



การสื่อสารแบบหลายอินเตอร์เฟซและหลายช่องสัญญาณในเครือข่ายเซนเซอร์และ
แอกชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร
**Multi-Interface and Multi-Channel Communications in Wireless Sensor and
Actuator Networks for Building-Temperature Control**

ยุทธนา ไชยชนะ
Yuttana Chaichana

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การสื่อสารแบบหลายอินเตอร์เฟซและหลายช่องสัญญาณในเครือข่ายเซนเซอร์และ
แอกชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

**Multi-Interface and Multi-Channel Communications in Wireless Sensor and
Actuator Networks for Building-Temperature Control**

ยุทธนา ไชยชนะ

Yuttana Chaichana

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสื่อสารแบบหลายอินเตอร์เฟสและหลายช่องสัญญาณในเครือข่าย
 เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายใน
 อาคาร

ผู้เขียน นายยุทธนา ไชยชนะ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกลม ชีรภาพจรเดช)	(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกลม ชีรภาพจรเดช)
กรรมการ
	(ดร.กิตติคุณ ทองพูล)
กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรรัตน์ เรืองชัยจตุพร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกรม วีรภาพจรเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายยุทธนา ไชยชนะ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการขอขึ้นอนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายยุทธนา ไชยชนะ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสื่อสารแบบหลายอินเตอร์เฟสและหลายช่องสัญญาณในเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร
ผู้เขียน	นายยุทธนา ไชยชนะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

เครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายเป็นวิวัฒนาการขั้นถัดไปของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย สามารถให้บริการทั้งการเฝ้าระวังและการควบคุมในงานประยุกต์ต่าง ๆ ได้หลากหลาย ดังนั้นการรวมเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายเข้ากับระบบควบคุมแบบลูปปิดให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นโจทย์วิจัยที่สำคัญ วิทยานิพนธ์นี้เป็นงานศึกษาวิจัยและพัฒนาการรวมวิธีการสื่อสารแบบหลายอินเตอร์เฟสและหลายช่องสัญญาณเข้ากับการจัดเส้นทางแบบ AODV (Ad hoc on demand distance vector) เพื่อแก้ประเด็นปัญหาการแย่งชิงช่องสัญญาณในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่มักกำหนดให้ใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวตามแนวทางดั้งเดิมบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 วิทยานิพนธ์นี้เลือกงานประยุกต์เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร โพรโทคอลสื่อสารแบบใหม่ที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีชื่อว่า 3IMC-MAODV (3-Interface multi-channel modified AODV) และ 4IMC-MAODV (4-Interface multi-channel modified AODV) โพรโทคอลที่น่าเสนอนี้มีกระบวนการดำเนินการทั้งการจัดเส้นทางและการจัดสรรช่องสัญญาณ ยิ่งไปกว่านั้น อัลกอริทึมที่น่าเสนอยังพิจารณาค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองการควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนวิธีการตัดสินใจด้วย วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV เปรียบเทียบกับ AODV แบบดั้งเดิม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่น่าเสนอให้สมรรถนะที่สูงกว่า AODV ทั้งในมุมมองการสื่อสารและการควบคุม

Thesis Title	Multi-Interface and Multi-Channel Communications in Wireless Sensor and Actuator Networks for Building-Temperature Control
Author	Mr. Yuttana Chaichana
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2016

ABSTRACT

Wireless sensor and actuator networks (WSANs), which are the next evolution of wireless sensor networks, can provide not only monitoring but also controlling services to various applications. Thus, how to efficiently combine the WSANs and a closed loop control system is an important research question. This thesis investigates how to integrate multi-channel and multi-interface communications with AODV (Ad hoc on demand distance vector) routing to address the contention issue in the traditional single-channel WSANs based on IEEE 802.15.4. A building-temperature control system is employed as a control application in this work. This thesis proposes new communication protocols entitled 3IMC-MAODV (3-Interface multi-channel modified AODV) and 4IMC-MAODV (4-Interface multi-channel modified AODV). These proposed protocols perform both routing and channel assignments altogether. Furthermore, an error of the temperature control response is also considered in the proposed algorithms. Performance analyses of 3IMC-MAODV and 4IMC-MAODV are compared with traditional AODV in this thesis. The results indicate that proposed solutions can provide better performance than AODV in both communication and control aspects.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกรม ชีรภาพจรเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย จัดเวลากระบวนการคิดวิเคราะห์ รวมทั้งให้กำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู กรรมการสอบ โครงร่างและประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรารัตน์ เรืองชัยจตุพร และ ดร. กิตติคุณ ทองพูล ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆมาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ รวมทั้งน้องๆ นักศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และกำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเยี่ยม และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

ยุทธนา ไชยชนะ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(25)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.2.1 บทความที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย	3
1.2.2 บทความที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ.....	4
1.3 ประเด็นวิจัย	9
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	9
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	10
1.7 สรุปผลงานที่เป็นประโยชน์	10
1.8 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์	12
บทที่ 2 แบบจำลองระบบ	13
2.1 ภาพรวมระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย.....	13
2.2 ระบบควบคุม.....	14
2.2.1 แบบจำลองอุณหภูมิภายในอาคาร.....	14
2.2.2 ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์	16
2.3 ระบบสื่อสาร	18
2.3.1 ลำดับชั้นของการติดต่อสื่อสารไร้สาย.....	18
2.3.2 แบบจำลองมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และ กลไก CSMA/CA	19
2.3.3 แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ.....	20
2.3.4 แบบจำลองอินเตอร์เฟซ.....	20
2.3.5 ตัวบ่งชี้การละทิ้งของแพกเก็ตใน NS2.....	22
บทที่ 3 การวิเคราะห์สมรรถนะเบื้องต้นของโพรโทคอล AODV.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 บทนำ.....	24
3.2 การศึกษาปริมาณงานสูงสุดของโพรโทคอล AODV.....	25
3.2.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	25
3.2.2 การออกแบบการจำลอง.....	25
3.2.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	29
3.2.4 สรุปผลการจำลอง.....	35
3.3 การศึกษาผลกระทบของเวลาเริ่มต้นในการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง	35
3.3.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	35
3.3.2 การออกแบบการจำลอง.....	35
3.3.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	37
3.3.4 สรุปผลการจำลอง.....	49
3.4 การศึกษาผลกระทบเมื่อโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน.....	50
3.4.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	50
3.4.2 การออกแบบการจำลอง.....	50
3.4.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	51
3.4.4 สรุปผลการจำลอง.....	56
3.5 การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ Active route time-out.....	56
3.5.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	56
3.5.2 การออกแบบการจำลอง.....	56
3.5.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	58
3.5.4 สรุปผลการจำลอง.....	62
บทที่ 4 โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ	64
4.1 บทนำ.....	64
4.2 โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV.....	64
4.2.1 กระบวนการส่งและรับข้อความร้องขอเส้นทาง	64
4.2.2 กระบวนการส่งและรับข้อความยืนยันเส้นทาง.....	65
4.2.3 กระบวนการส่งและรับข้อความเส้นทางผิดพลาด	65
4.3 ขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 โพรโทคอลจัดเส้นทาง 3IMC-MAODV	66
4.3.2 โพรโทคอลจัดเส้นทาง 4IMC-MAODV	72
4.3.3 กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ	76
บทที่ 5 การวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	81
5.1 บทนำ.....	81
5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	82
5.2.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	82
5.2.2 การออกแบบการจำลอง.....	82
5.2.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	87
5.2.4 สรุปผลการจำลอง.....	102
5.3 การศึกษาปริมาณงานสูงสุด.....	103
5.3.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	103
5.3.2 การออกแบบการจำลอง.....	103
5.3.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	104
5.3.4 สรุปผลการจำลอง.....	107
5.4 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	107
5.4.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	107
5.4.2 การออกแบบการจำลอง.....	107
5.4.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	109
5.4.4 สรุปผลการจำลอง.....	118
5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีไม่จำกัดจำนวนฮอปในการส่งข้อมูล	119
5.5.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	119
5.5.2 การออกแบบการจำลอง.....	119
5.5.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	120
5.5.4 สรุปผลการจำลอง.....	126
5.6 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีจำนวนช่องสัญญาณสูงสุดต่างกัน	126
5.6.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	126
5.6.2 การออกแบบการจำลอง.....	127

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.6.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	128
5.6.4 สรุปผลการจำลอง	138
5.7 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีอัตราการส่งข้อมูลสูง	139
5.7.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	139
5.7.2 การออกแบบการจำลอง	139
5.7.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล	140
5.7.4 สรุปผลการจำลอง	148
5.8 สรุปภาพรวมผลการวิเคราะห์สมรรถนะ	148
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	161
6.1 สรุปผลการวิจัย	161
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	165
6.2.1 ปัญหา	165
6.2.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	165
6.2.3 ข้อเสนอแนะ	165
บรรณานุกรม	167
ภาคผนวก การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	170
ประวัติผู้เขียน	177

รายการตาราง

หน้า

ตาราง 1-1 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรช่องสัญญาณบน โหนดที่ประกอบด้วย หลายอินเตอร์เฟซ.....	8
ตาราง 2-1 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์ทั่วไป.....	15
ตาราง 2-2 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน.....	15
ตาราง 2-3 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์พื้นที่.....	15
ตาราง 2-4 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์อุณหภูมิ.....	16
ตาราง 2-5 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์อัตราขยายที่ใช้งานในตัวควบคุม PID.....	16
ตาราง 2-6 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง การแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ.....	20
ตาราง 3-1 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.2.....	27
ตาราง 3-2 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.3.....	37
ตาราง 3-3 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.4.....	50
ตาราง 3-4 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.5.....	57
ตาราง 4-1 ตารางโหนดข้างเคียงของ โหนด 2.....	70
ตาราง 4-2 ตารางจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณของ โหนด 2.....	70
ตาราง 5-1 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.2.....	84
ตาราง 5-2 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.3.....	103
ตาราง 5-3 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.4.....	109
ตาราง 5-4 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.5.....	119
ตาราง 5-5 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.6.....	127
ตาราง 5-6 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.7.....	140
ตาราง 5-7 การวิเคราะห์ระบบควบคุมกรณีไม่มีระบบสื่อสารไร้สาย.....	151
ตาราง 5-8 การวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบ กรณี 1 โหนดต้นทาง 1 โหนดปลายทางและมีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอป.....	151
ตาราง 5-9 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลต้นแบบและโพรโทคอลที่นำเสนอ กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	152
ตาราง 5-10 การศึกษาปริมาณงานสูงสุดของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV.....	153

รายการตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง 5-11 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของ โพรโทคอลต้นแบบและ โพรโทคอลที่นำเสนอ กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด.....	154
ตาราง 5-12 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของ โพรโทคอลต้นแบบและ โพรโทคอลที่นำเสนอ กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	155
ตาราง 5-13 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของ โพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณ ข้อมูลสูงสุด 2 ช่องกับกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดตามจำนวนคู่การสื่อสาร (สมรรถนะในระบบสื่อสาร)	156
ตาราง 5-14 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของ โพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณ ข้อมูลสูงสุด 2 ช่องกับกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดตามจำนวนคู่การสื่อสาร (สมรรถนะในระบบควบคุม).....	157
ตาราง 5-15 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของ โพรโทคอลต้นแบบและ โพรโทคอลที่นำเสนอ กรณีระบบมีอัตราการส่งข้อมูลที่ 10 แพกเกตต่อวินาที	158
ตาราง 5-16 สรุปการละทิ้งแพกเกตข้อมูลกรณีใช้การส่งข้อมูลที่ 12.19 วินาทีต่อแพกเกต.....	159
ตาราง 5-17 สรุปการละทิ้งแพกเกตข้อมูลกรณีใช้การส่งข้อมูลที่ 10 แพกเกตต่อวินาที.....	160
ตาราง 5-18 ความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเทอร์เน็ตเฟส.....	160
ตาราง 6-1 เปรียบเทียบ โพรโทคอลที่นำเสนอ กับ โพรโทคอลในบทความที่เกี่ยวข้อง กับเทคนิคหลายอินเทอร์เน็ตเฟสหลายช่องสัญญาณ	164

รายการภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 2-1 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับการควบคุมอุณหภูมิ ภายในอาคาร	13
ภาพประกอบ 2-2 พารามิเตอร์ที่พิจารณาจากผลตอบสนองการควบคุม	17
ภาพประกอบ 2-3 ลำดับชั้นของการติดต่อสื่อสาร	18
ภาพประกอบ 2-4 ลักษณะทางกายภาพของโหนดชนิด SISC และ MIMC	21
ภาพประกอบ 2-5 โครงสร้างของโหนดที่จำลองกรณีมีอินเตอร์เฟซเดียว	21
ภาพประกอบ 2-6 โครงสร้างของโหนดที่จำลองกรณีประกอบด้วยหลายอินเตอร์เฟซ	22
ภาพประกอบ 3-1 ตำแหน่งการวางโหนดของการจำลองย่อยที่หนึ่งในการจำลอง 3.2	26
ภาพประกอบ 3-2 ตำแหน่งการวางโหนดของการจำลองย่อยที่สองในการจำลอง 3.2	27
ภาพประกอบ 3-3 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบ กรณีหนึ่งโหนดต้นทาง	29
ภาพประกอบ 3-4 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบทำได้ต่ออัตราการส่งข้อมูล กรณีหนึ่งโหนดต้นทาง	30
ภาพประกอบ 3-5 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC กรณีหนึ่งโหนดต้นทาง	31
ภาพประกอบ 3-6 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง กรณีสองโหนดต้นทาง	32
ภาพประกอบ 3-7 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง ต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง	32
ภาพประกอบ 3-8 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูล กรณีสองโหนดต้นทาง	33
ภาพประกอบ 3-9 จำนวนแพคเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC โดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง	33
ภาพประกอบ 3-10 จำนวนแพคเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง	34
ภาพประกอบ 3-11 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูล กรณีสองโหนดต้นทาง	34
ภาพประกอบ 3-12 ตำแหน่งการวางโหนดต้นทางและโหนดปลายทางในการจำลอง 3.3	36

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3-13 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	38
ภาพประกอบ 3-14 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	39
ภาพประกอบ 3-15 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน ..	39
ภาพประกอบ 3-16 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ย กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	40
ภาพประกอบ 3-17 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 1 ถึง 6 โหนดต้นทาง กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	41
ภาพประกอบ 3-18 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 8 10 และ 12 โหนด ต้นทางกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	41
ภาพประกอบ 3-19 การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	42
ภาพประกอบ 3-20 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่จำนวน โหนด ต้นทาง 1 ถึง 6 โหนดกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	42
ภาพประกอบ 3-21 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่จำนวน โหนด ต้นทาง 8 10 และ 12 โหนดกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน	43
ภาพประกอบ 3-22 ลักษณะการละทิ้งแพ็คเกจที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR	44
ภาพประกอบ 3-23 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล	45
ภาพประกอบ 3-24 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล	45
ภาพประกอบ 3-25 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล.....	45
ภาพประกอบ 3-26 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล	46
ภาพประกอบ 3-27 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 1 ถึง 6 โหนดต้นทาง กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล	47
ภาพประกอบ 3-28 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 8 10 และ 12 โหนดต้นทางกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล.....	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3-29 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ย กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล	48
ภาพประกอบ 3-30 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 1 ถึง 6 โหนด ต้นทางกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล.....	48
ภาพประกอบ 3-31 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 8 10 และ 12 โหนดต้นทางกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล.....	49
ภาพประกอบ 3-32 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 3.4	50
ภาพประกอบ 3-33 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางกรณีโหนด ต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	51
ภาพประกอบ 3-34 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทางกรณีโหนด ต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	52
ภาพประกอบ 3-35 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยกรณีโหนดต้นทางทุกโหนด วางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	52
ภาพประกอบ 3-36 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยกรณีโหนดต้นทางทุกโหนด วางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	53
ภาพประกอบ 3-37 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่โหนดต้นทาง 1 ถึง 12 โหนดกรณีโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	54
ภาพประกอบ 3-38 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่โหนดต้นทาง 1 ถึง 12 โหนดกรณีโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	55
ภาพประกอบ 3-39 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 3.5	57
ภาพประกอบ 3-40 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล AODV ต้นแบบ กรณีเปลี่ยนแปลงค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที	58
ภาพประกอบ 3-41 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลง ค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที	59
ภาพประกอบ 3-42 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของ โพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลง ค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที	59

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3-43 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ขึ้น MAC ของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลง ค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที	60
ภาพประกอบ 3-44 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล AODV ต้นแบบ กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลจาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพคเกจ	61
ภาพประกอบ 3-45 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล AODV ต้นแบบ กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลจาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพคเกจ	61
ภาพประกอบ 3-46 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลง อัตราการส่งข้อมูลจาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพคเกจ	62
ภาพประกอบ 3-47 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ขึ้น MAC ของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลง อัตราการส่งข้อมูลจาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพคเกจ	62
ภาพประกอบ 4-1 โครงสร้างโหนดของ 3IMC-MAODV	67
ภาพประกอบ 4-2 ลักษณะการเก็บข้อมูลจากโหนดข้างเคียง	69
ภาพประกอบ 4-3 โครงสร้างโหนดของ 4IMC-MAODV	73
ภาพประกอบ 4-4 ฝั่งงานแสดงการทำงานของกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ	78
ภาพประกอบ 4-5 สถานการณ์ที่กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณไม่ถูกใช้ประโยชน์	79
ภาพประกอบ 4-6 สถานการณ์ที่กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณสามารถใช้ประโยชน์ได้	80
ภาพประกอบ 5-1 ภาพรวมของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย	83
ภาพประกอบ 5-2 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.2	84
ภาพประกอบ 5-3 รูปแบบของการจำลองเมื่อถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง กรณีระบบมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	84
ภาพประกอบ 5-4 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	88
ภาพประกอบ 5-5 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	88

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-6 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเทอร์เน็ตเฟสของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	89
ภาพประกอบ 5-7 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	90
ภาพประกอบ 5-8 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ย กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	91
ภาพประกอบ 5-9 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแพ็คเกจร้องขอเส้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	91
ภาพประกอบ 5-10 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโพรโทคอล AODV ต้นแบบที่แต่ละระดับโหนดต้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	92
ภาพประกอบ 5-11 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่แต่ละระดับโหนดต้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	93
ภาพประกอบ 5-12 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่แต่ละระดับโหนดต้นทาง กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	94
ภาพประกอบ 5-13 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ย ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	95
ภาพประกอบ 5-14 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI โดยเฉลี่ย ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	96
ภาพประกอบ 5-15 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT โดยเฉลี่ย ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	96
ภาพประกอบ 5-16 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	97
ภาพประกอบ 5-17 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI โดยเฉลี่ย ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	98

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-18 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT โดยเฉลี่ย ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	98
ภาพประกอบ 5-19 จำนวนการส่งแพคเกจร้องขอเส้นทาง RREQ โดยเฉลี่ย ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	99
ภาพประกอบ 5-20 อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	100
ภาพประกอบ 5-21 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว.....	100
ภาพประกอบ 5-22 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	101
ภาพประกอบ 5-23 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	102
ภาพประกอบ 5-24 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.3	103
ภาพประกอบ 5-25 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV.....	104
ภาพประกอบ 5-26 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	105
ภาพประกอบ 5-27 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	105
ภาพประกอบ 5-28 ปริมาณงานของแพคเกจ RREQ โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	106
ภาพประกอบ 5-29 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	106
ภาพประกอบ 5-30 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.4	108
ภาพประกอบ 5-31 รูปแบบของการจำลองเมื่อถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง กรณีระบบมีโหนดปลายทางหลายโหนด	108
ภาพประกอบ 5-32 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	109

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-33 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	110
ภาพประกอบ 5-34 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	111
ภาพประกอบ 5-35 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	111
ภาพประกอบ 5-36 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	112
ภาพประกอบ 5-37 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	113
ภาพประกอบ 5-38 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	113
ภาพประกอบ 5-39 ลักษณะเส้นทางที่แต่ละโหนดต้นทางใช้ส่งแพ็คเกจข้อมูล	114
ภาพประกอบ 5-40 อัตราการดูเ้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	114
ภาพประกอบ 5-41 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด ...	115
ภาพประกอบ 5-42 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	116
ภาพประกอบ 5-43 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	116
ภาพประกอบ 5-44 ผลตอบสนองการควบคุมที่เกิดขึ้นกรณีโหนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูล ให้โหนดปลายทางได้เลย.....	117
ภาพประกอบ 5-45 ผลตอบสนองการควบคุมที่เกิดขึ้นกรณีโหนดต้นทางสามารถส่งข้อมูล ให้โหนดปลายทางได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง.....	118
ภาพประกอบ 5-46 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด และไม่จำกัดจำนวนฮอป	120

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-47 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	121
ภาพประกอบ 5-48 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทุกโหนดต้นทาง ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด และไม่จำกัดจำนวนฮอป	121
ภาพประกอบ 5-49 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	122
ภาพประกอบ 5-50 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	122
ภาพประกอบ 5-51 ตัวอย่างลักษณะเส้นทางที่เป็นไปได้ที่แต่ละโหนดต้นทาง ใช้ส่งแพคเกจข้อมูล.....	123
ภาพประกอบ 5-52 อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	124
ภาพประกอบ 5-53 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	124
ภาพประกอบ 5-54 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	125
ภาพประกอบ 5-55 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป.....	126
ภาพประกอบ 5-56 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.6	127
ภาพประกอบ 5-57 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	128
ภาพประกอบ 5-58 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	129
ภาพประกอบ 5-59 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทุกโหนดต้นทางของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	129
ภาพประกอบ 5-60 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	130

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-61 จำนวนการละทิ้งแพกเกตจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 3IMC-MAODV	130
ภาพประกอบ 5-62 จำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 3IMC-MAODV	131
ภาพประกอบ 5-63 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 4IMC-MAODV	132
ภาพประกอบ 5-64 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 4IMC-MAODV	132
ภาพประกอบ 5-65 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเทอร์เฟซของทุกโหนดต้นทางของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 4IMC-MAODV	133
ภาพประกอบ 5-66 จำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 4IMC-MAODV	133
ภาพประกอบ 5-67 จำนวนการละทิ้งแพกเกตจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 4IMC-MAODV	134
ภาพประกอบ 5-68 จำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 4IMC-MAODV	134
ภาพประกอบ 5-69 อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	135
ภาพประกอบ 5-70 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	135
ภาพประกอบ 5-71 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	136
ภาพประกอบ 5-72 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV	136
ภาพประกอบ 5-73 อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 4IMC-MAODV	137
ภาพประกอบ 5-74 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 4IMC-MAODV	137

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-75 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 4IMC-MAODV	138
ภาพประกอบ 5-76 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 4IMC-MAODV	138
ภาพประกอบ 5-77 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.7	139
ภาพประกอบ 5-78 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีในระบบ มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	140
ภาพประกอบ 5-79 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ทั้งสามโพรโทคอลทำได้กรณีในระบบมีอัตรา การส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที.....	141
ภาพประกอบ 5-80 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเทอร์เฟซที่ทั้งสามโพรโทคอลทำได้ กรณีในระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	142
ภาพประกอบ 5-81 จำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีในระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	142
ภาพประกอบ 5-82 การละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วย ตัวบ่งชี้ NRTE กรณีในระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	143
ภาพประกอบ 5-83 การละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วย ตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC กรณีในระบบมีอัตรา การส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที.....	144
ภาพประกอบ 5-84 การละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วย ตัวบ่งชี้ IFQ ที่ Network layer กรณีในระบบมีอัตรา การส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที.....	144
ภาพประกอบ 5-85 จำนวนการละทิ้งแพกเกตจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยกรณีในระบบมีอัตรา การส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที.....	145
ภาพประกอบ 5-86 จำนวนการส่งแพกเกตร้องขอเส้นทาง RREQ ที่ชั้น MAC โดยเฉลี่ย กรณีในระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	145
ภาพประกอบ 5-87 อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีในระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	146

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 5-88 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล	
กรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	146
ภาพประกอบ 5-89 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล	
กรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	147
ภาพประกอบ 5-90 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล	
กรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที	147

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

3IMC-MAODV	3-Interface multi-channel modified AODV
4IMC-MAODV	4-Interface multi-channel modified AODV
16C3I	16-Channel 3-interface
ACK	Acknowledgment
AODV	Ad-hoc on demand distance vector
ART	Active route time-out
BE	Back-off exponent
CCA	Clear channel assessment
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
DSDV	Destination-sequenced distance vector
IAE	Integral of absolute error
LR-WPANs	low-rate wireless personal area networks
MAC	Medium access control
MIMC	Multi-interface multi-channel
NS2	Network simulator version 2
OLSR	Optimized link state routing
OSPF-MCDS	Open shortest path first-minimal connected dominating
PID	Proportional integral and derivative
PiccSIM	Platform for integrated communications and control design, simulation, implementation and modeling
PHY	Physical layer
RCA	Receive-based channel assignment
RCB	Receive channel balancing
RREP	Route reply message
RREQ	Route request message
RERR	Route error message
SNR	Signal to noise ratio
WCS	Wireless control system

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

WPAN

Wireless personal area network

WSANs

Wireless sensor and actuator networks

WSNs

Wireless sensor networks

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย WSNs (Wireless sensor and actuator networks) เป็นระบบควบคุมรูปแบบใหม่ที่ใช้การส่งข้อมูลควบคุมผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย ประกอบด้วยกลุ่มของโหนดเซนเซอร์ (Sensor node) และแอคชูเอเตอร์ (Actuator) ทำงานร่วมกัน เช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารซึ่งทำการควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง โดยโหนดเซนเซอร์จะตรวจวัดอุณหภูมิปัจจุบันภายในห้องแล้วทำการส่งข้อมูลอุณหภูมิไปยังศูนย์ควบคุมเพื่อคำนวณค่าความแตกต่างของอุณหภูมิห้องปัจจุบันกับค่าที่ต้องการและตอบสนองด้วยการสั่งการให้แอคชูเอเตอร์ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายในห้องจนเป็นค่าที่ต้องการ [1] โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV (Ad-hoc on demand distance vector) [2] เป็นกระบวนการหาเส้นทางสำหรับส่งผ่านข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์ต้นทางไปยังโหนดปลายทางเพื่อเข้าสู่กระบวนการควบคุมในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย AODV เป็นโพรโทคอลจัดเส้นทางที่ให้สัญญาณโอเวอร์เฮด (Overhead) ในเครือข่ายน้อย [3] เนื่องจากกระบวนการจัดเส้นทางจะเริ่มต้นเมื่อมีข้อมูลต้องการส่งเท่านั้น การตรวจสอบเอกสารบทความ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1, 4–6] และผลการจำลองเบื้องต้นในการใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เหมาะสมกับระบบที่มีความต้องการในการส่งข้อมูลต่ำ เช่น ข้อมูลอุณหภูมิ ทำให้ทราบว่าเมื่อจำนวนโหนดต้นทางหรือโหนดเซนเซอร์ที่ต้องการส่งข้อมูลมีจำนวนมากขึ้น โหนดเหล่านี้ต้องทำการแข่งขันแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณโดยมีกระบวนการ CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) ในการจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ณ เวลาหนึ่งจะมีเพียงโหนดเดียวเท่านั้นที่สามารถส่งข้อมูลในช่องสัญญาณได้ เป็นข้อจำกัดจากการใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวในเครือข่าย ซึ่งไม่เพียงพอกับความต้องการส่งข้อมูลเมื่อจำนวนโหนดเซนเซอร์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียและการชนกันของแพคเกจข้อมูลทั้งในช่วงกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งแพคเกจข้อมูลเพราะข้อจำกัดจากการใช้ตัวส่ง-รับสัญญาณวิทยุหรืออินเตอร์เฟสเพียงตัวเดียวจึงสามารถใช้งานได้เพียงช่องสัญญาณเดียว ณ เวลานั้น ทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลภายในเครือข่ายส่งผลให้สมรรถนะในระบบควบคุมต่ำลงเพราะโหนดปลายทางรับข้อมูลได้น้อยลงหรือไม่สามารถรับข้อมูลได้ หากสามารถปรับปรุงโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ให้สามารถลดปัญหาดังกล่าวจะช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายได้

การศึกษายทความ [7] มีวิธีการหลากหลายที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายจากปัญหาที่กล่าวมาบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งเป็นเครือข่ายแบบ WPANs (Wireless personal area networks) โดยจำกัดกำลังส่งอยู่ในระดับต่ำ พบว่าวิธีการเพิ่มช่องสัญญาณเพื่อหลบหลีก ลดการแข่งขันแย่งชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณและการชนกันของแพกเกตข้อมูลได้เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับมาตรฐานนี้เนื่องจากมีช่องสัญญาณให้ใช้งานโดยไม่เกิดการซ้อนทับกันถึง 16 ช่องสัญญาณ การศึกษายทความ [8] ได้พบวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ด้วยการแบ่งแยกช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางและการส่ง-รับแพกเกตข้อมูลออกจากกันเพื่อลดการแข่งขันแย่งชิงช่องสัญญาณในทั้งสองกระบวนการซึ่งจะสามารถลดการสูญเสียข้อมูลจากทั้งกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูลลงได้ แต่ยังคงมีข้อเสียเปรียบที่ไม่สามารถใช้หลายช่องสัญญาณในสองกระบวนการได้พร้อมกันจากการใช้งานเพียงสองอินเตอร์เฟซ บทความ [9] ได้ทำการเพิ่มอินเตอร์เฟซเป็นสามอินเตอร์เฟซเพื่อให้ใช้งานหลายช่องสัญญาณได้ทั้งกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูลพร้อมกันในโพรโทคอล DSDV (Destination-sequenced distance vector) จากแนวคิดดังกล่าวงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ด้วยการใช้งานหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณซึ่งจะเพิ่มสมรรถนะในการส่ง-รับข้อมูลเพราะสามารถลดการแข่งขันแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณจากการแยกช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางเพื่อลดอัตราการสูญเสียข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่วงกระบวนการนี้ โดยใช้งานอินเตอร์เฟซร่วม (Common interface) ที่ใช้งานช่องสัญญาณร่วม (Common channel) สำหรับกระบวนการจัดเส้นทาง และเพิ่มอินเตอร์เฟซสำหรับส่ง-รับแพกเกตข้อมูลเพื่อลดการแข่งขันแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณในช่วงกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูลด้วยการใช้หลายช่องสัญญาณที่เหลืออยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ทำให้สามารถลดการสูญเสียข้อมูลจากการแย่งชิงช่องสัญญาณและการชนกันของแพกเกตในกระบวนการดังกล่าวได้อีกทางหนึ่ง งานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดดังกล่าวข้างต้นมาปรับปรุงพร้อมทั้งประยุกต์ใช้ร่วมกับการใช้งานพารามิเตอร์ค่าความผิดพลาดการควบคุม (Control error value) [1] โดยคำนวณจากค่าความแตกต่างของค่าอุณหภูมิภายในห้องจากแพกเกตข้อมูลที่โหนดเซนเซอร์ต้องการส่งปัจจุบันกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งเป็นความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายกับระบบควบคุมมาปรับใช้กับกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณที่นำเสนอและเป็นตัวตัดสินใจว่า ณ เวลานั้นสมรรถนะในระบบควบคุมเป็นอย่างไร หากสมรรถนะของระบบควบคุมขณะนั้นต่ำกว่ากรณีค่าอุณหภูมิปัจจุบันภายในห้องมีความแตกต่างจากค่าอุณหภูมิที่ต้องการมากเกินไปจะต้องทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้ระบบ หากสมรรถนะของระบบควบคุมขณะนั้นคืออยู่แล้วก็ไม่ต้องการ

ปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายเพื่อปรับปรุงสมรรถนะเพิ่มขึ้นอีกโดยไม่จำเป็นซึ่งจะช่วยลดการสิ้นเปลืองจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณ

1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โจทย์วิจัยในหัวข้อ 1.1 นำมาซึ่งความต้องการนำเทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณและความสัมพันธ์จากพารามิเตอร์ในระบบควบคุมมาปรับปรุงสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายรวมถึงการใช้เทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณในระบบเครือข่ายไร้สาย เนื่องด้วยมีบทความที่มีความแตกต่างกันของเนื้อหาเป็นสองเรื่องจึงได้แยกบทความออกเป็นสองกลุ่มดังนี้

1.2.1 บทความที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

การตรวจสอบบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าปัจจุบันงานวิจัยที่ศึกษาทั้งการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมกับระบบการสื่อสารไร้สายหรือระบบควบคุมไร้สาย WCS (Wireless control system) มีอยู่น้อยมาก จากบทความ [4] ระบบควบคุมไร้สายมีองค์ประกอบสำคัญคือ ส่วนการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมและเครือข่ายไร้สาย บทความนี้ใช้วิธีจำลองการทำงานของทั้ง 2 ระบบพร้อมกันเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของสมรรถนะในการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมที่ลดลงจากการสูญเสียข้อมูลติดต่อกันหลายๆครั้งในเครือข่ายไร้สาย ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาและออกแบบเครือข่ายไร้สายเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมให้ดีขึ้น การศึกษาบทความนี้ทำให้พบเครื่องมือจำลอง PiccSIM (Platform for integrated communications and control design, simulation, implementation and modeling) ซึ่งสามารถจำลองทั้งระบบควบคุมและระบบสื่อสารไร้สายได้พร้อมกัน โดยสามารถนำมาใช้ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของทั้งสองระบบในกรณีระบบสื่อสารไร้สายใช้ช่องสัญญาณเดียวและหลายช่องสัญญาณในงานวิจัยนี้ได้

วิทยานิพนธ์ [1] ศึกษาและพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV เพื่อเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์และเพิ่มสมรรถนะของระบบให้สูงขึ้น โดยเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลจากการพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งในระบบควบคุมและระบบสื่อสารไร้สายรวมถึงพารามิเตอร์ค่าความผิดพลาดของการควบคุมซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีการหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณสำหรับงานวิจัยนี้ได้ วิทยานิพนธ์นี้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะในทั้งสองระบบที่ยังคงใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวในโพรโทคอลจัดเส้นทางที่นำเสนอ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นการแย่งชิงช่องสัญญาณและการชนกันของข้อมูลในช่องสัญญาณจะส่งผลให้

สมรรถนะของระบบต่ำลง วิทยานิพนธ์ [1] ไม่ได้ศึกษากรณีในเครือข่ายมีหลายโหนดต้นทางและปลายทางและกรณีการเพิ่มสมรรถนะของระบบด้วยเทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณ

บทความ [6] เป็นบทความที่พัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ให้เหมาะสมกับระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารซึ่งเป็นระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย โดยการปรับปรุงโพรโทคอลนั้นพิจารณาบนชั้นจัดเส้นทาง (Network layer) เมตริกที่ใช้เป็นการคำนวณความล่าช้าของแพคเกจร้องขอเส้นทาง (The delay time of a RREQ packet) เปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ หากความล่าช้าของแพคเกจร้องขอเส้นทางต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ แพคเกจร้องขอเส้นทางนี้จะถูกละทิ้งไป สามารถทำความเข้าใจรายละเอียดของแพคเกจร้องขอเส้นทางได้ในบทที่ 4 บทความนี้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะทั้งในระบบควบคุมและระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แต่ไม่ได้มีการใช้เทคนิคหลายช่องสัญญาณแต่อย่างใด

บทความ [10] เป็นบทความแรกที่น่าวิธีการหลายช่องสัญญาณ (Multi-channel) มาศึกษาในระบบควบคุมไร้สาย เนื่องจากการนำระบบไร้สายมาใช้กับการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมสามารถให้ประโยชน์ที่สำคัญเช่น ความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ติดตั้ง แต่ระบบไร้สายก็นำมาซึ่งปัญหาใหม่ เช่น ความล่าช้า (Delay) การสูญเสียข้อมูล (Information loss) และการจำกัดข้อมูลที่ส่งได้ (Limited throughput) เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะของระบบควบคุม ดังนั้นการใช้หลายช่องสัญญาณพร้อมกันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายไร้สายได้ เนื่องจากระบบควบคุมมีข้อจำกัดในเรื่องความล่าช้าจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำความเข้าใจผลกระทบของระบบสื่อสารไร้สายต่อสมรรถนะของระบบควบคุม บทความนี้จะศึกษาส่วนของชั้น MAC (Medium access control) ในเรื่องของความล่าช้าเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งไม่ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะและวิเคราะห์ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายจากการใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV

การศึกษายบทความ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิทยานิพนธ์ [1, 4, 6, 10] ยังไม่มีงานชิ้นใดพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทางที่ใช้เทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณพร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะทั้งระบบควบคุมและระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้เทคนิคดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลจัดเส้นทางเพื่อใช้งานบนเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายพร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะในระบบควบคุมและระบบสื่อสารไร้สาย

1.2.2 บทความที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณ

การใช้งานหลายช่องสัญญาณมีรูปแบบที่หลากหลายทั้งการพัฒนาจากมาตรฐานเดิมและปรับปรุงด้วยแนวคิดจากมาตรฐานอื่น การตรวจสอบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อนี้ให้ความ

สนใจการใช้งานหลายช่องสัญญาณแบบ MIMC (Multi-interface multi-channel) ซึ่งเป็นการเพิ่มอุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุ หรือ อินเทอร์เน็ตเข้าไปในแต่ละโหนด ทุกบทความภายในหัวข้อนี้ไม่มีระบบควบคุมเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเพียงแนวคิดและเทคนิคการใช้งานหลายอินเทอร์เน็ตหลายช่องสัญญาณมาปรับใช้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายเท่านั้น

บทความ [9] นำเสนอวิธีการ 16C3I (16-Channel 3-interface) ซึ่งทุกโหนดประกอบด้วย 3 อินเทอร์เน็ตที่สามารถใช้ช่องสัญญาณแตกต่างกันได้ หนึ่งในอินเทอร์เน็ตถูกใช้เป็นที่ Common interface โดยเป็นอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้ส่ง-รับข้อมูลควบคุมการสื่อสารเช่น ข้อความการจัดเส้นทาง (Routing message) ของโหนดภายในเครือข่าย ส่วนอีก 2 อินเทอร์เน็ตใช้สำหรับส่ง-รับข้อมูลทั่วไป โดยหนึ่งช่องสัญญาณจาก 16 ช่องสัญญาณถูกใช้เป็นที่ Common channel ซึ่งเป็นช่องสัญญาณสำหรับ Common interface ที่ทุกโหนดใช้ร่วมกันเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลการจัดเส้นทาง ส่วนอีก 15 ช่องสัญญาณใช้สำหรับส่ง-รับข้อมูลทั่วไป (Data channel) พร้อมทั้งใช้วิธีการ RCB (Receiving channel balancing) เพื่อลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น เทคนิค RCB จะใช้วิธีการกระจายโหนดที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการรับข้อมูลออกเท่ากันทั่วทั้งเครือข่าย โดยแต่ละโหนดได้พิจารณาเลือกช่องสัญญาณสำหรับรับข้อมูลจากช่องสัญญาณที่มีโหนดอื่นเลือกใช้น้อยสุดภายในระยะ 2 ฮอป และถ้าเป็นไปได้จะหลีกเลี่ยงช่องสัญญาณที่มีการใช้ในระยะเวลา 1 ฮอปด้วยเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนระหว่างช่องสัญญาณเดียวกันจากโหนดข้างเคียง ข้อเสียเปรียบของวิธีการนี้คือจำนวนอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มขึ้น

บทความ [11] เสนอโพรโทคอลที่พัฒนาจาก AODV โดยทุกโหนดในเครือข่ายประกอบด้วย 2 อินเทอร์เน็ต แบ่งเป็นอินเทอร์เน็ตสำหรับรับข้อมูล (Receiving interface) ซึ่งใช้ช่องสัญญาณหนึ่งเป็นเวลานานและอินเทอร์เน็ตสำหรับส่งข้อมูล (Sending interface) ที่จะทำการสลับช่องสัญญาณบ่อยๆ ขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณรับข้อมูล (Receiving channel) ของโหนดข้างเคียง โดยตัวโหนดสามารถรับรู้ Receiving channel ของโหนดข้างเคียงจาก Hello แพกเก็ตที่แลกเปลี่ยนกันภายในเครือข่าย ข้อเสียของวิธีการนี้คือต้องกระจาย Hello แพกเก็ตในทุกๆช่องสัญญาณรวมถึงแพกเก็ตร้องขอเส้นทาง RREQ ซึ่งเป็นแพกเก็ตที่ใช้เพื่อค้นหาและกำหนดเส้นทางส่งข้อมูลของโพรโทคอล AODV ด้วย ส่งผลให้ปริมาณการส่งข้อมูลควบคุมการสื่อสารเหล่านี้สูง

บทความ [8] มีลักษณะคล้ายกับบทความ [11] แต่ทำการปรับปรุงส่วนของปริมาณการส่งข้อมูลควบคุมการสื่อสาร โดยจะเปลี่ยนจากการกระจายแพกเก็ตจัดเส้นทางในทุกช่องสัญญาณเป็นการกระจายใน Common channel ที่ทุกโหนดใช้ร่วมกัน เมื่อโหนดไม่ได้ส่งข้อมูล

มีข้อด้อยคือ บางเวลาทุกโหนดไม่ได้ใช้งาน Common channel ณ เวลาเดียวกันเนื่องจากโหนดกำลังส่งข้อมูลอยู่ ทำให้มีโอกาสที่บางโหนดอาจจะไม่ได้รับแพคเกจจัดเส้นทางในบางครั้ง

บทความ [12] เสนอโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง OSPF-MCDS (Open shortest path first-minimal connected dominating) โพรโทคอลนี้จะหาเส้นทางการส่งข้อมูลไว้ล่วงหน้าและออกแบบสำหรับเครือข่าย MIMC ใช้วิธีการส่งแพคเกจข้อมูลแบบ RCA (Receive-based channel assignment) วิธีการนี้จะกำหนดหนึ่งช่องสัญญาณให้กับอินเตอร์เฟซที่ใ้รับแพคเกจข้อมูลของแต่ละโหนดในการสื่อสารระหว่างโหนด โดยอินเตอร์เฟซสำหรับส่งและรับแพคเกจข้อมูลจะเป็นอินเตอร์เฟซเดียวกัน และกำหนดให้หนึ่งอินเตอร์เฟซใช้ Common channel ทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลช่องสัญญาณพร้อมข้อมูลเส้นทางเพื่อลดสัญญาณรบกวน ทุกโหนดจะหลีกเลี่ยงการใช้ช่องสัญญาณเดียวกันสำหรับรับแพคเกจข้อมูลภายในระยะ 2 ฮอปเพื่อลดการรบกวนจากการใช้ช่องสัญญาณเดียวกันจากโหนดข้างเคียงในการรับแพคเกจข้อมูล ทุกโหนดจะใช้เพียงหนึ่งอินเตอร์เฟซสำหรับการส่ง-รับข้อมูลที่ใ้ช่องสัญญาณร่วมกันจึงเกิดสัญญาณรบกวนและไม่สามารถส่ง-รับแพคเกจข้อมูลพร้อมกันได้

บทความ [13] ใช้โพรโทคอล OLSR (Optimized link state routing) ทุกโหนดประกอบด้วย 3 อินเตอร์เฟซ หนึ่งอินเตอร์เฟซใช้เป็น Common interface เพื่อแลกเปลี่ยนแพคเกจข้อมูลควบคุม อินเตอร์เฟซที่สองสำหรับใ้รับแพคเกจข้อมูลและสามสำหรับส่งแพคเกจข้อมูล ทั้งนี้เพื่อแยกการส่ง-รับแพคเกจข้อมูลปกติและแพคเกจข้อมูลควบคุมซึ่งประกอบด้วยข้อมูลเส้นทางและข้อมูลช่องสัญญาณเพื่อลดสัญญาณแทรกสอด

การศึกษายบทความข้างต้นและตาราง 1-1 วิธีการเกือบทั้งหมดเป็นการใช้งานเทคนิคหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณบนมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นส่วนใหญ่ มาตรฐานนี้มีความแตกต่างจากมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ทั้งอัตราการส่งข้อมูล จำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดการรบกวนกัน และระยะทางในการส่งข้อมูล มาตรฐาน IEEE 802.11 นั้นมีอัตราการส่งข้อมูลถึง 1 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งเกินความจำเป็นอย่างมากต่อการส่งแพคเกจข้อมูลของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร พร้อมทั้งจำนวนช่วงสัญญาณที่ใช้งานได้โดยไม่เกิดการรบกวนกันมีเพียง 3 ช่องสัญญาณเท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคหลายช่องสัญญาณจึงไม่ค่อยเหมาะสมสำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 ส่วนมาตรฐาน IEEE802.15.4 มีช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดการรบกวนกันถึง 16 ช่องสัญญาณจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมมากกว่า จากบทความในตาราง 1-1 มีบทความ [8, 11-13] ซึ่งส่งแพคเกจข้อมูลด้วยอัตราคงที่ CBR (Constant bit rate) โดยแพคเกจข้อมูลที่ใ้ส่งในกระบวนการส่งข้อมูลจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเช่นเดียวกับข้อมูลอุณหภูมิสำหรับงานวิจัยนี้ ส่วนโพรโทคอลจัดเส้นทางในบทความทั้งหมดสามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ รูปแบบ

แรกคือ โพรโทคอล Reactive โพรโทคอลรูปแบบนี้จะทำการจัดเส้นทางเมื่อโหนดมีความต้องการจะส่งข้อมูลเท่านั้น ข้อดีของโพรโทคอล Reactive คือจำนวนแพกเกตจัดเส้นทางมีปริมาณน้อย แต่อย่างไรก็ตามจะมีข้อเสียเปรียบคือ เกิดความล่าช้าในขั้นตอนกระบวนการจัดเส้นทางตอนเริ่มต้น รูปแบบที่สองคือโพรโทคอล Proactive โพรโทคอลรูปแบบนี้จะมีการจัดเตรียมเส้นทางไว้แม้โหนดจะไม่มีความต้องการส่งข้อมูลก็ตามมีข้อดีคือจะไม่เกิดความล่าช้าจากกระบวนการจัดเส้นทาง ข้อเสียเปรียบของโพรโทคอลชนิดนี้คือจำนวนแพกเกตจัดเส้นทางจะมีปริมาณสูงกว่ารูปแบบ Reactive เพราะจะต้องทำการปรับปรุงเส้นทางเป็นช่วงเวลา โพรโทคอลที่เหมาะสมกับระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารควรจะเป็นโพรโทคอลรูปแบบ Reactive ซึ่งจะทำการจัดเส้นทางให้ห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิเท่านั้น และมีเพียงบทความ [8, 11] ที่ใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทางรูปแบบ Reactive คือโพรโทคอล AODV โดยเราสามารถนำแนวคิดการแยกช่องสัญญาณร่วม มาใช้งานเฉพาะกระบวนการจัดเส้นทางเพื่อลดการแข่งขันแย่งชิงช่องสัญญาณระหว่างกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งข้อมูลลง และแนวคิดการแบ่งหน้าที่สำหรับส่งและรับแพกเกตข้อมูลในแต่ละอินเตอร์เฟซที่เพิ่มขึ้น มาปรับใช้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จากบทความ [9] จะสามารถใช้ประโยชน์จากการใช้หลายช่องสัญญาณได้พร้อมกันทั้งกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งข้อมูลเพื่อลดการแย่งชิงช่องสัญญาณและการชนกันของข้อมูลในกระบวนการทั้งสอง รายละเอียดการปรับใช้แนวคิดดังกล่าวจะถูกระบุอยู่ในบทที่ 4 หัวข้อ โพรโทคอลจัดเส้นทางแบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ

ตาราง 1-1 บทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรช่องสัญญาณบนโหนดที่ประกอบด้วยหลายอินเตอร์เฟซ

บทความ	ประเภทข้อมูล	มาตรฐานที่ใช้	โพรโทคอลจัดเส้นทาง	จำนวน Interface	จำนวน Channel	Common interface	Common channel	ข้อจำกัด
[8] 2010	CBR	IEEE 802.11	AODV (Reactive)	2	12	ไม่ใช่	ใช่	ใช้เพียง 2 อินเตอร์เฟซ แต่มีข้อเสียคือ บางเวลาบางโหนดอาจไม่ได้รับแพ็กเก็ตจัดเส้นทาง
[9] 2013	MPEG4	IEEE802.15.4	DSDV (Proactive)	3	16	ใช่	ใช่	ประกอบด้วย 3 อินเตอร์เฟซที่ใช้ช่องสัญญาณต่างกันทำให้สัญญาณแทรกสอดน้อย แต่มีต้นทุนเพิ่มจากจำนวนอินเตอร์เฟซ
[11] 2006	CBR	IEEE 802.11	AODV (Reactive)	2	12	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ใช้เพียง 2 อินเตอร์เฟซแต่มีความจำเป็นต้องการกระจายแพ็กเก็ตจัดเส้นทางในทุกช่องสัญญาณซึ่งเพิ่มจำนวนโอเวอร์เฮดภายในเครือข่าย
[12] 2006	CBR	IEEE 802.11	OSPF-MCDS (Proactive)	2	12	ใช่	ใช่	ใช้เพียง 2 อินเตอร์เฟซ แต่ไม่สามารถส่ง-รับข้อมูลพร้อมกันได้
[13] 2006	CBR	IEEE 802.11	OLSR (Proactive)	3	11	ใช่	ใช่	ประกอบด้วย 3 อินเตอร์เฟซที่ใช้ช่องสัญญาณต่างกันทำให้สัญญาณแทรกสอดน้อย แต่มีต้นทุนเพิ่มจากจำนวนอินเตอร์เฟซ

