



โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเอโอดีวีที่คำนึงถึงการใช้พลังงานด้วยวิธีการข้ามระดับชั้น

Cross Layer Energy Aware for AODV Routing Protocol

วาริส ฉันทิ

Waris Chanei

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Computer Engineering  
Prince of Songkla University

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเอโอดีวีที่คำนึงถึงการใช้พลังงานด้วยวิธีการข้ามระดับชั้น  
Cross Layer Energy Aware for AODV Routing Protocol

วาริส ฉันทิ

Waris Chanei

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Computer Engineering  
Prince of Songkla University

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเอไอดีวีที่คำนึงถึงการใช้พลังงาน  
   ด้วยวิธีการข้ามระดับชั้น

ผู้เขียน                นายวาริส จันอิ

สาขาวิชา              วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ดร.สกุณา เจริญปัญญาศักดิ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช ต้นตอมรทัต)

.....กรรมการ

(ดร.กมล เขมระรัมย์)

.....กรรมการ

(ดร.สกุณา เจริญปัญญาศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม  
คอมพิวเตอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน  
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(ดร.ศกุนา เจริญปัญญาศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(นายวาริส จันอิ)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน  
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(นายวาริส จันอ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางเอไอดีวีที่คำนึงถึงการใช้พลังงาน ด้วยวิธีการข้ามระดับชั้น
ผู้เขียน	นายวาริส จันอิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2555

#### บทคัดย่อ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เป็นเครือข่ายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ขนาดเล็กจำนวนมาก ทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม แล้วทำการส่งค่าจากเซนเซอร์ไปยังอุปกรณ์เก็บข้อมูลส่วนกลางโดยใช้การสื่อสารแบบไร้สาย ทำงานบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ส่วนการจัดการการสื่อสารมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่นำไปใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสื่อสารในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จำเป็นต้องใช้โพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่ายในการจัดการเส้นทาง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีการค้นหาเส้นทางใหม่บ่อยครั้ง ส่งผลให้มีจำนวนข้อความควบคุมในระบบเพิ่มขึ้น และค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายลดลง

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้นำเสนอโพรโทคอล Cross Layer Energy Aware for AODV (CLEA-AODV) ซึ่งพัฒนาจากโพรโทคอล Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) ด้วยวิธีการนำค่าพารามิเตอร์ของพลังงาน มาใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง โดยนำมาทำงานร่วมกับโพรโทคอลในระดับชั้น Physical วิธีการดังกล่าวเรียกว่าการทำงานแบบการสื่อสารข้ามระดับชั้น (Cross Layer)

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการของการสื่อสารข้ามระดับชั้น มาใช้ในการแก้ไขอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทาง ซึ่งจากผลลัพธ์การจำลองการทำงาน สามารถเพิ่มค่าสมรรถนะการทำงาน ได้แก่ ค่าอัตราปริมาณงาน และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ เมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV เดิม

**Thesis Title**            Cross Layer Energy Aware for AODV Routing Protocol  
**Author**                    Mr. Waris Chanei  
**Major Program**        Computer Engineering  
**Academic Year**        2012

#### **ABSTRACT**

Wireless sensor networks consist of several tiny sensor nodes which were largely deployed to monitor the environmental conditions. Each sensor node forwards the sense data wirelessly to a base station using IEEE 802.15.4 standard. The wireless network management can be different depending on the applications.

In wireless sensor networks, the network protocol has to be employed in order to manage the route. However, the nature of wireless sensor networks causes a route discovery oftenly. This lead to have a large number of control messages. Therefore, the network performance is decrease. According to those problems, we propose the Cross Layer Energy Aware for AODV (CLEA-AODV) protocol base on Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) protocol for the route discovery using the power parameter consideration. The cross layer technique (Physical and Network Layer) is also applied. By using our techniques, we can achieve a higher performance of throughput and packet delivery ratio compare to the original AODV.

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.สฤณา เจริญปัญญาศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา พร้อมทั้งแนะนำแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์รวมถึงแนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.กมล เขมะรังษี ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในการประสานงานด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการประชุมวิชาการ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร นักศึกษาปริญญาเอก และนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดีเสมอมา

และท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และครอบครัวที่ส่งเสริม และสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ เรื่องจนกระทั่งข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

วาริส จันอิ



## สารบัญ

### หน้า

บทคัดย่อ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง .....	(10)
รายการภาพประกอบ .....	(11)
อภิธานศัพท์.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	7
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	8
1.7 อุปกรณ์และสถานที่วิจัย .....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ .....	9
2.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4 .....	10
2.2 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง.....	12
2.3 การสื่อสารข้ามระดับชั้น .....	23
2.4 การหาค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่าย.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การพัฒนาโพรโทคอล AODV .....	31
3.1 แนวคิดและหลักการออกแบบ .....	31
3.2 การแก้ไขอัลกอริทึมโดยใช้การสื่อสารข้ามระดับชั้น .....	36
3.3 อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV .....	54
บทที่ 4 ผลการทดสอบ .....	60
4.1 เปรียบเทียบการจำลองการทำงานในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งที่ตั้ง .....	63
4.2 เปรียบเทียบการจำลองการทำงานในระบบเครือข่ายแบบกริด .....	70
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	78
5.1 บทสรุปของการทำวิทยานิพนธ์ .....	78
5.2 ปัญหาและอุปสรรคของการทำวิทยานิพนธ์ .....	79
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	80
บรรณานุกรม .....	81
ภาคผนวก .....	87
ภาคผนวก ก การใช้งานโปรแกรม NS-2 .....	88
ภาคผนวก ข การตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์ .....	91
ประวัติผู้เขียน .....	101

## รายการตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงค่าของพลังงานในการเลือกเส้นทาง.....	3
ตารางที่ 2-1 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RREQ.....	14
ตารางที่ 2-2 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RREP.....	16
ตารางที่ 2-3 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RERR.....	17
ตารางที่ 2-4 ความหมายของส่วนของข้อมูลในตารางเก็บค่าเส้นทาง.....	17
ตารางที่ 2-5 ความหมายของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	29
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าเกณฑ์ของระดับพลังงานที่มีค่าต่ำจากงานวิจัยอื่น.....	40
ตารางที่ 3-2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม.....	42
ตารางที่ 3-3 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม.....	48
ตารางที่ 4-1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	62

รายการภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 2-1 รูปแบบของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย .....	11
ภาพประกอบ 2-2 รูปแบบข้อความ Route Request (RREQ).....	14
ภาพประกอบ 2-3 รูปแบบข้อความ Route Reply (RREP).....	15
ภาพประกอบ 2-4 รูปแบบข้อความ Route Error (RERR) .....	16
ภาพประกอบ 2-5 ตารางเก็บค่าเส้นทาง.....	18
ภาพประกอบ 2-6 กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น .....	19
ภาพประกอบ 2-7 กระบวนการตอบกลับการค้นหาเส้นทาง .....	21
ภาพประกอบ 2-8 ลักษณะการทำงานของแต่ละระดับชั้นสื่อสาร .....	23
ภาพประกอบ 2-9 กระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น .....	24
ภาพประกอบ 3-1 การเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV .....	34
ภาพประกอบ 3-2 การเลือกเส้นทางเมื่อมีข้อมูลในข้อความ RREQ เหมือนกัน.....	35
ภาพประกอบ 3-3 การดึงค่าพารามิเตอร์ของพลังงานมาใช้ในระดับชั้นเครือข่าย.....	36
ภาพประกอบ 3-4 การเพิ่มข้อมูลของพลังงานในข้อความ RREQ .....	37
ภาพประกอบ 3-5 เส้นทางสื่อสารที่มีระดับพลังงานสูงทุกเส้นทาง.....	39
ภาพประกอบ 3-6 กำหนดตำแหน่งของโหนดแบบสุ่ม.....	43
ภาพประกอบ 3-7 แสดงค่าอัตราปริมาณงานเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดมากขึ้น .....	44
ภาพประกอบ 3-8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดมากขึ้น .....	45
ภาพประกอบ 3-9 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดมากขึ้น ...	46
ภาพประกอบ 3-10 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกลบทิ้งเนื่องจากเกิดการชนกัน .....	47
ภาพประกอบ 3-11 แสดงค่าอัตราปริมาณงานเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ.....	50
ภาพประกอบ 3-12 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ .....	51
ภาพประกอบ 3-13 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ.....	52
ภาพประกอบ 3-14 การกำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ.....	54
ภาพประกอบ 3-15 การเลือกเส้นทางในกรณีที่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์.....	57
ภาพประกอบ 3-16 การเลือกเส้นทางในกรณีที่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ .....	58

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4-1 ลักษณะของรูปแบบระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง .....	64
ภาพประกอบ 4-2 แสดงค่าอัตราปริมาณงานในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง.....	65
ภาพประกอบ 4-3 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งเนื่องจากชนกันในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง .	66
ภาพประกอบ 4-4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง .....	67
ภาพประกอบ 4-5 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง .....	68
ภาพประกอบ 4-6 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง.....	69
ภาพประกอบ 4-7 ลักษณะของระบบเครือข่ายแบบกริด.....	70
ภาพประกอบ 4-8 แสดงค่าอัตราปริมาณงานในระบบเครือข่ายแบบกริด.....	71
ภาพประกอบ 4-9 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งเนื่องจากการชนกันในระบบเครือข่ายแบบกริด.....	73
ภาพประกอบ 4-10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จในระบบเครือข่ายแบบกริด.....	74
ภาพประกอบ 4-11 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายแบบกริด.....	75
ภาพประกอบ 4-12 แสดงจำนวนแสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งในระบบเครือข่ายแบบกริด .....	76

### อภิธานศัพท์

ความหมายดั้งเดิม	คำที่ใช้งาน
Wireless Sensor Networks	เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
Mobile Ad hoc Networks	เครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายแบบแอดฮอค
Cross Layer	กระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น
Neighbor Nodes	โหนดข้างเคียง
User	ผู้ใช้งาน
Address	ค่าที่อยู่
Transmission Range	ระยะของการส่งข้อมูล
Multi Hop	การสื่อสารแบบหลายช่วงการเชื่อมต่อ
Latency	ระยะเวลาในการส่งข้อมูล
Control Message	ข้อความควบคุม
Overhead	ข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย
Throughput	ค่าอัตราปริมาณงาน
Routing Table	ตารางเก็บค่าเส้นทาง
Sequence Number	หมายเลขลำดับ
Broadcast	การแพร่กระจาย
Packet Delivery Ratio	ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ
Delay	ค่าหน่วงเวลา
Energy	ค่าพลังงาน
Packet Drop	ข้อมูลที่ถูกลบทิ้ง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) เป็นการสื่อสารที่ประกอบด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์จำนวนมากทำการรับและส่งข้อมูล ซึ่งระบบประเภทนี้สามารถสื่อสารกันเองหรือส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์เซนเซอร์ตัวอื่นที่อยู่ใกล้เคียงไปยังปลายทางที่ต้องการ ผ่านการสื่อสารแบบไร้สาย [1-2] สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์ มีโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย (Network Layer) ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับการค้นหาเส้นทางสื่อสาร และซ่อมแซมเส้นทางเมื่อการติดต่อสื่อสารมีปัญหา ซึ่งโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่ายที่สามารถนำมาใช้งานกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้มีหลายโพรโทคอล ได้แก่ Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)[3], Optimized Link State Routing (OLSR) [4] และ Dynamic Source Routing (DSR) [5] ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้โพรโทคอล Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [6] ทำหน้าที่เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง แต่โพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม ถูกออกแบบมาสำหรับใช้กับเครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายแบบแอดฮอค (Mobile Wireless Ad hoc Networks) [7] ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในเรื่องของทรัพยากรและพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด [8] ดังนั้นเมื่อนำโพรโทคอล AODV มาประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จะพบว่าเมื่อพลังงานของโหนดในเส้นทางสื่อสารหมดลง จะส่งผลกระทบต่อระบบเครือข่าย ทำให้ค่าสมรรถนะลดลง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการออกแบบและปรับปรุงอัลกอริทึมในการค้นหาและเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยการใช้เทคนิคกระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น (Cross Layer) และเรียกโพรโทคอลนี้ว่า Cross Layer Energy Aware for AODV (CLEA-AODV)

โพรโทคอล CLEA-AODV เป็นโพรโทคอลที่พัฒนาอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยการนำค่าพารามิเตอร์ของระดับพลังงานจากระดับชั้น Physical ด้วยวิธีการสื่อสารข้ามระดับชั้น มาใช้เป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง โดยมีหลักการทำงาน คือ หากในระบบเครือข่ายมีเส้นทางสื่อสารมากกว่า 1 เส้นทาง แล้วเส้นทางแรกที่ถูกเลือกมีค่าระดับพลังงานเสี่ยงต่อการที่พลังงานจะหมดลง หากมีเส้นทางอื่นที่มีค่าระดับพลังงานสูงกว่าเส้นทางก่อนหน้าที่ถูกเลือก วิธีการนี้จะทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าระดับพลังงานที่สูงกว่า และทำการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางสื่อสารเส้นใหม่แทนเส้นทางเดิม ซึ่งจากการจำลองการทำงานพบว่า

โพรโทคอล CLEA-AODV สามารถช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบเครือข่ายในเรื่องของค่าอัตราปริมาณงาน และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ รวมทั้งสามารถลดจำนวนข้อความสื่อสารในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้

## 1.2 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สนใจการพัฒนาอัลกอริทึมการค้นหาและเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยนำค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของแต่ละโหนดในเส้นทางสื่อสาร มาเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง จากการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยพบว่า มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงค่าพลังงานจำนวนมาก แต่จะมีวัตถุประสงค์ของแต่ละงานแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Energy efficiency) การลดค่าหน่วงเวลา (Delay) การเพิ่มอายุการทำงานของระบบเครือข่าย (Network Lifetime) การเพิ่มค่าอัตราปริมาณงาน (Throughput) และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ (Packet Delivery Ratio; PDR) เป็นต้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษาการพัฒนาโพรโทคอล AODV ที่ช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงาน ในประเด็นของค่าอัตราปริมาณงาน ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ และการลดจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย ซึ่งพบว่างานวิจัยที่ตรงกับประเด็นที่สนใจสามารถสรุปไว้ดังแสดงในตารางที่ 1-1

จากการสืบค้นงานวิจัยที่พัฒนาโพรโทคอล AODV โดยนำค่าพลังงานมาเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง พบว่าอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น มีความคล้ายคลึงกับโพรโทคอล AODV เดิม คือ โหนดต้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูลถึงโหนดปลายทาง จะทำการแพร่กระจาย (Broadcast) ข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง ส่วนอัลกอริทึมที่แตกต่างจากโพรโทคอล AODV เดิม คือ ในส่วนของข้อความ RREQ มีการแก้ไขโดยเพิ่มการเก็บข้อมูลระดับพลังงานของแต่ละโหนดในเส้นทางสื่อสาร และมีลักษณะของอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของแต่ละโพรโทคอล ซึ่งเป็นส่วนที่แตกต่างกัน ดังสรุปจากตารางที่ 1-1 สามารถแบ่งประเภทของโพรโทคอลตามลักษณะของอัลกอริทึมในการใช้ค่าพลังงานเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทางออกเป็น 3 ประเภท คือ



ตารางที่ 1-1 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางที่คำนึงถึงค่าของพลังงานในการเลือกเส้นทาง

Protocol	Tool	Algorithm			MAC IEEE		Compare with AODV Performance (✓) = Better, (✗) = Lower					
		Modify Delay	Non-Broadcast	Cost & Equation	802.11	802.15.4	PDR	Throughput	Overhead	Delay	lifetime	Energy efficiency
ALMEL-AODV [9]	NS-2			✓	✓		✓				✓	
DEEAR [10]	NS-2			✓	✓		✓	✗		✗	✓	✓
EAAODV [11]	NS-2		✓	✓	✓			✓				
EADV [12]	OMNET++			✓		✓						✓
EAODV [13]	MATLAB			✓							✓	
E-AODV [14]	NS-2	✓			✓						✓	
ECB-AODV [15]	NS-2		✓		✓				✓		✓	✓
ELBRP [16]	NS-2	✓				✓				✗	✓	
GEANDMRA [17]	NS-2		✓	✓	✓		✓		✓	✓		
LSEA [18]	NS-2		✓		✓		✓		✓	✓	✓	
ME-AODV [19]	NS-2			✓		✓	✓		✓			✓
PAMP [20]	GlomoSim			✓	✓		✓	✓	✗		✓	
SQ-AODV [21]	NS-2			✓	✓		✓	✓	✓		✓	

1. แก้ไขค่าหน่วงเวลา (Delay time) ของข้อความ RREQ เมื่อมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ โพรโทคอล Enhanced AODV (E-AODV) [14] และ Energy Level Routing Base Protocol (ELBRP) [16] หลักการทำงาน คือ เมื่อโหนดข้างเคียงได้รับข้อความ RREQ จากโหนดต้นทาง จะทำการตรวจสอบระดับพลังงานของตนเอง หากมีระดับพลังงานต่ำกว่าค่าที่กำหนด (Threshold) จะทำการเพิ่มค่าหน่วงเวลาให้กับข้อความ RREQ ที่ถูกส่งออกไป เมื่อข้อความ RREQ ผ่านโหนดที่มีระดับพลังงานน้อย ส่งผลให้ข้อความ RREQ ดังกล่าวมาถึงโหนดปลายทางหลังข้อความ RREQ ที่ผ่านโหนดที่มีระดับพลังงานมากกว่า ดังนั้นโหนดปลายทางจะได้รับข้อความ RREQ จากโหนดที่มีค่าพลังงานสูงก่อน เมื่อโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ จึงส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทาง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากอัลกอริทึมนี้ พบว่ามีข้อเสีย คือ ค่าหน่วงเวลาของโพรโทคอลดังกล่าว มีค่าสูงกว่าโพรโทคอล AODV เดิม

2. กำหนดช่วงของระดับพลังงาน (Threshold) ที่อนุญาตให้สามารถส่งต่อข้อความ RREQ ได้แก่ โพรโทคอล Energy Aware AODV (EAAODV) [11], Energy Constraint protocol Base on AODV (ECB-AODV) [15], Grid-based Energy Aware Node-Disjoint Multipath Routing Algorithm (GEANDMRA) [17] และ Link Stability and Energy Aware (LSEA) [18] หลักการทำงาน คือ เมื่อโหนดข้างเคียงได้รับข้อความ RREQ จากโหนดต้นทาง จะทำการตรวจสอบระดับพลังงานของตนเอง หากมีระดับพลังงานต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จะไม่อนุญาตให้มีการส่งต่อข้อความ RREQ ดังนั้นโหนดที่มีระดับพลังงานเหลือน้อย จะไม่สามารถส่งต่อข้อความ RREQ ไปถึงโหนดปลายทางได้ โดยเกณฑ์ในการกำหนดค่าระดับพลังงาน กำหนดได้จากการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ [11] และ [17] และจากการทดลองจำลองการทำงาน [15] และ [18] สำหรับข้อเสียของอัลกอริทึมดังกล่าว คือ หากไม่มีเส้นทางสื่อสารอื่น ที่มีค่าระดับพลังงานสูงกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนด โหนดปลายทางจะไม่ได้รับข้อความ RREQ เนื่องจากโหนดข้างเคียงที่มีระดับพลังงานน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไม่สามารถส่งต่อข้อความ RREQ ได้ ซึ่งส่งผลให้โหนดต้นทางไม่สามารถติดต่อกับโหนดปลายทางได้ แม้ว่าจะยังมีพลังงานที่สามารถสื่อสารถึงกันได้

3. กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักให้กับแต่ละเส้นทาง (Cost Routes) ในระบบเครือข่าย ได้แก่ โพรโทคอล Alternate Link Maximum Energy Level AODV (ALMEL-AODV) [9], Distributed Energy Efficient AODV Routing (DEEAR) [10], Energy Aware Distance Vector (EADV) [12], Energy aware AODV (EAODV) [13], Multipath Energy Aware (ME-AODV) [19], Power-Aware Multi-Path Routing Protocol (PAMP) [20] และ Stability-base QOS-capable AODV

(SQ-AODV) [21] หลักการทำงาน คือ ทำการเก็บข้อมูลของระดับพลังงานของแต่ละโหนดในเส้นทาง แล้วนำสมการทางคณิตศาสตร์มาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักให้กับแต่ละเส้นทางในระบบเครือข่าย โดยเส้นทางที่มีค่าถ่วงน้ำหนักมากหรือน้อยที่สุด ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของแต่ละโพรโทคอล จะเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกเป็นเส้นทางสื่อสาร ลักษณะของอัลกอริทึมนี้ มีความซับซ้อนมากกว่า 2 แบบแรก ยกตัวอย่างเช่น โพรโทคอล ALMEL-AODV ทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าพลังงานสูงสุด โดยใช้สมการ  $\text{Max } E(i) = \sum_{i=1}^{n-1} E(i+1)$  [9] โพรโทคอล PAMP ทำการคำนวณค่าพลังงานที่สามารถใช้ได้บนเส้นทางสื่อสาร จากสมการ  $E_{\text{avail}} = E_{\text{max}} - \sum_i E_{\text{resv}}(i)$  [20] แล้วเลือกเส้นทางที่มีค่าดังกล่าวสูงที่สุด เป็นต้น ผลลัพธ์การทำงานของแต่ละโพรโทคอลที่ได้พัฒนา โดยส่วนใหญ่ทำการเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV เดิม และมีค่าสมรรถนะที่ดีกว่า

จากตารางที่ 1-1 พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้การจำลองการทำงานผ่านซอฟต์แวร์ Network Simulation version 2 (NS-2) และเลือกใช้มาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นโพรโทคอลในระดับชั้น Physical และ MAC แต่มีบางงานวิจัย [12],[16] และ [19] ที่เลือกใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในส่วนของงานวิทยานิพนธ์นี้ สนใจจำลองการทำงานบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงเลือกใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในการจำลองการทำงาน

จากตารางที่ 1-1 แต่ละงานวิจัยได้ทำการเลือกวัดค่าประสิทธิภาพและค่าสมรรถนะการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับจุดเด่นของโพรโทคอล และความสนใจของแต่ละงานวิจัย ซึ่งมีค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพที่งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการวัด ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ (PDR) ค่าอัตราปริมาณงาน (Throughput) ค่าหน่วงเวลา (Delay) จำนวนข้อความควบคุม (Overhead) ค่าอายุทำงานของเครือข่าย (Network Life Time) และปริมาณของพลังงานที่ใช้ไป (Energy Usage) โดยผลลัพธ์ที่นำมาแสดง ส่วนใหญ่ทำการเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV เดิม และเลือกแสดงค่าประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า แต่มีบางงานวิจัยที่แสดงค่าประสิทธิภาพที่แย่กว่าโพรโทคอล AODV เดิม เช่น โพรโทคอล DEEAR [10] มีผลลัพธ์ของค่าอัตราปริมาณงาน และค่าหน่วงเวลาแย่กว่าโพรโทคอล AODV เดิม โพรโทคอล PAMP [20] มีจำนวนข้อความควบคุมในระบบมากกว่าโพรโทคอล AODV เดิม เป็นต้น งานวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้แสดงค่าประสิทธิภาพครบทุกค่า แต่เลือกแสดงเฉพาะค่าประสิทธิภาพที่สนใจ ซึ่งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นในส่วนของการเพิ่มค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงาน ในเรื่องของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ (PDR) ค่าอัตราปริมาณงาน (Throughput) และลดจำนวนข้อความควบคุม (Overhead) ในระบบเครือข่าย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการพัฒนาโปรโตคอล AODV โดยแก้ไขอัลกอริทึมในการค้นหาและเลือกเส้นทางใหม่ และเรียกโปรโตคอลนี้ว่า Cross Layer Energy Aware for AODV (CLEA-AODV) เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการทำงานของโปรโตคอลนี้กับโปรโตคอลอื่นๆ ที่ได้พัฒนามาจากโปรโตคอล AODV และนำค่าพลังงานมาใช้ในการเลือกเส้นทางเช่นเดียวกัน พบว่ามีหลักการในการแก้ไขโปรโตคอล AODV ที่คล้ายคลึงกัน คือ การแก้ไขข้อความ RREQ เพื่อเพิ่มการเก็บค่าข้อมูลของระดับพลังงานของโหนดในเส้นทางสื่อสาร และมีการเพิ่มอัลกอริทึมในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง โดยใช้ข้อมูลของค่าระดับพลังงาน ส่วนความแตกต่างของโปรโตคอล CLEA-AODV กับโปรโตคอลอื่น คือ ค่าระดับพลังงานของโหนดในเส้นทางที่โปรโตคอล CLEA-AODV นำมาพิจารณา ไม่ใช่ค่าพลังงานเฉลี่ยของทุกๆ โหนดในเส้นทาง และไม่ใช่สมการทางคณิตศาสตร์ในการกำหนดค่าน้ำหนักของเส้นทางสื่อสาร แต่เป็นการเก็บเฉพาะค่าพลังงานของโหนดในเส้นทางสื่อสารที่เหลือพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีความง่าย (Simple) ไม่ซับซ้อน ในส่วนของหลักการการทำงานมีการแบ่งโหมดการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ หากเส้นทางแรกที่ถูกเลือก มีค่าของระดับพลังงาน (Threshold) เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จะใช้อัลกอริทึมในการค้นหาและเลือกเส้นทางเหมือนโปรโตคอล AODV แต่หากค่าระดับพลังงานต่ำกว่าค่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ จะใช้ค่าระดับพลังงานมาเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทางแทน โดยเกณฑ์ในการกำหนดค่าระดับพลังงานที่มีความเสี่ยงต่อการที่พลังงานจะหมดลง กำหนดไว้ที่ เมื่อระดับพลังงานในเส้นทางสื่อสารมีค่าต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ (เกณฑ์ในการกำหนดค่าระดับพลังงานอธิบายไว้ในบทที่ 3) หากเส้นทางแรก มีค่าระดับพลังงานเหลือน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะถือว่ามีความเสี่ยงที่เส้นทางสื่อสารจะขาดลงเนื่องจากโหนดในเส้นทางพลังงานหมดลง ดังนั้นหากมีเส้นทางอื่นที่มีค่าระดับพลังงานมากกว่า อัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโปรโตคอล CLEA-AODV จะเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่แทนเส้นทางเดิม ซึ่งจากการสืบค้นข้อมูลพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ใช้ อัลกอริทึมนี้ในการพัฒนาโปรโตคอล AODV ในส่วนของรายละเอียดการออกแบบโปรโตคอล ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนากระบวนการค้นหาเส้นทางในโพรโทคอล AODV ด้วยเทคนิคกระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น และใช้ค่าพลังงานคงเหลือของเซนเซอร์สำหรับการพิจารณาเลือกเส้นทาง

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ใช้กระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้นในการปรับปรุงอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้กับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

1.4.2 เป็นการใช้อารามิเตอร์ของพลังงานซึ่งอยู่ในระดับชั้น Physical ทำงานร่วมกับโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย เพื่อช่วยในการตัดสินใจสำหรับเลือกเส้นทางสื่อสาร

1.4.3 การจำลองการทำงานแต่ละแบบ จำลองในรูปแบบที่โหนดอยู่กับที่ และใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4

### 1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 13 ขั้นตอน เริ่มจากเดือนมิถุนายน 2553 และสิ้นสุด เดือนกันยายน 2555 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ขั้นที่ 1: ศึกษาแนวทาง และวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นที่ 2: ศึกษาการทำงานของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในระดับชั้นเครือข่าย ระดับชั้น MAC และระดับชั้น Physical

ขั้นที่ 3: ศึกษากระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น เพื่อนำมาใช้ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ขั้นที่ 4: ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Network Simulation version 2 (NS-2)

ขั้นที่ 5: ศึกษาอัลกอริทึมการทำงานของโพรโทคอล AODV ในโปรแกรม NS-2

ขั้นที่ 6: ออกแบบและแก้ไขอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV

ขั้นที่ 7: แก้ไขอัลกอริทึมการทำงานของโพรโทคอล AODV ในโปรแกรม NS-2

ขั้นที่ 8: ออกแบบรูปแบบของการจำลองการทำงาน

ขั้นที่ 9: ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล AODV

ขั้นที่ 10: เปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองการทำงาน ของโพรโทคอลที่ได้ทำการออกแบบใหม่กับโพรโทคอลมาตรฐาน

ขั้นที่ 11: วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้รับการพัฒนาขึ้นมานานกว่า 10 ปี ปัจจุบันถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น การเฝ้าระวังสุขภาพทางการแพทย์ การเก็บข้อมูลทางด้านเกษตร และการควบคุมอัตโนมัติในโรงงาน เป็นต้น ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายประกอบด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กที่เรียกว่า โหนด ที่สามารถส่งข้อมูลถึงกันผ่านทางโปรโตคอลสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แต่เนื่องจากอุปกรณ์โหนดมีขนาดเล็กและใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้สะดวกในการติดตั้งและใช้งานเพราะโหนดในระบบสามารถมีได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบและพัฒนาทางด้านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจึงต้องคำนึงถึงการประหยัดพลังงานทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และโปรโตคอลที่ใช้ [22] สำหรับอุปกรณ์โหนดโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้ [23]

- หน่วยประมวลผล (CPU) ประกอบด้วย ตัวประมวลผล และ หน่วยความจำ ทำหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล
- เซนเซอร์ตรวจจับข้อมูล (Sensor) ทำหน้าที่ตรวจวัดหรือตรวจจับข้อมูลที่เราสสนใจ
- ส่วนของการติดต่อสื่อสาร (Transmitter) เป็นส่วนที่กำหนดคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ในการสื่อสาร ทำหน้าที่เป็นตัวรับและตัวส่งข้อมูล
- แบตเตอรี่ (Battery) ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์เซนเซอร์

เนื่องจากในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นในระหว่างการสื่อสาร มีโอกาสที่โหนดในเส้นทางสื่อสารพลังงานจะหมดลง ซึ่งส่งผลให้โหนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูลถึงโหนดปลายทางได้ ทำให้ค่าอัตราปริมาณงานและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการปรับปรุงโปรโตคอลการค้นหาเส้นทาง โดยนำค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนดในเส้นทางสื่อสาร มาเป็นตัวแปรหนึ่งในการเลือกเส้นทางสื่อสาร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดของการปรับปรุงโปรโตคอลไว้ในบทที่ 3

