

รหัสโครงการ SUT7-709-54-12-04



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Development of wireless sensor network design techniques)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Development of wireless sensor network design techniques)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ และ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2556



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อให้มีการใช้พลังงานของโนดอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เครือข่ายสามารถมีอายุการทำงานได้นานตามที่กำหนด โดยเทคนิคที่นำเสนอนี้ได้พัฒนาขึ้นในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าใช้จ่ายเครือข่ายน้อยที่สุด โดยใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด และทำให้การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่น้อยที่สุดด้วย

นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ได้แก่การพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำให้ได้เครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโนดในเครือข่าย โดยเทคนิคที่นำเสนอมุ่งเน้นการออกแบบเครือข่ายในส่วนของกาติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งเป็นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้ง โดยเครือข่ายที่ได้สามารถรับประกันคุณภาพการสื่อสารข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน และสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่กำหนด จากผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงเลขแสดงให้เห็นว่า เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบโครงสร้างเครือข่ายสำหรับกรณีที่มีสิ่งแวดล้อมเครือข่ายที่ต่างกันได้ โดยทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายดีกว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีอื่น ทั้งในด้านพลังงานรวมที่ใช้ในเครือข่าย และพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไป

Abstract

In this research, we have developed network design techniques for efficient energy utilization in Wireless Sensor Networks (WSNs). We model the proposed network design problems as an integer linear programming that aims to minimize the network cost through the minimum number of relay-station installation. Then we further investigate the problem of minimizing the energy consumption of the sensor nodes.

Our key contribution is that the proposed models not only guarantee the network lifetime but also ensure the radio communication between the energy-limited sensor nodes so that the network can guarantee packet delivery from sensor nodes to the base station. Numerical experiments were conducted to evaluate and demonstrate the effectiveness of the proposed methods in various network scenarios. The results demonstrate the capabilities of the proposed methods to design WSNs with more efficient energy utilization compared with other methods in term of total energy consumption and average energy consumption of SNs in the networks.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและความรู้พื้นฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	
2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 มาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	5
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	7
2.3.1 ส่วนประกอบของโนดตรวจรู้	7
2.3.2 สถานีถ่ายทอด	11
2.4 แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model)	12
2.5 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้	13
2.5.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง	14
2.5.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ	14
2.6 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 แนวคิดและเทคนิคในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	
3.1 การนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	18
3.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์	19
3.2.1 การนิยามตัวแปร	20
3.2.2 สมการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	21
3.2.3 สมการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มุ่งเน้นการใช้ พลังงานน้อยที่สุดของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	24
3.3 โปรแกรมสำหรับหาคำตอบของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	24
3.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม	24
3.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม	26
3.3.3 ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	28
บทที่ 4 การทดลองออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายและการวิเคราะห์ผล	
4.1 การศึกษาผลกระทบของจำนวนตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด และการใช้พลังงาน	34
4.1.1 พารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่เครือข่ายที่ใช้ในการทดลอง	34
4.1.2 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน	38
4.2 การศึกษาผลกระทบของจำนวน โหนดตรวจรู้ที่ใช้ในเครือข่าย	42
4.2.1 พารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่เครือข่ายที่ใช้ในการทดลอง	42
4.2.2 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน	48
4.2.3 การวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ	53
4.3 การวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันต่อผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและ การใช้พลังงานในเครือข่าย	54
4.3.1 พารามิเตอร์และคำอธิบายการทดลอง	54
4.3.2 การวิเคราะห์ผลการใช้พลังงาน	55
4.3.3 การวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก	
ความซับซ้อนของปัญหา.....	70
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	72
ประวัติผู้วิจัย.....	73



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การจัดสรรช่องความถี่ในย่าน 2.4 GHz	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูล	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	7
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายไร้สาย	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด	11
รูปที่ 2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้	13
รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio	27
รูปที่ 3.2 Data file editing area	27
รูปที่ 3.3 Setting file editing area	28
รูปที่ 3.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายตัวอย่าง (ประกอบด้วย 1 สถานีฐาน โนดตรวจรู้ 5 โนด)	29
รูปที่ 3.5 สมการคณิตศาสตร์ในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX	30
รูปที่ 3.6 อินพุตของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX	31
รูปที่ 3.7 เอาต์พุตจากโปรแกรม IBM ILOC CPLEX	33
รูปที่ 4.1 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (BS=1, SN=30)	36
รูปที่ 4.2 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 30 ตำแหน่ง	36
รูปที่ 4.3 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 50 ตำแหน่ง	37
รูปที่ 4.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 99 ตำแหน่ง	37
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองที่ 1 - เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด	40
รูปที่ 4.6 ผลการทดลองที่ 2 - เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 17 สถานี	40
รูปที่ 4.7 ผลการทดลองที่ 3 - เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 16 สถานี	41
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองที่ 4 - เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 13 สถานี	41
รูปที่ 4.9 กรณีที่มีจำนวน โนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โนด (ครั้งที่ 1)	43
รูปที่ 4.10 กรณีที่มีจำนวน โนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โนด (ครั้งที่ 2)	43
รูปที่ 4.11 กรณีที่มีจำนวน โนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โนด (ครั้งที่ 3)	44
รูปที่ 4.12 กรณีที่มีจำนวน โนดตรวจรู้ในเครือข่าย 50 โนด (ครั้งที่ 1)	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 50 โหนด (ครั้งที่ 2).....	45
รูปที่ 4.14 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 50 โหนด (ครั้งที่ 3).....	45
รูปที่ 4.15 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 80 โหนด (ครั้งที่ 1).....	46
รูปที่ 4.16 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 80 โหนด (ครั้งที่ 2).....	46
รูปที่ 4.17 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 80 โหนด (ครั้งที่ 3).....	47
รูปที่ 4.18 การติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 30 โหนด.....	49
รูปที่ 4.19 การติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 50 โหนด.....	49
รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไป กรณีเครือข่ายมี โหนดตรวจรู้ 30 โหนด (ผลจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง).....	51
รูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไป กรณีเครือข่ายมี โหนดตรวจรู้ 50 โหนด (ผลจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง).....	52
รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไป กรณีเครือข่ายมี โหนดตรวจรู้ 80 โหนด (ผลจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง).....	52
รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไป.....	53
รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 โหนด.....	59
รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โหนด.....	60
รูปที่ 4.26 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 80 โหนด.....	60
รูปที่ 4.27 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี MERP1.....	62
รูปที่ 4.28 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี MERP2.....	62
รูปที่ 4.29 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย เมื่อใช้วิธี RPAP.....	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	13
ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซท.....	20
ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ.....	20
ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่.....	21
ตารางที่ 3.4 แสดงการแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio.....	25
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่าย.....	35
ตารางที่ 4.2 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในพื้นที่ทดสอบ.....	39
ตารางที่ 4.3 การใช้พลังงานในเครือข่าย.....	39
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของพลังงาน โหนดตรวจรู้แต่ละ โหนดที่เหลืออยู่ พลังงานที่เหลือมากที่สุดและน้อยที่สุด ของโหนดตรวจรู้ เปอร์เซนต์ของจำนวน โหนดตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล.....	39
ตารางที่ 4.5 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายของการทดลองหัวข้อ 4.2.....	48
ตารางที่ 4.6 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไปและค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน.....	50
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง.....	50
ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีจำนวน โหนดตรวจรู้ที่ต่างกัน.....	53
ตารางที่ 4.9 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้ง และพลังงานรวมที่ใช้ในเครือข่าย.....	56
ตารางที่ 4.10 พลังงานสูงสุดและต่ำสุดของโหนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่าย.....	57
ตารางที่ 4.11 พลังงานเฉลี่ยของโหนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่ายและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	58
ตารางที่ 4.12 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีจำนวน โหนดตรวจรู้ที่ต่างกัน.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนามาตรฐานการสื่อสารไร้สายหลายประเภทที่ส่งสัญญาณในย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific and Medical) 2.4 GHz มาตรฐานที่กำลังได้รับความสนใจและประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันได้แก่ มาตรฐาน IEEE 802.15.4 สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ซึ่งเป็นเครือข่ายที่ใช้ตรวจจับและส่งข้อมูลให้กับหน่วยประมวลผล ซึ่งในปัจจุบันเครือข่ายประเภทนี้ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในทางการแพทย์ จะใช้โนดตรวจรู้ในการเก็บบันทึกข้อมูลทางร่างกายของคนไข้ เช่น อุณหภูมิของร่างกาย จังหวะการเต้นของหัวใจ เป็นต้น ในทางการทหารจะใช้ในการตรวจจับระเบิดหรือเก็บข้อมูลทางด้านสภาพแวดล้อมในบริเวณเขตชายแดน ส่วนทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้นเราสามารถนำประโยชน์ของโนดตรวจรู้มาใช้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง เช่น ป่าทึบ ซึ่งเป็นบริเวณที่เข้าสำรวจได้ยากทำให้การ फैาระวังไฟป่าใช้เวลานานและทำได้ยาก รวมถึงในกรณีที่ฝนตกหนักจึงจำเป็นต้องวัดระดับน้ำในแม่น้ำเพื่อเป็นการแจ้งเตือนเหตุอุทกภัย เป็นต้น

โครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบไปด้วย โนดตรวจรู้ (Sensor node) มีหน้าที่ตรวจจับสถานะสิ่งแวดล้อมที่เราสนใจและส่งข้อมูลนั้นให้กับสถานีฐาน (Base station) เพื่อทำการประมวลผลข้อมูลที่ตรวจได้ และนำผลไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ซึ่งโนดตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้โดยตรงหากว่าระยะห่างระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐานอยู่ในรัศมีที่สามารถทำการสื่อสารกันได้ แต่ถ้าห่างกันมากกว่านั้นก็ต้องทำการส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้อื่นก่อนที่จะส่งให้สถานีฐานต่อไป การที่โนดตรวจรู้ต้องรับและส่งผ่านข้อมูลของโนดตรวจรู้อื่นทำให้โนดต้องเสียพลังงานจากแบตเตอรี่ไปมาก ซึ่งอาจส่งผลให้อายุการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายไม่ยืนยาวตามต้องการ ดังนั้นในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจึงต้องทำการกำหนดโครงสร้าง การรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ และมีการกำหนดให้ใช้สถานีถ่ายทอด (Relay station) ในเครือข่ายอย่างเหมาะสมด้วย

โครงการวิจัยที่นำเสนอนี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย IEEE 802.15.4 เพื่อลดผลกระทบของการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโนดตรวจรู้ เพื่อให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ต้องการ โดยมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายต่ำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการออกแบบวางแผน โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
3. เพื่อศึกษาและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าหนด โครงสร้างและการรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่างๆ เช่น พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดและรัศมีการสื่อสารของ โหนดตรวจรู้ไร้สาย เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาหลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
2. กำหนดกรอบวิธี และเกณฑ์ในการออกแบบวางแผน โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
3. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ สำหรับกรอบวิธี และเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดขึ้น
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
5. ศึกษา วิเคราะห์ และตรวจสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายที่ได้จากวิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้นมา

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
2. ออกแบบกรอบวิธี และเกณฑ์การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
3. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับกรอบวิธี และเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดขึ้น
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
5. ศึกษา วิเคราะห์ และตรวจสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายที่ได้จากวิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับ : ได้เทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ที่พิจารณาประเด็นการใช้พลังงานของเครือข่าย โดยได้กำหนดโครงสร้างการรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการใช้สถานีถ่ายทอดในเครือข่าย เพื่อให้ได้เครือข่ายที่มีอายุการใช้งานในระยะเวลาตามที่ต้องการ และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถเป็นองค์ความรู้ในการศึกษา วิจัยและประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังได้บทความวิจัยที่มีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาศึกษาและวิจัย และได้ผลิต

นักวิจัยซึ่งเป็นบัณฑิตระดับปริญญาโทที่มีคุณภาพ และมีประสบการณ์ในการทำงานวิจัยซึ่งสามารถผลิตผลงานที่มีประโยชน์ได้

หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่มีความสนใจในเทคนิคการออกแบบ และการปรับปรุงคุณภาพการสื่อสารของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 หรือมาตรฐานอื่นๆ รวมถึงหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนที่ประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย และทำหน้าที่ดูแลและควบคุมระบบการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและความรู้พื้นฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.2 กล่าวถึงมาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย การทำงานชั้นกายภาพ และชั้นควบคุมการเข้าใช้สื่อ หัวข้อ 2.3 อธิบายโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย หัวข้อ 2.4 อธิบายแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model) ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในงานวิจัยนี้ และหัวข้อ 2.5 อธิบายแบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้

2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรม พบว่าปัญหาเรื่องการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการพิจารณาประเด็นเรื่องความจำกัดของพลังงานของเครือข่าย [1-5] โดยในงานวิจัย [1-2] ได้นำเสนอการศึกษาการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยพิจารณาปัญหาการติดตั้งสถานีฐานสำหรับเครือข่าย ซึ่งงานวิจัย [1] มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยืนยาวที่สุดเมื่อกำหนดจำนวนสถานีฐานให้ ส่วนในงานวิจัย [2] ได้ทำการพิจารณาเรื่องการหาจำนวนสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด สำหรับงานวิจัย [3] ได้นำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาเรื่องอายุการใช้งานของเครือข่ายโดยใช้การหาเส้นทางและการกำหนดอัตราการส่งที่เหมาะสมที่สุด โดยมีสมมติฐานว่าสามารถปรับระดับความแรงของการส่งสัญญาณของโนดตรวจรู้ได้ตามระยะทาง โดยงานวิจัย [3] พิจารณาปัญหาการหาระยะทางที่สั้นที่สุด ในการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐานของเครือข่าย ส่วนงานวิจัยที่ [4] พิจารณาปัญหาการเก็บข้อมูลให้ได้มากที่สุด เมื่อกำหนดให้โนดตรวจรู้มีแหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีพลังงานจำกัด สำหรับงานวิจัยที่ [5] ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ในรูปของสมการจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Programming) สำหรับปัญหาการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้จำนวนแพ็คเกจที่ได้รับที่สถานีฐานมีค่ามากที่สุด และทำให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานตามที่กำหนด

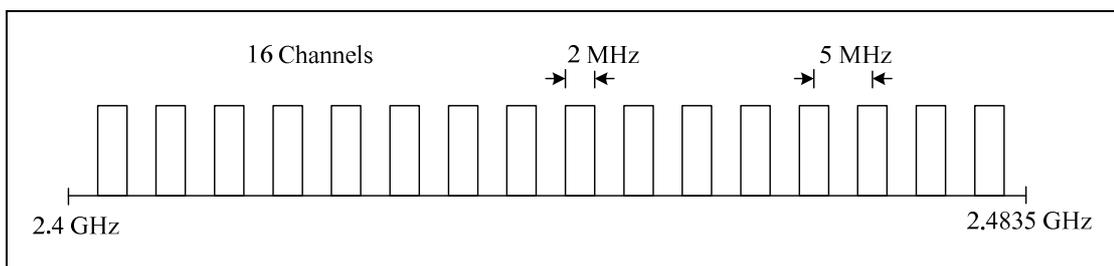
จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย พบว่างานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้มีการพิจารณาเงื่อนไขในด้านการไหลของข้อมูล (flow conservation constraints) ซึ่งจะช่วยให้สามารถรับประกันการส่งแพ็คเกจจากโนดตรวจรู้ไร้สายไปยังสถานี

ฐานได้ ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยที่ผ่านมาที่นำเสนอการใช้สถานีถ่ายทอดจะมีการจำกัดจำนวนช่วงเชื่อมต่อ (number of hops) ระหว่างโนดตรวจรู้ไร้สายกับสถานีฐานไว้ที่สองช่วง ซึ่งในทางปฏิบัติอาจต้องใช้มากกว่านี้ ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพ โดยได้พิจารณาปัญหาการวางแผนโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด รวมถึงพิจารณาประเด็นเรื่องการไหลของข้อมูล และเรื่องการใช้พลังงานเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพด้วย เพื่อให้สามารถออกแบบเครือข่ายที่รับประกันอายุการใช้งานได้ตามที่ต้องการ โดยมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด

2.2 มาตรฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

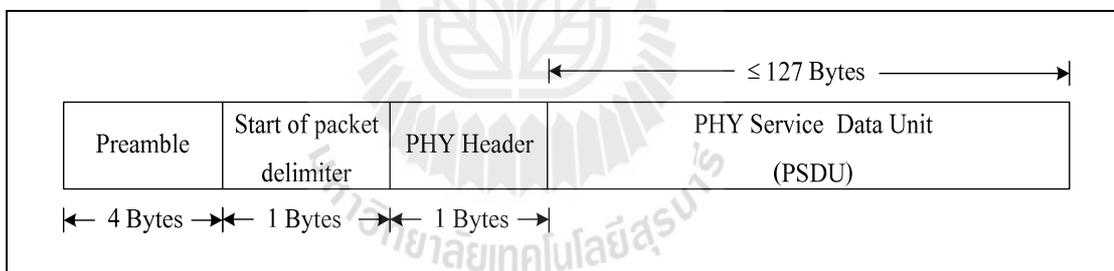
ในช่วงที่ผ่านมาเทคโนโลยีเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และได้มีการกำหนดมาตรฐานการทำงานสำหรับเครือข่ายดังกล่าวเรียกว่ามาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวกำหนดขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยและบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตโนดตรวจรู้ โดยโนดตรวจรู้มีความสามารถในการสังเกต ฝ้าตรวจและชี้ทิศทางของพารามิเตอร์ที่ต้องการตามลักษณะทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ก๊าซ ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น โนดตรวจรู้จะประกอบด้วย Application Programming Interface (API) ที่ต่างกันตามแต่ละโรงงานและการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตามความต้องการสำหรับการรวมข้อมูล การเข้าใช้ช่องสัญญาณ การกระจายข้อมูลจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดมาตรฐานของอุปกรณ์ต่อร่วมและรูปแบบข้อมูลของโนดตรวจรู้ โดยจุดประสงค์ของการกำหนดมาตรฐาน คือการทำให้โนดตรวจรู้ต่างชนิดกันที่ผลิตจากต่างโรงงาน สามารถใช้งานร่วมกันได้ โดยไม่ต้องมีมนุษย์คอยควบคุมตลอดเวลา

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 กำหนดการทำงานในชั้นกายภาพ (physical layer) และชั้นการเชื่อมโยงข้อมูล (data link layer) [16] โดยชั้นการเชื่อมโยงข้อมูล ได้กำหนดกลไกการเข้าใช้ช่องสัญญาณ การส่งเฟรมตอบรับ การสร้างเครือข่ายและการแยกเครือข่าย ซึ่งมาตรฐานนี้สนับสนุน Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ในชั้นกายภาพซึ่งใช้ทำงานในภาคอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ ที่ความถี่ 868 MHz หรือ 915 MHz โดยมีอัตราเร็วที่ 20 kbps หรือ 40 kbps สำหรับแถบความถี่สูง ในชั้นกายภาพจะทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz โดยมีอัตราเร็ว 250 kbps โดยสามารถแบ่งช่องความถี่ออกเป็น 16 ช่อง แต่ละช่องความถี่มีแบนด์วิดท์ (bandwidth) 2 MHz และความถี่กลางของแต่ละช่องห่างกัน 5 MHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับความถี่ย่านนี้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาดใหญ่ อัตราเร็วที่สูงสามารถลดเวลาในการส่งเฟรมข้อมูล และพลังงานในการรับและส่งข้อมูล



รูปที่ 2.1 การจัดสรรช่องความถี่ในย่าน 2.4 GHz

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของกลุ่มข้อมูล (message unit) ในส่วนแรกจะเป็นพรีมเบิล (preamble) ซึ่งมีขนาด 32 bits โดยโครงสร้างส่วนนี้จะทำการเข้าจังหวะของสัญลักษณ์ (symbol synchronization) ในส่วนถัดไปเป็นส่วนที่บอกจุดเริ่มต้นของแพ็คเกจข้อมูล (start of packet delimiter) ซึ่งมีขนาด 8 bits ใช้สำหรับการประสานจังหวะของเฟรม (frame synchronization) สำหรับ PHY header มีขนาด 8 bits ใช้ระบุความยาวของข้อมูลในพีเอสดียู (PSDU) และส่วนของพีเอสดียูเป็นส่วนของข้อมูล โดยข้อมูลจะมีความยาวไม่เกิน 127 bytes



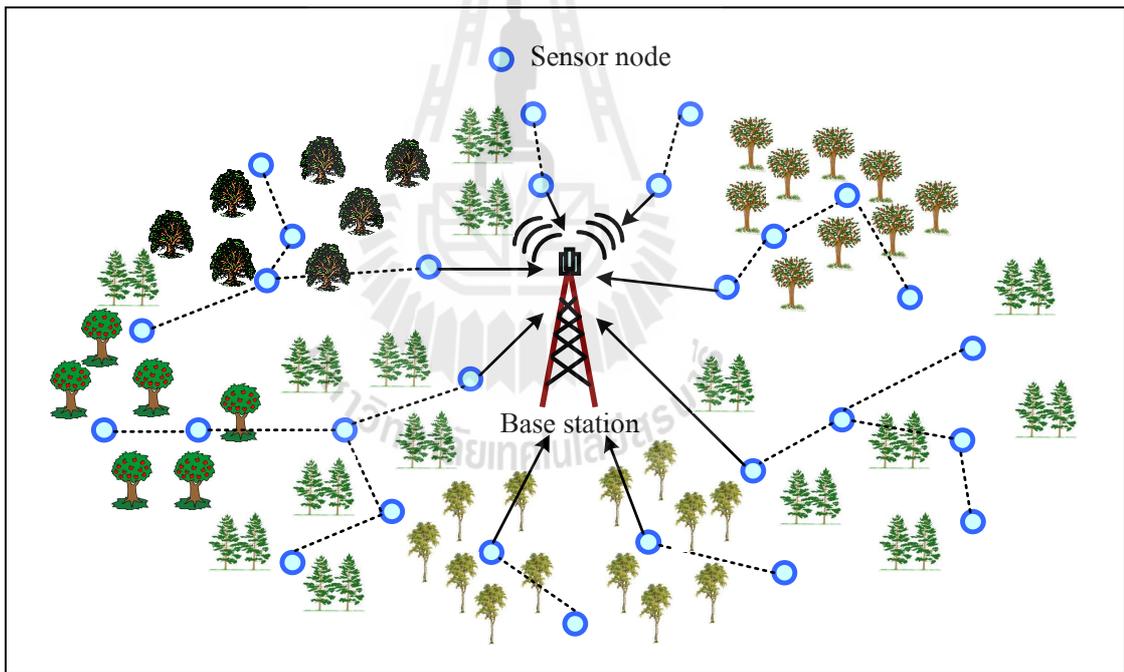
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกลุ่มข้อมูล

ชั้นการเชื่อมโยงข้อมูล ได้กำหนดให้กลุ่มข้อมูลมีขนาด 128 bytes โดยมี payload ขนาดสูงสุด 104 bytes ซึ่งถือว่าเพียงพอสำหรับมาตรฐานเพื่อใช้ในการออกแบบระบบที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลต่ำและสามารถทำงานในแบบวิธีที่ปิดสัญญาณบิตคอน และแบบไม่มีสัญญาณบิตคอน สำหรับแบบวิธีที่ไม่มีสัญญาณบิตคอนจะใช้ระเบียบวิธีสื่อสาร Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลที่ได้ส่งออกไป

2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบด้วยสถานีฐานและโนดตรวจรู้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [5], [16]

