

การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพใน
เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**NETWORK STRUCTURE DESIGN FOR EFFICIENT
ENERGY CONSUMPTION IN WIRELESS SENSOR
NETWORKS USING MULTI-OBJECTIVE
OPTIMIZATION**

Chompunut Jantarasorn



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การออกแบบโครงสร้างเครื่องข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพใน
เครื่องข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ กระจอกนอก)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชมพูนุท จันทรศร : การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์
(NETWORK STRUCTURE DESIGN FOR EFFICIENT ENERGY CONSUMPTION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก, 206 หน้า.

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในหลาย ๆ แอปพลิเคชัน เช่น การตรวจสอบสุขภาพของผู้ป่วย การตรวจสอบสภาพแวดล้อม โครงสร้างของเครือข่ายประกอบไปด้วย โหนดตรวจรู้ และสถานีฐานซึ่งโดยทั่วไปจะตั้งอยู่ห่างไกล เพื่อเก็บสะสม และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับมา โดยทั่วไปแล้วโหนดตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปที่สถานีฐานโดยตรง หรือส่งผ่านโหนดตรวจรู้ระหว่างทาง โหนดอื่น ๆ เนื่องจากโหนดตรวจรู้เน้นดำเนินการ โดยใช้แหล่งพลังงานที่จำกัด เช่น แบตเตอรี่ ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยน หรือเติมพลังงานให้กับโหนดตรวจรู้ได้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีนี้สถานีถ่ายทอดจะถูกนำมาใช้ในการรับ และส่งข้อมูลที่ได้รับจากโหนดตรวจรู้ไปที่สถานีฐาน ทำให้โหนดตรวจรู้ที่มีพลังงานอยู่อย่างจำกัดสามารถดำเนินการได้ภายในคาบอายุการใช้งานที่ต้องการ เนื่องจากสถานีถ่ายทอดสามารถจัดหาพลังงานจากเซลล์สุริยะ และมีแหล่งสำรองพลังงาน ดังนั้นค่าใช้จ่าย และอายุการใช้งานของเครือข่ายนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย และเส้นทางในการรับส่งข้อมูล เพื่อที่จะแก้ปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพของพลังงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น เราจึงจำเป็นต้องมีเทคนิคในการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาข้อจำกัดของค่าใช้จ่ายในเครือข่าย การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และผลกระทบของสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย

งานวิจัยนี้เสนอการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยพิจารณาคูณภาพของสัญญาณในเทอมของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพื่อให้อัตราความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยพิจารณาปัญหาการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย ที่ติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดซึ่งทำให้เครือข่ายดำเนินการได้ในระยะเวลาที่กำหนด ยิ่งไปกว่านั้นเราได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งในเครือข่าย ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนี้ ได้กำหนดปัญหาโดยใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี และหาคำตอบโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

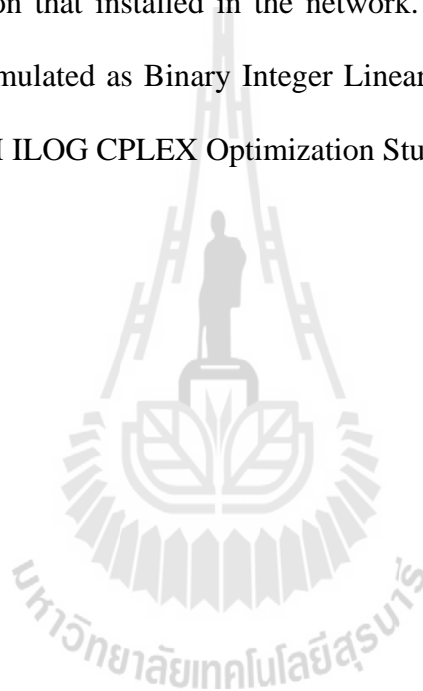
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

CHOMPUNUT JANTARASORN : NETWORK STRUCTURE DESIGN
FOR EFFICIENT ENERGY CONSUMPTION IN WIRELESS SENSOR
NETWORKS USING MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. CHUTIMA PROMMAK, Ph.D., 206 PP.

WIRELESS SENSOR NETWORKS/OPTIMAL NODE PLACEMENT/
RELAY STATION/ENERGY CONSUMPTION

Wireless Sensor Networks (WSNs) have played a potential role in many applications such as health monitoring and environmental monitoring. A network structure consists of sensor nodes (SNs) and a base station (BS) which located further away to collect and analyze the sensing data. Typically, SNs could send data to BS directly or indirectly via other intermediate SN(s). From the fact that SNs usually operate by using limited energy sources such as batteries, it may be undesirable to replace or recharge SNs due to high maintenance cost. In this case, Relay Stations (RSs) serve an essential role to receive and forward data from SNs to BS such that the energy-limited SNs can operate for a desired period of the network lifetime. Since RSs could be equipped with more sophisticated energy sources such as solar cells and the energy storage, the network deployment cost and lifetime could mainly depend on the number of sophisticated RSs used in the network and how the sensing data is forwarded to BS. In order to address the energy efficiency issues of WSNs, we need an effective RS placement technique, considering practical issues such as limitation of network cost, energy efficiency and the effects of noise and bit error rate characteristics of the wireless transceivers.

This research proposes a novel network structure design for efficient energy consumption in WSNs, considering quality of signal in term of signal to noise ratio to achieve an acceptance bit error rate. Specifically, we examine the problem of minimizing energy consumption of SNs in the network using minimum number of relay stations that could allow the network to operate for a required network lifetime. Moreover, we study tradeoff between energy consumption of sensor nodes and number of relay station that installed in the network. The proposed WSN structure design problem is formulated as Binary Integer Linear Programming (BILP) models and solved by the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ชมพูนุท จันทร์สร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	5
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	6
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	6
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	7
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	7
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้.....	7
1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2	ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1	กล่าวนำ.....	10
2.2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.3	โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	17
	2.3.1 ส่วนประกอบของโนดตรวจรู้.....	20
	2.3.2 โครงสร้างทางกายภาพของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	22
	2.3.3 สถานีถ่ายทอด.....	24
2.4	การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	28
	2.4.1 ความท้าทายในการหาเส้นทางภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	29
	2.4.2 โพรโตคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	31
	2.4.3 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธี minimum spanning tree.....	34
2.5	แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย.....	37
2.6	แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้.....	39
	2.6.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง.....	40
	2.6.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ.....	41
	2.6.3 การคำนวณค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ไร้สาย.....	42
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิต.....	43
2.8	การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี.....	46
	2.8.1 ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น.....	47
	2.8.2 รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น.....	47
	2.8.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน.....	48
	2.8.4 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น.....	49
	2.8.5 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา.....	49
2.9	การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10	ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์.....	60
2.10.1	วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	61
2.10.2	วิธีลำดับชั้น.....	62
3	แนวคิดและวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ.....	64
3.1	แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....	64
3.2	การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว ในขั้นตอนที่ 1.....	66
3.3	การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์.....	69
3.4	การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด ในขั้นตอนที่ 2.....	70
3.5	การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว.....	72
3.6	การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สองวัตถุประสงค์.....	78
3.7	การพัฒนาอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด ในขั้นตอนที่ 2.....	82
3.8	โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี.....	85
4	การทดลองและวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย ตรวจรู้ไร้สาย.....	91
4.1	การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการวัตถุประสงค์เดียว และศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของ เครือข่าย และการใช้พลังงานของ โหนดตรวจรู้.....	92
4.2	การวิเคราะห์ผลของการใช้พลังงานของ โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย เมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน.....	122
4.3	การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุด ของสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	การออกแบบโครงสร้างเครื่องข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักและศึกษาผลกระทบของขนาดเครื่องข่าย ต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ใน เครื่องข่าย.....	141
4.5	การออกแบบโครงสร้างเครื่องข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ ที่ใช้วิธีลำดับชั้นและศึกษาผลกระทบของขนาดเครื่องข่ายต่อ พลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ ในเครื่องข่าย.....	150
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	159
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	159
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	160
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	161
	รายการอ้างอิง.....	162
	ภาคผนวก.....	165
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลสายอากาศภาคส่ง ภาครับ และสถานีถ่ายทอด.....	165
	ภาคผนวก ข. การคำนวณระยะทางสื่อสารของสายอากาศภาคส่ง.....	173
	ภาคผนวก ค. จำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครื่องข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนค.....	176
	ภาคผนวก ง. ตัวอย่างข้อมูลอินพุตของขั้นตอนที่ 2 และค่าใช้จ่าย ของการสร้างเครื่องข่ายในขั้นตอนที่ 2.....	178
	ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	195
	ประวัติผู้เขียน.....	206

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	39
2.2 องค์ประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นชนิดต่าง ๆ.....	51
2.3 Basic feasible solution ที่สัมพันธ์กับจุดยอดมุม.....	53
2.4 Canonical form 0.....	55
2.5 Canonical form 1.....	57
2.6 Canonical form 2.....	59
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2.....	83
3.2 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไปนารีวัตถุประสงค์เดียว เป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	88
3.3 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไปนารีสองวัตถุประสงค์ เป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	89
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย.....	95
4.2 อัตราขยาย ราคา และระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศส่ง.....	97
4.3 อัตราขยาย ราคา และระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศรับ.....	97
4.4 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายจากหัวข้อที่ 4.1.....	107
4.5 พลังงานรวมที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	108
4.6 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	109
4.7 สรุปค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายในหัวข้อที่ 4.1.....	110
4.8 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีขนาดต่าง ๆ.....	111
4.9 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้เมื่อมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุด ตลอดอายุการใช้งาน.....	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.10	พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้เมื่อมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ โนดตรวจรู้ที่ใช้พลังงานมากที่สุด ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุด ตลอดอายุการใช้งาน.....	127
4.11	พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้เมื่อมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การเบี่ยงเบนของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน.....	128
4.12	ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของ สมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด.....	139
ก.1	รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1.....	166
ก.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1.....	167
ก.3	รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 2.....	168
ก.4	รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 3.....	168
ก.5	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 3.....	169
ก.6	รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 4.....	170
ก.7	รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาครับ.....	170
ก.8	รายละเอียดของอุปกรณ์ Wireless sensor system router.....	172
ข.1	พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณระยะทางสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1.....	175
ค.1	จำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนด.....	177
ง.1	ตัวอย่างข้อมูลอินพุตของการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด ในขั้นตอนที่ 2 ในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 1.....	179
ง.2	ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศ ในเครือข่ายที่ 1 ที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 1.....	180
ง.3	ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศ ในเครือข่ายที่ 1 ที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 2.....	181
ง.4	ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศ ในเครือข่ายที่ 1 ที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 3.....	182

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบจำลองชั้นการทำงานของ Zigbee ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....19
2.2	อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย.....20
2.3	โครงสร้างของโนดในเครือข่ายประเภทที่ 1.....23
2.4	โครงสร้างของโนดในเครือข่ายประเภทที่ 2.....24
2.5	โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด.....28
2.6	ตัวอย่างเครือข่ายที่มี 4 โหนด.....35
2.7	เส้นทางเชื่อมต่อที่เกิดลูป.....36
2.8	แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้.....40
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิต กับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน.....45
2.10	บริเวณที่เป็นไปได้ของรูปทรงเรขาคณิต.....53
3.1	ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมวัตถุประสงค์เดียวในขั้นตอนที่ 1.....68
3.2	ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2.....71
3.3	หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....85
3.4	Data file editing area.....86
3.5	Setting file editing area.....87
4.1	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 1.....98
4.2	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 2.....98
4.3	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 3.....99
4.4	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 4.....99
4.5	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 5.....100
4.6	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 1.....100
4.7	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 2.....101
4.8	การสุ่มตำแหน่งโนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 3.....101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไป ในเครือข่าย 50 โนค ครั้งที่ 1 ถึง 5.....	120
4.33 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไป ในเครือข่าย 80 โนค ครั้งที่ 1 ถึง 5.....	121
4.34 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแฉกแรงสะสมของพลังงานที่โนคตรวจรู้ ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนค.....	121
4.35 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมในเครือข่ายขนาด 30 โนค เมื่อใช้วัตถุประสงค์ ต่างกัน กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด.....	129
4.36 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมในเครือข่ายขนาด 50 โนค เมื่อใช้วัตถุประสงค์ ต่างกัน กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด.....	130
4.37 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมในเครือข่ายขนาด 80 โนค เมื่อใช้วัตถุประสงค์ ต่างกัน กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด.....	130
4.38 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MERP ในเครือข่าย ขนาดต่าง ๆ กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด.....	131
4.39 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MMEC ในเครือข่าย ขนาดต่าง ๆ กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด.....	132
4.40 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MSAD ในเครือข่าย ขนาดต่าง ๆ กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด.....	132
4.41 ฟังก์ชันแฉกแรงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ต่างกัน ในเครือข่าย ขนาด 80 โนค เมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด และสถานี ถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 %.....	133
4.42 คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โนคตรวจรู้ 30 โนค ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	144
4.43 คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โนคตรวจรู้ 50 โนค ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	144

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.44	คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โนดตรวจรู้ 80 โนด ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	145
4.45	เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	145
4.46	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันใน เครือข่ายขนาด 30 โนด.....	146
4.47	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันใน เครือข่ายขนาด 50 โนด.....	147
4.48	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันใน เครือข่ายขนาด 80 โนด.....	147
4.49	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อ $w_1=0.8, w_2=0.2$ ในเครือข่าย ขนาด 30 50 และ 80 โนด.....	148
4.50	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อ $w_1=0.5, w_2=0.5$ ในเครือข่าย ขนาด 30 50 และ 80 โนด.....	149
4.51	ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อ $w_1=0.2, w_2=0.8$ ในเครือข่าย ขนาด 30 50 และ 80 โนด.....	150
4.52	คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โนดตรวจรู้ 30 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้น.....	153
4.53	คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โนดตรวจรู้ 50 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้น.....	153
4.54	คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี โนดตรวจรู้ 80 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้น.....	154
4.55	เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้นกับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก.....	155
4.56	เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น ในเครือข่ายขนาด 30 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้น.....	156

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57	
เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น ในเครือข่ายขนาด 50 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น.....	157
4.58	
เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น ในเครือข่ายขนาด 80 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น.....	157
ก.1	
แบบรูปสนามแม่เหล็กในระนาบสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า ของสายอากาศแบบที่ 1.....	167
ก.2	
แบบรูปสนามแม่เหล็กในระนาบสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า ของสายอากาศแบบที่ 3.....	169
ก.3	
แบบรูปกำลังงานในแนวนอน และแนวตั้งของสายอากาศภาครับ.....	171
ก.4	
อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสถานีถ่ายทอดที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัย.....	172



บทที่ 1

บทนำ#

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks : WSNs) เป็นการสื่อสารแบบไร้สายในระยะใกล้ มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย เครือข่ายมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ อุปกรณ์เชื่อมต่อมีขนาดเล็ก และมีความแม่นยำในการวัดสูง สามารถวัดค่าและเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงได้อย่างถูกต้อง สามารถประมวลผลได้ด้วยตนเอง และติดต่อสื่อสารกันเป็นเครือข่าย การนำไปใช้งานนั้นสามารถนำเครือข่ายประเภทนี้ ไปใช้ได้กับหลายแอปพลิเคชัน เช่น ใช้ในด้านสุขภาพ โดยติดโนดตรวจรู้ (Sensor node : SN) ไว้กับผู้ป่วยเพื่อตรวจวัดชีพจร หรือความดันโลหิต ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่าง ๆ ในพื้นที่ที่สนใจ เช่น ใช้ในการวัดความชื้น ความเป็นกรดเป็นเบสในพื้นที่ทางการเกษตรเพื่อเป็นข้อมูลให้กับเกษตรกร ใช้ในการวัดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม หรือใช้ตรวจจับข้อมูลในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น พื้นที่เสี่ยงภัยทางทหาร แล้วทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้ออกจากการตรวจจับซึ่งเป็นข้อมูลดิบเหล่านี้ ส่งไปประมวลผลยังปลายทางต่อไป

เครือข่ายประเภทนี้ประกอบไปด้วยโนดที่มีขนาดเล็กจำนวนมากที่เรียกว่า โหนดตรวจรู้ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ หน่วยตรวจจับข้อมูล (sensing unit) หน่วยประมวลผลข้อมูล (processing unit) และหน่วยที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูล (transceiver unit) และหน่วยพลังงาน (power unit) โดยโนดตรวจรู้จะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ ในการสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นสามารถนำโนดตรวจรู้จำนวนมากไปติดตั้งภายในสภาพแวดล้อมที่สนใจเพื่อเก็บข้อมูล โดยโนดตรวจรู้แต่ละโนดจะติดต่อสื่อสารแบบไร้สายกับโนดตรวจรู้ข้างเคียงโดยที่สามารถควบคุมและจัดการข้อมูลได้ด้วยตัวเอง (self-organize) และมีการทำงานกันแบบร่วมมือ (collaboration) เป็นเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายทำให้สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างโนดได้ แม้ว่าจะไม่ได้ติดต่อกับโนดปลายทางโดยตรง ซึ่งการส่งข้อมูลลักษณะนี้จะเรียกว่า การส่งแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (multi hop) เมื่อทำการตรวจวัด

ข้อมูลที่มีการโปรแกรมให้ทำการตรวจจับแล้ว จากนั้นเกตเวย์ (gateway) ซึ่งอาจจะเป็น โหนดตรวจรู้
 ธรรมดา หรือเป็น โหนดตรวจรู้ที่มีพลังงานมากกว่า โหนดตรวจรู้ทั่วไป จะทำการส่งต่อข้อมูลเหล่านั้น
 ไปยังปลายทาง (sink) ที่เรียกว่า สถานีฐาน (Base station : BS) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและ
 ติดต่อกับผู้ใช้งาน หรืออาจติดต่อกับเครือข่ายอื่น ๆ เช่น อินเทอร์เน็ต เป็นต้น

เนื่องจากโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยทั่วไปถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก ดังนั้นจึง
 ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ได้แก่ มีขนาดของหน่วยประมวลผล ขนาดของ
 หน่วยความจำ และแหล่งจ่ายพลังงาน รวมถึงระยะในการสื่อสาร และระยะรับส่งข้อมูลที่จำกัด
 ดังนั้นแหล่งจ่ายพลังงานของโหนดตรวจรู้จึงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งาน
 ได้นาน ซึ่งหากนำเครือข่ายชนิดนี้ไปใช้ในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึงจะไม่สามารถเปลี่ยนหรือ
 เติมพลังงานให้กับแบตเตอรี่ภายในโหนดตรวจรู้ได้ ด้วยเหตุนี้พลังงานจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มี
 ความสำคัญ และเป็นความท้าทายของงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
 เนื่องจากต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสูญเสียพลังงาน เช่น ระยะของการสื่อสารระหว่าง
 ภาคส่ง และภาครับ จำนวนบิตข้อมูลที่ส่ง เพื่อให้การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมี
 ประสิทธิภาพ และสามารถใช้งานได้ยาวนานที่สุด

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้รับความสนใจเป็น
 อย่างมาก จากงานวิจัยของ Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, and Cayirci, E. (2002) ได้
 มีการแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบเครือข่าย และโครงสร้างของการสื่อสาร อัลกอริทึม และ
 โพรโทคอลที่ใช้ในแต่ละชั้น งานวิจัยของ Younis, M., Akkaya, K. (2008) ได้ทำการจำแนกวิธีหา
 ตำแหน่งของโหนดในเครือข่าย และแสดงให้เห็นถึงจุดเด่น ข้อจำกัด วัตถุประสงค์ แบบจำลอง และ
 การกำหนดปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างของ
 เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายได้รับความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะการพิจารณาประเด็นเรื่องการหา
 ตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมของสถานีถ่ายทอด (Relay station: RS) ในเครือข่าย โดยงานวิจัยของ Bari,
 A., Teng, D., and Jaekel A. (2009), Pandey, S., Dong, S., Agrawal P., and Sivalingam, K.M.
 (2009), Hou, Y.T., Shi, Y., Sherali, H.D., and Midkiff, S.F. (2005), Wang, Q., Xu, K., Takahara,
 G., and Hassanein, H. (2007) สมมุติว่าสถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่ไม่จำกัด โดยในงานวิจัยของ
 Bari, A., Teng, D., and Jaekel A. (2009), Pandey, S., Dong, S., Agrawal P., and Sivalingam, K.M.
 (2009) มีวัตถุประสงค์ คือใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายให้น้อยที่สุด งานวิจัยของ Bari, A.,
 Teng, D., and Jaekel A. (2009) ได้พิจารณาเงื่อนไขเกี่ยวกับการเชื่อมต่อของเครือข่าย และการ
 ครอบคลุมเพื่อรับประกันว่าจะไม่มีการสูญหายของข้อมูลเนื่องมาจาก buffer overflow และการ
 สูญเสียพลังงานจะไม่เกินระดับที่กำหนดไว้ ในงานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal P., and

Sivalingam, K.M. (2009) นั้น โหนดตรวจรู้จะสามารถส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อไปยังสถานีถ่ายทอดได้ ในงานวิจัยของ Hou, Y.T., Shi, Y., Sherali, H.D., and Midkiff, S.F. (2005) มีการออกแบบปัญหาพร้อมกันสองอย่าง คือ การจัดหาพลังงานเพิ่มเติมบน โหนดที่มีหน้าที่รวบรวมและส่งต่อข้อมูล (aggregation and forwarding node: AFN) และศึกษาการจัดวางสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด งานวิจัยของ Wang, Q., Xu, K., Takahara, G., and Hassanein, H. (2007) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในเครือข่าย โดยมีเงื่อนไขคือ อายุการใช้งานและการเชื่อมต่อของโหนดในเครือข่าย และ โหนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลให้กับสถานีถ่ายทอดภายในช่วงเชื่อมต่อเดียวเท่านั้น ส่วนในงานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008), Al-Turjman, F.M., Hassanein H.S., and Ibnkahla M.A. (2009) ได้สมมติให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่จำกัด โดยในงานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้จำนวนแพ็คเกจข้อมูลทั้งหมดที่สถานีฐานได้รับมีความถูกต้องและมีจำนวนมากที่สุดภายใต้อายุการใช้งานที่กำหนด โดยพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิต (bit error rate: BER) ด้วย งานวิจัยของ Al-Turjman, F.M., Hassanein H.S., and Ibnkahla M.A. (2009) ได้นำเสนอการใช้สถานีถ่ายทอดกับแอปพลิเคชันภายในป่าโดยจัดวางโหนดเป็นสามมิติ และนำเสนอ नियมอายุการใช้งานของเครือข่ายให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น งานวิจัยของ Azad, A.P., and Chockalingam, A. (2006) พิจารณาหาตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานที่เหมาะสม เพื่อลดพลังงานที่มากที่สุดที่โหนดตรวจรู้ใช้ในหนึ่งคาบให้มีค่าน้อยที่สุด งานวิจัยของ Jia, J., Chen, J., Chang, G., Wen, Y. and Song, J. (2009) ได้ศึกษาการหาจุดสมดุลที่เหมาะสมระหว่างอัตราการครอบคลุม (coverage rate) ที่มากที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นคือทำให้โหนดตรวจรู้อยู่ในโหมดการทำงาน (active mode) ให้น้อยที่สุด

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาเรื่องการออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายที่ทำการพิจารณาวัตถุประสงค์การออกแบบหลายวัตถุประสงค์พร้อมกัน ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้พิจารณาเรื่องสัญญาณรบกวน (noise) ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดบิตเพื่อให้มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการสื่อสารระหว่างโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงความถูกต้องของข้อมูลที่ภาครับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาปัญหาการวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอดที่มีพลังงานไม่จำกัด เช่น การใช้เซลล์สุริยะ (solar cell) และติดตั้งแหล่งสำรองพลังงานให้กับสถานีถ่ายทอด ทำให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เครือข่ายทำงานได้ในระยะเวลาที่กำหนด รวมทั้งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ คือ พลังงาน

ที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน กับ จำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เลือก ติดตั้งในเครือข่าย โดยใช้แนวทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (multi-objective optimization)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผน โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้ สถานีถ่ายทอดเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของเครือข่าย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพลังงาน และอายุการใช้งานของเครือข่าย
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาเทคนิคและสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ที่มีการใช้สถานีถ่ายทอดเพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.2.5 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการ ออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 การหาจำนวนสถานีถ่ายทอด และตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมจะช่วยลดมูลค่าการลงทุนใน การสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
- 1.3.2 เส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยัง โนดตรวจรู้ข้างเคียง สถานีถ่ายทอด และสถานี ฐานมีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย
- 1.3.3 เมื่อมีการใช้สถานีถ่ายทอดติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม จะทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้ พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และทำให้เครือข่ายสามารถดำเนินการได้ในระยะเวลาที่นานขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ตำแหน่งที่ตั้งของโนดตรวจรู้ ได้กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าแล้วก่อนที่เครือข่ายจะเริ่ม ทำงาน
- 1.4.2 โนดตรวจรู้จะมีพลังงานที่จำกัด
- 1.4.3 สถานีถ่ายทอดและสถานีฐานจะมีพลังงานที่ไม่จำกัด
- 1.4.4 โนดตรวจรู้จะมีการส่งข้อมูลเป็นรอบ
- 1.4.4 โนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปยังโนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐานที่อยู่ภายในระยะการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ที่ส่งข้อมูล

1.4.6 เมื่อสถานีถ่ายทอดได้รับข้อมูลที่ส่งมาจากโนคตรวจรู้แล้ว จะรวบรวมข้อมูลและส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปยังสถานีฐาน

1.4.7 อายุการใช้งานของเครือข่ายจะสั้นสุดลงเมื่อโนคตรวจรู้โนคแรกภายในเครือข่ายหมดพลังงานลง

1.4.8 พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ในการส่งข้อมูลจะขึ้นอยู่กับจำนวนแพ็คเกจข้อมูลและระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับ

1.4.9 พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับข้อมูลจะขึ้นอยู่กับจำนวนแพ็คเกจข้อมูล

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงาน และทฤษฎีการรับและส่งข้อมูลของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1.5.2 งานวิจัยนี้พิจารณาเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่โนคตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานอยู่กับที่ (static)

1.5.3 จำลองเครือข่ายโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายขนาดต่าง ๆ

1.5.4 พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่มีการใช้สถานีถ่ายทอด เป็นสมการสำหรับหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization)

1.5.5 พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 1.5.4 เพื่อหาจำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ดีที่สุด รวมถึงเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการส่งข้อมูลจากโนคตรวจรู้ไปยังโนคตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน

1.5.6 ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย
- 3) หาสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับการคำนวณพลังงานของโนคในเครือข่าย

4) จำลองเครือข่ายขนาดเล็ก เพื่อศึกษาการรับส่งข้อมูล และการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งระหว่างโนดแต่ละชนิดในเครือข่าย

5) ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการหาตำแหน่งที่ตั้งของสถานีถ่ายทอด และจำลองเครือข่ายขนาดใหญ่ แต่เป็นการศึกษาในกรณีที่ใช้สถานีถ่ายทอดในเครือข่าย

6) วิเคราะห์ว่าเมื่อมีการใช้สถานีถ่ายทอดในเครือข่าย และเมื่อมีจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายเพิ่มขึ้น จะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายอย่างไร

7) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นสมการสำหรับหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

8) พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อที่ 7

9) ทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และประเมินคุณภาพเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) จำลองเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายขนาดเล็ก และศึกษาการรับ และส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ และการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังสถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน

3) ศึกษา และวิเคราะห์การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ภายในเครือข่าย

4) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เป็นสมการสำหรับหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

5) พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 4

6) ทำการทดลองเปรียบเทียบกรณีเมื่อจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น ว่าส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายอย่างไร

7) เปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเพิ่มจำนวนของสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายว่าส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้แต่ละโนดในเครือข่ายอย่างไร

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer)
- 2) โปรแกรม Microsoft Excel
- 3) โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.2
- 4) โปรแกรม MATLAB
- 5) โปรแกรม Dev C++

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรม และข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จากนั้นเก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดลองเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายว่าส่งผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายอย่างไร

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเกี่ยวกับการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบและแสดงให้เห็นถึงจำนวนสถานีถ่ายทอด ตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด และเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด และนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเครือข่ายที่ออกแบบด้วยวิธีการอื่น ๆ โดยจะทำการทดลองด้วยเครือข่ายที่มีขนาดต่าง ๆ (พิจารณาจากจำนวนและตำแหน่งของโนดตรวจรู้)

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.7.1 ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ และพัฒนาประยุกต์ใช้งานเครือข่ายประเภทนี้ได้ในงานที่เกี่ยวข้อง

1.7.2 ทำให้เห็นว่าการนำสถานีถ่ายทอดมาช่วยในการรับ และส่งข้อมูลในเครือข่ายนั้น ทำให้โนดตรวจรู้สามารถทำงานได้ยาวนานขึ้น ส่งผลให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อให้เครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยกำหนดให้โนดตรวจรู้มีการส่งข้อมูลเป็นรอบ เพื่อลดพลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัด และมีการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการออกแบบ เพื่อ

ช่วยในการรับและส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากโนคตรวजूไปที่ปลายทาง และเพื่อให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น สำหรับวัตถุประสงค์ในการออกแบบของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อต้องการให้โนคตรวजूใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งานที่กำหนด โดยในการออกแบบนั้นได้คำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น คำนึงถึงคุณภาพสัญญาณ โดยพิจารณาค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความรบกวนภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง โดยระดับความผิดพลาดของข้อมูลนั้นจะต้องไม่ต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนด ข้อจำกัดพลังงานของโนคตรวजूไร้สาย การรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวजू กับโนคตรวजूโนคข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐานในเครือข่าย นอกจากนี้ยังคำนึงถึงงบประมาณในการติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดที่จำกัดอีกด้วย โดยใช้การกำหนดปัญหาการออกแบบด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี จากนั้นจะได้พิจารณาเส้นทางในการสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานในเครือข่าย โดยใช้หลักการของ minimum spanning tree อีกทั้งได้มีการพิจารณาปัญหาแบบสองวัตถุประสงค์ โดยจะพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้พลังงานของโนคตรวजूไร้สายเปรียบเทียบกับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่าย ภายใต้งบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อหาเซตของคำตอบที่ดีที่สุด

1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับ นวัตกรรมของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายทรวजूไร้สาย การหาเส้นทางในเครือข่ายทรวजूไร้สาย แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย แบบจำลองการใช้พลังงานของโนคตรวजू ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และอัตราความผิดพลาดบิต การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริทึมจิมเพล็กซ์ และ ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดและวิธีการออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายทรวजूไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียวในขั้นตอนที่ 1 การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์ การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว การพัฒนา

สมการคณิตศาสตร์สองวัตถุประสงค์ การพัฒนาอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด
ในขั้นตอนที่ 2 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการวัตถุประสงค์เดียวและศึกษา
ผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของเครือข่ายและการใช้พลังงานของ โนดตรวจรู้ การ
วิเคราะห์ผลของการใช้พลังงานของ โนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์ที่ต่างกัน การ
วิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธี
ผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก การออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีผลรวม
ค่าถ่วงน้ำหนักและศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่าย การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วย
สมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีลำดับชั้นและศึกษาผลกระทบจากขนาดเครือข่าย

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา
และแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย เพื่อทำให้มีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 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 2.9 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมชิมเพล็กซ์ และ 2.10 ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

2.1 กล่าวนำ

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบนั้นจะประกอบไปด้วย โหนดตรวจรู้ (Sensor node : SN) เกตเวย์ (Gateway) และสถานีฐาน (Base station : BS) โดยโนดตรวจรู้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจจับ (sensing) หรือเฝ้าสังเกตความเป็นไปในธรรมชาติ โดยจะนำไปติดตั้งไว้ใกล้กับสิ่งแวดล้อมที่ต้องการเฝ้าสังเกตการณ์ จากนั้น โหนดตรวจรู้เหล่านี้จะส่งข้อมูลเหล่านั้นไปที่เกตเวย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ได้รับจากโนดตรวจรู้ไปที่ปลายทาง หรือสถานีฐานต่อไป โดยสถานีฐานมีหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประมวลผลข้อมูล และเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งานเพื่อนำข้อมูลที่ได้รับมาวิเคราะห์ผล หรือวางแผนการทำงานต่อไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ของโนดตรวจรู้ ได้แก่ ขนาดของหน่วยประมวลผล ขนาดของหน่วยความจำ และแหล่งจ่ายพลังงาน รวมถึงระยะในการตรวจจับข้อมูลที่จำกัด ดังนั้นในการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมาใช้งานนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือ การจัดการพลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลาที่ยาวนานที่สุด ซึ่งในงานวิจัยต่าง ๆ ก็ได้มีวิธีการในการออกแบบเครือข่าย วัตถุประสงค์ที่ศึกษาแตกต่างกัน เพื่อจะทำให้โนดตรวจรู้สามารถใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาทิศทาง ปรัชญ์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาหลักการทํางานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โครงสร้าง ข้อจำกัด การออกแบบของงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูล และใช้เป็น แนวทางในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งจากการศึกษามีปรัชญ์วรรณกรรมที่ผ่านมามี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

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

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ทำการสำรวจงานวิจัยต่าง ๆ โดยได้อธิบายถึงพื้นฐาน ของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โพรโทคอล และอัลกอริทึมที่มีการนำเสนอในงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัย นี้สามารถรวบรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย นอกจากนี้จะ รวบรวมเงื่อนไขการออกแบบที่เหมาะสม และสรุปการใช้เครื่องมือในการออกแบบเพื่อให้เป็นไป ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ รวมทั้งได้นำเสนอการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายไปใช้ในแอปพลิเคชัน ต่าง ๆ และกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับ เครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ ข้อจำกัดในการออกแบบเครือข่าย เช่น พลังงานที่ใช้ไป (power consumption) สถาปัตยกรรมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารของเครือข่าย เป็นต้น

2.2.2 งานวิจัยของ Younis, M. and Akkaya, K. (2008) เป็นงานวิจัยสำรวจวิธีการและ เทคนิคในการหาตำแหน่งวางโนดในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

ลักษณะงานวิจัย เป็นการสำรวจและรวบรวมงานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวกับการหา ตำแหน่งวางโนดที่ดีที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้จะเน้นการแสดงให้เห็นถึงวัตถุประสงค์ แบบจำลอง และ การกำหนดปัญหาของงานวิจัยต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยในช่วงระยะหลังที่ผ่านมา มีการนำโนดถ่ายทอด (Relay node) มาใช้ในการรวบรวมข้อมูล โดยหาตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอด แต่ในงานวิจัยที่ได้ทำการสำรวจมานั้น จะเป็นเพียงงานวิจัยที่ทำการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียว เท่านั้น เช่น ต้องการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด ต้องการทำให้การเชื่อมต่อของเครือข่ายมีมาก ที่สุด ต้องการให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด เป็นต้น

2.2.3 งานวิจัยของ Bari, A., Teng, D. and Jaekel, A. (2009) เป็นงานวิจัยที่หาตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดที่ดีที่สุดใเครือข่ายตรวจรู้แบบลำดับชั้น (hierarchical) ด้วยโนดเก็บข้อมูลที่เคลื่อนที่ได้ (mobile data collector)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการในการหาตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดที่ดีที่สุด และให้มีจำนวนน้อยที่สุด โดยที่โนดถ่ายทอดจะทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด (cluster head) ที่มีหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากโนดตรวจรู้ที่อยู่ในคลัสเตอร์ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโนดเก็บข้อมูลที่เคลื่อนที่ได้ ที่ทำการเก็บข้อมูลจากโนดถ่ายทอดแต่ละโนด แล้วจึงส่งข้อมูลไปที่สถานีฐาน เพื่อช่วยให้โนดถ่ายทอดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลให้น้อยลง โดยกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) และพิจารณาเงื่อนไขของอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ ขนาดของบัฟเฟอร์ของโนดถ่ายทอด ความเร็วของโนดเก็บข้อมูลที่เคลื่อนที่ได้ และมีเงื่อนไขที่รับประกันการสูญหายของข้อมูลเนื่องจาก buffer overflow และพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปจะไม่เกินระดับที่กำหนดไว้

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นการพิจารณาการส่งข้อมูลจากโนดถ่ายทอดไปที่สถานีฐานนั้นอาจใช้แนวทางอื่นในการพิจารณาการสื่อสารได้ด้วย เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ นอกจากนี้ถ้าตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งโนดถ่ายทอดมีความละเอียดขึ้น จะทำให้จำนวนโนดถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนลดลง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาคูณภาพในการสื่อสารข้อมูล เช่น สัญญาณรบกวน และยังเป็นการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียว

2.2.4 งานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal, P., and Sivalingam, K. M. (2008) เป็นงานวิจัยที่หาวิธีการวัดสมรรถนะของตำแหน่งของโนดสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบลำดับชั้นที่แตกต่างกัน

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่พิจารณาเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายแบบลำดับชั้นที่ใช้หลักการของการจัดคลัสเตอร์ โดยเครือข่ายจะประกอบด้วยโนดสามชนิด ได้แก่ โนดตรวจรู้ (Regular sensor node, Litenode : LN) ที่มีข้อจำกัดของพลังงาน โนดถ่ายทอด (High-end sophisticated node: SNs) ที่ทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด ซึ่งสามารถจัดหาพลังงานเพิ่มเติมให้กับโนดถ่ายทอดได้ งานวิจัยนี้เป็นการหาตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดที่ดีที่สุด และจำนวนน้อยที่สุดเพื่อให้โนดถ่ายทอดสามารถรองรับปริมาณกราฟฟิคที่เกิดจากโนดตรวจรู้ได้ โดยรับประกันว่าโนดตรวจรู้จะต้องมีการเชื่อมต่อกัน สำหรับการกำหนดปัญหาในงานวิจัยนี้จะเป็นการกำหนดปัญหาแบบหลายเงื่อนไข ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการออกแบบและกำหนดปัญหามี 3 วิธี ได้แก่ การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary integer linear programming : BILP) วิธี Greedy และวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic

algorithm : GA) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอวิธีการแบบผสม (hybrid approach) โดยใช้ผลเฉลยที่ได้จากวิธีการ greedy รวมกับวิธีของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีมาเป็นผลเฉลยตั้งต้นให้กับวิธีเจเนติกอัลกอริทึม 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) เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดแบ่งพลังงาน และหาตำแหน่งที่ตั้งโนดถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายตรวจสอบไร้สาย

ลักษณะของงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่พิจารณาปัญหาพร้อมกันสองอย่าง คือปัญหาการจัดแบ่งพลังงานเพิ่มเติมให้กับ โหนดที่ทำหน้าที่รวบรวมและส่งต่อข้อมูลให้กับสถานีฐาน (Aggregation and forwarding node : AFNs) ซึ่งเทียบได้กับ โหนดที่ทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด และปัญหาการหาตำแหน่งที่ตั้งให้กับ โหนดถ่ายทอดเพื่อทำให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด โดยเครือข่ายจะมีโนดอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ โหนดตรวจสอบที่อยู่ในคลัสเตอร์ ซึ่งทำการส่งข้อมูลให้กับคลัสเตอร์เฮดภายในหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ เนื่องจากโหนดตรวจสอบมีตำแหน่งใกล้เคียงกับคลัสเตอร์เฮดมาก จากนั้นคลัสเตอร์เฮดก็จะส่งต่อข้อมูลไปยังคลัสเตอร์เฮดโนดอื่น ๆ หรือส่งตรงไปที่สถานีฐาน ซึ่งคลัสเตอร์เฮดนี้จะมีอายุการใช้งานที่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีนิยามอายุการใช้งานว่า ระยะเวลาที่เครือข่ายทำงานจนกระทั่งคลัสเตอร์เฮดโนดในเครือข่ายหมดพลังงานลง และโทโปโลยี (topology) ของเครือข่ายนั้นถูกควบคุมด้วยระดับพลังงานของภาคส่ง งานวิจัยนี้กล่าวว่าการแบ่งพลังงานเพิ่มเติมให้กับคลัสเตอร์เฮดยังเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพ และเพื่อช่วยลดข้อบกพร่องของ

โทโปโลยีของเครือข่ายจึงทำการเพิ่มโนดถ่ายทอดในตำแหน่งที่แน่นอนให้กับเครือข่าย โดยโนดถ่ายทอดนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับคลัสเตอร์เฮดโนด แต่จะทำงานแตกต่างกัน คือ โนดถ่ายทอดไม่มีหน้าที่ในการกำเนิดข้อมูล แต่จะมีหน้าที่เพียงถ่ายทอดกราฟิกข้อมูลไปที่สถานีฐานเท่านั้น สำหรับการกำหนดปัญหาในงานวิจัยนี้จะใช้การโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนผสม (Mixed-integer nonlinear programming : MINLP) ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม่สามารถแก้ได้ (NP-hard) ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมสปิน (Smart pairing and intelligent disc search : SPINDS) มาใช้ในการแก้ปัญหาด้วยหลักการในการหาคำตอบซ้ำ ๆ โดยจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของโนดถ่ายทอดไปยังตำแหน่งที่ทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอขึ้นมา นั้นจะเปลี่ยนปัญหาให้กลายเป็นการโปรแกรมเชิงเส้น ทำให้สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาที่ลดลง (polynomial time) งานวิจัยนี้พบว่าโทโปโลยีของเครือข่ายที่ไม่เหมาะสมมีผลต่ออายุการใช้งานของเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ทำให้เห็นว่าการนำโนดถ่ายทอดมาใช้ในเครือข่ายจะทำให้เครือข่ายมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาจัดหาพลังงานให้กับคลัสเตอร์เฮดโนดนั้นอาจไม่เหมาะสมกับแอปพลิเคชันที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริง ต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่นำไปใช้งานด้วย ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะต้องการให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด แต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาคุณภาพของสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล และไม่มีหลักในการกำหนดค่าพลังงานตั้งต้นให้กับโนดในเครือข่ายที่แน่นอน ทำให้นำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ยาก และยังเป็นเพียงการศึกษาวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

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

ลักษณะของงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ต้องการหาค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งโนดถ่ายทอด โดยต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมีค่าน้อยที่สุด และต้องรับประกันเงื่อนไขของอายุการใช้งาน และการเชื่อมต่อ โดยได้แบ่งการจำลองแบบออกเป็นสองการทดลอง ได้แก่ การทดลองแรก โนดถ่ายทอดมีพลังงานไม่จำกัด ส่วนในการทดลองที่สอง โนดถ่ายทอดจะมีพลังงานจำกัด เนื่องจากการหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นใช้เวลานาน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการที่แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการหาค่าตำแหน่งติดตั้งโนดถ่ายทอดที่เชื่อมต่อกับโนดตรวจรู้ภายในหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ โดยจำลองปัญหาของเซตที่ครอบคลุมที่มีค่าน้อยที่สุด และเพื่อเป็นการรับประกันการถ่ายทอดกราฟิกจากโนดถ่ายทอดจากขั้นตอนที่หนึ่งว่าสามารถส่งไปถึงสถานีฐานได้นั้น จึงมีการนำเสนอวิธีการฮิวริสติก (heuristic scheme) สามวิธีเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งของโนด

ถ่ายทอดในขั้นตอนที่สอง รวมทั้งได้มีการกำหนดขอบเขตของจำนวน โหนดถ่ายทอดอย่างน้อยที่สุดที่จะถูกติดตั้งในขั้นตอนที่สองเพื่อให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อกัน งานวิจัยนี้ได้นิยามอายุการใช้งานของเครือข่าย จากปริมาณทรานซิปิกที่ถูกสะสมอยู่ที่ โหนดถ่ายทอดจนกระทั่ง โหนดหมดพลังงานลง

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาคุณภาพของสัญญาณ เช่น สัญญาณรบกวนในเครือข่าย และยังพิจารณาวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียว อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่า โหนดถ่ายทอดมีพลังงานไม่จำกัด โดยกำหนดให้ โหนดถ่ายทอดใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีค่าความจุสูง ๆ หรือ พลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือน เป็นต้น

2.2.7 งานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008) เป็นงานวิจัยที่กำหนดหน้าที่และหาตำแหน่งติดตั้ง โหนดถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบสองชั้น (two-tiered)

ลักษณะของงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่พิจารณาปัญหาาร่วมกันเกี่ยวกับการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้ง โหนดถ่ายทอด และการกำหนดเส้นทางในเครือข่ายแบบสองชั้น โดยได้นำเสนออัลกอริทึมหาคำตอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้จำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่สถานีฐานได้รับมีค่ามากที่สุดภายใต้อายุการใช้งานที่กำหนด ได้นำเสนออัลกอริทึมของการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี เพื่อกำหนดตำแหน่งของ โหนดถ่ายทอดโดยใช้ตำแหน่งปัจจุบันเป็นตำแหน่งตั้งต้น จากนั้นจะใช้อัลกอริทึม Weighted clustering เพื่อย้าย โหนดถ่ายทอดไปที่ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่สามารถรองรับการทำงานของ โหนดตรวจรู้ได้ โดย โหนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปที่ โหนดถ่ายทอดภายในช่วงเชื่อมต่อเดียว และงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้ โหนดถ่ายทอดมีพลังงานที่จำกัด 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 เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการพิจารณาค่าความถูกต้องในการส่งข้อมูลซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราความผิดพลาดบิต ที่หาได้จากค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน อีกทั้งพิจารณาการส่งข้อมูลเป็นรอบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณางบประมาณในการลงทุน และยังเป็นเพียงการศึกษาวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

2.2.8 งานวิจัยของ Al-Turjman, F. M., Hassanein, H. S., and Ibnkahla, M. A. (2009) เป็นงานวิจัยเพื่อหาการเชื่อมต่อที่ดีที่สุดด้วยเงื่อนไขของอายุการใช้งานที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งโนดที่ใช้ไฟาติดตามสภาพแวดล้อม

ลักษณะของงานวิจัย งานวิจัยนี้มีการนำโนดถ่ายทอดมาใช้ในแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับสิ่งแวดล้อมภายในป่า โดยได้เสนอวิธีเพื่อทำให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อกันอย่างดีที่สุด และรับประกันได้ว่าเครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด นอกจากนี้ยังได้นิยามอายุการใช้งานของเครือข่ายที่เหมาะสมในทางปฏิบัติมากขึ้น ซึ่งโนดถ่ายทอดจะถูกกำหนดให้มีพลังงานจำกัด วัตถุประสงค์ในงานวิจัยคือ ต้องการให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อ (connectivity) กันมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขคือ จำนวนโนดถ่ายทอด และอายุการใช้งาน สำหรับแบบจำลองเครือข่ายในงานวิจัยนี้จะแบ่งเครือข่ายออกเป็นสองชั้น ชั้นแรกเป็นการทำงานของโนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล และรายงานต่อไปที่คลัสเตอร์เฮด โนดซึ่งจะอยู่ในชั้นบน (upper layer) ซึ่งทำการสื่อสารกับสถานีฐานอย่างเป็นคาบโดยตรง หรืออาจสื่อสารผ่านโนดถ่ายทอดก่อน งานวิจัยนี้จะทำการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งโนดถ่ายทอด เพื่อให้คลัสเตอร์เฮด โนดติดต่อกับสถานีฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตำแหน่งโนดตรวจรู้ คลัสเตอร์เฮด และสถานีฐานในเครือข่ายนั้นจะกำหนดไว้ก่อนแล้ว ในการวัดประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของโนดนั้นจะใช้กราฟการเชื่อมต่อ (graph connectivity) และใช้ minimum spanning tree เพื่อหาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดในเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการติดตั้งโนดตรวจรู้ในระนาบ 3 มิติ ซึ่งมีความเหมาะสมกับแอปพลิเคชันในการใช้งานภายในป่าตามที่พิจารณา อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพในการติดต่อสื่อสาร และยังไม่ได้พิจารณางบประมาณในการลงทุน อีกทั้งยังเป็นเพียงการออกแบบที่ศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

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

ลักษณะของงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้เสนออัลกอริทึมที่ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเครือข่าย และปริมาณข้อมูลที่ส่งตลอดอายุการใช้งานโดยติดตั้งสถานีฐานมากกว่า 1 โนด เพื่อลดจำนวนช่วงเชื่อมต่อในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ ทำให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานลดลง จึงช่วยให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น สำหรับอายุการใช้งานของเครือข่ายในงานวิจัยนี้นั้นเสนอว่าอายุการใช้งานจะสิ้นสุดลงเมื่อแบตเตอรี่ของโนดตรวจรู้มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา 3 วิธี ได้แก่ อัลกอริทึมที่ใช้ในการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานใกล้กับโนดที่มีพลังงานเหลือมากที่สุดให้เป็น โนดแรกที่มีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานในแต่ละรอบ ถัดมาเป็นอัลกอริทึมที่ทำให้โนดที่มีพลังงานเหลือมากที่สุดมีจำนวนมากที่สุดเพื่อช่วย

กระจายข้อมูลให้กับ โหนดอื่นอย่างเท่า ๆ กัน และสุดท้ายเป็นอัลกอริทึมเพื่อให้ค่าพลังงานที่เหลือของทุก ๆ โหนดในเครือข่ายมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด เปรียบเทียบกับการหาคำตอบด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม พบว่าอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้ใช้ในการออกแบบสามารถทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้ปริมาณข้อมูลที่ส่งได้นั้นมีค่ามากขึ้นด้วย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้ยังไม่มีการใช้โนดถ่ายทอดในเครือข่าย แต่จะพิจารณาให้มีการติดตั้งสถานีฐานมากกว่า 1 สถานี เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด และงานวิจัยนี้ทำให้ได้มุมมองการพิจารณาพลังงานที่เหลือของโนดตรวจรู้ที่ทำให้เกิดความสมดุลของข้อมูล และได้นำมาพิจารณาปรับใช้ในงานวิจัย อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่มีการพิจารณาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด และคุณภาพในการสื่อสาร อีกทั้งยังเป็นเพียงการศึกษาเพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น

2.2.10 งานวิจัยของ Jia, J., Chang, G., Wen, Y., and Song, J. (2009) เป็นงานวิจัยการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับการควบคุมการครอบคลุมในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายด้วยการปรับค่าระยะในการตรวจจับข้อมูลของโนดตรวจรู้

ลักษณะของงานวิจัย งานวิจัยนี้พยายามที่จะลดการใช้พลังงานของเครือข่ายโดยการจัดการให้กับโนดตรวจรู้โดยแบ่งการทำงานออกเป็นสองโหมดคือ โหมดทำงาน (active mode) และโหมดหยุดพักการทำงาน (sleep mode) โดยต้องการให้โนดตรวจรู้ที่อยู่ในโหมดทำงานมีจำนวนน้อยที่สุดเพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่ไม่ต้องการ โดยที่โนดตรวจรู้สามารถปรับระยะในการตรวจจับข้อมูลได้เพื่อให้เครือข่ายมีการครอบคลุมมากที่สุด โดยจะออกแบบเป็นสมการแบบหลายวัตถุประสงค์ และประยุกต์วิธีเจเนติกอัลกอริทึมในการหาคำตอบ

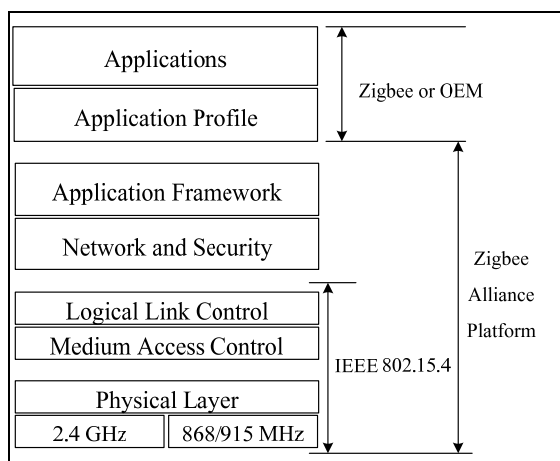
จุดที่สามารถพัฒนาต่อได้ งานวิจัยนี้จะพิจารณาอัตราการครอบคลุมพื้นที่ของโนดตรวจรู้ และทำให้เห็นตัวอย่างของการออกแบบปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ และทำให้เห็นว่าการออกแบบปัญหาใด ๆ นั้นทุก ๆ ปัญหาส่วนใหญ่ที่พิจารณาจะมีความขัดแย้งกัน โดยผู้วิจัยต้องเป็นคนตัดสินใจเลือกคำตอบที่ดีที่สุด

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 รองรับโทโปโลยีการทำงาน of เครือข่าย 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 นั้นจะเป็นเพียงอุปกรณ์ทั่วไปที่ถูกลดหน้าที่ที่เป็น 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 โน้ดตรวจรู้จะมีคุณสมบัติในการเป็นเครื่องตรวจวัด 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) และ จากงานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008) ได้มีการอธิบายโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งประกอบไปด้วย สถานีฐานและ โน้ดตรวจรู้ ดังนี้



รูปที่ 2.1 แบบจำลองชั้นการทำงานของ Zigbee ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

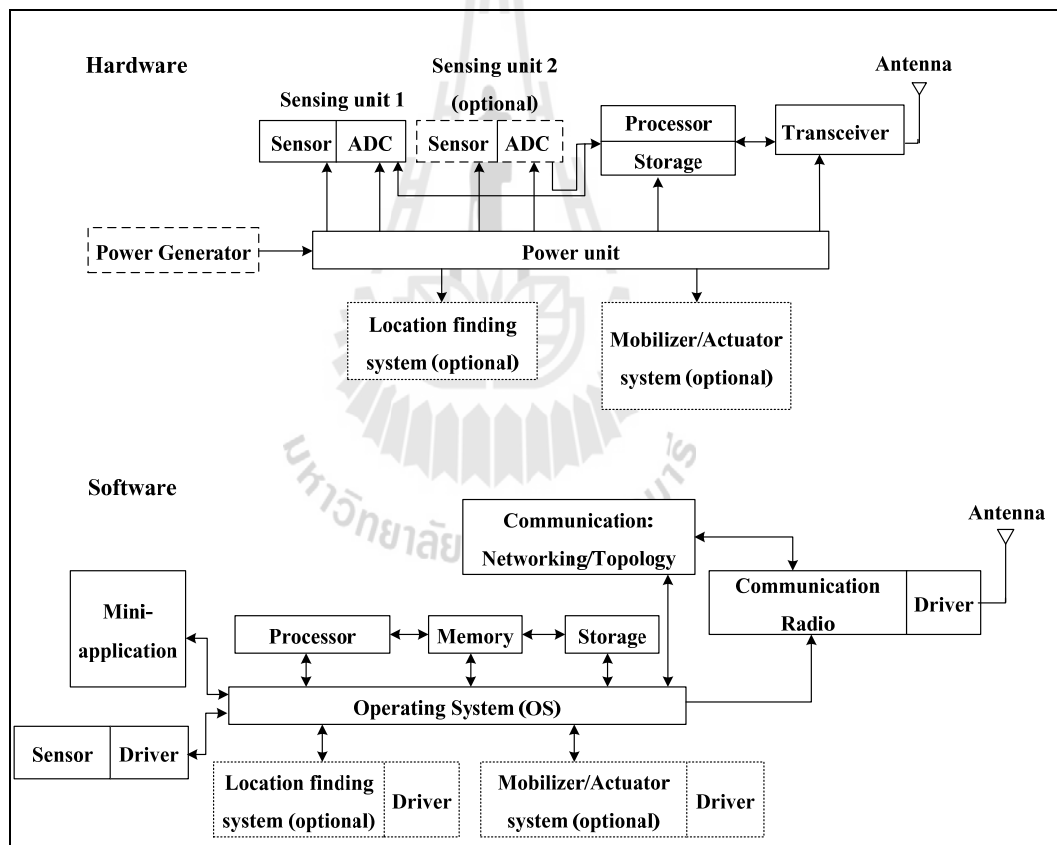
- **สถานีฐาน (Base station : BS)** เป็น โหนดปลายทาง (sink) ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก โหนดตรวจรู้ หรือสถานีถ่ายทอด จากนั้นจะทำการรวบรวมข้อมูล ประมวลผลข้อมูล และส่งต่อไปที่ ผู้ใช้ โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้ผ่านอินเทอร์เน็ต เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของ สถานีฐานนั้นขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันในการใช้งาน เช่น อาจติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางเครือข่ายเพื่อ สามารถเชื่อมต่อกับโหนดในเครือข่ายได้อย่างทั่วถึง เป็นต้น

- **โหนดตรวจรู้ (Sensor node : SN)** เป็นอุปกรณ์ที่มีการสื่อสารอย่างไร้สาย มีหน้าที่ตรวจจับ ข้อมูล และส่งข้อมูลให้กับ โหนดตรวจรู้ข้างเคียง หรือส่งข้อมูลให้กับสถานีฐานโดยตรง ชื่อที่รู้จัก ในทางอุตสาหกรรมมีหลายชื่อ เช่น โหนด ไร้สาย (Wireless node : WN), Smart dust, mote, และ Commercial off-the-shelf (COTS) หน้าที่การทำงานของ โหนดตรวจรู้โดยทั่วไปนั้นจะขึ้นอยู่กับ แอปพลิเคชัน แต่โดยทั่วไปโหนดตรวจรู้จะมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในการ หาค่าพารามิเตอร์ในตำแหน่งที่กำหนด เช่น ใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้นในอากาศ ปริมาณแสงสว่าง เป็นต้น ใช้ในการตรวจจับความเป็นไปของเหตุการณ์ที่สนใจ และใช้ในการ คาดการณ์ค่าพารามิเตอร์ในเหตุการณ์ เช่น ใช้ในการตรวจสอบสภาพการจราจรบนท้องถนน เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้โหนดตรวจรู้มีหน้าที่ในการตรวจจับข้อมูลภายในสภาพแวดล้อมที่ กำหนด แล้วส่งต่อข้อมูลไปที่สถานีถ่ายทอด หรือสถานีฐาน โดยการกำเนิดแฟลคเกต และการ ตรวจจับข้อมูลของ โหนดตรวจรู้ นั้นจะมีการทำงานอย่างเป็นคาบ (periodically) โดยที่จำนวนบิต ข้อมูลในแต่ละแฟลคเกตที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละคานั้นจะมีขนาดเท่ากัน

2.3.1 ส่วนประกอบของโนดตรวจรู้

ในการออกแบบโครงสร้างของโนดตรวจรู้เพื่อให้รองรับฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายของโนดนั้น ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนประมวลผลข้อมูล ส่วนที่มีหน้าที่ในการสื่อสาร และส่วนที่มีหน้าที่กำเนิดพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.2 ในการออกแบบส่วนต่าง ๆ นั้นจะคำนึงถึงกับแอปพลิเคชันที่นำไปใช้ จากหนังสือ Wireless sensor networks : technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) กล่าวว่าแต่ละแอปพลิเคชันจะมีเทคโนโลยีในการออกแบบโนดตรวจรู้ของตนเอง ตัวอย่างเช่น โนด smart dust และ โนด 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 โดยทั่วไปโน้ตตรวจรู้จะใช้การคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 8 บิต ถึง 64 บิต และใช้หน่วยความจำตั้งแต่ 0.01 ถึง 100 กิกะไบต์ (gigabyte : GB)