การสื่อสารภายในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยที่โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่เลือกใช้สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้คือ โพรโทคอล Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) และเลือกใช้เทคนิคกระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น (Cross Layer) มาช่วยในการปรับปรุงโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่นำค่าพลังงานคงเหลือมาพิจารณาเลือกเส้นทาง เพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพการทำงานให้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยที่เนื้อหาที่เกี่ยวข้องในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้อธิบายไว้ในแต่ละหัวข้อต่อไป

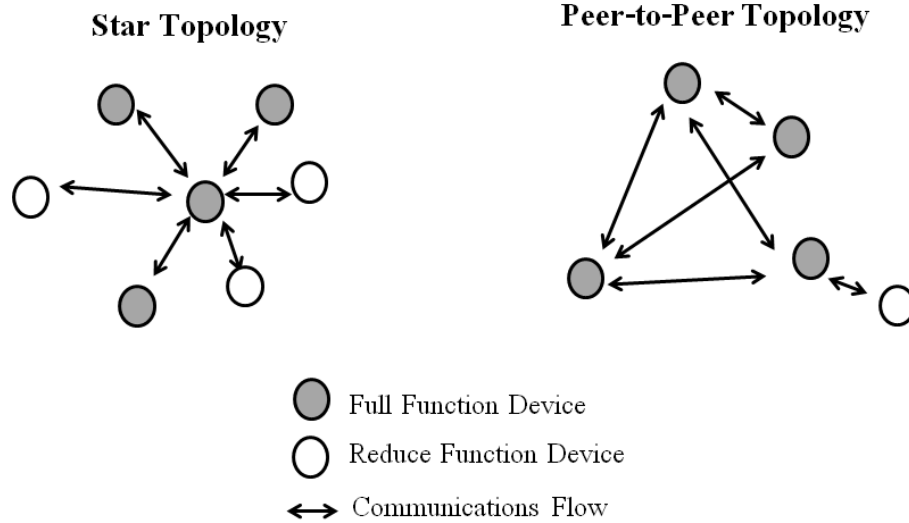
## 2.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 [24] มีความเหมาะสมกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบความเร็วต่ำ มีอัตราในการส่งข้อมูลน้อย และมีระยะของการส่งข้อมูลสั้น ลักษณะรูปแบบการทำงาน มีทั้งรูปแบบที่อุปกรณ์เซนเซอร์ติดตั้งอยู่กับที่ และรูปแบบที่อุปกรณ์เซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ สำหรับมาตรฐานนี้ จะกำหนดเฉพาะกระบวนการทำงานอยู่ในระดับชั้น Medium Access Control (MAC) และ Physical

ในระดับชั้น Physical มีหน้าที่ในการจัดการเกี่ยวกับคลื่นความถี่และจำนวนช่องสัญญาณ โดยมีลักษณะที่แตกต่างกัน 3 คลื่นความถี่ ได้แก่

- คลื่นความถี่ 868 MHz มี 1 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูล 20 kbps มีระยะในการส่งประมาณ 1 km
- คลื่นความถี่ 915 MHz มี 10 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูล 40 kbps มีระยะในการส่งประมาณ 1 km
- คลื่นความถี่ 2.4 GHz มี 16 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูล 250 kbps มีระยะในการส่งข้อมูลประมาณ 220 m

ในระดับชั้น MAC มีหน้าที่ในการจัดการเกี่ยวกับการเข้าใช้ช่องสัญญาณ และการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล สามารถรองรับขนาดแพ็กเก็ตได้สูงสุด 128 ไบต์ ก่อนการส่งข้อมูลมีการใช้อัลกอริทึม Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) คือ จะทำการตรวจสอบว่า ช่องสัญญาณว่างหรือไม่ เพื่อลดปัญหาการชนกันของข้อมูล (Collision) โดยมี 2 โหมดการทำงาน คือ โหมด Beacon-enabled มีโหนดตัวกลาง (PAN coordinator) คอยจัดการ การเข้าใช้ช่องสัญญาณ และ โหมด Non beacon-enabled ไม่มีตัวกลางที่คอยจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณ สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แบ่งรูปแบบของระบบเครือข่ายออกเป็น 2 รูปแบบ ดังภาพประกอบ 2-1 [25]



ภาพประกอบ 2-1 รูปแบบของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

- Star Topology เหมาะสมกับระบบเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก ระยะเวลาในการส่งข้อมูล (Latency) ต่ำ โดยมีโหนดตัวกลางคอยจัดการ การเข้าใช้ช่องสัญญาณ

- Peer-to-Peer Topology เหมาะสมกับรูปแบบเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนของโหนดสูง แต่ไม่คำนึงถึงระยะเวลาในการส่งข้อมูล การทำงานเป็นแบบหลายฮอป แต่ละโหนดสามารถสื่อสารกันเอง ซึ่งการสื่อสารในรูปแบบดังกล่าว จะต้องใช้หน่วยความจำในการเก็บข้อมูลของตารางเก็บค่าเส้นทาง (Routing Table) เพื่อใช้ในการจัดการเส้นทางสื่อสาร

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สนใจรูปแบบเครือข่ายที่ประกอบด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์จำนวนมากกว่า 2 โหนด การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นแบบหลายช่วงการเชื่อมต่อ และกำหนดให้โหนดไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งตรงกับรูปแบบเครือข่าย Peer-to-Peer Topology ดังนั้นจึงเลือกใช้โหมดการทำงานแบบ Non beacon-enabled เนื่องจากในการทดลองแม้ว่าโหนดไม่มีการเคลื่อนที่ แต่ในระบบเครือข่ายมีเซนเซอร์จำนวนมาก อีกทั้งระหว่างการสื่อสารมีการเปลี่ยนโหนดต้นทาง และในกรณีที่มีโหนดเชื่อมต่อในเส้นทางสื่อสารพลังงานหมดลง จะต้องมีการค้นหาเส้นทางใหม่ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้โปรโตคอลการค้นหาเส้นทาง ในการทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับเส้นทางสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์



## 2.2 โพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง มีความสำคัญกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เนื่องจากในระบบเครือข่ายที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์จำนวนมาก หากโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง มีระยะห่างกันเกินกว่าระยะของการส่งข้อมูล (Transmission Range) ย่อมไม่สามารถสื่อสารถึงกันได้โดยตรง จึงต้องใช้โหนดข้างเคียงเป็นตัวกลางในการส่งต่อข้อมูล ซึ่งกระบวนการดังกล่าว ต้องใช้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในการเลือกที่จะใช้โหนดใดบ้าง ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง สำหรับประเภทของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมี 2 ประเภท คือ โพรโทคอล Proactive และ โพรโทคอล Reactive [26]

โพรโทคอล Proactive มีกระบวนการการจัดการเส้นทาง โดยจะส่งข้อความควบคุม (Control Message) เพื่อคอยตรวจสอบและปรับปรุงเส้นทางเป็นคาบเวลาคงที่ แม้ว่าจะไม่มีการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์ โพรโทคอลจะคอยตรวจสอบและปรับปรุงเส้นทางตลอดเวลา ดังนั้นโพรโทคอล Proactive จะมีข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย (Overhead) จำนวนมาก แต่มีข้อดี คือ เมื่อต้องการส่งข้อมูล สามารถส่งข้อมูลได้ทันที ได้แก่ โพรโทคอล Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) และโพรโทคอล Optimized Link State Routing (OLSR) เป็นต้น

โพรโทคอล Reactive มีกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยใช้การแพร่กระจายข้อความสื่อสารออกไปค้นหาเส้นทาง ซึ่งจะทำการค้นหาเส้นทางเฉพาะเมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น ดังนั้นจึงมีข้อความสื่อสารในระบบน้อยกว่าโพรโทคอล Proactive แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ระยะเวลาในการค้นหาเส้นทาง ก่อนที่จะสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้ มีโพรโทคอลประเภทดังกล่าว ได้แก่ โพรโทคอล Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) และโพรโทคอล Dynamic Source Routing (DSR) เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากหลักการทำงานของโพรโทคอลทั้งสองแบบ โพรโทคอล Reactive จึงมีความเหมาะสมกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมากกว่า เนื่องจากมีการใช้ทรัพยากร และมีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายน้อยกว่าโพรโทคอล Proactive ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง เพราะโพรโทคอลดังกล่าว มีอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น (Route discovery) พัฒนามาจากโพรโทคอล DSR และอัลกอริทึมในการตรวจสอบเส้นทาง (Route Maintenance) มีหลักการเดียวกับโพรโทคอล DSDV แต่มีความแตกต่างตรงที่ คาบเวลาในการแพร่กระจายข้อความสื่อสารเพื่อตรวจสอบเส้นทาง มีคาบเวลาไม่คงที่เหมือนโพรโทคอล DSDV วิธีการดังกล่าว ช่วยให้ใช้แบนด์วิดท์อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถลดจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม

ตามการนำโพรโทคอล AODV ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายแบบแอดฮอก มาใช้กับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งมีปัจจัยในเรื่องของพลังงานมาเกี่ยวข้อง อาจไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการปรับปรุงอัลกอริทึมการค้นหาและเลือกเส้นทางให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมากยิ่งขึ้น

### 2.2.1 Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

โพรโทคอล AODV [6] คือ โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายแบบแอดฮอก มีรูปแบบการสื่อสาร ที่ไม่จำเป็นต้องมีสถานีฐาน (Base station) คอยควบคุมการทำงาน ในส่วนของการสื่อสารถึงกัน อุปกรณ์เซนเซอร์แต่ละตัว สามารถเป็นได้ทั้งโหนดรับ โหนดส่ง และโหนดเชื่อมต่อ หน้าที่หลักของโพรโทคอล AODV คือ ทำการค้นหาเส้นทางสื่อสารเริ่มต้น และซ่อมแซมเส้นทางเมื่อระบบเครือข่ายเกิดข้อผิดพลาดในการสื่อสาร โพรโทคอล AODV มีความเหมาะสมกับเครือข่ายที่มีจำนวนหลายๆ โหนด และสามารถทำงานได้ทั้งในรูปแบบเครือข่ายที่โหนดมีการเคลื่อนที่และโหนดติดตั้งอยู่กับที่ โดยโพรโทคอล AODV มีหลักการทำงานเบื้องต้นดังนี้

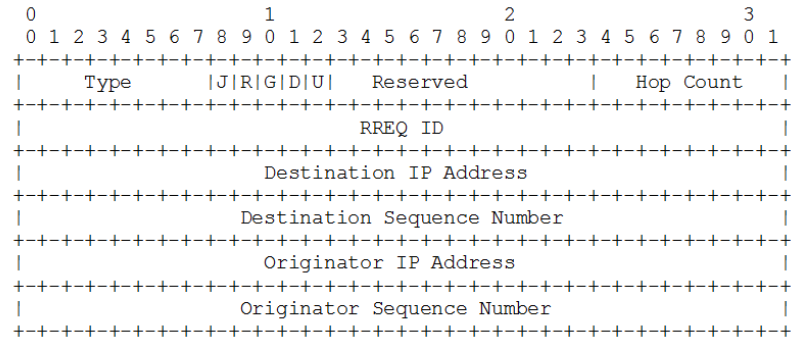
- ทำการค้นหาเส้นทางเฉพาะเมื่อต้องการส่งข้อมูล
- ทำการตรวจสอบรักษาเส้นทางโดยใช้ข้อมูลจากโหนดข้างเคียง
- ทำการปรับปรุงข้อมูลของเส้นทาง เมื่อโหนดรอบข้างมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง
- ใช้กระบวนการแพร่กระจายข้อความควบคุมเพื่อค้นหาและปรับปรุงเส้นทางสื่อสาร

### 2.2.2 ข้อความควบคุมและตารางเก็บค่าเส้นทางในโพรโทคอล AODV

โพรโทคอล AODV มีกระบวนการในการค้นหาและจัดการเส้นทางโดยใช้ข้อความควบคุม (Control message) โดยทำการส่งต่อข้อความผ่านโหนดข้างเคียงไปจนถึงโหนดปลายทาง ซึ่งแต่ละโหนดที่ได้รับข้อความควบคุม จะทำการตรวจสอบและจัดเก็บค่าเกี่ยวกับรายละเอียดของเส้นทางสื่อสาร เช่น เลขกำกับข้อความ (Message ID) เลขลำดับของข้อความ (Sequence Number) และตัวเลขตำแหน่งที่อยู่ (IP Address) เป็นต้น ในส่วนของตัวเลขตำแหน่งที่อยู่ จากเอกสารอ้างอิง [6] เป็นตัวเลขในมาตรฐานของ IPv4 ขนาด 32 บิต แต่กระบวนการทำงานในซอฟต์แวร์จำลองการทำงาน ใช้ตัวเลขกำกับ (ID) เป็นตัวเลขที่อยู่ของแต่ละโหนดแทน ข้อมูลดังกล่าวมา จะถูกเก็บไว้ในข้อความควบคุม และตารางเก็บค่าเส้นทาง (Routing table) ซึ่งข้อความควบคุมในโพรโทคอล AODV ประกอบด้วย ข้อความ Route request message (RREQ) ข้อความ

Route reply message (RREP) และข้อความ Route error message (RERR) แต่ละข้อความมีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของข้อความควบคุมแต่ละข้อความและตารางเก็บค่าเส้นทาง ดังนี้

### Route request message (RREQ)



ภาพประกอบ 2-2 รูปแบบข้อความ Route Request (RREQ)

ข้อความ RREQ [6] มีขนาด 24 ไบต์ ประกอบไปด้วยส่วนของข้อมูลที่เก็บค่าต่างๆ ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RREQ

ส่วนของข้อมูล	ความหมาย
Type	ชนิดของข้อความ เป็น 1
Hop Count	จำนวนโหนดที่ข้อความ RREQ ผ่านมาจากต้นทาง จนถึงโหนดที่ RREQ มาถึง
RREQ ID	หมายเลขลำดับของข้อความ RREQ แต่ละชุดที่ทำการแพร่กระจาย
Destination IP Address	เลขไอพีที่อยู่ของโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลถึง

ตารางที่ 2-1 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RREQ (ต่อ)

ส่วนของข้อมูล	ความหมาย
Destination Sequence Number	เลขลำดับล่าสุดจากโหนดต้นทาง
Originator IP Address	หมายเลขไอพีของโหนดต้นทาง ซึ่งทำการสร้างและส่งข้อความ RREQ เพื่อหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง
Originator Sequence Number	หมายเลขลำดับ ณ ปัจจุบัน

### Route reply message (RREP)

```

0          1          2          3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
|   Type   |R|A|  Reserved  |Prefix Sz| Hop Count |
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
|
|                Destination IP address                |
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
|
|                Destination Sequence Number              |
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
|
|                Originator IP address                    |
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
|
|                Lifetime                                  |
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+

```

ภาพประกอบ 2-3 รูปแบบข้อความ Route Reply (RREP)

ข้อความ RREP [6] มีขนาด 20 ไบต์ จะประกอบไปด้วยส่วนของข้อมูลที่เก็บค่าต่างๆ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RREP

ส่วนของข้อมูล	ความหมาย
Type	ชนิดของข้อความ เป็น 2
Hop Count	จำนวนของฮอป จากต้นทางจนถึงปลายทาง
Destination IP Address	หมายเลขไอพีของโหนดปลายทางในเส้นทางการส่งข้อมูล
Destination Sequence Number	หมายเลขลำดับในเส้นทาง
Originator IP Address	หมายเลขไอพีของโหนดที่สร้างข้อความ RREQ
Lifetime	หมายเลขลำดับ ณ ปัจจุบันเวลาในหน่วยมิลลิวินาที ที่โหนดจะต้องได้รับข้อความ RREP เพื่อยืนยันเส้นทางที่ใช้ในการสื่อสาร

**Route error message (RERR)**

```

0          1          2          3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|   Type      |N|           Reserved           | DestCount  |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|               Unreachable Destination IP Address (1)               |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|               Unreachable Destination Sequence Number (1)           |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
| Additional Unreachable Destination IP Addresses (if needed) |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|Additional Unreachable Destination Sequence Numbers (if needed)|
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+

```

ภาพประกอบ 2-4 รูปแบบข้อความ Route Error (RERR)

ข้อความ RERR [6] มีขนาด 20 ไบต์ ประกอบไปด้วยส่วนของข้อมูลที่เก็บค่าต่างๆ  
ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ความหมายของส่วนของข้อมูลในข้อความ RERR

ส่วนของข้อมูล	ความหมาย
Type	ชนิดของข้อความ เป็น 3
DestCount	จำนวนของโหนดปลายทางที่ไม่สามารถติดต่อได้
Unreachable Destination IP Address	หมายเลขไอพีที่อยู่ของโหนดปลายทางที่ไม่สามารถติดต่อได้เนื่องจากขาดการติดต่อ
Destination Sequence Number	หมายเลขลำดับในเส้นทาง
Unreachable Destination Sequence Number	หมายเลขลำดับในตารางเก็บค่าเส้นทางสำหรับปลายทางที่ระบุไว้ในโหนดปลายทางที่ไม่สามารถติดต่อได้

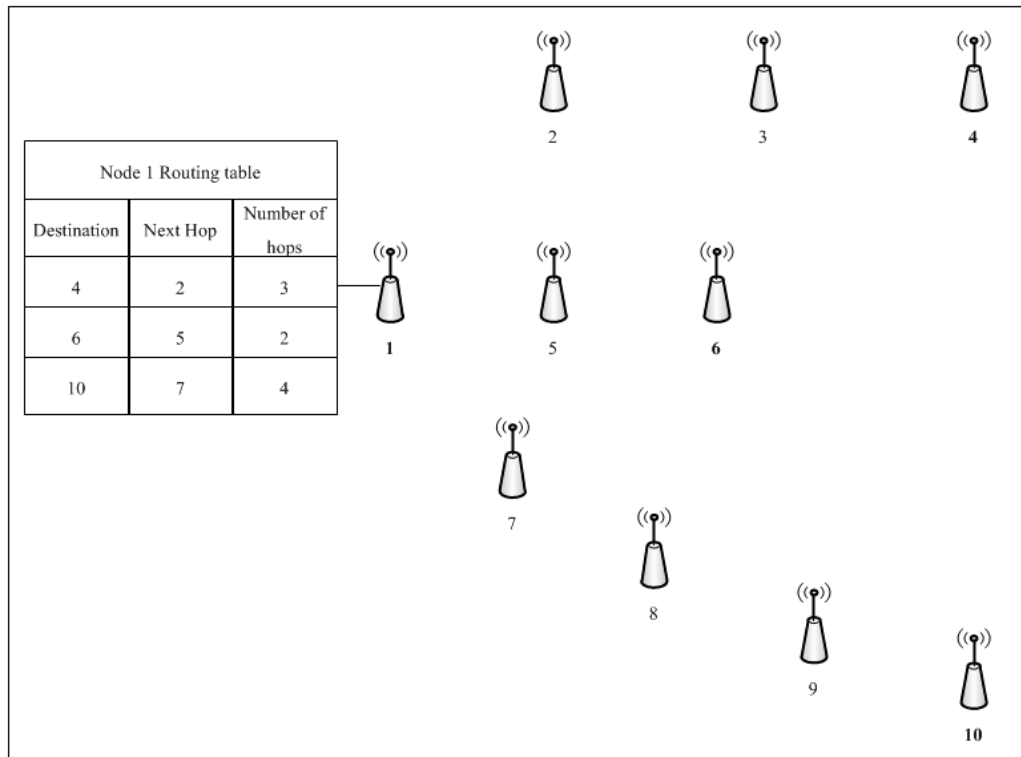
ตารางเก็บค่าเส้นทาง (Routing table)

ตารางเก็บค่าเส้นทาง [6] มีหน้าที่ ในการเก็บรายละเอียดเกี่ยวกับเส้นทางในการสื่อสารโดยมีโครงสร้างสำหรับเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบ ข้อความ RREQ และ RREP ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ความหมายของส่วนของข้อมูลในตารางเก็บค่าเส้นทาง

ส่วนของข้อมูล	ความหมาย
Destination	โหนดปลายทางที่ต้องการสื่อสาร
Next Hop	โหนดถัดไปในเส้นทางสื่อสาร
Number of hops	จำนวน โหนดทั้งหมดที่ใช้ส่งต่อข้อมูลในเส้นทางสื่อสาร
Sequence number for the destination	หมายเลขลำดับในเส้นทาง
Expiration time for the route table entry	อายุของข้อมูลในตารางเก็บค่าเส้นทาง

การเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทางสื่อสาร ในตารางเก็บค่าเส้นทางเป็นดังภาพประกอบ



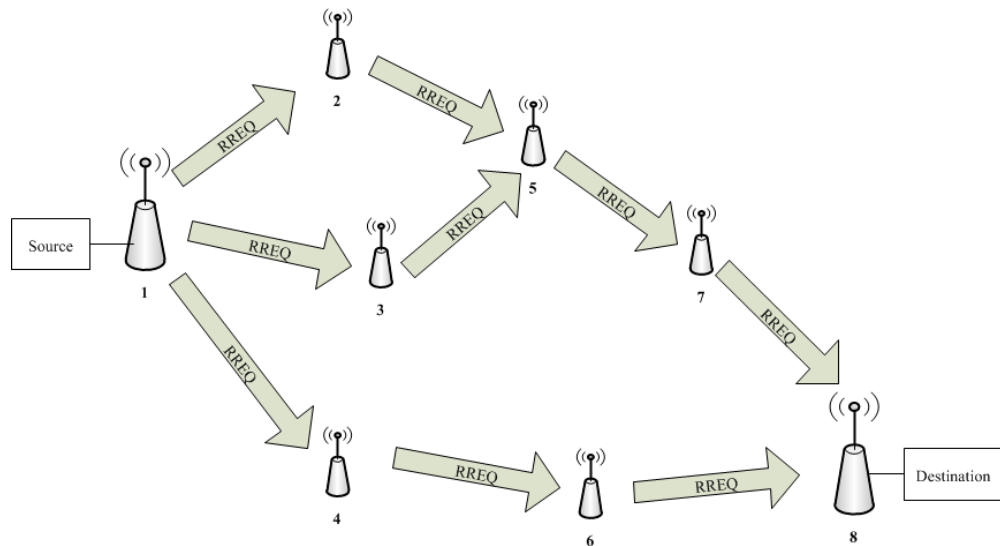
ภาพประกอบ 2-5 ตารางเก็บค่าเส้นทาง

จากภาพประกอบ 2-5 แสดงตารางเก็บค่าเส้นทางของโหนด 1 ที่เก็บรายละเอียดของโหนดปลายทางโหนดต่างๆ ได้แก่ โหนด 4 โหนด 6 และโหนด 10 รายละเอียดเกี่ยวกับเส้นทางประกอบไปด้วย เลขที่อยู่ของโหนดปลายทาง โหนดถัดไป และจำนวนฮอปที่ใช้ในเส้นทาง ในส่วนของรายละเอียดเกี่ยวกับอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางอธิบายในหัวข้อ 2.3.3

### 2.2.3 อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV

#### กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น (Route Discovery)

กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น เกิดขึ้นเมื่อ โหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยัง โหนดปลายทาง แต่โหนดต้นทางไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทางไปยัง โหนดปลายทาง จึงเริ่มขั้นตอนการทำงาน คือ โหนดต้นทางจะทำการแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงเพื่อส่งต่อข้อความ RREQ ไปยังโหนดปลายทาง มีอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทาง ดังภาพประกอบ 2-6



ภาพประกอบ 2-6 กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น

จากภาพประกอบ 2-6 อธิบายหลักการทำงานของโพรโทคอล AODV ในการค้นหาเส้นทาง ดังนี้

**โหนด 1:** โหนดต้นทาง ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง (โหนด 8) จึงทำการสร้างข้อความ RREQ และแพร่กระจายข้อความไปยังโหนดข้างเคียง

**โหนด 2 โหนด 3 และโหนด 4:** โหนดข้างเคียง เมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 1 ในขั้นตอนแรก ทำการตรวจสอบข้อความ RREQ ว่าตนเองเป็นโหนดปลายทางหรือไม่ หากเป็นโหนดปลายทาง จะทำการส่งข้อความ RREP ตอบกลับไปยังโหนดต้นทาง ซึ่งในกรณีนี้ทั้ง 3 โหนดไม่ได้เป็นโหนดปลายทาง จึงทำการตรวจสอบข้อมูลในข้อความ RREQ กับข้อมูลในตารางเก็บค่าเส้นทางของแต่ละโหนด หากมีข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง ก็จะทำการส่ง



ข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทาง แต่ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของโหนดปลายทาง โหนด 2 โหนด 3 และ โหนด 4 จะทำการแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงอื่นๆต่อไป โดย โหนด 2 และ โหนด 3 ส่งต่อข้อความ RREQ ไปยังโหนด 5 และ โหนด 4 ส่งต่อข้อความ RREQ ไปยังโหนด 6

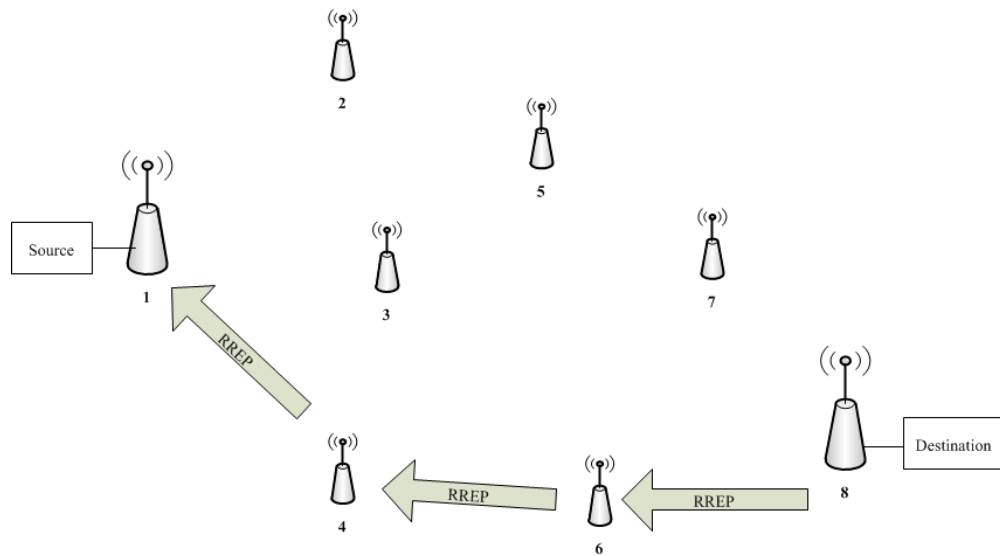
**โหนด 5:** เมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 2 และ โหนด 3 หากได้รับข้อความ RREQ จากโหนดใดก่อน ข้อความ RREQ ที่มาถึงหลังจะโดนทิ้ง เนื่องจากโหนด 5 มีการตรวจสอบว่าข้อความ RREQ ที่ได้รับมาจากโหนดต้นทางเดียวกัน และมีเลขแพร่กระจายข้อความ (Broadcast id) ชุดเดียวกันหรือไม่ ซึ่งข้อความ RREQ จากโหนด 2 และ โหนด 3 มีเลขลำดับการแพร่กระจายข้อความและมาจากโหนดต้นทางเดียวกัน ดังนั้นโหนด 5 ทำการรับและส่งต่อข้อความ RREQ เพียง 1 ข้อความที่มาถึงก่อน และทำการทิ้งข้อความ RREQ ที่มาถึงหลัง

**โหนด 6 และ โหนด 7:** เมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนดก่อนหน้า มีกระบวนการในการตรวจสอบเช่นเดียวกันกับกรณีของโหนด 2 โหนด 3 และ โหนด 4 ซึ่งโหนด 6 และ โหนด 7 ไม่ใช่โหนดปลายทางและไม่มีข้อมูลของเส้นทางไปยังโหนดปลายทางจึงทำการแพร่กระจายข้อความ RREQ ต่อไปยังโหนดข้างเคียง

**โหนด 8:** ได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 6 และ โหนด 7 มีโอกาสเกิดเหตุการณ์ 2 กรณี คือ

1. กรณีที่ข้อความ RREQ จากโหนด 7 ถึงก่อนข้อความ RREQ จากโหนด 6 ในกรณีดังกล่าว โหนด 8 ซึ่งเป็นโหนดปลายทางเมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 7 ทำการตรวจสอบ และพบว่าตนเองเป็นโหนดปลายทาง จึงทำการสร้าง และส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนด 7 หลังจากนั้นเมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 8 จะทำการเปรียบเทียบข้อมูลของเลขลำดับ (Sequence number) และจำนวนฮอป (Hop count) กับข้อความ RREQ ของโหนด 7 ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่ามีข้อมูลของเลขลำดับชุดเดียวกัน แต่โหนด 6 มีค่าจำนวนฮอป 3 ซึ่งน้อยกว่าค่าจำนวนฮอปของข้อความ RREQ จากโหนด 7 ดังนั้น โหนด 8 จะทำการสร้างข้อความ RREP ชุดใหม่ และกำหนดค่าเลขลำดับให้สูงกว่าข้อความ RREP ก่อนหน้าและทำการส่งกลับไปยังโหนดต้นทาง
2. กรณีที่ข้อความ RREQ จากโหนด 6 ถึงก่อนข้อความ RREQ จากโหนด 7 เมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 6 โหนด 8 จะทำการตรวจสอบ และพบว่าตนเองเป็นโหนดปลายทาง จึงทำการสร้างและส่งข้อความ RREP ตอบกลับ

ยังโหนด 6 ดังภาพประกอบ 2-7 หลังจากนั้นเมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 7 แล้วทำการตรวจสอบกับข้อความ RREQ ของโหนด 6 ซึ่งพบว่ามีเลขลำดับชุดเดียวกัน และค่าจำนวนฮอปของข้อความ RREQ จากโหนด 6 มีค่าน้อยกว่าค่าจำนวนฮอปของข้อความ RREQ จากโหนด 7 ดังนั้นโหนด 8 จะทำการทิ้งข้อความ RREQ จากโหนด 7 โดยกระบวนการตอบกลับการค้นหาเส้นทางสามารถดูได้ดังภาพประกอบ 2-7