1.3 ประเด็นวิจัย

การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหัวข้อ 1.2 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงแนวทางในการนำเทคนิคหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณเข้ามาปรับปรุงระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายให้สามารถเพิ่มสมรรถนะของโพรโทคอลจัดเส้นทางโดยการลดอัตราการสูญเสียข้อมูลในระบบสื่อสารไร้สาย เมื่อสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายเพิ่มขึ้นสมรรถนะในระบบควบคุมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากบทความ [11] พบข้อจำกัดที่เกิดจากการใช้อินเตอร์เฟซเพียงแค่สองอินเตอร์เฟซทำให้ต้องทำการกระจายแพกเก็ตจัดเส้นทางในทุกช่องสัญญาณที่ใช้ซึ่งเป็นการเพิ่มสัญญาณโอเวอร์เฮดของกระบวนการจัดเส้นทางมากเกินไป วิธีการแก้ไขที่สามารถทำได้คือการเพิ่มอินเตอร์เฟซสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางโดยเฉพาะขึ้นมาเพื่อที่จะสามารถแยกใช้งานช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางซึ่งเป็นแนวคิดจากบทความ [8] ขณะที่สามารถส่งแพกเก็ตข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณด้วยอินเตอร์เฟซสำหรับส่งและรับข้อมูลอีกสองอินเตอร์เฟซได้ในเวลาเดียวกันเช่นเดียวกับบทความ [9] จะสามารถลดการแย่งชิงช่องสัญญาณและการชนกันของข้อมูลได้ทั้งในกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งแพกเก็ตข้อมูล งานวิจัยนี้ออกแบบและพัฒนาวิธีการดังกล่าวสำหรับโพรโทคอลจัดเส้นทางรูปแบบ Reactive คือ โพรโทคอล AODV ที่ให้จำนวนสัญญาณโอเวอร์เฮดในเครือข่ายน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลจัดเส้นทาง DSDV [3] จากบทความ [9] ดังนั้นประเด็นวิจัยคือ พัฒนาเทคนิคการใช้หลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณอย่างไรเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ให้สามารถใช้ในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้ และเทคนิคดังกล่าวมีผลต่อสมรรถนะของระบบอย่างไร รวมทั้งแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบจากการใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ดันแบบกับโพรโทคอลที่นำเสนอด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย PiceSIM

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- ก) ศึกษากลไกการใช้หลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายด้วยการจำลองการทำงานที่มีทั้งระบบสื่อสารและการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุม
- ข) พัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทางแบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายเพื่อลดอัตราการสูญเสียข้อมูลและสามารถบรรลุเป้าหมายการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุม

- ค) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากโพรโทคอล AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

พัฒนาและปรับปรุงเทคนิคหลายอินเตอร์เฟสและหลายช่องสัญญาณในเครือข่ายไร้สายเพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมพร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุมจากเครือข่ายไร้สายที่ใช้งานบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย PiccSIM ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- ก) ศึกษาและติดตั้งเครื่องมือจำลอง PiccSIM
- ข) ศึกษาการใช้งาน NS2 (Network simulator 2) ในส่วนของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
- ค) ศึกษาการใช้งาน MATLAB ในส่วนของการควบคุม
- ง) ทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายและระบบควบคุม
- จ) ทดสอบเทคนิคหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายแล้วบันทึกสมรรถนะของระบบที่ได้
- ฉ) เปรียบเทียบสมรรถนะจากโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลต้นแบบ
- ช) สรุปผลและเขียนรายงาน

1.7 สรุปผลงานที่เป็นประโยชน์

- ก) โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายทั้งในระบบสื่อสารไร้สายและระบบควบคุมให้ดีขึ้น โดยสามารถปรับปรุงสมรรถนะการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมให้บรรลุเป้าหมายได้จากกระบวนการต่างๆดังนี้
 - การใช้ Common interface และ Common channel ช่วยปรับปรุงสมรรถนะในช่วงกระบวนการจัดเส้นทางให้ดีขึ้น
 - การแยกอินเตอร์เฟสสำหรับส่งและรับแพคเกจข้อมูลทำให้สามารถใช้งานหลายช่องสัญญาณในกระบวนการส่งข้อมูลส่งผลให้สมรรถนะของกระบวนการส่งแพคเกจข้อมูลสูงขึ้น
 - การใช้งานแพคเกจแจ้งเตือน (Hello packet) เพื่อปรับปรุงตารางผู้ใช้ช่องสัญญาณและตารางโหนดข้างเคียงในกระบวนการจัดเส้นทาง

- กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณจะสามารถลดความหนาแน่นและการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณในกระบวนการส่งแพคเกจข้อมูลได้
- ข) ได้ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่ใช้โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุและเหตุผลที่สมรรถนะเพิ่มขึ้นและลดลงในสถานการณ์ที่กำหนดได้
- กรณีการจำลองที่แต่ละโหนดต้นทางมีอัตราการส่งข้อมูลค่าที่ช่วงเวลานั้นส่วนสืบต่อแพคเกจหรือประมาณ 67.70 บิตต่อวินาที การละทิ้งแพคเกจข้อมูลส่วนใหญ่เกิดจากโพรโทคอลจัดเส้นทางไม่สามารถหาเส้นทางมารองรับการส่งข้อมูลได้ ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของข้อมูลในกระบวนการจัดเส้นทางเพราะผลกระทบที่ต้องทำกระบวนการจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งหนึ่งแพคเกจข้อมูลทำให้เกิดการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณและการสูญเสียข้อมูลจำนวนมากในกระบวนการจัดเส้นทางจนไม่สามารถสร้างเส้นทางเพื่อมารองรับการส่งแพคเกจข้อมูลที่จะเกิดขึ้น แพคเกจข้อมูลที่ไม่มีเส้นทางรองรับเหล่านี้จะถูกทิ้งไปส่งผลให้สมรรถนะทั้งในระบบสื่อสารไร้สายและระบบควบคุมต่ำลง ซึ่งโพรโทคอลที่นำเสนอจะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ดีกว่าโพรโทคอล AODV
 - กรณีอัตราการส่งข้อมูลสูงที่ 10 แพคเกจต่อวินาที จะเกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลจากการสะสมแพคเกจจนเต็มและสิ้นหน่วยความจำ (บัฟเฟอร์) ซึ่งเกิดทั้งในช่วงกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งแพคเกจข้อมูล ทั้งนี้ยังคงเกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลจากกรณีที่ไม่สามารถหาเส้นทางมารองรับการส่งแพคเกจข้อมูลได้เช่นกัน โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลจากทุกสาเหตุที่กล่าวมาได้ดีกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบ จากการใช้งาน Common interface, Common channel และกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ ทำให้สมรรถนะที่ได้ทั้งในระบบสื่อสารและระบบควบคุมสูงกว่า AODV

1.8 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ได้อธิบายส่วนของแบบจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ บทที่ 3 ทำการวิเคราะห์เบื้องต้นสำหรับโพรโทคอล AODV บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 บทที่ 4 อธิบายการทำงานของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV พร้อมทั้งนำเสนอโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ บทที่ 5 เสนอผลการวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับ AODV สำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารบนเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายพร้อมวิจารณ์ผลที่ได้จากการทดสอบ และสุดท้ายบทที่ 6 จะอธิบายข้อสรุปที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมปัญหาและข้อเสนอแนะ

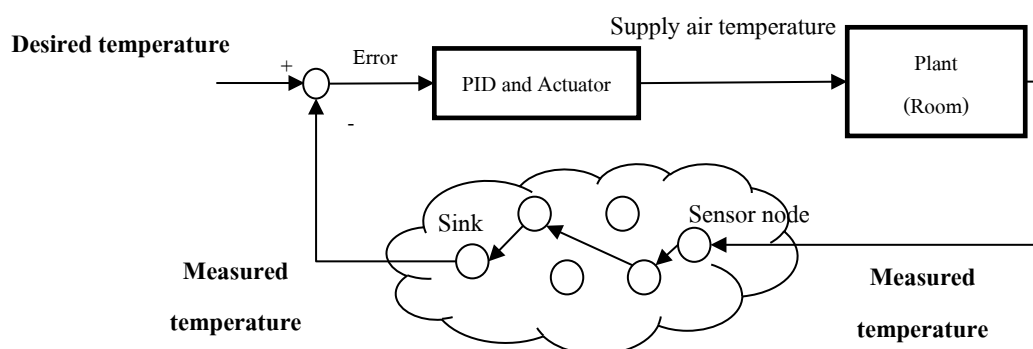
บทที่ 2

แบบจำลองระบบ

บทนี้ได้อธิบายรายละเอียดของตัวแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยแบบจำลองของระบบควบคุมและแบบจำลองของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายซึ่งทั้งสองระบบทำงานอยู่บนเครื่องมือคนละตัวแต่ทำงานร่วมกันในลักษณะคู่ขนานภายใต้เครื่องมือ PiccSIM โดยบทนี้ประกอบด้วยหัวข้อ ภาพรวมระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย ระบบควบคุมระบบสื่อสารที่จะอธิบายลักษณะของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และกลไก CSMA/CA แบบจำลองอินเตอร์เฟซ แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ (Radio propagation model) และตัวป้อนข้อมูลและฟังก์ชันของแพคเกจใน NS2

2.1 ภาพรวมระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร [1] ดังภาพประกอบ 2-1 ระบบดังกล่าวมีสองส่วนหลักที่สำคัญคือ ระบบควบคุมและระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายภายในระบบควบคุมประกอบไปด้วยตัวควบคุม (Controller) แอกชูเอเตอร์ (Actuator) และระบบทางกายภาพของอุณหภูมิภายในอาคาร (Building temperature plant) ซึ่งโหนดเซนเซอร์จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิจาก Plant แล้วทำการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจากโหนดเซนเซอร์หรือโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางและส่งต่อข้อมูลให้ตัวควบคุมทำการตัดสินใจเพื่อตอบสนองด้วยแอกชูเอเตอร์ที่จะปรับอุณหภูมิให้กับ Plant ต่อไป สามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละระบบในหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบ 2-1 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สายสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

2.2 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมประกอบไปด้วยแบบจำลองอุณหภูมิภายในอาคารที่จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์ จากบทความ [6] และวิทยานิพนธ์ [1] มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 แบบจำลองอุณหภูมิภายในอาคาร

แบบจำลองอุณหภูมิภายในอาคารประกอบด้วยสมการ (2-1) ถึง (2-5) ดังนี้

$$\frac{dT_Z}{dt} = [C_E + C_R + C_{W1} + C_{W2} + q(t)] \quad (2-1)$$

$$C_E = \frac{1}{H_a} [F_{sa} \rho_a C_a (T_{sa} - T_Z)] \quad (2-2)$$

$$C_R = U_{roof} A_{roof} (T_{roof} - T_Z) \quad (2-3)$$

$$C_{W1} = 2U_{wall1} A_{wall1} (T_{wall1} - T_Z) \quad (2-4)$$

$$C_{W2} = 2U_{wall2} A_{wall2} (T_{wall2} - T_Z) \quad (2-5)$$

สมการ (2-1) เป็นการรวมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดภายในห้องที่จะทำการควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย C_E C_R C_{W1} C_{W2} และ $q(t)$ เมื่อรวมกันจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตหรืออุณหภูมิภายในห้อง T_Z ของระบบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีรายละเอียดของสมการย่อยดังนี้

สมการ (2-2) ประกอบด้วยความจุความร้อน H_a ความหนาแน่นของอากาศ ρ_a ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ C_a อัตราไหลลมจ่าย F_{sa} ค่าอุณหภูมิลมจ่ายที่ป้อนโดยแอกชูเอเตอร์ T_{sa} ของระบบที่ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์เป็นผู้คำนวณ สุดท้ายคืออุณหภูมิภายในบริเวณห้อง T_Z หลังจากการคำนวณจะรวมเป็นค่า C_E ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั่วไปต่ออุณหภูมิภายในบริเวณห้อง

สมการ (2-3) จะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของหลังคา U_{roof} พื้นที่ของหลังคา A_{roof} อุณหภูมิของหลังคา T_{roof} และอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง T_Z หลังจากการคำนวณจะรวมเป็นค่า C_R ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหลังคาต่ออุณหภูมิภายในบริเวณห้อง

สมการ (2-4) จะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก U_{wall1} พื้นที่ของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก A_{wall1} อุณหภูมิของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก T_{wall1} อุณหภูมิภายในบริเวณห้อง T_Z

หลังจากการคำนวณจะรวมเป็นค่า C_{w1} ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกต่ออุณหภูมิภายในบริเวณห้อง

สมการ (2-5) จะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางทิศเหนือและใต้ U_{wall2} พื้นที่ของผนังห้องทางทิศเหนือและใต้ A_{wall2} อุณหภูมิของผนังห้องทางทิศเหนือและใต้ T_{wall2} อุณหภูมิภายในบริเวณห้อง T_z หลังจากการคำนวณจะรวมเป็นค่า C_{w2} ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังห้องทางทิศเหนือและใต้ต่ออุณหภูมิภายในบริเวณห้อง

ค่าที่กำหนดในพารามิเตอร์แต่ละตัวแสดงดัง ตาราง 2-1 ตาราง 2-2 ตาราง 2-3 และ ตาราง 2-4 โดยค่าทั้งหมดยึดตามวิทยานิพนธ์ [1]

ตาราง 2-1 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์ทั่วไป

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
ความจุความร้อน (J/°C)	H_a	89,036.7
ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)	ρ_a	1.25
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg °C)	C_a	1,005
อัตราไหลลมจ่าย (m ³ /s)	F_{sa}	0.0172
กำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง (W)	$q(t)$	320

ตาราง 2-2 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของหลังคา (W/m ² °C)	U_{roof}	1
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก (W/m ² °C)	U_{wall1}	2
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางทิศเหนือและใต้ (W/m ² °C)	U_{wall2}	2

ตาราง 2-3 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์พื้นที่

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
พื้นที่ของหลังคา (m ²)	A_{roof}	15.75
พื้นที่ของผนังห้องทางทิศเหนือและทิศใต้ (m ²)	A_{wall1}	15.75
พื้นที่ของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก (m ²)	A_{wall2}	20.25

ตาราง 2-4 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์อุณหภูมิ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
อุณหภูมิของหลังคา (°C)	T_{roof}	10
อุณหภูมิของผนังห้องทางทิศตะวันออกและตะวันตก (°C)	T_{wall1}	10
อุณหภูมิของผนังห้องทางทิศเหนือและใต้ (°C)	T_{wall2}	10
อุณหภูมิลมจ่ายที่ป้อนโดยแอกชูเอเตอร์ (°C)	T_{sa}	-
อุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (°C)	T_Z	-
อุณหภูมิภายในบริเวณห้องเริ่มต้นที่เวลา 0 วินาที (°C)	$T_Z(0)$	10
อุณหภูมิที่ต้องการ (°C)	T_D	21

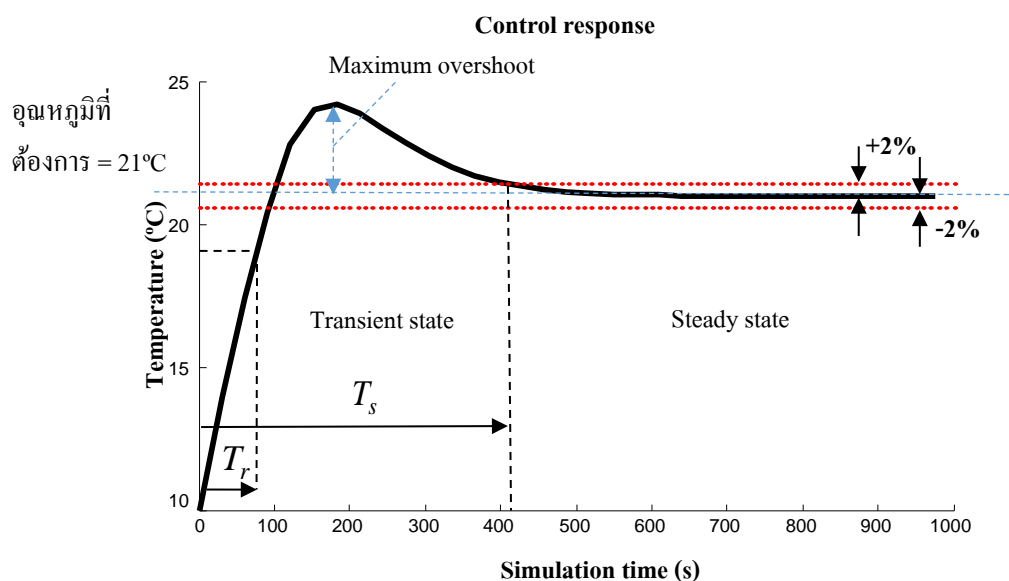
2.2.2 ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์

ตัวควบคุมที่ถูกใช้งานเป็นแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ PID controller (Proportional integral and derivative controller) [1] ซึ่งทำหน้าที่คำนวณอินพุทหรือสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมให้แก่แอกชูเอเตอร์เพื่อปรับอุณหภูมิให้เย็นขึ้นหรือลงไปป้อนให้ระบบจนได้ค่าอุณหภูมิภายในห้องที่ต้องการ ตัวควบคุมจะคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองการควบคุมซึ่งก็คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องกับอุณหภูมิที่ต้องการ ค่าของพารามิเตอร์อัตราขยายที่กำหนดแสดงดังตาราง 2-5 ค่าทั้งหมดยึดตามวิทยานิพนธ์ [1]

ตาราง 2-5 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์อัตราขยายที่ใช้งานในตัวควบคุม PID

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
อัตราขยายเชิงสัดส่วน	K_P	6
อัตราขยายเชิงอินทิกรัล	K_I	0.05
อัตราขยายเชิงอนุพันธ์	K_D	55

ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองการควบคุมและตัวชี้วัดสำหรับเปรียบเทียบสมรรถนะที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ในบทที่ 5 โดยผลตอบสนองการควบคุมที่ได้จากระบบควบคุมในกรณีไม่มีการทำงานของระบบสื่อสารไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้องสามารถอธิบายพารามิเตอร์และผลการจำลองเบื้องต้นได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2-2 พารามิเตอร์ที่พิจารณาจากผลตอบสนองการควบคุม

ภาพประกอบ 2-2 จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่พิจารณาดังนี้

- ก) ช่วงเวลาขึ้น (T_r , Rise time) คือระยะเวลาที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก 10 % จนถึง 90 % ของค่าอุณหภูมิที่ต้องการ (Desired temperature) มีหน่วยเป็นวินาที
- ข) ช่วงเวลาเข้าที่ (T_s , Settling time) คือช่วงเวลาที่ผลตอบสนองขาออกของระบบควบคุมหรือค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ของค่าเป้าหมายในงานนี้คือค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งช่วงเวลาเข้าที่มีหน่วยเป็นวินาที
- ค) ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum overshoot) คือค่าสูงสุดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเป็นผลต่างจากค่าอุณหภูมิสูงสุดกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ
- ง) สภาวะชั่วคราว (Transient state) คือสภาวะที่ผลตอบสนองการควบคุมหรือค่าอุณหภูมิมิมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่
- จ) สภาวะคงตัว (Steady state) คือสภาวะที่ค่าอุณหภูมิปัจจุบันสามารถเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วง $\pm 2\%$ ของค่าอุณหภูมิที่ต้องการในช่วงระยะเวลาการจำลอง

ผลการจำลองเบื้องต้นสำหรับระบบควบคุมแบบต่อเนื่องในกรณีไม่มีการทำงานของระบบสื่อสารไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีช่วงเวลาขึ้นเท่ากับ 105.88 วินาที ช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 401.86 วินาทีและค่าพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 2.33 % ค่าเหล่านี้จะใช้ประกอบการวิเคราะห์ในบทที่ 5 ต่อไป

2.3 ระบบสื่อสาร

ระบบสื่อสารในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่นำส่งข้อมูลอุณหภูมิกายในอาคารซึ่งตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ของโหนดต้นทางส่งต่อไปยังโหนดปลายทางแล้วส่งต่อไปให้ตัวควบคุมนำไปคำนวณค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิและเข้าสู่กระบวนการทำงานของระบบควบคุมต่อไป ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีแบบจำลองสำคัญที่ถูกระบุใช้งานดังนี้

2.3.1 ลำดับชั้นของการติดต่อสื่อสารไร้สาย

ลำดับชั้นของโพรโทคอลในระบบสื่อสารที่ใช้งานในโหนดเซนเซอร์ถูกแบ่งออกเป็น 5 ลำดับชั้น [14] ชั้นบนสุดคือชั้นประยุกต์ (Application layer) ซึ่งเป็นชั้นที่จะนำข้อมูลที่รับได้จากชั้นลำดับล่างไปใช้งานกับระบบที่ออกแบบไว้ เช่น ระบบควบคุม และยังทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลจากระบบที่ใช้งานส่งลงไปยังชั้นล่างเพื่อส่งข้อมูลในระบบสื่อสาร ชั้นลำดับถัดมาคือชั้นขนถ่าย (Transport layer) สำหรับควบคุมการส่งข้อมูลต้นทางไปยังปลายทาง ถัดมาเป็นชั้นจัดเส้นทาง (Network layer) ทำหน้าที่หาเส้นทางจากต้นทางไปยังปลายทางซึ่งโพรโทคอลจัดเส้นทางจะทำงานอยู่ในชั้นนี้ ถัดมาคือชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (Data link layer) เป็นชั้นเชื่อมโยงการส่งรับข้อมูลระหว่างชั้นจัดเส้นทางกับชั้นกายภาพ (Physical layer) ซึ่งมีส่วนย่อยอีกสองส่วนคือ LLC (Logical link control) และชั้นควบคุมการเข้าใช้ตัวกลาง MAC (Medium access control) โดยจะอธิบายรายละเอียดของ MAC ในหัวข้อถัดไป และสุดท้ายชั้นล่างสุดคือ ชั้นกายภาพจะทำหน้าที่กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานเช่น อุปกรณ์ส่ง-รับสัญญาณวิทยุมีอัตราการส่งข้อมูลเท่าใด สัญญาณที่ส่งทำการมอดูเลชัน (Modulation) แบบใด เป็นต้น ลำดับชั้นทั้งหมดแสดงดังภาพประกอบ 2-3

Application layer
Transport layer
Network layer
Data link layer
Physical layer

ภาพประกอบ 2-3 ลำดับชั้นของการติดต่อสื่อสาร

2.3.2 แบบจำลองมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และ กลไก CSMA/CA

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็น LR-WPANs (Low-rate wireless personal area networks) โดยมีอัตราการส่งข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานต่ำ เหมาะสำหรับแอปพลิเคชันจำพวกเฝ้าระวัง (Monitoring) ซึ่งมีการกำหนดการทำงานที่ขึ้นกับภาพและชั้นควบคุมการเข้าใช้ตัวกลาง

ชั้นกายภาพจะควบคุมการส่ง-รับข้อมูลที่ความถี่ 2400-2483.5 เมกะเฮิรตซ์ซึ่งเป็นความถี่ที่มีผู้ใช้งานสูงที่สุด มีช่องสัญญาณให้ใช้งานโดยไม่เกิดการรบกวนกันเองจำนวน 16 ช่องสัญญาณ ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์สำหรับ WPAN ภายในงานวิจัยนี้ทดสอบด้วยการอ้างอิงอุปกรณ์สื่อสาร CC2420 ทำงานที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์และมีอัตราการส่งข้อมูล 250 กิโลบิตต่อวินาที [15]

กลไกการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ถูกใช้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในชั้น MAC คือ CSMA/CA [16] โดยเมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูล มันจะเริ่มกระบวนการ CCA (Clear channel assessment) เพื่อตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่างหรือมีโหนดอื่นกำลังใช้งานอยู่หรือไม่ หากช่องสัญญาณว่างจึงจะเริ่มกระบวนการส่งข้อมูล กลไก CSMA/CA บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สามารถเลือกใช้งานได้จาก 2 รูปแบบคือ รูปแบบ Slotted ซึ่งมีการใช้งานบีคอน (Beacon) และเฟรมแบบซูเปอร์เฟรม (Super frame) โดยรูปแบบนี้จะสามารถจองเวลาการเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้ และรูปแบบที่สองคือ Un-slotted ซึ่งไม่มีการใช้งานบีคอน (Beacon) และซูเปอร์เฟรมแต่จะใช้การรอเข้าใช้ช่องสัญญาณด้วยเวลาสุ่มตามพารามิเตอร์เวลาถอย (Back-off time) แทน งานวิจัยนี้ใช้รูปแบบ Un-slotted เท่านั้น เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นกว่ารูปแบบ Slotted ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดของ CSMA/CA รูปแบบ Un-slotted

CSMA/CA รูปแบบ Un-slotted กระบวนการจะเริ่มขึ้นเมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูล โหนดจะเริ่มกระบวนการ CCA เพื่อตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่าง หรือมีโหนดอื่นกำลังใช้งานอยู่หรือไม่ โดยก่อนจะเริ่มกระบวนการ CCA โหนดจะต้องทำการรอด้วยเวลาสุ่มตามพารามิเตอร์เวลาถอย ซึ่งเป็นเวลาที่คำนวณจากพารามิเตอร์อีกสองตัวประกอบด้วย BE (Back-off exponent) มีค่าปรัยเท่ากับ 3 และ $aUnitBackoffPeriod$ มีค่าเท่ากับ 320 ไมโครวินาที ดังสมการ (2-6) หลังจากรอจนครบเวลาถอยก็จะเริ่มกระบวนการ CCA เพื่อตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่างหรือไม่ หากช่องสัญญาณว่างก็จะทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล หาก CCA ระบุว่าช่องสัญญาณยังไม่ว่าง โหนดจะต้องกลับไปรอด้วยเวลาสุ่มตามพารามิเตอร์เวลาถอย แล้วค่อยเริ่มกระบวนการ CCA อีกครั้ง กระบวนการรอนี้จะสามารถทำได้ทั้งหมด 5 ครั้งหากครบ 5 ครั้งแล้วช่องสัญญาณยังไม่ว่างแพ็กเก็ตจะถูกทิ้งไป

$$\text{Back-off time} = (A \text{ random integer between } 0 \text{ to } 2^{\text{BE}} - 1) \times a \text{ UnitBackoffPeriod} \quad (2-6)$$

2.3.3 แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ

แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุถูกใช้เพื่ออธิบายลักษณะของการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุของโหนดเซนเซอร์ ซึ่งสามารถถูกใช้คำนวณความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับได้ งานวิจัยนี้ทดสอบด้วยแบบจำลองเดี่ยวคือ Two-ray ground ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับขึ้นอยู่กับระยะทาง โดยเป็นผลรวมของสัญญาณที่ถูกส่งมาโดยตรง (Line of sight) และสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นมายังตัวรับ (Ground reflection) ซึ่งภายในจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ P_t คือความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับมีหน่วยวัตต์ d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับมีหน่วยเมตร P_r คือกำลังส่งมีหน่วยวัตต์ G_t และ G_r คืออัตราขยายของสายอากาศฝั่งส่งและรับ h_t และ h_r คือความสูงของสายอากาศฝั่งส่งและรับมีหน่วยเป็นเมตร สุดท้าย L คือค่าจากการสูญเสียของระบบ สามารถแสดงการคำนวณดังสมการ (2-7)

$$P_r(d) = \frac{(P_t \times G_t \times h_t \times G_r \times h_r)}{d^4 \times L} \quad (2-7)$$

ค่าที่ใช้งานแสดงดังตาราง 2-6 ซึ่งค่าที่กำหนดนอกจาก P_t และ d จะเป็นค่าปริยายที่ถูกใช้งานในเครื่องมือ NS2

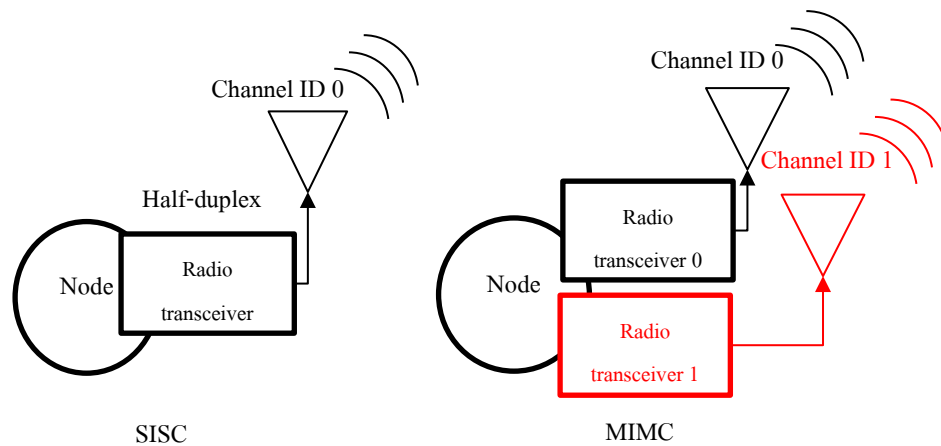
ตาราง 2-6 สัญลักษณ์และค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์ในแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
P_t	0.0435 [15]
G_t และ G_r	1
h_t และ h_r	1
d	7
L	1

2.3.4 แบบจำลองอินเตอร์เฟส

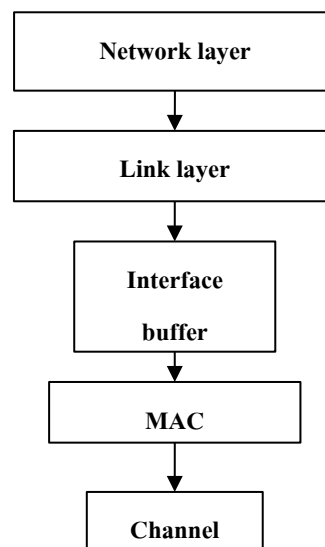
งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาโปรโตคอลจัดเส้นทางด้วยการเพิ่มจำนวนอินเตอร์เฟส โดยในงานวิจัยนี้คือ ตัวส่ง-รับสัญญาณวิทยุ (Radio transceiver) ซึ่งการทำงานของอินเตอร์เฟสจะไม่สามารถส่งและรับข้อมูลในเวลาเดียวกันได้ (Half duplex) ยกเว้นอินเตอร์เฟสที่ใช้ส่งและรับเป็นคนละอินเตอร์เฟสกันก็จะสามารถทำงานแบบคู่ขนานได้ ซึ่งในงานนี้อ้างอิงอุปกรณ์สื่อสาร CC2420 ทำงานอยู่ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีอัตราการส่งข้อมูล 250 กิโลบิตต่อวินาที [15]

ลักษณะทางกายภาพของโหนดที่ประกอบด้วยอินเทอร์เฟซเดียว SISC (Single-interface single-channel) และโหนดที่ประกอบด้วยหลายอินเทอร์เฟซ MIMC (Multi-interface multi-channel) แสดงดังภาพประกอบ 2-4



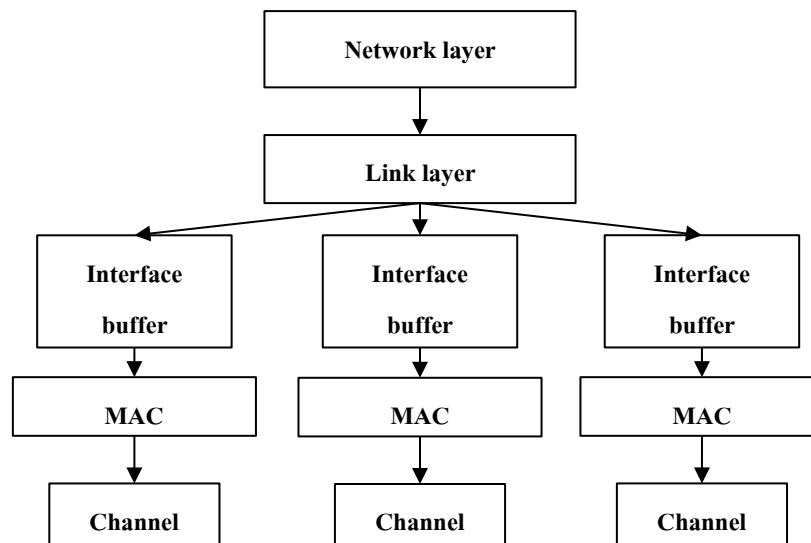
ภาพประกอบ 2-4 ลักษณะทางกายภาพของโหนดชนิด SISC และ MIMC

การเพิ่มจำนวนอินเทอร์เฟซจากเอกสาร [27] ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ภาพประกอบ 2-5 แสดงโครงสร้างของโหนดที่ทำการจำลองกรณีมีเพียงอินเทอร์เฟซเดียว



ภาพประกอบ 2-5 โครงสร้างของโหนดที่จำลองกรณีมีอินเทอร์เฟซเดียว [27]

ภาพประกอบ 2-6 แสดงโครงสร้างของโหนดที่จำลองกรณีประกอบด้วยหลายอินเทอร์เฟซ ซึ่งส่วนที่เพิ่มขึ้นมาจะอยู่ภายใต้ Link layer ลงไป ตัวโหนดจะสามารถใช้หลายช่องสัญญาณได้พร้อมกันจากการใช้ช่องสัญญาณที่แตกต่างกันของแต่ละอินเทอร์เฟซ



ภาพประกอบ 2-6 โครงสร้างของโหนดที่จำลองกรณีประกอบด้วยหลายอินเตอร์เฟส

2.3.5 ตัวบ่งชี้การละทิ้งของแพกเกตใน NS2

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงรายละเอียดของการละทิ้งแพกเกตที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่าย เซนเซอร์ไร้สายซึ่งทำการจำลองผ่านเครื่องมือ NS2 [17] หัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดของการละทิ้งแพกเกตแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นและสาเหตุของการละทิ้งซึ่งมีหลายสาเหตุ สามารถอธิบายได้โดยสรุปดังนี้

IFQ: บ่งบอกถึงเหตุการณ์ที่แพกเกตล้นบัฟเฟอร์ เกิดจากอัตราการส่งข้อมูลสูงเกินไป ซึ่งบัฟเฟอร์มีการจัดการรูปแบบ FIFO (First in first out) โดยการละทิ้งแพกเกตที่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ เกิดขึ้นสองรูปแบบคือ IFQ ที่ชั้น MAC จะเกิดขึ้นเมื่อโหนดไม่สามารถส่งแพกเกตออกไปได้เร็วพอจนเกิดการล้นของแพกเกตในบัฟเฟอร์ แพกเกตแรกที่เข้ามาจะถูกดำเนินการ ส่วนแพกเกตที่เข้ามาหลังจากบัฟเฟอร์เต็มจะถูกละทิ้งไป รูปแบบที่สองคือ IFQ ที่ Network layer จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงจนมีการสะสมของแพกเกตข้อมูลในบัฟเฟอร์ของชั้น Network layer จนเต็มขณะที่โหนดยังคงอยู่ในกระบวนการจัดเส้นทาง เมื่อบัฟเฟอร์เต็มแพกเกตข้อมูลแรกที่เข้ามาสะสมอยู่ในบัฟเฟอร์จะถูกละทิ้งไป

CBK: บ่งบอกถึงเหตุการณ์ที่ชั้น MAC ไม่พร้อมจะส่งแพกเกตหรือส่งไม่สำเร็จ และแจ้งให้ชั้นบน (Upper layer) ทราบถึงกระบวนการส่งที่ผิดพลาด โดยเกิดจากเหตุการณ์ เช่น ไม่มีการแจ้งให้ทราบ (Acknowledgment) จากโหนดรับข้อมูลสำหรับแพกเกตที่จะส่ง

DUP: บ่งชี้ว่าเกิดการรับแพกเกตซ้ำ อันเนื่องมาจากกระบวนการส่งซ้ำ ตัวแพกเกตที่ซ้ำจะถูกละทิ้งและถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้

ERR: เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ทั้งที่ชั้น MAC และชั้นกายภาพ โดยในชั้นกายภาพหรือ PHY เป็นการบ่งชี้ว่าสามารถรับรู้ถึงแพกเก็ตแต่ไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากพลังงานของแพกเก็ตตอนที่ถูกรับนั้นต่ำกว่าความไว (Sensitivity) ของตัวรับ (Receiver) ส่วนชั้น MAC เป็นการบ่งชี้ว่าเกิดขึ้นเพราะกระบวนการรับไม่สมบูรณ์หรือขนาดของแพกเก็ตไม่ถูกต้องจากการที่แพกเก็ตไม่สามารถส่งถึงตัวรับได้สมบูรณ์จากระยะทางที่ไกลเกินไป

NRTE: บ่งชี้ว่าไม่มีเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลไปยังโหนดที่ต้องการเนื่องจากเกิดความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางทำให้ไม่มีเส้นทางส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งมีความแตกต่างจากตัวบ่งชี้ IFQ ที่ Network layer โดยแพกเก็ตที่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE คือแพกเก็ตที่ถูกทิ้งหลังจากกระบวนการจัดเส้นทางล้มเหลว

LQI: เกิดขึ้นเมื่อแพกเก็ตที่รับได้นั้นมีค่า SNR (Signal to noise ratio) ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ (10 dB) มีสาเหตุที่อาจทำให้เกิดเหตุการณ์นี้เช่น ปัญหาโหนดซ่อน (Hidden node problem) เกิดขึ้นเมื่อมีโหนดมากกว่า 1 โหนดต้องการส่งข้อมูลแต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของโหนดบางโหนดได้แล้วเกิดการส่งข้อมูลแบบไม่รู้ (Unaware transmission) กันกับโหนดอื่นกรณีที่สองคือ โหนดสองโหนดเลือกช่วงเวลาทยพร้อมกันและระบุว่าช่องสัญญาณอยู่ในสภาวะว่างแล้วเกิดเหตุการณ์ที่ส่งข้อมูลพร้อมกันแม้ทั้งสองโหนดจะสามารถระบุตัวตนของกันและกันได้ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูล

NOT: เป็นการละทิ้งที่ชั้นกายภาพซึ่งระบุว่าแพกเก็ตถูกละทิ้งแม้จะเป็นการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ถูกต้อง เกิดขึ้นเมื่อโหนดได้รับหลายแพกเก็ตพร้อมกันซึ่งแพกเก็ตที่ไม่ได้มีกำลังรับสูงสุดหรือถูกระบุเป็น LQI จะถูกละทิ้งและแสดงด้วยตัวบ่งชี้นี้

บทที่ 3

การวิเคราะห์สมรรถนะเบื้องต้นของโพรโทคอล AODV

3.1 บทนำ

บทนี้ได้นำเสนอการทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบที่ถูกนำมาใช้งานบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยมีแง่มุมนำเสนอ ดังนี้ ก) การศึกษาปริมาณงานสูงสุดของโพรโทคอล AODV ข) การศึกษาผลกระทบของเวลาเริ่มต้นในการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง ค) การศึกษาผลกระทบเมื่อโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและสุดท้าย ง) การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ ART (Active route time-out) เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้พัฒนาโพรโทคอลแบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ

ผลการจำลองภายใต้เครื่องมือ NS2 v.2.34 ซึ่งถูกใช้เพื่อจำลองระบบเครือข่าย เซนเซอร์ไร้สายบนระบบปฏิบัติการ Linux ubuntu 11.04 ในขอบเขตการสื่อสารหนึ่งฮอปและสภาพแวดล้อมที่กำหนด แสดงให้เห็นผลการศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอล AODV จากมุมมองข้อ ก) ผลการจำลองเมื่อโพรโทคอล AODV ถูกนำมาใช้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จะสามารถให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 156 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเป็นปริมาณงานที่ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่มาตรฐาน IEEE 802.15.4 แจ้งไว้เกิดจากสองสาเหตุ สาเหตุแรกคือปริมาณงานที่ผู้วิจัยทำการคำนวณมานั้นเป็นปริมาณงานจากแพกเกตข้อมูลจริงเท่านั้น ไม่ได้ทำการรวมปริมาณงานจากแพกเกตจัดเส้นทางเข้าไป และสาเหตุที่สองเกิดจากแพกเกตข้อมูลถูกละทิ้งจากการล้นของบัฟเฟอร์แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ขึ้น MAC ซึ่งเป็นผลกระทบจากระบวนการ CSMA/CA ต่อมาข้อ ข) การศึกษาเวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูลต่อสมรรถนะของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV กรณีโหนดต้นทางเริ่มต้นส่งแพกเกตข้อมูลที่เวลาเดียวกันจะให้สมรรถนะต่ำกว่ากรณีโหนดต้นทางเริ่มต้นส่งแพกเกตข้อมูลที่เวลาสุ่มในช่วง 0 ถึง 12.19 วินาที เนื่องจากการละทิ้งแพกเกตข้อมูลสูงกว่า ข้อ ค) ทำการศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะเมื่อโหนดต้นทางถูกวางอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน ผลจากการศึกษาพบว่าสมรรถนะของโพรโทคอลจะต่ำลงเนื่องจากการละทิ้งแพกเกตข้อมูลที่เป็นผลพวงมาจากความล้มเหลวในช่วงการจัดเส้นทาง เพราะการแย่งชิงช่องสัญญาณจากจำนวนโหนดต้นทางที่เพิ่มขึ้น และสุดท้ายมุมมองข้อ ง) การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ ART ผลการจำลองชี้ว่าสมรรถนะของโพรโทคอล AODV จะต่ำลงเพราะการละทิ้งแพกเกตข้อมูลจากความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์ ART จะเป็นตัวกำหนดจำนวนครั้งของกระบวนการจัดเส้นทางต่อการส่งแพกเกตข้อมูล สมรรถนะกรณีต้องจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งแพกเกตข้อมูลจะต่ำกว่ากรณีมีการจัดเส้นทางเพียงครั้งเดียวจากการศึกษาผลการจำลองที่ได้ในข้อ ก) ถึง ง) สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนา

โพรโทคอลแบบหลายอินเตอร์เฟสหลายช่องสัญญาณและใช้ประกอบการออกแบบการจำลองของ บทที่ 5 การจำลองในบทนี้ทำให้ทราบว่าสาเหตุหลักที่สมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต่ำลง เนื่องจากเกิดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลเพราะความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางแสดงด้วยตัว บ่งชี้ NRTE ซึ่งสมรรถนะจะยิ่งต่ำลงเมื่อถูกใช้งานในกรณีต้องทำกระบวนการจัดเส้นทางทุกครั้งต่อ การส่งแพ็คเกจข้อมูล ด้วยผลการศึกษาดังกล่าวจึงนำมาซึ่งโพรโทคอลที่นำเสนอโดยทำการ ออกแบบเพื่อช่วยลดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลจากสาเหตุข้างต้น การเปรียบเทียบสมรรถนะจาก โพรโทคอล AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอถูกแสดงในบทที่ 5

3.2 การศึกษาปริมาณงานสูงสุดของโพรโทคอล AODV

3.2.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

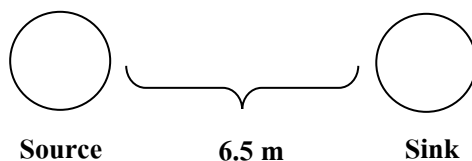
เพื่อศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ในเรื่องของปริมาณงาน จากแพ็คเกจข้อมูลสูงสุดที่โพรโทคอลนี้ทำได้เมื่อถูกนำมาใช้บนระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เนื่องจากยังไม่มีบทความหรืองานวิจัยที่ศึกษาเฉพาะปริมาณงานจาก แพ็คเกจข้อมูลในระหว่างการสื่อสารหนึ่งฮอป ผลการจำลองสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงประกอบการ อธิบายการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลที่เกิดขึ้นในการจำลองของบทที่ 5

3.2.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้ใช้เครื่องมือ NS2 ซึ่งไม่มีการทำงานของระบบควบคุมเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อค้นหาอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของโพรโทคอล AODV ต้นแบบที่ถูกใช้งานบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 กำหนดให้การจำลองนี้แบ่งออกเป็น 2 การจำลองย่อยเพื่อศึกษาว่าจะเกิดความแตกต่าง ของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดหรือไม่ในสถานการณ์ที่ต่างกัน ผลการจำลองนี้จะเชื่อมโยงไปยังผล การจำลองต่อไปซึ่งอธิบายว่าปริมาณงานที่ลดต่ำลงในกรณีอัตราการส่งข้อมูลต่ำเป็นผลกระทบ จากกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV ไม่ใช่ผลกระทบจากอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด ปริมาณงานสูงสุดจากการจำลองนี้เป็นปริมาณงานที่มาจาก การจัดเส้นทางเพียงครั้งเดียวของ โพรโทคอลจัดเส้นทาง การจำลองย่อยที่หนึ่งกำหนดให้มีโหนดจำนวน 2 โหนดคือโหนดต้นทาง และโหนดปลายทางอย่างละ 1 โหนดอยู่ในระนาบเดียวกันวางห่างกันที่ระยะ 6.5 เมตรดัง ภาพประกอบ 3-1 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูล 5 ระดับคือ การส่งข้อมูลที่ 0.007 0.006 0.005 0.004 และ 0.003 วินาทีต่อแพ็คเกจ แสดงตัวอย่างการคำนวณการส่งข้อมูล 0.007 วินาที ต่อแพ็คเกจเป็นอัตราการส่งข้อมูลดังสมการ (3-1) ซึ่งช่วงอัตราการส่งข้อมูลทั้งหมดจะเท่ากับ 117.71 137.33 164.80 206.00 และ 274.67 กิโลบิตต่อวินาที ตามลำดับ อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของ มาตรฐาน IEEE 802.15.4 อยู่ที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที การเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลที่ออกแบบ ไว้อยู่ในช่วงน้อยกว่าจนถึงมากกว่าอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จึง

เพียงพอต่อการศึกษาปริมาณงานสูงสุดจากแพกเก็ตข้อมูล การจำลองนี้กำหนดให้โพรโทคอล AODV ต้นแบบส่งข้อมูลด้วยเส้นทางที่มีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอป โดยยังคงไว้ซึ่งกระบวนการจัดเส้นทาง เช่น การส่งต่อแพกเก็ตของเส้นทาง RREQ การตอบกลับแพกเก็ตยืนยันเส้นทาง RREP และอื่นๆไว้ดังเดิมยกเว้นในกระบวนการจัดเส้นทาง โพรโทคอล AODV จะเลือกใช้เส้นทางที่มีระยะการสื่อสารจากโหนดต้นทางถึงปลายทางเพียงหนึ่งฮอปเท่านั้น โดยมีเหตุผลอันเนื่องมาจากต้องการทราบปริมาณงานจากแพกเก็ตข้อมูลที่ถูกส่งในระยะหนึ่งฮอป ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ง่ายที่สุดเพื่อทำความเข้าใจปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการส่งข้อมูลแบบไร้สายเพื่อระบุว่าการเกิดขี้นมีสาเหตุมาจากอะไร การทดสอบแบบหลายฮอปอาจทำให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากความซับซ้อนของโทโพโลยี (Topology) จึงจำกัดให้โพรโทคอลเลือกใช้เส้นทางระยะหนึ่งฮอป

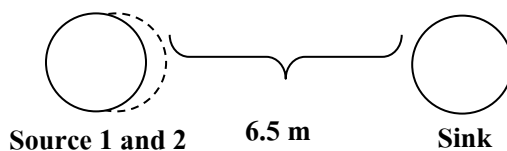
$$\frac{1000 \text{ s}}{0.007 \text{ s}} \times \frac{1}{1000 \text{ s}} \times 103 \text{ bytes} \times \frac{8 \text{ bit}}{1 \text{ byte}} = 117.71 \text{ kbps} \quad (3-1)$$



