round-Robin เป็นต้น การเขียนโปรแกรมสั่งงาน NS2 แบ่งเป็น 2 ส่วนคือภาษา Tool Command Language (TCL) และ C++ ทั้งสองภาษามีหน้าที่แตกต่างกัน ภาษา TCL เอาไว้ตั้งค่าต่างๆ สำหรับจำลองการทำงาน



รูปที่ 5.1 โปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เอ็นเอส-ทู

## 5.2 ตัววัดประสิทธิภาพของระบบที่ประเมิน

จากการจำลองการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอโดยการวัดประสิทธิภาพด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานเครือข่ายเอ็นเอส-ทู NS2 ในที่นี้โปรแกรมจำลองจะไม่ได้ให้ผลออกมาในรูปแบบที่ต้องการ โดยที่ผลจะออกมาในรูปแบบของไฟล์พฤติกรรมของแพ็คเก็ตต่างๆ (Trace File) เช่น แพ็คเก็ตถูกส่งออกจากโหนดใด เวลาเท่าใด เป็นแพ็คเก็ตประเภทใด เป็นต้น ซึ่งต้องใช้ Alfred Aho, Peter Weinberger and Brian Kernighan (AWK Script) ในการกรองสิ่งเหล่านั้นออกมาให้เป็นผลการจำลองที่ต้องการต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 5.2.1 เวลาประวิงเฉลี่ย (Average End-to-End Delay)

เวลาประวิงเฉลี่ย (เฉลี่ย) หมายถึง เวลาที่แพ็คเก็ตหนึ่งถูกส่งจากต้นทางไปยังปลายทาง ในการจำลองจะเป็น การหาค่าเวลาประวิงของแพ็คเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกในจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยใช้เวลาที่โหนดปลายทางได้รับแพ็คเก็ตข้อมูลลบกับเวลาที่โหนดต้นทางนั้นส่งแพ็คเก็ต ค่าเฉลี่ยของเวลาประวิงหาได้ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$avg\_delay = \frac{\sum t_{recv} - t_{tran}}{pkt\_recv} \quad (5.1)$$

$\sum t_{recv} - t_{tran}$  คือ ผลรวมเวลาเวลาประวิงของแพ็คเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่ส่งจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $t_{recv}$  คือ เวลาที่โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางได้รับแพ็คเก็ตข้อมูล ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_{tran}$  คือ เวลาที่โหนดเซ็นเซอร์ต้นทางส่งแพ็คเกจข้อมูล

$pkt\_recv$  คือ จำนวนแพ็คเกจข้อมูลทั้งหมดที่โหนดเซ็นเซอร์ต้นทางส่ง

### 5.2.2 โอเวอร์เฮดของการค้นหาเส้นทาง (Routing Overhead)

โอเวอร์เฮดในการค้นหาเส้นทาง หมายถึง จำนวนแพ็คเกจร้องขอเส้นทางทั้งหมดที่ถูกส่งออกไปในเครือข่ายในกระบวนการค้นหาเส้นทาง พิจารณาตั้งแต่โหนดเซ็นเซอร์ต้นทางเริ่มส่งแพ็คเกจกระจายไปในเครือข่ายและโหนดระหว่างทาง เมื่อได้รับแพ็คเกจจะส่งแพ็คเกจกระจายต่อไปจนกระทั่งโหนดปลายทางได้รับแพ็คเกจร้องขอเส้นทางและทำการตอบกลับมายังโหนดต้นทาง ดังแสดงในสมการที่ 5.2

$$overhead = \sum_{i=1}^N pkt_i \quad (5.2)$$

$pkt_i$  คือ จำนวนแพ็คเกจที่ถูกส่งออกมาในกระบวนการค้นหาเส้นทางของเส้นทาง  $i$

$N$  คือ จำนวนเส้นทางทั้งหมด

### 5.2.3 ทROUGHPUT (Throughput)

ทROUGHPUT หมายถึง ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้จากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อหน่วยเวลา ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราพิจารณาจากปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางตลอดช่วงเวลาที่จำลองการทำงาน ดังแสดงในสมการที่ 5.3

$$Throughput = \frac{pkt\_recv \times pkt\_size \times 8}{runtime} \text{ bps} \quad (5.3)$$

$pkt\_recv$  คือ จำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางได้รับสำเร็จ

$pkt\_size$  คือ ขนาดของแพ็คเกจหน่วยเป็นไบต์ ต้องคูณด้วย 8 เพื่อแปลงให้เป็นบิต

$runtime$  คือ เวลาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

### 5.2.4 แพ็คเกจที่สูญเสีย (Packet Loss)

แพ็คเกจที่สูญเสีย หมายถึง จำนวนแพ็คเกจทั้งหมดที่ถูกส่งจากโหนดต้นทางในเครือข่ายแต่ไม่สามารถส่งไปถึงปลายทาง เราสามารถคำนวณแพ็คเกจที่สูญเสียได้ ดังแสดงในสมการที่ 5.4

$$packet\_loss = \sum_{i=1}^n pkt\_send_i - pkt\_recv \quad (5.4)$$

$pkt\_send_i$  คือ จำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่ถูกออกจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทาง  $i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$pkt\_recv$  คือ จำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่รับสำเร็จจากโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง

$n$  คือ จำนวนโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางทั้งหมด

### 5.2.5 คิวเฉลี่ย (Average Queue)

คิวเฉลี่ย หมายถึง จำนวนแพ็คเกจเฉลี่ยที่รออยู่ในหน่วยความจำ (Buffer) เพื่อรอการประมวลผลในแต่ละโหนด สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 5.5

$$avg\_queue = \frac{\sum_{i=1}^n pkt\_queue_i}{n} \quad (5.5)$$

$pkt\_queue_i$  คือ แพ็คเกจที่รอการประมวลผลที่โหนดเซ็นเซอร์ต้นทาง  $i$

$n$  คือ จำนวนโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางทั้งหมด

### 5.2.6 อายุการใช้งานของเครือข่าย (Network Lifetime)

อายุการใช้งานของเครือข่าย หมายถึง เวลาที่โหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเริ่มต้นส่งข้อมูล จนกระทั่งโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายไม่สามารถส่งข้อมูลได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราพิจารณาจากอายุการใช้งานของเส้นทางส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางทั้งหมดในเครือข่าย ดังแสดงในสมการที่ 5.6

$$T_{WSN} = \frac{\sum_{g=1}^K T_g}{K} \quad (5.6)$$

$T_g$  คือ อายุการใช้งานในเส้นทางส่งข้อมูล  $g$  จากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง

$K$  คือ จำนวนเส้นทางทั้งหมดในเครือข่าย

## 5.3 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองการทำงาน

จากการจำลองเราได้วัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่เราได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้และอัลกอริทึมที่เราได้นำเสนอนี้เรียกว่า “กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย” (ไอเออาร์ไอ) โดยได้มีการพิจารณาการเวลาประวิง (ดีเลย์) ของเซ็นเซอร์โหนดเพื่อลดเวลาประวิงในเครือข่ายกับอัลกอริทึมเดิม “อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของมดเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย” (เออาร์ไอ) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสอง วิธีการดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงกราฟผลการจำลอง รวมทั้งได้มีการอธิบายผลการจำลองของอัลกอริทึมเออาร์ไอเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ ในการจำลองการทำงานเพื่อวัดประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมไอเออาร์ไอและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมเออาร์โอเพื่อวัดประสิทธิภาพของเครือข่ายในด้านต่างๆ จะต้องมีข้อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง การทำงานดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองการทำงาน

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
Simulation Area	1000 m <sup>2</sup>
Simulation Time	100 s
Number of Mobile Nodes	100 node
Data Rate	250 kb/s
Random Speed	0 - 10 m/s
Size of Packet	512 bytes
Mobility Model	Random Waypoint
Propagation Model	TwoRayGround
Interface Queue Type	DropTail/PriQueue
Antenna Model	OmniAntenna
Interface Queue	50 packet
Node Initial Energy	10 J
T <sub>x</sub> Energy	0.275 J
R <sub>x</sub> Energy	0.175 J
Sensing Energy	0.00175 mJ

ในตารางที่ 5.1 เราได้กำหนดให้มีโหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่จำนวน 100 โหนดเซ็นเซอร์และมีหนึ่งโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางในการรับข้อมูล โดยมีการสุ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ตั้งแต่ 0 - 10 เมตรต่อวินาที และมีโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางที่ไม่เคลื่อนที่ รูปแบบการเคลื่อนที่จะเป็นแบบ Random Waypoint ที่ใช้ค่า Pause Time เท่ากับ 1 วินาที โดยโหนดเหล่านี้ถูกสุ่มวางตำแหน่งในพื้นที่เครือข่ายขนาด 1,000 ตารางเมตร สำหรับการเก็บแพ็คเก็ตระหว่างการรับส่งข้อมูลของโหนด อินเตอร์เฟซคิว (Interface Queue) คือ 50 แพ็คเก็ต ทราฟฟิกข้อมูลที่ใช้ในเครือข่ายเป็นแบบอัตราการส่งบิตข้อมูลแบบคงที่หรือ Constant Bit Rate (CBR) ที่มีขนาดเท่ากับ 512 ไบต์ โดยใช้เวลาในการจำลองการทำงาน 100 วินาทีของโปรแกรมจำลอง NS2

#### 5.4 ผลการจำลองการทำงาน

จากอัลกอริทึม กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ตระหนักถึงเวลาประวิง (ดีเลย์) ในเครือข่ายที่ได้นำเสนอและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายในด้านต่างๆ จากแนวคิดในนำเอาเวลาประวิงในเครือข่ายมาเป็นน้ำหนักในอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด เพื่อลดปัญหาด้านเวลาประวิงของการส่งข้อมูล และเพิ่มประสิทธิภาพในด้านโอเวอร์เฮด ทรุษุท แพ็คเก็ตที่สูญเสีย คิวเฉลี่ยและอายุการใช้งานของเครือข่าย เราได้ทำการวัดประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมเดิม รวมทั้งได้อธิบายผลการจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานในด้านต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ โดยเราได้แบ่งการจำลองการทำงานเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 : การจำลองการทำงานเพื่อพิจารณาค่า  $r$  และ  $dw$  ที่เหมาะสม

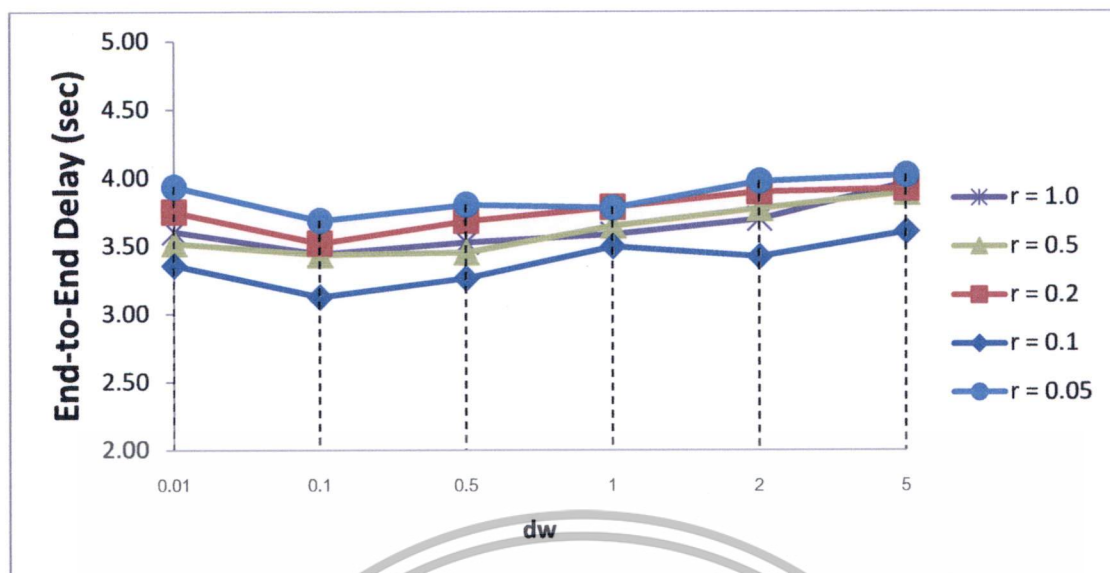
ส่วนที่ 2 : การจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ ไอเออาร์ไอ เทียบกับอัลกอริทึมเออาร์ไอ

