

รหัสโครงการ SUT7-709-55-12-04



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบและวางแผนโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้
ไร้สายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครือข่าย
(Development of network design and planning techniques for wireless
sensor networks to improve energy consumption performance)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-709-55-12-04



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบและวางแผนโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้
ไร้สายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครือข่าย
(Development of network design and planning techniques for wireless
sensor networks to improve energy consumption performance)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตินา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

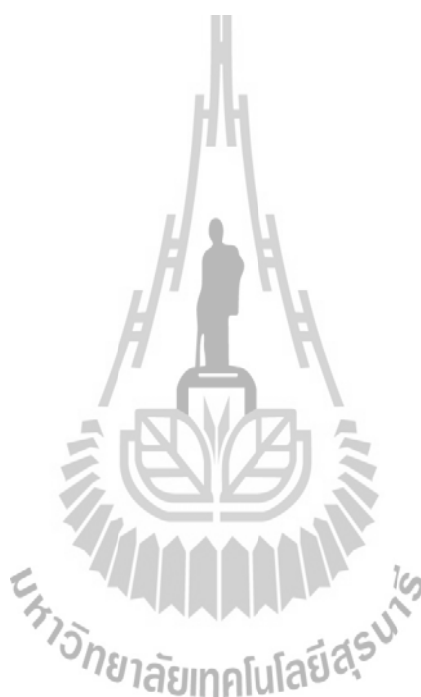
ตุลาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ และ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

ตุลาคม 2557



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบและวางแผนโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครือข่าย ทำให้เครือข่ายสามารถมีอายุการทำงานได้นานตามที่กำหนด โดยเทคนิคที่นำเสนอนี้ได้พัฒนาขึ้นในรูปของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming) แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple Objectives) ซึ่งวัตถุประสงค์ที่พิจารณาได้แก่ วัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด เนื่องจากงบประมาณในการสร้างเครือข่ายที่มีจำกัด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้แก่การพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ทำให้ได้เครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโนดในเครือข่าย โดยเทคนิคที่นำเสนอมุ่งเน้นการออกแบบเครือข่ายในส่วนของกำหนัดจำนวนและตำแหน่งในการติดตั้งสถานีฐานถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุดในเครือข่าย รวมถึงการกำหนัดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ซึ่งสามารถส่งผ่าน โนดตรวจรู้หรือผ่านสถานีถ่ายทอดหรือส่งให้สถานีฐานโดยตรงก็ได้ โดยมีหลักการเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของ โนดตรวจรู้ และสามารถรับประกันคุณภาพการสื่อสารข้อมูลระหว่าง โนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ทั้งนี้ยังสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่กำหนดด้วย

ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดให้กับปัญหาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่อยู่ในรูปของโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) และวิธีลำดับชั้น (Hierarchical method) จากการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีให้ลักษณะคำตอบในแนวเดียวกัน แต่วิธีลำดับชั้นสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก กล่าวคือสามารถหาคำตอบได้ทุกค่าของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย ทำให้สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างเครือข่ายได้ทุกกรณีของการใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ต่างกัน

Abstract

This research presents a study and development of network design and planning techniques for Wireless Sensor Networks (WSNs) to improve energy consumption performance. We model the proposed network design problems as Binary Integer Linear Programming using Multiple Objectives. The proposed model aims to not only minimize the energy consumption of sensor nodes in the network but also minimize the network cost of relay-station installation.

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. The proposed model can determine efficient number and location of relay stations. Moreover, suitable routes for delivering packets were also determined. The packets can be sent via sensor nodes or relay stations or sent directly to the base station.

Solution techniques for the proposed Binary Integer Linear Programming using Multiple Objectives problem apply two approaches including the weighted sum method and the hierarchical method. Numerical experiments demonstrate that both methods could yield efficient results. Specifically, the hierarchical method could produce more solutions than that of the weighted sum method. The hierarchical method could determine solutions for all number of relay stations to be installed in the network. As a result, the comparison and analysis could be conducted for all cases that use different number of relay stations.

สารบัญ

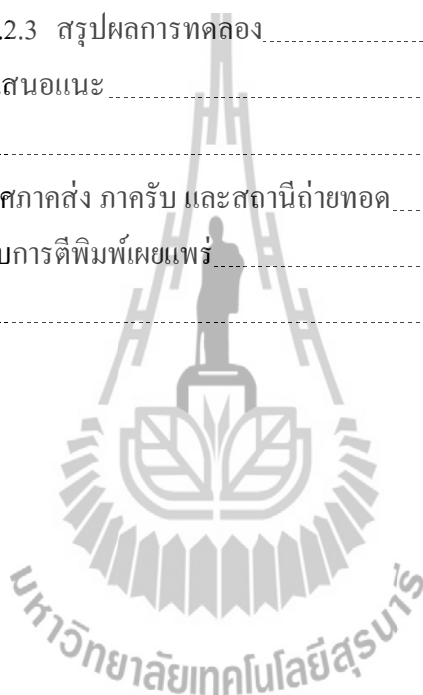
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	12
2.3.1 ส่วนประกอบของ โหนดตรวจรู้	14
2.3.2 โครงสร้างทางกายภาพของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	17
2.3.3 สถานีถ่ายทอด (Relay station : RS)	18
2.4 การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	21
2.5 แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path-loss model)	25
2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานของ โหนดตรวจรู้ (Energy consumption model)	27
2.6.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง	28
2.6.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ	29
2.6.3 การคำนวณค่าพลังงานตั้งต้นของ โหนดตรวจรู้ไร้สาย	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิต	30
2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary Integer Linear Programming : BILP).....	34
2.9 ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization).....	36
บทที่ 3 แนวคิดและวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ	
3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	39
3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว.....	40
3.3 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์.....	42
3.4 การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด.....	43
3.5 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียว.....	45
3.6 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์.....	49
3.7 การพัฒนาอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด.....	53
3.8 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี.....	56
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย	
4.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียว.....	61
4.1.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง.....	61
4.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	66
4.1.3 สรุปผลการทดลอง.....	72
4.2 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์.....	73
4.2.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	73
4.2.1.1 การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์.....	80
4.2.1.2 การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย.....	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธี ลำดับชั้น.....	86
4.2.2.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง	87
4.2.2.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	87
4.2.2.3 สรุปผลการทดลอง.....	93
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก ก. ข้อมูลสายอากาศภาคส่ง ภาครับ และสถานีถ่ายทอด.....	100
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	108
ประวัติผู้วิจัย.....	109



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองชั้นการทำงานของ Zigbee ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	13
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	14
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโนดในเครือข่ายประเภทที่ 1.....	17
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโนดในเครือข่ายประเภทที่ 2.....	18
รูปที่ 2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด.....	21
รูปที่ 2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้.....	28
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน.....	33
รูปที่ 3.1 การทำงานของโปรแกรมเชิงเส้นในปริมาตรประสงค์เดียว.....	41
รูปที่ 3.2 การทำงานของปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด.....	44
รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	56
รูปที่ 3.4 Data file editing area.....	57
รูปที่ 3.5 Setting file editing area.....	57
รูปที่ 4.1 เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โหนด.....	64
รูปที่ 4.2 เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โหนด.....	65
รูปที่ 4.3 เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โหนด.....	65
รูปที่ 4.4 เส้นทางการส่งข้อมูลที่ได้สำหรับในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โหนด.....	66
รูปที่ 4.5 เส้นทางการส่งข้อมูลที่ได้สำหรับในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โหนด.....	67
รูปที่ 4.6 เส้นทางการส่งข้อมูลที่ได้สำหรับในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โหนด.....	67
รูปที่ 4.7 พลังงานที่แจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 30 โหนด.....	70
รูปที่ 4.8 พลังงานที่แจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 50 โหนด.....	71
รูปที่ 4.9 พลังงานที่แจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 80 โหนด.....	71
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบพลังงานที่แจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย ขนาด 30 50 และ 80 โหนด.....	72

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	82
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	82
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	83
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 ในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	83
รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 30 โนด.....	84
รูปที่ 4.16 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 50 โนด.....	85
รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 80 โนด.....	85
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น.....	88
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น.....	89
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น.....	89
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น และวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	90
รูปที่ 4.22 เปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นในเครือข่ายขนาด 30 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น.....	122
รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นในเครือข่ายขนาด 50 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น.....	123
รูปที่ 4.24 เปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นในเครือข่ายขนาด 80 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น.....	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	26
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด.....	54
ตารางที่ 3.2 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการ โปรแกรมเชิงเส้น ไปนารีวัตถุประสงค์เดียวเป็น รูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	59
ตารางที่ 3.3 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการ โปรแกรมเชิงเส้น ไปนารีสองวัตถุประสงค์เป็น รูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	60
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างเครือข่าย.....	93
ตารางที่ 4.2 อัตราขยาย ราคา และ ระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาคส่ง.....	95
ตารางที่ 4.3 อัตราขยาย ราคา และ ระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาครับ.....	95
ตารางที่ 4.4 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้ง ในเครือข่ายจากหัวข้อที่ 4.1.....	100
ตารางที่ 4.5 พลังงานรวมที่ใช้ไปของ โหนดตรวจรู้ (ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน).....	100
ตารางที่ 4.6 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของ โหนดตรวจรู้ (ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน).....	100
ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง วัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โหนดตรวจรู้ 50 โหนด.....	109

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) เป็นการสื่อสารแบบไร้สายในระยะใกล้ระหว่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่มีขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา และใช้พลังงานต่ำในการรับส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ เพื่อติดต่อสื่อสารกันเป็นเครือข่าย เครือข่ายประเภทนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายเช่น ระบบเฝ้าดูแลผู้ป่วยในสถานพยาบาลเพื่อส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากตัวผู้ป่วย ระบบตรวจรู้สภาพแวดล้อมของพื้นที่ทำการเกษตรเพื่อเฝ้าระดับอุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดต่าง เพื่อจะได้สามารถปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับพืชชนิดต่างๆได้ นอกจากนี้ยังได้มีการประยุกต์ใช้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในการปฏิบัติการของทหาร เช่น การตรวจจับข้อมูลในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ หรือพื้นที่เสี่ยงภัย

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ โหนดตรวจรู้ (sensor node: SN) โครงสร้างภายในโหนดตรวจรู้ประกอบด้วย หน่วยตรวจจับข้อมูล (sensing unit) หน่วยประมวลผลข้อมูล (processing unit) และหน่วยที่ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณไร้สาย (wireless transceiver unit) โดยโหนดตรวจรู้จะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ ในการสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น สามารถนำโหนดตรวจรู้ไปติดตั้งในพื้นที่ที่สนใจตรวจจับและเก็บข้อมูล โหนดตรวจรู้จะทำการรับส่งสัญญาณแบบไร้สายกับโหนดข้างเคียง ซึ่งอาจเป็นโหนดตรวจรู้ธรรมดา หรือเป็นโหนดที่มีความสามารถพิเศษที่เรียกว่าสถานีถ่ายทอด (relay station: RS) ซึ่งจะทำการรวมข้อมูล และส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีปลายทางที่เรียกว่าสถานีฐาน (base station: BS) ซึ่งเป็นศูนย์ประมวลผล และทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานระบบตรวจรู้ต่างๆ หรืออาจติดต่อกับเครือข่ายภายนอกอื่น เช่น เครือข่ายอินเทอร์เน็ต

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานที่จำกัด ซึ่งอาจมีค่าน้อยกว่า 0.5 mAh หรือเท่ากับ 1.2 volt [1] การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในบางสภาพแวดล้อม การเติมพลังงานให้กับแหล่งจ่ายพลังงานอาจเป็นไปได้ ดังนั้นอายุการใช้งานของเครือข่ายจึงขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนดตรวจรู้ไร้สาย ในเครือข่ายที่มีการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (multi-hop) นั้น แต่ละโหนดจะทำสองหน้าที่ด้วยกัน คือหน้าที่แรกเป็นการตรวจจับและสร้างข้อมูล ส่วนอีกหน้าที่ที่สำคัญคือส่งผ่านข้อมูลไปยังสถานีฐานของเครือข่าย กรณีที่โหนดบางโหนดในเครือข่ายใช้พลังงานจากแบตเตอรี่จนหมดและไม่สามารถทำงานได้ เป็นเหตุให้โครงสร้าง และเส้นทางการสื่อสาร

ของเครือข่ายเปลี่ยนแปลง หรือขาดไป ซึ่งทำให้ข้อมูลที่สำคัญที่ตรวจจับจากบางพื้นที่ขาดหายไปก่อนที่จะถึงอายุการใช้งานเครือข่ายที่กำหนดไว้ ดังนั้นการออกแบบและวางแผน โครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายให้มีการใช้พลังงานของโนดในการส่งผ่านข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการที่จะสามารถประยุกต์ใช้งานเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอการวิจัยและพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำหนดโครงสร้าง การใช้งานสถานีย่อยทอด และตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีย่อยทอดที่เหมาะสมที่สุดในเครือข่าย เพื่อให้การใช้พลังงานสำหรับการสื่อสารของโนดตรวจรู้ไร้สายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้สามารถยืดอายุการทำงาน of เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่จำกัดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการกำหนดพารามิเตอร์และ โครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีย่อยทอด
2. เพื่อพัฒนาเทคนิคและสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีย่อยทอด เพื่อให้การใช้พลังงานรวมสำหรับการสื่อสารของโนดตรวจรู้ไร้สายของเครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานรวมของ โหนดตรวจรู้และจำนวนสถานีย่อยทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาหลักการทำงานและโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีย่อยทอด
2. ศึกษาการกำหนดพารามิเตอร์และ โครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีย่อยทอด
3. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ รวมถึงการออกแบบกรอบวิธี และเกณฑ์เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีย่อยทอด
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีย่อยทอด
5. ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานรวมของ โหนดตรวจรู้และจำนวนสถานีย่อยทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
2. กำหนดกรอบวิธี และเกณฑ์การออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด
3. พัฒนาศมการคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด
5. ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานรวมของโนดตรวจรู้และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับ : ได้เทคนิคการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เครือข่าย เพื่อให้การใช้พลังงานสำหรับการสื่อสารของโนดตรวจรู้ไร้สายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ทำให้สามารถยืดอายุการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่จำกัดได้ ซึ่งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้จะเพิ่มองค์ความรู้ในการวิจัยและประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังทำให้ได้บทความวิจัยที่มีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาวิจัย และได้ผลิตนักวิจัยซึ่งเป็นบัณฑิตระดับปริญญาโทที่มีคุณภาพ และมีประสบการณ์ในการทำงานวิจัยซึ่งสามารถผลิตผลงานที่มีประโยชน์ได้

หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่มีความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบ วางแผน และติดตั้งเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย รวมถึงหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ที่ทำหน้าที่ดูแลและควบคุมระบบการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อให้มีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายในงานวิจัยนี้ได้ ดังนั้นบทนี้จะได้กล่าวถึงหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 2.1 กล่าวนำ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 2.4 การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 2.5 แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย 2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิต 2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี และ 2.9 ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

2.1 กล่าวนำ

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยทั่วไปประกอบด้วย โนดตรวจรู้ (Sensor node : SN) เกตเวย์ (Gateway) และสถานีฐาน (Base station : BS) โดยโนดตรวจรู้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจจับ (sensing) หรือเฝ้าสังเกตความเป็นไปในธรรมชาติ โดยจะนำไปติดตั้งไว้ใกล้กับสิ่งแวดล้อมที่ต้องการเฝ้าสังเกตการณ์ จากนั้นโนดตรวจรู้เหล่านี้จะส่งข้อมูลเหล่านั้นไปที่เกตเวย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่รับจากโนดตรวจรู้ไปที่ปลายทาง หรือสถานีฐานต่อไป โดยสถานีฐานมีหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประมวลผลข้อมูล และเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งานเพื่อนำข้อมูลที่รับมาวิเคราะห์ผล หรือวางแผนการทำงานต่อไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ของโนดตรวจรู้ ได้แก่ ขนาดของหน่วยประมวลผล ขนาดของหน่วยความจำ และแหล่งจ่ายพลังงาน รวมถึงระยะในการตรวจจับข้อมูลที่จำกัด ดังนั้นในการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมาใช้งานนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือ การจัดการพลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลาที่ยาวนานที่สุด ซึ่งในงานวิจัยต่าง ๆ ก็ได้มีวิธีการในการออกแบบเครือข่าย วัตถุประสงค์ที่ศึกษาแตกต่างกัน เพื่อจะทำให้โนดตรวจรู้สามารถใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาทิศทาง ปรัชญ์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โครงสร้าง ข้อจำกัด การออกแบบของงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูล และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งจากการศึกษามีปรัชญ์วรรณกรรมที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.2.1 งานวิจัยของ Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. (2002) [4] เป็นงานวิจัยที่รวบรวมและสำรวจเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ทำการสำรวจงานวิจัยต่าง ๆ โดยได้อธิบายถึงพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โพลโทคอล และอัลกอริทึมที่มีการนำเสนอในงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ นำมารวบรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย นอกจากนี้จะรวบรวมเงื่อนไขการออกแบบที่เหมาะสม และสรุปการใช้เครื่องมือในการออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ รวมทั้งได้นำเสนอการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายไปใช้ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ และกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ ข้อจำกัดในการออกแบบเครือข่าย เช่น พลังงานที่ใช้ไป (power consumption) สถาปัตยกรรมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารของเครือข่าย เป็นต้น

2.2.2 งานวิจัยของ Younis, M. and Akkaya, K. (2008) [32] เป็นงานวิจัยสำรวจวิธีการและเทคนิคในการหาตำแหน่งวางโหนดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ลักษณะงานวิจัย เป็นการสำรวจและรวบรวมงานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวกับการหาตำแหน่งวางโหนดที่ดีที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้จะเน้นการแสดงให้เห็นถึงวัตถุประสงค์ แบบจำลอง และการกำหนดปัญหาของงานวิจัยต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยในช่วงระยะหลังที่ผ่านมามีการนำโหนดถ่ายทอด (Relay node) มาใช้ในการรวบรวมข้อมูล โดยหาตำแหน่งติดตั้งโหนดถ่ายทอด แต่ในงานวิจัยที่ได้ทำการสำรวจมานั้น จะเป็นเพียงงานวิจัยที่ทำการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น เช่น ต้องการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด ต้องการทำให้การเชื่อมต่อของเครือข่ายมีมากที่สุด ต้องการให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด เป็นต้น

2.2.3 งานวิจัยของ Bari, A., Teng, D. and Jaekel, A. (2009) [8] เป็นงานวิจัยที่หาตำแหน่งติดตั้ง โหนดถ่ายทอดที่ดีที่สุดในเครือข่ายตรวจรู้แบบลำดับชั้น (hierarchical) ด้วยโนดเก็บข้อมูลที่เคลื่อนที่ได้ (mobile data collector)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการในการหาตำแหน่งติดตั้ง โหนดถ่ายทอดที่ดีที่สุด และให้มีจำนวนน้อยที่สุด โดยที่ โหนดถ่ายทอดจะทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด (cluster head) ที่มีหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจาก โหนดตรวจรู้ที่อยู่ในคลัสเตอร์ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโนดเก็บข้อมูลที่เคลื่อนที่ได้ ที่ทำการเก็บข้อมูลจาก โหนดถ่ายทอดแต่ละ โหนด แล้วจึงส่งข้อมูลไปที่สถานีฐาน เพื่อช่วยให้ โหนดถ่ายทอดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลให้น้อยลง โดยกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) และพิจารณาเงื่อนไขของอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของ โหนดตรวจรู้ ขนาดของบัฟเฟอร์ของ โหนดถ่ายทอด ความเร็วของ โหนดเก็บข้อมูลที่เคลื่อนที่ได้ และมีเงื่อนไขที่รับประกันการสูญหายของข้อมูลเนื่องจาก buffer overflow และพลังงานที่ โหนดตรวจรู้ใช้ไปจะไม่เกินระดับที่กำหนดไว้

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นการพิจารณาการส่งข้อมูลจาก โหนดถ่ายทอดไปที่สถานีฐานนั้นอาจใช้แนวทางอื่นในการพิจารณาการสื่อสารได้ด้วย เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ นอกจากนี้ถ้าตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้ง โหนดถ่ายทอดมีความละเอียดขึ้น จะทำให้จำนวน โหนดถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนลดลง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาคูณภาพในการสื่อสารข้อมูล เช่น สัญญาณรบกวน และยังเป็นการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียว

2.2.4 งานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal, P., and Sivalingam, K. M. (2008) [23] เป็นงานวิจัยที่หาวิธีการวัดสมรรถนะของตำแหน่งของโหนดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบลำดับชั้นที่แตกต่างกัน

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่พิจารณาเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบลำดับชั้นที่ใช้หลักการของการจัดคลัสเตอร์ โดยเครือข่ายจะประกอบด้วย โหนดสามชนิด ได้แก่ โหนดตรวจรู้ (Regular sensor node, Litenode : LN) ที่มีข้อจำกัดของพลังงาน โหนดถ่ายทอด (High-end sophisticated node: SNs) ที่ทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด ซึ่งสามารถจัดหาพลังงานเพิ่มเติมให้กับ โหนดถ่ายทอดได้ งานวิจัยนี้เป็นการหาตำแหน่งติดตั้ง โหนดถ่ายทอดที่ดีที่สุด และจำนวนน้อยที่สุดเพื่อให้ โหนดถ่ายทอดสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดจาก โหนดตรวจรู้ได้ โดยรับประกันว่า โหนดตรวจรู้จะต้องมีการเชื่อมต่อกัน สำหรับการกำหนดปัญหาในงานวิจัยนี้จะเป็นการกำหนดปัญหาแบบหลายเงื่อนไข ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการออกแบบและกำหนดปัญหามี 3 วิธี ได้แก่ การโปรแกรมเชิงเส้น

ไบนารี (Binary integer linear programming : BILP) วิธี Greedy และวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm : GA) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอวิธีการแบบผสม (hybrid approach) โดยใช้ผลเฉลยที่ได้จากวิธีการ greedy รวมกับวิธีของการโปรแกรมเชิงเส้น ไบนารีมาเป็นผลเฉลยตั้งต้นให้กับวิธีเจเนติกอัลกอริทึม ซึ่งพบว่าสามารถใช้เวลาในการหาคำตอบได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีเจเนติกอัลกอริทึมดั้งเดิม จากผลการจำลองแบบในงานวิจัยนี้พบว่า ถ้าเป็นการติดตั้งโนดถ่ายทอดด้วยวิธีกริด (grid) นั้น วิธีการที่ทำให้ได้จำนวนโนดถ่ายทอดน้อยที่สุด คือ วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี อย่างไรก็ตามอีกสองวิธีก็ทำให้เครือข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้เช่นกัน แต่จะต้องติดตั้งจำนวนโนดถ่ายทอดที่มากกว่า ถัดมาสำหรับกรณีที่มีการสุ่มตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดด้วยการกระจายอย่างเท่า ๆ กันนั้น พบว่าวิธีเจเนติกอัลกอริทึม จะให้คำตอบของจำนวนโนดถ่ายทอดที่น้อยกว่าวิธีอื่น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ทำให้เห็นว่าวิธีการหาคำตอบด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีจะทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) โดยที่ตำแหน่งของการเลือกติดตั้งโนดถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นจะต้องเป็นแบบกริด ในขณะที่การหาคำตอบด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม และวิธีกริดนั้นเป็นการหาคำตอบแบบฮิวริสติก (heuristic) นั่นคือ คำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาอายุการใช้งานของเครือข่าย งบประมาณการลงทุน และคุณภาพในการสื่อสารข้อมูล เช่น ในเรื่องของสัญญาณรบกวน และยังเป็นเพียงการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียว

2.2.5 งานวิจัยของ Hou, Y.T., Shi, Y., Sherali, H. D., and Midkiff, S.F. (2005) [15] เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดแบ่งพลังงาน และหาตำแหน่งที่ตั้งโนดถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายตรวจสอบไร้สาย

ลักษณะของงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่พิจารณาปัญหาพร้อมกันสองอย่าง คือปัญหาการจัดแบ่งพลังงานเพิ่มเติมให้กับโนดที่ทำหน้าที่รวบรวมและส่งต่อข้อมูลให้กับสถานีฐาน (Aggregation and forwarding node : AFNs) ซึ่งเทียบได้กับโนดที่ทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด และปัญหาการหาตำแหน่งที่ตั้งให้กับโนดถ่ายทอดเพื่อให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด โดยเครือข่ายจะมีโนดอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ โหนดตรวจสอบที่อยู่ในคลัสเตอร์ ซึ่งทำการส่งข้อมูลให้กับ คลัสเตอร์เฮดภายในหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ เนื่องจากโนดตรวจสอบมีตำแหน่งใกล้กับคลัสเตอร์เฮดมาก จากนั้นคลัสเตอร์เฮดก็จะส่งต่อข้อมูลไปยังคลัสเตอร์เฮดโนดอื่น ๆ หรือส่งตรงไปที่สถานีฐาน ซึ่ง คลัสเตอร์เฮดนี้จะมีอายุการใช้งานที่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีนิยามอายุการใช้งานว่า ระยะเวลาที่เครือข่ายทำงานจนกระทั่งคลัสเตอร์เฮดโนดในเครือข่ายหมดพลังงานลง และโทโปโลยี (topology) ของเครือข่าย

นั้นถูกควบคุมด้วยระดับพลังงานของภาคส่ง งานวิจัยนี้กล่าวว่าการแบ่งพลังงานเพิ่มเติมให้กับคลัสเตอร์เฮดยังเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพ และเพื่อช่วยลดข้อบกพร่องของ โทโปโลยีของเครือข่ายจึงทำการเพิ่มโนดถ่ายทอดในตำแหน่งที่แน่นอนให้กับเครือข่าย โดยโนดถ่ายทอดนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับคลัสเตอร์เฮด โนด แต่จะทำงานแตกต่างกัน คือโนดถ่ายทอดไม่มีหน้าที่ในการกำเนิดข้อมูล แต่จะมีหน้าที่เพียงถ่ายทอดกราฟิกข้อมูลไปที่สถานีฐานเท่านั้น สำหรับการกำหนดปัญหาในงานวิจัยนี้จะใช้การโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนผสม (Mixed-integer nonlinear programming : MINLP) ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม่สามารถแก้ได้ (NP-hard) ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมสปิน (Smart pairing and intelligent disc search : SPINDS) มาใช้ในการแก้ปัญหาด้วยหลักการในการหาคำตอบซ้ำ ๆ โดยจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของโนดถ่ายทอดไปยังตำแหน่งที่ทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอขึ้นมานั้นจะเปลี่ยนปัญหาให้กลายเป็นการโปรแกรมเชิงเส้น ทำให้สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาที่ลดลง (polynomial time) งานวิจัยนี้พบว่าโทโปโลยีของเครือข่ายที่ไม่เหมาะสมมีผลต่ออายุการใช้งานของเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ทำให้เห็นว่าการนำโนดถ่ายทอดมาใช้ในเครือข่ายจะทำให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาจัดหาพลังงานให้กับคลัสเตอร์เฮด โนดนั้นอาจไม่เหมาะสมกับแอปพลิเคชันที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่นำไปใช้งานด้วย ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะต้องการให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด แต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาคุณภาพของสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล และไม่มีหลักในการกำหนดค่าพลังงานตั้งต้นให้กับ โนดในเครือข่ายที่แน่นอน ทำให้นำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ยาก และยังเป็นเพียงการศึกษาวิจัยระดับเบื้องต้น

2.2.6 งานวิจัยของ Wang, Q., Xu, K., Takahara, G., and Hassanein, H. (2007) [30] เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าตำแหน่งวางอุปกรณ์สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดและพิจารณาเงื่อนไขของอายุการใช้งาน

ลักษณะของงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ต้องการหาค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งโนดถ่ายทอด โดยต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมีค่าน้อยที่สุด และต้องรับประกันเงื่อนไขของอายุการใช้งานและการเชื่อมต่อ โดยได้แบ่งการจำลองแบบออกเป็นสองการทดลอง ได้แก่ การทดลองแรก โนดถ่ายทอดมีพลังงานไม่จำกัด ส่วนในการทดลองที่สอง โนดถ่ายทอดจะมีพลังงานจำกัด เนื่องจากการหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นใช้เวลานาน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการที่แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการหาค่าตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดที่เชื่อมต่อกับ โนดตรวจรู้ภายในหนึ่งช่วง

เชื่อมต่อ โดยจำลองปัญหาของเซตที่ครอบคลุมที่มีค่าน้อยที่สุด และเพื่อเป็นการรับประกันการถ่ายทอดกราฟฟิกจากโนดถ่ายทอดจากขั้นตอนที่หนึ่งว่าสามารถส่งไปถึงสถานีฐานได้นั้น จึงมีการนำเสนอวิธีการฮิวริสติก (heuristic scheme) สามวิธีเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งของโนดถ่ายทอดในขั้นตอนที่สอง รวมทั้งได้มีการกำหนดขอบเขตของจำนวนโนดถ่ายทอดอย่างน้อยที่สุดที่จะถูกติดตั้งในขั้นตอนที่สองเพื่อให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อกัน งานวิจัยนี้ได้นิยามอายุการใช้งานของเครือข่าย จากปริมาณกราฟฟิกที่ถูกสะสมอยู่ที่โนดถ่ายทอดจนกระทั่งโนดหมดพลังงานลง

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาคุณภาพของสัญญาณ เช่น สัญญาณรบกวนในเครือข่าย และยังพิจารณาวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียว-อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่าโนดถ่ายทอดมีพลังงานไม่จำกัด โดยกำหนดให้โนดถ่ายทอดใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีค่าความจุสูง ๆ หรือ พลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือน เป็นต้น

2.2.7 งานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008) [12] เป็นงานวิจัยที่กำหนดหน้าที่และหาตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบสองชั้น (two-tiered)

ลักษณะของงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่พิจารณาปัญหาาร่วมกันเกี่ยวกับการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งโนดถ่ายทอด และการกำหนดเส้นทางในเครือข่ายแบบสองชั้น โดยได้นำเสนออัลกอริธึมหาคำตอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้จำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่สถานีฐานได้รับมีค่ามากที่สุดภายใต้อายุการใช้งานที่กำหนด ได้นำเสนออัลกอริธึมของการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นใบนารี เพื่อกำหนดตำแหน่งของโนดถ่ายทอดโดยใช้ตำแหน่งปัจจุบันเป็นตำแหน่งตั้งต้น จากนั้นจะใช้อัลกอริธึม Weighted clustering เพื่อย้ายโนดถ่ายทอดไปที่ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่สามารถรองรับการทำงานของโนดตรวจรู้ได้ โดยโนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปที่โนดถ่ายทอดภายในช่วงเชื่อมต่อเดียว และงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้โนดถ่ายทอดมีพลังงานที่จำกัด โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าความแรงสัญญาณเพื่อส่งต่อแพ็คเกจข้อมูลไปยังสถานีฐานภายในหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ งานวิจัยนี้ได้พิจารณาอัตราความผิดพลาดบิต (bit error rate : BER) ซึ่งหาได้จากค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio : SNR) ที่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองความน่าจะเป็นของการผิดพลาดข้อมูล ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาวิธีการมอดูเลตแบบ binary phase shift keying (BPSK) ซึ่งจะใช้ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดข้อมูล ขนาดของแพ็คเกจ และค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในการคำนวณอัตราการรับแพ็คเกจ (packet reception rate : PRR)

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการพิจารณาค่าความถูกต้องในการส่งข้อมูล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราความผิดพลาดบิต ที่หาได้จากค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน อีกทั้ง

พิจารณาการส่งข้อมูลเป็นรอบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณางบประมาณในการลงทุน และยังเป็นเพียงการศึกษาวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

2.2.8 งานวิจัยของ Al-Turjman, F. M., Hassanein, H. S., and Ibnkahla, M. A. (2009) [6] เป็นงานวิจัยเพื่อหาการเชื่อมต่อที่ดีที่สุดด้วยเงื่อนไขของอายุการใช้งานที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งโนดที่ใช้ไฟติดตามสภาพแวดล้อม

ลักษณะของงานวิจัย งานวิจัยนี้มีการนำโนดถ่ายทอดมาใช้ในแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับสิ่งแวดล้อมภายในป่า โดยได้เสนอวิธีเพื่อให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อกันอย่างดีที่สุด และรับประกันได้ว่าเครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด นอกจากนี้ยังได้นิยามอายุการใช้งานของเครือข่ายที่เหมาะสมในทางปฏิบัติมากขึ้น ซึ่งโนดถ่ายทอดจะถูกกำหนดให้มีพลังงานจำกัด วัตถุประสงค์ในงานวิจัยคือ ต้องการให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อ (connectivity) กันมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขคือ จำนวนโนดถ่ายทอด และอายุการใช้งาน สำหรับแบบจำลองเครือข่ายในงานวิจัยนี้จะแบ่งเครือข่ายออกเป็นสองชั้น ชั้นแรกเป็นการทำงานของโนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล และรายงานต่อไปที่คลัสเตอร์เฮดโนดซึ่งจะอยู่ในชั้นบน (upper layer) ซึ่งทำการสื่อสารกับสถานีฐานอย่างเป็นคาบโดยตรง หรืออาจสื่อสารผ่านโนดถ่ายทอดก่อน งานวิจัยนี้จะทำการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งโนดถ่ายทอด เพื่อให้คลัสเตอร์เฮดโนดติดต่อกับสถานีฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตำแหน่งโนดตรวจรู้ คลัสเตอร์เฮด และสถานีฐานในเครือข่ายนั้นจะกำหนดไว้ก่อนแล้ว ในการวัดประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของโนดนั้นจะใช้กราฟการเชื่อมต่อ (graph connectivity) และใช้ minimum spanning tree เพื่อหาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดในเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการติดตั้งโนดตรวจรู้ในระนาบ 3 มิติ ซึ่งมีความเหมาะสมกับแอปพลิเคชันในการใช้งานภายในป่าตามที่พิจารณา อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพในการติดต่อสื่อสาร และยังไม่ได้พิจารณางบประมาณในการลงทุน อีกทั้งยังเป็นเพียงการออกแบบที่ศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

2.2.9 งานวิจัยของ Azad, A. P. and Chockalingam, A. (2006) [7] เป็นงานวิจัยที่หาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่เคลื่อนที่ได้ และเส้นทางที่ตระหนักรู้พลังงานในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ลักษณะของงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้เสนออัลกอริทึมที่ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่าย และปริมาณข้อมูลที่ส่งตลอดอายุการใช้งานโดยติดตั้งสถานีฐานมากกว่า 1 โนด เพื่อลดจำนวนช่วงเชื่อมต่อในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ ทำให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานลดลง จึงช่วยให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น สำหรับอายุการใช้งานของเครือข่ายในงานวิจัยนี้นั้น เสนอว่าอายุ