ภาพประกอบ 2-7 กระบวนการตอบกลับการค้นหาเส้นทาง

จากภาพประกอบ 2-7 โหนดปลายทางเมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 6 จะทำการส่งข้อความ RREP กลับไปยังต้นทาง เมื่อโหนดในเส้นทางได้รับข้อความ RREP จะทำการเก็บข้อมูลของเส้นทางไปยังโหนด 8 เก็บไว้ในตารางเก็บค่าเส้นทางและส่งต่อ ข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทาง ส่วนโหนดต้นทางเมื่อได้รับข้อความ RREP ก็สามารถทราบเส้นทางที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้

### กระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง (Route Maintenance)

กระบวนการซ่อมแซมเส้นทางสื่อสาร เกิดขึ้นเมื่อในระดับชั้น MAC ตรวจสอบพบว่า เกิดข้อผิดพลาดในการสื่อสาร (Link Failure) แล้วทำการแจ้งเตือนไปยังโพรโทคอล AODV เมื่อได้รับการแจ้งเตือน โพรโทคอล AODV มีอัลกอริทึมในการซ่อมแซมเส้นทางดังนี้

1. หากจุดที่เส้นทางสูญหาย ใกล้กับโหนดปลายทางมากกว่าโหนดต้นทาง จะทำการซ่อมแซม ณ จุดที่เส้นทางนั้นสูญหาย (Local Repair) และจะทำการแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงอื่นๆ เพื่อส่งไปยังโหนดปลายทาง โดยที่ไม่ต้องทำการหาเส้นทางใหม่ตั้งแต่โหนดต้นทาง
2. หากจุดที่เส้นทางสูญหายใกล้กับโหนดต้นทางมากกว่า จะทำการแพร่กระจายข้อความ RERR ไปยังโหนดต้นทาง เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อความ RERR จะทำการค้นหาเส้นทางสื่อสารใหม่อีกครั้ง

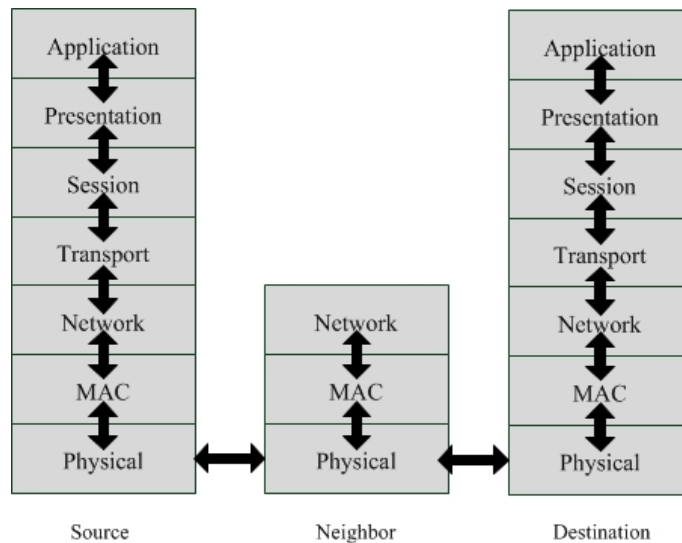
#### 2.2.4 การปรับปรุงโพรโทคอล AODV

เนื่องจากเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีข้อจำกัดในเรื่องของพลังงาน หากมีการส่งข้อความควบคุมบ่อยครั้ง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปกับการส่งข้อความควบคุม [27] และ [28] มากไปกว่านั้น ก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายในเรื่องของแบนด์วิดท์ และอาจทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้น การส่งข้อความควบคุมออกไปในระบบเครือข่าย เกิดขึ้นเมื่อโหนดต้องการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น หรือทำการซ่อมแซมเส้นทางอันเนื่องมาจากเกิดข้อผิดพลาดในการสื่อสาร หากมีวิธีที่สามารถลดการเกิดข้อผิดพลาดในการสื่อสารย่อมส่งผลให้ข้อความควบคุมในระบบเครือข่ายลดลงด้วย ซึ่งส่งผลดีต่อระบบเครือข่ายโดยรวมสาเหตุหนึ่งที่เกิดการสื่อสารผิดพลาดในระบบเครือข่าย คือ การที่โหนดในเส้นทางสื่อสารพลังงานหมดลง ทำให้ต้องค้นหาเส้นทางใหม่ จึงได้ตั้งสมมติฐานว่า หากโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสามารถเลือกเส้นทางอื่นที่โหนดในเส้นทางมีค่าพลังงานมากกว่า ย่อมส่งผลให้ปัญหาดังกล่าวลดลงได้

ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการออกแบบและแก้ไขอัลกอริทึมในการค้นหาและเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV ใหม่ โดยนำค่าพารามิเตอร์ของพลังงาน มาเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง ซึ่งมีรายละเอียดของโพรโทคอลดังกล่าว อธิบายไว้ในบทที่ 3

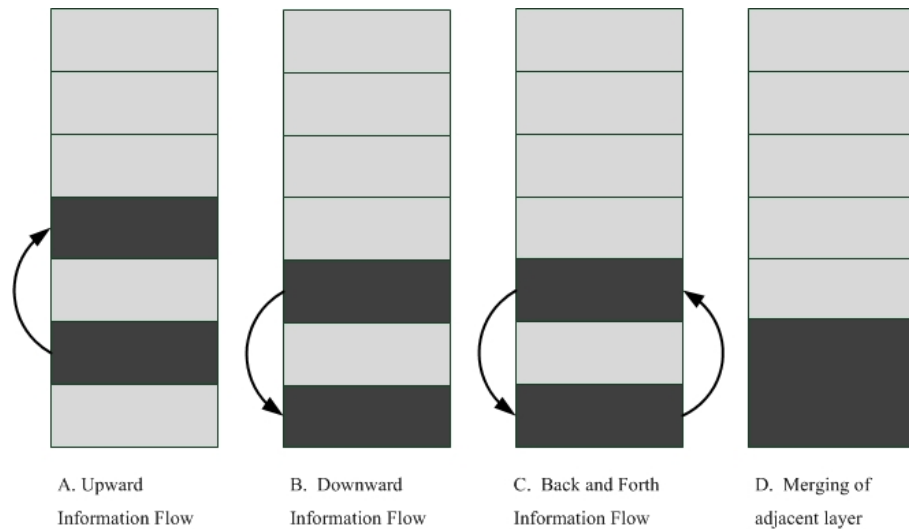
### 2.3 การสื่อสารข้ามระดับชั้น

การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ โดยทั่วไปแล้วมีกระบวนการจัดการการสื่อสารแบ่งออกเป็นระดับชั้นต่างๆ 7 ระดับชั้น ตามมาตรฐาน OSI 7-Layer Reference Model (OSI Model) [29-30] คุณสมบัติของ OSI Model คือ แต่ละระดับชั้นที่ทำการรับและส่งข้อมูล มีการติดต่อกับระดับชั้นที่อยู่ติดกันเท่านั้น จะไม่มีการติดต่อข้ามไประดับชั้นอื่น ดังภาพประกอบ 2-8



ภาพประกอบ 2-8 ลักษณะการทำงานของแต่ละระดับชั้นสื่อสาร

การสื่อสารข้ามระดับชั้น (Cross layer) [31] คือ การออกแบบโปรโตคอล โดยอนุญาตให้แต่ละระดับชั้นมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลหรือค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ต่างระดับชั้นกันได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญในการแก้ปัญหา และเพิ่มสมรรถนะให้กับเครือข่าย เช่น เซอร์ไวรัส เนื่องจาก การสื่อสารข้ามระดับชั้น สามารถแก้ไขส่วนของการสื่อสารระหว่างระดับชั้นต่างๆ ให้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยในการสื่อสารข้ามระดับชั้นไม่จำเป็นจะต้องทำในระดับชั้นที่อยู่ติดกัน แต่สามารถทำข้ามระดับชั้นได้ โดยต้องสร้างส่วนของการสื่อสาร เรียกว่า อินเทอร์เฟซ (Interface) มีลักษณะของการทำงานดังภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบ 2-9 กระบวนการสื่อสารข้ามระดับชั้น [32]

จากภาพประกอบ 2-9A (Upward Information Flow) เป็นการสร้างอินเทอร์เน็ตเฟสใหม่ในระดับชั้นที่อยู่ระดับสูงกว่า ต้องการข้อมูลจากระดับชั้นที่ต่ำกว่าซึ่งไม่ใช่ระดับชั้นที่อยู่ติดกัน ส่งผลทำให้เกิดอินเทอร์เน็ตเฟสใหม่ขึ้น จากระดับชั้นต่ำขึ้นไปยังระดับชั้นสูงกว่า

จากภาพประกอบ 2-9B (Downward Information Flow) เป็นการสร้างอินเทอร์เน็ตเฟสใหม่ในระดับชั้นต่ำกว่าต้องการข้อมูลจากระดับชั้นที่สูงกว่า ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์จึงสร้างอินเทอร์เน็ตเฟสใหม่ขึ้น จากระดับชั้นสูงขึ้นไปยังระดับชั้นที่ต่ำกว่า

จากภาพประกอบ 2-9C (Back and Forth Information Flow) เป็นการสร้างอินเทอร์เน็ตเฟสใหม่ ซึ่งเกิดระหว่างสองระดับชั้น หรือมากกว่า ที่ไม่ใช่ระดับชั้นที่อยู่ติดกัน ทำงานร่วมกันในลักษณะการรับและส่ง ข้อมูลสลับกัน

จากภาพประกอบ 2-9D (Merging of Adjacent Layer) เป็นการรวมกันของระดับชั้นที่ติดกัน โดยการนำระดับชั้น 2 ระดับชั้นหรือมากกว่า เป็นระดับชั้นที่อยู่ติดกัน มารวมกันเป็นระดับชั้นเดียวกัน เรียกว่า Super layer

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก้ไขอัลกอริทึมของโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย ซึ่งมีหน้าที่ในการค้นหาและจัดการเส้นทางสื่อสาร [33] โดยเพิ่มข้อมูลในส่วนของค่าระดับพลังงาน (Energy) ที่อยู่ในระดับชั้น Physical ซึ่งอยู่ในระดับชั้นต่ำกว่า (Lower Layer) มาใช้เป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง โดยทั่วไปแล้วการทำงานในระดับชั้นเครือข่าย ไม่สามารถนำข้อมูลของค่าพลังงานมาใช้ได้โดยตรง จึงต้องใช้การสื่อสารข้ามระดับชั้นแบบ Upward Information Flow ในการเข้าถึงข้อมูลของค่าพลังงานจากระดับชั้น Physical แล้วนำข้อมูลดังกล่าว มาใช้เป็นตัวแปรในการค้นหาเส้นทางในระดับชั้นเครือข่าย เพื่อพัฒนาโพรโทคอล AODV ให้มีค่าประสิทธิภาพการทำงานดียิ่งขึ้น

#### 2.4 การหาค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่าย

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล CLEA-AODV กับโพรโทคอล AODV ซึ่งในการพิจารณาค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงานของโพรโทคอล มีค่าสมรรถนะที่สามารถวัดและบ่งบอกประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าอัตราปริมาณงาน (Throughput)

ค่าอัตราปริมาณงาน คือ ค่าของจำนวนข้อมูลที่โหนดปลายทางสามารถรับได้ทั้งหมด ต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่เราสงสัย ซึ่งในช่วงเวลาที่สนใจหากข้อมูลจากโหนดต้นทาง ส่งไปไม่ถึงโหนดปลายทาง ย่อมส่งผลให้ค่าอัตราปริมาณงานมีค่าลดลง โดยการทดลองจำลองการทำงานในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้โพรโทคอล UDP เป็นโพรโทคอลในระดับชั้นทรานสปอร์ต (Transport Layer) เมื่อมีการสูญหายของข้อมูลจะไม่มีการส่งข้อมูลซ้ำ ดังนั้นหากค่าอัตราปริมาณงานมีค่าสูง ย่อมแสดงว่าข้อมูลจากโหนดต้นทางสามารถถูกส่งไปถึงโหนดปลายทางได้มาก และมีข้อมูลสูญหายน้อย โดยสามารถคำนวณหาค่าอัตราปริมาณได้จากสมการ (1)

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Packets received} \times \text{Packets size} \times 8}{\text{Runtime}} \text{ (bps)} \quad (1)$$

Throughput คือ ค่าอัตราปริมาณงาน

Packets received คือ ข้อมูลที่รับได้ทั้งหมด

Packets size คือ ขนาดของแพ็กเกจ

Runtime คือ ระยะเวลาที่สิ้นสุดการส่ง – ระยะเวลาที่เริ่มต้นส่ง

- ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ (Packet Delivery Ratio)

ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ คือ ค่าที่บอกความสำเร็จในการส่งข้อมูล มีค่าไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการจำลองการทำงานของระบบเครือข่ายที่มีโหนดจำนวนมาก และมีการเชื่อมต่อพร้อมๆกันหลายการเชื่อมต่อ หากเกิดการชนกันของข้อมูล ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จจะมีค่าลดลง และในระบบเครือข่ายที่มีการกำหนดค่าพลังงานให้กับแต่ละโหนด หากโหนดในเส้นทางสื่อสารพลังงานหมดลง ย่อมส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งออกมาจากโหนดต้นทางไม่สามารถไปถึงโหนดปลายทางได้ ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน โดยค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$PDR = \frac{\text{Total packets received} \times 100}{\text{Total packets sent}} \text{ (Percent)} \quad (2)$$

PDR คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ

Total packets received คือ จำนวนข้อมูลที่รับได้ทั้งหมด

Total packets sent คือ จำนวนข้อมูลที่ส่งออกไปทั้งหมด

- จำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย (Overhead)

จำนวนข้อความสื่อสารในระบบ คือ ข้อความที่ถูกส่งออกมาเพื่อใช้ในการจัดการการสื่อสาร โดยนับจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย และนับเฉพาะข้อความสื่อสารจากโพรโทคอล AODV ได้แก่ ข้อความ RREQ ข้อความ RREP และ ข้อความ RERR ยังมีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบน้อย จะส่งผลดีต่อระบบเครือข่าย เนื่องจากในการส่งข้อความสื่อสารออกมาในระบบเครือข่าย จะใช้การแพร่กระจาย (Broadcast) ซึ่งถือเป็นการสิ้นเปลืองแบนด์วิดท์และทรัพยากร ดังนั้นหากสามารถลดจำนวนข้อความสื่อสารที่ส่งออกมา ย่อมส่งผลดีต่อระบบเครือข่ายโดยรวม

- จำนวนข้อมูลที่ถูกลบทิ้ง (Packet Drop)

ข้อมูลที่ถูกลบทิ้ง หมายถึง ข้อมูลที่ส่งออกมาจากโหนดต้นทาง แล้วโหนดปลายทางไม่สามารถรับได้ ซึ่งหากมีข้อมูลที่ถูกลบทิ้งจำนวนมาก จะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง สาเหตุของการที่ข้อมูลถูกลบทิ้ง เกิดจากการที่โหนดต้นทางไม่สามารถหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางได้ และเกิดจากการที่ข้อมูลชนกัน (Collision) โดยจะเกิดขึ้นในระดับชั้น MAC เมื่อโหนดในระบบเครือข่ายได้รับข้อมูลจากโหนดอื่นๆ พร้อมกัน ส่งผลให้เกิดการชนกันและไม่สามารถรับข้อมูลได้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่มีการชนกัน เช่น จำนวนการเชื่อมต่อ โดยยิ่งเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้เกิดการชนกันบ่อยครั้งขึ้น เป็นต้น

- การคำนวณค่าพลังงาน (Energy)

การคำนวณค่าพลังงานที่เซนเซอร์ใช้ในการรับและส่งข้อมูลแต่ละครั้ง มีหน่วยเป็น จูล ทำการคำนวณจากค่ากำลังที่ใช้ส่งข้อมูล (txPower) และ ค่ากำลังที่ใช้รับข้อมูล (rxPower) ทั้งสองค่ามีหน่วยเป็นวัตต์ โดยมีสมการในการคำนวณค่าพลังงานดังสมการ (3)

$$\text{Energy} = \frac{\text{Power} \times 8 \times \text{Packet size}}{\text{Bandwidth}} \text{ (Joule)} \quad (3)$$

ตัวอย่างการบันทึกค่าพลังงานในการส่งข้อมูลหนึ่งครั้งจากการจำลองการทำงานผ่านซอฟต์แวร์จำลองการทำงาน Network Simulation version 2 (NS-2)

```
s 44.746173154 _5_ AGT --- 580 cbr 64 [0 0 0 0] [energy 9.707541]
r 44.746173154 _5_ RTR --- 580 cbr 64 [0 0 0 0] [energy 9.707541]
s 44.746173154 _5_ RTR --- 580 cbr 84 [0 0 0 0] [energy 9.707541]
s 44.747158154 _5_ MAC --- 580 cbr 91 [0 2c 5 800] [energy 9.707541]
N -t 44.750454 -n 5 -e 9.707225
*s ส่ง, r รับ, N ระดับพลังงาน
```



จากข้อความข้างต้น สามารถแปลความหมายได้ว่า ที่เวลาวินาทีที่ 44.746173154 โหนด 5 ส่งข้อมูลไปยังโหนด 0 โดยส่งข้อมูลจากระดับชั้นทรานสปอร์ต ขนาด 64 ไบต์ ไปยังระดับชั้นเครือข่ายใช้มาตรฐาน IPv4 ในส่วนของตำแหน่งที่อยู่ (IP Address) โปรแกรม NS-2 เป็นตัวจัดการ เมื่อระดับชั้นเครือข่ายได้รับข้อมูล จะทำการรวมข้อมูลตัวเลขที่อยู่ (IP Address) ขนาด 20 ไบต์ แล้วส่งข้อมูลลงไปยังระดับชั้น MAC ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งออกไปในระบบเครือข่ายจากระดับชั้น MAC โดยจากข้อมูลขนาด 64 ไบต์ เมื่อรวมข้อมูลจากระดับชั้น MAC และระดับชั้นเครือข่าย จะมีขนาด 91 ไบต์ โดยก่อนส่งข้อมูลโหนด 5 มีระดับพลังงาน 9.707702 จูล หลังจากส่งข้อมูลออกไป 1 ครั้ง ที่เวลา 44.750454 โหนด 5 เหลือพลังงาน 9.707225 จูล ดังนั้น โหนด 5 ใช้พลังงานในการส่งหนึ่งครั้ง คือ  $9.707541 - 9.707225 = 0.000316$  จูล

เมื่อเปรียบเทียบจากค่าทางทฤษฎี ในการจำลองการทำงานกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลองดังนี้

พลังงานเริ่มต้น 10 จูล

ค่ากำลังการส่ง 0.1 วัตต์

ขนาดข้อมูลที่ถูส่งจากระดับชั้นทรานสปอร์ตมีขนาด 64 ไบต์ เมื่อรวมกับข้อมูลจากระดับชั้นเครือข่ายอีก 20 ไบต์ และระดับชั้น MAC มีขนาด 7 ไบต์ รวมเป็น 91 ไบต์

ขนาดแบนด์วิดท์ 250 กิโลบิตต่อวินาที

จากสมการ (3) สามารถคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ไปในการรับและส่งข้อมูล

$$\text{Energy} = (0.1 * 8 * 91) / 250 * 10^3 = 0.0002912 \text{ จูล}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองการทำงาน ซึ่งมีค่า 0.000316 จูล สรุปได้ว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าจากการจำลองการทำงาน

- การคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (Confidence interval 95%).

ในการจำลองการทำงาน เพื่อวัดค่าประสิทธิภาพการทำงานของโปรโตคอล ในแต่ละการทดลองได้ทำการทดลองซ้ำ โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละโหนดแบบสุ่ม หรือเปลี่ยนโหนดต้นทาง ซึ่งการที่จะบอกได้ว่า ผลลัพธ์จากการจำลองการทำงานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแต่ละการทดลอง มีค่าต่างกันอย่างไรมีนัยสำคัญหรือไม่ ต้องคำนวณเพื่อหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีสูตรการคำนวณดังสมการ (4)

$$CI95\% = \frac{1.96 \times \alpha}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$\alpha$  คือ ค่าความแปรปรวน

$n$  คือ จำนวนครั้งในการทดสอบ

ค่าที่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นจะอยู่ระหว่าง ค่า  $\bar{X} \pm CI95\%$

เมื่อ  $\bar{X}$  คือค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง

นำค่า  $\bar{X}$  ที่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ มาเปรียบเทียบกัน หากค่าทั้ง 2 ค่า มีความแตกต่างกัน โดยที่ค่าช่วงความเชื่อมั่นต่ำสุด ของผลลัพธ์ที่สูงกว่า ไม่มีค่าเหลื่อมล้ำกับค่าช่วงความเชื่อมั่นสูงสุดของผลลัพธ์ที่ต่ำกว่า จะสามารถสรุปได้ว่าการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ทำการวัดค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ คือ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล CLEA-AODV กับโพรโทคอล AODV ว่าผลลัพธ์การทำงานของทั้ง 2 โพรโทคอล มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

ในการหาค่าประสิทธิภาพการทำงาน จะต้องทำการจำลองการทำงานผ่านซอฟต์แวร์จำลองการทำงาน ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม NS-2 เป็นซอฟต์แวร์จำลองการทำงานระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งต้องทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น การเลือกใช้กฎและโพรโทคอลในการสื่อสารถูกกำหนดไว้ในไฟล์ (.tc1) เพื่อทำการจำลองสภาพแวดล้อมในการทดสอบ มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ความหมายของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ความหมาย
MAC layer	โพรโทคอลในระดับชั้น MAC
Network layer	โพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย
Transport layer	โพรโทคอลในระดับชั้นทรานสปอร์ต
Application layer	ชนิดของข้อมูลทำการส่ง

ตารางที่ 2-5 ความหมายของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง (ต่อ)

พารามิเตอร์	ความหมาย
Number of Nodes	จำนวนโหนดที่ทำการทดลอง
Area	พื้นที่ มีหน่วยเป็นตารางเมตร
Transmission Range	ระยะในการส่งข้อมูล มีหน่วยเป็นเมตร
Packet Size	ขนาดของแพ็คเกจข้อมูล
Data interval	ความถี่ในการส่งข้อมูล
Connection	จำนวนการเชื่อมต่อในระบบเครือข่าย
Initial Energy	การกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้น มีหน่วยเป็นจูล
Transmit power (Tx) Receiving power (Rx)	กำหนดค่าการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลมีหน่วยเป็นวัตต์
Simulation time	ระยะเวลาในการจำลองการทำงานมีหน่วยเป็นวินาที

ผลลัพธ์ที่ได้จากจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม NS-2 อยู่ในรูปแบบของไฟล์ (.tr) ซึ่งบันทึกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่ายทั้งหมดระหว่างการจำลอง ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดเวลาการจำลองการทำงาน ซึ่งข้อมูลจากไฟล์ (.tr) ยังไม่สามารถรู้ถึงค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอลที่จำลองได้โดยตรง ต้องมีการใช้สคริปต์ในการอ่านค่าและแปรผลลัพธ์ออกมาให้อยู่ในรูปแบบทางสถิติ แล้วจึงแสดงผลเป็นตาราง หรือกราฟที่สามารถเข้าใจได้ ซึ่งผลลัพธ์จากการจำลองการทำงานได้แสดงไว้ในบทที่ 4

### บทที่ 3

## การพัฒนาโพรโทคอล AODV

ในบทที่ 3 เป็นการนำเสนอรายละเอียดของการพัฒนากระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

- แนวคิดและหลักการออกแบบ
- การแก้ไขอัลกอริทึมโดยใช้การสื่อสารข้ามระดับชั้น
- อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทาง

#### 3.1 แนวคิดและหลักการออกแบบ

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์จำนวนมาก โดยอุปกรณ์เซนเซอร์แต่ละตัว อาจเรียกว่า “โหนด (Node)” สามารถรองรับการทำงานบนระบบเครือข่ายหลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน สำหรับการนำไปใช้งานในระบบเครือข่ายขนาดใหญ่ มีโอกาสที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์มากกว่าระยะของสัญญาณส่ง (Transmission Range) โหนดต้นทางและโหนดปลายทางไม่สามารถสื่อสารกันได้อีก (Single Hop) จึงจำเป็นต้องส่งผ่านข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียง (Neighbor Nodes) เพื่อให้โหนดข้างเคียงรับและส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง เป็นการสื่อสารแบบหลายช่วงการเชื่อมต่อ (Multi Hop) [34]

การสื่อสารแบบหลายช่วงการเชื่อมต่อ จำเป็นจะต้องใช้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางมาจัดการการสื่อสาร [35] ซึ่งมีข้อดี คือ โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางสามารถเลือกได้เองว่าใช้โหนดข้างเคียงใดบ้าง เป็นโหนดเชื่อมต่อในเส้นทางสื่อสาร จึงสามารถอำนวยความสะดวกเมื่อมีการเพิ่มอุปกรณ์เซนเซอร์ตัวใหม่เข้าไปในระบบเครือข่าย อุปกรณ์เซนเซอร์จะสามารถหาเส้นทางส่งข้อมูลได้เอง โดยที่ผู้ใช้ไม่ต้องทำการกำหนดเส้นทางและที่อยู่ของโหนดปลายทางให้อุปกรณ์เซนเซอร์

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแต่ละโพรโทคอล มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การเลือกโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะงานประยุกต์ที่จะนำไปใช้ว่าเน้นการทำงานในรูปแบบใด เช่น เครือข่ายเซนเซอร์ติดตามตัวคนไข้ในโรงพยาบาล หรือเครือข่ายเซนเซอร์ตรวจจับและแจ้งเตือนสัญญาณไฟไหม้ [36-37] ในการนำไปใช้งานดังกล่าว ควรเน้นความรวดเร็วและทำงานแบบทันทีทันใด (Real Time Application) จึงควร

เลือกโพรโทคอลที่มีค่าหน่วงเวลา (Delay) ต่ำ เป็นต้น ในการออกแบบโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ไม่สามารถทำการออกแบบให้รองรับและเหมาะสมกับทุกงานได้ และไม่สามารถมีคุณลักษณะการทำงานที่ครอบคลุมในทุกๆรูปแบบได้ การออกแบบหรือแก้ไขอัลกอริทึมในการทำงานของโพรโทคอล จึงควรดูจากความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน สำหรับการออกแบบแก้ไขโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในงานวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นในเรื่องของการเพิ่มค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงาน ได้แก่ ค่าอัตราปริมาณ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ และการลดจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย ซึ่งแต่เดิมนั้นโพรโทคอล AODV ถูกออกแบบมาสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายแบบแอดฮอก [38] มีรูปแบบการสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเป็นรูปแบบการสื่อสารแบบเดียวกันกับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงสามารถนำโพรโทคอล AODV มาใช้ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้เช่นกัน แต่เครือข่ายเคลื่อนที่ไร้สายแบบแอดฮอก มีข้อแตกต่างที่สำคัญที่มีผลต่อการออกแบบโพรโทคอล คือ เรื่องของพลังงาน แบนด์วิดท์ และทรัพยากรในการประมวลผลที่มีอยู่อย่างจำกัด การออกแบบโพรโทคอลในระดับชั้นสื่อสารสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จึงมีปัจจัยที่ควรคำนึงถึงดังนี้ [27]

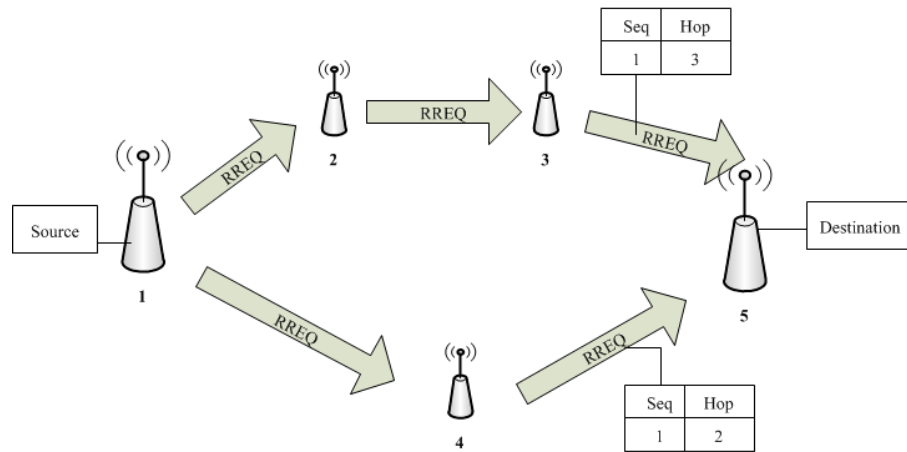
1. การวางตำแหน่งของอุปกรณ์เซนเซอร์ (Node Deployment) ในระบบเครือข่ายที่มีอุปกรณ์เซนเซอร์จำนวนมาก ลักษณะการเรียงตัวและการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ หากมีการวางตำแหน่งแบบสุ่ม จำเป็นต้องมีการจัดการในระดับชั้นเครือข่าย (Network Management) แต่หากโหนดมีการจัดเรียงที่ตายตัว สามารถใช้การจัดการแค่ในระดับชั้น MAC ระบบก็ยังสามารถทำงานได้
2. อายุการทำงานของแบตเตอรี่ มีผลกับการทำงานของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง คือ ในการสื่อสารแบบหลายฮอป เมื่อโหนดในเส้นทางบางโหนดพลังงานหมดลง โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางต้องทำการค้นหาเส้นทางใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนข้อความควบคุมในระบบเพิ่มขึ้น
3. ความแตกต่างของอุปกรณ์เซนเซอร์ ในงานบางรูปแบบต้องการเซนเซอร์ต่างชนิดกันในการเก็บข้อมูล ดังนั้นการที่โพรโทคอลสามารถทำงานร่วมกันได้ในอุปกรณ์ต่างชนิดกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น
4. กระบวนการแก้ปัญหาเมื่อเกิดการทำงานผิดพลาด ในระดับชั้น MAC อุปกรณ์เซนเซอร์สามารถตรวจสอบได้ว่าโหนดใดเกิดข้อผิดพลาดในการรับและส่งข้อมูล และแจ้งไปที่ระดับชั้นเครือข่าย เพื่อทำการแก้ปัญหาโดยการค้นหาเส้นทางใหม่ ซึ่งกระบวนการในการ

ค้นหาเส้นทางใหม่ ต้องคำนึงถึงในเรื่องของพลังงาน เนื่องจากหากมีการส่งข้อความควบคุมเพื่อค้นหาเส้นทางใหม่ออกไปเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานและแบนด์วิดท์ ดังนั้นในการออกแบบอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางใหม่ จึงควรออกแบบให้มีการส่งข้อความสื่อสารออกไปในระบบให้น้อยที่สุด