#### 5.4.1 การจำลองการทำงานเพื่อพิจารณาค่า $r$ และ $dw$ ที่เหมาะสม

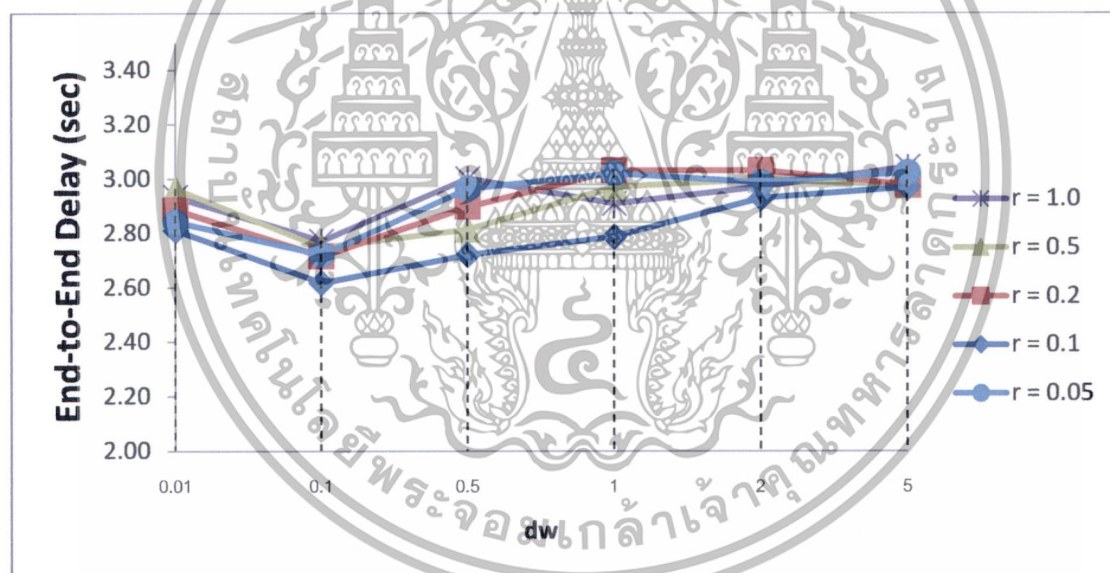
อัลกอริทึมไอเออาร์ไอเป็นอัลกอริทึมที่นำเสนอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยก่อนที่จะวัดประสิทธิภาพในด้านต่างๆ นั้น เราจะต้องมีการพิจารณาค่าที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำเอาค่าที่เหมาะสมไปใช้ในกลไกอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 4 เพื่อให้อัลกอริทึมที่เราได้นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เราจึงได้จำลองการทำงานเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการทำงานตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในการศึกษาทดลอง ดังต่อไปนี้

- อัตราการสร้างแพ็คเก็ตในการค้นหาเส้นทาง FANT transmission rate :  $r$
- ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้สำหรับประกอบการพิจารณาในกระบวนการเลือกเส้นทาง Delay weight factor :  $dw$

การจำลองการทำงานโดยการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า  $dw$  และ  $r$  ที่เหมาะสมนี้จะถูกนำไปใช้ในอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ต่อไป ซึ่งการจำลองการทำงานจะอยู่บนพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ ตั้งแต่ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตรต่อวินาที โดยเราจะพิจารณาผลการจำลองการทำงานจากเวลาประวิง (ดีเลย์) ของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทาง เพื่อพิจารณาค่า  $dw$  และ  $r$  ที่เหมาะสม เพื่อนำค่า  $dw$  และ  $r$  ไปใช้ในการกำหนดค่าสำหรับการจำลองการทำงานในส่วนที่สองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมไอเออาร์ไอที่เราได้นำเสนอกับอัลกอริทึมเออาร์ไอ ดังผลการจำลองการทำงานที่แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.7

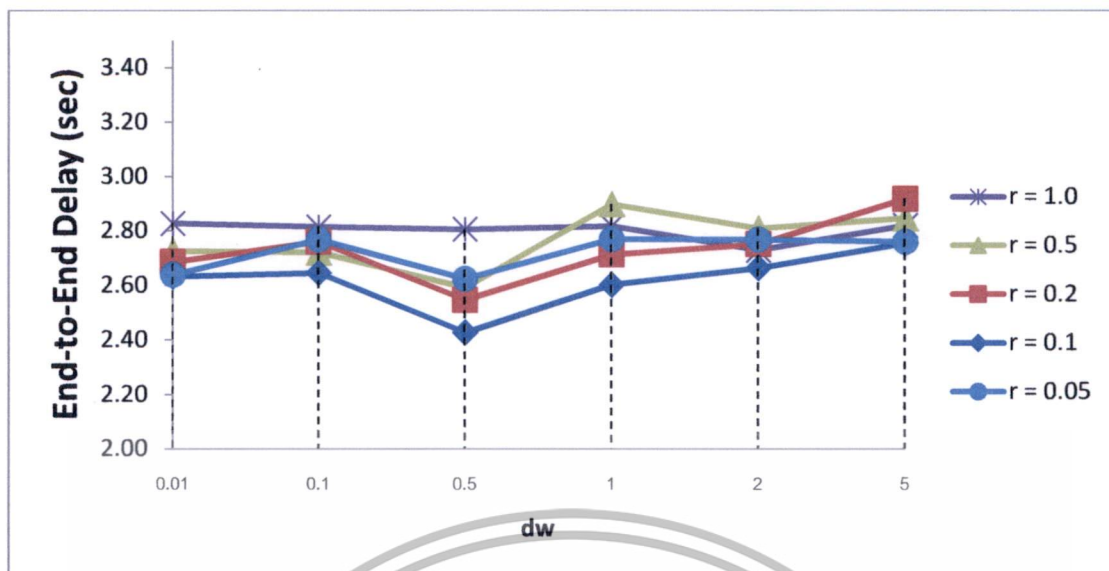


รูปที่ 5.2 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 0 เมตรต่อวินาที

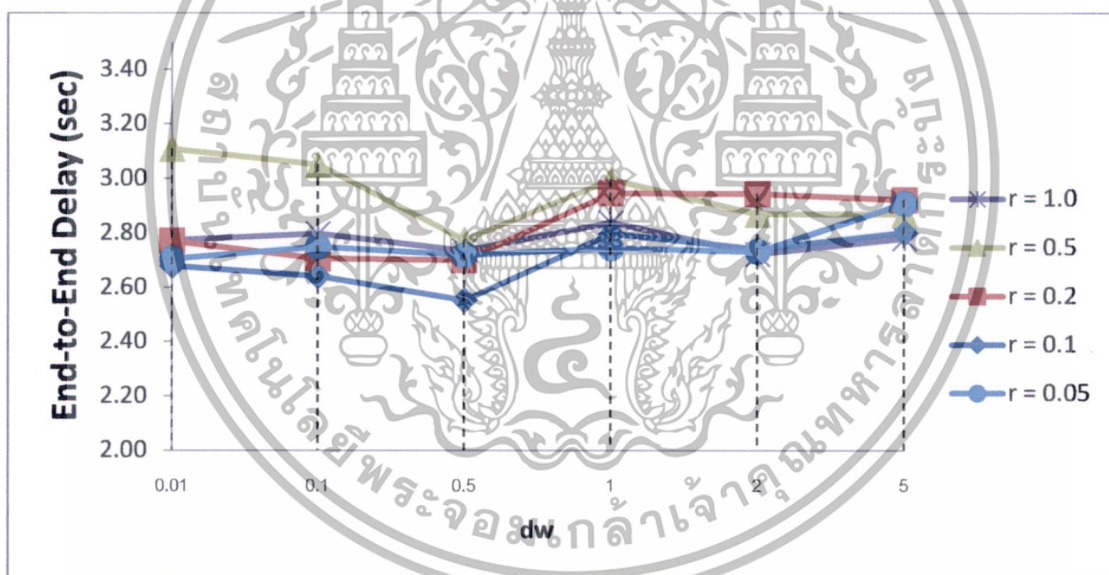


รูปที่ 5.3 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 2 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

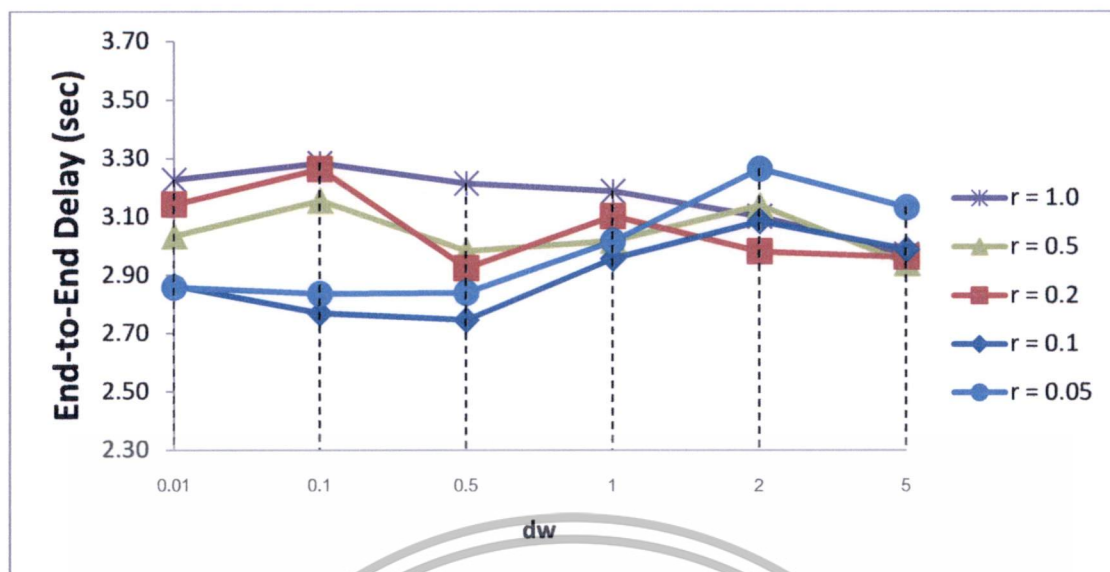


รูปที่ 5.4 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 4 เมตรต่อวินาที

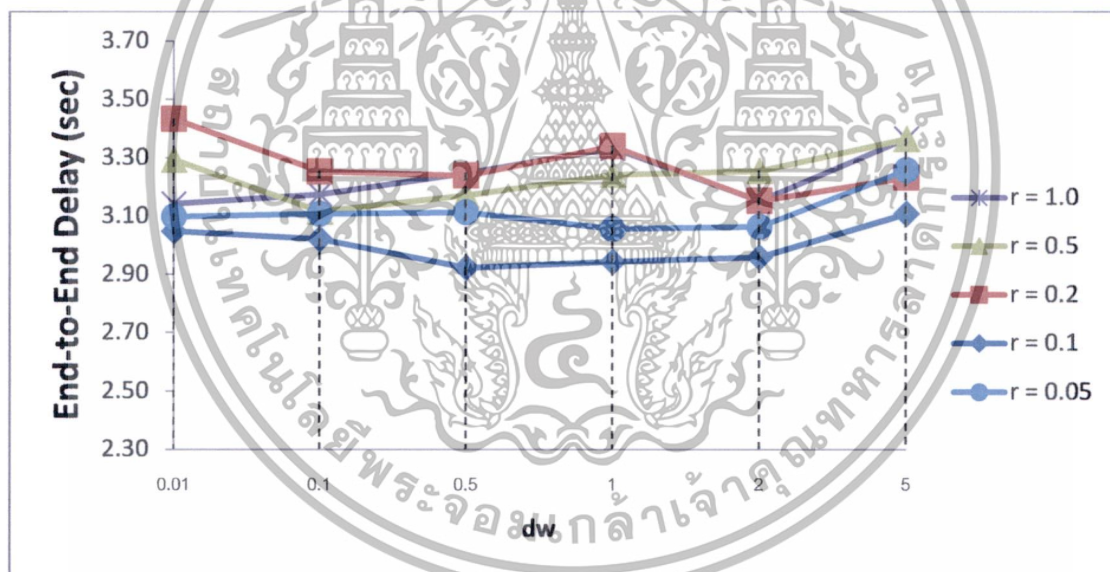


รูปที่ 5.5 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 6 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 8 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.7 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ 10 เมตรต่อวินาที

ในการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.2 ถึง 5.7 เป็นการแสดงให้เห็นถึงเวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $dw$  และ  $r$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ตั้งแต่ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตรต่อวินาที จากผลจำลองการทำงานเราจะทำการพิจารณาเลือกค่า  $dw$  และ  $r$  ที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่าที่  $dw$  มีค่าเป็น 0.1 และที่  $r$  มีค่าเป็น 0.1 เมื่อมีความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์เป็น 0 และ 2 เมตรต่อวินาทีจะทำให้เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่ำสุด ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหนดเซ็นเซอร์ปลายทางมีค่าน้อยที่สุดดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 แต่เมื่อความเร็วของโหนดเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้นค่าตั้งแต่ 4, 6, 8 และ 10 เมตรต่อวินาที ที่ค่า  $dw$  เป็น 0.5 โดยที่ค่า  $r$  มีค่าเป็น 0.1 จะทำให้เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางที่น้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่า  $r$  และ  $dw$  ที่เหมาะสมที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างๆ เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานในส่วนที่ 2