- สถานีฐาน มีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้หรือสถานีถ่ายทอดหลังจากนั้น จะทำการประมวลผลข้อมูลหรือส่งข้อมูลให้กับศูนย์กลางการเฝ้าสังเกตต่อไป
- โนดตรวจรู้ มีหน้าที่ในการชี้ทิศทางและส่งข้อมูลให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียง หรือส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานโดยตรง แต่โนดตรวจรู้ไม่สามารถค้นหาเส้นทางหรือส่งข้อมูลข้ามเครือข่ายหรือส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ต่างชนิดกันด้วยตัวเอง โนดตรวจรู้มีตำแหน่งที่แน่นอน ส่วนมากเคลื่อนที่ไม่ได้และมีการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุในย่านความถี่สาธารณะที่ความถี่ 2.4 GHz และพลังงานของโนดตรวจรู้มีอยู่อย่างจำกัด การเปลี่ยนหรือเติมพลังงานให้โนดตรวจรู้ทุกตัวทำได้ยาก และเสียค่าใช้จ่ายสูง



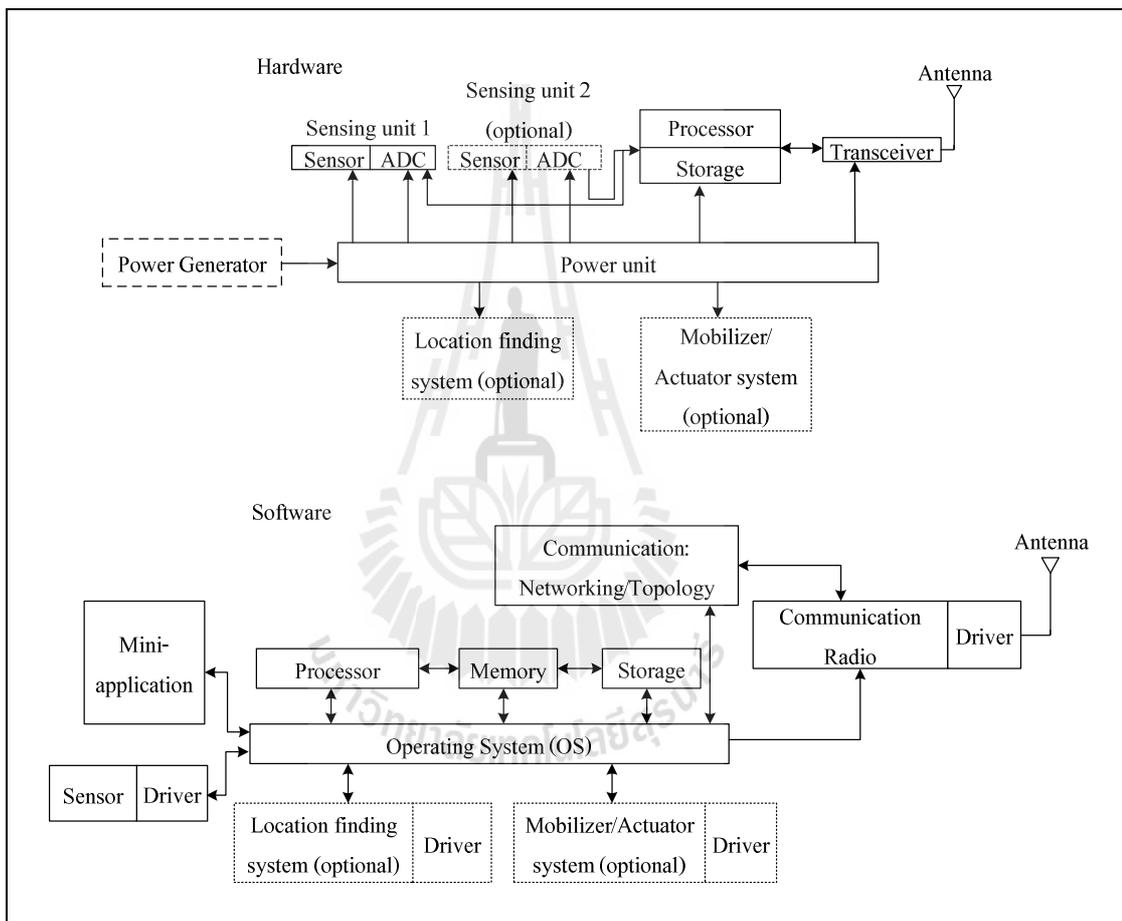
รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

2.3.1 ส่วนประกอบของโนดตรวจรู้

โนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายจะมีหน้าที่พื้นฐานที่สำคัญ คือ การประมวลผลสัญญาณ (signal processing) ซึ่งประกอบด้วย การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing) การ

บีบอัดข้อมูล การแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลและการเข้ารหัสสัญญาณ การหาเส้นทางและการส่งข้อมูลและการจัดการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่อยู่ในเครือข่าย

รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยความซับซ้อนและโครงสร้างของเครือข่ายตรวจสอบไร้สายขึ้นอยู่กับกระยุกต์ใช้งาน ฮาร์ดแวร์มีส่วนประกอบพื้นฐาน 4 อย่างได้แก่ เช่น เซ็นเซอร์หรือส่วนตรวจรู้ (Sensor) หน่วยรับและส่งข้อมูลไร้สาย (Transceiver unit) หน่วยประมวลผล (Processing unit) และแหล่งพลังงาน (Power unit)



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายไร้สาย

- 1) เซ็นเซอร์หรือส่วนตรวจรู้ (Sensor) ทำหน้าที่วัดค่าต่างๆ ของสภาพแวดล้อมพื้นฐาน เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ความดัน ความเร่ง แรงสั่นสะเทือน ความเคลื่อนไหว ความลึก ความเป็นกรดหรือด่าง ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก และความดัน เป็นต้น
- 2) หน่วยรับและส่งข้อมูลไร้สาย (Transceiver unit) ทำงานในย่านความถี่สาธารณะ เพื่อรับและส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์ข้างเคียง โดยสามารถรองรับการสื่อสารในแบบดาข่าย

(mesh) หรือแบบดาว (star) ปริมาณงาน (throughput) ที่สามารถสื่อสารได้มีค่า 10-256 kbps ซึ่งขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน

- 3) หน่วยประมวลผล (Processing unit) ทำหน้าที่สั่งงานหรือรับข้อมูลที่วัดได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูล และจัดเก็บในหน่วยความจำเพื่อรอการร้องขอข้อมูล หรืออาจส่งข้อมูลทันทีผ่านทางหน่วยรับและส่งข้อมูลไร้สาย หน่วยประมวลผลอาจรับข้อมูลจากระบบระบุตำแหน่งเพื่อช่วยในการประมวลผลต่างๆ หรือหน่วยประมวลผลอาจทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางระบบเคลื่อนที่ นอกจากนี้ หน่วยประมวลผลยังทำหน้าที่ประมวลผลเครือข่ายและหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย
- 4) แหล่งพลังงาน (Power unit) จ่ายพลังงานให้กับทุกส่วนประกอบบนไมโครคอนโทรลเลอร์ การใช้พลังงานนั้นขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งเครือข่ายบางประเภทอาจมีความต้องการใช้งานเป็นวันหรือเดือนหรือปี เป็นต้น

สำหรับซอฟต์แวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยพื้นฐานแล้วประกอบด้วย 5 อย่าง ได้แก่

- 1) ระบบปฏิบัติการรหัสไมโคร (Operation system microcode) เป็นซอฟต์แวร์มาตรฐานสำหรับฟังก์ชันการทำงานพื้นฐาน โดยทั่วไปแล้วจะมี open source ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการออกแบบการใช้งานเครือข่ายไมโครคอนโทรลเลอร์ไร้สาย โดยคำสั่งปฏิบัติการที่ใช้จะมีขนาดเล็กและสามารถติดตั้งใช้งานได้อย่างรวดเร็ว
- 2) ตัวขับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Sensor Driver) เป็นซอฟต์แวร์มาตรฐานเพื่อใช้ควบคุมการทำงานพื้นฐานในการเป็นเครื่องรับและเครื่องส่ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจมีการใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่หรือจากแหล่งจ่ายอื่น โดยขึ้นอยู่กับชนิดและการทำงาน และต้องทำการใส่ข้อมูลเพื่อทำการติดตั้งและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์
- 3) หน่วยประมวลผลการสื่อสาร (Communication processor) เป็นชุดคำสั่งที่ใช้จัดการการสื่อสาร เช่น การหาเส้นทาง การรองรับ และส่งต่อข้อมูล การเข้าใช้สื่อช่องสัญญาณ การเข้ารหัสสัญญาณและการแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูล เป็นต้น
- 4) ตัวขับการสื่อสาร (Communication Driver) เป็นซอฟต์แวร์มาตรฐานที่ใช้ในการจัดการเกี่ยวกับช่องสื่อสารสัญญาณวิทยุ ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณนาฬิกา และการซิงโครไนส์ การเข้ารหัสสัญญาณระดับสัญญาณและการมอดูเลต เป็นต้น
- 5) กระบวนการประมวลผลข้อมูล (Data processing) ในส่วนนี้เป็นกระบวนการเชิงตัวเลข ได้แก่ การประมวลผลข้อมูลและการจัดเก็บค่าของสัญญาณ หรือการสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานอื่น

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสนับสนุนการเชื่อมต่อระหว่างโหนดเดียวหรือหลายโหนด ซึ่งอาจมีระยะห่างต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับกำลังส่งสัญญาณ เพื่อให้สามารถได้โครงสร้างการเชื่อมต่อเครือข่าย และสามารถหาเส้นทางผ่านหลายโหนดได้ อย่างไรก็ตาม โหนดตรวจรู้มีทรัพยากรหลายอย่างที่จำกัด การจัดการการใช้งานทรัพยากรของโหนดตรวจรู้ที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ทรัพยากรที่จำกัดของโหนดตรวจรู้ ได้แก่

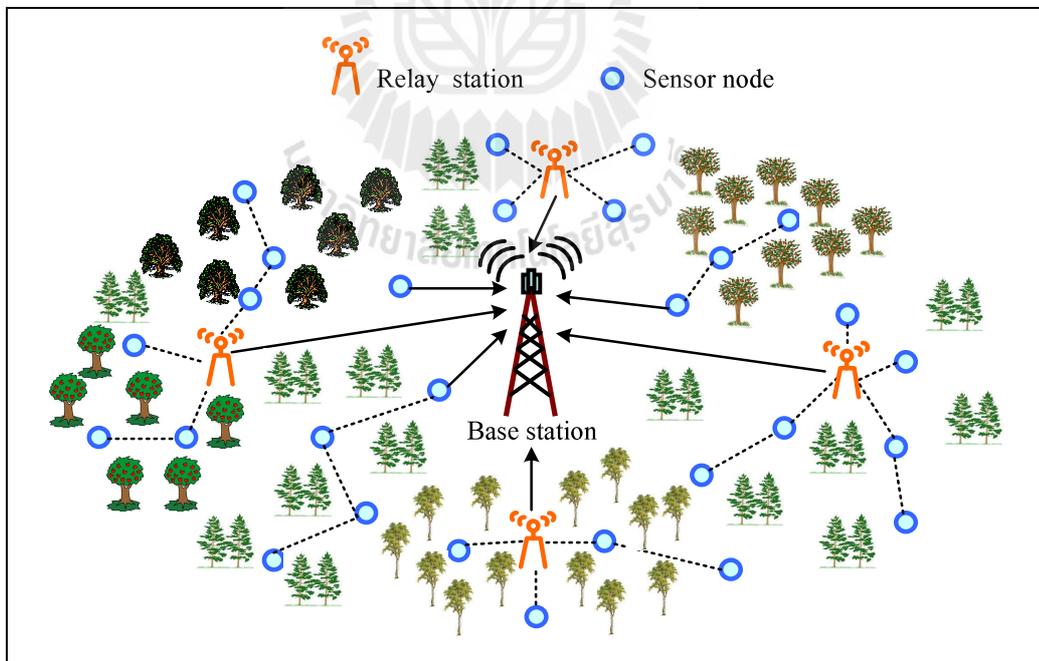
- 1) พลังงาน (Energy) โหนดตรวจรู้ไร้สายมีพลังงานที่จำกัดในการทำงาน ซึ่งทำให้การออกแบบเครือข่ายเพื่อรักษาพลังงานเป็นเรื่องสำคัญที่ควรคำนึงถึง
- 2) แบนด์วิดท์การสื่อสาร (Communication bandwidth) นอกจากการสื่อสารไร้สายมีการจำกัดแบนด์วิดท์แล้ว เครือข่ายไร้สายอาจมีการรบกวนของช่องสัญญาณ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ และทำให้คุณภาพของการให้บริการต่ำลงด้วย
- 3) การคำนวณ (Computation) หน่วยประมวลผลของโหนดตรวจรู้มีความสามารถจำกัด ซึ่งส่งผลให้เกิดความจำกัดในการใช้งานอัลกอริทึมต่างๆ ได้
- 4) ความไม่แน่นอนในการวัดค่าพารามิเตอร์ (Uncertainty in measured parameter) สัญญาณที่ทำการตรวจวัดและการเก็บสะสมนั้นมีความไม่แน่นอน อีกทั้งการสื่อสารไร้สายมีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม ทำให้ความน่าเชื่อถือของข้อมูลของโหนดตรวจรู้ลดลง

จากการศึกษาองค์ประกอบของโหนดตรวจรู้และทรัพยากรที่มีจำกัดของโหนดตรวจรู้ พบว่าในการทำงานในส่วนของหน่วยเฝ้าตรวจหรือการประมวลผลข้อมูลของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์นั้น จำเป็นต้องใช้พลังงานในการทำงาน ซึ่งพลังงานของโหนดตรวจรู้มีอยู่อย่างจำกัด ถ้าใช้หมดแล้ว การจะเปลี่ยนหรือเพิ่มพลังงานจะทำได้ยาก และเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงเป็นประเด็นที่สำคัญในการออกแบบเครือข่ายเพื่อให้ได้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุดหรือทำให้โหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด

2.3.2 สถานีถ่ายทอด

โน้ตตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้โดยตรงหากว่าระยะห่างระหว่างโน้ตตรวจรู้กับสถานีฐานอยู่ในรัศมีที่สามารถทำการสื่อสารกันได้ แต่ถ้าห่างกันมากกว่านั้นก็ต้องทำการส่งข้อมูลผ่านโน้ตตรวจรู้อื่นก่อนที่จะส่งให้สถานีฐาน การที่โน้ตตรวจรู้ต้องรับและส่งผ่านข้อมูลของโน้ตตรวจรู้อื่นทำให้โน้ตต้องเสียพลังงานจากแบตเตอรี่ไปมาก ซึ่งจะส่งผลให้อายุการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายไม่ยืนยาวตามต้องการ ดังนั้นในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจึงต้องทำการกำหนดโครงสร้าง การรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ และในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีการใช้สถานีถ่ายทอด (Relay station) ในเครือข่ายเพื่อช่วยส่งต่อข้อมูลจากโน้ตตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน

สถานีถ่ายทอดมีหน้าที่รับข้อมูลจากโน้ตตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายและส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐาน ทำให้โน้ตตรวจรู้ทุกโน้ตที่อยู่ในเครือข่ายสามารถสร้างการเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานได้ และประเด็นสำคัญคือเป็นการลดพลังงานในการส่งข้อมูลของโน้ตตรวจรู้ รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด โดยคุณสมบัติของสถานีถ่ายทอดคือมีพลังงานไม่จำกัด ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ และเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ได้ ทำให้ช่วยยืดอายุการทำงานของเครือข่ายได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด

2.4 แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model)

ในการหาตำแหน่งเพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น ทำได้โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายสัญญาณซึ่งได้จากการวัดสัญญาณจริง หรือในบางกรณีซึ่งบริเวณติดตั้งเครือข่ายไม่สะดวกในการวัดสัญญาณจริง อาจทำโดยใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี เพื่อประเมินระยะการรับส่งสัญญาณระหว่างภาครับและภาคส่ง และประมาณค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ เพื่อช่วยในการวางแผนและออกแบบเครือข่ายเบื้องต้น ในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายเพื่อช่วยให้โนดตรวจรู้ทุกโนดสามารถเชื่อมต่อกันได้

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีอย่างง่าย (Simplify pathloss model) [9] ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ สมการที่ (2.2) โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแสดงในตารางที่ 2.1 โดยพิจารณาการใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz ส่วนกำลังที่ใช้ส่งสัญญาณนั้น กำหนดที่ 32 mWatt ตามข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์จริง ซึ่งในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนี้ เราได้พิจารณาบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางหนาแน่น เช่น ในป่าทึบ หรือภายในอาคาร ที่มีผนังหรือกำแพงอยู่มาก จึงได้ใช้ดัชนีการสูญเสียเนื่องจากสิ่งแวดล้อมให้มีค่าเท่ากับ 4 และใช้ระยะห่างอ้างอิงในสนามระยะใกล้ของสายอากาศเท่ากับ 1 เมตร

$$P_r = P_t + K - 10n \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (2.1)$$

$$K(dB) = 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d_0} \quad (2.2)$$

โดยที่ P_r คือ ความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ (dBm)

P_t คือ ความแรงของสัญญาณที่ส่งภาคส่ง (dBm)

n คือ ดรรชนีการสูญเสียเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม

d คือ ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ (m)

d_0 คือ ระยะห่างอ้างอิงในสนามระยะใกล้ของสายอากาศ (m)

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

K คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสายอากาศและการลดทอนเฉลี่ยของช่องความถี่

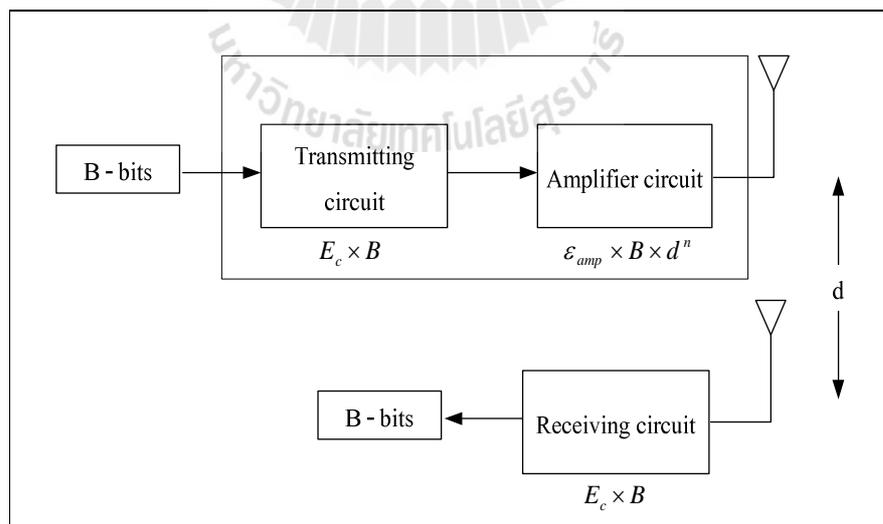
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่ที่ใช้ทำงาน	2.4 GHz
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	32 mW
ระยะอ้างอิง	1 m.
ครรชนิการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4

2.5 แบบจำลองการใช้พลังงานของโน้ตตรวจรู้

การใช้พลังงานของโน้ตตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ ได้พิจารณาใช้แบบจำลองวิทยุอันดับหนึ่ง (First Order Radio Model) [8] สำหรับคำนวณหาพลังงานที่โน้ตตรวจรู้ใช้ในการรับส่งข้อมูล เนื่องจากรูปแบบการใช้พลังงานนี้ มีความสะดวกในการคำนวณและยังเป็นที่ยอมรับใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งแบบจำลองการใช้พลังงานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.6

พลังงานของโน้ตตรวจรู้มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เป็นอย่างมาก ถ้าเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีขนาดใหญ่จะทำให้การส่งข้อมูลผ่านระหว่างโน้ตตรวจรู้ด้วยกันมาก ซึ่งจะทำให้มีการใช้พลังงานของโน้ตตรวจรู้มากตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครือข่ายสั้นลง เช่น โน้ตตรวจรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานมากที่สุด พลังงานของโน้ตตรวจรู้จะหมดลงก่อนโน้ต



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโน้ตตรวจรู้

อื่นๆ เพราะว่าโนดที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานต้องทำหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดอื่นๆ เพื่อส่งข้อมูลต่อไปให้กับสถานีฐาน ทำให้ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการรับและส่งข้อมูลต่อไปให้กับสถานีฐาน เป็นเหตุให้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานหมดลงก่อนโนดอื่นๆ ในเครือข่าย การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้แบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง และพลังงานที่ใช้ในภาครับ

2.5.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง

จากรูปแบบการใช้พลังงานในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าการใช้พลังงานในส่วนของภาคส่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นพลังงานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนที่ 2 เป็นพลังงานที่ใช้ในวงจรขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โดยที่ E_c เป็นพลังงานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ \mathcal{E}_{amp} เป็นพลังงานที่ใช้ในวงจรขยายสัญญาณก่อนส่งออกไปยังภาครับ จะเห็นว่าในส่วนที่ 2 จะมีการพิจารณาระยะห่าง d (เมตร) ระหว่างโนดส่งและโนดรับ ถ้าโนดภาครับอยู่ห่างจากโนดที่เป็นภาคส่งมากจะทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการส่งไปถึงภาครับ โดยที่ตัวแปร n เป็นครรชนีของการสูญเสียจากระยะทาง ซึ่งค่าของ n ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่พิจารณาในการออกแบบ เช่น ในอากาศว่าง ชานเมือง หรือภายในอาคาร เป็นต้น ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการการใช้พลังงานที่ภาคส่งได้ดังนี้

$$Tx = (E_c \times B) + (\mathcal{E}_{amp} \times B \times d^n) \quad (2.3)$$

2.5.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ

จากรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาด้านภาครับจะเห็นว่ามีการใช้พลังงานในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (E_c) โดยไม่มีการพิจารณาระยะห่างระหว่างโนดตรวจรู้ ซึ่งสามารถเขียนสมการการใช้พลังงานที่ภาครับได้ดังนี้

$$Rx = E_c \times B \quad (2.4)$$

งานวิจัยของ Shi, Y., Thomas, Y.H., and Efrat, A. (2009) [1] ได้มีการกำหนดค่าของพลังงานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ $E_c = 1nJ/bit$ และ $\mathcal{E}_{amp} = 3 pJ/bit/m^4$ โดย B คือ จำนวนบิตข้อมูลที่ต้องการส่ง (bits)

ในการหาอายุการใช้งานของเครือข่ายนั้น สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (จุด) กับกระแสไฟฟ้าและแรงดันในช่วงระยะเวลาที่ต้องการ โดยเขียนเป็นสมการดังนี้

$$E = v \times i \times t \text{ (joules)} \quad (2.5)$$

โดยที่ E คือ พลังงาน (joules)
 v คือ แรงดันของแหล่งจ่าย (volt)
 i คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร (mA)
 $t_{Lifetime}$ คือ อายุการใช้งานของแหล่งพลังงาน (Hours)

$$\text{ซึ่งหาได้จาก } t_{Lifetime} = \frac{\text{Spec. Battery (AH)}}{\text{Current of circuit (A)}} \text{ (Hours)} \quad (2.6)$$

ตัวอย่าง กำหนดให้ใช้ถ่านไฟฉาย Panasonic 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน ซึ่งมีความจุ 2850 mAh สามารถหาอายุการใช้งานของถ่านไฟฉายและพลังงานของถ่านไฟฉาย

- หาอายุการใช้งานของถ่านไฟฉาย

วิธีทำ

$$t_{Lifetime} = \frac{2850mAh}{100mA} = 28.5 \text{ hours}$$

- หาพลังงานของถ่านไฟฉาย

วิธีทำ

$$E = v \times i \times t$$

$$E = (6\text{volt} \times 100\text{mA}) \times 28.5\text{hours}$$

$$E = (600\text{mW}) \times 102,600\text{sec.}$$

$$E = 61,560 \text{ joules}$$

เพราะฉะนั้นถ่านไฟฉายขนาด 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน จะให้พลังงาน 61,560 จูล โดยมีอายุการใช้งาน 28 ชั่วโมง 30 นาที