การใช้งานจะสิ้นสุดลงเมื่อแบตเตอรี่ของโน้ตตรวจรู้มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา 3 วิธี ได้แก่ อัลกอริทึมในการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานใกล้เคียงกับโน้ตที่มีพลังงานเหลือมากที่สุดให้เป็นโน้ตแรกที่มีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานในแต่ละรอบ ถัดมาเป็นอัลกอริทึมที่ทำให้โน้ตที่มีพลังงานเหลือมากที่สุดมีจำนวนมากที่สุดเพื่อช่วยกระจายข้อมูลให้กับโน้ตอื่นอย่างเท่า ๆ กัน และสุดท้ายเป็นอัลกอริทึมเพื่อให้ค่าพลังงานที่เหลือของทุก ๆ โน้ตในเครือข่ายมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด เปรียบเทียบกับการหาคำตอบด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม พบว่าอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้ใช้ในการออกแบบสามารถทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้นั้นมีค่ามากขึ้นด้วย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ยังไม่มีการใช้โน้ตถ่ายทอดในเครือข่าย แต่จะพิจารณาให้มีการติดตั้งสถานีฐานมากกว่า 1 สถานี เพื่อให้โน้ตตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด และงานวิจัยนี้ทำให้ได้มุมมองการพิจารณาพลังงานที่เหลือของโน้ตตรวจรู้ที่ทำให้เกิดความสมดุลของข้อมูล และได้นำมาพิจารณาปรับใช้ในงานวิจัย อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่มีมีการพิจารณาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด และคุณภาพในการสื่อสาร อีกทั้งยังเป็นเพียงการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

2.2.10 งานวิจัยของ Jia, J., Chang, G., Wen, Y., and Song, J. (2009) [17] เป็นงานวิจัยการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับการควบคุมการครอบคลุมในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายด้วยการปรับค่าระยะในการตรวจจับข้อมูลของโน้ตตรวจรู้

ลักษณะของงานวิจัย งานวิจัยนี้พยายามที่จะลดการใช้พลังงานของเครือข่ายโดยการจัดการวางให้กับโน้ตตรวจรู้โดยแบ่งการทำงานออกเป็นสองโหมดคือ โหมดทำงาน (active mode) และโหมดหยุดพักการทำงาน (sleep mode) โดยต้องการให้โน้ตตรวจรู้ที่อยู่ในโหมดทำงานมีจำนวนน้อยที่สุดเพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่ไม่ต้องการ โดยที่โน้ตตรวจรู้สามารถปรับระยะในการตรวจจับข้อมูลได้เพื่อทำให้เครือข่ายมีการครอบคลุมมากที่สุด โดยจะออกแบบเป็นสมการแบบหลายวัตถุประสงค์และประยุกต์วิธีเจเนติกอัลกอริทึมในการหาคำตอบ

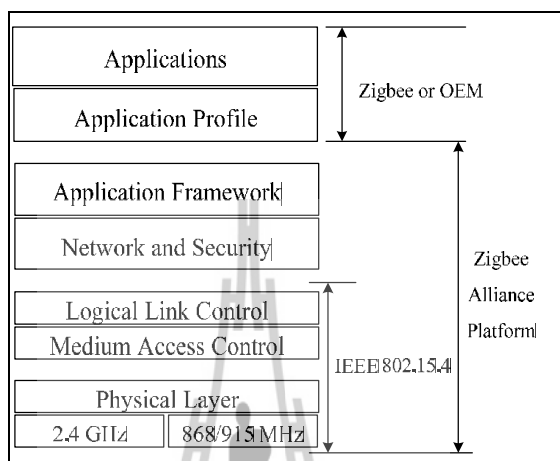
จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้จะพิจารณาอัตราการครอบคลุมพื้นที่ของโน้ตตรวจรู้และทำให้เห็นตัวอย่างของการออกแบบปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ และทำให้เห็นว่าในการออกแบบปัญหาใด ๆ นั้นทุก ๆ ปัญหาส่วนใหญ่ที่พิจารณาจะมีความขัดแย้งกัน โดยผู้ใช้จะต้องเป็นคนตัดสินใจเลือกคำตอบที่ดีที่สุด

2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless sensor networks : WSNs) เป็นเครือข่ายที่อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในย่านความถี่ 2.4 GHz เป็นมาตรฐานที่รองรับการทำงานในเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network technology : WPAN) ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยองค์กร Zigbee (Zigbee alliance) ซึ่งองค์กรนี้ได้มีการทำงานร่วมกับสมาชิกทั่วโลกในการร่วมมือกันสร้างอุปกรณ์ไร้สายที่ทำหน้าที่ติดตาม และควบคุมที่มีความน่าเชื่อถือ และมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบบจำลองที่แสดงชั้นการทำงานของสถาปัตยกรรมของเทคโนโลยีไร้สาย Zigbee ที่สัมพันธ์กับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยการทำงานขององค์กรนั้นจะให้ความสำคัญกับเครือข่าย ความปลอดภัย และการทำงานในชั้นแอปพลิเคชัน (application layer) เนื่องจากในชั้นนี้จะประกอบไปด้วยการทดสอบการทำงานระหว่างอุปกรณ์ สำหรับการออกแบบในชั้นกายภาพ (physical layer) จะเน้นในเรื่องของการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอุปกรณ์ในมาตรฐานนี้มีอัตราในการรับส่งข้อมูลต่ำ โดยมีอัตราในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 250 kbps มีการมอดูเลต (modulation) ข้อมูลแบบ 16-ary orthogonal (16 O-QPSK) มีช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่อง สำหรับในส่วน of ชั้น medium access control (MAC layer) จะออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานในการควบคุม และติดตามสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ โดยมีหน้าที่ดูแลโครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ เช่น รองรับโทโปโลยีการทำงานของเครือข่าย และอุปกรณ์ ควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางแบบ contention และ แบบ schedule เป็นต้น สำหรับโทโปโลยีของเครือข่าย และประเภทของอุปกรณ์ในมาตรฐานนี้จะแบ่งอุปกรณ์ออกเป็น 2 ประเภทตามคุณสมบัติ และความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ ได้แก่ อุปกรณ์ full-function (FFD) และอุปกรณ์ reduced-function (RFD) โดย FFD จะมีแหล่งจ่ายพลังงานที่เพียงพอ และมีหน่วยความจำที่มีขนาดใหญ่ มีหน้าที่การทำงานหลากหลาย สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ของเครือข่ายอื่น ๆ ได้ สามารถทำหน้าที่ได้ทั้ง network coordinator และ router สำหรับอุปกรณ์แบบ RFD นั้นจะเป็นเพียงอุปกรณ์ทั่วไปที่ถูกลดหน้าที่เป็น end device ที่สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น FFD ได้เท่านั้น ทำให้มีราคาถูก และอุปกรณ์มีความซับซ้อนน้อย เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล Zigbee นี้ สามารถจัดโทโปโลยีออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบดาว (star) แบบเมช (mesh) และ แบบคลัสเตอร์ทรี (cluster tree)

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนิยมนำมาใช้ในการตรวจจับ การคำนวณ และการสื่อสารข้อมูล ซึ่ง โนดตรวจรู้จะมีคุณสมบัติในการเป็นเครื่องตรวจวัด ฝ้าสังเกต และตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ รวมถึงปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การนำมาใช้งานในโรงพยาบาล การเกษตร อุตสาหกรรม ที่พักอาศัยซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตประจำวัน หรือเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยและทรัพย์สินของมนุษย์ทั้งสิ้น จากการศึกษา

หนังสือ Wireless sensor networks : technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) [27] และ จากงานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008) [12] ได้มีการอธิบายโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งประกอบไปด้วย สถานีฐานและ โหนดตรวจรู้ ดังนี้



รูปที่ 2.1 แบบจำลองชั้นการทำงานของ Zigbee ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

- **สถานีฐาน (Base station : BS)** เป็น โหนดปลายทาง (sink) ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก โหนดตรวจรู้ หรือสถานีถ่ายทอด จากนั้นจะทำการรวบรวมข้อมูล ประมวลผลข้อมูล และส่งต่อไปที่ผู้ใช้ โดยผู้ใช้สามารถเข้าใช้ผ่านอินเทอร์เน็ต เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของ สถานีฐานนั้นขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันในการใช้งาน เช่น อาจติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางเครือข่ายเพื่อสามารถเชื่อมต่อกับโหนดในเครือข่ายได้อย่างทั่วถึง เป็นต้น

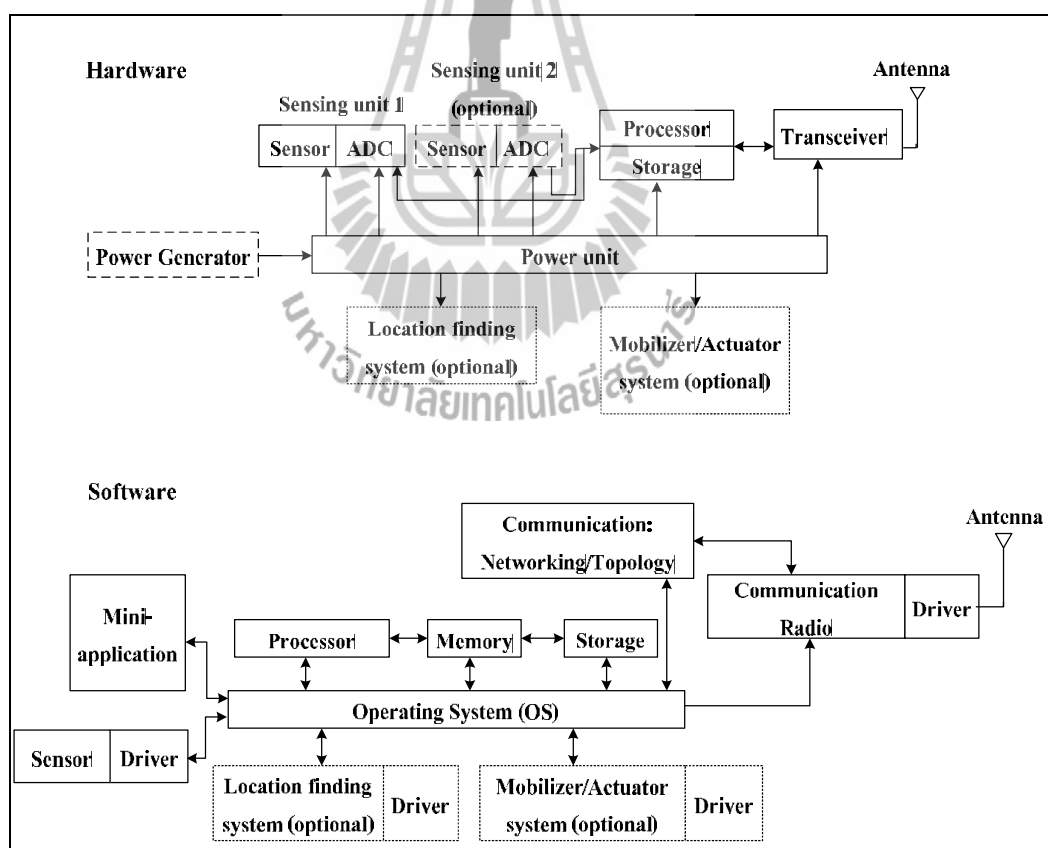
- **โหนดตรวจรู้ (Sensor node : SN)** เป็นอุปกรณ์ที่มีการสื่อสารอย่างไร้สาย มีหน้าที่ตรวจจับข้อมูล และส่งข้อมูลให้กับโหนดตรวจรู้ข้างเคียง หรือส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานโดยตรง ชื่อที่รู้จักในทางอุตสาหกรรมมีหลายชื่อ เช่น โหนดไร้สาย (Wireless node : WN), Smart dust, mote, และ Commercial off-the-shelf (COTS) หน้าที่การทำงานของโหนดตรวจรู้โดยทั่วไปนั้นจะขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชัน แต่โดยทั่วไปโหนดตรวจรู้จะมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ในตำแหน่งที่กำหนด เช่น ใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้นในอากาศ ปริมาณแสงสว่าง เป็นต้น ใช้ในการตรวจจับความเป็นไปของเหตุการณ์ที่สนใจ และใช้ในการคาดการณ์ค่าพารามิเตอร์ในเหตุการณ์ เช่น ใช้ในการตรวจดูสภาพการจราจรบนท้องถนน เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้โหนดตรวจรู้มีหน้าที่ในการตรวจจับข้อมูลภายในสภาพแวดล้อมที่กำหนด แล้วส่งต่อข้อมูลไปที่สถานีถ่ายทอด หรือสถานีฐาน โดยการกำเนิดแพ็คเก็ต และการ

ตรวจจับข้อมูลของ โหนดตรวจรู้ นั้นจะมีการทำงานอย่างเป็นคาบ (periodically) โดยที่จำนวนบิตข้อมูลในแต่ละแพ็คเกจที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละคาบนั้นจะมีขนาดเท่ากัน

2.3.1 ส่วนประกอบของโหนดตรวจรู้

ในการออกแบบโครงสร้างของโหนดตรวจรู้เพื่อให้รองรับฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายของโหนดนั้น ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนประมวลผลข้อมูล ส่วนที่มีหน้าที่ในการสื่อสาร และส่วนที่มีหน้าที่กำเนิดพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.2 ในการออกแบบส่วนต่าง ๆ นั้นจะคำนึงถึงแอปพลิเคชันที่นำไปใช้ จากหนังสือ Wireless sensor networks : technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) [27] กล่าวว่าแต่ละแอปพลิเคชันจะมีเทคโนโลยีในการออกแบบโหนดตรวจรู้ของตนเอง ตัวอย่างเช่น โหนด smart dust และ โหนด COTS นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ย่อย ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1) ส่วนกำเนิดพลังงาน (power) โครงสร้างในส่วนแหล่งจ่ายพลังงานนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ต้องออกแบบให้สามารถรองรับการทำงานของอุปกรณ์ได้ในระยะเวลานานเป็นชั่วโมง เป็นเดือน หรือเป็นปี ขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันในการใช้งาน

2) ส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณ และเก็บข้อมูล (computation logic and storage) เป็นส่วนที่รองรับการประมวลผลข้อมูลแบบ onboard และการเปลี่ยนแปลงของหน่วยเก็บข้อมูลแบบชั่วคราว หรือในช่วงสั้น ๆ การเข้ารหัส การแก้ไขความผิดพลาด (forward error correction : FEC) การมอดูเลตแบบดิจิทัล (digital modulation) การสื่อสารแบบดิจิทัล เป็นต้น โดยทั่วไปโนดตรวจรู้ จะใช้การคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 8 บิต ถึง 64 บิต และใช้หน่วยความจำตั้งแต่ 0.01 ถึง 100 กิกะไบต์ (gigabyte : GB)

3) ส่วนของเซ็นเซอร์ ทรานส์ดิวเซอร์ (sensor transducer) เป็นส่วนประสานงานระหว่างสิ่งแวดล้อม กับโนดตรวจรู้ ซึ่งอาจใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของโนดตรวจรู้ที่ใช้ในการตรวจจับสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น แสงสว่าง อุณหภูมิ ความกดดันอากาศ เป็นต้น

4) ส่วนที่ทำหน้าที่สื่อสาร (communication) โนดตรวจรู้จะมีความสามารถในการสื่อสาร เช่น ในโนดตรวจรู้ในประเภทที่ 1 (category 1 : C1WSN) ที่มีโทโปโลยีในการสื่อสารแบบเมช มีการเชื่อมต่อแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ ใช้การหาเส้นทางแบบ dynamic หรือ โนดตรวจรู้ในประเภทที่ 2 (category 2 : C2WSN) ที่มีการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด หรือหลายจุดต่อจุด (multipoint-to-point) ที่ใช้ช่วงเชื่อมต่อเดียว (single-hop) ในการสื่อสารระหว่างโนด ใช้การหาเส้นทางแบบ static คือมีเพียงเส้นทางเดียวจากโนดตรวจรู้ไปที่โนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล

สำหรับส่วนประกอบทางด้านซอฟต์แวร์ของโนดตรวจรู้ จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน ดังนี้

1) ระบบดำเนินการ (operating system) หรือ microcode หรือเรียกอีกชื่อว่า middleware ทำหน้าที่รองรับการทำงานของโมดูล เป็นระบบดำเนินการแบบ open-source ที่ออกแบบมาสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยทั่วไประบบดำเนินการเหล่านี้จะใช้สำหรับสถาปัตยกรรมที่สามารถใช้งานได้รวดเร็ว เพื่อลดค่าใช้จ่าย ตัวอย่างของระบบดำเนินการ ได้แก่ TinyOS เป็นต้น

2) หน่วยขับเซ็นเซอร์ (sensor drivers) ทำหน้าที่จัดการหน้าที่พื้นฐานของหน่วยรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ โครงสร้างของโนด และการตั้งค่าที่จะต้องทำการส่งข้อมูลให้กับโนดตรวจรู้

3) หน่วยประมวลผลของการติดต่อสื่อสาร (communication processor) มีหน้าที่สื่อสารเพื่อจัดการรหัสข้อมูล หาเส้นทาง การบัฟเฟอร์ การส่งต่อแพ็คเกจ การรักษาโทโปโลยี และการ

ควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง เช่น กระบวนการในการป้องกันการชนกันของข้อมูล (contention mechanism) เป็นต้น

4) หน่วยขับเคลื่อนสื่อสาร (communication drivers) เป็นโมดูลซอฟต์แวร์ที่ดูแลการเชื่อมต่อสำหรับสื่อสารข้อมูลด้วยสัญญาณวิทยุ รวมถึงดูแลการซิงโครไนซ์ (synchronization) การเข้ารหัสสัญญาณ การกู้คืนบิตข้อมูล การนับบิตข้อมูล ระดับสัญญาณ และการมอดูเลต

5) ส่วนประมวลผลข้อมูลแบบ mini-apps (data processing mini-apps) เป็นส่วนของการควบคุมเกี่ยวกับตัวเลข การเก็บค่าสัญญาณ และจัดการสัญญาณ หรือส่วนที่รองรับ แอปพลิเคชันทั่วไปในระดับโนดสำหรับการประมวลผลภายในเครือข่าย

การดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมของโนดตรวจรู้ไร้สายนั้น จะต้องพิจารณาเงื่อนไขของทรัพยากรต่าง ๆ ดังนี้

1) พลังงานที่ใช้ไป (power consumption) โนดตรวจรู้จะมีแหล่งจ่ายพลังงานที่จำกัด ซึ่งการรักษาพลังงานเป็นเงื่อนไขหลักที่ต้องพิจารณาดำเนินการสำหรับเครือข่ายประเภทนี้

2) การสื่อสาร (communication) เครือข่ายไร้สายโดยทั่วไปแล้วจะถูกจำกัดขนาดของแบนด์วิดท์ (bandwidth) ดังนั้นเครือข่ายอาจถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนได้ง่าย และทำให้ความสามารถในการสื่อสารถูกจำกัด และไม่มีคุณภาพ เช่น อาจมีการหน่วงเวลาสูง มีความแปรปรวนสูง เฟรมข้อมูลอาจไปไม่ถึงภาครับ มีอัตราความผิดพลาดบิตสูง เป็นต้น

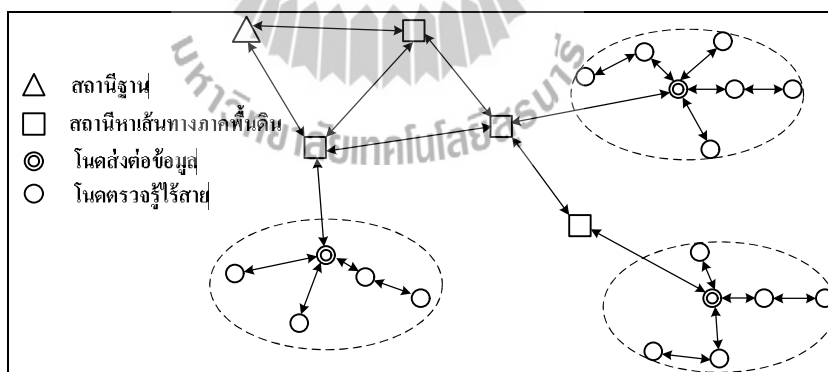
3) การคำนวณ (computation) โดยทั่วไปโนดตรวจรู้จะมีข้อจำกัดของพลังงานที่ใช้ในการคำนวณ และหน่วยความจำ ซึ่งถูกจำกัดด้วยประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล ทำให้ส่งผลต่อปริมาณของข้อมูลที่จะถูกจัดเก็บในโนดตรวจรู้

4) ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่วัด (uncertainty in measured parameters) เนื่องจากสัญญาณที่ทำการตรวจจับนั้นมีความไม่แน่นอน ดังนั้นข้อมูลที่ต้องการอาจมีการผสมกับสัญญาณรบกวน (noise) และ/หรือ สัญญาณแทรกสอด (interference) ภายในธรรมชาติ ทำให้โนดตรวจรู้ไม่สามารถเก็บข้อมูล หรือขาดความแม่นยำในการส่งต่อข้อมูล ดังนั้นตำแหน่งในการติดตั้งโนดตรวจรู้จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการตรวจจับข้อมูล โดยเฉพาะในเครือข่ายที่โนดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เป็นต้น

2.3.2 โครงสร้างทางกายภาพของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

โครงสร้างทางกายภาพของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายจากหนังสือ Wireless sensor networks : technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) [27] กล่าวว่า สามารถแบ่งหมวดหมู่ของเครือข่ายและระบบ ตามลักษณะทางกายภาพของ โหนดตรวจรู้ได้ 2 ประเภท ได้แก่

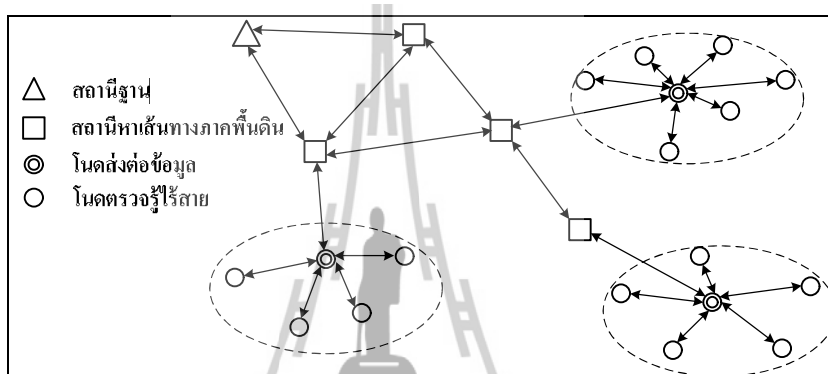
1) ประเภทที่ 1 (Category1: C1WSNs) จะใช้พื้นฐานการสื่อสารแบบเมช (mesh) โดย โหนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่เป็น end device จะมีการสื่อสารมากกว่าหนึ่งช่วงเชื่อมต่อไปยัง โหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล (forwarding node) โดยจะเรียกโหนดนี้ว่า wireless router ดังรูปที่ 2.3 และ โหนด wireless router จะทำหน้าที่หาเส้นทางแบบ dynamic ซึ่งโหนดนี้จะสามารถหาเส้นทางที่ดีที่สุดไปถึงปลายทางได้ ซึ่งเส้นทางนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่า 1 เส้นทาง และเป็นการเชื่อมต่อแบบ ไร้สาย โดยลักษณะที่สำคัญของ โหนด wireless router คือ เป็น โหนดที่รองรับการสื่อสารกับ โหนดที่เป็น end device โดยจะทำหน้าที่เสมือนว่าเป็น repeater คือ ทำการถ่ายทอด (relay) ข้อมูลจาก end device เพื่อส่งต่อให้ถึงปลายทาง โดยสัญญาณวิทยุที่ใช้ในการสื่อสารนั้นสามารถทำงานได้ไกลถึง 1000 เมตร ซึ่งโหนดนี้สามารถรองรับการประมวลผลข้อมูล หรือลดหน้าที่ลงเป็นเพียง โหนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่เป็น end device ก็ได้ สำหรับแอปพลิเคชันที่สามารถใช้ได้กับ โครงสร้างประเภทที่ 1 ได้แก่ แอปพลิเคชันทางการแพทย์ การดูแลที่อยู่อาศัย (habitat monitoring) หรือสิ่งแวดล้อม เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโหนดในเครือข่ายประเภทที่ 1

2) ประเภทที่ 2 (Category2 : C2WSNs) จะใช้พื้นฐานการสื่อสารแบบจุดต่อจุด หรือ หลายจุดต่อหนึ่งจุด โดยทั่วไปโหนดตรวจรู้ซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบ end device จะมีการเชื่อมต่อแบบช่วงเชื่อมต่อเดียวกับ โหนด wireless router แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยที่โหนดนี้จะทำการเชื่อมต่อกับสถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน (terrestrial network) ด้วยการสื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ หรือผ่านการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด โดยลักษณะที่สำคัญของเครือข่ายประเภทนี้ คือ โหนดตรวจรู้จะไม่สามารถสื่อสารกับ

โนดตรวจรู้ข้างเคียงได้ โหนด wireless router จะรองรับการหาเส้นทางแบบ static ไปยังเครือข่ายภาคพื้นดิน และ/หรือ มีเส้นทางการเชื่อมต่อไปยังเครือข่ายภาคพื้นดินเพียงเส้นทางเดียว โดยสัญญาณวิทยุนั้นจะสามารถสื่อสารได้ในระยะไม่เกิน 100 เมตร และ โหนด wireless router จะไม่สามารถรองรับการประมวลผลข้อมูล หรือลดบทบาทเป็นโนดตรวจรู้ที่ทำงานแบบ end device ได้ จะเห็นได้ว่าเครือข่ายนี้จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างเครือข่ายในประเภทที่ 1 สำหรับตัวอย่างของแอปพลิเคชัน ได้แก่ การติดตามความเป็นไปภายในโรงงานอุตสาหกรรม การควบคุมอาคาร การควบคุมกระบวนการผลิต เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโนดในเครือข่ายประเภทที่ 2

2.3.3 สถานีถ่ายทอด (Relay station : RS)

การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ไร้สายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นจะแปรผันตามจำนวนบิตข้อมูล และระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับ จากแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานในการสื่อสารนั้นพบว่า การสื่อสารระหว่างโนดสองโนดใด ๆ ที่อยู่ใกล้กันมาก จะใช้พลังงานมากกว่าการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อด้วยระยะทางสั้น ๆ ซึ่งผลของการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อนั้นมีการศึกษาในหลายงานวิจัยทั้งสถาปัตยกรรมแบบแบนราบ (flat architecture) และสถาปัตยกรรมแบบลำดับชั้น (hierarchical architecture) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อจะทำให้พลังงานในการสื่อสารมีค่าลดลง แต่ก็อาจทำให้มีโนดตรวจรู้บางโนดเกิด overload คือ เมื่อโนดตรวจรู้ได้รับข้อมูลจากโนดต้นทางจำนวนมาก จึงทำให้โนดตรวจรู้โนดนี้หมดพลังงานลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับโนดตรวจรู้โนดอื่น ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครือข่าย เพราะทำให้ปลายทางไม่ได้รับข้อมูลภายในพื้นที่ที่โนดนี้ทำการตรวจจับ เป็นต้น ซึ่งหลายงานวิจัยได้พยายามแก้ปัญหาเหล่านี้โดยพยายามที่จะลดผลกระทบจากโนดตรวจรู้โนดแรกทั้งหมดพลังงาน เทคนิคหนึ่งที่มีการนำเสนอเพื่อลดภาระของโนดตรวจรู้ที่เกิด overload คือ มีการนำโนดพิเศษ ที่เรียกว่าโนดถ่ายทอด (relay node) ซึ่งต่อไปในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า สถานีถ่ายทอด (relay

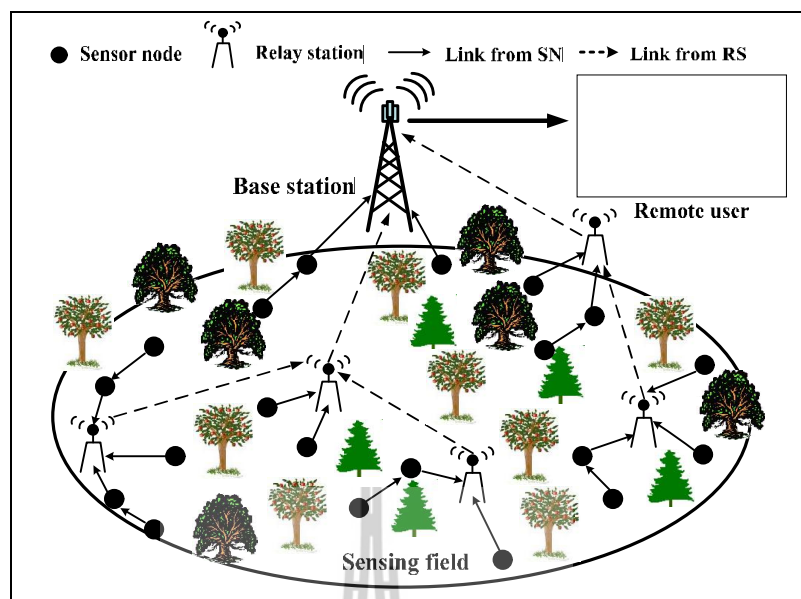
station : RS) มาใช้ในเครือข่ายเพื่อช่วยแบ่งเบาข้อมูลที่โหนดตรวจรู้ได้รับ จากการศึกษาของงานวิจัยที่มีการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในเครือข่ายนั้นมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น เพื่อทำให้การรวบรวมข้อมูลภายในเครือข่ายมีความสมดุล (balance load) เพื่อทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายมีค่ามากที่สุด หรือ เพื่อทำให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีความอดทนต่อความผิดพลาด (fault-tolerance) เป็นต้น

จากการศึกษาของงานวิจัยที่มีการใช้งานสถานีถ่ายทอดที่ผ่านมานั้นพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมา มีการกำหนดให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่จำกัด เช่นงานวิจัยของ Wang, Q., Xu, K., Takahara G., and Hassanein H. (2007) [30] งานวิจัยของ Al-Turjman, F. M., Hassanein, H. S., and Ibnkahla, M. A. (2009) [6] งานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., and Lou, W. (2008) [12] และงานวิจัยของ Bari, A., Teng, D. and Jaekel, A. (2009) [8] กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะมีพลังงานที่มากกว่าโหนดตรวจรู้ ซึ่งข้อได้เปรียบในการนำสถานีถ่ายทอดมาทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮดแทนที่โหนดตรวจรู้ นั้นมีข้อดี เพราะเนื่องจากสถานีถ่ายทอดเป็น โหนดที่มีขนาด buffer มากกว่า หรือสามารถส่งต่อข้อมูลในระยะที่ไกลมากกว่าโหนดตรวจรู้ทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากทำให้โหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานอย่างเท่า ๆ กัน (load balanced) และช่วยให้เครือข่ายมีความอดทนต่อความผิดพลาด (fault tolerance) เป็นต้น

งานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal, P., and Sivalingam, K. M. (2008) [23] กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะถูกสมมุติให้มีพลังงาน และคุณสมบัติในการสื่อสารที่มากกว่าโหนดตรวจรู้ แต่ไม่ได้ระบุว่าพลังงานของสถานีถ่ายทอดนั้นจำกัดหรือไม่ โดยยกตัวอย่างของสถานีถ่ายทอดที่ใช้งาน คือ iMote จาก Crossbow งานวิจัยของ Li, S., Chen, G., and Ding W. (2009) ที่กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะเป็น โหนดที่มีพลังงานมากกว่าโหนดตรวจรู้ แต่ในขณะที่เดียวกันก็มีราคาแพงมากกว่าโหนดตรวจรู้มาก งานวิจัยของ Hou, Y. T., Shi, Y., Sherali, H. D., and Midkiff S. F. (2005) [15] กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะไม่มีหน้าที่ในการกำเนิดข้อมูล แต่จะทำหน้าที่เพียงถ่ายทอดกราฟิกข้อมูลไปที่สถานีฐานเท่านั้น โดยในงานวิจัยนี้จะมีการหาพลังงานเพิ่มเติมให้กับสถานีถ่ายทอด งานวิจัยของ Hande, A., Polk, T., Walker, W., Bhatia D., and Jonsson, E. (2007) [13] เป็นงานวิจัยที่มีการนำเซลล์สุริยะมาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับสถานีถ่ายทอด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกโหนดชนิดนี้ว่า Wireless router node ใช้กับแอปพลิเคชันที่อยู่ภายในอาคาร โดยที่ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากถ่านอัลคาไลน์ที่ต้องทำการเปลี่ยนใหม่เมื่อพลังงานของถ่านหมดลง โดยระบบการทำงานจะประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ หน่วยที่ทำหน้าที่เก็บพลังงาน และ โมดูลที่ทำหน้าที่สะสมพลังงาน โดยหน่วยที่ทำหน้าที่เก็บพลังงานนั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์สุริยะที่มีการเชื่อมต่อกับส่วนประกอบที่ทำหน้าที่จัดหาพลังงานจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีการใช้งานภายในอาคาร

และบริเวณทางเดินในโรงพยาบาล ส่วนของ ultracapacitor จะใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสะสมพลังงาน และแบตเตอรี่จากถ่านอัลคาไลน์จะเป็นเพียงส่วนที่ทำการสำรองพลังงาน สถานีถ่ายทอดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Crossbow MICAz motes ซึ่งถูกควบคุมโดยการดำเนินการของวงจรที่ใช้ในการจัดหาพลังงานเพื่อให้พลังงานเพียงพอและเกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

ในทางการค้ำนี้ผู้ผลิตได้ทำการผลิตอุปกรณ์ที่มีหน้าที่เช่นเดียวกับสถานีถ่ายทอด เช่น อุปกรณ์ของบริษัท National Instruments โดยในเอกสารอ้างอิง (datasheet) ของผู้ผลิตจะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า NI wireless sensor network gateway เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดการเครือข่ายสำหรับหาเส้นทางในการส่งข้อมูล และรวบรวมข้อมูลจากโนดตรวจรู้ อุปกรณ์ Coalesenses ClimaControl Wireless Repeater Datasheet R824 โดยในเอกสารอ้างอิงของผู้ผลิต กล่าวว่า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น โดยหลักการทำงานของอุปกรณ์นี้ คือ จะใช้เพื่อขยายพื้นที่ดำเนินการของเครือข่ายที่ถูกจำกัดพื้นที่ในกรณีที่โนดตรวจรู้ไม่สามารถส่งข้อมูลไปถึงสถานีฐานได้ การใช้สถานีถ่ายทอดเข้ามาช่วยจะทำให้ขยายพื้นที่ครอบคลุมให้เพิ่มขึ้น โดยสถานีถ่ายทอดจะทำการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไร้สาย และส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปที่สถานีฐาน โดยการใช้การเข้ารหัสด้วยรูปแบบที่มีความน่าเชื่อถือ มีสายอากาศที่มีความอ่อนไหวสูง และมีภาคขยายพลังงานที่ช่วยให้สามารถส่งข้อมูลได้ในระยะที่ไกลขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้งานของอุปกรณ์นี้ยังต้องอาศัยไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดเพื่อสร้างการสื่อสารกับสถานีฐาน โดยอุปกรณ์จะทำการหาเส้นทางในการส่งข้อมูล อุปกรณ์ HOBO Data Router ในเอกสารอ้างอิงของผู้ผลิตกล่าวว่า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาเส้นทางโดยมีการปรับปรุงความน่าเชื่อถือ ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลจากอุปกรณ์ที่อยู่ห่างไกลหรือช่วยในการส่งต่อข้อมูลจากโนดที่ถูกกีดขวาง อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของอุปกรณ์ชนิดนี้จะอยู่ที่ 24 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้แหล่งจ่ายไฟจากอุปกรณ์ AC adapter อุปกรณ์จากบริษัท The DEETER Group โดยเรียกอุปกรณ์ว่า Wireless Router การใช้งานจะติดตั้งอุปกรณ์ระหว่างโนดตรวจรู้ กับสถานีฐาน สามารถใช้ในการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อได้ อุปกรณ์จากบริษัท E-Senza Technologies โดยเรียกอุปกรณ์ว่า SenzaHub SH140 Wireless Hub เป็นอุปกรณ์หาเส้นทางแบบมีสายใช้เพื่อขยายระยะในการสื่อสารสามารถสร้างโทโปโลยีแบบเมช (mesh) ได้ สามารถนำอุปกรณ์ไปใช้ในแอปพลิเคชันเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม การจัดการเกี่ยวกับน้ำ และของเสียภายในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี น้ำมันและก๊าซ หรือ ใช้เพื่อตามรอยวัตถุในกระบวนการผลิต เป็นต้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด

การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีหน้าที่แตกต่างกัน 3 ส่วน ได้แก่ โหนดตรวจรู้ที่มีพลังงานจำกัด ทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล และส่งต่อข้อมูลไปที่โหนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน ส่วนที่สอง คือ สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่ใช้พลังงานจากเซลล์สุริยะ และมีแหล่งสำรองพลังงานขนาดใหญ่ ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากโหนดตรวจรู้ ไปที่สถานีถ่ายทอดข้างเคียง หรือ สถานีฐาน และส่วนสุดท้าย คือ สถานีฐาน มีหน้าที่เก็บรวบรวม และประมวลผลข้อมูล โดยจะทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้

2.4 การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากงานวิจัยของ Al-Karaki, J. N., and Kamal, A. E. (2004) [5] กล่าวว่า การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายเนื่องจากลักษณะของเครือข่ายที่แตกต่างไปจากเครือข่ายไร้สายประเภทอื่น ๆ เช่น mobile ad hoc networks หรือ เครือข่ายเซลล์ลูลาร์ (cellular networks) ข้อแตกต่างแรกคือ เนื่องจากโหนดตรวจรู้มีจำนวนมากดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะสร้าง global addressing ที่ใช้กับโหนดจำนวนมาก ดังนั้นโพลโทคอลที่ใช้พื้นฐานของ IP จึงไม่สามารถนำมาใช้กับเครือข่ายประเภทนี้ได้ รวมทั้งการนำโหนดตรวจรู้มาใช้ในเครือข่ายแบบ ad hoc นั้น โหนดตรวจรู้เหล่านี้จำเป็นต้องมีการจัดการด้วยตนเองได้เนื่องจากเครือข่ายแบบ ad hoc ต้องการระบบที่ใช้ในการจัดรูปแบบการเชื่อมต่อ และจัดการกับการกระจายตัวของโหนดในเครือข่าย แต่สำหรับเครือข่าย

ตรวจรู้ไร้สายนั้นการได้รับข้อมูลมีความสำคัญมากกว่าการรู้ ID ของโนดที่ส่งข้อมูล อีกทั้งเนื่องจากข้อจำกัดของพลังงาน การประมวลผล และความจุของหน่วยความจำของโนดตรวจรู้ ทำให้เครือข่ายประเภทนี้จำเป็นต้องมีการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ หรือเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีของเครือข่ายในกรณีที่โนดตรวจรู้สามารถเคลื่อนที่ได้ นั่นทำให้เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จุดประสงค์ในการออกแบบเครือข่าย คือ ทำให้สามารถรวบรวมข้อมูลได้ในขณะเดียวกันต้องสามารถทำงานได้ยาวนานที่สุดโดยนำเทคนิคการจัดการพลังงานมาใช้ในเครือข่าย

จากงานวิจัยของ Al-Karaki, J. N., and Kamal, A. E. (2004) [5] กล่าวว่าจากการสำรวจงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมานั้น สามารถจำแนกโพลโทคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางซึ่งจำแนกตามโครงสร้างของเครือข่าย (network-structure-based protocols) ได้ดังนี้

1) การหาเส้นทางแบบแบนราบ (flat-based routing) สำหรับเครือข่ายแบบแบนราบจะเป็นการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ โดยแต่ละโนดจะถูกกำหนดหน้าที่เหมือนกัน และแต่ละโนดจะร่วมมือกันในการทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล เนื่องจากโนดในเครือข่ายที่มีจำนวนมาก จึงไม่สามารถกำหนด ID ทั้งหมด (global identifier) ให้กับโนดตรวจรู้แต่ละโนดได้ ดังนั้นในการพิจารณาข้อมูลจะมีการหาเส้นทางแบบ data-centric โดยสถานีฐานจะส่งการชักถาม (queries) ไปยังบริเวณที่แน่นอน และรอจนกว่าจะได้รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณที่ส่งการชักถามออกไป ดังนั้นข้อมูลจะถูกร้องขอผ่านการชักถาม โพลโทคอลที่จัดว่ามีการหาเส้นทางแบบ data-centric เช่น โพลโทคอล SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) และ directed diffusion เป็นต้น

2) การหาเส้นทางแบบลำดับชั้น (hierarchical-based routing) หรือวิธีการหาเส้นทางโดยใช้พื้นฐานของการจัดคลัสเตอร์ เป็นโพลโทคอลที่ดั้งเดิมแล้วถูกใช้ในเครือข่ายแบบไร้สาย เป็นเทคนิคพิเศษที่มีข้อได้เปรียบที่ทำให้เครือข่ายสามารถปรับขยายได้ และช่วยให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น โพลโทคอลนี้จะพิจารณาจากโนดที่มีพลังงานมากกว่าเพื่อใช้ในการดำเนินการ และส่งข้อมูล จะเรียกโนดนี้ว่า คลัสเตอร์เฮด ในขณะที่จะใช้โนดที่มีพลังงานน้อยกว่าทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล โพลโทคอลนี้จะทำให้เครือข่ายมีการใช้พลังงานลดลงโดยการให้คลัสเตอร์เฮดที่มีหน้าที่ในการรวบรวมข้อมูล เพื่อลดจำนวนข้อมูลที่จะถูกส่งไปที่สถานีฐาน การหาเส้นทางแบบลำดับชั้นจะแบ่งออกเป็นสองชั้น ได้แก่ ชั้นที่ 1 จะทำการเลือกโนดที่จะทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด และชั้นที่สองทำหน้าที่ในการหาเส้นทาง เทคนิคส่วนใหญ่ในการหาเส้นทางด้วยวิธีนี้นั้นจะไม่ได้ใช้ในการหาเส้นทาง แต่จะเป็นการหาว่าต้องส่งต่อไปที่

โหนดใด และเมื่อไรที่จะส่งข้อมูล ประมวลผลข้อมูล หรือรวบรวมข้อมูล เช่น โพลโทคอล LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), โพลโทคอล PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems), TEEN (Threshold-Sensitive Energy Efficient Protocols) เป็นต้น

3) การหาเส้นทางแบบยึดตำแหน่ง (location-based routing) ในการหาเส้นทางแบบนี้ นั้นโหนดตรวจรู้จะถูกกำหนดตำแหน่งโดยสามารถหาระยะทางระหว่างโหนดได้จากการประมาณค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ โดยโหนดจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน ซึ่งการหาตำแหน่งของโหนดนั้นสามารถทราบได้จากการเชื่อมต่อกับดาวเทียมโดยใช้ GPS (Global positioning system) เพื่อประหยัดพลังงาน วิธีการหาตำแหน่งของโหนดจะกำหนดให้โหนดตรวจรู้อยู่ในโหมดพักการทำงาน (idle mode) ถ้าโหนดไม่ได้ทำหน้าที่ในการตรวจจับข้อมูล ตัวอย่างของโพลโทคอลในกลุ่มนี้ได้แก่ GAF (Geographic adaptive fidelity), GEAR (Geographic and energy aware routing) เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วโพลโทคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ถ้าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบมีค่าที่แน่นอน โดยสามารถควบคุมให้อยู่ภายใต้เงื่อนไข และในระดับพลังงานที่สามารถใช้งานได้ นอกจากโพลโทคอลทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาแล้ว ก็ยังมีโพลโทคอลอื่น ๆ อีก ได้แก่ โพลโทคอล multipath-based, query-based, negotiation-based, QoS-based หรือ coherent-based และนอกจากนี้ยังสามารถจำแนกโพลโทคอลออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ proactive, reactive, และ hybrid ขึ้นอยู่กับวิธีการในการหาเส้นทางจากต้นทางไปที่ปลายทางโดยโพลโทคอลแบบ proactive ทุก ๆ เส้นทางจะถูกคำนวณก่อนการทำงาน ขณะที่โพลโทคอล reactive การหาเส้นทางจะขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน และโพลโทคอลแบบ hybrid จะเป็นการผสมของทั้งแบบ proactive และ แบบ reactive นอกจากนี้ยังมีโพลโทคอลในการหาเส้นทางแบบอื่น ๆ อีก เรียกว่า cooperative ในการหาเส้นทางแบบ cooperative นั้น โหนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปที่โหนดศูนย์กลาง (central node) ซึ่งเป็นแหล่งที่มีการรวบรวมข้อมูล และจะเป็น โหนดที่มีความสามารถในการประมวลผล ด้วยเหตุนี้จึงช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการหาเส้นทาง

ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาเส้นทางเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นั้น มีงานวิจัยไม่น้อยที่ให้ความสนใจกับการแก้ปัญหาของการหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยงานวิจัยต่าง ๆ ได้มีอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่งานวิจัยจะให้ความสำคัญกับการทำให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุด เพื่อทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด หลาย ๆ งานวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองเครือข่ายที่ต่างกัน ได้แก่ วิธีการจัดคลัสเตอร์ให้กับเครือข่าย วิธี data-centric วิธีการจัดสมดุลโหลด วิธีการรวบรวมข้อมูลเพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการหาเส้นทางมีรายละเอียดของงานวิจัยต่าง ๆ ที่มีการนำเสนออัลกอริทึมในการหาเส้นทางดังนี้ งานวิจัยของ Aquino-Santos, R., Villas nor-

Gonzalez, L. A., Licea V. R., Cardenas O. A., and Block A. E. (2009) นำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวิธีการในการหาเส้นทางที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ วิธี source วิธี shortest path วิธีแบบลำดับชั้น (hierarchical) และ วิธี geographic เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในเครือข่ายไร้สายแบบ ad-hoc และในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดย วิธี source ถูกนำมาใช้เพราะไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาโทโปโลยี ในขณะที่วิธี shortest path นั้นถูกนำมาใช้เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายในการหาเส้นทาง สำหรับวิธีลำดับชั้น และ geographic นั้นถูกเลือกใช้เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลจากตำแหน่งโหนดผ่านระบบติดตามตำแหน่ง เนื่องจากการใช้งานในหลาย ๆ แอปพลิเคชันนั้นต้องการตำแหน่งโหนดที่แม่นยำ โดยเฉพาะแอปพลิเคชันเกี่ยวกับสุขภาพ การทหาร การเกษตร หุ่นยนต์ และสิ่งแวดล้อม การดูแลโครงสร้าง เป็นต้น ส่วนการหา shortest path นั้นจะมีการนำอัลกอริทึมของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบ data-centric เช่น direct diffusion, rumor routing, gradient-based routing และ zigbee standard โดยงานวิจัยนี้จะใช้ผลจากการจำลองแบบในการวัดค่าประสิทธิภาพในแต่ละอัลกอริทึมที่ใช้ ซึ่งเมตริกซ์ที่ใช้ในการวัดสมรรถนะ (performance metrics) ได้แก่ ความล่าช้า (latency), end-to-end delay (EED), สัดส่วนการส่งแพ็คเกจ (packet delivery ratio), และ โหลดในการหาเส้นทาง (routing load) จากงานวิจัยของ Khan, M., Pandurangan, G., and Bhargava, B. (2003) เป็นการหาเส้นทางด้วยวิธี data-centric ให้กับข้อมูลในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีข้อจำกัดในเรื่องของพลังงาน โดยข้อมูลที่เข้ามาจะมาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งแล้วถูกรวบรวมไว้ที่โหนดระหว่างทาง (intermediate node) ซึ่งโหนดระหว่างทางนี้จะทำการลดปริมาณข้อมูลจำนวนมาก เพื่อลดพลังงานในการส่งข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบ และวิเคราะห์ส่วนประกอบของเครือข่ายที่ดีที่สุด และใช้วิธีการ data-centric เพื่อลดการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายทั้งที่เป็นการสุ่มตำแหน่งติดตั้ง โหนด และเครือข่ายที่เป็น การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดล่วงหน้า อีกทั้งงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าวิธีการ minimum spanning tree (MST) ว่าเป็นวิธีรวบรวมข้อมูลที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพในการหาเส้นทาง งานวิจัยของ Ranganathan, D., Pothuri, P. K., Sarangan, V., and Radhakrishnan S. (2010) [25] มีการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมาใช้ในการเฝ้าระวังแผ่นดินไหว และระดับของการปล่อยพลังงานบนปากปล่องภูเขาไฟซึ่งมีความอ่อนไหวต่อความล่าช้าสูง และจะต้องทำการส่งข้อมูลไปที่ศูนย์กลางที่คอยควบคุมภายในระยะเวลาการหน่วงเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยโหนดตรวจรู้จะต้องไม่ใช้พลังงานที่มากเกินไป เรียกอัลกอริทึมนี้ว่า delay-constrained, energy efficient routing problem (DCEERP) เมื่อกำหนดขอบเขตของการหน่วงเวลาในหน่วยวินาทีแล้ว หน้าที่ของอัลกอริทึม คือ จะต้องหาเส้นทางจากโหนดตรวจรู้ไปที่ปลายทางโดยใช้พลังงานให้น้อยที่สุด นั่นคือระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลตามเส้นทางนั้นจะต้องไม่เกินระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้

มีการพิจารณาวิธีการในการหาเส้นทางที่มีการควบคุมพลังงาน และใช้แบบจำลองของความล่าช้าในการเข้าถึงข้อมูลเช่นเดียวกับที่ใช้ในชั้น MAC ของมาตรฐาน 802.11 เพื่อแก้ปัญหาของอัลกอริธึม DCEERP

2.5 แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path-loss model)

เนื่องจากความซับซ้อนของการแพร่กระจายสัญญาณจึงทำให้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายวิธีการสูญเสียในธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองที่ใช้นั้นจะได้ออกมาจากการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน หรือได้จากการวัดจริง เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอุปกรณ์ภาคส่งนั้นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีความหลากหลาย ซึ่งอาจทำให้สัญญาณถูกลดทอน หรือเกิดการจางหายได้ ดังนั้นในการออกแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐาน ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองในการคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่ภาครับรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายจากหนังสือ Wireless Communications (Goldsmith, A. 2007) [11] มาคำนวณหาค่าความแรงสัญญาณที่โนดแต่ละโนดในเครือข่ายรับได้ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3) ดังนี้

$$P_r = P_t K \left[\frac{d_0}{d} \right]^\gamma \quad (2.1)$$

จาก (2.1) เป็นสมการที่แสดงการคำนวณพลังงานที่ภาครับ ซึ่งแปลงเป็นค่าการลดทอนในหน่วยเดซิเบล (decibel : dB) ได้ดังนี้

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + K (dB) - 10\gamma \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (2.2)$$

โดยที่ P_r คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ภาครับรับได้ (dBm)

P_t คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ภาคส่ง (dBm)

γ คือ เลขชี้กำลังวิธีการสูญเสีย (path-loss exponent)

d คือ ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ (m)

d_0 คือ ระยะทางอ้างอิงในสนามระยะไกลของสายอากาศ (m)

K คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสายอากาศ และการลดทอนเฉลี่ยของช่องความถี่

โดยค่า K, d_0 และ γ นั้นจะหาได้จากการวิเคราะห์ หรือใช้แบบจำลองที่ได้จากการวัดจริง แบบจำลองนี้โดยทั่วไปจะถูกตั้งก็ต่อเมื่อ ระยะทางในการสื่อสาร $d > d_0$ เมื่อ d_0 มีค่าอยู่ในช่วง

1-10 เมตร และอยู่ภายในอาคาร (indoor) และมีค่าในช่วง 10-100 เมตร เมื่ออยู่นอกอาคาร (outdoor) เมื่อ

$$K(dB) = 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d_0} \quad (2.3)$$

โดยที่ λ คือ ค่าความยาวคลื่น (m)

ค่า γ นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจาย สำหรับการแพร่กระจายในอวกาศว่าง (free-space) หรือ แบบจำลองสองทิศทาง (two-ray model) นั้นค่าเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียจะมีค่าเท่ากับ 2 หรือ 4 ตามลำดับ จากหนังสือ Wireless communications (Rappaport T.S. 1996) [26] กล่าวไว้โดยทั่วไปค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 เนื่องจากค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียนี้อาจมีความซับซ้อนขึ้นไปตามสภาพแวดล้อม เช่น มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 6 เมื่ออยู่ในพื้นที่เขตเมือง (urban area) ที่มีความหนาแน่น จากงานวิจัยของ Erceg, V., Greenstein, L. J., Tjandra, S. Y., Parkoff, S. R., Gupta, A., Kulic, B., Julius, A. A., and Bianchi, R. (1999) กล่าวไว้ว่าค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียนั้นจะหาได้จากแบบจำลองที่ใช้พื้นฐานจากการวัดค่าซึ่งต้องพิจารณาความถี่และความสูงของสายอากาศ เป็นหลัก อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียที่เหมาะสมนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองที่น้อยที่สุด (minimum mean square error : MMSE)

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียเท่ากับ 4 โดยอ้างอิงมาจากแอปพลิเคชันที่ใช้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในการตรวจจับการรั่วไหลของก๊าซในเมืองถ่านหินจากงานวิจัยของ Zhou, G., Zhu, Z., Chen, G., and Hu, N. (2009) โดยพิจารณาอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบสร้างเครือข่ายในย่านความถี่ 2.4 GHz และใช้ระยะทางอ้างอิงในระยะไกลของสายอากาศเท่ากับ 2 เมตร เพื่อจำกัดระยะในการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ (transmission range) ให้มีค่าไม่เกิน 71 เมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ	2.4 GHz
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	32 mW (18 dBm)
ระยะอ้างอิง	2 m.
ครรชนิการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4

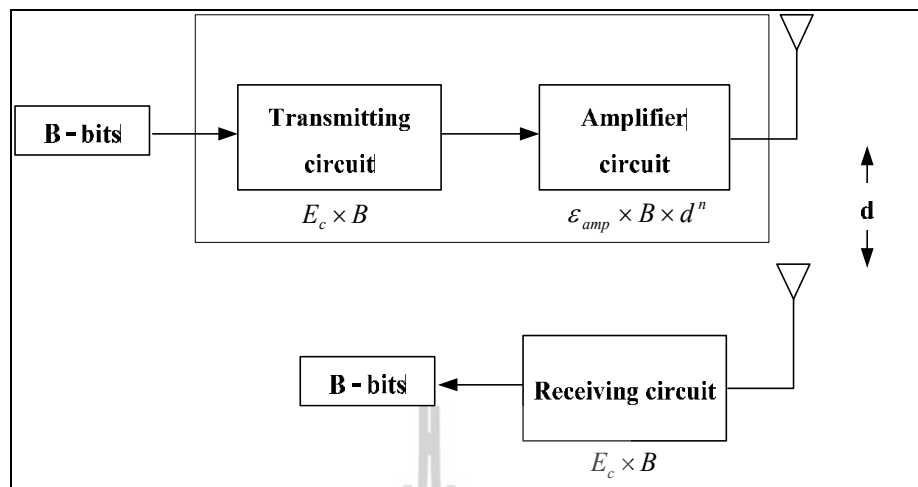
งานวิจัยนี้ได้ใช้โครงสร้างแบบเมช คือมีการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ได้ โดยที่โนดตรวจรู้สามารถรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดข้างเคียง และทำการส่งข้อมูลต่อให้กับสถานีถ่ายทอด หรือ สถานีฐาน ในการออกแบบเครือข่ายนั้นจะใช้แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายในการคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ เพื่อเป็นการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกโนดในเครือข่าย และยังคงคำนึงถึงพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ ดังนั้นจึงมีการนำสถานีถ่ายทอดมาช่วยในการรับและส่งต่อข้อมูลไปที่ปลายทาง ซึ่งการทำงานของสถานีถ่ายทอดนั้นเทียบได้กับการทำงานแบบ FFD (full function device) คือ สถานีถ่ายทอดสามารถสื่อสารกับสถานีถ่ายทอดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะสื่อสารของตัวมันได้ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถรับข้อมูลจาก end device ซึ่งก็คือ โนดตรวจรู้ได้อีกด้วย โดยสถานีถ่ายทอดจะทำหน้าที่เป็นโนดระหว่างทาง (intermediate node) ในการส่งต่อข้อมูลจากโนดตรวจรู้โดยใช้การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (multihop path)

2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ (Energy consumption model)

พลังงานเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย การออกแบบโครงสร้างเครือข่าย เพื่อให้การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานยิ่งขึ้น ซึ่งในส่วนพลังงานของโนดตรวจรู้นั้นจะใช้ในการดำเนินการเกี่ยวกับการตรวจจับข้อมูล (sensing) การติดต่อสื่อสาร (communication) และการประมวลผลข้อมูล (data processing)

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายพลังงานของโนดตรวจรู้จะมีทั้งแบบที่สามารถเติมพลังงานได้ (chargeable) และแบบที่ไม่สามารถเติม หรือเปลี่ยนได้ (non-rechargeable) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน เช่น โนดตรวจรู้บางชนิดอาจใช้สารจำพวก นิกเกิล-แคดเมียม (nickel-cadmium : NiCd), นิกเกิล-ซิงค์ (nickel-zinc : NiZn), นิกเกิล-เมทอล ไฮไดรด์ (nickel metal hydride : Nimh) และ ลิเทียมไอออน (lithium-Ion) แต่ที่พบเห็นกันโดยทั่วไปนั้นส่วนใหญ่โนดตรวจรู้จะใช้พลังงานจากสารที่มีลิเทียมเป็นส่วนประกอบ เช่น ถ่านอัลคาไลน์ AA หรือ Li-AA อย่างไรก็ตามเนื่องจากความก้าวหน้าในปัจจุบันได้มีการใช้แหล่งจ่ายพลังงานของโนดตรวจรู้จากเซลล์สุริยะ, เทอร์โมเจเนอเรเตอร์ (thermogenerator) หรือ พลังงานจากการสั่นสะเทือน (vibration energy) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบจำลองในการคำนวณพลังงานจากงานวิจัยของ Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan (2000) [14] ซึ่งเป็นแบบจำลองสัญญาณวิทยุลำดับที่หนึ่ง (first order radio model) ซึ่งการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ไร้สายนั้น จะประกอบไปด้วยพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล และพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโน้ตครวรู้

2.6.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง

จากรูปที่ 2.6 ในส่วนของวงจรภาคส่งเมื่อได้รับแพ็คเกจข้อมูลจำนวน B บิตเข้ามาแล้ว วงจรภาคส่งจะต้องใช้พลังงานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (transmitting circuit) เท่ากับ E_c คือ พลังงานต่อบิตที่ใช้ในการทำงานของวงจรภาคส่ง (เช่นเดียวกับกับวงจรภาครับ) ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 nJ/bit ถัดมาเป็นพลังงานในวงจรภาคขยาย (amplifier circuit) ใช้พารามิเตอร์ ϵ_{amp} คือ ค่าคงที่ในส่วนของภาคขยาย กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 nJ/bit/m^n จะเห็นว่าในส่วนของวงจรภาคขยายนี้ การใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับ ดังนั้นถ้าระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับอยู่ไกลมาก วงจรก็จะต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลมากขึ้นตามไปด้วย และเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสียจากระยะทางแทนด้วยสัญลักษณ์ n ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 6 ซึ่งมีค่าเป็นไปตามลักษณะสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ภายในอาคารที่มีกำแพงมาก จะใช้ค่าเท่ากับ 4 หรือถ้าพิจารณาว่าไม่มีสิ่งกีดขวาง ก็จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 เป็นต้น ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล แสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$E_{TX}(B, d) = (E_c \times B) + (\epsilon_{amp} \times B \times d^n) \quad (2.4)$$

2.6.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ

เนื่องจากในส่วนของภาครับนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลอย่างเดียว ดังนั้นจึงมีการคิดพลังงานเพียงอย่างเดียว นั่นคือพลังงานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ E_c เป็นพลังงานต่อบิตที่ใช้ในการทำงานของวงจรภาครับเท่านั้น มีค่าเท่ากับ 50 nJ/bit แสดงได้ดังสมการที่ (2.5)

$$E_{RX}(B) = E_c \times B \quad (2.5)$$

งานวิจัยนี้จะอ้างอิงค่าพลังงาน และจำนวนบิตข้อมูล จากงานวิจัยของ Azad, A.P. and Chockalingam, A. (2006) [7] ซึ่งมีการส่งข้อมูลเป็นรอบ โดยในแต่ละแพ็คเกจนั้นจะมีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 200 บิต และใช้ค่าพารามิเตอร์ของพลังงานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ $E_c = 50 \text{ nJ/bit}$ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรรักษาขยาย $\varepsilon_{amp} = 0.1 \text{ nJ/bit/m}^2$ จะเห็นว่าการวิจัยนี้ใช้ค่าของเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสียเท่ากับ 2 เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่พิจารณาเครือข่ายขนาดเล็ก โดยมีพื้นที่ขนาด 900 ตารางเมตร (กว้าง 30 เมตร ยาว 30 เมตร) อีกทั้งยังไม่ได้คำนึงถึงแอปพลิเคชันที่จะนำไปใช้งาน และใช้จำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่าย 30 โหนด มีจำนวนสถานีฐานในเครือข่ายมากถึง 3 สถานีฐาน และกำหนดค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้เท่ากับ 0.05 จูล โดยที่รัศมีการทำงานของโนดตรวจรู้อยู่ที่ระยะ 10 เมตร เท่านั้น แต่เนื่องจากงานวิจัยเรานั้นได้พิจารณาพื้นที่ขนาดใหญ่กว่า (พื้นที่กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร) ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางค่า ได้แก่ ค่าเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสีย และค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ไว้สอยให้มีค่าที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยค่าของเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสียนั้นได้กำหนดให้มามีค่ามากขึ้น เนื่องจากโนดตรวจรู้มีระยะทางห่างกันมาก อีกทั้งยังได้พิจารณาแอปพลิเคชันที่จะนำไปใช้งาน และแบบจำลองวิธีการสูญเสียเพิ่มขึ้นด้วย เพื่อเป็นการรับประกันการรับและ ส่งข้อมูลระหว่าง โหนดแต่ละชนิดในเครือข่าย เพื่อให้เกิดความถูกต้องและเหมาะสมในทางปฏิบัติมากขึ้น

2.6.3 การคำนวณค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ไร้สาย

เนื่องจากพลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอายุการใช้งานของเครือข่าย คือ โหนดตรวจรู้ยังมีพลังงานมากก็จะสามารถดำเนินการได้ในระยะเวลาที่ยาวนานยิ่งขึ้น สำหรับการออกแบบพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาแหล่งจ่ายพลังงานจากถ่านอัลคาไลน์เออร์ไอเซอร์ AA ที่มีความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน ที่มีความจุของปริมาณประจุ (capacity) ในถ่านเท่ากับ 2850 mAh (<http://data.energizer.com/PDFs/E91.pdf>) และได้มีการทดลองเพื่อวัดกระแสการทำงานของอุปกรณ์ Zigbee ในขณะที่มีการรับและส่งข้อมูลอย่าง

ต่อเนื่อง พบว่าวัดกระแสได้เท่ากับ 100 mA ดังนั้นจะคำนวณหาพลังงานโดยใช้สมการที่ (2.6) และ (2.7) ดังนี้

$$E = v \times i \times t_{lifetime} \quad (2.6)$$

โดยที่ E คือ พลังงาน (joules)

v คือ ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย (volt)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร (mA)

$t_{Lifetime}$ คือ อายุการใช้งานของแหล่งพลังงาน (sec)

$$\text{เมื่อ } t_{lifetime} = \frac{\text{Capacity of battery (mAh)}}{\text{Current of circuit (A)}} \quad (2.7)$$

ดังนั้น การคำนวณค่าพลังงานตั้งต้นของโน้ตตรวจรู้ มีขั้นตอน ดังนี้

1) คำนวณอายุการใช้งานของแหล่งจ่ายพลังงาน เมื่อทราบค่าความจุของแหล่งจ่ายเท่ากับ 2850 mAh และกระแสที่ใช้ในวงจรเท่ากับ 100 mA จากสมการที่ (2.7) จะได้

$$t_{lifetime} = \frac{2850\text{mAh}}{100\text{mA}} = 28.5\text{hours} = 102,600 \text{ sec} \quad (2.8)$$

2) หาพลังงานตั้งต้นของโน้ตตรวจรู้ เมื่อแหล่งจ่ายมีความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน และอายุการใช้งานเท่ากับ 102,600 วินาที จากสมการที่ (2.6) จะได้

$$\begin{aligned} E &= (1.5\text{volts} \times 4) \times (100\text{mA}) \times 102,600\text{sec} \\ E &= (0.6\text{Watts}) \times 102,600\text{sec} \\ E &= 61,560 \text{ Joules} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะกำหนดให้พลังงานตั้งต้นของโน้ตตรวจรู้ไร้สายมีค่าเท่ากับ 61,560 จูล

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิต

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.4 จะเห็นว่ามาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ดำเนินการในย่านความถี่ 2.4 GHz จากมาตรฐานที่กล่าวถึงใน IEEE Std 802.15.4-2006 กล่าวว่าที่ความถี่นี้จะใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ Offset quadrature phase shift keying (O-QPSK) ด้วยรูปร่างพัลส์แบบคลื่นรูปไซน์ (half-sine pulse) ซึ่งจะเท่ากับค่า shift keying ที่น้อยที่สุด ทำให้ได้อัตราเร็วชิพ(chip rate) เท่ากับ 2.0 Megachip/sec และ ใช้การแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแบบ Direct sequence spread

spectrum (DSSS) ประกอบไปด้วย 16-ary ที่ตั้งฉากกัน และมีการกำหนดค่า PN code เป็น 32-chip ทำให้ได้อัตราเร็วที่ 250 kbps (4 bit/symbol, 62.5 kilosymbols/sec)

เนื่องจากการทำงานภายในบริเวณเดียวกันระหว่างมาตรฐาน IEEE 802.15 ที่ประกอบไปด้วย มาตรฐาน IEEE Std 802.11b-1999, มาตรฐาน IEEE Std 802.15.1-2002, มาตรฐาน IEEE Std 802.15.3-(2003), และมาตรฐาน IEEE 802.15.4 Std-2006 นั้นทำให้เกิดการรบกวนระหว่างอุปกรณ์ที่มีการใช้งานในบริเวณเดียวกันได้ เช่น จากงานวิจัยของ Angrisani, L., Bertocco, M., Fortin, D., and Sona, A. (2008) [3] ที่มีการศึกษาการรบกวนกันระหว่างมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.15.4 เมื่อมีการใช้งานภายในบริเวณเดียวกัน โดยมีการวัดเมตริกซ์ของสมรรถนะในเทอมของ สัดส่วนของการสูญเสียแพ็คเกจ (packet loss ratio : PLR) นอกจากนี้จากหนังสือ Wireless sensor networks : technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) [27] กล่าวว่าผลกระทบจากลักษณะการเคลื่อนที่ของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ มีผลต่อการสื่อสารข้อมูล เช่นกัน เช่น สิ่งแวดล้อมภายในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นการหาตำแหน่งติดตั้ง โหนดตรวจรู้เพื่อลด สัญญาณแทรกสอดจะต้องติดตั้ง โหนดตรวจรู้ให้ห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอดของคลื่นวิทยุ (radio frequency interference : RFI) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ภาควงสัญญาณวิทยุอื่น ๆ อุปกรณ์ คอมพิวเตอร์ หรือสายเคเบิล เป็นต้น เนื่องจากโหนดตรวจรู้ อาจมีการเชื่อมต่อกับภาควงและส่ง เหล่านั้นได้ หรือ สิ่งแวดล้อมภายในโรงงานที่มีเหล็ก หรือ โครงสร้างของโลหะอาจจะเป็นสาเหตุ ของ multipath ได้ ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดกับสัญญาณที่แท้จริงได้ ทำให้ภาควงไม่สามารถ ได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง หรือไม่สามรถถอดรหัสได้ จะเห็นได้ว่าคุณภาพของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับ หลายปัจจัย เช่น ตำแหน่งของอุปกรณ์ รูปแบบการแพร่กระจายของสัญญาณ ผลกระทบของ multipath จากวัตถุข้างเคียงที่ส่งผลทำให้พลังงานที่ได้รับมีความแปรปรวน หรือในกรณีที่อุปกรณ์ ไม่มีการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมเดียวกันนี้อาจเกิดการจางหายของสัญญาณได้เนื่องจากการ เคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่รอบ ๆ เช่น ถ้าพิจารณาแอปพลิเคชันที่มีการใช้งานภายในอาคารปัจจัยที่ ส่งผลต่อสัญญาณที่ได้รับ ได้แก่ วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น ฝาผนัง พื้น หรือการเคลื่อนที่ผ่าน ของคน ดังนั้นในการออกแบบเครือข่ายจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้โดยใช้เทคนิคที่จะทำให้ อัตราความผิดพลาดบิต (bit error rate : BER) ข้อมูลอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งจากมาตรฐาน IEEE Std 802.15.4-2006 นั้นกล่าวว่า ผลของอัตราความผิดพลาดบิตนั้นได้มาจากแบบจำลองจากการ วิเคราะห์ (analytical model) จากมาตรฐาน IEEE Std 802.15.2-2003 ซึ่งได้มีการแสดงวิธีการ คำนวณไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 รวมทั้งสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio : SNR) ในหัวข้อที่ 5.3.6 ซึ่งใน มาตรฐาน IEEE Std 802.15.4-2006 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความผิดพลาดบิต กับค่า

สัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของมาตรฐานต่าง ๆ ได้แก่ มาตรฐาน IEEE 802.11b-1999, มาตรฐาน IEEE 802.15.3, มาตรฐาน IEEE 802.15.1-2002 และมาตรฐาน IEEE 802.15.4-2006 ดังรูปที่ 2.7

จากหนังสือ Wireless sensor networks: technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) [27] กล่าวว่า ระดับความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ยอมรับได้สำหรับการสื่อสารข้อมูล (data communication) จะมีค่าเท่ากับ 10^{-6} ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากรูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อมีการใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ภายในบริเวณเดียวกันกับมาตรฐาน IEEE 802.11b-1999 นั้น เมื่อต้องการให้ระดับของอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-6} จะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนประมาณ 2 dB ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า จุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 2 dB ซึ่งค่านี้จะนำไปใช้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