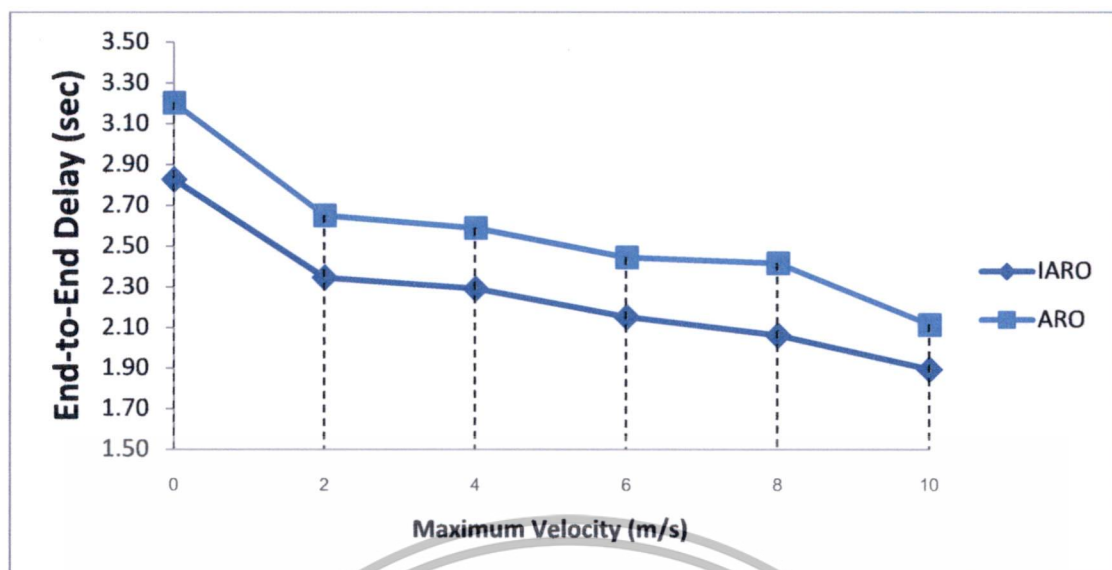
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย	FANT transmission rate : $r$	Delay weight factor : $dw$
0	0.1	0.1
2	0.1	0.1
4	0.1	0.5
6	0.1	0.5
8	0.1	0.5
10	0.1	0.5

ดังนั้นเราจึงพิจารณาว่าค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพด้านเวลาประวิงดีที่สุดซึ่งเป็นจุดสำคัญของอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอนี้และเนื่องจากเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการทดลองและวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอนี้จะทำปรับค่าที่เหมาะสมตามความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์นั้นคือ เมื่อโหนดเซ็นเซอร์มีความเร็วเป็น 0 และ 2 เมตรต่อวินาที เราจะกำหนดให้ค่า  $dw$  มีค่าเป็น 0.1 และเมื่อโหนดเซ็นเซอร์มีความเร็วเป็น 4, 6, 8 และ 10 เมตรต่อวินาที เราจะกำหนดให้ค่า  $dw$  มีค่าเป็น 0.5 แต่มีค่า  $r$  เหมือนกันที่ 0.1 เพื่อให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพมากที่สุด และเราได้ทำการประเมินประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ของอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ ดังต่อไปนี้

#### 5.4.2 การจำลองการทำงานเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมไอเออาร์ไอและอัลกอริทึมเออาร์ไอ

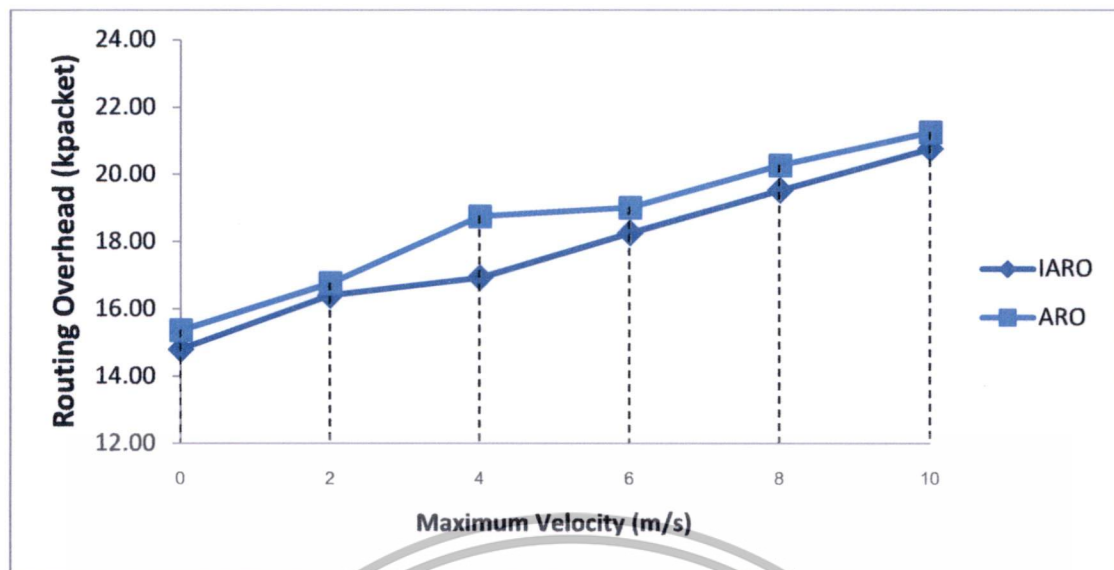
จากการจำลองการทำงานที่มีการพิจารณาค่า  $dw$  และ  $r$  ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ แล้วเราจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมไอเออาร์ไอและอัลกอริทึมเออาร์ไอ ซึ่งการจำลองการทำงานจะอยู่บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่มโดยจะกำหนดให้โหนดเซ็นเซอร์มีความเร็วแบบสุ่มเป็น 0 ถึง 2 เมตรต่อวินาที และเป็น 0 ถึง 4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.8 จนกระทั่งโหนดเซ็นเซอร์มีความเร็วแบบสุ่มเป็น 0 ถึง 10 เมตรต่อวินาที โดยทำการพิจารณาประสิทธิภาพของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในต่างๆ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



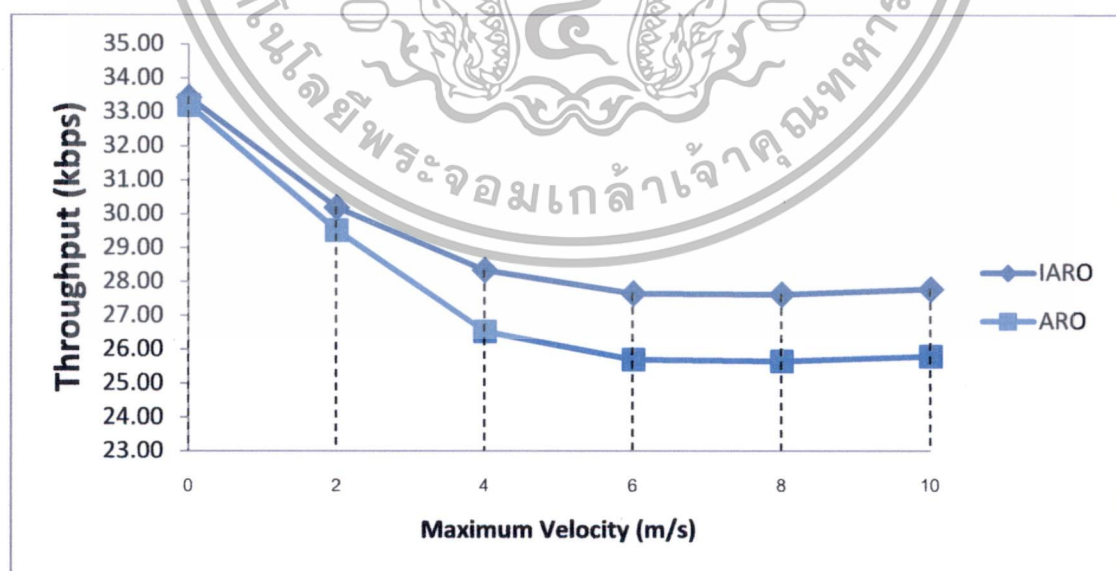
รูปที่ 5.8 เวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม

เวลาประวิง (ดีเลย์) ของการส่งข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนี้ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครือข่าย ทำให้ทรูพพโดยรวมของระบบเครือข่ายมีค่าน้อยลงและอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จในเครือข่ายลดลงตามไปด้วย จากรูปที่ 5.8 แสดงถึงค่าเวลาประวิงเฉลี่ยของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางในเครือข่ายที่เราได้ทำการจำลองแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมไอเออาร์โอ นั้นให้ค่าของเวลาประวิงที่น้อยลงกว่าอัลกอริทึมเออาร์โอ ในทุกๆ ของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ โดยในช่วงแรกของการจำลองการทำงานมีโหนดเซ็นเซอร์ไม่เคลื่อนที่ค่าเวลาประวิงเฉลี่ยที่เกิดในเส้นทางจะมีค่ามากที่สุดอาจเนื่องมาจากโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆ ในเครือข่ายมีการใช้เส้นทางเดิมในการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลทำให้ปริมาณแพ็คเก็ตข้อมูลสะสมในเส้นทางมีมากทำให้เกิดเวลาประวิงในเส้นทางในการส่งข้อมูลมากและเมื่อเครือข่ายมีความเร็วเพิ่มขึ้นโหนดเซ็นเซอร์จะมีการหาเส้นทางใหม่เพื่อเชื่อมต่อไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางทำให้เวลาประวิงที่เกิดขึ้นในเส้นทางส่งแพ็คเก็ตข้อมูลลดน้อยลงแต่ปริมาณของโอเวอร์เฮดในการค้นหาเส้นทางจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วของโหนดเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 โอเวอร์เฮดต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม

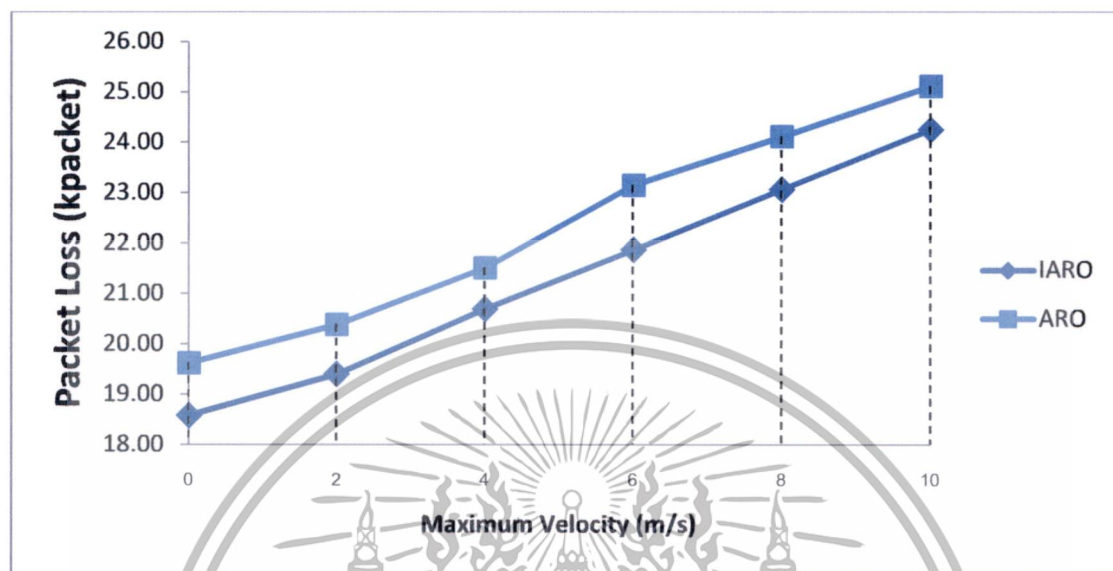
จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านโอเวอร์เฮดในการค้นหาเส้นทางของอัลกอริทึมที่นำเสนอไอเออาร์ไอ และอัลกอริทึมเออาร์ไอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโหนดเซ็นเซอร์ จากผลการจำลองการทำงานของอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ มีโอเวอร์เฮดน้อยกว่าอัลกอริทึมเออาร์ไอ ในทุกๆ การเปลี่ยนความเร็วของโหนดเซ็นเซอร์ เนื่องจากอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ มีกลไกของกระบวนการค้นหาเส้นทางที่มีประสิทธิภาพโดยจะทำการกระจายส่งแพ็คเกจในการค้นหาเส้นทาง FANT ในกระบวนการค้นหาเส้นทางตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในอัลกอริทึมที่นำเสนอ จึงทำให้อัลกอริทึมที่นำเสนอนั้นสามารถช่วยลดโอเวอร์เฮดในการค้นหาเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าอัลกอริทึมแบบเดิม