ภาพประกอบ 3-1 ตำแหน่งการวางโหนดของการจำลองย่อยที่หนึ่งในการจำลอง 3.2

การจำลองย่อยที่สองจะใช้พารามิเตอร์ทุกอย่างคล้ายกับการจำลองย่อยที่หนึ่ง แต่จะทำการเพิ่มจำนวนโหนดต้นทางอีก 1 โหนด เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเข้าใช้ช่องสัญญาณของกระบวนการ CSMA/CA โหนดต้นทางจะถูกวางไว้ ณ ตำแหน่งเดียวกันทั้ง 2 โหนดดังภาพประกอบ 3-2 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูล 3 ระดับแรกจากการส่งแพกเก็ตข้อมูลที่ 0.03 ถึง 0.01 วินาทีต่อแพกเก็ต โดยแต่ละระดับจะลดลงระดับละ 0.01 วินาทีต่อแพกเก็ต ขณะที่ 7 ระดับต่อมาเป็นการส่งแพกเก็ตข้อมูลในช่วง 0.009 ถึง 0.003 วินาทีต่อแพกเก็ต การเปลี่ยนแปลงแต่ละระดับจะลดลงระดับละ 0.001 วินาทีต่อแพกเก็ต อัตราการส่งข้อมูลสามารถแปลงให้อยู่ในหน่วยกิโลบิตต่อวินาที ดังตาราง 3-1 กรณีการทดลองย่อยที่สองจะประกอบด้วยสองโหนดต้นทางทำให้อัตราการส่งข้อมูลจะเท่ากับ 27.46 กิโลบิตต่อวินาที $\times 2$ เท่ากับ 54.93 กิโลบิตต่อวินาที ที่ค่าเริ่มต้น สาเหตุที่ใช้ช่วงอัตราการส่งข้อมูลดังกล่าวเพราะต้องการให้ครอบคลุมอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดจากมาตรฐานที่ใช้ซึ่งอยู่ที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที เมื่อมีสองโหนดต้นทางก็จะเพิ่มเป็น 500 กิโลบิตต่อวินาที แต่การใช้ช่องสัญญาณร่วมกันอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดควรเป็นค่าเดิมคือ 250 กิโลบิตต่อวินาที อย่างไรก็ตาม

ได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลที่ใช้ให้ครอบคลุมถึงอัตราการส่งข้อมูลจนถึง 500 กิโลบิตต่อวินาที เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทางจะถูกสุ่มในช่วง 0.1 ถึง 1 วินาที ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มจากความต้องการให้ทั้งสองโหนดเริ่มต้นส่งข้อมูลไม่พร้อมกัน และเช่นเดียวกับการจำลองย่อยที่หนึ่งจะกำหนดให้โพรโทคอล AODV ต้นแบบส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอปเท่านั้นเช่นกัน ทุกการจำลองจะใช้ระยะรับรู้สัญญาณพาหะเป็นสองเท่าของระยะการส่งข้อมูลเนื่องจากบทความ [18] ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมกรตรวจจับสัญญาณพาหะจะมีระยะอย่างน้อยเป็นสองเท่าของระยะการส่งข้อมูลซึ่งเป็นผลกระทบจากการแพร่กระจายสัญญาณของโหนดที่แม้จะไม่อยู่ในระยะการส่งข้อมูลก็ตาม พารามิเตอร์อื่นๆของทั้งสองการจำลองย่อยแสดงดังตาราง 3-1



ภาพประกอบ 3-2 ตำแหน่งการวางโหนดของการจำลองย่อยที่สองในการจำลอง 3.2

ตาราง 3-1 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.2

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
เวลาในการจำลองการทำงาน	1000 วินาที
จำนวนโหนดต้นทาง	1 โหนดในการจำลองย่อยที่หนึ่ง และ 2 โหนดในการจำลองย่อยที่สอง
จำนวนโหนดปลายทาง	1 โหนด
ระยะการสื่อสารหนึ่งฮอปที่ใช้ทดสอบ	6.5 เมตร
ช่วงการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลกรณีหนึ่งโหนดต้นทาง	117.71 137.33 164.80 206.00 และ 274.67 กิโลบิตต่อวินาที
ช่วงการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง	54.93 82.40 164.80 183.11 206.00 235.43 274.66 329.60 412.00 และ 549.33 กิโลบิตต่อวินาที
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของโหนดต้นทางกรณีหนึ่งโหนดต้นทาง	0.1 วินาที

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของ โหนดต้นทางกรณี สองโหนดต้นทาง	สุ่มในช่วง 0.1 ถึง 1 วินาที ด้วยการแจกแจง แบบยูนิฟอร์ม
ขนาดบัพเฟอร์ที่ Network layer	64 [1] แพกเกต
ขนาดบัพเฟอร์ที่ MAC	50 [17] แพกเกต
แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ	Two-ray ground
ความถี่ที่ใช้งาน	2.4 กิกะเฮิรตซ์
อัตราการส่งข้อมูล	250 กิโลบิตต่อวินาที
ระยะการส่งข้อมูล	7 เมตร
ระยะรับรู้สัญญาณพาหะ	14 เมตร
ขนาดแพกเกตข้อมูล	103 ไบต์ (70 ไบต์ ที่ชั้น Application)
มาตรฐานการสื่อสาร	IEEE 802.15.4

ตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

ตัวชี้วัดสมรรถนะที่ถูกใช้เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมีดังนี้

- ก) อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย (Average packet delivery ratio) ตัวชี้วัดนี้คำนวณจากจำนวนแพกเกตที่รับสำเร็จ ณ โหนดปลายทางต่อจำนวนแพกเกตที่ส่ง ณ โหนดต้นทางซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ยิ่งค่าเข้าใกล้ 100 % แสดงถึงสมรรถนะที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากการสูญหายของแพกเกตที่เป็นอัตราส่วนต่างค่าโดยคำนวณจาก

$$\text{อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล} = \frac{\text{จำนวนแพกเกตที่รับได้}}{\text{จำนวนแพกเกตที่ส่ง}}$$

- ข) ปริมาณงานโดยเฉลี่ย (Average throughput) คือปริมาณงานที่โหนดปลายทางรับได้มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที ซึ่งคำนวณจากแพกเกตข้อมูลเท่านั้น ไม่รวมแพกเกตจัดเส้นทาง

$$\text{ปริมาณงาน} = \frac{\text{จำนวนแพคเกจที่รับได้} \times \text{ขนาดแพคเกจ(บิต)}}{\text{เวลาที่ทำการจำลอง (วินาที)}}$$

$$\text{ขนาดแพคเกจข้อมูล} = 103 \text{ ไบต์} \times 8 \text{ บิต}$$

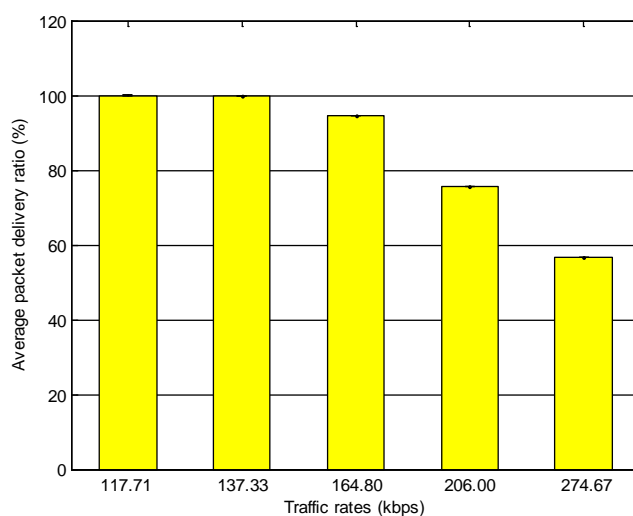
ค) จำนวนแพคเกจข้อมูลที่ถูกทิ้งโดยเฉลี่ย (Average number of data packet drops) คือผลรวมเฉลี่ยสะสมของการละทิ้งแพคเกจข้อมูล

ง) จำนวนแพคเกจจัดเส้นทางที่ถูกทิ้งโดยเฉลี่ย (Average number of routing packet drops) คือผลรวมเฉลี่ยสะสมของการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทาง

ผลการจำลองทั้งหมดถูกแสดงด้วยค่าเฉลี่ยที่มีช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95 % Confident interval) [1] ในทุกๆการจำลอง

3.2.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

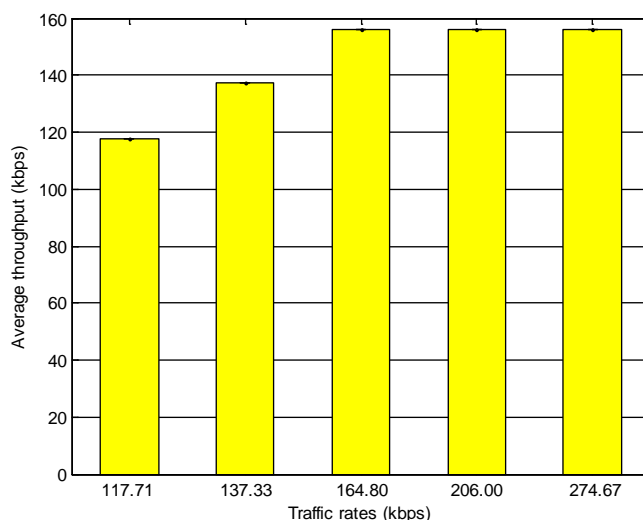
การจำลองแรกมีโหนดต้นทางเพียงโหนดเดียว ภาพประกอบ 3-3 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบ โดยจะลดลงต่ำกว่า 100 % เมื่อใช้อัตราการส่งข้อมูล 164.80 กิโลบิตต่อวินาทีเป็นต้นไป



ภาพประกอบ 3-3 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีหนึ่งโหนดต้นทาง

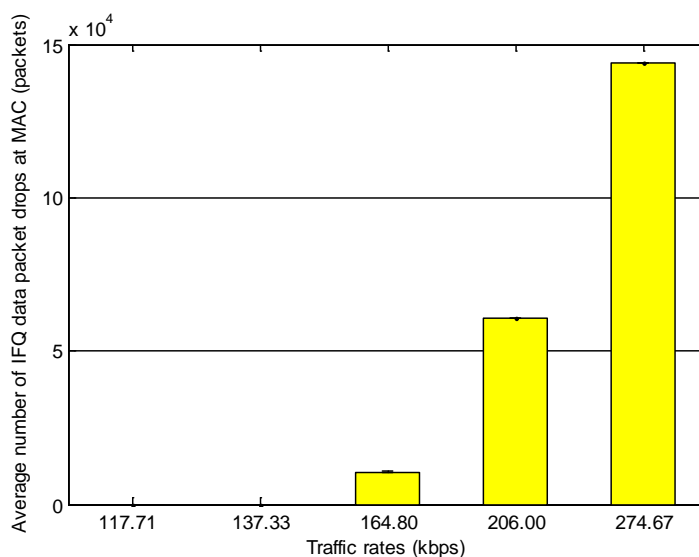
ภาพประกอบ 3-4 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถทำได้สูงสุดคงที่ประมาณ 156 กิโลบิตต่อวินาที ผลการจำลองทำให้ทราบว่าปริมาณงานจากแพคเกจข้อมูลสูงสุดที่ได้มีค่าต่ำกว่าอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที จากสองสาเหตุ สาเหตุแรกคือปริมาณงานที่คำนวณมาจากแพคเกจข้อมูลเพียง

อย่างเดียวไม่ได้รวมปริมาณงานจากแพกเกตจัดเส้นทาง ค่าที่ได้จึงปริมาณงานจากแพกเกตข้อมูลจริงเท่านั้น สาเหตุที่สองเกิดจากการความล่าช้าที่ชั้น MAC ซึ่งมาจากกระบวนการ CSMA/CA จะต้องสุ่มรอเวลาตามเวลาถอยทำให้เกิดความล่าช้า [19–21] ซึ่งส่งผลกระทบต่อให้มีการสะสมแพกเกตข้อมูลจนบัฟเฟอร์เต็มจากอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเกินไปและเกิดเหตุการณ์บัฟเฟอร์ล้น (Overflow) สามารถแสดงรายละเอียดในส่วนถัดไป



ภาพประกอบ 3-4 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบทำได้ต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีหนึ่งโหนดต้นทาง

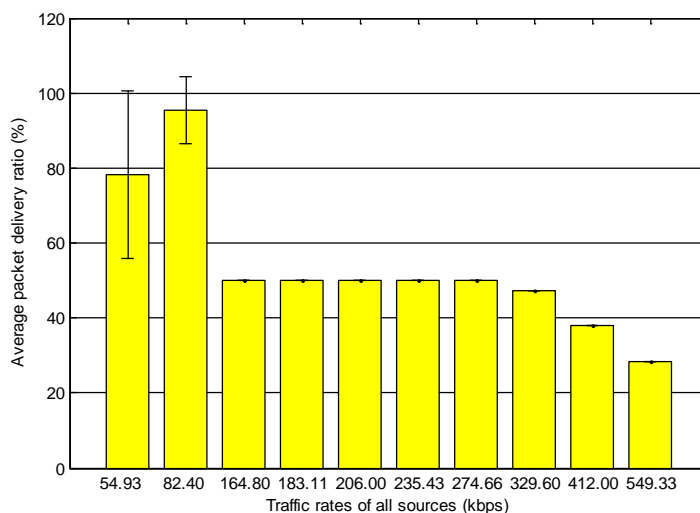
ภาพประกอบ 3-5 แสดงจำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยซึ่งทั้งหมดเกิดจากแพกเกตล้นหน่วยความจำที่อินเตอร์เฟซบัฟเฟอร์ (Interface buffer) ที่ชั้น MAC เนื่องจากโหนดไม่สามารถถ่ายแพกเกตออกไปได้ทันกับอัตราการส่งข้อมูลเพราะความล่าช้าในกระบวนการ CSMA/CA ส่งผลให้เกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC [17] จำนวนแพกเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าค่าสูงสุดที่สามารถส่งได้ ภาพประกอบ 3-4 ที่อัตราการส่งข้อมูล 164.80 กิโลบิตเป็นต้นไปจะเป็นค่าคงที่ประมาณ 156 กิโลบิตต่อวินาทีซึ่งก็คืออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดที่สามารถทำได้ การส่งข้อมูลมากกว่า 156 กิโลบิตต่อวินาทีจะถูกละทิ้งและแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ดังภาพประกอบ 3-6 ซึ่งที่อัตราการส่งข้อมูล 117.71 และ 137.33 กิโลบิตต่อวินาที มีจำนวนการละทิ้งแพกเกตแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC เท่ากับ 0 เนื่องจากอัตราการส่งข้อมูลดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 156 กิโลบิตต่อวินาที ที่เป็นค่าสูงสุด



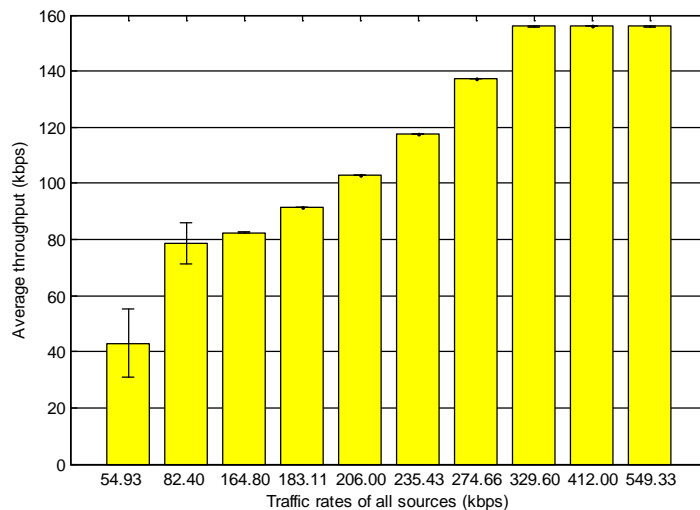
ภาพประกอบ 3-5 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC
กรณีหนึ่งโหนดต้นทาง

การจำลองย่อยที่สองคือกรณีมีโหนดต้นทาง 2 โหนด ภาพประกอบ 3-6 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง โดยที่อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 54.93 และ 82.40 บิตต่อวินาที ค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ซึ่งแตกต่างจากการจำลองย่อยที่หนึ่ง เนื่องจากในการจำลองนี้มีโหนดต้นทาง 2 โหนด โดยทั้งสองโหนดจะแย่งชิงช่องสัญญาณเพื่อใช้ส่งข้อมูลทำให้อัตราการรับต่อการส่งข้อมูลไม่คงที่ หากพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยจะลดลงต่ำกว่า 100 % ที่อัตราการส่งข้อมูล 164.80 กิโลบิตต่อวินาที เป็นต้นไปเช่นเดียวกับการจำลองย่อยที่หนึ่ง ภาพประกอบ 3-7 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง ซึ่งโพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถทำได้สูงสุดและคงที่ประมาณ 156 กิโลบิตต่อวินาที เช่นเดียวกันกับผลการจำลองย่อยที่หนึ่ง และหากพิจารณาปริมาณงานต่ออัตราการส่งข้อมูลที่ได้ทำให้ทราบว่าปริมาณงานนั้นลดลงเหลือเพียง 50 % เท่านั้น ไม่ได้เข้าสู่ค่าสูงสุดที่ 156 กิโลบิตต่อวินาทีแบบทันทีทันใดเช่นในการจำลองย่อยที่หนึ่งเนื่องจากแพคเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งไม่ได้แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC เพียงอย่างเดียวเหมือนการจำลองย่อยที่หนึ่ง เพราะในการจำลองนี้มีโหนดต้นทางมากกว่าหนึ่งโหนดทำให้เกิดการแข่งขันแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการส่งข้อมูล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ประสบความสำเร็จในการหาเส้นทางจนเกิดการละทิ้งแพคเกจแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE สาเหตุทำให้สมรรถนะต่ำลงอันเนื่องมาจากแพคเกจข้อมูลถูกละ

ทั้งด้วยสองสาเหตุซึ่งถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC และ NRTE โดยสามารถอธิบายรายละเอียดในส่วนถัดไป



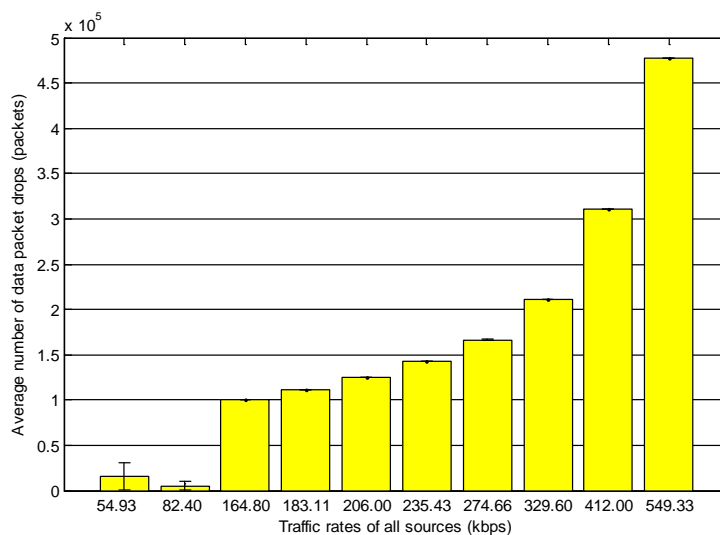
ภาพประกอบ 3-6 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางกรณีสองโหนดต้นทาง



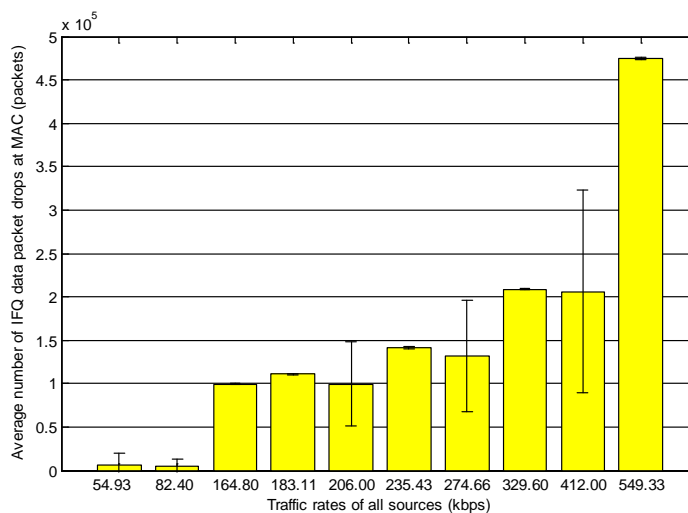
ภาพประกอบ 3-7 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทางต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง

ภาพประกอบ 3-8 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลที่เกิดขึ้นซึ่งส่วนใหญ่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC เนื่องจากความล่าช้าในกระบวนการเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA เช่นเดียวกับการจำลองย่อยที่หนึ่งแสดงในภาพประกอบ 3-9 สาเหตุที่ 2 เกิดจากความล้มเหลวในการจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE แสดงในภาพประกอบ 3-10 เนื่องจากในการ

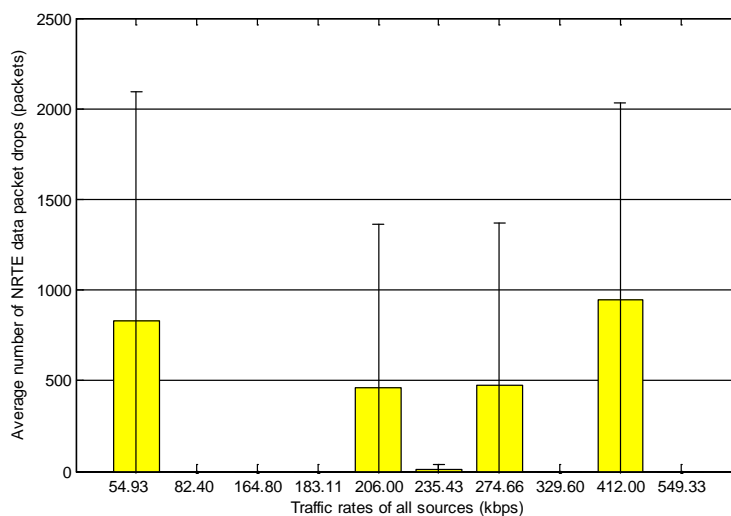
จำลองย่อยนี้มีโหนดต้นทาง 2 โหนด โดยทั้งสองโหนดจะต้องแย่งชิงช่องสัญญาณสำหรับจัดเส้นทางและส่งข้อมูล เมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของข้อมูลในช่องสัญญาณที่มีอยู่เพียงช่องเดียวสูงขึ้นจนไม่สามารถหาเส้นทางได้ส่งผลให้เกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE



ภาพประกอบ 3-8 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง

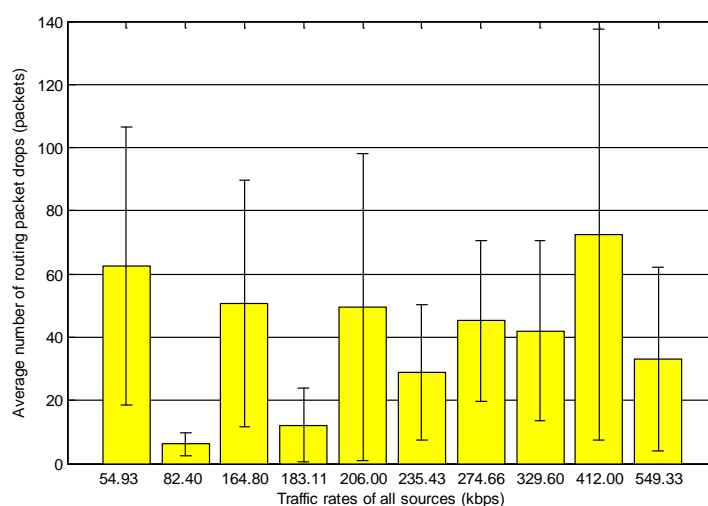


ภาพประกอบ 3-9 จำนวนแพคเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC โดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูลกรณีสองโหนดต้นทาง



ภาพประกอบ 3-10 จำนวนแพคเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRT โดยเฉลี่ยต่ออัตรา
การส่งข้อมูลกรณีสองโหนดคั่นทาง

ภาพประกอบ 3-11 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางที่เกิดขึ้นในการ
จำลองซึ่งไม่มีความแตกต่างกันชัดเจนที่ทุกอัตราการส่งข้อมูล เนื่องจากความต้องการในการจัด
เส้นทางตอนเริ่มต้นส่งข้อมูลมีเท่ากันเพราะกรณีนี้เป็นการจัดเส้นทางเพียงครั้งเดียว แต่จากภาพ
สามารถแสดงถึงเหตุผลเพื่อรองรับการวิเคราะห์ที่กล่าวมาเบื้องต้นที่ว่า เมื่อมีโหนดคั่นทาง 2 โหนด
ในระยะหนึ่งสอปมีโอกาสที่จะเกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลจากการที่โพรโทคอลไม่สามารถหา
เส้นทางได้ซึ่งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRT



ภาพประกอบ 3-11 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยต่ออัตราการส่งข้อมูล
กรณีสองโหนดคั่นทาง

3.2.4 สรุปผลการจำลอง

สรุปได้ว่าปริมาณงานของแพกเกตข้อมูลสูงสุดของโพรโทคอล AODV ต้นแบบ โดยมีช่องสัญญาณให้ใช้งานทั้งการจัดเส้นทางและส่งข้อมูลเพียงช่องสัญญาณเดียวนั้นอยู่ที่ประมาณ 156 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเป็นปริมาณงานโดยรวมจากทุกโหนดต้นทางนั้นหมายความว่าแม้จำนวนโหนดต้นทางจะเพิ่มขึ้นอัตราการส่งข้อมูลหรือปริมาณงานสูงสุดที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถทำได้ก็จะไม่เกิน 156 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที อันเนื่องมาจากปริมาณงานค่านี้คำนวณมาจากแพกเกตข้อมูลเท่านั้น ไม่รวมปริมาณงานจากแพกเกตจัดเส้นทางและความล่าช้าเกิดขึ้นที่ชั้น MAC จากกระบวนการ CSMA/CA จะต้องสุ่มรอเวลาตามเวลาถอยจะทำให้เกิดเหตุการณ์บัพเพอร์ลันจนแพกเกตข้อมูลถูกละทิ้งและแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ส่วนการจำลองย่อยที่สอง แสดงผลการจำลองที่บ่งบอกถึงโอกาสที่แพกเกตข้อมูลจะถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE เมื่อมีจำนวนโหนดต้นทางมากกว่าหนึ่งโหนดทำให้ไม่ประสบความสำเร็จในการจัดเส้นทางโดยเป็นผลกระทบจากการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นในช่วงกระบวนการจัดเส้นทาง

3.3 การศึกษาผลกระทบของเวลาเริ่มต้นในการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง

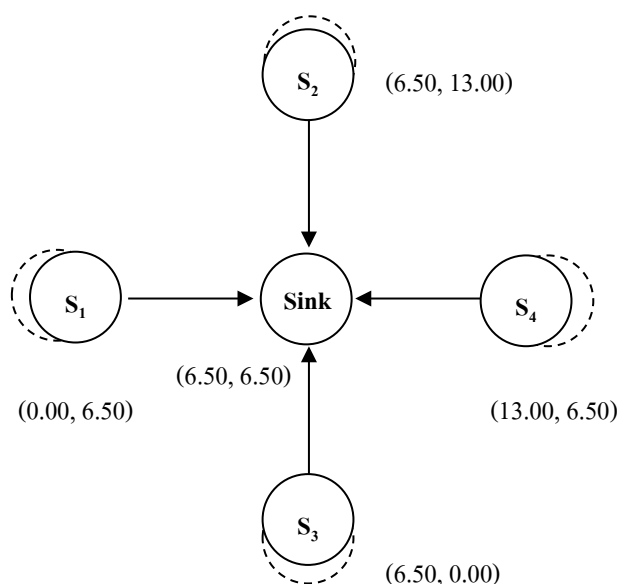
3.3.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

เพื่อทำการศึกษาว่าเวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางมีผลต่อสมรรถนะของโพรโทคอล AODV อย่างไร และมีผลกระทบต่อกระบวนการ CSMA/CA ที่เป็นส่วนสำคัญสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางและการส่งข้อมูลอย่างไร ผลการจำลองที่ได้ใช้เพื่อออกแบบการจำลองในบทที่ 5

3.3.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้ใช้เครื่องมือจำลอง NS2 และทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทางระหว่าง 1-12 โหนดโดยทำการเพิ่มระดับละหนึ่งโหนดต้นทาง การเพิ่มจำนวนโหนดมีเป้าหมายเพื่อต้องการเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลในช่องสัญญาณและค้นหาจำนวนโหนดต้นทางที่โพรโทคอลจัดเส้นทางสามารถรองรับได้กรณีมีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียว เนื่องจากระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะใช้การชกตัวอย่างเท่ากับช่วงเวลานั้นซึ่งเป็นระยะเวลาที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก 10 % จนถึง 90 % ของค่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้หาร 10 มีค่าเท่ากับ 12.19 วินาที หรือ ช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบ โดยเป็นช่วงการชกตัวอย่างไวที่สุดสำหรับศึกษาสมรรถนะของระบบควบคุมจากบทความ [22] ได้แนะนำไว้ และเหตุผลที่เลือกใช้นี้เนื่องจากที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบจะให้สมรรถนะการควบคุมดีที่สุด การจำลองนี้จึงใช้อัตราการส่งแพกเกตข้อมูลเท่ากับช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบต่อแพกเกต เพื่อให้สอดคล้องกับการจำลองในบทที่ 5 ซึ่งอัตราการ

ส่งข้อมูลค่านี้มีผลกระทบต่อพารามิเตอร์ในโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ที่ชื่อว่า ART (Active route time-out) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่จะกำหนดการคงอยู่ของเส้นทางหลังจากประสบความสำเร็จในการจัดเส้นทาง ค่าปริยายของพารามิเตอร์ ART มีค่าเท่ากับ 10 วินาทีตามค่าปริยายใน NS2 ซึ่งค่าของเวลานี้จะลดลงหลังจากแพกเกตข้อมูลถูกส่งออกไปโดยทุกๆครั้งที่เส้นทางถูกใช้งาน ART จะถูกปรับให้กลับมาเท่ากับ 10 วินาทีทุกครั้ง หากเส้นทางไม่ถูกใช้งานภายในระยะเวลาของ ART เส้นทางนั้นจะถูกลบทิ้งไป การใช้อัตราการส่งข้อมูลช่วงเวลาขึ้นส่วนสลิปต่อแพกเกต ทำให้โหนดต้นทางต้องจัดเส้นทางใหม่ทุกครั้งเมื่อต้องการจะส่งแพกเกตข้อมูล การวางโหนดแสดงดังภาพประกอบ 3-12 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางโหนดต้นทาง 4 โหนดแรก โดยโหนดต้นทาง S_1 อยู่ที่ตำแหน่ง (0.00, 6.50) S_2 อยู่ที่ตำแหน่ง (6.50, 13.00) S_3 อยู่ที่ตำแหน่ง (6.50, 0.00) และ S_4 อยู่ที่ตำแหน่ง (13.00, 6.50) หลังจากนั้นโหนดที่ 5-12 จะวาง ณ ตำแหน่งเดียวกับโหนดต้นทาง S_1 S_2 S_3 และ S_4 ตามลำดับ เนื่องจากไม่มีตำแหน่งที่จะวางโหนดเหล่านี้แล้วไม่เกิดการซ้อนทับของระยะการส่งข้อมูลนอกจาก 4 ตำแหน่งที่ได้แสดงไว้ การจำลองนี้สามารถคำนวณอัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโหนดต้นทางเช่นเดียวกับการจำลอง 3.2 ในสมการ (3-1) การส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนสลิปต่อแพกเกตจะมีค่าเท่ากับอัตราการส่งข้อมูล 67.60 บิตต่อวินาทีต่อ 1 โหนดต้นทาง เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นอัตราการส่งข้อมูลโดยรวมก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดต้นทาง การจำลองนี้ทำการเปลี่ยนแปลงโหนดต้นทาง 9 ระดับ โดยเพิ่มขึ้นครั้งละหนึ่งโหนดต้นทางในระดับ 1-6 หลังจากนั้นทำการเพิ่มระดับละสองโหนดต้นทาง



ภาพประกอบ 3-12 ตำแหน่งการวางโหนดต้นทางและโหนดปลายทางในการจำลอง 3.3

การจำลองในหัวข้อนี้แบ่งเป็นสองการจำลองย่อย กรณีแรกกำหนดให้โหนดต้นทางเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกันและกรณีที่สองให้โหนดต้นทางเริ่มต้นส่งข้อมูลด้วยเวลาสุ่มเพื่อทำการศึกษาว่าเวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูลส่งผลกระทบต่อสมรรถนะหรือกระบวนการของระบบหรือไม่ พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 3.2 ของทั้งสองการจำลองย่อยแสดงดังตาราง 3-2 ทั้งนี้ได้กำหนดให้โพรโทคอล AODV ต้นแบบส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอปเท่านั้นเช่นเดียวกับการจำลอง 3.2 และพิจารณาตัวชี้วัดเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.2.2

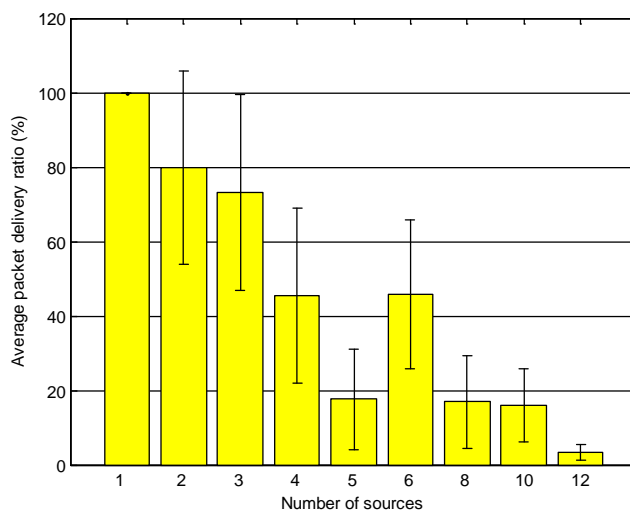
ตาราง 3-2 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.3

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1 – 12 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	1 โหนด
การส่งแพกเกตข้อมูล	12.19 วินาทีต่อแพกเกต
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของทุกโหนดต้นทาง กรณีการจำลองย่อยที่หนึ่ง	0.1 วินาที
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของทุกโหนดต้นทาง กรณีการจำลองย่อยที่สอง	สุ่มในช่วง 0 ถึง 12.19 วินาที ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม
ช่วงการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดต้นทางที่ 1-12 โหนด	67.60 135.20 202.80 270.40 338.00 405.60 473.20 540.80 608.40 676.00 743.60 และ 811.20 บิตต่อวินาที

3.3.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

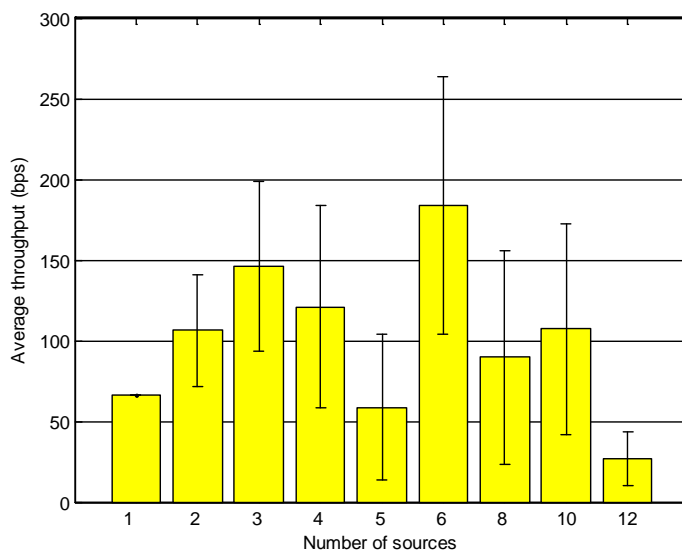
3.3.3.1 กรณีโหนดต้นทางเริ่มส่งแพกเกตข้อมูลที่เวลาเดียวกัน

โหนดต้นทางเริ่มต้นส่งแพกเกตข้อมูลที่ 0.1 วินาทีพร้อมกันทุกโหนด ภาพประกอบ 3-13 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางหากพิจารณาค่าเฉลี่ยจะลดต่ำกว่า 100 % เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 1 โหนดและลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น



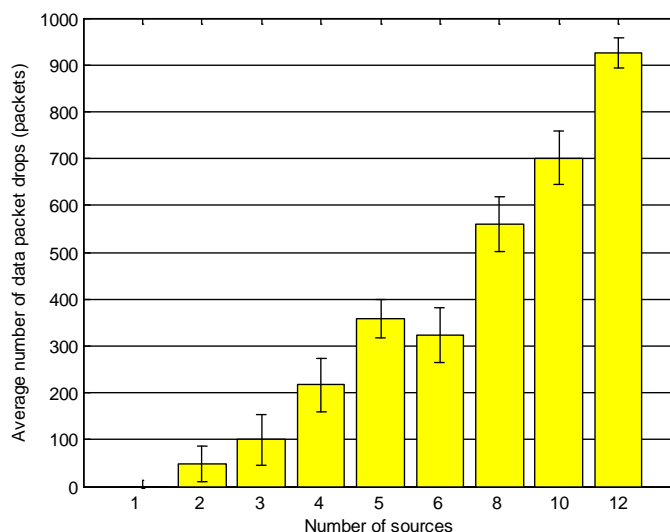
ภาพประกอบ 3-13 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง
กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน

ภาพประกอบ 3-14 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง ปริมาณงานจากแพกเกตข้อมูลจะเริ่มคงที่ประมาณ 100 บิตต่อวินาที ที่จำนวนโหนดต้นทาง 3 โหนดเป็นต้นไปเนื่องจากความสามารถในการหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV ต้นแบบในการจำลองบนสถานการณ์นี้สามารถให้สมรรถนะสูงสุดที่ค่านี้และลดลงต่ำสุดเมื่อมี 12 โหนดต้นทาง โดยปริมาณงานจากแพกเกตข้อมูลที่ทุกโหนดต้นทางทำได้จะลดลงเหลือประมาณ 25 บิตต่อวินาที เท่านั้นซึ่งเป็นผลกระทบจากกระบวนการจัดเส้นทางไม่สามารถหาเส้นทางมารับการส่งข้อมูลได้ การใช้อัตราการส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนสืบต่อแพกเกต จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV เนื่องจากกรณีนี้จะต้องจัดทำกระบวนการจัดเส้นทางทุกครั้งที่โหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลส่งผลให้เกิดการแพร่แพกเกตร้องขอเส้นทาง RREQ เป็นจำนวนมาก เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มจำนวนแพกเกตร้องขอเส้นทางในทางอ้อม เนื่องจากกระบวนการส่งแพกเกตร้องขอเส้นทางจะทำการส่งต่อไปตามจำนวนโหนดที่แพกเกตนี้สามารถส่งไปถึงได้ จึงเกิดการแข่งชิงช่องสัญญาณอย่างมหาศาลในช่วงกระบวนการจัดเส้นทางเป็นสาเหตุให้การจัดเส้นทางเกิดความล้มเหลว

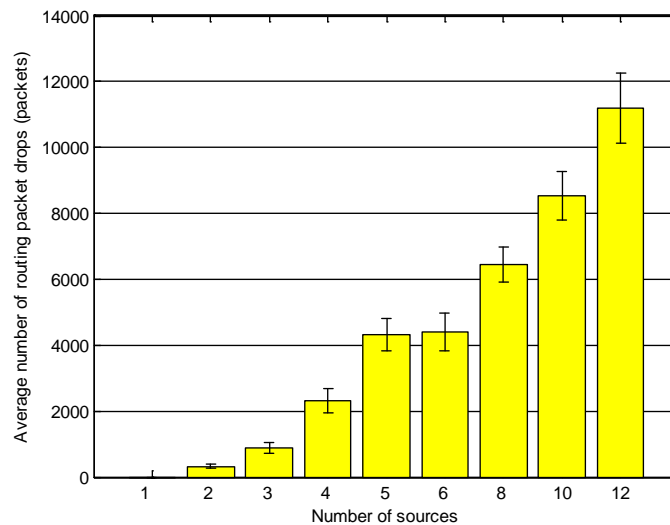


ภาพประกอบ 3-14 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง
กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน

ภาพประกอบ 3-15 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยประมาณ 90 จนถึง 920 แพคเกจในช่วง 2 ถึง 12 โหนดต้นทาง และภาพประกอบ 3-16 แสดงการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยประมาณ 200 ถึง 11000 แพคเกจในช่วง 2 ถึง 12 โหนดต้นทาง ซึ่งจำนวนการละทิ้งแพคเกจโดยเฉลี่ยทั้งสองประเภทเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นจากสาเหตุที่ได้อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า

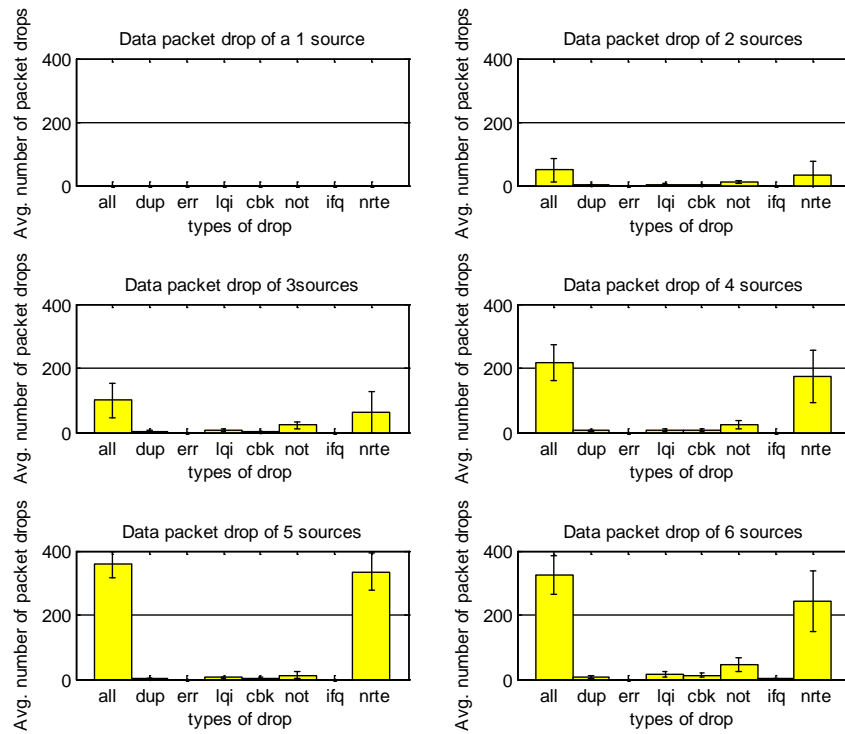


ภาพประกอบ 3-15 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน

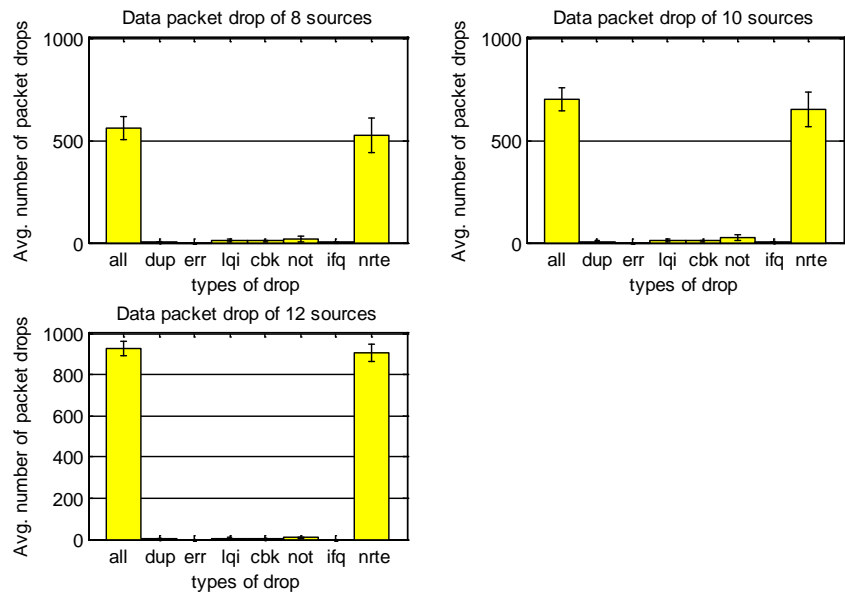


ภาพประกอบ 3-16 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทาง โดยเฉลี่ย
กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน

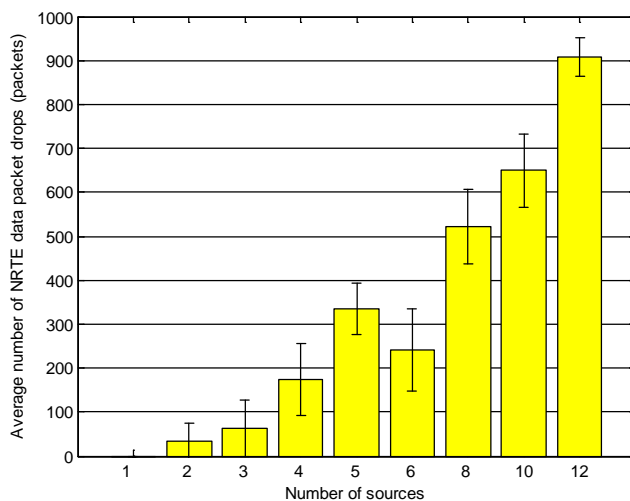
ภาพประกอบ 3-17 และภาพประกอบ 3-18 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยแยกประเภท กราฟแท่งซ้ายสุดในแต่ละภาพย่อยแสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยรวมทั้งหมด ส่วนกราฟแท่งถัดไปทางขวาคือการจำแนกการละทิ้งแพคเกจแสดงด้วยตัวบ่งชี้แต่ละประเภท หากคำนวณผลรวมทั้งหมดก็จะเท่ากับกราฟแท่งทางซ้ายสุด จากภาพจะเริ่มมีการละทิ้งแพคเกจข้อมูลเมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 1 โหนด สาเหตุหลักของการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE จำนวนประมาณ 50 ถึง 900 แพคเกจในช่วง 2 ถึง 12 โหนดต้นทางในภาพประกอบ 3-19 ซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของกระบวนการจัดเส้นทาง การละทิ้งแพคเกจรองลงมาในภาพประกอบ 3-17 และภาพประกอบ 3-18 ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT LQI CBK IFQ ที่ขึ้น MAC และ DUP ภาพประกอบ 3-20 และภาพประกอบ 3-21 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางแยกประเภท โดยส่วนใหญ่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR การละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางรองลงมาถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ขึ้น MAC NOT และ LQI ตามลำดับ ซึ่งได้อธิบายสาเหตุและลักษณะการละทิ้งแพคเกจที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยเป็นผลกระทบจากจำนวนโหนดต้นทางที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความหนาแน่นของข้อมูลในช่องสัญญาณและการแย่งชิงช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น [19, 20] ทำให้เกิดการละทิ้งแพคเกจดังที่ได้กล่าวมา



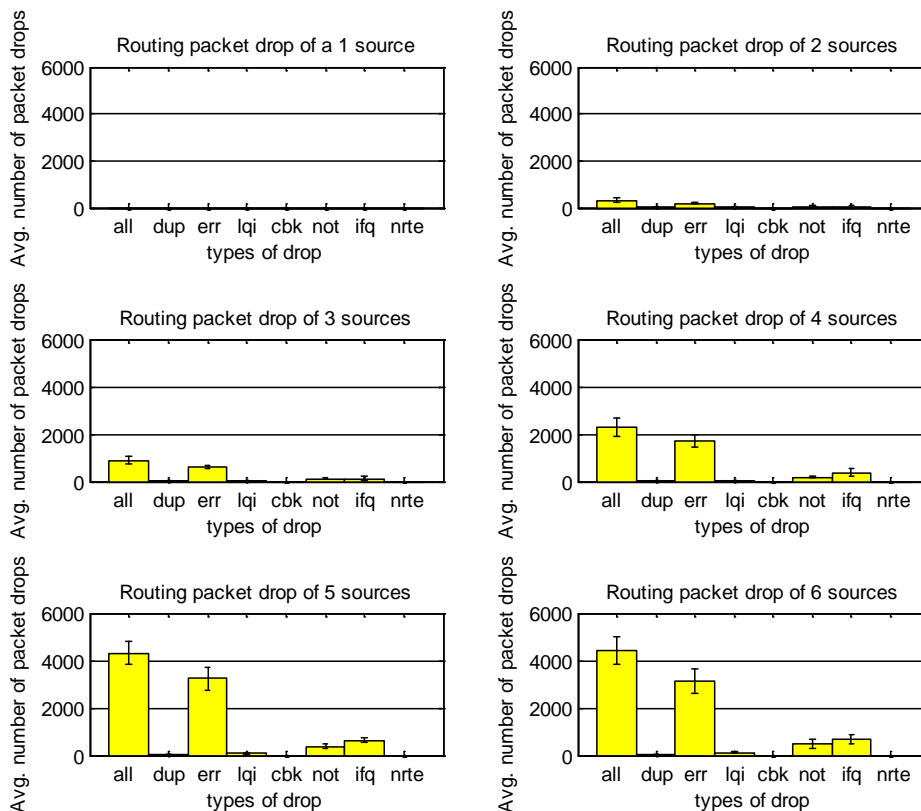
ภาพประกอบ 3-17 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 1 ถึง 6 โหนดต้นทาง
กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน



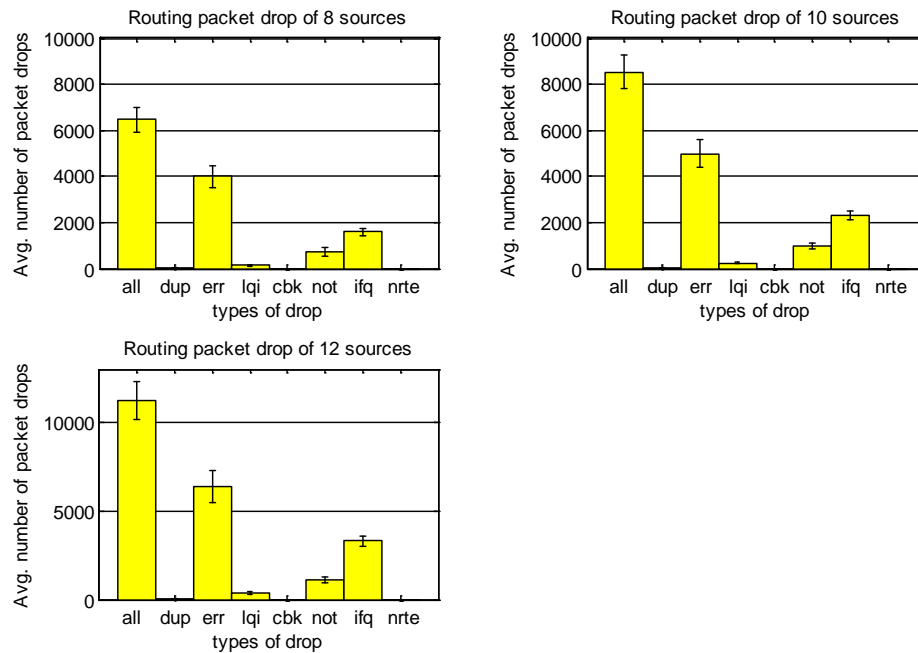
ภาพประกอบ 3-18 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 8 10 และ 12 โหนด
ต้นทางกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน



ภาพประกอบ 3-19 การละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE
กรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน

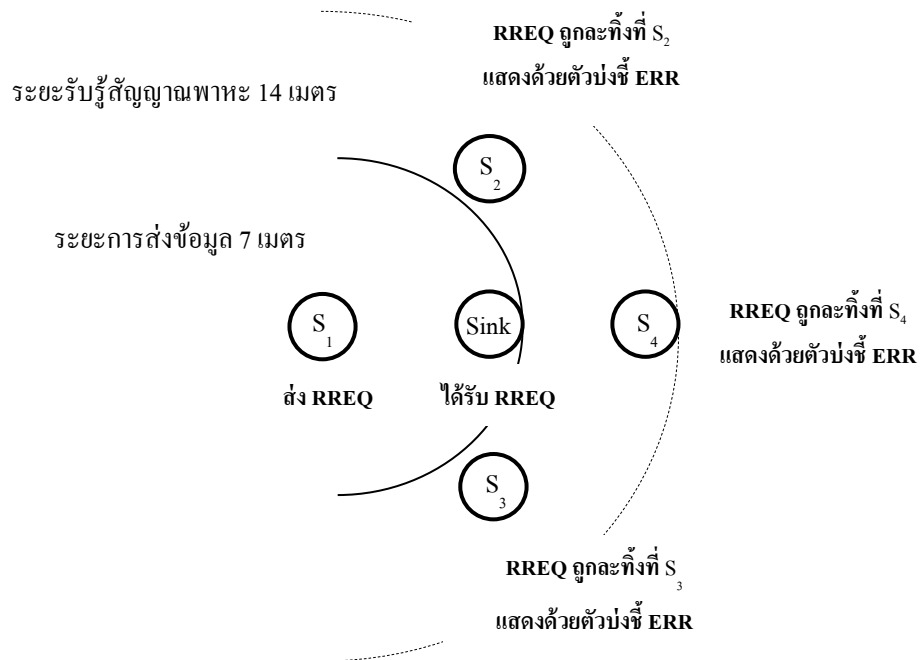


ภาพประกอบ 3-20 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่จำนวน โหนด
ต้นทาง 1 ถึง 6 โหนดกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน



ภาพประกอบ 3-21 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่จำนวน โหนด
ต้นทาง 8 10 และ 12 โหนดกรณีเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลพร้อมกัน

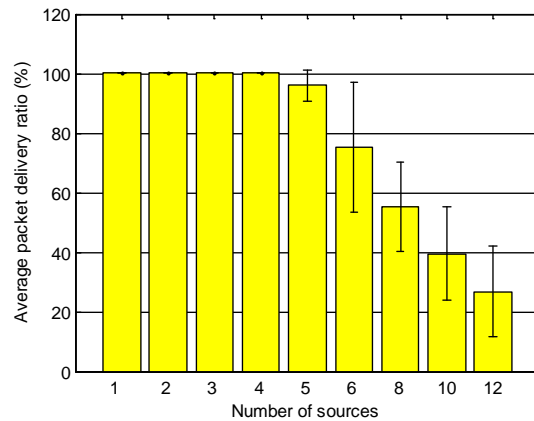
การละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางที่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR สามารถอธิบายด้วยภาพประกอบ 3-22 ยกตัวอย่างกรณีมี 4 โหนดต้นทาง S_1, S_2, S_3 และ S_4 จากตำแหน่งการวางโหนด 4 โหนดแรกในภาพประกอบ 3-12 โดยโหนดต้นทาง S_1 ทำการแพร่ (Broadcast) แพคเกจร้องขอเส้นทาง RREQ เพื่อหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง (Sink node) ซึ่งระยะการส่งข้อมูลของโหนด S_1 ครอบคลุมเพียงโหนดปลายทางเท่านั้น แต่ระยะรับรู้สัญญาณพาหะจะครอบคลุมโหนดต้นทาง S_2, S_3 และ S_4 ส่งผลให้โหนดต้นทาง S_2, S_3 และ S_4 รับรู้ถึงแพคเกจ RREQ ที่โหนดต้นทาง S_1 ทำการแพร่ออกมา ซึ่งแพคเกจ RREQ ที่โหนด S_2, S_3 และ S_4 รับรู้ได้จะถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR เนื่องจากกำลังรับต่ำเกินไปจนไม่สามารถแยกสัญญาณข้อมูลออกมาได้ และมีเพียงโหนดปลายทางเท่านั้นที่สามารถรับ RREQ แพคเกจได้ โดยการละทิ้งแพคเกจแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR จะไม่เกิดขึ้นในกรณีระยะการส่งข้อมูลครอบคลุมทุกโหนดแสดงรายละเอียดในการจำลอง 3.4



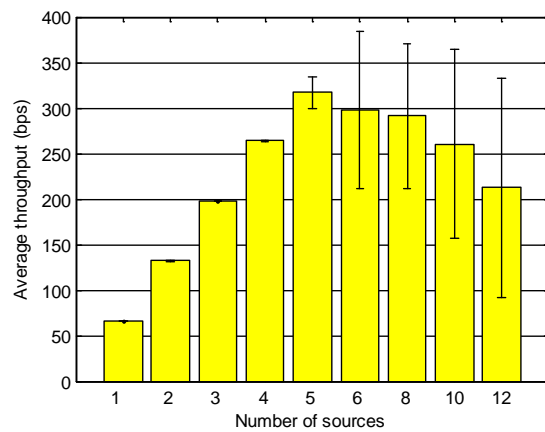
ภาพประกอบ 3-22 ลักษณะการละทิ้งแพคเกจที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR

3.3.3.2 กรณีโหนดต้นทางเริ่มต้นส่งข้อมูลที่เวลาสุ่ม

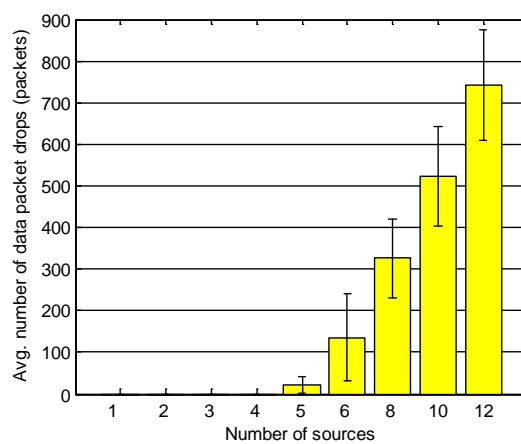
การจำลองย่อยที่ 2 กำหนดให้แต่ละโหนดต้นทางสุ่มเวลาเริ่มส่งข้อมูลในช่วงระหว่าง 0-12.19 วินาที เหตุผลที่ให้ทำการสุ่มในช่วงเวลานี้เท่านั้น เพื่อให้ทุกๆ โหนดทำการส่งข้อมูลในช่วงการวนลูบหรือรอบการส่งข้อมูลเดียวกัน ภาพประกอบ 3-23 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางซึ่งค่าเฉลี่ยลดลงต่ำกว่า 100 % เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 4 โหนดและลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น ในขณะที่ภาพประกอบ 3-24 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทางสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 315 บิตต่อวินาทีและลดลงเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองของภาพประกอบ 3-23 และภาพประกอบ 3-24 กับภาพประกอบ 3-13 และภาพประกอบ 3-14 ทำให้ทราบว่า การจำลองที่กำหนดให้ทุกโหนดต้นทางสุ่มเวลาเริ่มส่งข้อมูลนั้นให้สมรรถนะสูงกว่าทั้งอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลและปริมาณงานโดยเฉลี่ย เนื่องจากผลการจำลองกรณีโหนดต้นทางเริ่มส่งแพคเกจข้อมูลในเวลาเดียวกันมีจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลสูงกว่า ซึ่งมีจำนวนการละทิ้งประมาณ 90 จนถึง 920 แพคเกจ ในช่วง 2 ถึง 12 โหนดต้นทาง ส่วนกรณีโหนดต้นทางเริ่มส่งข้อมูลที่เวลาสุ่มมีจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 25 จนถึง 730 แพคเกจ ในช่วง 5 ถึง 12 โหนดต้นทาง จากการเปรียบเทียบภาพประกอบ 3-15 กับภาพประกอบ 3-25



ภาพประกอบ 3-23 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง
กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล

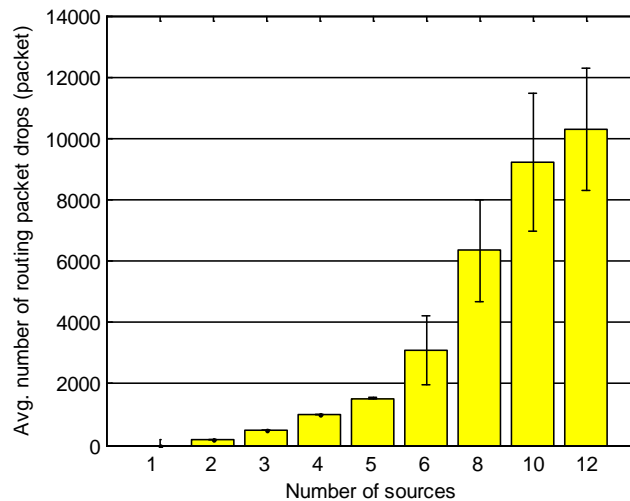


ภาพประกอบ 3-24 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง
กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล



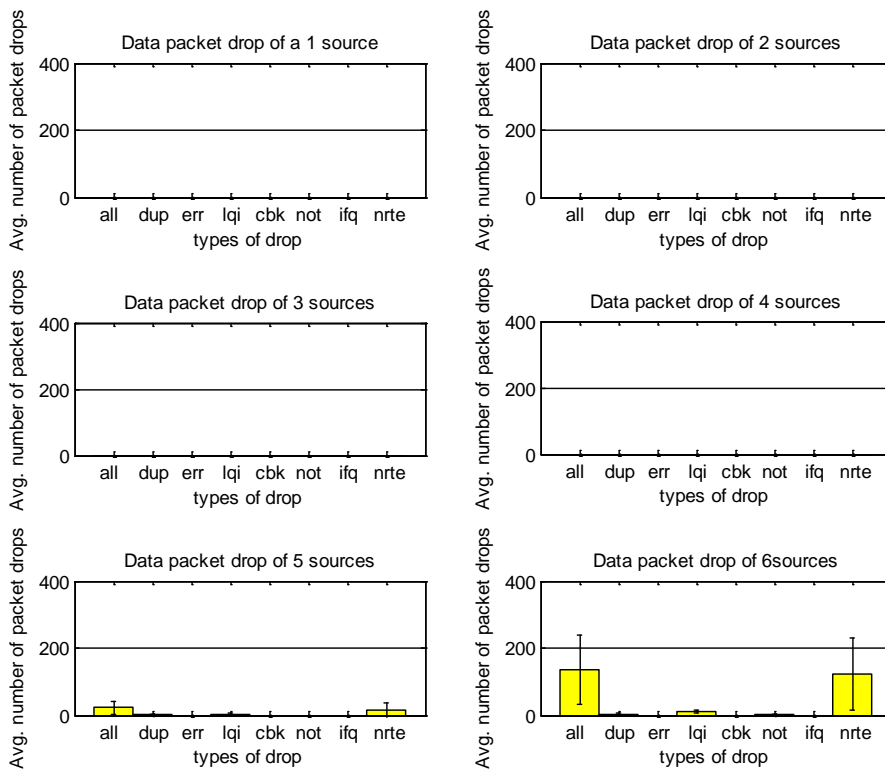
ภาพประกอบ 3-25 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล

ภาพประกอบ 3-26 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยซึ่งไม่มี ความแตกต่างอย่างชัดเจนในทางสถิติเมื่อทำการเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 3-16

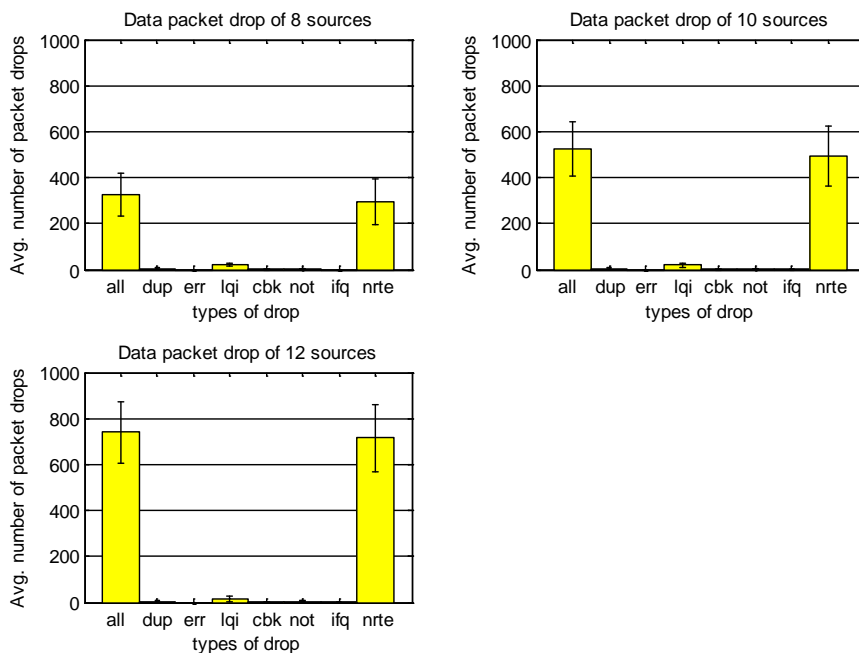


ภาพประกอบ 3-26 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทาง โดยเฉลี่ยกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล

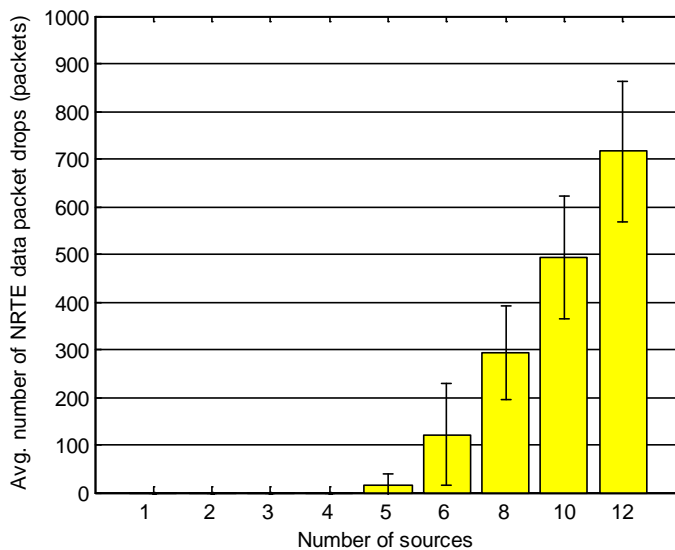
ภาพประกอบ 3-27 และภาพประกอบ 3-28 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยแยกประเภท โดยส่วนใหญ่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ซึ่งมีจำนวนการละทิ้ง 20 ถึง 700 แพคเกจจากค่าเฉลี่ยโดยประมาณ ในช่วง 5 ถึง 12 โหนดต้นทางดังภาพประกอบ 3-29 ขณะที่ภาพประกอบ 3-30 และภาพประกอบ 3-31 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทซึ่งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR สูงที่สุด การละทิ้งแพคเกจข้อมูลและแพคเกจจัดเส้นทางในการจำลองนี้ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้เช่นเดียวกันกับการจำลอง 3.3.3.1



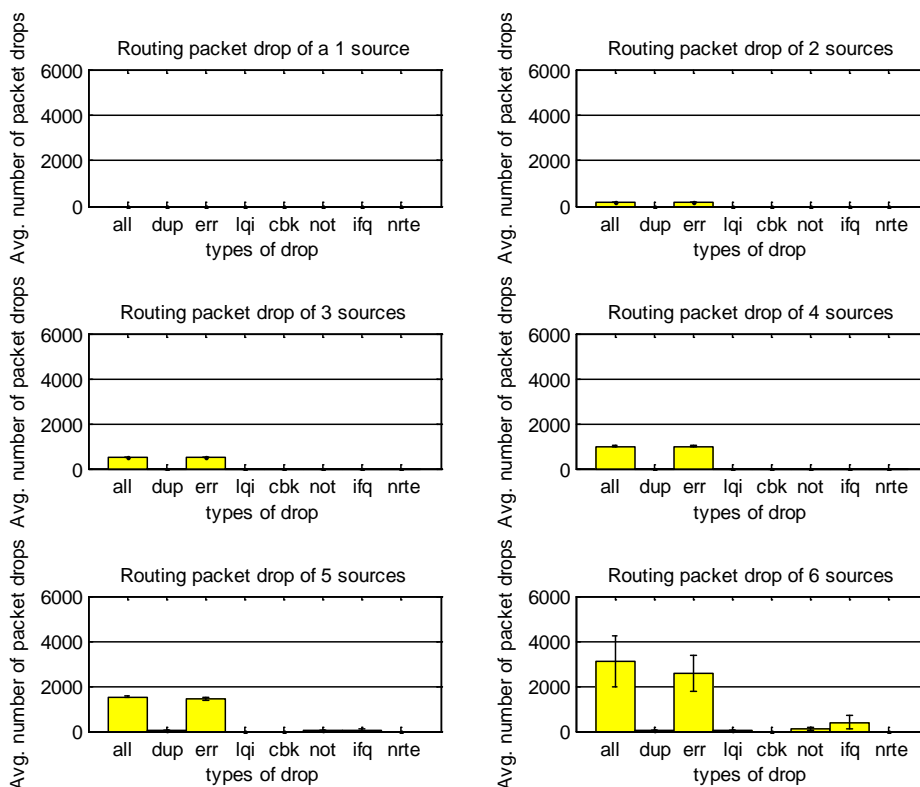
ภาพประกอบ 3-27 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 1 ถึง 6 โหนดต้นทาง
กรณีช่วงเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล



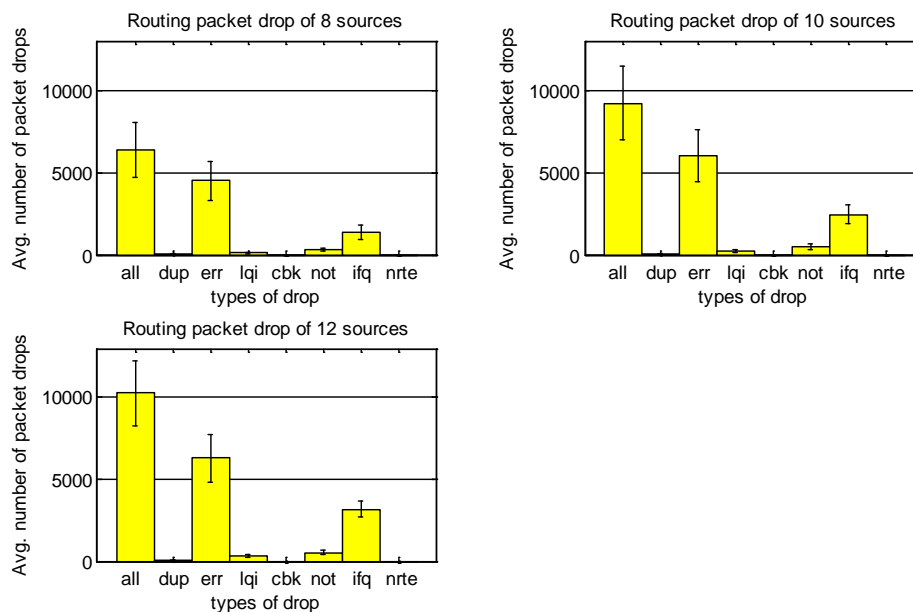
ภาพประกอบ 3-28 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 8 10 และ 12 โหนด
ต้นทางกรณีช่วงเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล



ภาพประกอบ 3-29 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ N RTE โดยเฉลี่ย
กรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล



ภาพประกอบ 3-30 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 1 ถึง 6 โหนด
ต้นทางกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล



ภาพประกอบ 3-31 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่ 8 10 และ 12 โหนดต้นทางกรณีสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูล

3.3.4 สรุปผลการจำลอง

ผลจากการจำลอง 3.3.3.2 กรณีทุกโหนดต้นทางสุ่มเวลาเริ่มส่งข้อมูลให้อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล โดยเฉลี่ยลดลงต่ำกว่า 100 % เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 4 โหนด และปริมาณงานสูงสุดโดยเฉลี่ยประมาณ 315 บิตต่อวินาที ซึ่งให้สมรรถนะสูงกว่ากรณีโหนดต้นทางส่งข้อมูลพร้อมกันทุกโหนดจากผลการจำลอง 3.3.3.1 ให้อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางลดต่ำกว่า 100 % เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 1 โหนดและปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ประมาณ 100 บิตต่อวินาที ทั้งนี้ผลจากการจำลอง 3.3.3.2 ยังให้ปริมาณการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยต่ำกว่าผลการจำลอง 3.3.3.1 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของโหนดต้นทางมีผลต่อสมรรถนะของระบบซึ่งเป็นผลจากการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณในกระบวนการ CSMA/CA [19, 20] และความหนาแน่นของข้อมูลที่สูงขึ้นในกระบวนการจัดเส้นทางเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น โดยผลการจำลอง 3.3.3.1 เกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE สูงกว่าผลการจำลอง 3.3.3.2 จากการเปรียบเทียบภาพประกอบ 3-19 และภาพประกอบ 3-29 ผลการจำลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่าการกำหนดเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ ดังนั้นการจำลองในบทที่ 5 จะกำหนดให้โหนดต้นทางเริ่มต้นส่งข้อมูลด้วยเวลาสุ่มเนื่องจากให้สมรรถนะที่ดีกว่า

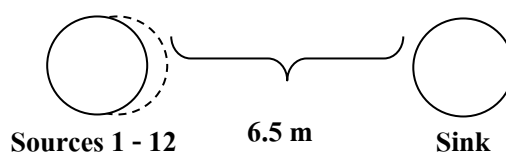
3.4 การศึกษาผลกระทบเมื่อโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

3.4.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

เพื่อศึกษากรณีทุกโหนดต้นทางอยู่ในระยะส่งข้อมูลเดียวกันจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอล AODV อย่างไร เมื่อเป็นการส่งข้อมูลในสถานการณ์ที่ต้องจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งแพคเกจข้อมูล พร้อมทั้งพิจารณาผลการจำลองเมื่อทุกโหนดอยู่ในระยะการส่งข้อมูลจะเกิดการละทิ้งแพคเกจจากสาเหตุที่โหนดต้นทางส่งแพคเกจไม่ถึงปลายทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR หรือไม่

3.4.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้กำหนดให้โหนดต้นทางวางอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันทุกโหนดเพื่อให้อยู่ในระยะการส่งข้อมูลและระยะการตรวจจับสัญญาณพาหะของทุกโหนด พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาโหนดซ่อน (Hidden node problem) โดยมีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียวอยู่ในระนาบเดียวกันห่างจากโหนดต้นทาง 6.5 เมตรดังภาพประกอบ 3-32 การจำลองนี้เปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทาง 12 ระดับซึ่งทำการเพิ่มหนึ่งโหนดต้นทางที่แต่ละระดับและกำหนดให้โพรโทคอล AODV ต้นแบบส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอปเท่านั้นเช่นกัน พิจารณาตัวชี้วัดและมีอัตราการส่งข้อมูลเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.2 พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 3.2 แสดงดังตาราง 3-3



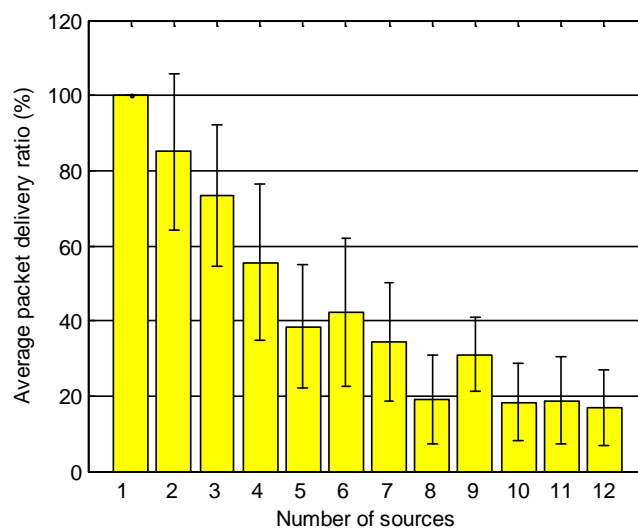
ภาพประกอบ 3-32 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 3.4

ตาราง 3-3 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.4

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-12 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	1 โหนด
การส่งแพคเกจข้อมูล	12.19 วินาทีต่อแพคเกจ
ระยะการสื่อสารหนึ่งฮอปที่ใช้ทดสอบ	6.5 เมตร
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง	สุ่มในช่วง 0 ถึง 12.19 วินาทีด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม

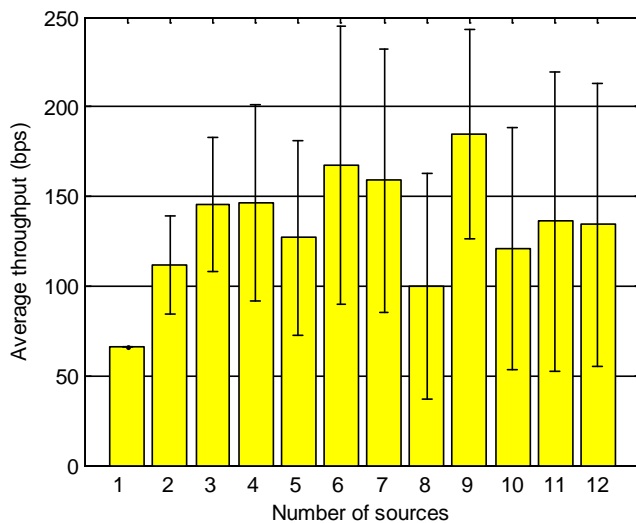
3.4.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

ภาพประกอบ 3-33 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง การจำลองนี้ ทุกโหนดต้นทางจะอยู่ในสถานะที่ต้องแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณ ยิ่งจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณย่อมมีมากตามไปด้วยส่งผลให้สมรรถนะที่ได้ต่ำลงชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบภาพประกอบ 3-33 กับภาพประกอบ 3-23 ในหัวข้อ 3.3.3.2 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยลดลงอย่างชัดเจน



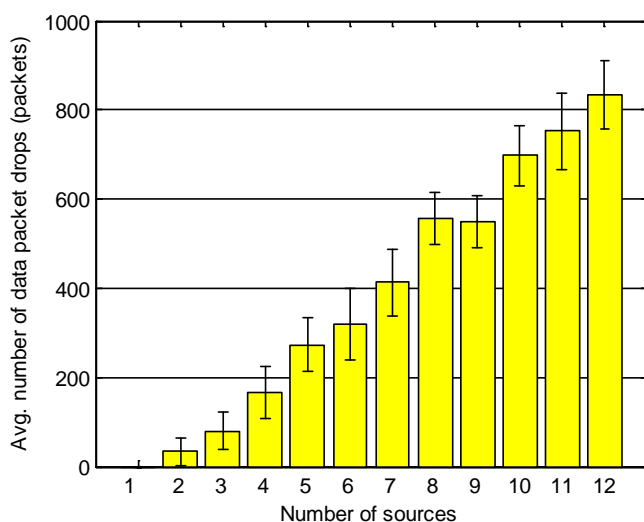
ภาพประกอบ 3-33 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางกรณีที่มีโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

เช่นเดียวกับภาพประกอบ 3-34 ที่แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางลดลงเช่นกันเมื่อทำการเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 3-24 เนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลในกระบวนการจัดเส้นทางและการแย่งชิงช่องสัญญาณที่สูงขึ้นเพราะตำแหน่งการวางโหนดต้นทางเปลี่ยนไป อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยจากทุกโหนดต้นทางค่อนข้างคงที่ประมาณ 150 บิตต่อวินาที ที่ 3 โหนดต้นทางเป็นต้นไป แม้จะเป็นการสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลที่ทุกโหนดต้นทางก็ตาม

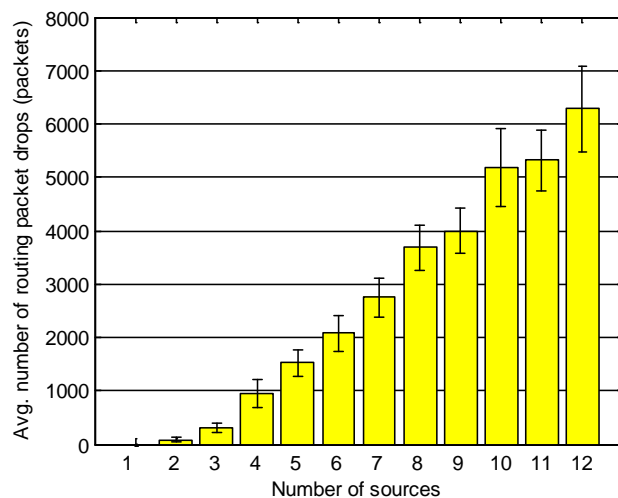


ภาพประกอบ 3-34 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยที่โหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทางกรณีทีโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

ภาพประกอบ 3-35 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยประมาณ 35-830 แพคเกจในช่วง 2 ถึง 12 โหนดต้นทาง และภาพประกอบ 3-36 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทาง โดยเฉลี่ยประมาณ 100 ถึง 6200 แพคเกจในช่วง 2 ถึง 12 โหนดต้นทาง ซึ่งการละทิ้งแพคเกจทั้งสองประเภทจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น

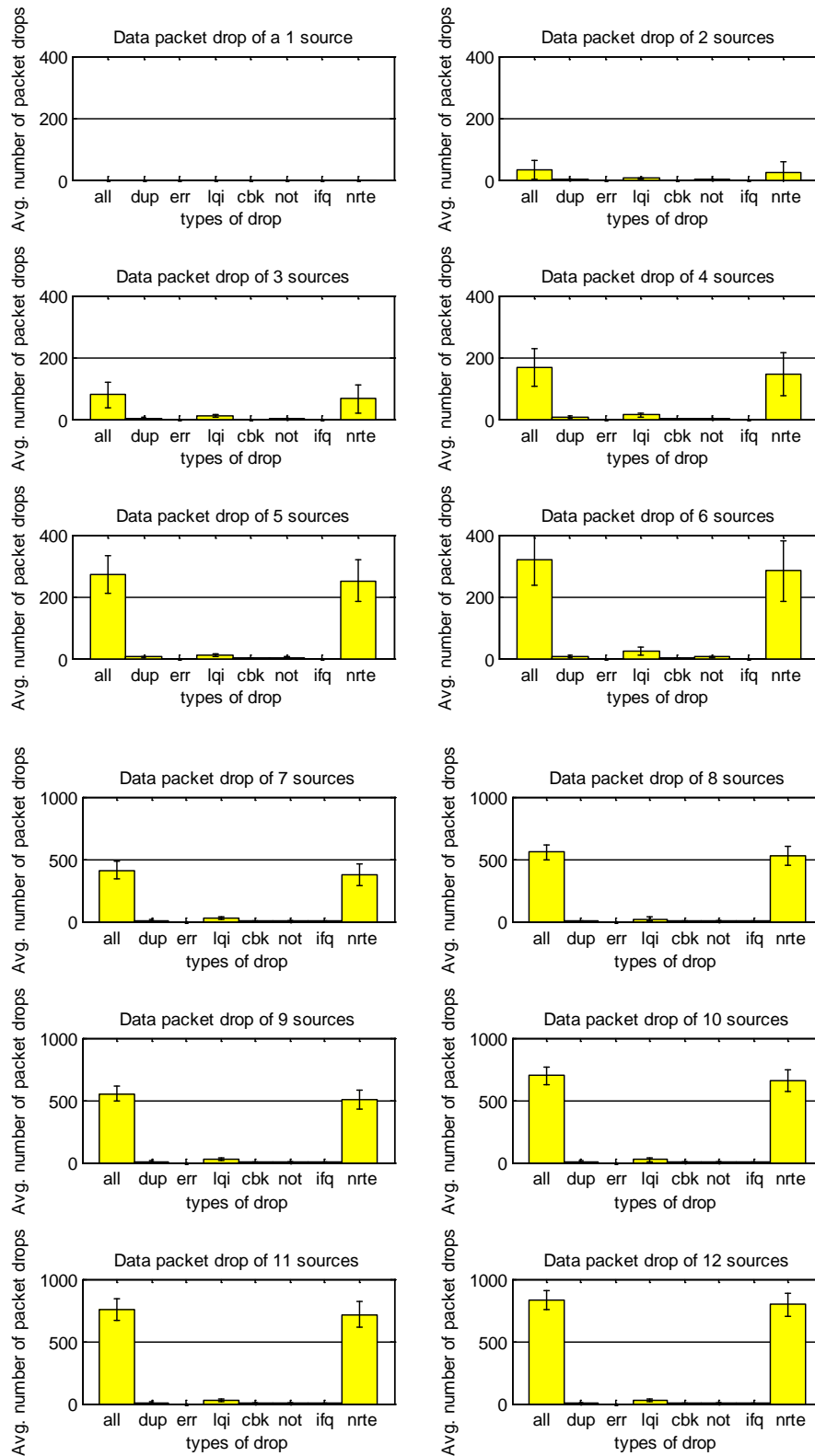


ภาพประกอบ 3-35 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยกรณีทีโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

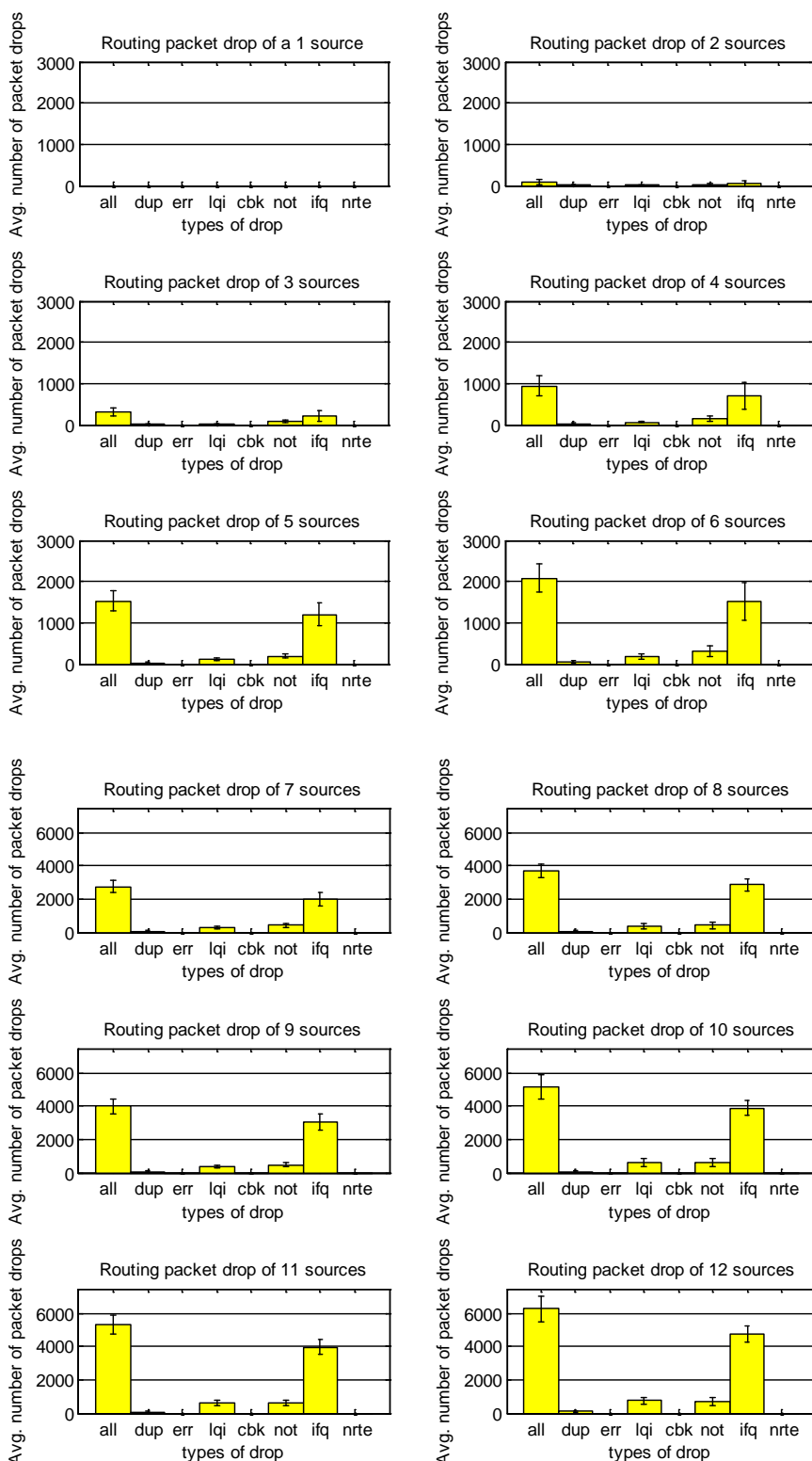


ภาพประกอบ 3-36 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยกรณีทีโหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

ภาพประกอบ 3-37 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยแยกประเภทซึ่งส่วนใหญ่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ที่เกิดขึ้นจากการจัดเส้นทางไม่สำเร็จเพราะการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณในกระบวนการจัดเส้นทางที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดต้นทาง โดยปริมาณการละทิ้งเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในการจำลองนี้หากพิจารณาภาพประกอบ 3-38 ซึ่งแสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภท สังเกตได้ว่าไม่มีการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR เกิดขึ้นเพราะทุกโหนดอยู่ในระยะการส่งข้อมูลที่ครอบคลุมถึงกันทั้งหมดทำให้การละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางที่จะเกิดจากการส่งไม่ถึงไม่เกิดขึ้นอีกต่อไป



ภาพประกอบ 3-37 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่โหนดต้นทาง 1 ถึง 12 โหนดกรณีที่โหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน



ภาพประกอบ 3-38 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยแยกประเภทที่โหนดต้นทาง 1 ถึง 12 โหนดกรณีที่โหนดต้นทางทุกโหนดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

3.4.4 สรุปผลการจำลอง

ผลการจำลองทำให้ทราบว่ากรณีทุกโหนดค้นทางอยู่ในระหว่างการส่งข้อมูลของโหนดค้นทางอื่นจะทำให้สมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต่ำลงซึ่งให้อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล โดยเฉลี่ยลดต่ำกว่า 100 % เมื่อจำนวนโหนดค้นทางมากกว่า 1 โหนดและให้ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ประมาณ 150 บิตต่อวินาทีซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง 3.3.3.1 แม้จะกำหนดให้โหนดค้นทางช่วงเวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูลแล้วก็ตาม การจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าการละทิ้งแพกเกตจัดเส้นทางที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ ERR ไม่เกิดขึ้น การละทิ้งแพกเกตข้อมูลส่วนใหญ่ยังคงเกิดขึ้น โดยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ที่มีสาเหตุจากความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางซึ่งสมรรถนะของระบบจะต่ำลงเมื่อจำนวนโหนดค้นทางเพิ่มขึ้น

3.5 การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ Active route time-out

3.5.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

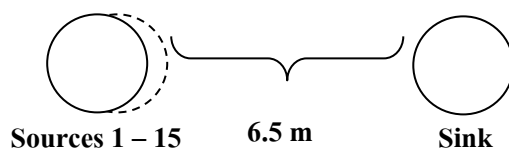
ศึกษาและทำความเข้าใจผลกระทบจากพารามิเตอร์ ART (Active route time-out) ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาการคงอยู่ของเส้นทางที่จัดขึ้นภายใต้โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต่อสมรรถนะของระบบ

3.5.2 การออกแบบการจำลอง

ปกติแล้วเส้นทางที่ถูกจัดขึ้นหลังจากกระบวนการจัดเส้นทางสำเร็จจะมีเวลานับถอยหลังที่เส้นทางนี้จะถูกลบทิ้งด้วยเวลาในพารามิเตอร์ ART ซึ่งมีค่าโดยปริยายเท่ากับ 10 วินาที หากเส้นทางถูกเรียกใช้งาน เวลานับถอยหลังจะกลับไปเท่ากับ 10 วินาทีทุกครั้ง และหากเส้นทางไม่ถูกใช้งานภายในระยะเวลา 10 วินาทีจะถือว่าเป็นเส้นทางที่ไม่มีความจำเป็นมันจะถูกลบทิ้งไป โดยเป็นกระบวนการช่วยลดพลังงานและหน่วยความจำได้ดี แต่เมื่อความต้องการในการส่งแพกเกตข้อมูลในงานวิจัยนี้ขึ้นอยู่กับระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารซึ่งส่งด้วยความเร็ว 12.19 วินาทีหรือช่วงเวลาขึ้นส่วนสลิปต่อแพกเกตจะมีผลกระทบโดยตรงกับพารามิเตอร์ ART ที่จะทำให้สมรรถนะของระบบเปลี่ยนไป

ผลการจำลอง 3.4 แสดงปริมาณงานสูงสุดที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถทำได้กรณีให้อัตราการส่งแพกเกตข้อมูลด้วยความเร็ว 12.19 วินาทีต่อแพกเกตอยู่ที่ประมาณ 150 บิตต่อวินาที ซึ่งสาเหตุที่สมรรถนะต่ำลงเพราะต้องทำกระบวนการจัดเส้นทางใหม่ทุกครั้งต่อการส่งแพกเกตข้อมูลทำให้ความแออัดของแพกเกตจัดเส้นทางในเครือข่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนโหนดค้นทางเพิ่มขึ้นปริมาณของแพกเกตจัดเส้นทางและการแย่งชิงช่องสัญญาณในเครือข่ายก็ยิ่งทวีคูณทำให้สมรรถนะของระบบต่ำลงจากเหตุการณ์ที่ไม่สามารถจัดเส้นทางได้สำเร็จจนเกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE

การจำลองนี้ทำการศึกษาว่า ถ้าหากเราเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ ART หรือเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้โพรโทคอล AODV เพื่อให้โพรโทคอลจัดเส้นทางทำการจัดเส้นทางแค่ครั้งเดียวเท่านั้นหากจัดเส้นทางสำเร็จก่อนกระบวนการส่งข้อมูล สมรรถนะของระบบที่ได้จะเป็นอย่างไร การจำลองนี้แบ่งเป็น 2 การจำลองย่อยคือกรณีแรกจะทำการเปลี่ยนแปลง ART จากเดิม 10 วินาทีเป็น 20 วินาทีและกรณีที่สองจะเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลจากเดิม 12.19 วินาทีต่อหนึ่งแพกเกตเป็น 1 วินาทีต่อหนึ่งแพกเกตโดยคงค่า ART ไว้ที่ 10 วินาที ทำการจำลองโดยใช้เครื่องมือจำลอง NS2 มีลักษณะการวางโหนดแสดงดังภาพประกอบ 3-39 โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทางระหว่าง 1 ถึง 15 โหนด โดยเพิ่มจำนวนโหนดต้นทางครั้งละหนึ่งโหนดและมีลักษณะการวางโหนดและเหตุผลในการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทางเหมือนกับการจำลอง 3.4 การจำลองนี้กำหนดให้โพรโทคอล AODV ส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอปเท่านั้น และพิจารณาตัวชี้วัดเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.2 พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 3.2 แสดงดังตาราง 3-4



ภาพประกอบ 3-39 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 3.5

ตาราง 3-4 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 3.5

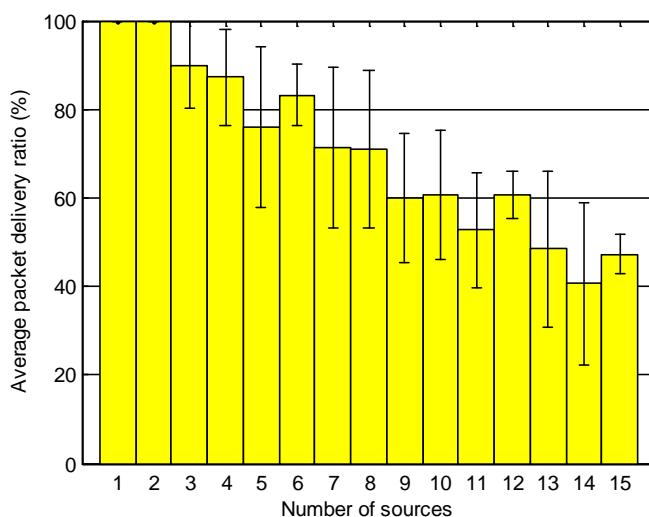
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-15 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	1 โหนด
การส่งแพกเกตข้อมูลกรณีการจำลองย่อยที่หนึ่ง	12.19 วินาทีต่อแพกเกต
การส่งแพกเกตข้อมูลกรณีการจำลองย่อยที่สอง	1 วินาทีต่อแพกเกต
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของโหนดต้นทางกรณีการจำลองย่อยที่หนึ่ง	สุ่มในช่วง 0 ถึง 12.19 วินาทีด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของโหนดต้นทางกรณีการจำลองย่อยที่สอง	สุ่มในช่วง 0 ถึง 1 วินาที ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม

3.5.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

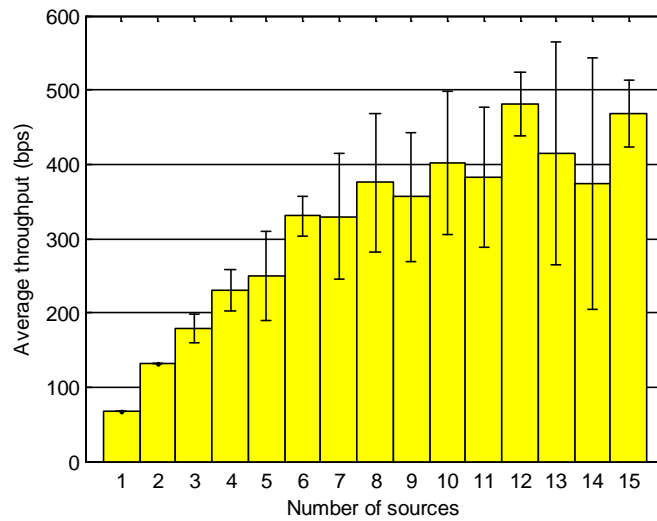
3.5.3.1 ผลการจำลองกรณีเปลี่ยนแปลง ART จากเดิม 10 วินาที เป็น 20 วินาที

การจำลองย่อยนี้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ART จาก 10 วินาทีเป็น 20 วินาทีเพื่อต้องการที่จะให้เส้นทางที่จัดขึ้นหลังจากกระบวนการจัดเส้นทางสามารถถูกใช้งานได้ตลอดโดยไม่ถูกลบทิ้งไป