5. รูปแบบการเคลื่อนที่ในระบบเครือข่าย หากโหนดในระบบเครือข่ายมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา จำเป็นต้องมีโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในการจัดการและตรวจสอบเส้นทางอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากมีโอกาสที่ต้องทำการหาเส้นทางใหม่บ่อยครั้ง

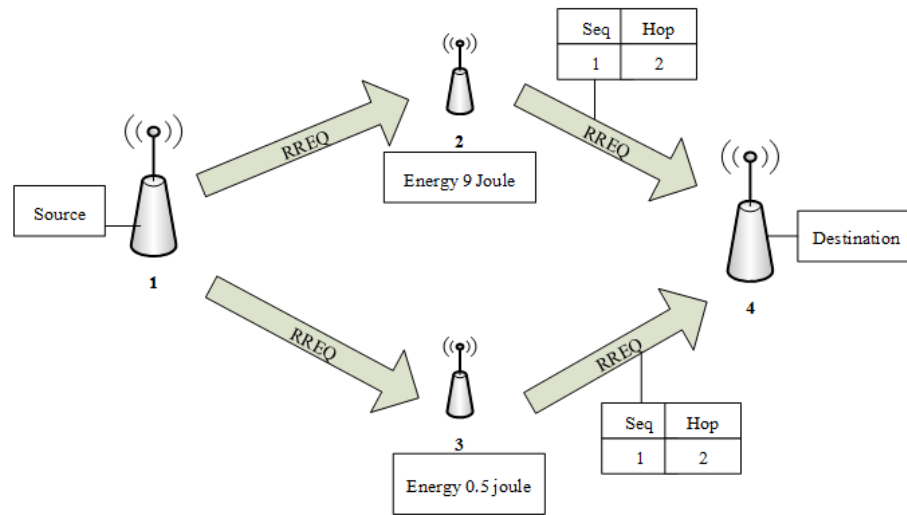
การออกแบบโพรโทคอลบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งอุปกรณ์เซนเซอร์ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน จึงมีข้อจำกัดในการรับและส่งข้อมูล เมื่อเซนเซอร์ใดมีการรับและส่งข้อมูลจำนวนมาก จะส่งผลให้เซนเซอร์ตัวนั้นเหลือพลังงานน้อยกว่าเซนเซอร์ตัวอื่นๆ [39] ในงานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะทำการจำลองการทำงานในรูปแบบของระบบเครือข่ายที่กำหนดพลังงานเริ่มต้นให้กับอุปกรณ์เซนเซอร์เท่ากันทุกๆ โหนด ซึ่งในระบบเครือข่าย เมื่อเวลาผ่านไปโหนดบางโหนดที่ทำการรับและส่งข้อมูลมากกว่าโหนดอื่นๆ พลังงานของโหนดดังกล่าวจะลดลงไปมากและเหลือพลังงานน้อยกว่าโหนดอื่นๆ จึงมีโอกาสที่โหนดดังกล่าว จะพลังงานหมดลงก่อนโหนดอื่นๆ ในระบบเครือข่าย ซึ่งจะส่งผลให้เส้นทางสื่อสารถูกตัดขาด ทำให้ค่าอัตราปริมาณงาน และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง

เนื่องจากอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV ไม่มีการนำพารามิเตอร์ของพลังงานมาใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง จากบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.3 ได้อธิบายอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยใช้ข้อความ RREQ ในการค้นหาเส้นทาง ใช้ข้อมูลของเลขลำดับ (Sequence Number) และจำนวนฮอป (Hop Count) ในข้อความ RREQ เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง ดังภาพประกอบ 3-1



ภาพประกอบ 3-1 การเลือกเส้นทางของโปรโตคอล AODV

จากภาพประกอบ 3-1 โหนด 5 ซึ่งเป็นโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 3 และ โหนด 4 ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบเลขลำดับ โดยเลือกจากเลขลำดับที่มากกว่า และดูจากเลขจำนวนฮอปว่าข้อความใดมีจำนวนฮอปน้อยกว่า แล้วทำการส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางผ่านเส้นทางที่เลือก แต่หากข้อความ RREQ ทั้งสองข้อความ มีค่าของเลขลำดับและจำนวนฮอปเท่ากันทุกๆค่า อัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโปรโตคอล AODV ไม่มีข้อมูลอื่นที่สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีกว่าได้ ดังภาพประกอบ 3-2



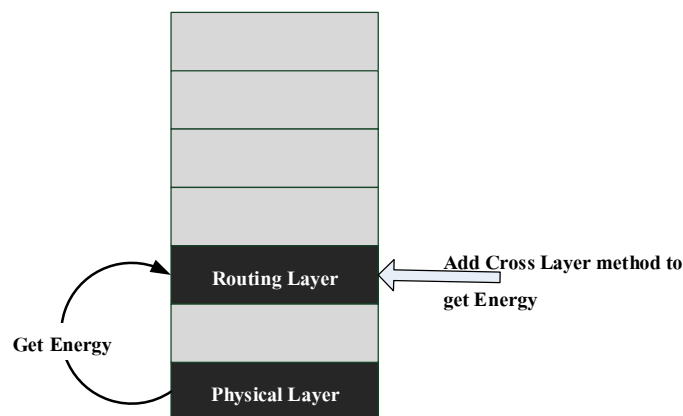
ภาพประกอบ 3-2 การเลือกเส้นทางเมื่อมีข้อมูลในข้อความ RREQ เหมือนกัน

จากภาพประกอบ 3-2 หากข้อมูลในข้อความ RREQ เหมือนกันทั้งเลขลำดับและจำนวนฮอป โพรโทคอล AODV จะทำการเลือกเส้นทางโดยเลือกข้อความ RREQ ที่มาถึงก่อน หลังจากนั้นหากมีข้อความ RREQ มาถึงหลัง และมีข้อมูลของเลขลำดับและจำนวนฮอปเท่ากัน โหนดปลายทางจะทำการทิ้งข้อความ RREQ ที่มาถึงหลัง จากอัลกอริทึมการเลือกเส้นทางแบบดังกล่าว ไม่มีการนำค่าระดับพลังงานของโหนดในเส้นทาง มาเป็นส่วนในการพิจารณาเลือกเส้นทาง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 3-2 โหนด 2 ซึ่งมีค่าพลังงานมากกว่าโหนด 3 หากข้อความ RREQ จากโหนด 3 มาถึงโหนด 4 ซึ่งเป็นโหนดปลายทางก่อน โหนดปลายทางจะทำการส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางผ่านโหนด 3 แม้ว่าโหนด 2 มีพลังงานมากกว่า ดังนั้นเมื่อโหนดต้นทางส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางผ่านโหนด 3 เมื่อเวลาผ่านไป โหนด 3 พลังงานหมดลง โพรโทคอล AODV ต้องทำการค้นหาเส้นทางใหม่ ส่งผลให้ค่าอัตราปริมาณงาน และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง [40] อีกทั้งยังสิ้นเปลืองแบนด์วิดท์และพลังงานไปกับการส่งข้อความ RREQ ใหม่อีกครั้ง จากปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการแก้ไขอัลกอริทึมการค้นหาและเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยนำค่าระดับพลังงานปัจจุบันของแต่ละโหนดในเส้นทาง มาเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง ด้วยวิธีการที่เรียกว่าการสื่อสารข้ามระดับชั้น (Cross Layer) และเรียกโพรโทคอล AODV ที่ได้ทำการพัฒนาว่า โพรโทคอล Cross Layer Energy Aware for AODV (CLEA-AODV)



### 3.2 การแก้ไขอัลกอริทึมโดยใช้การสื่อสารข้ามระดับชั้น

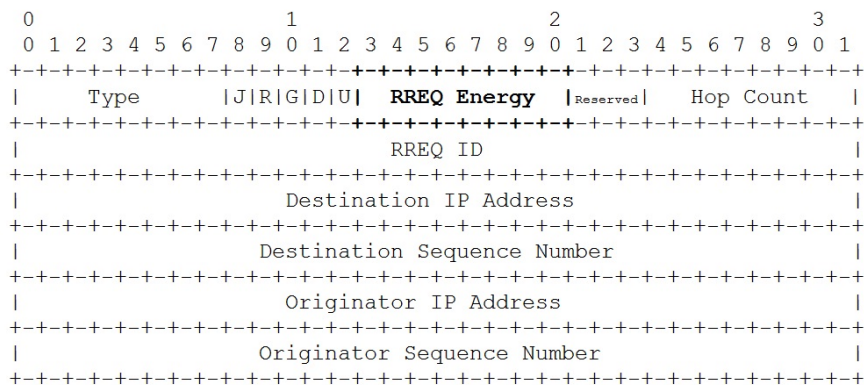
โครงสร้างการทำงานของโพรโทคอลในระบบเครือข่ายแบบเซนเซอร์ไร้สาย แบ่งการทำงานออกเป็นระดับชั้น ในแต่ละระดับชั้นมีหน้าที่ ที่แตกต่างกัน เช่น ในระดับชั้นเครือข่าย มีหน้าที่ในการค้นหาและจัดการเส้นทาง ในระดับชั้น MAC มีหน้าที่จัดการ การเข้าใช้ช่องสัญญาณ ควบคุมการชนและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ในระดับชั้น Physical มีหน้าที่จัดการเกี่ยวกับ พลังงานและการส่งสัญญาณการสื่อสาร เป็นต้น ซึ่งการทำงานในแต่ละระดับชั้น มีหน้าที่ ที่แยก ออกจากกันอย่างชัดเจน การปรับปรุงอัลกอริทึมในการค้นหาและเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยใช้พารามิเตอร์ของพลังงานเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง จะไม่สามารถทำได้หากมี แค่ข้อมูลในระดับชั้นเครือข่าย จึงต้องใช้การสื่อสารข้ามระดับชั้น โดยมีลักษณะการทำงานดัง ภาพประกอบ 3-3



ภาพประกอบ 3-3 การดึงค่าพารามิเตอร์ของพลังงานมาใช้ในระดับชั้นเครือข่าย

จากภาพประกอบ 3-3 โพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย ต้องการข้อมูลของ พลังงาน จึงต้องนำข้อมูลพารามิเตอร์ของพลังงานจากระดับชั้น Physical มาใช้ [9] และ [21] ใน ส่วนของการแก้ไขโพรโทคอล AODV ให้สามารถใช้ค่าพลังงานเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง ต้องทำการแก้ไขที่กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มต้น (Route Discovery) ซึ่งในกระบวนการดังกล่าว

ใช้ข้อความ RREQ ซึ่งเป็นข้อความในระดับชั้นเครือข่าย ในการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง อัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโหนดปลายทาง จะพิจารณาจากข้อมูลในข้อความ RREQ ดังนั้น การนำพารามิเตอร์ของพลังงานมาใช้เป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง จะต้องทำการเพิ่มข้อมูลพลังงาน (Energy field) เข้าไปในข้อความ RREQ ดังภาพประกอบ 3-4

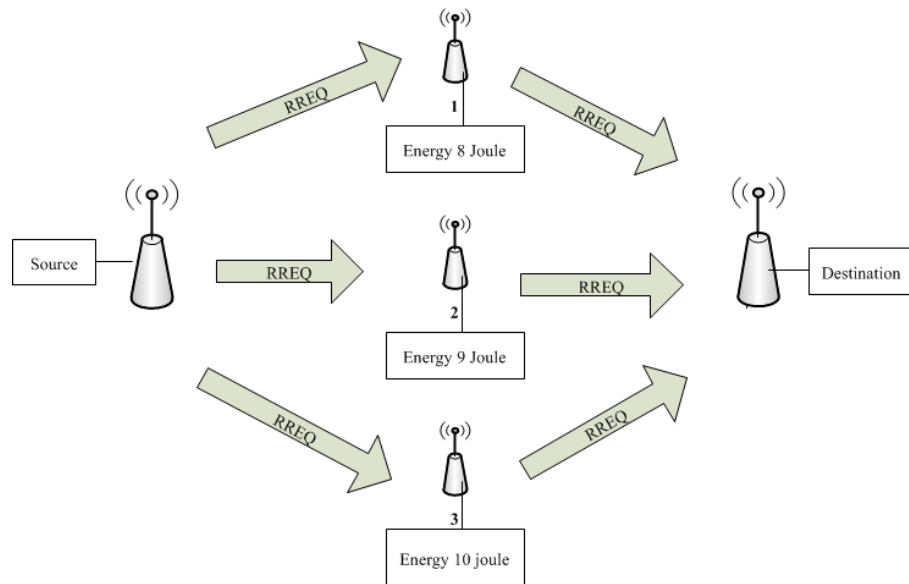


ภาพประกอบ 3-4 การเพิ่มข้อมูลของพลังงานในข้อความ RREQ

จากภาพประกอบ 3-4 ในข้อความ RREQ ของโปรโตคอล AODV เดิม มีช่องเก็บข้อมูลว่าง (Reserved) [6] ที่สำรองไว้สำหรับเก็บข้อมูลอื่นๆ จึงทำการเพิ่มในส่วน RREQ Energy ขนาด 8 บิต เพื่อเก็บข้อมูลของสถานะพลังงาน ดังนั้นขนาดข้อความ RREQ ของโปรโตคอล CLEA-AODV จึงมีขนาดเท่ากับขนาดข้อความ RREQ ของโปรโตคอล AODV

โปรโตคอล AODV มีข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง คือ จำนวนฮอป (Hop Count) โดยเลือกเส้นทางที่มีจำนวนฮอปสั้นที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มข้อมูลในส่วนของค่าพลังงาน (RREQ Energy) ทำหน้าที่ในการเก็บค่าพลังงานคงเหลือ (Remaining Energy) ของโหนดในเส้นทางสื่อสารที่ข้อความ RREQ ผ่าน มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบอัลกอริทึมการค้นหา

เส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV คือ หากมีเส้นทางสื่อสารในระบบเครือข่ายมากกว่า 1 เส้นทาง ในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล จะตรวจสอบข้อมูลจากเส้นทางแรกที่ถูกเลือก โดยพิจารณาจากค่าสถานะของระดับพลังงานจากเส้นทางแรก ว่ามีความเสี่ยงต่อการที่พลังงานจะหมดลงหรือไม่ (Low Energy Threshold) ค่าเกณฑ์ที่กำหนดเป็นค่าเกณฑ์ที่พิจารณาจากข้อมูลของค่าพลังงานในข้อความ RREQ ที่มาถึงโหนดปลายทาง โดยโหนดปลายทางจะเป็นโหนดที่ทำการเลือกพิจารณาว่าจะทำการทิ้งข้อความ RREQ ที่มาถึงหลัง หรือรับข้อความ RREQ ที่มาถึงหลัง แล้วทำการส่งข้อความ RREP ใหม่ กลับไปยังโหนดต้นทาง เพื่อทำการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ที่มีค่าพลังงานมากกว่าเส้นทางก่อนหน้า แต่เนื่องจากการรับหรือส่งข้อมูล 1 ครั้ง มีการใช้พลังงานประมาณ 0.0003 จูล (อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4) โดยกำหนดค่าแบตเตอรี่เต็มไว้ที่ 10 จูล นั่นคือ โหนดเซนเซอร์จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ประมาณ 30,000 ครั้ง ซึ่งในการจำลองการทำงาน โหนดในระบบเครือข่ายมีโอกาสเป็นได้ทั้งโหนดรับและโหนดส่ง โดยสาเหตุที่ต้องกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำของค่าพลังงาน เนื่องจากหากมีการใช้ค่าระดับพลังงานเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทางทุกๆ ครั้ง ในบางกรณีอาจส่งผลให้มีจำนวนข้อความควบคุมในระบบเพิ่มขึ้น เช่น ในกรณีที่เส้นทางสื่อสารมีพลังงานสูงทุกเส้นทาง การเลือกเส้นทางที่มีพลังงานสูงกว่าอาจไม่ได้ช่วยให้มีค่าอัตราปริมาณงาน หรือค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จเพิ่มขึ้น เนื่องจากหากในระบบเครือข่าย ไม่มีโหนดที่พลังงานหมดและไม่มีการค้นหาเส้นทางใหม่เกิดขึ้น อัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV จะมีจำนวนข้อความสื่อสารสูงกว่าโพรโทคอล AODV เดิม ยกตัวอย่างดังภาพประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3-5 เส้นทางสื่อสารที่มีระดับพลังงานสูงทุกเส้นทาง

จากภาพประกอบ 3-5 เป็นระบบเครือข่ายที่มี 3 เส้นทางสื่อสาร โดยแต่ละเส้นทางมีจำนวนฮอปเท่ากัน มีความแตกต่างกันตรงที่ค่าระดับพลังงานของโหนดเชื่อมต่อของแต่ละเส้นทางมีค่าไม่เท่ากัน โดยโหนดที่มีค่าพลังงานน้อยที่สุด คือ โหนด 1 มีค่าพลังงาน 8 จูล ในการพิจารณาเลือกเส้นทาง หากเป็นอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV ทุกๆ เส้นทางมีโอกาสที่จะถูกเลือกใช้เป็นเส้นทางสื่อสารเท่าๆกัน โดยโพรโทคอล AODV จะทำการเลือกเส้นทางที่มีข้อความ RREQ มาถึงก่อนเส้นทางอื่น ข้อความ RREQ ที่มาถึงหลังจะโดนทิ้ง แต่หากพิจารณาเลือกเส้นทางโดยใช้ค่าพลังงานเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง โดยใช้โพรโทคอล CLEA-AODV ในกรณีที่ดีที่สุด คือ ข้อความ RREQ จากโหนด 3 มาถึงเป็นข้อความแรก แต่ในกรณีที่แย่ที่สุด คือ หากข้อความแรกที่มาถึง เป็นข้อความ RREQ จากโหนด 1 ซึ่งมีค่าพลังงานน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับเส้นทางอื่น อัลกอริทึมการทำงานของโพรโทคอล CLEA-AODV โดยที่ไม่มีกำหนดค่าเกณฑ์ขั้นต่ำ เมื่อได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 1 จะทำการส่งข้อความ RREP กลับไป

ยังโหนดต้นทาง และหากได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 2 ซึ่งมีค่า 9 จูล เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานกับเส้นทางพบว่ามีความมากกว่า ดังนั้นโหนดปลายทางจะทำการส่งข้อความ RREP ไปยังโหนดต้นทางใหม่อีกครั้ง และหากได้รับข้อความ RREQ ข้อความล่าสุดจากโหนด 3 ก็ต้องทำในลักษณะเดียวกัน คือ ส่งข้อความ RREP ใหม่ไปยังโหนดต้นทาง ซึ่งพบว่ามี การส่งข้อความ RREP ใหม่ถึง 3 ครั้ง จึงส่งผลให้มีจำนวนข้อความในระบบเพิ่มขึ้น โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้ อาจไม่ได้ช่วยเพิ่มค่าอัตราปริมาณงานหรือค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จที่ลดลงอันเนื่องมาจากการที่พลังงานของโหนดในเส้นทางสื่อสารหมดลง เนื่องจากแม้ว่าโหนด 1 มีค่าพลังงานน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโหนดอื่น ซึ่งโหนด 1 มีค่าระดับพลังงานเหลืออยู่ 80 เปอร์เซ็นต์ ถือว่ามีค่าระดับพลังงานที่สูง จากเหตุการณ์ดังกล่าว หากมีการกำหนดเกณฑ์ของระดับพลังงานที่เสี่ยงจะหมดลงในระหว่างการสื่อสาร จะสามารถช่วยลดข้อความสื่อสารในระบบลงได้ ซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบเครือข่าย สำหรับข้อมูลเบื้องต้นในการกำหนดค่าสถานะของระดับพลังงานจากการสืบค้นงานวิจัยอื่น ที่มีการกำหนดค่าสถานะของพลังงานที่เสี่ยงต่อการที่พลังงานจะหมดลง ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าเกณฑ์ของระดับพลังงานที่มีค่าต่ำจากงานวิจัยอื่น

Protocol	Energy Threshold
EAAODV [37]	< 20 - 22.5 %
EADV [12]	< 10 %
LSEA [18]	< 30 %
MMBCR [41]	< 20 %
R-AODV [42]	< 20 %

จากตารางที่ 3-1 พบว่า ค่าระดับของพลังงานที่มีเกณฑ์ต่ำจากงานวิจัยอื่น มีค่าอยู่ในช่วง 10 - 30 เปรอร์เซ็นต์ จึงนำค่าเกณฑ์ของระดับพลังงานดังกล่าว เป็นแนวทางในการหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับโพรโทคอล CLEA-AODV โดยได้ทำการออกแบบจำลองการทำงานเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานที่เหมาะสม มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. จำลองการทำงานเพื่อหาจำนวนโหนดที่เหมาะสมในการทดลองหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ
2. จำลองการทำงานเพื่อหาค่าเกณฑ์ของพลังงานที่เหมาะสมกับโพรโทคอล CLEA-AODV

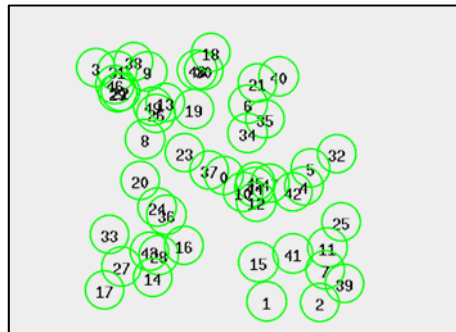
### 1. จำลองการทำงานเพื่อหาจำนวนโหนดที่เหมาะสมในการทดลองหาค่า

จำลองการทำงาน โดยเลือกใช้โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย มีวัตถุประสงค์ในการทดลอง คือ เพื่อหาจำนวนโหนดที่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ 200\*200 ตารางเมตร มีระยะในการส่งข้อมูล 50 เมตร เมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนดตั้งแต่ 50 โหนด ถึง 200 โหนด โดยใช้ค่าชี้วัดประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงาน ได้แก่ ค่าอัตราปริมาณงาน (Throughput) ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ (PDR) จำนวนข้อความสื่อสาร (Overheads) และจำนวนข้อความที่ถูกลบทิ้งเนื่องจากการชนกัน (Collision) ในการทดลองจำลองการทำงาน ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการจำลอง ดังตารางที่ 3-2

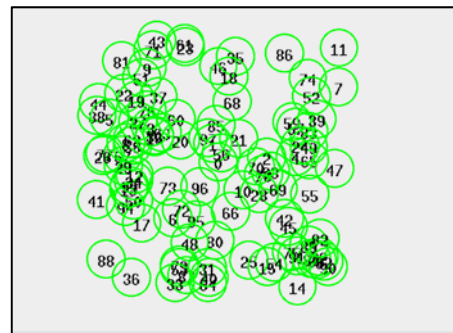
ตารางที่ 3-2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	ความหมาย
MAC layer	IEEE 802.15.4
Network layer	AODV
Transport layer	UDP
Application layer	Constance Bit Rate (CBR)
Number of Nodes	50 100 150 และ 200 โหนด
Area	200*200 ตารางเมตร
Transmission Range	50 เมตร
Packet Size	64 ไบต์
Data interval	ทุก 0.3 วินาทีส่ง 1 แพ็กเกจ หรือประมาณ 3 แพ็กเกจต่อวินาที
Connection	10 การเชื่อมต่อพร้อมกัน และมีการเปลี่ยนโหนดต้นทางใหม่ทุก 1000 วินาที
Initial Energy	10 จูล
Transmit power	txPower = 0.1 วัตต์
Receiving power	rxPower = 0.1 วัตต์
Simulation time	3000 วินาที

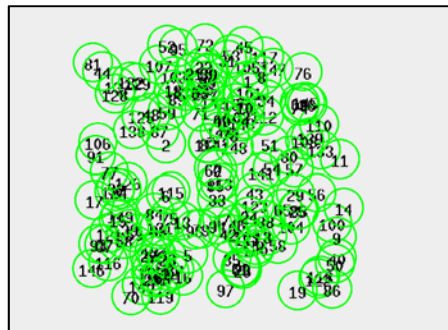
ในการทดลองจำลองการทำงาน กำหนดจำนวนโหนดตั้งแต่ 50 100 150 และ 200 โหนด เพื่อดูผลกระทบเมื่อมีการเพิ่มจำนวนโหนดและหาค่าจำนวนโหนดที่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ และระยะการส่งที่กำหนด โดยแต่ละการทดลองกำหนดตำแหน่งของโหนดเซนเซอร์แบบสุ่ม ดังภาพประกอบ 3-6 ได้ผลลัพธ์ในการจำลองการทำงานดังภาพประกอบ 3-7 ถึง 3-9



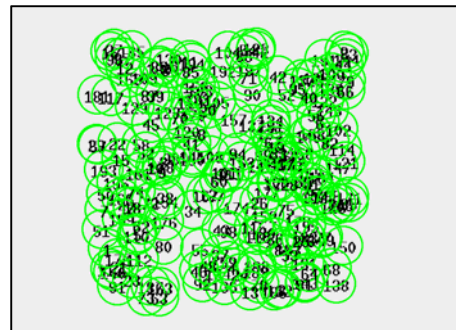
ก. สุ่มตำแหน่ง 50 โหนด



ข. สุ่มตำแหน่ง 100 โหนด



ค. สุ่มตำแหน่ง 150 โหนด

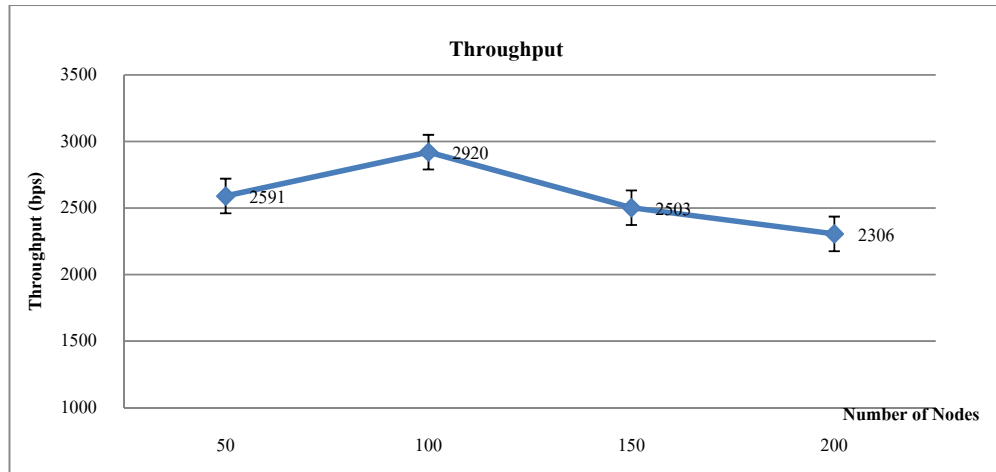


ง. สุ่มตำแหน่ง 200 โหนด

ภาพประกอบ 3-6 กำหนดตำแหน่งของโหนดแบบสุ่ม

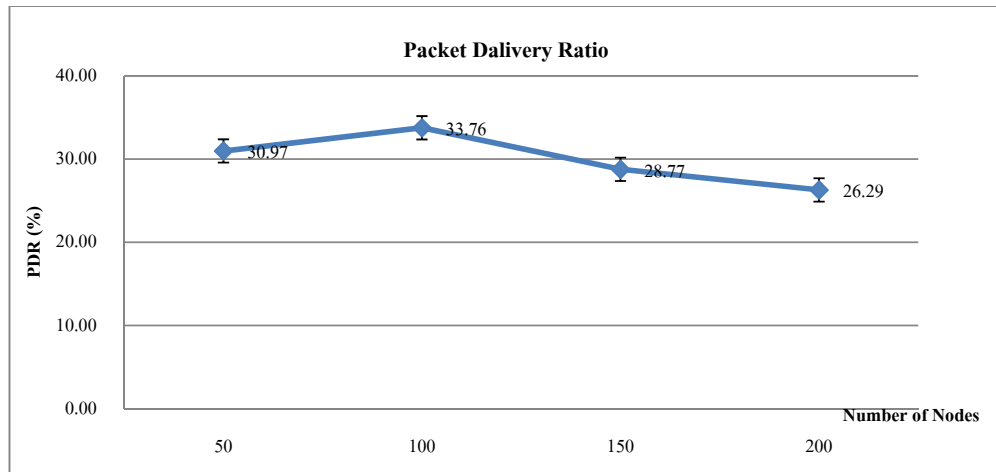


### ผลลัพธ์การจำลองการทำงาน



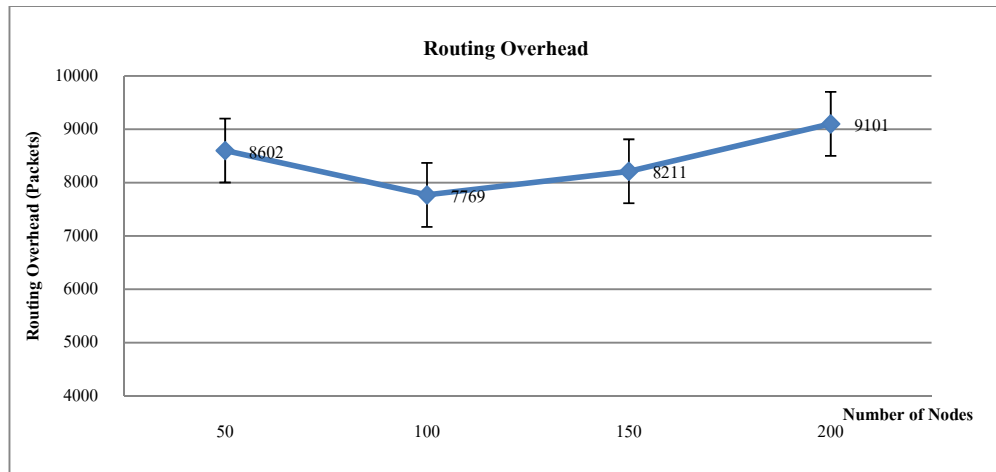
ภาพประกอบ 3-7 แสดงค่าอัตราปริมาณงานเมื่อเพิ่มจำนวน โหนดมากขึ้น