รูปที่ 5.10 ทราฟฟิคต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม

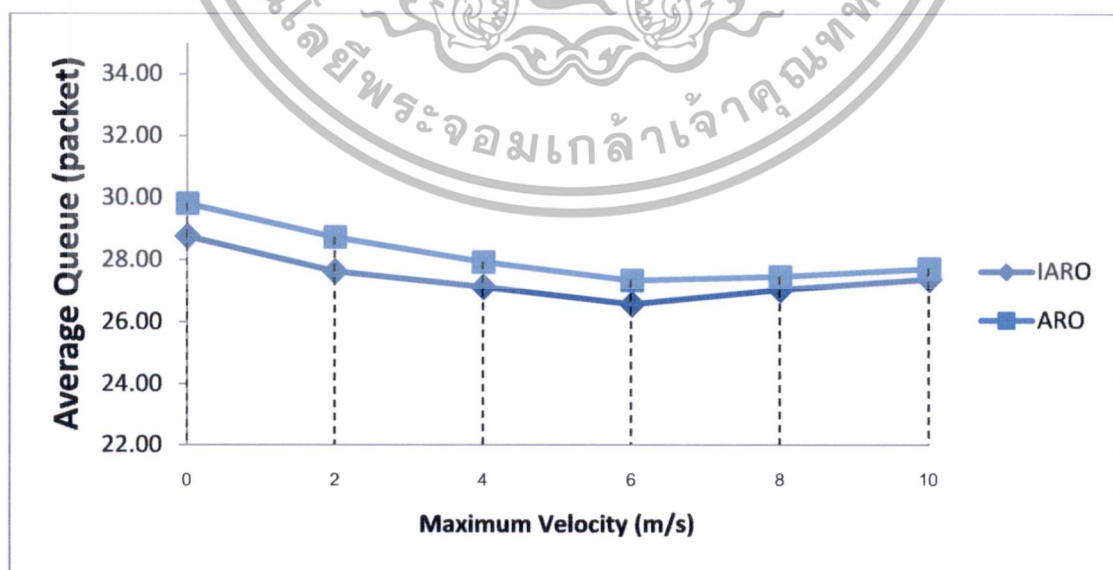
จากการจำลองการทำงานเพื่อวัดประสิทธิภาพด้านทราฟฟิคเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในเอกสารเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นว่า ค่าทราฟฟิคเมื่อโหนดเซ็นเซอร์ไม่เคลื่อนที่การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอมีค่าทรูพุตสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมเดิม แต่เมื่อโหลดเซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้อัลกอริทึมที่นำเสนอ (ไอเออาร์ไอ) จะให้ค่าทรูพุตสูงกว่าอัลกอริทึมเดิม



รูปที่ 5.11 แพ้คเกตที่สูญเสียต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหลดแบบสุ่ม

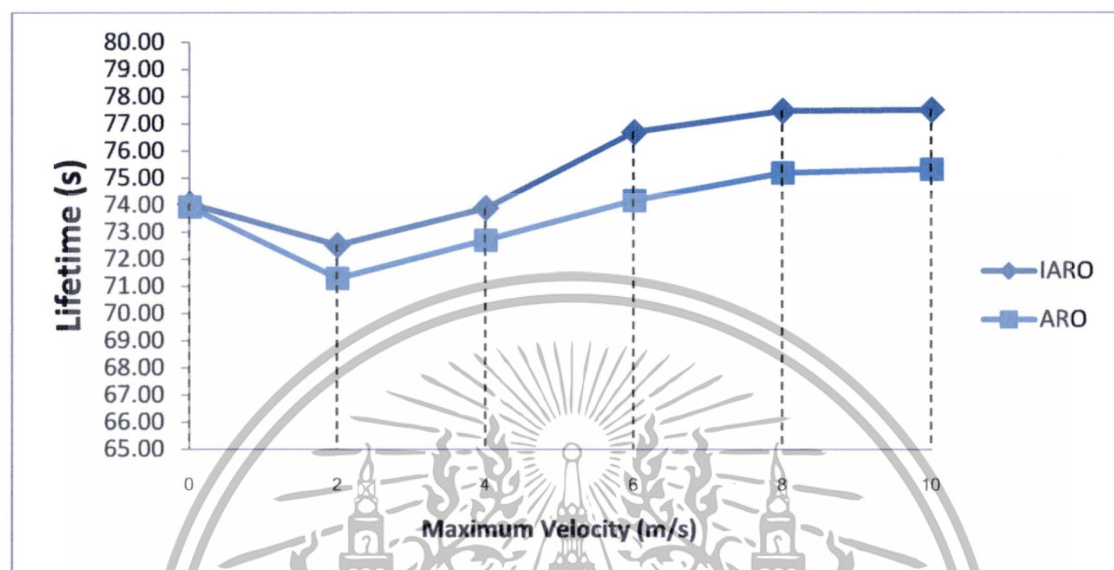
จากรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านแพ้คเกตที่สูญเสียอัลกอริทึมที่เรานำเสนอไอเออาร์ไอมีจำนวนแพ้คเกตที่สูญเสียน้อยกว่าอัลกอริทึมเออาร์ไอในทุกๆของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของโหลดเซ็นเซอร์ เนื่องจากอัลกอริทึมที่เรานำเสนอให้เวลาประวิงของการส่งข้อมูลระหว่างโหลดเซ็นเซอร์ต้นทางกับโหลดเซ็นเซอร์ปลายทางน้อยกว่าอัลกอริทึมเออาร์ไอ ดังนั้นจึงทำให้แพ้คเกตที่สูญเสียน้อยลงด้วย



รูปที่ 5.12 คิวเฉลี่ยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหลดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองการทำงานเพื่อวัดประสิทธิภาพด้านควมเฉลี่ยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอ ไอเออาร์ไอมีค่าน้อยกว่าอัลกอริทึมเดิมเออาร์ไอในทุกๆ ของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์



รูปที่ 5.13 อายุการใช้งานของเครือข่ายต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์แบบสุ่ม

จากรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านอายุการใช้งานของเครือข่ายเมื่อโหนดเซ็นเซอร์มีความเร็วของการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป อายุการใช้งานของเครือข่ายอัลกอริทึมไอเออาร์ไอ จะสูงกว่าเล็กน้อยเทียบกับอัลกอริทึมเดิมเมื่อโหนดเซ็นเซอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่แต่เมื่อโหนดเซ็นเซอร์เริ่มมีการเคลื่อนที่ที่จะเห็นได้ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ ไอเออาร์ไอ นั้นจะช่วยให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานสูงกว่าอัลกอริทึมเออาร์ไอ อย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้ได้ช่วยลดปริมาณโอเวอร์เฮดของเครือข่ายน้อยลงจึงทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเพิ่มขึ้นด้วย

อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอได้ตระหนักถึงปัญหาเพื่อช่วยลดภาระของโหนดเซ็นเซอร์ในการรับและส่งแพ็คเกจข้อมูลโดยได้นำเอาเวลาประวิงที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆ ไปใช้กับการค้นเส้นทางด้วยวิธีการของมดจากการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของเครือข่าย (QoS) ในด้านต่างๆ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพอัลกอริทึมที่นำเสนอช่วยให้มีประสิทธิภาพทำงานของเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 สรุปผลการจำลองการทำงาน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน (เออาร์ไอ) อัลกอริทึมที่เรานำเสนอเรียกว่า “กลไกการปรับปรุงอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (ไอเออาร์ไอ)” เพื่อให้เหมาะสมกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบมีโหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่ อัลกอริทึมเออาร์ไอใช้การพิจารณาอายุการใช้งานของโหนดในเครือข่ายแบ่งประเภทของการใช้พลังงานเป็น พลังงานที่ในตรวจจับและพลังงานที่ในการสื่อสาร ซึ่งได้นำมาเป็นน้ำหนักในการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด ซึ่งอาจจะเกิดโหนดเซ็นเซอร์ที่มีการรับส่งข้อมูลมากกว่าโหนดเซ็นเซอร์อื่นๆ ในเครือข่าย เนื่องจากโหนดเซ็นเซอร์ต้องทำการส่งต่อข้อมูลโหนดเซ็นเซอร์ต้นทางอื่นๆ เพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดเซ็นเซอร์ปลายทางพร้อมกับต้องทำการส่งข้อมูลของตัวเอง จึงทำให้โหนดเซ็นเซอร์เหล่านี้ในเครือข่ายเกิดเวลาประวิง (ดีเลย์) สูง ทรูพุทและอายุการใช้งานของเครือข่ายลดน้อยลง จากปัญหาดังกล่าวเราจึงปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยกลไกการพิจารณาเวลาประวิงแบบต่างๆ ที่เกิดในเครือข่ายประเภทนี้เพื่อนำมาเป็นน้ำหนักในการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางแบบเดิม เออาร์ไอ ซึ่งพิจารณาการใช้พลังงานต่างๆ ของโหนดในเครือข่าย จากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัลกอริทึมไอเออาร์ไอ สามารถลดเวลาประวิง แอปพลิเคชันที่สูญเสีย คิวเฉลี่ยและโอเวอร์เฮดได้มากกว่าอัลกอริทึมเออาร์ไอ ส่งผลให้ทรูพุทเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมเออาร์ไอ และผลจากการจำลองการทำงานยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพอายุการใช้งานของเครือข่ายโดยที่อัลกอริทึมไอเออาร์ไอจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมเออาร์ไอ

#### 6.2 อุปสรรคและปัญหา

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือปัญหาของการทำการจำลองระบบเครือข่ายของการทำงานของอัลกอริทึมเออาร์ไอ ที่ได้นำมาศึกษาและปรับปรุงและอัลกอริทึมที่นำเสนอ ไอเออาร์ไอ ซึ่งทั้งสองอัลกอริทึมนี้ในโปรแกรมจำลองเครือข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการทำงานของเครือข่าย Network Simulator version 2 (NS2) ที่ต้องใช้เวลาในการศึกษาส่วนประกอบของระบบต่างๆ ในโปรแกรมจำลองการทำงานเพื่อให้มีความเข้าใจการทำงานในส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของคำสั่งพื้นฐานของโปรแกรมซึ่งถูกเขียนขึ้นมาด้วยภาษา C++ สคริปที่ใช้ในการจำลองการทำงาน (TCL script) และสคริปที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเครือข่าย (AWK script) ซึ่งในแต่ละส่วนนั้นต้องใช้เวลาในการศึกษาและหาข้อมูลเพื่อทำความเข้าใจในการแก้ไขและปรับปรุงโปรแกรมจำลองการทำงาน อีกทั้งเวลาที่จำลองการทำงานสำหรับการประเมินเพื่อวัดประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ของเครือข่ายนั้นต้องใช้เวลาาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 แนวทางการปรับปรุงในอนาคต

จากการจำลองการทำงานของอัลกอริทึมไอเออาร์โอที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถลดเวลาประวิง (ดีเลย์) และโอเวอร์เฮด ทำให้เพิ่มอายุการใช้งานและทรูพุทในเครือข่ายให้สูงขึ้นได้แล้ว นั้น ทางผู้จัดทำยังเห็นว่าอัลกอริทึมไอเออาร์โอ ยังสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงขึ้นอีกได้โดยอาจนำอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์อื่นๆ มาประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายประเภทนี้ หรือทำการศึกษาอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดที่ได้มีการปรับปรุงให้ประสิทธิภาพมากที่สุดมาประยุกต์ใช้งานในโลกต่างๆ ของอัลกอริทึม อาจจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการเกิดโหนดเซ็นเซอร์ที่มีการรับส่งข้อมูลมากกว่าโหนดเซ็นเซอร์อื่นๆ ในเครือข่ายได้หรืออาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในด้านอื่นๆ ให้ดีมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11 Issue. 6, pp. 6-28, Dec 2004.
- [2] J. Yick B. Mukherjee and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330. April 2008.
- [3] D. Puccinelli and M. Haenggi. *Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges of Ubiquitous Sensing*. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 5:19-29, Aug 2005.
- [4] Chee-Yee Chong and Srikanta P.Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," *Proceedings of the IEEE*: vol.91, no.8, Aug 2003
- [5] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, Aug 2002
- [6] M. Dorigo and M. Birttai, T. Stutzle, "Ant colony Optimization", *Comput. Intell. Mag.*, IEEE 1 (4), pp 28-39, 2006
- [7] M. Dorigo and T. Stutzle, "Ant Colony Optimization", Cambridge, MA. MIT Press, 2004.
- [8] G. D. Caro and M. Dorigo, "Antnet: Distributed stigmergetic control for communications networks," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 9, pp.317-365, 1998.
- [9] Di Caro G.A., Dorigo M., "Two Ant Colony Algorithms for Best-Effort Routing in Datagram Networks" , *Proceedings of PDCS'98* , October 28-31 1998,
- [10] Murthy and Garcia-Luna-Aceves, "An efficient routing protocol for wireless networks" , *Journal Mobile Networks and Applications*, Volume 1 Issue 2, Oct. 1996, pp 183-197
- [11] C. Perkin, E. M. Royer, and S. Das, "Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing", IETF RFC 3561, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] F. Correia and T. Vazao, "Simple Ant Routing Algorithm strategies for a (Multipurpose) MANET model," **ICOIN International Conference**, vol.1, no. 1, pp. 1-8 Jan, 2008.
- [13] X.-M. Hu and J. Zhang, "Ant routing optimization algorithm for extending the lifetime of wireless sensor networks," **IEEE International Conference**, vol. no, no. 1, pp.738-744, Oct. 2010.
- [14] Network Simulator 2. "NS2." [Online]. Available : <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