2.6 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) เป็นคณิตศาสตร์ประยุกต์แขนงหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาที่ต้องการให้เป็นไปตามจุดประสงค์ โดยมีแนวคิดที่ทำให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดในทรัพยากรที่มีจำกัด วิธีนี้สามารถใช้แก้ปัญหาได้หลายอย่าง โดยเริ่มจากการพัฒนารูปแบบหรือโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนปัญหา จากนั้นทำการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดภายใต้

ข้อจำกัด หรือเงื่อนไขที่มีอยู่ ตัวอย่างปัญหาที่ใช้วิธีโปรแกรมเชิงเส้นตรง เช่น การคำนวณการผลิตสินค้าให้ได้มากที่สุด แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การหาวิธีการเคลื่อนย้ายทหารให้มากที่สุดโดยที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การผลิตสินค้าจำนวนน้อยที่สุด แต่ทำกำไรได้มากที่สุด หรือหาว่าหากบริษัทหนึ่งผลิตสินค้า 2 ประเภท ต้องผลิตอย่างละกี่ชิ้นจึงจะได้กำไรสูงสุดโดยมีเงื่อนไขที่กำหนดให้ เช่น งบประมาณ จำนวนวัตถุดิบ กำลังคน และระยะเวลาการผลิต เป็นต้น ซึ่งการใช้วิธีโปรแกรมเชิงเส้นตรงที่ใช้กับการแก้ปัญหาทางด้านอุตสาหกรรมจะต้องเกี่ยวข้องกับวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต

การแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งรูปแบบระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมีดังนี้

1) สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุน กำไร ฯลฯ เพื่อให้กำหนดเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด (maximize or minimize) ในการหาคำตอบ

2) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) คือตัวแปรที่ใช้เก็บคำตอบของปัญหา ตัวแปรตัดสินใจเป็นส่วนประกอบในฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข ซึ่งในปัญหาหนึ่งๆ อาจกำหนดตัวแปรได้หลายลักษณะ แต่สำหรับโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม คำตอบที่ได้จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก

3) สมการแสดงขอบข่ายหรือสมการเงื่อนไข (Constraints) แสดงความจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรของปัญหา โดยวัตถุประสงค์ของปัญหาจะได้ค่าที่สูงที่สุดหรือต่ำที่สุดตามที่ต้องการได้คิมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของปัญหา เช่น ข้อจำกัดด้านทรัพยากร ความต้องการ นโยบาย หรือเงื่อนไขต่างๆ ของปัญหา ดังนั้นจึงมีการเรียกโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มว่าเป็นตัวแบบ ที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดในเงื่อนไขบังคับ (constrained optimization model) โดยที่เงื่อนไขบังคับอาจจะอยู่ในรูปสมการหรืออสมการ (inequality) ก็ได้ แต่เงื่อนไขต้องอยู่ในรูปสมการเชิงเส้น นั่นคือใช้เครื่องหมายเท่ากับ (=) โดยที่ตัวแปร มีเลขชี้กำลังเป็น 1 หรืออยู่ในรูปอสมการเชิงเส้น นั่นคือใช้เครื่องหมายมากกว่าเท่ากับ (\geq) หรือน้อยกว่าเท่ากับ (\leq) และตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1

4) ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่างๆ ของรูปแบบแทนระบบต้องมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง (linear form) คือ ตัวแปรทุกตัวในสมการเป้าหมายและสมการหรืออสมการ ของขอบข่ายจะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเป็นกำลังเดียว (กำลังหนึ่ง)

5) ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (All positive value)

รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่พิจารณานั้นเป็นปัญหาลักษณะที่ต้องการหาค่าสูงสุดหรือต้องการหาค่าต่ำสุด โดยเขียนได้ดังนี้

หาค่าสูงสุด (Maximize) หรือหาค่าต่ำสุด (Minimize) ของ $z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

ภายใต้ข้อจำกัดดังนี้ (Subject to)

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

...

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

- โดยที่ x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variable) หรือจำนวนหน่วยของกิจกรรม j ที่ตัดสินใจทำ
- c_j คือ ผลตอบแทน (Profit หรือ return) ที่ได้จากการตัดสินใจเลือกหรือต้นทุน (cost) ของตัวแปรตัดสินใจ x_j
- a_{ij} คือ จำนวนทรัพยากรชนิดที่ i ส่วนหนึ่งที่ถูกใช้ไปจากจำนวนทรัพยากรชนิด i ทั้งหมดที่มีอยู่ อันเนื่องจากการเลือกตัวแปรตัดสินใจ x_j (Resource consumption rate)
- b_i คือ จำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ (Resource) ชนิดที่ i เพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เนื่องจากการหาคำตอบในงานวิจัยนี้ต้องการหาตำแหน่งที่เหมาะสมและจำนวนในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด ซึ่งคำตอบที่ต้องการเป็นเลขจำนวนเต็ม

บทที่ 3

แนวคิดและเทคนิคในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ในการออกแบบและการวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น ประเด็นการใช้พลังงานเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้วางแผนเครือข่ายต้องพิจารณา งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดผลกระทบของการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโนดตรวจรู้ โดยได้กำหนดโครงสร้างการรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการใช้สถานีถ่ายทอด (Relay station) ในเครือข่าย รวมถึงการพิจารณาประเด็นเรื่องการใช้พลังงานของข้อมูลด้วย เพื่อให้ได้เครือข่ายที่มีอายุการใช้งานในระยะเวลาตามที่ต้องการ และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด เพื่อให้การใช้งานเครือข่ายคุ้มค่าและได้ประโยชน์จากการลงทุนมากที่สุด

เนื้อหาในบทนี้อธิบายเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้พัฒนาขึ้น โดยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) เพื่อช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพารามิเตอร์ของการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย หัวข้อ 3.1 อธิบายการนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย หัวข้อ 3.2 อธิบายการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดตัวแปรและสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ และหัวข้อสุดท้าย 3.3 อธิบายโปรแกรมสำหรับหาคำตอบของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็ม ได้แก่ การแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม ส่วนประกอบของโปรแกรม และ ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

3.1 การนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วน ของระบบไร้สาย โดยพิจารณาปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด (Relay Station placement and assignment problems) สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งเป็นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งในการ ติดตั้งสถานีฐานถ่ายทอดในเครือข่าย รวมถึงการกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยัง สถานีฐาน ซึ่งสามารถส่งผ่านโนดตรวจรู้หรือผ่านสถานีถ่ายทอดหรือส่งให้สถานีฐานโดยตรงก็ได้ โดยมี หลักการเพื่อลดผลกระทบของการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโนดตรวจรู้ เพื่อให้มีการใช้ พลังงานของโนดตรวจรู้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้ได้เครือข่ายที่มีอายุการใช้งานในระยะเวลาตาม ที่ต้องการ โดยมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด ทำให้สามารถใช้งานเครือข่ายได้อย่างคุ้มค่ากับ การลงทุนมากที่สุด

ในงานวิจัยนี้การเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้น ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (Candidate Relay Stations) ผู้ออกแบบเครือข่ายได้กำหนดขึ้นในพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งในการกำหนดนั้นได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการติดตั้ง เช่น ความยากง่ายในการเข้าถึง การเชื่อมระบบไฟฟ้ากำลัง หรือการจัดตั้งระบบเซลแสงอาทิตย์ และระบบส่งสัญญาณ (Transmission Systems) ระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เมื่อผ่านกระบวนการออกแบบเครือข่ายที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จะได้จำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดสำหรับใช้ในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ตามอายุการใช้งานที่ต้องการ

ในงานวิจัยนี้ ได้นิยามอายุการทำงานของเครือข่าย (network lifetime) ว่าเป็นช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานของเครือข่าย จนกระทั่งโนดตรวจรู้โนคใดโนคหนึ่งในเครือข่ายหมดพลังงานลง ซึ่งเป็นคำนิยามที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับอายุการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (WSN lifetime) [6] และในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง (continuous delivery) โดยสามารถทำการส่งจากโนดตรวจรู้ไปถึงสถานีฐานได้แบบหลายช่วง (multi-hop)

3.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

หัวข้อนี้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบและวางแผนการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและการกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข ซึ่งเราได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่พิจารณา 2 ปัญหาได้แก่ ปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด (RS placement and assignment problem) และปัญหาการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มุ่งเน้นการใช้พลังงานน้อยที่สุด (the minimum energy-RS placement problem) โดยที่สมการเงื่อนไขได้กำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการสื่อสารระหว่างโนดต่างๆในเครือข่าย ทั้งในเรื่องของคุณภาพสัญญาณ ความจุข้อมูล และพลังงานของโนด

เนื้อหาต่อจากนี้ประกอบด้วย หัวข้อ 3.2.1 เป็นการนิยามตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มของงานวิจัยนี้ หัวข้อ 3.2.2. อธิบายสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย และหัวข้อ 3.2.3 อธิบายสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มุ่งเน้นการใช้พลังงานน้อยที่สุดของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

3.2.1 การนิยามตัวแปร

ตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์ประกอบด้วย เซต ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และ พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (constant parameters) ดังแสดงในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยตัวแปรตัดสินใจมี 2 ประเภทคือ ประเภทแรกเป็นตัวแปรตัดสินใจไบนารี ซึ่งมีค่า 0 หรือ 1 ตัวแปรตัดสินใจอีกประเภทเป็นตัวแปรที่เก็บค่าปริมาณข้อมูล มีค่าเป็นจำนวนเต็มที่ไม่มากกว่าหรือเท่ากับ 0 ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซต

สัญลักษณ์	คำนิยาม
J	เซตของตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (Candidate Relay Stations)
I	เซตของโนดตรวจรู้ (Sensor nodes)
M	เซตของสถานีฐาน (Base stations)

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ

สัญลักษณ์	คำนิยาม
x_j	ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j
s_{ik}	ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปโนดตรวจรู้ k ; $i, k \in I, i \neq k$ (bits)
r_{ij}	ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปสถานีถ่ายทอด j ; $j \in J$ (bits)
b_{im}	ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน m ; $m \in M$ (bits)

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่

สัญลักษณ์	คำนิยาม
$C_{L_{SN}}$	พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ (<i>joules/bit</i>)
$C_{L_{RS}}$	พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีถ่ายทอด (<i>joules/bit</i>)
$C_{L_{BS}}$	พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน (<i>joules/bit</i>)
C_r	พลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ (<i>joules/bit</i>)
$P_{L_{SN}}$	จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้รับได้จากโนดตรวจรู้อื่น ๆ (<i>dBm</i>)
$P_{L_{RS}}$	จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่สถานีถ่ายทอดรับได้จากโนดตรวจรู้ (<i>dBm</i>)
$P_{L_{BS}}$	จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่สถานีฐานรับได้จากโนดตรวจรู้ (<i>dBm</i>)
P_{ik}	ความแรงของสัญญาณที่โนดตรวจรู้ k รับได้จากโนดตรวจรู้ i ; $i, k \in I$ (<i>dBm</i>)
P_{ij}	ความแรงของสัญญาณที่สถานีถ่ายทอด j รับได้จากโนดตรวจรู้ i ; $i \in I, j \in J$ (<i>dBm</i>)
P_{im}	ความแรงของสัญญาณที่สถานีฐาน m รับได้จากโนดตรวจรู้ i ; $i \in I$ and $m \in M$ (<i>dBm</i>)
V	ปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่สถานีถ่ายทอดรองรับได้ (<i>bits</i>)
T	อายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (<i>sec</i>)
E_i	พลังงานเริ่มต้นของโนดตรวจรู้ i ; $i \in I$ (<i>joules</i>)
g_i	อัตราการสร้างข้อมูลของโนดตรวจรู้ i ; $i \in I$ (<i>bit/sec</i>)

3.2.2 สมการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด (RS placement and assignment problem: RPAP) ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายเครือข่ายน้อยที่สุด นั่นคือใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด โดยเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สามารถทำการสื่อสารไร้สายระหว่างโนดในเครือข่ายได้ และมีอายุการใช้งานเครือข่ายตามที่กำหนด ซึ่งข้อกำหนดต่างๆ ของการออกแบบเครือข่ายได้พัฒนาให้อยู่ในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

(1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแสดงในสมการที่ (3.1) เป็นฟังก์ชันที่ต้องการทำให้สถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนน้อยที่สุด (Minimize number of relay stations) เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด (Minimize cost) โดยจำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกจะต้องอำนวยความสะดวกให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} x_j \quad (3.1)$$

(2) สมการเงื่อนไข (Constraints)

เงื่อนไขในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นการกำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการสื่อสารระหว่างโหนดในเครือข่ายแบบไร้สายที่ใช้สถานีถ่ายทอดในการส่งผ่านข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน โดยผู้วิจัยได้แบ่งเงื่อนไขออกเป็นสามกลุ่มคือ เงื่อนไขการสื่อสารระหว่างโหนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐาน เงื่อนไขในเรื่องของความจุและการรองรับปริมาณข้อมูลภายในเครือข่าย และ เงื่อนไขในเรื่องของข้อจำกัดด้านพลังงานของโหนดตรวจรู้ ซึ่งโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบ (นั่นคือจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีถ่ายทอด) และเส้นทางในการส่งข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ทั้งหมด

(2.1) เงื่อนไขการสื่อสารระหว่างโหนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐาน

$$s_{ik}(P_{ik} - P_{T1}) \geq 0 \quad \forall i, k \in I, i \neq k \quad (3.2)$$

$$r_{ij}(P_{ij} - P_{T2}) \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.3)$$

$$b_{im}(P_{im} - P_{T3}) \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M \quad (3.4)$$

เงื่อนไขที่ (3.2) - (3.4) กำหนดการสื่อสารระหว่างโหนดต่างๆในเครือข่าย โดยทำการประเมินจากคุณภาพความแรงของสัญญาณที่โหนดรับได้จากภาคส่ง ซึ่งการสื่อสารจะสามารถทำได้ถ้าค่าความแรงสัญญาณที่รับได้มากกว่าค่าขีดแบ่ง (threshold) โดยเงื่อนไขที่ (3.2) กำหนดการสื่อสารระหว่างโหนดตรวจรู้ไร้สาย i และ k ซึ่งการสื่อสารจะทำได้ถ้าหากค่าความแรงสัญญาณ P_{ik} มากกว่าค่าขีดแบ่ง P_{T1} เมื่อ $i, k \in I$ และ $i \neq k$ ส่วนเงื่อนไขที่ (3.3) กำหนดการสื่อสารระหว่างโหนดตรวจรู้ไร้สาย i และสถานีถ่ายทอด j ซึ่งการสื่อสารจะทำได้ถ้าหากค่าความแรงสัญญาณ P_{ij} มากกว่าค่าขีดแบ่ง P_{T2} เมื่อ $i \in I$ และ $j \in J$ และเงื่อนไขที่ (3.4) กำหนดการสื่อสารระหว่างโหนดตรวจรู้ไร้สาย i และสถานีฐาน m ซึ่งการสื่อสารจะทำได้ถ้าหากค่าความแรงสัญญาณ P_{im} มากกว่าค่าขีดแบ่ง P_{T3} เมื่อ $i \in I$ และ $m \in M$

(2.2) เงื่อนไขในเรื่องของความจุและการรองรับปริมาณข้อมูลภายในเครือข่าย

$$(T * g_i) + \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} = \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} \quad \forall i \in I \quad (3.5)$$

$$\sum_{\forall j \in J} r_{ij} \leq Vx_j \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$\sum_{\forall i \in I} (T * g_i) = \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall i \in I} r_{ij} + \sum_{\forall m \in M} \sum_{\forall i \in I} b_{im} \quad (3.7)$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \in I, i \neq k \quad (3.8)$$

$$r_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.9)$$

$$b_{im} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M \quad (3.10)$$

เงื่อนไขที่ (3.5) กำหนดสมดุลการไหลของข้อมูล กล่าวคือ ปริมาณข้อมูลที่ไหลเข้าโนดตรวจรู้ต้องเท่ากับปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งออก ซึ่งปริมาณข้อมูลของโนดตรวจรู้ประกอบด้วยข้อมูลที่โนดตรวจรู้สร้างขึ้นตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายและปริมาณข้อมูลที่รับมาจากโนดตรวจรู้อื่นๆ ส่วนปริมาณข้อมูลที่ไหลออกประกอบด้วยปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ส่งไปยังโนดตรวจรู้อื่น ๆ หรือส่งไปยังสถานีถ่ายทอด หรือส่งไปยังสถานีฐาน ส่วนเงื่อนไขที่ (3.6) กำหนดการรองรับปริมาณข้อมูลของสถานีถ่ายทอด j กรณีเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด j (นั่นคือ $x_j = 1$) กล่าวคือปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ส่งมาให้สถานีถ่ายทอด j ต้องมีค่าไม่เกินปริมาณข้อมูลที่สถานีถ่ายทอด j สามารถรองรับได้ และเงื่อนไขที่ (3.7) เป็นการตรวจสอบว่าปริมาณข้อมูลของโนดตรวจรู้ทั้งหมดในเครือข่ายต้องส่งให้กับสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐาน เงื่อนไขข้อนี้เป็นการป้องกันข้อมูลสูญหายจากการส่งข้อมูลผ่านโนดต่างๆ ในเครือข่าย

สำหรับเงื่อนไขที่ (3.8) - (3.10) เป็นการกำหนดว่าค่าตัวแปรที่เกี่ยวกับปริมาณข้อมูลที่ส่งระหว่างโนดต่างๆ (s_{ik} , r_{ij} , b_{im}) ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

(2.3) เงื่อนไขในเรื่องของข้อจำกัดด้านพลังงานของโนดตรวจรู้

$$\sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ki} C_r + \sum_{\forall n \in I}^{i \neq n} s_{in} C_{t_sn} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} C_{t_RS} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} C_{t_Bs} \leq E_i \quad \forall i \in I \quad (3.11)$$

พลังงานที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ต้องมีค่าไม่เกินพลังงานตั้งต้นที่โนดตรวจรู้มีอยู่ ซึ่งการใช้พลังงานแบ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลจากโนดอื่น ๆ และพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ไปยังโนดตรวจรู้ด้วยกันเองหรือไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐานนั้นต้องมีค่าไม่เกินพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้

3.2.3 สมการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มุ่งเน้นการใช้พลังงานน้อยที่สุดของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

หัวข้อนี้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มุ่งเน้นการใช้พลังงานน้อยที่สุดของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Minimum Energy-RS Placement problem: MERP) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายน้อยที่สุด สมการคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวเขียนได้ดังสมการ (3.12) โดยที่สมการเงื่อนไขสำหรับการออกแบบเครือข่ายเป็นสมการเดียวกับสมการเงื่อนไข (3.2) - (3.11) ที่แสดงในหัวข้อ 3.2.2

$$\text{Minimize } \sum_{\forall i \in I} \left(\sum_{\forall k \neq i} s_{ki} C_r + \sum_{\forall n \in I} s_{in} C_{t_sn} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} C_{t_RS} + \sum_{\forall m \in M} b_{im} C_{t_Bs} \right) \quad (3.12)$$

3.3 โปรแกรมสำหรับหาคำตอบของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับสมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ใช้ในการออกแบบและการวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio โดยได้ทำการแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มให้เป็นคำสั่งในโปรแกรม ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1 ส่วนหัวข้อ 3.3.2 อธิบายรายละเอียดหน้าต่างการใช้งานโปรแกรม และหัวข้อ 3.3.3 แสดงตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

3.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม

ตารางที่ 3.4 แสดงการแปลงสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มจากหัวข้อที่ 3.2 ให้เป็นคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ซึ่งประกอบด้วยกำหนัดตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (3.1) และเงื่อนไข (3.2) - (3.11)

ตารางที่ 3.4 แสดงการแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม

IBM ILOC CPLEX Optimization Studio

สมการจากหัวข้อ 3.2	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
x_j	dvar int x[RS] in 0..1;
s_{ik}	dvar int+ s[SN][SN] ;
r_{ij}	dvar int+ r[SN][RS] ;
b_{im}	dvar int+ b[SN][BS] ;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective Function
สมการ(3.1)	Minimize sum(j in RS) x[j]
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(3.2)	ct1 : forall(i,k in SN:i!=k) s[i][k]*(Pr_SN[k][i]-Pthr_SN) >=0 ;
สมการ(3.3)	ct2 : forall(i in SN,j in RS) r[i][j]*(Pr_RS[i][j]-Pthr_RS) >=0
สมการ(3.4)	ct3 : forall(i in SN,m in BS) b[i][m]*(Pr_BS[i][m]-Pthr_BS) >=0 ;
สมการ(3.5)	ct4 : forall(i in SN) T*g[i] + sum(k in SN:k!=i)s[k][i] == sum(n in SN:i!=n)s[i][n] + sum(j in RS) r[i][j]+sum(m in BS) b[i][m];
สมการ(3.6)	ct5 : forall(j in RS) sum(i in SN) r[i][j] <= V*x[j];
สมการ(3.7)	ct6 : sum(i in SN) (T*g[i]) == sum(j in RS) sum(i in SN) r[i][j] + sum(m in BS)sum(i in SN) b[i][m]
สมการ(3.8)	ct7 : forall(k,i in SN:k!=i) s[k][i] >= 0;
สมการ(3.9)	ct8 : forall(i in SN,j in RS) r[i][j] >= 0;
สมการ(3.10)	ct9 : forall(i in SN,m in BS) b[i][m] >= 0;
สมการ(3.11)	ct 10 : forall(i in SN,j in RS,m in BS) (sum(k in SN:k!=i) (s[k][i]*Cr_SN[k][i])) + (sum(n in SN:n!=i) (s[i][n]*Ct_SN[i][n])) + (sum(j in RS) (r[i][j]*Ct_RS[i][j])) + (sum(m in BS)

3.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม

รูปที่ 3.1 แสดงหน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio ซึ่งมีรายละเอียดและหน้าที่การทำงานดังนี้

หมายเลข 1 (OPL Project) แสดงไฟล์โครงการ (Project) ที่กำลังเปิดอยู่ สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) คำสั่งไฟล์ (*.dat) และ เซตคั้งไฟล์ (*.ops)

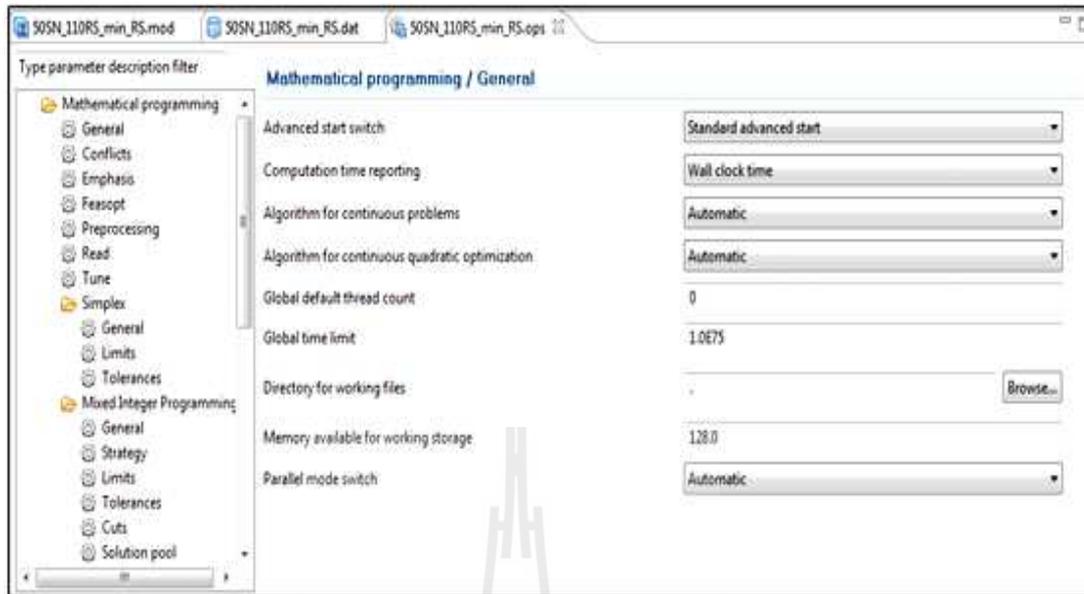
หมายเลข 2 (Model File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของกรโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไปนารี ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข

หมายเลข 3 (Data File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียว และในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ 3.2

หมายเลข 4 (Setting File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้กับโปรแกรม เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (Memory) ที่ใช้ในการคำนวณ จำนวนการวนซ้ำ (iteration) ของซิมเพล็กซ์อัลกอริทึมและจัดการเกี่ยวกับข้อมูลล็อก (Log data) ที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 3.3

หมายเลข 5 (Outline View) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของ โมเดลไฟล์ คำสั่งไฟล์ และ เซตคั้งไฟล์ และจัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อต่อการตรวจสอบและค้นหา

หมายเลข 6 (Solutions Log Area) แสดงคำตอบที่โปรแกรมทำการคำนวณพบ และพิจารณาว่าน่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Feasible Solution) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้เรื่อย ๆ จนกระทั่งโปรแกรมทำการคำนวณพบคำตอบที่ดีที่สุด (Final Solution)



รูปที่ 3.3 Setting file editing area

3.3.3 ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด พื้นที่ทดสอบมีขนาด 100 ตารางเมตร โดยกำหนดให้มีโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 5 โหนด สถานีฐาน 1 สถานี จำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 6 สถานี ทำการส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแสดงดังรูปที่ 3.4 สำหรับความซับซ้อน (ความยาก) ของปัญหาการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายของตัวอย่างนี้พิจารณาได้จากจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาคำตอบ (y) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของปัญหา โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.13) ซึ่งทำการพิสูจน์ไว้ในภาคผนวก ก. โดยขนาดของปัญหาขึ้นอยู่กับจำนวน โหนดตรวจรู้ (a) จำนวนสถานีฐาน (b) และจำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)

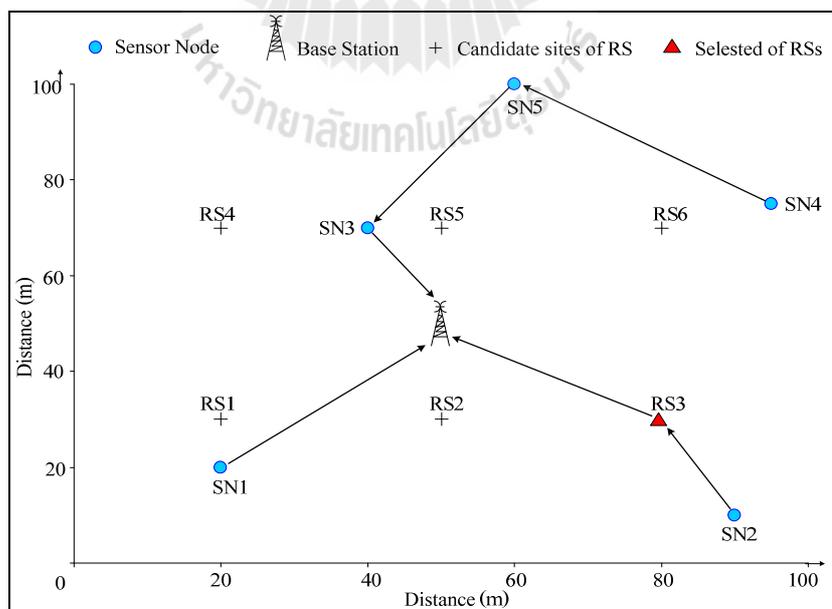
$$y = a(a + b + c - 1) + c \quad (3.13)$$

จากตัวอย่างการออกแบบเครือข่ายที่พิจารณานี้ $a = 5$, $b = 1$ และ $c = 6$ ดังนั้น $y = 61$ เราสามารถวิเคราะห์ความซับซ้อนของปัญหาการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยพิจารณาจากปัญหาการออกแบบขนาดต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อขนาดของปัญหา (นั่นคือ a , b , c) เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นแต่ขนาดของตัวแปรตัดสินใจจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่จะทำให้ปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้สมการคณิตศาสตร์มาใช้ในการออกแบบเครือข่ายและใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE มาช่วยในการหาคำตอบ

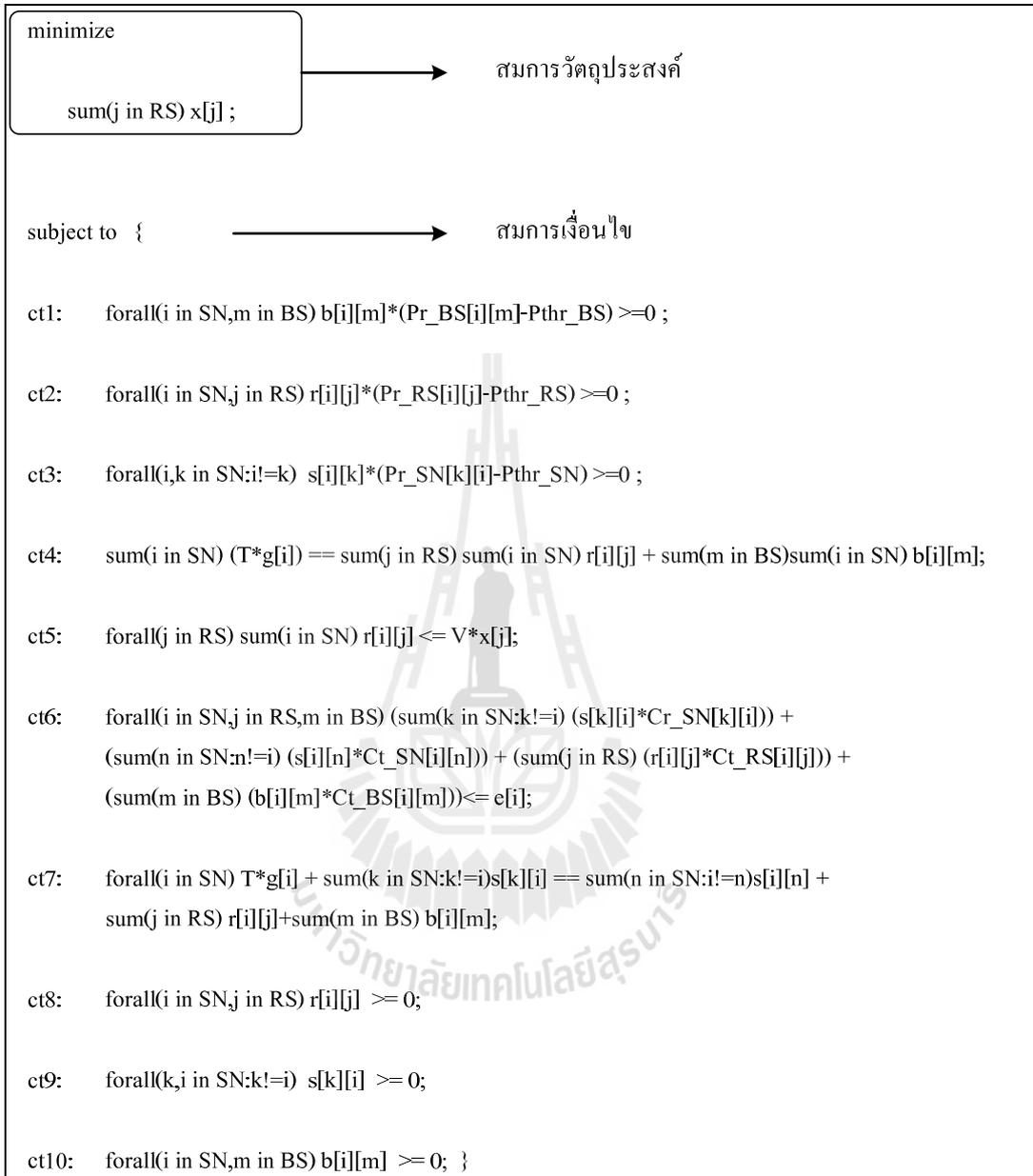
ในการหาคำตอบให้กับตัวแปรตัดสินใจของปัญหานี้ได้ใช้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายดังกล่าวในหัวข้อ 3.2 ได้ถูกแปลงเป็น โปรแกรม IBM ILOC CPLEX ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ส่วนรูปที่ 3.6 แสดงอินพุตของโปรแกรม และรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรม ซึ่งประกอบด้วยจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้ง 1 สถานี โดยเลือกติดตั้งตำแหน่งที่ 3 และมีการส่งข้อมูล จากโนดตรวจรู้โนดที่ 1 ไปยังสถานีฐาน โนดที่ 2 ไปยังสถานีถ่ายทอดตำแหน่งที่ 3 และโนดที่ 4 ส่งข้อมูลไปโนดที่ 5 และจากโนดที่ 5 ไปยังโนดที่ 3 และจากโนดตรวจรู้ที่ 3 ไปยังสถานีฐานโดยตรง ซึ่งปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งแสดงดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบเครือข่ายและจำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

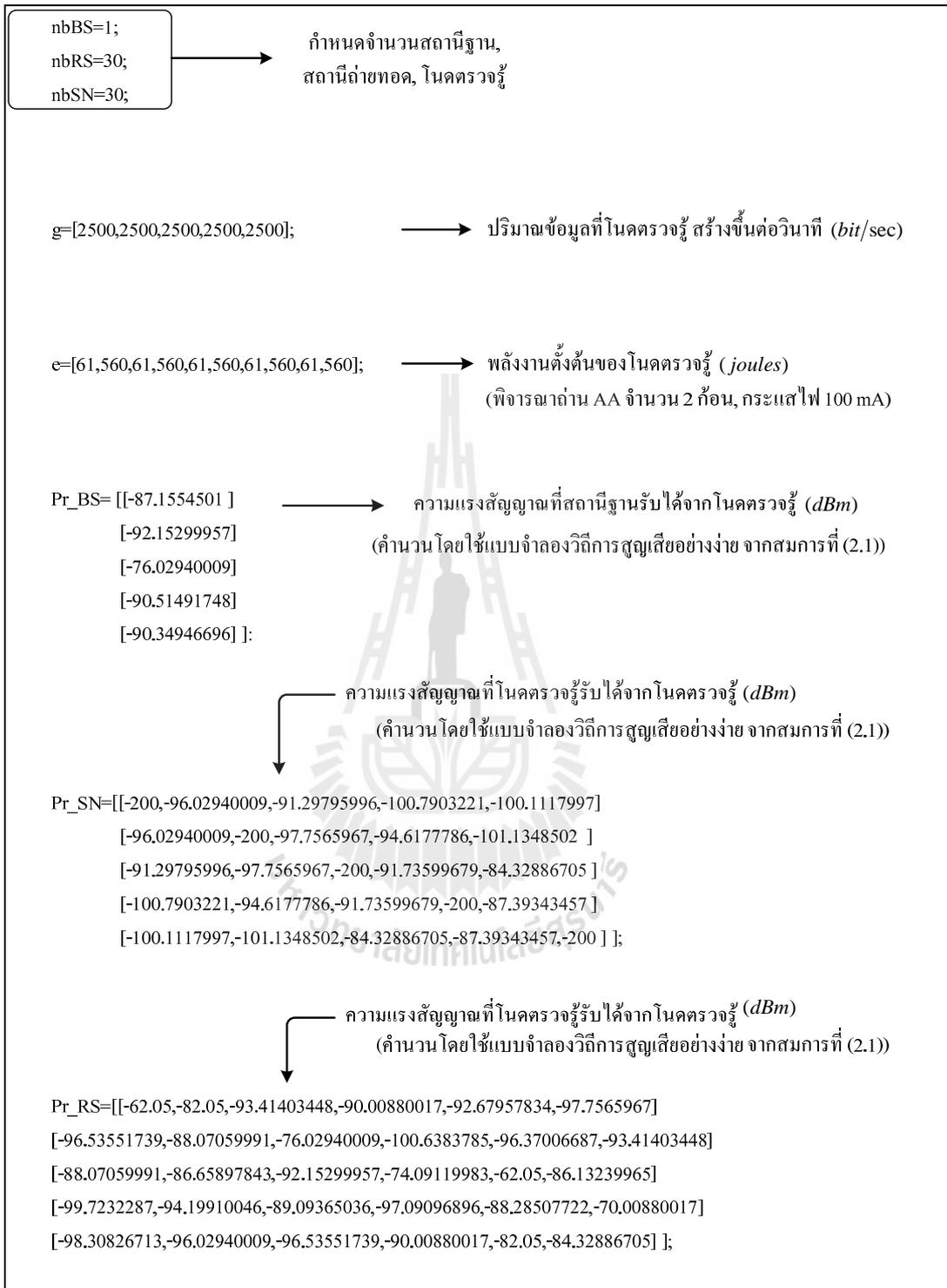
โนดตรวจรู้(a)	สถานีฐาน(b)	จำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)	จำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด (y)
5	1	6	61
5	3	6	71
5	1	10	85
50	1	6	2,806
50	3	6	2,906
50	6	10	3,260



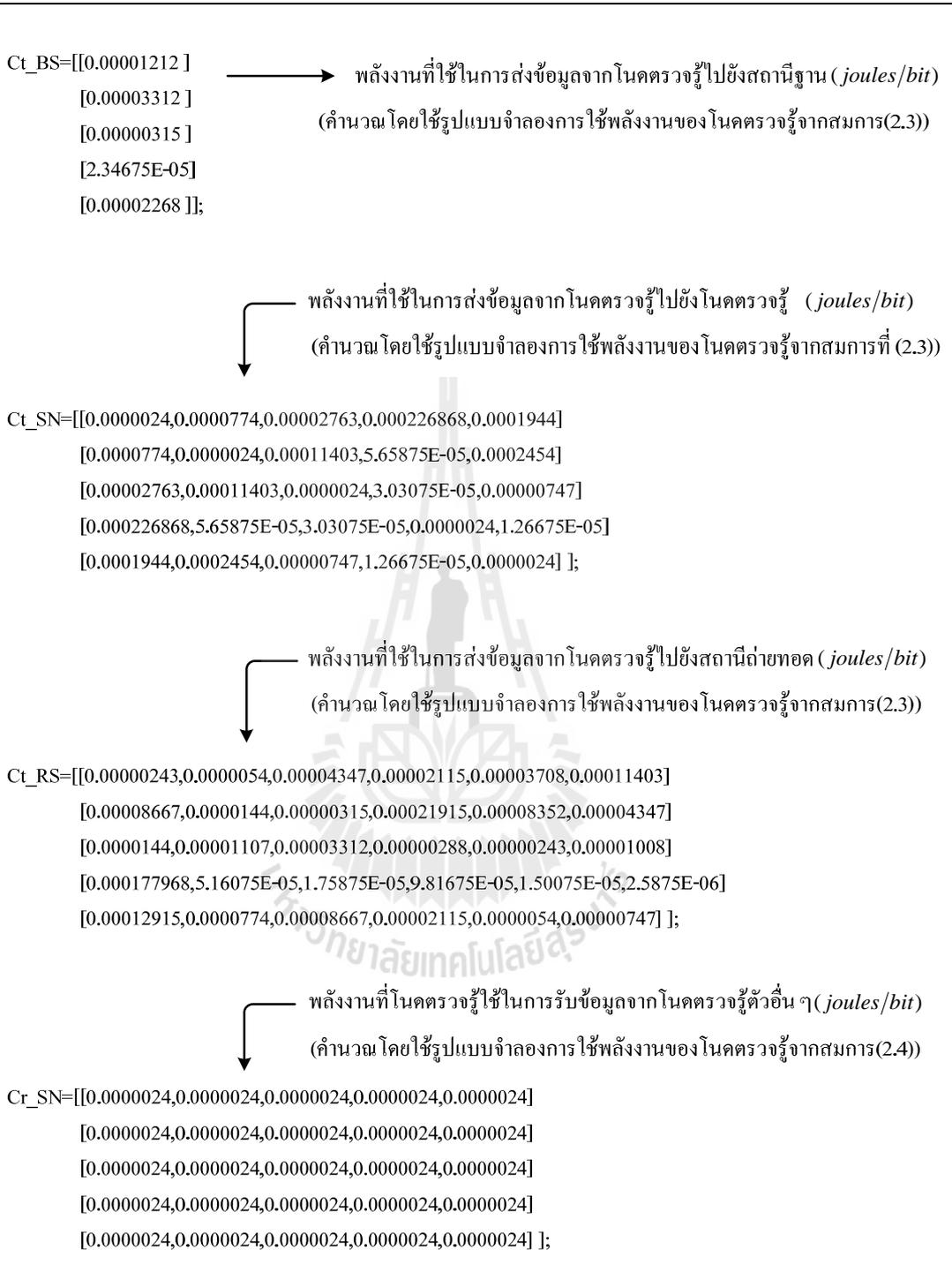
รูปที่ 3.4 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายตัวอย่าง (ประกอบด้วย 1 สถานีฐาน โนดตรวจรู้ 5 โนด)



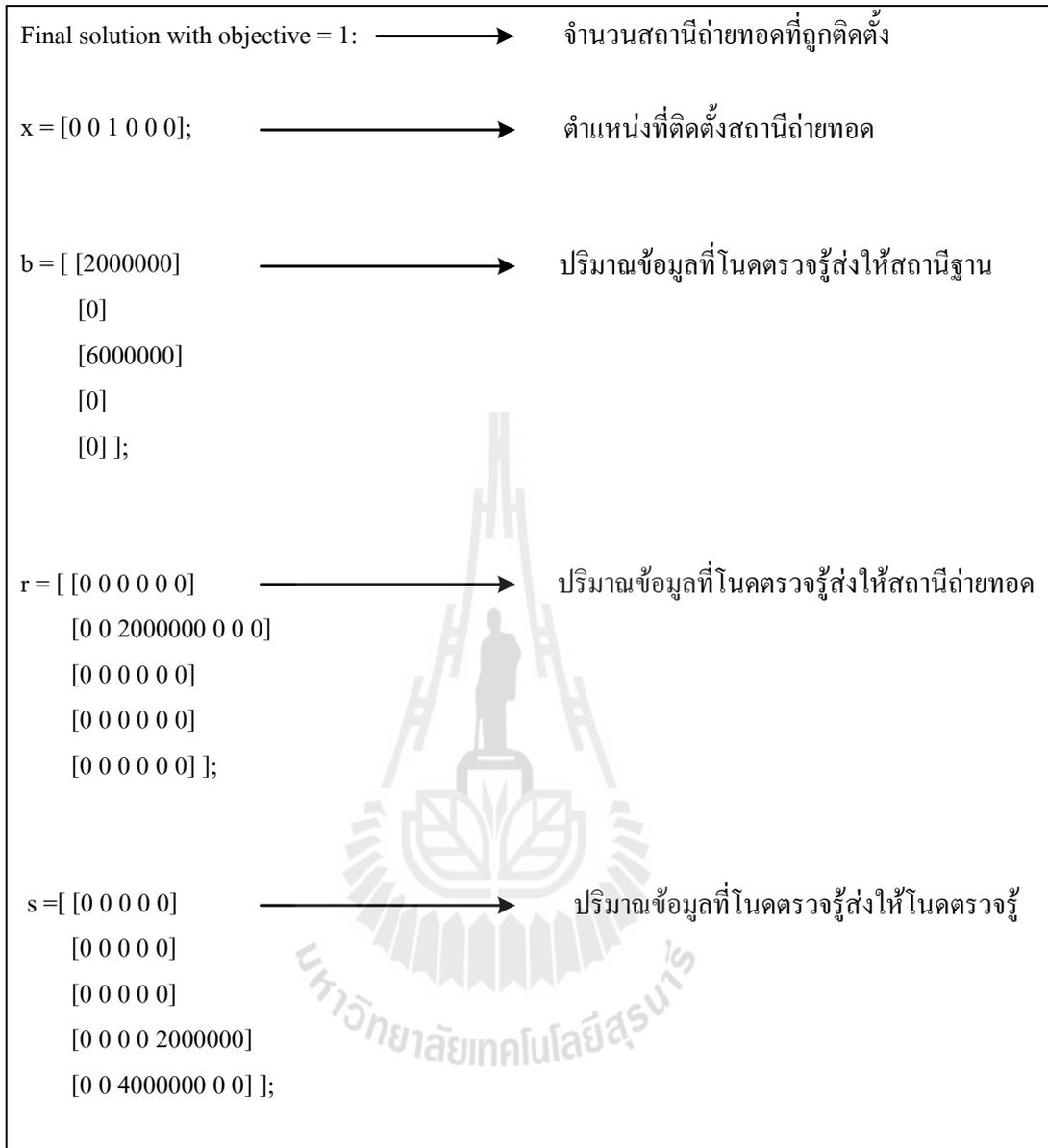
รูปที่ 3.5 สมการคณิตศาสตร์ใน โปรแกรม IBM ILOC CPLEX



รูปที่ 3.6 อินพุตของข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX



รูปที่ 3.6 อินพุตของข้อมูลที่ใช้ใน โปรแกรม IBM ILOC CPLEX (ต่อ)



รูปที่ 3.7 เอาต์พุตจากโปรแกรม IBM ILOC CPLEX

บทที่ 4

การทดลองออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายและการวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้สาธิตการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ได้อธิบายในบทที่ 3 ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อการใช้พลังงานของเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเนื้อหาในหัวข้อที่ 4.1 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด (Candidate site to install relay stations) และการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ หัวข้อที่ 4.2 ศึกษาผลกระทบของจำนวนโนดตรวจรู้ที่ใช้ในเครือข่าย และหัวข้อที่ 4.3 เป็นการวิเคราะห์ผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและผลกระทบด้านพลังงาน เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน

4.1 การศึกษาผลกระทบของจำนวนตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด และการใช้พลังงาน

หัวข้อนี้ได้ทดลองใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด (RS placement and assignment problem: RPAP) สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (ดูรายละเอียดที่หัวข้อ 3.2.2) โดยในหัวข้อนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของจำนวนตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด (Candidate site to install relay stations) ต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้

4.1.1 พารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่เครือข่ายที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะพื้นที่ของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นพื้นที่ขนาด 500x500 ตารางเมตร ซึ่งมีการใช้สถานีฐาน 1 สถานีและมีโนดตรวจรู้จำนวน 30 โนด (แสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีฟ้า) พื้นที่เครือข่ายดังกล่าวอ้างอิงมาจากงานวิจัย Shi, Y. et al (2009) [1] การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนและตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่แตกต่างกัน

เพื่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล เราได้ทำการทดลองกรณีที่ไม่มีการใช้สถานีถ่ายทอด (เรียกว่า การทดลองที่ 1) กล่าวคือประเมินการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ไร้สายกรณีที่ไม่มีสถานีถ่ายทอด แต่ทำการส่งข้อมูลให้สถานีฐานโดยตรง หรือส่งผ่านโนดตรวจรู้ข้างเคียง โดยได้ทำการหาอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดของเครือข่ายในรูปที่ 4.1 ภายใต้เงื่อนไขพลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งอายุการใช้งานที่หาได้นั้นมีค่าเท่ากับ 800 วินาทีและนำค่าที่ได้นี้ไปเป็นอายุการทำงานของ