สำหรับการคำนวณค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (thermal noise) ซึ่งใช้ในการพิจารณาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ส่งผลต่อการรับ และส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับ โนดตรวจรู้ โนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และ โนดตรวจรู้กับสถานีฐาน จากหนังสือ Telemetry principles (Patranabis D. 1999) [24] ได้แสดงในการคำนวณค่าสัญญาณรบกวน ไว้ดังสมการที่ (2.10) ดังนี้

$$N = kBT \quad (2.10)$$

โดยที่ N คือ ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

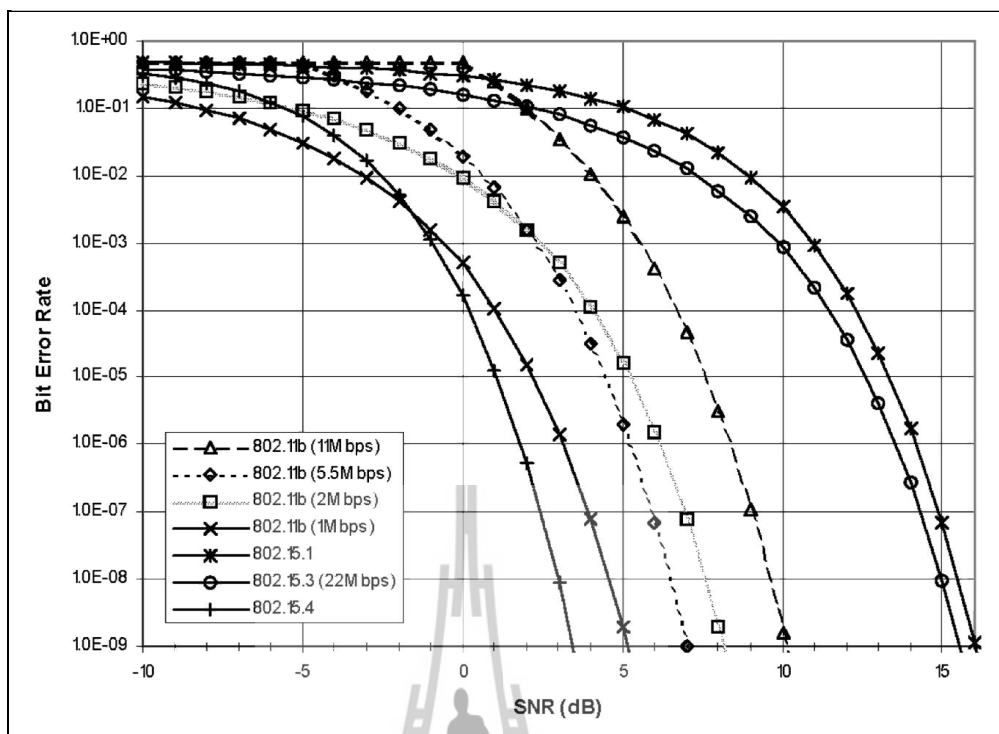
k คือ ค่าคงที่ของ Boltzman's มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

B คือ แบนด์วิดท์ที่ภาครับ จากมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 5 MHz

T คือ อุณหภูมิห้อง หน่วยเคลวิน (K)

เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการที่ (2.10) จะได้

$$N = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \times 5 \times 10^6 \frac{1}{\text{s}} \times (30^\circ \text{C} + 273.15) \text{K} = 2.0917 \times 10^{-14} \text{ Watts} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิต กับ
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

แปลงหน่วยวัตต์ (*Watt*) ให้กลายเป็น *dBW* ดังนี้

$$N(dBW) = 10 \log_{10}(2.0917 \times 10^{-14}) = -136.794 \text{ dBW} \tag{2.12}$$

แปลงหน่วย *dBW* ให้กลายเป็น *dBm* โดย

$$X_{dBm} = X_{dBW} + 30 \tag{2.13}$$

ดังนั้นจะได้

$$N(dBm) = -136.794 + 30 = -106.794 \text{ dBm} \tag{2.14}$$

ซึ่งค่าสัญญาณรบกวนจากสมการที่ (2.14) นี้ จะเป็นค่าของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากความร้อนภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะใช้ในการคำนวณในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary Integer Linear Programming : BILP)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวางที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) เพื่อใช้ในการออกแบบปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ของฟังก์ชันเป้าหมายเชิงเส้น (linear objective function) ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดเชิงเส้นต่าง ๆ (linear constraints) จอร์จ บี ดานซิก (George B. Dantzig) นับว่าเป็นบิดาของการโปรแกรมเชิงเส้น เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มในการสร้างรูปแบบทั่วไปของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น และพัฒนาวิธีการอย่างมีระบบในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งมีการเริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 เป็นต้นมา จนถึงทุกวันนี้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าวยังคงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ (simplex method) ในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งปัจจุบันได้มีการใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างกว้างขวาง และโปรแกรมสำเร็จรูปก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่นเดียวกันทั้งในทางธุรกิจและอุตสาหกรรม รูปแบบทั่วไปของการโปรแกรมเชิงเส้นนั้น เป็นรูปแบบที่สามารถปรับใช้ได้กับปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมาย อาจอยู่ในรูปกำไร ค่าใช้จ่าย จำนวนผลผลิตที่มากที่สุด เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปของข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่ ข้อจำกัดทางการตลาด ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เป็นต้น จากหนังสือการโปรแกรมเชิงเส้น (ประกอบ จิริกิติ 2535) ได้กล่าวถึง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้น ดังนี้

- 1) ปัญหาทางด้านการผลิต (product mix problem) เป็นการพิจารณาปริมาณสินค้าที่จะทำการผลิต เพื่อใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น เครื่องจักร วัตถุดิบ แรงงาน ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด
- 2) ปัญหาการขนส่ง (transportation problem) เป็นการพิจารณาหาปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจากแหล่งผลิต ไปยังผู้บริโภค หรือปลายทางเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำที่สุด หรือส่งถึงปลายทางได้เร็วที่สุด
- 3) ปัญหาการเลือกสื่อโฆษณา (media selection) เป็นการพิจารณาเลือกสื่อโฆษณาชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ข้อมูลหรือข่าวสารที่ต้องการเผยแพร่ออกสู่เป้าหมายเป็นจำนวนมากที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายในการโฆษณาน้อยที่สุด เป็นต้น

2.8.1 รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น

รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้นมีสองลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่พิจารณานั้นเป็นปัญหาการหาค่าสูงสุด (maximization) หรือเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุด (minimization) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.15) ถึง (2.17) ดังนี้

วัตถุประสงค์ หาค่าสูงสุดของ หรือหาค่าที่ต่ำที่สุด

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.15)$$

ภายใต้ข้อจำกัด

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \end{aligned} \quad (2.16)$$

และ

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.17)$$

โดยที่

x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable) หรือ จำนวนหน่วยของกิจกรรมที่ j ที่ตัดสินใจ
ทำ เช่น อาจหมายถึงจำนวนหน่วยของสินค้าที่ j ที่จะทำการผลิต $j=1,2,\dots,n$

c_j คือ ผลตอบแทน (profit) ที่ได้จากการตัดสินใจทำกิจกรรมที่ j ต่อหนึ่งหน่วย เช่น ใน
กรณีของการผลิตสินค้าจำนวน c_j จะหมายถึงกำไรที่ได้จากการจำหน่ายสินค้าชนิดที่ j หนึ่งหน่วย
 $j=1,2,\dots,n$

a_{ij} คือ จำนวนทรัพยากรชนิดที่ i ที่จะใช้ในการทำกิจกรรมที่ j หนึ่งหน่วย (resource
consumption rate) $i=1,2,\dots,m$ และ $j=1,2,\dots,n$

b_i คือ จำนวนทรัพยากร (resource) ชนิดที่ i ที่มีอยู่เพื่อใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ
 $i=1,2,\dots,m$

ในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐานนี้ เราต้องการที่จะหาค่าของตัวแปรตัดสินใจ
 x_j ต่าง ๆ ว่ามีค่าเท่ากับเท่าไรจึงจะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงสุด หรือต่ำที่สุด โดยที่ตัว
แปรตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรทั้ง m ข้อจำกัด คือใช้
ทรัพยากรไม่เกินปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ และต้องมีค่ามากกว่า และไม่เป็นจำนวนลบ (non-
negative) สำหรับค่า a_{ij}, b_i, c_j นั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าอยู่แล้ว

2.8.2 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน

จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ สามส่วน ดังนี้

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ต้นทุน กำไร เพื่อต้องการให้ได้มาซึ่งเป้าหมายที่ทำให้เกิดค่าสูงสุด หรือค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่
(2.15)

2) สมการข้อจำกัดของปัญหา หรือ เงื่อนไข (constraints) คือ ข้อจำกัดของปัญหาในด้านทรัพยากร หรือปัจจัยต่าง ๆ โดยแต่ละเงื่อนไขจะมีความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น (linear equation) หรือ อสมการเชิงเส้น (linear inequality) ดังสมการที่ (2.16)

3) ตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่ใส่เข้าไปในระบบ และต้องการหาคำตอบ ดังสมการที่ (2.17)

2.9 ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization)

การทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์มีความสำคัญอย่างมากสำหรับผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับ การตัดสินใจปัญหาที่มีความหลากหลาย เนื่องจากในทางปฏิบัติปัญหาหลาย ๆ อย่างมักจะ ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์เสมอ และมักเป็นปัญหาที่มีวัตถุประสงค์ที่ แปรผกผันกัน ซึ่งหากทำการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากจะทำให้ได้ คำตอบเพียงแง่มุมเดียวเท่านั้น เช่น การออกแบบอุปกรณ์อย่างหนึ่งนั้นมีวัตถุประสงค์ที่ต้องคำนึงถึง คือ ต้องการให้น้ำหนักของแบตเตอรี่มีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่ต้องการให้อุปกรณ์สามารถใช้งาน ได้ในระยะเวลาที่ยาวนานเช่นกัน จะเห็นได้ว่าปัญหานี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องพิจารณาในการ ออกแบบสองปัจจัยพร้อมกันเนื่องจากไม่มีผลเฉลยใดเลยที่จะเป็นค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ ที่จะพิจารณาเซตของผลเฉลยที่ดีที่สุดที่มีการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างกัน งานวิจัยทางด้าน เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless sensor networks : WSNs) จะพิจารณาปัญหาการทำให้ดีที่สุด (optimization) ตามวัตถุประสงค์ของการแก้ปัญหาที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่เน้นเทคนิคที่ใช้ในการ ออกแบบเครือข่ายโดยทั่วไปจะเป็นการออกแบบการทำให้ดีที่สุดเพียงวัตถุประสงค์เดียว (single objective) เท่านั้น แล้วนำวัตถุประสงค์อื่นๆ ที่ต้องการแปลงเป็นเงื่อนไข หรือแปลงปัญหาที่ ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นปัญหาที่มีเพียงวัตถุประสงค์เดียวโดยใช้ความสัมพันธ์ ของค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ของวัตถุประสงค์ที่สัมพันธ์กัน วิธีการผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักจะแสดง ให้เห็นการแลกเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ที่สนใจ ทำให้ได้มาซึ่งผลเฉลยสำหรับ ปัญหาการทำให้ดีที่สุด วิธีการที่ใช้แปลงปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ให้ กลายเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวที่มีการศึกษาในงานวิจัยต่างๆ มีหลายวิธี เช่น วิธีผลรวมค่า ถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method), วิธีแบ่งลำดับชั้น (Hierarchical method) เป็นต้น

2.9.1 วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยทำให้วัตถุประสงค์ที่สนใจเป็น บรรทัดฐาน (normalization) เดียวกัน คือ ทำให้วัตถุประสงค์นั้น ๆ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน แล้วนำค่าถ่วง

น้ำหนักมาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการนี้จะมีรูปแบบทั่วไป จากงานวิจัยของ Grodzevich, Oleksandr, O. and, Oleksandr, R. (2006) [20] แสดงดังสมการที่ (2.18)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^k w_i f_i(\tilde{x}) \\ \text{subject to} \quad & \tilde{x} \in \tilde{S} \end{aligned} \quad (2.18)$$

เมื่อ $w_i \geq 0$ สำหรับทุก ๆ $i=1, \dots, k$ และ $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ จะเป็น pareto optimal ได้ ก็ต่อเมื่อ $w_i > 0$

สำหรับทุก ๆ $i=1, \dots, k$ หรือผลเฉลยไม่เหมือนกันเลย

สำหรับวิธีการที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณานั้นเป็นบรรทัดฐาน จะแสดงได้ดังสมการที่ (2.19)

$$0 \leq \frac{f(x) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \leq 1 \quad (2.19)$$

โดยที่ $f(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการพิจารณา

f_{\min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด

f_{\max} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุด

ในกรณีนี้หลังจากที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สนใจถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้วจะทำให้วัตถุประสงค์มีค่าอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และไม่เกินหนึ่ง จากนั้นจะนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการพิจารณามาพล็อตกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างวัตถุประสงค์

จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithm (K. Deb 2009) [10] ได้กล่าวถึงข้อดีของวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ โดยสามารถใช้ได้กับปัญหาที่แสดงให้เห็นถึง pareto front แบบ convex ซึ่งวิธีการนี้รับประกันได้ว่าสามารถหาเซตของคำตอบที่ดีที่สุดได้ตลอดทั้ง front สำหรับข้อเสียของวิธีการนี้คือ หากนำมาใช้กับปัญหาที่มีลักษณะผสม เช่น ปัญหาแบบสองวัตถุประสงค์ที่ วัตถุประสงค์แรกต้องการหาค่าที่มากที่สุด แต่อีกวัตถุประสงค์หนึ่งต้องการหาค่าน้อยที่สุด แล้วจะต้องทำการแปลงให้เป็นวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งที่เหมือนกัน เป็นต้น

2.9.2 วิธีลำดับชั้น

เป็นวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยให้ผู้ใช้เป็นคนจัดลำดับความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นจะกำหนดให้วัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองลงมาเป็นเงื่อนไข ที่มีค่าตามการกำหนดของผู้ใช้ จึงทำ

ให้เหลือเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียว แสดงได้ดังสมการที่ (2.20) ในกรณีที่พิจารณาว่า f_2 มีความสำคัญมากกว่า f_1 ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} \min \quad & f_2 \\ \text{subject to} \quad & x \in \Omega \end{aligned} \quad (2.20)$$

เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะได้คำตอบที่ดีที่สุดเป็น f_2^* ถัดมาจะทำการแก้ปัญหา ดังแสดงในสมการที่ (2.21)

$$\begin{aligned} \min \quad & f_1 \\ \text{subject to} \quad & x \in \Omega \\ & f_2(x) \leq f_2^* + \varepsilon \end{aligned} \quad (2.21)$$

โดยที่ ε คือ ค่าคงที่ แสดงถึงการเพิ่มค่าขึ้นของวัตถุประสงค์ที่ 2

จ ก ห นั ง ลี อ Multi-objective optimization using evolutionary algorithm (K. Deb 2009) [10] ได้กล่าวว่าข้อดีของวิธีลำดับชั้น คือ การหาคำตอบที่ดีที่สุดบน pareto นั้นสามารถหาได้โดยเปลี่ยนค่า ε ซึ่งสามารถใช้ได้กับทั้งปัญหาแบบ convex และ nonconvex สำหรับส่วนของข้อมูลที่จำเป็นจากผู้ใช้นั้น อัลกอริทึมนี้จะมีความใกล้เคียงกับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก สำหรับข้อเสียของวิธีลำดับชั้นนั้นเนื่องจากการตอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่า ε ของผู้ใช้ ดังนั้นผู้ใช้จะเป็นผู้กำหนดค่าที่น้อยที่สุด หรือมากที่สุด อย่างไรก็ตามการนำวิธีลำดับชั้นมาใช้ในการแก้ปัญหาแบบ nonconvex นั้น ค่าคงที่ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นคำตอบที่ดีที่สุดอาจไม่ถูกเลือก หากผู้ใช้ไม่ได้ทำการเลือกค่า ε ในจุดนั้น ดังนั้นการกำหนดค่า ε ของผู้ใช้นั้นจึงอาจทำให้ไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดได้ ทั้ง ๆ ที่ปัญหานั้นสามารถหาคำตอบได้ และในกรณีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าสองวัตถุประสงค์นั้น จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากผู้ใช้ที่มากขึ้นเพื่อกำหนดค่า ε

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการทำให้ดีที่สุดแบบสองวัตถุประสงค์โดยวัตถุประสงค์แรก คือ เพื่อให้วิศวกรจรรยาใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และ วัตถุประสงค์ที่สอง คือ เพื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด เนื่องจากงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักแปลงจากสมการสองวัตถุประสงค์ให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาคำตอบที่น้อยที่สุด เปรียบเทียบกับวิธีลำดับชั้น ดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3

บทที่ 3

แนวคิดและวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการ ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอแนวคิดและวิธีออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว 3.3 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์ 3.4 การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด 3.5 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว 3.6 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สองวัตถุประสงค์ 3.7 การพัฒนาอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด และ 3.8 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ในการออกแบบให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดที่สำคัญของเครือข่ายประเภทนี้ นั่นคือ ข้อจำกัดในความเร็วของหน่วยประมวลผล ความจุของหน่วยเก็บข้อมูล และ ข้อจำกัดของแหล่งจ่ายพลังงาน

การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ไร้สายนั้น จะเกิดจากการใช้พลังงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการส่งข้อมูล และรับข้อมูล โดยในส่วนของภาคส่งนั้น พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะแปรผันตามจำนวนบิตข้อมูล และระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ ส่วนในวงจรของภาครับนั้น การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้จะแปรผันตามจำนวนบิตข้อมูลที่ได้รับจากภาคส่ง จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้จะขึ้นอยู่กับระยะทาง และจำนวนบิตข้อมูล ในหลายงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal, P. and Sivalingam, K. (2009) [23] และงานวิจัยของ Bari, A., Tang, D. and Jaekel, A. (2009) [8] ได้พยายามหาวิธีการลดการสิ้นเปลืองพลังงานของโนดตรวจรู้ โดยการเพิ่มโนดพิเศษในเครือข่าย ที่เรียกว่า โนดถ่ายทอด (Relay node) ซึ่งต่อไปในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า สถานีถ่ายทอด (Relay station : RS) ที่มีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ในเครือข่าย แล้วส่งต่อข้อมูลเหล่านั้นไปยังปลายทางต่อไป เพื่อช่วยแบ่งเบาการรับและส่งข้อมูลจำนวนมากที่เกิดขึ้นที่โนดตรวจรู้ และช่วยลดระยะทางในการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานของสถานีถ่ายทอดนั้นจะพิจารณาว่า สถานีถ่ายทอดจะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ (solar cell) และ มีแหล่งสำรองพลังงาน (energy

storage) คิดตั้งอยู่ที่สถานีถ่ายทอดอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้มีการพิจารณาในส่วนของการใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย เพื่อให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอายุการใช้งานของเครือข่ายนั้นขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยการนิยามอายุการใช้งานของโนดตรวจรู้ขึ้นอ้างอิงจากงานวิจัยของ Shi, Y., Hou, Y. T. and Efrat, A. (2009) [28] ซึ่งเป็นนิยามที่กล่าวว่า อายุการใช้งานของเครือข่ายนั้นเริ่มตั้งแต่เครือข่ายเริ่มมีการรับส่งข้อมูลจนกระทั่งโนดตรวจรู้โนดแรกหมดพลังงานลง และได้กำหนดให้โนดตรวจรู้มีการส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลให้โนดตรวจรู้หมดพลังงานลงอย่างรวดเร็ว และอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ส่วนในงานวิจัยของ Azad, A.P. and Chockalingam, A. (2006) [7] นั้นจะพิจารณาการส่งข้อมูลเป็นรอบ เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้ว อาจไม่มีความจำเป็นที่โนดตรวจรู้จะต้องตรวจจับข้อมูลตลอดเวลา และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้

ในการออกแบบการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาให้โนดตรวจรู้มีการรับและส่งข้อมูลเป็นแพ็คเกจ โดยโนดตรวจรู้จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเกจเป็นรอบ เพื่อให้มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากขึ้น และพิจารณาการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ว่า เมื่อโนดตรวจรู้ได้รับแพ็คเกจข้อมูลจากโนดตรวจรู้ก่อนหน้าแล้ว โนดตรวจรู้โนดนั้นจะมีกระบวนการบีบอัด และจัดเรียงข้อมูลที่ได้รับมาจากโนดก่อนหน้ารวมกับแพ็คเกจที่เกิดจากการตรวจจับข้อมูลของโนดนั้นก่อน แล้วจึงส่งแพ็คเกจข้อมูลนั้นต่อไป นอกจากนี้สิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบเครือข่ายประเภทนี้คือ ระยะของการรับส่งข้อมูล (transmission range) ของโนด ซึ่งเป็นระยะที่โนดตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปยังโนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐานได้

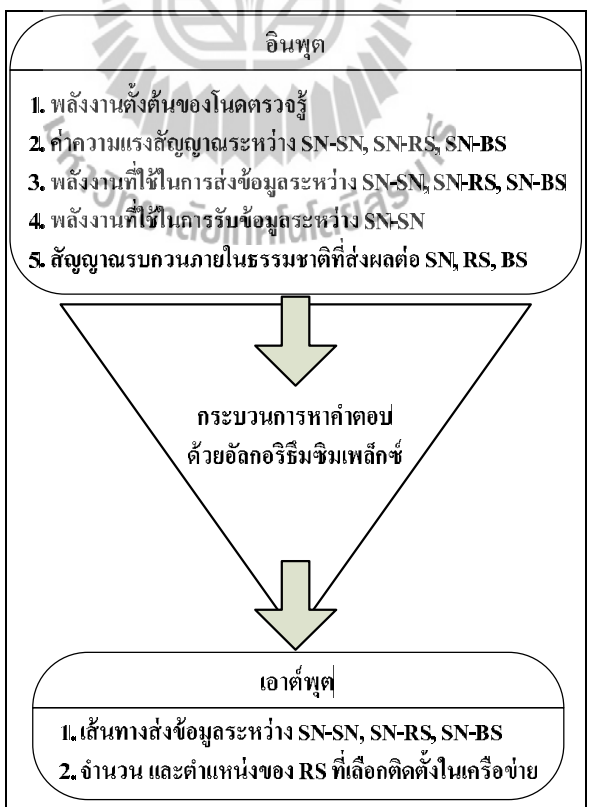
งานวิจัยนี้เน้นการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ดีที่สุดภายในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้และสถานีฐานในเครือข่ายติดตั้งอยู่ก่อนแล้ว เพื่อช่วยให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด และสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว

ในการออกแบบเครือข่ายของงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary integer linear programming : BILP) ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญคือ สมการวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข โดยค่าของตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งประกอบอยู่ในสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข จะมีค่าเพียงสองค่า คือ 0 หรือ 1 เท่านั้น

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนที่ 1 คือ ต้องการให้การใช้พลังงานรวมตลอดอายุการใช้งานของโนดตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ โหนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ก่อนหน้า และส่งข้อมูลไปที่โนดข้างเคียง ให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

และสมการเงื่อนไขเพื่อให้การสื่อสารในเครือข่ายโนดตรวจรู้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ เงื่อนไขการส่งข้อมูลระหว่างโนดแต่ละโนดในเครือข่าย นั่นคือ โหนดตรวจรู้จะต้องส่งข้อมูลให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน โหนดใดโนดหนึ่งเพียงโนดเดียวเท่านั้น เงื่อนไขที่รับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โหนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน นั่นคือความแรงสัญญาณที่ได้รับจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนด เงื่อนไขที่รับประกันค่าคุณภาพของสัญญาณ นั่นคือ ค่าความแรงสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โหนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และโนดตรวจรู้กับสถานีฐานต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่กำหนดเพื่อให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และเงื่อนไขเกี่ยวกับพลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้ คือ พลังงานรวมทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ทุก ๆ โหนดใช้ในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูล ตลอดอายุการใช้งานจะต้องไม่เกินค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้แต่ละโนด รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียว



รูปที่ 3.1 การทำงานของโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียว

3.3 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์

จากที่ได้ทราบถึงความสำคัญของการโปรแกรมเชิงเส้นมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 นั้น เป็นเพียงการกำหนดปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้พลังงานของโนคตรวู้ตลอดอายุการใช้งานเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วการออกแบบปัญหาหลาย ๆ อย่างมักต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ และมักจะเป็นปัญหาที่มีความสัมพันธ์อย่างแปรผกผันกัน ซึ่งหากทำการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากจะทำให้ได้คำตอบเพียงแง่มุมเดียวเท่านั้น เช่น การออกแบบอุปกรณ์อย่างหนึ่งนั้น มีวัตถุประสงค์ที่ต้องคำนึงถึงคือ ต้องออกแบบให้อุปกรณ์มีแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันก็ต้องการให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานที่สุดอีกด้วย จะเห็นได้ว่าปัญหานี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องพิจารณาในการออกแบบสองวัตถุประสงค์พร้อมกัน เนื่องจากในความเป็นจริงนั้น ไม่มีผลเฉลยใดเลยที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาเซตของผลเฉลยที่ดีที่สุดซึ่งต้องมีการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างกัน

งานวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาจากปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมา ส่วนใหญ่นั้นจะเป็นการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียว แล้วนำวัตถุประสงค์ข้ออื่นที่ต้องการแปลงเป็นสมการเงื่อนไขเท่านั้น และมีงานวิจัยบางงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Jia, J., Chen, J., Chang, G., Wen, Y. and Song, J. (2009) [17] นั้นได้พิจารณาวัตถุประสงค์สองวัตถุประสงค์พร้อมกัน คือ ได้พิจารณาให้โนคตรวู้อยู่ในโหมดทำงาน (active mode) ให้น้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน โดยกำหนดให้โนคตรวู้มีคุณสมบัติที่สามารถปรับระยะของการตรวจจับข้อมูล (sensing range) ได้ด้วยตัวมันเอง ในขณะเดียวกันก็ต้องการให้มีพื้นที่การครอบคลุมที่มากที่สุดด้วย แต่ยังไม่มียงานวิจัยใดเลยที่ทำการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยพิจารณางบประมาณในการลงทุนควบคู่ไปกับพลังงานที่โนคตรวู้ใช้ไปเพื่อดำเนินการตรวจจับข้อมูล

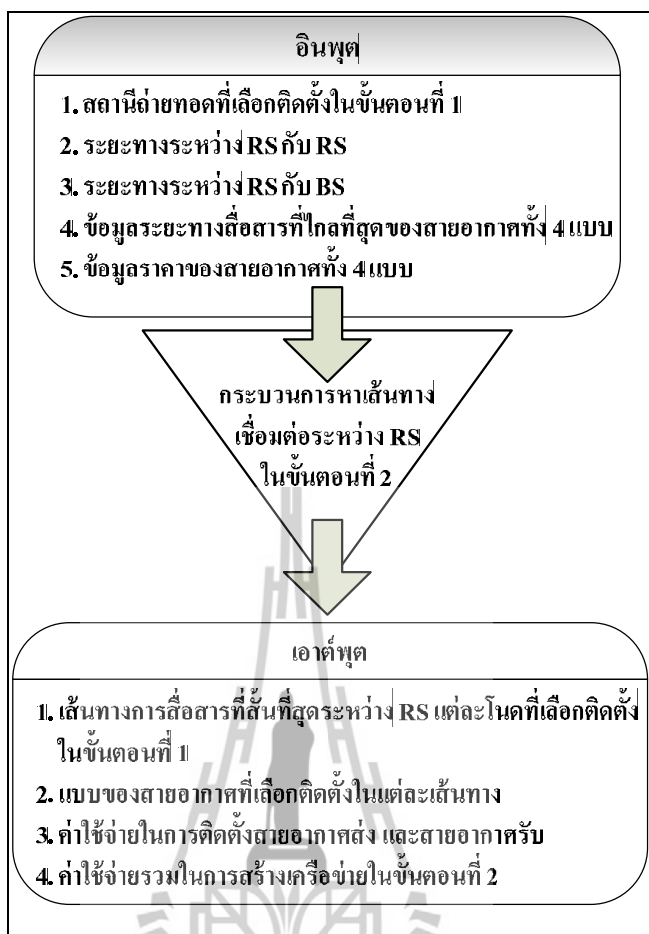
ดังนั้นในการศึกษาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์นี้ นอกจากผู้วิจัยจะได้ศึกษาวัตถุประสงค์แรกเช่นเดียวกับการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียวดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.1 แล้ว นั่นคือ ต้องการทำให้พลังงานที่โนคตรวู้ใช้ในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน อีกวัตถุประสงค์หนึ่งที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาคือ ต้องการทำให้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งมีค่าน้อยที่สุดด้วย

3.4 การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด

จากการกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว และการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์ ทำให้ได้คำตอบเป็นจำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่ต้องติดตั้งในเครือข่าย ซึ่งใช้เป็นข้อมูลอินพุตให้กับขั้นตอนต่อไป เพื่อใช้ในการออกแบบสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดทุกโหนดที่เลือกติดตั้ง และพิจารณาการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อจากสถานีถ่ายทอดไปยังสถานีฐานอีกด้วย

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเรื่องค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศเพื่อใช้ในการสื่อสาร และรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานด้วย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ นอกจากจะต้องให้ข้อมูลอินพุตเกี่ยวกับตำแหน่งของสถานีถ่ายทอด และตำแหน่งของสถานีฐานแล้ว ยังต้องให้ข้อมูลทางเลือกการเชื่อมต่อโหนดในเครือข่ายเข้าด้วยกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดด้วยหลักการของ minimum spanning tree โดยใช้ระยะทางระหว่างแต่ละโหนดในเครือข่ายเป็นข้อมูลอินพุตเพื่อสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างทุก ๆ โหนดเข้าด้วยกัน โดยหลักการนี้เป็นการหาระยะทางรวมที่สั้นที่สุด และไม่ทำให้เกิดลูปในเครือข่าย นั่นคือ ระหว่างโหนดสองโหนด ใด ๆ จะต้องมียังเส้นทางเดียว หลังจากที่ได้เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างทุก ๆ โหนดในเครือข่ายแล้วต่อมาก็จะพิจารณาเลือกชนิดของสายอากาศที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อใช้ในการสื่อสารในเส้นทางการเชื่อมต่อของแต่ละโหนด โดยข้อมูลที่จะใช้ในการเลือกชนิดของสายอากาศส่งคือ ระยะทางการเชื่อมต่อของแต่ละโหนด ซึ่งในการเลือกประเภทของสายอากาศส่งที่จะใช้ในการสื่อสารจะต้องทำการคำนวณหาระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่สายอากาศจะสามารถทำการสื่อสารได้ โดยในการคำนวณนั้นงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path loss model) เพื่อคำนวณหาระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่สายอากาศสามารถสื่อสารได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ของหัวข้อที่ 2.5

จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการติดตั้งสายอากาศส่ง ณ สถานีถ่ายทอดใด ๆ ที่มีการสร้างเส้นทางสื่อสารระหว่างกัน ซึ่งค่าใช้จ่ายจะขึ้นอยู่กับอัตราขยายของสายอากาศ และประเภทของสายอากาศที่เลือกใช้ในการสื่อสาร นอกจากนี้ยังมีการคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศภาครับ ณ สถานีถ่ายทอดทุกโหนดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย รวมทั้งค่าใช้จ่ายทั้งหมดในเครือข่ายที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ โดยขั้นตอนการทำงานของปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทำงานของปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด

สำหรับสายอากาศที่ใช้ในการรับข้อมูลซึ่งจะติดตั้งไว้ที่สถานีถ่ายทอดทุกโหนดที่ถูกติดตั้งจากขั้นตอนแรก และติดตั้งไว้ที่สถานีฐานนั้นจะพิจารณาเลือกใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (omnidirectional antenna) เพราะว่าเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติที่มีทิศทางการแพร่กระจายและรับคลื่นได้รอบทิศทาง 360 องศา ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการทำงานที่ต้องการ นั่นคือ ต้องการให้สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาจากโหนดตรวจรู้ ในขณะเดียวกันก็สามารถรับข้อมูลที่มาจากสถานีถ่ายทอดได้ด้วย และสำหรับสายอากาศที่ใช้ในการส่งข้อมูลนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) เพราะเป็นสายอากาศที่มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่ชัดเจน เหมาะกับการติดต่อระหว่างจุดต่อจุด (point-to-point) และสามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่าสายอากาศรอบทิศทางในระนาบเดียว เนื่องจากจะมีพลังงานในการแพร่กระจายคลื่นที่สูงที่สุดเพียงทิศทางเดียว ดังนั้นคุณสมบัตินี้จึงทำให้สายอากาศชนิดนี้มีสมรรถนะในการส่งและรับข้อมูลมากกว่าสายอากาศชนิดอื่น ๆ อีกทั้งสามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายอื่น ๆ ได้ดีอีกด้วย ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเลือกสายอากาศชนิดที่มี

ทิศทางเดี่ยวชนิดยาคิ (Yagi antenna) เนื่องจากต้องการให้สถานีถ่ายทอดสามารถทำการสื่อสารกับสถานีถ่ายทอดข้างเคียง และ/หรือ ระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานเท่านั้น

3.5 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียว

หัวข้อนี้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในขั้นตอนที่ 1 แบบที่ใช้สมการวัตถุประสงค์เดียว คือต้องการให้พลังงานรวมที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุด โดยที่สมการเงื่อนไขได้กำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการสื่อสารระหว่างโนดต่างๆ ในเครือข่าย ทั้งในเรื่องของคุณภาพสัญญาณ ความจุข้อมูล และพลังงานของโนด

ตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียวในขั้นตอนที่ 1 ประกอบด้วย เซต ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (constant parameters) ดังแสดงคำนิยามข้างล่างนี้ โดยตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวแปรไบนารี ซึ่งมีค่า 0 หรือ 1

เซตของตัวแปร :

I คือ เซตของโนดตรวจรู้

J คือ เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้

B คือ เซตของสถานีฐาน

ตัวแปรตัดสินใจ :

β_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j หรือ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ ไม่มีการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j โดยที่ $j \in J$

s_{ik} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโนดตรวจรู้ i ไปยังโนดตรวจรู้ k มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนดตรวจรู้ i ไปยังโนดตรวจรู้ k และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ ไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ i and $k \in I, i \neq k$

r_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีถ่ายทอด j มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีถ่ายทอด j และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ ไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ $i \in I, j \in J$

h_{ib} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ ไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ $i \in I, b \in B$

ตัวแปรค่าคงที่ :

E_t คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการส่งข้อมูลต่อรอบ (joule/round)

E_r คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับข้อมูลต่อรอบ (joule/round)

E_i คือ พลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้แต่ละโนด (joule)

P_{ik} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้ k รับได้จากโนดตรวจรู้ i โดยที่ i and $k \in I$ (dBm)

P_{ij} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่สถานีถ่ายทอด j รับได้จากโนดตรวจรู้ i โดยที่ $i \in I, j \in J$ (dBm)

P_{ib} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่สถานีฐาน b รับได้จากโนดตรวจรู้ i โดยที่ $i \in I, b \in B$ (dBm)

P_{11} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ (dBm)

P_{12} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ กับสถานีถ่ายทอด (dBm)

P_{13} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ กับสถานีฐาน (dBm)

ω_k คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่โนดตรวจรู้ i โดยที่ $\forall k \in I$ (dBm)