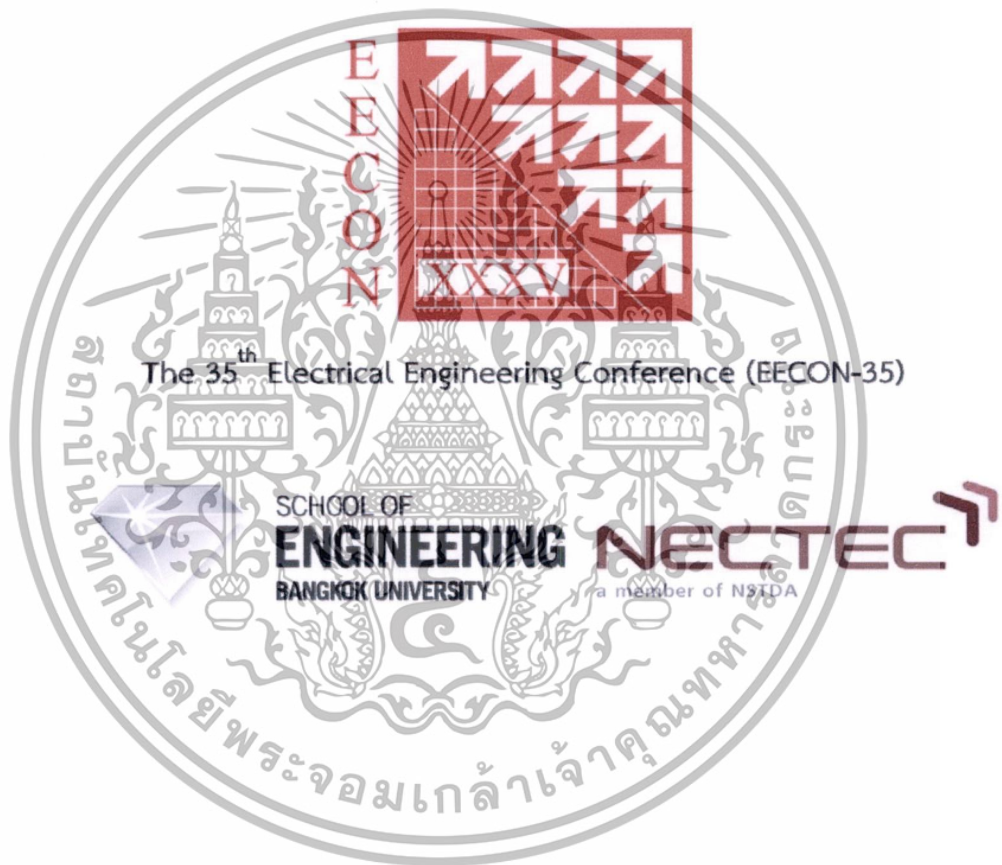
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] รณชัย ส้มหมื่นเมา และ ศักดิ์ชัย ทิพย์จักร์รัตน์ “การปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการ ของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 ธันวาคม 2555 หน้า 647 – 650
- [2] รณชัย ส้มหมื่นเมา และ ศักดิ์ชัย ทิพย์จักร์รัตน์ “ผลกระทบของการเคลื่อนที่บนอัลกอริทึมการปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย” การประชุมทางวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 9 พฤษภาคม 2556 หน้า 523 – 528



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสม  
ด้วยวิธีการของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย**  
**Improvement of Ant Colony Optimization Routing for Wireless Sensor Networks**

รณชัย สังข์เม็นแก้ว และ ศักดิ์ชัย ทิพย์ชัญญ์รัตน์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 ถนนคลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์: 0-2329-8341

E-mail: romachai\_th@yahoo.com\*, ktsakcha@kmitl.ac.th\*

**บทคัดย่อ**

การค้นหาเส้นทางเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางโดยทั่วไปจะก่อให้เกิดข้อบกพร่องอย่างมากเกินไปส่งให้อายุการใช้งานของเครือข่ายลดลงของบทความนี้เรานำเสนออัลกอริทึมเพื่อปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (เออาร์โอ) โดยเราจะพิจารณาถึงผลของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายเราเรียกอัลกอริทึมที่เรานำเสนอว่าอัลกอริทึมการปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (ไอ-เออาร์โอ) เราทำการจำลองการทำงานของวิธีการที่เรานำเสนอด้วยโปรแกรม เอ็นเอส-2 เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการที่เราเสนอ ผลจากการจำลองการให้ทางแสดงให้เห็นว่า วิธีการที่เราเสนอช่วยเพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยมากขึ้นในช่วงจำนวน โหนดเซ็นเซอร์ระหว่าง 20-40 โหนด และเมื่อจำนวนโหนดเซ็นเซอร์มากกว่า 30 โหนดขึ้นไป วิธีการที่เราเสนอให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

คำสำคัญ: เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย, ระบบวิธีการของมด

**Abstract**

Routing is one of the challenging to topics in Wireless Sensor Networks (WSNs). Most of the routing algorithms may cause the increasing delay resulting in the decreasing lifetime in WSNs. In this paper, we propose the improvement of a novel ant routing optimization algorithm (ARO) [4]. Our proposed algorithm using ant colony optimization by considering the delay between the sensor nodes called improvement of ant routing optimization algorithm (I-ARO). We evaluate the performance of I-ARO comparing with ARO by means of computer simulation using network simulator version 2 (NS-2). The simulation results show that I-ARO provides the longer lifetime when a number of sensor node are between 20 and 40 nodes. When a number of

nodes increasing are greater 30 nodes. The lower delay can be achieved by using I-ARO.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Ant Colony Optimization

**1. บทนำ**

เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย (Wireless Sensor Networks: WSN) ประกอบไปด้วย โหนดเซ็นเซอร์ (Sensor Node) ที่มีการกระจายตัวเป็นจำนวนมากเพื่อใช้ในการสังเกตการณ์สิ่งต่างๆที่เราสนใจ เพื่อรวบรวมข้อมูลที่สนใจส่งไปยังสถานีหลัก (Base Station) เพื่อประมวลผล ส่วนประกอบต่างๆของโหนดเซ็นเซอร์ประกอบไปด้วย การตรวจจับ การประมวลข้อมูล การรับส่งข้อมูลและหน่วยพลังงาน [1] คุณสมบัติเด่นของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายคือพลังงานของโหนดเซ็นเซอร์แต่ละโหนดทั่วไปแล้วมีมีอยู่จำกัดในการชาร์จ ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์นั้นสามารถลดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้คือจุดสำคัญในการออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย

อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดได้ถูกนำมาประยุกต์ในด้านต่างๆ สำหรับเครือข่ายแบบมีสาย Caro และ Dorigo [2] แนะนำวิธีการที่เรียกว่า AntNet เพื่อการเรียนรู้การปรับตัวของสารการค้นหาลำเส้นทาง ผลการของการทดลองแสดงให้เห็นว่า AntNet มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางแบบอื่น ๆ เช่น OSPF และ SPF. F. Correia และ T. Vazao [3] ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการของมดก็สามารถนำมาประยุกต์ในการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายไร้สายได้ เช่นเครือข่ายเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ โดย F. Correia และ T. Vazao ได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอด้วยวิธีการของมดสามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าอัลกอริทึมค้นหาเส้นทางแบบเดิม เช่น อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางของโอดีวี (AODV)

สำหรับในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายจะมีข้อจำกัดในเรื่องของพลังงานของโหนดเซ็นเซอร์ Xiao-Min Hu และ Jun Zhang [4] ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนออัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางโดยประยุกต์ใช้วิธีการของมดโดยพยายามที่จะทำให้อุปกรณ์ใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น โดย Xiao-Min Hu และ Jun Zhang ได้นำเสนออัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (เออาร์ไอ) และงานวิจัยของ Xiao-Min Hu และ Jun Zhang จึงเป็นแรงบันดาลใจของเราในการนำเสนอวิธีการของเราในงานวิจัยนี้เราได้เสนออัลกอริทึมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (ไอ-เออาร์ไอ) โดยเราจะพิจารณาเฉลี่ยระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆ ในการค้นหาเส้นทาง ทั้งนี้ที่สอดคล้องให้กับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย จนถือว่าการใช้งานเครือข่ายให้อยาวนานขึ้น

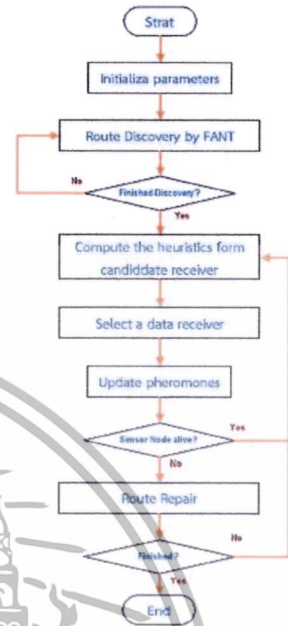
งานวิจัยนี้ แบ่งหัวข้อนำเสนอออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้ ส่วนที่ 2 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดและคำจำกัดความเฉลี่ยจะอยู่ในส่วนที่ 3 การจำลองและการทำงานของเครือข่ายจะอยู่ในส่วนที่ 4 และ ส่วนที่ 5 เป็นบทสรุปของงานวิจัยนี้

**2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

งานวิจัย Xiao-Min Hu และ Jun Zhang [4] ได้้นำเสนอแนวคิดอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายด้วยวิธีการของมด (เออาร์ไอ) เพื่อลดเวลาใช้งานของเครือข่ายให้เพิ่มมากขึ้น เออาร์ไอได้นำมาใช้ค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาเส้นทางเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย สำหรับวิธีการของเออาร์ไอได้พิจารณาการใช้พลังงานของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์มาพิจารณาเพื่อไม่ให้พลังงานของโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายหมด โดยสามารถแบ่งการใช้พลังงานของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเป็นส่วนๆคือ พลังงานที่ใช้ในการตรวจพบ พลังงานที่ใช้ในการสื่อสาร วิธีการของเออาร์ไอได้พิจารณาการใช้พลังงานต่างๆของโหนดเซ็นเซอร์ที่ถือคืออุปกรณ์ใช้งานของเครือข่ายในเออาร์ไอไม่ได้พิจารณาเฉลี่ยค่าต่างๆที่มาจากโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย สำหรับวิธีการที่เรานำเสนอเราได้พิจารณาเฉลี่ยที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย

**3. วิธีการที่นำเสนอ**

ในงานวิจัยนี้เรานำเสนออัลกอริทึมที่จะปรับปรุงวิธีการของเออาร์ไอโดยพิจารณาเฉลี่ยระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ เราเรียกอัลกอริทึมที่เรา นำเสนอว่าอัลกอริทึมการปรับปรุงประสิทธิภาพการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด (ไอ-เออาร์ไอ) จะถูกนำเสนอในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น ส่วนๆคือ ตีเฉลี่ยในเครือข่าย การค้นหาเส้นทาง (Route Discovery) การเลือกเส้นทาง (Route Selection) และการซ่อมแซมเส้นทาง (Route Repair)



รูปที่ 1 แนวทางการทำงานของ I-ARO

**3.1 การค้นหาเส้นทาง (Route Discovery)**

จากรูปที่ 1 เริ่มต้น โดย โหนดเซ็นเซอร์ทุกโหนดในเครือข่ายที่กรกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว โหนดค้นหาเริ่มกระบวนการ Route Discovery โดยการส่งแพ็กเก็ตควบคุมเฉพาะกิจ Forward ANT (FANT) ซึ่งเป็นกรจำลองของมด โหนดในเครือข่ายจะกระทั้งส่งไปยังปลายทาง เมื่อได้รับ FANT โหนดปลายทางจะทำการส่งแพ็กเก็ตควบคุมเฉพาะกิจกลับ Backward ANT (BANT) ผ่านเส้นทางที่สั้นที่สุดที่รู้จักแพ็กเก็ตนี้ควร ไปยังเส้นทางเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นและการไหลของข้อมูลอาจเริ่มต้นทันที