3) ส่วนของเซ็นเซอร์ ทรานสดิวเซอร์ (sensor transducer) เป็นส่วนประสานงานระหว่างสิ่งแวดล้อม กับ โน้ตตรวจรู้ ซึ่งอาจใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของโน้ตตรวจรู้ที่ใช้ในการตรวจจับสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น แสงสว่าง อุณหภูมิ ความกดดันอากาศ เป็นต้น

4) ส่วนที่ทำหน้าที่สื่อสาร (communication) โน้ตตรวจรู้จะมีความสามารถในการสื่อสาร เช่น ในโน้ตตรวจรู้ในประเภทที่ 1 (category 1 : C1WSN) ที่มีโทโปโลยีในการสื่อสารแบบเมช มีการเชื่อมต่อแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ ใช้การหาเส้นทางแบบ dynamic หรือ โน้ตตรวจรู้ในประเภทที่ 2 (category 2 : C2WSN) ที่มีการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด หรือหลายจุดต่อจุด (multipoint-to-point) ที่ใช้ช่วงเชื่อมต่อเดียว (single-hop) ในการสื่อสารระหว่างโน้ต ใช้การหาเส้นทางแบบ static คือมีเพียงเส้นทางเดียวจากโน้ตตรวจรู้ไปที่โน้ตที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล

สำหรับส่วนประกอบทางด้านซอฟต์แวร์ของโน้ตตรวจรู้ 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) ทำหน้าที่จัดการหน้าที่พื้นฐานของหน่วยรับส่งข้อมูลของโน้ตตรวจรู้ โครงสร้างของโน้ต และการตั้งค่าที่จะต้องทำการส่งข้อมูลให้กับโน้ตตรวจรู้

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

การควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง เช่น กระบวนการในการป้องกันการชนกันของข้อมูล (contention mechanism) เป็นต้น

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

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

การดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมของโนดตรวจรู้ไร้สายนั้น จะต้องพิจารณาเงื่อนไขของทรัพยากรต่าง ๆ ดังนี้

1) พลังงานที่ใช้ไป (power consumption) โหนดตรวจรู้จะมีแหล่งจ่ายพลังงานที่จำกัด ซึ่งการรักษาพลังงานเป็นเงื่อนไขหลักที่ต้องพิจารณาสำหรับเครือข่ายประเภทนี้

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

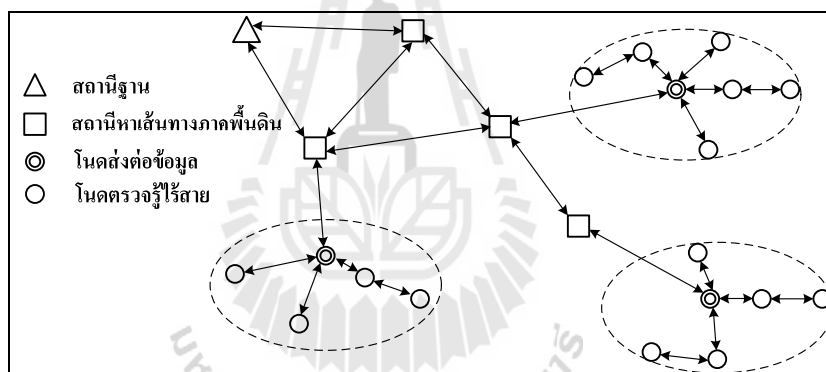
3) การคำนวณ (computation) โดยทั่วไปโนดตรวจรู้จะมีข้อจำกัดของพลังงานที่ใช้ในการคำนวณ และหน่วยความจำ ซึ่งถูกจำกัดด้วยประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล ทำให้ส่งผลกระทบต่อปริมาณของข้อมูลที่จะถูกจัดเก็บในโนดตรวจรู้

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) กล่าวว่าสามารถแบ่งหมวดหมู่ของเครือข่ายและระบบ ตามลักษณะทางกายภาพของโนดตรวจรู้ได้ 2 ประเภท ได้แก่

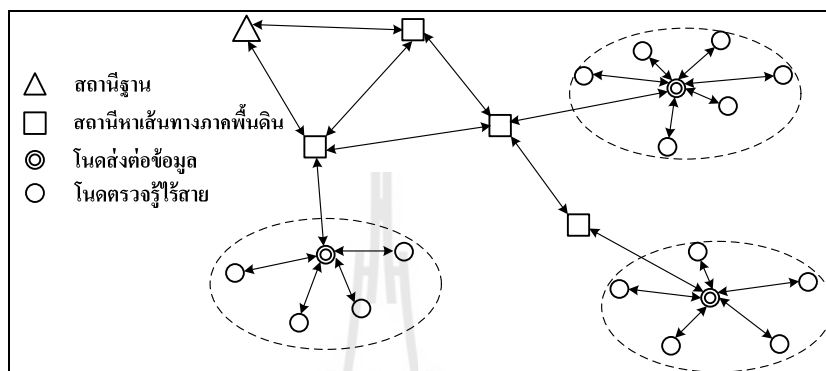
1) ประเภทที่ 1 (Category1: C1WSNs) จะใช้พื้นฐานการสื่อสารแบบเมช (mesh) โดยโนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่เป็น end device จะมีการสื่อสารมากกว่าหนึ่งช่วงเชื่อมต่อไปยังโนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล (forwarding node) โดยจะเรียกโนดนี้ว่า wireless router ดังรูปที่ 2.3 และโนด wireless router จะทำหน้าที่หาเส้นทางแบบ dynamic ซึ่งโนดนี้จะสามารถหาเส้นทางที่ดีที่สุดไปถึงปลายทางได้ ซึ่งเส้นทางนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่า 1 เส้นทาง และเป็นการเชื่อมต่อแบบไร้สาย โดยลักษณะที่สำคัญของ โนด wireless router คือ เป็นโนดที่รองรับการสื่อสารกับโนดที่เป็น end device โดยจะทำหน้าที่เสมือนว่าเป็น repeater คือ ทำการถ่ายทอด (relay) ข้อมูลจาก end device เพื่อส่งต่อให้ถึงปลายทาง โดยสัญญาณวิทยุที่ใช้ในการสื่อสารนั้นสามารถทำงานได้ไกลถึง 1000 เมตร ซึ่งโนดนี้สามารถรองรับการประมวลผลข้อมูล หรือลดหน้าที่ลงเป็นเพียงโนดตรวจรู้ที่ทำหน้าที่เป็น end device ก็ได้ สำหรับแอปพลิเคชันที่สามารถใช้ได้กับโครงสร้างประเภทที่ 1 ได้แก่ แอปพลิเคชันทางการแพทย์ การดูแลที่อยู่อาศัย (habitat monitoring) หรือสิ่งแวดล้อม เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโนดในเครือข่ายประเภทที่ 1

2) ประเภทที่ 2 (Category2 : C2WSNs) จะใช้พื้นฐานการสื่อสารแบบจุดต่อจุด หรือหลายจุดต่อหนึ่งจุด โดยทั่วไปโนดตรวจรู้ซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบ end device จะมีการเชื่อมต่อแบบช่วงเชื่อมต่อเดียวกับ โนด wireless router แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยที่โนดนี้จะทำการเชื่อมต่อกับสถานีเครือข่ายภาคพื้นดิน (terrestrial network) ด้วยการสื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ หรือผ่านการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด โดยลักษณะที่สำคัญของเครือข่ายประเภทนี้ คือ โนดตรวจรู้จะไม่สามารถสื่อสารกับโนดตรวจรู้ข้างเคียงได้ โนด wireless router จะรองรับการหาเส้นทางแบบ static ไปยังเครือข่ายภาคพื้นดิน และ/หรือ มีเส้นทางการเชื่อมต่อไปยังเครือข่ายภาคพื้นดินเพียงเส้นทางเดียว โดยสัญญาณวิทยุนั้นจะสามารถสื่อสารได้ในระยะไม่เกิน 100 เมตร และ โนด wireless router จะไม่

สามารถรองรับการประมวลผลข้อมูล หรือลดบทบาทเป็น โหนดตรวจรู้ที่ทำงานแบบ end device ได้ จะเห็นได้ว่าเครือข่ายนี้จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างเครือข่ายในประเภทที่ 1 สำหรับ ตัวอย่างของแอปพลิเคชัน ได้แก่ การติดตามความเป็นไปภายในโรงงานอุตสาหกรรม การควบคุมอาคาร การควบคุมกระบวนการผลิต เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ โหนดในเครือข่ายประเภทที่ 2

ข้อดีของการใช้โหนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

- 1) ราคาถูก
- 2) มีขนาดเล็กเหมาะกับการติดตั้งภายในสิ่งแวดล้อม
- 3) โหนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสามารถจัดการตัวเองได้ โดยไม่ต้องมีมนุษย์เข้าไปควบคุมหรือช่วยเหลือ
- 4) โหนดตรวจรู้จำนวนมากสามารถกระจายตัวครอบคลุมบริเวณพื้นที่ทำการของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อเก็บข้อมูล

ข้อจำกัดของการใช้โหนดตรวจรู้และเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

- 1) โหนดตรวจรู้มีแหล่งพลังงานและความสามารถในการประมวลผลจำกัด
- 2) โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเป็นโครงสร้างที่ไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา

2.3.3 สถานีถ่ายทอด (Relay station : RS)

การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ไร้สายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นจะแปรผันตามจำนวนบิตข้อมูล และระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับ จากแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานในการสื่อสารนั้นพบว่า การสื่อสารระหว่างโหนดสองโหนดใด ๆ ที่อยู่ใกล้กันมาก จะใช้

พลังงานมากกว่าการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อด้วยระยะทางสั้น ๆ ซึ่งผลของการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อนั้นมีการศึกษาในหลายงานวิจัยทั้งเครือข่ายแบบแบนราบ (flat architecture) และเครือข่ายแบบลำดับชั้น (hierarchical architecture) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการส่งข้อมูลแบบหลายช่วงเชื่อมต่อจะทำให้พลังงานในการสื่อสารมีค่าลดลง แต่ก็อาจทำให้มีโหนดตรวจรับบางโหนดเกิด overload คือ เมื่อโหนดตรวจรับได้รับข้อมูลจากโหนดต้นทางจำนวนมาก จึงทำให้โหนดตรวจรับโหนดนี้หมดพลังงานลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับโหนดตรวจรับโหนดอื่น ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครือข่าย เพราะทำให้ปลายทางไม่ได้รับข้อมูลภายในพื้นที่ที่โหนดนี้ทำการตรวจรับ เป็นต้น ซึ่งหลายงานวิจัยได้พยายามแก้ปัญหาเหล่านี้โดยพยายามที่จะลดผลกระทบจากโหนดตรวจรับโหนดแรกที่หมดพลังงาน เทคนิคหนึ่งที่มีการนำเสนอเพื่อลดภาระของโหนดตรวจรับที่เกิด overload คือ มีการนำโหนดพิเศษ ที่เรียกว่าโหนดถ่ายทอด (relay node) ซึ่งต่อไปในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า สถานีถ่ายทอด (relay station : RS) มาใช้ในเครือข่ายเพื่อช่วยแบ่งเบาข้อมูลที่โหนดตรวจรับได้รับ จากการศึกษาของงานวิจัยที่มีการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในเครือข่ายนั้นมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น เพื่อทำให้การรวบรวมข้อมูลภายในเครือข่ายมีความสมดุล (balance load) เพื่อทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายมีค่ามากที่สุด หรือ เพื่อทำให้เครือข่ายตรวจรับไร้สายมีความอดทนต่อความผิดพลาด (fault-tolerance) เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่มีการใช้งานสถานีถ่ายทอดที่ผ่านมานั้นพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมามีการกำหนดให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่จำกัด เช่นงานวิจัยของ Wang, Q., Xu, K., Takahara G., and Hassanein H. (2007) งานวิจัยของ Al-Turjman, F. M., Hassanein, H. S., and Ibnkahla, M. A. (2009) งานวิจัยของ Guo, W., Huang, X., and Lou, W. (2008) และงานวิจัยของ Bari, A., Teng, D. and Jackel, A. (2009) กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะมีพลังงานที่มากกว่าโหนดตรวจรับ ซึ่งข้อได้เปรียบในการนำสถานีถ่ายทอดมาทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮดแทนที่โหนดตรวจรับนั้นมีข้อดีเพราะเนื่องจากสถานีถ่ายทอดเป็นโหนดที่มีขนาด buffer มากกว่า หรือสามารถส่งต่อข้อมูลในระยะที่ไกลมากกว่าโหนดตรวจรับทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากทำให้โหนดตรวจรับมีการใช้พลังงานอย่างเท่า ๆ กัน (load balanced) และช่วยให้เครือข่ายมีความอดทนต่อความผิดพลาด (fault tolerance) เป็นต้น

งานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal, P., and Sivalingam, K. M. (2008) กล่าวว่าสถานีถ่ายทอดจะถูกสมมุติให้มีพลังงาน และคุณสมบัติในการสื่อสารที่มากกว่าโหนดตรวจรับ แต่ไม่ได้ระบุว่าพลังงานของสถานีถ่ายทอดนั้นจำกัดหรือไม่ โดยยกตัวอย่างของสถานีถ่ายทอดที่ใช้งาน คือ iMote จาก Crossbow งานวิจัยของ Li, S., Chen, G., and Ding W. (2009) ที่กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะเป็นโหนดที่มีพลังงานมากกว่าโหนดตรวจรับ แต่ในขณะเดียวกันก็มีราคาแพงมากกว่าโหนด

ตรวจรู้มาก งานวิจัยของ Hou, Y. T., Shi, Y., Sherali, H. D., and Midkiff S. F. (2005) กล่าวว่า สถานีถ่ายทอดจะไม่มีหน้าที่ในการกำเนิดข้อมูล แต่จะทำหน้าที่เพียงถ่ายทอดกราฟิกข้อมูลไปที่ สถานีฐานเท่านั้น โดยในงานวิจัยนี้จะมีการหาพลังงานเพิ่มเติมให้กับสถานีถ่ายทอด งานวิจัยของ Hande, A., Polk, T., Walker, W., Bhatia D., and Jonsson, E. (2007) เป็นงานวิจัยที่มีการนำเซลล์สุริยะมาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับสถานีถ่ายทอด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกโนดชนิดนี้ว่า Wireless router node ใช้กับแอปพลิเคชันที่อยู่ภายในอาคาร โดยที่ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากถ่านอัลคาไลน์ที่ต้องทำการเปลี่ยนใหม่เมื่อพลังงานของถ่านหมดลง โดยระบบการทำงานจะประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ หน่วยที่ทำหน้าที่เก็บพลังงาน และ โมดูลที่ทำหน้าที่สะสมพลังงาน โดยหน่วยที่ทำหน้าที่เก็บพลังงานนั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์สุริยะที่มีการเชื่อมต่อกับส่วนประกอบที่ทำหน้าที่จัดหาพลังงานจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีการใช้งานภายในอาคาร และบริเวณทางเดินในโรงพยาบาล ส่วนของ ultracapacitor จะใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสะสมพลังงาน และ แบตเตอรี่จากถ่านอัลคาไลน์จะเป็นเพียงส่วนที่ทำการสำรองพลังงาน สถานีถ่ายทอดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Crossbow MICAz motes ซึ่งถูกควบคุมโดยการดำเนินการของวงจรที่ใช้ในการจัดหาพลังงานเพื่อให้พลังงานเพียงพอและเกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

ในทางการค้านั้นผู้ผลิตได้ทำการผลิตอุปกรณ์ที่มีหน้าที่เช่นเดียวกับสถานีถ่ายทอด 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 โดยใช้การเข้ารหัสด้วยรูปแบบที่มีความน่าเชื่อถือ 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 สามารถนำอุปกรณ์ไปใช้ในแอปพลิเคชันเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวก การจัดการเกี่ยวกับน้ำ และของเสียภายในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี น้ำมันและก๊าซ หรือ ใช้เพื่อตามรอยวัตถุดิบกระบวนการผลิต เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา และในส่วนของบริษัทผู้ผลิตนั้น พบว่าจะกำหนดให้สถานีถ่ายทอดมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ และส่งต่อข้อมูลเหล่านั้นไปยังสถานีฐานต่อไป โดยการพิจารณาพลังงานของสถานีถ่ายทอดในงานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงสมมติให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่จำกัดเช่นเดียวกับ โนดตรวจรู้ และบางงานวิจัยจะกำหนดให้มีการจัดหาพลังงานเพิ่มเติมให้กับสถานีถ่ายทอด และมีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่กำหนดให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่ไม่จำกัด โดยการใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนของผู้ผลิตก็เช่นเดียวกัน ส่วนใหญ่แล้วก็ยังไม่มีการผลิตสถานีถ่ายทอดที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ จะสมมติให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่ไม่จำกัด โดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการติดตั้งแหล่งสำรองพลังงานขนาดใหญ่ เพื่อใช้ในการกำเนิดพลังงานให้กับโนด โดยสถานีถ่ายทอดจะมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ แล้วส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปยังสถานีฐานต่อไป หรือส่งต่อข้อมูลให้กับสถานีถ่ายทอดข้างเคียงก่อน ในกรณีที่สถานีถ่ายทอดอยู่ไกลจากสถานีฐานมาก โดยในงานวิจัยนี้ต้องการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นมีมูลค่าสูง ซึ่งในการออกแบบเพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นจะต้องเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุด และต้องสามารถรับประกันได้ว่าทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเมื่อมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย แสดงดังรูปที่ 2.5

ข้อดีของสถานีถ่ายทอด

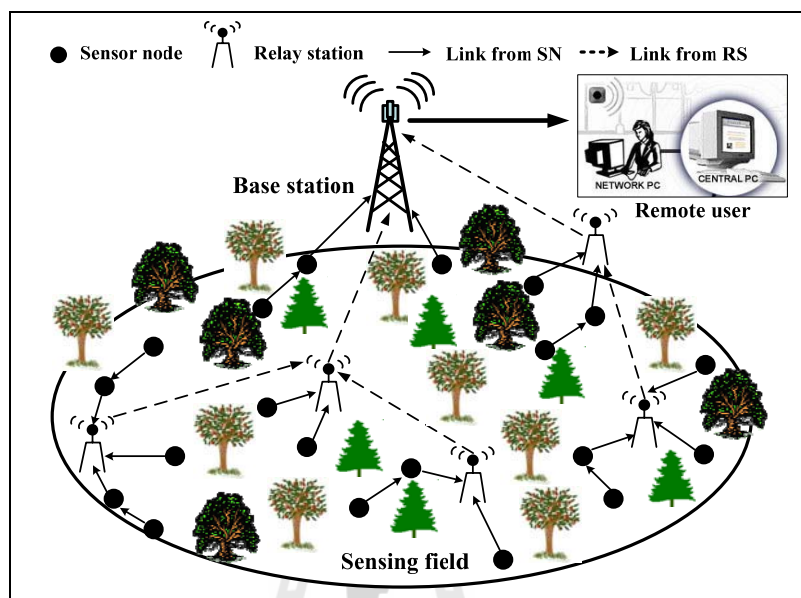
- 1) มีแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ สามารถใช้งานได้โดยที่มีพลังงานไม่จำกัด
- 2) เป็นอุปกรณ์แบบ FFD ซึ่งสามารถรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้และส่งต่อข้อมูลไปยังสถานีฐานได้ ช่วยประหยัดพลังงานของโนดตรวจรู้

- 3) สามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน

ข้อเสียของสถานีถ่ายทอด

- 1) สถานีถ่ายทอดเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นต้องคำนึงถึงพื้นที่ในการติดตั้ง

- 2) สถานีถ่ายทอดมีราคาแพง
- 3) ใช้งบประมาณในการติดตั้งสูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด

การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีหน้าที่แตกต่างกัน 3 ส่วน ได้แก่ โหนดตรวจรู้ที่มีพลังงานจำกัด ทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล และส่งต่อข้อมูลไปที่โหนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน ส่วนที่สอง คือ สถานีถ่ายทอดมีพลังงานที่ไม่จำกัด โดยจะใช้พลังงานจากเซลล์สุริยะ และมีแหล่งสำรองพลังงานขนาดใหญ่ ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากโหนดตรวจรู้ ไปที่สถานีถ่ายทอดข้างเคียง หรือสถานีฐาน และส่วนสุดท้าย คือ สถานีฐาน มีหน้าที่เก็บรวบรวม และประมวลผลข้อมูล โดยจะทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้

2.4 การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากงานวิจัยของ Al-Karaki, J. N., and Kamal, A. E. (2004) กล่าวว่า การหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายเนื่องจากลักษณะของเครือข่ายที่แตกต่างไปจากเครือข่ายไร้สายประเภทอื่น ๆ เช่น mobile ad hoc networks หรือ เครือข่ายเซลลูลาร์ (cellular networks) ข้อแตกต่างแรกคือ เนื่องจากโหนดตรวจรู้มีจำนวนมากดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะสร้าง global

addressing ที่ใช้กับโหนดจำนวนมาก ดังนั้นโปรโตคอลที่ใช้พื้นฐานของ IP จึงไม่สามารถนำมาใช้กับเครือข่ายประเภทนี้ได้ รวมทั้งการนำโหนดตรวจรู้มาใช้ในเครือข่ายแบบ ad hoc นั้น โหนดตรวจรู้เหล่านี้จำเป็นต้องมีการจัดการด้วยตนเองได้เนื่องจากเครือข่ายแบบ ad hoc ต้องการระบบที่ใช้ในการจัดรูปแบบการเชื่อมต่อ และจัดการกับการกระจายตัวของโหนดในเครือข่าย แต่สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นการได้รับข้อมูลมีความสำคัญมากกว่าการรู้ ID ของโหนดที่ส่งข้อมูล อีกทั้งเนื่องจากข้อจำกัดของพลังงาน การประมวลผล และความจุของหน่วยความจำของโหนดตรวจรู้ ทำให้เครือข่ายประเภทนี้จำเป็นต้องมีการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ หรือเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีของเครือข่ายในกรณีที่โหนดตรวจรู้สามารถเคลื่อนที่ได้ นั่นทำให้เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จุดประสงค์ในการออกแบบเครือข่าย คือ ทำให้สามารถรวบรวมข้อมูลได้ ในขณะที่เดียวกันต้องสามารถทำงานได้ยาวนานที่สุดโดยนำเทคนิคการจัดการพลังงานมาใช้ในเครือข่าย ซึ่งการออกแบบโปรโตคอลในการหาเส้นทางของเครือข่ายนั้นมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ การออกแบบหลายปัจจัย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

2.4.1 ความท้าทายในการหาเส้นทางภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1) ตำแหน่งของโหนดตรวจรู้ (node deployment) จะขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันที่นำไปใช้งาน ซึ่งในบางแอปพลิเคชันสามารถทำการกำหนดตำแหน่งติดตั้งไว้ล่วงหน้า หรือทำการสุ่มตำแหน่งติดตั้ง สำหรับการติดตั้งที่กำหนดตำแหน่งไว้ล่วงหน้านั้น ข้อมูลจะถูกส่งไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้แล้ว อย่างไรก็ตามสำหรับโหนดที่ถูกสุ่มตำแหน่งติดตั้งนั้น ถ้าตำแหน่งของโหนดที่ติดตั้งมีการกระจายอย่างไม่เท่ากันแล้วก็อาจใช้การจัดการคลัสเตอร์เพื่อทำให้เครือข่ายมีการเชื่อมต่อกัน และช่วยให้มีการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

2) พลังงานที่โหนดใช้ไปนั้นจะต้องมีความแม่นยำ (energy consumption without losing accuracy) เนื่องจากโหนดตรวจรู้จะต้องพยายามใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดในการสื่อสารและประมวลผลข้อมูล ดังนั้นอายุการใช้งานของโหนดตรวจรู้จะขึ้นอยู่กับแบตเตอรี่ ในการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อนั้น โหนดตรวจรู้จะทำหน้าที่ทั้งส่งข้อมูล และหาเส้นทางในการส่งข้อมูล ดังนั้นหากมีโหนดใดโหนดหนึ่งหมดพลังงานลงก็จะส่งผลทำให้โทโปโลยีในเครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย และอาจต้องมีการหาเส้นทางในการส่งข้อมูล และจัดการเครือข่ายใหม่อีกครั้ง

3) วิธีการในการรายงานข้อมูล (data reporting method) จะขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน โดยแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีการ ได้แก่ time-driven, event-driven, และ query-driven หรือวิธีที่ผสมทั้ง 3 วิธีการเข้าด้วยกัน (hybrid) วิธีการส่งแบบ time-driven เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันในการตรวจสอบข้อมูลแบบรายคาบโดยโหนดตรวจรู้จะตรวจจับข้อมูลใน

สภาพแวดล้อมแล้วจึงส่งข้อมูลนั้นภายในช่วงเวลาที่เป็นรายการ สำหรับวิธี event-driven และ query-driven นั้น โหนดตรวจรู้จะทำการจัดการกับข้อมูลที่ได้รับทันที เนื่องจากเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตลอดเวลา หรือมีการตอบสนองกับการซักถามข้อมูลที่ได้รับจากสถานีฐาน หรือโหนดอื่น ๆ ในเครือข่าย ซึ่งวิธีการนี้จะเหมาะสมกับแอปพลิเคชันที่ให้ความสำคัญกับช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์ วิธีการในการรายงานข้อมูลนั้นจะมีอิทธิพลต่อโปรโตคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางในเทอมของพลังงานที่ใช้ และการคำนวณหาเส้นทาง

4) ความแตกต่างของโหนดหรือการเชื่อมต่อ (node/link heterogeneity) ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นจะสมมุติให้โหนดตรวจรู้มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุก ๆ โหนด เช่น กำหนดให้มีความจุในการคำนวณ การสื่อสาร และพลังงานที่เท่า ๆ กันทุกโหนด แต่ในความเป็นจริงนั้นความจุของโหนดตรวจรู้จะขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันที่นำไปใช้งาน เช่น ในบางแอปพลิเคชันต้องการให้โหนดตรวจรู้มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นไปของสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และ ความกดดันอากาศ แอปพลิเคชันที่ใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนไหว ตรวจจับภาพ หรือติดตามการเคลื่อนไหวของวัตถุ ซึ่งลักษณะของโหนดตรวจรู้ที่นำไปใช้ในแต่ละแอปพลิเคชันย่อมมีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกัน แม้แต่การอ่านข้อมูล และการรายงานข้อมูลของโหนดตรวจรู้แต่ละ โหนดก็สามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ได้ออกแบบ ตัวอย่างเช่น โปรโตคอลแบบลำดับชั้น (hierarchical protocol) จะกำหนดหน้าที่ของคลัสเตอร์เฮด โหนดต่างจากโหนดตรวจรู้ทั่วไป โดยสามารถเลือกคลัสเตอร์เฮดจากโหนดที่ใช้งานอยู่ทั่วไป หรืออาจเลือกจากโหนดที่มีพลังงานมากกว่าโหนดอื่น ๆ ในเครือข่าย

5) ความอดทนต่อความผิดพลาด (fault tolerance) ในกรณีที่มีโหนดตรวจรู้บางโหนดไม่สามารถทำงานต่อไปได้ หรือถูกบล็อกไม่ให้มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายเนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอ หรือ เกิดความเสียหายจากตัวอุปกรณ์ หรือถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อม ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากโหนดตรวจรู้โหนดนั้นจะต้องไม่กระทบต่อการทำงานของเครือข่าย ถ้ามีโหนดตรวจรู้หลายโหนดเกิดความล้มเหลวขึ้นแล้ว ชั้น medium access control (MAC) และโปรโตคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางจะต้องทำการจัดรูปแบบของการเชื่อมต่อ และเส้นทางที่เหมาะสมใหม่ เพื่อให้โหนดตรวจรู้ที่เหลือในเครือข่ายสามารถส่งข้อมูลไปถึงปลายทางได้ โดยอาจจะต้องมีการปรับค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล และอัตราการส่งสัญญาณของการเชื่อมต่อที่เกิดขึ้นเพื่อลดการใช้พลังงานลง หรืออาจจะต้องมีการหาเส้นทางซ้ำผ่านบริเวณที่ยังคงมีโหนดตรวจรู้โหนดอื่นที่มีพลังงานมากพออยู่

6) ความสามารถในการปรับขนาดได้ (scalability) เนื่องจากจำนวนโหนดตรวจรู้ที่ใช้ในบริเวณตรวจจับข้อมูลนั้นมีจำนวนเป็นหลักร้อย หรือหลักพัน โหนด ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการหาเส้นทางจะต้องสามารถทำงานได้ในเครือข่ายขนาดใหญ่ นอกจากนี้โปรโตคอลที่ใช้ในการหา

เส้นทางจะต้องสามารถยืดหยุ่นต่อการตอบสนองต่อเหตุการณ์ภายในสภาพแวดล้อมที่สนใจ จนกระทั่งมีเหตุการณ์เกิดขึ้น โดยกำหนดให้โหนดตรวจรู้อยู่ในสถานะหลับ (sleep state) เมื่อมีข้อมูลจำนวนน้อยเพื่อให้โหนดตรวจรู้ประหยัดพลังงาน

7) การเปลี่ยนแปลงของเครือข่าย (network dynamic) จากการศึกษาส่วนใหญ่จะกำหนดตำแหน่งที่คงที่ให้กับโหนดตรวจรู้ อย่างไรก็ตามในหลาย ๆ แอปพลิเคชัน เช่น จากงานวิจัยของ Ye, F., Luo, H., Cheng, J., Lu S., and Zhang, L. (2002) นั้นกล่าวว่าสถานีฐาน และโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายสามารถเคลื่อนที่ได้ ด้วยเหตุนี้การหาเส้นทางจากโหนดที่มีการเคลื่อนที่จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างมาก เนื่องจากเส้นทาง และโทโปโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่นเดียวกับพลังงาน และแบนด์วิธ ยิ่งไปกว่านั้นวัตถุที่เฝ้าสังเกตนั้นก็อาจมีการเคลื่อนไหวด้วยเช่นกัน เช่น การติดตามเป้าหมาย ในทางกลับกันการตรวจจับเหตุการณ์ที่อยู่กับที่จะยอมให้เครือข่ายทำงานในโหมดพร้อมทำงานเสมอ (reaction mode) เช่น มีการสร้างกราฟฟิกทันทีเมื่อได้รับรายงาน ในขณะที่ในแอปพลิเคชันที่มีการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา (dynamic event) นั้นโหนดตรวจรู้จะรายงานข้อมูลเป็นคาบ (periodic report) ไปที่สถานีฐาน

2.4.2 โพรโทคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

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

1) การหาเส้นทางแบบแบนราบ (flat-based routing) สำหรับเครือข่ายแบบแบนราบจะเป็นการสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ โดยแต่ละโหนดจะถูกกำหนดหน้าที่เหมือนกัน และแต่ละโหนดจะร่วมมือกันในการทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล เนื่องจากโหนดในเครือข่ายที่มีจำนวนมาก จึงไม่สามารถกำหนด ID ทั้งหมด (global identifier) ให้กับโหนดตรวจรู้แต่ละโหนดได้ ดังนั้นในการพิจารณาข้อมูลจะมีการหาเส้นทางแบบ data-centric โดยสถานีฐานจะส่งการชักถาม (queries) ไปยังบริเวณที่แน่นอน และรอจนกว่าจะได้รับข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่ส่งการชักถามออกไป ดังนั้นข้อมูลจะถูกร้องขอผ่านการชักถาม โพรโทคอลที่จัดว่ามีการหาเส้นทางแบบ data-centric เช่น โพรโทคอล SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) และ directed diffusion เป็นต้น

2) การหาเส้นทางแบบลำดับชั้น (hierarchical-based routing) หรือวิธีการหาเส้นทางโดยใช้พื้นฐานของการจัดคลัสเตอร์ เป็นโพรโทคอลที่ดั้งเดิมแล้วถูกใช้ในเครือข่ายแบบใช้สาย เป็นเทคนิคพิเศษที่มีข้อได้เปรียบที่ทำให้เครือข่ายสามารถปรับขยายได้ และช่วยให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นโดยสำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้น โพรโทคอลนี้จะพิจารณาจากโหนดที่มี

พลังงานมากกว่าเพื่อใช้ในการดำเนินการ และส่งข้อมูล จะเรียกโหนดนี้ว่า คลัสเตอร์เฮด ในขณะที่จะ
ใช้โหนดที่มีพลังงานน้อยกว่าทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูล โปรโตคอลนี้จะทำให้เครือข่ายมีการใช้
พลังงานลดลงโดยการ ใช้คลัสเตอร์เฮดที่มีหน้าที่ในการรวบรวมข้อมูล เพื่อลดจำนวนข้อมูลที่จะถูก
ส่งไปที่สถานีฐาน การหาเส้นทางแบบลำดับชั้นจะแบ่งออกเป็นสองชั้น ได้แก่ ชั้นที่ 1 จะทำการ
เลือกโหนดที่จะทำหน้าที่เป็นคลัสเตอร์เฮด และชั้นที่สองทำหน้าที่ในการหาเส้นทาง เทคนิคส่วน
ใหญ่ในการหาเส้นทางด้วยวิธีนี้นั้นจะไม่ได้ใช้ในการหาเส้นทาง แต่จะเป็นการหาว่าต้องส่งต่อไปที่
โหนดใด และเมื่อไรที่จะส่งข้อมูล ประมวลผลข้อมูล หรือรวบรวมข้อมูล เช่น โปรโตคอล LEACH
(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), โปรโตคอล PEGASIS (Power-Efficient Gathering
in Sensor Information Systems), TEEN (Threshold-Sensitive Energy Efficient Protocols) เป็นต้น

3) การหาเส้นทางแบบยึดตำแหน่ง (location-based routing) ในการหาเส้นทาง
แบบนี้ โหนดตรวจรู้จะถูกกำหนดตำแหน่งโดยสามารถหาระยะทางระหว่างโหนดได้จากการ
ประมาณค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ โดยโหนดจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน ซึ่งการหา
ตำแหน่งของโหนดนั้นสามารถทราบได้จากการเชื่อมต่อกับดาวเทียมโดยใช้ GPS (Global positioning
system) เพื่อประหยัดพลังงาน วิธีการหาตำแหน่งของโหนดจะกำหนดให้โหนดตรวจรู้อยู่ในโหมดพัก
การทำงาน (idle mode) ถ้าโหนดไม่ได้ทำหน้าที่ในการตรวจจับข้อมูล ตัวอย่างของโปรโตคอลใน
กลุ่มนี้ ได้แก่ GAF (Geographic adaptive fidelity), GEAR (Geographic and energy aware routing)
 เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วโปรโตคอลที่ใช้ในการหาเส้นทางนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ถ้า
พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบมีค่าที่แน่นอน โดยสามารถควบคุมให้อยู่ภายใต้เงื่อนไข และในระดับ
พลังงานที่สามารถใช้งานได้ นอกจากโปรโตคอลทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาแล้ว ก็ยังมีโปรโตคอลอื่น ๆ
อีก ได้แก่ โปรโตคอล multipath-based, query-based, negotiation-based, QoS-based หรือ coherent-
based และนอกจากนี้ยังสามารถจำแนกโปรโตคอลออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ proactive, reactive,
และ hybrid ขึ้นอยู่กับวิธีการในการหาเส้นทางจากต้นทางไปที่ปลายทางโดยโปรโตคอลแบบ
proactive ทุก ๆ เส้นทางจะถูกคำนวณก่อนการทำงาน ขณะที่โปรโตคอล reactive การหาเส้นทางจะ
ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน และโปรโตคอลแบบ hybrid จะเป็นการผสมของทั้งแบบ
proactive และ แบบ reactive นอกจากนี้ยังมีโปรโตคอลในการหาเส้นทางแบบอื่น ๆ อีก เรียกว่า
cooperative ในการหาเส้นทางแบบ cooperative นั้น โหนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปที่โหนดศูนย์กลาง
(central node) ซึ่งเป็นแหล่งที่มีการรวบรวมข้อมูล และจะเป็น โหนดที่มีความสามารถในการ
ประมวลผล ด้วยเหตุนี้จึงช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการหาเส้นทาง

ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาเส้นทางเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น มีงานวิจัยไม่น้อยที่ให้ความสนใจกับการแก้ปัญหาของการหาเส้นทางในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยงานวิจัยต่าง ๆ ได้มีอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่งานวิจัยจะให้ความสำคัญกับการทำให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุด เพื่อให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด หลาย ๆ งานวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองเครือข่ายที่ต่างกัน ได้แก่ วิธีการจัดคลัสเตอร์ให้กับเครือข่าย วิธี data-centric วิธีการจัดสมดุลโหลด วิธีการรวบรวมข้อมูลเพื่อให้อายุการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ 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 นั้นถูกเลือกใช้เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลจากตำแหน่งโนดผ่านระบบติดตามตำแหน่ง เนื่องจากการใช้งานในหลาย ๆ แอปพลิเคชันนั้นต้องการตำแหน่งโนดที่แม่นยำ โดยเฉพาะแอปพลิเคชันเกี่ยวกับสุขภาพทางการแพทย์ 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 โดยข้อมูลที่เข้ามาจะมาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งแล้วถูกรวบรวมไว้ที่โนดระหว่างทาง (intermediate node) ซึ่งโนดระหว่างทางนี้จะทำการลดปริมาณข้อมูลจำนวนมาก เพื่อลดพลังงานในการส่งข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบ และวิเคราะห์ส่วนประกอบของเครือข่ายที่ดีที่สุด และใช้วิธีการ data-centric เพื่อลดการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายทั้งที่เป็นการสุ่มตำแหน่งติดตั้ง โนด และเครือข่ายที่เป็นการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โนดล่วงหน้า อีกทั้งงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าวิธีการ minimum spanning tree (MST) ว่าเป็นวิธีรวบรวมข้อมูลที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพในการหาเส้นทาง

งานวิจัยของ Ranganathan, D., Pothuri, P. K., Sarangan, V., and Radhakrishnan S. (2010) มีการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมาใช้ในการเฝ้าระวังแผ่นดินไหว และระดับของการปล่อยพลังงานบนปากปล่องภูเขาไฟซึ่งมีความอ่อนไหวต่อความล่าช้าสูง และจะต้องทำการส่งข้อมูลไปที่ศูนย์กลางที่คอยควบคุมภายในระยะเวลาการหน่วงเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยโหนดตรวจรู้จะต้องไม่ใช้พลังงานที่มากเกินไป เรียกอัลกอริทึมนี้ว่า delay-constrained, energy efficient routing problem (DCEERP) เมื่อกำหนดขอบเขตของการหน่วงเวลาในหน่วยวินาทีแล้ว หน้าที่ของอัลกอริทึม คือ จะต้องหาเส้นทางจากโหนดตรวจรู้ไปที่ปลายทางโดยใช้พลังงานให้น้อยที่สุด นั่นคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลตามเส้นทางนั้นจะต้องไม่เกินระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาวิธีการในการหาเส้นทางที่มีการควบคุมพลังงาน และใช้แบบจำลองของความล่าช้าในการเข้าถึงข้อมูล เช่นเดียวกับที่ใช้ในชั้น MAC ของมาตรฐาน 802.11 เพื่อแก้ปัญหาของอัลกอริทึม DCEERP

2.4.3 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธี Minimum spanning tree

ก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการหาคำตอบด้วยอัลกอริทึม minimum spanning tree นั้น จะได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับแบบจำลองเครือข่าย (network model) เพื่อให้เกิดความเข้าใจคำนิยามเบื้องต้นก่อน ดังนี้

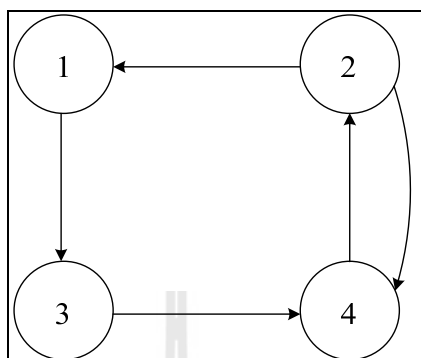
1) คำนิยามพื้นฐาน (basic definition)

กราฟ (graph) หรือเครือข่าย (network) กำหนดโดยเซตของสัญลักษณ์สองอย่าง ได้แก่ โหนด (node) และ เส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนด (arc) โดยกำหนดเซตของจุด เรียกว่า V หรือ vertices ซึ่งเซตของจุดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โหนด ส่วนเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนด นั้นจะเป็นเซตคู่ลำดับของจุด และจะใช้แทนทิศทางที่เป็นไปได้ของเส้นทางที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างเซตของจุด ตัวอย่างเช่น ถ้าเครือข่ายประกอบไปด้วยเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนด (j, k) จะเรียกโหนด j ว่า โหนดตั้งต้น (initial node) และเรียกโหนด k ว่า โหนดปลายทาง (terminal node) หมายถึง มีเส้นทางออกจากโหนด j ไปที่ โหนด k ตัวอย่างเช่นจากรูปที่ 2.6 เป็นกรณีที่มีโหนดในเครือข่ายจำนวน 4 โหนด ดังนั้นจะแสดงเป็นเซตของจุด ได้ว่า $V = \{1, 2, 3, 4\}$ ดังนั้น เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนด จะเป็น $A = \{(2, 1), (1, 3), (3, 4), (4, 2), (2, 4)\}$ เช่น เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนด $(3, 4)$ จะหมายถึง มีโหนดที่ 3 เป็นโหนดตั้งต้น และโหนดที่ 4 เป็นโหนดปลายทางโดยมีเส้นทางออกจากโหนด 3 ไปที่โหนด 4

2) ทฤษฎีเกี่ยวกับอัลกอริทึม minimum spanning tree

minimum spanning tree เป็นอัลกอริทึมในการเชื่อมโหนดทุกโหนดในกราฟแบบไม่มีทิศทางเข้าด้วยกันโดยผลรวมน้ำหนักของเส้นทางเชื่อมต่อ (edge) ต้องมีค่าน้อยที่สุด สัญลักษณ์ (i, j) จะแทนเส้นทางเชื่อมต่อจากโหนด i ไปที่โหนด j ตัวอย่างเช่น ถ้าแต่ละโหนดในเครือข่ายแทนด้วย

คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องในมหาวิทยาลัย เส้นเชื่อมต่อระหว่างโนด (i, j) อาจจะแทนด้วย สายเคเบิล ได้ดินที่เชื่อมต่อจากคอมพิวเตอร์เครื่องที่ i ไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องที่ j



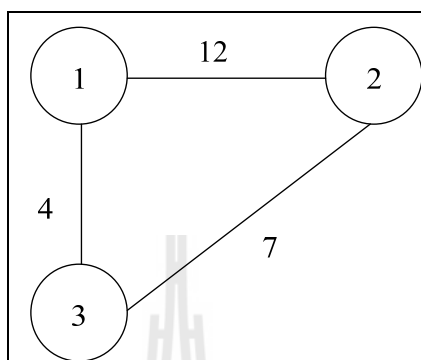
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างเครือข่ายที่มีโนด 4 โนด

ในหลายแอปพลิเคชันเราต้องการหาเซตของเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดในเครือข่ายที่เชื่อมต่อทุกโนด โดยที่ผลรวมของความยาวของเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดนั้นจะต้องน้อยที่สุด และภายในกลุ่มของโนดที่มีการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันนั้นจะต้องไม่มีลูบเกิดขึ้น ซึ่งจะเรียกลูบที่เกิดขึ้นว่า เส้นทางปิด (closed path หรือ cycle) ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 2.6 จะมีลูบ หรือเส้นทางปิดเกิดขึ้น คือเส้นทาง $(3, 4)-(4, 2)-(2, 4)$ ซึ่งเส้นทางนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าใช้วิธีการหาเส้นทางแบบ minimum spanning tree

สำหรับเครือข่ายที่มีจำนวน โนดในเครือข่าย n โนด การสร้าง spanning tree คือ การสร้างเส้นทางเชื่อมต่อของทุก ๆ โนดในเครือข่ายเข้าด้วยกัน โดยจะมีเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดเท่ากับ $n-1$ เส้นทาง และเป็นเส้นทางที่ไม่เป็นลูบ

จากรูปที่ 2.7 เป็นรูปที่แสดงเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดทั้ง 3 โนด ซึ่งมีเส้นทางที่เป็นไปได้ 3 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทางแรกคือ เส้นทางเชื่อมต่อ $(1, 2)$ และ $(2, 3)$ เส้นทางที่สอง คือ เส้นทางเชื่อมต่อ $(1, 2)$ และ $(1, 3)$ และเส้นทางที่สาม คือ เส้นทางเชื่อมต่อ $(1, 3)$ และ $(2, 3)$ หากใช้หลักการในการหาเส้นทางแบบ minimum spanning tree เพื่อหาเส้นทางในการเชื่อมต่อโนดทั้ง 3 โนดเข้าด้วยกัน และทำให้ผลรวมของระยะทางมีค่าสั้นที่สุดแล้วนั้น จะเริ่มจากหาโนดแรกเป็นโนดตั้งต้นก่อนซึ่งเป็นโนดใดก็ได้ ในตัวอย่างนี้กำหนดให้เป็นโนดที่ 1 จากนั้นจะตรวจสอบว่าเส้นทางเชื่อมต่อใดเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด นั่นคือ เส้นทางจาก $(1, 3)$ จากนั้นจะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโนดที่ 1 หรือ โนดที่ 3 ไปยังโนดที่เหลือ คือ โนดที่ 2 พบว่าเส้นทางที่สั้นที่สุด คือ จากโนดที่ 3 ไปยังโนดที่ 2 มีระยะทางสั้นกว่าโนดที่ 1 ไปโนดที่ 2 ดังนั้นสุดท้ายแล้วจะได้เส้นทาง

เชื่อมต่อของทั้ง 3 โหนด เป็นเส้นทาง (1, 3) และ (3, 2) จะได้ค่าของระยะทางที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่สั้นที่สุดเท่ากับ 11 หน่วย (4 + 7 หน่วย) ถัดไปจะกล่าวถึงหลักการหาเส้นทางด้วยอัลกอริทึม minimum spanning tree



รูปที่ 2.7 เส้นทางเชื่อมต่อที่เกิดรูป

1) เริ่มจากเลือกโหนดตั้งต้นโหนด i ใด ๆ ในเครือข่าย จากนั้นทำการเพิ่มโหนดข้างเคียงที่มีระยะทางใกล้กับโหนด i มากที่สุดเข้ามาในเครือข่าย เรียกว่าโหนด j แล้วสร้างเซตของโหนดที่มีการเชื่อมต่อกัน เรียกว่า $C = \{i, j\}$ และเรียกเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนด (i, j) ว่า minimum spanning tree ส่วนโหนดอื่น ๆ ที่เหลือในเครือข่าย เรียกว่า C' หมายถึง เซตของโหนดที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อ

2) เลือกสมาชิกในเซต C' (แทนด้วยโหนด n) ที่อยู่ใกล้โหนดในเซต C (โหนด i, j) มากที่สุด แล้วทำการเชื่อมต่อโหนดที่มีระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนดในเซต C กับโหนดในเซต C' (โหนด n) แล้วอัปเดตเซต C และเซต C' ดังนั้นในขั้นตอนนี้โหนด n จะมีการเชื่อมต่อกับโหนด i หรือโหนด j แล้ว จะได้เซตของ C ที่มีสมาชิกเป็น $\{i, j, n\}$ และจะลบโหนด n ออกจากเซตของ C'

3) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งไม่เหลือโหนดใน C' อีก นั่นคือ มีการเชื่อมต่อโหนดทุกโหนดครบแล้ว

จากการทำงานของอัลกอริทึม minimum spanning tree นั้น ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้คือเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนดแต่ละโหนดที่สั้นที่สุด ซึ่งเมื่อรวมเส้นทางของทุก ๆ โหนดเข้าด้วยกัน ก็จะได้เป็นระยะทางการเชื่อมต่อในเครือข่ายที่สั้นที่สุด โดยที่ไม่เกิดรูปขึ้น และรับประกันได้ว่า โหนดทุกโหนดในเครือข่ายจะต้องมีการเชื่อมต่อกัน

2.5 แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path-loss model)

เนื่องจากความซับซ้อนของการแพร่กระจายสัญญาณจึงทำให้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายวิธีการสูญเสียในธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองที่ใช้นั้นจะได้จากการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน หรือได้จากการวัดจริง เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอุปกรณ์ภาคส่งนั้นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีความหลากหลาย ซึ่งอาจทำให้สัญญาณถูกลดทอน หรือเกิดการจางหายได้ ดังนั้นในการออกแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐาน ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองในการคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่ภาครับรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายจากหนังสือ Wireless Communications (Goldsmith, A. 2007) มาคำนวณหาค่าความแรงสัญญาณที่โหนดแต่ละโหนดในเครือข่ายรับได้ 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) กล่าวว่า โดยทั่วไปค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 เนื่องจากค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียนี้จะมีความซับซ้อนขึ้นไปตามสภาพแวดล้อม 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) กล่าวว่าค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียนั้นจะหาได้จากแบบจำลองที่ใช้พื้นฐานจากการวัดค่าซึ่งต้องพิจารณาความถี่และความสูงของสายอากาศ เป็นหลัก อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียที่เหมาะสมนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองที่น้อยที่สุด (minimum mean square error : MMSE)

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าของเลขชี้กำลังวิถีการสูญเสียเท่ากับ 4 โดยอ้างอิงมาจากแอปพลิเคชันที่ใช้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายในการตรวจจับการรั่วไหลของก๊าซในเหมืองถ่านหินจากงานวิจัยของ 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 ก็มีการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ได้ โดยที่โนดตรวจรู้สามารถรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้โนดข้างเคียง และทำการส่งข้อมูลต่อให้กับสถานีถ่ายทอด หรือ สถานีฐาน ในการออกแบบเครือข่ายนั้นจะใช้แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายในการคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับ เพื่อเป็นการรับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดทุกโนดในเครือข่าย และยังคำนึงถึงพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ ดังนั้นจึงมีการนำสถานีถ่ายทอดมาช่วยในการรับและส่งต่อข้อมูลไปที่ปลายทาง ซึ่งการทำงานของสถานีถ่ายทอดนั้นเทียบได้กับการทำงานแบบ FFD (full function device) คือ สถานีถ่ายทอดสามารถสื่อสารกับสถานีถ่ายทอดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะสื่อสารของตัวมันได้ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถรับข้อมูลจาก end device ซึ่งก็คือ โนดตรวจรู้ได้อีกด้วย โดยสถานีถ่ายทอดจะทำหน้าที่เป็นโนดระหว่างทาง (intermediate device) ในการส่งต่อข้อมูลจากโนดตรวจรู้โดยใช้การสื่อสารแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (multihop path)

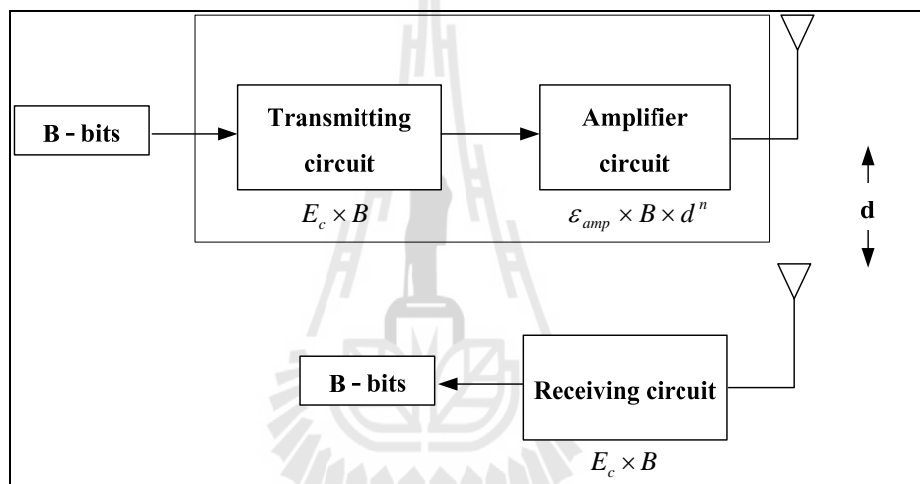
2.6 แบบจำลองการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ (Energy consumption model)

พลังงานเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อให้การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานยิ่งขึ้น 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) แต่ที่พบเห็นกันโดยทั่วไปนั้นส่วนใหญ่โนดตรวจรู้จะใช้

พลังงานจากสารที่มีลิเทียมเป็นส่วนประกอบ เช่น ถ่านอัลคาไลน์ AA หรือ Li-AA อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความก้าวหน้าในปัจจุบันได้มีการใช้แหล่งจ่ายพลังงานของโนคตรวจู้จากเซลล์สุริยะ, เทอร์โมเจเนอเรเตอร์ (thermogenerator) หรือ พลังงานจากการสั่นสะเทือน (vibration energy) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบจำลองในการคำนวณพลังงานจากงานวิจัยของ Heintzman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan (2000) ซึ่งเป็นแบบจำลองสัญญาณวิทยุลำดับที่หนึ่ง (first order radio model) ซึ่งการใช้พลังงานของโนคตรวจู้ไร้สายนั้น จะประกอบไปด้วยพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล และพลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลของโนคตรวจู้

2.6.1 พลังงานที่ใช้ในภาคส่ง (Energy consumption for transmitting)

จากรูปที่ 2.8 ในส่วนของวงจรภาคส่งเมื่อได้รับแพ็คเกจข้อมูลจำนวน B บิตเข้ามาแล้ว วงจรภาคส่งจะต้องใช้พลังงานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (transmitting circuit) เท่ากับ E_c คือพลังงานต่อบิตที่ใช้ในการทำงานของวงจรภาคส่ง (เช่นเดียวกับกับวงจรภาครับ) ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 nJ/bit ถัดมาเป็นพลังงานในวงจรภาคขยาย (amplifier circuit) ใช้พารามิเตอร์ ϵ_{amp} คือ ค่าคงที่ในส่วนของภาคขยาย กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 nJ/bit/m^n จะเห็นได้ว่าในส่วนของวงจรภาคขยายนี้ การใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างภาคส่ง และภาครับ ดังนั้นถ้าระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับอยู่ไกลมาก วงจรก็จะต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลมากขึ้นตามไปด้วย และเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสียจากระยะทางแทนด้วยสัญลักษณ์ n ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 6 ซึ่งมีค่า

เป็นไปตามลักษณะสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ภายในอาคารที่มีกำแพงมาก จะใช้ค่าเท่ากับ 4 หรือถ้าพิจารณาว่าไม่มีสิ่งกีดขวาง ก็จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 เป็นต้น ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล แสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

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

2.6.2 พลังงานที่ใช้ในภาครับ (Energy consumption for receiving)

เนื่องจากในส่วนของภาครับนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลอย่างเดียว ดังนั้นจึงมีการคิดพลังงานเพียงค่าเดียว 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) ซึ่งมีการส่งข้อมูลเป็นรอบ โดยในแต่ละแพ็คเกจนั้นจะมีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 200 บิต และใช้ค่าพารามิเตอร์ของพลังงานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ $E_c = 50 \text{ nJ/bit}$ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรภาคขยาย $\varepsilon_{amp} = 0.1 \text{ nJ/bit/m}^2$ จะเห็นว่างานวิจัยนี้ใช้ค่าของเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสียเท่ากับ 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 และค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ไว้สลายให้มีค่าที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยค่าของเลขชี้กำลังวิธีการสูญเสียนั้นได้กำหนดให้มีค่ามากขึ้น เนื่องจากโนดตรวจรู้มีระยะทางห่างกันมาก อีกทั้งได้พิจารณาแอปพลิเคชันที่จะนำไปใช้งาน และแบบจำลองวิธีการสูญเสียเพิ่มขึ้นด้วย เพื่อเป็นการรับประกันการรับและ ส่งข้อมูลระหว่าง โหนดแต่ละชนิดในเครือข่าย เพื่อให้เกิดความถูกต้องและเหมาะสมในทางปฏิบัติมากขึ้น

2.6.3 การคำนวณค่าพลังงานตั้งต้นของโน้ตตรวจรู้ไร้สาย

เนื่องจากพลังงานของโน้ตตรวจรู้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอายุการใช้งานของเครือข่าย คือ โน้ตตรวจรู้ยิ่งมีพลังงานมากก็จะสามารถดำเนินการได้ในระยะเวลาที่ยาวนานยิ่งขึ้น สำหรับการออกแบบพลังงานตั้งต้นของโน้ตตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาแหล่งจ่ายพลังงานจากถ่านอัลคาไลน์เอเนอร์จีเซออร์ AA ที่มีความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน ที่มีความจุของปริมาณประจุ (capacity) ในถ่านเท่ากับ 2850 mAh (<http://data.energizer.com/PDFs/E91.pdf>) และได้มีการทดลองเพื่อวัดกระแสการทำงานของอุปกรณ์ Zigbee ในขณะที่มีการรับและส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่อง 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 (mAh)
 $t_{Lifetime}$ 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

$$E = (1.5\text{volts} \times 4) \times (100\text{mA}) \times 102,600\text{sec}$$

$$E = (0.6\text{Watts}) \times 102,600\text{sec}$$

$$E = 61,560 \text{ Joules} \quad (2.9)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะกำหนดให้พลังงานตั้งต้นของโนคตรวจรู้ไร้สายมีค่าเท่ากับ 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 ที่ประกอบไปด้วยมาตรฐาน 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) ที่มีการศึกษาการรบกวนกันระหว่างมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.15.4 เมื่อมีการใช้งานภายในบริเวณเดียวกัน โดยมีการวัดเมตริกซ์ของสมรรถนะในเทอมของสัดส่วนของการสูญเสียแพ็คเกจ (packet loss ratio : PLR) นอกจากนี้จากหนังสือ Wireless sensor networks : technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) กล่าวว่าผลกระทบจากลักษณะการเคลื่อนที่ของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ มีผลต่อการสื่อสารข้อมูลเช่นกัน เช่น สิ่งแวดล้อมภายในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นการหาดำแหน่งติดตั้งโนคตรวจรู้เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดจะต้องติดตั้งโนคตรวจรู้ให้ห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอดของความถี่วิทยุ (radio frequency interference : RFI) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ภาควงสัญญาณวิทยุอื่น ๆ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ หรือสายเคเบิล เป็นต้น เนื่องจากโนคตรวจรู้อาจมีการเชื่อมต่อกับภาควงและส่งเหล่านั้นได้ หรือ สิ่งแวดล้อมภายในโรงงานที่มีเหล็ก หรือ โครงสร้างของโลหะอาจจะเป็นสาเหตุของ multipath ได้ ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณแทรกสอดกับสัญญาณที่แท้จริงได้ ทำให้ภาควงไม่สามารถได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง หรือ ไม่สามารถถอดรหัสได้ จะเห็นได้ว่าคุณภาพของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับ

หลายปัจจัย เช่น ตำแหน่งของอุปกรณ์ รูปแบบการแพร่กระจายของสัญญาณ ผลกระทบของ multipath จากวัตถุข้างเคียงที่ส่งผลทำให้พลังงานที่ได้รับมีความแปรปรวน หรือในกรณีที่อุปกรณ์ไม่มีการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมเดียวกันนี้อาจเกิดการจางหายของสัญญาณได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่รอบ ๆ เช่น ถ้าพิจารณาแอฟพลิเคชันที่มีการใช้งานภายในอาคารปัจจัยที่ส่งผลต่อสัญญาณที่ได้รับ ได้แก่ วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น ฝาผนัง พื้น หรือการเคลื่อนที่ผ่านของคน ดังนั้นในการออกแบบเครือข่ายจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้โดยใช้เทคนิคที่จะทำให้ อัตราความผิดพลาดบิต (bit error rate : BER) ข้อมูลอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งจากมาตรฐาน IEEE Std 802.15.4-2006 นั้นกล่าวว่า ผลของอัตราความผิดพลาดบิตนั้นได้มาจากแบบจำลองจากการวิเคราะห์ (analytical model) จากมาตรฐาน IEEE Std 802.15.2-2003 ซึ่งได้มีการแสดงวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 รวมทั้งสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio : SNR) ในหัวข้อที่ 5.3.6 ซึ่งในมาตรฐาน IEEE Std 802.15.4-2006 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความผิดพลาดบิต กับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของมาตรฐานต่าง 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 2.9

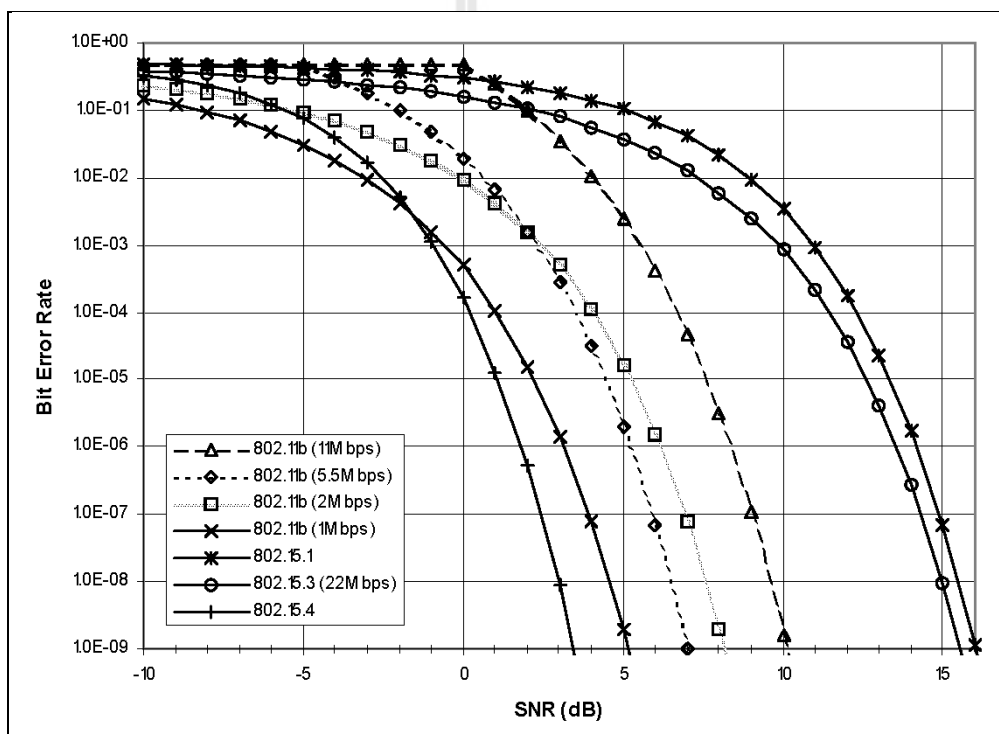
จากหนังสือ Wireless sensor networks: technology, protocols, and application (Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. 2007) กล่าวว่า ระดับความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ยอมรับได้สำหรับการสื่อสารข้อมูล (data communication) จะมีค่าเท่ากับ 10^{-6} ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากรูปที่ 2.9 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 โนดตรวจรู้กับ สถานีฐาน จากหนังสือ Telemetry principles (Patranabis D. 1999) 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 แบนด์วิดท์ที่ถูกรับ จากมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 5 MHz
 T คือ อุณหภูมิห้อง หน่วยเคลวิน (K)
 เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการที่ (2.10) จะได้

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



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิต กับ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

แปลงหน่วยวัตต์ ($Watt$) ให้กลายเป็น dBW ดังนี้

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

แปลงหน่วย dBW ให้กลายเป็น dBm โดย

$$X_{dBm} = X_{dBW} + 30 \quad (2.13)$$

ดังนั้นจะได้

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

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 และโปรแกรมสำเร็จรูปก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นเดียวกันทั้งในทางธุรกิจและอุตสาหกรรม รูปแบบทั่วไปของการโปรแกรมเชิงเส้นนั้น เป็นรูปแบบที่สามารถปรับใช้ได้กับปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมาย อาจอยู่ในรูปกำไร ค่าใช้จ่าย จำนวนผลผลิตที่มากที่สุด เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปของข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่ ข้อจำกัดทางการตลาด ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เป็นต้น จากหนังสือการโปรแกรมเชิงเส้น (ประกอบ จิรจิตติ 2535) ได้กล่าวถึง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้น ดังนี้

1) ปัญหาทางด้านการผลิต (product mix problem) เป็นการพิจารณาปริมาณสินค้าที่จะทำการผลิต เพื่อให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น เครื่องจักร วัตถุดิบ แรงงาน ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อที่ให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด

2) ปัญหาการขนส่ง (transportation problem) เป็นการพิจารณาหาปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจากแหล่งผลิต ไปยังผู้บริโภค หรือปลายทางเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำที่สุด หรือส่งถึงปลายทางได้เร็วที่สุด

3) ปัญหาการเลือกสื่อโฆษณา (media selection) เป็นการพิจารณาเลือกสื่อ โฆษณาชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ข้อมูลหรือข่าวสารที่ต้องการเผยแพร่ออกสู่เป้าหมายเป็นจำนวนมากที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายในการโฆษณาน้อยที่สุด เป็นต้น

2.8.1 ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น ได้แก่

1) ความเป็นสัดส่วน (proportionality) คือ ปริมาณทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตสินค้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนสินค้าที่ทำการผลิต เช่น ในการผลิตสินค้าชนิดหนึ่ง จะต้องใช้แรงงานในการผลิต 4 ชั่วโมงต่อหน่วย ดังนั้นหากทำการผลิตสินค้าชนิดนี้ 20 ชิ้น ก็จะต้องใช้แรงงานในการผลิตทั้งสิ้น 80 ชั่วโมง

2) การรวมกันได้ (additivity) หมายความว่า ปริมาณรวมของผลกำไรจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำไรของสินค้าแต่ละชนิด เช่น สินค้าชนิดที่หนึ่งมีกำไรเท่ากับ 10 บาทต่อหน่วย สินค้าชนิดที่สองมีกำไรเท่ากับ 15 บาทต่อหน่วย หากขายสินค้าชนิดที่หนึ่งได้เพียงชนิดเดียวจำนวน 10 ชิ้น จะได้กำไร 100 บาท (10×10) เป็นต้น

3) การแบ่งได้ (divisibility) หมายความว่า ค่าของตัวแปรตัดสินใจที่มีอยู่ในปัญหาเมื่อกำหนดออกมาแล้ว จะมีค่าใด ๆ ก็ได้ เช่น อาจเป็นเลขจำนวนเต็ม เศษส่วน หรือทศนิยม ในกรณีที่คำตอบที่ออกมาเป็นเลขไบนารี คือ มีค่าที่เป็นไปได้สองค่า ได้แก่ ศูนย์ กับหนึ่ง ก็จะต้องใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

4) การทราบค่า (deterministic) หมายความว่า เราจะทราบค่าต่าง ๆ ในปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นทุกค่า ยกเว้นค่าของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ในการหาปริมาณการผลิตสินค้า เพื่อให้ได้กำไรสูงสุดนั้น จะต้องทราบว่า สินค้าที่ผลิตแต่ละชนิดมีกำไรต่อหน่วยเท่าไร ใช้ทรัพยากรใดบ้างในการผลิต มีการใช้ทรัพยากรแต่ละชนิดในการผลิตสินค้าต่อหน่วยเท่าไร เป็นต้น

2.8.2 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

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

และ

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0 \tag{2.17}$$

โดยที่

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

c_j คือ ผลตอบแทน (profit) ที่ได้จากการตัดสินใจทำกิจกรรมที่ j ต่อหนึ่งหน่วย เช่น ในกรณีของการผลิตสินค้าจำนวน 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 ว่ามีค่าเท่ากับเท่าไรจึงจะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงที่สุด หรือต่ำที่สุดโดยที่ตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรทั้ง m ข้อจำกัด คือ ใช้ทรัพยากรไม่เกินปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ และต้องมีค่ามากกว่า และไม่เป็นจำนวนลบ (non-negative) สำหรับค่า a_{ij}, b_i, c_j นี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าอยู่แล้ว

2.8.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน

จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ สามส่วน ดังนี้

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุน 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)

2.8.4 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น

1) สมการของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นสมการเชิงเส้น โดยที่ตัวแปรทุกตัวจะต้องมีกำลังเป็น 1 เท่านั้น นอกจากนี้ต้องเขียนอยู่ในรูปแบบของการบวก การลบกันของตัวแปรต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น $3x_1 + 5x_2$ เป็นสมการเชิงเส้น เพราะตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1 และ ตัวแปรทุกตัวมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

2) สมการวัตถุประสงค์ ต้องเป็นการระบุว่าต้องการหาค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด โดยจะต้องแสดงถึงจุดประสงค์ในการตัดสินใจ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้น้อยที่สุด

3) สมการเงื่อนไข ต้องเป็นสมการ หรืออสมการเชิงเส้น ที่อยู่ในรูปน้อยกว่าเท่ากับ (\leq) มากกว่าเท่ากับ (\geq) หรือเท่ากับ ($=$) เท่านั้น โดยที่ค่าของตัวแปรตัดสินใจของทุกเทอมในสมการเงื่อนไข จะต้องมีหน่วยเดียวกัน

4) ข้อจำกัดของสัญลักษณ์ (sign restrictions) ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นบวกจะกำหนดข้อจำกัดของสัญลักษณ์ได้ เช่น $x_1 \geq 0$ แต่หากว่า ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นได้ทั้งค่าบวก และค่าลบ หรือมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกว่า unrestricted in sign (urs)

2.8.5 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา

ในการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จะไม่สามารถกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ตายตัวได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหานั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างไรก็ตาม สามารถสรุปเป็นขั้นตอนทั่วไป ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การให้นิยามตัวแปรตัดสินใจ (x) ในแต่ละปัญหานั้นจะมีการนิยามตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของปัญหาต่าง ๆ เช่น ในการพิจารณาว่าจะเลือกปลูกผักชนิดใดบ้าง จำนวนกี่หน่วย อาจให้ x_i เป็นตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึง จำนวนหน่วยของผักชนิดที่ i ที่จะปลูก ในการพิจารณาว่าต้องใช้เหล็กชนิดใดบ้าง เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ อาจให้ x_i แทนค่าตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึงการเลือกใช้เหล็กชนิดที่ i ที่จะใช้ในการสร้าง

ขึ้นงานตามต้องการ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรตัดสินใจจะเป็นตัวแปรที่มีมิติเดียว แต่บางครั้งในการออกแบบปัญหานั้นอาจใช้ตัวแปรตัดสินใจที่มากกว่าหนึ่งมิติ เช่น x_{ij} หมายถึง เหล็กชนิด i ที่จะเลือกใช้ในปีที่ j เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 : การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (z) หลังจากที่ได้กำหนดนิยามตัวแปรตัดสินใจแล้ว จะต้องทำการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจตามที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทั้งระบุให้ชัดเจนว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องการหาค่าที่สูงที่สุด หรือค่าที่ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 : การกำหนดเงื่อนไข หรือข้อจำกัดของปัญหา คือการเขียนข้อจำกัดของปัญหาให้อยู่ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับทรัพยากรที่มีอยู่ หรือ ข้อจำกัดของสิ่งที่พิจารณา เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 : การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้น หลังจากที่ได้ออกแบบส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัด ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 5 : การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อได้ทำการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ก็จะต้องทำการตรวจสอบแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้นั้น ถูกต้องแล้วหรือไม่

โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองของการโปรแกรมเชิงเส้นมีหลายชนิด ซึ่งจะจำแนกได้ตามค่าของตัวแปรตัดสินใจของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นชนิดนั้น ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นชนิดต่าง ๆ

ชนิดของการโปรแกรมเชิงเส้น	ตัวแปรตัดสินใจ	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	เงื่อนไข
การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming)	ตัวแปรที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก หรือเป็นตัวแปรที่ไม่มีกำหนดสัญลักษณ์ (urs)	สมการเชิงเส้น เลขชี้กำลังของตัวแปรมีค่าเป็น 1	เป็นสมการเชิงเส้น หรือ อสมการเชิงเส้น
การโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม (Integer programming)	ตัวแปรทุกตัวต้องเป็นจำนวนเต็มบวก	สมการเชิงเส้น เลขชี้กำลังของตัวแปรมีค่าเป็น 1	เป็นสมการเชิงเส้น หรือ อสมการเชิงเส้น
การโปรแกรมเลขจำนวนเต็มผสม (Mixed integer programming)	ตัวแปรเป็นจำนวนเต็มบวก หรือเป็นจำนวนทศนิยม (เศษส่วน) ก็ได้	สมการเชิงเส้น เลขชี้กำลังของตัวแปรมีค่าเป็น 1	เป็นสมการเชิงเส้น หรือ อสมการเชิงเส้น
การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary integer programming)	ตัวแปรมีค่าเป็นได้สองค่าคือ 0 หรือ 1	สมการเชิงเส้น เลขชี้กำลังของตัวแปรมีค่าเป็น 1 สัมประสิทธิ์มีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก	เป็นสมการเชิงเส้น หรือ อสมการเชิงเส้น
การโปรแกรมจำนวนเต็มแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear integer programming)	ตัวแปรทุกตัวหรือบางตัวเป็นจำนวนเต็ม	สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น	ทางด้านซ้ายมือจะเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี เนื่องจากคำตอบในงานวิจัยนี้เป็นเส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างโหนดชนิดต่าง ๆ ในเครือข่าย และคำตอบจะบอกจำนวนและตำแหน่งที่เลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย ซึ่งคำตอบของตัวแปรตัดสินใจในที่ได้จะมีค่าได้สองค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น

2.9 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์

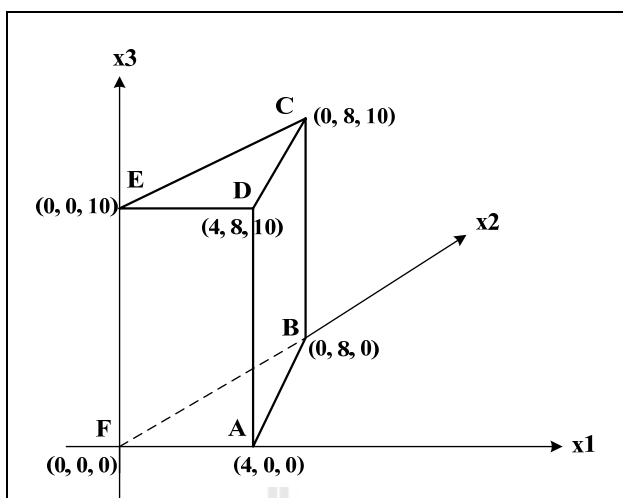
วิธีซิมเพล็กซ์เป็นวิธีพีชคณิต จากหนังสือการวิจัยดำเนินงาน (รองศาสตราจารย์สุทธิมา ชำนาญเวช 2009) กล่าวว่า เป็นวิธีที่ประกอบขึ้นด้วยการคำนวณเมตริกซ์ (matrix) โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหา และบรรลุผลตามเป้าหมายโดยเร็วที่สุด ดังนั้นอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์จะเป็นวิธีการคำนวณที่มีลักษณะแบบทำซ้ำขั้นตอน คือ จะคำนวณซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยตัวอย่างต่อไปนี้จะเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นของรูปทรงเรขาคณิต จากหนังสือ Operation research : applications and algorithm (Winston W. L. 1993) ซึ่งจะแสดงให้เห็นขั้นตอนการทำงานของอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์ ดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง การโปรแกรมเชิงเส้นของรูปทรงเรขาคณิต

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } x_1 + 2x_2 + 2x_3 \\
 & \text{subject to } 2x_1 + x_2 \leq 8 \\
 & \quad \quad \quad x_3 \leq 10 \\
 & \quad \quad \quad x_1, x_2, x_3 \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

จากตัวอย่างนี้เซตของจุดจะรองรับสมการเชิงเส้นแบบสามมิติ โดยมีบริเวณที่เป็นไปได้ (feasible region) จะได้จากการอินเตอร์เซก (intersection) ของบริเวณที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5 บริเวณ ซึ่งหาได้จากสมการ ได้แก่ $2x_1 + x_2 \leq 8$, $x_3 \leq 10$, $x_1 \geq 0$, $x_2 \geq 0$, และ $x_3 \geq 0$ ซึ่งบริเวณที่ได้นี้ทำให้เกิดรูปทรงหลายเหลี่ยมขึ้น (polyhedron) ดังแสดงดังรูปที่ 2.10

ในแต่ละด้าน (face, facet) ของบริเวณที่เป็นไปได้นี้ จะแสดงถึงแต่ละเงื่อนไข หรือ ข้อบังคับของเครื่องหมาย (sign restriction) ที่สัมพันธ์กับทุก ๆ จุดบนด้าน ได้แก่ เงื่อนไข $2x_1 + x_2 \leq 8$ จะสัมพันธ์กับจุด ABCD; เงื่อนไข $x_3 \geq 0$ จะสัมพันธ์กับจุด ABF; เงื่อนไข $x_3 \leq 10$ จะสัมพันธ์กับจุด DEC; เงื่อนไข $x_2 \geq 0$ จะสัมพันธ์กับจุด ADEF; และ เงื่อนไข $x_1 \geq 0$ จะสัมพันธ์กับจุด CBEF



รูปที่ 2.10 บริเวณที่เป็นไปได้ของรูปทรงเรขาคณิต

ซึ่งจุดยอดมุม (corner, extreme) ของรูปจะแสดงบริเวณที่เป็นไปได้ทั้งหมด ได้แก่ A, B, C, D, E, และ F ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับ basic feasible solution : bsf แสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจะได้อธิบายเพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นต่อไป นอกจากนี้ยังมี bfs ข้างเคียง (adjacent basic feasible solutions) ซึ่งก็จะอยู่ที่จุดมุมเช่นกัน ได้แก่ A, E, และ B นั้นจะเป็น bfs ข้างเคียงของจุด F ดังนั้นถ้าอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์มีการเริ่มต้นจากจุด F แล้ว สามารถรับประกันได้ว่า bfs ถัดไปที่จะพิจารณา ก็จะเป็นจุดใดจุดหนึ่งในสามจุดนี้ คือ จุด A, E, และ B

ตารางที่ 2.3 basic feasible solution ที่สัมพันธ์กับจุดยอดมุม

Basic variables (BV)	Basic Feasible Solution (bfs)	ความสัมพันธ์กับจุดยอด
x_1, x_3	$x_1 = 4, x_3 = 10, x_2 = s_1 = s_2 = 0$	D
s_1, s_2	$s_1 = 8, s_2 = 10, x_1 = x_2 = x_3 = 0$	F
s_1, x_3	$s_1 = 8, x_3 = 10, x_1 = x_2 = s_2 = 0$	E
x_2, x_3	$x_2 = 8, x_3 = 10, x_1 = s_1 = s_2 = 0$	C
x_2, s_2	$x_2 = 8, s_2 = 10, x_1 = x_3 = s_1 = 0$	B
x_1, s_2	$x_1 = 4, s_2 = 10, x_2 = x_3 = s_1 = 0$	A

ถัดมาจะอธิบายถึงขั้นตอนของอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ในการแก้ปัญหาโจทย์ของการโปรแกรมเชิงเส้นในปัญหาการหาค่าที่สูงที่สุด (maximization) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แปลงการโปรแกรมเชิงเส้นให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน (standard form)

โดยทำการแปลงเงื่อนไขเป็นสมการ และตัวแปรทุกตัวจะต้องเป็นจำนวนที่ไม่มีค่าติดลบ (non-negative) ซึ่งในตัวอย่างนี้เนื่องจากสมการเงื่อนไขนั้นจะเป็นเครื่องหมายน้อยกว่าหรือเท่ากับ (\leq) จะใส่ตัวแปร slack (slack variable : s_i) เข้าไปในสมการเงื่อนไข ซึ่งจะแสดงถึงปริมาณของทรัพยากรที่ไม่ได้ใช้ในเงื่อนไขที่ i นอกจากนี้แล้วยังต้องเพิ่มข้อบังคับของเครื่องหมาย คือ $s_i \geq 0$ ด้วย ดังนั้นจากตัวอย่างจะได้รูปแบบมาตรฐาน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & x_1 + 2x_2 + 2x_3 \\ \text{subject to } & 2x_1 + x_2 + s_1 = 8 \\ & x_3 + s_2 = 10 \\ & x_1, x_2, x_3, s_1, s_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) จะทำการแปลงสมการให้อยู่ในรูปแบบของ row 0 เพื่อใส่เงื่อนไขที่อยู่ในรูปแบบมาตรฐานแล้วลงไป ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 เป็น canonical form 0 ซึ่งแต่ละสมการนั้นจะมีตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็น 1 และมีค่าเป็น 0 ในแถวอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 2 หา basic feasible solution (bfs) จากสมการในรูปแบบมาตรฐาน

จะเริ่มต้นจากการหา bfs ตั้งต้น (initial basic feasible solution) จาก canonical form 0 ซึ่งจากสมการที่ (2.19) นั้นจะเห็นได้ว่ามีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ค่า ได้แก่ x_1, x_2, x_3, s_1, s_2 ให้มีค่าเท่ากับ n และมีจำนวนสมการเงื่อนไข 2 สมการ ให้มีค่าเท่ากับ m ดังนั้นในการหาค่า BV (basic variables) นั้นจะทำการเลือกตัวแปรเท่ากับ $n-m$ ค่า ให้เป็นตัวแปรแบบ NBV (non basic variables) ดังนั้นจะได้ว่าในตัวอย่างนี้จะมี $NBV = n-m = 5-2 = 3$ ค่า และจะมี $BV = n-(n-m) = 5-(5-2) = 2$ ค่า ซึ่งในกรณีของตัวอย่างนี้ จาก canonical form 0 นั้นจะเห็นว่าถ้ากำหนดให้ $x_1, x_2, x_3 = 0$ เราก็จะสามารถหาค่าของ s_1, s_2 ได้ โดยกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่ทางขวามือ (right-hand side : rhs) ของแถวที่ i ดังนั้นสรุปว่า

$$BV = \{s_1, s_2\} \text{ และ } NBV = \{x_1, x_2, x_3\}$$

และจะได้ค่า 1 basic feasible solutions สำหรับเซตของ basic variable คือ $s_1 = 8, s_2 = 10, x_1 = x_2 = x_3 = 0$ จะสังเกตว่าค่าของ basic variable นั้นจะมีความสัมพันธ์กับแถวของ canonical form คือค่า basic variable จะมีสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ 1 ในแถวนั้น ๆ และสำหรับแถวที่ 0 นั้นจะเห็น

ว่าค่าที่ปรากฏในแถวที่ 0 ที่มีสัมประสิทธิ์เป็น 1 คือ z และ z จะไม่ปรากฏในแถวอื่น ๆ ดังนั้นจะใช้ z เป็น basic variable ด้วย ดังนั้นจะได้ basic feasible solution สำหรับ canonical form 0 ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งค่าของตัวแปรจะแยกได้ ดังนี้

$$BV = \{z, s_1, s_2\} \text{ และ } NBV = \{x_1, x_2, x_3\}$$

ตารางที่ 2.4 Canonical form 0

แถว	สมการ	Basic variable (BV)
แถวที่ 0	$z - x_1 - 2x_2 - 2x_3 = 0$	$z = 0$
แถวที่ 1	$2x_1 + x_2 + s_1 = 8$	$s_1 = 8$
แถวที่ 2	$x_3 + s_2 = 10$	$s_2 = 10$

จากตัวอย่างนี้ให้สังเกตว่าตัวแปร slack นั้นสามารถใช้เป็นค่า basic variable ได้ด้วย ในกรณีที่กำลังที่ทางขวามือของเงื่อนไขเป็นค่าที่ไม่ติดลบ

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบว่าค่า basic feasible solution ในปัจจุบัน ให้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดแล้วหรือไม่ (ในกรณีนี้พิจารณาว่าให้ค่าวัตถุประสงค์ที่มากที่สุด)

หลังจากที่ได้ค่าของ basic feasible solution มาแล้วนั้นจะต้องทำการตรวจสอบค่าที่ดีที่สุดแล้วหรือไม่ ถ้ายังไม่ดีที่สุดจะต้องทำการหา bfs ข้างเคียงของ bfs ดั้งเดิมที่ทำให้ได้ค่า z ที่เพิ่มขึ้น โดยวิธีที่จะเพิ่มค่า z ได้ คือ เพิ่มค่าของ nonbasic variable จากค่าปัจจุบันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 ในขณะที่ยังต้องทำให้ nonbasic variables ตัวอื่น ๆ มีค่าเป็น 0 เช่นเดิม ซึ่งในการเลือกตัวแปรที่จะมาเป็น nonbasic variable นั้นจะพิจารณาจาก canonical form 0 โดยดูจากสัมประสิทธิ์ในแถวที่ 0 ที่มีค่าติดลบมากที่สุด ซึ่งจากการพิจารณาจะพบว่าตัวแปรที่มีค่าติดลบมากที่สุดมี 2 ค่า ได้แก่ x_2, x_3 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์เท่ากับ 2 ทั้งสองค่า คือหากเพิ่มค่าตัวแปรทั้งสองขึ้นแล้วจะทำให้ค่า z เพิ่มขึ้น 2 เท่า ดังนั้นจะสามารถเลือกตัวแปรตัวใดก็ได้ ในตัวอย่างนี้จะขอเลือกตัวแปร x_3 ซึ่งการเพิ่มค่าของตัวแปร x_3 ขึ้นจากค่า 0 นั้น จะทำให้ตัวแปรนี้เปลี่ยนจาก nonbasic variable มาเป็น basic variable ซึ่งจะเรียก x_3 ว่าเป็น entering variable

ขั้นตอนที่ 4 ถ้า basic feasible solution ที่มีค่าปัจจุบันเป็นค่าที่ดีที่สุดแล้ว ตรวจสอบว่าตัวแปรใดที่จะเปลี่ยนค่าจาก nonbasic variable ให้กลายเป็น basic variable เพื่อหา basic feasible solution ค่าใหม่ที่ให้ได้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีขึ้น

ในแถวที่ 1 ดังนั้นเราจึงต้องทำให้ x_3 กลายเป็น basic variable ในแถวที่ 1 โดยที่แถวที่ 2 นั้นเป็น winner of the ratio test ดังนั้นเราจะต้องทำให้ x_3 เป็น basic variable ในแถวที่เป็น winner of the ratio test เสมอ นั่นคือ จะต้องทำให้สัมประสิทธิ์ของ x_3 มีค่าเป็น 1 ในแถวที่ 2 และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_3 มีค่าเป็น 0 ในแถวอื่น ๆ ทุกแถว จะเรียกวิธีการนี้ว่า pivoting ในแถวที่ 2 และเรียกแถวที่ 2 ว่า pivoting row เราจะทำให้ x_3 กลายเป็น basic variable โดยการทำ ero's ดังนี้

ero 1 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_3 ในแถวที่ 2 มีค่าเป็น 1 เนื่องจากในกรณีตัวอย่างนี้สัมประสิทธิ์ของ x_3 มีค่าเป็น 1 แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องดำเนินการ จะได้

$$x_3 + s_2 = 10 \quad (\text{แถวที่ } 2')$$

ero 2 ทำให้สัมประสิทธิ์ของ x_3 มีค่าเป็น 0 ในแถวที่ 0 โดยนำ 2(แถวที่ 2') + (แถวที่ 0) จะได้

2(แถวที่ 2') :

$$2x_3 + 2s_2 = 20$$

(แถวที่ 0) :

$$z - x_1 - 2x_2 - 2x_3 = 0$$

$$z - x_1 - 2x_2 + 2s_2 = 20 \quad (\text{แถวที่ } 0')$$

เนื่องจากว่า x_3 ไม่ปรากฏในแถวที่ 1 ดังนั้นเราจึงไม่ต้องแสดง ero เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าของ x_3 ในแถวที่ 1 ดังนั้นจะได้

$$2x_1 + x_2 + s_1 = 8 \quad (\text{แถวที่ } 1')$$


ทำการรวม แถวที่ 0' ถึง แถวที่ 2' เข้าด้วยกัน จะได้ canonical form 1 ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะได้

$$BV = \{z, s_1, x_3\} \text{ และ } NBV = \{x_1, x_2, s_2\}$$

ตารางที่ 2.5 Canonical form 1

แถว	สมการ	Basic variable (BV)
แถวที่ 0'	$z - x_1 - 2x_2 + 2s_2 = 20$	$z = 20$
แถวที่ 1'	$2x_1 + x_2 + s_1 = 8$	$s_1 = 8$
แถวที่ 2'	$x_3 + s_2 = 10$	$x_3 = 10$

จากตารางที่ 2.5 จะได้ canonical form 1 ซึ่งทำให้ได้ค่า basic feasible solutions ดังนี้



ซึ่งจากตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าค่า z จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 20 ซึ่งมาจากค่าแต่ละหน่วยของ x_3 ที่เพิ่มขึ้น 10 หน่วย (จาก $x_3 = 0$ ถึง 10) ที่สามารถเพิ่มค่า z ขึ้นทีละ 2 เท่า ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า } z \text{ จาก Canonical form 1} &= \text{ค่า } z \text{ ตั้งต้น} + 2(10) \\ &= 0 + 20 = 20 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าจาก canonical form 1 นี้ จะทำให้ได้ค่า z ที่มากขึ้น โดยเลื่อนไปยังตำแหน่ง basic feasible solution ข้างเคียง เมื่อสังเกตจากรูปที่ 2.5 ขณะนี้คำตอบได้เลื่อนจากตำแหน่ง F มายังตำแหน่ง E ซึ่งเป็นจุดมุมที่อยู่ข้างเคียง ถัดไปเราจะทำการเลื่อนพิจารณาไปยังตำแหน่งข้างเคียงกับจุด E ซึ่งได้แก่ จุด C, D ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าเพิ่มขึ้น

จะเห็นได้ว่าการเริ่มจาก canonical form ในแต่ละครั้งเพื่อหาคำตอบถัดไปนั้น จะต้องมีการดำเนินการไปยังตำแหน่งข้างเคียงที่ดีขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการพิจารณาจาก basic feasible solution ที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ไปยัง basic feasible solution ข้างเคียงที่ดีขึ้นนั้น จะเรียกว่า การทำซ้ำ (iteration หรือ pivot) ของอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งในรายละเอียดถัดไปจะเป็นการทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 ดังนี้

ตรวจสอบว่าค่า basic feasible solution ในปัจจุบันให้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดแล้วหรือไม่ โดยเริ่มจากตรวจสอบค่า nonbasic variable ในตารางที่ 2.5 (canonical form 1) เพื่อตรวจสอบว่าสามารถเพิ่มค่า z ได้อีกหรือไม่ โดยดูว่ายังมีตัวแปร nonbasic variable ตัวใดที่มีค่าเป็นลบอยู่จากแถวที่ 0 จะเห็นว่า nonbasic variable x_2 นั้นยังมีค่าติดลบมากที่สุด ดังนั้นจะเลือกตัวแปร x_2 ให้กลายเป็นตัวแปร entering variable และหาว่า x_2 สามารถเพิ่มค่าได้มากที่สุดเท่าไร ซึ่งเราสามารถเพิ่มค่า x_2 ได้มากที่สุดโดยที่ไม่ทำให้ basic variable มีค่าติดลบ โดยทำการแก้สมการหาค่าของ basic variable ในเทอมของ x_2 (โดยที่ค่า $x_1, s_2 = 0$) ดังนี้

$$\text{แถวที่ 1'}; s_1 = 8 - x_2 \text{ โดยที่ } s_1 \geq 0 \text{ หรือ } 8 - x_2 \geq 0 \text{ จะได้ } x_2 \leq 8$$

$$\text{แถวที่ 2'}; x_3 = 10 \text{ เนื่องจากไม่มีค่าของ } x_2 \text{ ในแถวที่ 2'}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของ x_2 ที่มากที่สุดที่สามารถมีค่าได้คือ ค่าที่น้อยที่สุด $\{8\} = 8$ หรือทดสอบโดยใช้ ratio

$$\text{แถวที่ 1'}; \frac{8}{1} = 8$$

$$\text{แถวที่ 2'}; \text{ไม่มีค่าสัดส่วนเนื่องจาก } x_2 \text{ มีสัมประสิทธิ์ที่ไม่มีค่าบวก (nonpositive) ในแถวที่}$$

2'

จะเห็นได้ว่าค่า ratio ที่น้อยที่สุดนั้นเกิดในแถวที่ 1' ดังนั้น แถวที่ 1' นี้จะกลายเป็น winner of the ratio test ซึ่งหมายความว่าเราจะต้องทำ ero's ให้สัมประสิทธิ์ของค่า x_2 ในแถวที่ 1 มีค่าเป็น 1 และทำให้สัมประสิทธิ์ของ x_2 ในแถวอื่น ๆ ทุกแถวมีค่าเป็น 0

ero 1 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_2 ในแถวที่ 1 มีค่าเป็น 1 เนื่องจากในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ของ x_2 มีค่าเป็น 1 แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องดำเนินการ จะได้

$$2x_1 + x_2 + s_1 = 8 \quad (\text{แถวที่ } 1'')$$

ero 2 ทำให้สัมประสิทธิ์ของ x_2 มีค่าเป็น 0 ในแถวที่ 0' โดยนำ 2(แถวที่ 1'') + (แถวที่ 0') จะได้

2(แถวที่ 1'') :

$$4x_1 + 2x_2 + 2s_1 = 16$$

(แถวที่ 0')

$$z - x_1 - 2x_2 + 2s_2 = 20$$

$$z + 3x_1 + 2s_1 + 2s_2 = 36 \quad (\text{แถวที่ } 0'')$$

เนื่องจากว่า x_2 ไม่ปรากฏในแถวที่ 2 ดังนั้นเราจึงไม่ต้องแสดง ero เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าของ x_2 ในแถวที่ 2 ดังนั้นจะได้

$$x_3 + s_2 = 10 \quad (\text{แถวที่ } 2'')$$

ทำการรวม แถวที่ 0'' ถึง แถวที่ 2'' เข้าด้วยกัน จะได้ canonical form 2 ดังตารางที่ 2.6 ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะได้

$$BV = \{z, x_3, x_2\} \quad \text{และ} \quad NBV = \{x_1, s_2, s_1\}$$

ตารางที่ 2.6 Canonical form 2

แถว	สมการ	Basic variable (BV)
แถวที่ 0''	$z + 3x_1 + 2s_1 + 2s_2 = 36$	$z = 36$
แถวที่ 1''	$2x_1 + x_2 + s_1 = 8$	$x_2 = 8$
แถวที่ 2''	$x_3 + s_2 = 10$	$x_3 = 10$

จากตารางที่ 2.6 จะได้ canonical form 2 ซึ่งจากตารางจะทำให้ได้ค่า basic feasible solutions ดังนี้ $z=36, x_2=8, x_3=10, s_1=s_2=x_1=0$ ซึ่งจากตารางที่ 2.6 จะเห็นว่าค่า z จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 36 ซึ่งมาจากค่าแต่ละหน่วยของ x_2 ที่เพิ่มขึ้น 8 หน่วย (จาก $x_3=0$ ถึง 8) ที่สามารถเพิ่มค่า z ขึ้นทีละ 2 เท่า ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ค่า } z \text{ จาก Canonical form 2} &= \text{ค่า } z \text{ จาก canonical form 1} + 2(8) \\ &= 20 + 16 = 36\end{aligned}$$

เมื่อจะทำการหา basic feasible solution ค่าใหม่ จากแถวที่ 0'' ของตารางที่ 2.6 พบว่าค่า nonbasic variable ทุกตัวมีค่าเป็นบวกทั้งหมดแล้ว แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถเพิ่มค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่า z) ได้อีก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า nonbasic variable ใด ๆ จะทำให้ z มีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่า basic feasible solution ค่าปัจจุบันที่ได้จาก canonical form 2 นั้น เป็นค่าที่ดีที่สุด หรือคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) แล้ว สรุปคือ ค่า $z=36, x_2=8, x_3=10, s_1=s_2=x_1=0$ แสดงว่าค่าคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้มีค่าเป็น 36 โดยที่ตัวแปรตัดสินใจ $x_1=0, x_2=8$ และ $x_3=10$ นั้นจะเป็นค่าที่ทำให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรตัดสินใจที่ได้มานี้ คือ จุด C (0, 8, 0) ซึ่งเป็นจุดมุมที่สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์

2.10 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

ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นปัญหาที่มีเพียงวัตถุประสงค์เดียวโดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ของวัตถุประสงค์ที่สัมพันธ์กัน วิธีการผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักจะแสดงให้เห็นการแลกเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ที่สนใจ ทำให้ได้มาซึ่งผลเฉลยสำหรับปัญหาการทำให้ดีที่สุด วิธีการที่ใช้แปลงปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวที่มีการศึกษาในงานวิจัยต่างๆ มีหลายวิธี เช่น วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method), วิธีแบ่งลำดับชั้น (Hierarchical method) เป็นต้น

2.10.1 วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยทำให้วัตถุประสงค์ที่สนใจเป็นบรรทัดฐาน (normalization) เดียวกัน คือ ทำให้วัตถุประสงค์นั้น ๆ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน แล้วนำค่าถ่วงน้ำหนักมาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการนี้จะมีรูปแบบทั่วไป จากงานวิจัยของ Grodzevich, Oleksandr, O. and, Oleksandr, R. (2006) แสดงดังสมการที่ (2.20)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^k w_i f_i(\tilde{x}) \\ \text{subject to} \quad & \tilde{x} \in \tilde{S} \end{aligned} \quad (2.20)$$

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 (2.21)

$$0 \leq \frac{f(x) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \leq 1 \quad (2.21)$$

โดยที่ $f(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการพิจารณา
 f_{\min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าที่น้อยที่สุด
 f_{\max} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุด

ในกรณีนี้หลังจากที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สนใจถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้วจะทำให้วัตถุประสงค์มีค่าอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และไม่เกินหนึ่ง จากนั้นจะนำฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ที่ทำการพิจารณาพล็อตกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างวัตถุประสงค์

จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithm (K. Deb 2009) ได้กล่าวถึงข้อดีของวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ โดยสามารถใช้ได้กับปัญหาที่แสดงให้เห็นถึง pareto front แบบ convex ซึ่งวิธีการนี้รับประกันได้ว่าสามารถหาเซตของคำตอบที่ดีที่สุดได้ตลอดทั้ง front สำหรับข้อเสียของวิธีการนี้ คือ หากนำมาใช้กับปัญหาที่มีลักษณะผสม เช่น ปัญหาแบบสองวัตถุประสงค์ที่ วัตถุประสงค์แรกต้องการหาค่าที่มากที่สุด แต่อีกวัตถุประสงค์หนึ่งต้องการหาค่าน้อยที่สุด แล้วจะต้องทำการแปลงให้เป็นวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งเหมือนกัน เป็นต้น

2.10.2 วิธีลำดับชั้น

เป็นวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยให้ผู้ใช้เป็นคนจัดลำดับความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นจะกำหนดให้วัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองลงมาเป็นเงื่อนไข ที่มีค่าตามการกำหนดของผู้ใช้ จึงทำให้เหลือเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียว แสดงได้ดังสมการที่ (2.22) ในกรณีที่พิจารณาว่า f_2 มีความสำคัญมากกว่า f_1 ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} \min \quad & f_2 \\ \text{subject to} \quad & x \in \Omega \end{aligned} \quad (2.22)$$

เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะได้คำตอบที่ดีที่สุดเป็น f_2^* ถัดมาจะทำการแก้ปัญหา ดังแสดงในสมการที่ (2.23)

$$\begin{aligned} \min \quad & f_1 \\ \text{subject to} \quad & x \in \Omega \\ & f_2(x) \leq f_2^* + \varepsilon \end{aligned} \quad (2.23)$$

โดยที่ ε คือ ค่าคงที่ แสดงถึงการเพิ่มค่าขึ้นของวัตถุประสงค์ที่ 2

จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithm (K. Deb 2009) ได้กล่าวว่าข้อดีของวิธีลำดับชั้น คือ การหาคำตอบที่ดีที่สุดบน pareto นั้นสามารถหาได้โดยเปลี่ยนค่า ε ซึ่งสามารถใช้ได้กับทั้งปัญหาแบบ convex และ nonconvex สำหรับส่วนของข้อมูลที่เป็นจากผู้นั้น อัลกอริทึมนี้มีความใกล้เคียงกับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก สำหรับข้อเสียของวิธีลำดับชั้น

นั่นเนื่องจากคำตอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่า ε ของผู้ใช้ ดังนั้นผู้ใช้จะเป็นผู้กำหนดค่าที่น้อยที่สุด หรือมากที่สุด อย่างไรก็ตามการนำวิธีลำดับชั้นมาใช้ในการแก้ปัญหาแบบ nonconvex นั้นค่าคงที่ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นคำตอบที่ดีที่สุดอาจไม่ถูกเลือก หากผู้ใช้ไม่ได้ทำการเลือกค่า ε ในจุดนั้น ดังนั้นการกำหนดค่า ε ของผู้ใช้นั้นจึงอาจทำให้ไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดได้ ทั้ง ๆ ที่ปัญหานั้นสามารถหาคำตอบได้ และในกรณีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าสองวัตถุประสงค์นั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากผู้ใช้ที่มากขึ้นเพื่อกำหนดค่า ε

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการทำให้ดีที่สุดในแบบสองวัตถุประสงค์โดยวัตถุประสงค์แรกคือเพื่อให้โน้ตตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และ วัตถุประสงค์ที่สอง คือเพื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด เนื่องจากงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักแปลงจากสมการสองวัตถุประสงค์ให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาคำตอบที่น้อยที่สุด เปรียบเทียบกับวิธีลำดับชั้น ดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3



บทที่ 3

แนวคิดและวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการ ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากที่ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่า เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับความเป็นไปของสิ่งแวดล้อมที่สนใจ ใช้ในการติดตามเป้าหมาย ระบุตำแหน่ง หรือรวบรวมข้อมูล ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ เช่น ใช้ในการติดตามเป้าหมาย การประเมินความเสี่ยงจากการสู้รบ ทางด้านสิ่งแวดล้อม ใช้ในการติดตามสภาพภูมิอากาศ การตรวจสอบภัยธรรมชาติต่าง ๆ เช่น ไฟป่า น้ำท่วม หรือใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตของพืชผลทางการเกษตร ทางด้านสุขภาพอนามัย เช่น ใช้ในการตรวจวัดความดันโลหิตของผู้ป่วย หรือผู้สูงอายุ เป็นต้น สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับแนวคิดและวิธีการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเพื่อการ ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย 3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น วัตถุประสงค์เดียว 3.3 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์ในขั้นตอนที่หนึ่ง 3.4 การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่สอง 3.5 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว 3.6 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สองวัตถุประสงค์ 3.7 การพัฒนาอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่สอง และ 3.8 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไปนารี

3.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นั้น จะเห็นได้ว่าเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการดำเนินชีวิตประจำวัน เช่น การตรวจจับความเป็นไปของสิ่งแวดล้อมทางการเกษตร ทางด้านสุขภาพอนามัยของผู้ป่วยในโรงพยาบาล หรือ ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิและการใช้พลังงานภายในที่อยู่อาศัยเพื่อปรับอุณหภูมิ และให้พลังงานเป็นไปตามที่ผู้ใช้ต้องการ เป็นต้น สำหรับโครงสร้างของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยทั่วไปนั้นจะประกอบไปด้วย โหนดตรวจรู้ และสถานีฐาน โดยโหนดตรวจรู้มีหน้าที่ตรวจจับข้อมูลภายในพื้นที่ที่สนใจ ส่วนสถานีฐานจะมีหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้รับจากโหนดตรวจรู้ และประมวลผล โดยจะเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลต่อไป ข้อดีของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

นั้นมีมากมาย อาทิเช่น ง่ายต่อการติดตั้ง ไม่ต้องใช้สายสัญญาณ อุปกรณ์มีขนาดเล็กสามารถทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ธรรมดา อย่างไรก็ตามการที่จะออกแบบให้เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายสามารถใช้งานได้จริงนั้น ยังต้องคำนึงถึงข้อจำกัดที่สำคัญของเครือข่ายประเภทนี้ นั่นคือข้อจำกัดในความเร็วของหน่วยประมวลผล ความจุของหน่วยเก็บข้อมูล และ ข้อจำกัดของแหล่งจ่ายพลังงาน การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ไร้สายนั้น จะเกิดจากการใช้พลังงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการส่งข้อมูล และรับข้อมูล โดยในส่วนของภาคส่งนั้น พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะแปรผันตามจำนวนบิตข้อมูล และระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ ส่วนในวงจรของภาครับนั้นการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้จะแปรผันตามจำนวนบิตข้อมูลที่รับจากภาคส่ง จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้จะขึ้นอยู่กับระยะทาง และจำนวนบิตข้อมูลนั่นเอง ในหลายงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Pandey, S., Dong, S., Agrawal, P. and Sivalingam, K. (2009) และงานวิจัยของ Bari, A., Tang, D. and Jaekel, A. (2009) ได้พยายามหาวิธีการลดการสิ้นเปลืองพลังงานของโนดตรวจรู้ โดยการเพิ่มโหนดพิเศษในเครือข่าย ที่เรียกว่า โหนดถ่ายทอด (Relay node) ซึ่งต่อไปในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า สถานีถ่ายทอด (Relay station : RS) ที่มีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ในเครือข่าย แล้วส่งต่อข้อมูลเหล่านั้นไปยังปลายทางต่อไป เพื่อช่วยแบ่งเบาการรับและส่งข้อมูลจำนวนมากที่เกิดขึ้นที่โนดตรวจรู้ และช่วยลดระยะทางในการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานของสถานีถ่ายทอดนั้นจะพิจารณาว่าสถานีถ่ายทอดจะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ (solar cell) และมีแหล่งสำรองพลังงาน (energy storage) ติดตั้งอยู่ที่สถานีถ่ายทอดอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้มีการพิจารณาในส่วนของค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย เพื่อให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอายุการใช้งานของเครือข่ายนั้นขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยการนิยามอายุการใช้งานของโนดตรวจรู้จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Shi, Y., Hou, Y. T. and Efrat, A. (2006) ซึ่งเป็นนิยามที่กล่าวว่า อายุการใช้งานของเครือข่ายนั้นจะเริ่มตั้งแต่เครือข่ายเริ่มมีการรับส่งข้อมูลจนกระทั่งโนดตรวจรู้โนดแรกหมดพลังงานลง และได้กำหนดให้โนดตรวจรู้มีการส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลให้โนดตรวจรู้หมดพลังงานลงอย่างรวดเร็ว และอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ส่วนในงานวิจัยของ Azad, A.P. and Chockalingam, A. (2006) นั้นจะพิจารณาการส่งข้อมูลเป็นรอบเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้ว อาจไม่มีความจำเป็นที่โนดตรวจรู้จะต้องตรวจจับข้อมูลตลอดเวลา และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ ส่วนการออกแบบการส่งข้อมูลในงานวิจัยนี้นั้น จะสมมุติให้โนดตรวจรู้มีการรับและส่งข้อมูลเป็นแพ็คเกจ โดยโนดตรวจรู้จะใช้เวลาในการส่งแพ็คเกจเป็นรอบ เพื่อให้มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากขึ้น และพิจารณาการรับส่ง

ข้อมูลของโนดตรวจรู้ว่า เมื่อโนดตรวจรู้ได้รับแพ็คเกจข้อมูลจากโนดตรวจรู้ก่อนหน้าแล้ว โหนดตรวจรู้โนดนั้นจะมีกระบวนการบีบอัด และจัดเรียงข้อมูลที่ได้รับมาจากโนดก่อนหน้ารวมกับแพ็คเกจที่เกิดจากการตรวจจับข้อมูลของโนดนั้นก่อน แล้วจึงส่งแพ็คเกจข้อมูลนั้นต่อไป นอกจากนี้สิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบเครือข่ายประเภทนี้ คือ ระยะของการรับส่งข้อมูล (transmission range) ของโนด ซึ่งเป็นระยะที่โนดตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปยังโนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน ได้ ในงานวิจัยนี้เน้นถึงการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ดีที่สุดภายในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ และสถานีฐานในเครือข่ายติดตั้งอยู่ก่อนแล้ว เพื่อช่วยให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด และสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียวในขั้นตอนที่ 1

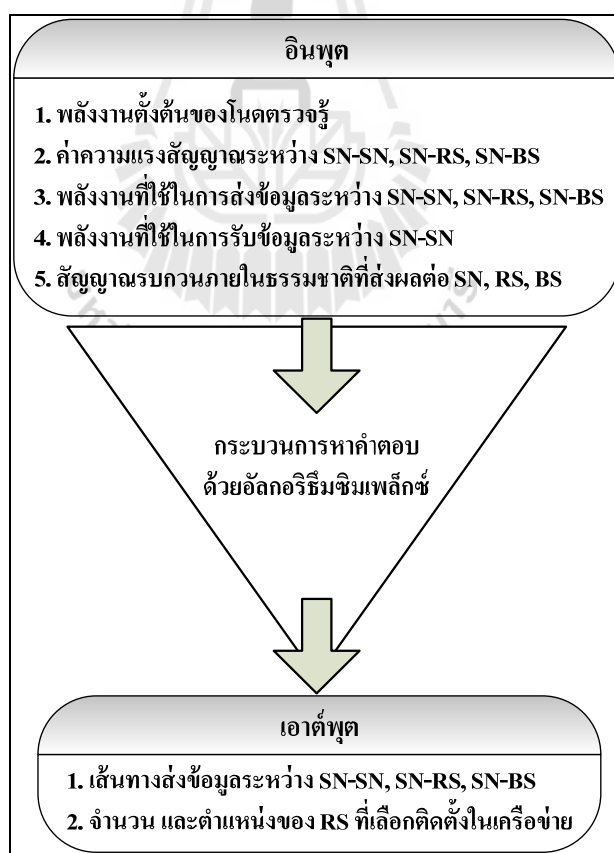
การโปรแกรมเชิงเส้น เป็นเทคนิคที่รู้จักอย่างแพร่หลายและเป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยดำเนินการ (operation research) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนออกแบบเพื่อจัดสรรปัจจัย หรือ ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้บรรลุถึงเป้าหมายที่กำหนดไว้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเป้าหมายจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรตัดสินใจ เรียกว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของการหาค่าที่สูงที่สุด หรือค่าที่ต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น เป้าหมายของการโปรแกรมเชิงเส้นคือ เพื่อแก้ปัญหาและตัดสินใจให้เกิดผลตามแนวทางการดำเนินงานที่ดีที่สุด (optimal) เช่น กำไรสูงสุด ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การโปรแกรมเชิงเส้นนั้นเริ่มมีการคิดค้นในปี ค.ศ. 1947 โดย จอร์จ บี แคนซิก (George B Danzig) และ มาร์แชล วูด (Marshall Wood) ที่ได้ทำการพัฒนาปัญหาให้กลายเป็นความสัมพันธ์ของสมการคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเชิงเส้นตรง ทำให้เกิดวิธีที่เรียกว่า ซิมเพล็กซ์ (simplex) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาทางโปรแกรมเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพมากและใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยมีหลักการของการหาคำตอบด้วยการทำงานแบบซ้ำ ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุด เหตุผลหลักที่จำเป็นต้องใช้การโปรแกรมเชิงเส้นในการออกแบบปัญหาที่สนใจ เนื่องจากในการออกแบบปัญหาที่สนใจนั้น หากปัญหานั้นเป็นปัญหขนาดเล็ที่มีตัวแปรจำนวนไม่มากนัก เราก็สามารถที่จะแก้ปัญหาโดยใช้การคำนวณมือในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ แต่สำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ที่มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง หรือมีจำนวนตัวแปรจำนวนมากนั้น เราก็ไม่สามารถที่จะใช้มือในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบเพื่อจำลองปัญหาหนึ่ง ๆ นั้น ขนาดของปัญหา ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจะมีผลต่อการหาคำตอบของปัญหาอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวช่วยในการพิจารณาปัญหาที่สนใจ โดยกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด อีกทั้งการ

จำลองปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นสามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มความเป็นไปได้ของปัญหาที่สนใจ โดยที่ยังไม่ต้องเทียบประมาณในการลงทุนจริงอีกด้วย จากนั้นเมื่อเราได้เห็นผลลัพธ์ของปัญหาที่ได้ออกแบบไว้แล้วว่าได้ผลดีจริงแล้ว จึงนำแนวทางที่ได้ออกแบบไว้มาสร้างเครือข่ายจริงต่อไป ปัจจุบันนี้การโปรแกรมเชิงเส้นถูกนำไปใช้ในการออกแบบในงานแขนงต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ทางด้านการเกษตร การโปรแกรมเชิงเส้นได้ถูกนำมาช่วยในการตัดสินใจจัดการเพื่อให้เกิดผลผลิตสูงสุด ภายใต้การจัดสรรปัจจัยที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น ที่ดิน น้ำ ปุ๋ย แรงงาน และเงินลงทุน เป็นต้น ทำให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชที่เหมาะสมตามฤดูกาล และความต้องการของตลาด ทางด้านอุตสาหกรรมได้ใช้เทคนิคนี้มาช่วยในการจัดการเกี่ยวกับการผลิต เช่น อุตสาหกรรมถ่านหิน เหล็กกล้า ในวงการธุรกิจ เช่น ธุรกิจการขนส่งก็ใช้เทคนิคนี้ในการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และใช้สำหรับจัดสรรบุคลากร และวัตถุดิบ จะเห็นได้ว่าเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นนี้มีบทบาทในหลาย ๆ ด้าน โดยสามารถนำมาใช้ในปัญหาที่ต้องการหาวิธีที่ดีที่สุดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ในการออกแบบเครือข่ายของงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญคือ สมการวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข โดยสมการวัตถุประสงค์ คือ สมการที่อยู่ในรูปของค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด เป็นสิ่งที่เราต้องการหาคำตอบ เช่น ต้องการทำให้เครือข่ายติดตั้งโนดตรวจรู้มีน้อยที่สุด หรือ ต้องการให้พลังงานที่เหลือของโนดตรวจรู้มีค่ามากที่สุด หรือ ต้องการให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด เป็นต้น ส่วนสมการเงื่อนไขนั้น เป็นสมการที่แสดงข้อจำกัดของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ถ้าเป็นปัญหาที่ต้องการให้ระยะเวลาการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุดนั้น สมการเงื่อนไขจะประกอบไปด้วย การพิจารณาความสมดุลของปริมาณบิตข้อมูลที่ไหลออกจากโนดที่พิจารณา ต้องเท่ากับปริมาณบิตข้อมูลที่ไหลเข้าที่โนดที่พิจารณา และ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปตลอดอายุการใช้งานต้องไม่เกินพลังงานตั้งต้นที่โนดมีอยู่ เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้พิจารณากำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี นั่นคือ ค่าของตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งจะประกอบอยู่ในสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข จะมีค่าเพียงสองค่า คือ 0 หรือ 1 เท่านั้น จะเรียกการโปรแกรมเชิงเส้นลักษณะนี้ว่า การโปรแกรมเชิงเส้นแบบไบนารี (Binary integer linear programming : BILP) โดยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีที่มีวัตถุประสงค์เดียวนี้ จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ต้องการให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ก่อนหน้า และส่งข้อมูลไปที่โนดข้างเคียง ให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน โดยสมการเงื่อนไขที่เป็นข้อจำกัดเพื่อทำให้สมการวัตถุประสงค์เกิดขึ้นนั้น ได้แก่ เงื่อนไขการส่งข้อมูลระหว่างโนดแต่ละโนดในเครือข่าย นั่นคือ โนดตรวจรู้จะต้องส่งข้อมูล

ให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียง และ/หรือ สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐาน โนคใดโนคหนึ่งเพียงโนคเดียวเท่านั้น เงื่อนไขที่รับประกันการเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน นั่นคือความแรงสัญญาณที่รับได้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนด เงื่อนไขที่รับประกันค่าคุณภาพของสัญญาณ นั่นคือ ค่าความแรงสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และโนดตรวจรู้กับสถานีฐานต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่กำหนดเพื่อให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และเงื่อนไขเกี่ยวกับพลังงานที่จำกัดของโนดตรวจรู้ คือ พลังงานรวมทั้งหมดที่โนดตรวจรู้ทุก ๆ โนคใช้ในการกำเนิด แต้เกิดข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูล ตลอดอายุการใช้งานจะต้องไม่เกินค่าพลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้แต่ละ โนค ซึ่งแสดงการทำงานของปัญหาการ โปรแกรมวัตถุประสงค์เดียวในขั้นตอนที่ 1 ได้ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นเมื่อได้กำหนดปัญหาเหล่านี้เป็นภาษาพูดแล้ว ก็จะทำการแปลงคำพูดเหล่านี้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์ ดังที่จะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.5



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการ โปรแกรมวัตถุประสงค์เดียวในขั้นตอนที่ 1

3.3 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์

จากที่ได้ทราบถึงความสำคัญของการโปรแกรมเชิงเส้นมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 นั้น เป็นเพียงการกำหนดปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ตลอดอายุการใช้งานเท่านั้น 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) นั้น ได้พิจารณาวัตถุประสงค์สองวัตถุประสงค์พร้อมกัน คือ ได้พิจารณาให้โนคตรวจรู้อยู่ในโหมดทำงาน (active mode) ให้น้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน โดยกำหนดให้โนคตรวจรู้มีคุณสมบัติที่สามารถปรับระยะเวลาของการตรวจจับข้อมูล (sensing range) ได้ด้วยตัวมันเอง ในขณะเดียวกันก็ต้องการให้มีพื้นที่การครอบคลุมที่มากที่สุดด้วย แต่ยังไม่มียานวิจัยใดเลยที่ทำการออกแบบเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายโดยพิจารณางบประมาณในการลงทุนควบคู่ไปกับพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปเพื่อกำหนดการตรวจจับข้อมูล