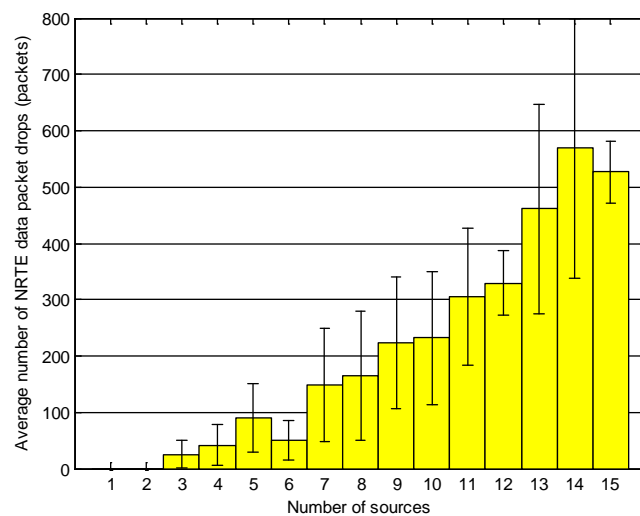
ภาพประกอบ 3-40 และภาพประกอบ 3-41 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยและปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบตามลำดับ โดยเมื่อมีกระบวนการจัดเส้นทางเพียงครั้งเดียว ผลที่ได้จากภาพเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ 3.4 การจำลองนี้ให้สมรรถนะสูงกว่าอย่างชัดเจนทั้งในเรื่องของอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยที่จากเดิมสามารถทำได้ถึง 100% ที่ 2 โหนดต้นทางเพิ่มขึ้นเป็น 3 โหนด ปริมาณงานสูงสุดจากเดิมอยู่ที่ประมาณ 150 บิตต่อวินาที เพิ่มขึ้นเป็น 400 บิตต่อวินาทีเนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลและการแย่งชิงช่องสัญญาณในกระบวนการจัดเส้นทางต่ำกว่ากรณีมีการจัดเส้นทางทุกครั้งที่ในการจำลอง 3.4 แต่สาเหตุที่ทำให้สมรรถนะต่ำลงจากภาพประกอบ 3-42 และภาพประกอบ 3-43 ยังคงเกิดจากการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE เป็นหลักประมาณ 30 ถึง 520 แพคเกจในช่วง 3 ถึง 15 โหนดต้นทาง รองลงมาถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ประมาณ 10 ถึง 120 แพคเกจในช่วง 5 ถึง 15 โหนดต้นทาง



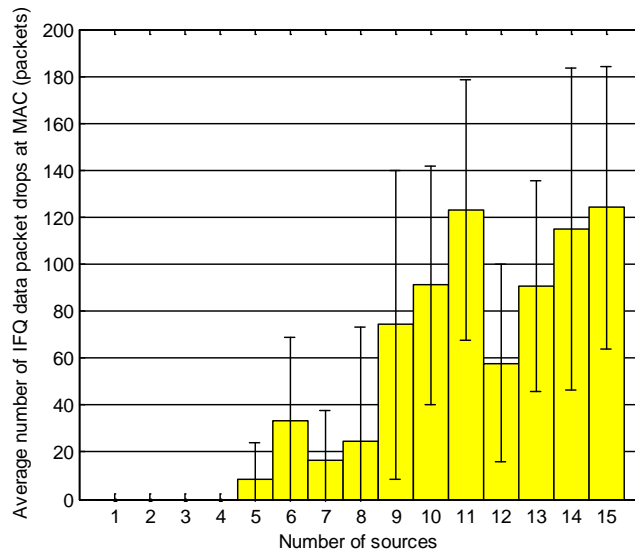
ภาพประกอบ 3-40 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที



ภาพประกอบ 3-41 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที



ภาพประกอบ 3-42 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที



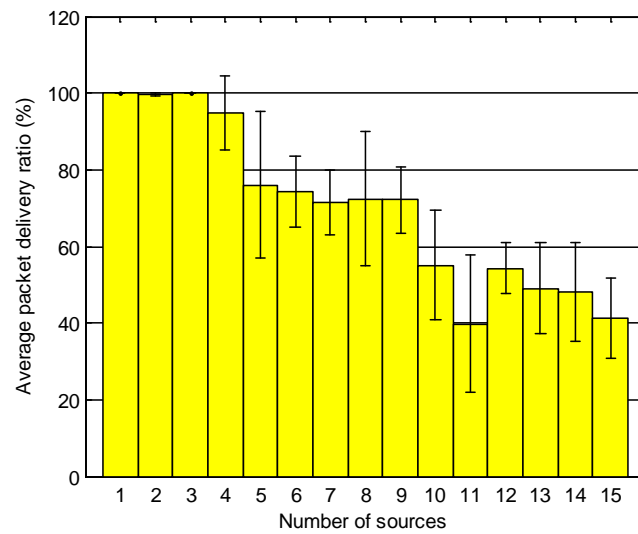
ภาพประกอบ 3-43 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงค่า ART จาก 10 เป็น 20 วินาที

3.5.3.2 ผลการจำลองกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลจากเดิม

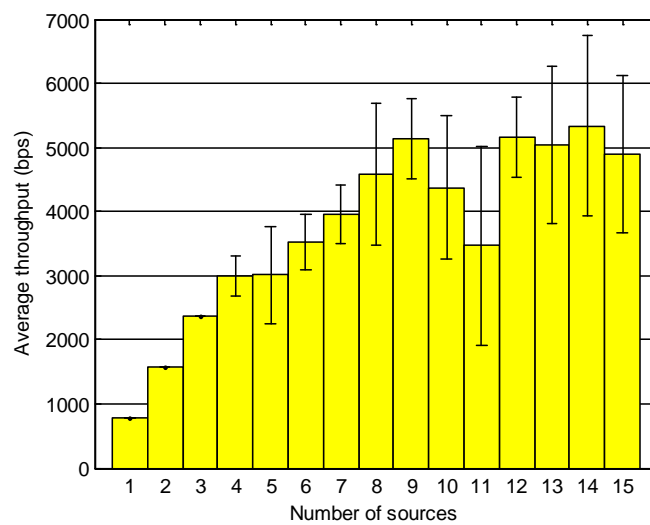
12.19 วินาทีต่อหนึ่งแพคเกจเป็น 1 วินาทีต่อหนึ่งแพคเกจ

การจำลองนี้ใช้ ART ตามค่าปริยายที่ 10 วินาที แต่ทำการเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลเป็น 1 วินาทีต่อหนึ่งแพคเกจ ลักษณะการวางโหนดใช้ลักษณะเช่นเดียวกับการจำลอง 3.5.3.1

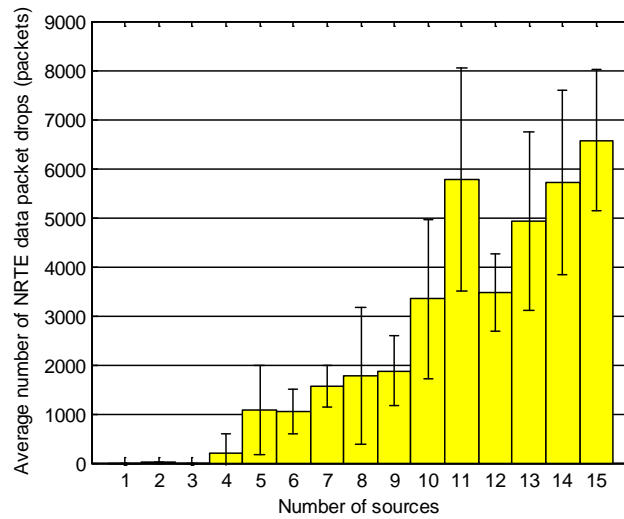
ภาพประกอบ 3-44 และภาพประกอบ 3-45 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยและปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล AODV ต้นแบบตามลำดับ ซึ่งสามารถให้อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยเต็มทีเมื่อจำนวนโหนดต้นทางไม่เกิน 4 โหนดที่อยู่ในระยะการส่งข้อมูลหนึ่งฮอปและให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 5 กิโลบิตต่อวินาที สมรรถนะที่ต่ำลงเกิดจากการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE เป็นหลักประมาณ 200 ถึง 6600 แพคเกจในช่วง 4 ถึง 15 โหนดต้นทาง รองลงมาถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ประมาณ 150 ถึง 2000 แพคเกจในช่วง 5 ถึง 15 โหนดต้นทางดังภาพประกอบ 3-46 และภาพประกอบ 3-47 ตามลำดับ โดยการละทิ้งแพคเกจข้อมูลที่เกิดขึ้นถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE สูงกว่า IFQ ที่ชั้น MAC เช่นเดียวกับการจำลอง 3.5.3.1



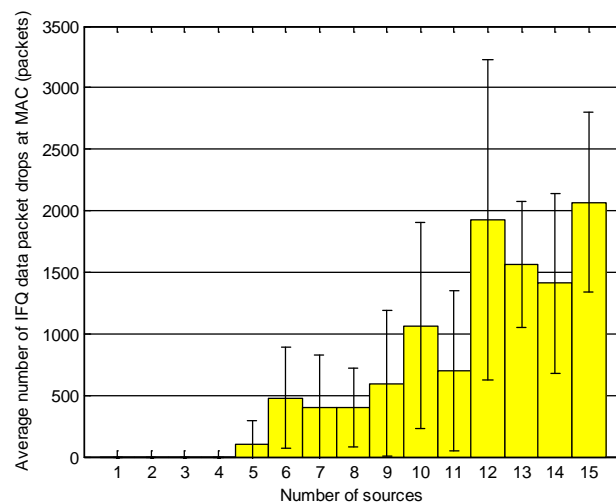
ภาพประกอบ 3-44 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบ กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลจาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพคเกจ



ภาพประกอบ 3-45 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงอัตรา การส่งข้อมูลจาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพคเกจ



ภาพประกอบ 3-46 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูล จาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพ็คเกจ



ภาพประกอบ 3-47 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูล โดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูล จาก 12.19 เป็น 1 วินาทีต่อแพ็คเกจ

3.5.4 สรุปผลการจำลอง

ผลการจำลองภายในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าการจัดเส้นทางครั้งเดียวและการจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งแพ็คเกจข้อมูลมีผลต่อสมรรถนะของระบบ โดยกรณีการจัดเส้นทางครั้งเดียวจะให้สมรรถนะที่สูงกว่า อัตราการส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนลืบต่อแพ็คเกจจะส่งผลให้

สมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบต่ำลงจากรณีที่เป็นการจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เมื่อใช้ค่า ART ตามค่าปริยาย ผลการจำลอง 3.5.3.1 และ 3.5.3.2 มีจุดสังเกตให้เห็นว่าปริมาณงานสูงสุดของโพรโทคอล AODV ต้นแบบจะเริ่มค่อนข้างเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อจำนวนโหนดเส้นทางมากกว่า 7 โหนดเป็นต้นไป ซึ่งจำนวนโหนดเส้นทางเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สมรรถนะของระบบต่ำลงจากการละทิ้งแพ็กเก็ตข้อมูลถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ที่เกิดจากความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางเนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลและการแข่งขันแย่งชิงช่องสัญญาณสำหรับช่วงกระบวนการจัดเส้นทางสูงเกินไปภายในช่องสัญญาณที่ใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวแต่อย่างไรก็ตามแม้จะเป็นกรณีจัดเส้นทางเพียงครั้งเดียว เมื่อจำนวนโหนดเส้นทางเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวไม่เพียงพอจะรองรับปริมาณข้อมูลและการแย่งชิงช่องสัญญาณสมรรถนะของระบบก็จะต่ำลงเช่นกัน

บทที่ 4

โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอรายละเอียดของโพรโทคอล AODV ต้นแบบที่นำมาศึกษาเพื่อพัฒนาต่อยอด โดยโพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายและออกแบบมาสำหรับเครือข่ายแอดฮอคไร้สาย (Wireless ad hoc network) บนมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน IEEE 802.11 และมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นต้น บทนี้ได้อธิบายถึงกระบวนการจัดเส้นทางที่ถูกใช้งานในหัวข้อโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบ หัวข้อถัดมาได้อธิบายโพรโทคอลที่นำเสนอซึ่งพัฒนาต่อยอดจากโพรโทคอล AODV คือ โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณที่ทำการพัฒนาขึ้นสองโพรโทคอลได้แก่ 3IMC-MAODV (3-Interface multi-channel modified AODV) และ 4IMC-MAODV โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายส่วนที่ได้เพิ่มเติมเข้ามาของโพรโทคอลที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV

4.2 โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV

โพรโทคอล AODV [2] จะเริ่มกระบวนการจัดเส้นทางขึ้นเมื่อมีการร้องขอใช้เส้นทางเพื่อส่งข้อมูลเท่านั้น โดยทำการส่งแพ็กเก็ตหาเส้นทางผ่านไปยังโหนดข้างเคียงเพื่อไปยังโหนดที่ต้นทางไม่สามารถติดต่อได้โดยตรง เนื่องจากโพรโทคอล AODV จะจัดเส้นทางก็ต่อเมื่อมีข้อมูลต้องการส่งด้วยเหตุนี้จึงสามารถลดการให้สัญญาณโอเวอร์เฮดในเครือข่ายให้น้อยลง และเป็น การลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็นในกระบวนการจัดเส้นทาง ทำให้ยืระยะเวลาการใช้งานของ เซนเซอร์โหนดได้ยาวนานขึ้น ข้อเสียเปรียบของโพรโทคอล AODV คือ อาจทำให้เกิดความล่าช้าของเวลาจากกระบวนการจัดเส้นทางในตอนเริ่มต้น โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV มีกระบวนการจัดเส้นทางดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 กระบวนการส่งและรับข้อความร้องขอเส้นทาง

กระบวนการส่งและรับข้อความร้องขอเส้นทาง RREQ (Route request message) เป็นกระบวนการสำรวจเส้นทางของโพรโทคอล AODV โดยกระบวนการนี้จะเริ่มต้นที่โหนดต้นทางทำการแพร่ (Broadcast) แพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางซึ่งบันทึกหมายเลขของโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลให้ไว้ ไปยังทุกโหนดในเครือข่ายเพื่อค้นหาโหนดปลายทางซึ่งมีหมายเลขตรงตามที่ระบุไว้ เมื่อแต่ละโหนดได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางนี้ก็จะทำการตรวจสอบว่าตัวมันเองใช่โหนดปลายทางที่ระบุไว้ในแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางนี้หรือไม่ หากไม่ใช่ก็จะทำการแพร่

แพกเก็ตร้องขอเส้นทางนี้อีกครั้ง หากใช้โหนดปลายทางตรงตามทีระบุไว้ในแพกเก็ตร้องขอเส้นทางก็จะเข้าสู่กระบวนการตอบยืนยันเส้นทาง (Route reply) ต่อไป

กระบวนการรับข้อความร้องขอเส้นทางจะมีข้อแม้ว่าหากเคยรับแพกเก็ตร้องขอเส้นทางนี้มาก่อนจะไม่ทำการรับไว้อีกซึ่งจะพิจารณาหมายเลขลำดับ (Sequence number) ของแพกเก็ตที่รับมาใหม่เปรียบเทียบกับหมายเลขลำดับของแพกเก็ตที่เคยรับไว้ก่อนหน้าเห็นว่าเหมือนกันหรือไม่ หากเหมือนกันก็จะทำการลบแพกเก็ตที่รับมาใหม่ทิ้งไป โดยหมายเลขลำดับจะเปลี่ยนไปทุกครั้งเมื่อเป็นการจัดเส้นทางครั้งใหม่

4.2.2 กระบวนการส่งและรับข้อความยืนยันเส้นทาง

กระบวนการส่งและรับข้อความยืนยันเส้นทาง RREP (Route reply message) กระบวนการนี้จะเริ่มต้นที่โหนดปลายทางหรือโหนดระหว่างทางใดๆหลังจากได้รับแพกเก็ตร้องขอเส้นทางแล้วเป็นโหนดปลายทางหรือมีข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางระบุไว้ในแพกเก็ตร้องขอเส้นทาง ก็จะทำการตอบแพกเก็ตแบบยูนิคาสต์โดยเจาะจงโหนดเป้าหมายที่ต้องการส่งข้อมูลให้ (Unicast) ยืนยันเส้นทางไปตามเส้นทางเดียวกันกับที่แพกเก็ตร้องขอเส้นทางถูกส่งมาไปจนถึงโหนดต้นทาง เมื่อแพกเก็ตยืนยันเส้นทางถูกรับ ณ โหนดต้นทางกระบวนการส่งแพกเก็ตข้อมูลก็จะเริ่มต้น โดยเส้นทางที่ใช้ในการส่งแพกเก็ตข้อมูลก็จะเป็นเส้นทางเดียวกันกับที่แพกเก็ตยืนยันเส้นทางใช้เดินทางมาถึงโหนดต้นทาง

กระบวนการจัดเส้นทางนี้มีเทคนิคในการจัดสรรเส้นทางโดยจะเลือกเส้นทางเร็วที่สุด (Fastest route) คือเส้นทางที่ใช้เวลาในการจัดเส้นทางน้อยที่สุด เป็นเส้นทางสั้นที่สุด (Shortest route) คิดจากจำนวนฮอปการสื่อสารที่ใช้ระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางซึ่งค่านี้จะถูกบันทึกลงในแพกเก็ตร้องขอเส้นทางและแพกเก็ตยืนยันเส้นทางเพื่อไว้ใช้พิจารณา และเป็นเส้นทางใหม่ที่สุดซึ่งทำการเปรียบเทียบจากค่าหมายเลขลำดับโดยจะยึดหมายเลขลำดับมากที่สุดเป็นหลัก

4.2.3 กระบวนการส่งและรับข้อความเส้นทางผิดพลาด

กระบวนการส่งและรับข้อความเส้นทางผิดพลาด RERR (Route error message) จะถูกใช้งานกรณีเกิดความผิดพลาดในการใช้เส้นทางในการส่งแพกเก็ตข้อมูลที่ไม่สามารถส่งแพกเก็ตไปยังโหนดปลายทางด้วยเส้นทางที่อยู่ในตารางเส้นทางได้ โพรโทคอล AODV จัดการให้โหนดที่พบความผิดพลาดของเส้นทางทำการซ่อมแซมเส้นทางหากทำได้หรือส่งแพกเก็ต RERR ซึ่งระบุเส้นทางที่เกิดปัญหาไว้ โดยโหนดจะเพิ่มหมายเลขลำดับของปลายทางที่เกิดปัญหาแล้วส่งแพกเก็ต RERR กลับไปยังโหนดต้นทาง เมื่อโหนดระหว่างทางได้รับแพกเก็ต RERR จะทำการลบข้อมูลเส้นทางที่มีจุดหมายไปยังโหนดปลายทางโดยใช้เส้นทางที่เกิดปัญหาทิ้งไปและส่งแพกเก็ต RERR

ต่อไปจนถึงโหนดต้นทาง หากโหนดต้นทางได้รับแพกเกต RERR ก็จะทำกรเริ่มกระบวนการจัดเส้นทางไปยังโหนดปลายทางใหม่อีกครั้ง

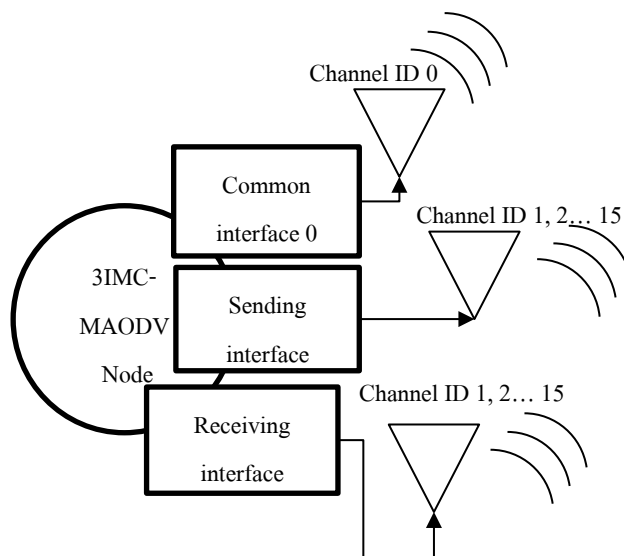
ทุกกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นของโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบจะถูกใช้งานในช่องสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวเท่านั้นรวมถึงช่วงการส่งแพกเกตข้อมูลก็จะใช้ช่องสัญญาณเดียวกันด้วยเนื่องจากโพรโทคอล AODV โดยปกติจะมีการใช้งานอินเทอร์เน็ตเฟสเพียงอินเทอร์เน็ตเฟสเดียว

4.3 ขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเทอร์เน็ตเฟสหลายช่องสัญญาณ

โพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเทอร์เน็ตเฟสหลายช่องสัญญาณที่ทำการพัฒนาขึ้นประกอบด้วยสองโพรโทคอลโดยมีความแตกต่างกันในเรื่องของจำนวนอินเทอร์เน็ตเฟสและความแตกต่างในส่วน of กระบวนการจัดเส้นทางและจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลที่สามารถใช้ได้ โดยโพรโทคอลจัดเส้นทางที่นำเสนอประกอบด้วย

4.3.1 โพรโทคอลจัดเส้นทาง 3IMC-MAODV

3IMC-MAODV เป็นโพรโทคอลที่พัฒนาจากโพรโทคอล AODV ต้นแบบโดยยึดแนวคิดที่ต้องการใช้จำนวนช่องสัญญาณเข้ามาช่วยลดการแย่งชิงช่องสัญญาณและการชนกันของข้อมูล ซึ่งนำแนวคิดของบทความ [8] ที่แยกช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางโดยเฉพาะเพียงช่องสัญญาณเดียว โดยไม่ได้ใช้งาน Common interface มาปรับใช้ใหม่โดยเพิ่ม Common interface สำหรับการส่ง-รับแพกเกตจัดเส้นทาง โดยเฉพาะเพื่อลดการสูญเสียข้อมูลในช่วงกระบวนการจัดเส้นทาง พร้อมทั้งแยกอินเทอร์เน็ตเฟสสำหรับส่งและรับแพกเกตข้อมูลเพื่อจะสามารถส่งและรับข้อมูลด้วยช่องสัญญาณที่แตกต่างกันได้ซึ่งจะช่วยลดการแย่งชิงช่องสัญญาณและการชนกันของข้อมูลในช่วงกระบวนการส่งข้อมูลที่จะเกิดขึ้นหลังกระบวนการจัดเส้นทางด้วย ความแตกต่างระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอกับบทความ [9, 13] คือ ชนิดของโพรโทคอลและการส่ง RREP ซึ่งเป็นแพกเกตยืนยันเส้นทางด้วย Sending interface และรับ RREP แพกเกตด้วย Receiving interface มาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ได้โดยไม่เกิดการซ้อนทับกันถึง 16 ช่องสัญญาณที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ [16] ดังนั้นจึงต้องการพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทางที่สามารถใช้ประโยชน์จากช่องสัญญาณทั้งหมดโดยจำนวนอินเทอร์เน็ตเฟสคงที่



ภาพประกอบ 4-1 โครงสร้างโหนดของ 3IMC-MAODV

โพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่พัฒนาขึ้นนั้นทุกโหนดมีความจำเป็นจะต้องประกอบไปด้วย 3 อินเทอร์เฟซดังภาพประกอบ 4-1 โดยสามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละอินเทอร์เฟซได้ดังนี้

- ก) อินเทอร์เฟซรวม 0 (Common interface 0) เป็นอินเทอร์เฟซสำหรับส่งและรับแพ็กเก็ตจัดเส้นทางผ่านช่องสัญญาณ 0
- ข) อินเทอร์เฟซสำหรับส่ง (Sending interface) เป็นอินเทอร์เฟซสำหรับส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โดยอินเทอร์เฟซนี้จะต้องเปลี่ยนช่องสัญญาณตามช่องสัญญาณของอินเทอร์เฟซสำหรับรับของโหนดตัวรับให้ตรงกันเพื่อส่งแพ็กเก็ตข้อมูล
- ค) อินเทอร์เฟซสำหรับรับ (Receiving interface) เป็นอินเทอร์เฟซสำหรับรับแพ็กเก็ตข้อมูลและ RREP แพ็กเก็ต

โพรโทคอลจัดเส้นทาง 3IMC-MAODV สามารถแบ่งช่วงการทำงานเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 กระบวนการจัดเส้นทาง และช่วงที่ 2 กระบวนการส่งข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1.1 ช่วงที่ 1 กระบวนการจัดเส้นทาง

ก่อนเริ่มต้นเครือข่ายแต่ละโหนดจะสุ่มช่องสัญญาณสำหรับรับ (Receiving channel ID) ของ Receiving interface ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform probability distribution) เพื่อเป็นช่องสัญญาณตั้งต้นจากช่องสัญญาณที่ 1 ถึงช่องสัญญาณที่ 15 แสดงดังอัลกอริทึม 3IMC-MAODV-1

3IMC-MAODV-1 ALGORITHM

Random a receiving channel of the receiving interface of each node in the network

VARIABLE: *Number_of_node, Receive_channel ID, Number_of_data_channel*

BEGIN

- (1) **FOR** ($I = 1; I \leq \text{Number_of_node}; I++$) **THEN**
- (2) $\text{Receive_channel ID } [I] = \text{uniformly random a channel ID between } 1\text{-}$
 $\text{Number_of_data_channel}$
- (3) **END FOR**

END

การส่ง RREQ

กรณี โหนดต้นทางมีข้อมูลที่ต้องการส่งแต่ยังไม่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะต้องแพร่ RREQ แพกเกตเหมือนกับโพรโทคอล AODV ดั้งเดิมเพื่อจัดเส้นทาง แต่จะมีความแตกต่างที่ 3IMC-MAODV จะใช้การแพร่บนช่องสัญญาณ 0 เท่านั้น โดยใช้อินเตอร์เฟสร่วมในการแพร่ RREQ แพกเกตแสดงดังอัลกอริทึม 3IMC-MAODV-2 บรรทัดที่ 1-2

การส่ง RREP

โหนดที่จะส่ง RREP จะมีข้อมูล Receiving channel ID ของ Receiving interface ที่ โหนดข้างเคียงใช้อยู่จากการรับ RREQ แพกเกตในกระบวนการก่อนหน้า เมื่อโหนดต้องการจะส่ง RREP โหนดจะใช้ Sending interface สำหรับการส่ง RREP แพกเกตเพื่อลดโอกาสการชนกันของ แพกเกต RREP และ RREQ โดยก่อนส่งจะต้องเปลี่ยนเป็น Channel ID เดียวกับ Receiving channel ID ของโหนดเป้าหมาย แสดงดังอัลกอริทึม 3IMC-MAODV-2 บรรทัดที่ 4

การรับ RREQ

ทุกโหนดจะมีอินเตอร์เฟสร่วมที่คอยรับ RREQ แพกเกตจากช่องสัญญาณ 0 แสดงดังอัลกอริทึม 3IMC-MAODV-3 บรรทัดที่ 1-2

การรับ RREP

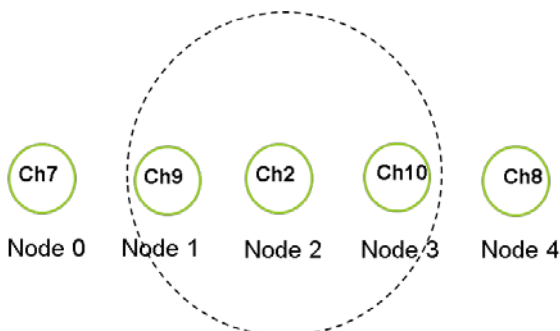
RREP แพกเกตที่ถูกส่งมาจะใช้ช่องสัญญาณเดียวกันกับช่องสัญญาณของ Receiving interface ของโหนดตัวรับจึงสามารถรับได้ตลอดเวลาและลดการชนกันกับแพกเกต RREQ ด้วยจากการใช้ช่องสัญญาณที่ต่างกัน แสดงดังอัลกอริทึม 3IMC-MAODV-3 บรรทัดที่ 4

ส่วนที่เพิ่มเติมจาก AODV ของ 3IMC-MAODV

Hello (ถูกใช้เป็นแพกเก็ตเพื่อแจ้งการคงอยู่ของโหนดที่ส่งแพกเก็ตนี้ไปยังโหนดข้างเคียงในระยะหนึ่งฮอป) RREQ และ RREP แพกเก็ตจะเพิ่มข้อมูล Channel ID ที่ถูกใช้งานใน Receiving interface ของโหนดที่ส่งแพกเก็ตเหล่านี้ลงไปเพื่อให้โหนดที่รับแพกเก็ตนี้ นำข้อมูลไปปรับปรุงตารางโหนดข้างเคียงและตารางจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณ โดยกระบวนการนี้ไม่ได้มีการเพิ่มขนาดของแพกเก็ตทั้งสามแต่อย่างใดเนื่องจากทำการเพิ่ม Channel ID ในส่วนสงวน (Reserved field) จำนวน 1 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบอนุญาตให้สามารถใช้งานได้ โดยทุกโหนดในเครือข่ายจะมีการบันทึกตารางเพิ่มขึ้นอีก 2 ตารางดังนี้

ก) ตารางโหนดข้างเคียง

ทุกโหนดจะมีตารางที่ใช้บันทึกข้อมูล Receiving channel ID ที่ถูกใช้งานใน Receiving interface ของโหนดข้างเคียงซึ่งได้รับจากรREQ และ RREP แพกเก็ตบันทึกเอาไว้เพื่อใช้ในการปรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณของ Sending interface ให้สามารถติดต่อสื่อสารกับโหนดข้างเคียงได้



ภาพประกอบ 4-2 ลักษณะการเก็บข้อมูลจากโหนดข้างเคียง

พิจารณาภาพประกอบ 4-2 โหนด 0 ต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนด 4 จึงเริ่มกระบวนการจัดเส้นทาง หลังเสร็จสิ้นกระบวนการจัดเส้นทาง โหนด 2 จะมีข้อมูล Receiving channel ID ของโหนด 1 จากตอนรับ RREQ แพกเก็ตและข้อมูล Receiving channel ID ของโหนด 3 จากตอนรับ RREP แพกเก็ตดังตาราง 4-1 โดยข้อมูลที่เก็บไว้จะมีเฉพาะโหนดที่ส่งแพกเก็ต Hello RREQ และ RREP มาเท่านั้น

ตาราง 4-1 ตารางโหนดข้างเคียงของโหนด 2

โหนดข้างเคียง	Channel ID ที่ใช้งาน
2	2
1	9
3	10

ข) ตารางจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณ

ทุกโหนดจะมีการบันทึกจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณซึ่งคำนวณจาก Receiving channel ID ที่ถูกใช้ใน Receiving interface ของแต่ละโหนดจากการรับแพคเกจ RREQ RREP และ Hello โดยถูกบันทึกไว้เพื่อคำนวณหาช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานน้อยที่สุดและมากที่สุด ยกตัวอย่างจากภาพประกอบ 4-2 โหนด 2 จะมีตารางจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการจัดเส้นทางแล้วดังตาราง 4-2

ตาราง 4-2 ตารางจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณของโหนด 2

Channel ID	จำนวนผู้ใช้งานในช่องสัญญาณ
1	0
2	1
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	1
10	1
11	0
12	0

ถูกใช้งานโดยโหนด 2

ถูกใช้งานโดยโหนด 1

ถูกใช้งานโดยโหนด 3

Channel ID	จำนวนผู้ใช้งานในช่องสัญญาณ
13	0
14	0
15	0

ตาราง 4-2 แสดงช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานน้อยที่สุดคือช่องสัญญาณ 1 3 4 5 6 7 8 11 12 13 14 และ 15 ส่วนช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงที่สุดคือ 2 9 และ 10 โดยสามารถแสดงการทำงานได้ดังอัลกอริทึม CHANNEL ASSIGNMENT บรรทัดที่ 1-11 ในหัวข้อ 4.3.3

4.3.1.2 ช่วงที่ 2 กระบวนการส่งข้อมูล

เมื่อโหนดมีเส้นทางไปยังปลายทางเรียบร้อยแล้วก่อนจะส่งแพ็คเกจข้อมูลผ่าน Sending interface โหนดจะทำการตรวจสอบว่า Receiving interface ของตัวมันเองใช้ Receiving channel ID ที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงที่สุดหรือไม่ หากตรวจพบว่าใช้ช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานสูงที่สุดจะทำการเรียกใช้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณโดยจะไปพิจารณาค่าความผิดพลาดการควบคุม (Control error value) ณ ขณะนั้นก่อนว่ามีค่ามากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์หรือไม่ โดยค่าความผิดพลาดการควบคุมคำนวณจากร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าอุณหภูมิในแพ็คเกจข้อมูลที่โหนดต้องการส่งลบด้วยค่าอุณหภูมิที่ต้องการ (21 °C) หากมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ มันจะทำการเปลี่ยน Receiving channel ID ของ Receiving interface ของตัวเองไปยังช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานน้อยที่สุดเพื่อลดการใช้ช่องสัญญาณที่มีความแออัดของข้อมูลและการแย่งชิงช่องสัญญาณสูงในเครือข่าย โดยก่อนเปลี่ยนช่องสัญญาณจะตรวจสอบว่ามีช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานน้อยที่สุดที่ช่อง หลังจากนั้นก็เปลี่ยนช่องสัญญาณโดยการสุ่มด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในกลุ่มช่องสัญญาณที่มีจำนวนผู้ใช้งานน้อยสุดเหล่านั้นและส่ง Hello แพ็คเกจโดยใช้อินเตอร์เฟสร่วมในการส่ง เพื่อให้โหนดข้างเคียงรู้ว่าโหนดที่ส่งแพ็คเกจนี้ได้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ใช้รับแพ็คเกจข้อมูลแล้ว หลังจากนั้นจึงส่งแพ็คเกจข้อมูลผ่าน Sending interface แต่ถ้าหากค่าความผิดพลาดของการควบคุม ณ ขณะนั้นน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ก็จะไม่เรียกใช้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณหรือการเปลี่ยนแปลง Receiving channel ID ที่ใช้อยู่ สามารถแสดงการทำงานในหัวข้อ 4.3.3

3IMC-MAODV-2 ALGORITHM

Sending a packet

VARIABLE: *Packet_type, RREQ, HELLO, RERR, RREP, Data*

BEGIN

- (1) **IF** (*Packet_type == RREQ or HELLO or RERR*) **THEN**
- (2) *Sending a packet by using a common interface*
- (3) **ELSE** *//RREP, Data*
- (4) *Sending a packet by using a sending interface (The same channel ID with a receiving channel ID of a target node)*
- (5) **END IF**

END

ALGORITHM 3IMC-MAODV-3

Receiving a packet

VARIABLE: *Packet_type, RREQ, HELLO, RERR*

BEGIN

- (1) **IF** (*Packet_type == RREQ or HELLO or RERR*) **THEN**
- (2) *Receiving a packet by using a common interface*
- (3) **ELSE** *//RREP, Data*
- (4) *Receiving a packet by using a receiving interface*
- (5) **END IF**

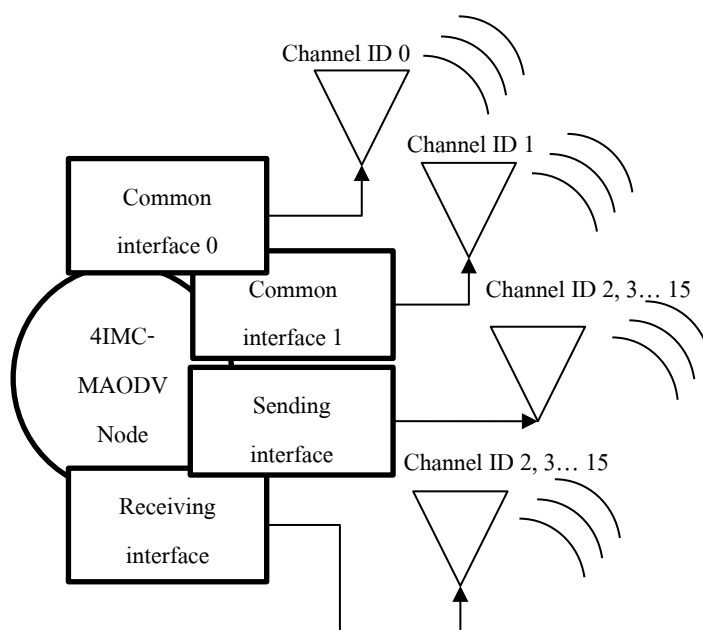
END

4.3.2 โพรโทคอลจัดเส้นทาง 4IMC-MAODV

4IMC-MAODV เป็นโพรโทคอลที่พัฒนาต่อจากโพรโทคอลจัดเส้นทาง 3IMC-MAODV จากความต้องการที่จะเพิ่มช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางขึ้นมาอีกหนึ่งอินเตอร์เฟซหนึ่งช่องสัญญาณเนื่องจากการใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางกรณีที่เครือข่ายมีความหนาแน่นของข้อมูลสูง และทำการออกแบบให้จำนวนสัญญาณโอเวอร์เฮดคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงจากโพรโทคอล 3IMC-MAODV โดยการสุ่มที่จะส่งแพ็คเกจ RREQ Hello และ RERR ในช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่ง ณ แพ็คเกจนั้นด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งรายละเอียดจะอยู่ในส่วนถัดไป

โพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่พัฒนาขึ้นนั้นทุกโหนดมีความจำเป็นต้องประกอบไปด้วย 4 อินเทอร์เฟซดังภาพประกอบ 4-3 โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

- ก) อินเทอร์เฟซร่วม 0 (Common interface 0) สำหรับแลกเปลี่ยนแพกเก็ตในกระบวนการจัดเส้นทางผ่านช่องสัญญาณ 0
- ข) อินเทอร์เฟซร่วม 1 (Common interface 1) สำหรับแลกเปลี่ยนแพกเก็ตในกระบวนการจัดเส้นทางผ่านช่องสัญญาณ 1
- ค) อินเทอร์เฟซสำหรับส่ง (Sending interface) เป็นอินเทอร์เฟซสำหรับส่งแพกเก็ตข้อมูล โดยอินเทอร์เฟซนี้จะต้องเปลี่ยนช่องสัญญาณตามช่องสัญญาณของอินเทอร์เฟซสำหรับรับของโหนดตัวรับให้ตรงกันเพื่อส่ง-รับแพกเก็ตข้อมูล
- ง) อินเทอร์เฟซสำหรับรับ (Receiving interface) เป็นอินเทอร์เฟซสำหรับรับแพกเก็ตข้อมูลและ RREP



ภาพประกอบ 4-3 โครงสร้างโหนดของ 4IMC-MAODV

กระบวนการทั้งหมดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง 4IMC-AODV โดยรวมจะเหมือนกับโพรโทคอลจัดเส้นทาง 3IMC-MAODV เกือบทุกประการ แต่จะมีความแตกต่างกันบางส่วนโดยสามารถอธิบายรายละเอียดในส่วนของกระบวนการจัดเส้นทางและส่งข้อมูลดังนี้

4.3.2.1 ช่วงที่ 1 กระบวนการจัดเส้นทาง

ก่อนเริ่มต้นเครือข่ายแต่ละโหนดจะสุ่ม Receiving channel ID ของ Receiving interface ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มเพื่อเป็นช่องสัญญาณตั้งต้นเหมือนกับโปรโตคอล 3IMC-MAODV แต่มีความแตกต่างกันคือช่องสัญญาณข้อมูลที่ใช้ได้ในกระบวนการนี้จะเริ่มจากช่องสัญญาณที่ 2 ถึงช่องสัญญาณที่ 15 เนื่องจากช่องสัญญาณ 0 และ 1 จะถูกสงวนไว้ใช้ในขั้นตอนการส่งและรับแพกเกต RREQ RERR และ Hello แสดงดังอัลกอริทึม 4IMC-MAODV-1

4IMC-MAODV-1 ALGORITHM

Random a receiving channel of the receiving interface of each node in the network

VARIABLE: *Number_of_node, Receive_channel ID, Number_of_data_channel*

BEGIN

- (1) **FOR** ($I = 1; I \leq \text{Number_of_node}; I++$) **THEN**
- (2) *Receive_channel ID [I] = uniformly random a channel ID between 2-
Number_of_data_channel*
- (3) **END FOR**

END

การส่ง RREQ

กรณีโหนดต้นทางมีข้อมูลต้องการส่งแต่ยังไม่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โหนดจะต้องทำการแพร่ RREQ แพกเกตเหมือนกับโปรโตคอล AODV ต้นแบบและ 3IMC-MAODV เพื่อจัดเส้นทาง แต่จะมีความแตกต่างคือ 4IMC-MAODV จะใช้การแพร่ในช่องสัญญาณใดช่องสัญญาณหนึ่ง ณ แพกเกตร้องขอเส้นทางแพกเกตนี้ โดยการใช้การสุ่มด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มระหว่างช่องสัญญาณ 0 กับช่องสัญญาณ 1 ซึ่งจะใช้ Common interface 0 สำหรับการส่งในช่องสัญญาณ 0 หรือ Common interface 1 สำหรับการส่งในช่องสัญญาณ 1 แสดงดังอัลกอริทึม 4IMC-MAODV-2 บรรทัดที่ 1-6 โดยวิธีการนี้จะทำให้จำนวนแพกเกต RREQ ที่ถูกส่งเมื่อเปรียบเทียบในสภาวะปกติจะไม่มี ความแตกต่างกับโปรโตคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบและ 3IMC-MAODV

การส่ง RREP

โหนดที่จะส่ง RREP จะมีข้อมูล Receiving channel ID ของ Receiving interface ที่โหนดข้างเคียงใช้อยู่จากการรับ RREQ แพกเกต โดยโหนดจะใช้ Sending interface ในการส่ง ซึ่ง

จะต้องเปลี่ยน Channel ID ให้ตรงกับ Receiving channel ID ของโหนดเป้าหมายเช่นเดียวกับ 3IMC-MAODV แสดงผังอัลกอริทึม 4IMC-MAODV-2 บรรทัดที่ 7-8

การรับ RREQ

ทุกโหนดจะมี Common interface 0 และ 1 เพื่อใช้รับข้อมูลจากช่องสัญญาณ 0 และช่องสัญญาณ 1 จึงสามารถรับ RREQ แยกแยะได้จากทั้งสองช่องสัญญาณ แสดงผังอัลกอริทึม 4IMC-MAODV-3 บรรทัดที่ 1-2

การรับ RREP

RREP แยกแยะที่ถูกส่งมาจะใช้ Channel ID ที่ตรงกับ Receiving channel ID บน Receiving interface ของโหนดตัวรับจึงสามารถรับได้ตลอดเวลาและลดการชนกันกับแพคเกจ RREQ หรือแพคเกจอื่นๆด้วยการใช้ช่องสัญญาณที่ต่างกันเช่นเดียวกับ 3IMC-MAODV แสดงผังอัลกอริทึม 4IMC-MAODV-3 บรรทัดที่ 3-4

4.3.2.2 ช่วงที่ 2 กระบวนการส่งข้อมูล

กระบวนการทำงานในส่วนนี้จะเหมือนกับโพรโทคอล 3IMC-MAODV เกือบทุกประการยกเว้นจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ในกระบวนการส่งแพคเกจข้อมูลของโพรโทคอล 4IMC-MAODV จะมีจำนวนช่องสัญญาณสูงสุดอยู่ที่ 14 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณ 2 - 15) เนื่องจากใช้ 2 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณ 0 และ 1) สำหรับกระบวนการส่ง-รับ RREQ RERR และ Hello แยกแยะ

4IMC-MAODV-2 ALGORITHM

Sending a packet

VARIABLE: *Packet_type, RREQ, HELLO, RERR, RREP, Data, SI*

BEGIN

- (1) **IF** (*Packet_type* == *RREQ* or *HELLO* or *RERR*) **THEN**
- (2) *SI* = Random between 0-1 by using uniform distribution
- (3) **IF** (*SI* == 0) **THEN**
- (4) Sending a packet by using the common interface 0
- (5) **ELSE**
- (6) Sending a packet by using the common interface 1
- (7) **END IF**
- (8) **ELSE** //RREP, Data

(9) *Sending a packet by using a sending interface (The same channel ID with a receiving channel ID of a target node)*

(10) **END IF**

END

4IMC-MAODV-3 ALGORITHM

Receiving a packet

VARIABLE: *Packet_type, RREQ, HELLO, RERR*

BEGIN

(1) **IF** (*Packet_type == RREQ or HELLO or RERR*) **THEN**

(2) *Receiving a packet by using the common interface 0 or common interface 1*

(3) **ELSE** *//RREP, Data*

(4) *Receiving a packet by using a receiving interface*

(5) **END IF**

END

4.3.3 กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ

กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณเป็นเทคนิคที่ถูกใช้งานในโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ซึ่งเป็นกระบวนการเพื่อกระจายการส่งแพกเกตข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณในเครือข่ายให้มีความแออัดเบาบางลงโดยใช้ประโยชน์จากการที่แต่ละโหนดแยก Receiving interface และ Sending interface ซึ่งทุกโหนดจะทำการสุ่มช่องสัญญาณสำหรับรับแพกเกตข้อมูลตอนเริ่มต้นเครือข่ายขึ้นมาจากช่องสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ โดยโพรโทคอล 3IMC-MAODV มีช่องสัญญาณสำหรับแพกเกตข้อมูลสูงสุด 15 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณ 1 ถึง 15) ซึ่งไม่นับรวมช่องสัญญาณที่แยกไว้สำหรับกระบวนการจัดเส้นทางและโพรโทคอล 4IMC-MAODV มีช่องสัญญาณสำหรับแพกเกตข้อมูลสูงสุด 14 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณ 2 ถึง 15) สิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการนี้คือข้อมูลจากรางจำนวนผู้ใช้ช่องสัญญาณ โดยขั้นตอนการทำงานได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.1.2 ในส่วนกระบวนการส่งข้อมูล และสามารถแสดงการทำงานได้ดังอัลกอริทึม CHANNEL ASSIGNMENT และภาพประกอบ 4-4

CHANNEL ASSIGNMENT ALGORITHM

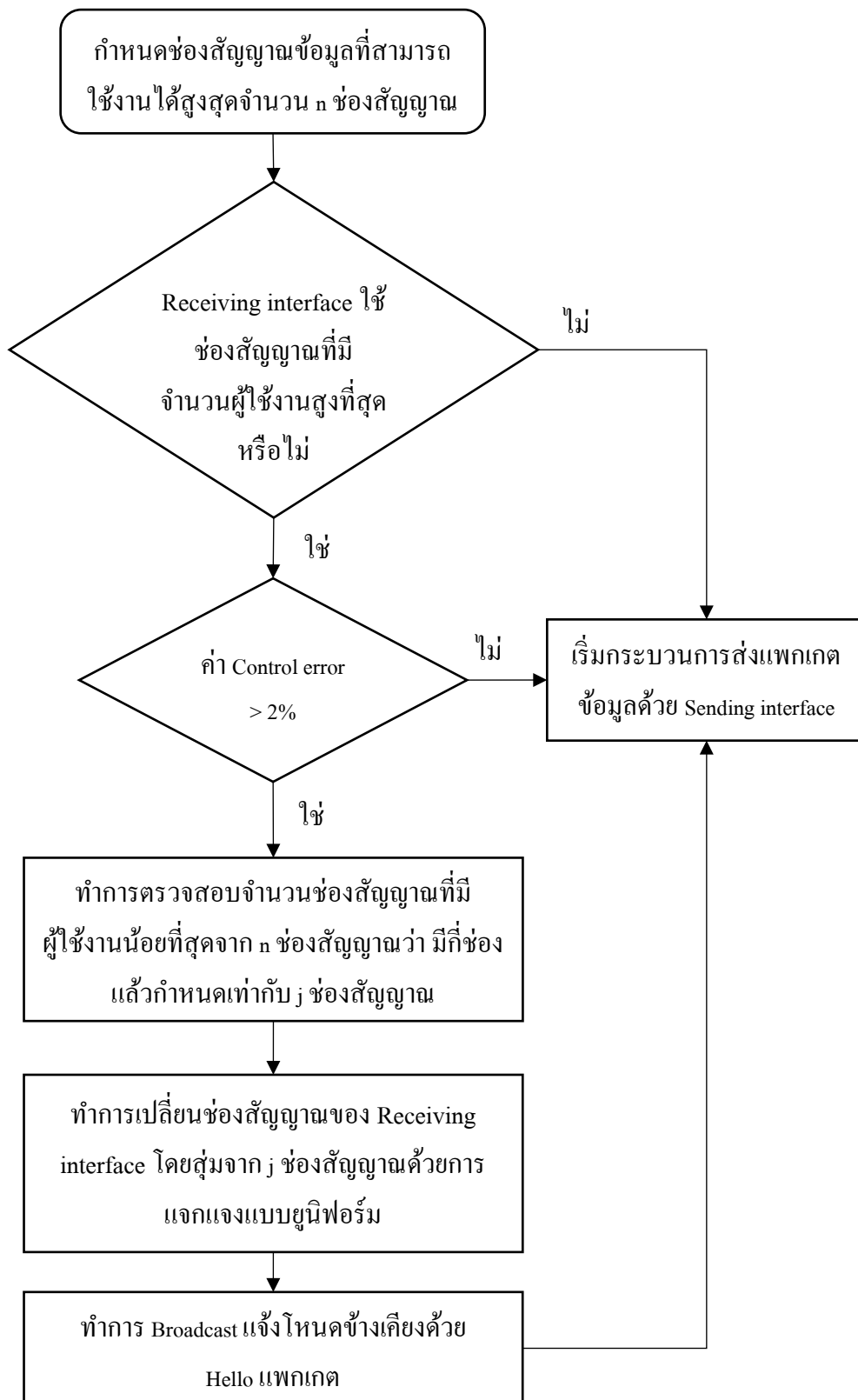
Considering the conditions, then changes a receiving channel of the receiving interface at each node or continue