ω_j คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่สถานีถ่ายทอด j โดยที่ $\forall j \in J$ (dBm)

ω_b คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่สถานีฐาน b โดยที่ $b \in B$ (dBm)

δ คือ จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณรบกวน (dBm)

N_{RS} คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณในการลงทุน (node)

T คือ อายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (round)

ในงานวิจัยจะมีตัวแปรตัดสินใจ 4 ตัว ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน

3.5.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแสดงในสมการที่ (3.1) เป็นฟังก์ชันที่ต้องการทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเกจข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุด ภายในระยะเวลาที่ต้องการ โดยจำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกจะต้องอำนวยให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

$$\text{Minimize } \sum_{\forall i \in I} (T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_t \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib})) \quad (3.1)$$

3.5.2 สมการเงื่อนไข

เงื่อนไขในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นการกำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการสื่อสารระหว่างโนดในเครือข่ายแบบไร้สายที่ใช้สถานีถ่ายทอดในการส่งผ่านข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน โดยผู้วิจัยได้แบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่มคือ เงื่อนไขในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดแต่ละชนิดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เงื่อนไขงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย และเงื่อนไขข้อจำกัดของพลังงานของโนดตรวจรู้ ซึ่งโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบในขั้นที่ 1 (นั่นคือจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีถ่ายทอด) ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ทั้งหมด

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดแต่ละชนิดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1.1 เส้นทางที่เกิดจากโนดตรวจรู้แต่ละโนดในเครือข่าย คือ โหนดตรวจรู้แต่ละโนดจะสร้างเส้นทางเชื่อมต่อเพื่อส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยัง โหนดตรวจรู้ข้างเคียง หรือ สถานีถ่ายทอด หรือ สถานีฐาน เส้นทางใดเส้นทางหนึ่งเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น

$$\sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + \sum_{b \in B} h_{ib} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

1.2 เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานของโนดตรวจรู้ เงื่อนไขนี้จะกล่าวว่า โหนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปที่ สถานีถ่ายทอด หรือสถานีฐาน หรือ เมื่อโนดตรวจรู้ที่พิจารณาได้รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ก่อนหน้าแล้วจะส่งข้อมูลไปที่สถานีถ่ายทอด หรือสถานีฐาน นั่นคือ เป็นเงื่อนไขที่จำกัดจำนวนช่วงเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับ โหนดตรวจรู้ให้มีจำนวนไม่เกินหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ

$$\sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} \leq \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + \sum_{b \in B} h_{ib} \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

1.3 การสร้างเส้นทางจากโนคตรวจรู้ไปยังสถานีถ่ายทอด คือ โนคตรวจรู้จะสามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายแล้วเท่านั้น

$$r_{ij} \leq \beta_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.4)$$

1.4 การสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับโนคตรวจรู้ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ทำให้โนคตรวจรู้ i สามารถสร้างเส้นทางเชื่อมต่อไปยังโนคตรวจรู้ k ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

$$s_{ik}(P_{ik} - P_{i1}) \geq 0 \quad i \text{ and } k \in I, i \neq k \quad (3.5)$$

1.5 การสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ทำให้โนคตรวจรู้ i สามารถสร้างเส้นทางเชื่อมต่อไปยังสถานีถ่ายทอด j ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

$$r_{ij}(P_{ij} - P_{i2}) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.6)$$

1.6 การสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับสถานีฐาน คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ทำให้โนคตรวจรู้ i สามารถสร้างเส้นทางเชื่อมต่อไปยังสถานีฐาน b ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

$$h_{ib}(P_{ib} - P_{i3}) \geq 0 \quad \forall i \in I, b \in B \quad (3.7)$$

ซึ่งค่าความแรงสัญญาณของโนคแต่ละชนิดในเครือข่าย ได้แก่ ค่าความแรงสัญญาณที่โนคตรวจรู้รับได้จากโนคตรวจรู้ ค่าความแรงสัญญาณที่สถานีถ่ายทอดรับได้จากโนคตรวจรู้ และค่าความแรงที่สถานีฐานรับได้จากโนคตรวจรูนั้น จะต้องมีค่ามากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่โนคแต่ละชนิดรับได้จากสมการที่ (2.2) ในหัวข้อที่ 2.6

1.7 คุณภาพของสัญญาณในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับโนคตรวจรู้ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่จะทำโนคตรวจรู้ i สามารถส่งข้อมูลไปยังโนคตรวจรู้ k ได้นั้น จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ระดับความผิดพลาดบิตข้อมูลที่กำหนดไว้

$$s_{ik}(P_{ik} - \omega_k - \delta) \geq 0 \quad i \text{ and } k \in I, i \neq k \quad (3.8)$$

1.8 คุณภาพของสัญญาณในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด คือ ค่าความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้ i สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอด j ได้ นั่นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่กำหนดไว้

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

1.9 คุณภาพของสัญญาณในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับ สถานีฐาน คือ ค่าความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้ i สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน b ได้ นั่นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ระดับความผิดพลาดบิตข้อมูลที่กำหนดไว้

$$h_{ib}(P_{ib} - \omega_b - \delta) \geq 0 \quad \forall i \in I, b \in B \quad (3.10)$$

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

2.1 เนื่องจากงบประมาณของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้จะต้องมีจำนวนไม่เกินงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายนั้นต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

$$\sum_{\forall j \in J} \beta_j \leq N_{RS} \quad \forall j \in J \quad (3.11)$$

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขข้อจำกัดของพลังงานของโนดตรวจรู้

3.1 พลังงานรวมทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ใช้ในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับแพ็คเก็ตข้อมูลจากโนดก่อนหน้า และส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโนดตรวจรู้ข้างเคียง หรือ สถานีถ่ายทอด หรือ สถานีฐาน ภายในระยะเวลาที่กำหนด จะต้องไม่เกินค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้

$$T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_t \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib}) \leq E_i \quad \forall i \in I \quad (3.12)$$

3.6 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์

จากที่ได้แสดงการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวจะให้คำตอบของปัญหาที่สนใจเพียงแง่มุม

เดียวเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในการพิจารณาปัญหาใด ๆ ก็ตาม มักจะมีประเด็น หรือ วัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์เสมอ โดยหลาย ปัญหาที่พิจารณานั้นมักจะเป็นปัญหาที่มีความขัดแย้งกัน (conflict) และจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดี ที่สุดได้เพียงคำตอบเดียว ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ (decision maker) จะต้องทำการเลือกคำตอบที่ดี ที่สุดจากเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้เหล่านั้น

ในงานวิจัยนี้จะได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ วัตถุประสงค์ที่ 1 ต้องการให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุด ตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 ต้องการให้เครือข่ายติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อย ที่สุด โดยที่จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งนี้จะต้องรับประกันว่าจะสามารถทำให้เครือข่ายทำงาน ได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

ตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์สำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นใบนริสองวัตถุประสงค์ใน ขั้นตอนที่ 1 ประกอบด้วย เซต ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (constant parameters) ดังแสดงคำนิยามข้างล่างนี้

เซตของตัวแปร :

- I คือ เซตของโนคตรวจรู้
- J คือ เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้
- B คือ เซตของสถานีฐาน

ตัวแปรตัดสินใจ :

- β_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ เลือกติดตั้ง สถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่ง j หรือ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด ที่ตำแหน่ง j โดยที่ $j \in J$
- s_{ik} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อกับโนคตรวจรู้ i ไปยังโนคตรวจรู้ k มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนคตรวจรู้ i ไปยังโนคตรวจรู้ k และมีค่า เท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ i and $k \in I, i \neq k$
- r_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อกับโนคตรวจรู้ i ไปยังสถานีถ่ายทอด j มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนคตรวจรู้ i ไปยังสถานีถ่ายทอด j และมี ค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ $i \in I, j \in J$

h_{ib} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อกับโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ ไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ $i \in I, b \in B$

ตัวแปรค่าคงที่ :

E_t คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการส่งข้อมูลต่อรอบ (joule/round)

E_r คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับข้อมูลต่อรอบ (joule/round)

E_i คือ พลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้แต่ละโนด (joule)

P_{ik} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่โนดตรวจรู้ k รับได้จากโนดตรวจรู้ i โดยที่ i and $k \in I$ (dBm)

P_{ij} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่สถานีถ่ายทอด j รับได้จากโนดตรวจรู้ i โดยที่ $i \in I, j \in J$ (dBm)

P_{ib} คือ ค่าความแรงสัญญาณที่สถานีฐาน b รับได้จากโนดตรวจรู้ i โดยที่ $i \in I, b \in B$ (dBm)

P_{t1} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ (dBm)

P_{22} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ กับสถานีถ่ายทอด (dBm)

P_{13} คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ กับสถานีฐาน (dBm)

ω_k คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่โนดตรวจรู้ i โดยที่ $\forall k \in I$ (dBm)

ω_j คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่สถานีถ่ายทอด j โดยที่ $\forall j \in J$ (dBm)

ω_b คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่สถานีฐาน b โดยที่ $b \in B$ (dBm)

δ คือ จุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณรบกวน (dBm)

N_{RS} คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณในการลงทุน (node)

T คือ อายุการใช้งานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (round)

w_1 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยที่ $w_1 \in [0,1]$

w_2 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 โดยที่ $w_2 \in [0,1]$

f_1^{\min} คือ ค่าตอบที่มีค่าน้อยที่สุดของวัตถุประสงค์ที่ 1

f_1^{\max} คือ ค่าตอบที่มีค่ามากที่สุดของวัตถุประสงค์ที่ 1

f_2^{\min} คือ ค่าตอบที่มีค่าน้อยที่สุดของวัตถุประสงค์ที่ 2

f_2^{\max} คือ ค่าตอบที่มีค่ามากที่สุดของวัตถุประสงค์ที่ 2

$F_1(x)$ คือ ค่าของวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้ว

$F_2(x)$ คือ ค่าของวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้ว

ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวจะมีค่าเป็นตัวเลขได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยจะมีตัวแปรตัดสินใจทั้งสิ้น 4 ตัว ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน

3.6.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเกจข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดภายในระยะเวลาที่กำหนด สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } \sum_{\forall i \in I} (T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_r \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib})) \quad (3.13)$$

วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายให้น้อยที่สุด สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } \sum_{\forall j \in J} \beta_j \quad (3.14)$$

ซึ่งการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบของสมการวัตถุประสงค์เดียวนั้น ก่อนที่จะนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักนั้น จะต้องทำให้วัตถุประสงค์ทั้งสองเป็นบรรทัดฐานเดียวกันก่อน เพื่อให้ค่าของวัตถุประสงค์ที่พิจารณานั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ทำให้สะดวกต่อการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้กับแต่ละวัตถุประสงค์ โดยมีวิธีการดังนี้

$$\text{Minimize } z = w_1 F_1(x) + w_2 F_2(x) \quad (3.15)$$

$$\text{โดยที่ } F_1(x) = \frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}}$$

$$F_2(x) = \frac{f_2(x) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (3.16)$$

ดังนั้น จะได้

$$z = w_1 \left(\frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right) + w_2 \left(\frac{f_2(x) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right) \quad (3.17)$$

หลังจากที่ได้ใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียวแล้ว ในงานวิจัยนี้จะสามารถเขียนวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษาให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize } w_1 & \left(\frac{\left(\sum_{\forall i \in I} (T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_t \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib})) \right) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right) \\ & + w_2 \left(\frac{\sum_{\forall j \in J} \beta_j - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.6.2 สมการเงื่อนไข

สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสำหรับสองวัตถุประสงค์นี้ ใช้เงื่อนไขเดียวกับสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียวซึ่งมีกลุ่มเงื่อนไข 3 กลุ่มดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 3.5

3.7 การพัฒนาอัลกอริธึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด

จากสมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในขั้นตอนที่ 1 นั้นผลของคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาจะแสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างทั้งสองวัตถุประสงค์ และเมื่อเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปเรื่อยๆ ก็จะได้เซตของผลเฉลยของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งคำตอบที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์ในขั้นตอนแรก นั้น จะประกอบไปด้วยเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน จำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย สำหรับการพัฒนาอัลกอริธึมเพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดนั้น จะนำสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในขั้นตอนแรกมาสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน โดยใช้หลักการของ minimum spanning tree ซึ่งจากหนังสือของ Sedgewick R. (2001) กล่าวว่า minimum spanning tree เป็นวิธีการหาเส้นทางที่ทำให้ผลรวมของ cost มีค่าน้อย

ที่สุด โดยจะทำการเชื่อมต่อโนดทุก ๆ โนดในเครือข่าย และไม่ทำให้เกิดลูป ซึ่งค่า cost สำหรับงานวิจัยนี้ คือ ระยะทางการเชื่อมต่อระหว่างโนดนั่นเอง เมื่อได้เส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างโนดแต่ละโนด ซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วจึงพิจารณาเลือกสายอากาศแบบยาคิ-อูตะ ที่มีอัตราขยายที่แตกต่างกัน 4 แบบ เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน

สำหรับวิธีในการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโนดแต่ละโนดในขั้นตอนนี้ ได้ใช้หลักการของ minimum spanning tree เพื่อหาระยะทางการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละโนดในเครือข่ายที่สั้นที่สุด เนื่องจากต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศมีค่าน้อยที่สุด โดยติดตั้งสายอากาศที่สามารถทำการสื่อสารได้ที่ระยะทางต่าง ๆ กัน โดยอัลกอริทึมสำหรับสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานมีการใช้ตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีค่านิยามดังตารางที่ 3.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด

ตัวแปร	ความหมาย
F	เซตของโนดที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อ
T	เซตของโนดที่สร้างการเชื่อมต่อแล้ว
distance_node	ตัวแปรที่เก็บระยะทางระหว่าง โนดที่มีการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อ

อัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด

อินพุต : 1) สถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1

2) ระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีถ่ายทอด

3) ระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีฐาน

4) ข้อมูลระยะทางสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศทั้ง 4 แบบ

5) ข้อมูลราคาของสายอากาศส่งทั้ง 4 แบบและสายอากาศรับ

เอาต์พุต : 1) เส้นทางการสื่อสารที่สั้นที่สุดระหว่างสถานีถ่ายทอดแต่ละ โนดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1

2) แบบของสายอากาศที่ถูกติดตั้งในแต่ละเส้นทางการสื่อสาร

3) ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ

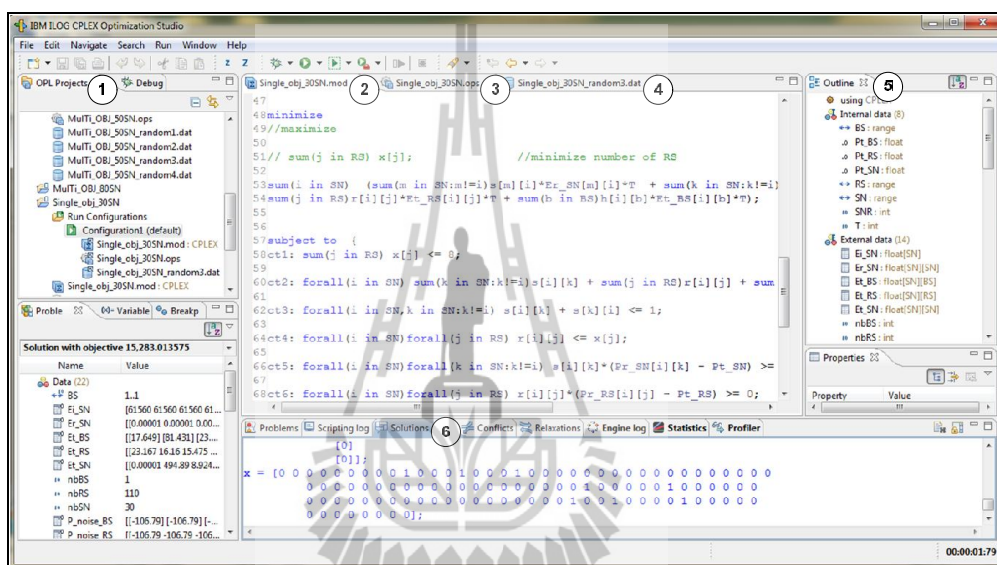
4) ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการสร้างเครือข่ายในขั้นตอนที่ 2

- ขั้นตอนที่ 1 : เลือกโหนดแรกในเครือข่ายเพื่อสร้าง tree แล้วเก็บโหนดแรกไว้ในเซต T
- ขั้นตอนที่ 2 : ตรวจสอบระยะทางระหว่างโหนดในเซต T กับ โหนดที่เหลือทุกโหนดที่อยู่ในเซต F จากนั้นพิจารณาเลือกสร้างการเชื่อมต่อ (link) ระหว่างโหนดในเซต T กับโหนดในเซต F ที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุด
- ขั้นตอนที่ 3 : เก็บค่าระยะทางที่มีการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดซึ่งเป็นระยะทางที่สั้นที่สุดในตัวแปร distance_node และลบโหนดที่ถูกสร้างการเชื่อมต่อแล้วออกจากเซต F และเพิ่มโหนดที่ถูกสร้างการเชื่อมต่อแล้วไว้ในเซต T
- ขั้นตอนที่ 4 : พิจารณาเลือกสายอากาศภาคส่งที่จะใช้ในการสื่อสารระหว่างโหนดที่มีการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อ โดยพิจารณาจากค่าของตัวแปร distance_node ดังนี้
- 4.1) ถ้า distance_node มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 315 เมตร ให้เลือกสายอากาศแบบที่ 4 ราคา 4,500 บาท
 - 4.2) ถ้า distance_node มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 298 เมตร แต่ไม่เกิน 315 เมตร ให้เลือกสายอากาศแบบที่ 3 ราคา 3,550 บาท
 - 4.3) ถ้า distance_node มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 199 เมตร แต่ไม่เกิน 298 เมตร ให้เลือกสายอากาศแบบที่ 2 ราคา 1,600 บาท
 - 4.4) ถ้า distance_node มีค่าน้อยกว่า 188 เมตร ให้เลือกสายอากาศแบบที่ 1 ราคา 2,500 บาท
- ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง
- ขั้นตอนที่ 6 : ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนครบทุกโหนดในเครือข่าย (เซต F มีค่าเป็นศูนย์)
- ขั้นตอนที่ 7 : คำนวณค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาครับ และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศทั้งหมดในเครือข่าย
- ขั้นตอนที่ 8 : สิ้นสุดการทำงาน

จากการทำงานของอัลกอริทึมสำหรับการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดทำให้สามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนแรก และระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนแรก กับสถานีฐานที่ถูกกำหนดตำแหน่งไว้แล้วได้ ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายได้

3.8 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุดนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถแปลงสมการคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมได้ง่าย มีประสิทธิภาพ และนิยมใช้งานวิจัยการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างแพร่หลาย โดยโปรแกรมนี้จะใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาผลเฉลยที่ต้องการ หน้าต่างของโปรแกรม ILOG OPL IDE จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

1. หมายเลข 1 (opl project) แสดงไฟล์โครงการ (project) ที่เปิดอยู่สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) คำสั่งไฟล์ (*.dat) และ เซตตั้งไฟล์ (*.ops)
2. หมายเลข 2 (model file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข
3. หมายเลข 3 (data file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียวและในรูปของเมตริกซ์ (matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ 3.4
4. หมายเลข 4 (setting file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้โครงการ เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ

คำสั่งของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่แสดงในตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3 นั้นเป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีแบบ วัตถุประสงค์เดียว จากหัวข้อที่ 3.5 และแบบสองวัตถุประสงค์ในหัวข้อที่ 3.6 ตามลำดับ ให้ กลายเป็นภาษาของโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากการที่ได้อธิบายรายละเอียดของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio มา พอสังเขป กล่าวได้ว่าโปรแกรมนี้ถือว่าเป็นเครื่องมือช่วยในการหาผลเฉลยที่ใช้งานง่าย และสามารถ นำมาประยุกต์ใช้งานในการหาคำตอบของงานวิจัยได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานสามารถ ศึกษารายละเอียด เพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับหลักการและกระบวนการใช้งานอย่างละเอียด ในคู่มือสำหรับอ้างอิงจาก <http://www.ibm.com> โดยจะต้องศึกษาการแปลงสมการคณิตศาสตร์ที่ได้ พัฒนาขึ้นให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรม ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบสามส่วน คือ ตัวแปร ตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข เพื่อให้สามารถใช้งานโปรแกรมในการหา คำตอบที่ดีที่สุดตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.8 เป็นเครื่องมือช่วยในการหาผลเฉลยที่ดีที่สุด และใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Samsung Intel(R) Core(TM) i5-2410M 2.30 GHz หน่วยความจำ ขนาด 4 GB ในการประมวลผล ในส่วนของการทดลองวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น ได้ทำ การสุ่มตำแหน่ง โหนดตรวจรู้ และพล็อตกราฟผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Microsoft Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

ตารางที่ 3.2 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้น ไปบนาริวัตถุประสงค์เดียวเป็น
รูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการจากหัวข้อ 3.5	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
β_j	dvar int x[RS] in 0..1;
s_{ik}	dvar int s[SN][SN] in 0..1;
r_{ij}	dvar int r[SN][RS] in 0..1;
h_{ib}	dvar int b[SN][BS] in 0..1;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective function
สมการ(3.1)	Minimize sum(i in RS) (sum(m in SN:m!=i)s[m][i]*Er_SN[m][i]*T) + (sum(k in SN:k!=i)s[i][k]*Et_SN[i][k]*T) + (sum(j in RS)r[i][j]*Et_RS[i][j]*T) + (sum(b in BS)h[i][b]*Et_BS[i][b]*T)
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(3.2)	ct1 : forall(i in SN) sum(k in SN:k!=i)s[i][k] + sum(j in RS)r[i][j] + sum(b in BS)h[i][b] == 1;
สมการ(3.3)	ct2 : forall(i in SN) sum(m in SN:m!=i)s[m][i] <= sum(j in RS)r[i][j] + sum(b in BS)h[i][b];
สมการ(3.4)	ct3 : r[i][j] <= x[j]
สมการ(3.5)	ct4 : forall(i in SN)forall(k in SN:k!=i) s[i][k]*(Pr_SN[i][k] - Pt_SN) >= 0;
สมการ(3.6)	ct5 : forall(i in SN)forall(j in RS) r[i][j]*(Pr_RS[i][j] - Pt_RS) >= 0;
สมการ(3.7)	ct6 : forall(i in SN)forall(b in BS) h[i][b]*(Pr_BS[i][b] - Pt_BS) >= 0;
สมการ(3.8)	ct7 : forall(i in SN)forall(k in SN:k!=i) s[i][k]*(Pr_SN[i][k] - P_noise_SN[i][k] - SNR) >= 0;
สมการ(3.9)	ct8 : forall(i in SN)forall(j in RS) r[i][j]*(Pr_RS[i][j] - P_noise_RS[i][j] - SNR) >= 0;
สมการ(3.10)	ct9 : forall(i in SN)forall(b in BS) h[i][b]*(Pr_BS[i][b] - P_noise_BS[i][b] - SNR) >= 0;

ตารางที่ 3.2 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้น ไม่นารีวัตถุประสงค์เดียวเป็น
รูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (ต่อ)

สมการจากหัวข้อ 3.5	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
สมการ(3.11)	ct10 : sum(j in RS) x[j] <= N_{RS} ;
สมการ(3.12)	ct11 : forall(i in SN) (sum(m in SN:m!=i)s[m][i]*Er_SN[m][i]*T) + (sum(k in SN:k!=i)s[i][k]*Et_SN[i][k]*T) + (sum(j in RS)r[i][j]*Et_RS[i][j]*T) + (sum(b in BS)h[i][b]*Et_BS[i][b]*T) <= Ei_SN[i];

ตารางที่ 3.3 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้น ไม่นารีสองวัตถุประสงค์เป็น
รูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการจากหัวข้อ 3.6	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
β_j	dvar int x[RS] in 0..1;
s_{ik}	dvar int s[SN][SN] in 0..1;
r_{ij}	dvar int r[SN][RS] in 0..1;
h_{ib}	dvar int b[SN][BS] in 0..1 ;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective Function
สมการ(3.18)	W1*(((sum(i in SN)sum(m in SN:m!=i)s[m][i]*Er_SN[m][i]*T) + sum(k in SN:k!=i)s[i][k]*Et_SN[i][k]*T + sum(j in RS)r[i][j]*Et_RS[i][j]*T + sum(b in BS)h[i][b]*Et_BS[i][b]*T) – f1_min)/(f1_max – f1_min))*10000 + W2*(((sum(j in RS)x[j]) – f2_min)/(f2_max – f2_min))*10000;
เงื่อนไข	ใช้สมการเดียวกับสมการที่ (3.2) ถึง (3.12) ในตารางที่ 3.2

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

เนื้อหาในบทนี้สาธิตการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีที่ได้อธิบายในบทที่ 3 ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อการใช้พลังงานของเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้ 4.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการวัตถุประสงค์เดียว และศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของเครือข่ายและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้และ 4.2 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์โดยใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และวิธีลำดับชั้น

4.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียว

หัวข้อนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้สมการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีแบบวัตถุประสงค์เดียวที่กล่าวในหัวข้อ 3.5 และนำเสนอการศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของเครือข่าย และการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้

การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้สมการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีแบบวัตถุประสงค์เดียว เพื่อกำหนดโครงสร้างเครือข่ายที่มีการใช้พลังงานรวมน้อยที่สุดสำหรับโนดตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งสิ่งที่จะได้จากการออกแบบนี้คือจำนวน และตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย และเส้นทางของการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ไปยังปลายทาง

4.1.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้ได้พิจารณาเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาดกว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร ซึ่งอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Shi, Y., Hou, Y. T., and Efrat, A. (2009) [28] โดยพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีสถานีฐาน 1 สถานี ติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางของเครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบที่พิกัด (250, 250) สำหรับพื้นที่ที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด (candidate site of relay station) นั้นมีตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด 110 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3

การทดลองของหัวข้อนี้ได้พิจารณาเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30, 50 และ 80 โหนด โดยแต่ละขนาดของเครือข่ายจะทำการหุ่มตำแหน่งของโนดตรวจรู้ 5 ครั้ง รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงตัวอย่างตำแหน่งของโนดตรวจรู้จากการหุ่มครั้งที่ 1 สำหรับเครือข่ายขนาด 30, 50

และ 80 โนต ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้าง เครือข่าย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างเครือข่ายโดยใช้แบบจำลองพลังงานในการรับ และส่งข้อมูล จากงานวิจัยของ Heinzelman W. R., Chandrakasan A., and Balakrishnan (2000) [14] มาใช้ในการ คำนวณพลังงานในการรับส่งข้อมูลของโนตตรวจรู้ในเครือข่าย ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.6 สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงานที่โนตตรวจรู้ใช้ในการส่งและรับข้อมูลนั้นคำนวณได้ จากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) ตามลำดับ

ความแรงของสัญญาณ (received signal strength) ที่โนตตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานี ฐานรับได้นั้นคำนวณได้จากแบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายดังสมการที่ (2.1) และใช้พารามิเตอร์ ในการคำนวณตามตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ที่ เกิดจากความร้อนในวงจรรีเล็กทรอนิกส์นั้นคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบนั้น ได้อ้างอิงการออกแบบตาม มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และได้ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้จุดเริ่มเปลี่ยน ความแรงสัญญาณ (received signal strength threshold) ที่ทำให้โนตแต่ละชนิดสามารถสื่อสารกัน ได้นั้นมีค่าเท่ากับ -90 dBm ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ทำให้โนตแต่ละชนิด สามารถสื่อสารกัน ได้มีค่าเท่ากับ 2 dB เพื่อให้ได้อัตราค่าความผิดพลาดบิตในระดับที่กำหนดไว้ ซึ่ง ในขั้นตอนของการแก้ปัญหาในการออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายนั้นจะใช้โปรแกรม IBM ILOG

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างเครือข่าย [16], [21]

พารามิเตอร์	ค่า
จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ (threshold)	-90 dBm*
ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ	2.4 GHz*
พลังงานตั้งต้นของโนตตรวจรู้	61,560 joules
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณ	32 mW (18 dBm)*
ระยะทางอ้างอิง (reference distance)	2 m.
ดรรชนีการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4
ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio)	2 dB**
ขนาดแพ็คเกจข้อมูล	200 bit
อายุการใช้งานของเครือข่าย	13,631 round (47 days)

CPLEX Optimization Studio version 12.2 โดยใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel® Core™ i5-2410M ความเร็วซีพียู 2.3 GHz แรมขนาด 4 GB 64 บิต ในการประมวลผลหาคำตอบ

ในการพิจารณาเลือกใช้สายอากาศเพื่อการส่งสัญญาณระหว่างโหนดในเครือข่ายนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคี ที่มีอัตราขยายที่แตกต่าง 4 แบบ ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งอัตราขยายที่ต่างกันมีผลต่อระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศ และราคาของสายอากาศ ส่วนสายอากาศที่ใช้ในการรับข้อมูลซึ่งจะติดตั้งไว้ที่สถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งทุกโหนด และสถานีฐานนั้น จะเลือกใช้สายอากาศชนิดรอบทิศทางระนาบเดียว ซึ่งมีอัตราขยาย ราคา และระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถทำงานได้ แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยรายละเอียดข้อมูลเกี่ยวกับสายอากาศส่งที่ใช้ในการออกแบบและราคาของสายอากาศแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1 ถึง ก.6 สำหรับข้อมูลของอัตราขยาย และราคาของสายอากาศภาครับ แสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.7

ข้อมูลอินพุตสำหรับการหาคำตอบของเส้นทางการเชื่อมต่อ โหนดทุกโหนดในเครือข่ายในการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด คือ ตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนแรก และตำแหน่งของสถานีฐาน โดยในขั้นตอนนี้จะต้องทำการคำนวณระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอดแต่ละโหนดในเครือข่าย และระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดแต่ละโหนดในเครือข่าย เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกสายอากาศที่จะใช้เป็นภาคส่ง โดยได้ทำการพิจารณาสายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคี ที่มีอัตราขยายที่แตกต่างกัน 4 แบบ ซึ่งสายอากาศแต่ละแบบจะมีราคาที่แตกต่างกัน โดยราคาจะแปรผันตามอัตราขยายที่มากขึ้น

อัลกอริทึมที่ใช้ในการหาเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างโหนดทุกโหนดในเครือข่ายนั้นจะใช้อัลกอริทึมที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.7 สำหรับการหาคำตอบของเส้นทางการเชื่อมต่อที่สั้นที่สุดระหว่างสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานในเครือข่าย แบบของสายอากาศภาคส่งที่เลือกใช้ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง สายอากาศภาครับ สถานีถ่ายทอด และค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างเครือข่ายนั้น สามารถหาคำตอบได้โดยใช้โปรแกรม Dev C++ version 4.9.9.2 โดยใช้คอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i5-2410M ความเร็วซีพียู 2.3 GHz หน่วยความจำ 4 GB 64 บิต ในการประมวลผลหาคำตอบ

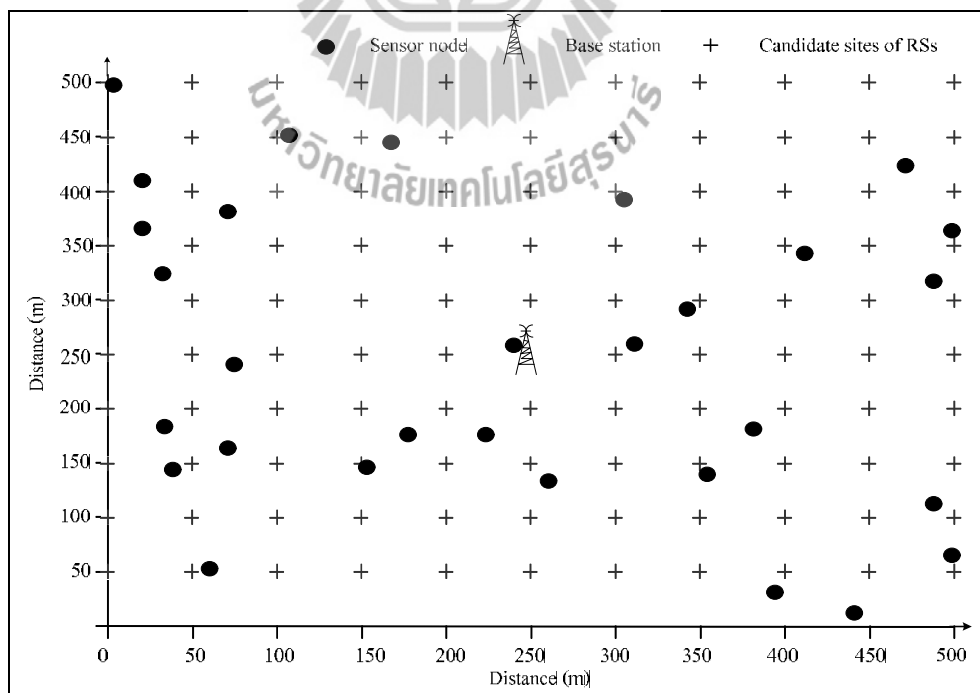
ตารางที่ 4.2 อัตราขยาย ราคา และ ระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาคส่ง

สายอากาศ	อัตราขยายของสายอากาศ (dBi)	ราคา (บาท)	ระยะสื่อสารไกลที่สุด (m.)
แบบที่ 1	7	2500	188*
แบบที่ 2	8	1600 (ลดเกรดอุปกรณ์ลง)	199
แบบที่ 3	15	4100	298
แบบที่ 4	16	4500	315

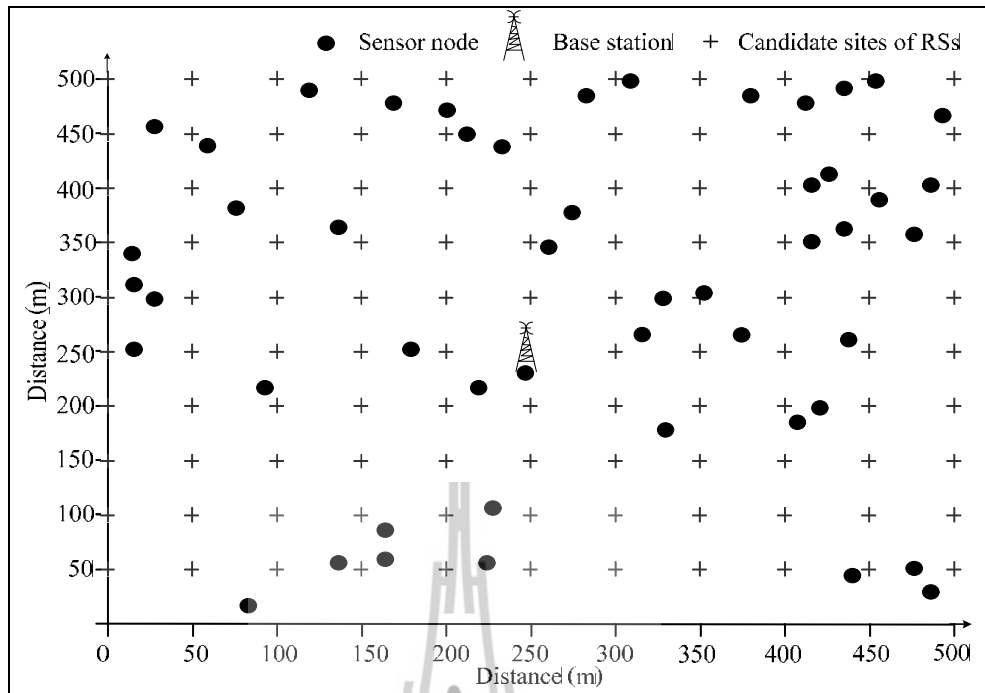
* วิธีในการหาระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.3 อัตราขยาย ราคา และ ระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาครับ