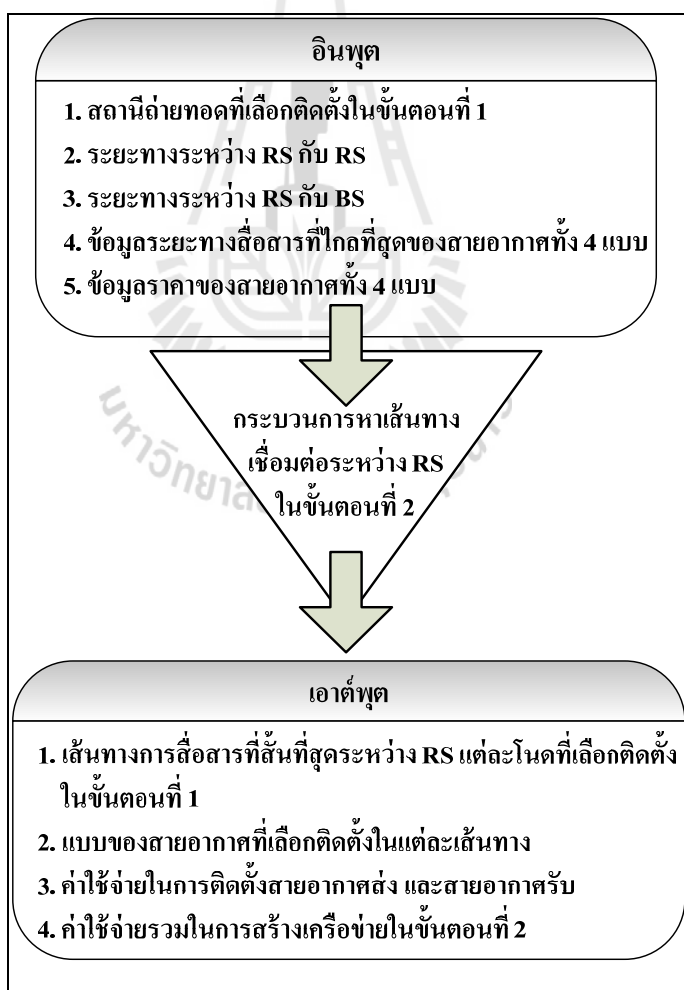
ดังนั้นในการศึกษาการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์ในขั้นตอนที่ 1 นี้ นอกจากผู้วิจัยจะได้ศึกษาวัตถุประสงค์แรกเช่นเดียวกับการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียวแล้ว นั่นคือต้องการทำให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ในการกำเนิดแพ็คเกจข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งานแล้ว อีกวัตถุประสงค์หนึ่งที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาคือ ต้องการทำให้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1 นี้มีค่าน้อยที่สุดด้วย สำหรับแนวทางในการหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นจะใช้วิธีการแปลงฟังก์ชันสองวัตถุประสงค์ให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวด้วยเทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) คือ จะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ทั้งสองวัตถุประสงค์ แล้วนำค่าวัตถุประสงค์ทั้งสองมาทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) เดียวกัน นั่นคือทำให้ค่าของทั้งสองวัตถุประสงค์มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 คูณกับวัตถุประสงค์ทั้งสอง โดยที่ผลรวมค่าของถ่วง

น้ำหนักเมื่อรวมกันแล้วต้องมีค่าเท่ากับ 1 แล้วทำการหาคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อได้ความสัมพันธ์ของค่าวัตถุประสงค์ทั้งสองแล้ว ก็จะทำการพล็อตกราฟซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 นี้ได้แก่ เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน จำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย ซึ่งสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1 นี้ และตำแหน่งของสถานีฐาน ซึ่งถูกกำหนดให้คงที่อยู่แล้วนั้นจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน ต่อไปในขั้นตอนที่ 2 ดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.4

3.4 การกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2

จากการกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว และการโปรแกรมเชิงเส้นสองวัตถุประสงค์ในขั้นตอนที่ 1 นั้น คำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหา นอกจากเส้นทางการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดชนิดอื่นในเครือข่าย ได้แก่ ระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ โนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน ยังจะได้คำตอบเป็นจำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายอีกด้วย สำหรับการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 นี้ จะนำคำตอบของจำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 รวมทั้งตำแหน่งของสถานีฐานที่ได้กำหนดไว้ก่อนแล้วมาเป็นข้อมูลอินพุตเพื่อใช้ในการออกแบบสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดทุกโนดที่เลือกติดตั้ง และพิจารณาการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อจากสถานีถ่ายทอดไปยังสถานีฐานอีกด้วย เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการพิจารณาในส่วนของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศเพื่อใช้ในการสื่อสาร และรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานด้วย ดังนั้นจากที่มีข้อมูลอินพุตเป็นตำแหน่งของสถานีถ่ายทอด และตำแหน่งของสถานีฐานแล้ว จึงต้องหาวิธีการในการเชื่อมต่อโนดทุกโนดในเครือข่ายเข้าด้วยกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโนดในขั้นตอนที่ 2 นี้ด้วยหลักการของ minimum spanning tree โดยใช้ระยะทางระหว่างแต่ละโนดในเครือข่ายเป็นข้อมูลอินพุตเพื่อสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างทุก ๆ โนดเข้าด้วยกัน โดยหลักการนี้เป็นการหาระยะทางรวมที่สั้นที่สุด และไม่ทำให้เกิดลูปในเครือข่าย นั่นคือ ระหว่างโนดสองโนดใด ๆ จะต้องมีเพียงเส้นทางเดียว หลังจากที่ได้เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างทุก ๆ โนดในเครือข่ายแล้ว ต่อมาก็จะพิจารณาเลือกชนิดของสายอากาศที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อใช้ในการสื่อสารในเส้นทางการเชื่อมต่อของแต่ละโนด โดยข้อมูลที่จะใช้ในการเลือกชนิดของสายอากาศส่งคือ ระยะทางการเชื่อมต่อของแต่ละโนด ซึ่งในการเลือกประเภทของสายอากาศส่งที่จะใช้ในการสื่อสารของขั้นตอน

ที่ 2 นี้จะต้องทำการคำนวณหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่สายอากาศจะสามารถทำการสื่อสารได้ โดยในการคำนวณนั้นงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path loss model) เพื่อคำนวณหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่สายอากาศสามารถสื่อสารได้ซึ่งได้กล่าวถึงสมการของแบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายก่อนหน้านี้แล้วในสมการที่ 2.2 ของหัวข้อที่ 2.6 จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการติดตั้งสายอากาศส่ง ณ สถานีถ่ายทอดใด ๆ ที่มีการสร้างเส้นทางสื่อสารระหว่างกัน ซึ่งค่าใช้จ่ายจะขึ้นอยู่กับอัตราขยายของสายอากาศ และประเภทของสายอากาศที่เลือกใช้ในการสื่อสาร นอกจากนี้ยังมีการคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศภาครับ ณ สถานีถ่ายทอดทุกโหนดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย รวมทั้งค่าใช้จ่ายทั้งหมดในเครือข่ายที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ โดยขั้นตอนการทำงานของปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2

สำหรับสายอากาศที่ใช้ในการรับข้อมูลซึ่งจะติดตั้งไว้ที่สถานีถ่ายทอดทุกโหนดที่ถูกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 และติดตั้งไว้ที่สถานีฐานนั้นจะพิจารณาเลือกใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional antenna) เพราะว่าเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติที่มีทิศทางการแพร่กระจายและรับคลื่นได้รอบทิศทาง 360 องศา ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการทำงานที่ต้องการ นั่นคือ ต้องการให้สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาจากโหนดตรวจรู้ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถรับข้อมูลที่มาจากสถานีถ่ายทอดได้ด้วย และสำหรับสายอากาศที่ใช้ในการส่งข้อมูลนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) เพราะเป็นสายอากาศที่มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่ชัดเจน เหมาะกับการติดต่อระหว่างจุดต่อจุด (point-to-point) และสามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่าสายอากาศรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว เนื่องจากจะมีพลังงานในการแพร่กระจายคลื่นที่สูงที่สุดเพียงทิศทางเดียว ดังนั้นคุณสมบัตินี้จึงทำให้สายอากาศชนิดนี้มีสมรรถนะในการส่งและรับข้อมูลมากกว่าสายอากาศชนิดอื่น ๆ อีกทั้งสามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายอื่น ๆ ได้ดีอีกด้วย ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเลือกสายอากาศชนิดที่มีทิศทางเดี่ยวชนิดยาคิ (Yagi antenna) เนื่องจากต้องการให้สถานีถ่ายทอดสามารถสื่อสารกับสถานีถ่ายทอดข้างเคียง และ/หรือ ระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานเท่านั้น

3.5 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว

หัวข้อนี้แสดงการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบ และวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่กำหนดในหัวข้อที่ 3.2 โดยเริ่มจากการกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาเพื่อใช้ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะของการกำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี โดยในขั้นตอนของการกำหนดปัญหาก่อนที่จะทำการพัฒนาเป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นจะต้องรู้จักโครงสร้างทั่วไปของเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย หน้าที่ของโหนดแต่ละชนิดในเครือข่าย ได้แก่ โหนดตรวจรู้ไร้สาย สถานีถ่ายทอด และสถานีฐาน ความแรงสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดแต่ละชนิดในเครือข่าย ลักษณะการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนด การคำนวณค่าพลังงานที่โหนดตรวจรู้ไร้สายใช้ในการติดต่อสื่อสาร และค่าพลังงานที่เหลือ และปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นข้อจำกัดของเครือข่าย เช่น พลังงานตั้งต้นที่จำกัดของโหนดตรวจรู้ เป็นต้น

ในกระบวนการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีนั้น ในกรณีของการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์แบบวัตถุประสงค์เดียวในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือ เพื่อให้โหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน โดยในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าของวัตถุประสงค์ที่ต้องการนั้น ต้องมีเงื่อนไขที่รับประกันได้ว่าโหนดตรวจรู้ทุกโหนดในเครือข่าย

สามารถที่จะสร้างการเชื่อมต่อถึงกันได้ทุกโหนด โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณทางกายภาพที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดแต่ละชนิด มีการพิจารณาถึงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลที่ได้รับที่ปลายทางมีความถูกต้อง และพิจารณาจำนวน และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้สถานีถ่ายทอดมาใช้เป็นโหนดที่ช่วยแบ่งเบาหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลของโหนดตรวจรู้ โดยทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลไปถึงปลายทางเพื่อช่วยให้โหนดตรวจรู้สามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานที่สุด โดยจะมีตำแหน่งสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในการพิจารณาเลือกติดตั้งทุก ๆ ระยะ 50 เมตร ภายในพื้นที่ใช้งาน (sensing field) ของเครือข่าย

การแปลงวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขให้เป็นสมการคณิตศาสตร์จะทำให้การวางแผนเครือข่ายทำได้ง่ายมีประสิทธิภาพ และทำให้ได้เครือข่ายที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือสามารถออกแบบปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ได้มีการใช้ตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีคำนิยามดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

I คือ เซตของโหนดตรวจรู้

J คือ เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้

B คือ เซตของสถานีฐาน

ตัวแปรตัดสินใจ :

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

s_{ik} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังโหนดตรวจรู้ k มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังโหนดตรวจรู้ k และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ i and $k \in I, i \neq k$

r_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีถ่ายทอด j มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีถ่ายทอด j และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ $i \in I, j \in J$

h_{ib} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโหนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น โดยที่ $i \in I, b \in B$

ตัวแปรค่าคงที่ :

- E_t คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการส่งข้อมูลต่อรอบ (joule/round)
- E_r คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับข้อมูลต่อรอบ (joule/round)
- E_i คือ พลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้แต่ละ โหนด (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)

สำหรับการกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี นั่นคือ ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวจะมีค่าเป็นตัวเลขได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยจะมีตัวแปรตัดสินใจ 4 ค่า ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน อีกส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญของการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการ โปรแกรมเชิงเส้นนั้น เลขชี้กำลังของตัวแปรต้องมีค่าเป็น 1 และตัวแปรตัดสินใจต้องมีค่าเป็น 0 หรือ 1 สำหรับสมการเงื่อนไข

นั้น ต้องเป็นสมการ หรืออสมการเชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ดังนี้

3.5.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ต้องการให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุด ภายในระยะเวลาที่ต้องการ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

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

3.5.2 สมการเงื่อนไข

เป็นสมการที่เป็นข้อจำกัดของทรัพยากรในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับปัญหาของการวิจัย เพื่อให้ได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ประกอบด้วย 11 สมการ โดยแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคแต่ละชนิดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

1. เส้นทางที่เกิดจากโนคตรวจรู้แต่ละโนคในเครือข่าย คือ โนคตรวจรู้แต่ละโนค จะสร้างเส้นทางเชื่อมต่อเพื่อส่งแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโนคตรวจรู้ข้างเคียง หรือ สถานีถ่ายทอด หรือ สถานีฐาน เส้นทางใดเส้นทางหนึ่งเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น

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

2. เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานของโนคตรวจรู้ เงื่อนไขนี้จะกล่าวว่า โนคตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปที่สถานีถ่ายทอด หรือสถานีฐาน หรือ เมื่อโนคตรวจรู้ที่พิจารณาได้รับข้อมูลจากโนคตรวจรู้ก่อนหน้า แล้วจะส่งข้อมูลไปที่สถานีถ่ายทอด หรือสถานีฐาน นั่นคือ เป็นเงื่อนไขที่จำกัดจำนวนช่วงเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับ โนคตรวจรู้ให้มีจำนวนไม่เกินหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ

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

3. การสร้างเส้นทางจากโนคตรวจรู้ไปยังสถานีถ่ายทอด คือ โนคตรวจรู้จะสามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายแล้วเท่านั้น

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

4. การสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับโนคตรวจรู้ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ทำให้โนคตรวจรู้ i สามารถสร้างเส้นทางเชื่อมต่อไปยังโนคตรวจรู้ k ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

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

5. การสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ทำให้โนคตรวจรู้ i สามารถสร้างเส้นทางเชื่อมต่อไปยังสถานีถ่ายทอด j ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณที่กำหนดไว้

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

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

7. คุณภาพของสัญญาณในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับโนคตรวจรู้ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่จะทำให้โนคตรวจรู้ i สามารถส่งข้อมูลไปยังโนคตรวจรู้ k ได้นั้น จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ระดับความผิดพลาดบิตข้อมูลที่กำหนดไว้

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

8. คุณภาพของสัญญาณในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด คือ ค่าความแรงสัญญาณที่โนคตรวจรู้ i สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีถ่ายทอด j ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ระดับอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่กำหนดไว้

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

9. คุณภาพของสัญญาณในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนคตรวจรู้กับสถานีฐาน คือ ค่าความแรงสัญญาณที่โนคตรวจรู้ i สามารถส่งข้อมูลไปยังสถานีฐาน b ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ระดับความผิดพลาดบิตข้อมูลที่กำหนดไว้

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

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

10. เนื่องจากงบประมาณของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้จะต้องมีจำนวนไม่เกินงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายนั้นต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะทำให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

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

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขข้อจำกัดของพลังงานของโนคตรวจรู้

11. พลังงานรวมทั้งหมดที่โนคตรวจรู้ใช้ในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับแพ็คเก็ตข้อมูลจากโนคก่อนหน้า และส่งต่อแพ็คเก็ตข้อมูลไปยังโนคตรวจรู้ข้างเคียง หรือ สถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐานภายในระยะเวลาที่กำหนด จะต้องไม่เกินค่าพลังงานตั้งต้นของโนคตรวจรู้

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

3.6 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สองวัตถุประสงค์

จากที่ได้แสดงการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียว เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวจะให้คำตอบของปัญหาที่สนใจเพียงแง่มุมเดียวเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในการพิจารณาปัญหาใด ๆ ก็ตาม มักจะมีประเด็น หรือ วัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์เสมอ โดยหลายปัญหาที่พิจารณานั้นมักจะเป็นปัญหาที่มีความขัดแย้งกัน (conflict) และจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เพียงคำตอบเดียว ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ (decision maker) จะต้องทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้เหล่านั้น

ในงานวิจัยนี้จะได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ วัตถุประสงค์ที่ 1 ต้องการให้โนคตรวจรัฐใช้พลังงานในการกำเนิดเพื่อเกิดข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 ต้องการให้เครือข่ายติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด โดยที่จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งนี้จะต้องรับประกันว่าจะสามารถทำให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นจะทำการแปลงปัญหาที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์ด้วยการโปรแกรมเชิงเส้น โบนารีเพื่อหาเซตของคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ระหว่างวัตถุประสงค์ทั้งสอง โดยงานวิจัยนี้จะทำการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียวโดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับวัตถุประสงค์ทั้งสองนี้ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.11.1 ของหัวข้อที่ 2.11

ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ด้วยการโปรแกรมเชิงเส้น โบนารีสำหรับสองวัตถุประสงค์นี้ จะใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์วัตถุประสงค์เดียวทั้งหมด นั่นคือ จะมีการรับประกันว่าโนคตรวจรัฐทุก โนคในเครือข่ายสามารถที่จะสร้างการเชื่อมต่อถึงกันได้ทุก โนค มีการพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่มีความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดบิตเพื่อรับประกันความถูกต้องของข้อมูลที่ภาครับ และพิจารณางบประมาณที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายอีกด้วย เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้สถานีถ่ายทอดมาใช้เป็นโหนดที่ช่วยแบ่งเบาหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลของ โนคตรวจรัฐ เพื่อช่วยให้โนคตรวจรัฐสามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานที่สุด โดยมีตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดซึ่งเป็นเซตของตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งคำตอบที่ได้จากการกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นสามารถรับประกันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้

การแปลงสมการวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขให้เป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นจะทำให้การวางแผนเครือข่ายทำได้มีประสิทธิภาพ และทำให้ได้เครือข่ายที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือสามารถออกแบบปัญหาที่มีขนาดใหญ่ได้ ซึ่งในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ได้มีการใช้ตัวแปรต่าง ๆ โดยมีคำนิยาม ดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

I คือ เซตของโนดตรวจรู้

J คือ เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้

B คือ เซตของสถานีฐาน

ตัวแปรตัดสินใจ :

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

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

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

h_{ib} คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกเส้นทางเชื่อมต่อนอกจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ มีการเลือกเส้นทางจากโนดตรวจรู้ i ไปยังสถานีฐาน b และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกเส้นทางนั้น 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_{i1}	คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ (dBm)
P_{i2}	คือ จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้ กับสถานีถ่ายทอด (dBm)
P_{i3}	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

สำหรับการกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี นั่นคือ ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวจะมีค่าเป็นตัวเลขได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยจะมีตัวแปรตัดสินใจทั้งสิ้น 4 ค่า ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และตัวแปรตัดสินใจที่แสดงการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน อีกส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญของการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการ โปรแกรมเชิงเส้นนั้น เลขชี้กำลังของตัวแปรต้องมีค่าเป็น 1 และตัวแปรตัดสินใจจะต้องมีค่าเป็น 0 หรือ 1 สำหรับ

สมการเงื่อนไขนั้น ต้องเป็นสมการ หรืออสมการเชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ดังนี้

3.6.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการกำเนิดแพ็คเก็ตข้อมูล รับข้อมูล และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดภายในระยะเวลาที่กำหนด สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

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

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

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

3.6.2 สมการเงื่อนไข

สมการเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์นี้จะเหมือนกับเงื่อนไขที่ (3.2) ถึง (3.12) ในหัวข้อที่ 3.5.2

3.7 การพัฒนาอัลกอริธึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2

จากสมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในขั้นตอนที่ 1 นั้นผลของคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาจะแสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างทั้งสองวัตถุประสงค์ และเมื่อเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปเรื่อย ๆ ก็จะได้เซตของผลเฉลยของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งคำตอบที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์ในขั้นตอนที่ 1 นั้น จะประกอบไปด้วยเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน จำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย สำหรับการพัฒนาอัลกอริธึมเพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 นี้จะนำสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1 มาสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน โดยใช้หลักการของ minimum spanning tree ซึ่งจากหนังสือของ Sedgewick R. (2001) กล่าวว่า minimum spanning tree เป็นวิธีการหาเส้นทางที่ทำให้ผลรวมของ cost มีค่าน้อยที่สุด โดยจะทำการเชื่อมต่อโนดทุก ๆ โนดในเครือข่าย และไม่ทำให้เกิดลูป ซึ่งค่า cost สำหรับงานวิจัยนี้ คือ ระยะทางการเชื่อมต่อระหว่างโนดนั่นเอง เมื่อได้เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดแต่ละโนด ซึ่งเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วจึงพิจารณาเลือกสายอากาศแบบยาก็-อูคะ ที่มี

อัตราขยายที่แตกต่างกัน 4 แบบ เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน

สำหรับวิธีในการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดแต่ละโหนดในขั้นตอนที่ 2 นี้ จะใช้หลักการของ minimum spanning tree เพื่อหาระยะทางการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละโหนดในเครือข่ายที่สั้นที่สุด เนื่องจากต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศมีค่าน้อยที่สุด โดยติดตั้งสายอากาศที่สามารถทำการสื่อสารได้ที่ระยะทางต่าง ๆ กัน โดยอัลกอริทึมสำหรับสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานมีการใช้ตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีค่านิยามดังตารางที่ 3.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในอัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2

ตัวแปร	ความหมาย
F	เซตของโหนดที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อ
T	เซตของโหนดที่สร้างการเชื่อมต่อแล้ว
distance_node	ตัวแปรที่เก็บระยะทางระหว่างโหนดที่มีการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อ

อัลกอริทึมสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2

- อินพุต :
- 1) สถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1
 - 2) ระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีถ่ายทอด
 - 3) ระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีฐาน
 - 4) ข้อมูลระยะทางสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศทั้ง 4 แบบ
 - 5) ข้อมูลราคาของสายอากาศส่งทั้ง 4 แบบและสายอากาศรับ
- เอาต์พุต :
- 1) เส้นทางสื่อสารที่สั้นที่สุดระหว่างสถานีถ่ายทอดแต่ละโหนดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1
 - 2) แบบของสายอากาศที่ถูกติดตั้งในแต่ละเส้นทางสื่อสาร
 - 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

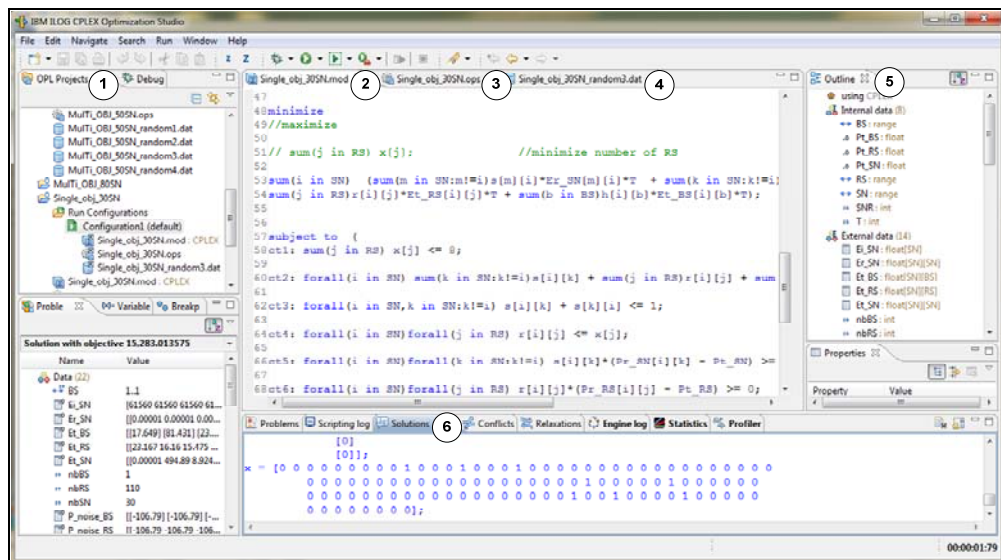
- ขั้นตอนที่ 3 : เก็บค่าระยะทางที่มีการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดซึ่งเป็นระยะทางที่สั้นที่สุดในตัวแปร `distance_node` และลบโหนดที่ถูกสร้างการเชื่อมต่อแล้วออกจากเซต F และเพิ่มโหนดที่ถูกสร้างการเชื่อมต่อแล้วไว้ในเซต T
- ขั้นตอนที่ 4 : พิจารณาเลือกสายอากาศภาคส่งที่จะใช้ในการสื่อสารระหว่างโหนดที่มีการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อ 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 : กำหนดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง
- ขั้นตอนที่ 6 : ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนครบทุกโหนดในเครือข่าย (เซต F มีค่าเป็นศูนย์)
- ขั้นตอนที่ 7 : กำหนดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาครับ และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศทั้งหมดในเครือข่าย
- ขั้นตอนที่ 8 : สิ้นสุดการทำงาน

จากการทำงานของอัลกอริทึมสำหรับการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโหนดในขั้นตอนที่ 2 นี้ จะทำให้สามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอด กับสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 และระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 กับสถานีฐานที่ถูกกำหนดตำแหน่งไว้แล้วได้ โดยสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายในขั้นตอนที่ 2 ได้

3.8 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุดนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถแปลงสมการคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมได้ง่าย มีประสิทธิภาพ และนิยมใช้ในงานวิจัยการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างแพร่หลาย โดยโปรแกรมนี้จะใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ซึ่งเป็น

กระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการ โปรแกรมเชิงเส้นในการหาผลเฉลยที่ต้องการ 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) ที่เปิดอยู่ สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) ค่าตัวแปรไฟล์ (*.dat) และ เซตตั้งไฟล์ (*.ops)
2. หมายเลข 2 (model file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการ โปรแกรมเชิงเส้น ไปนารี ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข
3. หมายเลข 3 (data file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียวและในรูปของเมตริกซ์ (matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณ โดยคำสั่งในโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ 3.4
4. หมายเลข 4 (setting file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้โครงการ เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (memory) ที่ใช้ในการคำนวณ จำนวนการวนซ้ำ (iteration) ของขั้นตอนวิธีแบบซิมเพล็กซ์และจัดการเกี่ยวกับข้อมูลล็อก (log data) ที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 3.5

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



ตารางที่ 3.2 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้น ไปนาริวัตอุปสงค์เดี่ยวเป็น
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 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีวัตถุประสงค์เดียวเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (ต่อ)

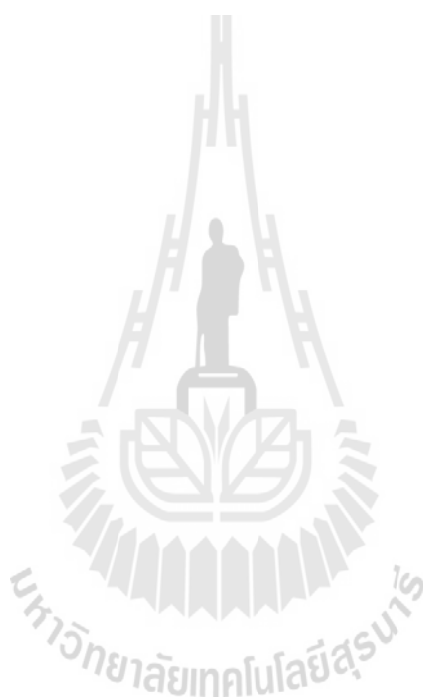
สมการจากหัวข้อ 3.5	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
สมการ(3.11)	ct10 : sum(j in RS) x[j] <= N_{RS} ;
สมการ(3.12)	ct11 : forall(i in SN) (sum(m in SN:m!=i)s[m][i]*Er_SN[m][i]*T) + (sum(k in SN:k!=i)s[i][k]*Et_SN[i][k]*T) + (sum(j in RS)r[i][j]*Et_RS[i][j]*T) + (sum(b in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

ตารางที่ 3.3 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสองวัตถุประสงค์เป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม 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

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 ได้ทำการสุ่มตำแหน่ง โหนดตรวจรู้ และพล็อตกราฟผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Microsoft Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย



บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย

เนื้อหาก่อนหน้านี้ได้เสนอแนวคิดของงานวิจัยโดยแบ่งเป็นสองหัวข้อใหญ่ ๆ คือ การหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว และการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบสองวัตถุประสงค์ สำหรับปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียวนั้น ได้เสนอแนวคิดของงานวิจัยโดยหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังปลายทางเพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด รวมทั้งหาคำตอบของจำนวน และตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ดีที่สุด เพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และสำหรับปัญหาแบบสองวัตถุประสงค์นั้น ได้พิจารณาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์ที่หนึ่งต้องการให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่สองต้องการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดเพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดปัญหาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยการแปลงความต้องการ เงื่อนไข และข้อจำกัดต่าง ๆ ในทางทฤษฎีให้เป็นสมการคณิตศาสตร์ เนื่องจากการออกแบบด้วยสมการคณิตศาสตร์นั้นมีข้อดี คือ ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของผลการทดลองที่ออกแบบโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนจริง รวมทั้งสามารถออกแบบได้ในระยะเวลาที่จำกัด และนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่มีโนดจำนวนมากได้

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษากการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย และวิเคราะห์เครือข่ายที่ออกแบบขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 จะใช้การออกแบบด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นแบบไบนารี เพื่อหาคำตอบของเส้นทางในการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปยังปลายทาง รวมทั้งคำตอบของจำนวน และตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งานที่กำหนด ภายใต้เงื่อนไข ที่แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (1) เงื่อนไขในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดแต่ละชนิดในเครือข่าย (2) เงื่อนไขงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่าย (3) เงื่อนไขข้อจำกัดของพลังงานของโนดตรวจรู้ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.5.2 ในบทที่ 3 ถัดมาเมื่อได้คำตอบเป็นเส้นทางในการสื่อสารระหว่างโนดตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงจำนวน และตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งแล้ว ในขั้นตอนที่ 2 นั้น เป็นการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดไปที่สถานีฐาน โดยพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่าง

สถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน โดยใช้วิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยหลักการของ minimum spanning tree ดังที่ได้กล่าวไปแล้วหัวข้อที่ 3.7

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย เปรียบเทียบกับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย โดยใช้หลักการแปลงสมการ โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) เพื่อแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว แล้วนำคำตอบที่ได้จากสมการมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองวัตถุประสงค์จากกราฟความสัมพันธ์ที่มีการแปรผกผันกัน โดยสิ่งที่ทำให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุดเปลี่ยนแปลงไป คือค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ซึ่งในบทนี้จะได้แสดงความสำคัญของค่าถ่วงน้ำหนักที่มีผลกระทบต่อคำตอบที่ดีที่สุด และถัดมาจะเป็นการใช้เทคนิคลำดับชั้น (Hierarchical method) ในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับเทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

เนื้อหาในส่วนของบทที่ 4 นี้ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้ หัวข้อที่ 4.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการวัตถุประสงค์เดียว และศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของเครือข่ายและการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ 4.2 การวิเคราะห์ผลของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์ที่ต่างกัน 4.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก 4.4 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักและศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่าย 4.5 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีลำดับชั้นและศึกษาผลกระทบจากขนาดเครือข่าย

4.1 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการวัตถุประสงค์เดียวและศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของเครือข่าย และการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้

สำหรับการออกแบบในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาพลังงานที่น้อยที่สุดที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับ คือ เส้นทางของการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ไปยังปลายทาง จำนวน และตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย เนื่องจากโนดตรวจรู้ที่มีหน้าที่ในการตรวจจับข้อมูลมีพลังงานที่จำกัด และมีตำแหน่งที่กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบ

สมการคณิตศาสตร์เพื่อหาตำแหน่ง และจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อติดตั้งในเครือข่าย โดยหน้าที่ของสถานีถ่ายทอดนั้นจะเป็น โหนดที่ทำการรับ และส่งข้อมูลที่ได้รับจากโหนดตรวจรู้ไปที่ปลายทาง เนื่องจากการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในเครือข่ายนั้นจะทำให้โหนดตรวจรู้สามารถทำงานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น และทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างสมดุลใน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ โดยได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ ดังนี้ เงื่อนไขการสื่อสารระหว่างโหนดในเครือข่าย เงื่อนไขนี้จะรับประกันได้ว่า โหนดแต่ละชนิดในเครือข่ายจะมีเส้นทางที่สามารถส่งข้อมูลไปถึงปลายทางได้ ซึ่งเป็นเส้นทางที่ทำให้โหนดมีการใช้พลังงานน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน เงื่อนไขของคุณภาพสัญญาณในการรับและส่งข้อมูล คือ ได้พิจารณาค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดชนิดต่าง ๆ ในเครือข่ายเพื่อให้ภาครับได้รับข้อมูลที่มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ เงื่อนไขของพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโหนดตรวจรู้ โดยกำหนดให้โหนดตรวจรู้ทุกโหนดในเครือข่ายมีพลังงานตั้งต้นเท่ากัน และสุดท้ายเงื่อนไขของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย เนื่องจากงบประมาณในการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งการจะได้คำตอบที่ดีที่สุดจากสมการคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นนี้ จะต้องมีการคำนวณหาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดชนิดต่าง ๆ ในเครือข่ายโดยพิจารณาจากเงื่อนไขทั้งหมดข้างต้นที่ได้กำหนดไว้ในสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งคำตอบที่ได้ คือ เส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างโหนดตรวจรู้กับโหนดตรวจรู้ และ/หรือ โหนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และ/หรือ โหนดตรวจรู้กับสถานีฐาน รวมทั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุด และเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดที่รับประกันได้ว่าทำให้เครือข่ายสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

งานวิจัยนี้จะกำหนดให้โหนดตรวจรู้มีการกำเนิดแพ็คเกจเป็นรอบ รอบละ 200 บิต สำหรับการรับและส่งข้อมูลระหว่างโหนดตรวจรู้กับโหนดตรวจรู้ นั้น จะกำหนดให้โหนดมีความสามารถในการจัดเรียงข้อมูล และบีบอัดแพ็คเกจข้อมูลให้เท่ากับที่กำหนดไว้ก่อนที่จะส่งข้อมูลต่อไปกับโหนดอื่น ๆ นั่นคือ เมื่อโหนดตรวจรู้ได้รับข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ก่อนหน้าแล้ว โหนดตรวจรู้โหนดนั้นจะต้องทำการจัดเรียง และบีบอัดแพ็คเกจข้อมูลให้มีขนาดเท่ากับ 200 บิตก่อนที่จะส่งไปยังโหนดอื่น ซึ่งจากการทำงานของโหนดตรวจรู้ที่ได้อธิบายมานั้น งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดให้การรับและส่งข้อมูลระหว่างโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีจำนวนไม่เกินสองช่วงเชื่อมต่อ เพื่อให้โหนดตรวจรู้สามารถมีกระบวนการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหากไม่กำหนดจำนวนช่วงเชื่อมต่อในการรับส่งข้อมูลแล้วอาจทำให้ข้อมูลเกิด overload ที่โหนดตรวจรู้ปลายทางซึ่งอยู่ใกล้กับสถานีฐานได้ สำหรับการส่งข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ไปที่สถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐานนั้น โหนดตรวจรู้จะสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดเหล่านี้ได้ โดยจะต้องพิจารณาเงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้นเช่นกัน

4.1.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนั้นจะทำการจำลองแบบเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาดกว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร เท่ากันทุกการทดลอง ซึ่งอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Shi, Y., Hou, Y. T., and Efrat, A. (2009) โดยพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีสถานีฐาน 1 สถานี จะถูกติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางของเครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบที่ตำแหน่ง (250, 250) สำหรับพื้นที่ที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอด (candidate site of relay station) นั้นมีตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด 110 ตำแหน่ง ตลอดเครือข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.15 สำหรับข้อมูลอินพุตนั้น ประกอบไปด้วย พลังงานตั้งต้นของโนดตรวจรู้ทุก ๆ โนดในเครือข่าย ค่าความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด ความแรงสัญญาณระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับสถานีฐาน ค่าพลังงานในการรับข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ที่ส่งผลต่อการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานในเครือข่าย ในการทดลองของหัวข้อนี้จะพิจารณาขนาดของเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่ 1 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด เครือข่ายที่ 2 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โนด และเครือข่ายที่ 3 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โนด โดยแต่ละเครือข่ายนั้นจะทำการทดสอบจำนวนเครือข่ายละ 5 ครั้ง โดยมีตำแหน่งของโนดตรวจรู้ และตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ แสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.15 และได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย แสดงดังตารางที่ 4.1

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างเครือข่ายโดยใช้แบบจำลองพลังงานในการรับ และส่งข้อมูลจากงานวิจัยของ Heinzelman W. R., Chandrakasan A., and Balakrishnan (2000) มาใช้ในการคำนวณพลังงานในการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.7 สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการส่งข้อมูลนั้นคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และสมการที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับข้อมูลคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย

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

* MaxStream Incorporation (2006) **IEEE 802.15.4 OEM RF Modules**, www.MaxStream.net, 12 July 2006.

** **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, pp. 0_1-305.

ความแรงของสัญญาณ (received signal strength) ที่โนดตรวจรู้ สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานรับได้นั้นคำนวณได้จากแบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่ายดังสมการที่ (2.1) และใช้พารามิเตอร์ในการคำนวณตามตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ที่เกิดจากความร้อนในวงจรรีเลย์ทรอนิกนั้นคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

สำหรับเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบนั้น ได้อ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และได้ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้จุดเริ่มเปลี่ยนความแรงสัญญาณ (received signal strength threshold) ที่ทำให้โนดแต่ละชนิดสามารถสื่อสารกันได้นั้นมีค่าเท่ากับ -90 dBm ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ทำให้โนดแต่ละชนิดสามารถสื่อสารกัน ได้มีค่าเท่ากับ 2 dB เพื่อให้ได้อัตราค่าความผิดพลาดบิตในระดับที่กำหนดไว้ ซึ่งในขั้นตอนของการแก้ปัญหาในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายนั้นจะใช้โปรแกรม IBM ILOG

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

สำหรับการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายในขั้นตอนที่ 2 นั้น จะพิจารณาหาเส้นทางการส่งต่อข้อมูลจากสถานีถ่ายทอดไปที่ปลายทาง หรือสถานีฐานต่อไป โดยจะนำคำตอบที่ได้จากการกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นวัตถุประสงค์เดียวจากขั้นตอนที่ 1 คือ ตำแหน่งและจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในแต่ละเครือข่าย มาใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และ/หรือ ระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานต่อไป โดยใช้แนวทางการเชื่อมต่อเครือข่ายด้วยหลักการของ minimum spanning tree เนื่องจากเป็นวิธีการที่รับประกันได้ว่าจะทำให้ได้เส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างโหนดทุก ๆ โหนดในเครือข่ายที่สั้นที่สุด และไม่ทำให้เกิดลูป หลังจากได้เส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนดทุกโหนดในเครือข่ายแล้ว ก็จะคำนวณระยะทางของการเชื่อมต่อระหว่างโหนดสองโหนดใด ๆ แล้วนำระยะทางระหว่างโหนดนั้นมาพิจารณาเลือกสายอากาศเพื่อใช้ในการสื่อสาร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคี ที่มีอัตราขยายที่แตกต่าง 4 แบบ ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งอัตราขยายที่ต่างกันมีผลต่อระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศ และราคาของสายอากาศ ส่วนสายอากาศที่ใช้ในการรับข้อมูลซึ่งจะติดตั้งไว้ที่สถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งทุกโหนด และสถานีฐานนั้น จะเลือกใช้สายอากาศชนิดรอบทิศทางระนาบเดี่ยว ซึ่งมีอัตราขยาย ราคา และระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถทำงานได้ แสดงดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากต้องใช้ในการรับข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ และ/หรือ สถานีถ่ายทอด โดยอ้างอิงข้อมูลจากเว็บไซต์ http://www.sysnetcenter.com/category.php?id_category=39 ราคา ณ วันที่ 27 กันยายน 2554 โดยมีรายละเอียดข้อมูลเกี่ยวกับสายอากาศส่งที่ใช้ในการออกแบบ และราคาสายอากาศตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1 ถึง ก.6 สำหรับข้อมูลของอัตราขยาย และราคาของสายอากาศภาครับอ้างอิงจากเว็บไซต์ http://www.sysnetcenter.com/category.php?id_category=30 ราคา ณ วันที่ 27 กันยายน 2554 ซึ่งจะได้ให้รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อมูลสายอากาศที่ใช้ในการออกแบบตาม ภาคผนวก ก ในตารางที่ ก.7

ข้อมูลอินพุตสำหรับการหาคำตอบของเส้นทางการเชื่อมต่อ โหนดทุกโหนดในเครือข่ายในการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 คือ ตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 และตำแหน่งของสถานีฐาน โดยในขั้นตอนนี้จะต้องทำการคำนวณระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอดแต่ละโหนดในเครือข่าย และระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดแต่ละโหนดในเครือข่าย เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกสายอากาศที่จะใช้เป็นภาคส่ง โดยได้ทำการพิจารณาสายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคี ที่มีอัตราขยายที่แตกต่างกัน 4 แบบ ซึ่งสายอากาศแต่ละแบบจะมีราคาที่แตกต่างกัน โดยราคาจะแปรผันตามอัตราขยายที่มากขึ้น

อัลกอริทึมที่ใช้ในการหาเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างโหนดทุกโหนดในเครือข่ายนั้นจะใช้ อัลกอริทึมที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.7 สำหรับการหาคำตอบของเส้นทางการเชื่อมต่อที่สั้นที่สุด ระหว่างสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานในเครือข่าย แบบของสายอากาศ ภาคส่งที่เลือกใช้ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศภาคส่ง สายอากาศภาครับ สถานีถ่ายทอด และ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างเครือข่ายของขั้นตอนที่ 2 จะหาคำตอบโดยใช้โปรแกรม Dev C++ Copyright © Bloodshed software version 4.9.9.2 ซึ่งเป็น โปรแกรมฟรีแวร์ สามารถดาวน์โหลดใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายจากเว็บไซต์ <http://bloodshed.net> โดยใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel® Core™ i5-2410M ความเร็วซีพียู 2.3 GHz แรมขนาด 4 GB 64 บิต ในการประมวลผลหาคำตอบ

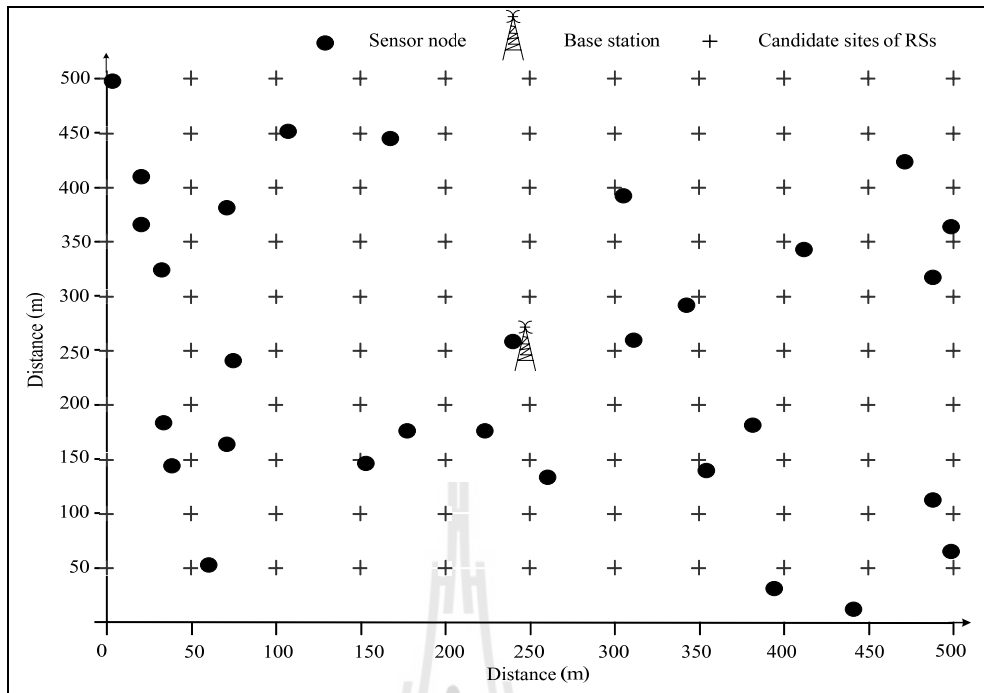
ตารางที่ 4.2 อัตราขยาย ราคา และ ระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาคส่ง

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

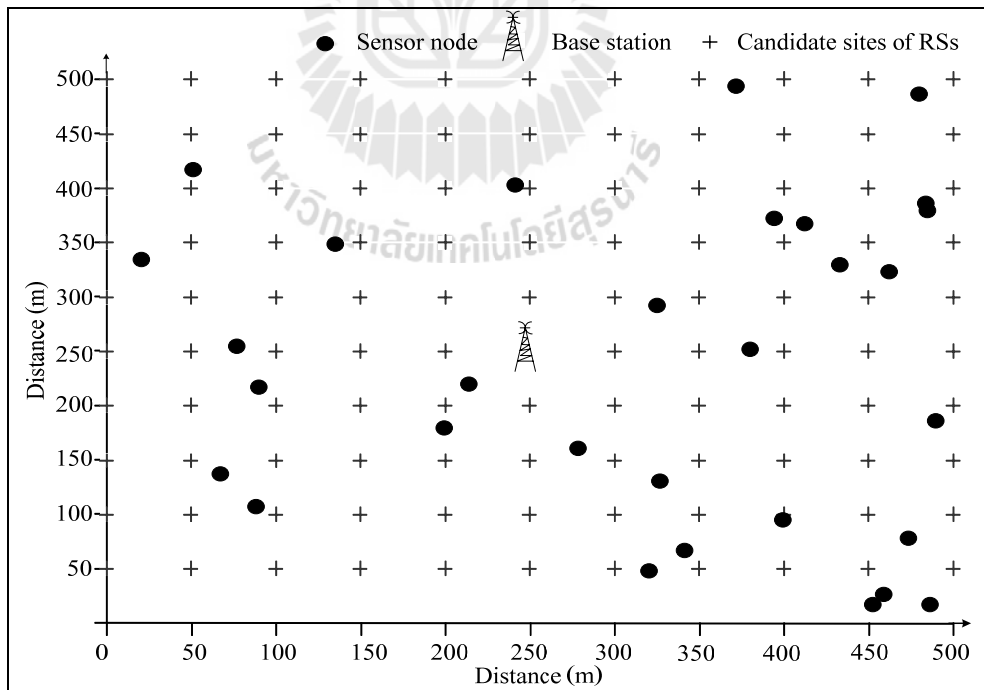
* วิธีในการหาระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.3 อัตราขยาย ราคา และ ระยะสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาครับ

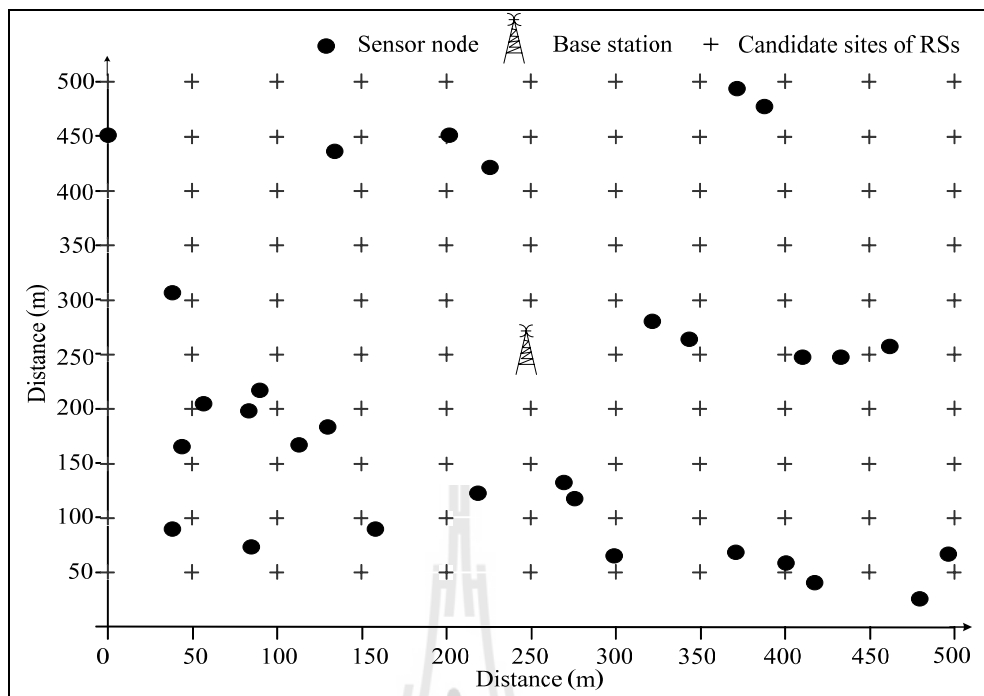
สายอากาศ	อัตราขยายของสายอากาศ (dBi)	ราคา (บาท)	ระยะสื่อสารไกลที่สุด (m.)
แบบที่ 1	8	1500	199



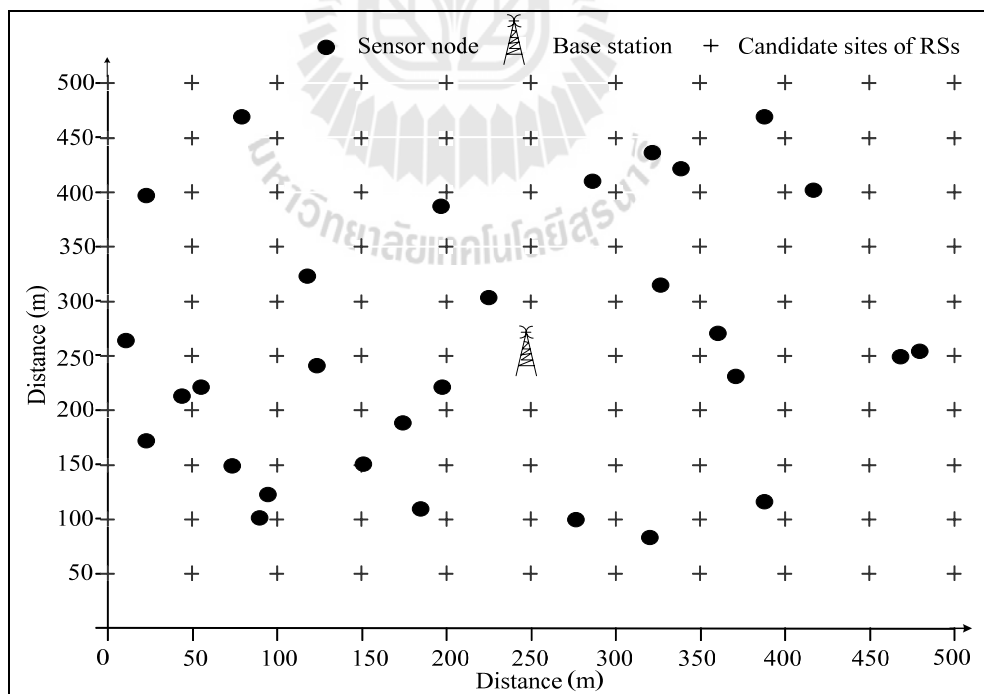
รูปที่ 4.1 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 1



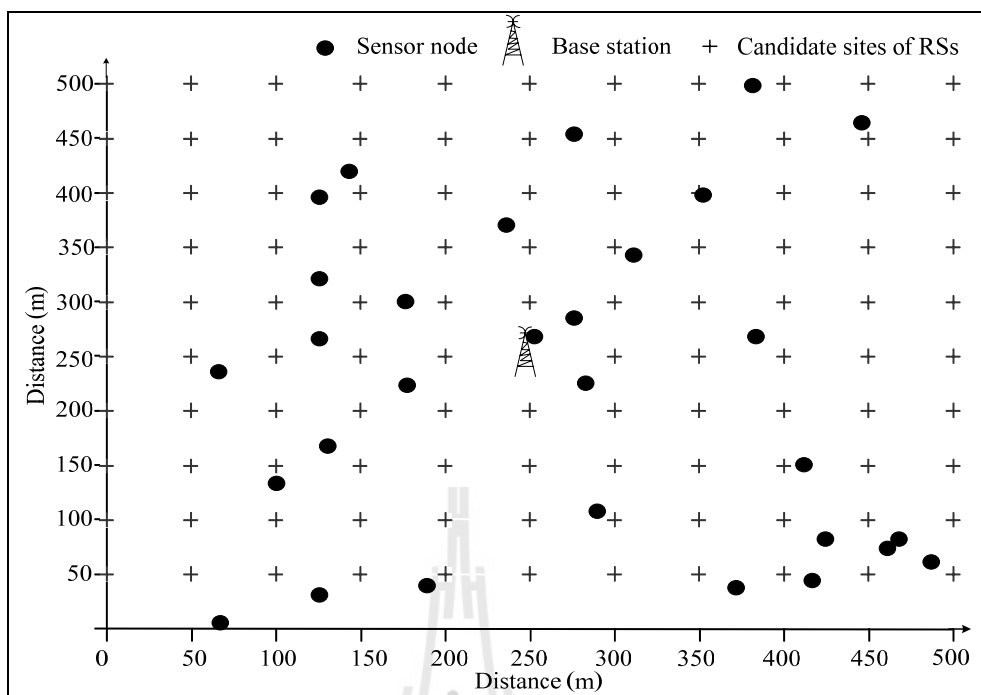
รูปที่ 4.2 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 2



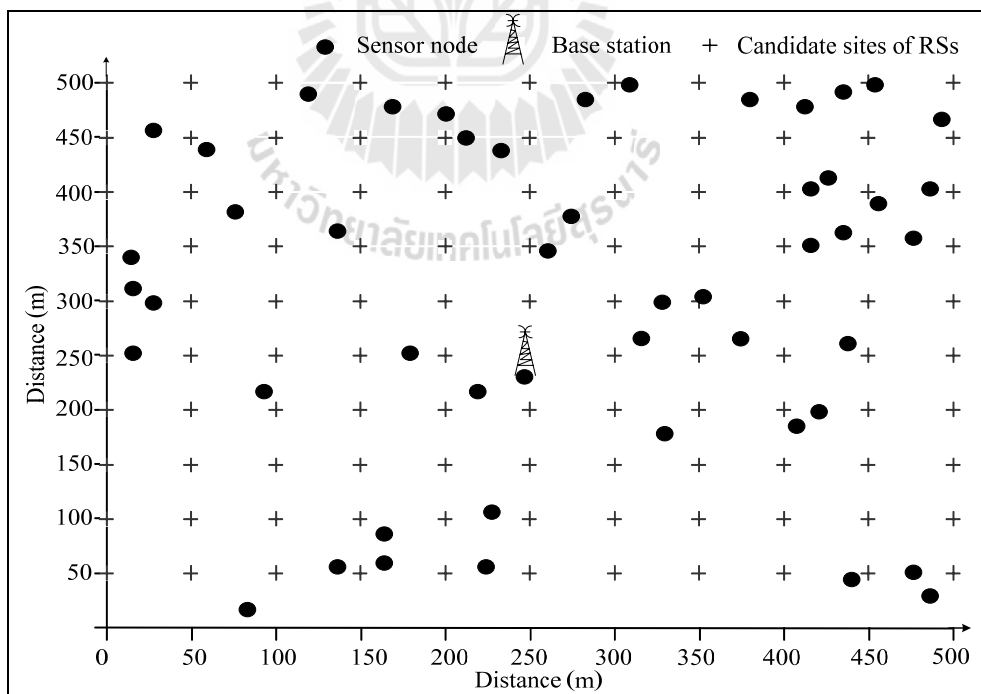
รูปที่ 4.3 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 3



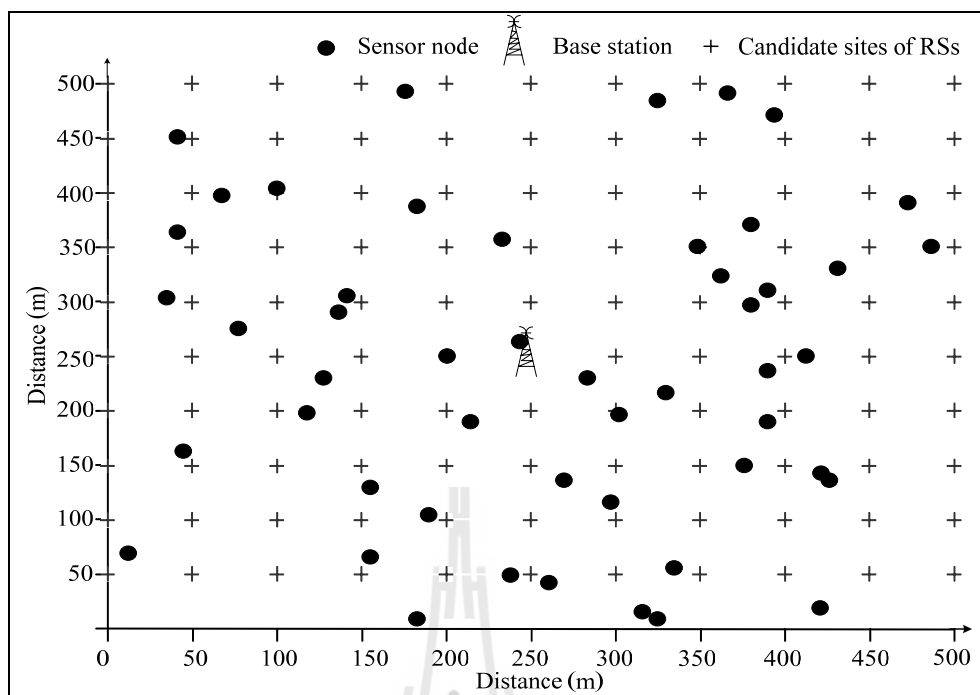
รูปที่ 4.4 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 4