เนื่องจากการส่งข้อมูลแบบแพร่กระจายชนิด FANT เมื่อส่งรับได้รับข้อความ FANT เป็นโหนดปลายทาง ข้อความ FANT ที่ยังคงอยู่ในเครือข่ายเพื่อทำการค้นหาเส้นทางอื่นจนกว่าจะถึงโหนดปลายทาง โหนดปลายทางต้องทำการสร้าง BANT และส่งกลับไปยังเส้นทางเดิมไปยังโหนดค้นหา

**3.2 การเลือกเส้นทาง (Route Selection)**

ขั้นตอนถัดจากการค้นหาเส้นทางคือการเลือกเส้นทางเป็นขั้นตอนหาความน่าจะเป็นใช้เพื่อเลือกโหนดรับข้อมูลเพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังปลายทางจากรูปที่ 1 ในการคำนวณหาวิธีวัดความน่าจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการเลือกโหนดรับข้อมูลจากโหนดข้างเคียงซึ่งหาได้จากสมการ (1)

$$ph_{(u,j,d)} = \frac{\Phi_{(u,j,d)} \delta_{(u,j,d)}}{\sum_{i=0}^M \Phi_{(u,j,d)} \delta_{(u,j,d)}} \quad (1)$$

$ph_{(u,j,d)}$  เป็นความน่าจะเป็นในการเลือกของการเชื่อมโยงไปยังโหนด  $j$  ไปยังปลายทางโหนด  $d$  โดยโหนด  $u$  มีความสัมพันธ์กับค่าฟีโรโมนของการเชื่อมโยง  $\Phi_{(u,j,d)}$  กับ  $\delta_{(u,j,d)}$  เมื่อ  $M$  เป็นจำนวนโหนดข้างเคียง โหนด  $u$

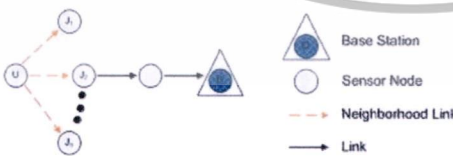
ในการปรับปรุงระดับของฟีโรโมน ระดับของฟีโรโมนจะเป็นตัวบ่งชี้ของกิจกรรมค่าและคุณภาพของการเชื่อมโยง เส้นทางของการเชื่อมโยงที่มีคุณภาพจะมีระดับฟีโรโมนที่สูง ในขณะที่มีคุณภาพต่ำทำให้ระดับฟีโรโมนต่ำตามไปด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย การเพิ่มความเข้มข้นของฟีโรโมนและการลดความเข้มข้นของฟีโรโมน

3.2.1 ดีเลย์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย

งานวิจัยมุ่งเน้นการเพิ่มอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย ดีเลย์ (Delay) ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย ดีเลย์ในเครือข่ายคือเวลาที่ใช้ในการเดินทางของข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยังสถานีหลัก สามารถเขียนเป็นสมการได้ระหว่างโหนดเซ็นเซอร์  $u$  ไปยังโหนดเซ็นเซอร์  $d$  โดยค่าโหนดข้างเคียง  $j$   $\delta_{(u,j,d)}$  ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\delta_{(u,j,d)} = \left( \frac{1}{pd_{(u,j,d)}} + \frac{1}{qd_{(u,j,d)}} \right) \quad (2)$$

โดยที่  $pd_{(u,j,d)}$  เป็นดีเลย์ของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูลระหว่างโหนด  $u$  กับโหนดข้างเคียง  $j$ ,  $F$  เป็นพหุคูณความเข้มข้นของดีเลย์และ  $qd_{(u,j,d)}$  คือดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิวที่โหนด  $j$  โดยที่ปลายทางเป็น  $d$  ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการพิจารณาดีเลย์ของโหนดเซ็นเซอร์จากโหนดเซ็นเซอร์ถึงสถานีหลัก

ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายโหนดวิกฤตที่มีการรับข้อมูลจากโหนดข้างเคียงเป็นจำนวนมากทำให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานลดลง และส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโหนดเซ็นเซอร์ด้วย ดีเลย์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายแบ่งออกเป็นดังนี้

3.2.2 ดีเลย์เกิดการรอคิว (Queuing Delay)

ดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิวคือเวลาที่ข้อมูลรออยู่ในคิวจนกว่าจะสามารถดำเนินการได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดดีเลย์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายดังแสดงในสมการที่ (3)

$$qd_{(u,j,d)} = q_{(u,j,d)} + ds \quad (3)$$

โดย  $qd_{(u,j,d)}$  คือดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิวของโหนด  $j$   $q_{(u,j,d)}$  เป็นดีเลย์ในการเดินทางของข้อมูลไปยังหัวคิวและ  $ds$  ดีเลย์ในการให้บริการ

3.2.3 ดีเลย์ของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูล (Propagation Delay)

ดีเลย์ของสื่อที่ใช้ในการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายนั้นคือเวลาที่สัญญาณต้องเดินทางสื่อกลาง (Transmission Medium) จากหนึ่งข้อมูลไปยังผู้รับข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$pd_{(u,j,d)} = \frac{d_{(u,j,d)}}{s} \quad (4)$$

โดย  $pd_{(u,j,d)}$  คือดีเลย์ของสื่อที่ใช้ข้อมูลระหว่างโหนด  $u$  กับโหนด  $j$ ,  $d_{(u,j,d)}$  เป็นระยะทางระหว่างโหนดเซ็นเซอร์  $u$  กับโหนดเซ็นเซอร์  $j$  และ  $s$  คือความเร็วของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูล

3.3 การซ่อมแซมเส้นทาง (Route Repair)

ในการซ่อมแซมเส้นทางนั้นเป็นกระบวนการที่เริ่มเมื่อตรวจพบเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างสองโหนดเสียหาย เส้นทางที่เสียหายนั้นสามารถเกิดขึ้นเนื่องจากโหนดเซ็นเซอร์หยุดการทำงานจากข้อผิดพลาดในการส่งสัญญาณหรือเกิดการชนกันของข้อมูลมีจำนวนมาก ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายอาจเกิดเส้นทางเสียหายบ่อยครั้ง

ในการซ่อมแซมเส้นทาง I-ARO จะพยายามหาเส้นทางอื่นในพื้นที่ใกล้เคียงของเส้นทางที่เสียหาย I-ARO โดยการส่งแบบกระจายด้วยข้อความ Repair Forward ANT (R\_FANT) เพื่อหาเส้นทางอื่นที่สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การจำลองและผลการทำงานเครือข่าย

ในการจำลองการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายนั้นได้ใช้โปรแกรม Network Simulator version 2 (NS-2) โดยได้จำลองการทำงานของอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ (I-ARO) เทียบกับอัลกอริทึมเออาร์โอ (ARO)

4.1 การจำลองการทำงานของเครือข่าย

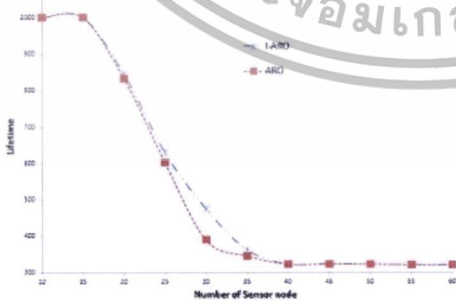
ในการจำลองการทำงานของเครือข่ายเราทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

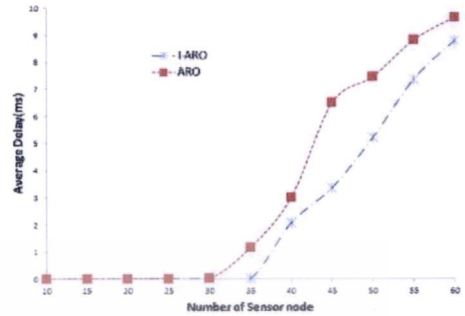
พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดของพื้นที่	1000x1000 ตารางเมตร
พลังงานเริ่มต้นของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์	50 จูล
พลังงานที่ใช้ในการรับส่ง	0.175 มิลลิวัตต์
พลังงานที่ใช้ในการตรวจรับ	1.75 มิลลิวัตต์
อัตราการส่งข้อมูลของโหนดเซ็นเซอร์	16 กิโลบิตต่อวินาที
จำนวนโหนดเซ็นเซอร์	10 ถึง 60 โหนด

4.2 ผลการจำลองการทำงานของเครือข่าย

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ จะให้อายุการใช้งานของเครือข่ายสูงกว่าอัลกอริทึมเออาร์โอเมื่อจำนวนโหนดเซ็นเซอร์อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 โหนด และจากรูปที่ 4 จะพบว่าอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอให้ผลที่ดีกว่าอัลกอริทึมเออาร์โอ เมื่อมีจำนวนโหนดเซ็นเซอร์ตั้งแต่ 30 โหนดขึ้นไป



รูปที่ 3 อายุการใช้งานของเครือข่ายกับจำนวนโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆ



รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยในการส่งข้อมูลกับจำนวนโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพอัลกอริทึมการค้นหาค้นหาในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย โดยนำวิธีการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดโดยพิจารณาผลระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ต่างๆในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย เพื่อทำการเลือกเส้นทางที่ให้ค่าคือต้นทุนที่ต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น หรือวิธีการที่นำเสนอว่า "อัลกอริทึมการปรับปรุงประสิทธิภาพการค้นหาค้นหาที่เหมาะสมคือวิธีการของมด (ไอ-เออาร์โอ)" เราทำการวัดประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบกันอัลกอริทึมเออาร์โอ [4] ผลการทดลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ จะให้อายุการใช้งานที่สูงกว่าอัลกอริทึมเออาร์โอเมื่อจำนวนโหนดเซ็นเซอร์อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 โหนดและค่าการทำงานที่ดีของพบว่าอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอให้ผลที่ดีกว่าอัลกอริทึมเออาร์โอ เมื่อจำนวนโหนดเซ็นเซอร์มีมากกว่า 30 โหนดขึ้นไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," IEEE Wireless Communications, Vol. 11 Issue. 6, Dec 2004, pp. 6-28.
- [2] G. D. Caro and M. Dorigo, "Antnet: Distributed stigmergetic control for communications networks," J. Artif. Intell. Res. , vol. 9, pp. 317-365, 1998.
- [3] F. Correia and T. Vazao, "Simple Ant Routing Algorithm strategies for a (Multipurpose) MANET model," ICOIN International Conference, vol. I, no. I, Jan. 2008., pp. 1-8.
- [4] X.-M. Hu and J. Zhang, "Ant routing optimization algorithm for extending the lifetime of wireless sensor networks," IEEE International Conference , vol. no. , no. I , Oct. 2010 .pp. 738-744.

**nccit  
2013**

**THE 9<sup>TH</sup> NATIONAL CONFERENCE ON  
COMPUTING AND INFORMATION  
TECHNOLOGY**

PROCEEDINGS OF NCCIT 2013  
THE 9<sup>TH</sup> NATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND INFORMATION TECHNOLOGY

9<sup>TH</sup>-10<sup>TH</sup> MAY 2013

KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

WWW.NCCIT.NET

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ  
ครั้งที่ 9

9-10 พฤษภาคม 2556

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

WWW.IT.KMUTNB.AC.TH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของการเคลื่อนที่บนอัลกอริทึมการปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วย  
วิธีการของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย  
Impact of Mobility on the Improvement of Ant Colony Optimization Routing  
Algorithm for Wireless Sensor Networks

รณชัย สังข์หมื่นแก้ว (Ronnachai Sangmunemao)<sup>1</sup> และศักดิ์ชัย ทิพย์จักรรัตน์ (Sakchai Thipchaksurat)<sup>2</sup>

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>1</sup>ronnachai\_th@yahoo.com, <sup>2</sup>ksakcha@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

กระบวนการหนึ่งที่สำคัญในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย คือ การค้นหาเส้นทาง การเคลื่อนที่ถือเป็นคุณสมบัติหนึ่งของ โหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่าย อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดดีเลย์ในเครือข่ายมากขึ้นไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายลดน้อยลง บทความนี้เรานำเสนออัลกอริทึมเพื่อปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (เออาร์ไอ) โดยเราจะพิจารณาดีเลย์ของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์และเพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายเราเรียกอัลกอริทึมที่เรานำเสนอว่าอัลกอริทึมการปรับปรุงการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (ไอ-เออาร์ไอ) เราประเมินประสิทธิภาพของ ไอ-เออาร์ไอ ด้วยการจำลองการทำงานโดยวัดประสิทธิภาพในรูปของ ดีเลย์เฉลี่ยจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยังสถานีฐาน อายุการใช้งานของเครือข่ายและทรูทูด โดยเรามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ ผลจากการจำลองการทำงาน ไอ-เออาร์ไอ ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่า เออาร์ไอ ในทุกๆตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย ระบบวิธีการของมด การค้นหาเส้นทาง

### Abstract

One major process in wireless sensor networks is the routing algorithm. The movement is one of the characteristic of sensor nodes in networks. Most of the

routing algorithms may cause the increasing delay resulting in the decreasing the performance of networks. In the paper, we propose algorithm for improving the ant routing optimization algorithm (ARO). Our proposed algorithm considers the delay between the sensor nodes and additional route repair mechanism. Our algorithm is called the improvement of ant colony optimization routing algorithm (I-ARO). We evaluate the performance of I-ARO by means of the simulation. We evaluate performance in terms of average end-to-end delay, lifetime and throughput. We focus on the impact of sensor node mobility. The results show that the I-ARO provides the better performance than those of ARO for all performance metrics.