จากภาพประกอบ 3-7 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่า เมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนด จาก 50 เป็น 100 โหนด ค่าอัตราปริมาณงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหนดจาก 100 เป็น 150 และ 200 โหนด ปรากฏว่าค่าอัตราปริมาณงานมีค่าลดลง เนื่องจากการทดลองที่ 50 โหนด มีความหนาแน่นของโหนดน้อยที่สุด ซึ่งมีโอกาสที่โหนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูลถึงโหนดปลายทางได้ หากโหนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อความ RREQ ถึงโหนดปลายทาง ย่อมไม่สามารถสื่อสารกันได้ ส่งผลให้มีค่าอัตราปริมาณงานลดลง แต่เมื่อพิจารณาจากการเพิ่มจำนวนโหนดจาก 100 เป็น 150 และ 200 โหนด ค่าอัตราปริมาณงานกลับมีค่าลดลง สาเหตุเพราะในกรณีที่มีจำนวนโหนดมากขึ้น เมื่อแต่ละโหนดมีการส่งข้อมูลออกมาพร้อมๆกัน ทำให้มีโอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลสูงขึ้น ดังภาพประกอบ 3-10 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายลดลงเช่นเดียวกัน



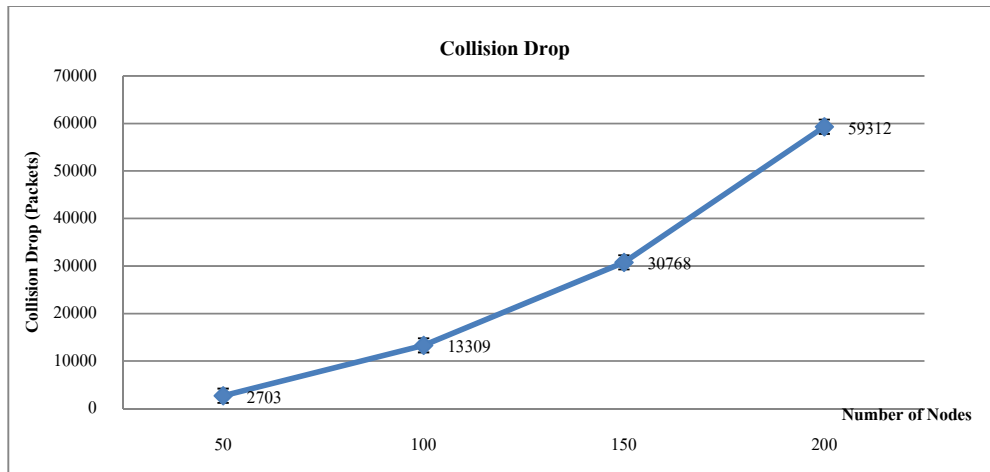
ภาพประกอบ 3-8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดมากขึ้น

จากภาพประกอบ 3-8 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่า เมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนด จาก 50 เป็น 100 โหนด ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหนดจาก 100 เป็น 150 และ 200 โหนด ปรากฏว่าค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุเหมือนกับในกรณีของค่าอัตราปริมาณงาน คือ เมื่อมีจำนวนโหนดเพิ่มมากขึ้น แล้วมีการส่งข้อมูลออกมาพร้อมๆกัน ทำให้มีโอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลสูงขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง



ภาพประกอบ 3-9 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดมากขึ้น

จากภาพประกอบ 3-9 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่า เมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนด จาก 50 เป็น 100 โหนด มีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายลดลง เนื่องจากหากโหนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อความสื่อสารไปยังโหนดปลายทาง จะทำการส่งข้อความสื่อสารใหม่ออกมาส่งผลให้มีข้อความสื่อสารเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหนดจาก 100 เป็น 150 และ 200 โหนด ปรากฏว่าจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากหากข้อความสื่อสารที่ถูกส่งออกมาเกิดการชนกัน ย่อมส่งผลให้ข้อความสื่อสารไม่สามารถไปถึงโหนดปลายทางได้เช่นกัน จึงส่งผลให้มีข้อความสื่อสารในระบบเพิ่มจำนวนมากขึ้น



ภาพประกอบ 3-10 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งเนื่องจากเกิดการชนกัน

จากภาพประกอบ 3-10 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนด จาก 50 ไปจนถึง 200 โหนด จำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งเนื่องจากเกิดการชนกันของข้อมูลมีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโหนดในขนาดพื้นที่เท่าเดิม ทำให้มีความหนาแน่นของโหนดมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการจำลองการทำงานดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนโหนดที่เหมาะสมกับพื้นที่ขนาด 200\*200 ตารางเมตร และมีระยะการส่งที่ 50 เมตร ควรมีจำนวนโหนด 100 โหนด จึงใช้การทดลองที่จำนวน 100 โหนด ในการหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำที่เหมาะสมให้กับโปรโตคอล CLEA-AODV

## 2. จำลองการทำงานเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานที่เหมาะสมกับโปรโตคอล CLEA-AODV

โปรโตคอล CLEA-AODV มีอัลกอริทึมการทำงานโดย กำหนดให้มีการใช้ค่าพลังงานเป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง เมื่อเส้นทางแรกเหลือระดับพลังงานน้อยและเสี่ยงต่อการที่พลังงานจะหมดลงในระหว่างสื่อสาร โดยเกณฑ์ของระดับพลังงานที่กำหนดได้ทำการสืบค้นจากงานวิจัยอื่นที่มีการกำหนดเกณฑ์ของระดับพลังงานต่ำ ซึ่งจากการสืบค้นข้อมูลจากงานวิจัยอื่น พบว่าค่าระดับพลังงานที่มีความเสี่ยงที่พลังงานจะหมดลงเมื่อเหลือระดับพลังงานอยู่ในช่วงน้อยกว่า 10-30 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ออกแบบการจำลองการทำงานเพื่อทดลองหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยใช้ค่าที่ได้จากการสืบค้น ทดลองตั้งเกณฑ์ระดับพลังงานไว้ที่ 5 10 20 30 40 เปอร์เซ็นต์ และไม่กำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลองดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม

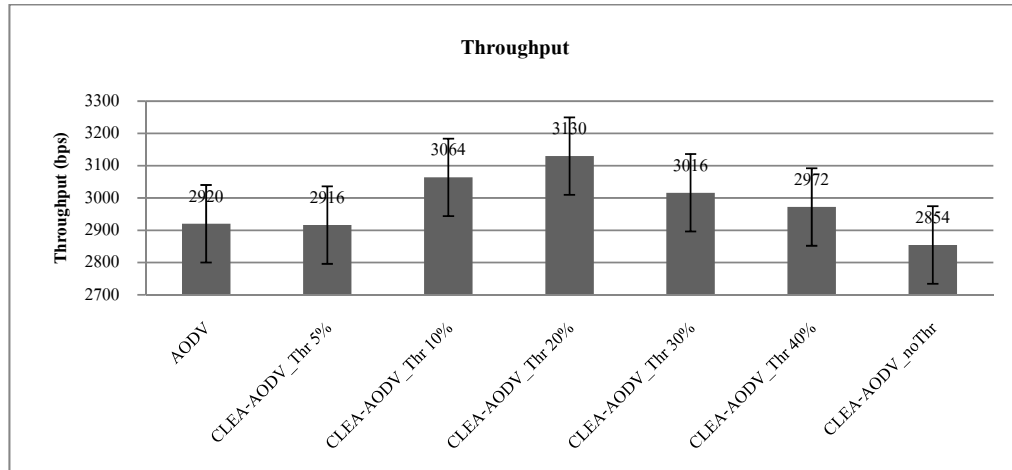
พารามิเตอร์	ความหมาย
MAC layer	IEEE 802.15.4
Network layer	CLEA-AODV
Transport layer	UDP
Application layer	Constance Bit Rate (CBR)
Number of Nodes	100 โหนด
Area	200*200 ตารางเมตร

ตารางที่ 3-3 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ความหมาย
Transmission Range	50 เมตร
Connection	10 การเชื่อมต่อพร้อมกัน และมีการเปลี่ยนโหนดค้น ทางใหม่ทุก 1000 วินาที
พารามิเตอร์	ความหมาย
Packet Size	64 ไบต์
Data interval	ทุก 0.3 วินาทีส่ง 1 แพ็กเกจ หรือประมาณ 3 แพ็กเกจต่อวินาที
Simulation time	3000 วินาที
Low Energy Threshold	5, 10, 20, 30, 40 เปอร์เซ็นต์ และ ไม่กำหนดค่า เกณฑ์พลังงานต่ำ
Initial Energy	10 จูล

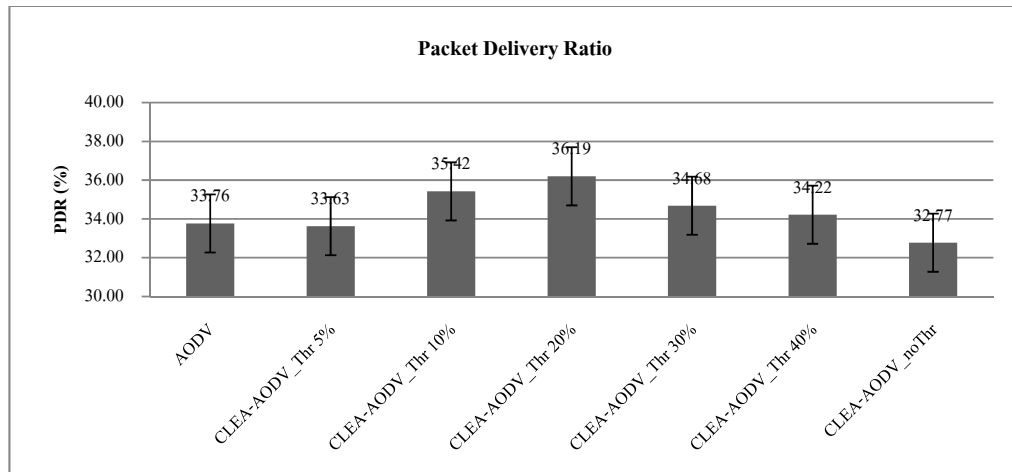
การกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้น เหมือนกับการทดลองในหัวข้อแรก แต่มีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน คือ เปลี่ยนโปรโตคอลการค้นหาเส้นทางเป็นโปรโตคอล CLEA-AODV แทนโปรโตคอล AODV และจำลองการทำงานที่จำนวนโหนด 100 โหนด มีผลลัพธ์จากการจำลองการทำงานแสดงดังภาพประกอบ 3-11 ถึง 3-13

### ผลลัพธ์การจำลองการทำงาน



ภาพประกอบ 3-11 แสดงค่าอัตราปริมาณงานเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ

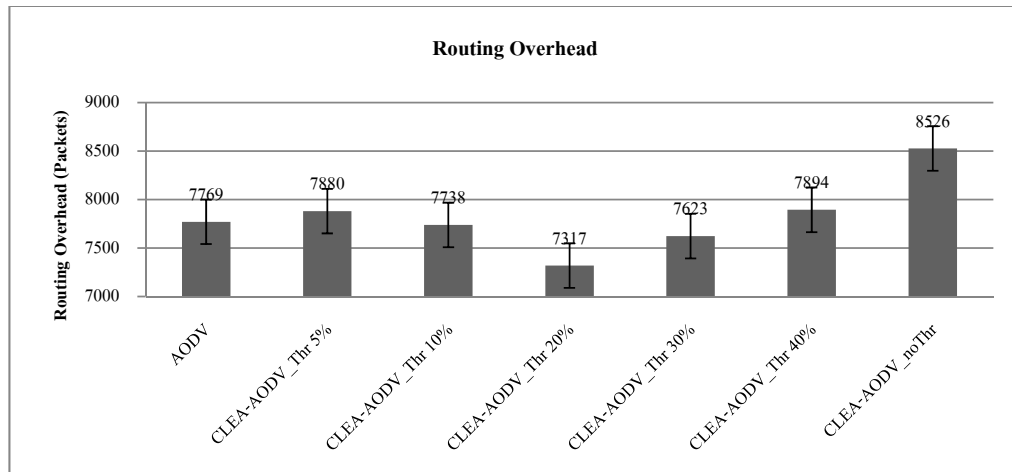
จากภาพประกอบ 3-11 เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราปริมาณงานของโปรโตคอล AODV และโปรโตคอล CLEA-AODV ที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าอัตราปริมาณงานมากกว่าโปรโตคอล AODV และโปรโตคอล CLEA-AODV ที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำเป็นค่าอื่น เมื่อทำการกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าอัตราปริมาณงานมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 3-12 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ

จากภาพประกอบ 3-12 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จของโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล CLEA-AODV ที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมากกว่าโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล CLEA-AODV ที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำเป็นค่าอื่น เมื่อทำการกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมีแนวโน้มลดลง





ภาพประกอบ 3-13 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายเพื่อหาค่าเกณฑ์พลังงานต่ำ

จากภาพประกอบ 3-13 จำนวนข้อความสื่อสารของโพรโทคอล CLEA-AODV ที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำที่ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าน้อยที่สุด ส่วนผลลัพธ์ของโพรโทคอล AODV และ โพรโทคอล CLEA-AODV ที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีแนวโน้มของจำนวนข้อความสื่อสารเพิ่มสูงขึ้น

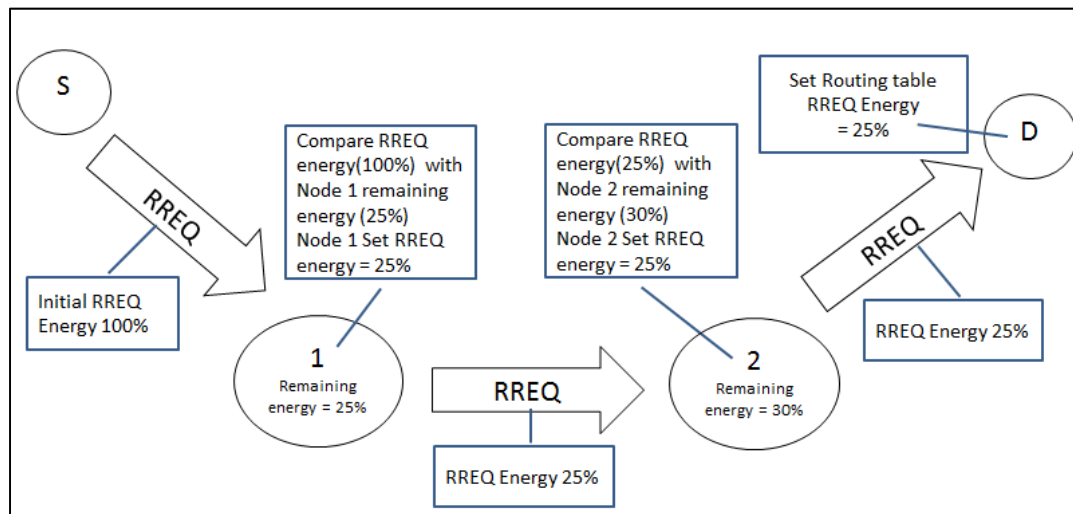
### สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองพบว่าเมื่อกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีค่าเกณฑ์พลังงานต่ำที่มีค่ามากเกินไปหรือไม่ได้ทำการกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำอาจส่งผลให้มีการเลือกเส้นทางและเปลี่ยนเส้นทางใหม่บ่อยครั้งเกินไป ส่งผลให้มีจำนวนข้อความควบคุมในระบบเครือข่ายเพิ่มมาก

ขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าของจำนวนข้อความควบคุมกับค่าอัตราปริมาณงานและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ พบว่าจำนวนข้อความควบคุมมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราปริมาณงานและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ เนื่องจากหากมีการส่งจำนวนข้อความควบคุมในระบบออกมาเป็นจำนวนมาก จะส่งผลให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดการชนกันของข้อมูล ส่วนในกรณีที่หากกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำเป็น 0 อัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV จะเหมือนกันกับโพรโทคอล AODV ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่กำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าผลลัพธ์จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับโพรโทคอล AODV และมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีค่านัยสำคัญเมื่อพิจารณาในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นพบว่าค่าของเกณฑ์พลังงานต่ำที่เหมาะสมสำหรับโพรโทคอล CLEA-AODV มีค่าอยู่ในช่วง 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์การจำลองพบว่าเมื่อกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าค่าอื่น เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 3-11 ถึง 3-13 พบว่าเมื่อกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำที่ 20 เปอร์เซ็นต์ จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยให้ค่าอัตราปริมาณงานและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จดีกว่าโพรโทคอล AODV เดิม 7.2 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายลดลง 5.8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการจำลองการทำงานในหัวข้อถัดไป เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล CLEA-AODV จะกำหนดค่าเกณฑ์พลังงานต่ำไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อกำหนดให้ในการทดลองจำลองการทำงานมีค่าแบตเตอรี่เต็มที่ 10 จูล ดังนั้นโพรโทคอล CLEA-AODV จึงมีอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทาง โดยหากเส้นทางแรกที่ถูกเลือกมีค่าระดับพลังงานเหลือน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ หรือ 2 จูล แล้วมีเส้นทางอื่นที่มีค่าระดับพลังงานเหลือมากกว่าเส้นทางแรก โพรโทคอล CLEA-AODV จะเปลี่ยนไปเลือกใช้เส้นทางอื่นที่มีค่าระดับพลังงานมากกว่าแทน โดยได้อธิบายอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางไว้ในหัวข้อ 3.3

### 3.3 อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล CLEA-AODV

โปรโตคอล CLEA-AODV มีหลักการในการค้นหาเส้นทางเหมือนกับโปรโตคอล AODV คือ จะทำการค้นหาเส้นทาง เมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น โดยในการค้นหาเส้นทาง ใช้การแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง ในส่วนของอัลกอริทึมที่แตกต่างกับโปรโตคอล AODV คือ มีการเพิ่มอัลกอริทึมในการกำหนดค่าพลังงานให้กับข้อความ RREQ ที่ถูกส่งออกไป ดังภาพประกอบ 3-14



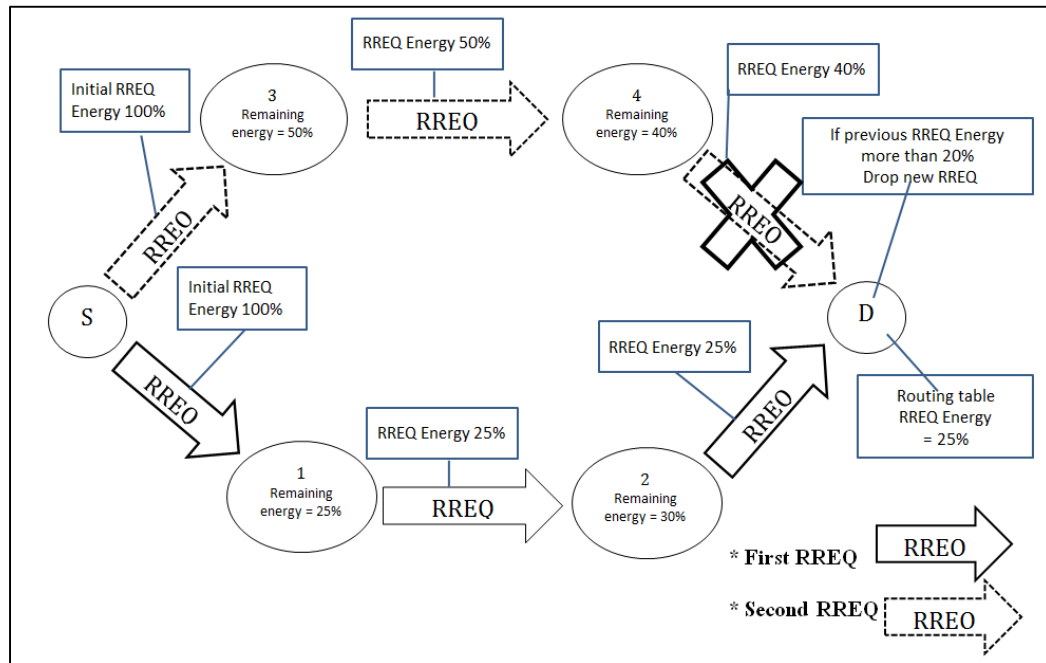
ภาพประกอบ 3-14 การกำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ

จากภาพประกอบ 3-14 โหนดต้นทาง (S) ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง (D) เริ่มต้น โหนดต้นทางแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง โดยกำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ จากโหนดต้นทางเป็น 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ สาเหตุที่ไม่กำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นในข้อความ RREQ ตามค่าพลังงานปัจจุบันของโหนดต้นทาง เพราะว่าการเปรียบเทียบค่าพลังงานในข้อความ RREQ กับค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนดอื่นๆ ในเส้นทาง จะทำการเลือก

ค่าพลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นในกรณีที่โหนดต้นทาง มีพลังงานเหลือน้อยกว่าโหนดอื่นๆในเส้นทาง ค่าพลังงานในข้อความ RREQ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ส่งผลให้โหนดปลายทางไม่สามารถรู้ได้ว่าเส้นทางใดมีค่าพลังงานมากกว่า จึงกำหนดให้ค่าพลังงานในข้อความ RREQ แรกจากโหนดต้นทางเป็น 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ ดังนั้นเมื่อส่งข้อความ RREQ ออกไปแล้วโหนด 1 ซึ่งเป็นโหนดข้างเคียง ได้รับข้อความ RREQ จากโหนดต้นทาง จะมีขั้นตอนการทำงาน โดยทำการตรวจสอบว่าตนเองเป็นโหนดปลายทางหรือไม่ หากตนเองไม่ใช่โหนดปลายทาง จะทำการตรวจสอบในตารางเก็บค่าเส้นทาง (Routing table) ว่ามีเส้นทางไปยังโหนดปลายทางหรือไม่ หากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โหนด 1 มีอัลกอริทึมในการกำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ โดยทำการตรวจสอบค่าพลังงานปัจจุบันของโหนดตนเอง พบว่าเหลือค่าพลังงาน 25 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของค่าพลังงานในข้อความ RREQ ที่ได้รับจากโหนดต้นทาง ซึ่งมีค่า 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการเลือกค่าพลังงานที่น้อยกว่า กำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ ใหม่ จากการเปรียบเทียบค่าพลังงานปัจจุบันของโหนด 1 พบว่าน้อยกว่าค่าพลังงานในข้อความ RREQ ดังนั้น โหนด 1 จะกำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ ใหม่เป็น 25 เปอร์เซ็นต์ แล้วแพร่กระจายข้อความ RREQ ต่อไปยังโหนดข้างเคียง เมื่อโหนด 2 ได้รับข้อความ RREQ จากโหนด 1 จะมีอัลกอริทึมในการทำงานลักษณะเดียวกันกับโหนด 1 ซึ่งโหนด 2 ไม่ใช่โหนดปลายทาง และไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง จึงตรวจสอบค่าพลังงานในข้อความ RREQ ที่ได้รับจากโหนด 1 คือ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าพลังงานปัจจุบันของโหนด 2 คือ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโหนด 2 จะทำการกำหนดค่าพลังงานในข้อความ RREQ เป็นค่าเดิม คือ 25 เปอร์เซ็นต์ และแพร่กระจายข้อความ RREQ ต่อไปยังโหนดปลายทาง เมื่อโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ จะทำการบันทึกค่าพลังงานจากข้อความ RREQ เก็บไว้ในตารางเก็บค่าเส้นทาง ซึ่งค่าพลังงานจากข้อความ RREQ ที่ได้รับ คือ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโหนดปลายทางจึงสามารถรู้ได้ว่าในเส้นทางสื่อสารมีโหนดที่เหลือพลังงานน้อยที่สุดเหลือระดับพลังงานอยู่เท่าไร หลังจากนั้นโหนดปลายทางจะส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทาง เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อความ RREP จึงสามารถรู้เส้นทางการสื่อสารได้ จากภาพประกอบ 3-14 เป็นกรณีที่มีเส้นทางการสื่อสารแก่เส้นทาง

เดียว แต่ในกรณีที่มีเส้นทางในการสื่อสารมากกว่า 1 เส้นทาง โหนดปลายทางจะได้รับข้อความ RREQ มากกว่า 1 ข้อความและมีอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทาง ดังนี้

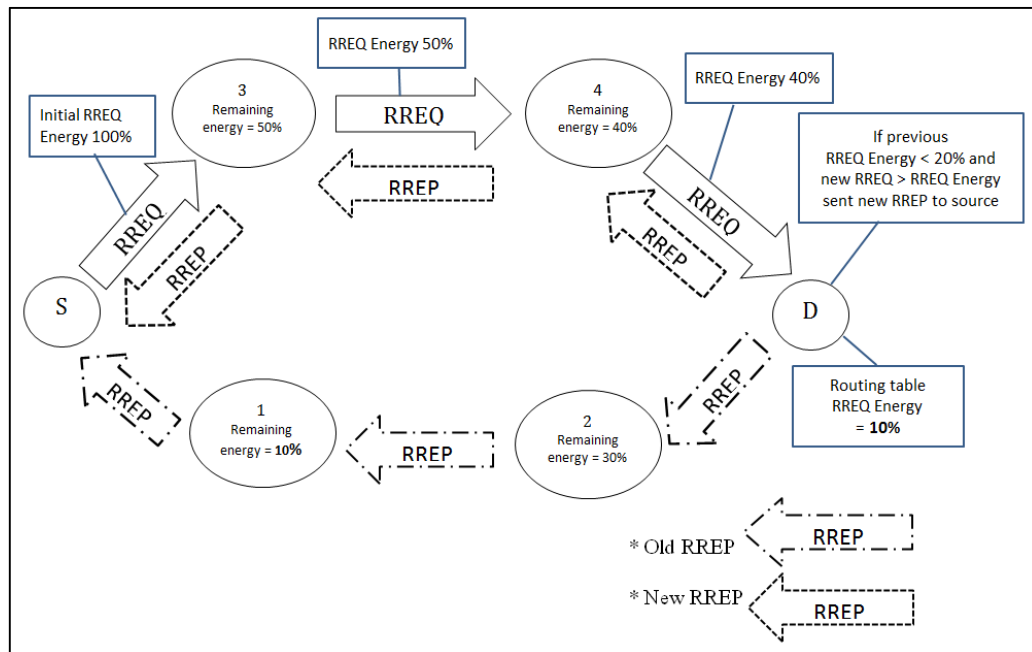
1. กรณีที่เส้นทางแรก มีค่าพลังงานมากกว่าเส้นทางหลัง จะทำการทิ้งข้อความ RREQ จากเส้นทางหลัง
2. กรณีที่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานน้อยกว่าเส้นทางหลัง แต่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำการทิ้งข้อความ RREQ จากเส้นทางหลังเช่นกัน แม้ว่าเส้นทางหลังจะมีค่าพลังงานมากกว่าเส้นทางแรกก็ตาม อธิบายดังภาพประกอบ 3-15
3. กรณีที่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานน้อยกว่าเส้นทางหลัง และเส้นทางแรกมีค่าพลังงานน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับข้อความ RREQ จากเส้นทางหลัง โหนดปลายทางจะทำการส่งข้อความ RREP ใหม่กลับไปยังโหนดต้นทาง อธิบายดังภาพประกอบ 3-16



ภาพประกอบ 3-15 การเลือกเส้นทางในกรณีที่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

จากภาพประกอบ 3-15 เมื่อโหนดต้นทาง คือ โหนด (S) ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง คือ โหนด (D) โหนดต้นทางทำการค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยการแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง โหนดข้างเคียงเมื่อได้รับข้อความ RREQ มีอัลกอริทึมในการกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นในข้อความ RREQ ดังภาพประกอบ 3-13 และส่งต่อข้อความ RREQ ไปจนถึงโหนดปลายทาง จากภาพประกอบ 3-15 ในระบบเครือข่ายมีเส้นทางในการสื่อสาร 2 เส้นทาง ดังนั้น โหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ มากกว่า 1 ข้อความ เมื่อข้อความ RREQ แรกจากเส้นทางเส้นล่างมาถึง โหนดปลายทางทำการส่งข้อความ RREQ กลับไปยังเส้นทางนั้น หากโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ ข้อความใหม่จากเส้นทางเส้นบน โหนดปลายทางจะทำการเปรียบเทียบว่า ข้อความ RREQ ใหม่ มาจากโหนดต้นทางเดียวกันหรือไม่ หากเป็นข้อความชุดเดียวกัน อัลกอริทึมในโปรโตคอล AODV เดิม จะทำการทิ้งข้อความ RREQ นั้น แต่

อัลกอริทึมในโพรโทคอล CLEA-AODV มีความแตกต่างจากโพรโทคอล AODV คือ จะนำค่าพลังงานในข้อความ RREQ แรกที่มาถึง ทำการเปรียบเทียบกับค่าพลังงานในข้อความ RREQ ที่มาถึงหลัง ในกรณีของภาพประกอบ 3-15 ค่าพลังงานในข้อความ RREQ แรกมีค่า 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าค่าสถานะพลังงานใกล้เคียงที่กำหนดไว้ คือ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโพรโทคอล CLEA-AODV จะทำการทิ้งข้อความ RREQ ที่มาถึงหลัง และไม่มีการส่งข้อความ RREP ใหม่ไปยังโหนดต้นทาง โดยยังคงใช้เส้นทางเดิมเป็นเส้นทางในการรับและส่งข้อมูล ซึ่งกระบวนการดังกล่าวช่วยให้ในระบบเครือข่ายที่มีค่าระดับพลังงานสูงไม่ต้องทำการเปลี่ยนเส้นทางใหม่ และยังสามารถช่วยลดจำนวนข้อความสื่อสารในระบบได้ แต่ในกรณีที่ค่าพลังงานของข้อความ RREQ แรกมีค่าพลังงานต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความเสี่ยงที่พลังงานจะหมดลง ในระหว่างที่ทำการสื่อสาร โพรโทคอล CLEA-AODV จะมีอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางดังภาพประกอบ 3-16



ภาพประกอบ 3-16 การเลือกเส้นทางในกรณีที่เส้นทางแรกมีค่าพลังงานน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

จากภาพประกอบ 3-16 เป็นระบบเครือข่ายที่มีเส้นทางในการสื่อสารให้เลือก 2 เส้นทาง โดยอัลกอริทึมการทำงานของโพรโทคอล เหมือนกับกรณีของภาพประกอบ 3-15 ต่างกันตรงที่เมื่อโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ แรก พบว่าพลังงานในเส้นทางมีค่าต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโหนด 1 มีพลังงานเหลืออยู่เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหากโหนดปลายทางได้รับข้อความ RREQ ที่มาถึงหลังจากเส้นทางเส้นบน ซึ่งมีค่าพลังงานในข้อความ RREQ อยู่ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อความ RREQ แรกจากเส้นทางเส้นล่าง พบว่ามีค่ามากกว่าข้อความ RREQ แรก และข้อความ RREQ แรกมีค่าพลังงาน ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โหนดปลายทางจะทำการส่งข้อความ RREP ใหม่ที่มีค่าเลขลำดับ (Sequence number) มากกว่า กลับไปยังโหนดต้นทางผ่านเส้นทางเส้นบน เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อความ RREP ใหม่ จะทำการปรับปรุงตารางเก็บค่าเส้นทางและใช้เส้นทางสื่อสารผ่านเส้นทางใหม่แทน