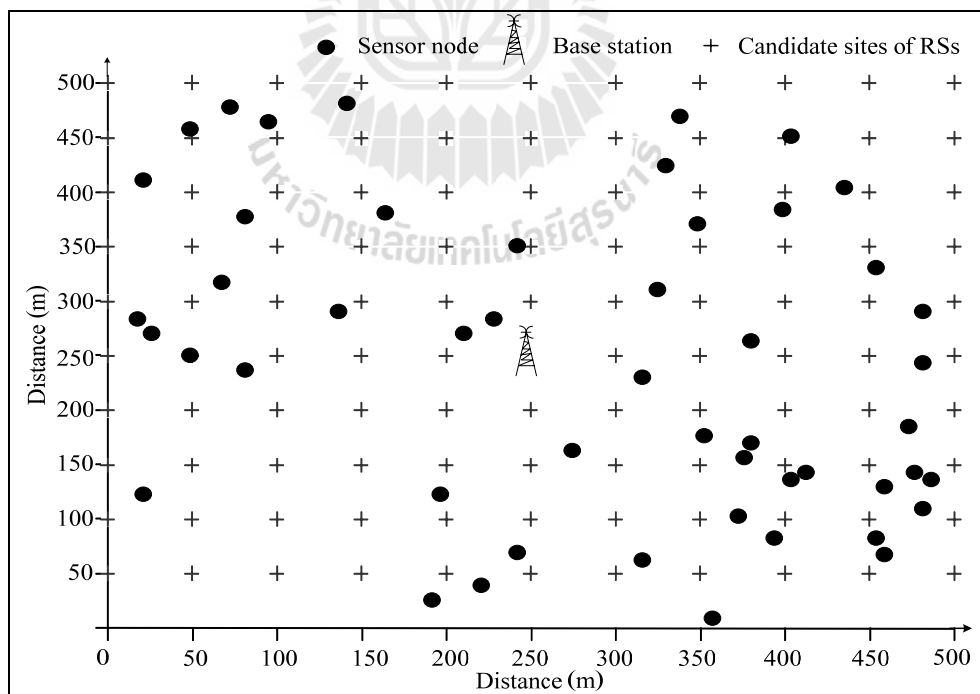
รูปที่ 4.5 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด ครั้งที่ 5



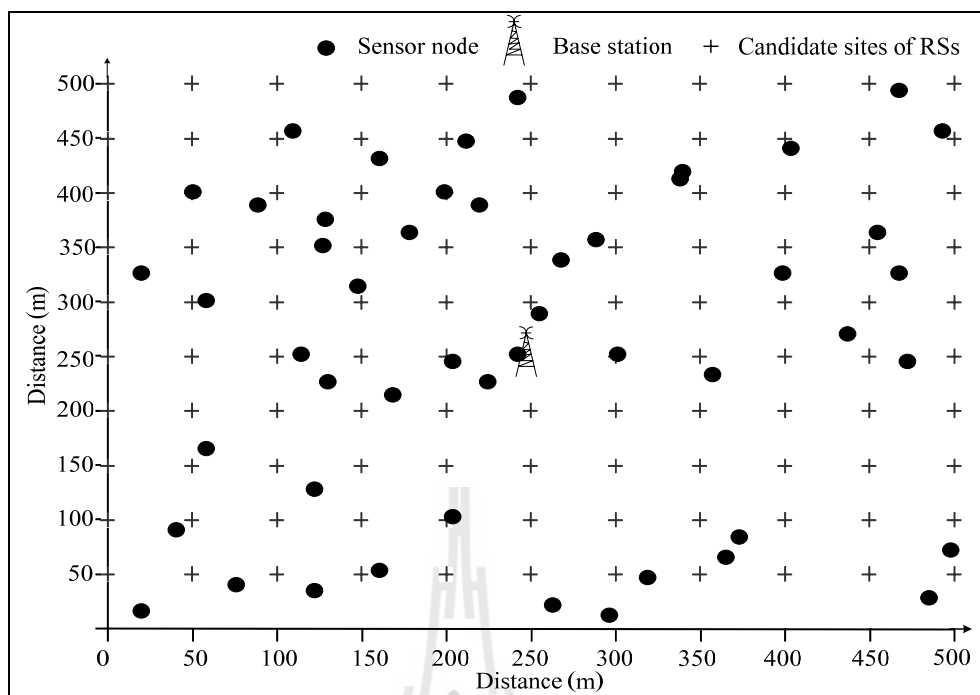
รูปที่ 4.6 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 1



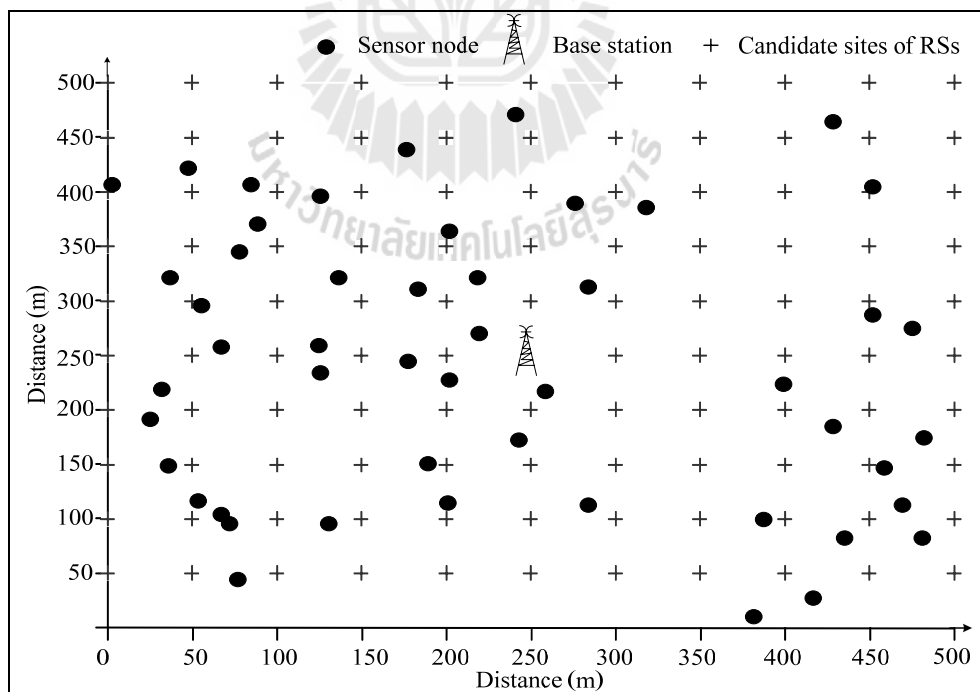
รูปที่ 4.7 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 2



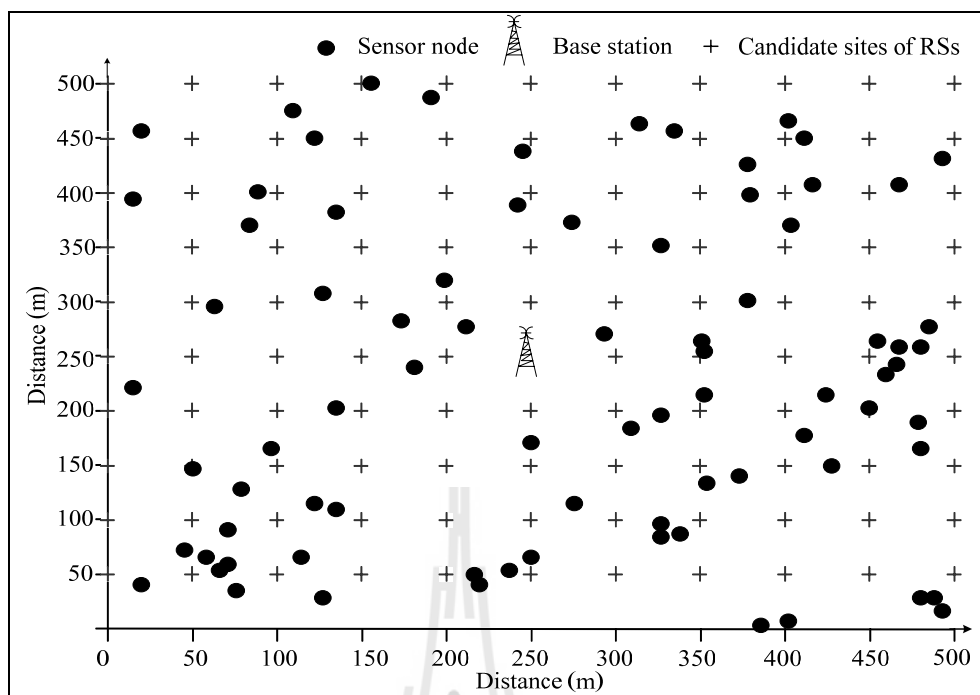
รูปที่ 4.8 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 3



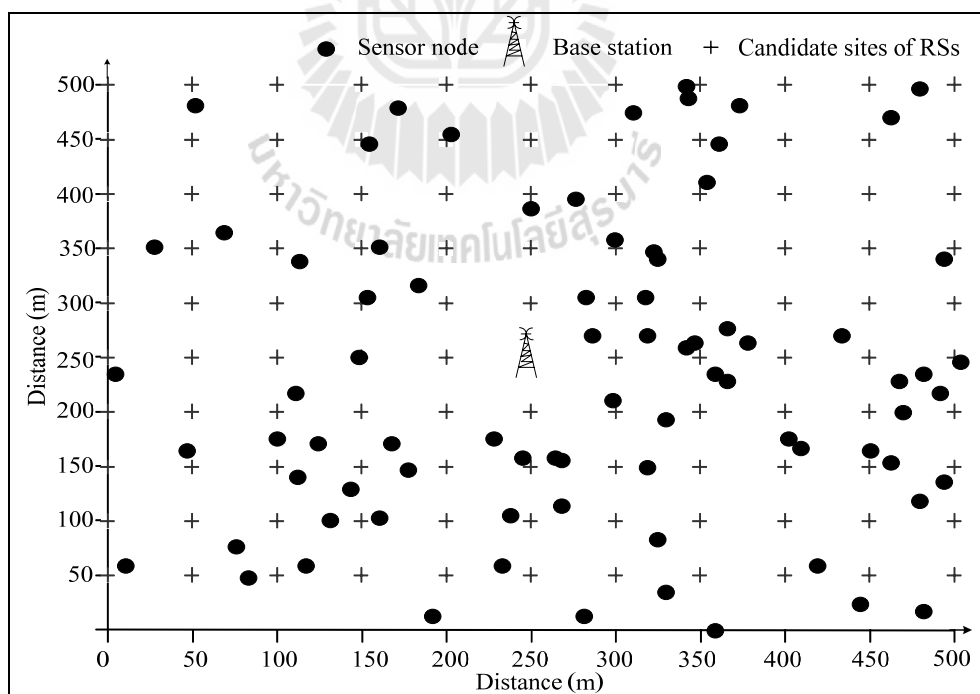
รูปที่ 4.9 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 4



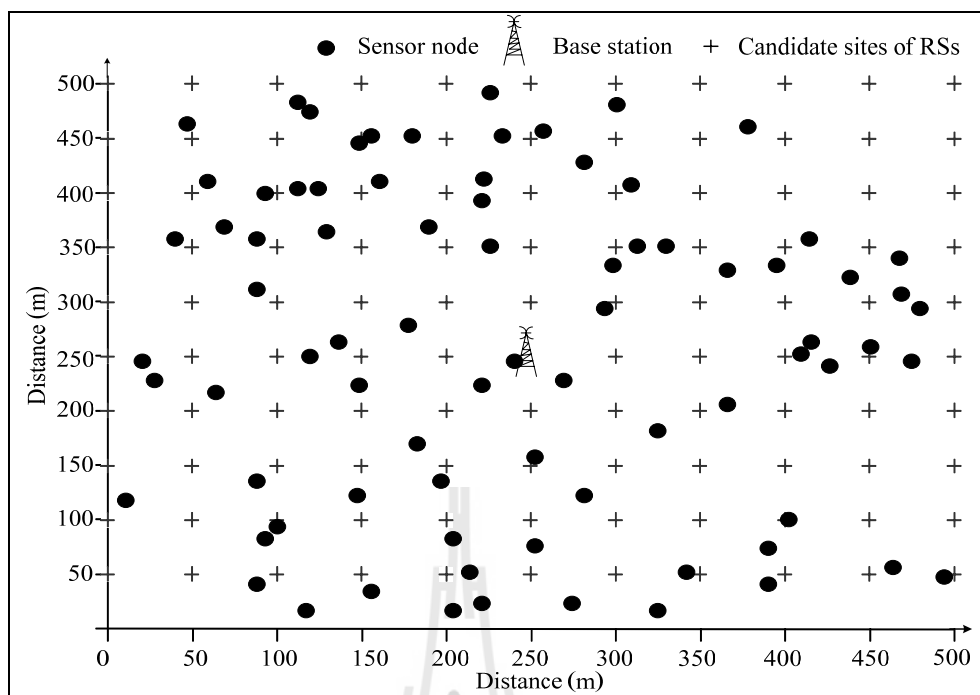
รูปที่ 4.10 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 50 โหนด ครั้งที่ 5



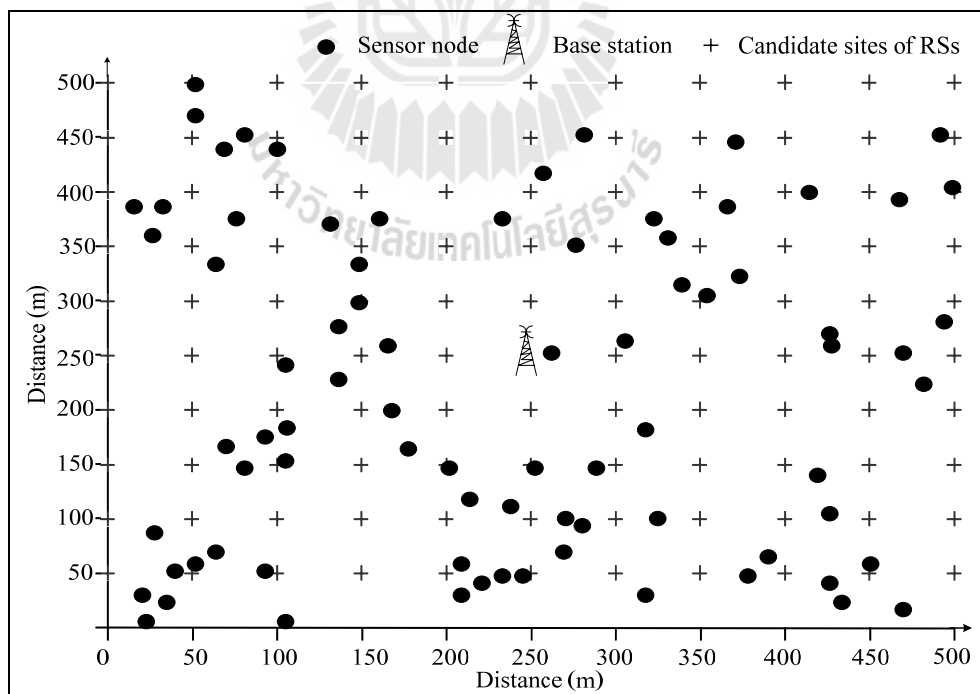
รูปที่ 4.11 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 80 โหนด ครั้งที่ 1



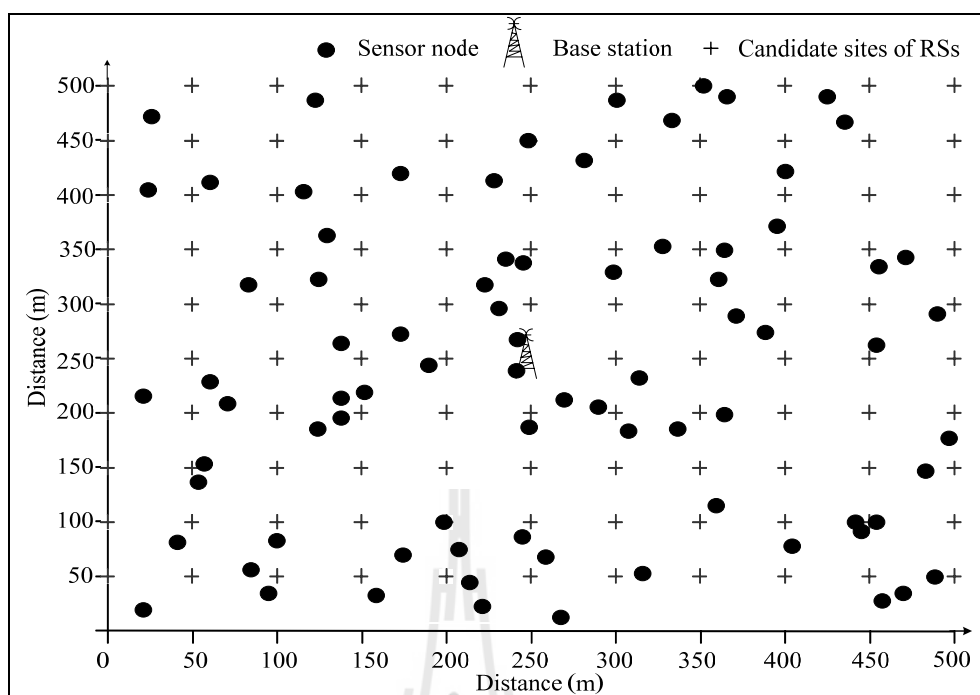
รูปที่ 4.12 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 80 โหนด ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.13 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 80 โหนด ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.14 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจรู้จำนวน 80 โหนด ครั้งที่ 4



รูปที่ 4.15 การสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจจำนวน 80 โหนด ครั้งที่ 5

4.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

รูปที่ 4.16 ถึง รูปที่ 4.30 แสดงผลการทดลองเมื่อมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โหนดตรวจใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน ในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจจำนวน 30 50 และ 80 โหนด โดยในเครือข่ายแต่ละขนาดจะทำการสุ่มตำแหน่งโหนดตรวจจำนวนเครือข่ายละ 5 ครั้ง ตามลำดับ จะเห็นว่าในการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นจะพิจารณาถึงงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในแต่ละเครือข่ายที่มีขนาดที่แตกต่างกันนั้นจะต้องเลือกติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุด และเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งการได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของจำนวน และตำแหน่งสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้ง รวมถึงเส้นทางการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดชนิดต่าง ๆ ในเครือข่ายนั้น จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ ค่าความแรงสัญญาณของการสื่อสารระหว่างโหนดที่จะมีการรับและส่งข้อมูลระหว่างกันนั้นจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า -90 dBm ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างโหนดที่มีการรับและส่งข้อมูลระหว่างกันจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 dB การรับและส่งข้อมูลของโหนดตรวจในเครือข่ายภายใต้อายุการใช้งานที่กำหนดนั้นจะต้องมีค่าไม่เกินระดับพลังงานตั้งต้นของโหนดตรวจที่กำหนด การรับ และส่งข้อมูลระหว่างโหนดตรวจในเครือข่ายจะต้องมีจำนวนไม่เกินสองช่วงเชื่อมต่อ โหนดตรวจจะสามารถส่งข้อมูลให้กับสถานีถ่ายทอดที่

เลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายนั้นจะต้องมีค่าน้อยที่สุด และทำให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งลำดับของการได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดนั้นจะเริ่มต้นจากราบว่าเครือข่ายจะต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุดกี่โหนดที่จะทำให้เครือข่ายสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นจะนำจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุดนี้ มาใช้เป็นเงื่อนไขในการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งหลังจากที่ทราบตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดแล้ว ก็จะได้คำตอบของเส้นทางในการรับส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้ และ/หรือ โนดตรวจรู้กับสถานีถ่ายทอด และ/หรือ โนดตรวจรู้กับสถานีฐาน โดยการเลือกเส้นทางในการรับส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้นั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ คือ การรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้กับโนดตรวจรู้นั้นจะต้องมีจำนวนไม่เกิน 2 ช่วงเชื่อมต่อเพื่อช่วยให้โนดตรวจรู้สามารถจัดเรียงแพ็คเกจข้อมูล และมีกระบวนการของการบีบอัดข้อมูลได้ภายในระยะเวลาของการตรวจจับข้อมูลที่กำหนด

เมื่อพิจารณาเส้นทางในการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โหนดนั้นพบว่า โนดตรวจรู้จะพยายามส่งข้อมูลไปยังเส้นทางที่ทำให้มีการใช้พลังงานในการส่งให้น้อยที่สุด นั่นคือ โนดตรวจรู้จะส่งข้อมูลไปยังโหนดข้างเคียงที่มีระยะทางใกล้กับตัวมันเองมากที่สุด เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จำนวนแพ็คเกจข้อมูลของ โนดตรวจรู้ที่เกิดจากการกำเนิดแพ็คเกจข้อมูลด้วยตัวมันเองนั้นจะมีค่าคงที่เท่ากันทุก ๆ รอบ คือมีค่าเท่ากับ 200 บิต และเมื่อโนดตรวจรู้โหนดนั้นส่งต่อข้อมูลที่ได้ทำการตรวจจับให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียงแล้ว โนดตรวจรู้โหนดนั้นก็จะมีกระบวนการจัดเรียงข้อมูลในแพ็คเกจ และทำการบีบอัดข้อมูลให้มีค่าเท่ากับ 200 บิตเท่าเดิมก่อนที่จะส่งต่อข้อมูลเหล่านั้นไปยังสถานีถ่ายทอด และ/หรือ สถานีฐานต่อไป ด้วยเหตุนี้เพื่อให้โนดตรวจรู้สามารถทำการจัดเรียงข้อมูลได้ทันภายในระยะเวลาของการส่งข้อมูลที่กำหนด จึงได้กำหนดช่วงเชื่อมต่อระหว่างโนดตรวจรู้ให้ถูกจำกัดไว้เพียง 1 ช่วงเชื่อมต่อเท่านั้น ดังนั้นในการพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลในงานวิจัยนี้ จะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตข้อมูล และระยะทางระหว่างภาครับ และภาคส่ง

จากตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ พบว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โหนด ทั้ง 5 ครั้งนั้น จะมีค่าเฉลี่ยของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายเท่ากับ 8 โหนด และเพิ่มขึ้นเป็น 9.8 โหนด และ 9.2 โหนดในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โหนด และ 80 โหนด ตามลำดับ จะเห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนมากขึ้นตามจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โหนดนั้นจะมีค่าเฉลี่ยของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งน้อย

กว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โนด เนื่องจากการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของโนดตรวจรู้เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายอีกด้วย คือ ถ้ามีโนดตรวจรู้โนดใด ๆ ที่อยู่ห่างจากโนดตรวจรู้โนดอื่นแล้วนั้น โนดตรวจรู้โนดนั้นจะไม่สามารถส่งต่อข้อมูลให้กับโนดตรวจรู้ข้างเคียงโนดอื่นได้ ทำให้ต้องเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในบริเวณนั้น เพื่อให้ข้อมูลของโนดตรวจรู้โนดนั้นสามารถส่งไปถึงปลายทางได้ หรืออาจกล่าวได้ว่า ในเครือข่ายที่โนดตรวจรู้มีการกระจายตัวเป็นกลุ่ม ๆ นั้น จะมีจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งน้อยกว่ากรณีที่เครือข่ายมีการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่อยู่ห่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 ถึง 4.25 ของเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โนดนั้นจะเห็นได้ว่าเครือข่ายดังกล่าวมีการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่ไม่เป็นกลุ่ม คือ มีบางโนดอยู่ห่างจากโนดตรวจรู้โนดอื่น ๆ จึงทำให้เครือข่ายนี้ต้องมีติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมากกว่าในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด

ตารางที่ 4.4 จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายจากหัวข้อที่ 4.1

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

จากตารางที่ 4.5 แสดงพลังงานรวมที่โนดตรวจรู้ใช้ไปตลอดอายุการใช้งาน ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : S.D.) ของพลังงานรวมที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 จะเห็นได้ว่าในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้เท่ากัน จะมีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ในแต่ละเครือข่ายที่แตกต่างกัน และเมื่อมีจำนวนของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าพลังงานรวมในเครือข่ายมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการรับส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.5 พลังงานรวมที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ (ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

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

จากตารางที่ 4.6 แสดงพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ ค่าเฉลี่ยของพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในเครือข่ายที่มีจำนวน โนคตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนค ครั้งที่ 1 ถึง 5 จะเห็นว่า การทดสอบแต่ละครั้งในเครือข่ายขนาดเดียวกันนั้นจะมีพลังงานเฉลี่ยที่แตกต่างกัน เนื่องจากการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ที่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพลังงานเฉลี่ยในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด คือ เครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 80 โนค เนื่องจากมีจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายมากที่สุด รองลงมาคือ เครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค เนื่องจากมีจำนวนโนคตรวจรู้ในเครือข่ายน้อย ทำให้โนคตรวจรู้ต้องใช้พลังงานในการส่งข้อมูลมากขึ้น รวมทั้งเป็นเครือข่ายที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยกว่าเครือข่ายอื่น และเครือข่ายที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ เครือข่ายที่มีจำนวน โนคตรวจรู้ 50 โนค เนื่องจากติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากกว่าเครือข่ายอื่น

ตารางที่ 4.6 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ (ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

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

การหาเส้นทางเชื่อมต่อของสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2 นั้น จะใช้หลักการของ minimum spanning tree และจะต้องมีข้อมูลอินพุตของระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งของแต่ละเครือข่ายจากขั้นตอนที่ 1 และระยะห่างระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 กับสถานีฐาน เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโนดที่สั้นที่สุดได้ ซึ่งตัวอย่างของข้อมูลอินพุตของการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 1 ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 1 แสดงไว้ดังตารางที่ ก.8 จากผลการทดลองจะได้เส้นทางที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างโนดในขั้นตอนที่ 2 ในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 โดยแสดงเป็นเส้นประดังรูปที่ 4.16 ถึง 4.30

สำหรับอุปกรณ์ที่งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงให้ทำหน้าที่เป็นสถานีถ่ายทอดนั้น เป็นอุปกรณ์จากบริษัท DEETER Electronics Inc จากเว็บไซต์ www.deeterelectronicsinc.com โดยทางผู้ผลิตได้เรียกอุปกรณ์นี้ว่า Wireless sensor system router ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ รวมทั้งราคา แสดงไว้ในตารางที่ ก.8 ในส่วนของเอกสารอ้างอิง ภาคผนวก ก

การพิจารณาหาเส้นทางในการเชื่อมต่อ โนดในขั้นตอนที่ 2 นี้ได้พิจารณาติดตั้งสายอากาศที่ใช้งานได้จริงเพื่อใช้ในการออกแบบ โดยสายอากาศส่งนั้นจะเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคีที่มีอัตราขยายที่แตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ 7 dBi, 8 dBi, 15 dBi และ 16 dBi โดยอัตราขยายที่แตกต่างกันนี้จะทำให้สายอากาศแต่ละแบบมีระยะสื่อสารที่ไกลที่สุด และราคาของสายอากาศที่แตกต่างกัน เมื่อได้เส้นทางของการส่งข้อมูลระหว่างโนดในขั้นตอนที่ 2 แล้ว ก็จะนำค่าระยะทางระหว่างโนดที่มีเชื่อมต่อกันนั้นมาใช้ในการพิจารณาเลือกสายอากาศที่ใช้ในการส่งข้อมูล โดยใช้เงื่อนไขของระยะทางที่ไกลที่สุดที่สายอากาศแต่ละแบบสามารถทำการสื่อสารได้ สำหรับ

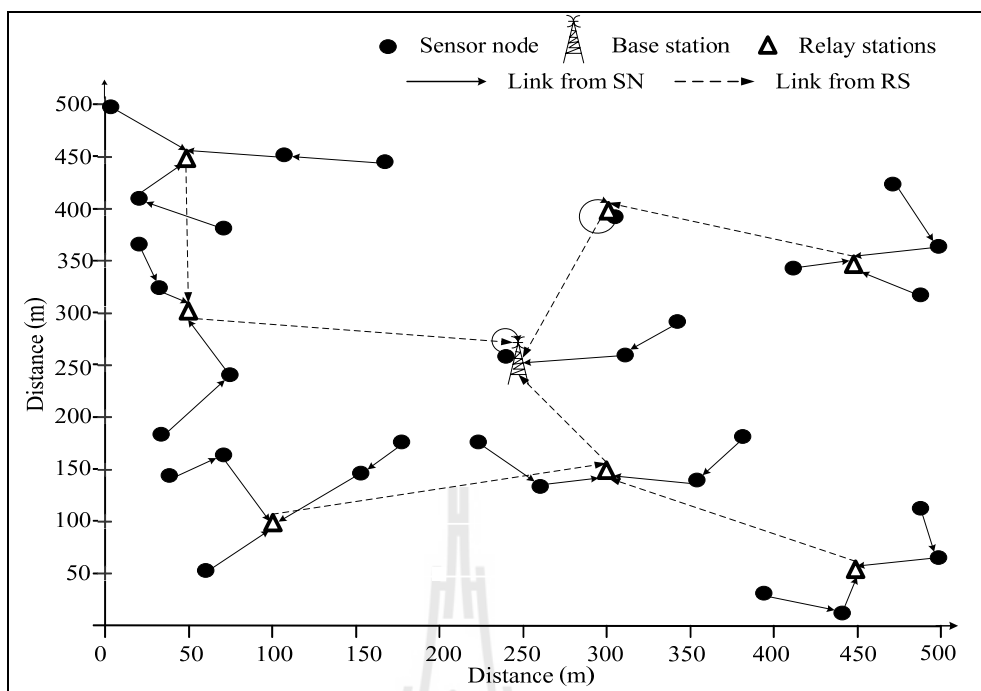
สายอากาศภาครับนั้นจะมีการติดตั้งที่สถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งทุก โหนด และสถานีฐาน ซึ่งสายอากาศภาครับที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทางระนาบเดียว เมื่อทราบ ว่าในแต่ละเส้นทางมีการติดตั้งสายอากาศส่งแบบใดแล้วก็จะสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายของการติดตั้งสายอากาศส่งในแต่ละเส้นทางเชื่อมต่อ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่งทั้งหมด ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด และค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเครือข่าย ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ ง.2 ถึง ง.16 ในส่วนของเอกสารอ้างอิง ภาคผนวก ง

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายของหัวข้อที่ 4.1 จากค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศส่ง สายอากาศรับในการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยสรุปเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายของแต่ละเครือข่ายจะแปรผันตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย และระยะห่างระหว่างโหนดที่ส่งผลต่อการเลือกติดตั้งสายอากาศส่ง คือ ถ้าระยะทางระหว่างโหนดมีค่ามาก จะต้องเลือกติดตั้งสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง ซึ่งมีราคาแพง และทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

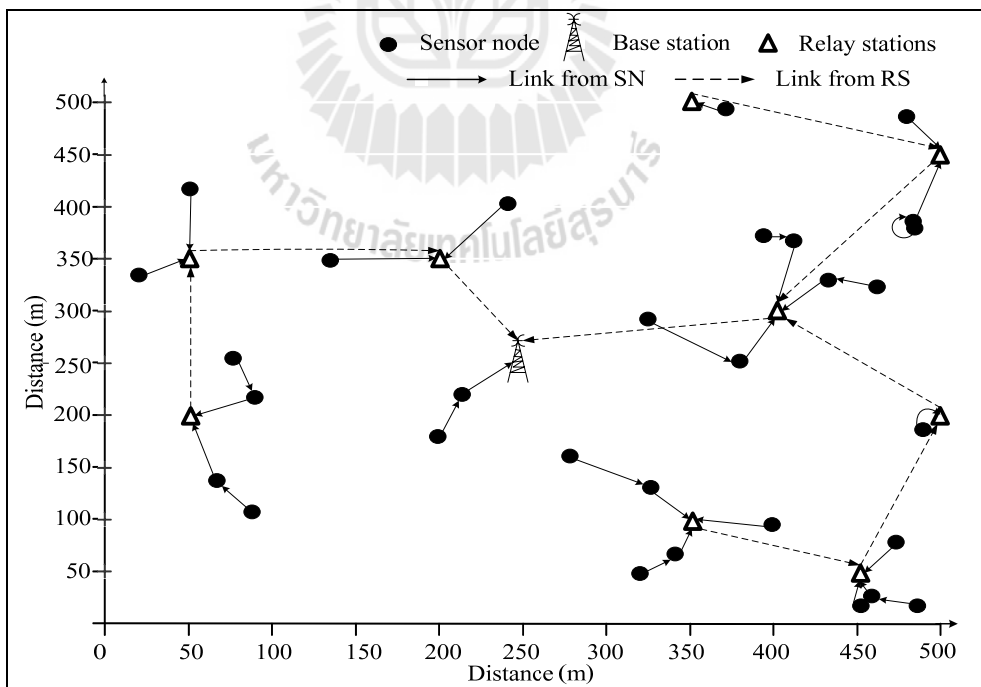
ตารางที่ 4.7 สรุปค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่ายในหัวข้อที่ 4.1

เครือข่าย	ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่าย (บาท)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 30 โหนด	84660.65	104306.55	97683.6	92883.6	92883.6	94483.6
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 50 โหนด	115729.5	115729.5	115729.5	117329.5	109106.55	114724.91
เครือข่ายที่มีโหนด ตรวจรู้ 80 โหนด	115729.5	128752.45	105906.55	94483.6	96083.6	108191.14

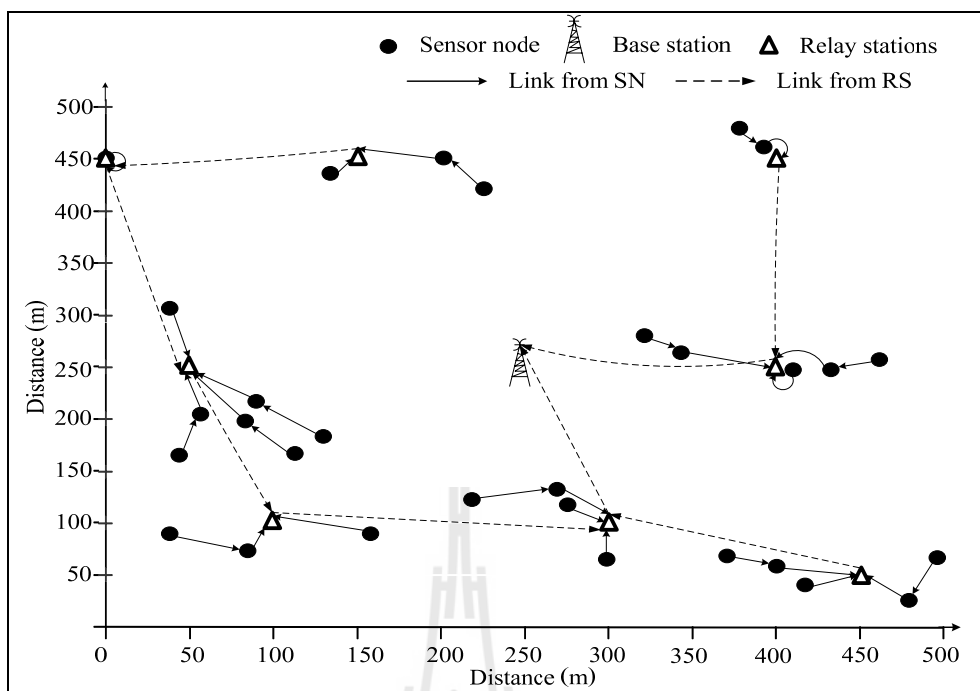
ตารางที่ 4.8 แสดงเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเมื่อเครือข่ายมีขนาดต่าง 30 50 และ 80 โหนด ในขั้นตอนที่ 1 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของการออกแบบในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะแปรผันตามขนาดของเครือข่าย โดยสามารถคำนวณค่าของจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ในเครือข่ายแต่ละขนาดได้ ดังนี้ เมื่อพิจารณาจำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 30 โหนด จะมีจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ในการออกแบบ 4 ค่า ได้แก่ ค่าของตัวแปรตัดสินใจในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่เป็นไปได้ (β_j) มีจำนวนเท่ากับ 110 ค่า ค่าของตัวแปรตัดสินใจในการเลือก



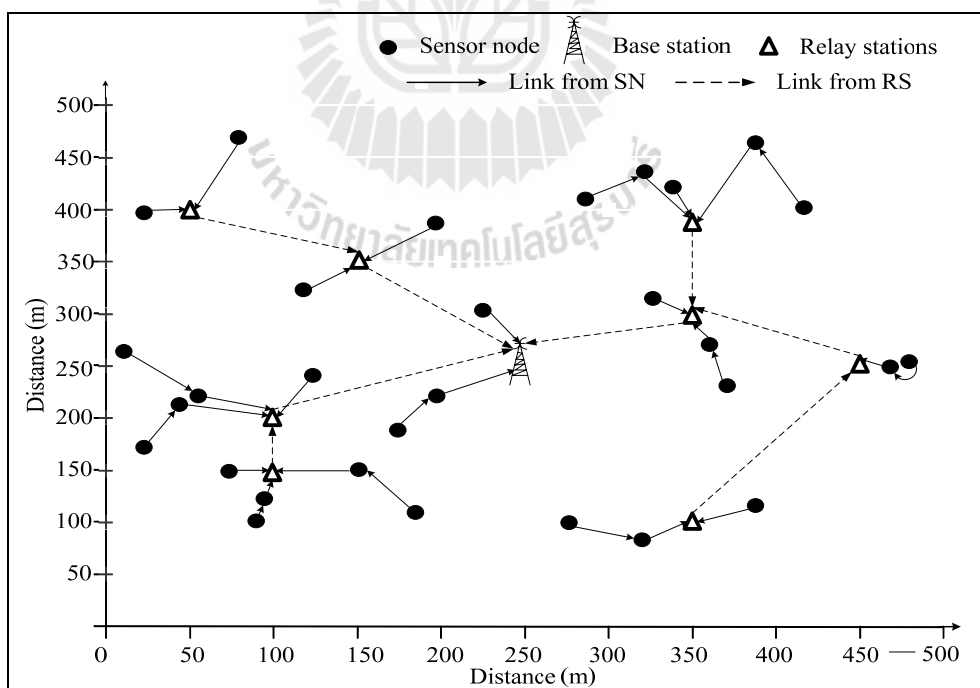
รูปที่ 4.16 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 1



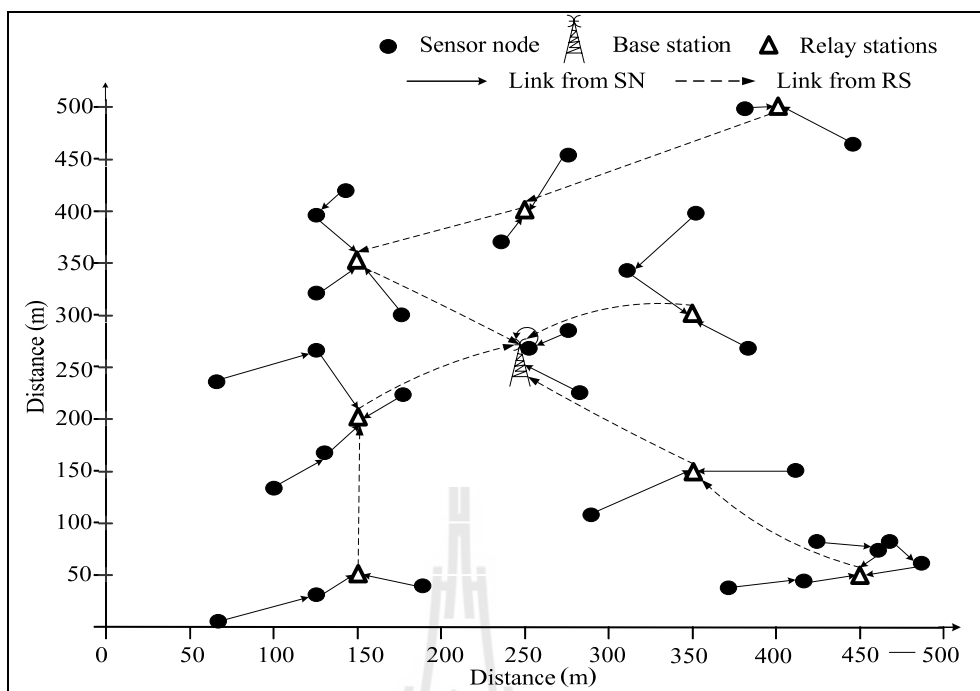
รูปที่ 4.17 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 2



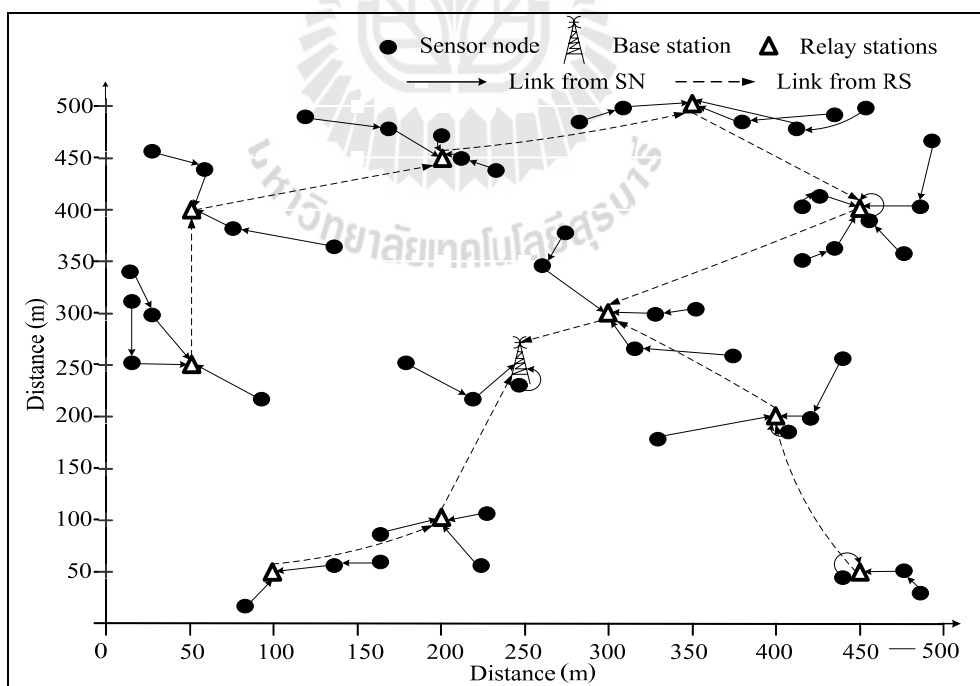
รูปที่ 4.18 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 3



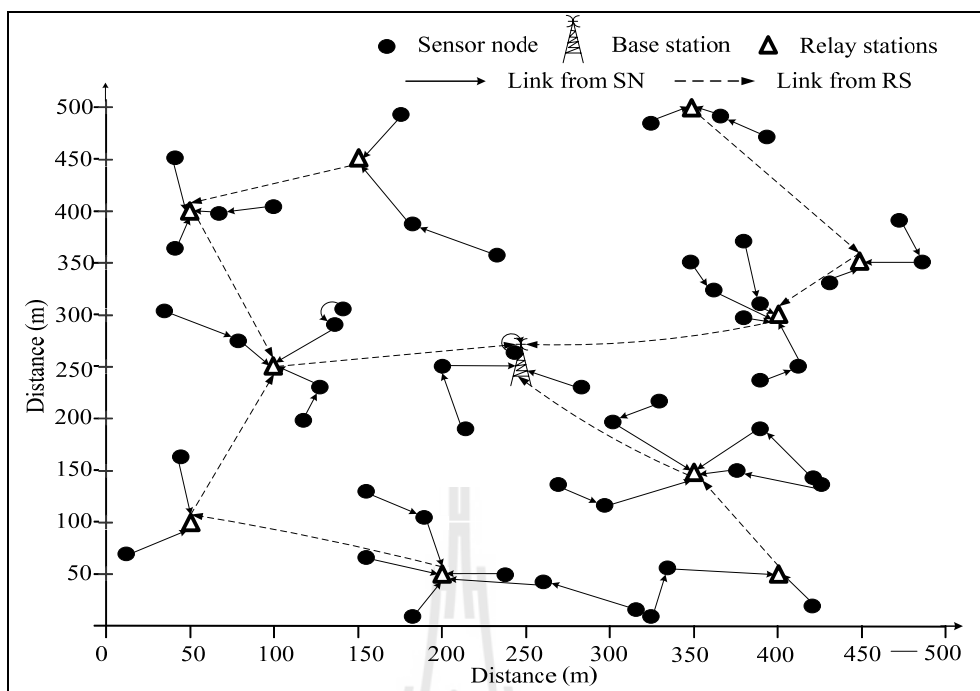
รูปที่ 4.19 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 4



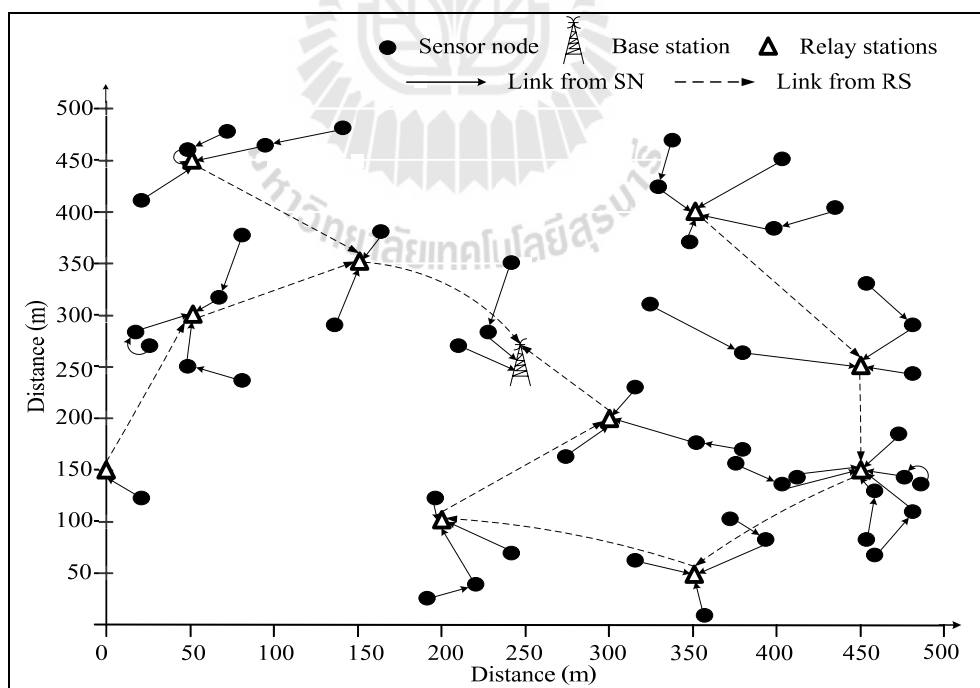
รูปที่ 4.20 ผลการทดลองเส้นทางกรส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 5



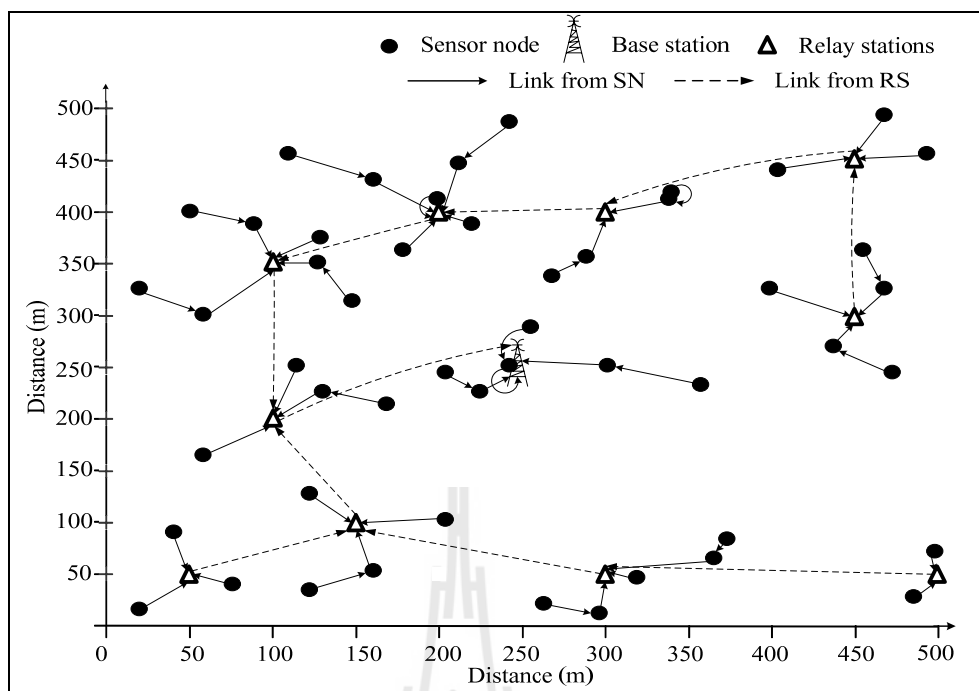
รูปที่ 4.21 ผลการทดลองเส้นทางกรส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด ครั้งที่ 1



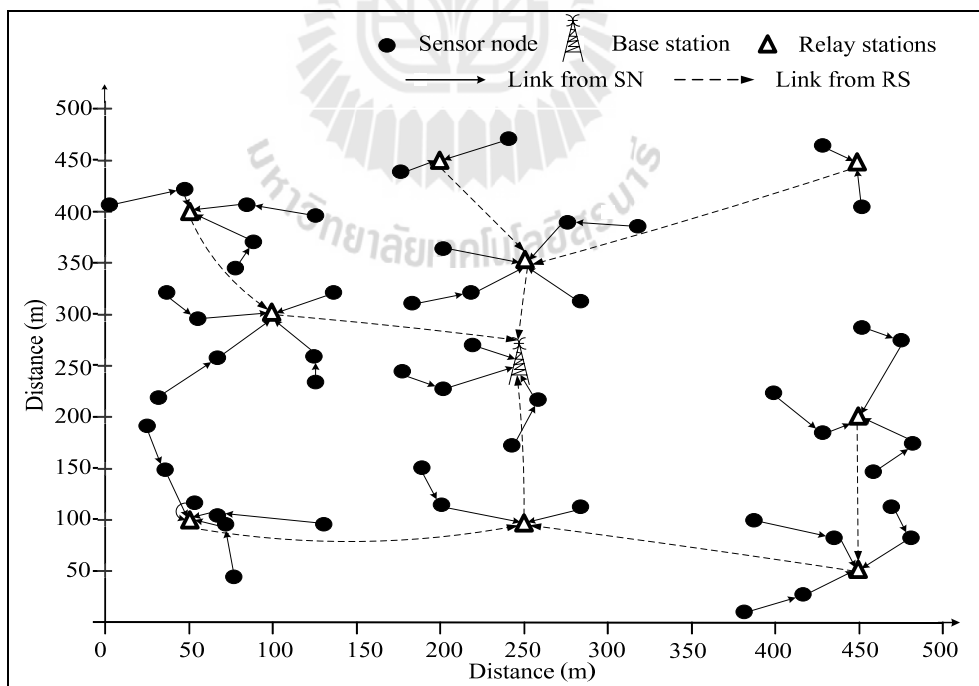
รูปที่ 4.22 ผลการทดลองเส้นทางกรส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด ครั้งที่ 2



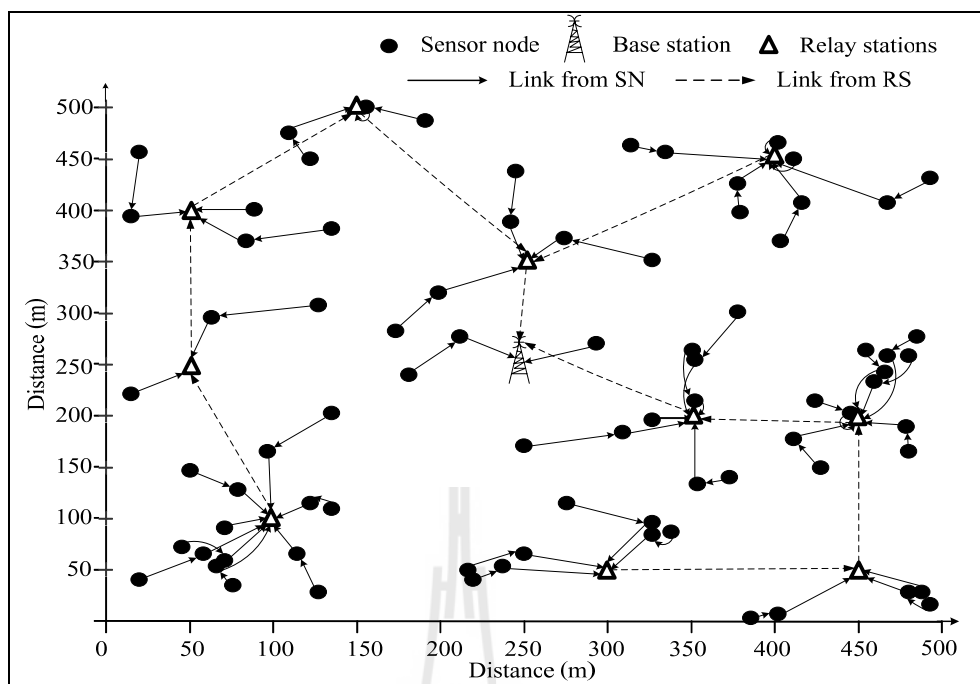
รูปที่ 4.23 ผลการทดลองเส้นทางกรส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด ครั้งที่ 3



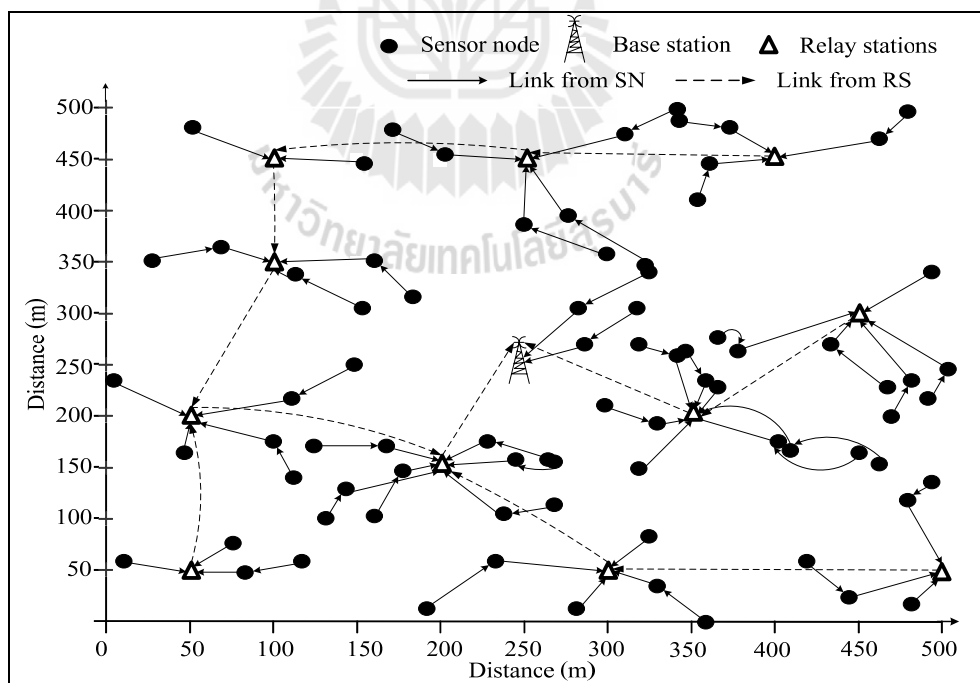
รูปที่ 4.24 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด ครั้งที่ 4



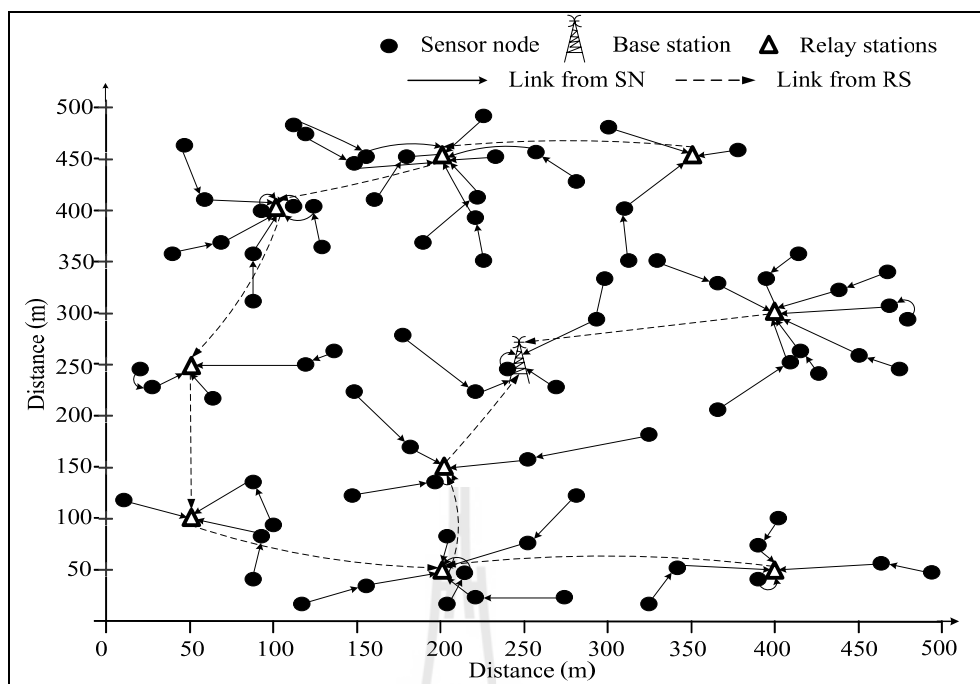
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด ครั้งที่ 5



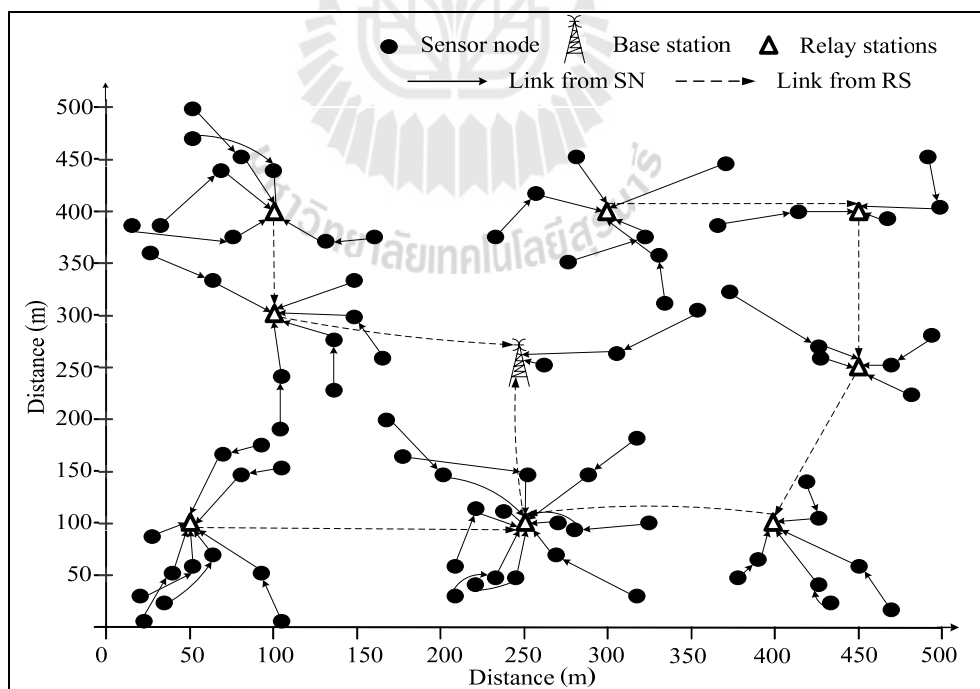
รูปที่ 4.26 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด ครั้งที่ 1