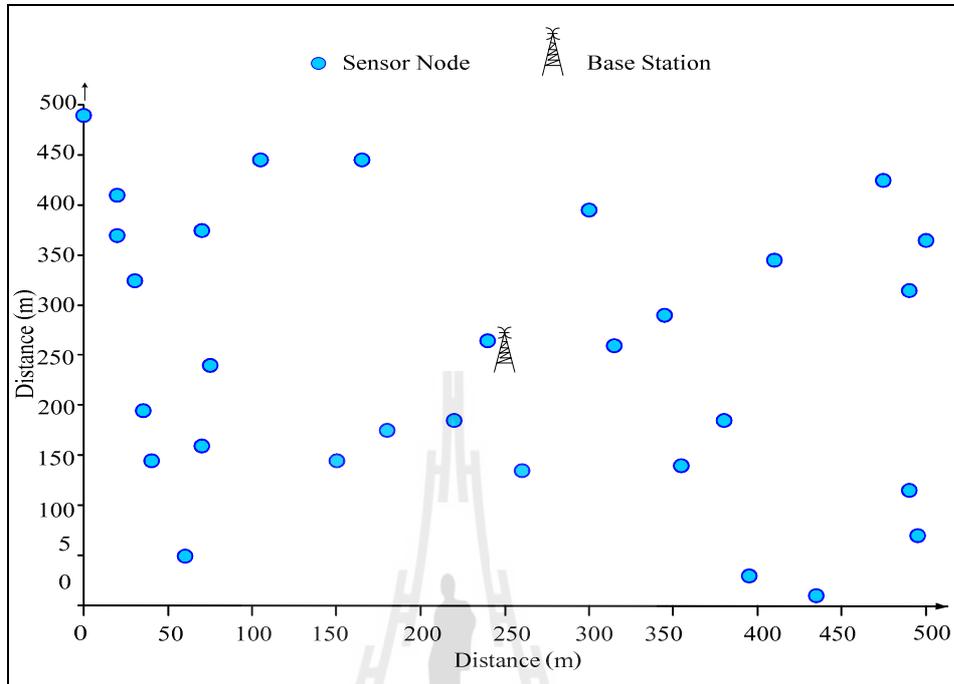
เครือข่ายในการทดลองที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด 3 แบบคือ แบบที่มีตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด 30, 50 และ 99 ตำแหน่ง (เรียกว่า การทดลองที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ) รูปที่ 4.2-4.4 แสดงตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอดทั้ง 3 แบบ (แทนด้วยสัญลักษณ์เครื่องหมายบวก ซึ่งมีการกระจายตัวเป็นแบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่)

ในการทดลองเราได้ใช้แบบจำลองการใช้พลังงานในการส่งและรับข้อมูลที่แนะนำในงานวิจัย [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลคำนวณได้จากสมการที่ (2.3) และพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูลคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ (Received signal strength) ณ โหนดตรวจรู้ สถานีฐาน และสถานีถ่ายทอด คำนวณได้จากแบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายในสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นการคำนวณความแรงสัญญาณที่ได้รับได้เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด พารามิเตอร์ของโหนดตรวจรู้ไร้สายในเครือข่ายได้พิจารณาใช้ค่าตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยได้กำหนดพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนค่าของจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ (threshold) ที่ทำให้โหนดตรวจรู้สามารถเชื่อมต่อสื่อสารกันได้ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ -90 dBm

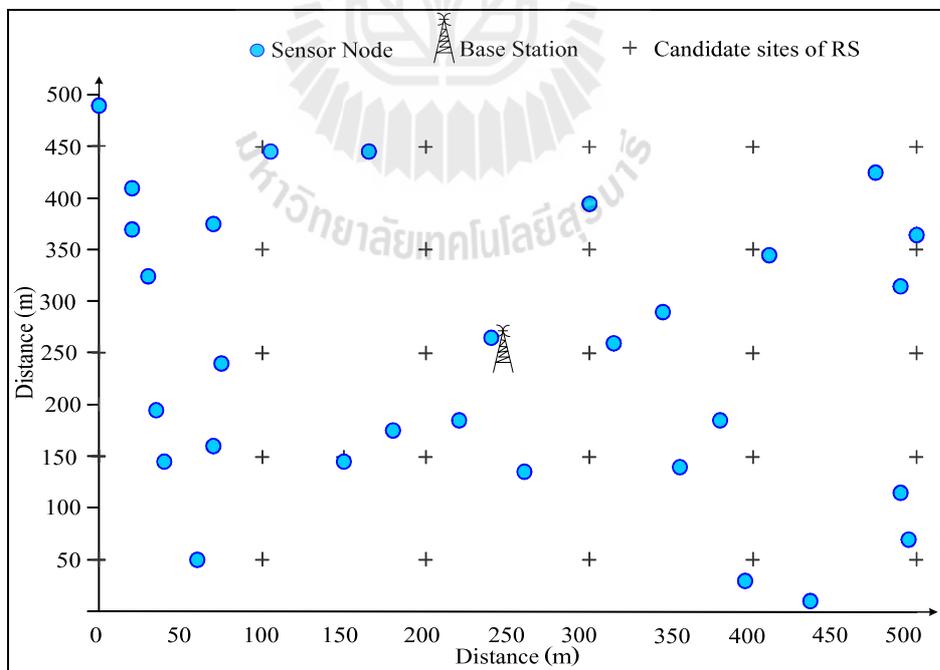
ในการทดลองนี้ การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายทำโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX ที่มีการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่าย

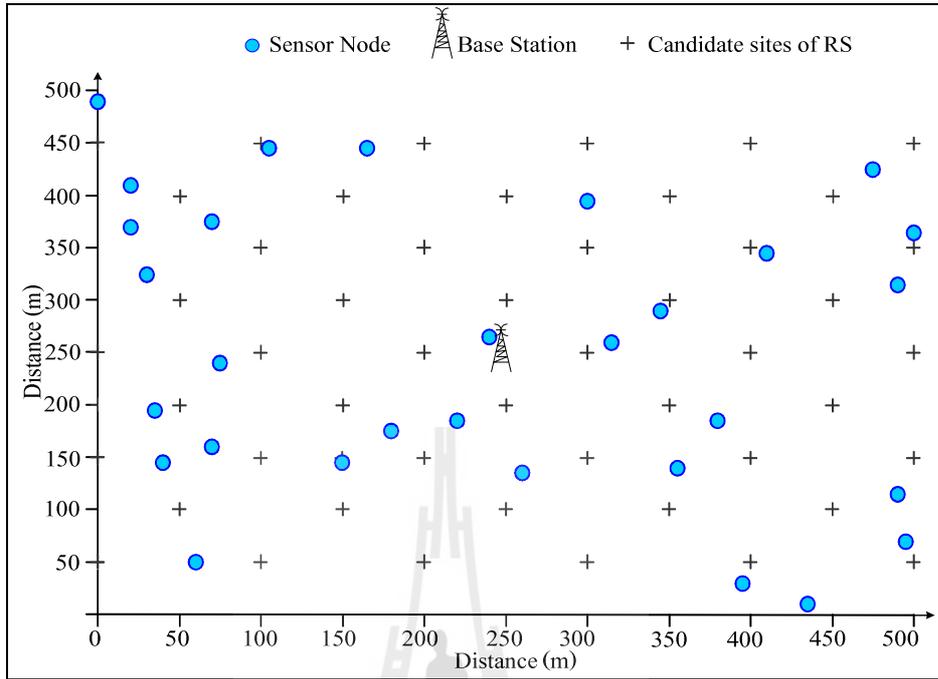
พารามิเตอร์	ค่า
จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ (threshold)	-90 dBm
อัตราเร็วการสร้างข้อมูลของโหนดตรวจรู้	2.5 kbps
ความถี่ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ ไร้สาย	2.4 GHz
พลังงานเริ่มต้นของโหนดตรวจรู้	2000 joules
ปริมาณข้อมูลสูงสุดที่สถานีถ่ายทอดรองรับได้	1,000,000 bits
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	32 mW
ระยะอ้างอิง	1 m.
กรณีการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4



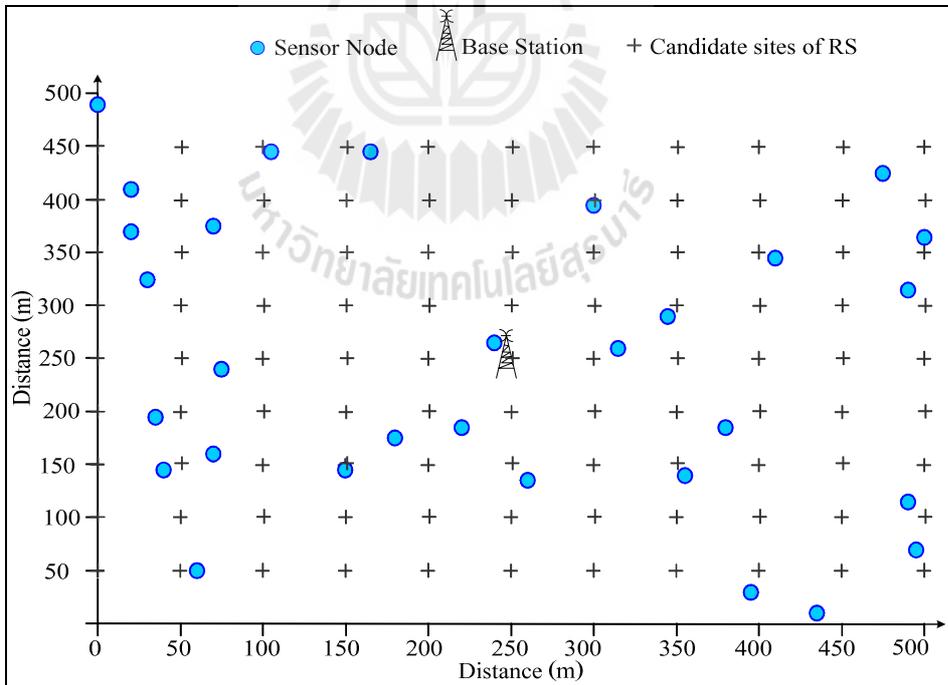
รูปที่ 4.1 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (BS=1, SN=30)



รูปที่ 4.2 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 30 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.3 เครื่องข่ายตรวจสอบรูปร่างที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 50 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.4 เครื่องข่ายตรวจสอบรูปร่างที่มีตำแหน่งสามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 99 ตำแหน่ง

4.1.2 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

การทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการใช้สถานีถ่ายทอดในเครือข่าย รูปที่ 4.5 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน จะเห็นว่าการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานต้องทำการรับส่งข้อมูลผ่านโนดตรวจรู้หลายโนดกว่าจะถึงสถานีฐาน ทำให้มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่อยู่ระหว่างทาง และโนดตรวจรู้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานพลังงานจะหมดลงก่อนโนดอื่นๆ เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดอื่นๆ และรวมถึงข้อมูลของโนดตัวนั้นเองด้วย จากการนิยามอายุการใช้งานของเครือข่ายสำหรับการทดลองนี้คือ เมื่อพลังงานของโนดตรวจรู้โนดใดโนดหนึ่งหมดลง ถือว่าอายุการใช้งานของเครือข่ายหมดลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ทำการติดตั้งภายในพื้นที่ทดสอบ สำหรับการทดลองที่ 1 ไม่มีการใช้สถานีถ่ายทอด สำหรับการทดลองที่ 2, 3 และ 4 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายคือ 17, 16 และ 13 สถานี ตามลำดับ รูปที่ 4.6 - 4.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอดของทั้ง 3 กรณี โดยจะเห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งลดลง เมื่อมีจำนวนและตำแหน่งให้เลือกติดตั้งมาก ซึ่งทำให้การออกแบบนั้นตอบสนองกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามการใช้จำนวนและตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากจะทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่

ตารางที่ 4.3 สรุปพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปตลอดอายุการใช้งานของเครือข่ายจะเห็นว่าการทดลองที่ 1 มีการใช้พลังงานสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทดลองที่ 2-4 ทั้งนี้เพราะว่าการทดลองที่ 1 ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจึงทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน โดยมีการรับและส่งข้อมูลผ่านระหว่างโนดตรวจรู้ด้วยกันจำนวนมากในกรณีนี้มีสมมุติฐานว่าไม่มีการจำกัดรัศมีในการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นรัศมีการทำงานขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ไปในการทดลองที่ 2-4 ที่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้น จะเห็นว่าในการทดลองที่ 4 มีการใช้พลังงานสูงสุด เนื่องจากใช้สถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุด ซึ่งทำให้โนดตรวจรู้ต้องใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในการทดลองที่ 4 สามารถรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน และการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับโนดตรวจรู้ รวมไปถึงโนดตรวจรู้มีพลังงานเพียงพอตลอดอายุการใช้งาน

ตารางที่ 4.4 แสดงพลังงานที่เหลืออยู่ของโนดตรวจรู้ จะเห็นว่าในการทดลองที่ 2-4 นั้นมีพลังงานเหลือมากกว่าการทดลองที่ 1 เนื่องจากว่าการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรูน้อยลง เพราะโนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลให้กับสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งแทน ทำให้การรับส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรูน้อยลงจึงทำให้พลังงานของโนดตรวจรู้เหลือมากกว่าการทดลองที่ 1 ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้

งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น และในการทดลองที่ 1 นั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงและมีโนคตรวจรู้ที่เหลือพลังงานน้อยกว่า 1 จูล มากถึง 56.67 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในพื้นที่ทดสอบ

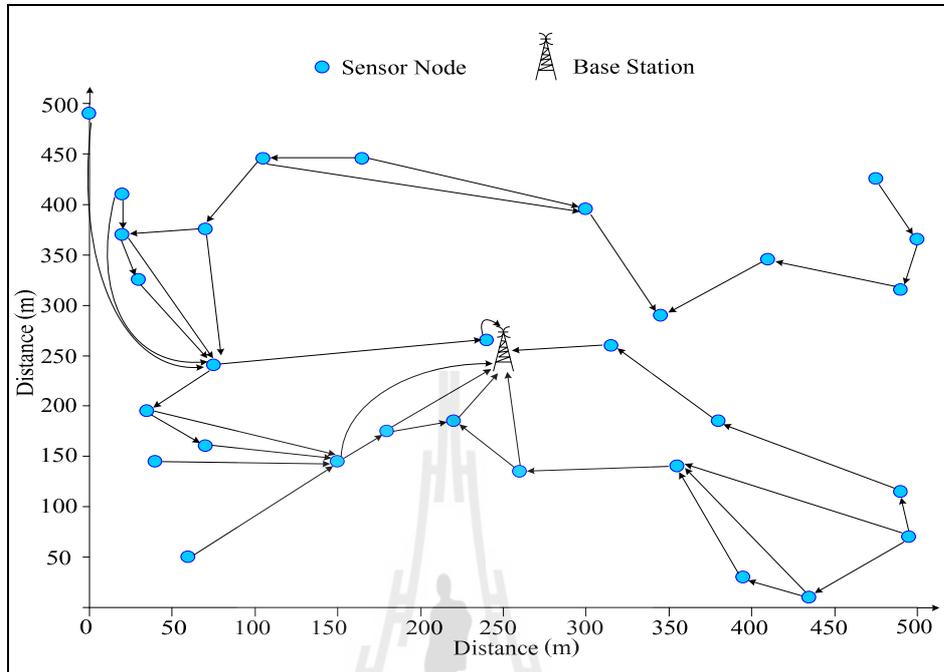
การทดลองที่	จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้ง
1	0
2	17
3	16
4	13

ตารางที่ 4.3 การใช้พลังงานในเครือข่าย

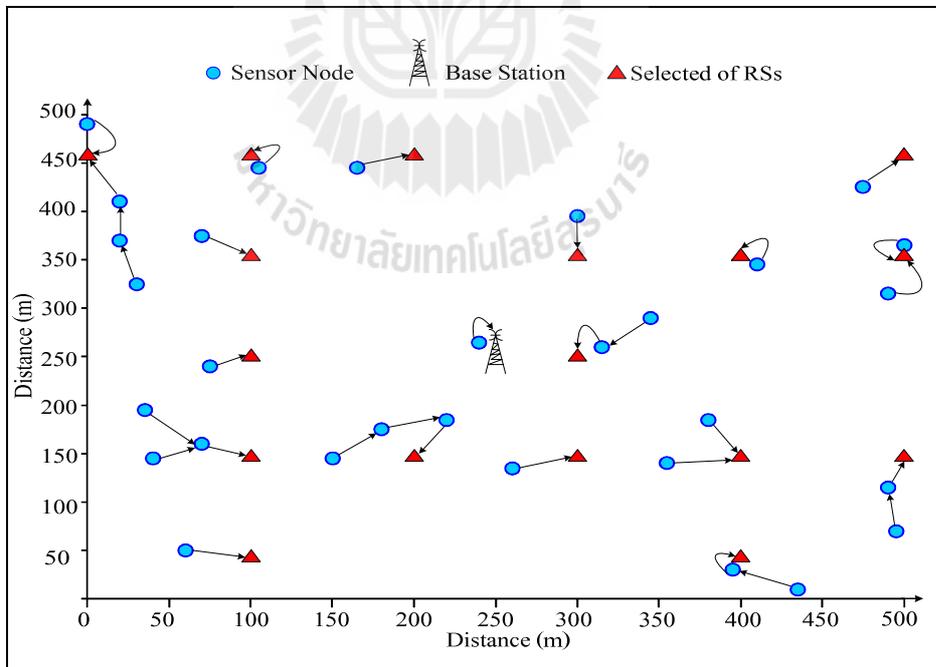
การทดลองที่	พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล)	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่โนคตรวจรู้แต่ละ โนค ใช้ไป (จูล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	47763.446	1592.115	682.139
2	566.598	18.886	17.921
3	837.257	27.909	25.359
4	1483.274	49.442	23.851

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของพลังงาน โนคตรวจรู้แต่ละ โนคที่เหลืออยู่ พลังงานที่เหลือมากที่สุดและน้อยที่สุดของ โนคตรวจรู้ เปอร์เซ็นต์ของจำนวน โนคตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล

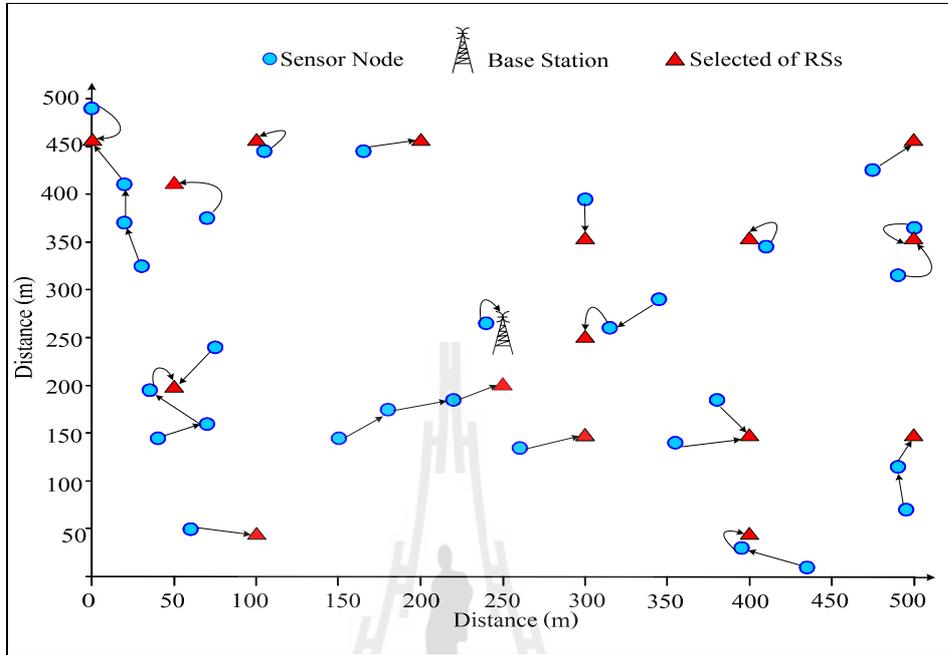
การทดลองที่	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลือของโนคตรวจรู้แต่ละ โนค (จูล)	พลังงานที่คงเหลือสูงสุด (จูล)	พลังงานที่คงเหลือน้อยที่สุด (จูล)	% โนคตรวจรู้ที่มีพลังงานเหลือน้อยกว่า 1 จูล
1	407.885	1999.16	0.000001	56.67
2	1981.56	1999.98	1927.83	0
3	1981.11	1999.98	1927.80	0
4	1972.09	1999.99	1910.73	0



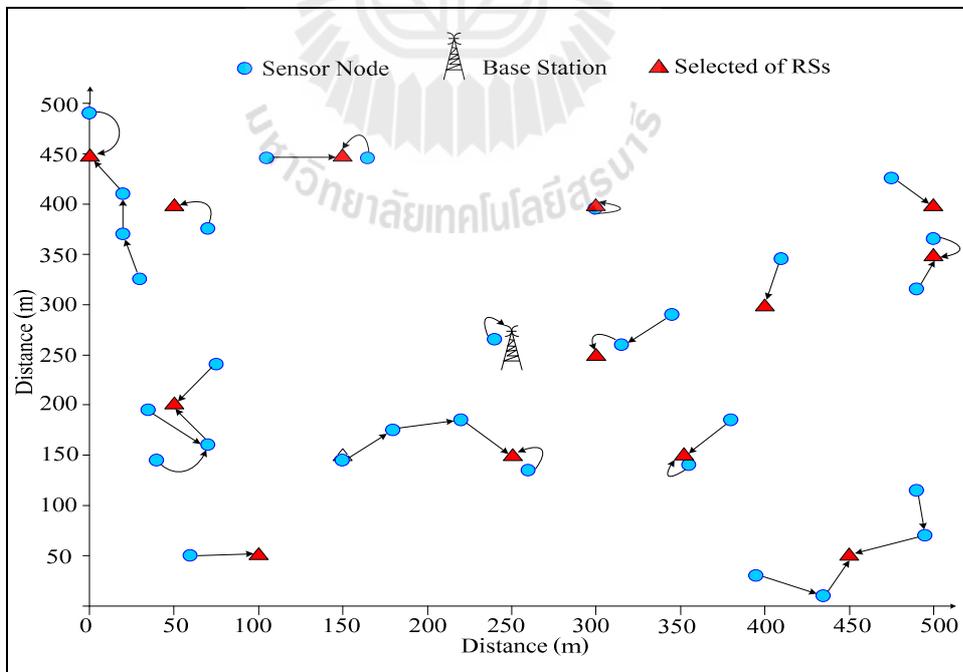
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองที่ 1 - เครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองที่ 2 - เครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 17 สถานี



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองที่ 3 - เครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 16 สถานี



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองที่ 4 - เครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอด 13 สถานี

4.2 การศึกษาผลกระทบของจำนวนโนดตรวจรู้ที่ใช้ในเครือข่าย

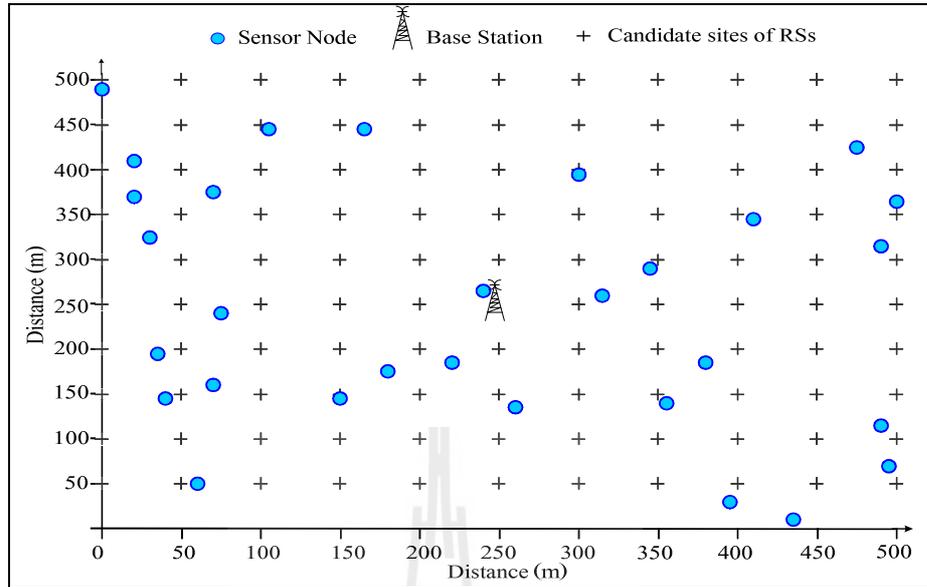
หัวข้อนี้ได้ทดลองใช้สมการคณิตศาสตร์แบบ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับ ปัญหาการติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด (RS placement and assignment problem: RPAP) สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (ดูรายละเอียดที่หัวข้อ 3.2.2) โดยในหัวข้อนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่าย ต่อการออกแบบติดตั้งสถานีถ่ายทอด และการใช้พลังงานในเครือข่าย โดยหัวข้อ 4.2.1 ได้อธิบายพารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง หัวข้อ 4.2.2 แสดงผลการออกแบบและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของโนดในเครือข่าย และหัวข้อ 4.2.3 เป็นการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