VARIABLE: *Number_of_data_channel, Control_error_value, Highest_channel ID*

BEGIN

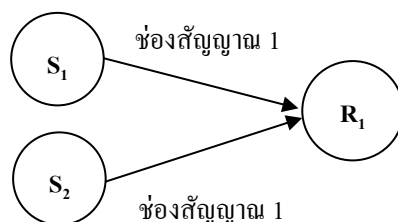
- (1) **FOR** ($I = 1; I \leq \text{Number_of_data_channel}; I++$) **THEN**
- (2) **IF** (*Number of users in a channel ID [I] > Number of users in a highest channel ID*) **THEN**
- (3) *Highest_channel ID = I*
- (4) **END IF**
- (5) **END FOR**
- (6) **FOR** ($I = 1; I \leq \text{Number_of_data_channel}; I++$) **THEN**
- (7) **IF** (*Number of users in a channel ID [I] <= Number of lowest users*) **THEN**
- (8) *Adding the channel ID [I] in the set of lowest channels*
- (9) **END IF**
- (10) **END FOR**
- (11) **IF** (*Receiving channel ID of a receiving interface == Highest_channel ID*) **THEN**
- (12) **IF** (*Control_error_value > 2 %*) **THEN**
- (13) *Random uniformly a new receiving channel ID from the set of lowest channels*
- (14) *Broadcast a hello message to notify neighboring nodes*
- (15) **ELSE**
- Using an old channel ID*
- (16) **END IF**
- (17) **ELSE**
- (18) *Continue*
- (19) **END IF**

END



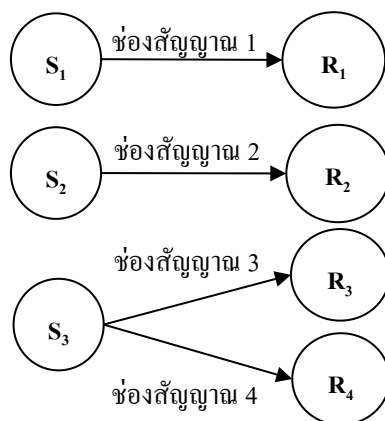
ภาพประกอบ 4-4 ฟังงานแสดงการทำงานของกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ

กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณจะถูกใช้ประโยชน์ก็ต่อเมื่อโหนดต่อไปหรือโหนดข้างเคียงที่ต้องการจะส่งข้อมูลให้ไม่ได้เป็นโหนดร่วมยกตัวอย่างเช่นภาพประกอบ 4-5 โหนด S_1 และ S_2 ต้องการส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนด R_1 ซึ่งโหนด R_1 มีอินเตอร์เฟซสำหรับรับแพ็คเกจข้อมูลที่ใช้ช่องสัญญาณ 1 อยู่ โดยจะถือว่าโหนด R_1 เป็นโหนดร่วมของโหนด S_1 และ S_2 เนื่องจากการส่งแพ็คเกจข้อมูลจะส่งด้วย Sending interface ที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกันกับช่องสัญญาณที่ถูกใช้ใน Receiving interface ของโหนดเป้าหมาย ดังนั้นโหนด S_1 และ S_2 ก็จะใช้ช่องสัญญาณเดียวกันในการส่งแพ็คเกจข้อมูลไปให้โหนด R_1 ทำให้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณไม่มีประโยชน์สำหรับการส่งแพ็คเกจข้อมูลในสถานการณ์นี้



ภาพประกอบ 4-5 สถานการณ์ที่กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณไม่ถูกใช้ประโยชน์

กรณีกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณจะมีประโยชน์นั้นแสดงดังภาพประกอบ 4-6 คือกรณีโหนดปลายทางหรือโหนดใดๆที่ต้องการส่งแพ็คเกจข้อมูลให้ไม่ได้เป็นโหนดร่วม โดยในกรณีนี้ประกอบด้วยโหนดต้นทาง S_1 , S_2 และ S_3 เป็นโหนดที่ต้องการส่งแพ็คเกจข้อมูล โดยโหนดปลายทาง R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 ทำการสุ่มช่องสัญญาณตอนเริ่มต้นเครือข่ายหรือใช้งานกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณแล้วใช้ช่องสัญญาณที่ Receiving interface แตกต่างกัน เมื่อโหนด S_1 ต้องการส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนด R_1 โหนด S_2 ต้องการส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนด R_2 และโหนด S_3 ต้องการส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนด R_3 และ R_4 ช่องสัญญาณที่โหนด S_1 , S_2 และ S_3 ใช้ส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนดปลายทางแต่ละโหนดจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถลดการแย่งชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณและความแออัดของปริมาณข้อมูลในช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีโหนดในเครือข่ายสามารถใช้งานได้เพียงช่องสัญญาณเดียวในกระบวนการส่งแพ็คเกจข้อมูลลงได้



ภาพประกอบ 4-6 สถานการณ์ที่กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณสามารถใช้ประโยชน์ได้

บทที่ 5

การวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV

5.1 บทนำ

บทนี้ได้นำเสนอการจำลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกับโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV บนระบบเครือข่ายเซนเซอร์และ แอคชูเอเตอร์ไร้สายซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อการจำลองดังนี้ ก) การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมี โหนดปลายทางโหนดเดียว ข) การศึกษาปริมาณงานสูงสุด ค) การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนด ปลายทางหลายโหนด ง) การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีไม่จำกัดจำนวนฮอปในการส่งข้อมูล จ) การ วิเคราะห์สมรรถนะกรณีจำนวนช่องสัญญาณสูงสุดต่างกันและสุดท้ายข้อ ฉ) การวิเคราะห์ สมรรถนะกรณีอัตราการส่งข้อมูลสูง

ผลการจำลองผ่านเครื่องมือจำลอง PiccSIM ภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนดแสดง ให้เห็นว่า ข้อ ก) โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถรองรับห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิหรือ จำนวนโหนดต้นทางในระยะหนึ่งฮอปกรณีมีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียวได้สูงสุด 3 โหนด และให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 125 บิตต่อวินาที ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถรองรับได้ 5 และ 10 โหนดตามลำดับ โดยให้ปริมาณงานประมาณ 325 และ 450 บิตต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งสมรรถนะจากการควบคุมที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับสมรรถนะของ ระบบสื่อสารไร้สาย โดยแพกเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากผลพวงของกระบวนการ จัดเส้นทางซึ่งแพกเกตข้อมูลถูกละทิ้งเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดต้นทางสูงขึ้น ข้อ ข) พบว่าปริมาณ งานสูงสุดที่โพรโทคอล 4IMC-MAODV ทำได้สูงกว่า 3IMC-MAODV มีค่าเท่ากับ 650 และ 450 บิตต่อวินาทีตามลำดับเมื่อใช้ช่วงซีกตัวอย่างเท่ากับช่วงเวลานั้นส่วนสิบ โดยเป็นค่าได้จากกรณี ระบบต้องจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งข้อมูลหนึ่งแพกเกต ส่วนข้อ ค) โพรโทคอล AODV ต้นแบบ สามารถรองรับจำนวนโหนดต้นทางและปลายทางได้สูงสุด 1 คู่ ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถรองรับได้ 2 และ 4 คู่ตามลำดับ ซึ่งมีจำนวนน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองในข้อ ก) เนื่องจากจำนวนโหนดปลายทางที่เพิ่มขึ้นสามารถก่อให้เกิดปัญหาใน กระบวนการจัดเส้นทางเพิ่มขึ้นทำให้สมรรถนะจากทุกโพรโทคอลต่ำลง ข้อ ง) แสดงผลการ เปรียบเทียบที่บ่งชี้ว่าการกำหนดให้โพรโทคอลจัดเส้นทางใช้เส้นทางหนึ่งฮอปกับกรณีต้นแบบที่ ไม่จำกัดจำนวนฮอปให้ผลการจำลองไม่แตกต่างกันเนื่องจากความสามารถดั้งเดิมของ AODV ข้อ จ) แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีใช้ 2 ช่องสัญญาณข้อมูลกับ กรณีเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณข้อมูลตามจำนวนคู่การสื่อสารจะให้สมรรถนะที่ไม่แตกต่างกันอย่าง

ชัดเจนกรณีใช้ช่วงชักตัวอย่างเท่ากับช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบ เนื่องจากการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลส่วนใหญ่ที่อัตราการส่งข้อมูลนี้เกิดในกระบวนการจัดเส้นทาง และข้อ ค) แสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถให้สมรรถนะสูงกว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุม โดยกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณในโพรโทคอลที่นำเสนอจะสามารถแสดงสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นได้ชัดเจนเมื่ออัตราการส่งข้อมูลอยู่ในระดับสูง ดังนั้นจากผลการจำลองจากข้อ ก ถึง ค สามารถสรุปได้ว่าโพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงสุดทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมรองลงมาคือ 3IMC-MAODV และ AODV ต้นแบบตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามแม้โพรโทคอลที่นำเสนอจะให้สมรรถนะสูงกว่า AODV ก็ต้องแลกมาด้วยจำนวนอินเทอร์เฟสและความซับซ้อนในกระบวนการจัดเส้นทางที่เพิ่มขึ้น

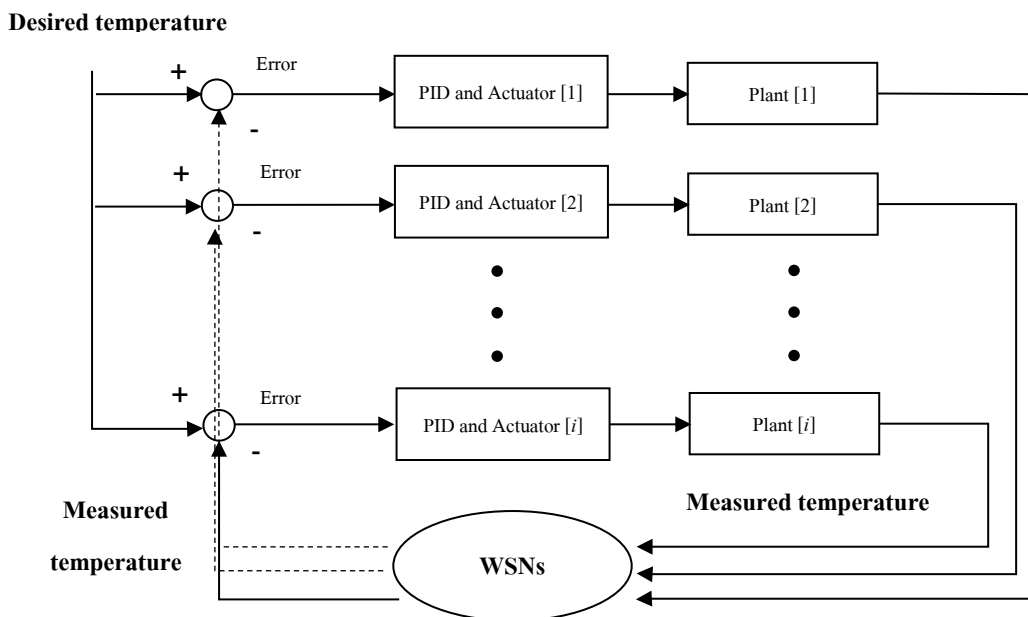
5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

5.2.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะจากการใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบกับโพรโทคอลที่นำเสนอบน WSNs กรณีเครือข่ายมีโหนดปลายทางสำหรับรับแพ็คเกจข้อมูลเพียงโหนดเดียว สมรรถนะจากทั้งสามโพรโทคอลจะมีลักษณะอย่างไร สาเหตุของการสูญเสียข้อมูลในเครือข่ายเกิดจากอะไร สมรรถนะที่ได้จากระบบสื่อสารจะส่งผลอย่างไรต่อระบบควบคุม

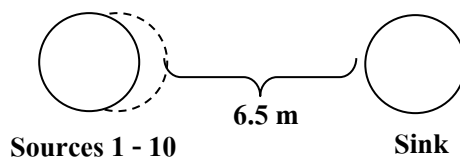
5.2.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้ทำการทดสอบทั้งระบบควบคุมและระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยใช้เครื่องมือจำลอง PiccSIM ซึ่งระบบควบคุมจะเป็นการควบคุมแบบหลายลูปตามจำนวนโหนดต้นทาง i ที่อยู่ภายใน WSNs ดังภาพประกอบ 5-1 ระบบควบคุมจะทำงานบนเครื่องมือจำลอง MATLAB/Simulink ขณะเดียวกันระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะทำงานอยู่บนเครื่องมือ NS2 สืบเนื่องจากผลการจำลองในหัวข้อ 3.4 โหนดต้นทางทั้งหมดจะถูกวางอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันเพื่อศึกษาสมรรถนะกรณีเลวร้ายที่สุดซึ่งได้รับผลกระทบจากการวางโหนดต้นทางในระยะการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางอื่นซึ่งเป็นกรณีที่ใช้เพื่อศึกษาสมรรถนะโดยหลีกเลี่ยงจากปัญหาโหนดซ่อน การจำลองนี้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทาง 10 ระดับ เริ่มที่ 1 โหนดต้นทางแล้วค่อยๆทำการเพิ่มระดับละหนึ่งโหนดต้นทาง

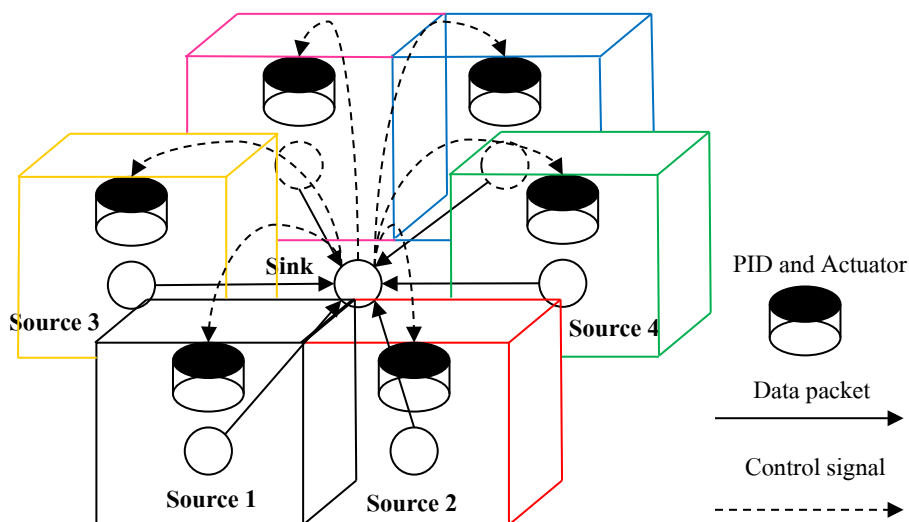


ภาพประกอบ 5-1 ภาพรวมของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

การส่งข้อมูลในเครือข่ายไร้สายโดยทั่วไปมีอยู่ 2 ลักษณะ ลักษณะแรกคือกรณี โหนดทำการส่งข้อมูลให้โหนดเดียวกัน ลักษณะที่สองคือโหนดส่งข้อมูลให้โหนดที่แตกต่างกัน การจำลองนี้จะเป็นลักษณะแรกที่มีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียว วางอยู่ในระนาบเดียวกันกับ โหนดต้นทางดังภาพประกอบ 5-2 ห่างออกไป 6.5 เมตร การใช้งานสำหรับสภาพแวดล้อมจริง แสดงดังภาพประกอบ 5-3 ซึ่งระบบจะมีศูนย์กลางควบคุมเพียงจุดเดียวในการจำลองนี้คือโหนดปลายทาง ทำหน้าที่รับข้อมูลอุณหภูมิที่ถูกส่งมาจากโหนดเซนเซอร์หรือโหนดต้นทางซึ่งประจำอยู่ในแต่ละ ห้องโดยทุกโหนดต้นทางมีระยะการส่งข้อมูลครอบคลุมถึงกันทั้งหมด เมื่อศูนย์กลางควบคุมได้รับข้อมูล อุณหภูมิจากโหนดต้นทางก็จะทำการคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมแล้วส่งให้แอคชูเอเตอร์ใน แต่ละห้องทำการปรับค่าอุณหภูมิเพื่อปรับปรุงให้ได้อุณหภูมิห้องที่ต้องการ ทุกโหนดต้นทางจะทำการ สุ่มเวลาเริ่มต้นการส่งข้อมูลในช่วง 0-12.19 วินาทีเพื่อต้องการให้ทุกโหนดส่งข้อมูลในรอบ เดียวกัน การจำลองนี้กำหนดให้โพรโทคอลจัดเส้นทางทั้งหมดส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอป เท่านั้น และกำหนดช่องสัญญาณข้อมูลของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV เท่ากับ 15 และ 14 ช่องสัญญาณตามลำดับ ซึ่งเป็นจำนวนช่องสัญญาณสำหรับแพคเกจข้อมูลสูงสุด ที่ทั้งสองโพรโทคอลสามารถใช้ได้ พารามิเตอร์อื่นๆแสดงดังตาราง 5-1



ภาพประกอบ 5-2 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.2



ภาพประกอบ 5-3 รูปแบบของการจำลองเมื่อถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง
กรณีระบบมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

ตาราง 5-1 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.2

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
เวลาในการจำลองการทำงาน	1000 วินาที
จำนวน โหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-10 โหนด
จำนวน โหนดปลายทาง	1 โหนด
ช่วงการส่งแพคเกจข้อมูล	12.19 (ช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบ) วินาทีต่อแพคเกจ
ระยะการสื่อสารหนึ่งฮอปที่ใช้ทดสอบ	6.5 เมตร
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของ โหนดต้นทาง	สุ่มในช่วง 0 ถึง 12.19 วินาทีด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม
ขนาดบัพเฟอร์ที่ Network layer	64 [1] แพคเกจ
ขนาดบัพเฟอร์ที่ MAC	50 [17] แพคเกจ

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ	Two-ray ground
ความถี่ที่ใช้งาน	2.4 กิกะเฮิรตซ์
อัตราการส่งข้อมูล	250 กิโลบิตต่อวินาที
ระยะการส่งข้อมูล	7 เมตร
ระยะรับรู้สัญญาณพาหะ	14 เมตร
ขนาดแพคเกจข้อมูล	79 ไบต์ (46 ไบต์ ที่ชั้น Application) [1]
มาตรฐานการสื่อสาร	IEEE 802.15.4
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสำหรับโพรโทคอล 3IMC-MAODV	15 ช่องสัญญาณ
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสำหรับโพรโทคอล 4IMC-MAODV	14 ช่องสัญญาณ

ตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในการพิจารณาสมรรถนะของระบบ

ตัวชี้วัดสมรรถนะถูกใช้เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และ แอคชูเอเตอร์ไร้สาย ภายในบทนี้แบ่งตัวชี้วัดสมรรถนะออกเป็น 2 มุมมองคือมุมมองของระบบ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายและมุมมองระบบควบคุม โดยมีตัวชี้วัดดังนี้

ตัวชี้วัดในมุมมองระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

- ก) อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ย (Average packet delivery ratio) ตัวชี้วัดนี้ คำนวณจากจำนวนแพคเกจที่รับสำเร็จที่โหนดปลายทางต่อจำนวนแพคเกจที่ส่ง ณ โหนดต้นทางซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ยิ่งค่าเข้าใกล้ 100 % แสดงถึงสมรรถนะที่ได้มีความ น่าเชื่อถือสูงเนื่องจากการสูญหายของแพคเกจที่เป็นอัตราส่วนต่างน้อยโดยตัวชี้วัดนี้ คำนวณจาก

$$\text{อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล} = \frac{\text{จำนวนแพคเกจที่รับได้}}{\text{จำนวนแพคเกจที่ส่ง}}$$

- ข) ปริมาณงาน โดยเฉลี่ย (Average throughput) คือปริมาณงานที่โหนดปลายทางรับได้มี หน่วยเป็น บิตต่อวินาที ซึ่งคำนวณจากแพคเกจข้อมูลเท่านั้น

$$\text{ปริมาณงาน} = \frac{\text{จำนวนแพกเกตที่รับได้} \times \text{ขนาดแพกเกต (บิต)}}{\text{เวลาที่ทำการจำลอง (วินาที)}}$$

- ค) ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซ (Average throughput per interface) คือปริมาณงานในมุมมองต่ออินเตอร์เฟซมีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที ซึ่งคำนวณจาก

$$\text{ปริมาณงานต่ออินเตอร์เฟซ} = \frac{\text{ปริมาณงาน}}{\text{จำนวนอินเตอร์เฟซที่โพรโทคอลใช้งานทั้งหมด}}$$

จำนวนอินเตอร์เฟซทั้งหมดของโพรโทคอล AODV: 1

จำนวนอินเตอร์เฟซทั้งหมดของโพรโทคอล 3IMC-MAODV: 3

จำนวนอินเตอร์เฟซทั้งหมดของโพรโทคอล 4IMC-MAODV: 4

- ง) จำนวนแพกเกตข้อมูลที่ถูกละทิ้งโดยเฉลี่ย (Average number of data packet drops) คือผลรวมเฉลี่ยสะสมของการละทิ้งแพกเกตข้อมูล
- จ) จำนวนแพกเกตจัดเส้นทางที่ถูกละทิ้งโดยเฉลี่ย (Average number of routing packet drops) คือผลรวมเฉลี่ยสะสมของการละทิ้งแพกเกตจัดเส้นทาง

ตัวชี้วัดในมุมมองระบบควบคุม

- ก) อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ย (Average convergence ratio) คำนวณจากจำนวนครั้งการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ต่อจำนวนครั้งการจำลองทั้งหมด มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ยิ่งค่าเข้าสู่ 100 % แสดงถึงสมรรถนะที่ได้ของระบบควบคุมมีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากผลตอบสนองการควบคุมขาออก (Control response output) เข้าสู่สภาวะคงตัวได้สูง โดยคำนวณจาก

$$\text{อัตราการลู่เข้า} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว}}{\text{จำนวนครั้งการจำลองทั้งหมด}}$$

- ข) ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ย (Average settling time) คือช่วงเวลาที่ผลตอบสนองขาออกของระบบควบคุมอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ของค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยมีหน่วยเป็นวินาที ณ เวลาที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะคงตัว ยิ่งค่าน้อยหมายความว่าผลตอบสนองการควบคุมขาออกเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ไว

- ค) ค่าพุ่งเกิน สูงสุด โดยเฉลี่ย (Average maximum overshoot) คือค่าสูงสุดของผลตอบสนองการควบคุมขาออกที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากผลต่างของค่าอุณหภูมิสูงสุดกับค่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ ค่าที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายจะทำให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำ คำนวณจาก

$$\text{ค่าพุ่งเกินสูงสุด} = \frac{\text{ค่าอนุหภูมิที่ขึ้นสูงสุด} - \text{ค่าอนุหภูมิเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว}}{\text{ค่าอนุหภูมิเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว}}$$

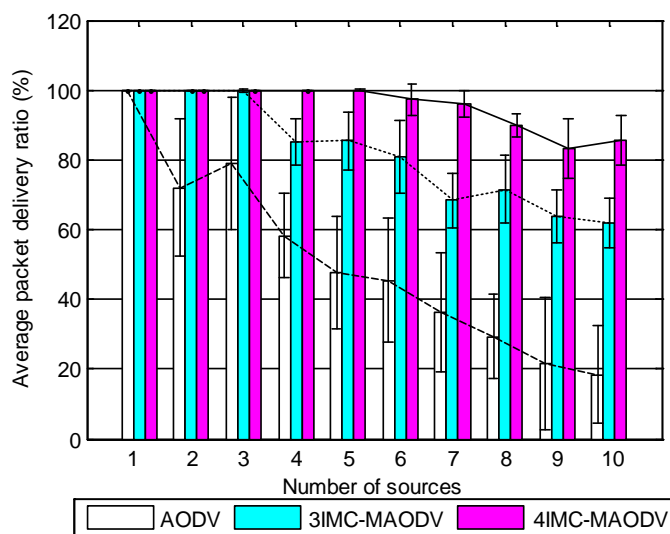
- ง) อินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ย (Average integral of absolute error) หรือ IAE คือผลรวมของค่าสัมบูรณ์สะสมของค่าความผิดพลาดของอนุหภูมิปัจจุบันจากค่าเป้าหมายตลอดช่วงระยะเวลาการควบคุม ยิ่งค่าสูงหมายความว่าค่าความผิดพลาดสะสมสูงด้วยเช่นกัน

บทนี้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะเหล่านี้เพื่อเปรียบเทียบและอธิบายผลการจำลองระบบและเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายและระบบควบคุม โดยผลการจำลองทั้งหมดถูกแสดงด้วยค่าเฉลี่ยที่มีช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95 % Confident interval) [1] ในทุกการจำลอง

5.2.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

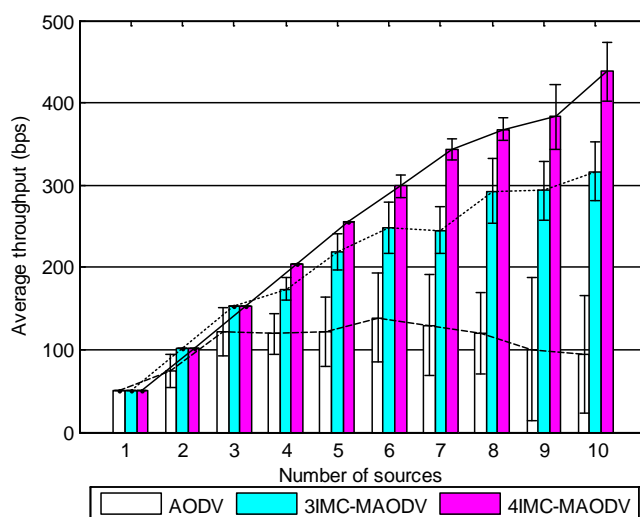
5.2.3.1 สมรรถนะของระบบสื่อสาร

ภาพประกอบ 5-4 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง ซึ่งโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะให้สมรรถนะสูงกว่า AODV อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 4 โหนดเป็นต้นไป โดยทุกโพรโทคอลจะค่อยๆ ให้สมรรถนะต่ำลงเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นเป็นผลกระทบจากกรณีระบบใช้ช่วงชักตัวอย่างที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบ ทุกโพรโทคอลจะต้องทำกระบวนการจัดเส้นทางทุกๆ ครั้งที่จะส่งแพ็คเกจข้อมูล กรณีนี้แม้อัตราการส่งข้อมูลจริงจะอยู่ในระดับต่ำ แต่สามารถสร้างปัญหาให้เกิดขึ้นในกระบวนการจัดเส้นทางได้ทำให้เกิดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลส่วนใหญ่เนื่องจากประสบการณ์ในการจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยส่งผลมากที่สุด ในโพรโทคอล AODV ต้นแบบซึ่งไม่มีอินเตอร์เฟสร่วมเพื่อใช้เพิ่มสมรรถนะสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 เนื่องจากการใช้เพียงช่องสัญญาณเดียวเพื่อจัดเส้นทางและส่งข้อมูลไม่สามารถรองรับจำนวนโหนดต้นทางที่เพิ่มขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามโพรโทคอล 3IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงกว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบเพราะแบ่งแยกช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางและการส่งข้อมูลไว้ทำให้การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ลดลงต่ำกว่า AODV และสุดท้ายโพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงสุดเพราะมีสองอินเตอร์เฟสสองช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทางซึ่งช่วยลดการละทิ้งข้อมูลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ลงอย่างมาก รายละเอียดและคำอธิบายการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลและแพ็คเกจจัดเส้นทางจะถูกอธิบายในส่วนถัดไป



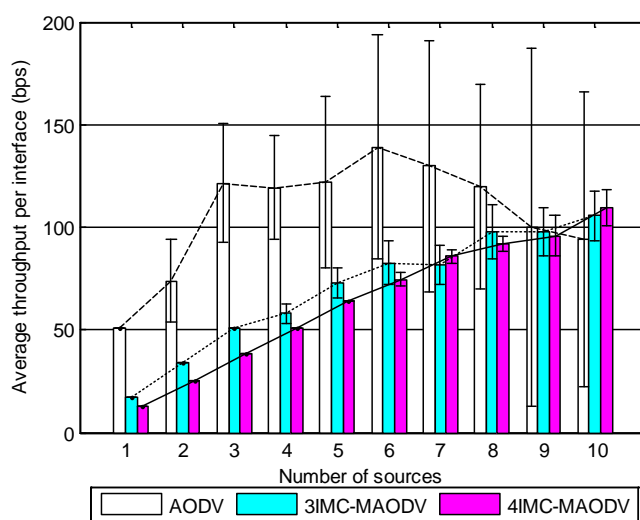
ภาพประกอบ 5-4 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทาง
กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

ภาพประกอบ 5-5 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยจากทั้ง 3 โพรโทคอลทำได้ ซึ่งโพรโทคอล AODV ต้นแบบให้ปริมาณงานสูงสุดและค่อนข้างคงที่ประมาณ 125 บิตต่อวินาที ส่วนโพรโทคอล 3IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 325 บิตต่อวินาทีโดยมีแบนด์วิดท์ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ส่วนโพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดที่ 450 บิตต่อวินาทีโดยมีแบนด์วิดท์ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก



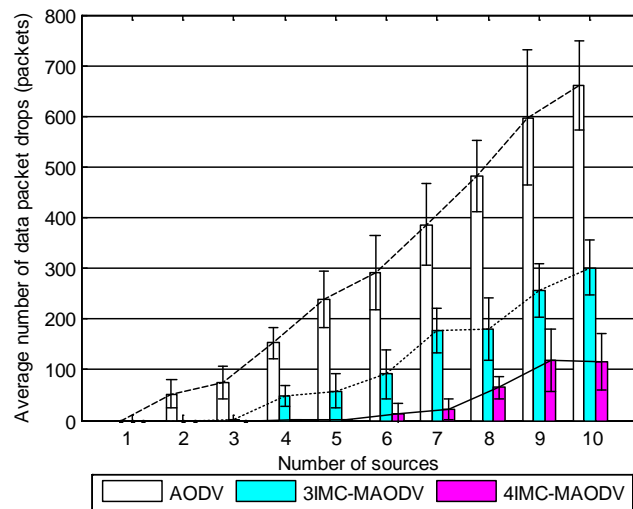
ภาพประกอบ 5-5 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทาง
กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

ภาพประกอบ 5-6 แสดงปริมาณงานจากแพกเก็ตข้อมูลโดยเฉลี่ยในมุมมองต่ออินเตอร์เฟซจากทั้ง 3 โพรโทคอล ซึ่งโพรโทคอล AODV ให้ความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเตอร์เฟซสูงที่สุดในช่วง 1 ถึง 5 โหนดต้นทางและมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น ขณะที่โพรโทคอล 3 IMC-MAODV จะให้ค่าสูงกว่า 4IMC-MAODV ที่ 1 ถึง 5 โหนดต้นทาง และไม่มี ความแตกต่างทางสถิติที่ 7 ถึง 10 โหนดต้นทางระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยโพรโทคอลที่นำเสนอมีแนวโน้มจะให้ความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเตอร์เฟซสูงกว่า AODV เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 9 โหนด



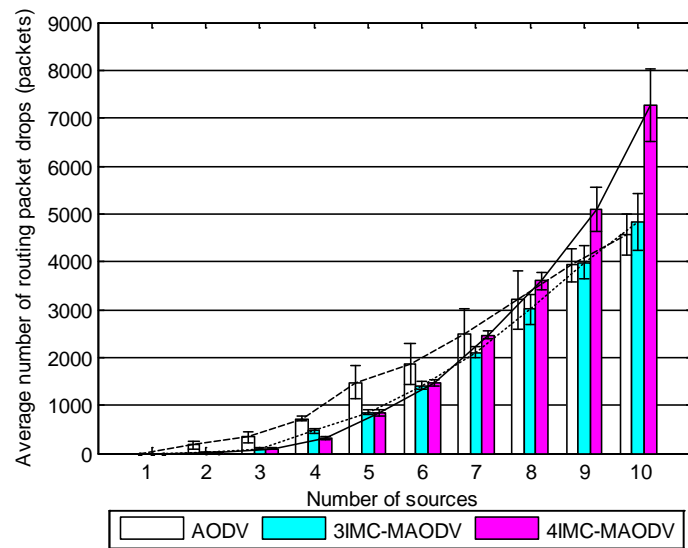
ภาพประกอบ 5-6 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของโหนดปลายทางจากทุกโหนดต้นทางกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

ภาพประกอบ 5-7 แสดงจำนวนการละทิ้งแพกเก็ตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล โดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบเกิดการละทิ้งแพกเก็ตข้อมูลสูงสุดรองลงมาคือ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ ซึ่งการละทิ้งแพกเก็ตข้อมูลถูกแสดงด้วยสามตัวบ่งชี้คือ NRTE จากกรณีโพรโทคอลไม่สามารถหาเส้นทางมารองรับการส่งข้อมูลได้และการชนกันของแพกเก็ตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT โดยรายละเอียดจะอยู่ในส่วนถัดไป

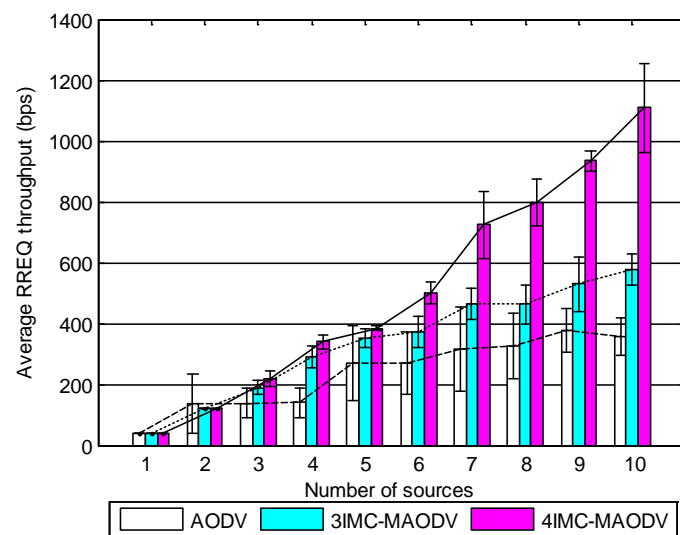


ภาพประกอบ 5-7 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

ภาพประกอบ 5-8 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล ซึ่งช่วงแรกโพรโทคอล AODV ดันแบบเกิดการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางสูงสุด แต่เมื่อจำนวนโหนดต้นทางสูงกว่า 9 โหนด โพรโทคอล 4IMC-MAODV จะเกิดการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางสูงสุด โดยจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางที่สูงที่สุดนี้เกิดจากการส่งแพ็คเกจจำนวนมากพร้อมกันแต่จะถูกรับไว้แค่แพ็คเกจที่มีกำลังรับสูงสุดแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT ดังคำอธิบายในบทที่ 2 การละทิ้งแพ็คเกจชนิดนี้ไม่ได้มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการจัดเส้นทาง แต่ในแง่ของปริมาณการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางจะสูงขึ้นอย่างมากทำให้ดูเหมือนว่า 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะต่ำกว่าสองโพรโทคอลที่เหลือแต่ความเป็นจริงไม่ได้เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก 4IMC-MAODV สามารถส่งแพ็คเกจจัดเส้นทางออกมาในเครือข่ายได้สูงกว่าอีกสองโพรโทคอลทำให้อีกสองโพรโทคอลมีโอกาสที่จะรับแพ็คเกจจัดเส้นทางพร้อมกันจนเกิดการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT มีจำนวนสูงกว่า แต่ในแง่ของปริมาณงานจากแพ็คเกจจัดเส้นทางที่ส่งสำเร็จจะมีสูงกว่า ดังภาพประกอบ 5-9 แสดงปริมาณงานที่รับได้โดยเฉลี่ยของแพ็คเกจร้องขอเส้นทางซึ่งโพรโทคอล 4IMC-MAODV ทำได้สูงกว่าอีกสองโพรโทคอลเมื่อจำนวนโหนดต้นทางสูงกว่า 5 โหนด โดยจะเชื่อมโยงไปยังสาเหตุของการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์และอธิบายในส่วนถัดไป

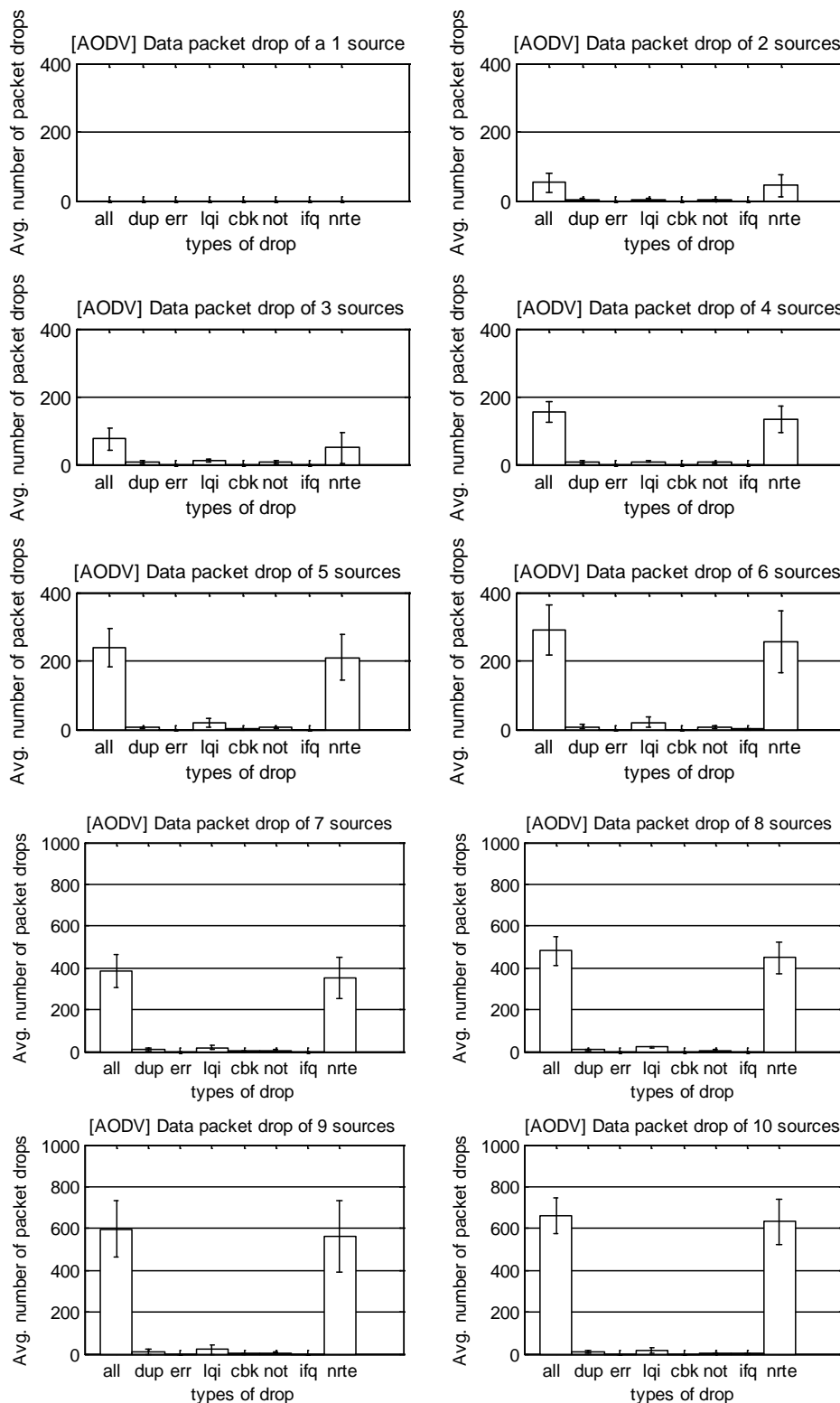


ภาพประกอบ 5-8 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

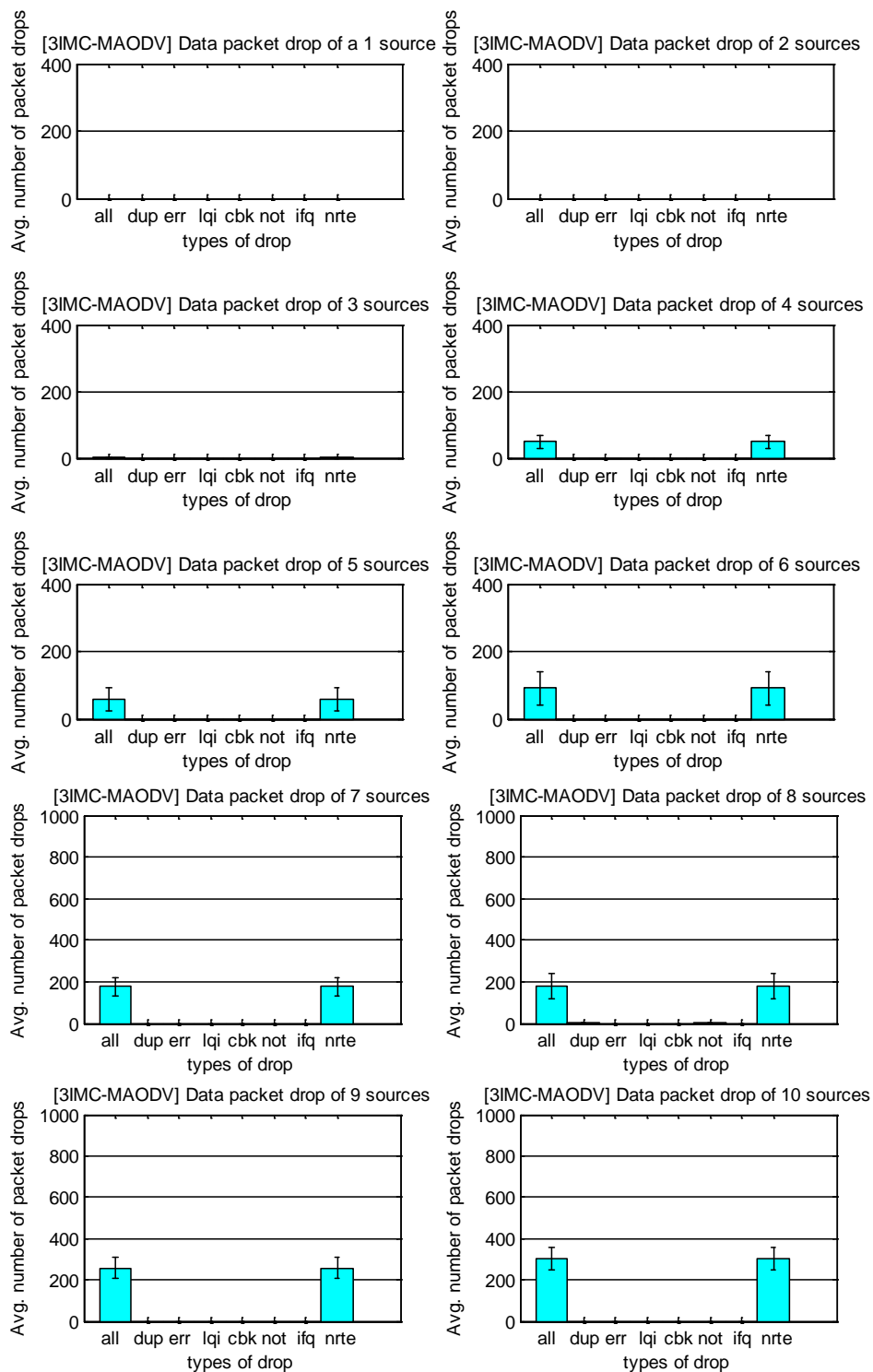


ภาพประกอบ 5-9 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของแพคเกจร้องขอเส้นทางกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

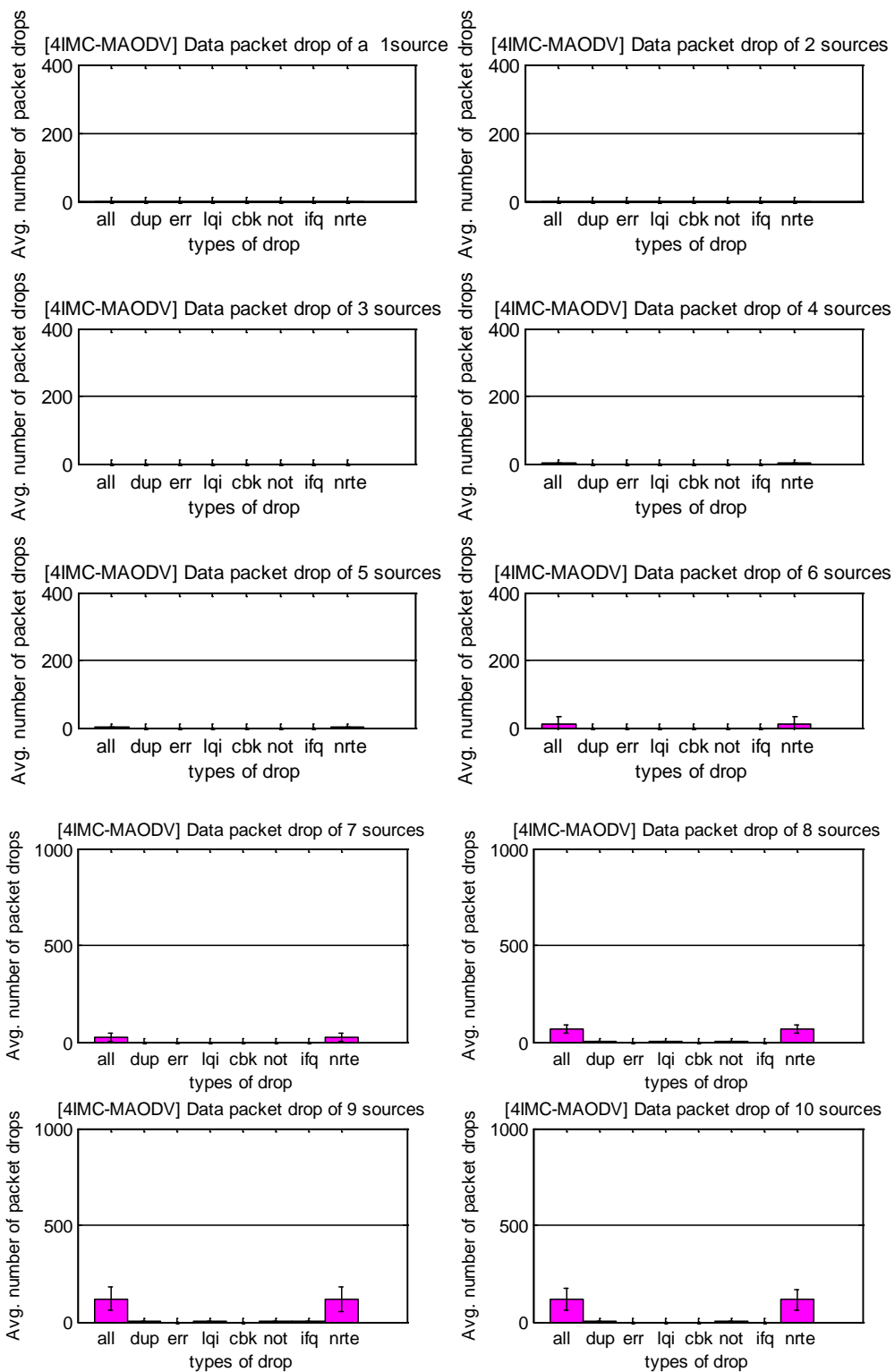
ภาพประกอบ 5-10 ถึงภาพประกอบ 5-12 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโปรโตคอล AODV ต้นแบบ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ การวิเคราะห์จะอยู่ในส่วนถัดไป



ภาพประกอบ 5-10 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโปรโตคอล AODV
 ต้นแบบที่แต่ละระดับโหนดต้นทางกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

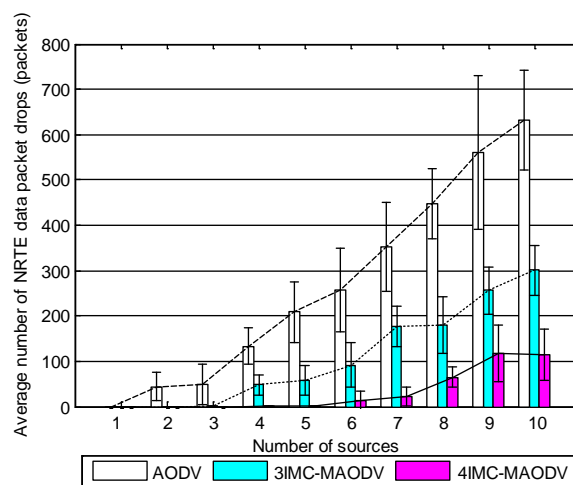


ภาพประกอบ 5-11 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโปรโตคอล 3IMC-MAODV ที่แต่ละระดับโหนดต้นทางกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

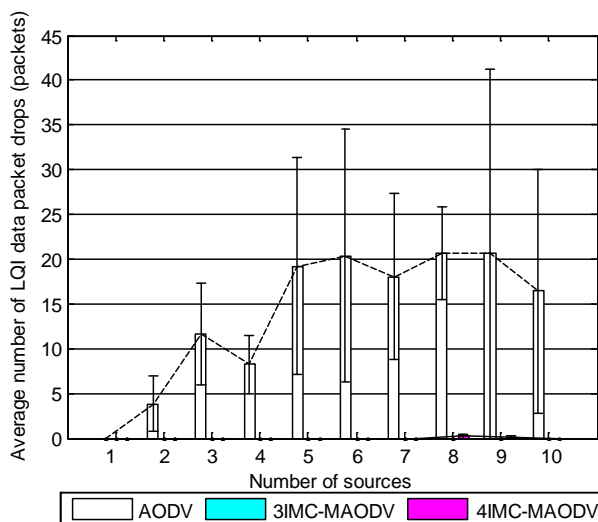


ภาพประกอบ 5-12 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแยกประเภทของโปรโตคอล 4IMC-MAODV ที่แต่ละระดับโหนดต้นทางกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