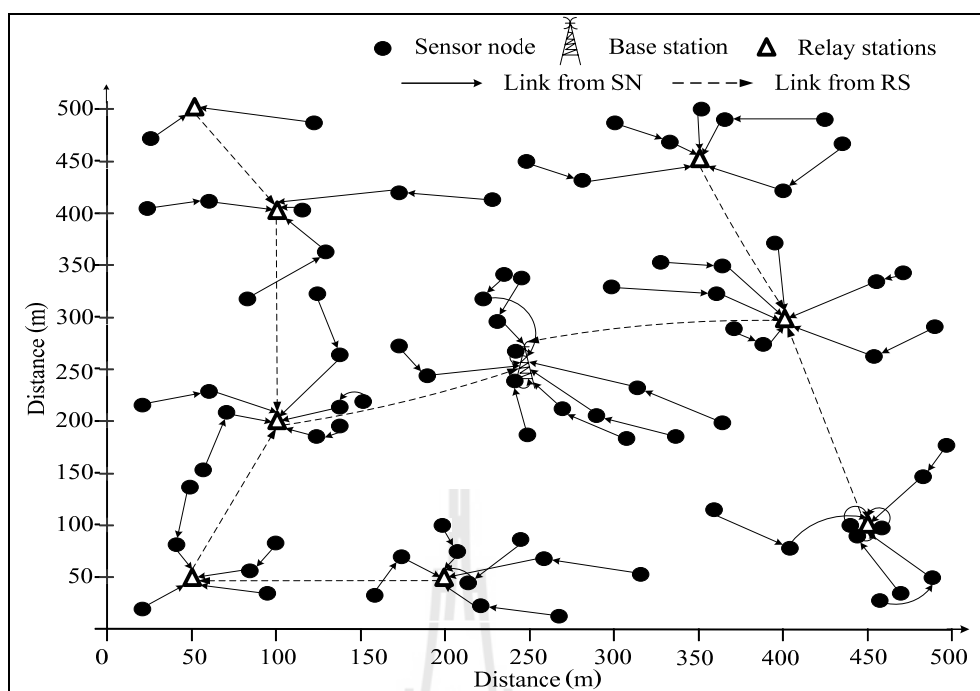
รูปที่ 4.27 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.28 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด ครั้งที่ 3



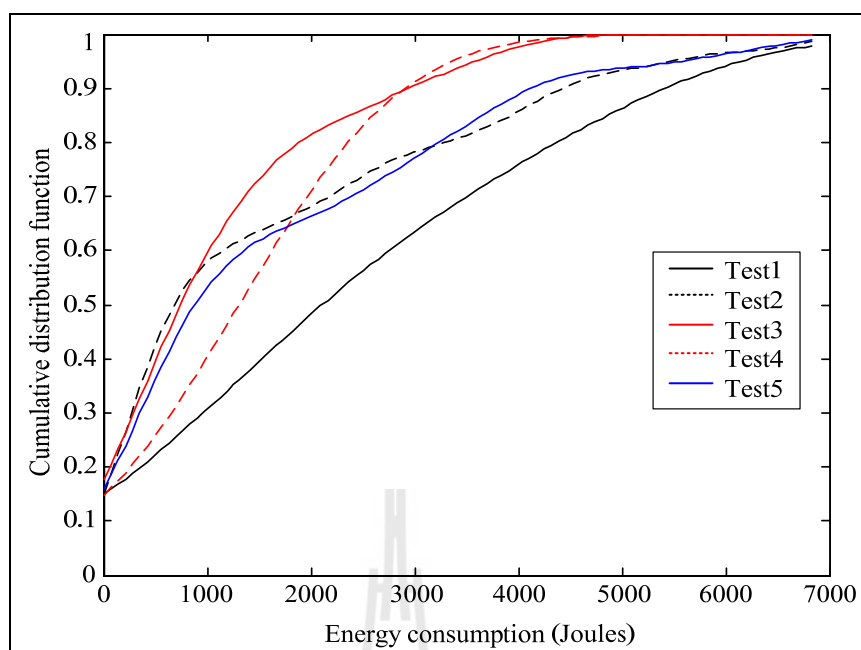
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด ครั้งที่ 4



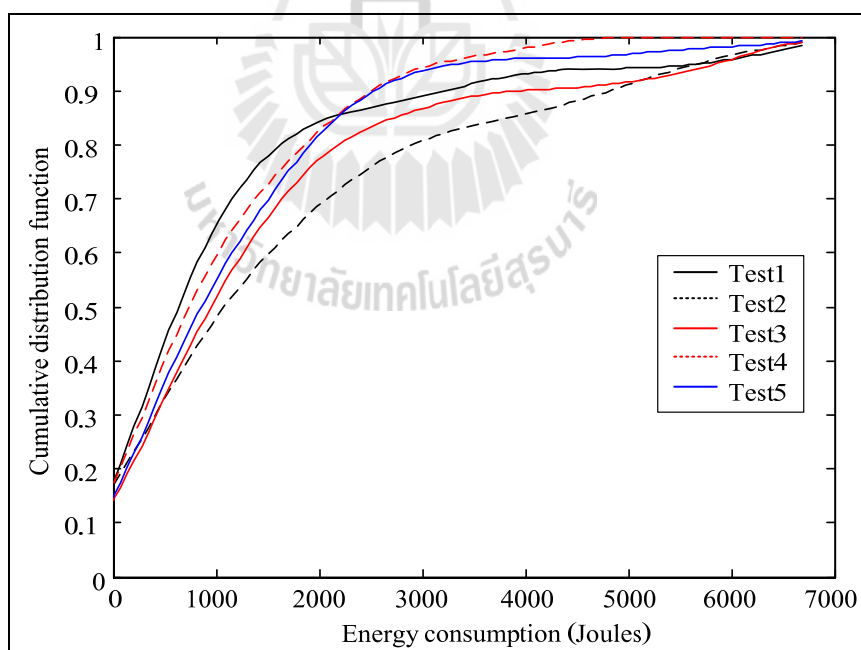
รูปที่ 4.30 ผลการทดลองเส้นทางการส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 80 โนด ครั้งที่ 5

จากรูปที่ 4.31 ถึง 4.33 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าเมื่อเครือข่ายมีขนาดเล็กคือ มีโนดตรวจรู้ในเครือข่ายจำนวนน้อยการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้จะมีความแตกต่างกันมาก แต่เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น คือ มีจำนวน โนดตรวจรู้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.32 และ 4.33 การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นจะมีค่าไม่ต่างกันมาก เนื่องจากเมื่อจำนวน โนดตรวจรู้เพิ่มขึ้น ทำให้โนดตรวจรู้มีการกระจายตัวอยู่บริเวณใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้การ ใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในการทดสอบแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน

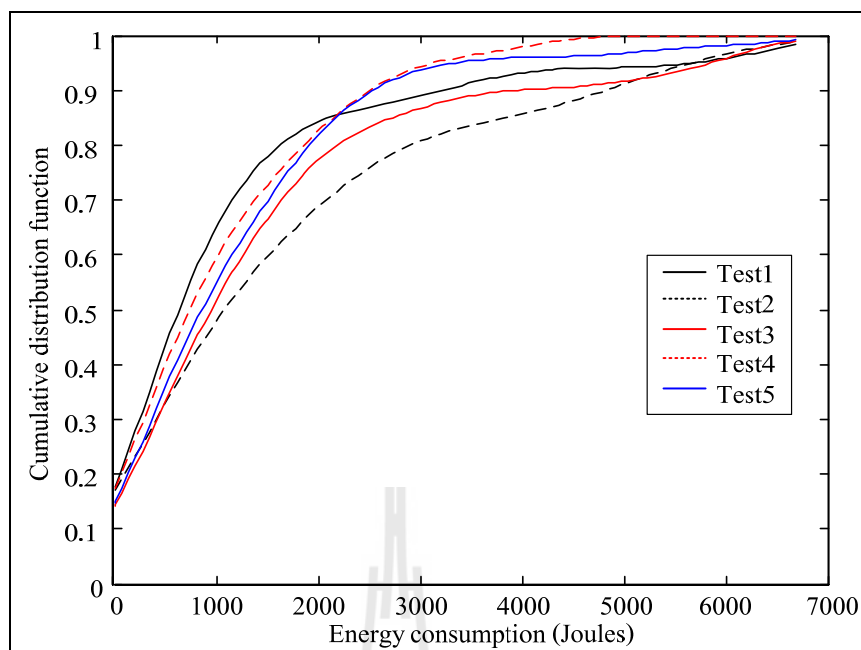
จากรูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปสำหรับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนด จะเห็นว่าเครือข่ายขนาด 50 โนด จะมีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่น้อยที่สุด ในขณะที่เครือข่ายที่มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ใกล้เคียงกันคือ เครือข่ายขนาด 30 และ 80 โนด แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงตำแหน่ง และจำนวนของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายอีกด้วย



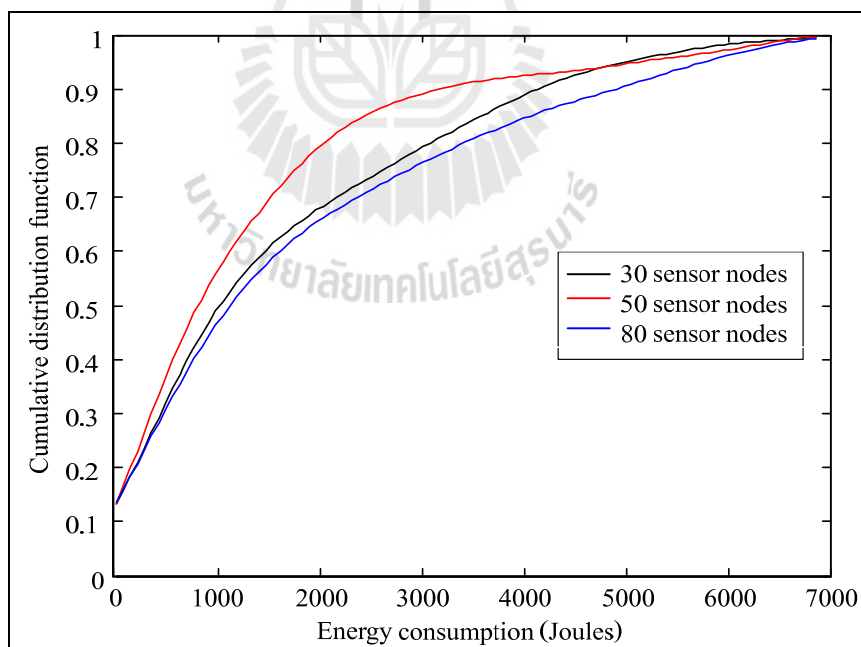
รูปที่ 4.31 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 30 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5



รูปที่ 4.32 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 50 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5



รูปที่ 4.33 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่าย 80 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไปในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการออกแบบ โครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการ วัตถุประสงค์เดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และศึกษาผลกระทบจากขนาดของเครือข่ายในเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่ 1 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด เครือข่ายที่ 2 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โนด และเครือข่ายที่ 3 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โนด และได้คำนวณค่าใช้จ่ายของเครือข่ายที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด และการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย จะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงจำนวน และตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดอีกด้วย โดยเครือข่ายที่มีการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายน้อยที่สุด คือ เครือข่ายขนาด 50 โนด เพราะติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากที่สุด และเครือข่ายที่ใช้พลังงานมากที่สุด คือเครือข่ายขนาด 80 โนด เพราะมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายมากที่สุด สำหรับค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 นั้นจะแปรผันตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย และระยะทางระหว่างโนด เนื่องจากจะต้องติดตั้งสายอากาศภาคส่งที่มีอัตราขยายสูง

4.2 การวิเคราะห์ผลของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่ต่างกัน

สำหรับหัวข้อที่ 4.1 ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน สำหรับในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการออกแบบการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นไปอีก 2 สองวัตถุประสงค์ ได้แก่ วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้พลังงานของโนดตรวจรู้ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 3 เพื่อให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การเบี่ยงเบนของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน ในการทดลองเพื่อคำนวณค่าพลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายนั้น จะใช้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.5 หัวข้อย่อยที่ 3.5.2 โดยในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย แยกออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และ กรณีที่สองเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ และได้ नियามตัวแปร พารามิเตอร์ค่าคงที่ต่าง ๆ ไว้ดังตารางที่ 4.1

4.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (Minimum Energy Relay Station Placement : MERP) ซึ่ง

ในการออกแบบการทดลองจะให้ความสนใจเกี่ยวกับการใช้พลังงานของโนคตรวजूแต่ละโนคในเครือข่าย เมื่อมีการเลือกติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุดเพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยจะมีตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่เป็นไปได้ทั้งหมด 110 ตำแหน่ง จากการออกแบบนี้เพื่อศึกษาผลของจำนวน และตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดภายในเครือข่ายทรูวู้ไร้สายที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวजूภายในเครือข่าย โดยตำแหน่งของโนคตรวजू สถานีถ่ายทอด และสถานีฐานแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.15 ในหัวข้อที่ 4.1 โดยการออกแบบการทดลองนี้ได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ : เพื่อให้โนคตรวजूในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

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

4.2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้โนคตรวजूที่ใช้พลังงานมากที่สุดในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (Minimize Maximum Energy Consumption: MMEC) ในการออกแบบการทดลองนี้เพื่อลดพลังงานของโนคตรวजूโนคที่ใช้พลังงานมากที่สุดให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด เพื่อให้โนคตรวजूในเครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างสมดุล คือมีระดับพลังงานใกล้เคียงกับโนคตรวजूโนคอื่น ๆ ในเครือข่าย โดยการออกแบบการทดลองนี้ได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 แต่จะมีการเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (4.2)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ : เพื่อให้โนคตรวजूที่ใช้พลังงานมากที่สุดในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

$$\text{Minimize } \max_{\forall i \in I} (T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_t \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib})) \quad (4.2)$$

ในกรณีนี้ สมการวัตถุประสงค์ที่ (4.2) จะคำนวณค่าพลังงานของโนคตรวजूทุก ๆ โนคในเครือข่าย และจะทำให้โนคตรวजूที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดมีการใช้พลังงานน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

4.2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การเบี่ยงเบนของการใช้พลังงานของโนคตรวजूมีค่าให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (Minimize Summation of Absolute Deviation:

MSAD) การออกแบบการทดลองนี้เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างสมดุล คือ เพื่อให้โนดตรวจรู้แต่ละ โหนดในเครือข่ายใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกับพลังงานเฉลี่ยของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย นั่นคือต้องการให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การเบี่ยงเบนของโนดตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุด โดยการออกแบบการทดลองนี้ได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (4.3)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ : เพื่อให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การเบี่ยงเบนของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

$$\text{Minimize} \quad \sum_{\forall i \in I} \left| M_i - \left(\frac{\sum_{\forall i \in I} M_i}{nbSN} \right) \right| \quad (4.3)$$

$$\text{เมื่อ} \quad M_i = T \left(E_r \sum_{\forall m \in I} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I} s_{ik} + E_r \sum_{\forall j \in I} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib} \right) \quad \forall i \in I$$

M_i คือ ค่าพลังงานของโนดตรวจรู้แต่ละ โหนดในเครือข่ายที่ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน (จูล)

N_{SN} คือ จำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่าย (โหนด)

ในกรณีนี้สมการวัตถุประสงค์ที่ (4.3) จะคำนวณผลรวมค่าสัมบูรณ์ของส่วนต่างระหว่างพลังงานของโนดตรวจรู้แต่ละ โหนดในเครือข่าย กับค่าเฉลี่ยของพลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพื่อให้มีค่าน้อยที่สุด

4.2.4 พารามิเตอร์ในการทดลอง

การทดลองในหัวข้อที่ 4.2 นี้ได้จำลองแบบเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาด กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร โดยประกอบไปด้วยสถานีฐาน 1 สถานี จะถูกติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางของเครือข่ายที่ตำแหน่ง (250, 250) มีตำแหน่งของโนดตรวจรู้ และตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.15 ส่วนของการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกเป็นค่าพลังงานของโนดตรวจรู้เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด และกรณีที่สองเป็นค่าพลังงานของโนดตรวจรู้เมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) และใช้สมการเงื่อนไขดังสารที่ (3.2) ถึง (3.12) ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.5 โดยทดสอบกับเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่ 1 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โหนด เครือข่ายที่ 2 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โหนด และเครือข่ายที่ 3 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โหนด โดยทำการทดสอบ

ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ และได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย ดังตารางที่ 4.1

4.2.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MERP) โดยทำการทดลองกับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ จะเห็นว่าในเครือข่ายขนาดเดียวกันจะมีค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่างกัน เนื่องจากการกระจายของโนดตรวจรู้ที่แตกต่างกัน และตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ต่างกัน และเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์จากจำนวนที่ติดตั้งได้น้อยที่สุดนั้น มีผลทำให้แต่ละเครือข่ายมีค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ลดลง เนื่องจากการติดตั้งโนดที่ช่วยในการรับ และส่งข้อมูลไปที่ปลายทางเพิ่มขึ้น ทำให้การรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง

จากตารางที่ 4.10 แสดงค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MMEC) โดยทำการทดลองกับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ จะเห็นว่าในเครือข่ายขนาดเดียวกันจะมีค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่างกัน เนื่องจากการกระจายของโนดตรวจรู้ที่แตกต่างกัน และตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ต่างกัน ในกรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดนั้นค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อมีการใช้วัตถุประสงค์ MMEC จะมีค่าสูงกว่ากรณีของวัตถุประสงค์ MERP เนื่องจากการใช้วัตถุประสงค์นี้มีวัตถุประสงค์ที่ให้ความสนใจกับโนดตรวจรู้โนดที่ใช้พลังงานมากที่สุดเพียงโนดเดียว โดยจะต้องหาเส้นทางการส่งข้อมูล หรือตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อทำให้ระดับการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้โนดที่ใช้พลังงานมากที่สุดมีการใช้พลังงานให้น้อยที่สุด ดังนั้นการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายจึงไม่จำเป็นต้องทำให้โนดตรวจรู้โนดอื่น ๆ ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามตำแหน่งของการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นจะต้องอยู่ภายใต้สมการเงื่อนไขที่กำหนด และทำให้โนดตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลไปถึงปลายทางได้ เมื่อมีสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์จากจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งน้อยที่สุดพบว่า จะส่งผลให้ค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในเครือข่ายลดลง เนื่องจากการติดตั้งโนดที่ช่วยในการรับ และส่งข้อมูลไปที่ปลายทางเพิ่มขึ้น ทำให้การรับและส่งข้อมูลระหว่างโนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง

ตารางที่ 4.9 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้เมื่อมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้ (MERP)

เครือข่าย	ค่าพลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย (จูล)						
	กรณี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย (S.D.)
เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 30 โนค	A	2454.57	1602.58	1066.22	1352.67	1642.89	1623.79 (361.9)
	B	1894.52	1132.96	673.63	990.90	1318.17	1202.04 (317.23)
เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 50 โนค	A	1136.98	1645.17	1453.21	1002.08	1160.59	1279.61 (317.26)
	B	866.12	1215.93	1175.60	890.48	955.97	1020.82 (165.32)
เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 80 โนค	A	1382.70	1966.26	1496.79	2080.99	1915.25	1768.4 (144.42)
	B	1129.16	1300.68	1246.51	1354.91	1598.96	1326.04 (200.13)

หมายเหตุ : กรณี A ติดตั้งสถานีถ่ายทอคน้อยที่สุด

กรณี B เพิ่มสถานีถ่ายทอขึ้น 10 เปอร์เซนต์ของกรณี A

จากตารางที่ 4.11 แสดงผลของค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MSAD) โดยทำการทดลองกับเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โนค ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ จะเห็นว่าในเครือข่ายขนาดเดียวกันจะมีค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่างกัน เนื่องจากการกระจายตัวของโนคตรวจรู้ที่แตกต่างกัน และตำแหน่งในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอที่ต่างกัน กรณีเมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอคน้อยที่สุด ค่าพลังงานเฉลี่ยของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MSAD จะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้วัตถุประสงค์ MMEC แต่เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าการทดลองเมื่อใช้วัตถุประสงค์นี้จะให้ค่าที่ต่ำกว่าการทดลองด้วยการใช้วัตถุประสงค์ MERP และ MMEC เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ต้องการให้ค่าพลังงานของโนคตรวจรู้เบี่ยงเบนจากค่าพลังงานเฉลี่ยให้น้อยที่สุด ซึ่งเมื่อสังเกตค่า

พลังงานเฉลี่ยในเครือข่ายพบว่าค่าพลังงานเฉลี่ยของวัตถุประสงค์นี้ยังมีค่าสูงกว่าวัตถุประสงค์ MERP แสดงให้เห็นว่าการเลือกเส้นทางส่งข้อมูลของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายนั้นยังไม่ใช้เส้นทางที่ทำให้มีการใช้พลังงานให้น้อยที่สุดดังเช่นวัตถุประสงค์ MERP เมื่อจำนวนโหนดตรวจรู้เพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์จากจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งน้อยที่สุด พบว่าค่าพลังงานเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีค่าลดลง เนื่องจากมีการติดตั้งโหนดที่ช่วยในการรับ และส่งข้อมูล ไปที่ปลายทางเพิ่มขึ้น ทำให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานลดลง

ตารางที่ 4.10 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้เมื่อมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้โหนดตรวจรู้ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MMEC)

เครือข่าย	ค่าพลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย (จูล)						ค่าเฉลี่ย (S.D.)
	กรณี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
เครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 30 โหนด	A	2838.36	2259.55	1320.81	1791.58	2083.02	2058.66 (324.35)
	B	2152.77	1717.82	910.48	1379.06	1636.48	1559.32 (276.99)
เครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 50 โหนด	A	1683.76	2599.99	1944.54	1418.46	1809.08	1891.17 (324.07)
	B	1254.66	1601.78	1962.41	1326.75	1502.30	1529.58 (267.31)
เครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้ 80 โหนด	A	2404.80	2718.58	2374.98	2427.39	2820.67	2549.28 (125.42)
	B	1718.40	2321.51	1700.00	2057.89	1920.76	1943.71 (144.23)

หมายเหตุ : กรณี A ติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

กรณี B เพิ่มสถานีถ่ายทอดขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ของกรณี A

ตารางที่ 4.11 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้เมื่อมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การเบี่ยงเบนของการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MSAD)

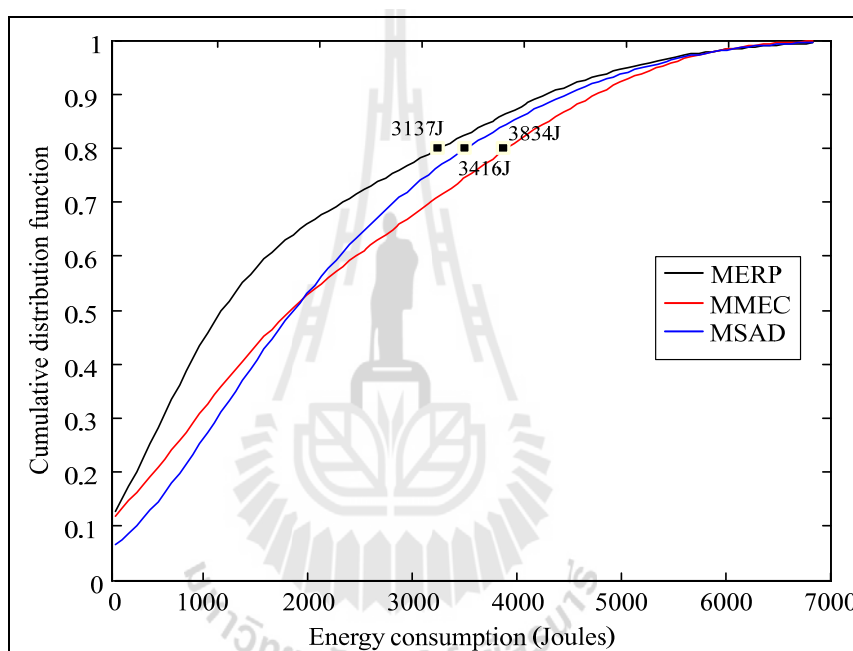
เครือข่าย	ค่าพลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่าย (จูล)						ค่าเฉลี่ย (S.D.)
	กรณี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 30 โนค	A	2614.05	2504.41	1341.77	1672.17	2148.12	2056.1 (331.04)
	B	2021.29	1439.45	762.97	1140.74	1637.95	1400.48 (248.16)
เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 50 โนค	A	1483.41	1899.05	1751.07	1124.10	1335.19	1518.56 (262.59)
	B	1128.98	1607.61	1306.48	1092.56	1057.42	1238.61 (134.29)
เครือข่ายที่มีโนคตรวจรู้ 80 โนค	A	1688.01	2604.86	1811.42	2389.63	2182.87	2135.36 (196.17)
	B	837.62	1330.15	823.26	1688.02	1756.80	1287.17 (218.83)

หมายเหตุ : กรณี A ติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

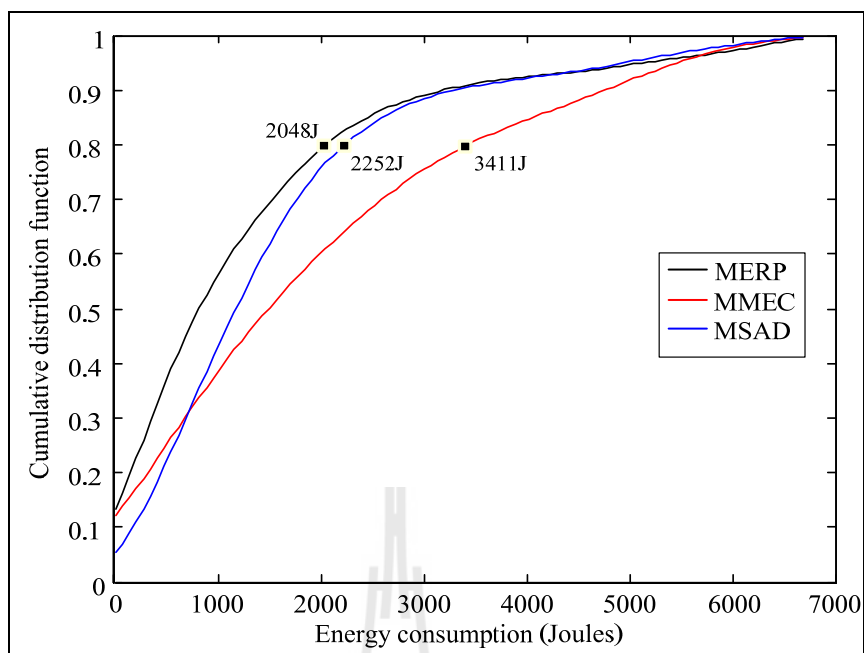
กรณี B เพิ่มสถานีถ่ายทอดขึ้น 10 เปอร์เซนต์ของกรณี A

จากรูปที่ 4.35 ถึง 4.37 แสดงผลกระทบของการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.35 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมในเครือข่ายขนาด 30 โนค จะเห็นว่าการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยวัตถุประสงค์ MERP นั้นจะทำให้โนคตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้วัตถุประสงค์อื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถทำให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และช่วยให้เครือข่ายมีการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะว่า MERP มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โนคตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน ส่วน MMEC มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โนคตรวจรู้ที่ใช้พลังงานมากที่สุดโนคตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน สำหรับ MSAD มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์การ

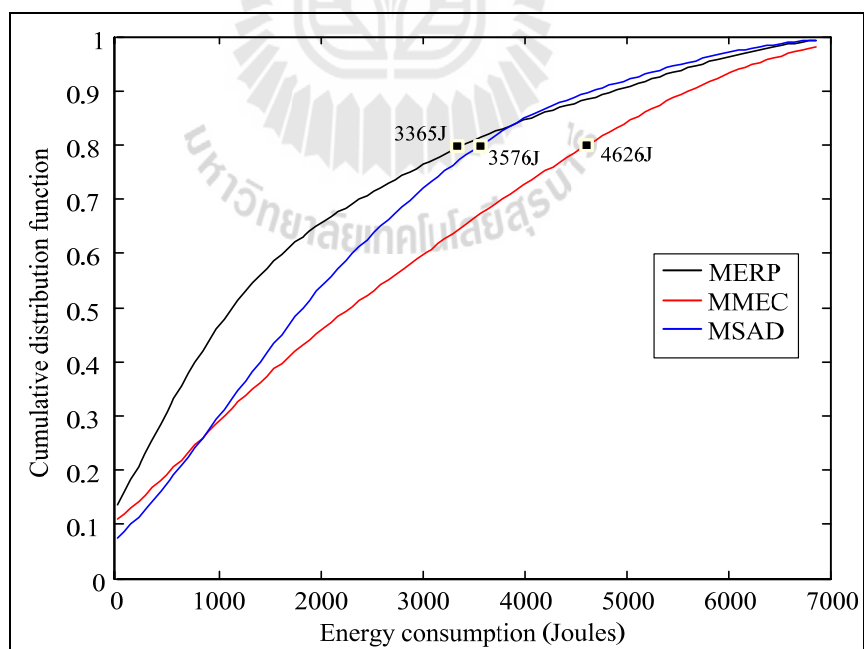
เบี่ยงเบนของการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน โดยทั้งสามวัสดุประสงค์นี้จะใช้เงื่อนงำในการออกแบบเช่นเดียวกันทั้งหมด เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการใช้ฟังก์ชันวัสดุประสงค์ MMEC จะทำให้โนคตรวจรู้มีการใช้พลังงานมากถึง 3834 จูลต่อโนค เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุประสงค์ MERP และ MSAD ที่มีการใช้พลังงาน 3137 จูล และ 3416 จูล ตามลำดับ จากรูปที่ 4.36 และ 4.37 มีแนวโน้มการใช้พลังงานที่เหมือนกันในการออกแบบเครือข่ายโดยใช้วัสดุประสงค์ที่แตกต่างกันในการออกแบบเครือข่ายขนาด 50 และ 80 โนค



รูปที่ 4.35 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมในเครือข่ายขนาด 30 โนค เมื่อใช้วัสดุประสงค์ต่างกัน กรณีที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

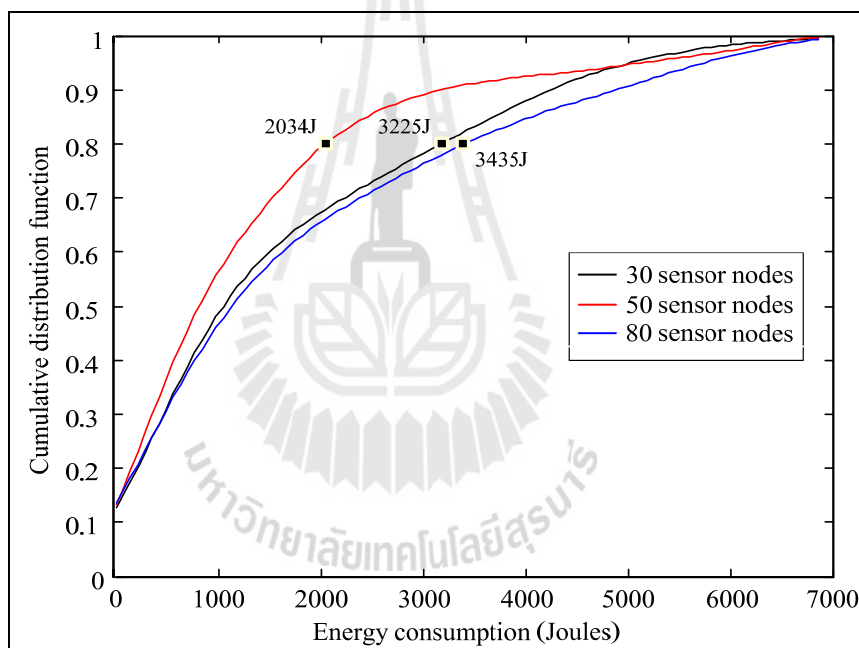


รูปที่ 4.36 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมในเครือข่ายขนาด 50 โนด เมื่อใช้วัตถุประสงค์ต่างกัน กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

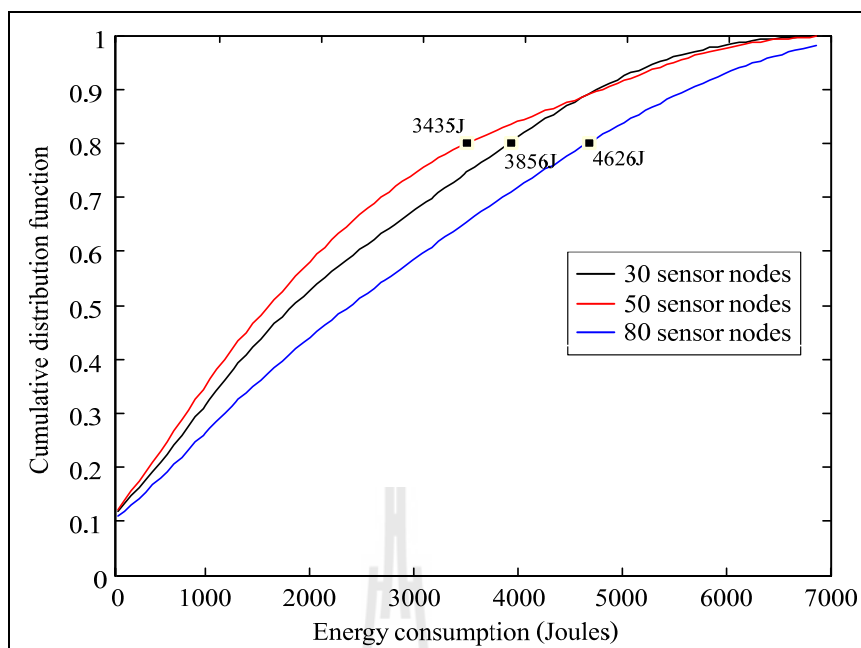


รูปที่ 4.37 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมในเครือข่ายขนาด 80 โนด เมื่อใช้วัตถุประสงค์ต่างกัน กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

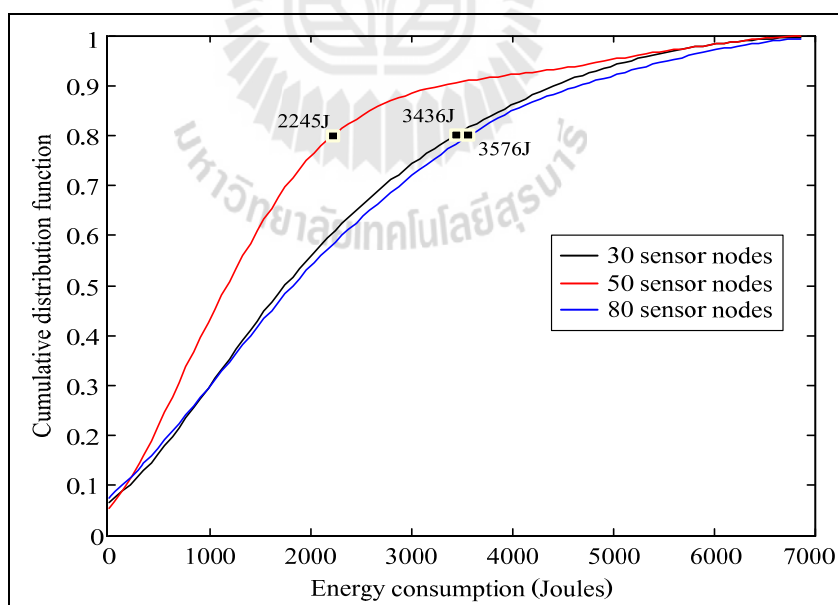
จากรูปที่ 4.38 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MERP ในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด กรณีที่ติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 50 โหนดนั้นจะมีการใช้พลังงานน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของโหนดในเครือข่ายพบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงาน 2034 จูลต่อโหนด เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายขนาด 30 และ 80 โหนด มีการใช้พลังงาน 3225 และ 3435 จูล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครือข่ายเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโหนดตรวจรู้ รวมถึง จำนวน และตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายอีกด้วย จากรูปที่ 4.39 และ 4.40 มีแนวโน้มการใช้พลังงานเช่นเดียวกันในการออกแบบเครือข่ายโดยใช้วัตถุประสงค์ MMEC และ MSAD ตามลำดับ



รูปที่ 4.38 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MERP ในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

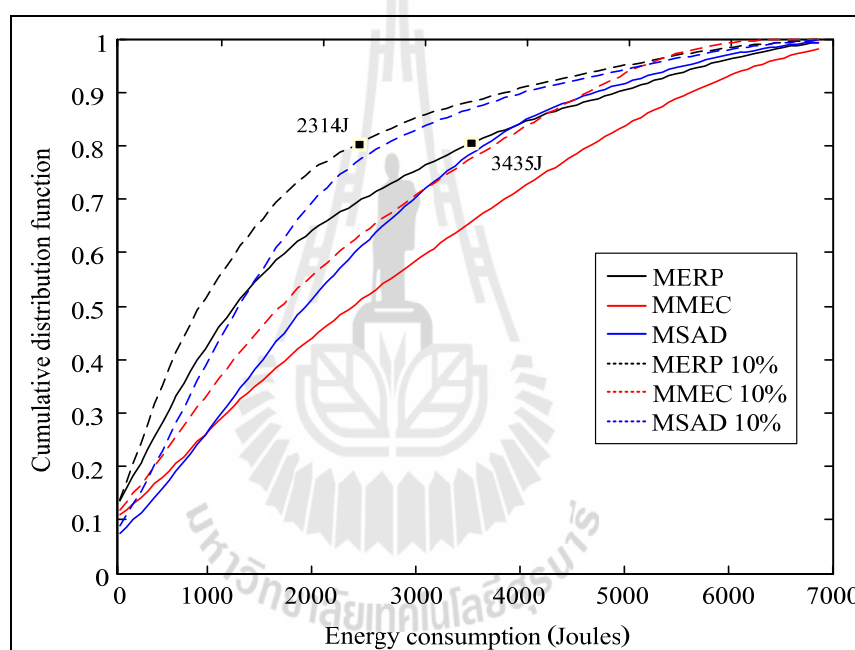


รูปที่ 4.39 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MMEC ในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด



รูปที่ 4.40 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้วัตถุประสงค์ MSAD ในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด

จากรูปที่ 4.41 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้วัตถุดิบประเภทที่ต่างกันในเครือข่ายขนาด 80 โหนด เพื่อศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายกรณีที่มีงบประมาณในการลงทุนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเมื่อใช้วัตถุดิบประเภท MERP พบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด จะเห็นว่าโหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในเครือข่าย 3435 จูล และเมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าโหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในเครือข่ายลดลงเหลือ 2314 จูล แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายจะส่งผลให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานลดลง แต่ก็ต้องแลกกับงบประมาณในการลงทุนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.41 ฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้วัตถุดิบประเภทที่ต่างกันในเครือข่ายขนาด 80 โหนด เมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด และสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น 10 %

จากหัวข้อ 4.2 ได้แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้วัตถุดิบประเภทที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยทำการทดลองในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 จากผลการทดลองจะเห็นว่าวัตถุดิบประเภทที่ทำให้เครือข่ายมีระดับพลังงานเฉลี่ยของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายน้อยที่สุด คือ วัตถุดิบประเภทเพื่อให้โหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MERP) ในขณะที่วัตถุดิบประเภทนี้จะทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีค่าในระดับ

ปานกลาง ซึ่งถือว่าเป็นวัตถุประสงค์ที่มีคุณภาพในแง่ของการทำให้เครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจะเลือกวัตถุประสงค์นี้ในการศึกษาฟังก์ชันสองวัตถุประสงค์ในหัวข้อถัดไป

4.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

ในหัวข้อนี้ได้เสนอผลของค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ที่มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน โดยวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์นั้นได้พิจารณาเลือกจากหัวข้อที่ 4.2 ที่แสดงถึงผลของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัตถุประสงค์ที่ทำให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ วัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MERP) และอีกวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่สนใจ คือ เพื่อให้เครือข่ายติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดของโนดตรวจรู้ จึงได้เพิ่มโนดพิเศษที่มีหน้ารับ และส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากโนดตรวจรู้ไปที่ปลายทาง ซึ่งเป็นโนดที่มีพลังงานที่ไม่จำกัด แต่ต้องใช้งบประมาณในการติดตั้งสูง เนื่องจากมีราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ โดยคำนึงถึงเส้นทางที่ทำให้โนดตรวจรู้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และคำนึงถึงงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาคำตอบที่น้อยที่สุด (minimization)

สำหรับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักเป็นวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียว โดยจะเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) มาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ (scalarized objective function) โดยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักพิจารณาจากความสำคัญของวัตถุประสงค์ คือ ถ้าวัตถุประสงค์ใดมีความสำคัญมากกว่า ค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นก็จะมีความมากกว่าอีกวัตถุประสงค์อื่น อย่างไรก็ตามการเลือกพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อขนาด (magnitude) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักนั้นจึงต้องทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นบรรทัดฐาน (normalize) เดียวกัน เพื่อให้วัตถุประสงค์ที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน สำหรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เลือกใช้เพื่อคูณกับแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องรวมกันแล้วมีค่าเป็น 1 จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithms (Deb K. 2008) กล่าวว่า คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์นี้จะเป็น pareto-optimal ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเป็นบวกสำหรับทุก ๆ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณา

4.3.1 การกำหนดการทดลอง

การออกแบบการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก โดยพิจารณาการวางแผนโครงสร้างเครือข่ายตรวจไร้สายที่มีจำนวนโหนดตรวจ 50 โหนด ในพื้นที่ขนาด กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร โดยพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีสถานีฐาน 1 สถานี ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ที่จุดศูนย์กลางของเครือข่าย สำหรับพื้นที่ที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้นมีตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด 110 ตำแหน่ง และมีตำแหน่งของโหนดตรวจดังรูปที่ 4.8 โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.6 และใช้เงื่อนไขเดียวกับสมการที่ (3.2) ถึง (3.12) และกำหนดให้ใช้ค่าคงที่ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 สำหรับการพิจารณาฟังก์ชันสองวัตถุประสงค์ในการทดลองนั้น จะเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 จากหัวข้อที่ 4.2 คือ เพื่อให้โหนดตรวจใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน (MERP) เนื่องจากเป็นวัตถุประสงค์ที่ทำให้โหนดตรวจในเครือข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสองวัตถุประสงค์ที่ได้ศึกษามา และสำหรับวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่พิจารณา คือ เพื่อให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากงบประมาณในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งทั้งสองวัตถุประสงค์นั้นแสดงดังสมการที่ (4.4) และ (4.5)

วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โหนดตรวจในเครือข่ายใช้พลังงานในการรับและส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

$$f_1 = \sum_{\forall i \in I} (T(E_r \sum_{\forall m \in I}^{m \neq i} s_{mi} + E_t \sum_{\forall k \in I}^{k \neq i} s_{ik} + E_r \sum_{\forall j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib})) \quad (4.4)$$

วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้ติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน

$$f_2 = \sum_{\forall j \in J} \beta_j \quad (4.5)$$

ซึ่งจะต้องทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองจากสมการที่ (4.4) และ (4.5) เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน ดังสมการที่ (4.6) ดังนี้

$$F_1 = \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \quad \text{และ} \quad F_2 = \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (4.6)$$

- 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 (โนค)
 F_2 คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว
 f_2^{\min} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่น้อยที่สุด (โนค)
 f_2^{\max} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่มากที่สุด (โนค)

จากนั้นจะนำค่าถ่วงน้ำหนักมาคูณกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันแล้ว จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ ดังสมการที่ (4.7)

$$\text{Minimize } z = w_1 F_1 + w_2 F_2 \quad (4.7)$$

- เมื่อ z คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์
 w_1 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยที่ $w_1 = [0,1]$
 w_2 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 โดยที่ $w_2 = [0,1]$

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

4.3.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการทดลองเมื่อพิจารณาเครือข่ายขนาด 50 โนค ดังรูปที่ 4.8 นั้น ก่อนทำการหาคำตอบที่ดีที่สุดของทั้งสองวัตถุประสงค์จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลอง ได้แก่ ค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่น้อยที่สุด (f_1^{\min}) ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานรวมที่น้อยที่สุดที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับและส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน ภายใต้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.10) และเงื่อนไขจากสมการที่ (3.12) จากหัวข้อที่ 3.6 โดยจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งได้มากที่สุดนั้นจะต้องไม่เกินงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่ คือ 25 โนค ส่วนค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่มากที่สุด (f_1^{\max}) นั้นคำนวณได้

จากพลังงานรวมที่มากที่สุดที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน ภายใต้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.10) และเงื่อนไขจากสมการที่ (3.12) จากหัวข้อที่ 3.6 โดยสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งนั้นจะมีจำนวนน้อยที่สุด ถัดมาในส่วนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 นั้นสามารถหาค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่น้อยที่สุด (f_2^{\min}) ได้จากการกำหนดปัญหาเป็นการหาคำตอบที่น้อยที่สุดของจำนวนสถานีถ่ายทอด (Minimize number of relay station placement) ที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดทดสอบกับเครือข่ายขนาด 50 โนด ดังรูปที่ (4.8) โดยใช้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.2) ถึง (3.10) และ (3.12) โดยจะไม่มีเงื่อนไขของจำนวนสถานีถ่ายทอด นั่นคือจะไม่ใช้เงื่อนไขของสมการที่ (3.11) และค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่มีค่ามากที่สุด (f_2^{\max}) นั้นจะมีค่าเป็น 25 โนด ซึ่งเป็นจำนวนสถานีถ่ายทอดที่มากที่สุดที่สามารถติดตั้งได้เมื่อพิจารณาจากงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 50 โนด จากผลการทดลองจะสังเกตว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ หรือ f_1 มีค่าลดลง ในขณะที่จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย หรือ f_2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสร้างสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์นี้เป็นปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุด (minimization) ดังนั้นถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใดมีค่าถ่วงน้ำหนักที่มีค่ามากกว่าคุณอยู่กับวัตถุประสงค์นั้นจะทำให้วัตถุประสงค์นั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าอีกวัตถุประสงค์ เพราะจะทำให้ค่าของวัตถุประสงค์นั้นมีค่าลดลงมากกว่าอีกวัตถุประสงค์หนึ่ง เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเทียบได้กับการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียวโดยจะเหลือเพียงวัตถุประสงค์ที่ 2 เท่านั้น จะสังเกตเห็นว่าค่า f_2 นั้นจะมีค่าที่น้อยที่สุดเท่ากับ 10 โนด ส่งผลให้ f_1 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 119432.6 จูล เนื่องจากจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายมีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย แสดงให้เห็นว่าถ้าติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด โนดตรวจรู้จะมีการใช้พลังงานในเครือข่ายสูงสุด จากนั้นเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า 0.02 ไปจนถึง 0.3 นั้นจะสังเกตเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อ f_2 หรือจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย ทำให้ระดับพลังงานรวมในเครือข่ายมีค่าคงที่ เนื่องจากติดตั้งสถานีถ่ายทอดเท่ากับ 10 โนดทุก ๆ ค่าถ่วงน้ำหนัก และเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามากพอ จะส่งผลให้เครือข่ายต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเป็น 0.32 จะส่งผลต่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ทำให้ f_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11 โนด และการเพิ่มขึ้นของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะส่งผลต่อค่า f_1 และ f_2 ไปจนกระทั่งเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเป็น 1 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณา

วัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักที่คุณอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ 2 นั้นมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาจากคำตอบที่ได้พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 นั้นจะส่งต่อจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย หรือ f_2 ทำให้ต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากที่สุด เพื่อให้ค่าพลังงานรวมที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้มีค่าลดลงต่ำที่สุด จากการทดลองพบว่าในเครือข่ายนี้เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดมากที่สุดจะทำให้เครือข่ายมีพลังงานเท่ากับ 9892.63 จูล แสดงให้เห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักมีอิทธิพลต่อความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นั่นคือ ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักที่คุณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่คุณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 แล้ว ก็จะส่งผลให้ค่า f_1 มีค่าลดลง และส่งผลให้ค่า f_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ก็ต่อเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าสูงพอที่จะทำให้วัตถุประสงค์ที่ 1 มีความสำคัญมากกว่าวัตถุประสงค์ที่ 2 หรือกล่าวได้ว่า ค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คุณอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักค่านั้น



ตารางที่ 4.12 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง
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	10	119432.6	1	0
0.02	0.98	114.6	10	72660.69	0.573018	0
0.04	0.96	229.21	10	72660.69	0.573018	0
0.06	0.94	343.81	10	72660.69	0.573018	0
0.08	0.92	458.41	10	72660.69	0.573018	0
0.1	0.9	573.02	10	72660.69	0.573018	0
0.12	0.88	687.62	10	72660.69	0.573018	0
0.14	0.86	802.22	10	72660.69	0.573018	0
0.16	0.84	916.83	10	72660.69	0.573018	0
0.18	0.82	1031.43	10	72660.69	0.573018	0
0.2	0.8	1146.04	10	72660.69	0.573018	0
0.22	0.78	1260.64	10	72660.69	0.573018	0
0.24	0.76	1375.24	10	72660.69	0.573018	0
0.26	0.74	1489.85	10	72660.69	0.573018	0
0.28	0.72	1604.45	10	72660.69	0.573018	0
0.3	0.7	1719.05	10	72660.69	0.573018	0
0.32	0.68	2109.28	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.34	0.66	1948.26	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.36	0.64	2033.35	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.38	0.62	2109.28	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.4	0.6	2185.2	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.42	0.58	2261.13	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.44	0.56	2337.06	11	58780.21	0.446302	0.0667
0.46	0.54	2395.26	12	49785.43	0.364189	0.1333
0.48	0.52	2431.03	13	41636.64	0.289798	0.2
0.5	0.5	2448.99	13	41636.64	0.289798	0.2

ตารางที่ 4.12 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	13	41636.64	0.289798	0.2
0.54	0.46	2482.7	14	35371.01	0.232599	0.2667
0.56	0.44	2475.89	14	35371.01	0.232599	0.2667
0.58	0.42	2469.08	14	35371.01	0.232599	0.2667
0.6	0.4	2462.26	14	35371.01	0.232599	0.2667
0.62	0.38	2441.27	16	26168.71	0.148591	0.4
0.64	0.36	2390.98	16	26168.71	0.148591	0.4
0.66	0.34	2340.7	16	26168.71	0.148591	0.4
0.68	0.32	2290.42	16	26168.71	0.148591	0.4
0.7	0.3	2240.06	17	23037.81	0.120009	0.4667
0.72	0.28	2170.73	17	23037.81	0.120009	0.4667
0.74	0.26	2101.4	17	23037.81	0.120009	0.4667
0.76	0.24	2023.71	18	20611.27	0.097857	0.5333
0.78	0.22	1933.27	19	18504.56	0.078624	0.6
0.8	0.2	1802.47	21	14490.01	0.041975	0.7333
0.82	0.18	1664.2	21	14490.01	0.041975	0.7333
0.84	0.16	1525.93	21	14490.01	0.041975	0.7333
0.86	0.14	1372.15	22	13103.70	0.02932	0.8
0.88	0.12	1191.16	24	10777.79	0.008086	0.9333
0.9	0.1	1000.05	25	9892.63	0	1
0.92	0.08	800.05	25	9892.63	0	1
0.94	0.06	600.05	25	9892.63	0	1
0.96	0.04	400.05	25	9892.63	0	1
0.98	0.02	200.06	25	9892.63	0	1
1	0	0.0573	25	9892.63	0	1

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้เสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงคที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการแปลงสมการสองวัตถุประสงคให้เป็นวัตถุประสงคเดียว โดยศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค คือ วัตถุประสงคที่ 1 เพื่อให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปมีค่าน้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงคที่ 2 เพื่อให้เครือข่ายติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยมีงบประมาณติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดสูงที่สุดได้ไม่เกิน 25 โนค จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงคที่ 1 มีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงคที่ 2 แล้ว จะส่งผลให้มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนเพิ่มขึ้น เพื่อให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปมีค่าน้อยที่สุดในขณะที่เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงคที่ 2 มีค่าสูงมากพอ จะส่งผลให้เครือข่ายติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดลดลง ทำให้พลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไปมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับวัตถุประสงคที่มันถูกอยู่ คือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงคที่ 1 มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง หรือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงคที่ 1 มีค่าลดลงจะทำให้จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น

4.4 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงคที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักและศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย

ดังที่ได้กล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงคให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงคแบบสเกลาร์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และการวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนักที่มีผลต่อคำตอบที่ดีที่สุด ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นการแลกเปลี่ยนของสองวัตถุประสงคที่ทำการศึกษา คือ วัตถุประสงคที่ 1 ต้องการให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงคที่ 2 คือ ต้องการให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดเพื่อให้เครือข่ายทำงานได้ตลอดอายุการใช้งาน สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงคที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายที่ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย

4.4.1 การกำหนดการทดลอง

การออกแบบในหัวข้อนี้ได้จำลองแบบเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาด กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร โดยประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานี ติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของเครือข่าย มีตำแหน่งของโนคตรวจรู้ และตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.5 โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.6 โดยทดสอบกับเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่

เครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด 50 โนด และ 80 โนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ และได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย ดังตารางที่ 4.1

ในการรัน โปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละเครือข่ายนั้น จะแบ่งการหาคำตอบที่ดีที่สุดออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่หนึ่งเป็นการหาคำตอบของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย เพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด (f_2^{\min}) โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาคำตอบที่น้อยที่สุด ถัดมาในขั้นตอนที่สองนั้น จะเพิ่มเงื่อนไขของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่ายทุกเครือข่ายให้มีจำนวนไม่เกิน 25 โนด (f_2^{\max}) ซึ่งเป็นจำนวนสถานีถ่ายทอดสูงสุดที่สามารถติดตั้งได้ภายในเครือข่ายภายใต้งบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด จากนั้นจะนำสมการที่ (3.2) ถึง (3.12) จากหัวข้อที่ 3.5 มากำหนดเป็นเงื่อนไขในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยทำการรันโปรแกรมหาคำตอบของพลังงานที่น้อยที่สุดที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับและส่งข้อมูลภายในระยะเวลาที่กำหนด (f_1^{\min}) และหาคำตอบของพลังงานที่มากที่สุดที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลภายในระยะเวลาที่กำหนด (f_1^{\max}) จากนั้นจึงรันโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ (f_1) โดยเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสองค่า โดยเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 ขึ้นทีละ 0.02 ในขณะที่ลดค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 ลงทีละ 0.02 แล้วทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โนด ได้ดังรูปที่ 4.42 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ

4.4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

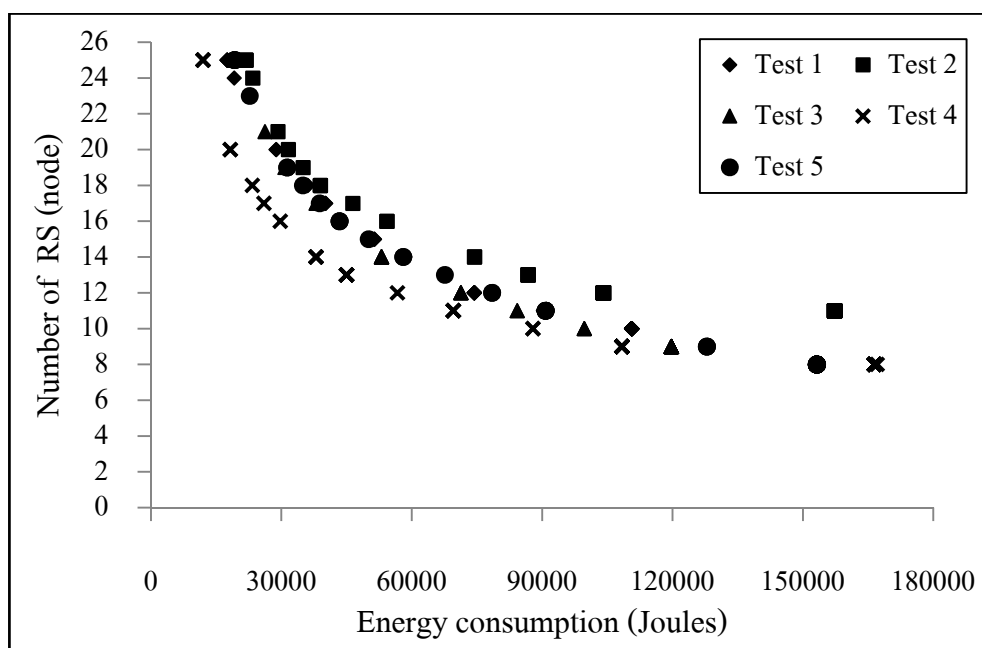
จากรูปที่ 4.42 แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างสองวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์เพื่อให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด จากกราฟจะแสดงให้เห็นถึง pareto front ซึ่งแสดงถึงการเรียงตัวเป็นแนวเส้นของค่าคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้นช่วงละ 0.02 และค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองมีค่าลดลงช่วงละ 0.02 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีการแลกเปลี่ยนแบบแปรผกผัน โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ พลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลจะมีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายนั้นมีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย เพราะการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจะทำให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลลดลง แต่เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจนถึงจำนวนประมาณ 16 โนด การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย จะมีผลต่อการใช้พลังงานของ

โนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง ซึ่งในการทดสอบครั้งที่ 1 ถึง 5 นี้จะมีผลการทดลองต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งมีตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่แตกต่างกัน