4.2.1 พารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่เครือข่ายที่ใช้ในการทดลอง

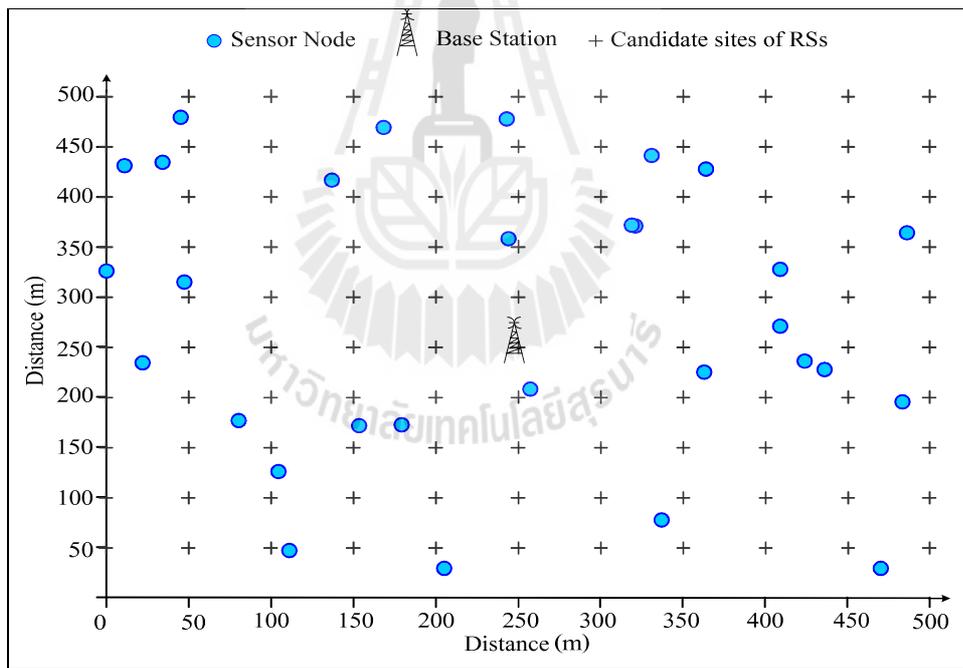
การทดลองนี้ใช้พื้นที่ทดสอบขนาด 500x500 ตารางเมตร โดยมีสถานีฐาน 1 สถานี และตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้จำนวน 110 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9

เราได้ทำการการออกแบบติดตั้งสถานีถ่ายทอด 3 กรณี คือ กรณีที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30, 50 และ 80 โนด ซึ่งในแต่ละกรณีได้มีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการสุ่มตำแหน่งของโนดตรวจรู้ใหม่ทุกครั้ง ด้วยลักษณะการกระจายตัวของตำแหน่งโนดตรวจรู้แบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ทดสอบ (uniform distribution) รูปที่ 4.9-4.17 แสดงตำแหน่งของโนดตรวจรู้ของการทดลองซ้ำ 3 ครั้งของแต่ละกรณี โดยจากผลการออกแบบ ได้มีการหาค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (พารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 4.1)

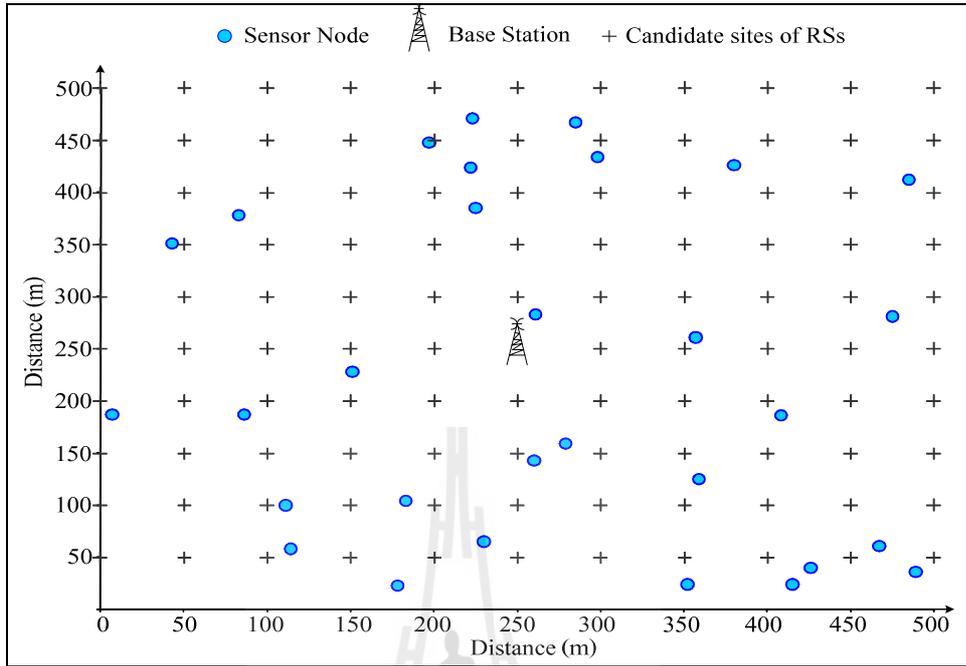
ในการทดลองนี้ การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย แต่ละกรณี ทำโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX ที่มีการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB



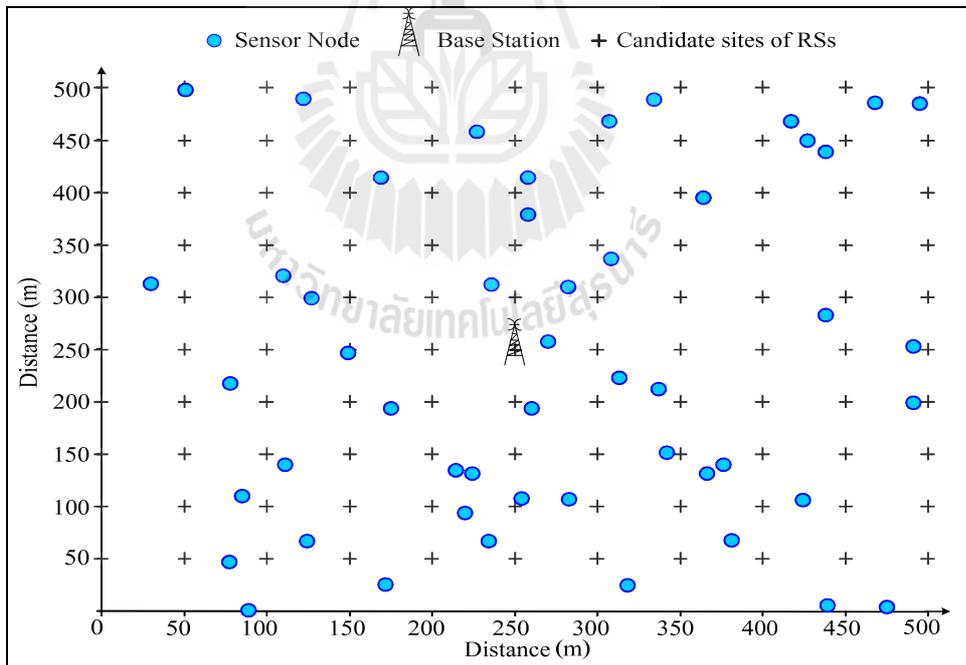
รูปที่ 4.9 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โหนด (ครั้งที่ 1)



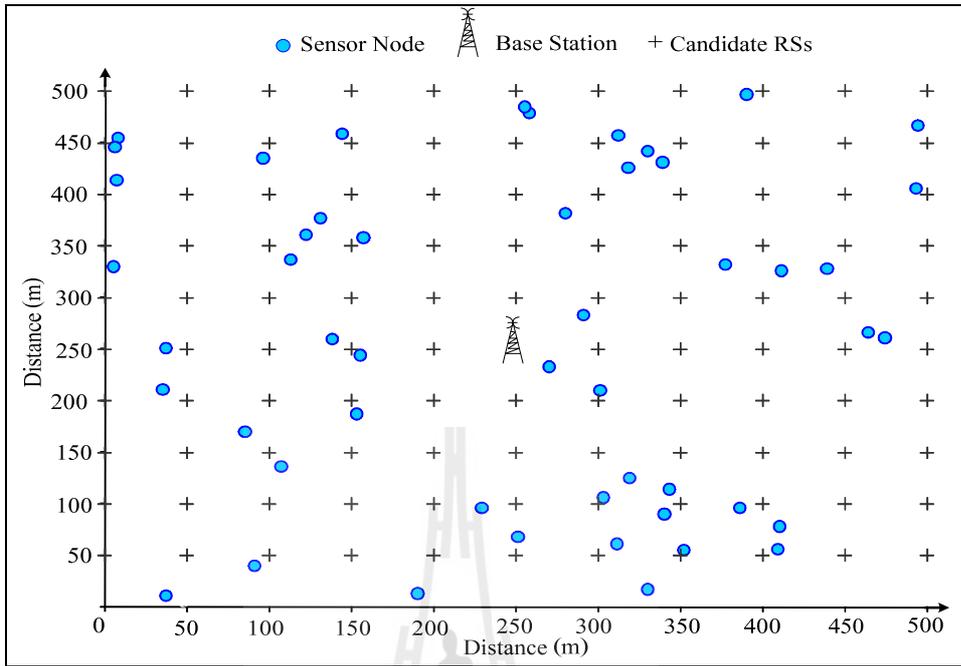
รูปที่ 4.10 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โหนด (ครั้งที่ 2)



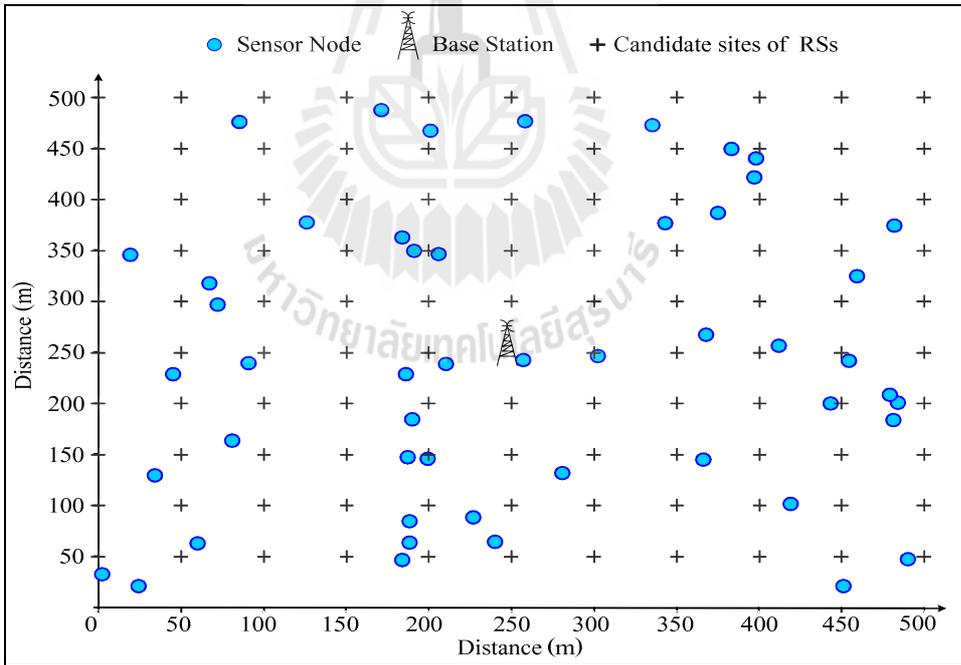
รูปที่ 4.11 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โหนด (ครั้งที่ 3)



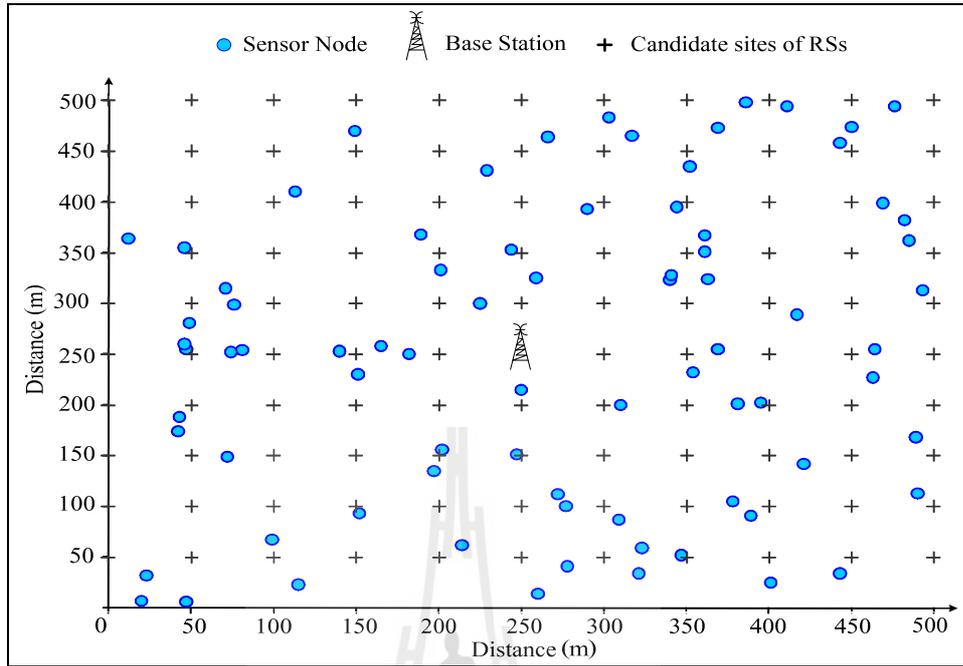
รูปที่ 4.12 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 50 โหนด (ครั้งที่ 1)



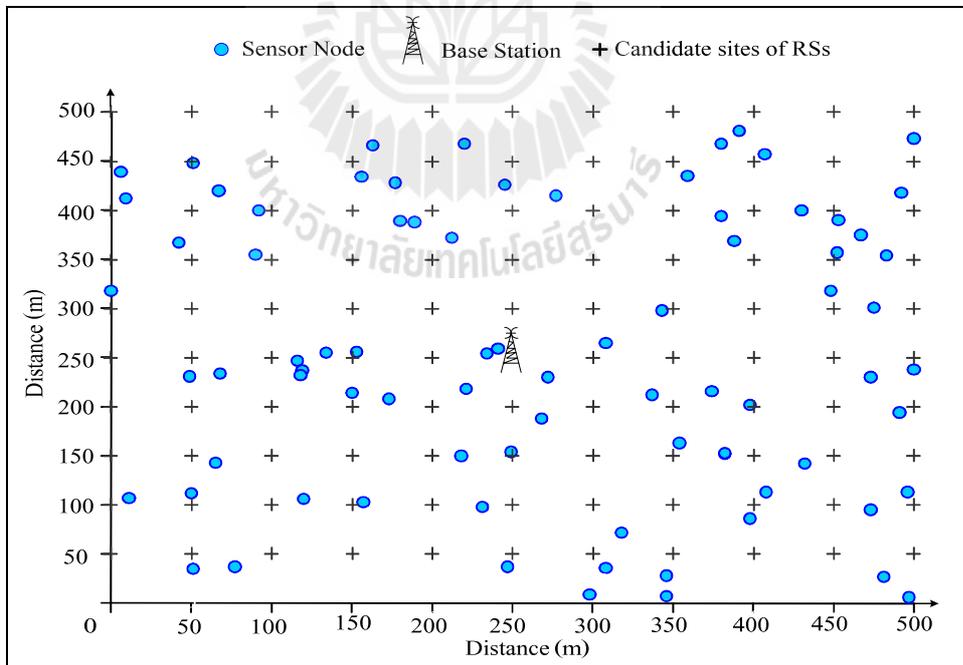
รูปที่ 4.13 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 50 โหนด (ครั้งที่ 2)



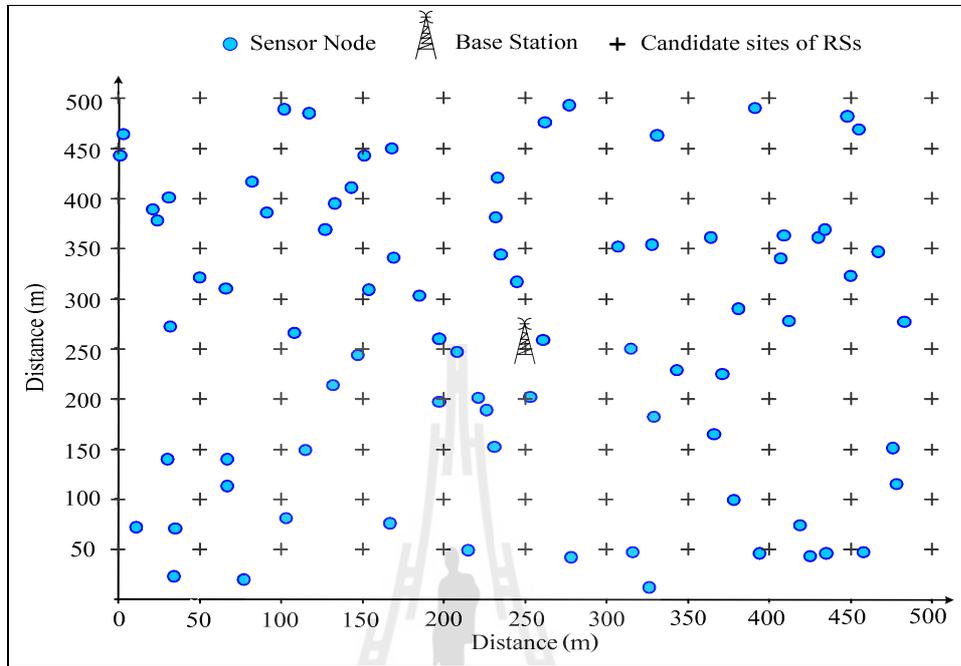
รูปที่ 4.14 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 50 โหนด (ครั้งที่ 3)



รูปที่ 4.15 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 80 โหนด (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.16 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 80 โหนด (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.17 กรณีที่มีจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย 80 โหนด (ครั้งที่ 3)



4.2.2 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

ตารางที่ 4.5 แสดงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในแต่ละกรณีซึ่งมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะเห็นว่าผลของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มการใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่โนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายได้สร้างขึ้นและเพื่อเป็นการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ากรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โนด สำหรับการทดลองออกแบบครั้งที่ 1 ได้มีการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากกว่ากรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โนด จึงกล่าวได้ว่าการออกแบบติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวน โนดตรวจรู้ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายด้วย

ตารางที่ 4.5 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายของการทดลองหัวข้อ 4.2

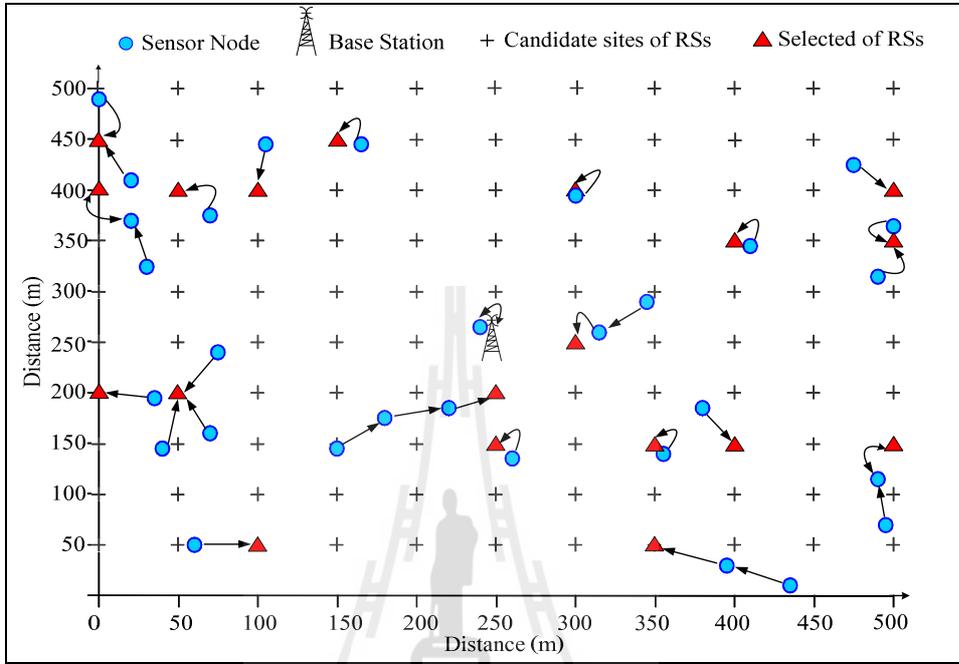
จำนวน โนดตรวจรู้	จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้ง		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
30 โนด	19	19	17
50 โนด	29	22	22
80 โนด	25	27	27

รูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงผลการออกแบบติดตั้งสถานีถ่ายทอดในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 และ 50 โนด ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้มากขึ้น จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่ายจะเพิ่มขึ้น

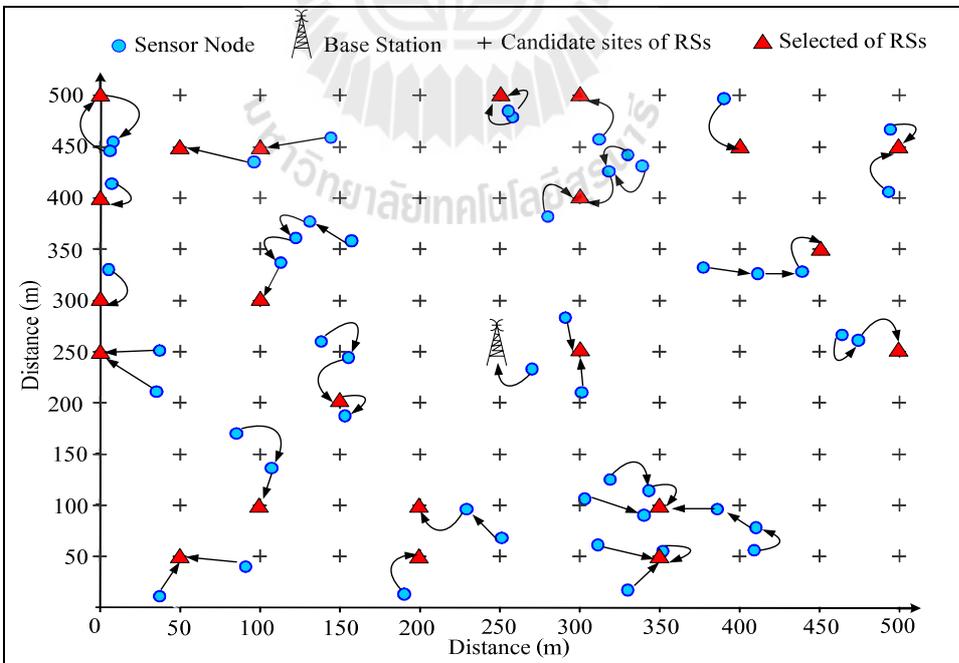
ตารางที่ 4.6 แสดงสรุปพลังงานรวมทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ทุกโนดในเครือข่ายใช้ไปตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย รวมถึงพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละ โนดใช้ไป และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งจะเห็นว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้เท่ากัน จะมีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ต่างกัน แต่ก็มีการใช้พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่ายมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อมีการเพิ่มจำนวนโนดตรวจรู้จะพบว่ามีการใช้พลังงานภายในเครือข่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการรับและส่งข้อมูลผ่าน โนดตรวจรู้มากขึ้น