เป้าหมายของการออกแบบโพรโทคอล CLEA-AODV คือ หากในระบบเครือข่ายมีเส้นทางสื่อสารมากกว่า 1 เส้นทาง โพรโทคอลสามารถเลือกเส้นทางที่ดีกว่าได้ หากเส้นทางก่อนหน้ามีความเสี่ยงที่พลังงานจะหมดลงระหว่างที่ทำการสื่อสาร ซึ่งหลักการดังกล่าวจะสามารถลดการค้นหาเส้นทางใหม่ ส่งผลให้สามารถลดจำนวนข้อความสื่อสาร และเพิ่มค่าสมรรถนะการทำงาน ได้แก่ ค่าอัตราปริมาณงาน และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการแก้ไขกระบวนการทำงานโพรโทคอล AODV ในซอฟต์แวร์จำลองการทำงาน ให้มีอัลกอริทึมการทำงานตรงกับโพรโทคอล CLEA-AODV ที่ได้ทำการออกแบบไว้ และทำการออกแบบการจำลองการทำงาน เพื่อเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการทำงานกับโพรโทคอล AODV โดยในส่วนของกระบวนการออกแบบการจำลองการทำงานและผลลัพธ์การจำลองการทำงานของทั้ง 2 โพรโทคอล ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

การจำลองการทำงาน (Simulation) เป็นการทดสอบการทำงานของระบบเครือข่าย โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองการทำงาน เนื่องจากอุปกรณ์จริงมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง และไม่สามารถควบคุมปัจจัยภายนอก หรือสภาพแวดล้อมบางตัวสำหรับการทดสอบได้ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงใช้การจำลองการทำงานผ่านซอฟต์แวร์เพื่อวัดค่าประสิทธิภาพ และสมรรถนะการทำงานของ โพรโทคอลบนระบบเครือข่ายที่สนใจ

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการทำงานของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ที่ทำงานอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และใช้โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลในระดับชั้นเครือข่าย จากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 1 หัวข้อ 1.2 พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ [9-11], [14-19] และ [21] ใช้โปรแกรมการจำลองการทำงานระบบเครือข่ายที่มีชื่อว่า Network Simulation version 2 (NS-2) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ได้รับความนิยม และมีผู้ใช้ในการทำวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์แบบ Open Source ทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการ Linux อีกทั้งซอฟต์แวร์ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้จำลองการทำงานระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ในเนื้อหาของบทนี้เป็นการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล CLEA-AODV บนของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยที่อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV มีการนำค่าสถานะพลังงานของโหนดในเส้นทางสื่อสารมาใช้เป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจึงต้องมีการกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นให้กับแต่ละโหนดในระบบเครือข่าย เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าโพรโทคอล CLEA-AODV สามารถเพิ่มค่าสมรรถนะ และประสิทธิภาพการทำงานให้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ เมื่อมีปัจจัยของพลังงานมาเกี่ยวข้อง ในการออกแบบการทดลองได้กำหนดรูปแบบของระบบเครือข่ายแบ่งออกเป็น 2 ทอพอโลยี (Topology) ได้แก่ (1) ระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง (Random) และ (2) ระบบเครือข่ายแบบกริด (Grid) สำหรับการทดลองทั้ง 2 ทอพอโลยี ได้กำหนดสภาวะแวดล้อม และพารามิเตอร์ในการทดสอบเหมือนกันต่างกันตรงที่รูปแบบการวางตำแหน่งของโหนดเซนเซอร์ เพื่อใช้วัดค่าสมรรถนะการทำงาน หรือเป็นการทดสอบประสิทธิภาพให้กับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ทั้งในรูปแบบที่เป็นระบบเครือข่ายแบบสุ่ม และระบบเครือข่ายแบบกริด โดยในการทดลองได้เพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อพร้อมกันตั้งแต่ 5 10 15

และ 20 การเชื่อมต่อ เพื่อแสดงผลกระทบ และทดสอบค่าประสิทธิภาพการทำงานของ โพรโทคอล การค้นหาเส้นทางทั้ง 2 โพรโทคอล เมื่ออยู่ในสถานะที่มีภาระงานเพิ่มขึ้น ในการทดลองได้กำหนด ระยะการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไว้ที่ 50 เมตร จำลองการทำงานที่จำนวน โหนด 100 โหนด บนพื้นที่ขนาด 400\*400 ตารางเมตร การทดลองในแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อ ทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้ง โดยทำการสุ่มตำแหน่งที่ตั้งของ โหนดใหม่ ทดลองในรูปแบบที่กำหนดให้ โหนดไม่มีการ เคลื่อนที่ เนื่องจากต้องการดูผลกระทบจากปัจจัยของพลังงาน หากกำหนดให้ โหนดมีการเคลื่อนที่ มีโอกาสที่เส้นทางสื่อสารจะขาดการติดต่อเนื่องจาก โหนดเคลื่อนที่ออกจากเส้นทางสื่อสาร ซึ่ง ไม่ได้เป็นผลกระทบจากเรื่องของพลังงาน เมื่อสิ้นสุดการจำลองการทำงาน นำผลลัพธ์ที่ได้มาหาค่า สมรรถนะเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของทั้ง 2 โพรโทคอล โดยมีค่าสมรรถนะที่ สนใจได้แก่ ค่าอัตราปริมาณงาน ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จ จำนวนข้อมูลที่เกิดการชนกัน จำนวน ข้อความสื่อสารในระบบเครือข่าย และจำนวนข้อมูลที่ถูกลบทิ้ง

การจำลองการทำงานกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นให้กับระบบเครือข่าย ที่ทุกๆ โหนด มีค่าพลังงานเท่ากัน 10 จูล ซึ่งในตอนเริ่มต้นของระบบ ทุกๆ โหนดในระบบเครือข่ายย่อมมีค่า พลังงานเริ่มต้นเท่ากัน ดังนั้นอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV ซึ่งใช้ ค่าระดับพลังงานเป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง อาจไม่สามารถแสดงค่าสมรรถนะการ ทำงานให้เห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งในการจำลองการทำงานได้กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งหมด ไว้ที่ 3000 วินาที โดยธรรมชาติของระบบเครือข่าย โหนดที่ทำหน้าที่เป็นโหนดเชื่อมต่อในเส้นทาง สื่อสาร ย่อมใช้พลังงานมากกว่าโหนดอื่นๆที่ไม่ได้ทำการรับและส่งข้อมูล เมื่อเวลาผ่านไป ย่อม ส่งผลให้แต่ละโหนดในระบบเครือข่าย มีค่าพลังงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบ อัลกอริทึมในการค้นหา และเลือกเส้นทางของโพรโทคอล CLEA-AODV และโพรโทคอล AODV เมื่ออยู่ในสถานะที่แต่ละโหนดในระบบเครือข่ายมีค่าระดับพลังงานแตกต่างกัน จึงกำหนดให้ใน การจำลองการทำงานมีการเปลี่ยนโหนดต้นทางใหม่ เมื่อจำลองการทำงานในระบบเครือข่าย หลังจากเวลาผ่านไป 1500 วินาที แต่ละโหนดในระบบเครือข่ายย่อมมีค่าระดับพลังงานที่แตกต่าง กัน เมื่อมีการค้นหาเส้นทางใหม่เกิดขึ้น ปัจจัยของค่าระดับพลังงานที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง ดังนั้นการกำหนดรูปแบบระบบ เครือข่ายในลักษณะดังกล่าว จะสามารถแสดงให้เห็นสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานจาก การใช้อัลกอริทึมในการค้นหา และเลือกเส้นทางที่แตกต่างกันของโพรโทคอล CLEA-AODV และ โพรโทคอล AODV เมื่อมีปัจจัยของค่าระดับพลังงานของโหนดในระบบเครือข่ายมาเกี่ยวข้อง

โดยในการจำลองการทำงานทั้ง 2 ทอพอโลยี ได้กำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ความหมาย
MAC layer	IEEE 802.15.4
Network layer	AODV และ CLEA-AODV
Transport layer	UDP
Application layer	Constance Bit Rate (CBR)
Number of Nodes	100 โหนด
Area	400*400 ตารางเมตร
Transmission Range	50 เมตร
Packet Size	64 ไบต์
Data interval	ทุก 0.5 วินาทีส่ง 1 แพ็กเกจ หรือประมาณ 2 แพ็กเกจต่อวินาที
Connection	5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อพร้อมๆกัน โดยจะทำการเปลี่ยนโหนดต้นทาง 1 ครั้ง ที่วินาทีที่ 1500

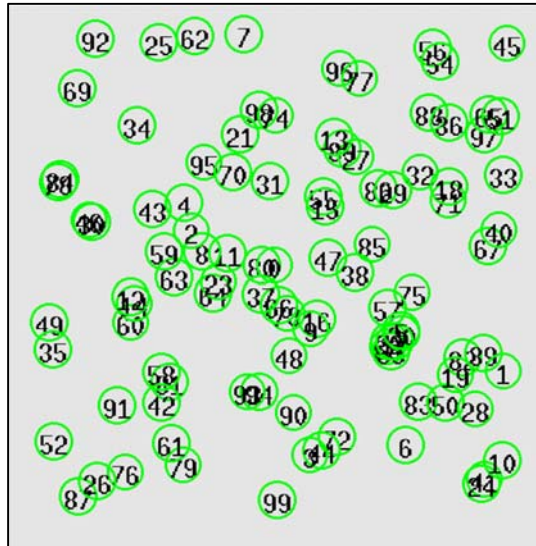
ตารางที่ 4-1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง (ต่อ)

พารามิเตอร์	ความหมาย
Initial Energy	10 จูล
Transmit power	txPower = 0.1 วัตต์
Receiving power	rxPower = 0.1 วัตต์
Simulation time	3000 วินาที

การทดลองจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของโปรโตคอล CLEA-AODV และ โปรโตคอล AODV บนระบบเครือข่ายทั้ง 2 ทอพอโลยีแบ่งการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อ คือ หัวข้อที่ 4.1 จำลองการทำงานในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งที่ตั้ง และในหัวข้อที่ 4.2 จำลองการทำงานในระบบเครือข่ายแบบกริด

#### 4.1 เปรียบเทียบการจำลองการทำงานในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งที่ตั้ง

การทดลองในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งที่ตั้ง แต่ละโหนดในระบบเครือข่ายจะจัดวางตำแหน่งอย่างเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่ตายตัว เมื่อมีการค้นหาเส้นทางโดยการแพร่กระจายข้อความสื่อสารออกมาจากโหนดต้นทาง อาจมีบางโหนดในระบบเครือข่ายที่ไม่สามารถรับข้อความ RREQ ได้ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่โหนดต้นทางจะไม่สามารถหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางได้ และหากการกระจายตัวของแต่ละโหนดเป็นไปในลักษณะกระจุกตัวรวมกัน เมื่อมีการส่งข้อมูลออกมาพร้อมๆกัน จะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูล ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลเสียต่อระบบเครือข่ายโดยรวมโดยได้แสดงตัวอย่างการจัดวางตำแหน่งของโหนดแบบสุ่มดังภาพประกอบ 4-1

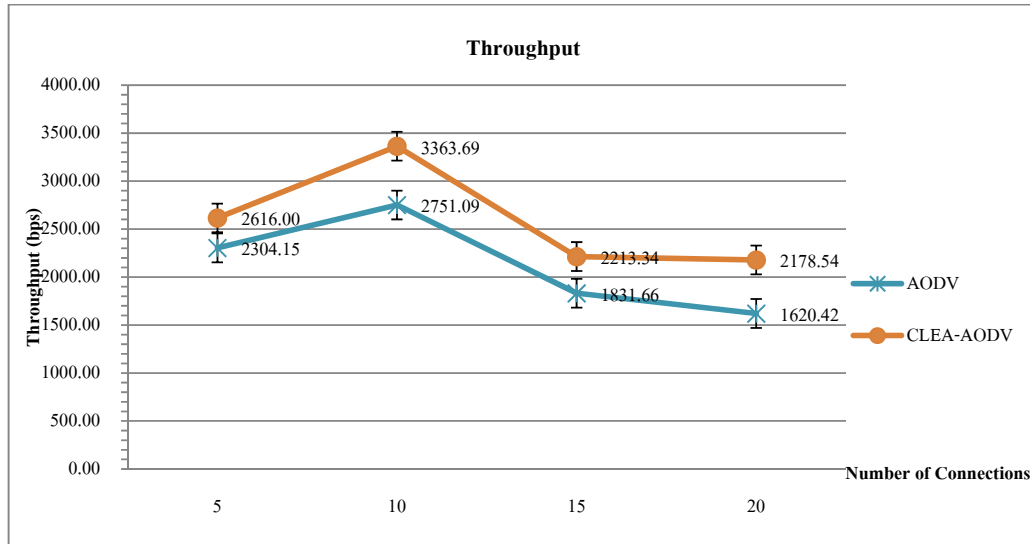


ภาพประกอบ 4-1 ลักษณะของรูปแบบระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง

ในการทดลองนี้ ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างโปรโตคอล CLEA-AODV และโปรโตคอล AODV โดยมีผลลัพธ์การจำลองการทำงานดังภาพประกอบ 4-2 ถึง

4-6

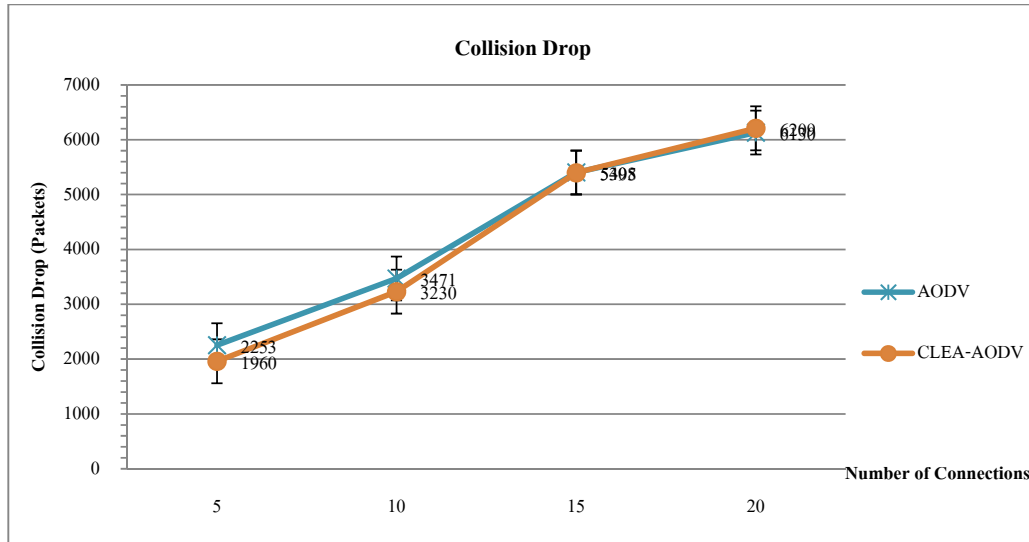
### ผลลัพธ์การจำลองการทำงาน



ภาพประกอบ 4-2 แสดงค่าอัตราปริมาณงานในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง

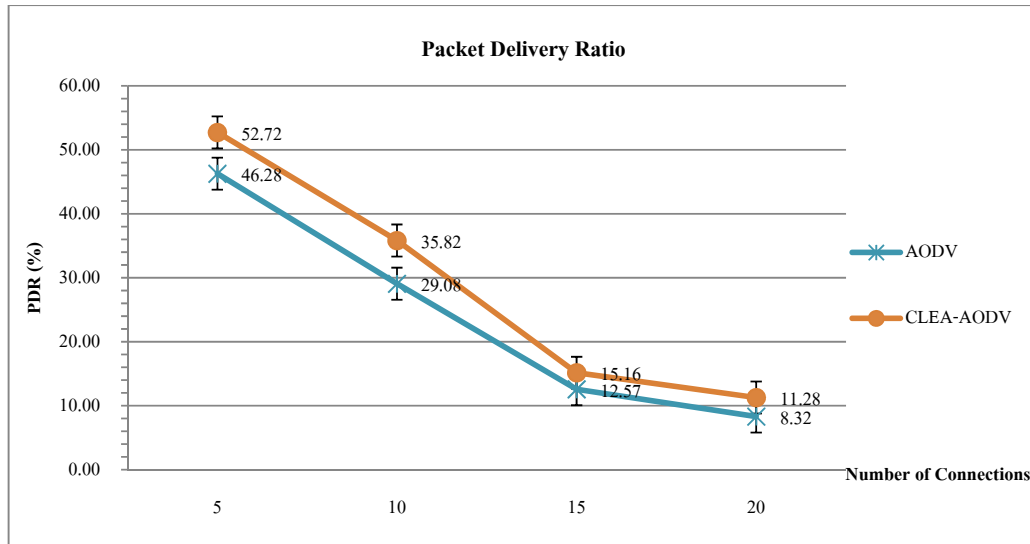
จากภาพประกอบ 4-2 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ จาก 5 เป็น 10 การเชื่อมต่อ ค่าอัตราปริมาณงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อจาก 10 เป็น 15 และ 20 การเชื่อมต่อ ค่าอัตราปริมาณงานกลับมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ย่อมส่งผลให้มีการส่งข้อมูลออกมาในระบบเครือข่ายมากขึ้น และมีโอกาสเกิดการชนกันของข้อมูลเพิ่มสูงขึ้นดังภาพประกอบ 4-3 ซึ่งแสดงจำนวนข้อมูลที่เกิดการชนกันในระบบเครือข่ายเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ จึงส่งผลให้ค่าอัตราปริมาณงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราปริมาณงานระหว่างโพรโทคอล CLEA-AODV และโพรโทคอล AODV พบว่าผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยโพรโทคอล CLEA-AODV ให้ผลลัพธ์ของค่าอัตราปริมาณงานที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV ในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าประมาณ 13.53 เปอร์เซ็นต์ 22.27 เปอร์เซ็นต์ 20.84 เปอร์เซ็นต์ และ 34.44

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล CLEA-AODV สามารถช่วยเพิ่มค่าอัตราปริมาณงานให้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เมื่อมีปัจจัยในเรื่องของพลังงานมาเกี่ยวข้องได้



ภาพประกอบ 4-3 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งเนื่องจากชนกันในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง

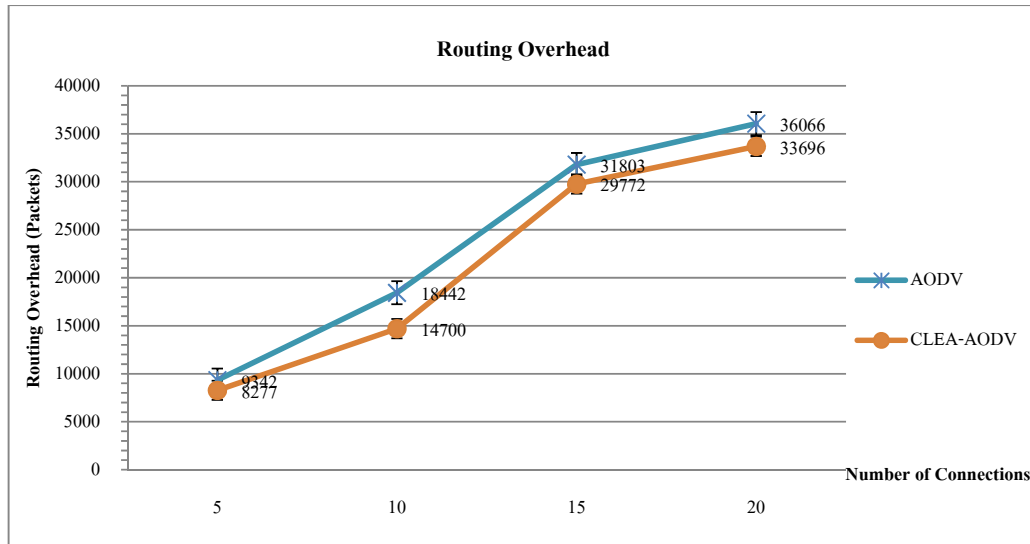
จากภาพประกอบ 4-3 เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทั้ง 2 โพรโทคอล พบว่าจำนวนข้อมูลที่มีการชนกันมีค่าใกล้เคียงกัน และต่างกันอย่างไรไม่มีค่านัยสำคัญ เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่าจำนวนข้อมูลที่เกิดการชนกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ย่อมส่งผลให้มีการส่งข้อมูลออกมาในระบบเครือข่ายพร้อมๆกันมากยิ่งขึ้น จึงเป็นการเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูล ซึ่งหากมีการชนกันของข้อมูลเป็นจำนวนมาก ข้อมูลจากโหนดต้นทางย่อมไม่สามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้ จึงส่งผลเสียต่อระบบเครือข่าย ทำให้ค่าอัตราปริมาณงานและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง



ภาพประกอบ 4-4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จในระบบเครือข่ายแบบคู่ตำแหน่ง

จากภาพประกอบ 4-4 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ส่งผลให้มีจำนวนข้อมูลที่ชนกันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จของทั้ง 2 โพรโทคอล พบว่าในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ โพรโทคอล CLEA-AODV มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จสูงกว่าโพรโทคอล AODV ทุกการทดลอง โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมากกว่าประมาณ 6.44 เปอร์เซ็นต์ 6.75 เปอร์เซ็นต์ 2.59 เปอร์เซ็นต์ และ 2.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลต่างของผลลัพธ์ของทั้ง 2 โพรโทคอล พบว่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จของทั้ง 2 โพรโทคอลมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น แสดงว่าโพรโทคอล CLEA-AODV สามารถทำงานได้ดีและเหมาะสมกับระบบเครือข่ายที่มีจำนวนการเชื่อมต่อไม่มาก และมีการชนกันของข้อมูลน้อย

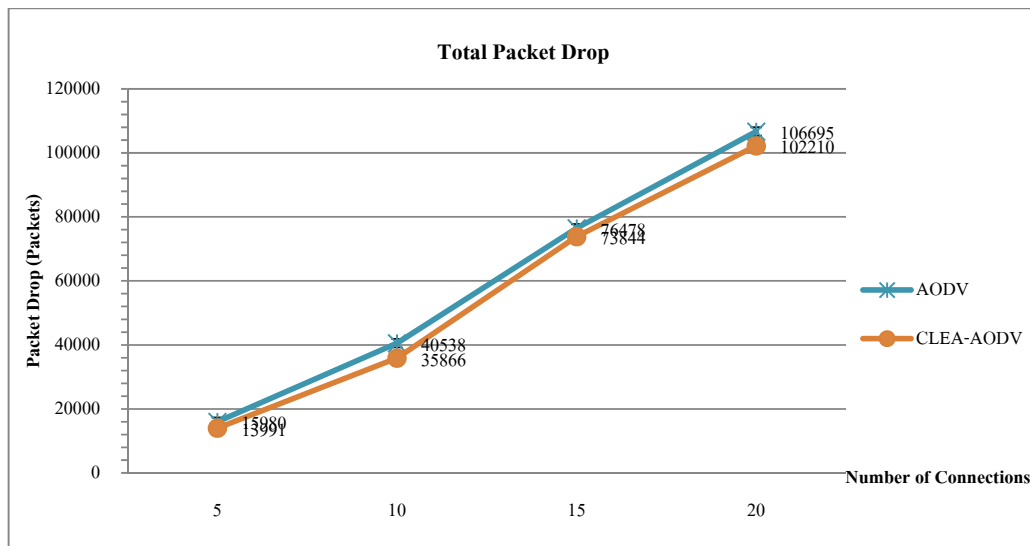




ภาพประกอบ 4-5 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายแบบดุ่มตำแหน่ง

จากภาพประกอบ 4-5 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น พบว่าแนวโน้มของจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายมีค่าเพิ่มจำนวนมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ จำนวน โหนดต้นทางในระบบเครือข่ายย่อมเพิ่มจำนวนขึ้นเช่นกัน ดังนั้นเมื่อทำการค้นหาเส้นทาง โหนดที่เป็นโหนดต้นทางแต่ละโหนด จะทำการส่งข้อความสื่อสารออกมาโดยการแพร่กระจาย อีกทั้งเมื่อมีการส่งข้อมูลออกมาพร้อมกันหลายๆ โหนด ย่อมส่งผลให้มีโอกาสที่ข้อมูลจะชนกันเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์การทำงานของทั้ง 2 โพรโทคอล พบว่าโพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ โดยมีจำนวนข้อความสื่อสารลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 11.40 เปอร์เซ็นต์ 20.29 เปอร์เซ็นต์ 6.39 เปอร์เซ็นต์ และ 6.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากผลลัพ์ดังกล่าว การที่โพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายน้อยกว่า ย่อมส่งผลดีต่อระบบเครือข่ายโดยรวม เนื่องจากเมื่อมีการส่งข้อความสื่อสารออกมาในระบบเครือข่ายลดลง จะส่งผลให้โอกาสที่ข้อมูลจะ

เกิดการชนกันลดลง อีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานและแบนด์วิดท์ที่ไม่ต้องนำมาใช้ ในการส่งข้อความสื่อสาร ซึ่งถือเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

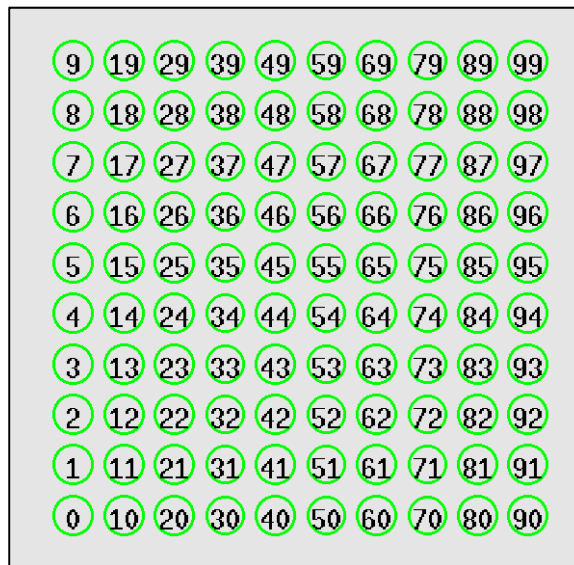


ภาพประกอบ 4-6 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง

จากภาพประกอบ 4-6 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่า จำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อย่อมส่งผลให้มีการส่งข้อมูลออกมาในระบบเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีโอกาสที่ข้อมูลชนกันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งพบว่าโพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งน้อยกว่าโพรโทคอล AODV โดยมีค่าน้อยกว่าในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 เชื่อมต่อ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 12.45 เปอร์เซ็นต์ 11.52 เปอร์เซ็นต์ 3.44 เปอร์เซ็นต์ และ 4.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล CLEA-AODV สามารถช่วยลดจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งได้ ซึ่งส่งผลดีต่อระบบเครือข่ายโดยรวม

#### 4.2 เปรียบเทียบการจำลองการทำงานในระบบเครือข่ายแบบกริด

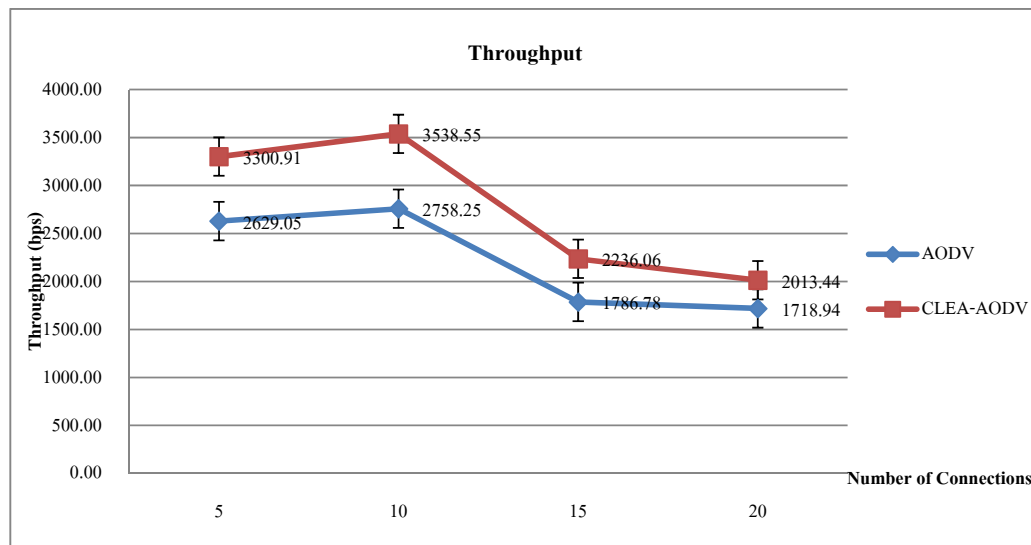
การทดลองในระบบเครือข่ายแบบกริด มีลักษณะการจัดวางตำแหน่งของโหนด เซนเซอร์ โดยโหนดต้นทางจะมีเส้นทางสื่อสารไปยังโหนดปลายทางแน่นอน ซึ่งมีความแตกต่างกับในรูปแบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง และเมื่อมีการค้นหาเส้นทางโดยการแพร่กระจายข้อความสื่อสาร หรือมีการส่งข้อมูลออกออกมาในระบบเครือข่ายเป็นจำนวนมาก ในระบบเครือข่ายแบบกริด โหนดต้นทางมีโหนดข้างเคียงที่สามารถรับข้อมูลได้มากกว่า 1 โหนดแน่นอน ซึ่งสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียงได้รอบทิศทาง จึงมีโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลสูงกว่าระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง โดยในระบบเครือข่ายแบบกริด มีลักษณะการจัดเรียงตำแหน่งของโหนด ดังภาพประกอบ 4-7



ภาพประกอบ 4-7 ลักษณะของระบบเครือข่ายแบบกริด

ในการทดลองนี้ ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างโปรโตคอล CLEA-AODV และโปรโตคอล AODV โดยมีผลลัพธ์การจำลองการทำงานดังภาพประกอบ 4-8 ถึง 4-12