Keyword: Wireless Sensor Networks, Ant Colony Optimization, Routing Algorithm

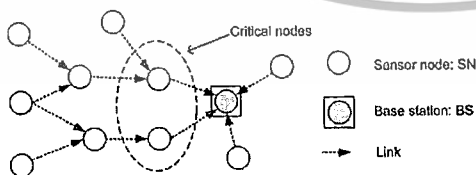
### 1. บทนำ

จากความรู้ทางด้านวิทยาการเทคโนโลยีของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายความสามารถที่โดดเด่นในการสังเกตการณ์ต่างๆ โดยที่ลักษณะการทำงานของเครือข่ายจะประกอบไปด้วยโหนดเซ็นเซอร์ที่ทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูลและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน ซึ่งโหนดเซ็นเซอร์จะถูกติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อสังเกตการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในพื้นที่สังเกตการณ์ โดยมีรูปแบบในการส่งข้อมูลเป็นแบบมัลติฮอปและโหนดเซ็นเซอร์จะมีขนาดเล็กแต่ในขณะเดียวกันนั้นโหนดเซ็นเซอร์ก็มีข้อจำกัดใน

การประมวลผล ขนาดของหน่วยความจำ ระยะการสื่อสารและพลังงาน [1]

เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายประกอบด้วยจำนวนโหนดเซ็นเซอร์ตั้งแต่เครือข่ายที่มีขนาดเล็กไปจนถึงเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากพื้นที่สังเกตการณ์ เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายมีศักยภาพที่ดีในการนำเอาไปใช้งานในการติดตามเฝ้าระวังเหตุการณ์ เช่น ติดตามเป้าหมายในทางทหาร เฝ้าระวังภัยพิบัติทางธรรมชาติ ทางด้านการแพทย์และสำรวจสภาพแวดล้อมในพื้นที่อันตราย ในปัจจุบันเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายมีทั้งเครือข่ายที่มีโหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่ [2] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายที่โหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่

สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายที่โหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่ ก็จะประกอบไปด้วยโหนดเซ็นเซอร์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเองหรือเคลื่อนที่ตามกายภาพของพื้นที่สังเกตการณ์ มีการเก็บข้อมูลต่างๆและส่งข้อมูลเหมือนกับเครือข่ายที่โหนดเซ็นเซอร์ไม่เคลื่อนที่แต่สิ่งแตกต่างที่สำคัญคือเครือข่ายที่โหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่จะมีการค้นหาเส้นทางไปยังสถานีฐานเป็นแบบพลวัต ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งสำหรับเครือข่ายแบบนี้คือเกิดโหนดวิกฤตดังภาพที่ 1 เป็นโหนดที่มีการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าโหนดอื่นๆในเครือข่ายส่งผลให้เกิดคิเล่ย์สูงเกิดการครอบงำของข้อมูลเป็นจำนวนมากและอายุการใช้งานของเครือข่ายลดลง [3] ดังนั้นในการออกแบบการค้นหาเส้นทางเพื่อให้สถานีฐานได้รับข้อมูลตามเวลาจริงคือจุดสำคัญจุดหนึ่งในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายและตอบสนองการใช้งานที่หลากหลาย



ภาพที่ 1: โหนดวิกฤต

สำหรับอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดถูกนำเสนอโดย Dorigo [4],[5] และได้มีการนำเอาการค้นหา

เส้นทางด้วยวิธีการของมดมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายแบบมีสาย Caro และ Dorigo [6],[7] ได้นำเสนออัลกอริทึมที่เรียกว่า AntNet เพื่อเรียนรู้การปรับตารางการค้นหาเส้นทาง ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่า AntNet มีประสิทธิภาพสูงกว่าการค้นหาเส้นทางแบบอื่นๆ เช่น OSPF และ SPF ต่อมาได้นำเอาอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายแบบไร้สาย เช่น เครือข่ายเคลื่อนที่แบบแอดฮอด โดย F.Cortcia และ T.Vazao [8] และเรียกอัลกอริทึมนี้ว่า SARA ผลของการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า SARA มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางแบบเดิม เช่น อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางเอโอดีวี (AODV)

สำหรับในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายที่มีข้อจำกัดต่างๆ นั้น Xiao-Min Hu และ Jun Zhang [9] ได้เสนออัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางโดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่ายให้เพิ่มมากขึ้น โดยเรียกอัลกอริทึมนี้ว่า ARO และงานวิจัยนี้ทำให้เราได้เกิดแรงบันดาลใจในการนำเสนออัลกอริทึมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมด โดยเราได้พิจารณาจุดเล่ย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และเพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง ทั้งนี้เพื่อลดเล่ย์ที่เกิดขึ้นในเครือข่ายทำให้สถานีฐานได้รับข้อมูลตามเวลาจริงและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของเครือข่ายให้เพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้ แบ่งหัวข้อนำเสนอออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้ หัวข้อที่ 2 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดที่เราได้นำเสนอจะอยู่ในหัวข้อที่ 3 สำหรับการจำลองและผลของการจำลองการทำงานของงานวิจัยนี้อยู่ในหัวข้อที่ 4 และหัวข้อที่ 5 เป็นบทสรุปของงานวิจัยนี้

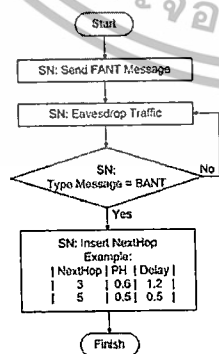
## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย Xiao-Min Hu และ Jun Zhang [9] ได้นำเสนอแนวคิดอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายด้วยวิธีการของมด (เออาร์ไอ) เพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายให้เพิ่มมากขึ้น เออาร์ไอได้นำเอาการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาเส้นทาง

สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย สำหรับวิธีการของเออาร์โอได้พิจารณาการใช้พลังงานของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์เพื่อให้การใช้พลังงานของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายมีสมดุล โดยสามารถแบ่งการใช้พลังงานของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเป็นส่วนๆ คือ พลังงานที่ใช้ในการตรวจจับและพลังงานที่ใช้ในการสื่อสาร วิธีการของเออาร์โอได้พิจารณาการใช้พลังงานต่างๆของโหนดเซ็นเซอร์เพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายแต่ในเออาร์โอไม่ได้พิจารณาดีเลย์ต่างๆที่เกิดขึ้นจากโหนดเซ็นเซอร์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายและไม่มีการปรับปรุงเส้นทางเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายที่โหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่ สำหรับวิธีการที่เราได้นำเสนอเราได้พิจารณาดีเลย์และเพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครือข่าย

### 3. วิธีการที่นำเสนอ

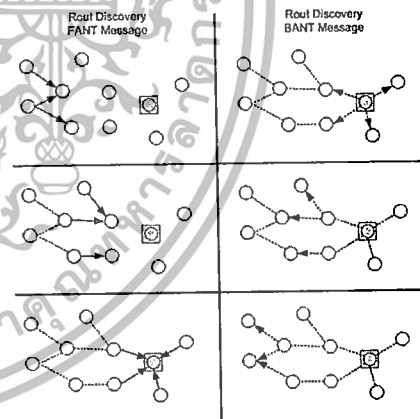
ในงานวิจัยนี้เราได้นำเสนออัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่ปรับปรุงวิธีการของเออาร์โอโดยพิจารณาดีเลย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโหนดเซ็นเซอร์และเพิ่มกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง เราเรียกอัลกอริทึมที่เรานำเสนอว่าอัลกอริทึมการปรับปรุงประสิทธิภาพการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย (ไอ-เออาร์โอ) ขั้นตอนของอัลกอริทึมจะถูกนำเสนอในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น ส่วนๆ คือ กลไกการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Mechanism) กลไกการเลือกเส้นทาง (Route Selection Mechanism) และกลไกการซ่อมแซมเส้นทาง (Route Repair Mechanism)



ภาพที่ 2: แผนผังของกลไกการค้นหาเส้นทาง

### 3.1 กลไกการค้นหาเส้นทาง

เมื่อเครือข่ายครอบคลุมทั่วพื้นที่สังเกตการณ์ ทุกๆ โหนดในเครือข่ายสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้และรู้ตำแหน่งของทุกๆ โหนดที่อยู่ในเครือข่าย ในขั้นตอนนี้เป็นการค้นหาเส้นทางจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยังสถานีฐาน ขั้นตอนแรกโหนดเซ็นเซอร์ที่ไม่ติดกับสถานีฐาน จะทำการส่งข้อความควบคุมเฉพาะกิจ Forward ANT (FANT) ไปยังโหนดข้างเคียงตามเงื่อนไขคือโหนดข้างเคียงต้องอยู่ระหว่างสถานีฐานกับโหนดที่ต้องการค้นหาเส้นทาง หลังจากนั้นเมื่อโหนดข้างเคียงได้รับข้อความควบคุมเฉพาะกิจ FANT แล้วก็ทำการสร้างเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างโหนดและทำการส่งข้อความควบคุมเฉพาะกิจ FANT ไปยังโหนดถัดไปจนกระทั่งถึงสถานีฐาน เมื่อสถานีฐานได้รับข้อความควบคุมเฉพาะกิจ FANT สถานีฐานจะทำการส่งข้อความควบคุมกลับ Backward ANT (BANT) ไปยังเส้นทางเชื่อมโยงต่างๆที่ถูกสร้างขึ้นโดย FANT เมื่อโหนดเซ็นเซอร์ได้รับข้อความ BANT โหนดเซ็นเซอร์จะทำการสร้างตารางเส้นทางตามขั้นตอนดังภาพที่ 2 ขั้นตอนนี้จะสมบูรณ์เมื่อทุกๆ โหนดเซ็นเซอร์ได้รับข้อความ BANT ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3: ตัวอย่างกลไกการค้นหาเส้นทาง

### 3.2 กลไกการเลือกเส้นทาง

ในการส่งข้อมูลกลไกการเลือกเส้นทางเป็นกระบวนการที่สำคัญเพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายเมื่อมีการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยังสถานีฐาน เมื่อเครือข่ายทำการค้นหาเส้นทาง

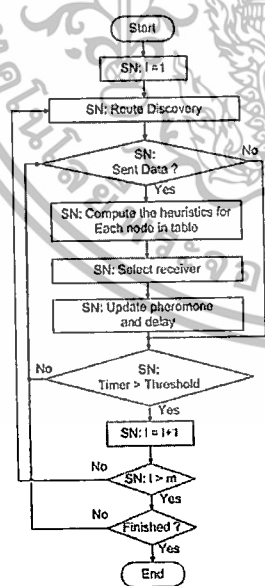
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วโหนดเซ็นเซอร์ต้องการส่งข้อมูลจะเลือกโหนดรับข้อมูล จากความน่าจะเป็นตามขั้นตอนดังภาพที่ 4 โดยคำนวณหาความ หมายวิเศษิตความน่าจะเป็นในการเลือกโหนดรับข้อมูลจาก โหนดข้างเคียงซึ่งหาได้จากสมการ (1)

$$p^h_{(sn,j,bs)} = \frac{\Phi_{(sn,j,bs)} \delta_{(sn,j,bs)}}{\sum_{k=0}^{k=M} \Phi_{(sn,j,bs)} \delta_{(sn,j,bs)}} \quad (1)$$

$p^h_{(sn,j,bs)}$  เป็นความน่าจะเป็นในการเลือกโหนดรับข้อมูล ไปยังสถานีฐานโดยโหนด  $sn$  มีความสัมพันธ์กับค่าฟีโรโมน ของโหนดข้างเคียง  $\Phi_{(sn,j,bs)}$  กับตัวเลขของโหนด ข้างเคียง  $\delta_{(sn,j,bs)}$  เมื่อ  $M$  เป็นจำนวนของโหนดข้างเคียง

ในการปรับปรุงระดับของฟีโรโมน ระดับของฟีโรโมนจะ เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของเส้นทาง เส้นทางที่มีคุณภาพสูงจะมี ระดับของฟีโรโมนที่สูงขณะที่เส้นทางที่มีคุณภาพต่ำระดับ ของฟีโรโมนก็จะต่ำตามไปด้วย ในกระบวนการปรับระดับ ของฟีโรโมนและ พารามิเตอร์ต่างๆในกระบวนการเรียนรู้ เส้นทางที่เหมาะสมตามขั้นตอนดังภาพที่ 4 จะเหมือนกับ อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดในเครือข่าย แบบมีสาย AntNet [6], [7]