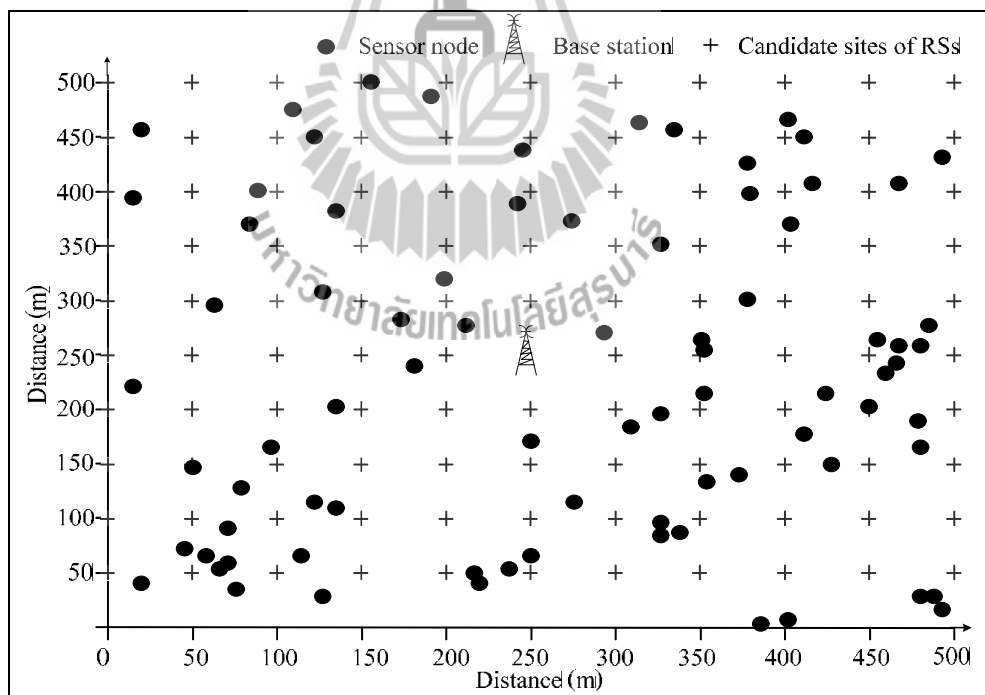
สายอากาศ	อัตราขยายของสายอากาศ (dBi)	ราคา (บาท)	ระยะสื่อสารไกลที่สุด (m.)
แบบที่ 1	8	1500	199



รูปที่ 4.1 เครื่องข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด



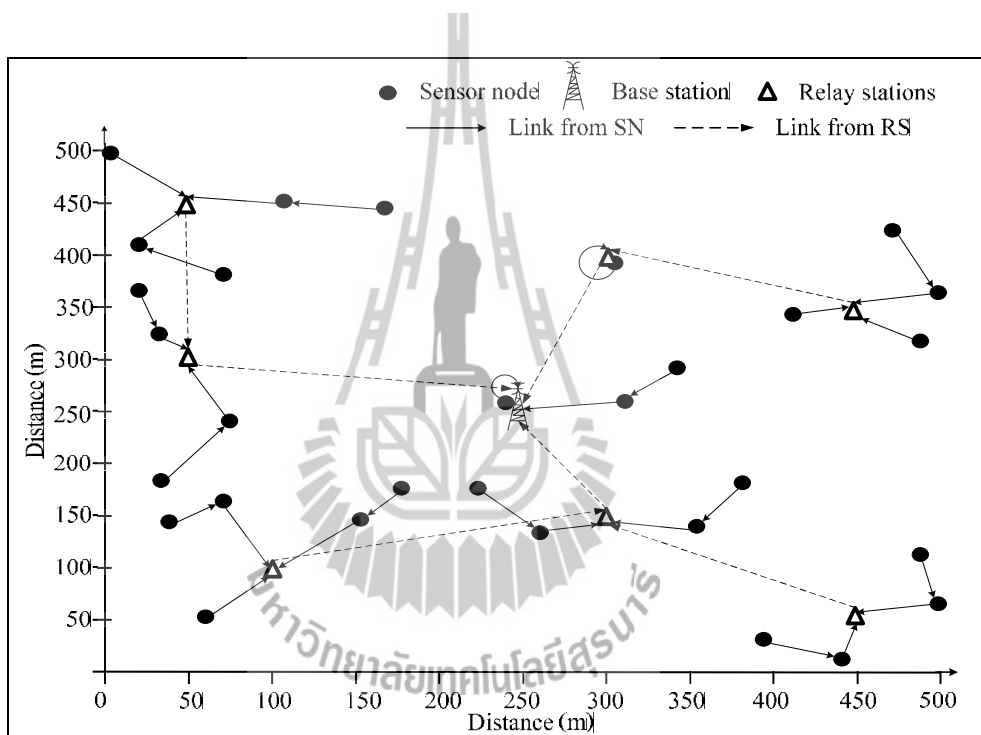
รูปที่ 4.2 เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โหนด



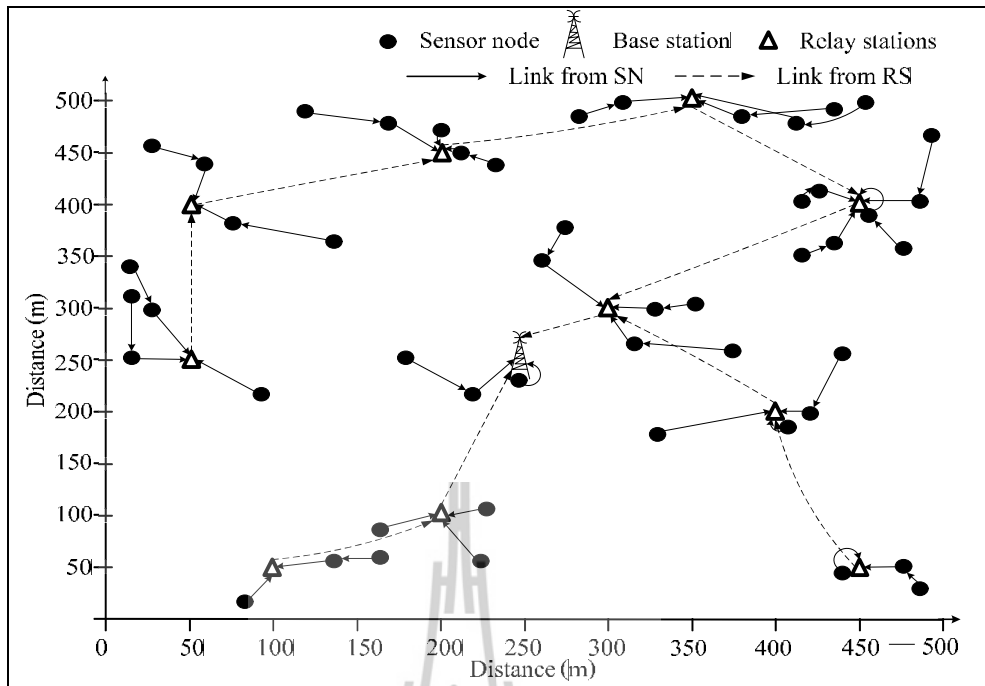
รูปที่ 4.3 เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โหนด

4.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

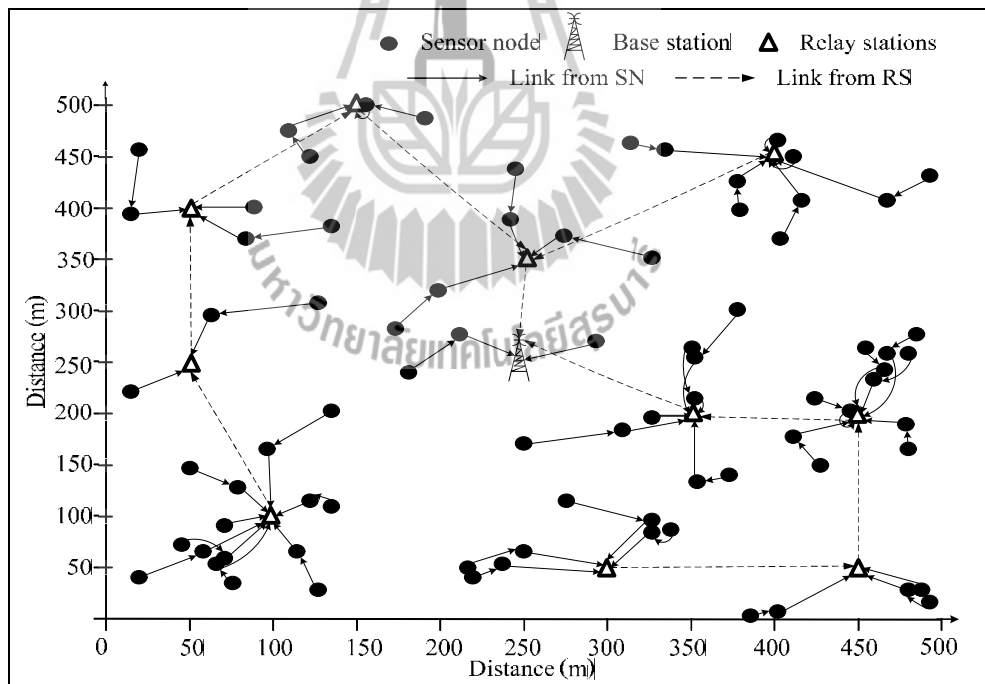
รูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 แสดงตัวอย่างผลการวางแผนและออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายกรณีเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ตามลำดับ ซึ่งในการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นจะพิจารณาถึงงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในแต่ละเครือข่ายที่มีขนาดที่แตกต่างกันนั้นจะต้องเลือกติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด และเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งการได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของจำนวน และตำแหน่งสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้ง รวมถึงเส้นทางการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดชนิดต่าง ๆ ในเครือข่ายนั้น จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 4.4 เส้นทางการส่งข้อมูลที่ได้สำหรับในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 30 โหนด



รูปที่ 4.5 เส้นทางการส่งข้อมูลที่ได้สำหรับในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โหนด



รูปที่ 4.6 เส้นทางการส่งข้อมูลที่ได้สำหรับในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โหนด

ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ต้องติดตั้งในเครือข่ายขนาดต่างๆ จากผลการทดลองกรณีเครือข่ายขนาด 30 โหนด พบว่าจากการทดลอง 5 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ยจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่ายเท่ากับ 8 โหนด และเพิ่มขึ้นเป็น 9.8 โหนด และ 9.2 โหนดในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 50 โหนด และ 80 โหนด ตามลำดับ จะเห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนมากขึ้นตามจำนวนโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 80 โหนดนั้นจะมีค่าเฉลี่ยของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งน้อยกว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 50 โหนด เนื่องจากการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของโหนดตรวจรู้เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายอีกด้วย คือ ถ้ามีโหนดตรวจรู้โหนดใด ๆ ที่อยู่ห่างจากโหนดตรวจรู้โหนดอื่นแล้วนั้น โหนดตรวจรู้โหนดนั้นจะไม่สามารถส่งต่อข้อมูลให้กับโหนดตรวจรู้ข้างเคียงโหนดอื่นได้ ทำให้ต้องเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในบริเวณนั้น เพื่อให้ข้อมูลของโหนดตรวจรู้โหนดนั้นสามารถส่งไปถึงปลายทางได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าในเครือข่ายที่โหนดตรวจรู้มีการกระจายตัวเป็นกลุ่ม ๆ นั้น จะมีจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งน้อยกว่ากรณีที่เครือข่ายมีการกระจายตัวของโหนดตรวจรู้ที่อยู่ห่างกัน

ตารางที่ 4.5 แสดงพลังงานรวมที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปตลอดอายุการใช้งาน ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : S.D.) ของพลังงานรวมที่โหนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาดต่างๆ จะเห็นว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้เท่ากัน จะมีการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของโหนดตรวจรู้ในแต่ละเครือข่ายที่แตกต่างกัน และเมื่อมีจำนวนของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าพลังงานรวมในเครือข่ายมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการรับส่งข้อมูลของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น

จากตารางที่ 4.6 แสดงพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ ค่าเฉลี่ยของพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในเครือข่ายขนาดต่างๆ จะเห็นว่าทดสอบแต่ละครั้งในเครือข่ายขนาดเดียวกันนั้นจะมีพลังงานเฉลี่ยที่แตกต่างกัน เนื่องจากการกระจายตัวของโหนดตรวจรู้ที่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพลังงานเฉลี่ยในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด คือ เครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 80 โหนด เนื่องจากมีจำนวนโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมากที่สุด รองลงมาคือ เครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 30 โหนด เนื่องจากมีจำนวนโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายน้อย ทำให้โหนดตรวจรู้ต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลมากขึ้น รวมทั้งเป็นเครือข่ายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยกว่าเครือข่ายอื่น และเครือข่ายที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ เครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 50 โหนด เนื่องจากติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากกว่าเครือข่ายอื่น

ตารางที่ 4.4 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายจากหัวข้อที่ 4.1

เครือข่าย	จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้ง (โหนด)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
เครือข่ายที่มี โหนดตรวจรู้ 30 โหนด	7	9	8	8	8	8
เครือข่ายที่มี โหนดตรวจรู้ 50 โหนด	10	10	10	10	9	9.8
เครือข่ายที่มี โหนดตรวจรู้ 80 โหนด	10	11	9	8	8	9.2

ตารางที่ 4.5 พลังงานรวมที่ใช้ไปของ โหนดตรวจรู้ (ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

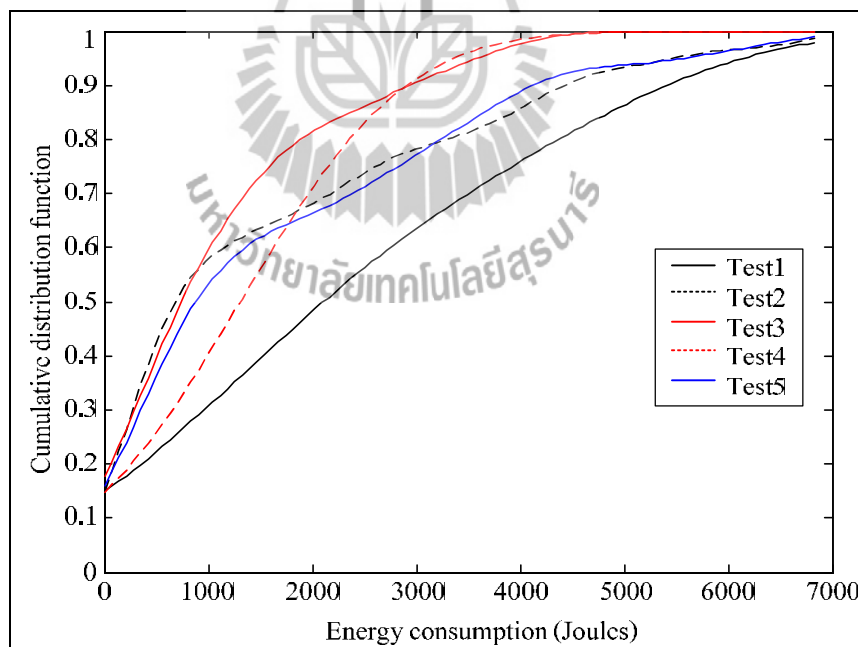
เครือข่าย	พลังงานรวมที่ใช้ไปในเครือข่าย (จูล)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย (ค่า S.D.)
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 30 โหนด	73637.42	48077.26	31986.56	40580.08	49286.75	48713.61 (15555.37)
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 50 โหนด	56849.37	82258.65	72660.69	50103.76	58029.74	63980.44 (13117.4)
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 80 โหนด	110615.56	157300.98	119743.29	166478.57	153219.76	141471.63 (24688.82)

ตารางที่ 4.6 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของ โหนดตรวจรู้ (ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

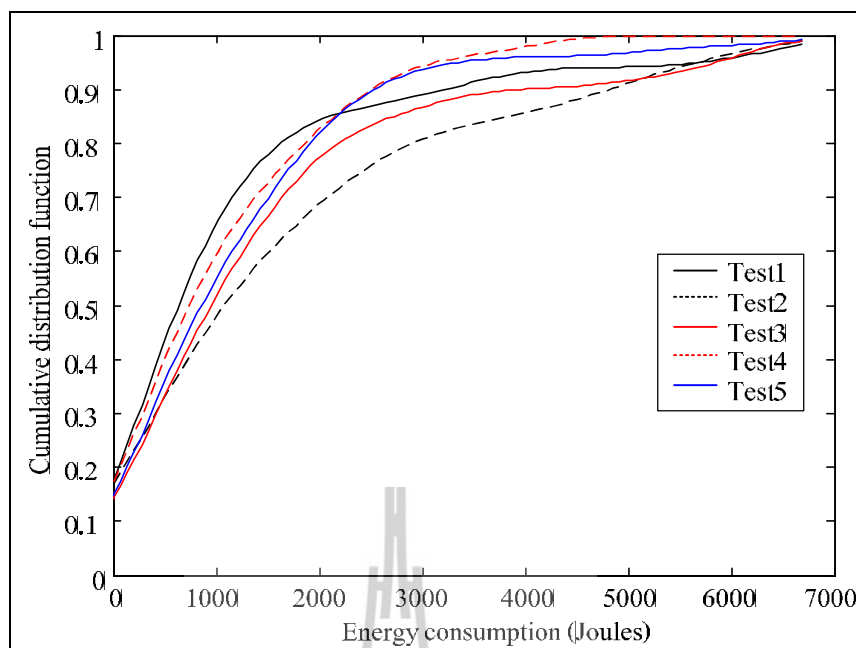
เครือข่าย	พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ (จูล)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย (ค่า S.D.)
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 30 โหนด	2454.58	1602.58	1066.22	1352.67	1642.89	1623.79 (463.77)
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 50 โหนด	1136.99	1645.17	1453.21	1002.08	1160.59	1279.61 (234.65)
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 80 โหนด	1382.69	1966.26	1496.79	2080.98	1915.25	1768.4 (276.03)

ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ในรูปแบบของฟังก์ชันแจกแจงสะสม โดยรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนค ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเครือข่ายมีขนาดเล็ก คือ มีโนคตรวจรู้ในเครือข่ายจำนวนน้อยการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้จะมีความแตกต่างกันมาก แต่เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น คือ มีจำนวนโนคตรวจรู้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นจะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากเมื่อจำนวนโนคตรวจรู้เพิ่มขึ้น ทำให้โนคตรวจรู้มีการกระจายตัวอยู่บริเวณใกล้เคียงกันมากขึ้น จึงส่งผลให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในการทดสอบแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน

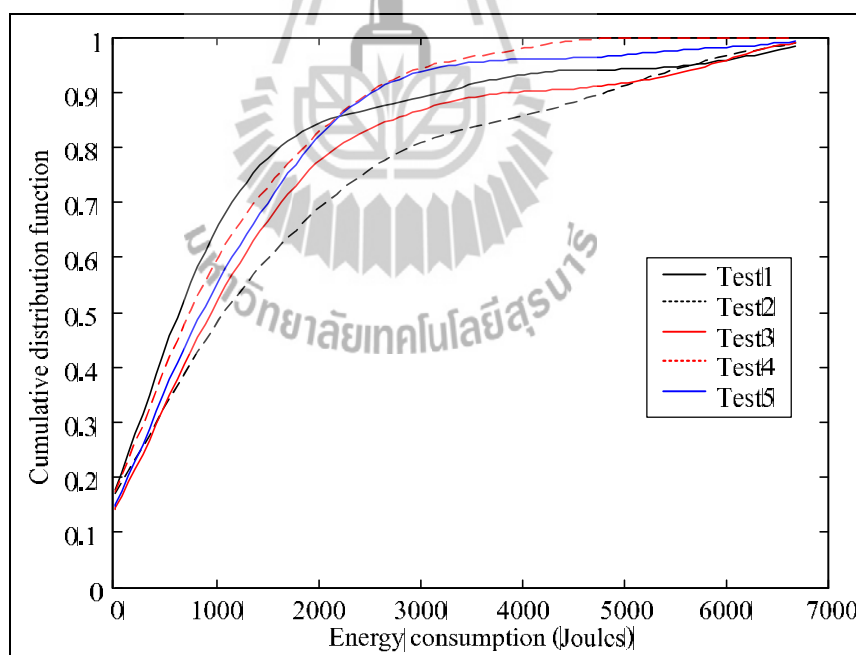
จากรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปสำหรับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนค จะเห็นว่าเครือข่ายขนาด 50 โนค จะมีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้น้อยที่สุด ในขณะที่เครือข่ายที่มีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ใกล้เคียงกัน คือ เครือข่ายขนาด 30 และ 80 โนค แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงตำแหน่ง และจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายอีกด้วย



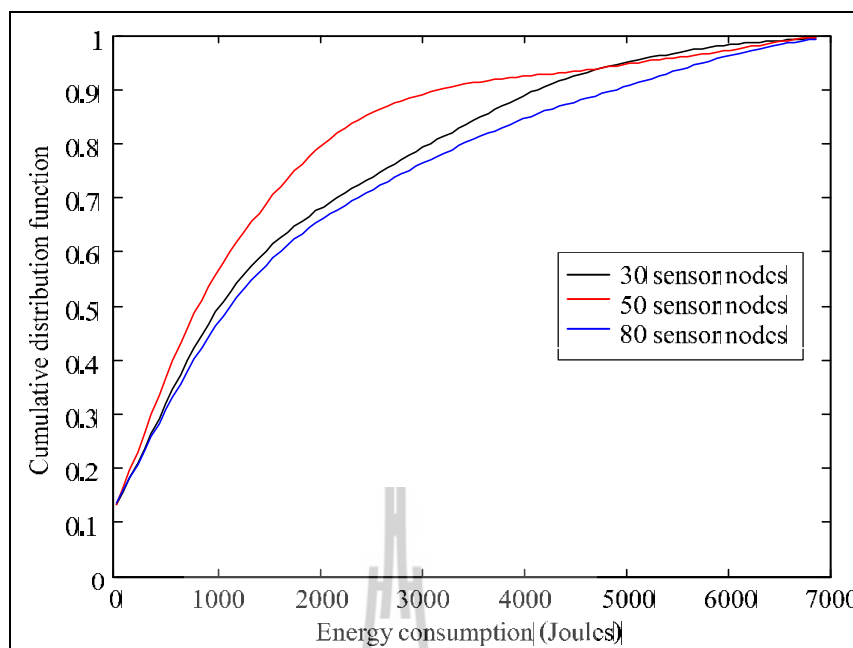
รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 30 โนค จากผลการทดลอง 5 ครั้ง



รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนคตรวรู้ใช้ไปในเครื่องข้าย 50 โนค
จากผลการทดลอง 5 ครั้ง



รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนคตรวรู้ใช้ไปในเครื่องข้าย 80 โนค
จากผลการทดลอง 5 ครั้ง



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้
ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนค

4.1.3 สรุปผลการทดลอง

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการ
วัตถุประสงค์เดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โนคตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอด
อายุการใช้งาน และศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายในเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่ 1
มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค เครือข่ายที่ 2 มีจำนวนโนคตรวจรู้ 50 โนค และเครือข่ายที่ 3 มีจำนวน
โนคตรวจรู้ 80 โนค รวมถึงได้วิเคราะห์การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย จะเห็นได้ว่าการ
ใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายที่มีจำนวน โนคเพิ่มขึ้น
เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงจำนวน และตำแหน่งในการ
เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดอีกด้วย โดยเครือข่ายที่มีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายน้อย
ที่สุด คือ เครือข่ายขนาด 50 โนค เพราะติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากที่สุด และเครือข่ายที่ใช้
พลังงานมากที่สุด คือเครือข่ายขนาด 80 โนค เพราะมีจำนวน โนคตรวจรู้ในเครือข่ายมากที่สุด

4.2 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์

หัวข้อนี้ศึกษาการใช้โปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์ที่นำเสนอในหัวข้อ 3.6 ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในหัวข้อ 4.2.1 และการใช้วิธีลำดับชั้นในหัวข้อ 4.2.2

4.2.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

สำหรับการใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์ในหัวข้อที่ 4.2.1.1 และในหัวข้อที่ 4.2.1.2 นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย

4.2.1.1 การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์

ในหัวข้อนี้ได้เสนอผลของค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์ที่ 1 ต้องการให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 ต้องการให้เครือข่ายติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ จึงได้เพิ่มโนดพิเศษที่มีหน้าที่รับและส่งต่อข้อมูลที่รับจากโนดตรวจรู้ไปที่ปลายทาง ซึ่งเป็นโนดที่มีพลังงานที่ไม่จำกัด แต่ต้องใช้งบประมาณในการติดตั้งสูง เนื่องจากมีราคาแพง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ โดยคำนึงถึงเส้นทางที่ทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และคำนึงถึงงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาคำตอบที่น้อยที่สุด (minimization)

สำหรับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักเป็นวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียว โดยจะเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) มาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ (scalarized objective function) โดยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักพิจารณาจากความสำคัญของวัตถุประสงค์ คือ ถ้าวัตถุประสงค์ใดมีความสำคัญมากกว่า ค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นก็จะมีค่ามากกว่าอีกวัตถุประสงค์อื่น อย่างไรก็ตามการเลือกพิจารณา

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อขนาด (magnitude) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักนั้นจึงต้องทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นบรรทัดฐาน (normalize) เดียวกัน เพื่อให้วัตถุประสงค์ที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน สำหรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เลือกใช้เพื่อคูณกับแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องรวมกันแล้วมีค่าเป็น 1 จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithms (Deb K. 2008) กล่าวว่า คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์นี้จะเป็น pareto-optimal ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเป็นบวกสำหรับทุกๆ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณา

ก. พารามิเตอร์ในการทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้พิจารณาการวางแผน โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 50 โหนด ในพื้นที่ขนาดกว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร โดยพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีสถานีฐาน 1 สถานี ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางของเครือข่าย สำหรับพื้นที่ที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นมีตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด 110 ตำแหน่ง และมีตำแหน่งของโหนดตรวจรู้ดังรูปที่ 4.2 โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.6 และใช้เงื่อนไขเดียวกับสมการที่ (3.2) ถึง (3.12) และกำหนดให้ใช้ค่าคงที่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1 สำหรับการพิจารณาฟังก์ชันสองวัตถุประสงค์ในการทดลองนั้นได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ เพื่อให้โหนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากเป็นวัตถุประสงค์ที่ทำให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (สมการที่ (3.13) จากหัวข้อที่ 3.6) และสำหรับวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่พิจารณาคือ เพื่อให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีอยู่อย่างจำกัด (สมการที่ (3.14) จากหัวข้อที่ 3.6) ซึ่งทั้งสองวัตถุประสงค์มีรายละเอียดสมการดังนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1 ต้องการให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน กำหนดให้ f_1 คือ ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย (จูล)

$$f_1 = \sum_{\forall i \in I} (T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_t \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib})) \quad (4.1)$$

วัตถุประสงค์ที่ 2 ต้องการให้ติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน กำหนดให้ f_2 คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย (โหนด)

$$f_2 = \sum_{\forall j \in J} \beta_j \quad (4.2)$$

การทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน (normalize) ทำได้โดยใช้สมการที่ (4.3) ดังนี้

$$F_1 = \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \quad \text{และ} \quad F_2 = \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (4.3)$$

เมื่อ f_1 คือ ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย (จูล)

F_1 คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว

f_1^{\min} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่น้อยที่สุด (จูล)

f_1^{\max} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่มากที่สุด (จูล)

f_2 คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย (โหนด)

F_2 คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว

f_2^{\min} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่น้อยที่สุด (โหนด)

f_2^{\max} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่มากที่สุด (โหนด)

จากนั้นจะนำค่าถ่วงน้ำหนัก (w_1 และ w_2) มาคูณกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (4.3) ที่ทำเป็นบรรทัดฐานเดียวกันแล้ว จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ ดังสมการที่ (4.4)

$$\text{Minimize} \quad z = w_1 F_1 + w_2 F_2 \quad (4.4)$$

เมื่อ z คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์

w_1 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยที่ $w_1 = [0,1]$

w_2 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 โดยที่ $w_2 = [0,1]$

$$w_1 + w_2 = 1$$

จากนั้นเมื่อได้คำตอบของค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ f_1 และ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย f_2 แล้ว จึงนำค่าของทั้งสองวัตถุประสงค์มาพิจารณา pareto-front ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของทั้งสองวัตถุประสงค์ที่พิจารณา โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงละ 0.02 เพื่อให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของ pareto-front ได้อย่างชัดเจน

ข. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการทดลองเมื่อพิจารณาเครือข่ายขนาด 50 โหนด ในรูปที่ 4.2 นั้น ก่อนทำการหาคำตอบที่ดีที่สุดของทั้งสองวัตถุประสงค์จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลอง ได้แก่ ค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่น้อยที่สุด (f_1^{\min}) ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานรวมที่น้อยที่สุดที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่ง

ข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน ภายใต้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.10) และเงื่อนไขจากสมการที่ (3.12) จากหัวข้อที่ 3.6 โดยจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้มากที่สุดนั้นจะต้องไม่เกินงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่คือ 25 โนค ส่วนค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่มากที่สุด (f_1^{\max}) นั้นคำนวณได้จากพลังงานรวมที่มากที่สุดที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน ภายใต้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.10) และเงื่อนไขจากสมการที่ (3.12) จากหัวข้อที่ 3.6 โดยสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งนั้นจะมีจำนวนน้อยที่สุด

ในส่วนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 นั้นสามารถหาค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่น้อยที่สุด (f_2^{\min}) ได้จากการกำหนดปัญหาเป็นการหาคำตอบที่น้อยที่สุดของจำนวนสถานีถ่ายทอด (Minimize number of relay station placement) ที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด สำหรับเครือข่ายขนาด 50 โนค ในรูปที่ 4.2 โดยใช้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.10) และ (3.12) โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขของจำนวนสถานีถ่ายทอด นั่นคือจะไม่ใช้เงื่อนไขของสมการที่ (3.11) และค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่มีค่ามากที่สุด (f_2^{\max}) นั้นจะมีค่าเป็น 25 โนค ซึ่งเป็นจำนวนสถานีถ่ายทอดที่มากที่สุดที่สามารถติดตั้งได้เมื่อพิจารณาจากงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 50 โนค จากผลการทดลองจะสังเกตว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ หรือ f_1 มีค่าลดลง ในขณะที่จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย หรือ f_2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสร้างสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์นี้เป็นปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุด (minimization) ดังนั้นถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใดมีค่าถ่วงน้ำหนักที่มากกว่าจะอยู่กับวัตถุประสงค์นั้นจะทำให้วัตถุประสงค์นั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าอีกวัตถุประสงค์ เพราะจะทำให้ค่าของวัตถุประสงค์นั้นมีค่าลดลงมากกว่าอีกวัตถุประสงค์หนึ่ง เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเทียบได้กับการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียวโดยจะเหลือเพียงวัตถุประสงค์ที่ 2 เท่านั้น จะสังเกตเห็นว่าค่า f_2 นั้นจะมีค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 10 โนค ส่งผลให้ f_1 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 119432.6 จูล เนื่องจากจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายมีผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย แสดงให้เห็นว่าถ้าติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด โนคตรวจรู้จะมีการใช้พลังงานในเครือข่ายสูงสุด จากนั้นเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า 0.02 ไปจนถึง 0.3 นั้นจะสังเกตเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อ f_2 หรือจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย ทำให้ระดับพลังงานรวมในเครือข่ายมีค่าคงที่ เนื่องจากติดตั้งสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 10 โนคทุก ๆ ค่าถ่วงน้ำหนัก และเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่

1 มีค่ามากพอ จะส่งผลให้เครือข่ายต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเป็น 0.32 จะส่งผลต่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ทำให้ f_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11 โนค และการเพิ่มขึ้นของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะส่งผลต่อค่า f_1 และ f_2 ไปจนกระทั่งเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเป็น 1 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักที่คุณอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ 2 นั้นมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาจากคำตอบที่ได้พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 นั้นจะส่งต่อจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย หรือ f_2 ทำให้ต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากที่สุด เพื่อให้ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้มีค่าลดลงต่ำที่สุด จากการทดลองพบว่าในเครือข่ายนี้เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากที่สุดจะทำให้เครือข่ายมีพลังงานเท่ากับ 9892.63 จูล แสดงให้เห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักมีอิทธิพลต่อความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นั่นคือ ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักที่คุณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่คุณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 แล้ว ก็จะส่งผลให้ค่า f_1 มีค่าลดลง และส่งผลให้ค่า f_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ก็ต่อเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าสูงพอที่จะทำให้วัตถุประสงค์ที่ 1 มีความสำคัญมากกว่าวัตถุประสงค์ที่ 2 หรือกล่าวได้ว่า ค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คุณอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักนั้น

ค. สรุปผลการทดลอง

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้เสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียว โดยศึกษาการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ คือ วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปมีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้เครือข่ายติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยมีงบประมาณติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดสูงที่สุดได้ไม่เกิน 25 โนค จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 แล้ว จะส่งผลให้มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนเพิ่มขึ้น เพื่อให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 มีค่าสูงมากพอ จะส่งผลให้เครือข่ายติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดลดลง ทำให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับค่าของวัตถุประสงค์ที่มันคุณอยู่ คือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง หรือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าลดลงจะทำให้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการ สอง
วัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด

w_1	w_2	z	$f_1(x)$ (จุด)	$f_2(x)$ (โนด)	$F_1(x)$	$F_2(x)$
0	1	0	119432.6	10	1	0
0.02	0.98	114.6	72660.69	10	0.573018	0
0.04	0.96	229.21	72660.69	10	0.573018	0
0.06	0.94	343.81	72660.69	10	0.573018	0
0.08	0.92	458.41	72660.69	10	0.573018	0
0.1	0.9	573.02	72660.69	10	0.573018	0
0.12	0.88	687.62	72660.69	10	0.573018	0
0.14	0.86	802.22	72660.69	10	0.573018	0
0.16	0.84	916.83	72660.69	10	0.573018	0
0.18	0.82	1031.43	72660.69	10	0.573018	0
0.2	0.8	1146.04	72660.69	10	0.573018	0
0.22	0.78	1260.64	72660.69	10	0.573018	0
0.24	0.76	1375.24	72660.69	10	0.573018	0
0.26	0.74	1489.85	72660.69	10	0.573018	0
0.28	0.72	1604.45	72660.69	10	0.573018	0
0.3	0.7	1719.05	72660.69	10	0.573018	0
0.32	0.68	2109.28	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.34	0.66	1948.26	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.36	0.64	2033.35	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.38	0.62	2109.28	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.4	0.6	2185.2	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.42	0.58	2261.13	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.44	0.56	2337.06	58780.21	11	0.446302	0.0667
0.46	0.54	2395.26	49785.43	12	0.364189	0.1333
0.48	0.52	2431.03	41636.64	13	0.289798	0.2
0.5	0.5	2448.99	41636.64	13	0.289798	0.2