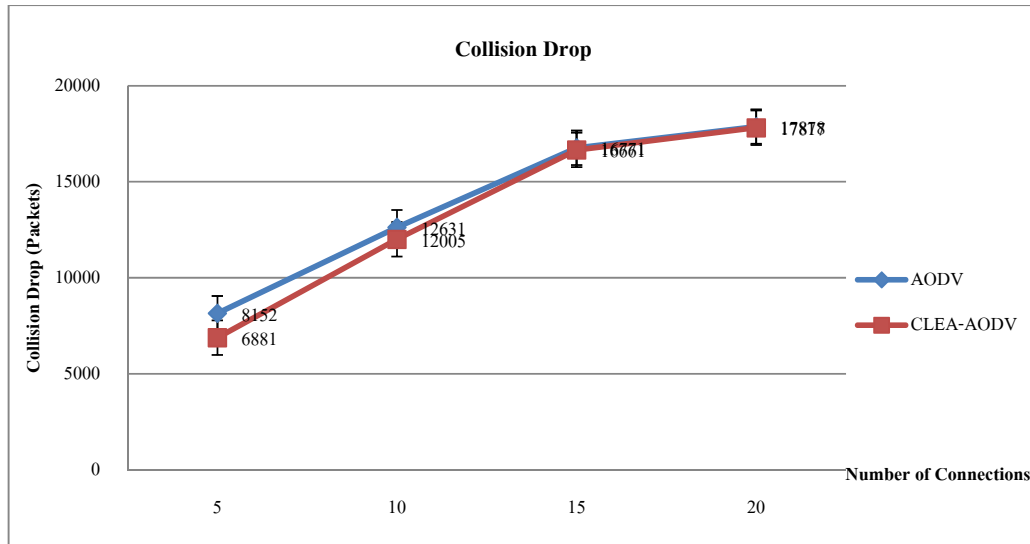
#### ผลลัพธ์การจำลองการทำงาน



ภาพประกอบ 4-8 แสดงค่าอัตราปริมาณงานในระบบเครือข่ายแบบกริด

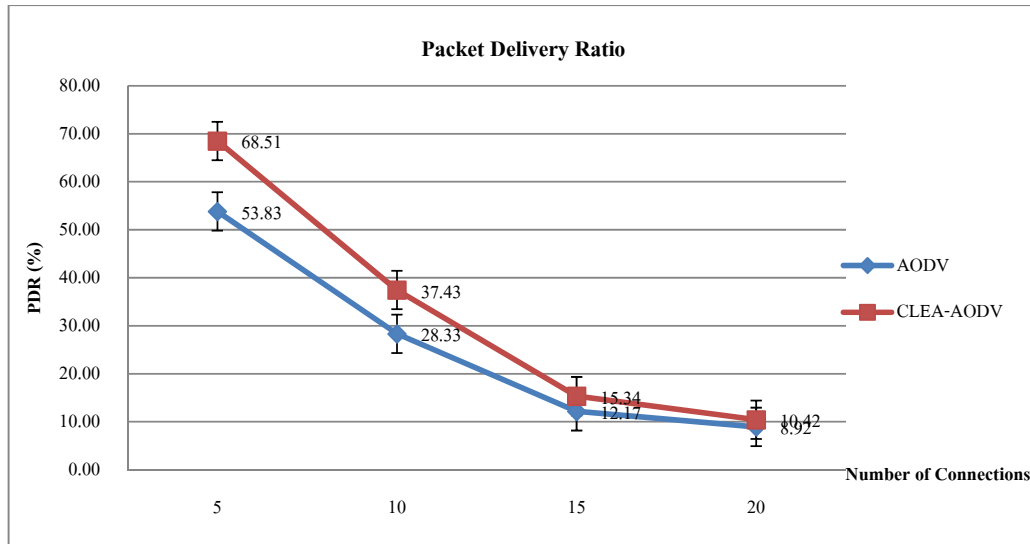
จากภาพประกอบ 4-8 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อจาก 5 เป็น 10 การเชื่อมต่อ พบว่าค่าอัตราปริมาณงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ส่งผลให้มีจำนวนโหนดเส้นทางเพิ่มมากขึ้น ข้อมูลที่ทำการรับและส่งถึงโหนดปลายทางย่อมเพิ่มจำนวนมากขึ้นเช่นกัน จึงส่งผลให้ค่าอัตราปริมาณงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อมากกว่า 10 การเชื่อมต่อ พบว่าค่าอัตราปริมาณงานกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อข้อมูลถูกส่งออกมาในระบบเครือข่าย

พร้อมๆกันเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีโอกาสที่ข้อมูลจะเกิดการชนกันมีค่าสูงขึ้น ดังภาพประกอบ 4-9 ดังนั้นเมื่อเกิดการชนกัน ข้อมูลที่ถูกส่งจากโหนดต้นทางจึงไม่สามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้ ค่าอัตราปริมาณงานจึงมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราปริมาณงานระหว่างโพรโทคอล CLEA-AODV และ โพรโทคอล AODV พบว่า โพรโทคอล CLEA-AODV มีค่าอัตราปริมาณงานมากกว่าโพรโทคอล AODV โดยในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ มีค่าอัตราปริมาณงานมากกว่าคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ประมาณ 25.56 เปอร์เซ็นต์ 28.29 เปอร์เซ็นต์ 25.14 เปอร์เซ็นต์ และ 17.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราปริมาณงานกับทอพอโลยีในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง พบว่าการทดลองที่ 5 และ 10 การเชื่อมต่อ ในระบบเครือข่ายแบบกริดให้ค่าอัตราปริมาณงานที่สูงกว่า เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากรูปแบบการจัดวางตำแหน่งของโหนด เซนเซอร์ ในระบบเครือข่ายแบบกริด ซึ่งมีจำนวนเส้นทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางมากกว่า 1 เส้นทางแน่นอน ดังนั้นโอกาสที่โหนดต้นทางจะหาเส้นทางไม่พบจึงมีค่าน้อยกว่าในรูปแบบสุ่มตำแหน่ง และเมื่อพิจารณาจากค่าอัตราปริมาณงานที่เพิ่มขึ้น พบว่าการทดลองในรูปแบบที่ 5 และ 10 การเชื่อมต่อ โพรโทคอล CLEA-AODV มีค่าอัตราปริมาณงานที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางโดยใช้ค่าพลังงานเป็นตัวแปรในการเลือกเส้นทาง หากมีจำนวนเส้นทางให้เลือกมากกว่าย่อมส่งผลดี เนื่องจากสามารถเลือกเส้นทางที่มีความเสี่ยงต่อการที่พลังงานจะหมดลงระหว่างการสื่อสารได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ในการทดลองในระบบเครือข่ายแบบกริดโพรโทคอล CLEA-AODV สามารถให้ค่าอัตราปริมาณงานที่มากกว่าโพรโทคอล AODV อย่างชัดเจน ส่วนในการทดลองที่ 15 และ 20 การเชื่อมต่อพบว่าค่าอัตราปริมาณงานมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อมีการส่งข้อความสื่อสารและข้อมูลออกมาในระบบเครือข่ายเป็นจำนวนมาก เมื่อมีการชนกันของข้อมูล ส่งผลให้ข้อความสื่อสารและข้อมูลจากโหนดต้นทางไม่สามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้ ดังนั้นทั้ง 2 โพรโทคอล จึงไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าอัตราปริมาณงานที่ได้จึงมีค่าน้อย และมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล CLEA-AODV สามารถทำงานได้ดีและมีความเหมาะสมกับระบบเครือข่ายที่มีการชนกันของข้อมูลน้อย



ภาพประกอบ 4-9 แสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกลบทิ้งเนื่องจากการชนกันในระบบเครือข่ายแบบกริด

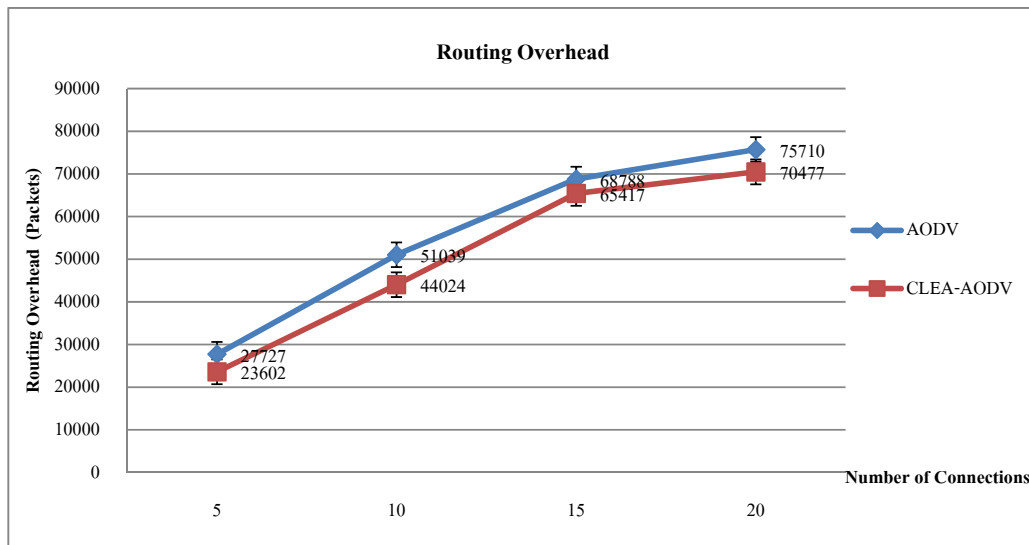
จากภาพประกอบ 4-9 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟ พบว่ามีจำนวนข้อมูลที่ชนกันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ส่งผลให้มีการส่งข้อมูลออกมาในระบบเครือข่ายเพิ่มจำนวนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ข้อมูลจะเกิดการชนกันเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง พบว่าในระบบเครือข่ายแบบกริดมีการชนกันของข้อมูลมากกว่าในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งประมาณ 3 เท่าตัว เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากตารางตำแหน่งของโหนด พบว่าเมื่อมีการแพร่กระจายข้อความสื่อสาร จะสามารถส่งข้อมูลออกไปได้รอบทิศทาง ซึ่งเมื่อมีการแพร่กระจายข้อความสื่อสาร ในระบบเครือข่ายแบบกริด จะมีจำนวนโหนดที่สามารถรับและส่งต่อข้อมูลมากกว่า ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ข้อมูลจะเกิดการชนกันจึงมีค่ามากกว่าระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง



ภาพประกอบ 4-10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จในระบบเครือข่ายแบบกริด

เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟเมื่อทำการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการชนกันของข้อมูลที่เพิ่มจำนวนมากขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จของโปรโตคอล CLEA-AODV กับโปรโตคอล AODV พบว่า โปรโตคอล CLEA-AODV มีผลลัพธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมากกว่าทุกการทดลอง ซึ่งในการทดลองที่ 5 และ 10 การเชื่อมต่อ มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จที่มากกว่าอย่างชัดเจน และต่างกันอย่างมีค่านัยสำคัญ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จมากกว่าประมาณ 14.68 เปอร์เซ็นต์ และ 9.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในการทดลองที่ 15 และ 20 การเชื่อมต่อ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงและต่างกันอย่างไม่มีความนัยสำคัญ โดยมีค่ามากกว่าประมาณ 3.17 เปอร์เซ็นต์ และ 1.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุเนื่องจาก หากมีการชนกันของข้อมูลจำนวนมากแล้วโหนดต้นทางทำการค้นหาเส้นทาง ซึ่งข้อความสื่อสารที่ถูกส่งออกไปเกิดการชนกัน จึงไม่สามารถไปถึงโหนดปลายทางได้ โหนดต้นทางจึงไม่สามารถส่งข้อมูลไปถึงโหนดปลายทาง ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลง หรือหากมีการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

แต่ข้อมูลที่ถูกส่งออกมาในระบบเครือข่ายเกิดการชนกัน ย่อมส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จลดลงเช่นเดียวกัน จากผลลัพธ์ดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล CLEA-AODV จะสามารถให้ค่าสมรรถนะที่ดีและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสถานะที่มีการเชื่อมต่อและมีการชนกันของข้อมูลน้อย

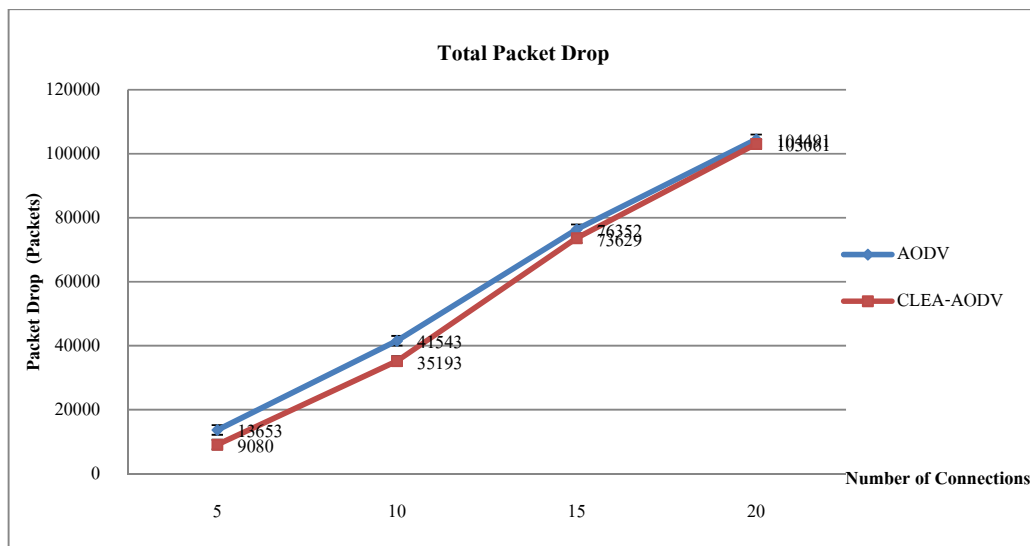


ภาพประกอบ 4-11 แสดงจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายแบบกริด

จากภาพประกอบ 4-11 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่า เมื่อทำการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ ส่งผลให้มีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ จำนวนโหนดต้นทางย่อมเพิ่มจำนวนมากขึ้น การค้นหาเส้นทางจึงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่งผลให้มีการส่งข้อความสื่อสารออกมาในระบบเครือข่ายมากขึ้น แนวโน้มของจำนวนข้อความสื่อสารจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ เมื่อเปรียบเทียบจำนวนข้อความสื่อสารระหว่างระบบเครือข่ายแบบกริดกับระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง พบว่าในระบบเครือข่ายแบบกริดมีจำนวนข้อความสื่อสารมากกว่าในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งประมาณ 2



เท่า สาเหตุเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากการวางตำแหน่งของโหนด แล้วโหนดต้นทางทำการค้นหาเส้นทางโดยทำการแพร่กระจายข้อความสื่อสารโดยสามารถส่งข้อความสื่อสารออกไปได้รอบทิศทาง จึงส่งผลให้ในระบบเครือข่ายแบบกริดมีจำนวนข้อความสื่อสารมากกว่าในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง อีกทั้งจำนวนข้อมูลที่ชนกันก็มากกว่าเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนข้อความสื่อสารของโพรโทคอล CLEA-AODV และโพรโทคอล AODV พบว่า โพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อความสื่อสารน้อยกว่า โพรโทคอล AODV โดยมีจำนวนข้อความสื่อสารลดลงในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ประมาณ 14.88 เปอร์เซ็นต์ 13.74 เปอร์เซ็นต์ 4.90 เปอร์เซ็นต์ และ 6.91 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งการที่โพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อความสื่อสารในระบบเครือข่ายน้อยกว่า ย่อมส่งผลดีต่อระบบเครือข่ายโดยรวมเนื่องจากสามารถช่วยลดการใช้พลังงานและแบนด์วิดท์ที่ใช้ไปกับการส่งข้อความสื่อสารได้



ภาพประกอบ 4-12 แสดงจำนวนแสดงจำนวนข้อมูลที่ถูกล้างในระบบเครือข่ายแบบกริด

จากภาพประกอบ 2-12 เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่า จำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อส่งผลให้มีการส่งข้อมูลออกมาในระบบเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีโอกาสที่ข้อมูลชนกันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งพบว่า โพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งน้อยกว่า โพรโทคอล AODV โดยมีค่าน้อยกว่าในการทดลองที่ 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 33.49 เปอร์เซ็นต์ 15.29 เปอร์เซ็นต์ 3.57 เปอร์เซ็นต์ และ 1.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล CLEA-AODV สามารถช่วยลดจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งและเหมาะสมกับรูปแบบของระบบเครือข่ายที่มีการชนกันของข้อมูลน้อย

## บทที่ 5

### บทสรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของวิทยานิพนธ์ ผลลัพธ์การทำงาน ข้อดี และข้อด้อยของโพรโทคอลที่ได้ทำการออกแบบ รวมถึงปัญหา อุปสรรคในการทำงาน และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา เพื่อเพิ่มเติมประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล CLEA-AODV ให้ดียิ่งขึ้น

#### 5.1 บทสรุปของการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาโพรโทคอล Ad hoc Distance On demand Vector (AODV) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในการนำมาใช้กับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งมีปัจจัยของระดับพลังงานของโหนดในเส้นทางสื่อสารมาเกี่ยวข้อง โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า การสื่อสารข้ามระดับชั้น (Cross Layer) เพื่อดึงค่าพลังงานจากระดับชั้น Physical มาเป็นอีกตัวแปรในการเลือกเส้นทาง และเรียกโพรโทคอลที่ได้ปรับปรุงใหม่ว่า Cross Layer Energy Aware for AODV (CLEA-AODV) ซึ่งได้ทำการแก้ไขในส่วนของอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทาง เนื่องจากอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV เดิมนั้น ไม่ได้มีการนำในส่วนของค่าระดับพลังงาน ซึ่งมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการทำงานมาใช้ในการเลือกเส้นทาง จึงได้ทำการแก้ไขอัลกอริทึมในการเลือกเส้นทางใหม่ นั่นคือเมื่อเส้นทางสื่อสารเกิดปัญหาจากโหนดในเส้นทางเกิดเหตุการณ์ของพลังงานหมดลงระหว่างที่ทำการสื่อสาร และมีเส้นทางอื่นที่มีค่าระดับพลังงานสูงกว่า โพรโทคอล CLEA-AODV จะทำการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางอื่นแทน

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล CLEA-AODV และโพรโทคอล AODV ทั้งในรูปแบบระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งที่ตั้งของโหนด และระบบเครือข่ายแบบกริด เพื่อแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล CLEA-AODV มีค่าประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV โดยในระบบเครือข่ายทั้ง 2 รูปแบบ มีการกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นให้กับทุกโหนดเท่ากัน และเมื่อเวลาผ่านไประดับพลังงานของแต่ละโหนดในระบบเครือข่ายจะมีค่าแตกต่างกัน เมื่อมีการค้นหาเส้นทางใหม่เกิดขึ้น ในสถานะที่โหนดในระบบเครือข่ายมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน โพรโทคอล CLEA-AODV สามารถให้ค่าประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV สำหรับลักษณะในการจำลองการทำงาน ได้ทำการทดลองเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อพร้อมกัน จาก 5 10 15 และ 20 การเชื่อมต่อ เพื่อดูผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นจากการเปรียบเทียบ

ผลลัพธ์การทำงานของทั้ง 2 โพรโทคอล พบว่าทั้งในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่งและในระบบเครือข่ายแบบกริด โพรโทคอล CLEA-AODV ให้ผลลัพธ์ของค่าอัตราปริมาณงานที่ดีกว่าถึงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในระบบเครือข่ายแบบกริด ซึ่งมีเส้นทางสื่อสารให้เลือกหลายเส้นทาง และที่จำนวนการเชื่อมต่อ 5 และ 10 การเชื่อมต่อ ซึ่งมีการชนกันของข้อมูลน้อย ให้ผลลัพธ์ของค่าอัตราปริมาณงานที่ดีกว่าประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จของโพรโทคอล CLEA-AODV มีผลลัพธ์มากกว่าโพรโทคอล AODV เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะในการทดลองที่ 5 และ 10 การเชื่อมต่อ ให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าอย่างชัดเจน ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองที่ 15 และ 20 การเชื่อมต่อ เนื่องจากมีการชนกันของข้อมูลสูง จึงส่งผลให้ค่าที่ได้มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน ในส่วนของผลลัพธ์ของจำนวนข้อความควบคุมพบว่าโพรโทคอล CLEA-AODV มีจำนวนข้อความควบคุม น้อยกว่าโพรโทคอล AODV อย่างชัดเจนในการทดลองที่ 5 และ 10 การเชื่อมต่อ โดยมีจำนวนข้อความควบคุมน้อยกว่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับผลลัพธ์ของจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้งโพรโทคอล CLEA-AODV มีผลลัพธ์ของจำนวนข้อมูลที่ถูกทิ้ง น้อยกว่าโพรโทคอล AODV ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในการทดลองที่ 15 และ 20 การเชื่อมต่อ ค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของทั้ง 2 โพรโทคอล มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการชนกันของข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อ

จากผลลัพธ์การจำลองการทำงานที่กล่าวมา จึงสามารถสรุปได้ว่า ในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ที่มีปัจจัยของค่าระดับพลังงานของโหนดในระบบเครือข่าย ที่มีความแตกต่างกัน โพรโทคอล CLEA-AODV ให้ผลลัพธ์ของค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าโพรโทคอล AODV ทั้งในระบบเครือข่ายแบบสุ่มตำแหน่ง และระบบเครือข่ายแบบกริด โดยเฉพาะในการทดลองที่ 5 และ 10 การเชื่อมต่อซึ่งมีการชนกันของข้อมูลน้อย

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรคของการทำวิทยานิพนธ์

1. เมื่อมีการชนกันของข้อมูลจำนวนมาก ย่อมส่งผลกระทบต่อการค้นหาเส้นทาง ซึ่งทำให้ข้อความสื่อสารจากโหนดต้นทาง ไม่สามารถไปถึงโหนดปลายทางได้ เมื่อโพรโทคอล CLEA-AODV ไม่สามารถรู้เส้นทาง หรือมีเส้นทางสื่อสารให้เลือกน้อย ประสิทธิภาพในการทำงานจึงลดลง
2. ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองไม่สามารถนำมาใช้ดูค่าประสิทธิภาพได้ทันที ต้องผ่านการแปลงผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบทางสถิติก่อน

3. การจำลองการทำงานได้ผลลัพธ์จากการจำลองไฟล์บันทึกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อทำการทดลองหลายครั้ง จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลขนาดใหญ่

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิทยานิพนธ์นี้สามารถที่นำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง กับระบบเครือข่าย เช่น เซอร์ไวร์สาย โดยที่ระบบสามารถเพิ่มค่าอัตราปริมาณงาน 10-20 เปอร์เซ็นต์หรือสามารถนำ อัลกอริทึมตัวนี้ไปประยุกต์ใช้กับโพรโทคอลตัวอื่นๆได้

## บรรณานุกรม

- [1] J. Zheng and M. J. Lee. "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4," *Sensor Network Operations, IEEE Press chapter4*, pp.218–237, 2006.
- [2] G. Acs and L. Buttyabv. "A taxonomy of routing protocol for wireless sensor networks," *Award of the Hungarian Telecommunication Scientific Society ACM Conference*, pp.32-40, 2007.
- [3] C. E. Perkins, P. Bhagwat, "Highly DynamicDestination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," *SIGCOMM*, London, 1994.
- [4] T. Clausen, P. Jacquet, A. Laoti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum and L.Viennot, "Optimized Link State Routing Protocol," *IETF RFC 3626*, 2003.
- [5] D. B. Johnson, D. A. Maltz andYih and C. Hu, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," *IETF Internet Draft*, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manetsdr-08.txt>, February 2003.
- [6] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer and S. R. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," *IETF RFC 3561*, 2003.
- [7] J. Macker, "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," *IETF RFC 2501*, 1999.
- [8] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone, "An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution," *Sensors Journal*, vol. 9, n. 9, pp. 6869-6896, 2009.

- [9] T. Hieng Tie, C. Eng Tan and S. Ping Lau, "Alternate Link Maximum Energy Level Ad Hoc Distance Vector Scheme for Energy Efficient Ad Hoc Networks Routing," *International Conference on Computer and Communication Engineering*, 2010.
- [10] D. Joshi Radhika and P. Rege Priti, "Distributed energy efficient routing in ad hoc networks," *Fourth International Conference Wireless Communication and Sensor Networks*, pp.16-21, 2008.
- [11] Z. Chenchen and Y. Zhen, "A New EAAODV Routing Protocol based on Mobile Agent," *The International Conference on Systems and Networks Communication, IEEE Computer Society*, pp. 4, 2006.
- [12] S. Mahlkecht, S. A. Madani and M. Roetzert, "Energy Aware Distance Vector Routing Scheme for Data Centric Low Power Wireless Sensor Networks," *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp.1030-1035, 2006.
- [13] C. Jianglian, Z. Zhaoxiao, Z. Wenli and Pei Tingrui, "Energy-aware AODV Routing for Ad Hoc Networks," *International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing*, pp.466-468 , 2009.
- [14] J. Kim and J. Jang "AODV based Energy Efficient Routing Protocol for Maximum Lifetime in MANET," *Proceedings of the Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services*, pp.77, 2006.
- [15] M. Frikha and F. Ghandour, "Implementation and Performance Evaluation of an Energy Constraint Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Computer Society, Proceedings of the The Third Advanced International Conference on Telecommunications*, pp.13, 2007.

- [16] L. Li, F. Zheng, C. Li and P. Yuanan, "Energy Constrained Routing Protocol for MANET," *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp.3205-3210, 2007.
- [17] W. Zhengyu, D. Xiangjun and C. Lin, "A Grid-Based Energy Aware Node-Disjoint Multipath Routing Algorithm for MANETs," in *Proceedings of International Conference on Natural Computation*, vol.5, pp.244-248, 2007.
- [18] S. Hamad, H. Nouredine and H. Al-Raweshidy, "LSEA: Link Stability and Energy Aware for Efficient Routing in Mobile Ad Hoc Network," *14th International Symposium Wireless Personal Multimedia Communications*, pp.1-5, 2011.
- [19] A. Bhatia and P. Kaushik, "A Cluster Based Minimum Battery Cost AODV Routing Using Multipath Route for ZigBee," *Proceedings of the 16th International Conference on Networks*, pp.1-7, 2008.
- [20] J. Yang, K. Kang, Y. Cho and S. Chae, "PAMP: Power-Aware Multi-Path Routing Protocol for a Wireless Ad hoc Network," *The Wireless Communications and Networking Conference proceedings, IEEE Communications Society*, pp.2247-2252, 2008.
- [21] M. Veerayya, V. Sharma and A. Karandikar, "SQ-AODV: A Novel Energy-Aware Stability-Based Routing Protocol for Enhanced QOS in Wireless AD-HOC Networks," *IEEE Military Communications Conference*, pp.1-7, 2008.
- [22] V. Potdar, A. Sharif, and E. Chang, "Wireless sensor networks: A survey," *International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, IEEE Computer Society*, pp. 636–641, 2009.



- [23] L. M. Borges, F. J. Velez, and A. S. Lebres, "Taxonomy for Wireless Sensor Networks Services Characterisation and Classification," *7th Conference on Telecommunications*, 2009.
- [24] "IEEE 802.15.4 MAC standard," *IEEE Computer Society*, 2009.
- [25] L. De Nardis and M. Di Benedetto, "Overview of the IEEE 802.15.4/4a standards for low data rate Wireless Personal Data Networks," *4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp.285-289, 2007.
- [26] D. Shwetha, Bhat.M Subramanya, and T. Devaraju.J, "A Performance Study of Proactive, Reactive and Hybrid Routing Protocols using Qualnet Simulator," *International Journal of Computer Applications*, vol. 28, No.5, pp.10-17, 2011.
- [27] E. I. Oyman and C. Ersoy, "The Effect of Overhead Energy Considerations to the Network Lifetime in Wireless Sensor Networks," *13th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, 2004.
- [28] S. Halawani, A. Khan, "Sensors Lifetime Enhancement Techniques in Wireless Sensor Networks - A Survey," *Journal of Computing*, vol. 2, pp.34-47, 2010.
- [29] A. Abed, A. Alkhatib and G. Singh Baicher, "Wireless Sensor Network Architecture," *International Conference on Computer Networks and Communication Systems*, vol.35, pp.10-15, 2012.
- [30] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Comm.*, vol. 11, pp. 6-28, 2004.
- [31] D. Felice and M. Relatore, "Cross-Layer Optimizations in Multi-Hop Ad Hoc Networks," (*Ph.D. Thesis*) *Dottorato di Ricerca*, 2008.

- [32] V. Srivastava and M. Motani, "Cross-layer design: a survey and the road ahead," *IEEE Communications Magazine*, vol.43, pp.112-119, 2005.
- [33] W. Charfi, M. Masmoudi and F. Derbel, "A Layered Model for Wireless Sensor Networks," *6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2009.
- [34] S. K. Singh , M. P Singh and D. K Singh "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks – A Survey," *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, vol.1, No.2, pp.63-83, 2010.
- [35] Z. Huang, L. San-Yang and Q. Xiang-Gang, "Overview of Routing in Dynamic Wireless Sensor Networks," *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, vol.4, No.4, pp.199-206, 2010.
- [36] Y. Zeng and C. Sreenan, "A Real-Time and Robust Routing Protocol for Building Fire Emergency Applications Using Wireless Sensor Networks," *8th International Workshop on RealTime Networks*, pp.358-363, 2009.
- [37] K. Sha, W. Shi and O. Watkins, "Using Wireless Sensor Networks for Fire Rescue Applications: Requirements and Challenges," *6th IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, pp.239-244, 2006.
- [38] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, "Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey," *Elsevier Ad Hoc Networks Journal*, vol. 7, No. 3, pp. 537-568, 2009.
- [39] E.I. Oyman, and C. Ersoy. "Overhead Energy Considerations for Efficient Routing in Wireless Sensor Networks," *Computer Network The OhioLINK Electronic Journal Center*, vol.46, pp. 465-478, 2004.