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 3 ครั้งของพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไปและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะเห็นว่าในการทดลองที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด จะมีการใช้พลังงานทั้งหมดน้อยกว่ากรณีที่ที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 และ 80 โนด โดย

เครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 80 โหนด เป็นกรณีที่มีการใช้พลังงานมากที่สุด และพลังงานเฉลี่ยที่โหนดแต่ละตัวใช้ไปนั้นก็มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.18 การติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 30 โหนด



รูปที่ 4.19 การติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 50 โหนด

ตารางที่ 4.6 พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละตัวใช้ไปและ
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จำนวน โหนด ตรวจรู้	พลังงานทั้งหมดที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล) (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			พลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้แต่ละ โนดใช้ไป (จูล)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
30 โหนด	557.72 (17.86)	529.91 (16.95)	468.52 (14.36)	18.59	17.66	15.62
50 โหนด	787.97 (15.89)	984.65 (22.76)	970.97 (24.02)	15.76	19.69	19.42
80 โหนด	2,198.48 (33.54)	2,355.32 (43.741)	1,920.82 (33.52)	27.48	29.44	24.01

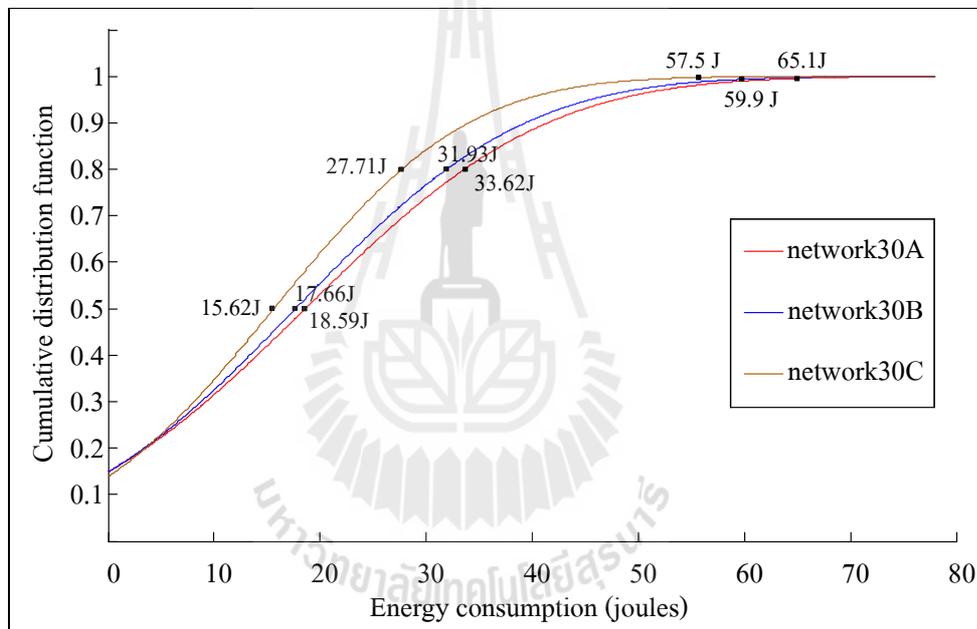
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จำนวน โหนด ตรวจรู้	พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล) (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	พลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ที่ใช้ (จูล) (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
30 โหนด	518.72 (45.64)	17.29 (1.52)
50 โหนด	914.53 (109.82)	18.29 (2.19)
80 โหนด	2,158.21 (220.03)	26.98 (2.75)

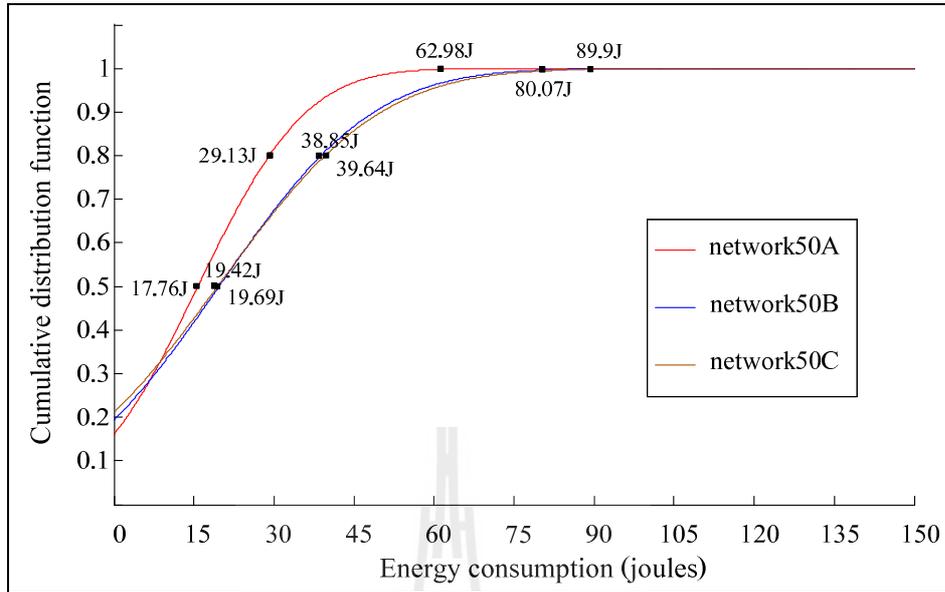
รูปที่ 4.20-4.22 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมในการเปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้
ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ตามลำดับ โดยกราฟแต่ละรูปแสดงค่าของฟังก์ชันแจกแจง
สะสมของพลังงานที่ใช้ไปในเครือข่ายที่มีขนาดเท่ากัน เช่น จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีขนาด
เท่ากัน 30 โหนด แต่ตำแหน่งของโนดตรวจรู้เปลี่ยนไป (ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.11) พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไป
ของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากโนดตรวจรู้ทำการส่งข้อมูลไปสถานีฐาน

โดยตรงหรือส่งให้กับโนคตรวจรู้ข้างเคียงหรือส่งให้กับสถานีถ่ายทอด ซึ่งค่าเฉลี่ยพลังงานของโนคตรวจรู้ขึ้นอยู่กับจำนวนโนคตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่าย

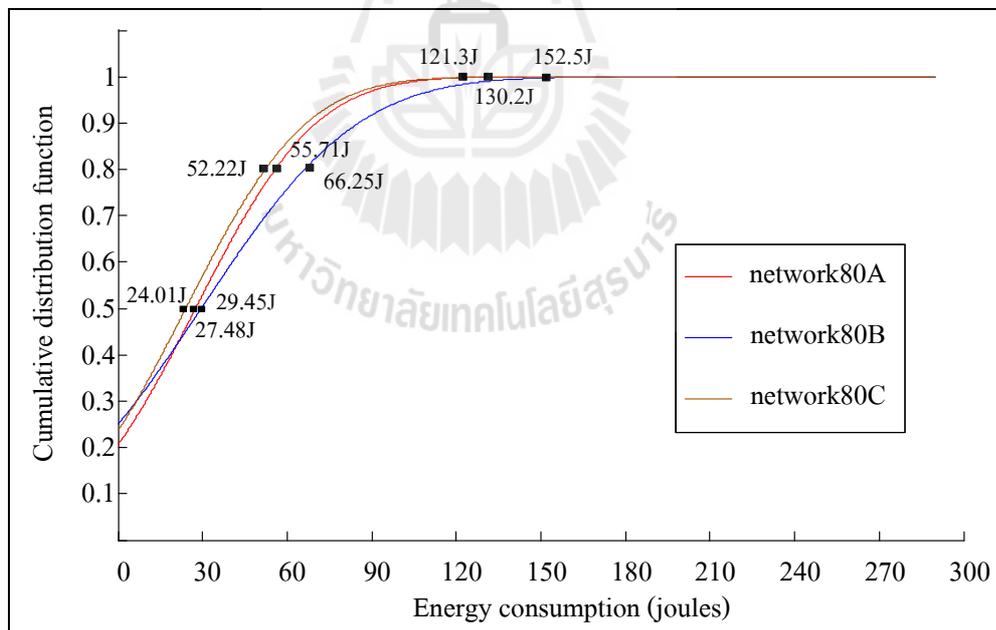
จากรูปที่ 4.23 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมในการเปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายที่มีขนาดต่างกัน พิจารณาเครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 30 โนคจะเห็นว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโนคตรวจรู้มีการใช้พลังงานต่ำกว่า 32 จูล เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานของ 80 เปอร์เซ็นต์ของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายขนาด 50 และ 80 โนค โดยมีการใช้พลังงาน 39 จูลและ 66 จูล ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อขนาดของเครือข่ายใหญ่ขึ้นจะมีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่จะมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนคตรวจรู้มากกว่าเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก



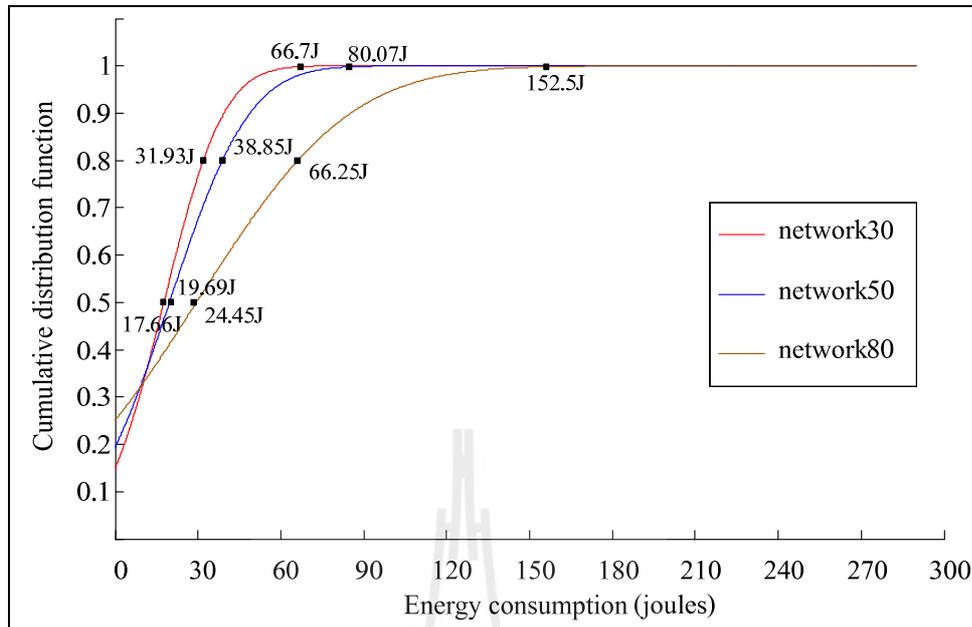
รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไป
กรณีเครือข่ายมีโนคตรวจรู้ 30 โนค (ผลจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)



รูปที่ 4.21 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไป
กรณีเครือข่ายมีโนดตรวจรู้ 50 โนด (ผลจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)



รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนดตรวจรู้ใช้ไป
กรณีเครือข่ายมีโนดตรวจรู้ 80 โนด (ผลจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)



รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไป

4.2.3 การวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ที่ต่างกัน 3 ขนาดคือ เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 30, 50 และ 80 โนค โดยแต่ละกรณีได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งในแต่ละครั้งตำแหน่งของโนคตรวจรู้จะเปลี่ยนไป โดยใช้วิธีการสุ่มตำแหน่งแบบที่มีการกระจายสม่ำเสมอ (uniform distribution)

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่ามากขึ้นเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้มากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากจำนวนโนคตรวจรู้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องหาคำตอบมีจำนวนมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการทดลองซ้ำแต่ละครั้งของกรณีที่มีโนคตรวจรู้จำนวนหนึ่งๆ จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ที่ต่างกัน

จำนวน โนคตรวจรู้	เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (วินาที)			เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
30 โนค	7.51	7.00	7.29	7.27
50 โนค	10.75	11.00	11.03	10.93
80 โนค	20.31	16.50	21.03	19.28

4.3 การวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันต่อผลของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดและ การใช้พลังงานในเครือข่าย

หัวข้อนี้นำเสนอการทดลองที่มีการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลต่อการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย และได้ทำการวิเคราะห์ผลของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดต่อการ ใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ โดยได้เปรียบเทียบการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 แบบได้แก่ ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด (RPAP ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นการใช้พลังงานเครือข่ายน้อยที่สุด (MERP ดังแสดงรายละเอียดใน หัวข้อ 3.2.3) และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นให้ได้อายุการทำงานเครือข่ายนานที่สุด (Maximize the network Lifetime Problem: MLP) โดยที่ MLP เป็นแนวทางที่นำเสนอในงานวิจัย Shi et al., 2009 [1] ซึ่งเป็นแนวทางที่ไม่ได้ใช้สถานีถ่ายทอดในเครือข่าย

สำหรับแนวทาง MERP เราได้พิจารณาใน 2 รูปแบบ คือ MERP1 และ MERP2 โดยที่ MERP1 มี วัตถุประสงค์เพื่อให้การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายน้อยที่สุด เพื่อให้เครือข่ายมีอายุการทำงาน ได้ตามที่กำหนด ส่วน MERP2 นั้นมีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อให้การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ใน เครือข่ายน้อยที่สุด แต่ต่างกับ MERP1 คือมีการพิจารณาข้อจำกัดเรื่องงบประมาณเครือข่าย โดยใช้ เงื่อนไขเพิ่มคือการจำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งในเครือข่าย

เนื้อหาต่อจากนี้ หัวข้อ 4.3.1 กล่าวถึงพารามิเตอร์และอธิบายการทดลอง หัวข้อ 4.3.2 แสดงการ วิเคราะห์ผลการใช้พลังงานในแต่ละกรณี และหัวข้อ 4.3.3 แสดงการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

4.3.1 พารามิเตอร์และอธิบายการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายภายในพื้นที่ขนาด 500x500 ตาราง เมตร โดยได้พิจารณาเครือข่ายที่ต่างกัน 3 ขนาด เหมือนในการทดลองหัวข้อ 4.2 คือเครือข่ายที่ ประกอบด้วยโนดตรวจรู้ 30, 50 และ 80 โหนด ซึ่งในแต่ละกรณีได้มีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการชুম ตำแหน่งของโนดตรวจรู้ใหม่ทุกครั้ง รูปที่ 4.9-4.17 แสดงตำแหน่งของโนดตรวจรู้ของการทดลองซ้ำ 3 ครั้งของแต่ละกรณี ซึ่งผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อถัดไป ได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (พารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 4.1)

ในขั้นแรกได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP ในการหาอายุการทำงานเครือข่ายที่นานที่สุดสำหรับ เครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โหนด โดยคำนึงถึงเงื่อนไขของพลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ แบตเตอรี่ที่ใช้ และในการทดลองนี้ได้กำหนดให้โนดตรวจรู้ทุกโหนดใช้แบตเตอรี่ที่มีพลังงาน 61,560 จูล

ซึ่งได้จากการใช้แบตเตอรี่ AA 4 ก้อน ที่จ่ายกระแสขนาด 0.1 แอมป์ในช่วงเวลา 105 วินาที ผลปรากฏว่าได้อายุเครือข่าย 13,825 วินาที

จากนั้นได้ใช้อายุเครือข่ายดังกล่าวเป็นข้อกำหนดอายุการทำงานของเครือข่ายที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกแบบติดตั้งสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายด้วยการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP, MERP1 และ MERP2 ซึ่งการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการติดตั้งสถานีถ่ายทอดทำโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX ที่มีการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB

4.3.2 การวิเคราะห์ผลการใช้พลังงาน

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายและพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ไปในการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP RPAP MERP1 และ MERP2 สำหรับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ตามลำดับ จะเห็นว่าผลของการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP มีการใช้พลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่นๆ และสำหรับการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP โหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานน้อยกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP เนื่องจากการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP ไม่มีการใช้สถานีถ่ายทอด ในการรับและส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานต้องทำการรับและส่งผ่านโหนดตรวจรู้ตัวอื่นๆ จึงทำให้ต้องใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้มาก จากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 จะสังเกตเห็นว่ามีการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้น้อยที่สุด เนื่องมาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดมากที่สุดสำหรับการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 ในการออกแบบเครือข่ายพบว่าพลังงานรวมที่ใช้ในเครือข่ายสูงกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ RPAP กับ MERP2 จะเห็นว่าผลการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 สามารถปรับปรุงผลกระทบของการใช้พลังงานในเครือข่ายได้ โดยใช้จำนวนของสถานีถ่ายทอดเท่ากัน เพราะว่า MERP2 มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้พลังงานภายในเครือข่ายให้น้อยที่สุด ส่วน RPAP มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการลงทุนในด้านการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.10 แสดงการใช้พลังงานสูงสุดและต่ำสุดของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายที่มีขนาดต่างกัน จะเห็นว่าผลของการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP การใช้พลังงานสูงสุดและต่ำสุด มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการออกแบบเครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่นๆ โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 มีการใช้พลังงานน้อยที่สุดในส่วนของพลังงานสูงสุดและต่ำสุด และเมื่อเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP และ MERP2 จะเห็นว่าผลการออกแบบ

เครือข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 โหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานค่าน้อยกว่า RPAP ถึงแม้ว่าจะใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากัน

ตารางที่ 4.11 แสดงพลังงานเฉลี่ยของโหนดตรวจรู้และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะเห็นว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MLP มีการใช้พลังงานเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่สุด แต่สำหรับเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 มีการใช้พลังงานเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.9 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้ง และพลังงานรวมที่ใช้ในเครือข่าย

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย	พลังงานรวมที่โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้ไป (จูล)
เครือข่ายขนาด 30 โหนด	MLP	-	1,514,307
	RPAP	16	12,621
	MERP1	27	3,628
	MERP2	16	7,254
เครือข่ายขนาด 50 โหนด	MLP	-	2,748,142
	RPAP	17	27,014
	MERP1	37	5,865
	MERP2	17	15,405
เครือข่ายขนาด 80 โหนด	MLP	-	3,295,265
	RPAP	17	75,661
	MERP1	59	9,099
	MERP2	17	26,575

ตารางที่ 4.10 พลังงานสูงสุดและต่ำสุดของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่าย

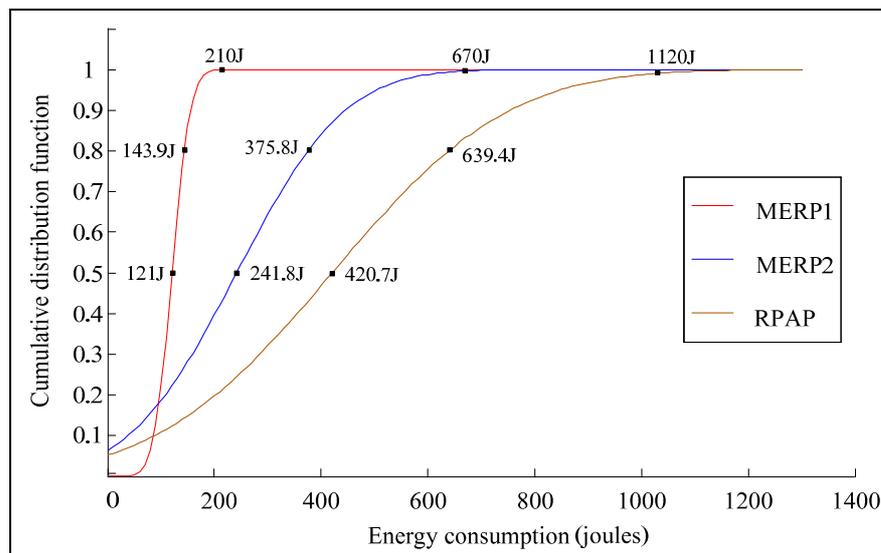
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		พลังงานสูงสุดที่โนดตรวจรู้ ในเครือข่ายใช้ไป (จูล)	พลังงานต่ำสุดที่โนดตรวจรู้ ในเครือข่ายใช้ไป (จูล)
เครือข่ายขนาด 30 โหนด	MLP	61,560	329
	RPAP	1,185	82
	MERP1	180	84
	MERP2	697	84
เครือข่ายขนาด 50 โหนด	MLP	61,560	68
	RPAP	2611	83
	MERP1	379	83
	MERP2	1,185	83
เครือข่ายขนาด 80 โหนด	MLP	61,560	186
	RPAP	8,341	82
	MERP1	413	82
	MERP2	1400	83

ตารางที่ 4.11 พลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ที่ใช้ไปในเครือข่ายและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

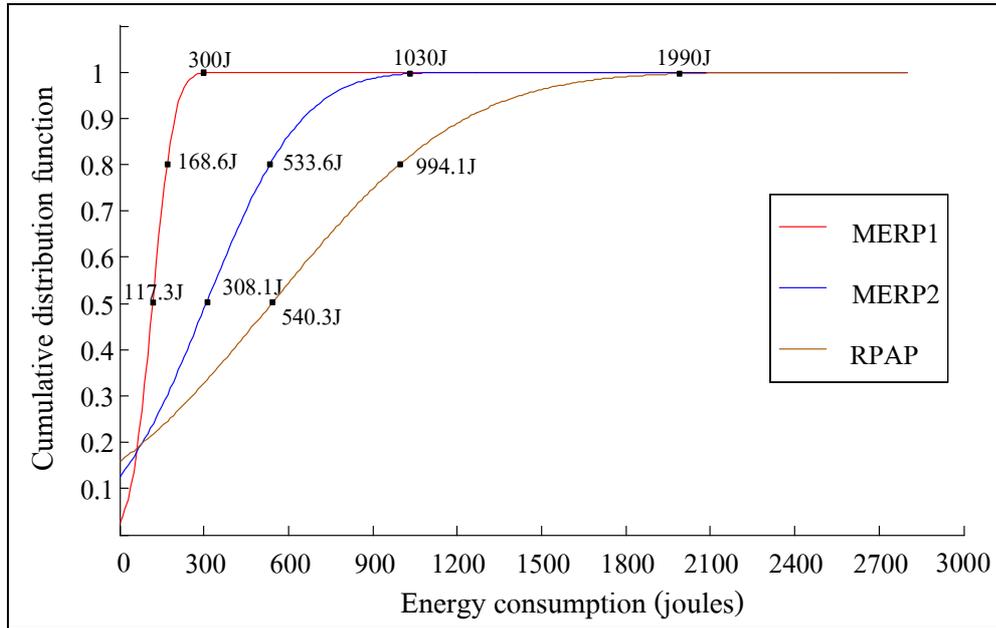
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปใน เครือข่าย (จุด)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ พลังงาน (จุด)
เครือข่ายขนาด 30 โหนด	MLP	50,476	20,902
	RPAP	420	259
	MERP1	120	26
	MERP2	241	159
เครือข่ายขนาด 50 โหนด	MLP	54,962	16,722
	RPAP	540	539
	MERP1	117	60
	MERP2	308	267
เครือข่ายขนาด 80 โหนด	MLP	41,190	212,105
	RPAP	945	1,359
	MERP1	113	50
	MERP2	332	288