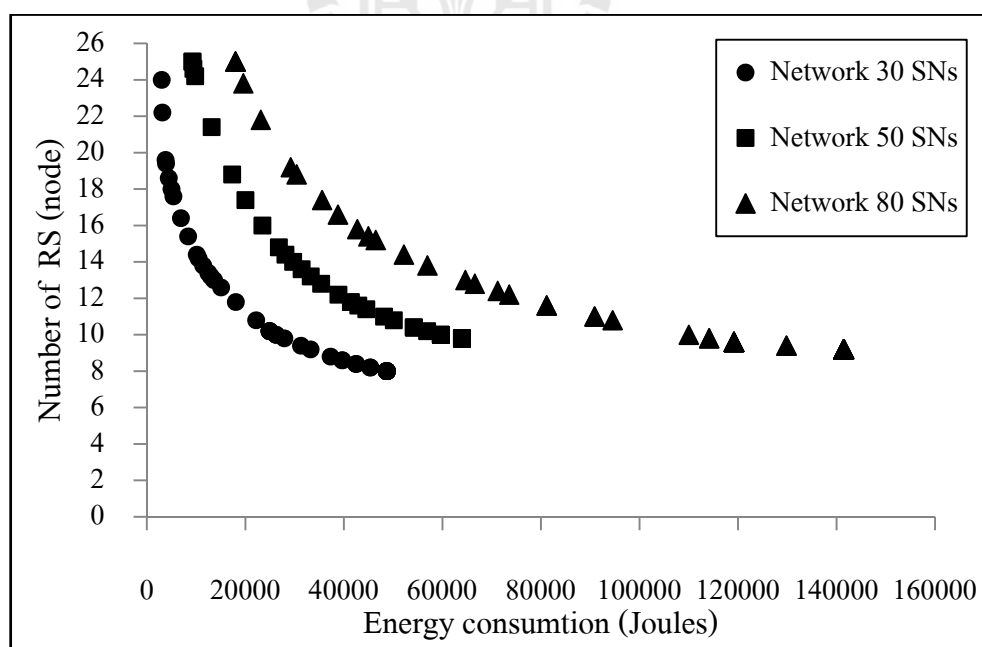
จากรูปที่ 4.43 แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างสองวัตถุประสงค์เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 50 โนด จะเห็นว่าผลการทดลองจะเป็นไปในทำนองเดียวกับเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด แต่ค่าของวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจนถึงจำนวนประมาณ 22 โนด การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย จะมีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยการทดสอบทั้ง 5 ครั้งจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากแต่ละการทดสอบมีตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.44 แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างสองวัตถุประสงค์เมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 80 โนด จะเห็นว่าผลการทดลองจะเป็นไปในทำนองเดียวกับเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด และ 50 โนด แต่การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ภายในเครือข่ายจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากมีจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจนถึงจำนวนประมาณ 20 โนด การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่าย จะมีผลต่อการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยการทดสอบทั้ง 5 ครั้งจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากแต่ละการทดสอบมีตำแหน่งการกระจายตัวของโนดตรวจรู้ที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.45 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โนด โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้งด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก พบว่าเครือข่ายทั้งสามขนาดจะมีผลการทดลองที่เป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ การใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายจะลดลง เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น โดยโนดตรวจรู้จะมีการใช้พลังงานสูงสุดในเครือข่ายเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โนด และมีการใช้พลังงานลดลงเมื่อจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีจำนวนลดลง

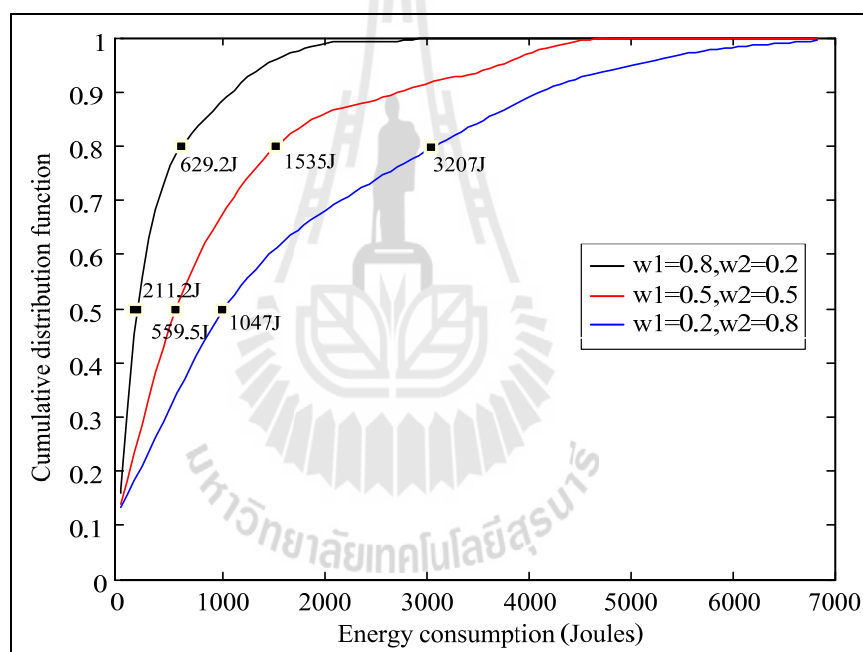


รูปที่ 4.44 คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 80 โหนด ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

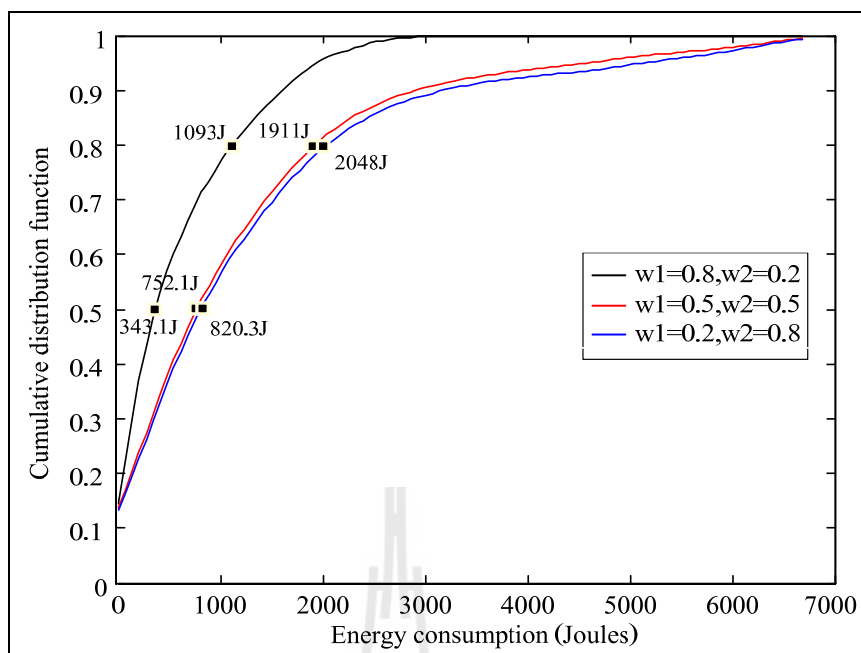


รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โหนด ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

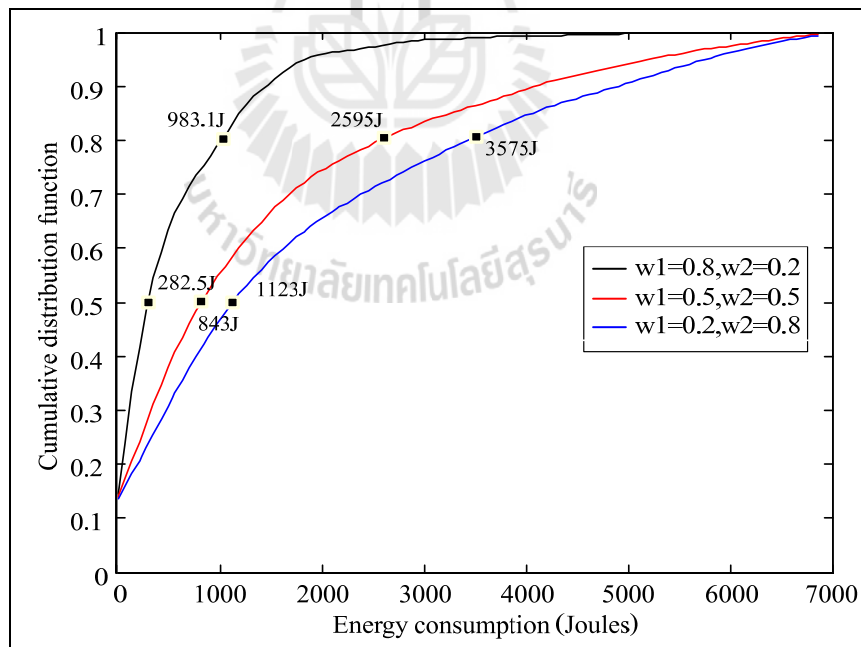
จากรูปที่ 4.46 ถึง 4.48 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแตกต่างกันในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.46 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมในเครือข่าย 30 โหนดเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 (w_1) เท่ากับ 0.2 พบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานมากถึง 3207 จูลต่อโหนด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่มีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.5 พบว่าโหนดตรวจรู้มีการใช้พลังงาน 629.2 และ 1535 จูล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักส่งผลต่อการใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย โดยเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามาก จะทำให้การใช้พลังงานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง จากรูปที่ 4.47 และ 4.48 มีแนวโน้มการใช้พลังงานเช่นเดียวกันในเครือข่ายขนาด 50 และ 80 โหนด



รูปที่ 4.46 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 30 โหนด



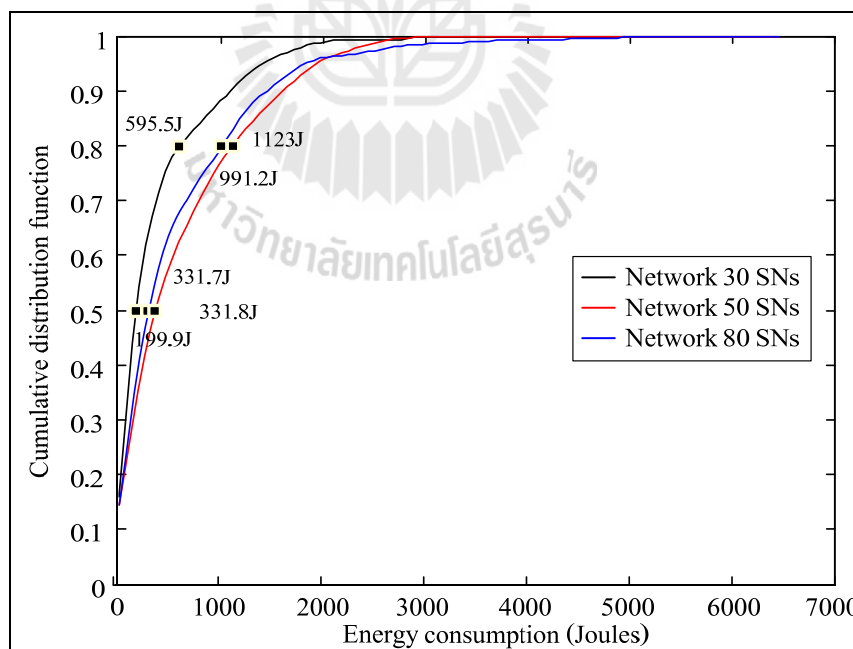
รูปที่ 4.47 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 50 โหนด



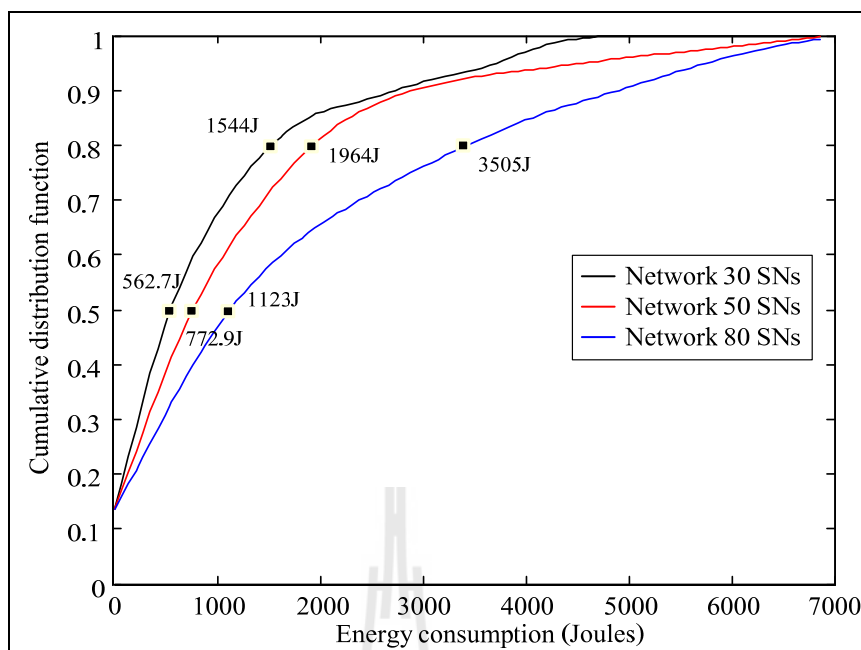
รูปที่ 4.48 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันในเครือข่ายขนาด 80 โหนด

จากรูปที่ 4.49 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 (w_1) มีค่า 0.8 และค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 (w_2) มีค่า 0.2 ในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด จะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าสูงกว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 แสดงว่าเครือข่ายจะต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวนมากเพื่อให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานน้อยที่สุด จากรูปจะเห็นว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายขนาด 50 โหนด มีการใช้พลังงานมากถึง 1123 จูล เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายขนาด 30 และ 80 โหนด ที่โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงาน 595.5 และ 991.2 จูล ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.50 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 (w_1) มีค่า 0.5 และค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 (w_2) มีค่า 0.5 ในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด จะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของทั้งสองวัตถุประสงค์มีค่าเท่ากัน แสดงว่าเครือข่ายจะต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีจำนวนน้อยกว่ากรณีที่ค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่ามากกว่าวัตถุประสงค์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายขนาด 80 โหนด มีการใช้พลังงานมากถึง 3505 จูลต่อโหนด เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายขนาด 30 และ 50 โหนด ที่โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงาน 1544 จูล และ 1964 จูล ตามลำดับ

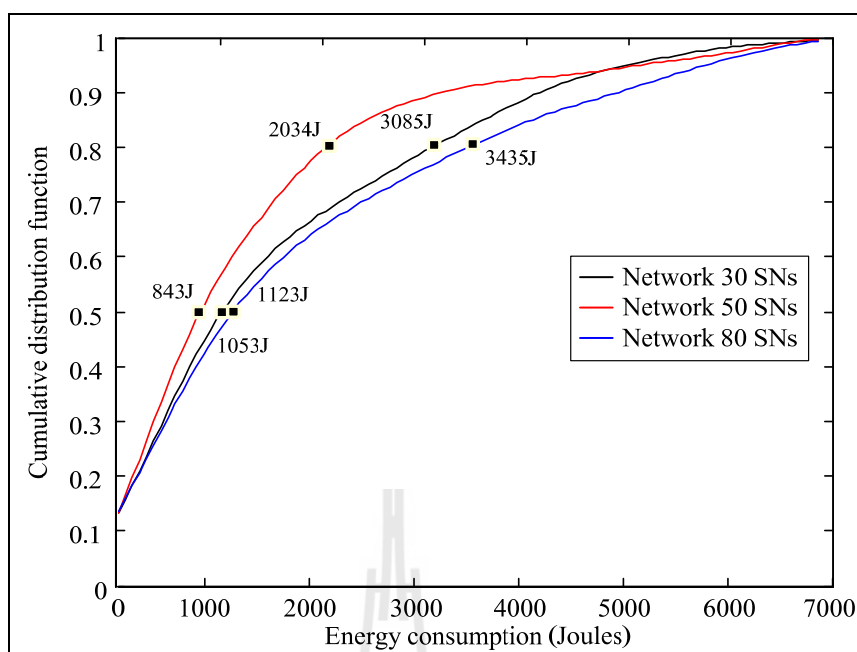


รูปที่ 4.49 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อ $w_1=0.8$, $w_2=0.2$ ในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด



รูปที่ 4.50 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อ $w_1=0.5$, $w_2=0.5$ ในเครือข่าย
ขนาด 30 50 และ 80 โหนด

จากรูปที่ 4.51 แสดงฟังก์ชันแจกแจงสะสมเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 (w_1) มีค่า 0.2 และค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 (w_2) มีค่า 0.8 ในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด จะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าน้อยกว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ 2 แสดงว่าเครือข่ายจะต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด ดังนั้นจะส่งผลให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายจะมีการใช้พลังงานมากขึ้น จากรูปจะเห็นว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายขนาด 80 โหนด มีการใช้พลังงานมากถึง 3435 จูลต่อ โหนด เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายขนาด 50 และ 30 โหนด ที่โนดตรวจรู้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงาน 2034 จูล และ 3085 จูล ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเมื่อ $w_1=0.2$, $w_2=0.8$ ในเครือข่าย
ขนาด 30 50 และ 80 โหนด

สำหรับการออกแบบในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และศึกษาผลกระทบจากขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวัตถุประสงค์ที่ศึกษามีการแลกเปลี่ยนแบบแปรผกผันกัน โดยการใช้งานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดตรวจรู้ในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น โดยเครือข่ายที่มีการใช้พลังงานสูงสุด คือ เครือข่ายขนาด 80 โหนด และการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการใช้งานของโหนดตรวจรู้ในเครือข่าย

4.5 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีลำดับชั้นและศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย

จากหัวข้อที่ 4.4 ได้แสดงการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักมาแล้ว สำหรับหัวข้อนี้จะได้นำเสนอวิธีการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นสมการวัตถุประสงค์เดียวด้วยวิธีลำดับชั้น เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาด

เครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย โดยมีวัตถุประสงค์ที่พิจารณาสองวัตถุประสงค์ คือ วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โนคตรวจรู้ใช้พลังงานในการรับ และส่งข้อมูลให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุดเพื่อให้เครือข่ายสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

4.5.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง

การออกแบบการทดลองในหัวข้อนี้มีขึ้นเพื่อศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ที่พิจารณา โดยจำลองแบบเครือข่ายที่มีพื้นที่ขนาด กว้าง 500 เมตร ยาว 500 เมตร โดยประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานี ติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของเครือข่าย มีตำแหน่งของโนคตรวจรู้ และตำแหน่งที่สามารถเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.5 โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.6 โดยทดสอบกับเครือข่าย 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค 50 โนค และ 80 โนค ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ และได้กำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย ดังตารางที่ 4.1

การแก้สมการหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีลำดับชั้นมีหลักการดังกล่าวในบทที่ 2 ของหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithms (Deb K. 2009) คือ ให้ค่างค่าของวัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญมากกว่าให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และให้วัตถุประสงค์อื่น ๆ ซึ่งมีความสำคัญรองลงมาเป็นเงื่อนไข โดยสามารถกำหนดค่าคงที่ที่ใช้เป็นเงื่อนไขตามความเหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 4.8

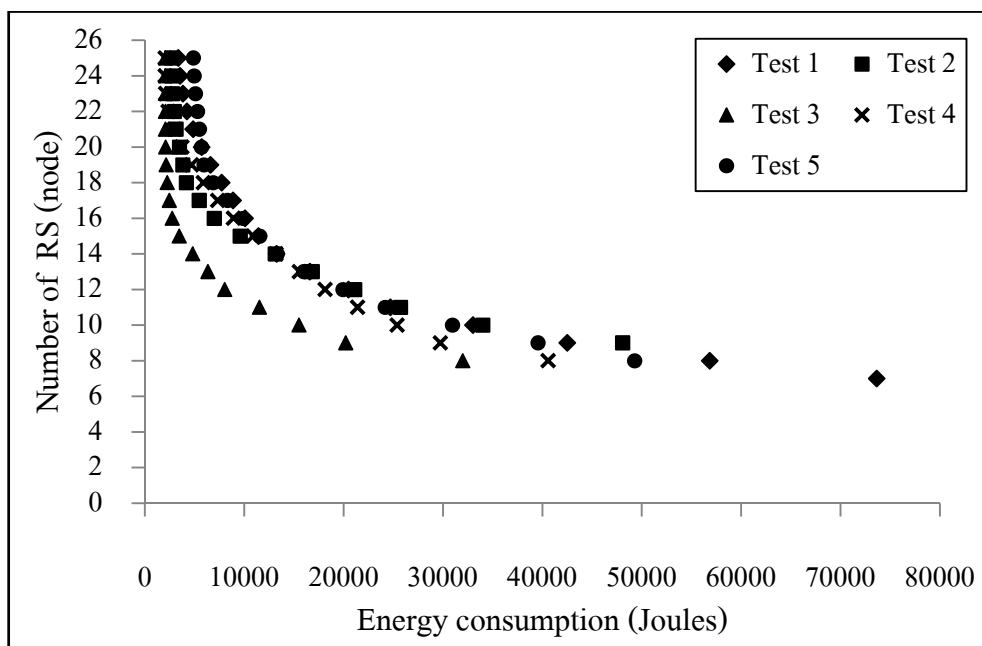
$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && f_1(x) \\ & \text{subject to} && f_2(x) \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (4.8)$$

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 โนค เนื่องจากงบประมาณการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่วนเงื่อนไขข้ออื่น ๆ นั้นยังคงใช้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสมการที่ (3.2) ถึง (3.12) จากหัวข้อที่ 3.5 จากนั้นจะทำการหาโครงสร้างเครือข่ายที่ดีที่สุดที่ทำให้การใช้พลังงานของโนคตรวจรู้มีค่าน้อยที่สุด เมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดตามจำนวนที่กำหนดไว้ในเงื่อนไข โดยการหาคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละครั้งนั้นจะเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นครั้งละ 1 โนค จนกระทั่งถึงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่สามารถติดตั้งได้มากที่สุด หลังจากได้คำตอบที่ดีที่สุด คือ ค่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่โนคตรวจรู้ใช้ในการรับ และส่งข้อมูลแล้ว จะนำ

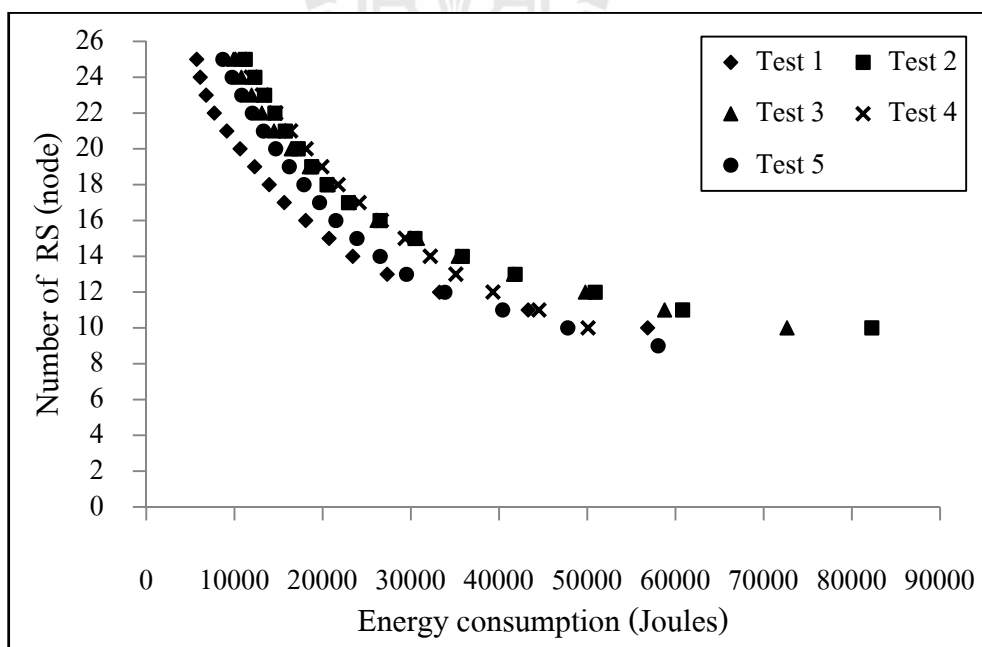
คำตอบที่ได้ คือ ค่าพลังงานที่โนคตรวจรู้ใช้ไป และ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งมาพล็อตกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างสองวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์

4.5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

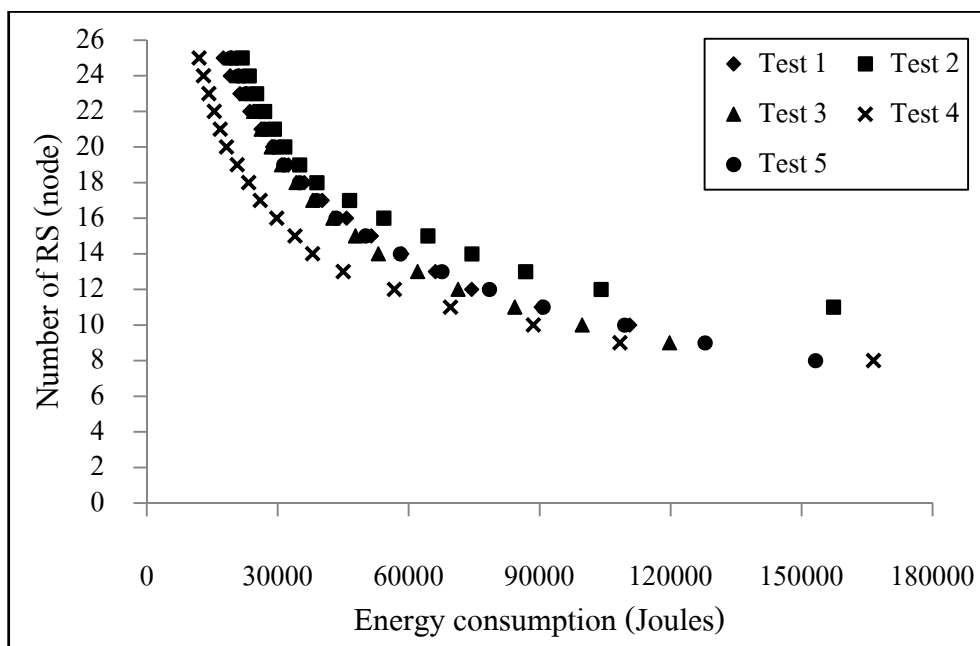
จากรูปที่ 4.52 แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีลำดับชั้น โดยมีวัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้โนคตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้ติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้น้อยที่สุดเพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดในเครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค จากรูปจะแสดงให้เห็นถึง pareto-front ที่แสดงการเรียงตัวเป็นแนวเส้นของค่าพลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวจรู้ เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นจากจำนวนสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุดถึงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่มากที่สุดที่เลือกติดตั้งได้ คือ 25 โนค โดยจำนวนสถานีถ่ายทอดจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 โนค จะเห็นว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีความสัมพันธ์อย่างแปรผกผันกัน โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 จะมีค่าลดลงเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายทำให้โนคมีการใช้พลังงานลดลง นอกจากนี้จะสังเกตว่าเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดตั้งแต่ 18 โนคขึ้นไป การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดจะส่งผลต่อการค่าพลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยในการทดสอบแต่ละครั้งนั้น โนคตรวจรู้ในเครือข่ายจะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการกระจายตัวของโนคตรวจรู้จะมีผลต่อการใช้พลังงานรวมในเครือข่ายลดลง จากรูปที่ 4.53 และ 4.54 นั้นเป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโนคตรวจรู้เพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 80 โนค ซึ่งมีผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกับเครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 30 โนค ส่วนที่ต่างกัน คือ เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีการใช้พลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเครือข่ายที่มีจำนวนโนคตรวจรู้ 50 โนค และ 80 โนคนั้นจะสังเกตเห็นว่าเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดตั้งแต่ 22 โนค และ 20 โนคขึ้นไปตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดจะส่งผลต่อการค่าพลังงานของโนคตรวจรู้ในเครือข่ายลดลง โดยในการทดสอบแต่ละครั้งนั้น โนคตรวจรู้ในเครือข่ายจะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการกระจายตัวของโนคตรวจรู้จะมีผลต่อการใช้พลังงานรวมในเครือข่ายลดลง



รูปที่ 4.52 คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี
โนดตรวจรู้ 30 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น

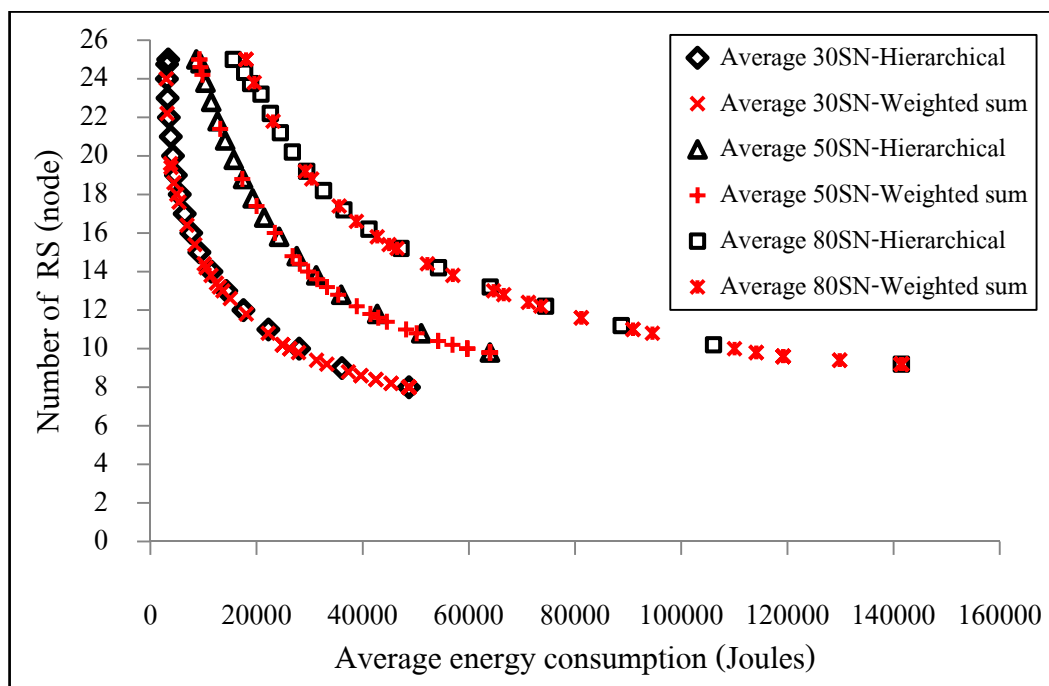


รูปที่ 4.53 คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี
โนดตรวจรู้ 50 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น



รูปที่ 4.54 คำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่ายที่มี
โนดตรวจรู้ 80 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้น

จากรูปที่ 4.55 แสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ โนดตรวจรู้ใช้ไป และค่าเฉลี่ยของจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่ายเมื่อมีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนดด้วยวิธีลำดับชั้น (Hierarchical method) เปรียบเทียบกับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) จากกราฟจะเห็นว่า pareto-front ของทั้งสองวิธีอยู่ในแนวเดียวกันแต่วิธีลำดับชั้นสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก กล่าวคือ สามารถหาคำตอบได้ทุกค่าของจำนวนสถานีถ่ายทอด เนื่องจากวิธีลำดับชั้นนั้นได้กำหนดให้นำวัตถุประสงค์อื่นที่มีความสำคัญรองลงมา นำมากำหนดให้เป็นเงื่อนไข ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกค่าคงที่ที่น้อยที่สุด จากจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ต้องใช้ในเครือข่ายเพื่อให้เครือข่ายทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นทีละ 1 โนด จึงทำให้มีค่าคำตอบในทุกตำแหน่งของจำนวนสถานีถ่ายทอด



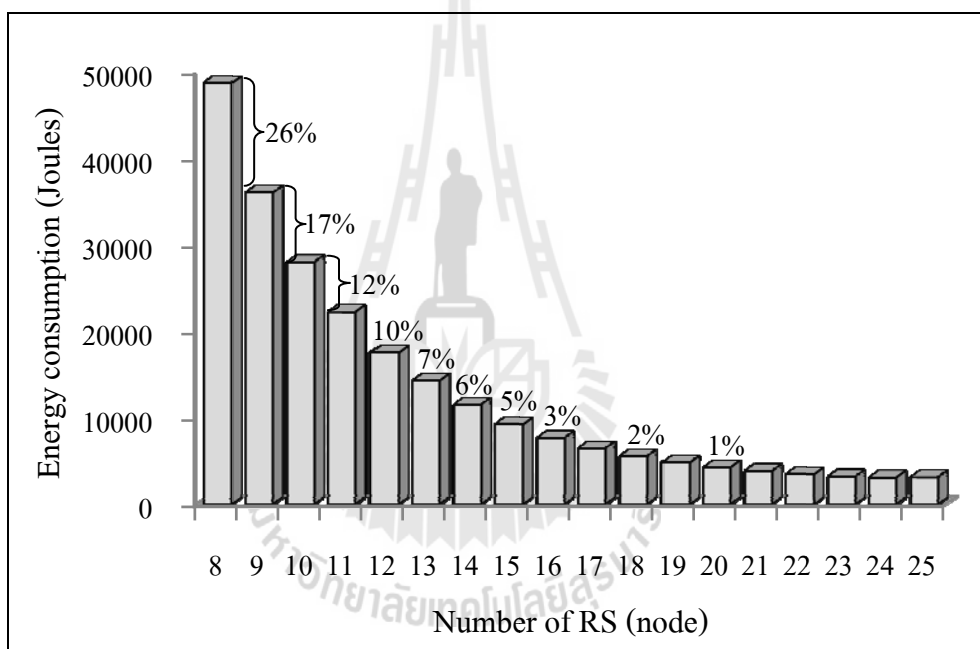
รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด ด้วยวิธีลำดับชั้น กับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.56 ถึง 4.58 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้จำนวน 30 50 และ 80 โนดตามลำดับ รูปที่ 4.56 จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายลดลงเมื่อติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น โดยเครือข่ายที่มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โนด จะต้องติดตั้งจำนวนสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด 8 โนด เพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด และเมื่อใช้จำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นเป็น 9 โนด จะทำให้ระดับพลังงานลดลง 26 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับจำนวนสถานีถ่ายทอดที่น้อยที่สุด และพลังงานจะลดลงไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นถึง 16 โนดแล้ว การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นแทบจะไม่ส่งผลต่อการลดลงของพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้

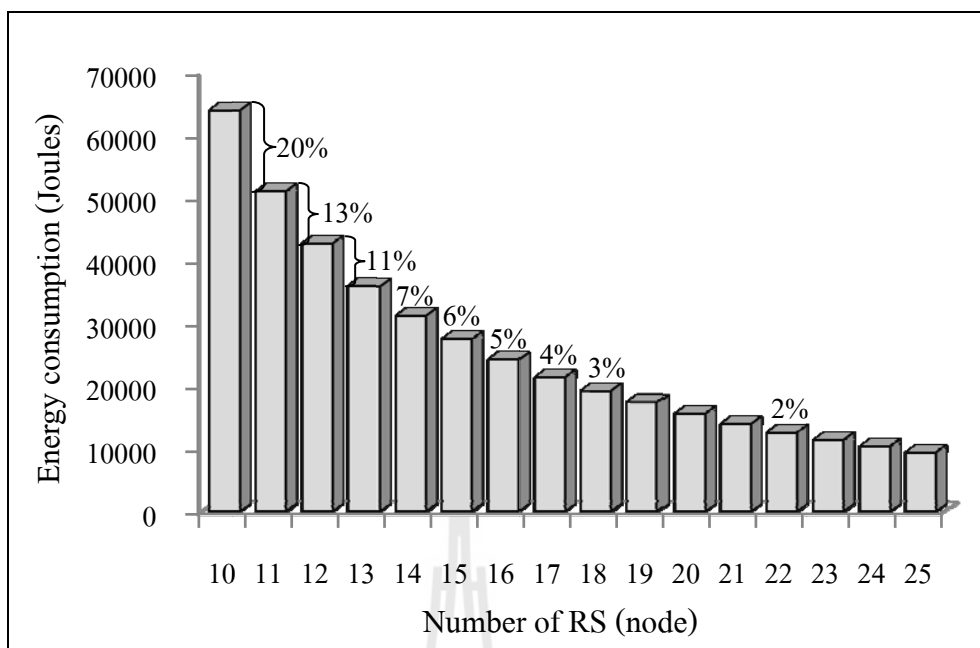
จากรูปที่ 4.57 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานในเครือข่ายขนาด 50 โนด จะเห็นได้ว่าต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดอย่างน้อย 10 โนด เพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นเป็น 11 โนด จะทำให้ระดับพลังงานที่ใช้ไปของโนดตรวจรู้ลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ และพลังงานจะลดลงไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เพิ่มขึ้น

โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นถึง 19 โหนดแล้ว การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นแทบจะไม่ส่งผลต่อการลดลงของพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้

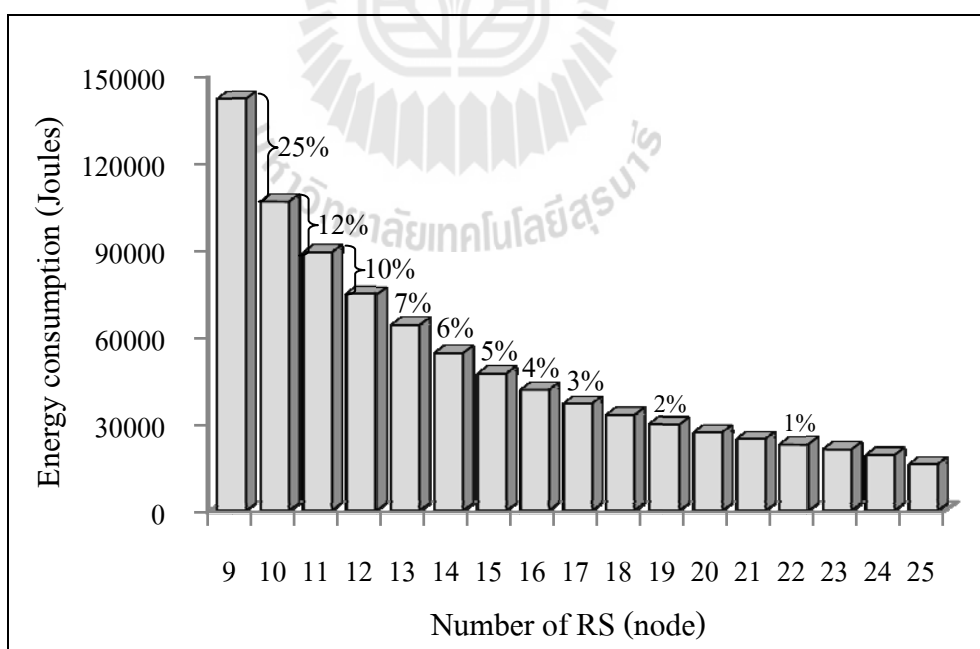
จากรูปที่ 4.58 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานในเครือข่ายขนาด 80 โหนด จะเห็นได้ว่าต้องติดตั้งสถานีถ่ายทอดอย่างน้อย 9 โหนด เพื่อให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นเป็น 10 โหนด จะทำให้ระดับพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้ลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ และพลังงานจะลดลงไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้นถึง 19 โหนดแล้ว การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายนั้นแทบจะไม่ส่งผลต่อการลดลงของพลังงานที่ใช้ไปของโหนดตรวจรู้



รูปที่ 4.56 เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น
ในเครือข่ายขนาด 30 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น



รูปที่ 4.57 เปรี่เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น
ในเครือข่ายขนาด 50 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น



รูปที่ 4.58 เปรี่เซ็นต์การลดลงของพลังงานเมื่อใช้สถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น
ในเครือข่ายขนาด 80 โหนด ด้วยวิธีลำดับชั้น

สำหรับการออกแบบในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีลำดับชั้น และศึกษาผลกระทบของขนาดเครือข่ายต่อพลังงานที่ใช้ไปของโนคตรวรู้ และจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย จากผลการทดลองจะเห็นว่าการใช้วิธีลำดับชั้นนั้นจะสามารถหาคำตอบได้ละเอียดกว่าวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากหลักการหาคำตอบด้วยวิธีลำดับชั้นนั้นจะเปลี่ยนสมการวัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองลงมา ใช้กำหนดให้เป็นเงื่อนไข ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเปลี่ยนวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งให้น้อยที่สุดใช้เป็นเงื่อนไข ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มจำนวนสถานีถ่ายทอดขึ้นทีละ 1 ค่า จะทำให้ได้คำตอบของพลังงานที่โนคตรวรู้ใช้ไปทุกตำแหน่งของจำนวนสถานีถ่ายทอด



บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เครือข่ายตรวจรู้ไร้สายเริ่มเข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการนำเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายมาใช้ในการรายงานสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ เช่น การใช้ในฟาร์ม หรือแปลงเพาะปลูกทางการเกษตรในการตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น เนื่องจากเป็นเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายประกอบด้วยโหนดตรวจรู้ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานภายในสภาพแวดล้อม สามารถจัดการข้อมูลได้ด้วยตัวเอง จึงเหมาะกับการใช้งานภายในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก ซึ่งโครงสร้างการทำงานของเครือข่ายโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ โหนดตรวจรู้ที่มีหน้าที่ตรวจจับความเป็นไปภายในธรรมชาติ เขตเวทย์ที่มีหน้าที่รับข้อมูลจากโหนดตรวจรู้ แล้วส่งต่อไปที่สถานีฐาน และสถานีฐานซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของเครือข่ายประเภทนี้ คือ ข้อจำกัดทางด้านพลังงานของโหนดตรวจรู้ ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงถึงระยะเวลาการทำงานของเครือข่าย งานวิจัยที่ผ่านมาได้พยายามแก้ปัญหาข้อจำกัดทางด้านพลังงานของโหนดตรวจรู้ เช่น ได้เสนอการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย เช่น กำหนดให้ติดตั้งสถานีฐานมากกว่า 1 สถานี การหาเส้นทางที่ทำให้โหนดตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด การเพิ่มโหนดพิเศษที่เรียกว่า สถานีถ่ายทอด ที่ทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูลจากโหนดตรวจรู้แล้วส่งต่อไปที่สถานีฐาน ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ แต่งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพในการสื่อสาร คือ ค่าสัญญาณรบกวนภายในเครือข่ายที่มีความสัมพันธ์กับอัตราความผิดพลาดบิตเพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง และอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ รวมถึงยังไม่มีงานวิจัยใดที่พิจารณาปัญหาการใช้พลังงานของเครือข่ายเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) โดยนำสถานีถ่ายทอดมาใช้ในการรับ และส่งข้อมูลไปที่ปลายทาง ทำให้โหนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานลดลง และทำให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานขึ้น โดยพิจารณาให้สถานีถ่ายทอดมีพลังงานไม่จำกัด เช่นการใช้พลังงานจากเซลล์สุริยะ และมีแหล่งสำรองพลังงานขนาดใหญ่ ทำให้ต้องใช้งบประมาณสูงในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด สำหรับการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายนั้นจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ดีที่สุด และจะต้อง

ติดตั้งให้น้อยที่สุดเนื่องจากงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary integer linear programming : BILP) เพื่อสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่าย โดยจะทำการสร้างสมการแบบวัตถุประสงค์เดียว ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โนดตรวจรู้ใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และกรณีการออกแบบด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ ที่พิจารณาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดระหว่างพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไป กับ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย โดยจะทำการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นวัตถุประสงค์เดียวด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 นี้ คือ เส้นทางการส่งข้อมูลของโนดตรวจรู้ในเครือข่าย รวมถึงจะได้จำนวน และตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งที่ทำให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด สำหรับในขั้นตอนที่ 2 จะนำคำตอบของจำนวนและตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดมาใช้เป็นข้อมูลอินพุตเพื่อสร้างเส้นทางสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดไปที่ปลายทางที่สั้นที่สุด โดยใช้แนวทางการสร้างเส้นทางแบบ minimum spanning tree ซึ่งในขั้นตอนที่ 2 นี้จะพิจารณาระยะทางในการเชื่อมต่อระหว่าง โนดเพื่อเลือกแบบของสายอากาศที่ใช้ในการส่งข้อมูล โดยจะใช้สายอากาศส่งแบบมีทิศทางชนิดยาคี ที่มีอัตราขยายแตกต่างกัน 4 แบบ ซึ่งราคาของสายอากาศส่งนั้นจะแปรผันตามอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ โดยคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 คือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง สายอากาศรับ และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งค่าใช้จ่ายของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดจะแปรผันตามจำนวนสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในเครือข่าย สำหรับการออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของเครือข่ายต่อค่าใช้จ่ายของเครือข่ายและการใช้พลังงานของ โนดตรวจรู้ผลกระทบของการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายเมื่อใช้วัตถุประสงค์ที่ต่างกัน ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) และเปรียบเทียบวิธีการแปลงสมการแบบหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียวระหว่างวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และวิธีลำดับชั้น (Hierarchical method)

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายตรวจรู้ไร้สายนั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในงานที่จะต้องศึกษา โดยต้องทราบถึงข้อจำกัด ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย แล้วจึงกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ โดยเมื่อกำหนดปัญหาได้แล้วจะต้องลงทดสอบความเป็นไปได้ของสมการที่กำหนดขึ้นในเครือข่ายขนาดเล็กก่อน เพื่อให้เห็นแนวโน้มความถูกต้องของสมการนั้น จากนั้นจึงนำไปใช้ในเครือข่ายที่จำลองแบบขึ้น โดยจะต้องทำการ

ทดสอบหลายกรณี ในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กัน เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาการใช้พลังงานของโนดตรวจรู้ในเครือข่ายที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ภายใต้งบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงได้เลือกพิจารณาสมการสองวัตถุประสงค์ ซึ่งการสร้างสมการหลายวัตถุประสงค์นั้นสามารถพิจารณาวัตถุประสงค์อื่น ๆ ได้อีก เช่น ต้องการให้อายุการใช้งานยาวนานที่สุด ต้องการให้โนดตรวจรู้มีพื้นที่ครอบคลุมมากที่สุด เป็นต้น และสำหรับการพิจารณาเลือกสายอากาศเพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 นั้น การออกแบบในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สายอากาศแบบยาก็เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง และมีลำคลื่นไปในทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วยังมีสายอากาศแบบมีทิศทางชนิดอื่น ๆ ให้เลือกพิจารณาได้ตามความเหมาะสม เช่น สายอากาศแบบพาราโบลา (parabolic antenna) เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio นั้น หากเครือข่ายที่พิจารณามีตัวแปรอินพุตจำนวนมากแล้ว ในบางกรณี โปรแกรมอาจไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ หรืออาจใช้เวลานานในการรันผลเพื่อหาคำตอบ ดังนั้นขนาดของเครือข่าย หรือจำนวน โหนดตรวจรู้ในเครือข่าย จึงเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ ซึ่งหากต้องออกแบบในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ อาจต้องพัฒนาอัลกอริทึมอื่น ๆ ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย โดยใช้สมการแบบวัตถุประสงค์เดียว (single objective) เพื่อให้โนดตรวจรู้ในเครือข่ายใช้พลังงานให้น้อยที่สุดตลอดอายุการใช้งาน และใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์ (multi-objective) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ ค่าพลังงานที่โนดตรวจรู้ใช้ไป กับ จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในเครือข่าย โดยทั้งสองวัตถุประสงค์จะต้องสามารถทำให้เครือข่ายดำเนินการได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในการศึกษาเครือข่ายประเภทนี้นั้นสามารถเพิ่มวัตถุประสงค์ หรือปรับเปลี่ยนวัตถุประสงค์ หรือ เงื่อนไขอื่น ๆ เพื่อใช้ในการวัดสมรรถนะของโครงสร้างเครือข่ายได้ เช่น การครอบคลุมของพื้นที่ให้มากที่สุด เพื่อให้อายุการใช้งานของเครือข่ายยาวนานที่สุด และสามารถนำวัตถุประสงค์ที่พิจารณานั้นมาสร้างสมการแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ได้อีกด้วย หรืออาจพัฒนาวิธีการในการหาคำตอบด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น Genetic algorithm หรือ วิธี Greedy ซึ่งจะทำได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ในระยะเวลาที่จำกัด เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- ประกอบ จิริกิติ (2535). **การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)**. โครงการส่งเสริมเอกสาร
วิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- สุทธิมา ชำนาญเวช (2552). **การวิจัยดำเนินงาน (Operation Research)**. วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ ฯ.
- 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.
- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, and Cayirci, E. (2002). **Wireless Sensor Networks: A Survey**, Computer Networks 38: 393-422.
- Al-Karaki, J.N., and Kaml, A.E. (2004). **Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey**, Wireless Communications, IEEE, Vol. 11: 6-28.
- 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.
- 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.
- 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.
- Bari, A. (2005). **Relay Nodes in Wireless Sensor Networks: A Survey**, Course: 60-520, University of Windsor, 2005
- Deb, K. (2009). **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.
- Goldsmith, A. (2007). **Wireless Communications**, Markono Print Media Pte Ltd, Singapore.
- Guo, W., Huang, X., Lou, W., and Liang, C. (2008). **On Relay Node Placement and Assignment for Two-tiered Wireless Networks**, Mobile Network Application: 186-197.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gongbo, Z., Zhencai, 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.
- 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.
- MaxStream Incorporation (2006). **IEEE 802.15.4 OEM RF Modules**, www.MaxStream.net, 12 July 2006.
- Miettinen, K. (2001). **Some Method for Nonlinear Multi-objective Optimization**, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Vol. 1993: Springer Berlin/Heidelberg: 1-20.

- 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.
- Patranabis, D. (1999). Telemetry Principles, McGraw-Hill Education Publishing company limited, India.
- 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.
- Rappaport T.S. (1996). **Wireless Communication Principles and Practice**, Prentice Hall PTR, New Jersey, United States of America.
- 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.
- 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.
- Tekinalp, O., and Karsli, G, (2007). **A New Multiobjective Simulated Annealing Algorithm**, Journal of Global Optimization, Vol.39, No. 1: 49-77.
- 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.
- Winston, W.L. (1994). **Operation research: Applications and Algorithms 3rd edition**, International Thompson Publishing, Belmont, California.
- Younis, M., Akkaya, K. (2008). **Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks: A Survey**, Ad hoc Networks, Vol. 6: 621-655.
- 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.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure of a person standing within a triangular structure, with a circular emblem below it containing a book and a lamp. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path at the bottom of the logo.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลสายอากาศภาคส่ง ภาครับ และสถานีถ่ายทอด

ก.1 ข้อมูลของสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ

ในการออกแบบการเชื่อมต่อในขั้นตอนที่ 2 นั้นจะเป็นการพิจารณาในส่วนของการรับ และส่งข้อมูลระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน โดยใช้การหาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 ไปยังสถานีฐานด้วยหลักการของ minimum spanning tree โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาสายอากาศ 2 ประเภท คือสายอากาศภาคส่งจะเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางชนิดยาคี 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

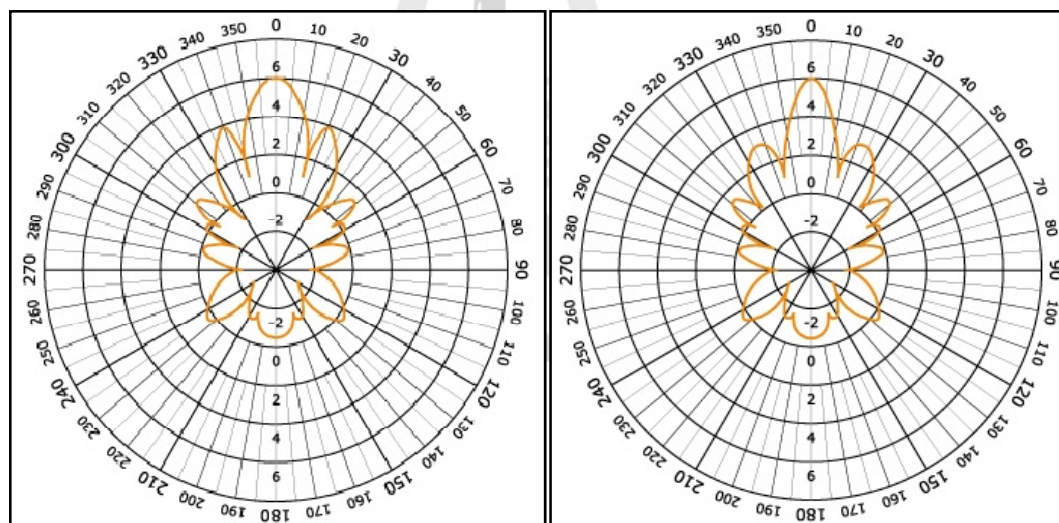
ตารางที่ ก.1 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1

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 Female
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

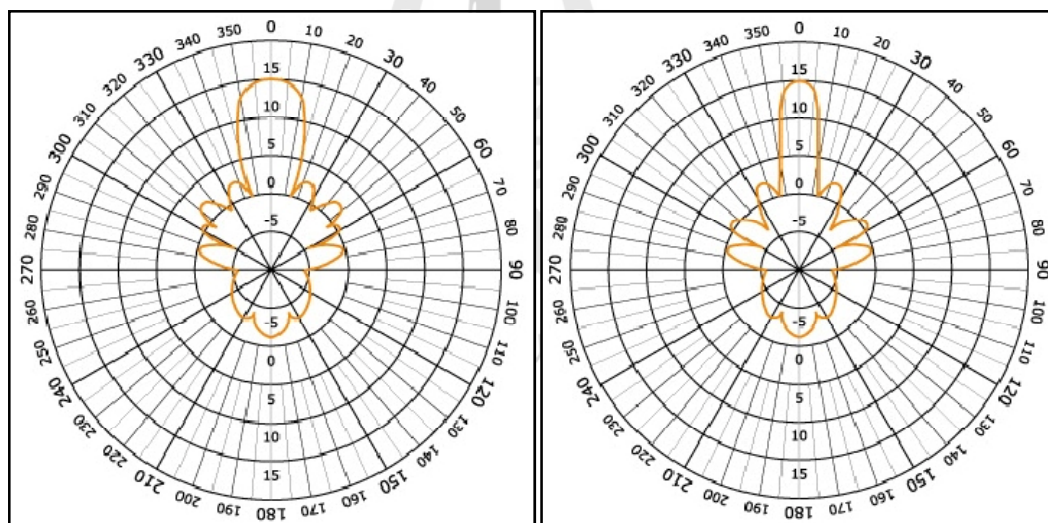
ตารางที่ ก.4 รายละเอียดผลิตภัณฑ์ของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 3

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 Female
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 Ω
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

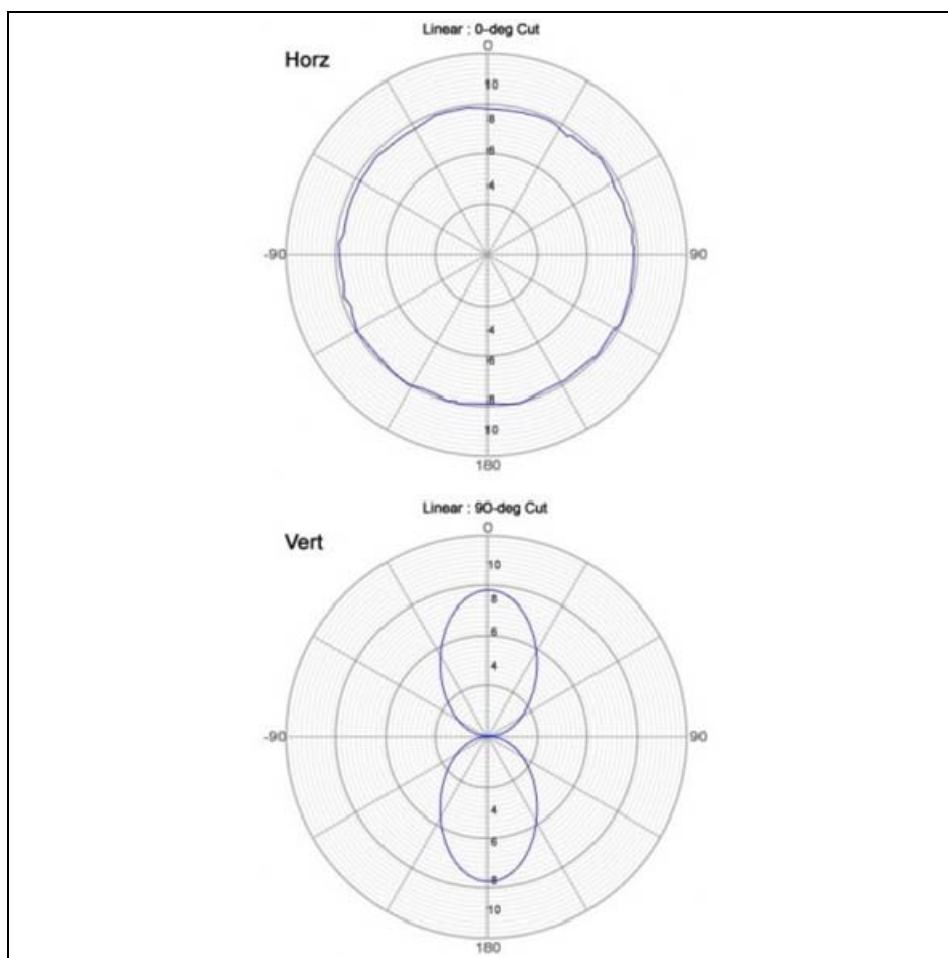
คุณสมบัติของสายอากาศ	รายละเอียด
ความถี่ใช้งาน	2.4 ถึง 2.5 GHz
มุมส่งข้อมูลในแนวนอน (horizontal)	25 องศา
มุมส่งข้อมูลในแนวตั้ง (vertical)	18 องศา
อัตราขยาย (gain)	16 dBi
หัวเชื่อมต่อ (connector)	N type Female+สายนำสัญญาณยาว 20 cm.
ขนาด (dimension) ยาว x กว้าง x สูง	650 x 140 x 75 mm.
น้ำหนัก (weight)	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
อุนหภูมิ (เซลเซียส)	-30 องศา ถึง 85 องศา
น้ำหนัก (weight)	0.3 g.
รับประกัน (warranty)	1 ปี
ราคา	1,500 บาท



รูปที่ ก.3 แบบรูปกำลังงานในแนวนอน และแนวตั้งของสายอากาศภากรับ

ก.2 ข้อมูลของสถานีถ่ายทอดที่ใช้ในงานวิจัย

สถานีถ่ายทอดในงานวิจัยนี้จะมีหน้าที่ในการรับข้อมูลจากโนดตรวจรู้ แล้วทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปยังสถานีฐานในเครือข่าย แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่าวนั้นมีราคาสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หนึ่งที่พิจารณาถึงจำนวนสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในเครือข่าย โดยต้องการติดตั้งสถานีถ่ายทอดให้มีจำนวนน้อยที่สุด เนื่องจากงบประมาณในการลงทุนที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งผู้ผลิตได้ทำการผลิตอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายกับสถานีถ่ายทอดโดยงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงอุปกรณ์ของ The DEETER Group จากบริษัท DEETER Electronics Inc จากเว็บไซต์ www.deeterelectronicsinc.com โดยทางผู้ผลิตได้เรียกอุปกรณ์นี้ว่า Wireless sensor system router ดังรูปที่ ก.4 ผู้ผลิตกล่าวว่าอุปกรณ์นี้สามารถเพิ่มระยะในการสื่อสารข้อมูล โดยนำอุปกรณ์นี้ไปติดตั้งที่ตำแหน่งระหว่างโนดตรวจรู้ 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

การคำนวณระยะทางสื่อสารของสายอากาศภาคส่ง

ข.1 ข้อมูลของสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ

ในการออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานในขั้นตอนที่ 2 ที่ได้ออกแบบไว้จากตารางที่ 4.2 ในบทที่ 4 นั้น จะเลือกพิจารณาสายอากาศส่งแบบมีทิศทาง (directional antenna) ที่มีอัตราขยายที่ต่างกัน ดังนั้นระยะในการสื่อสารที่ไกลที่สุดจึงแตกต่างกัน โดยสามารถคำนวณระยะทางที่ไกลที่สุดที่สายอากาศสามารถสื่อสารได้ดังนี้