- [40] S. Jeongho and B. Tae-Young, "A Routing Scheme with Limited Flooding for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol.3, No.3, pp.19 – 32, 2010.
- [41] L. Cao, T. Dahlberg and Y. Wang, "Performance Evaluation of Energy Efficient Ad Hoc Routing Protocols," *IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, pp.306-313, 2007.
- [42] T. Huang, W. Chung and C. Huang, "A Revised AODV Protocol with Energy Management for Real-Time/Non-real-time Services in Mobile Ad Hoc Network," *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications*, pp.440-446, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
การใช้งานโปรแกรม NS-2

## โปรแกรมจำลอง NS-2

โปรแกรมจำลอง NS-2 เป็นโปรแกรมที่ใช้การจำลองการทำงานระบบเครือข่าย สามารถจำลองได้หลากหลายรูปแบบ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ โปรแกรมจำลอง NS-2 ในการจำลองการทำงานเครือข่ายเช่นเซอร์ไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และใช้โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลการค้นหาเส้นทาง ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมจำลอง NS-2 จำลองได้เลย เนื่องจากมีตัวโปรแกรมดั้งเดิมมีส่วนของโพรโทคอลดังกล่าวติดตั้งมาเรียบร้อยแล้ว

โปรแกรม NS-2 มีภาษาที่ใช้ในการทำงาน 2 ภาษา คือ Ocl และ C++ เนื่องจาก Simulator มีลักษณะการทำงาน 2 อย่างที่แตกต่างกัน ซึ่งงานส่วนแรกจะเป็นการจำลองรายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับโพรโทคอลที่ใช้ในระบบเครือข่ายในระดับชั้นต่างๆ ส่วนงานในส่วนที่ 2 คือส่วน การกำหนดค่าพารามิเตอร์และกำหนดรูปแบบของระบบเครือข่ายที่นำมาจำลองการทำงาน

ก่อนทำการติดตั้งโปรแกรมจำลอง NS-2 ซึ่งทำงานอยู่ในระบบปฏิบัติการ Linux ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu version 11.10 หลังจากทำการติดตั้ง Ubuntu เสร็จเรียบร้อยแล้ว สามารถติดตั้งดาวน์โหลดตัวโปรแกรมได้จากลิงค์นี้

<http://sourceforge.net/projects/nsnam/files/allinone/ns-allinone-2.35/ns-allinone-2.35.tar.gz/download>

แล้วเปิดโปรแกรม Terminal ใน Ubuntu เพื่อพิมพ์คำสั่งในการติดตั้งโปรแกรม NS-2.35 ดังนี้

**พิมพ์คำสั่งในการอัปเดตและอัปเดตระบบปฏิบัติการ**

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get build-essential autoconf automake libxmu-dev
```

**พิมพ์คำสั่งในการติดตั้งโปรแกรม**

```
tar zxvf ns-allinone-2.35.tar.gz
```

```
cd ns-allinone-2.35
```

```
./install
```

การ run ns ผู้ใช้จะต้อง cd เข้าไปยัง Directory ที่เก็บ file(.tcl) แล้วพิมพ์คำสั่ง ns ตามด้วยชื่อ file(.tcl) ที่ต้องการจะประมวลผล เช่น

```
ns simple.tcl
```

หลังจากพิมพ์คำสั่ง NS-2 จะทำการประมวลผลการทำงานของงานและสร้างผลลัพธ์ของการจำลองเก็บไว้ใน Directory เดียวกับที่เก็บ file(.tcl) โดยมีผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสองไฟล์ คือ Trace file (.tr) และ Network AniMator file (.nam)

ในส่วนของ nam เป็นส่วนของการแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟฟิก โดยต้องเข้าไปใน Directory ที่เก็บ file (.nam) และพิมพ์คำสั่ง

```
nam simple.namsimple.tcl
```

ภาคผนวก ข  
การตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์



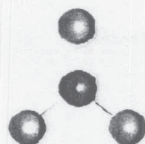
INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT TRENDS IN ENGINEERING AND  
TECHNOLOGY (ICRTET-2012)  
June 9 2012, Singapore

*Proceedings*  
*Of*  
*International Conference*  
*on*  
**RECENT TRENDS IN  
ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

**ICRTET-2012**

**June 9<sup>th</sup>, 2012  
Singapore**

*Organized by:*



**Interscience Research Network (IRNet)**

Bhubaneswar, India

## Enhanced Mobile Ad hoc Routing Protocol Using Cross layer Design in Wireless Sensor Networks

**Waris Chanei & Sakuna Charoenpanyasak**

Center of Excellent in Wireless Sensor Networks, Department of Computer Engineering,  
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand

E-mail : c.waris@hotmail.com, jsakuna@coe.psu.ac.th

*Abstract* - Wireless sensor networks consist of several tiny sensor nodes largely which were largely deployed to monitor the environment conditions. Each sensor node will forward the data wirelessly to the base station using IEEE 802.15.4 standard. The wireless network management will be different depending on the applications. In wireless sensor networks routing protocols, there are many control messages. Because of the limited resources in wireless sensor networks, routing protocol has to design to consider the energy. This paper proposes the new method based on AODV routing protocol to find the route using cross layer design. The proposed routing protocol can save the energy and reduce overhead compared to the original AODV.

*Keywords* - Wireless sensor networks, Routing Protocol, Mobile Ad hoc Networks, AODV, Cross layer design.

### I. INTRODUCTION

Wireless sensor networks (WSNs) have witnessed a growing interest in deploying. Sensors are expected to be low cost and can be applied to many applications. In the network having many sensors using multi-hop communication is required the routing protocol for to find the communication path and maintenance the route [1]. There are many routing protocols in propose for WSNs depending on their applications. In this research focus on multi-hop communication, therefore choose AODV routing protocol. But AODV designed for mobile ad-hoc network (MANETs). This protocol is not appropriate for WSNs because of there are still many limits of energy and resource [2]. Sensor node to send – receives packet low remaining energy than other sensor node. AODV protocol use route discovery to find a new path. But in route discovery is not energy parameter. If AODV choose low energy path. When some node in path is power off. AODV broadcast message control to find a new route. It effect to high routing overhead, waste energy and bandwidth.

This paper proposes the new algorithm to improve AODV for WSNs applications. Modified AODV the route discovery called Energy Weight –AODV (EW-AODV) has used the cross layer design technique for routing layer to access the energy parameter from the lower layer. The Network Simulation 2 (NS-2) is

employed to analyst the results between EW-AODV and AODV.

This article describes the operation of wireless sensor networks on IEEE 802.15.4 standards, AODV routing protocol and Cross layer design method in Section 2. The EW-AODV describes in Section 3. The simulation parameters and network topology using NS-2 network are presented in Section 4. The performance analysis and comparison are present in Section 5. The conclusion is described in Section 6.

### II. THEORY

#### A. IEEE 802.15.4 Standard

IEEE 802.15.4 [3] is a standard which specifies the physical layer and media access control (MAC) for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs). The basic framework conceives a 10-meter communication range with a transfer rate of 250 kbps. Trade-offs is possible to favor more radically the embedded devices with the low power requirements, through the definition of not one, but several physical layers. The transfer rates of 20 and 40 kbps were initially defined, with the 100 kbps rate being added in the current revision. This standard supports topology one-hop star and multi-hop with the frequency band at 2.4 GHz or 896/915 MHz. size of payload 104 bytes and address length 64 bit or 16 bit (support 65,000 node. The sensor can communicate

using multi-hop and also required a routing protocol to manage the path and send the information.

**B. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Protocol**

AODV [4] Routing is a routing protocol for mobile ad hoc networks (MANETs). AODV is a reactive routing protocol, meaning that it will establish a route to a destination only on demand. AODV find a routing path independently of the usage of the paths. At that point, node has to broadcast a request for a connection. The advantage of AODV is that there is no overhead traffic for the communication along the existing links. Also, the distance vector routing is simple, and doesn't require much memory or calculation. However, AODV still requires more time to establish a connection, and the overhead of the initial communication to establish a route is heavier than some other approaches. Fig. 1 show AODV Route Discovery, Node 0 is source node and Node 7 is a destination node. Nodes 0 start to broadcast a route request packet (RREQ) to the neighbors node, When the neighbors receive RREQ, it will check in the route table. If there is no route to a destination, AODV will broadcast to other neighbor nodes. When the destination node receives RREQ, it will send a route reply (RREP) to the source node. As we can be seen, the AODV protocols produce a large amount of control message when the route discovery is activated. Therefore, the energy is consumed. In this research, the energy saving routing protocol using cross layer design is proposed.

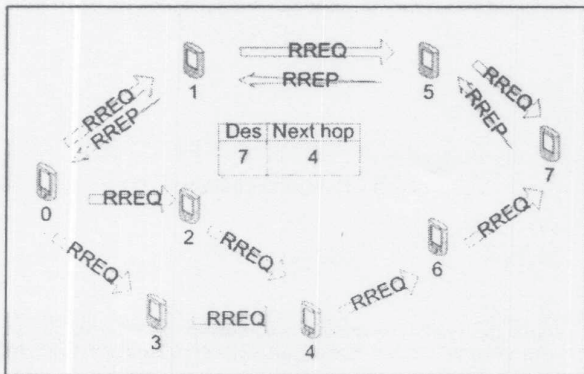


Figure 1. AODV Route Discovery.

**C. Cross layer Design**

By using cross layer design technique, each layer is allowed to exchange the data across layer [5]. Cross layer can solve some problems and improve the performance of WSNs. Cross layer allows a protocol to share and access the information from the different layer. Information exchange is not required in the

adjacent layers for example; MAC layer can exchange information between Transport layer. The communication layer interfacing is shown in Fig. 2.

Figure 2A shows a new interface call "Upward" information Flow by creating a tunnel forwarding the information from lower layer to the upper layer. In contrast, the "Downward" information flow as show in Figure 2B is created to allow the lower layer to gain the data from the upper layer. For example the routing layer can set some parameter in mac layer for data transmission. Figure 2C shows the Back and Forth information flow link between two or more of non-adjacent layers. A combination of the adjacent layer can be merged as show in Figure 2D This paper uses the upward information flow between the network layer and lower layer for the energy information. The energy parameter has been used in route discovery and will be described in the next section.

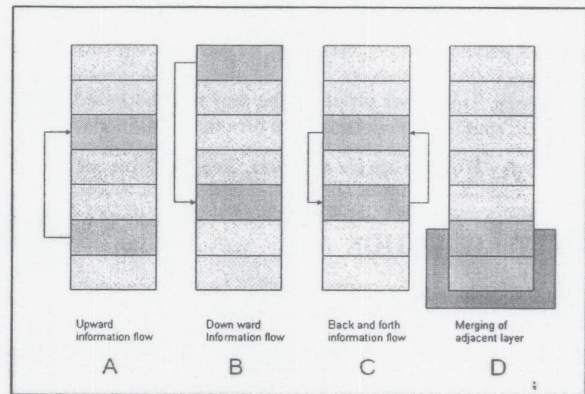


Figure - 2 : Cross Layer design.

**III. PROPOSE ENERGY WEIGH – AODV PROTOCOL**

The routing protocol for WSNs should be low complexity and use less resource. AODV is routing protocol designed for MANETs. AODV is reactive protocol, it has lower routing overhead than proactive protocol. Thus AODV suitable for WSNs. Although AODV has low routing overhead, the route discovery is still wasted a large amount of energy due to its control message. So that, the routing protocol is designed to minimize the broadcasting overhead [6]. In WSNs, energy is the most importance. Unfortunately, AODV has no energy parameters. Cross layer design technique can allow the higher layer to access the data from the lower layer. In this research AODV routing protocol can access the energy parameter from the lower layer as show in Fig. 3

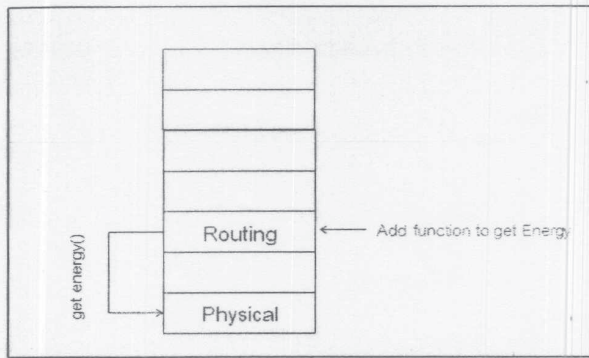


Figure 3 : Cross Layer to access energy parameter.

The modified AODV protocol is called Energy Weight- AODV (EW-AODV). In original AODV, when a source node sends the information to a destination node, it has will broadcast Route Request (RREQ) to neighbor nodes. When the destination node receives multiple RREQs. AODV will compare and choose RREQ with higher sequence number or less hop count to send RREP. However EW-AODV adds the energy field in RREQ as can be seen in Fig. 4.

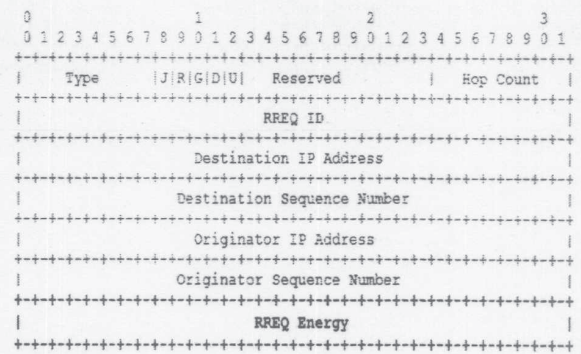


Figure 4 : Modify Route Request Message.

The energy field in RREQ will show the remaining energy of each node in the path using our algorithm RREQ Energy use for get lower current energy node in path with RREQ passes to Destination. It have algorithm to add RREQ Energy value to RREQ as show in Fig. 5

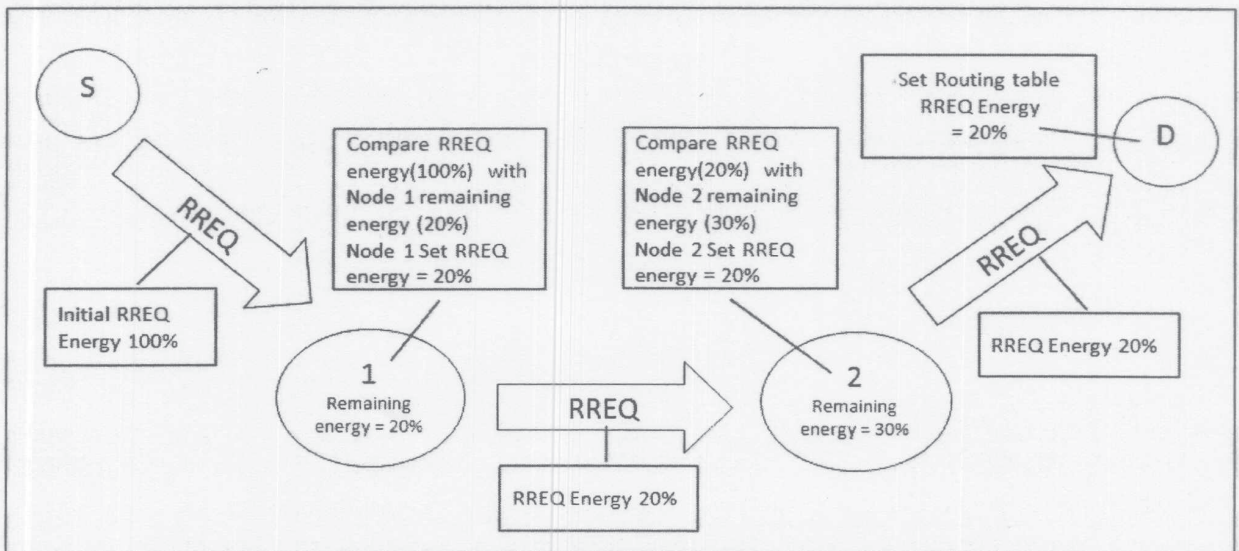


Figure : 5 Set energy in RREQ Message.

.From Fig. 5, source node (S) sent the information to a Destination node (D). At the beginning source node will broadcast RREQ and set energy parameter in RREQ message to 100%. When node 1 receives RREQ message, it will check the routing table. If the route is not found, node 1 has the energy at 20%. The energy in RREQ has been update to 20% when the energy in Node 1 is less than the energy in RREQ. Then the RREQ is broadcasted to the neighbor nodes. When Node 2

receives RREQ from Node 1, there is no need to update the energy in RREQ due to the remaining energy in node 2 is larger than RREQ. When the destination receives RREQ message from Node 2, it will set energy in routing table and sent RREP back to source node (via node 1,2). If the destination receives multiple RREQ messages in the same time, the algorithm of energy update will be explained in Fig. 6.

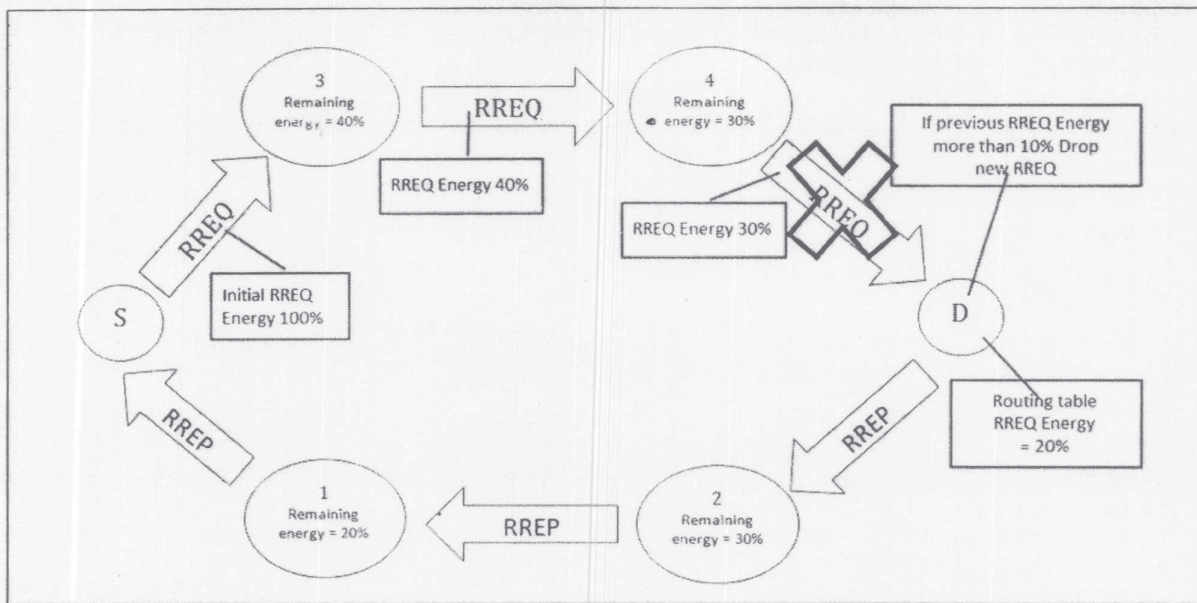


Figure 6 : EW-AODV choose the path when the previous RREQ has RREQ Energy greater than 10%.

The destination receives the first RREQ message from Node 2. After that it receives the second RREQ message from Node 4. In the original AODV, if a destination receives RREQ the same source it will discard the second RREQ message. In EW-AODV, the destination node will check both RREQs and choose the first RREQ if the remaining energy is still more than

10%. However, the destination node will choose another route if the RREQ energy in the first RREQ is less than 10%. In case previous RREQ have RREQ Energy lower than 10% EW-AODV has algorithm to choose path see in Fig. 7.

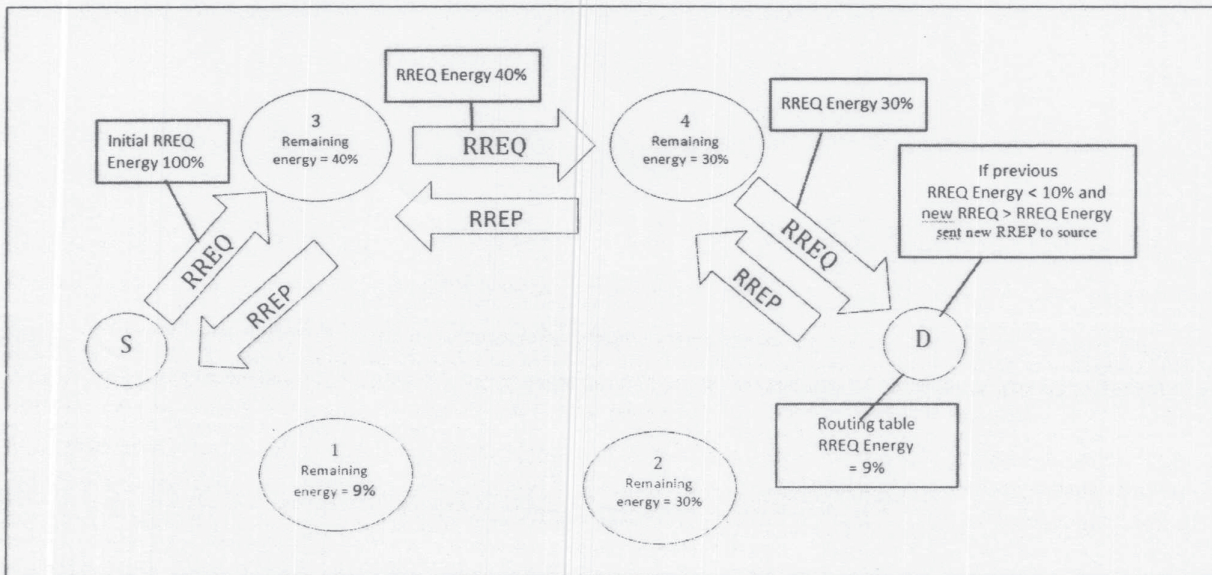


Fig. 7 : EW-AODV choose path when previous RREQ have RREQ Energy lower than 10%.

From Fig. 7, the destination receives the first RREQ from Node 2 and has RREQ Energy 9% the energy will save in routing table. When the destination receives the second RREQ from Node 4, the RREQ from Node 2 is discarded because the energy in RREQ from Node 2 is less than 10%. In this case, the destination sends a new RREP to the source node (via node 4, 3). EW-AODV considered the energy parameter to choose the route in contrast with the original AODV. Both EW-AODV and AODV have been simulated using NS-2. The performances in term of throughput, delay, PDR and energy are analyse in the next section.

#### IV. THE SIMULATION

We have compare performance of EW-AODV and AODV base on IEEE 802.15.4 standard with 64 sensor nodes in area 600 m<sup>2</sup>, as see in Fig. 8

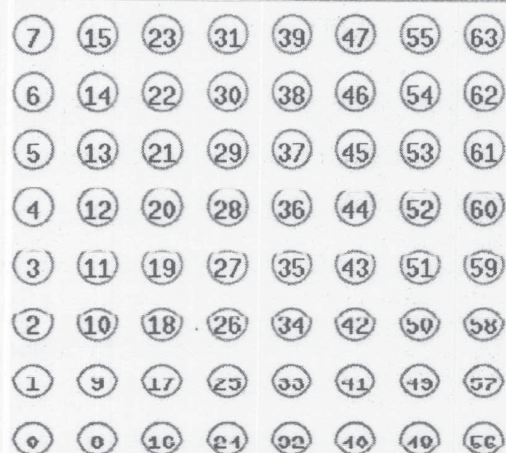


Figure 8 . Set position 64 node.

Because of the random position in the simulation, we cannot know the cause of packet drop. The reason of packet drop can be out of transmission rang, collision, run out of energy, no route to send and any reasons. In this research we focus only on the energy cause. The situation has been set for the experiments. Grid topology can make sure that the source has a route to destination. The constant bit rate (CBR) application is set to 64 bytes and data rate at 10 Kbps since a high data rate will have a high probability for collision. Which we don't prefer to occur in the simulation. The simulation time will be 5,000 second and only has one source node in a time. Source will change every 1,000 second in order to force the network changed the route. we set the scenario for comparison between having energy 50 joule (ini) in every node and random energy to nodes in rang of 0-50

joule (rdm). The simulation parameters have set as following:

- Number of Node : 64 nodes
- MAC : IEEE802.15.4
- Area : 600\*600 m<sup>2</sup>
- Transmission Rang : 60 m
- Routing Protocol : EW-AODV, AODV
- Initial Energy : 50 joule (ini),  
Random 0-50 joule (rdm)
- Simulation time : 5000 sec
- Connection : CBR 1 connection
- Packet Size : 64 bytes
- Rate : 10 Kbps

#### V. RESULT AND PERFORMANCE ANALYSIS

The performance of EW-AODV and AODV in term of average throughput, average delay, Packet Delivery Ratio (PDR), routing overhead and energy are used for comparison two scenario are deployed. In first scenario, the same initial energy is set to all sensor nodes at 50 joule. In second scenario, the random initial energy is set to all sensor node value 0-50 joule. The results of simulation are show in Fig. 8 – 12. Note that 'ini' mean initial energy to all sensor nodes 50 joule 'rdm' that mean random initial energy all sensor nodes 0 – 50 joule.

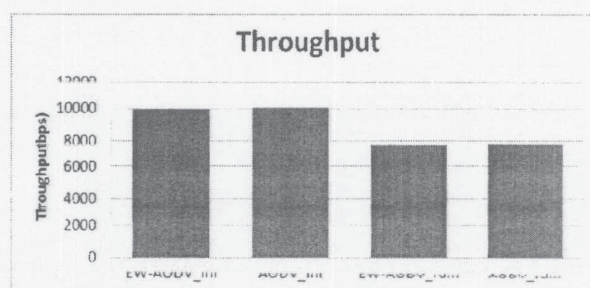


Fig. 9 : Average throughput.

In the simulation we set the data rate to 10 Kbps, thus the maximum throughput is 10 Kbps in scenario 1. We found that the throughput of both EW-AODV and AODV is not difference. While the random energy initialization gives a lower throughput when compare to the other.

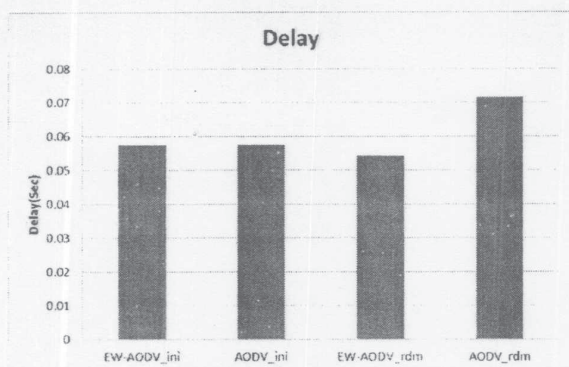


Fig. 10 : Average Delay.

In Fig. 10, the average delay of EW-AODV is slightly greater than AODV because of the discovery modification.

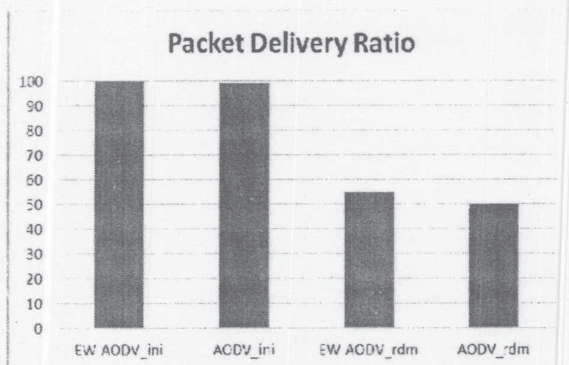


Fig. 11 : Packet Delivery Ratio.

In Fig. 11, our EW-AODV produces the best PDR compared with the original AODV. This is because the route is change before running out of the energy. However, the random initial energy of node has less PDR than other.

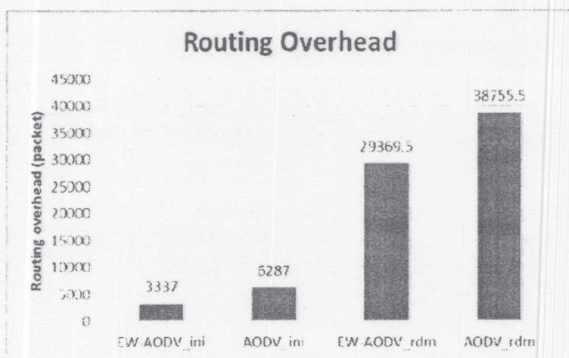


Fig. 12 : Routing overhead.

In Fig. 12, our EW-AODV has a low routing overhead nearly 50% compare to the original AODV in both two scenario. The reason is in EW-AODV, the alternative route is activated before node runs out of the energy. This can avoid the link failure and the network has no need to do a new route discovery.

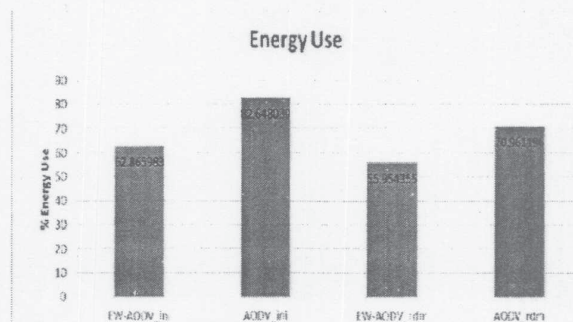


Fig. 13 : Energy usage

In Fig. 13, we can see our EW-AODV gave the lower energy usage than the random energy. The original in both scenarios. However, our EW-AODV with energy initialization uses the lowest energy at 56%.

## VI. CONCLUSION

The simulation result shows that both scenario of EW-AODV and AODV has the similar throughput, PDR and delay. However, our EW-AODV give the good result in term of overhead and energy usage when compare with the original AODV. Therefore our protocol appropriates for wireless sensor networks which energy is its resource constrains.

## REFERENCES

- [1] G. Acs and L. Buttyabv. "A taxonomy of routing protocol for wireless sensor networks," Award of the Hungarian Telecommunication Scientific Society, pp.32-40, Jan 2007.
- [2] Z. Huang L. San-Yang and Q. Xiang-Gang"Overview of Routing in Dynamic Wireless Sensor Networks," International Journal of Digital Content Technology and its Applications, Vol.4, No.4, pp. 199 - 206, 2010.
- [3] J. Zheng and M. J. Lee. "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4," Sensor Network Operations, IEEE Press chapter4, pp.218-237, 2006.
- [4] Charles E. Perkins, Elisabeth M. Belding-Royer and Samir R. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561, July 2003.



- [5] D. Felice and M. Relatore, "Cross-Layer Optimizations in Multi-HopAd Hoc Networks," Dottorato di Ricerca, March, 2008.
- [6] S. Jeongho and B. Tae-Young, "A Routing Scheme with Limited Flooding for Wireless Sensor Networks," International Journal of Future Generation Communication and Networking, Vol.3, No.3, pp.19 – 32, September 2010.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวาริส จันอึ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5310120075

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

C.Waris and J.Sakuna, "Enhanced Mobile Ad hoc Routing Protocol using Cross layer Design in Wireless Sensor Networks," *International Conference on Recent Trends in Engineering and Technology (ICRTET-2012)*, Singapore, 9th June, 2012.