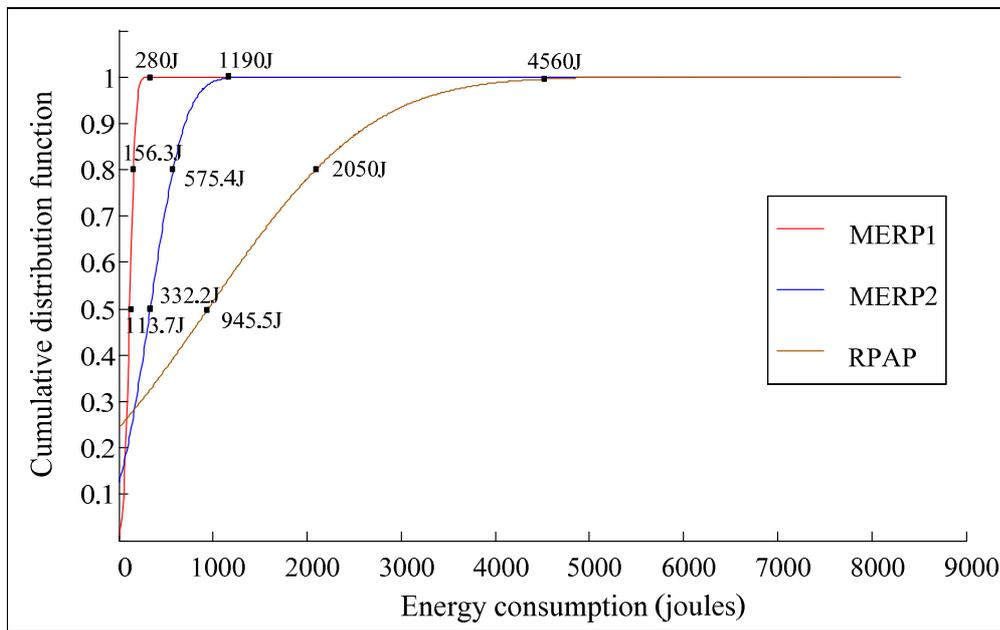
รูปที่ 4.24-4.26 แสดงผลกระทบของการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ในการออกแบบเครื่องข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 30, 50 และ 80 โนค ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.24 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครื่องข่ายขนาด 30 โนค จะเห็นว่าเครื่องข่ายที่ออกแบบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP มีการใช้พลังงาน ของโนคตรวจรู้สูงสุด โดยที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของโนคตรวจรู้ในเครื่องข่ายใช้พลังงานมากถึง 639.4 จูลต่อโนค เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบเครื่องข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 และ MERP2 จะเห็นว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโนคตรวจรู้ในเครื่องข่ายใช้พลังงาน 143.9 และ 375.8 จูล ตามลำดับ เนื่องจากว่า RPAP มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุด ภายใต้งบประมาณพลังงานของโนคตรวจรู้ต้องเพียงพอตลอดอายุการใช้งานที่กำหนด สำหรับ MERP1 มีวัตถุประสงค์เพื่อให้การใช้พลังงานในเครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายน้อยที่สุด ซึ่งสังเกตได้ว่าการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมาก สำหรับ MERP2 มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานในเครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายให้น้อยที่สุด โดยใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเท่ากับผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP จะเห็นว่า การออกแบบเครื่องข่ายโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 มีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ น้อยกว่าการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP รูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครื่องข่ายขนาด 50 และ 80 โนค ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มการใช้พลังงานในลักษณะเดียวกับกรณีเครื่องข่ายขนาด 30 โนค กล่าวคือ RPAP มีการใช้พลังงานสูงที่สุด และ MERP1 มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด



รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครื่องข่ายขนาด 30 โนค



รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 50 โนค



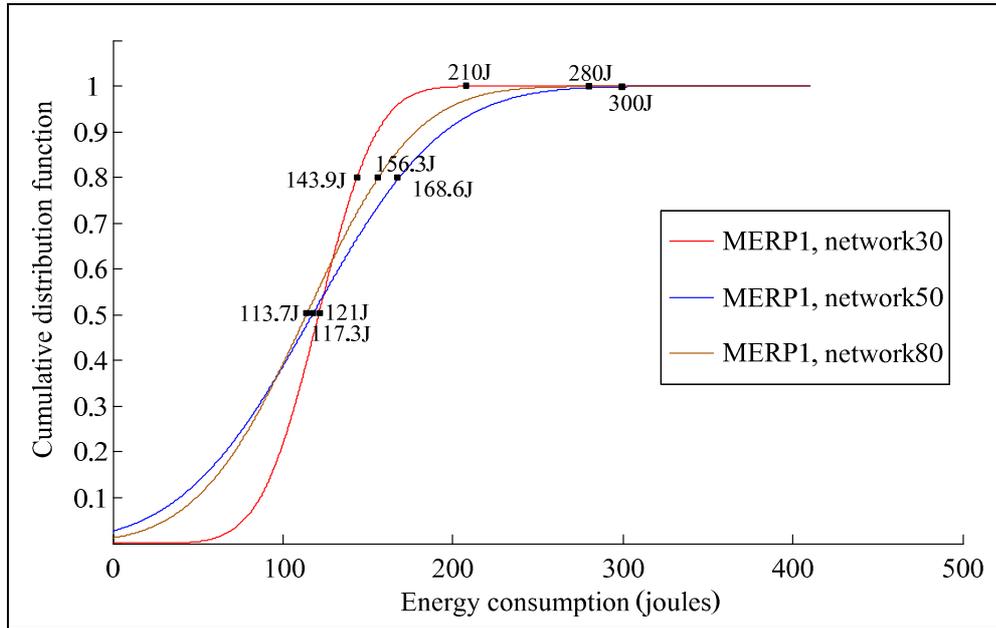
รูปที่ 4.26 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 80 โนค

รูปที่ 4.27-4.29 แสดงผลกระทบของจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายต่อการใช้พลังงานเมื่อการออกแบบเครือข่ายใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1, MERP2 และ RPAP โดยรูปดังกล่าวเป็นกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 จำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณการใช้พลังงานในเครือข่ายเล็กน้อย ในขณะที่กรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP จำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณการใช้พลังงานในเครือข่ายมากกว่า

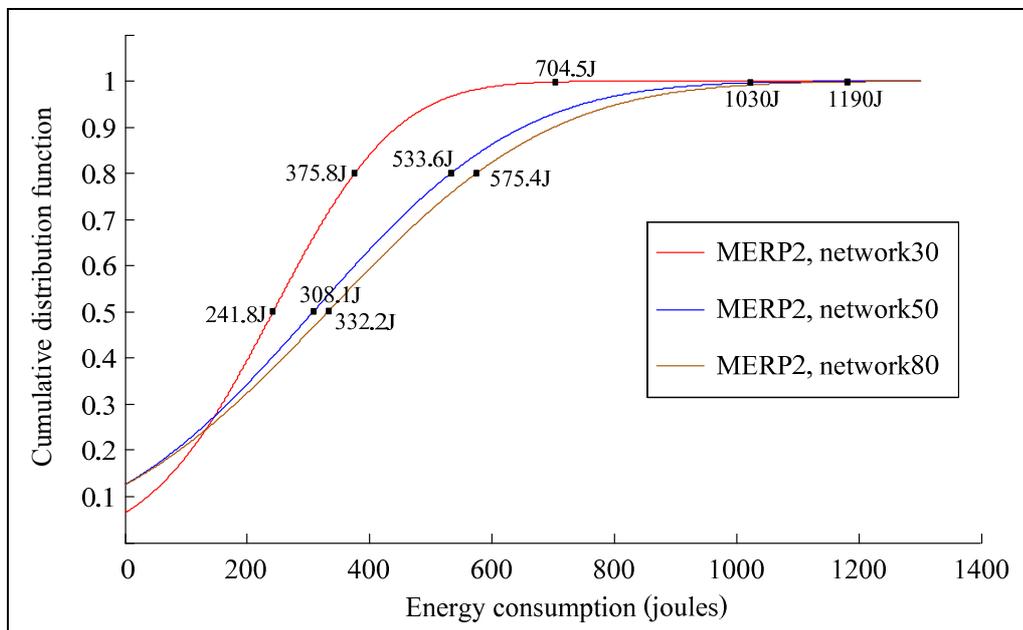
รูปที่ 4.27 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 ในการออกแบบเครือข่าย เราจะเห็นว่าการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายขนาด 30, 50 และ 80 โนค ไม่ต่างกันมากนัก สาเหตุเนื่องจากวัตถุประสงค์ MERP1 ทำให้เกิดการใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยการเพิ่มการติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย ซึ่งในกรณี MERP1 ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้ ดังนั้นการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายจึงลดลงได้จากการชดเชยด้วยการติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เพิ่มขึ้น

สำหรับกรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 และ RPAP ในการออกแบบเครือข่าย รูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงให้เห็นผลกระทบของการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเมื่อจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้ ซึ่งอาจมีเหตุมาจากงบประมาณเครือข่ายที่จำกัด ดังนั้นในกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้มากๆ ก็จะมีการส่งข้อมูลผ่านโนคตรวจรู้ที่อยู่ระหว่างเส้นทางส่งข้อมูลไปให้สถานีฐาน ทำให้มีการใช้พลังงานในการรับและส่งผ่านข้อมูลมากขึ้น

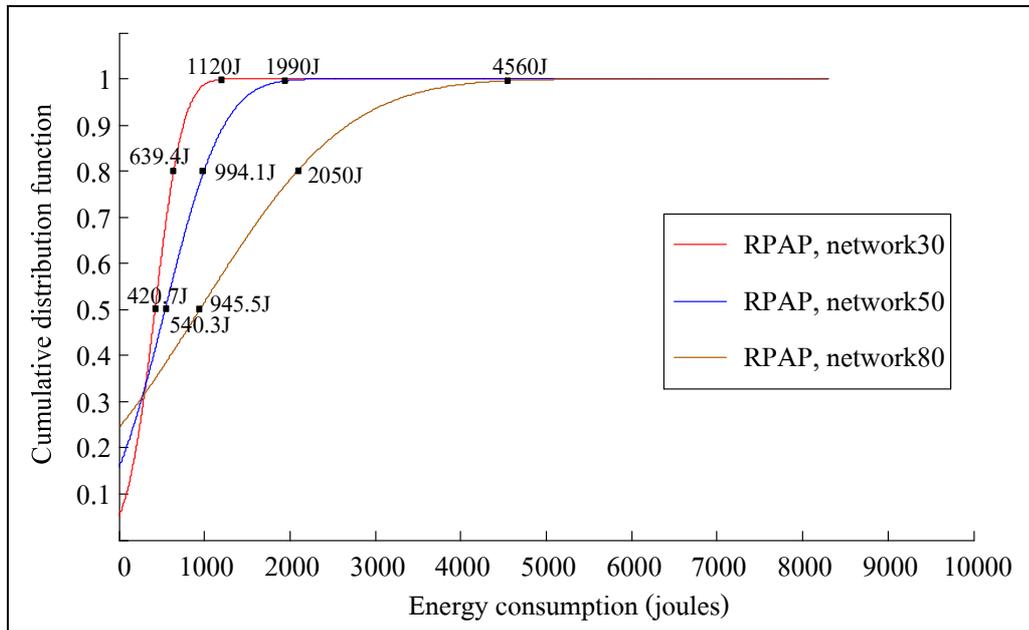
จากการทดลองและวิเคราะห์ผลในหัวข้อนี้พบว่า การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานรวมของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย โดยที่การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP1 ทำให้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด แต่ต้องทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมาก สำหรับการที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 มีการใช้พลังงานมากกว่า MERP1 แต่น้อยกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP โดยในการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 ได้มีการเพิ่มเงื่อนไขข้อจำกัดของการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งจะเห็นว่าการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 สามารถปรับปรุงคุณภาพของ RPAP ได้ ทำให้เราได้เครือข่ายที่มีการใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดและการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ที่มีประสิทธิภาพด้วย



รูปที่ 4.27 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายเมื่อใช้วิธี MERP1



รูปที่ 4.28 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายเมื่อใช้วิธี MERP2



รูปที่ 4.29 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานเฉลี่ยที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย
เมื่อใช้วิธี RPAP

4.3.3 การวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

ตารางที่ 4.12 แสดงเวลาที่โปรแกรม ILOG OPL IDE ใช้ในการหาคำตอบ เมื่อพิจารณาเครือข่าย 30 โหนด จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากขึ้น เมื่อพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ MERP2 จะเห็นว่าโปรแกรมจะใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ เพราะว่าได้มีเงื่อนไขที่จำกัดจำนวนสถานีถ่ายทอดให้เท่ากับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ RPAP โปรแกรมจึงต้องใช้เวลาในการหาคำตอบนานขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้เพิ่มเข้าไป

ตารางที่ 4.12 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีจำนวน โหนดตรวจรู้ที่ต่างกัน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์		เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
เครือข่ายขนาด 30 โหนด	RPAP	10.79 วินาที
	MERP1	7.31 วินาที
	MERP2	10 วินาที
เครือข่ายขนาด 50 โหนด	RPAP	16.53 วินาที
	MERP1	9.75 วินาที
	MERP2	27 นาที 5 วินาที
เครือข่ายขนาด 80 โหนด	RPAP	21.96 วินาที
	MERP1	17.14 วินาที
	MERP2	20 ชั่วโมง 45 นาที

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีหลักการเพื่อลดผลกระทบของการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโนดตรวจรู้ โดยได้กำหนดโครงสร้างการรับส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการใช้สถานีถ่ายทอด (Relay station: RS) ในเครือข่าย เพื่อให้ได้เครือข่ายที่มีอายุการใช้งานในระยะเวลาดำเนินการที่ต้องการ และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายน้อยที่สุด เพื่อให้การใช้งานเครือข่ายคุ้มค่าและได้ประโยชน์จากการลงทุนมากที่สุด

เทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนหนึ่งของระบบไร้สาย โดยได้นำเสนอวิธีการวางแผนติดตั้งและการจัดสรรสถานีถ่ายทอด (RS placement and assignment) สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยได้พัฒนาเทคนิคดังกล่าวในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) เพื่อกำหนดจำนวนและตำแหน่งในการติดตั้งสถานีฐานถ่ายทอดในเครือข่าย รวมถึงการกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ซึ่งสามารถส่งผ่านโนดตรวจรู้หรือผ่านสถานีถ่ายทอดหรือส่งให้สถานีฐานโดยตรงก็ได้ โดยมีหลักการเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโนดตรวจรู้ เพื่อให้มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทดลองที่ใช้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายภายใต้เงื่อนไขความจำกัดของพลังงานของโนดตรวจรู้ และได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานกับเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยแนวทางอื่น พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ทำให้ได้โครงสร้างเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานดีกว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีอื่น และจากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในการวางแผนและออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายพบว่า

- ในการออกแบบเครือข่าย เมื่อมีตำแหน่งให้เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมากขึ้น จะทำให้ผลคำตอบของการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งลดลง อย่างไรก็ตามการใช้จำนวนและตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มากจะทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่

- ในกรณีที่โนคตรวจรู้ในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลคำตอบของการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการรองรับปริมาณข้อมูลที่โนคตรวจรู้ภายในเครือข่ายได้สร้างขึ้นและเพื่อเป็นการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งานของเครือข่าย อย่างไรก็ตามการออกแบบติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนโนคตรวจรู้ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่ยังคงขึ้นอยู่กับตำแหน่งการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ที่อยู่ภายในเครือข่ายด้วย
- เมื่อพิจารณาพลังงานเฉลี่ยที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายที่มีขนาดต่างกัน พบว่าเมื่อโนคตรวจรู้ในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น จะมีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้มากขึ้น เนื่องจากเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่จะมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างโนคตรวจรู้มากกว่าเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก
- เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่ามากขึ้นเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้มากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากจำนวนโนคตรวจรู้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องหาคำตอบมีจำนวนมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการทดลองซ้ำแต่ละครั้งของกรณีที่มีโนคตรวจรู้จำนวนหนึ่งๆ จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน
- การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจะส่งผลต่อการใช้พลังงานรวมของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย โดยที่การใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นให้มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด และมีข้อจำกัดของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้ (MERP2) สามารถปรับปรุงคุณภาพของการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นให้มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุด (RPAP) ได้ ทำให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบมีการติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เพียงพอ และมีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ที่มีประสิทธิภาพ

เทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับหน่วยงานที่ต้องทำการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งทำให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ไร้สายในเครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการทำงานของเครือข่ายได้นานตามที่ต้องการ นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาวิจัยที่มีความสนใจในเรื่องของปัญหาการออกแบบและวางแผนระบบเครือข่ายไร้สาย

ประเภทอื่นได้ แนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต สามารถพิจารณาใช้สมการคณิตศาสตร์แบบหลาย
วัตถุประสงค์ในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อที่จะ
สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานเครือข่ายได้อย่างคุ้มค่ากับการลงทุนยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Yi Shi, Y. Thomas Hou, Alon Efrat, “Algorithm design for a class of base station location problems in sensor networks,” *Wireless Networks*, vol.15, No.1, pp. 21-38, 2009.
- [2] A. P. Azad and A. Chockalingam, “Mobile Base Stations Placement and Energy Aware Routing in Wireless Sensor Networks”, *WCNC IEEE*, Vol. 1, pp. 264-269, 2006.
- [3] Jae-Hwan Chang, and Leandros Tassiulas, “Maximize Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks,” *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol.12, No.4, pp. 609-619 Aug 2004.
- [4] S. Narayanan and K. Bhaskar, “Maximizing Data Extraction in Energy-Limited sensor Networks,” in *Proc. of IEEE INFOCOM 3*, pp. 1717-1727, 2004.
- [5] W. Guo, X. Huang, W. Lou, and C. Liang, “On Relay Node Placement and Assignment for Two-tiered Wireless Networks,” *Mobile Network Application*, vol.13, No.1-2, pp.186-197, 2008.
- [6] Fadi M. Al-Turjman, Hossam S. Hassanein and Mohamed A. Ibnkahla, “Connectivity Optimization with Realistic Lifetime Constraints for Node Placement in Environmental Monitoring,” in *Proc. of IEEE 34th Conference on Local computer Networks (LCN 2009)*, pp. 617-624, 20-23 October 2009.
- [7] En-Jie Ding, Chao-Nan Wang, and Qiang Zhou, “Wireless Model and Deployment of Sensor Networks in the Mine,” in *Proc. of the International Conference on Information Acquisition*, No. 4295791, pp. 538-542, 9-11 July 2007.
- [8] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishman, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks,” in *Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 223, 2000.
- [9] A. Goldsmith, “*Wireless Communications*,” Markono Print Media Pte Ltd, Singapore, pp. 46-48, 2007.
- [10] MaxStream Incorporation, “IEEE 802.15.4 OEM RF Modules,” www.MaxStream.net, 12 July 2006.
- [11] Z. Bojkovic and B. Bakmaz, “A Survey on Wireless Sensor Networks Deployment”, *WSEAS Transactions on Communications*, Issue 12, Vol. 7, pp. 1172-1181, 2008.

- [12] T.J. Chan, C.M. Chen, Y.F. Huang, J.Y. Lin and T.R. Chen, "Optimal Cluster Number Selection in Ad-hoc Wireless Sensor Networks", WSEAS Transactions on Communications, Issue 8, Vol. 7, pp. 837-846, 2008.
- [13] A. Goldsmith, Wireless Communications, Markono Print Media Pte Ltd, Singapore, 2007.
- [14] J. Levendovszky, A. Bojarszky, B. Karlocai, and A. Olah "Energy Balancing by Combinatorial Optimization for Wireless Sensor Networks", WSEAS Transactions on Communications, Issue 2, Vol. 7, pp. 27-32, 2008.
- [15] B. Paul, M.A. Matin, M.J. Showkat and Z. Rahman, "Optimal Placement of Base Stations in a Two Tiered Wireless Sensor Network", WSEAS Transactions on Communications, Issue 1, Vol. 9, pp. 43-52, 2010.
- [16] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati, Wireless Sensor Networks, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [17] T. Zahariadis, H.C. Leligou, S. Voliotis, S. Maniatis, P. Trakadas, and P. Karkazis, "Energy-Aware Secure Routing for Large Wireless Sensor Networks", WSEAS Transactions on Communications, Issue 9, Vol. 8, pp. 981-991, 2009.

ภาคผนวก

ความซับซ้อนของปัญหา

ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด จากหัวข้อ 3.5 ได้ทำการศึกษาความซับซ้อนของปัญหาโดยพิจารณาจากจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาคำตอบ ซึ่งทำการออกแบบเครือข่ายภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 100 ตารางเมตร ประกอบด้วย โหนดตรวจรู้ 5 โหนด สถานีฐาน 1 สถานี และตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ 6 ตำแหน่ง โดยขนาดของปัญหาจะขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดตรวจรู้ (a) จำนวนสถานีฐาน (b) และจำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)

จากการออกแบบเครือข่ายนี้ $a=5$, $b=1$, $c=6$ โดยตัวแปรตัดสินใจที่เราต้องการหาคำตอบมีดังนี้ x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j s_{ik} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโหนดตรวจรู้ i ไปโหนดตรวจรู้ k ; $i, k \in I, i \neq k$ (bits) r_{ij} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโหนดตรวจรู้ i ไปสถานีถ่ายทอด j ; $j \in J$ (bits) b_{im} คือ ปริมาณข้อมูลที่ส่งจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน m ; $m \in M$ (bits) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$x_j; j = 6 = c$$

$$s_{ik}; i = k = a = 5 : a(a-1)$$

$$r_{ij}; i = a = 5, j = c = 6 : ac$$

$$b_{im}; i = a = 5, m = b = 1 : ab$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad y = c + a(a-1) + ac + ab$$

$$\text{จัดรูป} \quad y = a(a+b+c-1) + c$$

$$\text{แทนค่า} \quad y = 5(5+1+6-1) + 6 = 61$$

จากนั้นได้ทำการเพิ่มขนาดของปัญหาเพื่อศึกษาความซับซ้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งได้กำหนดจำนวนโหนดตรวจรู้ สถานีฐาน และจำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อขนาดของปัญหา (นั่นคือ a , b , c) เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นแต่ขนาดของตัวแปรตัดสินใจจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล จากการศึกษาจะให้เห็นว่าในการออกแบบเครือข่ายเราควรรนำสมการคณิตศาสตร์มาช่วยในการออกแบบ เนื่องจากเมื่อตัวแปรเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาคำตอบที่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ทุกประการ

ตารางที่ ก.1 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบเครือข่ายและจำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

โนดตรวจรู้(a)	สถานีฐาน(b)	จำนวนตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ (c)	จำนวนตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด (y)
5	1	6	61
5	3	6	71
5	1	10	85
50	1	6	2,806
50	3	6	2,906
50	6	10	3,260

ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1. C. Prommak and S. Modhirun, “Optimal Wireless Sensor Network Design for Efficient Energy Utilization”, Proc. of the 25th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), Mar 22-25, 2011, pp. 814-819.
2. C. Prommak and S. Modhirun, “Optimal Network Design for Efficient Energy Utilization in Wireless Sensor Networks”, Journal of Computer Science, vol. 8, no. 1, pp. 149-158, 2012.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตินา พรหมมาก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยม) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อ พ.ศ. 2535 ปริญญาโท (Telecommunication Engineering) จาก University of Colorado at Boulder เมื่อ ค.ศ. 1998 และปริญญาเอก (Telecommunication Engineering) จาก University of Pittsburgh เมื่อ ค.ศ. 2004 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเรื่อง Wireless network design, Optical network design, Network optimization และ Heuristic approaches for network design