จากแบบจำลองวิธีการสูญเสียอย่างง่าย (Simplified path loss model) จากสมการที่ 2.2 ในบทที่ 2

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + K (dB) - 10\gamma \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (\text{ข.1})$$

$$K (dB) = 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d_0} \quad (\text{ข.2})$$

นำค่าอัตราขยายของสายอากาศมาคำนวณด้วย จะได้

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + G_t (dBi) + G_r (dBi) + K (dB) - 10\gamma \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่ G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dBi)

G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dBi)

โดยพารามิเตอร์แต่ละค่ามีความหมายดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.5 ของบทที่ 2

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณระยะทางสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ	2.4 GHz
กำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณของสายอากาศภาคส่ง	20 dBm
ระยะอ้างอิง (reference distance)	2 m.
ครรชนิการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง	4
กำลังงานที่ใช้ในการรับข้อมูล (received signal strength)	-90 dBm
อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งแบบที่ 1	7 dBi
อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง	8 dBi

แทนค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการที่ ข.3 จะได้

$$-90dBm = 20dBm + 7dBi + 8dBi - 46.066dB - 10(4) \log_{10} \left[\frac{d}{2m} \right] \quad (ข.4)$$

$$d = 188 \text{ m}$$

ดังนั้น จะสามารถคำนวณระยะการสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศภาคส่ง ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 7 dBi ได้เท่ากับ 188 เมตร



ภาคผนวก ค

จำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด

ค.1 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด ของการหาคำตอบด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์ในขั้นตอนที่ 1

จากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของขั้นตอนที่ 1 ที่ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี โดยใช้อัลกอริธึมซิมเพล็กซ์เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรซึ่งมีค่าแปรผันตามจำนวนโนดตรวจรู้ในเครือข่าย ซึ่งในการทดลองจะแบ่งเครือข่ายออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ เครือข่ายที่ 1 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 30 โหนด เครือข่ายที่ 2 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 50 โหนด และเครือข่ายที่ 3 มีจำนวนโนดตรวจรู้ 80 โหนด โดยในงานวิจัยนี้จะมีตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่เป็นไปได้ (β_j) ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปที่โนดตรวจรู้ข้างเคียง (s_{ik}) ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปที่สถานีถ่ายทอด (r_{ij}) และ ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดตรวจรู้ไปที่สถานีฐาน (h_{ib}) ซึ่งสามารถคำนวณจำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครือข่ายแต่ละขนาด ได้ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 จำนวนตัวแปรตัดสินใจในเครือข่ายขนาด 30 50 และ 80 โหนด

ตัวแปรตัดสินใจ	เครือข่ายที่ 1 มีจำนวน โนดตรวจรู้ 30 โหนด	เครือข่ายที่ 2 มีจำนวน โนดตรวจรู้ 50 โหนด	เครือข่ายที่ 3 มีจำนวน โนดตรวจรู้ 80 โหนด
β_j	110	110	110
s_{ik}	$[30] \times [30] = 900$	$[50] \times [50] = 2,500$	$[80] \times [80] = 6,400$
r_{ij}	$[30] \times [110] = 3,300$	$[50] \times [110] = 5,500$	$[80] \times [110] = 8,800$
h_{ib}	$[30] \times [1] = 30$	$[50] \times [1] = 50$	$[80] \times [1] = 80$
รวมจำนวนตัวแปร	4,340	8,160	15,390

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a platform, flanked by two stylized figures. Above the central figure is a large, stylized letter 'H'. The entire logo is enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างข้อมูลอินพุตของขั้นตอนที่ 2
และค่าใช้จ่ายของการสร้างเครือข่ายในขั้นตอนที่ 2

ง.1 ข้อมูลอินพุตของการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอน ขั้นตอนที่ 2

สำหรับการหาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดในขั้นตอนที่ 2 นั้น จะต้องทราบค่าอินพุตของระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 และระยะทางระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 1 กับสถานีฐานในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ คือ เครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 50 และ 80 โนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ โดยในการคำนวณค่าระยะทางระหว่างโนดนั้นจะคำนวณได้จากระยะทางระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีตัวอย่างของข้อมูลอินพุตแสดงดังตารางที่ ง.1 เป็นข้อมูลระยะทางระหว่างโนดในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 1

ตารางที่ ง.1 ตัวอย่างข้อมูลอินพุตของการกำหนดปัญหาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดใน
ขั้นตอนที่ 2 ในเครือข่ายที่มีโนดตรวจรู้ 30 โนด ครั้งที่ 1

ชื่อ โนด	ระยะทางระหว่างโนดที่ถูกติดตั้งในเครือข่าย (เมตร)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	354	180	472	300	381	566	283
2	354	0	206	206	430	361	354	212
3	180	206	0	292	250	250	391	112
4	472	206	292	0	403	269	150	206
5	300	430	250	403	0	158	412	224
6	381	361	250	269	158	0	255	158
7	566	354	391	150	412	255	0	283
8	212	212	112	206	224	158	283	0

ง.2 ข้อมูลประเภทของสายอากาศที่สถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2 ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศในเครือข่าย

ในขั้นตอนที่ 2 นี้จะใช้ข้อมูลของสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งจากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นข้อมูลอินพุตให้กับขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างเส้นทางการสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด และระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานในเครือข่าย ซึ่งจากการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการเชื่อมต่อด้วยหลักการของ minimum spanning tree นั้นจะมีเส้นทางของการเชื่อมต่อ และค่าใช้จ่ายของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเครือข่ายที่มีโหนดตรวจรู้จำนวน 30 โหนด 50 โหนด และ 80 โหนด ครั้งที่ 1 ถึง 5 ตามลำดับ ตามที่ได้แสดงดังไว้ในบทที่ 4 รูปที่ 4.16 ถึง 4.30 แสดงดังตารางที่ ง.2 ถึง ง.16

ตารางที่ ง.2 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศในเครือข่ายที่ 1 โหนดตรวจรู้ 30 โหนด ครั้งที่ 1

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 - สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 2	3	4,100
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 4	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 4 – 7	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		20,700
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		12,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		51,960.65
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		84,660.65

ตารางที่ ง.3 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 1 โหนดตรวจรู้ 30 โหนด ครั้งที่ 2

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 5	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 9	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		22,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		15,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		66,806.55
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		104,306.55 บาท

ตารางที่ 4.4 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 1 โหนดตรวจรู้ 30 โหนด ครั้งที่ 3

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน– สถานีถ่ายทอด 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 2	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 2 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 8	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 4 – 6	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 6 – 7	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		24,800
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		13,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		59,383.6
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		97,683.6 บาท

ตารางที่ ๖.5 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 1 โหนดตรวจรู้ 30 โหนด ครั้งที่ 4

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 8	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 2	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		20,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		13,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		59,383.6
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		92,883.6 บาท

ตารางที่ ง.6 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 1 โหนดตรวจรู้ 30 โหนด ครั้งที่ 5

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 5	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 2	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 8	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		20,000
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		13,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		59,383.6
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		92,883.6 บาท

ตารางที่ ง.7 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 2 โหนดตรวจรู้ 50 โหนด ครั้งที่ 1

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 10	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 10 – 9	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 9 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 5	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		25,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		16,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		74,229.5
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศทั้งสิ้น		115,729.5 บาท

ตารางที่ ๖.8 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 2 โหนดตรวจรู้ 50 โหนด ครั้งที่ 2

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 2	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 9	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 10	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		25,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		16,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		74,229.5
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		115,729.5 บาท

ตารางที่ ง.9 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 2 โหนดตรวจรู้ 50 โหนด ครั้งที่ 3

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 1 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 2 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 10	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 9	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		25,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		16,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		74,229.5
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		115,729.5 บาท

ตารางที่ ง.10 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 2 โหนดตรวจรู้ 50 โหนด ครั้งที่ 4

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 9	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 9 – 10	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 10 – 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 2 – 3	3	4,100
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		26,600
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		16,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		74,229.5
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		117,329.5 บาท

ตารางที่ ง.11 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 2 โหนดตรวจรู้ 50 โหนด ครั้งที่ 5

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 1 – 3	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 3 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 8	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 2	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 6 – 9	3	4,100
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		27,300
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		15,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		66,806.55
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		109,106.55 บาท

ตารางที่ ง.12 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 3 โหนดตรวจรู้ 80 โหนด ครั้งที่ 1

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 2 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 9	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 10	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 10 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 3	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		25,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		16,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		74,229.5
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		115,729.5 บาท

ตารางที่ ง.13 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 3 โหนดตรวจรู้ 80 โหนด ครั้งที่ 2

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 6 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 9	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 9 – 10	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 10 – 11	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 2 – 3	3	4,100
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		29,100
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		18,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		81,652.45
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		128,752.45 บาท

ตารางที่ ง.14 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 3 โหนดตรวจรู้ 80 โหนด ครั้งที่ 3

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 1 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 5	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 6	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 7 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 9	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 1 – 2	3	4,100
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		24,100
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		15,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		66,806.55
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		105,906.55 บาท

ตารางที่ ง.15 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 3 โหนดตรวจรู้ 80 โหนด ครั้งที่ 4

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 2	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 2 – 3	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 2 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 3 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 8 – 7	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 6	1	2,500
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		21,600
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		13,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		59,383.6
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศทั้งสิ้น		94,483.6 บาท

ตารางที่ ง.16 ประเภทของสายอากาศที่ใช้ในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศใน
เครือข่ายที่ 3 โหนดตรวจรู้ 80 โหนด ครั้งที่ 5

การเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ เลือกติดตั้งในขั้นตอนที่ 2	ใช้สายอากาศ ประเภท	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง สายอากาศส่ง (บาท)
สถานีถ่ายทอด 1 – 2	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 1 – 4	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – สถานีฐาน	1	2,500
สถานีฐาน – สถานีถ่ายทอด 5	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 7	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 4 – 6	3	4,100
สถานีถ่ายทอด 6 – 8	1	2,500
สถานีถ่ายทอด 5 – 3	3	4,100
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศส่ง		23,200
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศรับ		13,500
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด		59,383.6
รวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายอากาศทั้งสิ้น		96,083.6 บาท



ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Prommak, C., and Jantarasorn, C. (2011). **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.

ชมพูนุท จันทรศร และ ชุติมา พรหมมาก (2553). การศึกษาประสิทธิภาพเครือข่ายเมื่อมีการใช้งานมาตรฐาน 802.11g และ 802.15.4 ในบริเวณเดียวกัน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33). หน้า 865-868.



Optimal Relay Node Placement for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Chutima Prommak and Chompunut Jantarasorn

School of Telecommunication Engineering

Suranaree University of Technology

Nakhon Ratchasima, 30000 THAILAND

cprommak@sut.ac.th, m5240067@g.sut.ac.th

Abstract— Energy efficiency is an important issue in the widespread deployment of Wireless Sensor Networks (WSNs). In this paper, we present a study of the optimal relay node placement problems in WSNs for efficient energy consumption of wireless sensor nodes. In particular, we examine the problem of minimizing energy consumption of sensor nodes in the network using minimum number of relay stations that could allow the network to operate for a required network lifetime. A novel mathematical formulation has been developed as a Binary Integer Linear Programming (BILP) model. Our key contribution is that the proposed model not only ensures the required network lifetime but also guarantees the radio connectivity at high level of communication quality. Specially, we take into account effects of noise, signal quality limitation and bit error rate characteristics. Numerical experiments show that the proposed model yields efficient network configuration that could prolong the network lifetime and reduce the average energy consumption compared with other techniques.

Keywords— *Wireless sensor networks, Optimal node placement, Energy consumption*

I. INTRODUCTION

Wireless Sensor Networks (WSNs) have played a potential role in many emerging data-gathering applications such as health monitoring, forestry monitoring, and environmental monitoring in factory, farm and residential area. A simple network structure consists of sensor nodes (SNs) and a sink node, usually called a base station (BS). SNs are placed in the sensing field and BS is usually located further away to collect and analyze the sensing data. Typically, SNs could send data to BS directly or indirectly via other intermediate SN(s). From the fact that SNs usually operate by using limited energy sources such as batteries, it may be undesirable to replace or recharge SNs due to high maintenance cost. In this case, Relay Stations (RSs) serve an essential role to receive and forward data from SNs to BS such that the energy-limited SNs can operate for a desired period of the network lifetime. Since RSs could be equipped with more sophisticated energy sources such as solar cells and the energy storage, the network deployment cost and lifetime could mainly depend on the number of sophisticated RSs used in the network and how the sensing data is forwarded to BS. In order to address the energy efficiency issues of WSNs, we need an effective RS placement technique, considering practical issues such as limitation of

network cost, energy efficiency and the effects of noise and bit error rate characteristics of the wireless transceivers.

Several works have paid attention on investigating the WSN design problems with special consideration on the energy consumption issues [1-10]. In [1], the authors explored factors that affect the WSN design and the communication protocol that used in each layer. In [2], the authors classified node placement strategies for WSN design. Several studies have devoted on the relay node placement problems in which [3-6] considered no energy limitation at SNs whereas [7-10] considered energy constraints. In [3], the authors considered node connectivity and coverage with buffer overflow constraint. In [4], the multi-hop communication among SNs was considered and the mathematical formulation for RS placement problem was proposed. In [5] and [6], the authors considered the single hop communication between SNs and RSs. [5] assumed that the RSs could adjust the transmit power level where as [6] considered the connectivity constraints. In [7], the objective was to maximize the number of packets received at BS. In [8], the authors investigated definitions of network lifetime and proposed one that is appropriate for WSNs in forestry applications. In [9], the authors studied the BS placement problem that aimed to minimize energy consumption of SNs. In [10], the authors addressed the sensing coverage issue by keeping the minimum number of active SNs to save node energy. While the contributions of the previous works are significant, the existing studies did not consider the effects of noise and bit error rate characteristics of the wireless transceivers and did not provide radio connectivity guarantee. Furthermore, the network cost limitation and the energy efficiency were not considered together. For this reason, more practical and effective approaches for the WSN design with the use of relay stations are needed.

In our paper we propose a novel RS placement model for efficient energy consumption in WSNs. In particular, we examine the problem of minimizing energy consumption of sensor nodes in the network using minimum number of relay stations that could allow the network to operate for a required network lifetime. Specially, our model accounts for the effects of noise and bit error rate characteristics of the wireless transceivers on the SN connectivity and the quality of communication links.

This work was supported in part by research fund from the Suranaree University of Technology, Thailand.

The remainder of this paper is organized as followed. Section II provides the problem definition and describes the problem formulation. Section III presents numerical experiments and discussion which focus on studying the effect of the number of RSs and the RS placement techniques on energy consumption and lifetime of the networks. Finally, section IV concludes the paper.

II. PROBLEM DEFINITION AND FORMULATION

To achieve the energy efficiency in WSN deployment, this paper proposes optimal RS placement techniques, considering practical issues such as limitation of network cost, energy efficiency and the effects of noise and bit error rate characteristics of the wireless transceivers. Specially, we consider the minimum energy – RS placement problem (ME-RPP). The proposed model aims to determine optimal locations to install RSs in the target sensing field and determine optimal route to forward sensing data packet from SNs to BS so that the energy consumption used for data transmission of SNs can be minimized and the resulting network configuration can guarantee that the network lifetime and the radio communication quality at the required bit error rate and a given budget for RS installation.

Here the network lifetime is defined as the duration from starting the network until the first SN depletes its battery power. This is a common definition of the WSN lifetime [11].

TABLE I. Notations

Sets:	
I	A set of sensor node
J	A set of relay station
B	A set of base station
Decision variables:	
β_j	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the RS is installed at site $j, j \in J$; 0 otherwise
S_{ik}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the SN i is assigned to SN k, i and $k \in I, i \neq k$ and $t \in T$; 0 otherwise
r_{ij}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the SN i is assigned to RS $j, i \in I, j \in J$ and $t \in T$; 0 otherwise
h_{ib}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the SN i is assigned to BS $b, i \in I, b \in B$ and $t \in T$; 0 otherwise
Constant parameters:	
E_t	Energy consumption for transmit data per round (Joule/round)
E_r	Energy consumption for receive data per round (Joule/round)
E_i	Initial energy of each sensor node (Joule)
P_k	The signal strength that SN k receives from SN i (dBm), i and $k \in I$
P_{ij}	The signal strength that RS j receives from SN i (dBm), $i \in I, j \in J$
P_{ib}	The signal strength that BS b receives from SN i (dBm), $i \in I, b \in B$
P_{i1}	The received signal strength threshold between SNs (dBm)
P_{i2}	The received signal strength threshold between SNs and RSs (dBm)
P_{i3}	The received signal strength threshold between SNs and BS (dBm)
ω_k	Noise at SNs (dBm), $\forall k \in I$
ω_j	Noise at RSs (dBm), $\forall j \in J$
ω_b	Noise at BS (dBm), $\forall b \in B$
δ	Noise threshold for SNs (dB)
N_{RS}	The number of RSs that can be used due to the budget limitation
T	The required network lifetime

It is assumed that the SNs are distributed across the sensing field and the sensing data packets that contain sampled data from SNs are transmitted back to BS directly or indirectly via other neighbor SNs or RSs based on a synchronized schedule specified by a predefined period of time. We assume no collision in the packet transmission of SNs due to the MAC operation of IEEE 802.15.4.

The proposed optimal RS placement problem is formulated as a Binary Integer Linear Programming (BILP) model, denoted as a ME-RPP model. Table I shows notations used in the model. The ME-RPP model aims to minimize the SNs' energy consumption, including energy used for receiving and forwarding sensing data packets. This can be written as the objective function (1). We incorporate other network requirements into the mathematical model through a set of constraints written in (2)–(12).

Objective:

$$\text{Min } T \left(\sum_{i \in I} (E_r \sum_{m \in I} S_{mi} + E_t \sum_{k \in I} S_{ik} + E_i \sum_{j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib}) \right) \quad (1)$$

Constraints:

$$\sum_{k \in I} S_{ik} + \sum_{j \in J} r_{ij} + \sum_{b \in B} h_{ib} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k \in I} S_{ik} = \sum_{j \in J} r_{ij} + \sum_{b \in B} h_{ib} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} \beta_j \leq N_{RS} \quad (4)$$

$$r_{ij} \leq \beta_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

$$S_{ik}(P_{ik} - P_{i1}) \geq 0 \quad i \text{ and } k \in I, i \neq k \quad (6)$$

$$r_{ij}(P_{ij} - P_{i2}) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7)$$

$$h_{ib}(P_{ib} - P_{i3}) \geq 0 \quad \forall i \in I, b \in B \quad (8)$$

$$S_{ik}(P_{ik} - \omega_k - \delta) \geq 0 \quad i \text{ and } k \in I, i \neq k \quad (9)$$

$$r_{ij}(P_{ij} - \omega_j - \delta) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (10)$$

$$h_{ib}(P_{ib} - \omega_b - \delta) \geq 0 \quad \forall i \in I, b \in B \quad (11)$$

$$T \left(E_r \sum_{m \in I} S_{mi} + E_t \sum_{k \in I} S_{ik} + E_i \sum_{j \in J} r_{ij} + E_t \sum_{b \in B} h_{ib} \right) \leq E_i \quad (12)$$

$$\forall i \in I$$

The objective function (1) intends to minimize energy consumption of SNs for receiving and forwarding sensing data packets during the required network lifetime, T . Constraint (2) states that each SN forms a path to send data packet via a neighboring SN and/or RS to BS. In order to preserve SNs' energy, we limit the sensor-to-sensor transmissions to one hop. Constraint (3) states that if SN receives data packet from other SNs, it will send the packet to RS or BS. Considering the network budget limitation, constraint (4) specifies the number of RSs to be used in the sensing field. Constraint (5) ensures that SNs send data packet to RSs that are installed. To guarantee radio connectivity between SNs, RSs and BS, constraint (6)-(8) ensures that the signal strength received at SNs, RSs and BS must be greater than the specified threshold.

Here the simplify path loss model [12] is applied to evaluate radio connectivity around the sensor nodes. It is assumed symmetric connectivity in different directions around the transmitter. To guarantee the quality of radio communication at the required bit error rate, constraints (9)-(11) enforce that the signal to noise ratio (SNR) level at the receiving SNs, RSs, and BS must be greater than the specified threshold. Constraint (12) specifies the initial energy of each SN. It states that the total energy consumption of each SN for generating, receiving, and transmitting all data packets during the network lifetime cannot exceed the initial energy.

III. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

In this section we present numerical study and analysis demonstrating the optimal RS placement using the proposed ME-RPP model. We compare our model with the other approaches including the minimum spanning tree (MST) without RS, the uniform placement and the center of mass (CM) approach.

In numerical experiments, we consider the sensing field of size 500m×500m in which there are 30 SNs and BS is located at the center of the area as shown in Fig. 2 [11]. To observe the effects of deploying RSs in WSN and the effects of using different RS placement approaches, we conduct six experiments. The first experiment applies the MST to determine the route to send sensing data packets from SNs to BS. In this case, no RS is deployed in the sensing field. In experiment 2nd – 6th, the RSs are deployed in the network. We consider the network budget limitation and specify a fixed number of relay nodes to be used in the sensing field. The uniform placement method is applied in the second and fourth experiment in which two and four RSs are used, respectively. The center of mass method is applied in the third and fifth experiment in which two and four RSs are used, respectively. Table II shows the coordinates to locate RSs of each method. In experiment 2nd – 5th, the MST is applied to find the route to send sensing data packets from SNs to BS. In the last experiment (sixth), the ME-RPP model is applied to find the optimal locations of which the number of RSs is limited to four for a comparison purpose. In addition, the ME-RPP model finds the optimal route to send sensing data packets from SNs to BS. In this last experiment, the candidate sites to install RSs are uniformly distributed at the grid spacing of 50m×50m across the sensing field.

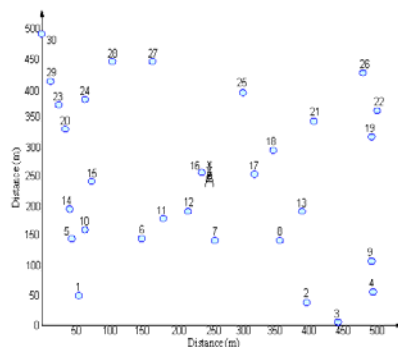


Figure 2. Sensing field and SNs distribution

We use the simplify path loss model [12] to calculate the received signal strength to guarantee sufficient signal strength that can ensure the radio communication between nodes in WSNs. Here the radio connectivity around the sensor nodes is assumed symmetric in different directions around the transmitters. The energy model presented in [15] is used to compute the energy consumption for transmitting and receiving signal of SNs. Such energy model is rewritten here in equations (13)-(14).

$$Tx = (E_c \times B) + (\epsilon_{amp} \times B \times d^n) \quad (13)$$

$$Rx = E_c \times B \quad (14)$$

where Tx denotes the transmitting energy (nJ), Rx denotes the receiving energy (nJ), E_c denotes energy consumption in transmitting and receiving circuit (nJ/bit), ϵ_{amp} denotes energy consumption in amplifier ($nJ/bit/m^m$), B denotes the number of bits in the packet ($bits$), d denotes the distance between transmitter and receiver (m) and n denotes an index path-loss exponent.

Furthermore, the WSN standards IEEE 802.15.4 are considered in our experiments. Table III shows the parameters used in the mathematical experiments. The received signal strength threshold to ensure the radio communication between nodes in the network is set to -90 dBm [13]. The SNR level to guarantee the quality of radio communication is set to 1 dB in order to achieve bit error rate (BER) at 10^{-5} [14]. The period of time to transmit a sensing data packet is 5 minutes/round. Here we consider the required network lifetime of 47 days (13,631 rounds).

In experiment 6th where the ME-RPP model is applied to find the optimal locations to install RSs, we input the set of RS candidate sites, the required network lifetime, and other parameters to the model. Then, we solve the problem by implementing the ME-RPP model with the ILOG-OPL development studio and solving with CPLEX 5.2 optimization solver. Computations are performed on an Intel Centrio Core2 Duo Processor 2.0 GHz and 2 GB of RAM.

TABLE II. Coordinate to install RSs

Approaches	Coordinate to install RSs	
	use 2 RSs	use 4 RSs
1. Uniform placement	(378, 114), (125, 346)	(128, 110), (382, 114), (128, 335), (382, 335)
2. Center of mass	(32, 246), (425, 107)	(78, 100), (417, 82), (57, 400), (400, 357)

TABLE III. Parameters used in numerical experiments

Parameters	Value
Receiver sensitivity threshold	-90 dBm
Operating frequency	2.4 GHz
Initial energy of sensor nodes	61,560 joules
Transmit power	32 mW
Reference distance	10 m.
Path loss exponent	4
SNR	1 dB
Packet size	200 bits
Network lifetime	13,631 rounds (47 days)

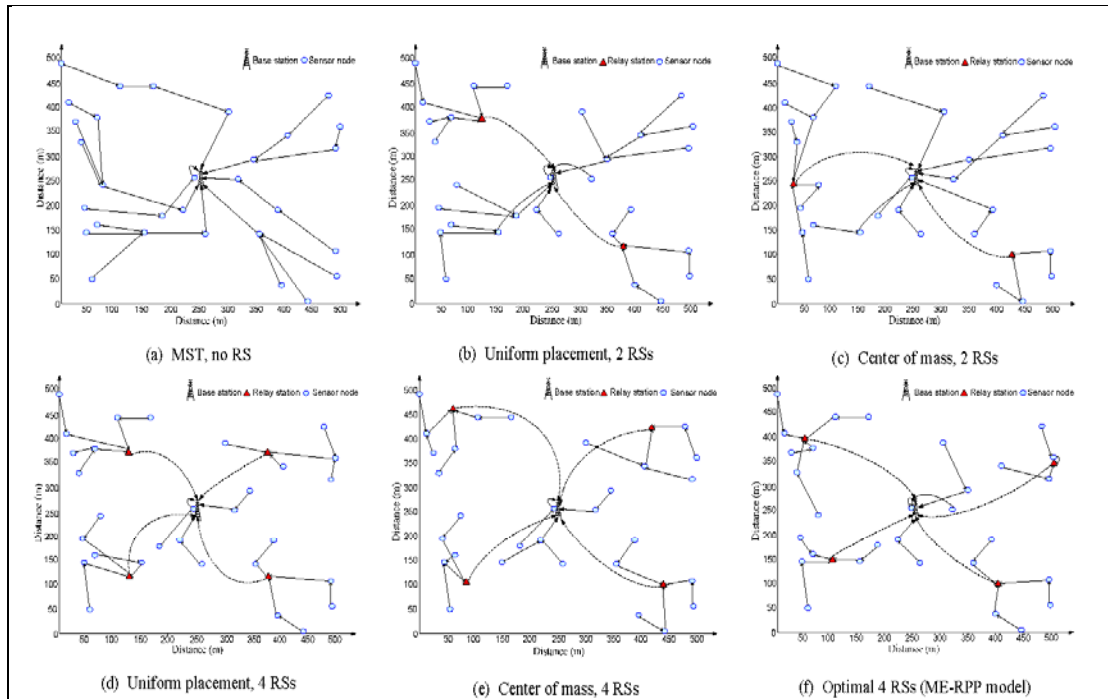


Figure 5. Relay station placements and packet transmission paths

The resulting network structures and the packet transmission paths are shown in Fig.5(a)-5(f). Fig.5(a) shows the network structure and the packet transmission paths obtained from the MST method used in the first experiment. In this case, no RS is deployed and is used as a reference for the comparison purpose of the energy consumption. In the preliminary experiments, we consider the network budget limitation and specify the limited number of RSs that can be used in the sensing field. In the case of using two RSs as shown in fig.5(b) and 5(c), the network structures are obtained by the uniform placement and the center of mass method, respectively. In fig.5(b), the two RSs are manually placed in the upper left corner and the lower right corner whereas in fig.5(c), the two RSs are placed at the center of a group of SNs in left and right side of the sensing field. The case of using four RSs are shown in fig.5(d)-5(f). The network structures in fig.5(d) and 5(e) are obtained by the uniform placement and the center of mass method, respectively. Fig.5(f) shows the optimal network structure and the optimal packet transmission path derived by the ME-RPP model. Such optimal configuration results in the minimum energy consumption compared with those of other methods as shown in table IV and V.

Table IV and V summarize the energy consumption of SNs and the resulting network lifetime of each experiment. Table IV reports the first SN in the network that depleted its energy and shows the amount of energy that such node consumed in each round of the packet transmission. We can see that in the case of MST with no RS, the first node that depleted its energy consumed the highest amount of energy in each round whereas in the case of ME-RPP with 4 RSs,

the energy consumption in each round of the first node that depleted its energy is lowest. As a result, the proposed ME-RPP model yielded WSN structure that could operate for the required network lifetime whereas the other methods resulted in shorter operating time.

From Table V, although the center of mass (CM) using 4 RSs could yield the network lifetime almost equal to that of the ME-RPP model, the average energy consumption of SNs in the network is almost 10% higher than that of the ME-RPP model.

Table IV. Numerical result comparison

Experiments	First SN depleting energy	Energy consumption of SN in each round (Joules)	Network lifetime	
			Rounds	Days
1.MST, no RS	SN 15	57.84	1,064	3
2.Uniform 2 RSs	SN 6	35.36	1,740	6
3.CM 2 RSs	SN 24	25.82	2,384	8
4.Uniform 4 RSs	SN 22	13.11	4,695	16
5.CM 4 RSs	SN 14	4.77	12,900	44
6. ME-RPP 4 RSs	SN 18	4.52	13,631	47

Table V. Average energy consumption of sensor nodes

Experiment	Network lifetime (days)	Average energy consumption (Joules)	SD. (Joules)
1.MST, no RS	3	11,557.73	15,233.59
2.Uniform 2 RSs	6	7,052.72	11,958.22
3.CM 2 RSs	8	11,887.16	17,399.20
4.Uniform 4 RSs	16	10,377.22	16,878.24
5.CM 4 RSs	44	13,196.49	17,263.87
6. ME-RPP 4 RSs	47	12,106.65	15,266.74

Fig. 3 compares the energy consumption of each SN in the network. We can observe that the optimal 4RS-deployment (derived by the ME-RPP model) results in the lowest energy consumption compared with other techniques. Fig. 4 compares the operating time (in rounds) versus the residual energy of SN that is the bottle neck of the network (i.e., the first SN that depleted its energy of which the node ID shown in Table IV). We can see that the optimal 4RS-deployment (derived by the ME-RPP model) also yields the longest network lifetime compared with those of the other techniques.

IV. CONCLUSION

In this paper, the optimal relay node placement problems for the energy efficiency and the green communication in wireless sensor networks are investigated. We propose a novel mathematical formulation as a Binary Integer Linear Programming (BILP) model that can determine the optimal locations to installed relay stations (RSs) and the packet transmission-path assignment from SNs to BS with a set of

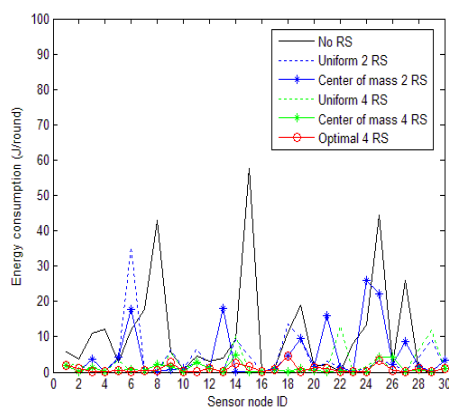


Figure 3. Energy consumption comparison

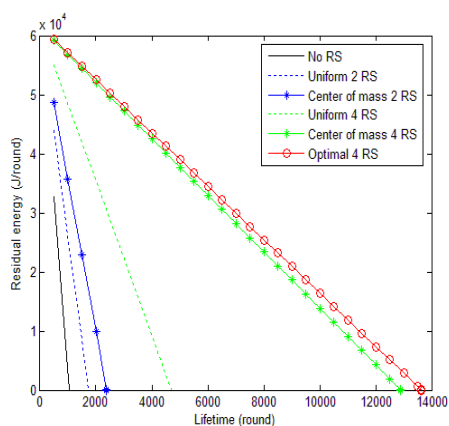


Figure 4. Residual energy versus network lifetime

constraints on the radio communication range, the signal quality requirement in term of bit error rate limitation and the required network lifetime. Numerical experiments illustrate that the proposed method yield WSN structures that can operate with more efficient energy utilization compared with other methods in term of the network lifetime, the average energy consumption and the residual energy of SNs. Our ongoing works investigate performance and effectiveness of the proposed approach. Furthermore, we investigate the diversity of the packet transmission paths to enhance the quality of delivery in noisy and chaos environments, considering the real sensor networks deployment scenarios.

REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] M. Younis and K. Akkaya, "Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 6, pp. 621-655, 2008.
- [3] A. Bari, D. Teng, and A. Jaekel, "Optimal relay node placement in hierarchical sensor networks with mobile data collector," in *Proceedings - International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN, 2009*.
- [4] S. Pandey, S. Dong, P. Agrawal, and K. M. Sivalingam, "On performance of node placement approaches for hierarchical heterogeneous sensor networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 14, pp. 401-414, 2009.
- [5] Y. T. Hou, Y. Shi, H. D. Sherali, and S. F. Midkiff, "On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, pp. 2579-2590, 2005.
- [6] W. Qianhong, X. Kenan, G. Takahara, and H. Hassanein, "Transactions Papers - Device Placement for Heterogeneous Wireless Sensor Networks: Minimum Cost with Lifetime Constraints," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 2444-2453, 2007.
- [7] W. Guo, X. Huang, W. Lou, and C. Liang, "On relay node placement and assignment for two-tiered wireless networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 13, pp. 186-197, 2008.
- [8] F. M. Al-Turjman, H. S. Hassanein, and M. A. Ibnkahla, "Connectivity optimization with realistic lifetime constraints for node placement in environmental monitoring," in *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN, 2009*, pp. 617-624.
- [9] A. P. Azad and A. Chockalingam, "Mobile base stations placement and energy aware routing in wireless sensor networks," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE, 2006*, pp. 264-269.
- [10] J. Jia, J. Chen, G. Chang, Y. Wen, and J. Song, "Multi-objective optimization for coverage control in wireless sensor network with adjustable sensing radius," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 57, pp. 1767-1775, 2009.
- [11] Y. Shi, Y. T. Hou, and A. Efrat, "Algorithm design for a class of base station location problems in sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 15, pp. 21-38, 2009.
- [12] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Markono Print Media Pte Ltd, Singapore, 2007, pp. 46-48.
- [13] Maxstream Incorporation, 2006, July, 12. "IEEE 802.15.4 OEM RF Modules" Available: <http://www.MaxStream.net>
- [14] J. Adams. 2004. IEEE Standard 802.15.4. Available: http://www.embedded-computing.com/departments/zigbee/fall_04/
- [15] En-Jie Ding, Chao-Nan Wang, and Qiang Zhou, "Wireless Model and Deployment of Sensor Networks in the Mine," in *Proc. of the International Conference on Information Acquisition*, No. 4295791, pp. 538-542, 9-11 July 2007.

การศึกษาประสิทธิภาพเครือข่ายเมื่อมีการใช้งานมาตรฐาน 802.11g และ 802.15.4 ในบริเวณเดียวกัน Network Performance Study of Coexistence Impact between IEEE 802.11g and IEEE 802.15.4

ชมพูนุท จันทรร และ ชุตินา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-224392 E-mail : pinky_toonie@hotmail.com, cprommak@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เน้นเสนอการศึกษาประสิทธิภาพเครือข่ายเมื่อมีการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11g และเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 ในบริเวณเดียวกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครือข่ายไร้สายทั้งสองมาตรฐานดังกล่าวสามารถรบกวนกันได้ เมื่อมีการใช้ช่องความถี่ที่ซ้อนทับกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่าย ทำให้อัตราการผิดพลาดของเครือข่าย IEEE 802.15.4 สูงได้ถึง 60% และทำให้ปริมาณงานของเครือข่าย IEEE 802.11g ลดลงได้มากกว่า 50%

คำสำคัญ: เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11g, เครือข่ายส่วนบุคคล IEEE 802.15.4, การวิเคราะห์สมรรถนะ

Abstract

This paper presents network performance study on the effects of the network coexistence between IEEE 802.11g and IEEE 802.15.4 networks. Experimental results show that when the coexisting wireless nodes use overlapping frequency channels, it could increase the Frame Error Rate (FER) of the IEEE 802.15.4 networks up to 60% and it could decrease up to 50% of the throughput of the IEEE 802.11g networks.

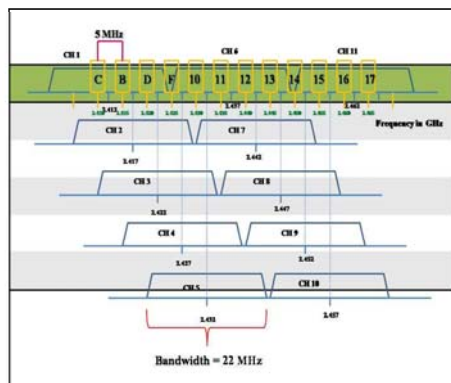
Keywords: WLAN IEEE 802.11, WPAN IEEE 802.15.4, Performance Analysis

1. คำนำ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายกำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ไร้สายเหล่านี้ ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ในมาตรฐาน IEEE 802.11g และ IEEE 802.15.4 เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีการใช้งานในย่านคลื่นความถี่สาธารณะสำหรับ อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial Scientific and Medical; ISM) โดยแบ่งออกเป็นสามย่านคือ 902 MHz, 2.4 GHz และ 5.725 GHz ซึ่งประเทศไทยอนุญาตให้ใช้งานในย่าน

ความถี่ที่ 2.4 GHz หากมีการใช้งานเครือข่ายของมาตรฐานทั้งสองดังกล่าวภายในบริเวณเดียวกันจะทำให้เกิดการรบกวนกันได้ เนื่องจากสัญญาณที่ส่งออกมาอยู่ในย่านความถี่เดียวกัน รูปที่ 1 แสดงการจัดสรรช่องความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.11g และ IEEE 802.15.4 ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11 แบ่งออกเป็น 11 ช่องความถี่ โดยแต่ละช่องมีแบนด์วิดท์กว้าง 22 MHz และมีการซ้อนทับกันระหว่างช่องความถี่ข้างเคียง ส่วนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แบ่งเป็น 16 ช่องความถี่ แต่ละช่องมีแบนด์วิดท์กว้าง 2 MHz โดยมีจุดศูนย์กลางความถี่ของช่องสัญญาณห่างกัน 5 MHz และไม่มีการซ้อนทับกันของสัญญาณระหว่างช่องความถี่ข้างเคียง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ให้ความสนใจการศึกษาประสิทธิภาพการสื่อสารกรณีที่มีการใช้งานเครือข่ายไร้สายมาตรฐานต่างๆ ในบริเวณเดียวกัน โดยส่วนมากใช้วิธีจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [1-2] หรือใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ (analytical model) [3-5] โดยงานวิจัย [1] ใช้การจำลองผลด้วย MatLab/Simulink เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR ของเครือข่าย IEEE802.11 และ IEEE 802.15.4 ส่วนงานวิจัย [2] ใช้การจำลองผลด้วย Network Simulation (NS2) เพื่อเปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ และเวลาหน่วงของการสื่อสารเครือข่าย IEEE 802.11 และ IEEE 802.15.4 สำหรับงานวิจัย [3-4] ได้ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ค่าอัตราการผิดพลาดแพ็คเกจ (Packet Error Rate, PER) ของอุปกรณ์ IEEE 802.15.4 โดยงานวิจัย [3] พิจารณาระยะห่างของอุปกรณ์ และการใช้ช่องความถี่ที่



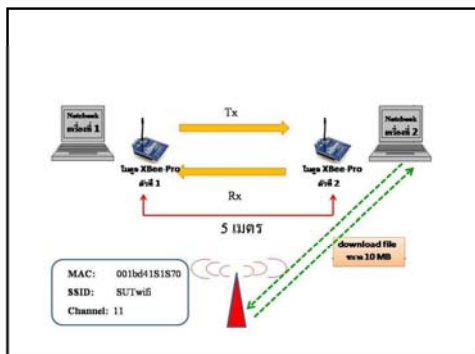
รูปที่ 1 ช่องสัญญาณของ WLAN และ Zigbee ในย่านความถี่ ISM

ต่างกัน ส่วนงานวิจัย [4] พิจารณาการรบกวนของมาตรฐาน IEEE 802.11 และ IEEE 802.15.1 งานวิจัย [5] ได้นำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจากหลักการของ Markov Chain เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่าย IEEE 802.15.4 เมื่อมีการแทรกสอดสัญญาณจากอุปกรณ์ในมาตรฐาน IEEE 802.11

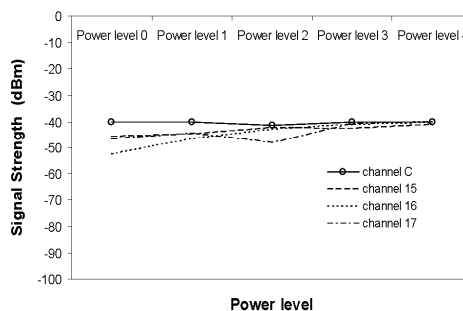
สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเราใช้วิธีการวัดผลจากการทำงานของเครือข่ายจริง เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนระหว่างเครือข่าย IEEE 802.11g กับ IEEE 802.15.4 ต่อสมรรถนะการสื่อสารของเครือข่าย ซึ่งลำดับการนำเสนอของบทความมีดังนี้ หัวข้อที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณ IEEE 802.11g ต่อการสื่อสารของเครือข่าย IEEE 802.15.4 หัวข้อที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณ IEEE 802.15.4 ต่อการสื่อสารของเครือข่าย IEEE 802.11g และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลการทดลองและแนวทางการวิจัยในอนาคต

2. การวิเคราะห์ผลกระทบต่อเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4

หัวข้อนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณจากเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11g ต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่าย IEEE 802.15.4 เมื่อมีการใช้งานทั้งสองเครือข่ายในบริเวณเดียวกัน ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการส่งเฟรมข้อมูลขนาด 32 ไบต์ ผ่านเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย Xbee-Pro โดยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสื่อสารนั้นประเมินจากค่าอัตราเฟรมผิดพลาด (Frame Error Rate, FER) ซึ่งจะคำนวณจากค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy Percentage) ที่กำลังส่งและช่องสัญญาณต่างๆ กัน ในแต่ละการทดลอง และค่าความเข้มสัญญาณ (Signal Strength, dBm) ที่อุปกรณ์ Xbee-Pro รับผิดชอบได้ สภาวะต่างๆ โดยพิจารณาผลกระทบของการเลือกใช้งานช่องสัญญาณสื่อสาร และกำลังส่งสัญญาณของอุปกรณ์ Xbee-Pro และผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11g



รูปที่ 2 การทดลองในลักษณะ line of sight ที่มีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3 ความเข้มสัญญาณกรณี line of sight ที่มีสัญญาณรบกวน

2.1 การสื่อสารระยะใกล้

เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบ ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 โดยติดตั้งอุปกรณ์ Xbee-Pro ในลักษณะ line of sight (LOS) คือไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างอุปกรณ์รับและส่งซึ่งตั้งอยู่ห่างกัน 5 เมตร และไม่มี การสื่อสารผ่านเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ผลการทดลองในกรณีนี้ปรากฏว่า ความเข้มสัญญาณมีค่า -40 dBm และอัตราเฟรมผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ทุกกรณี โดยไม่ขึ้นกับช่องสัญญาณที่กำหนดให้อุปกรณ์ Xbee-Pro

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยได้ทำการส่งเฟรมข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ Xbee-Pro ซึ่งตั้งอยู่ในลักษณะ line of sight ห่างกัน 5 เมตรเช่นเดิม แต่ในขณะที่ส่งเฟรมข้อมูลได้มีการคว่ำ โหลดข้อมูลมายังโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ผ่านเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งจุดเชื่อมต่อ (Access Point) ทำการส่งสัญญาณที่ช่องความถี่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 2 ผลการทดลองปรากฏว่า เมื่ออุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้ช่องความถี่ที่ 15-17 ซึ่งส่งสัญญาณออกมาในย่านความถี่ที่ซ้อนทับกับช่องความถี่ที่ 11 ของ IEEE 802.11 ความเข้มสัญญาณที่อุปกรณ์ Xbee-Pro รับผิดชอบมีค่าต่ำกว่า -40 dBm ดังแสดงในรูปที่ 3 หากอุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้กำลังส่งสัญญาณในระดับที่ 1 ค่าความเข้มสัญญาณจะลดลงอยู่ที่ประมาณ -53 dBm ส่วนอัตราเฟรมผิดพลาดนั้นยังมีค่าเป็นศูนย์ทุกกรณีเช่นเดิม เพราะแม้ว่าความเข้มสัญญาณจะมีค่าต่ำกว่า แต่ก็ยังมีความแรงพอที่จะเอาชนะสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการส่งสัญญาณของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

2.2 การสื่อสารระยะไกล

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองภายในอาคารที่มีขนาดกว้าง 70 เมตร ยาว 80 เมตร ซึ่งมีเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11g ติดตั้งอยู่ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 โดยติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย Xbee-Pro เพื่อทำการทดลองรับส่งเฟรมข้อมูลในลักษณะ non-line of sight (NLOS) ซึ่งมี

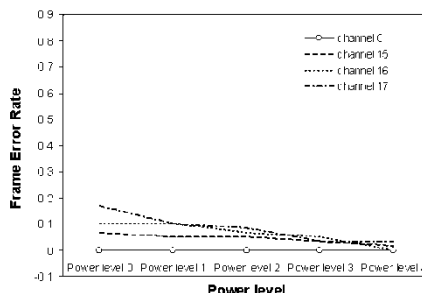
ระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง 45 เมตร โดยทำการทดลอง 2 กรณีคือ กรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งเกิดจากการความถี่ของข้อมูลยังใช้ตัวบ่งชี้คอมพิวเตอร์ผ่านเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยจุดเชื่อมต่อส่งสัญญาณที่ช่องความถี่ 11

ผลการทดลองปรากฏว่าการสื่อสารเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 ในระยะไกลแบบ NLOS จะมีคุณภาพการสื่อสารแย่งลงเมื่อเปรียบเทียบกับการสื่อสารระยะใกล้แบบ LOS กล่าวคือ อัตราเฟรมผิดพลาดอาจมีค่าสูงได้ถึง 20% ในกรณีไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และมีค่าสูงได้ถึง 60% ในกรณีมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

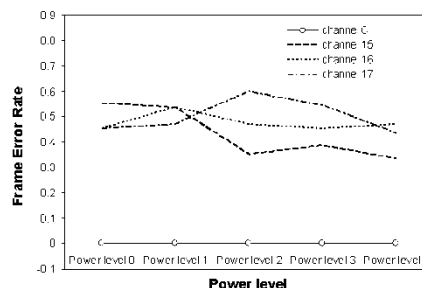
กล่าวคือในกรณีไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย นั่นคือไม่ได้ทำการความถี่ของข้อมูลยังใช้ตัวบ่งชี้ แต่ที่อัตราเฟรมผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ถ้าอุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้กำลังส่งสัญญาณค่าเช่นที่ power level 0 (0 dBm) อัตราเฟรมผิดพลาดมีค่าสูงถึง 20% แต่เมื่อใช้กำลังส่งสัญญาณสูงสุดที่ power level 4 (18 dBm) อัตราเฟรมผิดพลาดก็จะมีค่าน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 5

ส่วนในกรณีมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย นั่นคือทำการความถี่ของข้อมูลยังใช้ตัวบ่งชี้ขณะที่ทำการรับส่งเฟรมผ่านอุปกรณ์ Xbee-Pro ผลการทดลองปรากฏว่า เมื่ออุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้ช่องความถี่ 15, 16 และ 17 อัตราเฟรมผิดพลาดมีค่าสูงได้ถึง 60% ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากว่าสัญญาณของช่องความถี่ 15, 16 และ 17 ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 นั้นมีส่วนซ้อนทับกับสัญญาณของช่องที่ 11 ในมาตรฐาน IEEE 802.11g เคียงข้างความถี่ ส่งผลให้เกิดการรบกวนและทำให้เกิดเฟรมผิดพลาดขึ้น ในขณะที่เมื่ออุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้ช่องความถี่ C ซึ่งสัญญาณไม่ซ้อนทับกับสัญญาณของช่องความถี่ 11 ของ IEEE 802.11g จึงไม่รบกวนกัน ทำให้อัตราเฟรมผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์

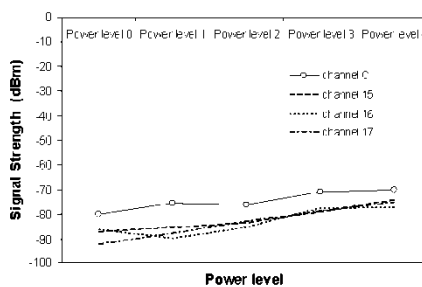
เมื่อพิจารณาเรื่องคุณภาพสัญญาณของการสื่อสารเครือข่ายไร้สาย IEEE802.15.4 ในระยะไกลแบบ NLOS ปรากฏว่าความเข้มสัญญาณที่อุปกรณ์ Xbee-Pro รับให้มีค่าต่ำกว่า -70 dBm ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 โดยในกรณีที่ไม่มีการความถี่ของข้อมูลยังใช้ตัวบ่งชี้คอมพิวเตอร์ ความเข้มสัญญาณของอุปกรณ์ Xbee-Pro เมื่อใช้ช่องความถี่ C มีค่าอยู่ในช่วง -80 ถึง -70 dBm ส่วนเมื่ออุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้ช่องความถี่ 15, 16 และ 17 ความเข้มสัญญาณที่ได้จะมีค่าต่ำลงอยู่ในช่วง -90 ถึง -75 dBm ดังแสดงในรูปที่ 7 นั่นคือเมื่ออุปกรณ์ Xbee-Pro ใช้ช่องความถี่ C จะมีคุณภาพสัญญาณดีกว่าเมื่อใช้ช่องความถี่ 15, 16 หรือ 17 เนื่องจากว่าสัญญาณของช่องความถี่ C ของ IEEE 802.15.4 ไม่ซ้อนทับกับสัญญาณของช่องความถี่ 11 ของ IEEE 802.11g จึงไม่รบกวนกัน ส่วนสัญญาณของช่องความถี่ 15, 16 และ 17 ของ IEEE802.15.4 นั้นมีส่วนซ้อนทับกับสัญญาณของช่องที่ 11 ของ IEEE 802.11g เคียงข้างความถี่ส่งผลให้การ



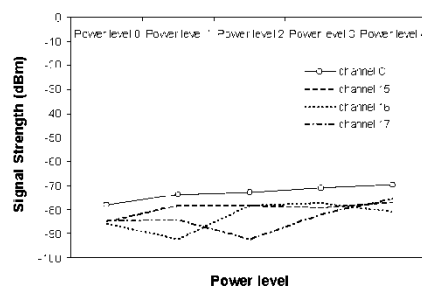
รูปที่ 5 อัตราเฟรมผิดพลาดของการทดลองระยะไกลแบบ NLOS กรณีไม่มีการความถี่ของข้อมูล



รูปที่ 6 อัตราเฟรมผิดพลาดของการทดลองระยะไกลแบบ NLOS กรณีมีการความถี่ของข้อมูล



รูปที่ 7 ความเข้มสัญญาณของการทดลองระยะไกลแบบ NLOS กรณีไม่มีการความถี่ของข้อมูล



รูปที่ 8 ความเข้มสัญญาณของการทดลองระยะไกลแบบ NLOS กรณีมีการความถี่ของข้อมูล

รบกวนมีมากกว่า จึงทำให้คุณภาพสัญญาณต่ำกว่ากรณีของความเร็ว C

ส่วนในกรณีที่มีการดาวน์โหลดข้อมูลมายัง โน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ ความเร็วสัญญาณที่อุปกรณ์ Xbee-Pro รับผิดชอบในทำนองเดียวกันกับกรณีก่อนหน้านี้ เพียงแต่มีความเร็วสัญญาณน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 8 นั่นคือเมื่อมีการดาวน์โหลดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ของช่องความถี่ที่ 11 ของ IEEE 802.11g ก็ยิ่งมากขึ้นทำให้สัญญาณของอุปกรณ์ Xbee-Pro เมื่อใช้ช่องความถี่ที่ 15, 16 และ 17 มีคุณภาพลดลง โดยมีความเร็วสัญญาณอยู่ในช่วง -95 ถึง -80 dBm

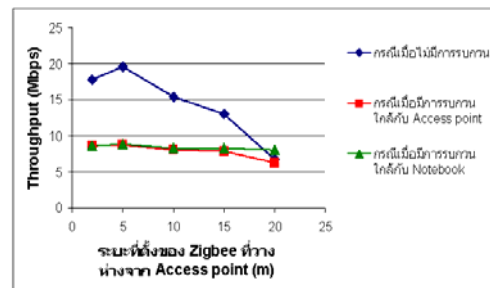
4. การวิเคราะห์ผลกระทบต่อการขยายไร้สาย IEEE 802.11g

หัวข้อนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณจากเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 ต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11g เมื่อมีการใช้งานทั้งสองเครือข่ายในบริเวณเดียวกัน ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการดาวน์โหลดข้อมูลขนาด 10 MB มายังโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์โดยผ่านจุดเข้าถึงที่ใช้ช่องความถี่ 6 ในขณะที่ดาวน์โหลดนั้น ก็ได้ทำการจำลองการสื่อสารของเครือข่าย IEEE 802.15.4 โดยทำการส่งเฟรมแบบต่อเนื่องผ่านอุปกรณ์ Xbee-Pro ซึ่งส่งสัญญาณที่ช่องความถี่ 11 และใช้กำลังส่งสัญญาณที่ 18 dBm ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้น ประเมินจากค่าปริมาณงาน (Throughput) เมื่อจุดเข้าถึงกับโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์มีระยะห่างที่ไกลออกไป

รูปที่ 9 แสดงผลการทดลอง จะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนจากเครือข่าย IEEE 802.15.4 ปริมาณงานของการสื่อสารผ่านเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างจุดเข้าถึงกับโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ (d) โดยปริมาณงานจะลดลงจาก 20 Mbps ที่ระยะ d เท่ากับ 5 เมตร มาที่ 6 Mbps ที่ระยะ d เท่ากับ 20 เมตร ในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ Xbee-Pro ใกล้กับจุดเข้าถึง จะเห็นว่าค่าปริมาณงานมีค่าลดลงมาก โดยมีปริมาณงานประมาณ 8 Mbps ที่ระยะ d เท่ากับ 5 เมตร และลดลงมาที่ 6 Mbps ที่ระยะ d เท่ากับ 20 เมตร ส่วนในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ Xbee-Pro ใกล้กับโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ ปริมาณงานที่ได้มีค่าประมาณ 7 Mbps ค่อนข้างคงที่สำหรับทุกระยะ d

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการสื่อสารเครือข่ายไร้สายเมื่อมีการใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.11g และ IEEE 802.15.4 ในบริเวณเดียวกัน โดยได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนระหว่างเครือข่ายไร้สายทั้งสอง จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณจากเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11g สามารถรบกวนการสื่อสารของเครือข่าย IEEE 802.15.4 ได้หากทั้งสองเครือข่ายใช้ช่องความถี่ที่ส่งสัญญาณในย่านความถี่ที่ซ้อนทับกัน ยกเว้นกรณีที่อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ



รูปที่ 9 ปริมาณงานของการสื่อสารผ่านเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

IEEE 802.15.4 อยู่ห่างกันไม่เกิน 5 เมตร การเลือกใช้ช่องความถี่จึงจะไม่เกิดผลกระทบต่อเฟรมคิดพลาด แต่ในกรณีที่อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ IEEE 802.15.4 อยู่ในระยะไกล การเลือกใช้ช่องความถี่จะมีผลต่อคุณภาพการสื่อสารอย่างมาก นั่นคือถ้าอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ IEEE 802.15.4 ใช้ช่องความถี่ที่ส่งสัญญาณในย่านความถี่ซ้อนทับกับเครือข่าย IEEE 802.11g จะทำให้ข้อผิดพลาดเพิ่มขึ้นถึง 60% ในทำนองเดียวกันสัญญาณจากเครือข่าย IEEE 802.15.4 สามารถรบกวนการสื่อสารของเครือข่าย IEEE 802.11g ได้เช่นกันเมื่อทั้งสองเครือข่ายใช้ช่องความถี่ที่ส่งสัญญาณในย่านความถี่ที่ซ้อนทับกัน จะส่งผลให้ปริมาณงานของเครือข่าย IEEE 802.11g ลดลงได้มากถึง 55%

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อติศร บังศรี และชลดา ศรีบุญรินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองและการวัดสัญญาณ

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Shuaib, M. Alnuaimi, M. Boulmalf, I. Jawhar, F. Salaabi and A. Lakas, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4: Experimental and Simulation Results," Journal of Communications, Vol. 2 No. 4, June 2007, pp. 29-37.
- [2] P. Eamsomboon, P. Keeratiwintakom and C. Mitpant, "The performance of Wi-Fi and Zigbee networks for inter-vehicle communication in Bangkok metropolitan area," 8th International Conference, ITS Telecommunications, 2008, pp. 408-411.
- [3] G. Yang, Y. Yu, "Zigbee networks performance under WLAN 802.11b/g interference," 4th International Symposium, Wireless Pervasive Computing, Feb 2009, pp. 1-4.
- [4] S.Y. Shin, H.S. Park, S. Choi and W.H. Kwon, "Packet error rate analysis of Zigbee under WLAN and Bluetooth interferences," IEEE Trans. Wireless Communication, Vol. 6 Issue. 8, 2007, pp. 2825-2830.
- [5] J.W. Chong, H.Y. Hwang, C.Y. Jung and D.K. Sung, "Analysis of throughput in Zigbee network under the presence of WLAN interference," International Symposium, Communications and Information Technologies, 2007, pp. 1166-1170.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชมพูนุท จันทรศร เป็นบุตรของ นาวาอากาศตรี วันชัย จันทรศร และนางฉวีวรรณ จันทรศร เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 31 ตุลาคม พุทธศักราช 2529 ที่จังหวัดนครปฐม เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนกำจรวิทย์ ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นชั้นปีที่ 1 ถึง 3 จากโรงเรียนพระนารายณ์ และระดับมัธยมศึกษาตอนปลายชั้นปีที่ 4 ถึง 6 จากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัย แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีพุทธศักราช 2548 หลังจกสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีพุทธศักราช 2551 เกียรตินิยมอันดับ 2 ได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการออกแบบและวางแผนเครือข่ายตรวจรู้ไร้สาย จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า แขนงไฟฟ้าสื่อสาร ในปีพุทธศักราช 2553

ระหว่างศึกษาได้เสนอขอความเข้าร่วมประชุมในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33) ณ โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 1-3 ธันวาคม 2553 และ งานประชุมวิชาการนานาชาติ IEEE Asia Pacific Wireless Communication Symposium ครั้งที่ 8 (IEEE APWCS 2011) ประเทศ สิงคโปร์ วันที่ 22-23 สิงหาคม 2554 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก จ