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง
วัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โหนด (ต่อ)

w_1	w_2	z	$f_1(x)$ (จุด)	$f_2(x)$ (โหนด)	$F_1(x)$	$F_2(x)$
0.52	0.48	2466.95	41636.64	13	0.289798	0.2
0.54	0.46	2482.7	35371.01	14	0.232599	0.2667
0.56	0.44	2475.89	35371.01	14	0.232599	0.2667
0.58	0.42	2469.08	35371.01	14	0.232599	0.2667
0.6	0.4	2462.26	35371.01	14	0.232599	0.2667
0.62	0.38	2441.27	26168.71	16	0.148591	0.4
0.64	0.36	2390.98	26168.71	16	0.148591	0.4
0.66	0.34	2340.7	26168.71	16	0.148591	0.4
0.68	0.32	2290.42	26168.71	16	0.148591	0.4
0.7	0.3	2240.06	23037.81	17	0.120009	0.4667
0.72	0.28	2170.73	23037.81	17	0.120009	0.4667
0.74	0.26	2101.4	23037.81	17	0.120009	0.4667
0.76	0.24	2023.71	20611.27	18	0.097857	0.5333
0.78	0.22	1933.27	18504.56	19	0.078624	0.6
0.8	0.2	1802.47	14490.01	21	0.041975	0.7333
0.82	0.18	1664.2	14490.01	21	0.041975	0.7333
0.84	0.16	1525.93	14490.01	21	0.041975	0.7333
0.86	0.14	1372.15	13103.70	22	0.02932	0.8
0.88	0.12	1191.16	10777.79	24	0.008086	0.9333
0.9	0.1	1000.05	9892.63	25	0	1
0.92	0.08	800.05	9892.63	25	0	1
0.94	0.06	600.05	9892.63	25	0	1
0.96	0.04	400.05	9892.63	25	0	1
0.98	0.02	200.06	9892.63	25	0	1
1	0	0.0573	9892.63	25	0	1

4.2.1.2 การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย

หัวข้อนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก โดยวัตถุประสงค์ที่ 1 ต้องการให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 ต้องการให้ติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

ก. พารามิเตอร์ในการทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้ได้พิจารณาใช้พารามิเตอร์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.1.1 โดยพิจารณาเครือข่ายในพื้นที่ขนาด กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานี ติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของเครือข่าย และพิจารณากรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด 50 โนด และ 80 โนด สำหรับเครือข่ายแต่ละขนาดได้ทำการช่ຸมตำแหน่งของโนดตรวจรู้ 5 ครั้ง รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงตัวอย่างตำแหน่งของโนดตรวจรู้จากการช่ຸมครั้งที่ 1 สำหรับเครือข่ายขนาด 30, 50 และ 80 โนด ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละเครือข่ายนั้น ได้ใช้สมการวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ดังสมการที่ (4.4) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ฟังก์ชันผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก w_1 และ w_2 โดยในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนัก โดยเพิ่มค่าของ w_1 ขึ้นครั้งละ 0.02 ในขณะที่ลดค่าถ่วงน้ำหนัก w_2 ลงครั้งละ 0.02

ข. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้น โบนารีแบบสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก เมื่อได้คำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 (ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย) และ f_2 (จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย) มาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ทั้งสองดังกล่าวต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย รูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30, 50 และ 80 โนด ตามลำดับ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนัก w_1 และ w_2 เปลี่ยนไปครั้งละ 0.02

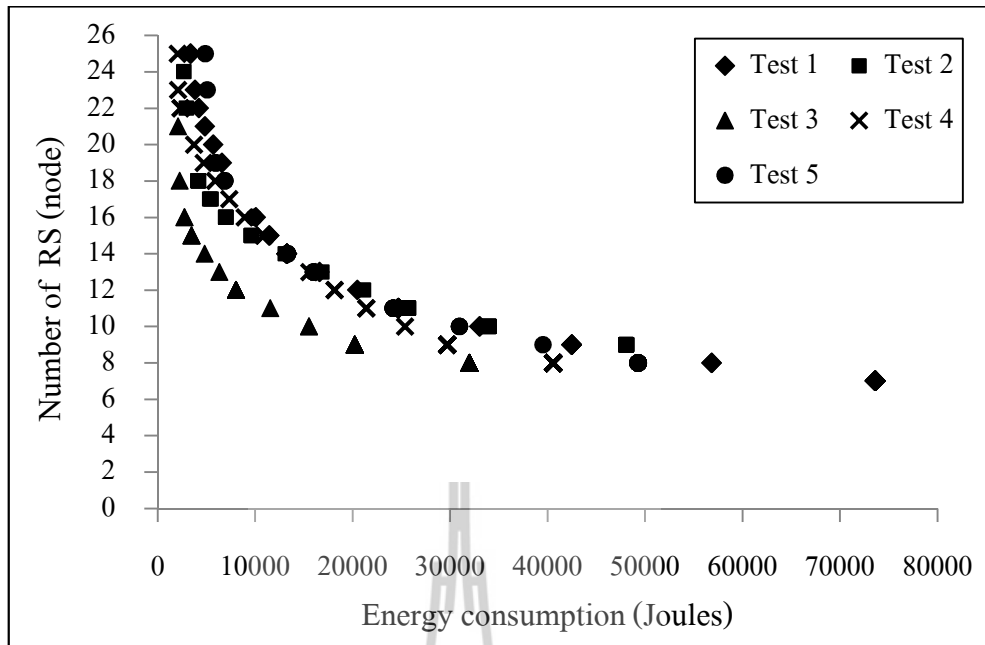
พิจารณารูปที่ 4.11 เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด จากกราฟ pareto front มีลักษณะการเรียงตัวแบบเป็นแนวเส้นของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 เมื่อค่าถ่วงน้ำหนัก

ของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้นช่วงละ 0.02 และค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองมีค่าลดลงช่วงละ 0.02 สังเกตได้ว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณามีลักษณะการแลกเปลี่ยน (tradeoff) แบบแปรผกผัน โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลจะมีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายนั้น มีผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย เพราะการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจะทำให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลลดลง แต่เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจนถึงจำนวนประมาณ 16 โนค การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย จะมีผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง ซึ่งในการทดสอบครั้งที่ 1 ถึง 5 นี้จะมีผลการทดลองต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งมีตำแหน่งการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ที่แตกต่างกัน

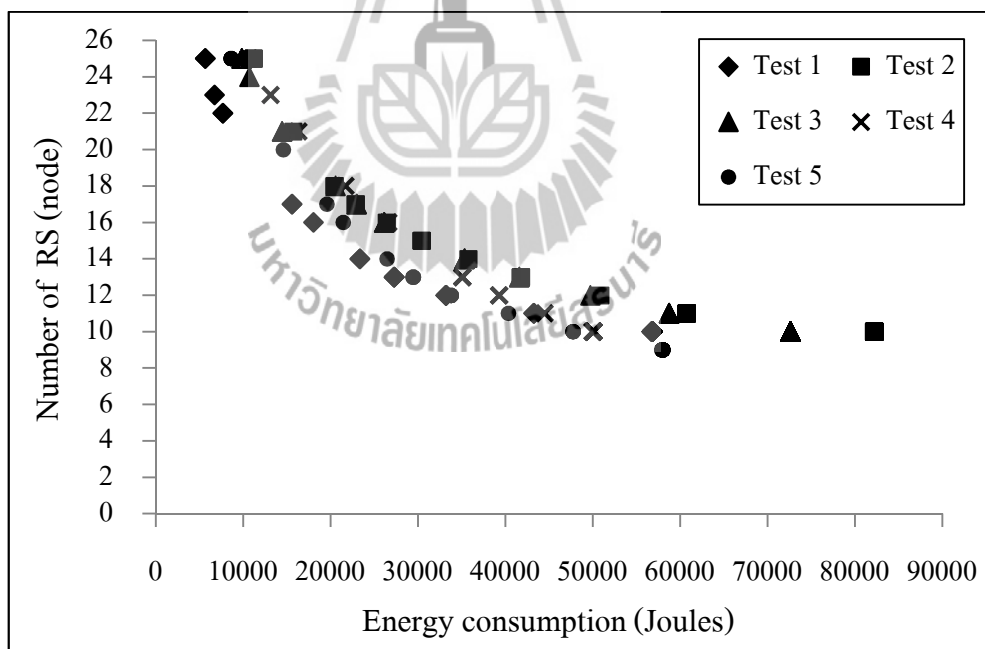
พิจารณารูปที่ 4.12 เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ 50 โนค จะเห็นว่าผลการทดลองจะเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีเครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค แต่ค่าของวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ภายในเครือข่ายจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากมีจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจนถึงจำนวนประมาณ 22 โนค การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย จะมีผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยการทดสอบทั้ง 5 ครั้งจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากแต่ละการทดสอบมีตำแหน่งการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ที่ต่างกัน

พิจารณารูปที่ 4.13 เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ 80 โนค จะเห็นว่าผลการทดลองจะเป็นไปในทำนองเดียวกับเครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค และ 50 โนค แต่การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ภายในเครือข่ายจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากมีจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจนถึงจำนวนประมาณ 22 โนค การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย จะมีผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยการทดสอบทั้ง 5 ครั้งจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากแต่ละการทดสอบมีตำแหน่งการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ที่ต่างกัน

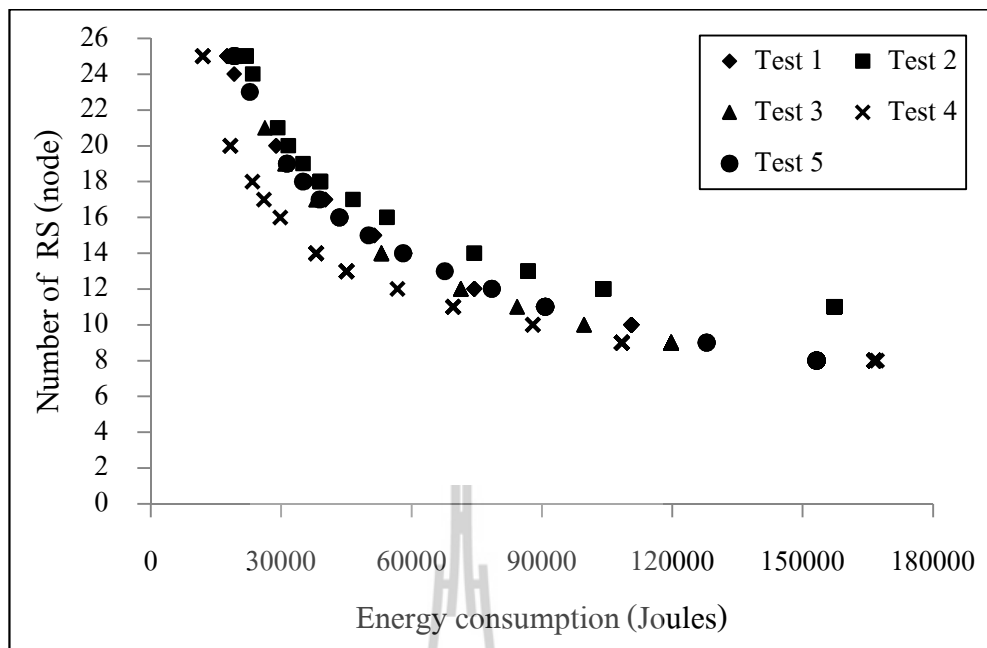
รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โนค โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้งด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักพบว่าเครือข่ายทั้งสามขนาดจะมีผลการทดลองที่เป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายจะลดลง เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น โดยโนคตรวจรู้จะมีการใช้พลังงานสูงที่สุดในเครือข่ายเครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 80 โนค และมีการใช้พลังงานลดลงเมื่อจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายมีจำนวนลดลง



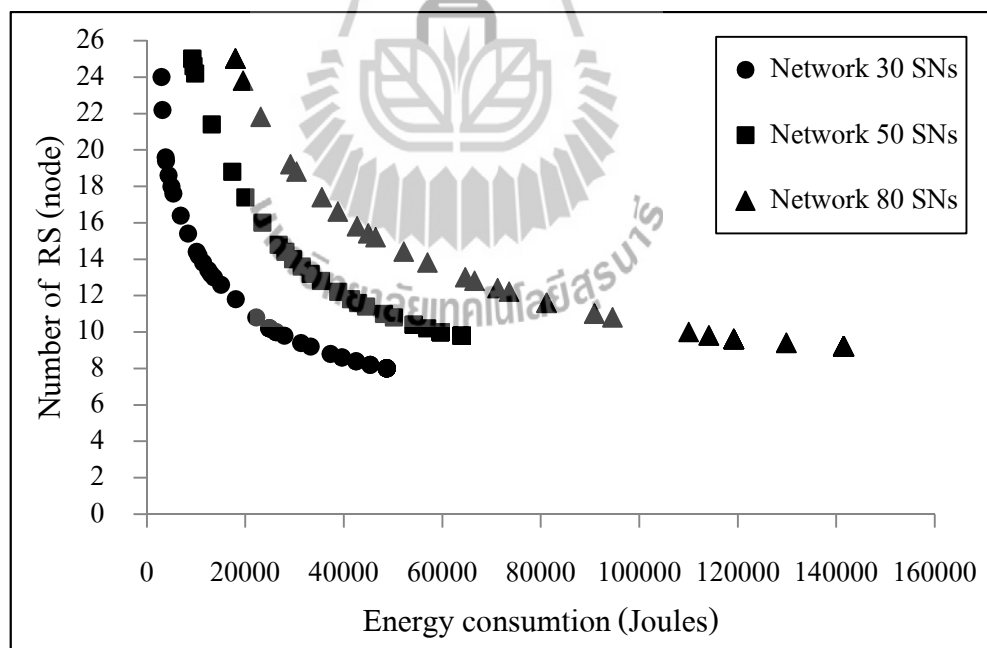
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โหนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โหนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก



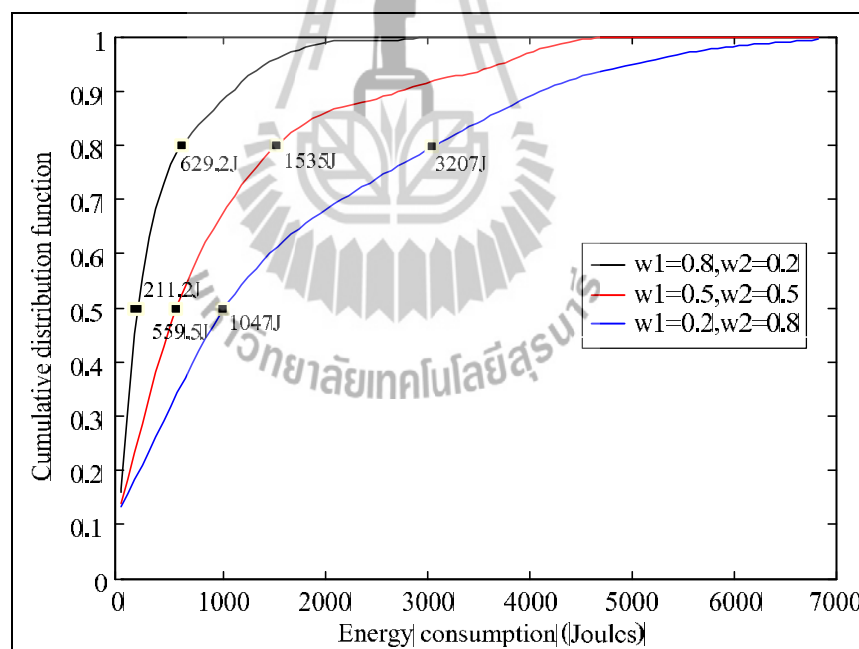
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โหนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก



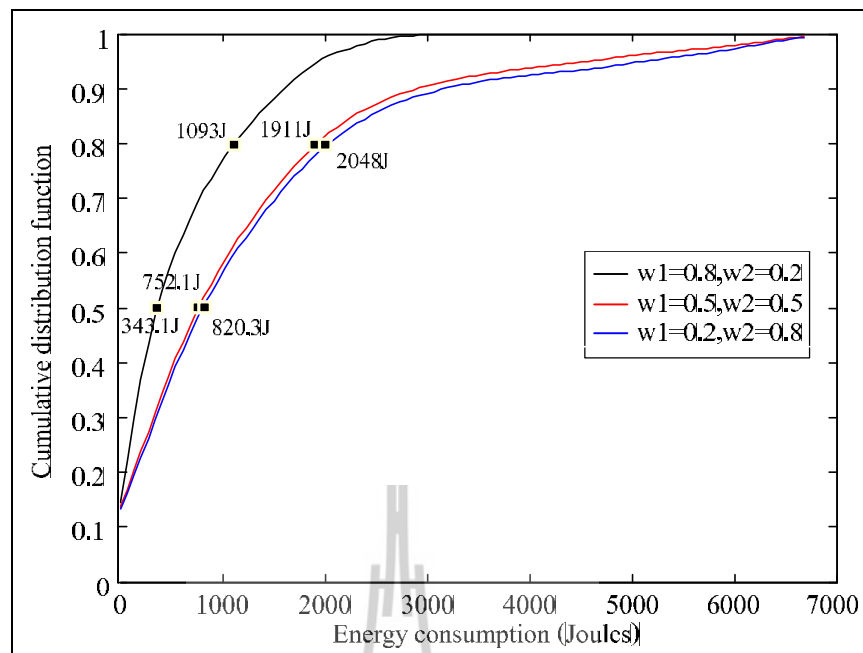
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 ในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โหนด เมื่อใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในสมการวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ สมการที่ (4.4) ต่อปริมาณพลังงานรวมที่โนคตรวจรู้ในเครือข่ายใช้ในการรับ และส่งข้อมูล รูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแตกต่างกันในเครือข่ายขนาด 30, 50 และ 80 โนค ตามลำดับ

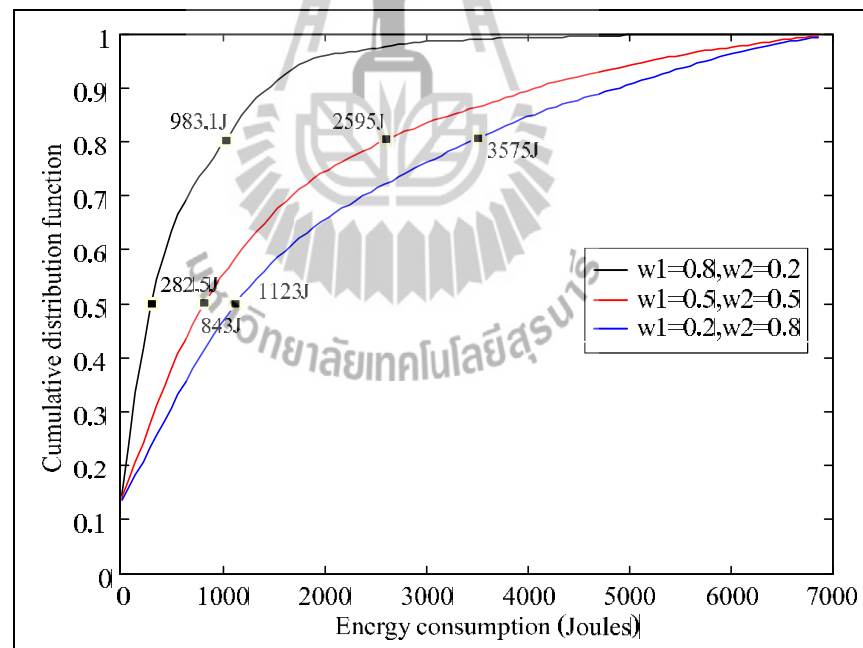
พิจารณารูปที่ 4.15 เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค จะเห็นว่าเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 (w_1) เท่ากับ 0.2 พบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานมากถึง 3207 จูลต่อโนค เมื่อเปรียบเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่มีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.5 พบว่าโนคตรวจรู้มีการใช้พลังงาน 629.2 และ 1535 จูล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักส่งผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย โดยเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามาก จะทำให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงแนวโน้มการใช้พลังงานเช่นเดียวกันสำหรับกรณีเครือข่ายขนาด 50 และ 80 โนค



รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 30 โนค



รูปที่ 4.16 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 50 โหนด



รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 80 โหนด

ค. สรุปผลการทดลอง

หัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และศึกษาผลกระทบจากขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวัตถุประสงค์ที่ศึกษามีการแลกเปลี่ยนแบบแปรผกผันกัน โดยการใช้งานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น โดยเครือข่ายที่มีการใช้พลังงานสูงสุด คือ เครือข่ายขนาด 80 โนด และการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย

4.2.2 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีลำดับชั้น

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นสมการวัตถุประสงค์เดียวด้วยวิธีลำดับชั้น เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย ในที่นี้พิจารณาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการโปรแกรมเชิงเส้น ไบนารีสองวัตถุประสงค์ ดังได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.6 คือ วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดเพื่อให้เครือข่ายสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีลำดับชั้นมีหลักการดังกล่าวในบทที่ 2 ของหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithms (Deb K. 2009) คือ ให้ค่าของวัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญมากกว่าให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และให้วัตถุประสงค์อื่น ๆ ซึ่งมีความสำคัญรองลงมาเป็นเรื่องอื่น โดยสามารถกำหนดค่าคงที่ที่ใช้เป็นเงื่อนไขตามความเหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad f_1(x) \\ & \text{subject to} \quad f_2(x) \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (4.5)$$

เมื่อ ε คือ ค่าคงที่ขอบเขตบน (Upper bound) ของค่า $f_2(x)$

งานวิจัยนี้จะกำหนดให้ $f_1(x)$ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ $f_2(x)$ เป็นเงื่อนไข โดยค่าคงที่ ε นั้นเป็นจำนวนสถานีถ่ายทอดที่มากที่สุดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย โดยจะมีจำนวนไม่เกิน 25 โนดเนื่องจากงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่วนเงื่อนไขข้ออื่น ๆ นั้นยังคงใช้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสมการที่ (3.2) ถึง (3.12) จากหัวข้อที่ 3.5 จากนั้นจะทำการหาโครงสร้างเครือข่ายที่ดี

ที่สุดที่ทำให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุด เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดตามจำนวนที่กำหนดไว้ในเงื่อนไข โดยการหาคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละครั้งนั้นจะเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นครั้งละ 1 โนค จนกระทั่งถึงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้มากที่สุด หลังจากได้คำตอบที่ดีที่สุดคือ ค่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลแล้ว จะนำคำตอบที่ได้คือ ค่าพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไป และ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสองวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์

4.2.2.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง

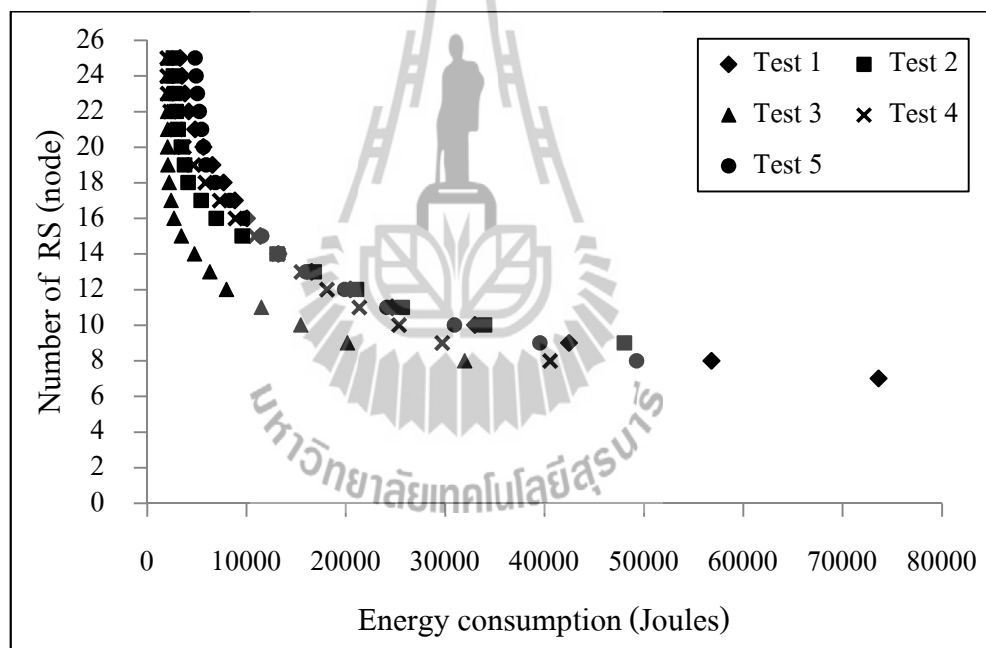
การทดลองในหัวข้อนี้ได้พิจารณาใช้พารามิเตอร์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.1.1 โดยพิจารณาเครือข่ายในพื้นที่ขนาด กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานี ติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของเครือข่าย และพิจารณากรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค 50 โนค และ 80 โนค สำหรับเครือข่ายแต่ละขนาดได้ทำการช่อมตำแหน่งของโนคตรวจรู้ 5 ครั้ง รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงตัวอย่างตำแหน่งของโนคตรวจรู้จากการช่อมครั้งที่ 1 สำหรับเครือข่ายขนาด 30, 50 และ 80 โนค ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย

4.2.2.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

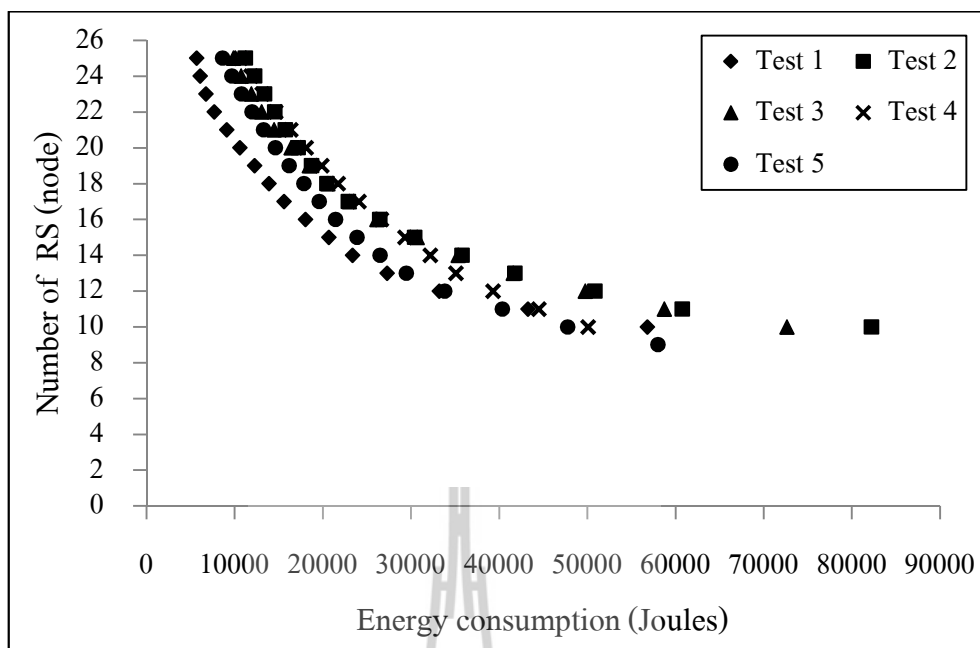
จากการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีแบบสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีลำดับชั้น เมื่อได้คำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 (ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย) และ f_2 (จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย) มาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ทั้งสองดังกล่าว รูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 30, 50 และ 80 โนค ตามลำดับ

พิจารณารูปที่ 4.18 กรณีเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค จากกราฟ pareto front มีลักษณะการเรียงตัวแบบเป็นแนวเส้นของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจากจำนวนสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุดถึงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่มากที่สุดที่เลือกติดตั้งได้คือ 25 โนค โดยจำนวนสถานีถ่ายทอดจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 โนค จะเห็นว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณามีลักษณะการแลกเปลี่ยน (tradeoff) แบบแปรผกผัน โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่งคือ พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลจะมีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สองคือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจำนวน

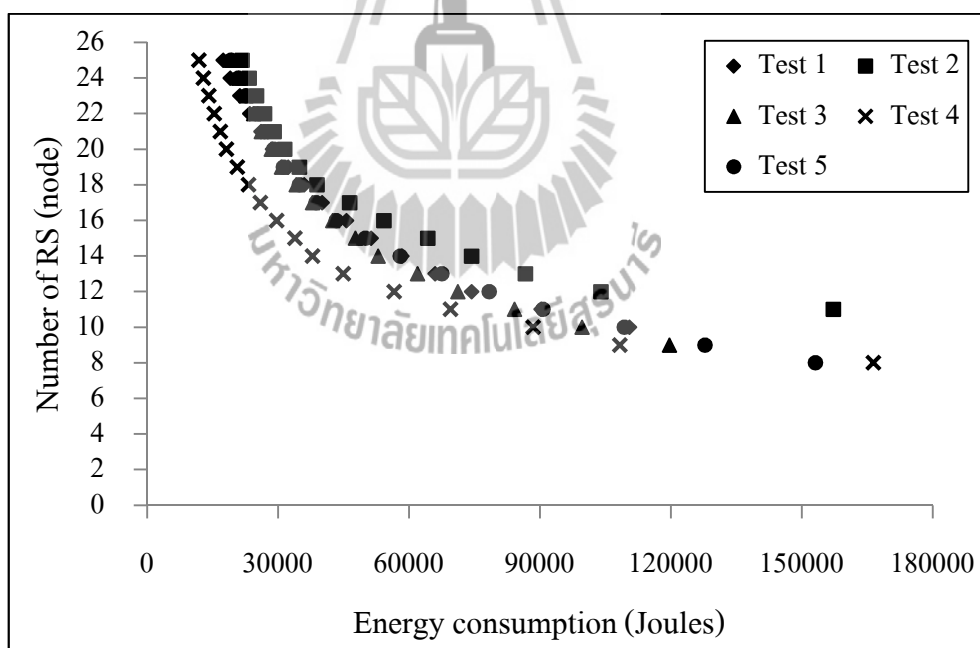
สถานีถ่ายทอดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายทำให้โหนดมีการใช้พลังงานลดลง นอกจากนี้จะสังเกตว่าเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดตั้งแต่ 18 โหนดขึ้นไป การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดจะส่งผลต่อการค่าพลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยในการทดสอบแต่ละครั้งนั้น โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายจะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 นั้นเป็นกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดตรวจรู้เพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 80 โหนด ซึ่งมีการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกับกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโหนดตรวจรู้ 30 โหนด แต่สิ่งที่ต่างกัน คือ เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 50 โหนด และ 80 โหนดนั้นจะสังเกตเห็นว่าเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดตั้งแต่ 22 โหนดขึ้นไป การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดจะส่งผลต่อการค่าพลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 30 โหนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น

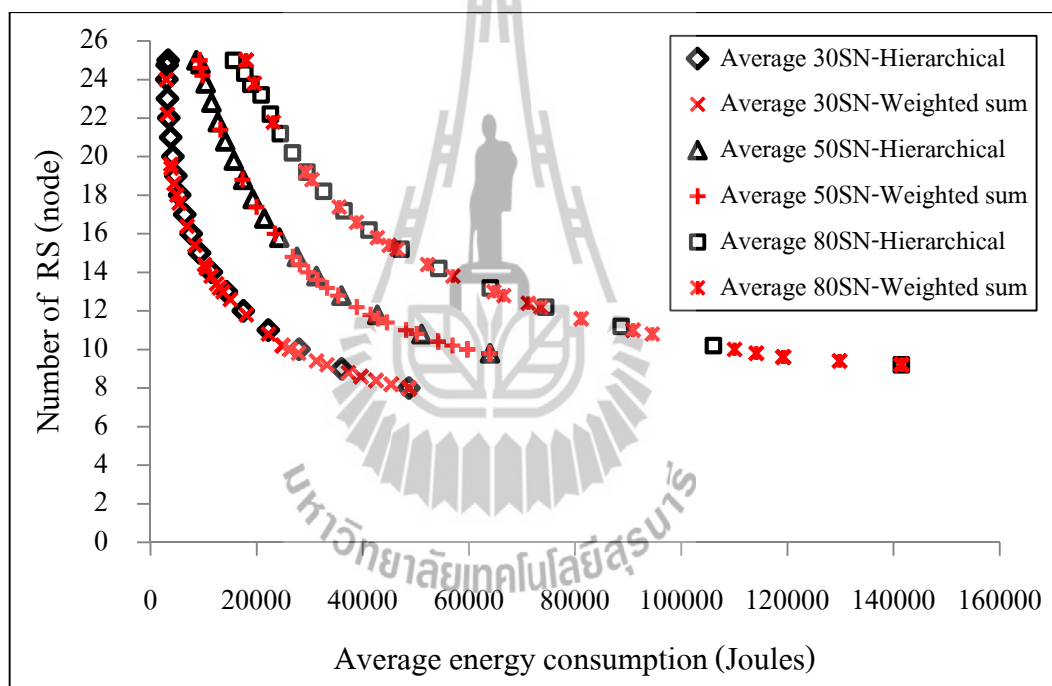


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2 สำหรับเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไป และค่าเฉลี่ยของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายเมื่อมีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนดเมื่อใช้วิธีลำดับชั้น (Hierarchical method) เปรียบเทียบกับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) จากกราฟจะเห็นว่า pareto-front ของทั้งสองวิธีอยู่ในแนวเดียวกัน แต่วิธีลำดับชั้นสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก กล่าวคือ สามารถหาคำตอบได้ทุกค่าของจำนวนสถานีถ่ายทอด เนื่องจากวิธีลำดับชั้นนั้นได้กำหนดให้นำวัตถุประสงค์อื่นที่มีความสำคัญรองลงมา นำมากำหนดให้เป็นเงื่อนไข ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกค่าคงที่ที่น้อยที่สุด จากจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ต้องใช้ในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นทีละ 1 โนด จึงทำให้มีค่าคำตอบในทุกตำแหน่งของจำนวนสถานีถ่ายทอด