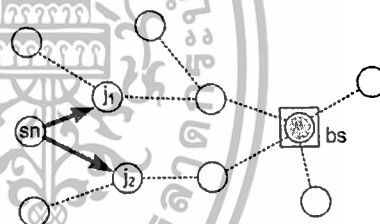
ภาพที่ 4: แผนผังของกลไกการเลือกเส้นทาง

### 3.2.1 ดีเลย์ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่าย เซ็นเซอร์แบบไร้สาย ดีเลย์ (Delay) ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบ ไร้สายเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเครือข่าย ดีเลย์ในเครือข่าย คือเวลาที่ใช้ในการเดินทางของข้อมูลจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยัง สถานีฐาน สามารถเขียนเป็นสมการดีเลย์ระหว่างโหนด เซ็นเซอร์  $sn$  ไปยังสถานีฐานโดยผ่านโหนดข้างเคียง  $j_i$  ดัง แสดงในสมการที่ (2)

$$\delta_{(sn,j_i,bs)} = \left( \frac{1}{pd_{(sn,j_i,bs)} + qd_{(sn,j_i,bs)}} \right)^w \quad (2)$$

โดยที่  $pd_{(sn,j_i,bs)}$  เป็นดีเลย์ของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูลระหว่าง โหนด  $sn$  กับโหนดข้างเคียง  $j_i$   $w$  เป็นพารามิเตอร์ควบคุม น้ำหนักของดีเลย์และ  $qd_{(sn,j_i,bs)}$  คือดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิวที่ โหนด  $j_i$  ปลายทางเป็นสถานีฐาน ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5: แสดงการพิจารณาดีเลย์

### 3.2.2 ดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิว (Queuing Delay)

ดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิวคือเวลาที่ข้อมูลรออยู่ในคิวจนกว่าจะ สามารถดำเนินการได้ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดดีเลย์ใน เครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย ดังสมการที่ (3)

$$qd_{(sn,j_i,bs)} = q_{(sn,j_i,bs)} + ds \quad (3)$$

ซึ่ง  $qd_{(sn,j_i,bs)}$  คือดีเลย์ที่เกิดจากการรอคิวของโหนด  $j_i$   $q_{(sn,j_i,bs)}$  เป็นดีเลย์ในการเดินทางของข้อมูลไปยังหัวคิวและ  $ds$  ดีเลย์ในการให้บริการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ดีเลย์ของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูล (Propagation Delay)

ดีเลย์ของสื่อที่ใช้ในการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายนั้นคือเวลาที่สัญญาณต้องเดินทางผ่านสื่อกลาง (Transmission Medium) จากผู้ส่งข้อมูลไปยังผู้รับข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$pd_{(sn,j_i,bs)} = \frac{d_{(sn,j_i,bs)}}{s} \quad (4)$$

ซึ่ง  $pd_{(sn,j_i,bs)}$  คือดีเลย์ของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูลระหว่างโหนด  $sn$  กับโหนด  $j_i$   $d_{(sn,j_i,bs)}$  เป็นระยะทางระหว่างโหนดเซ็นเซอร์  $sn$  กับโหนดเซ็นเซอร์  $j_i$  และ  $s$  ความเร็วของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูล

#### 3.3 กลไกการซ่อมแซมเส้นทาง

ในการซ่อมแซมเส้นทางนั้นเป็นกระบวนการที่เริ่มเมื่อตรวจพบเส้นทางที่เสียหายระหว่างโหนดเซ็นเซอร์มีความเสียหาย เส้นทางที่มีความเสียหายนั้นสามารถเกิดขึ้นเนื่องจากโหนดหยุดการทำงานจากข้อผิดพลาดในการส่งสัญญาณวิทยุหรือเกิดวาระชนกันของข้อมูลมีจำนวนมาก ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายที่มีโหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่อาจเกิดเส้นทางเสียหายบ่อยครั้ง แต่ขั้นตอนในการซ่อมแซมเส้นทางจะต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วด้วยค่าใช้จ่ายที่ต่ำ

ในการซ่อมแซมเส้นทางอัลกอริทึม I-ARO จะพยายามหาเส้นทางอื่นในพื้นที่ใกล้เคียงของเส้นทางที่เสียหายเพื่อส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน โดยการส่งกระจายข้อความ Repair Forward ANT (R\_FANT) เพื่อหาเส้นทางอื่นที่สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้

## 4. การจำลองและผลของการจำลองทำงาน

ในการจำลองการทำงานของเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สายที่มีโหนดเซ็นเซอร์เคลื่อนที่และได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของงานวิจัยนี้ที่ได้ใช้โปรแกรม Networks Simulator version 2 (NS2) [10] โดยได้จำลองการทำงานของอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ (I-ARO) ทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึมอื่นๆเพื่อทำการวัดประสิทธิภาพหรือผลกระทบที่เกิดจากสถานการณ์ต่างๆ ดังนั้นในการจำลองจะทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม เออาร์โอ (ARO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่นำเอาการ

ค้นหาเส้นทางด้วยวิธีการของมดมาประยุกต์ใช้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย

### 4.1 การจำลองการทำงานของเครือข่าย

ในการจำลองการทำงานและสถานการณ์ของเครือข่ายเราได้ทำการกำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบสุ่มและพารามิเตอร์คุณสมบัติต่างๆของโหนดเซ็นเซอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1

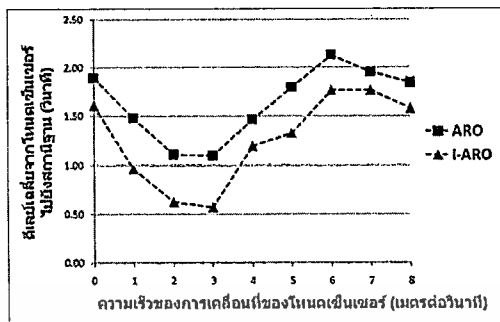
ตารางที่ 1: พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดของพื้นที่	1000 X 1000 ตารางเมตร
พลังงานเริ่มต้นของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์	20 จูล
พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล	0.175 มิลลิวัตต์
พลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล	0.275 มิลลิวัตต์
พลังงานที่ใช้ในการตรวจจับ	1.75 นาโนวัตต์
อัตราการสร้างข้อมูลของแต่ละโหนดเซ็นเซอร์	16 กิโลบิตต่อวินาที
รัศมีของการสื่อสาร	100 เมตร
จำนวนโหนดเซ็นเซอร์	100 โหนด
ความเร็วของโหนดเซ็นเซอร์	0 - 8 เมตรต่อวินาที
พารามิเตอร์ $w$	1

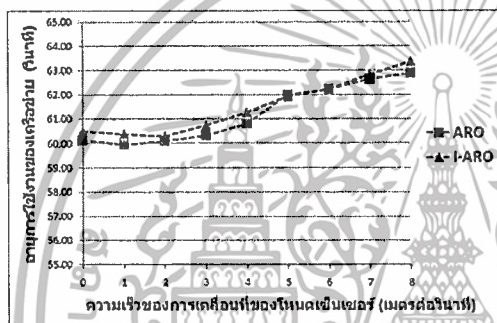
### 4.2 ผลการจำลองการทำงานของเครือข่าย

ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ ที่มีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าอัลกอริทึม เออาร์โอ จากภาพที่ 6 จะพบว่าอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ ให้ดีเลย์ที่ต่ำกว่า อัลกอริทึม เออาร์โอ จากผลการจำลองการทำงานวิธีการที่เรานำเสนอช่วยลดดีเลย์ในเครือข่ายให้น้อยลงเพื่อช่วยให้สถานีฐานได้รับข้อมูลตามเวลาจริงขณะที่ประสิทธิภาพของอายุการใช้งานของเครือข่ายเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม เออาร์โอ วิธีการที่เรานำเสนอช่วยยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายได้ดีกว่า ดังภาพที่ 7

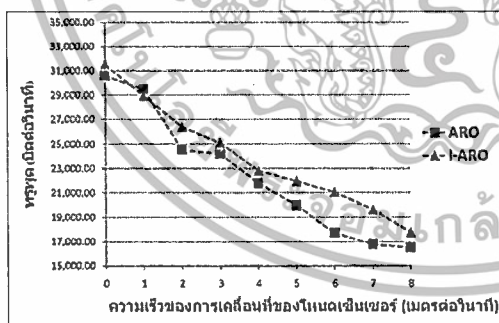
ภาพที่ 8 จะพบว่าประสิทธิภาพด้านทราฟฟิกของเครือข่ายอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ มีประสิทธิภาพในการให้ทราฟฟิกมากกว่า อัลกอริทึม เออาร์โอ เมื่อโหนดเซ็นเซอร์มีความเร็วของการเคลื่อนที่



ภาพที่ 6: ค่าเฉลี่ยของโหนดเคลื่อนที่ไปยังสถานีฐานกับความเร็วของการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์



ภาพที่ 7: อาชีพการใช้งานของเครือข่ายกับความเร็วของการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์



ภาพที่ 8: ทรูทุทกับความเร็วของการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์

5. สรุป

งานวิจัยนี้เราเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (เออาร์โอ) ด้วยการเพิ่มกระบวนการพิจารณาดีเลย์ระหว่างโหนดเซ็นเซอร์

และกลไกการซ่อมแซมเส้นทางเพื่อเลือกเส้นทางที่มีค่าดีเลย์ต่ำที่สุด เราเรียกวิธีการที่เรานำเสนอว่า “อัลกอริทึมการปรับปรุงประสิทธิภาพการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมด (ไอ-เออาร์โอ)” และเนื่องจากการเคลื่อนที่เป็นคุณสมบัติหนึ่งของโหนดเซ็นเซอร์ ในงานวิจัยนี้เราจึงสนใจในผลกระทบของการเคลื่อนที่ของโหนดเซ็นเซอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครือข่าย เราทำการประเมินประสิทธิภาพของ ไอ-เออาร์โอเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม เออาร์โอ [9] ผลการทดลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม ไอ-เออาร์โอ ให้ค่าดีเลย์เฉลี่ยจากโหนดเซ็นเซอร์ไปยังสถานีฐานต่ำกว่า อาชีพการใช้งานของเครือข่ายและทรูทุทที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึม เออาร์โอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11 Issue. 6, pp. 6-28, Dec 2004.
- [2] J. Yick B. Mukherjee and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330. April 2008.
- [3] D. Puccinelli and M. Haenggi. *Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges of Ubiquitous Sensing. IEEE Circuits and Systems Magazine*, 5:19-29, Aug 2005.
- [4] M. Dorigo and M. Birttai, T. Stutzle, "Ant colony Optimization", *Comput. Intell. Mag., IEEE 1 (4)*, pp 28-39, 2006
- [5] M. Dorigo and T. Stutzle, "Ant Colony Optimization", Cambridge, MA. *MIT Press*, 2004.
- [6] G. D. Caro and M. Dorigo, "Antnet: Distributed stigmergetic control for communications networks," *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 9, pp.317-365, 1998.
- [7] Di Caro G.A., Dorigo M., "Two Ant Colony Algorithms for Best-Effort Routing in Datagram Networks" , *Proceedings of PDCS'98*, October 28-31 1998,
- [8] F. Correia and T. Vazao, "Simple Ant Routing Algorithm strategies for a (Multipurpose) MANET model," *ICOIN International Conference*, vol.1, no. 1, pp. 1-8 Jan, 2008.
- [9] X.-M. Hu and J. Zhang, "Ant routing optimization algorithm for extending the lifetime of wireless sensor networks," *IEEE International Conference*, vol. no., no. 1, pp. 738-744, Oct. 2010.
- [10] Network Simulator 2: <http://www.isi.edu/hsnam/ns/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายรณชัย สั้งหมื่นเม้า  
 วัน เดือน ปีเกิด 28 ธันวาคม 2530 ที่ขอนแก่น  
 ที่อยู่ 79 หมู่ที่ 1  
 ตำบลภูเหล็ก อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น 40110 โทร. 0874778519  
 ประวัติการศึกษา 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
 มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
 ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบเครือข่ายไร้สาย  
 2.) ออกแบบระบบเครือข่าย

### ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- [1] รณชัย สั้งหมื่นเม้า และ ศักดิ์ชัย ทิพย์จักขุรัตน์ “การปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการ ของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 ธันวาคม 2555 หน้า 647 – 650
- [2] รณชัย สั้งหมื่นเม้า และ ศักดิ์ชัย ทิพย์จักขุรัตน์ “ผลกระทบของการเคลื่อนที่บนอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธีการของมดสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์แบบไร้สาย” การประชุมทางวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 9 พฤษภาคม 2556 หน้า 523 – 528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้