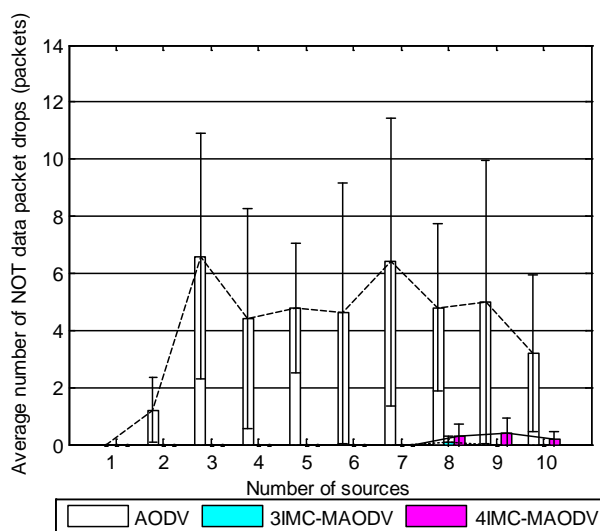
สิ่งที่ทำให้สมรรถนะในช่วงการส่งแพ็คเกจข้อมูลต่ำลงของโพรโทคอล AODV ต้นแบบคือการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE หากพิจารณาภาพประกอบ 5-13 จะทราบว่า AODV ต้นแบบมีจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE สูงสุด ขณะที่ 4IMC-MAODV ต่ำที่สุดจากทั้งสาม โพรโทคอลเพราะมีสอง Common interface และสอง Common channel จึงสามารถลดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลจากระบวนการจัดเส้นทางได้ดีกว่า AODV และ 3IMC-MAODV เมื่อพิจารณาแพ็คเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งจากการชนกันของข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI จากภาพประกอบ 5-14 และตัวบ่งชี้ NOT จากภาพประกอบ 5-15 มีการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยสองตัวบ่งชี้ในโพรโทคอล AODV ต้นแบบสูงที่สุด ซึ่งแทบจะไม่เกิดขึ้นเลยในโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV โดยการชนกันของข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการ CSMA/CA สุ่มเวลาถอยได้เวลาเดียวกันทำให้ส่งแพ็คเกจข้อมูลออกมาพร้อมกัน [20, 23–25] ซึ่งไม่ได้เป็นการชนกันของแพ็คเกจจากปัญหาโหนดซ่อนเนื่องจากระยะการตรวจจับสัญญาณพาหะนั้นครอบคลุมโหนดทั้งหมด โดยเกิดขึ้นในโพรโทคอล AODV เนื่องจากแพ็คเกจทุกชนิดทั้ง RREQ, RREP และ Data แพ็คเกจของ AODV ถูกส่งในช่องสัญญาณเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการชนกันของแพ็คเกจเหล่านี้กับแพ็คเกจข้อมูลจึงสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ ขณะที่ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะเกิดขึ้นระหว่างแพ็คเกจข้อมูลด้วยกันเท่านั้น เนื่องจาก RREQ และ RREP แพ็คเกจจะถูกส่งด้วยช่องสัญญาณอื่น ซึ่งการชนกันของแพ็คเกจข้อมูลจะเกิดในกรณีมีโหนดปลายทางเป็นโหนดร่วมเท่านั้นดังที่ได้สรุปไว้ในหัวข้อ 4.3.3 โดยปริมาณแพ็คเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งในการจำลองนี้ยังไม่มากพอจนเกิดการชนกันของแพ็คเกจข้อมูลอย่างชัดเจนในโพรโทคอลที่นำเสนอ



ภาพประกอบ 5-13 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

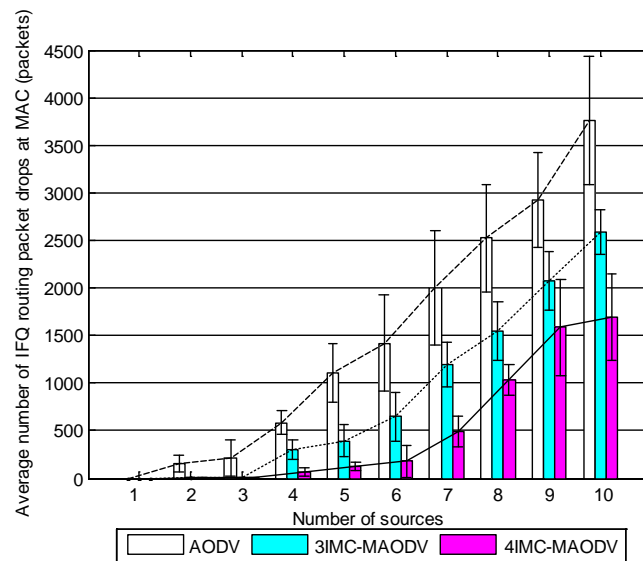


ภาพประกอบ 5-14 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว



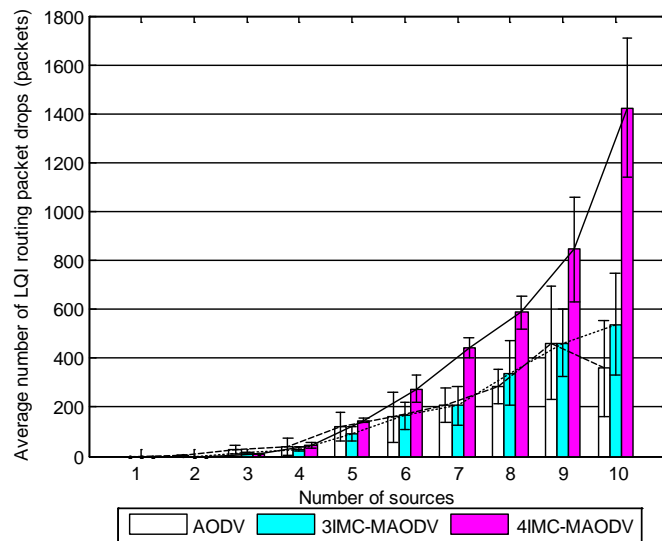
ภาพประกอบ 5-15 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

การละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางส่วนใหญ่ของโพรโทคอล AODV มาจากกรณีมีแพคเกจจัดเส้นทางค้างอยู่ในบัฟเฟอร์แล้วไม่ได้ส่งออกไปซึ่งเกิดการสะสมแพคเกจจนล้นบัฟเฟอร์ ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ขึ้น MAC ดังภาพประกอบ 5-16 โดยเป็นผลกระทบจากจำนวนโหนดต้นทางที่เพิ่มขึ้นทำให้การแย่งชิงช่องสัญญาณสูงขึ้นตามไปด้วยจึงเกิดเหตุการณ์ที่ช่องสัญญาณไม่ว่างให้ส่งแพคเกจออกไปจัดเส้นทางและเกิดการสะสมจนล้นบัฟเฟอร์

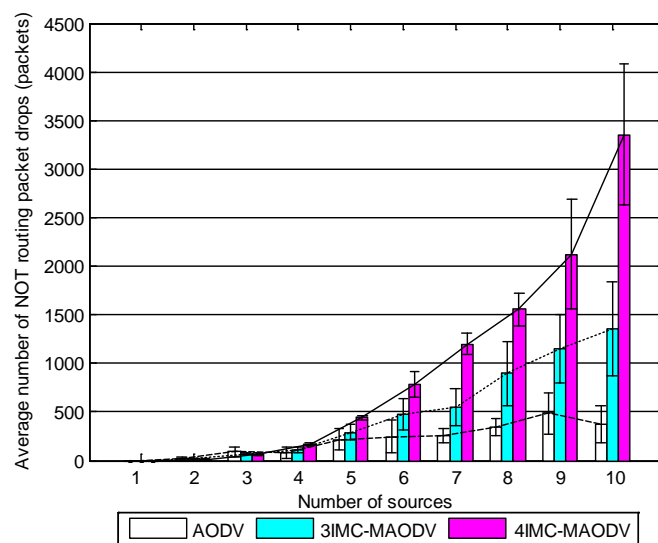


ภาพประกอบ 5-16 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

การละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางรองลงมาจะถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT โดยการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางที่ถูกแสดงด้วยสองตัวบ่งชี้นี้ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการจัดเส้นทางแม้ว่าในภาพประกอบ 5-17 และภาพประกอบ 5-18 โพรโทคอล 4IMC-MAODV มีการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT สูงที่สุด แต่การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลจากกระบวนการจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE กลับมีค่าต่ำสุดในภาพประกอบ 5-13 ดังนั้นส่วนที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการจัดเส้นทางจะมาจากการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ซึ่ง 4IMC-MAODV ให้ค่าต่ำที่สุด โดยเชื่อมโยงกับปริมาณงาน โดยเฉลี่ยของแพ็คเกจร้องขอเส้นทางในภาพประกอบ 5-9 ที่ 4IMC-MAODV ให้ค่าสูงสุด สุกท้ายเมื่อเกิดการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางจนกระบวนการจัดเส้นทางล้มเหลวก็จะไม่มีเส้นทางมารองรับการส่งข้อมูลก่อให้เกิดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดย 4IMC-MAODV มีจำนวนการละทิ้งต่ำกว่าโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ AODV ต้นแบบ



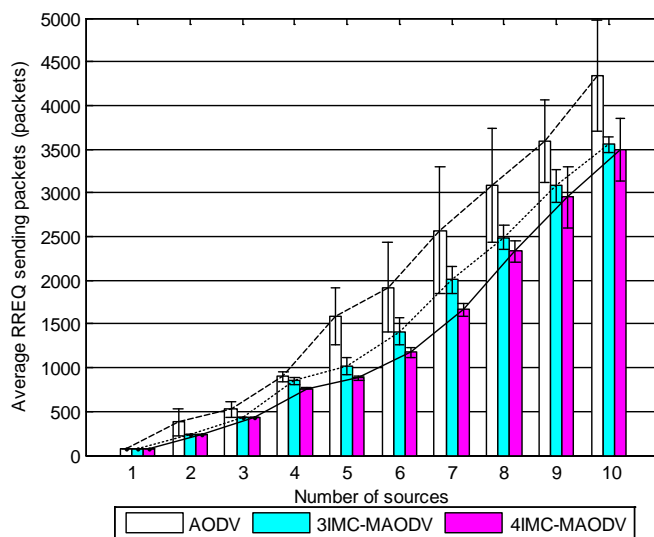
ภาพประกอบ 5-17 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว



ภาพประกอบ 5-18 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

พิจารณาจำนวนการส่งแพ็คเกจร้องขอเส้นทาง RREQ ที่ Network layer ในภาพประกอบ 5-19 โพรโทคอล AODV มีแนวโน้มความต้องการส่งแพ็คเกจ RREQ สูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอเนื่องจากความล้มเหลวในการจัดเส้นทางสูงกว่าทำให้โหนดต้นทางยังคงอยู่ในกระบวนการที่ต้องส่งแพ็คเกจ RREQ เพื่อหาเส้นทางมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากทำการพิจารณาที่ชั้น MAC โพรโทคอล AODV จะมีปริมาณการส่ง

RREQ แพกเกตต่ำกว่าเนื่องจากจะเกิดการละทิ้งแพกเกตถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC เป็นจำนวนมากดังที่ได้พิจารณาในส่วนก่อนหน้า



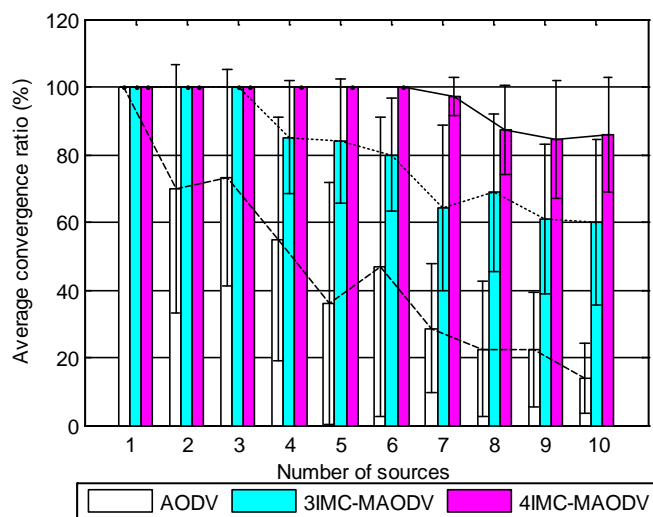
ภาพประกอบ 5-19 จำนวนการส่งแพกเกตร้องขอเส้นทาง RREQ โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

5.2.3.2 สมรรถนะของระบบควบคุม

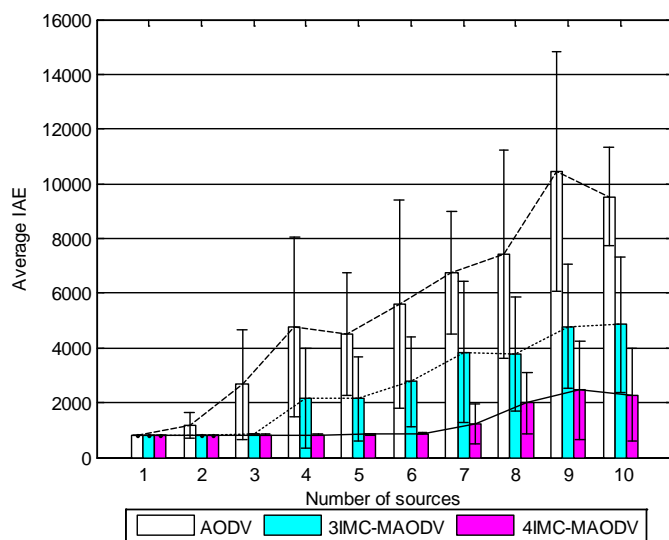
ภาพประกอบ 5-20 แสดงอัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล ซึ่งโพรโทคอล AODV ดั้งเดิมสามารถให้อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยได้ 100 % กรณีมีโหนดต้นทางไม่เกิน 3 โหนด ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV สามารถให้อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยได้ 100 % เมื่อมีโหนดต้นทางไม่เกิน 5 โหนดและสุดท้ายโพรโทคอล 4IMC-MAODV สามารถให้อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยได้ 100 % จนถึง 10 โหนด ซึ่งการเข้าสู่สภาวะคงตัวจะขึ้นอยู่กับารับแพกเกตข้อมูลของโหนดปลายทางที่ถูกส่งมาเพื่อทำการป้อนกลับเข้าไปในระบบควบคุมหากแพกเกตเกิดการสูญหายก็จะไม่มีข้อมูลไปใช้ปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุมทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ โดยได้พิจารณาไปแล้วในหัวข้อ 5.2.2.1 ที่โพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงที่สุดรองลงมาคือ 3IMC-MAODV และ AODV ดั้งเดิมตามลำดับ ซึ่งอัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยจะให้สมรรถนะในทำนองเดียวกัน

ภาพประกอบ 5-21 แสดงค่าความผิดพลาดสะสม IAE โดยเฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 โพรโทคอล ซึ่งกรณีมีโหนดต้นทางเพียงโหนดเดียวผลที่ได้จากทั้งสามโพรโทคอลไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าโพรโทคอล AODV ดั้งเดิมให้สมรรถนะด้อยที่สุดเนื่องจากค่าความผิดพลาดสะสมสูงกว่าอีกสองโพรโทคอลเพราะเกิดการสูญ

หายของแพกเกตข้อมูลที่จะนำมาใช้ปรับปรุงระบบสมรรถนะควบคุมสูงกว่าอีกสองโปรโตคอลที่เหลือ ขณะเดียวกันโปรโตคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะดีที่สุด โดยค่าความผิดพลาดสะสมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่ง-รับแพกเกตข้อมูลดังที่ได้พิจารณาไปแล้วในหัวข้อ 5.2.2.1 เช่นเดียวกัน หากความสามารถในการส่ง-รับแพกเกตข้อมูลสูงค่าความผิดพลาดสะสมโดยเฉลี่ยก็จะต่ำ



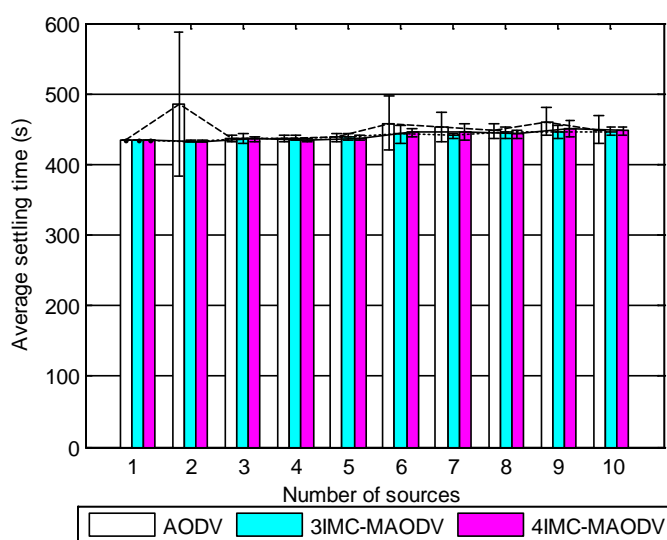
ภาพประกอบ 5-20 อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว



ภาพประกอบ 5-21 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

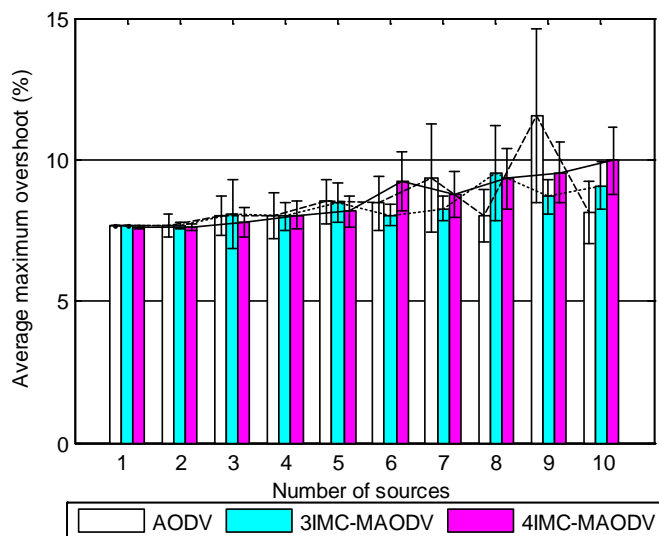
ภาพประกอบ 5-22 แสดงช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอล จากภาพเป็นช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยจากกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เท่านั้น ซึ่งช่วงเวลาเข้าที่โดย

เฉลี่ยจากทั้งสามโพรโทคอลไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนทางสถิติ แต่จะมีบางกรณีเช่นที่ 2 โหนด ต้นทาง โพรโทคอล AODV ต้นแบบให้ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอลอื่นจากสาเหตุที่ บางการจำลองระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าทำให้ค่าเฉลี่ยรวมเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับ ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยในระบบควบคุมที่ไม่มีระบบสื่อสารไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งอยู่ที่ 402 วินาทีจากหัวข้อ 2.2.2 กับผลจากการจำลองนี้ทั้งสามโพรโทคอลให้ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยประมาณ 432 วินาทีซึ่งช้ากว่าระบบควบคุมที่ไม่มีระบบสื่อสารไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้องประมาณ 30 วินาที เพราะการส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สายมีความล่าช้ามากกว่ารวมทั้งการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับ ช่วงเวลาชักตัวอย่าง จึงมีความแตกต่างจากระบบสายที่เป็นการส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง ส่งผลให้ ระบบที่มีช่วงเวลาชักตัวอย่างให้ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยช้าลง



ภาพประกอบ 5-22 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

ภาพประกอบ 5-23 แสดงค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลในกรณีที่ ระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เท่านั้น ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยจากระบบควบคุมที่ไม่มี ระบบสื่อสารไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้องจากบทที่ 2 ให้ค่าอยู่ที่ประมาณ 2.3 % และจากผลการจำลองนี้ หากพิจารณาจากช่วงความเชื่อมั่น ทั้งสามโพรโทคอลให้สมรรถนะของค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยไม่ แตกต่างกัน โดยที่หนึ่งโหนดต้นทางทั้งสามโพรโทคอลให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7.5 % ซึ่งสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีระบบสื่อสารไร้สายเข้ามาเกี่ยวข้อง จากบทความ [26] อุณหภูมิ สูงสุดที่ยอมรับได้ซึ่งจะทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกสบายคือ 26 องศาเซลเซียส ค่าพุ่งเกินสูงสุดจากการ จำลองนี้อยู่ที่ประมาณ 15 % หรือประมาณ 24.15 องศาเซลเซียสซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ แต่กรณีที่ ค่าพุ่งเกินสูงสุดมากกว่าประมาณ 24 % ค่าอุณหภูมิจะเกินค่าที่ยอมรับได้ที่ 26 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 5-23 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล
กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

5.2.4 สรุปผลการจำลอง

ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุม โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถมีจำนวนโหนดต้นทางสูงสุดในระยะหนึ่งฮอปได้ 3 โหนดเท่านั้นจึงจะได้สมรรถนะของระบบควบคุมที่ยอมรับได้พิจารณาจากอัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยที่ 100 % ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV รองรับได้ 5 โหนดต้นทาง ส่วนโพรโทคอล 4IMC-MAODV ยังคงรองรับได้ถึง 10 โหนด ส่วนของสมรรถนะของระบบสื่อสารจะขอชี้แจงในเรื่องปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ทั้ง 3 โพรโทคอลทำได้ โดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 125 325 450 บิตต่อวินาที ตามลำดับ ต่อมาเมื่อพิจารณาปริมาณงานที่ได้ในมุมมองต่ออินเทอร์เน็ตเฟส แม้โพรโทคอลที่นำเสนออาจจะทำให้ความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเทอร์เน็ตต่ำกว่าโพรโทคอล AODV แต่มีแนวโน้มจะให้ค่าที่สูงกว่าเมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 9 โหนดและหากเชื่อมโยงไปยังสมรรถนะของระบบควบคุมโพรโทคอลที่นำเสนอยังคงให้สมรรถนะดีกว่า AODV เมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น สุดท้ายการวิเคราะห์การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูล โพรโทคอล AODV ต้นแบบส่วนใหญ่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ซึ่ง 3IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้นี้ลงมาได้ในระดับหนึ่งขณะที่ 4IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งแพ็คเกจจากสาเหตุนี้ลงได้อย่างมากซึ่งเป็นประโยชน์จากการใช้งานสอง Common interface และสอง Common channel ต่อมาในส่วนของการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT เกิดขึ้นน้อยในโพรโทคอลที่นำเสนอเนื่องจากการแยกช่องสัญญาณสำหรับใช้ส่งแพ็คเกจ

ข้อมูลให้แตกต่างจากช่องสัญญาณที่ใช้ส่ง RREQ แพกเกตทำให้สามารถลดการละทิ้งแพกเกต ข้อมูลจากการละทิ้งแพกเกตที่แสดงด้วยสองตัวบ่งชี้นี้ได้ดีกว่าโพรโทคอล AODV

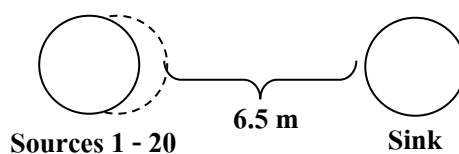
5.3 การศึกษาปริมาณงานสูงสุด

5.3.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

สืบเนื่องจากการจำลอง 5.2 ผู้วิจัยยังไม่สามารถทราบอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด จนถึงค่าคงที่ของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV กรณีใช้ช่วงการชักตัวอย่างที่ ช่วงเวลาขึ้นส่วนสืบได้ การจำลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV เพื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะที่ได้จาก โพรโทคอล AODV ต้นแบบในเรื่องของปริมาณงานสูงสุดจากการจำลอง 5.2

5.3.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้ใช้เครื่องมือจำลอง NS2 ทำการจำลองเฉพาะระบบเครือข่ายเซนเซอร์ ไร้สายเท่านั้น ลักษณะการวางโหนดแสดงดังภาพประกอบ 5-24 ทดสอบสำหรับการสื่อสารใน ระยะหนึ่งฮอปและทำการเปลี่ยนแปลงโหนดต้นทางจาก 1 ถึง 20 โหนดแล้วทำการเพิ่มจำนวน โหนดต้นทางครั้งละหนึ่งโหนด ทดสอบในกรณีมีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียว โดยมีสาเหตุใน การวางโหนด เวลาที่โหนดต้นทางเริ่มต้นส่งข้อมูล การเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดต้นทาง เช่นเดียวกับการจำลอง 5.2 และกำหนดให้โพรโทคอลจัดเส้นทางส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอป เท่านั้น พร้อมทั้งพิจารณาตัวชี้วัดเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.1 ยกเว้นตัวชี้วัดในมุมมองระบบควบคุม จะไม่ถูกพิจารณาในการจำลองนี้เนื่องจากต้องการทราบเพียงปริมาณงานสูงสุดที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ทำได้ พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 5.2 แสดง ดังตาราง 5-2



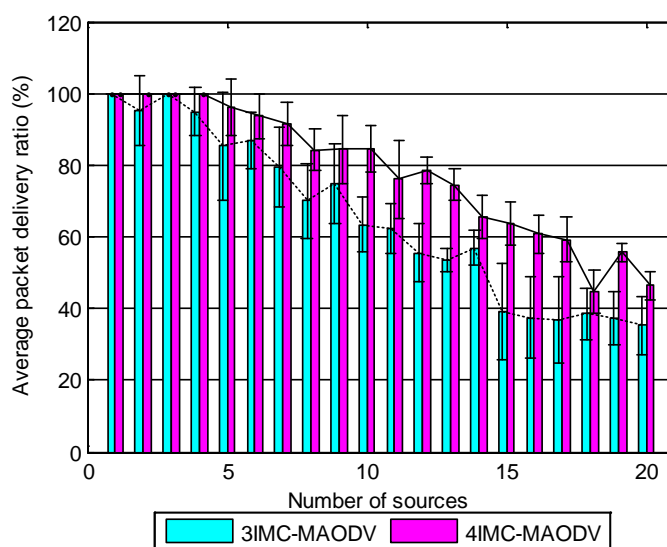
ภาพประกอบ 5-24 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.3

ตาราง 5-2 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.3

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-20 โหนด

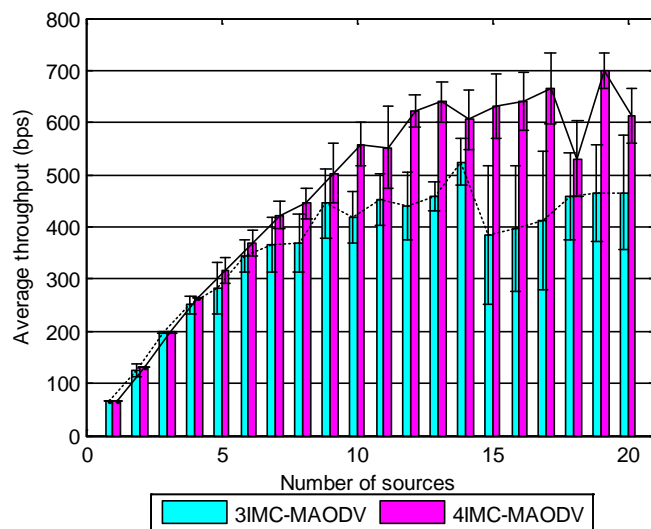
5.3.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

ภาพประกอบ 5-25 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับซึ่งทั้งสองโพรโทคอลจะให้สมรรถนะต่ำลงเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มสูงขึ้น จากตัวชี้วัดนี้ 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงกว่า 3IMC-MAODV หลังจาก 10 โหนดต้นทางเป็นต้นไปเนื่องจากการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลที่ลดลง เพราะการใช้จำนวนอินเทอร์เน็ตเฟสและช่องสัญญาณที่มากกว่าในกระบวนการจัดเส้นทางโดยจะอธิบายรายละเอียดในส่วนถัดไป

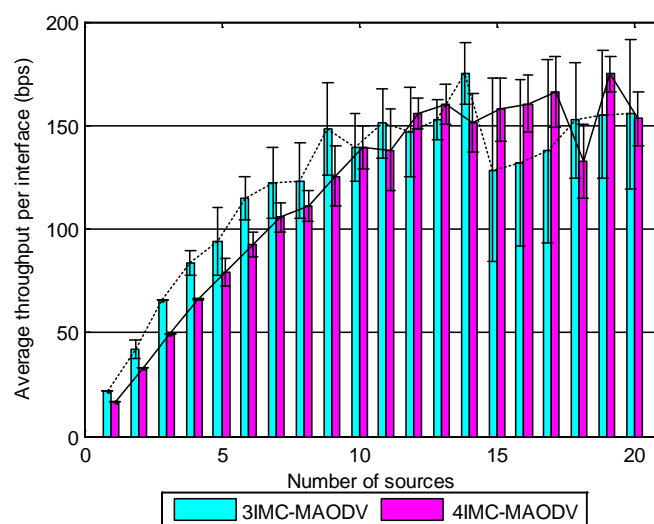


ภาพประกอบ 5-25 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV

ภาพประกอบ 5-26 แสดงปริมาณงานจากแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ โดย 3IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 450 บิตต่อวินาทีซึ่งค่อนข้างคงที่เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 8 โหนดเป็นต้นไป ส่วน 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 650 บิตต่อวินาทีและค่อนข้างคงที่เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 12 โหนดเป็นต้นไป ต่อมาภาพประกอบ 5-27 แสดงปริมาณงานจากแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยต่ออินเทอร์เน็ตเฟสของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ ซึ่งโพรโทคอล 3IMC-MAODV ให้ค่าสูงกว่า 4IMC-MAODV ที่ 1 ถึง 4 และที่ 6 โหนดต้นทาง โดยที่ 5 และ 7 ถึง 20 โหนดต้นทางจะให้ค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

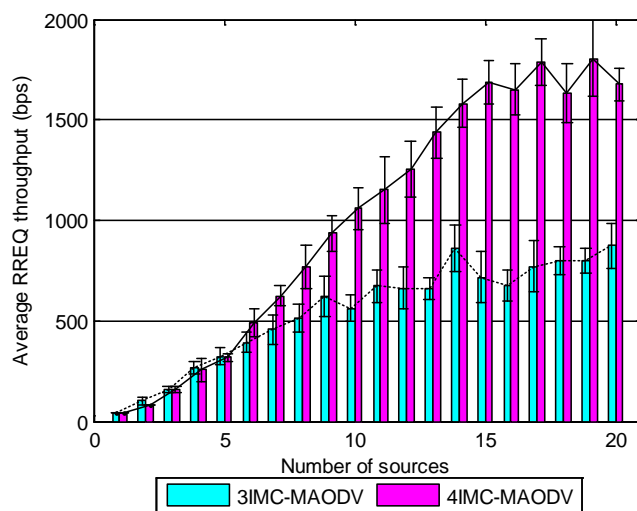


ภาพประกอบ 5-26 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV



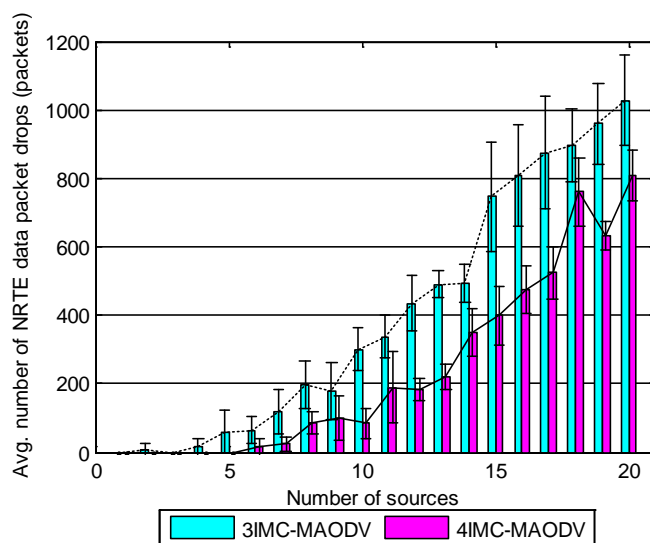
ภาพประกอบ 5-27 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV

ภาพประกอบ 5-28 แสดงปริมาณงานของแพกเกต RREQ โดยเฉลี่ยของทั้งสองโปรโตคอล โดย 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานของแพกเกต RREQ โดยเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 1800 บิตต่อวินาทีซึ่งมากกว่า 3IMC-MAODV ที่ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 850 บิตต่อวินาทีถึงสองเท่า โดยสามารถบ่งบอกถึงโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในกระบวนการจัดเส้นทางนั้นมีสูงกว่า



ภาพประกอบ 5-28 ปริมาณงานของแพกเกต RREQ โดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV

ภาพประกอบ 5-29 แสดงจำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูล โดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของทั้งสองโปรโตคอล ซึ่ง 3IMC-MAODV เริ่มมีการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE เมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 1 โหนดและจำนวนการละทิ้งแพกเกตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น ขณะที่ 4IMC-MAODV เริ่มมีการละทิ้งแพกเกตเมื่อจำนวนโหนดต้นทางมากกว่า 5 โหนดและจำนวนการละทิ้งแพกเกตจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่จะเพิ่มในปริมาณที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 3IMC-MAODV



ภาพประกอบ 5-29 จำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV

5.3.4 สรุปผลการจำลอง

ผลการจำลองในหัวข้อนี้ทำให้ทราบว่า โพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะในระบบสื่อสารสูงกว่า 3IMC-MAODV โดยปริมาณงานสูงสุดของแพ็คเกจข้อมูลที่ 4IMC-MAODV และ 3IMC-MAODV ให้ได้กรณีใช้ช่วงซักรั่วอย่างในช่วงเวลาขึ้นส่วนลิบ อยู่ที่ประมาณ 650 บิตต่อวินาที และ 450 บิตต่อวินาที ตามลำดับ โดยจากผลการจำลอง 5.2 โพรโทคอล AODV ต้นแบบให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 125 บิตต่อวินาทีซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าหลายเท่าตัว โดยค่านี้แสดงถึงความสามารถในการรองรับปริมาณข้อมูลจากโหนดต้นทางได้มากขึ้นของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV แต่หากพิจารณาในส่วนของปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซระหว่างสองโพรโทคอลยังไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนทางสถิติ เมื่อพิจารณาการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลที่เกิดขึ้น สมรรถนะที่ได้ต่ำลงของทุกโพรโทคอลยังคงเกิดจากการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลที่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยโพรโทคอล 4IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลได้ดีกว่า 3IMC-MAODV

5.4 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

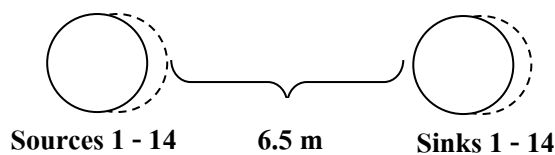
5.4.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบและโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีใช้งานบน WSANs ในสถานการณ์ที่เครือข่ายประกอบด้วยหลายโหนดต้นทางและปลายทาง เพื่อระบุและศึกษาสาเหตุของการสูญเสียข้อมูลภายในเครือข่ายมีความแตกต่างกับกรณีหนึ่งโหนดปลายทางหรือไม่ โดยสันนิษฐานว่าจำนวนโหนดปลายทางมีผลต่อจำนวนโอเวอร์เฮดในกระบวนการจัดเส้นทาง จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของระบบลดลงต่ำกว่ากรณีหนึ่งโหนดปลายทาง

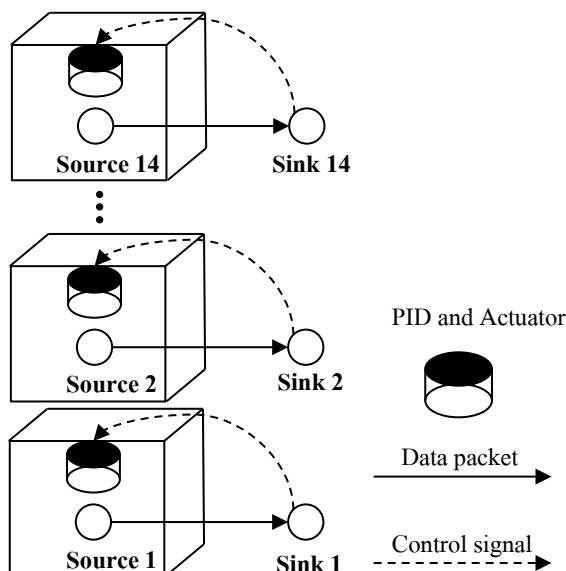
5.4.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้ใช้เครื่องมือจำลองระบบ PiccSIM โดยลักษณะการส่งข้อมูลในการจำลองนี้จะเป็นกรณีโหนดทำการส่งข้อมูลให้โหนดที่แตกต่างกัน กำหนดให้โหนดต้นทางและโหนดปลายทางมีลักษณะเป็นคู่การสื่อสาร (Communication pairs) คือ โหนดต้นทาง 1 ส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนดปลายทาง 1 และ โหนดต้นทาง 2 ส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนดปลายทาง 2 ตามลำดับ ไปจนถึงคู่การสื่อสารที่ 14 ทำการเปลี่ยนแปลง 14 ระดับ แต่ละระดับจะเพิ่มครั้งละหนึ่งคู่การสื่อสาร ทั้งนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถใช้ได้ตามจำนวนคู่การสื่อสาร โดย 14 คู่การสื่อสารจะหมายความว่า มีช่องสัญญาณสำหรับใช้ส่งแพ็คเกจข้อมูล 14 ช่องสัญญาณ ซึ่งช่องสัญญาณที่แต่ละโหนดต้นทางใช้ในการส่งแพ็คเกจข้อมูลจะขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่ Receiving interface ของโหนดปลายทางแต่ละ

ตัวส่งได้โดยอาจจะเหมือนกันหรือแตกต่างกันก็ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.3.3 โดย 14 ช่องสัญญาณที่กล่าวมาจะไม่นับรวมช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการจัดเส้นทาง การจำลองนี้ศึกษาประโยชน์จากกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณที่จะแสดงสมรรถนะเมื่อโหนดถัดไปที่ทำการส่งข้อมูลให้ไม่ได้เป็นโหนดร่วม ช่องสัญญาณข้อมูลต่ำสุดที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถใช้ได้คือ 2 ช่องสัญญาณเนื่องจากกำหนดให้ช่องสัญญาณสำหรับส่งและรับใช้ช่องสัญญาณต่างกันในสถานะที่ไม่มีการส่งข้อมูล การจำลองนี้กำหนดให้โพรโทคอลจัดเส้นทางส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางหนึ่งฮอปเท่านั้นและส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนสืบต่อแพ็คเกจ พิจารณาตัวชี้วัดเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.1 ตำแหน่งและลักษณะการวางโหนดแสดงดังภาพประกอบ 5-30 ซึ่งการใช้งานสำหรับสภาพแวดล้อมจริงแสดงดังภาพประกอบ 5-31 คือกรณีที่โหนดต้นทางแต่ละตัวส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนดปลายทางที่แตกต่างกันในแต่ละคู่การสื่อสาร โดยระยะการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางแต่ละโหนดครอบคลุมถึงกันทั้งหมดทุกโหนด พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 5.2 แสดงดังตาราง 5-3



ภาพประกอบ 5-30 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.4



ภาพประกอบ 5-31 รูปแบบของการจำลองเมื่อถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง กรณีระบบมีโหนดปลายทางหลายโหนด

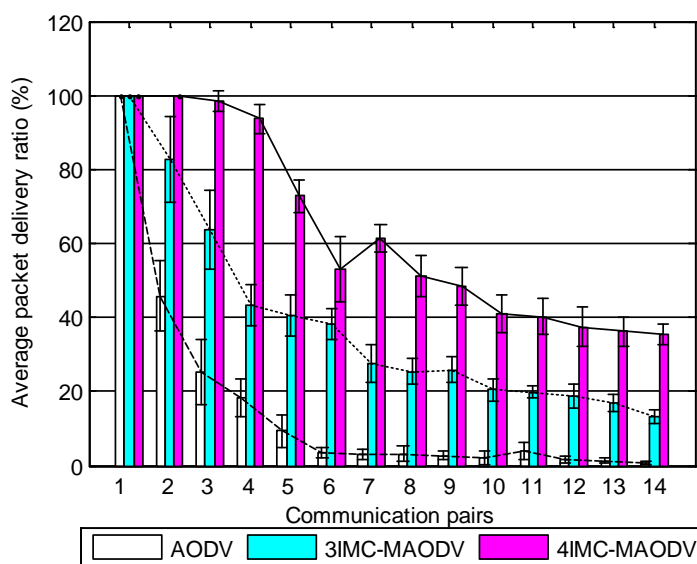
ตาราง 5-3 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.4

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-14 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-14 โหนด
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสำหรับโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	ทำการเปลี่ยนแปลงในช่วง 2-14 ช่องสัญญาณ

5.4.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

5.4.3.1 ผลจากสมรรถนะของระบบสื่อสาร

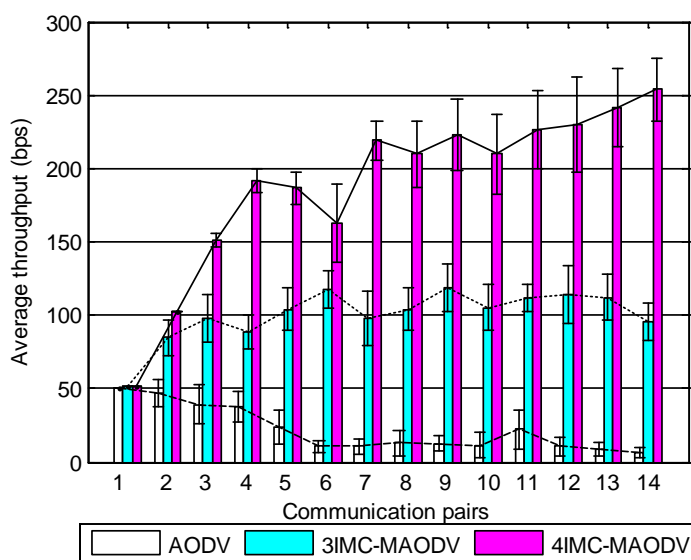
ภาพประกอบ 5-32 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางซึ่งโปรโตคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงที่สุดโดยจะต่ำลงเมื่อคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น รองลงมาคือโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ AODV ที่ให้สมรรถนะต่ำสุด โดยเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารมากกว่า 1 คู่ ซึ่งสมรรถนะที่ต่ำลงยังคงเกิดจากการล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ในส่วนถัดไป



ภาพประกอบ 5-32 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

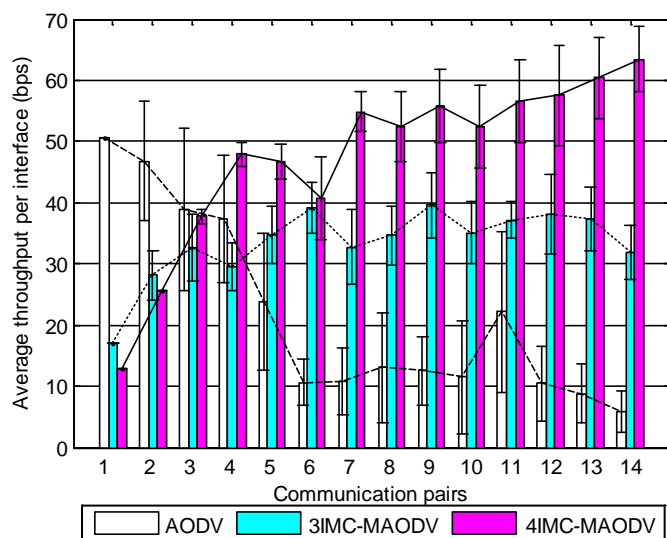
ภาพประกอบ 5-33 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ทุกโปรโตคอลทำได้จากภาพโปรโตคอล AODV ต้นแบบให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 50 บิตต่อวินาทีเท่านั้นและลดลงมากที่

ประมาณ 20 บิตต่อวินาทีเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้นขณะที่ 3IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดและคงที่ประมาณ 100 บิตต่อวินาที และสุดท้าย 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 250 บิตต่อวินาทีโดยยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งปริมาณงานที่ได้จากการจำลองนี้ต่ำกว่าปริมาณงานสูงสุดของแต่ละโพรโทคอลที่ได้จากการจำลอง 5.2 เนื่องจากจำนวนโหนดปลายทางเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มโหนดในการส่งต่อแพ็คเกจร้องขอเส้นทาง RREQ จากโหนดต้นทางแต่ละตัวไปโดยปริยาย หมายความว่าความหนาแน่นของข้อมูลและการแย่งชิงช่องสัญญาณในกระบวนการจัดเส้นทางจะเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลทำให้โอกาสที่โพรโทคอลจะจัดเส้นทางสำเร็จต่ำลงกว่าการจำลอง 5.2 ส่งผลให้เกิดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลจากกระบวนการจัดเส้นทางสูงขึ้นมากโดยจะวิเคราะห์คำอธิบายนี้ในส่วนถัดไป



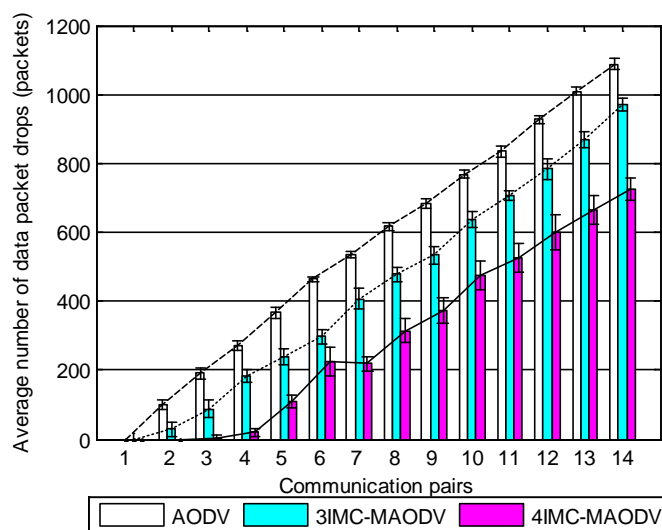
ภาพประกอบ 5-33 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

ภาพประกอบ 5-34 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทั้ง 3 โพรโทคอล โดย AODV ให้ความคุ้มค่าสูงสุดในช่วง 1 ถึง 2 คู่การสื่อสาร และ 3IMC-MAODV จะให้ค่าที่สูงกว่า AODV หลังจาก 5 คู่การสื่อสารเป็นต้นไป ส่วน 4IMC-MAODV จะให้ค่าที่สูงกว่า AODV ที่ 5 คู่การสื่อสารและสูงกว่า 3IMC-MAODV ที่ 7 คู่การสื่อสารเป็นต้นไป



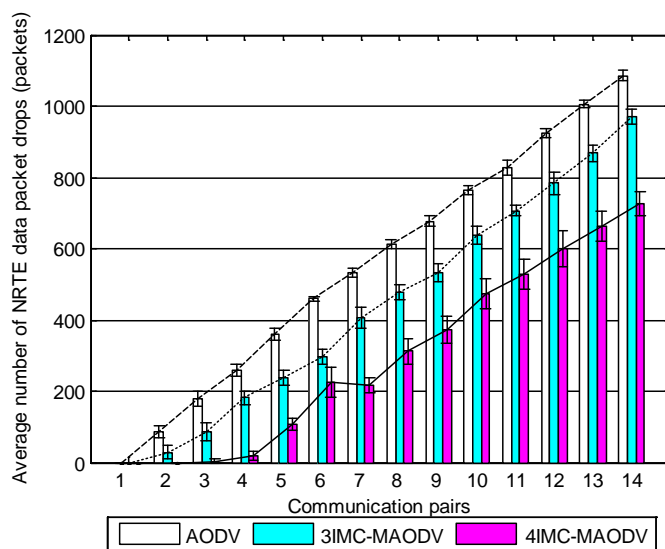
ภาพประกอบ 5-34 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนด
ปลายทางหลายโหนด

ภาพประกอบ 5-35 แสดงจำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยทั้งหมด จากภาพโพรโทคอล AODV ดันแบบเกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลสูงที่สุดรองลงมาคือโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ โดยจะทำการวิเคราะห์สาเหตุของการละทิ้งแพคเกจข้อมูลในส่วนถัดไป