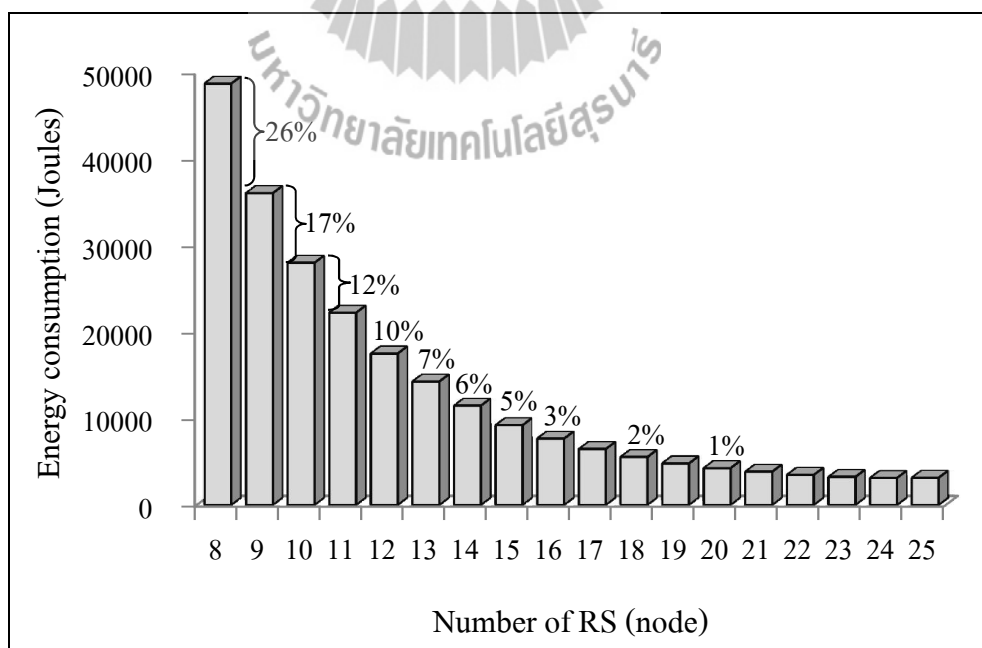
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น และวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

รูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โนดตามลำดับ พิจารณารูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นกรณีที่เครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลงเมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดอย่าง

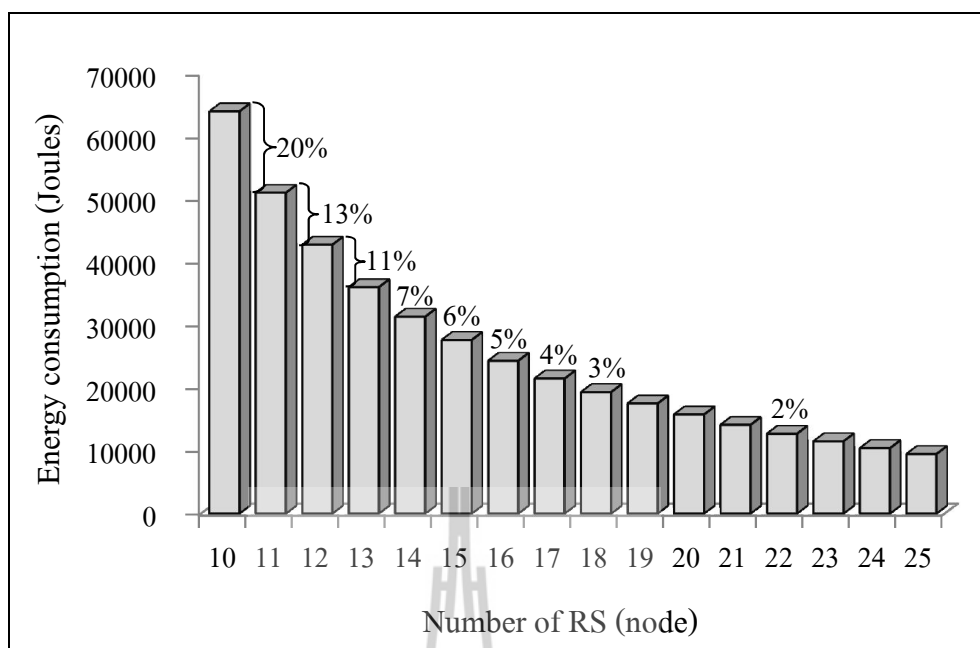
น้อยที่สุด 8 โหนด เพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และเมื่อใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นเป็น 9 โหนด จะทำให้ระดับการใช้พลังงานลดลง 26 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีจำนวนสถานีถ่ายทอด 8 โหนด และเมื่อเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นอีก การใช้พลังงานก็จะลดลง สังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นถึง 16 โหนด ต่อจากนั้นการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายจะทำให้การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ลดลงได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

รูปที่ 4.23 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานในเครือข่ายขนาด 50 โหนด กรณีนี้จะต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดอย่างน้อย 10 โหนด เพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นเป็น 11 โหนด จะทำให้ระดับพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นอีก การใช้พลังงานก็จะลดลง สังเกตได้ว่าเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นถึง 19 โหนดแล้ว ต่อจากนั้นการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายจะทำให้การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ลดลงได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

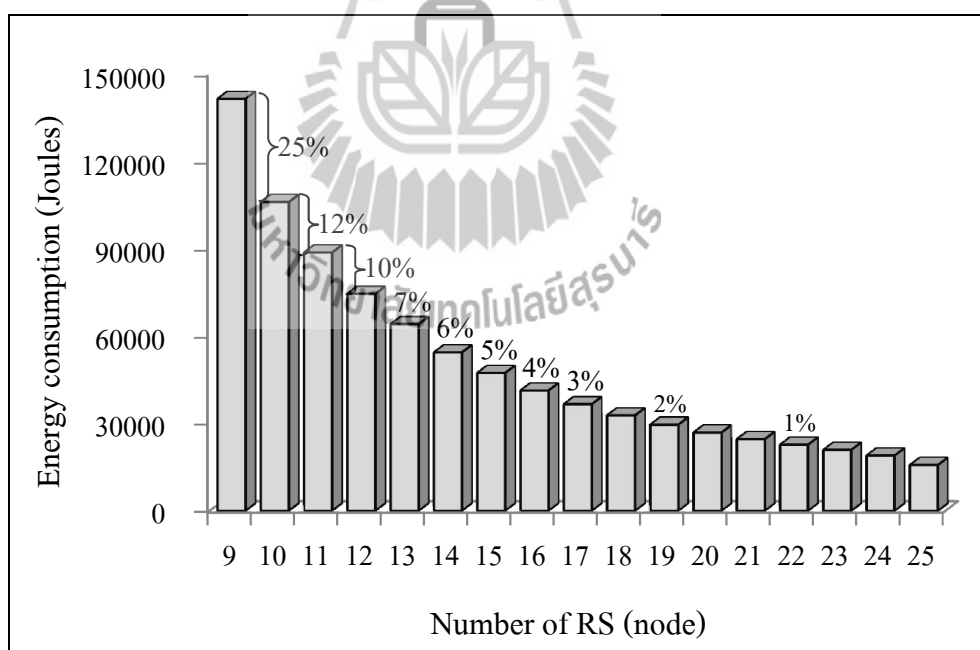
จากรูปที่ 4.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานในเครือข่ายขนาด 80 กรณีนี้จะต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดอย่างน้อย 9 โหนด เพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นเป็น 10 โหนด จะทำให้ระดับพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นอีก การใช้พลังงานก็จะลดลง สังเกตได้ว่าเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นถึง 19 โหนดแล้ว ต่อจากนั้นการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายจะทำให้การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ลดลงได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นในเครือข่ายขนาด 30 โหนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น



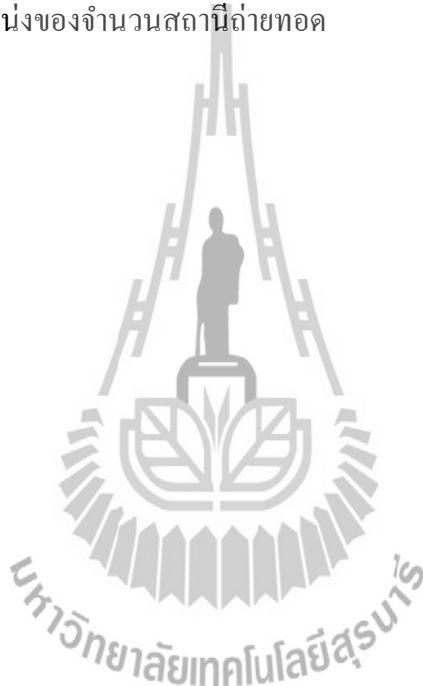
รูปที่ 4.23 เปรี่เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น
ในเครือข่ายขนาด 50 โหนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น



รูปที่ 4.24 เปรี่เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น
ในเครือข่ายขนาด 80 โหนด เมื่อใช้วิธีลำดับชั้น

4.2.2.3 สรุปผลการทดลอง

สำหรับการออกแบบในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีลำดับชั้น และศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย จากผลการทดลองจะเห็นว่า การใช้วิธีลำดับชั้นนั้นจะสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากหลักการหาคำตอบด้วยวิธีลำดับชั้นนั้นจะเปลี่ยนสมการวัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองลงมา ใช้กำหนดให้เป็นเงื่อนไขซึ่งในงานวิจัยนี้จะเปลี่ยนวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งให้น้อยที่สุดใช้เป็นเงื่อนไข ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นทีละ 1 ค่า จะทำให้ได้คำตอบของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปทุกตำแหน่งของจำนวนสถานีถ่ายทอด



บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคและสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีหลักการเพื่อลดผลกระทบของการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโหนดตรวจรู้ โดยได้กำหนดโครงสร้างการรับส่งข้อมูล ด้วยการใช้สถานีถ่ายทอด (Relay station: RS) ในเครือข่าย เพื่อให้ได้เครือข่ายที่มีอายุการใช้งานในระยะเวลาตามที่ต้องการ และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายอยู่ในงบประมาณที่กำหนด เพื่อให้การใช้งานเครือข่ายคุ้มค่า และได้ประโยชน์จากการลงทุนมากที่สุด

เทคนิคการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming) แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple Objectives) เพื่อกำหนดจำนวนและตำแหน่งในการติดตั้งสถานีฐานถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุดในเครือข่าย รวมถึงการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการส่งข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ไปยังสถานีฐาน ซึ่งสามารถส่งผ่านโหนดตรวจรู้หรือผ่านสถานีถ่ายทอดหรือส่งให้สถานีฐานโดยตรงก็ได้ โดยมีหลักการเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านข้อมูลของโหนดตรวจรู้

ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดให้กับปัญหาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่อยู่ในรูปของโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) และวิธีลำดับชั้น (Hierarchical method) จากการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีให้ลักษณะคำตอบในแนวเดียวกัน แต่วิธีลำดับชั้นสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก กล่าวคือสามารถหาคำตอบได้ทุกค่าของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย ทำให้สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างเครือข่ายได้ทุกกรณีของการใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ต่างกัน

จากการทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะการใช้พลังงานรวมของโหนดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น สรุปข้อสังเกตต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับลักษณะการกระจายตัวของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงจำนวนและตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดอีกด้วย

- จากการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก เมื่อวัตถุประสงค์ที่ 1 คือต้องการให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไป มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้เครือข่ายติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด สรุปได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับค่าของวัตถุประสงค์ที่มันคูณอยู่ กล่าวคือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้การใช้พลังงานที่โนคตรวจรู้ในเครือข่ายใช้ไปลดลง หรือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนลดลง
- จากการทดลองออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีลำดับชั้น และศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของ โนคตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย พบว่าการใช้วิธีลำดับชั้นนั้นจะสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากหลักการหาคำตอบด้วยวิธีลำดับชั้นนั้นจะเปลี่ยนสมการวัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองลงมา ให้อยู่ในรูปของเงื่อนไข ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งให้น้อยที่สุดให้เป็นเงื่อนไข ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นทีละ 1 สถานี ก็ทำให้ได้คำตอบของพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไป ทุกตำแหน่งของจำนวนสถานีถ่ายทอด

เทคนิคการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับหน่วยงานที่ต้องทำการออกแบบและวางแผน โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งการประยุกต์ใช้สถานีถ่ายทอดทำให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ไร้สายในเครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการทำงานของเครือข่ายได้นานตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากการใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีแบบหลายวัตถุประสงค์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอก สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการออกแบบและวางแผน โครงสร้างเครือข่ายไร้สายประเภทอื่นได้

สำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต สามารถพิจารณาใช้วัตถุประสงค์เพิ่ม หรือปรับเปลี่ยนวัตถุประสงค์ หรือ เงื่อนไขอื่น ๆ เพื่อใช้ในการวัดสมรรถนะของโครงสร้างเครือข่ายได้ เช่น การครอบคลุมของพื้นที่ให้มากที่สุด เพื่อให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด และสามารถนำวัตถุประสงค์ที่พิจารณานั้นมาสร้างสมการแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ได้อีกด้วย รวมทั้งการพัฒนาเทคนิควิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี

อื่นๆ เช่น Genetic algorithm หรือ วิธี Greedy ซึ่งจะให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด
ในระยะเวลาที่จำกัด เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] ประกอบ จิริกิติ (2535). การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming). โครงการส่งเสริมเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- [2] สุทธิมา ชำนาญเวช (2552). การวิจัยดำเนินงาน (Operation Research). วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ ฯ.
- [3] Angrisani, L., Bertocco, M., Fortin, D., and Sona, A. (2008). Experimental Study of Coexistence Issues Between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 Wireless Networks, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 57: 1514-1523.
- [4] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, and Cayirci, E. (2002). Wireless Sensor Networks: A Survey, Computer Networks 38: 393-422.
- [5] Al-Karaki, J.N., and Kaml, A.E. (2004). Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey, Wireless Communications, IEEE, Vol. 11: 6-28.
- [6] Al-Turjman, F.M., Hassanein H.S., and Ibnkahla M.A. (2009). Connectivity Optimization With Realistic Lifetime Constraints for Node Placement in Environmental Monitoring, in Communications, ICC'09, IEEE International Conference: 1-6.
- [7] Azad, A.P., and Chockalingam, A. (2006). Mobile Base Stations Placement and Energy Aware Routing in Wireless Sensor Networks, WCNC IEEE, Vol. 1, No. 1683475: 264-269.
- [8] Bari, A., Teng, D., and Jaekel A. (2009). Optimal Relay Node Placement in Hierarchical Sensor Networks with Mobile Data Collector, Computer Communications and Networks, ICCCN 2009, Proceedings of 18th International Conference: 1-6.
- [9] Bari, A. (2005). Relay Nodes in Wireless Sensor Networks: A Survey, Course: 60-520, University of Windsor.
- [10] Deb, K. (2009). Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.
- [11] Goldsmith, A. (2007). Wireless Communications, Markono Print Media Pte Ltd, Singapore.
- [12] Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008). On Relay Node Placement and Assignment for Two-tiered Wireless Networks, Moblie Network Application: 186-197.
- [13] Hande, A., Polk, T., Walker, W., and Bhatia D. (2007). Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes, Microprocessors and Microsystems, Vol. 31: 420-432.

- [14] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2000). Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences.
- [15] Hou, Y.T., Shi, Y., Sherali, H.D., and Midkiff, S.F. (2005). On Energy Provisioning and Relay Node Placement for Wireless Sensor Networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 4, Issue. 5: 2579-2590.
- [16] IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements (2006), Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Standard 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Standard 802.15.4-2003), (2006): 0_1-305.
- [17] Jia, J., Chen, J., Chang, G., Wen, Y. and Song, J. (2009). Multi-Objective Optimization for Coverage Control in Wireless Sensor Network with Adjustable Sensing Radius, Computers and Mathematics with Applications, Vol. 57: 1767-1775.
- [18] Kim I.Y., De Weck O.L. (2005). Adaptive Weighted-sum Method for Bi-objective Optimization: Pareto front Generation, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 29: 149-158.
- [19] Gongbo, Z., Zhencat, Z., Guangzhu, C., and Ningning, H. (2009). Energy-Efficient Chain-Type Wireless Sensor Network for Gas Monitoring, Second International Conference on Information and Computing Science, ICIC'09: 125-128.
- [20] Grodzevich, Oleksandr O., and R. (2006). Normalization and Other Topics in Multi-Objective Optimization [Study group report], Proceeding of The Fields-MITACS Industrial Problem Workshop, August 2006: 89–101.
- [21] MaxStream Incorporation (2006). IEEE 802.15.4 OEM RF Modules, www.MaxStream.net, 12 July 2006.
- [22] Miettinen, K. (2001). Some Method for Nonlinear Multi-objective Optimization, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Vol. 1993: Springer Berlin/Heidelberg: 1-20.

- [23] Pandey, S., Dong, S., Agrawal P., and Sivalingam, K.M. (2009). On Performance of Node Placement Approaches for Hierarchical Heterogeneous Sensor Networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol. 14: 401-414.
- [24] Patranabis, D. (1999). *Telemetry Principles*, McGraw-Hill Education Publishing company limited, India.
- [25] Pothuri, P.K., Ranganathan, D.L., Sarangan, V., and Radhakrishnan, S. (2010). Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks for Delay Sensitive Applications, *International Journal of Ad Hoc Ubiquitous Computing*, Vol. 5, No. 2: 103-116.
- [26] Rappaport T.S. (1996). *Wireless Communication Principles and Practice*, Prentice Hall PTR, New Jersey, United States of America.
- [27] Sohraby, K., Minoli D., and Znati T. (2007). *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, United States of America.
- [28] Shi, Y., Hou, Y.T., and Efrat, A. (2009). Algorithm Design for a Class of Base Station Location Problems in Sensor Networks, *Wireless Networks*, Vol. 15, No.1: 21-38.
- [29] Tekinalp, O., and Kararli, G. (2007). A New Multiobjective Simulated Annealing Algorithm, *Journal of Global Optimization*, Vol.39, No. 1: 49-77.
- [30] Wang, Q., Xu, K., Takahara, G., and Hassanein, H. (2007). Transactions Papers - Device Placement for Heterogeneous Wireless Sensor Networks: Minimum Cost with Lifetime Constraints, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 7: 2444-2453.
- [31] Winston, W.L. (1994). *Operation research: Applications and Algorithms* 3rd edition, International Thompson Publishing, Belmont, California.
- [32] Younis, M., Akkaya, K. (2008). Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks: A Survey, *Ad hoc Networks*, Vol. 6: 621-655.
- [33] Zhu, Y, and Han Q. (2009). The More Relay Nodes, The More Energy Efficient?, in *Computational Science and Engineering, CSE'09. International Conference*: 87-92.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลสายอากาศภาคส่ง ภาครับ และสถานีถ่ายทอด

ก.1 ข้อมูลของสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ

ในการออกแบบการเชื่อมต่อในขั้นตอนที่ 2 นั้นจะเป็นการพิจารณาในส่วนของการรับ และส่งข้อมูลระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน โดยใช้การหาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 ไปยังสถานีฐานด้วยหลักการของ minimum spanning tree โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาสายอากาศ 2 ประเภท คือสายอากาศภาคส่งจะเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคิ โดยเลือกใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายที่แตกต่างกัน 4 แบบ และมีราคาแตกต่างกันดังนี้ แบบที่ 1 มีอัตราขยาย 7 dBi แบบที่ 2 มีอัตราขยาย 8 dBi แบบที่ 3 มีอัตราขยาย 15 dBi และแบบที่ 4 มีอัตราขยาย 16 dBi ซึ่งจะพิจารณาติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอดข้างเคียง และ/หรือ สถานีฐาน ส่วนสายอากาศภาครับ ซึ่งจะติดตั้งที่สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานนั้น จะเลือกใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางระนาบเดียว ซึ่งมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

ก.1.1 รายละเอียดของสายอากาศภาคส่ง

1) สายอากาศภาคส่งแบบที่ 1 สายอากาศแบบมีทิศทาง Tactio LAXO-AN-YG07 สำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร ความถี่ 2.4 GHz อัตราขยาย 7 dBi ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบภาพ เสียง ข้อมูล และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN system) ราคา 2,500 บาท

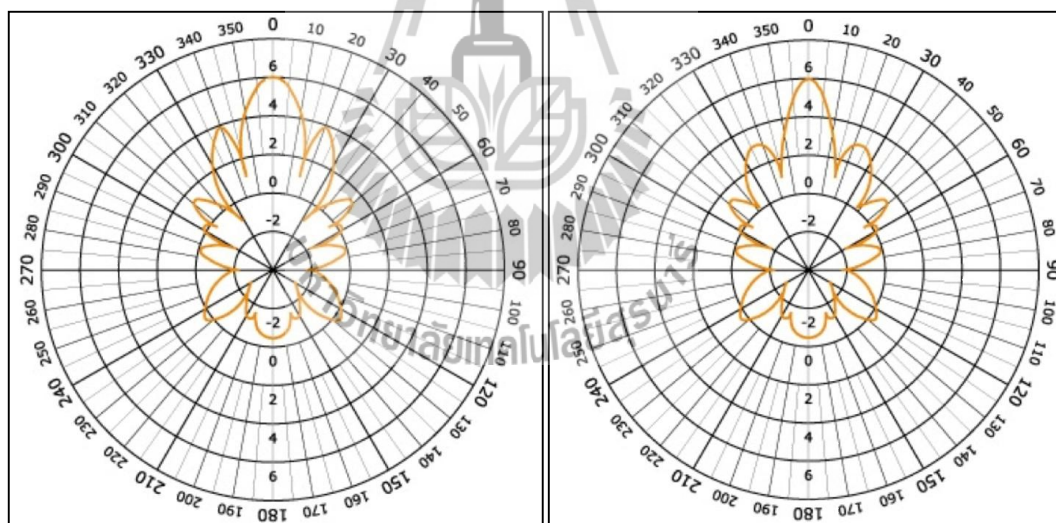
ตารางที่ ก.1 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 ถึง 2.5 GHz
มุมส่งข้อมูลในแนวนอน (horizontal)	30 องศา
มุมส่งข้อมูลในแนวตั้ง (vertical)	20 องศา
อัตราขยาย (gain)	7 dBi
หัวเชื่อมต่อ (connector)	N type Female
ขนาด (dimension) ยาว x กว้าง x สูง	300 x 500 x 45 mm.
น้ำหนัก (weight)	360 g.
รับประกัน (warranty)	1 ปี
ราคา	2,500 บาท

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
การโพลาไรเซชัน (polarization)	แบบเชิงเส้น (linear)
ค่า V.S.W.R.	1 : 1.5 Max
impedance	50 ohms $\pm 5\Omega$
power handling	15W Max
front to back ratio	20 dB
HPBW / horizontal	30 degree
HPBW / vertical	20 degree

โดยสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1 นั้น จะมีแบบรูปการจ่ายพลังงาน H-plane field และ แบบรูปการจ่ายพลังงาน E-plane field ดังรูปที่ ก. 1 ดังนี้



รูปที่ ก.1 แบบรูปสนามแม่เหล็กในระนาบสนามแม่เหล็ก
และสนามไฟฟ้า ของสายอากาศแบบที่ 1

2) สายอากาศภาคส่งแบบที่ 2 สายอากาศแบบมีทิศทาง Tactio LAXO-AN-YG08L (Low profile) สำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร ความถี่ 2.4 GHz อัตราขยาย 8 dBi อุปกรณ์เป็นแบบ Low profile คือ ปรับลดคุณภาพวัสดุลงเล็กน้อย แต่ได้ระยะทางเท่าเดิมราคา 1,600 บาท

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 2

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 ถึง 2.5 GHz
มุมส่งข้อมูลในแนวนอน (horizontal)	30 องศา
มุมส่งข้อมูลในแนวตั้ง (vertical)	20 องศา
อัตราขยาย (gain)	8 dBi
หัวเชื่อมต่อ (connector)	N type Femail
ขนาด (dimension) ยาว x กว้าง x สูง	300 x 50 x 45 mm.
น้ำหนัก (weight)	360 g.
รับประกัน (warranty)	1 ปี
ราคา	1,600 บาท

3) สายอากาศภาคส่งแบบที่ 3 สายอากาศแบบมีทิศทาง Tactio LAXO-AN-YG15 สำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร ความถี่ 2.4 GHz อัตราขยาย 15 dBi ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบภาพ เสียง ข้อมูล และระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN system) ราคา 4,100 บาท

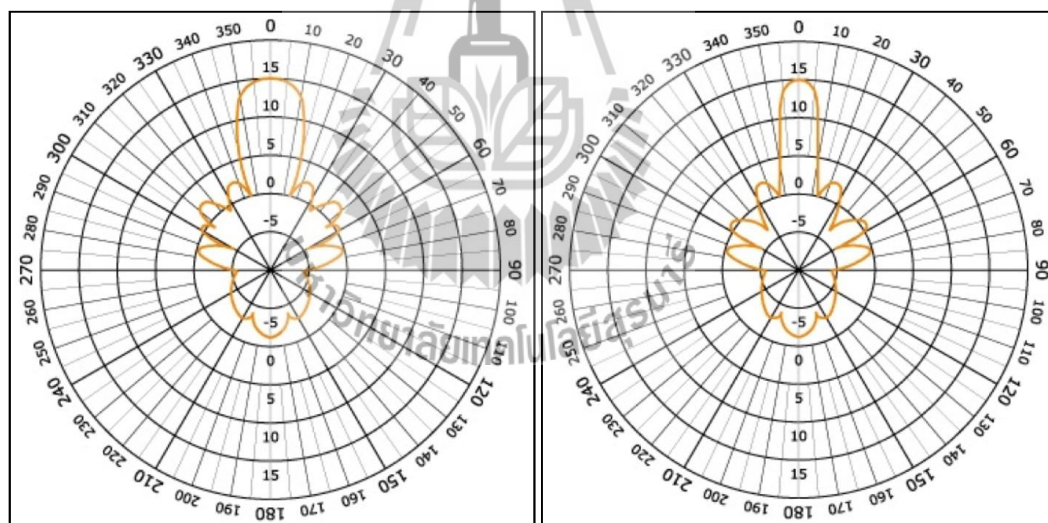
ตารางที่ ก.4 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 3

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 ถึง 2.5 GHz
มุมส่งข้อมูลในแนวนอน (horizontal)	25 องศา
มุมส่งข้อมูลในแนวตั้ง (vertical)	15 องศา
อัตราขยาย (gain)	15 dBi
หัวเชื่อมต่อ (connector)	N type Femail
ขนาด (dimension) ยาว x กว้าง x สูง	770 x 50 x 45 mm.
น้ำหนัก (weight)	570 g.
รับประกัน (warranty)	1 ปี
ราคา	4,100 บาท

ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 3

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
การโพลาไรเซชัน (polarization)	แบบเชิงเส้น (linear)
ค่า V.S.W.R.	1 : 1.5 Max
impedance	50 ohms $\pm 5\Omega$
power handling	15W Max
Front to back ratio	25 dB
HPBW / horizontal	25 degree
HPBW / vertical	15 degree

โดยสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1 นั้น จะมีแบบรูปการจ่ายพลังงาน H-plane field และ แบบรูปการจ่ายพลังงาน E-plane field ดังรูปที่ ก.2 ดังนี้



รูปที่ ก. 2 แบบรูปสนามแม่เหล็กในระนาบสนามแม่เหล็ก
และสนามไฟฟ้า ของสายอากาศแบบที่ 3

3) สายอากาศภาคส่งแบบที่ 4 สายอากาศแบบมีทิศทาง HYA-2450-16 ผลิตและตรวจวัดที่ประเทศไต้หวัน ขนาดกะทัดรัด เหมาะกับพื้นที่ที่มีฝุ่นมาก ทนความร้อน เหมาะสำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ point-to-point หรือ point-to-multipoint ราคา 4,500 บาท

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 4

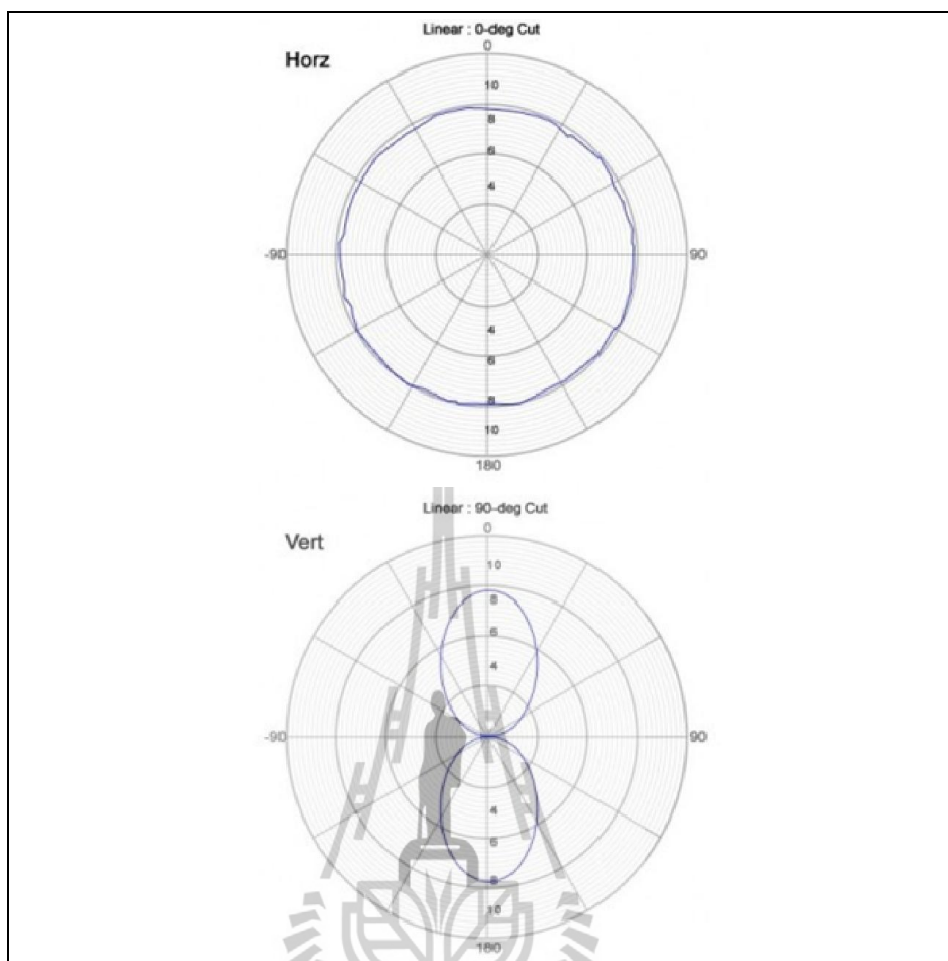
คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 ถึง 2.5 GHz
มุมส่งข้อมูลในแนวนอน (horizontal)	25 องศา
มุมส่งข้อมูลในแนวตั้ง (vertical)	18 องศา
อัตราขยาย (gain)	16 dBi
หัวเชื่อมต่อ (connector)	N type Female+สายนำสัญญาณยาว 20 cm.
ขนาด (dimension) ยาว x กว้าง x สูง	650 x 140 x 75 mm.
น้ำหนัก (weight)	750 g.
รับประกัน (warranty)	1 ปี
ราคา	4,500 บาท

ก.1.2 รายละเอียดของสายอากาศภาครับ

1) สายอากาศภาครับ เป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง สำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร ความถี่ 2.4 GHz อัตราขยาย 8 dBi ราคา 1,500 บาท เหมาะสำหรับพื้นที่ค่อนข้างโล่ง และไม่กว้างมากนัก หรือใช้เพื่อเป็นตัวทวนสัญญาณจากสายอากาศหลัก

ตารางที่ ก.7 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาครับ

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 ถึง 2.5 GHz
มุมส่งข้อมูลในแนวนอน (horizontal)	360 องศา
มุมส่งข้อมูลในแนวตั้ง (vertical)	15 องศา
อัตราขยาย (gain)	8 dBi
หัวเชื่อมต่อ (connector)	N type Female
อุณหภูมิ (เซลเซียส)	-30 องศา ถึง 85 องศา
น้ำหนัก (weight)	0.3 g.
รับประกัน (warranty)	1 ปี
ราคา	1,500 บาท



รูปที่ ก.3 แบบรูปกำลังงานในแนวนอน และแนวตั้งของสายอากาศภาครับ

ก.2 ข้อมูลของสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในงานวิจัย

สถานีถ่ายทอดในงานวิจัยนี้จะมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจาก โหนดตรวจรู้ แล้วทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปยังสถานีฐานในเครือข่าย แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นมีราคาสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หนึ่งที่จะพิจารณาถึงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่าย โดยต้องการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด เนื่องจากงบประมาณในการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งผู้ผลิตได้ทำการผลิตอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายกับสถานีถ่ายทอด โดยงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงอุปกรณ์ของ The DEETER Group จากบริษัท DEETER Electronics Inc จากเว็บไซต์ www.deeterelectronicsinc.com โดยทางผู้ผลิตได้เรียกอุปกรณ์นี้ว่า Wireless sensor system router ดังรูปที่ ก.4 ผู้ผลิตกล่าวว่าอุปกรณ์นี้สามารถเพิ่มระยะในการสื่อสารข้อมูล โดยนำอุปกรณ์นี้ไปติดตั้งที่ตำแหน่งระหว่างโหนดตรวจรู้ กับสถานีฐาน อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ถ่ายทอด

(Relay station) ข้อมูล ซึ่งอุปกรณ์นี้มีราคา 239.45 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ (239.45 x 31 บาท = 7,422.95 บาท) อัตราแลกเปลี่ยนเงิน ณ วันที่ 15 พฤศจิกายน 2554 โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ ดังตารางที่ ก.8

ตารางที่ ก.8 รายละเอียดของอุปกรณ์ Wireless sensor system router

คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 GHz ISM band
โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล	IEEE 802.15.4
ช่องสัญญาณ	11 ถึง 26
พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล	model RU01 : 18 dBm
ชนิดของสายอากาศ	สายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น (Half-wave dipole)
อัตราขยายของสายอากาศ	2.2 dBi
ความไวที่ภาครับ (receiver sensitivity)	-96 dBm
อุณหภูมิที่ทำงานได้	-20 ถึง 70 องศาเซลเซียส
แหล่งจ่ายพลังงานภายนอก	5Vdc
สายอากาศ	fully weather-proof
Antenna extension cable	ยาว 3 เมตร
ขนาด	สูง 125 mm. ลึก 55 mm. กว้าง 85 mm. และสายอากาศสูง 88 mm.
ราคา	7,422.95 บาท



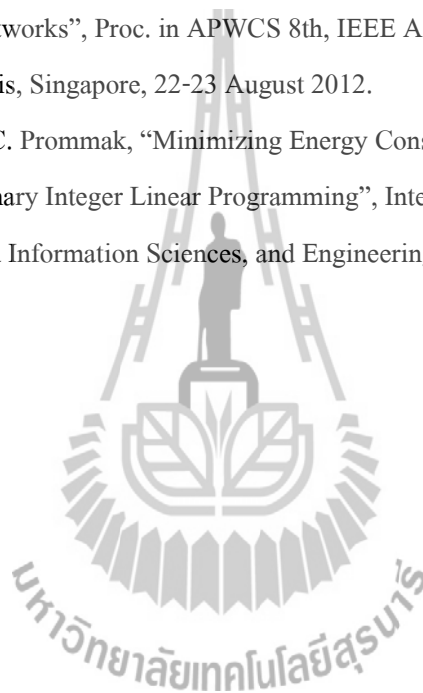
รูปที่ ก.4 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสถานีถ่ายทอดที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัย

ภาคผนวก ข.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1. C. Prommak, and C. Jantarasorn, “Optimal Relay Node Placement for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks”, Proc. in APWCS 8th, IEEE Asia Pacific Wireless Communication Symposium, Biopolis, Singapore, 22-23 August 2012.
2. C. Jantarasorn and C. Prommak, “Minimizing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks Using Binary Integer Linear Programming”, International Conference on Computer, Communication and Information Sciences, and Engineering (ICCCISE), vol. 62, pp. 124-128, 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 สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเรื่อง Wireless network design, Optical network design, Network optimization และ Heuristic approaches for network design