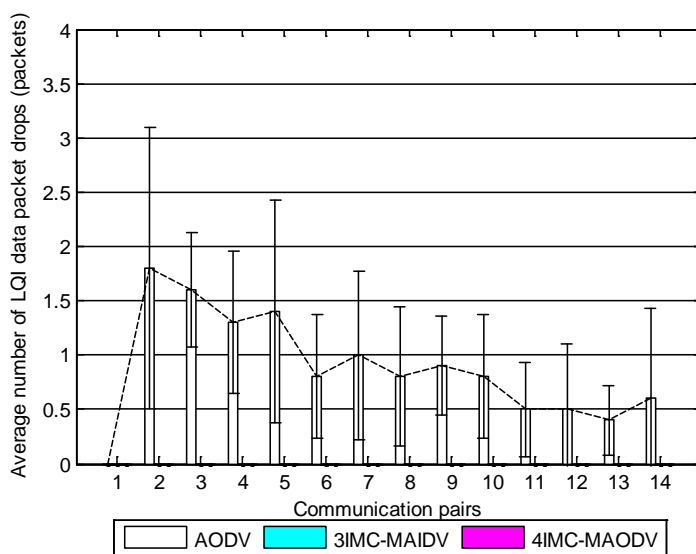
ภาพประกอบ 5-35 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล
กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

ภาพประกอบ 5-36 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ที่เกิดจากความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทาง โดยโพรโทคอล 4IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลได้ดีที่สุด

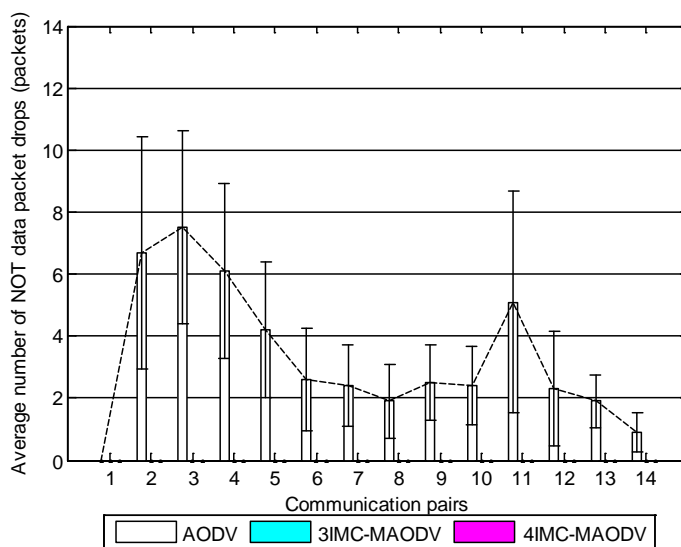


ภาพประกอบ 5-36 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

การจำลองนี้ไม่มีแพ็คเกจข้อมูลที่ถูกละทิ้งจากสาเหตุการชนกันของแพ็คเกจข้อมูล แสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT เกิดขึ้นในโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จากกรณีทั้งสองโพรโทคอลใช้ประโยชน์จากกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณได้ดังที่อธิบายในหัวข้อ 4.3.3 และเกิดขึ้นในโพรโทคอล AODV น้อยมากเช่นกันดังภาพประกอบ 5-37 และภาพประกอบ 5-38 เนื่องจากปริมาณการส่งแพ็คเกจข้อมูลของโพรโทคอล AODV ถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE เป็นจำนวนมากไปก่อนแล้ว

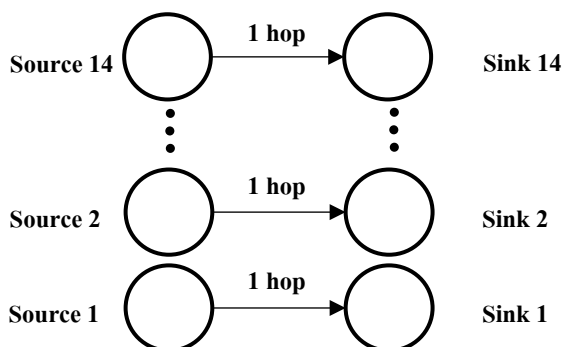


ภาพประกอบ 5-37 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด



ภาพประกอบ 5-38 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NOT ของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

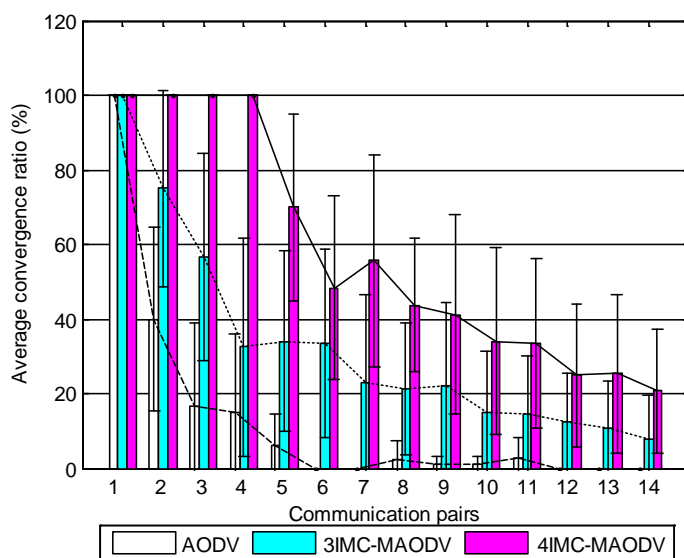
ลักษณะเส้นทางและจำนวนฮอปที่โหนดต้นทางแต่ละโหนดใช้ส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดปลายทางของแต่ละคู่การสื่อสารในการจำลองนี้แสดงดังภาพประกอบ 5-39 ซึ่งมีรูปแบบการส่งแพ็คเกจข้อมูลลักษณะนี้เท่านั้นเนื่องจากกำหนดให้โหนดต้นทางใช้เส้นทางที่มีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอป



ภาพประกอบ 5-39 ลักษณะเส้นทางที่แต่ละโหนดต้นทางใช้ส่งแพคเกจข้อมูล

5.4.3.2 ผลจากสมรรถนะของระบบควบคุม

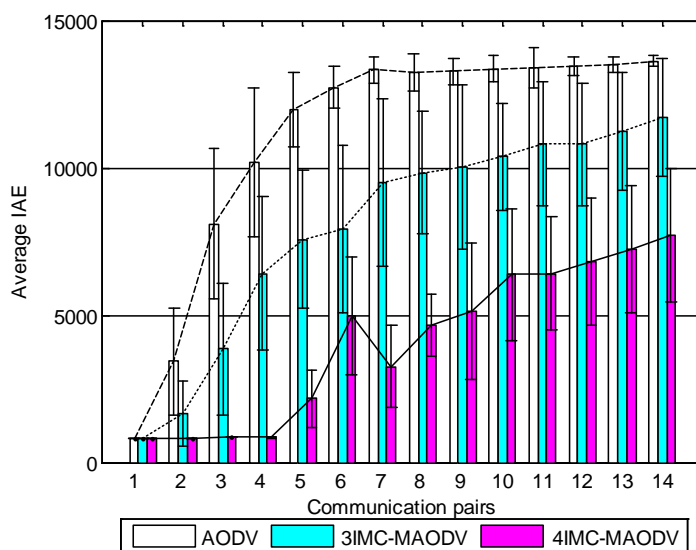
ภาพประกอบ 5-40 แสดงอัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล ซึ่งโพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถให้อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยได้ 100 % กรณีมีโหนดต้นทางไม่เกิน 1 คู่การสื่อสาร ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถให้อัตราการลู่เข้า 100 % กรณีมีคู่การสื่อสารไม่เกิน 2 และ 4 คู่ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง 5.2 ที่มีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียว การจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยที่ได้เมื่อจำนวนโหนดปลายทางเพิ่มขึ้นต่ำลงจากการเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 5-4



ภาพประกอบ 5-40 อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

ภาพประกอบ 5-41 แสดงค่า IAE โดยเฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 โพรโทคอลซึ่งกรณีมีคู่การสื่อสารเพียงหนึ่งคู่ ผลที่ได้จากทั้งสามโพรโทคอลไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้นจะ

เห็นได้อย่างชัดเจนว่าโปรโตคอล AODV ต้นแบบให้สมรรถนะด้อยที่สุดเนื่องจากค่าความผิดพลาดสะสมสูงกว่าอีกสองโปรโตคอลในขณะที่โปรโตคอลที่ให้สมรรถนะดีที่สุดคือ 4IMC-MAODV อันเนื่องมาจากอัตราการส่ง-รับแพคเกจข้อมูลที่สูงกว่า AODV และ 3IMC-MAODV ดังที่ได้พิจารณาไปแล้วในหัวข้อ 5.4.3.1

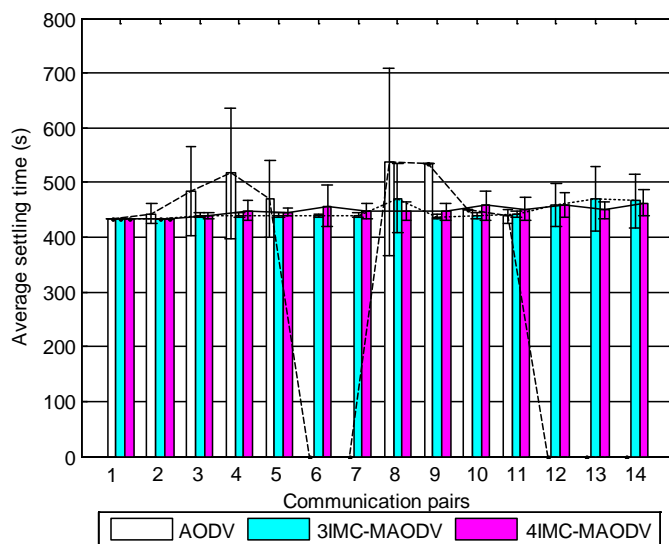


ภาพประกอบ 5-41 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

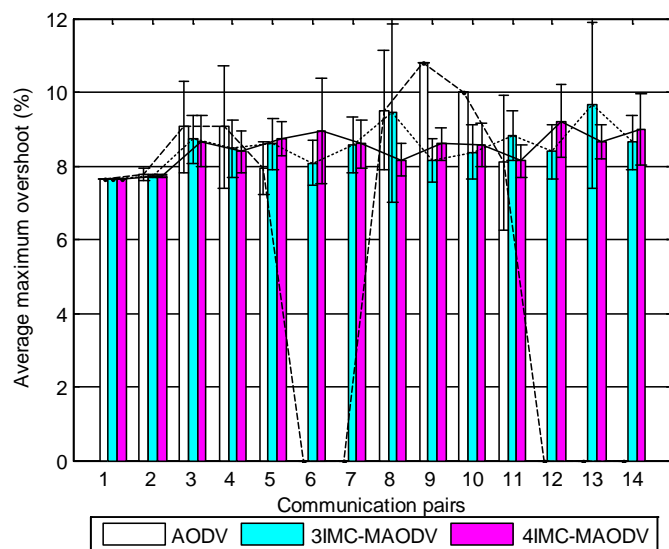
ภาพประกอบ 5-42 แสดงช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เท่านั้น ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยจากทั้งสามโปรโตคอล ซึ่งส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนทางสถิติ พิจารณาจากอัตราการลู่เข้าไม่มีค่าเป็นศูนย์ในแต่ละช่วงคู่การสื่อสาร แต่จะพบความแตกต่างอย่างชัดเจนของโปรโตคอล AODV ซึ่งไม่สามารถคำนวณช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยได้กรณีมีคู่การสื่อสารเท่ากับ 6 7 12 13 และ 14 คู่การสื่อสาร เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ที่ทุกคู่การสื่อสารในช่วงดังกล่าวจากอัตราการลู่เข้ามีค่าเป็นศูนย์ดังภาพประกอบ 5-40 เนื่องมาจากอัตราการส่ง-รับแพคเกจข้อมูลจากภาพประกอบ 5-32 มีค่าต่ำมาก ผลตอบสนองการควบคุมทั้งหมดที่ใช้โปรโตคอล AODV ในช่วงคู่การสื่อสารดังกล่าวจะไม่สามารถคำนวณช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยได้เนื่องจากระบบไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว ขณะที่โปรโตคอลที่นำเสนอไม่มีเหตุการณ์ลักษณะนี้เกิดขึ้น จึงมีช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยอยู่ประมาณ 430-440 วินาทีที่ทุกคู่การสื่อสาร

ภาพประกอบ 5-43 แสดงค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เท่านั้น ทั้งสามโปรโตคอลให้สมรรถนะที่ไม่แตกต่างกัน ยกเว้นกรณีที่มีคู่การสื่อสารเท่ากับ 6 7 12 13 และ 14 คู่การสื่อสาร โปรโตคอล AODV จะไม่สามารถ

คำนวณค่าพุ่งเกินสูงสุดได้เนื่องจากอัตราการลู่เข้า ณ คู่การสื่อสารดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกับช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยจากภาพประกอบ 5-42



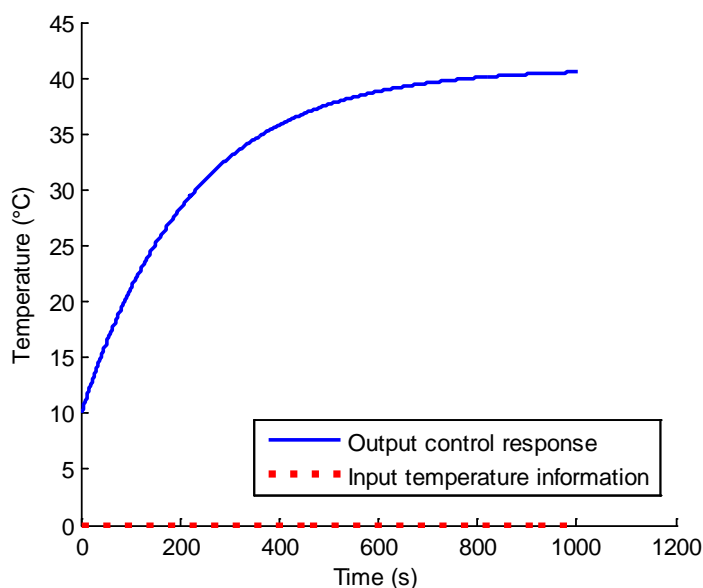
ภาพประกอบ 5-42 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด



ภาพประกอบ 5-43 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

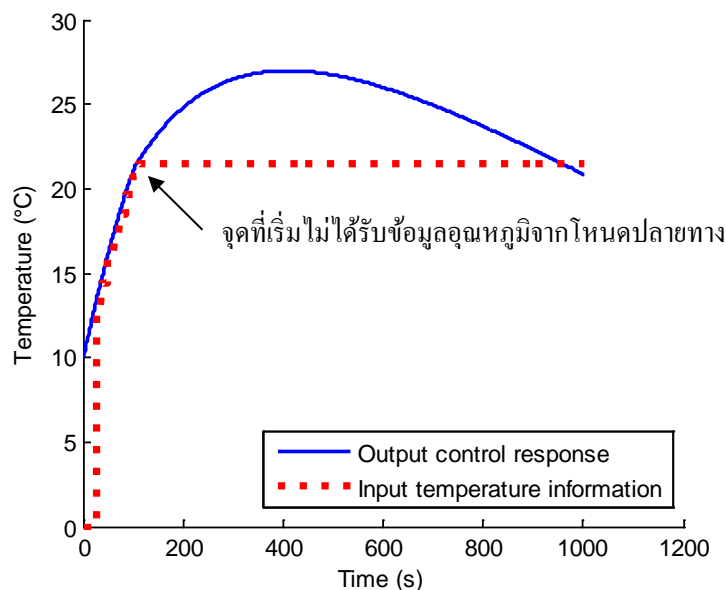
ลักษณะที่ระบบไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้นั้นเกิดขึ้นสองลักษณะโดยขผล การจำลองบางส่วนกรณีที่ผลตอบแทนการควบคุมขาออก (Output control response) หรือค่า อุณหภูมิห้องไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้มาประกอบคำอธิบาย โดยลักษณะแรกแสดงดัง

ภาพประกอบ 5-44 คือกรณีโหนดต้นทางไม่สามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลมาถึงโหนดปลายทางที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบควบคุมได้เลย ระบบควบคุมจะได้รับข้อมูลอุณหภูมิขาเข้า (Input temperature information) ที่มีค่าเป็น 0 องศาเซลเซียส (ค่าโดยปริยายตั้งต้น) โดยค่าอุณหภูมิภายในห้องจะค่อยๆ สูงขึ้นจนถึงประมาณ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งผลตอบสนองการควบคุมขาออกในลักษณะนี้เป็นลักษณะลู่ออกเนื่องจากไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิห้องให้อยู่ในค่าอุณหภูมิที่ต้องการได้



ภาพประกอบ 5-44 ผลตอบสนองการควบคุมที่เกิดขึ้นกรณีโหนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูลให้โหนดปลายทางได้เลย

ลักษณะที่สองแสดงดังภาพประกอบ 5-45 เป็นกรณีที่โหนดต้นทางสามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนดปลายทางได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งระบบควบคุมจะได้รับข้อมูลอุณหภูมิขาเข้ามาใช้ในการปรับปรุ้งค่าอุณหภูมิภายในห้อง แต่ ณ เวลาต่อมาโหนดต้นทางไม่สามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลให้โหนดปลายทางได้ ซึ่งในกรณีนี้ตัวควบคุมจะทำการป้อนอินพุทให้แก่แอกชูเอเตอร์ด้วยค่าเดิมที่คำนวณได้จากข้อมูลอุณหภูมิขาเข้าครั้งล่าสุด จากเทคนิค Zero order hold [1] หากโหนดต้นทางยังไม่สามารถส่งแพ็คเกจข้อมูลมายังโหนดปลายทางได้ ผลตอบสนองการควบคุมขาออกก็จะลู่ออกเช่นเดียวกันเนื่องจากอินพุทที่ตัวควบคุมทำการป้อนให้แอกชูเอเตอร์นั้นไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง ณ เวลาปัจจุบัน



ภาพประกอบ 5-45 ผลตอบสนองการควบคุมที่เกิดขึ้นกรณีโหนดต้นทางสามารถส่งข้อมูลให้โหนดปลายทางได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

5.4.4 สรุปผลการจำลอง

สำหรับสมรรถนะในระบบควบคุม โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถรองรับคู่การสื่อสารสูงสุดในระยะหนึ่งฮอปที่ 1 คู่เท่านั้นจึงจะได้สมรรถนะของระบบควบคุมที่ยอมรับได้ ขณะที่ 3IMC-MAODV รองรับได้ 2 คู่ ส่วน 4IMC-MAODV ยังคงรองรับได้ถึง 4 คู่การสื่อสาร ส่วนสมรรถนะของระบบสื่อสาร โพรโทคอล AODV ต้นแบบให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 50 บิตต่อวินาทีและลดลงมาคงที่ประมาณ 20 บิตต่อวินาที เมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น ขณะที่ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 100 และ 250 บิตต่อวินาที ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะให้ความคุ้มค่าสูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารมากกว่า 5 คู่การสื่อสาร โดยหลังจาก 7 คู่การสื่อสาร 4IMC-MAODV จะให้ค่าสูงสุด เมื่อวิเคราะห์การละทิ้งแพคเกจข้อมูลในโพรโทคอล AODV ต้นแบบส่วนใหญ่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ซึ่ง 3IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้นี้ลงมาได้ในระดับหนึ่ง ขณะที่ 4IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นประโยชน์จากการใช้งาน Common interface และ Common channel แต่อย่างไรก็ตามแม้โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะสามารถลดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ลงได้ แต่เมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้นถึงจุดที่อินเตอร์เฟซและช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นของทั้งสองโพรโทคอลไม่สามารถรองรับกระบวนการจัดเส้นทางทั้งหมดได้ สมรรถนะที่ได้ทั้งในระบบสื่อสารและระบบควบคุมก็จะต่ำลงเช่นกัน การ

จำลองนี้มีโหนดปลายทางเท่ากับจำนวนโหนดต้นทางซึ่งปริมาณการส่งแพ็คเกจจัดเส้นทางจะสูงกว่าการจำลอง 5.2 มากเนื่องจากโหนดปลายทางจะเป็นโหนดที่ส่งต่อแพ็คเกจร้องขอเส้นทางเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สมรรถนะที่ได้ในการจำลองนี้ต่ำกว่าการจำลอง 5.2 เพราะความหนาแน่นของข้อมูลและการแย่งชิงช่องสัญญาณในกระบวนการจัดเส้นทางสูงกว่า การจำลองนี้ไม่มีการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลจากการชนกันที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT ในโพรโทคอลที่นำเสนอเนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์จากกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณได้ สุดท้ายสามารถสรุปได้ว่าข้อสันนิษฐานที่ตั้งไว้ในหัวข้อวัตถุประสงค์ว่าจำนวนโหนดปลายทางมีผลต่อจำนวนโอเวอร์เฮดในกระบวนการจัดเส้นทางและเป็นสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของระบบลดลงนั้นเป็นจริง

5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีไม่จำกัดจำนวนฮอปในการส่งข้อมูล

5.5.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

ศึกษาสมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบกับโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีไม่จำกัดจำนวนฮอปในการเลือกเส้นทางสำหรับส่งแพ็คเกจข้อมูล เพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับการจำลอง 5.4 ที่กำหนดให้โพรโทคอลจัดเส้นทางใช้เส้นทางระหว่างโหนดต้นทางและปลายทางที่มีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอปเท่านั้น แล้วพิจารณาว่าผลการจำลองที่ได้มีความแตกต่างกันหรือไม่เนื่องจากตัวโพรโทคอลโดยปกตินั้นไม่ได้จำกัดจำนวนฮอปเพียงหนึ่งฮอปในเส้นทางสำหรับการส่งแพ็คเกจข้อมูล

5.5.2 การออกแบบการจำลอง

วิธีการจำลองจะเหมือนการจำลอง 5.4 เกือบทุกประการ ยกเว้นการจำลองนี้จะไม่จำกัดจำนวนฮอปในการส่งแพ็คเกจข้อมูลของโพรโทคอลจัดเส้นทาง และพิจารณาตัวชี้วัดเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.1 ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 5.2 แสดงดังตาราง 5-4

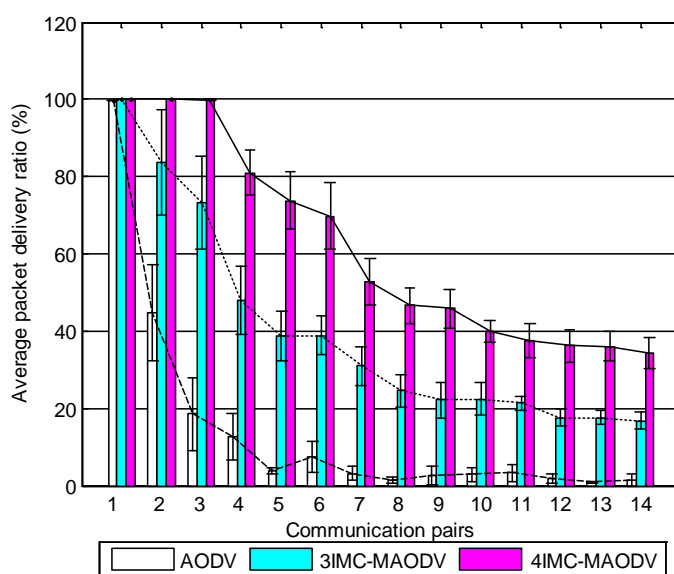
ตาราง 5-4 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.5

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-14 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-14 โหนด
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสำหรับโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	ทำการเปลี่ยนแปลงในช่วง 2-14 ช่องสัญญาณตามจำนวนคู่การสื่อสาร

5.5.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

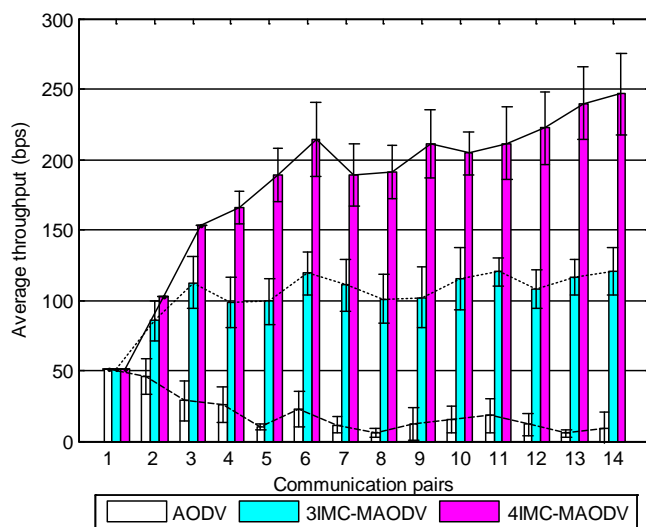
5.5.3.1 ผลจากสมรรถนะของระบบสื่อสาร

ภาพประกอบ 5-46 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางซึ่งโพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงที่สุดโดยจะต่ำลงเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น รองลงมาคือโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ AODV ให้สมรรถนะต่ำสุดโดยเป็นผลจากการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ที่ทำให้สมรรถนะต่ำลง เช่นเดียวกับการจำลอง 5.4



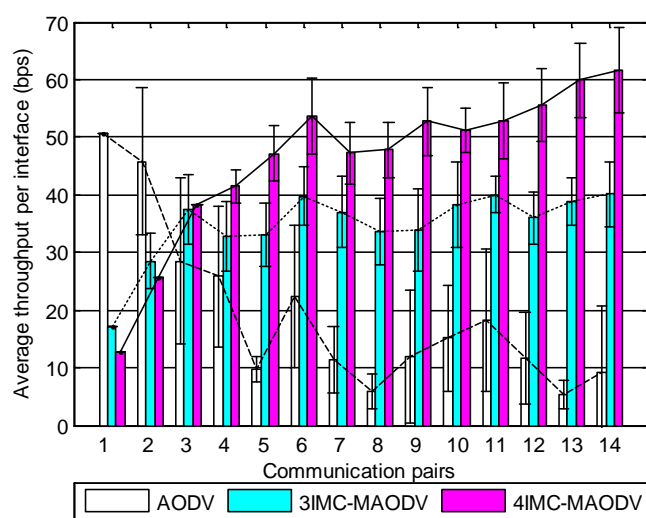
ภาพประกอบ 5-46 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

ภาพประกอบ 5-47 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ทุกโพรโทคอลทำได้ จากภาพโพรโทคอล AODV ต้นแบบให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 50 บิตต่อวินาที และลดลงมาคงที่ประมาณ 20 บิตต่อวินาที เมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดและคงที่ประมาณ 100 บิตต่อวินาที สุดท้าย 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 250 บิตต่อวินาที ซึ่งยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกเช่นเดียวกับการจำลอง 5.4



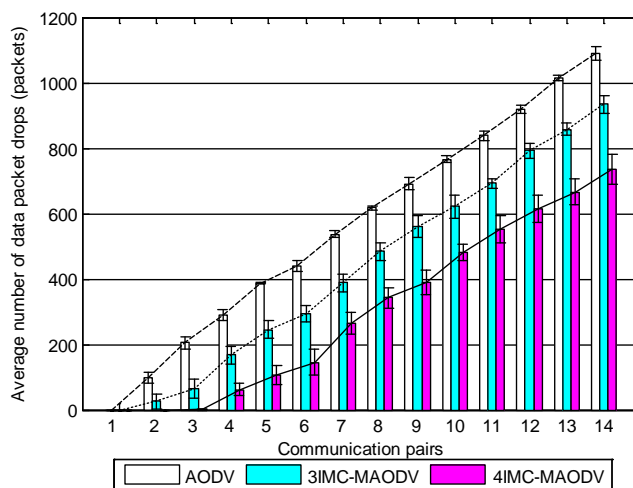
ภาพประกอบ 5-47 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3 โพรโทคอล
กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

ภาพประกอบ 5-48 แสดงปริมาณงาน โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซที่ทุกโพรโทคอลทำได้ ที่ 1 คู่การสื่อสาร AODV จะให้ค่าสูงสุด ซึ่งหลังจาก 4 คู่การสื่อสารเป็นต้นไป 3IMC-MAODV จะให้ค่าสูงกว่า AODV และหลังจาก 3 คู่การสื่อสารเป็นต้นไป 4IMC-MAODV จะให้ค่าสูงกว่า AODV นอกจากนี้หลังจาก 5 คู่การสื่อสาร 4IMC-MAODV จะให้ค่าสูงกว่า 3IMC-MAODV ด้วยเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเตอร์เฟซของโพรโทคอลที่น่าเสนอจะให้ค่าที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น



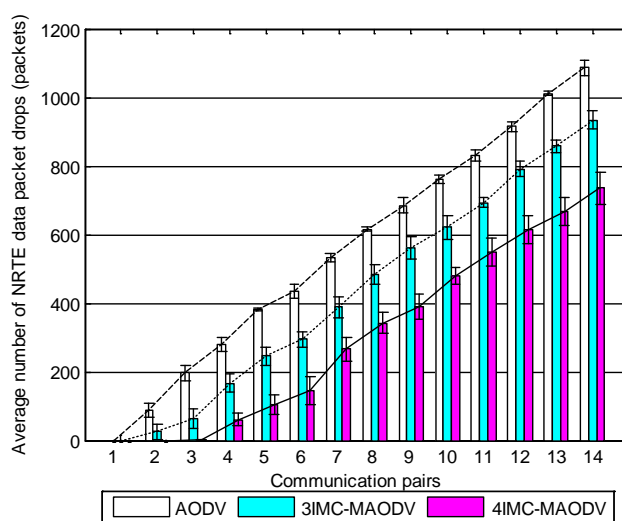
ภาพประกอบ 5-48 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3
โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

ภาพประกอบ 5-49 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยทั้งหมด จากภาพโปรโตคอล AODV ต้นแบบเกิดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลสูงที่สุดรองลงมาคือโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ โดยจะอธิบายรายละเอียดในส่วนถัดไป



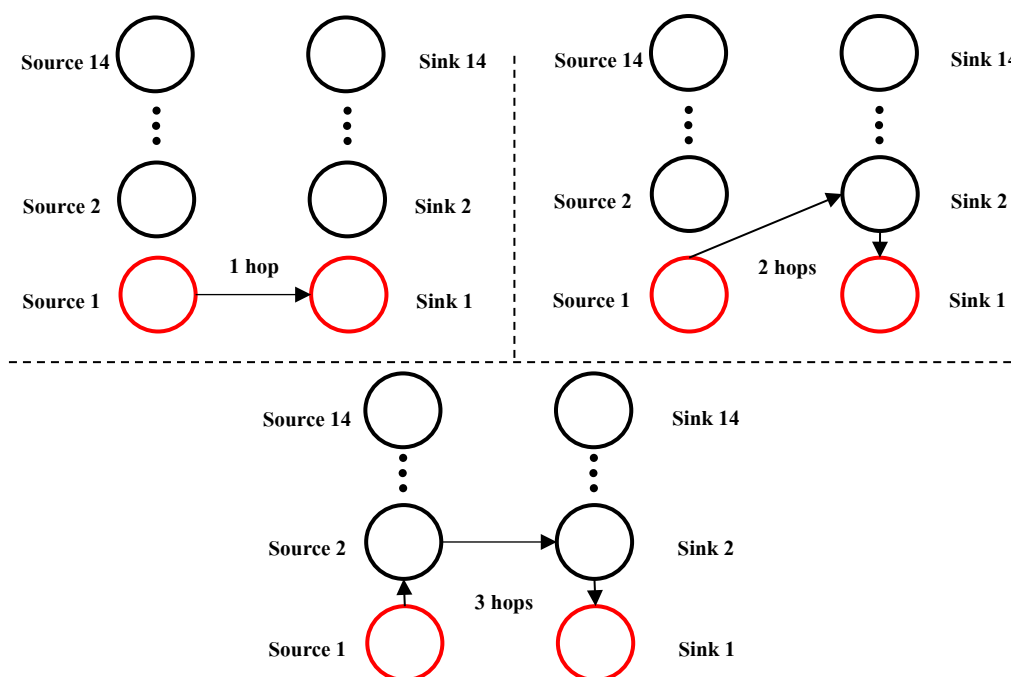
ภาพประกอบ 5-49 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

พิจารณาภาพประกอบ 5-50 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ที่โปรโตคอล 4IMC-MAODV มีจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ต่ำที่สุด



ภาพประกอบ 5-50 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTEกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

ลักษณะเส้นทางและจำนวนฮอปในการส่งแพ็คเกจข้อมูลของโหนดต้นทางของการจำลองนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการจัดเส้นทาง (การส่ง-รับ RREQ และ RREP) โดยเส้นทางที่ใช้จะสามารถเป็นได้ทั้ง 1 ฮอปและหลายฮอปตามจำนวนโหนดที่ RREQ แพร่กระจายไปถึง ยกตัวอย่างดังภาพประกอบ 5-51 โหนดต้นทาง 1 ทำการส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง 1 ได้ในหลายรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตามความสามารถดั้งเดิมของโพรโทคอล AODV คือการจัดเส้นทางที่มีระยะทาง (จำนวนฮอป) น้อยที่สุด [2] ซึ่งเส้นทางในการส่งแพ็คเกจข้อมูลของแต่ละโหนดต้นทางก็จะใช้เส้นทางที่ระยะทางหนึ่งฮอป อีกทั้งลักษณะการวางโหนดของการจำลองนี้ โหนดปลายทางของแต่ละคู่การสื่อสารอยู่ในระยะหนึ่งฮอปของโหนดต้นทางด้วย ดังนั้นโอกาสที่โหนดปลายทางของแต่ละคู่การสื่อสารจะได้รับ RREQ แพร่เกิดจากโหนดต้นทางโดยตรงจึงมีสูง เส้นทางที่โหนดต้นทางในแต่ละคู่การสื่อสารใช้ส่งแพ็คเกจข้อมูลจึงควรจะเป็นระยะหนึ่งฮอปเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเป็นรูปแบบเดียวกับการจำลอง 5.4 สมรรถนะที่ได้ในการจำลองนี้จึงมีความแตกต่างจากการจำลอง 5.4 น้อยมาก

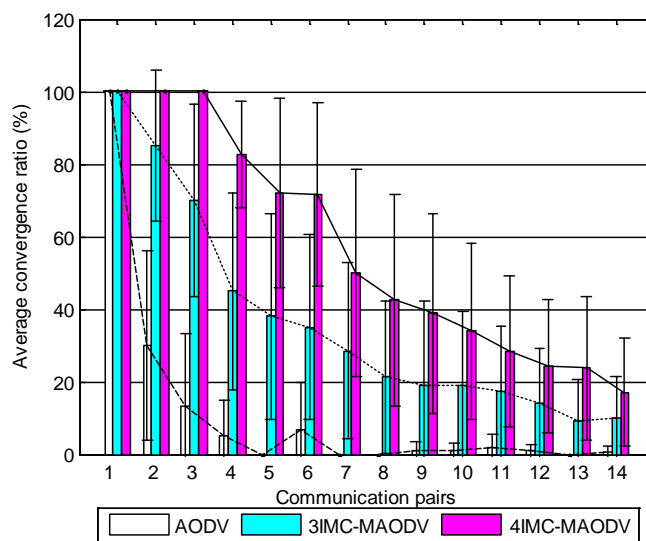


ภาพประกอบ 5-51 ตัวอย่างลักษณะเส้นทางที่เป็นไปได้ที่แต่ละโหนดต้นทางใช้ส่งแพ็คเกจข้อมูล

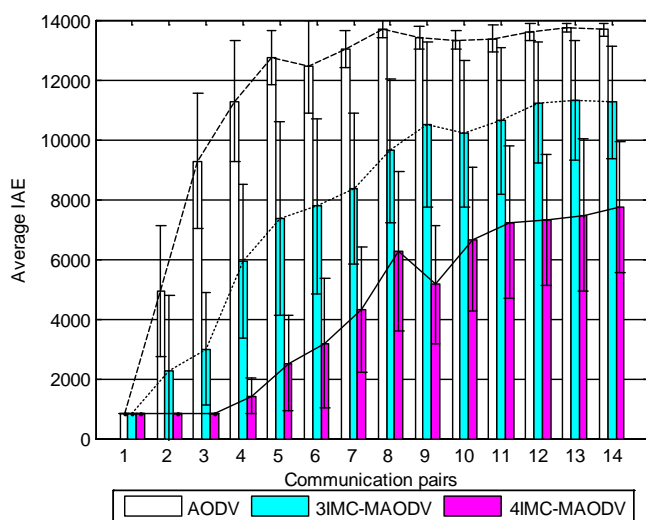
5.5.3.2 ผลจากสมรรถนะของระบบควบคุม

ภาพประกอบ 5-52 แสดงอัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล โดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถให้อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยได้ 100 % กรณีมีคู่การสื่อสารไม่เกิน 1 คู่ ขณะที่ 3IMC-MAODV รองรับได้ 2 คู่และสุดท้าย 4IMC-MAODV รองรับได้จนถึง 3 คู่

การสื่อสาร และภาพประกอบ 5-53 แสดงค่า IAE โดยเฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 โพรโทคอล ซึ่งกรณีมี โหนดต้นทางและปลายทางเพียงโหนดเดียวผลที่ได้จากทั้งสามโพรโทคอลไม่แตกต่างกันแต่เมื่อ จำนวนโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มขึ้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบให้สมรรถนะด้อยที่สุดเนื่องจากค่าความผิดพลาดสะสมสูงกว่าอีกสองโพรโทคอล และ โพรโทคอลที่ให้สมรรถนะดีที่สุดคือ 4IMC-MAODV

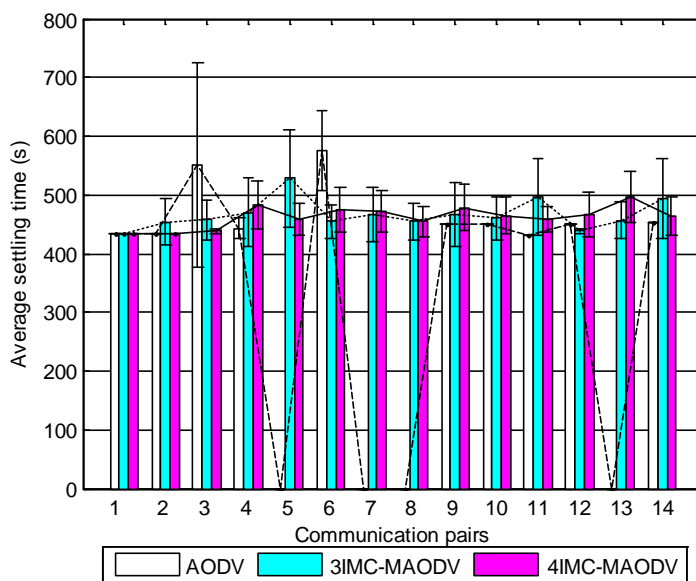


ภาพประกอบ 5-52 อัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด และไม่จำกัดจำนวนฮอป



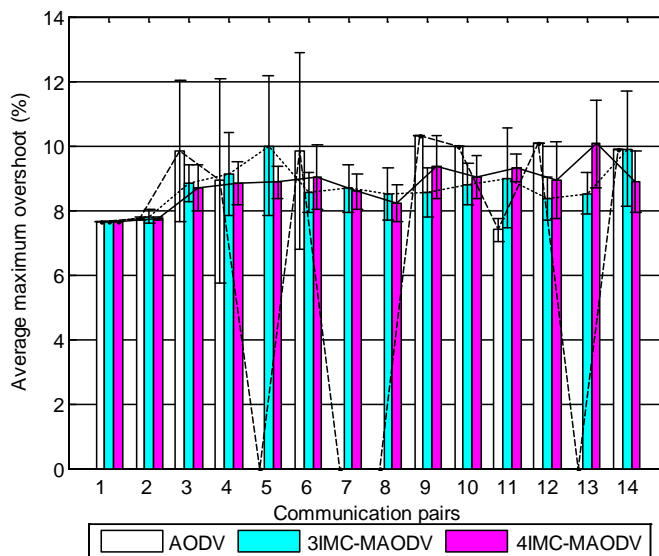
ภาพประกอบ 5-53 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด และไม่จำกัดจำนวนฮอป

ภาพประกอบ 5-54 แสดงช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เท่านั้น โดยส่วนใหญ่ทั้งสามโพรโทคอลไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนทางสถิติ แต่จะมีความแตกต่างกรณีมีจำนวนคู่การสื่อสารเท่ากับ 5 7 8 และ 13 คู่การสื่อสาร ซึ่งโพรโทคอล AODV ต้นแบบเกิดกรณีไม่สามารถคำนวณช่วงเวลาเข้าที่ได้เนื่องจากระบบไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวเลยดังเหตุการณ์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.4.3.2 ในส่วนของช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ย



ภาพประกอบ 5-54 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด และไม่จำกัดจำนวนฮอป

ภาพประกอบ 5-55 แสดงค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล กรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เท่านั้น โดยส่วนใหญ่ทั้งสามโพรโทคอลให้ค่าที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเช่นเดียวกัน แต่จะมีความแตกต่างกรณีมีจำนวนคู่การสื่อสารเท่ากับ 5 7 8 และ 13 คู่การสื่อสารที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบจะไม่สามารถคำนวณค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยได้เนื่องจากอัตราการเข้าสู่ที่คู่การสื่อสารเหล่านี้มีค่าเป็นศูนย์ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.4.3.2



ภาพประกอบ 5-55 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

5.5.4 สรุปผลการจำลอง

ผลการจำลองสมรรถนะของระบบในหัวข้อนี้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกรจำลอง 5.4 เกือบทุกประการจึงสามารถสรุปได้ว่ากรณีการจำลองที่ทุกๆ โหนดอยู่ในระยะการสื่อสารหนึ่งฮอป สมรรถนะที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันทั้งกรณีกำหนดให้โพรโทคอลจัดเส้นทางใช้เส้นทางที่มีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอปและกรณีทำการจัดเส้นทางด้วยกระบวนการปกติ เนื่องจากโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV และโพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งในสถานการณ์การจำลองที่กำหนดคือการใช้เส้นทางที่หนึ่งฮอปในการส่งข้อมูล โดยเป็นความสามารถดั้งเดิมของโพรโทคอลที่มี AODV เป็นพื้นฐานซึ่งจะเลือกใช้เส้นทางสั้นที่สุดในการส่งข้อมูล [2] ผลการจำลองที่ได้จึงมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรจำลอง 5.4 ในทุกโพรโทคอลที่ใช้ทดสอบ

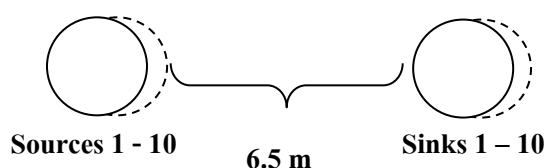
5.6 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีจำนวนช่องสัญญาณสูงสุดต่างกัน

5.6.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลที่นำเสนอระหว่างกรณีกำหนดช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเพียงสองช่องสัญญาณกับกรณีเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณสูงสุดตามจำนวนคู่การสื่อสารโดยใช้ช่วงซีกตัวอย่างเท่ากับช่วงเวลานั้นส่วนสิบ

5.6.2 การออกแบบการจำลอง

ทดสอบเฉพาะ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV โดยวิธีการจำลองจะเหมือนการจำลอง 5.4 ยกเว้นช่วงการเปลี่ยนแปลงจำนวนคูโหนดต้นทางและปลายทางจะอยู่ระหว่าง 1-10 คู่เท่านั้นดังภาพประกอบ 5-56 เนื่องจากเป็นการจำลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณโดยตรง จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนคู่การสื่อสารจนถึงจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลที่ใช้ได้สูงสุดก็เพียงพอจะทำความเข้าใจสมรรถนะที่ได้ การจำลองนี้ทำการเปรียบเทียบระหว่างโพรโทคอลเดียวกันที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดต่างกัน โดยมีสองการจำลองย่อย การจำลองแรกคือการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเพียง 2 ช่องสัญญาณ 3IMC-MAODV (2dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่มีช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับจำนวนคู่การสื่อสาร ในทำนองเดียวกันการจำลองย่อยที่สองจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่มีช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเพียง 2 ช่องสัญญาณ 4IMC-MAODV (2dch) และโพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่มีช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับจำนวนคู่การสื่อสาร พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 5.2 แสดงในตาราง 5-5



ภาพประกอบ 5-56 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.6

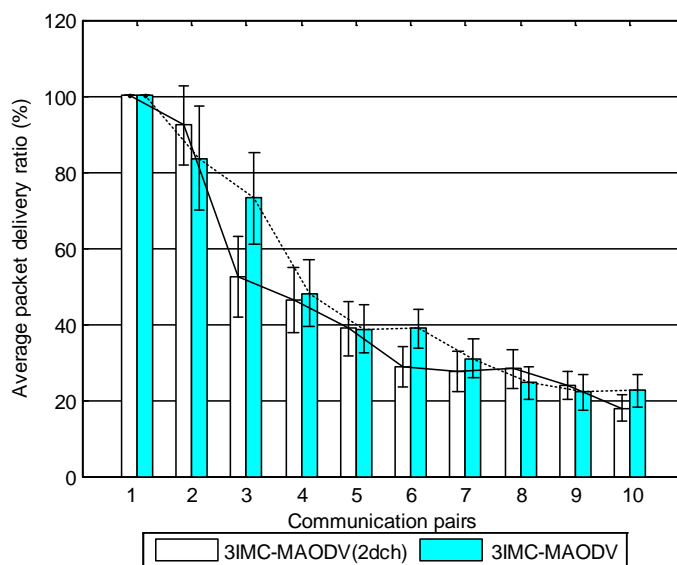
ตาราง 5-5 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.6

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-10 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-10 โหนด
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดสำหรับโพรโทคอล 3IMC-MAODV สำหรับการจำลองย่อยที่หนึ่ง	แบบที่หนึ่งมี 2 ช่องสัญญาณ และแบบที่สองทำการเปลี่ยนแปลง 2-10 ช่องสัญญาณตามจำนวนคู่การสื่อสาร
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดสำหรับโพรโทคอล 4IMC-MAODV สำหรับการจำลองย่อยที่สอง	แบบที่หนึ่งมี 2 ช่องสัญญาณ และแบบที่สองทำการเปลี่ยนแปลง 2-10 ช่องสัญญาณตามจำนวนคู่การสื่อสาร

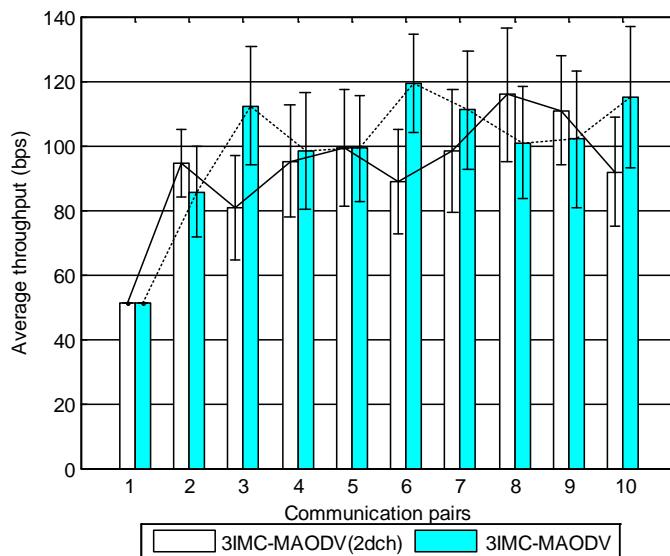
5.6.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

5.6.3.1 ผลจากสมรรถนะของระบบสื่อสาร

ภาพประกอบ 5-57 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยและภาพประกอบ 5-58 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยจากทุกโหนดต้นทางของโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่องและโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสาร ผลที่ได้บ่งชี้ว่ากระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณไม่สามารถแสดงสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนเมื่อระบบใช้ช่วงซีกตัวอย่างที่ช่วงเวลานั้นส่วนสิบ โดยจากภาพประกอบ 5-57 และภาพประกอบ 5-58 แสดงผลที่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติอันเนื่องมาจากอัตราการแพกเกตข้อมูลในช่วงกระบวนการส่งข้อมูลนั้นไม่ได้มีค่าที่สูง (ประมาณ 67.70 บิตต่อวินาทีต่อคู่การสื่อสาร) ทำให้การละทิ้งแพกเกตในช่วงกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูลไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดจากกระบวนการจัดเส้นทางเป็นส่วนใหญ่

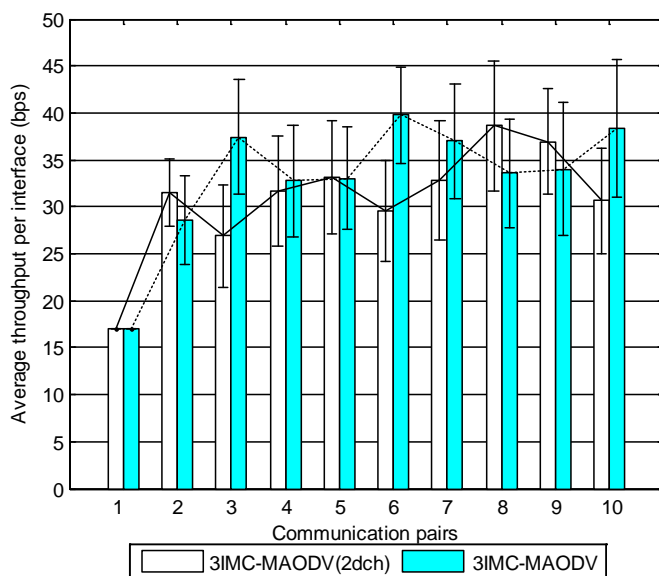


ภาพประกอบ 5-57 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV



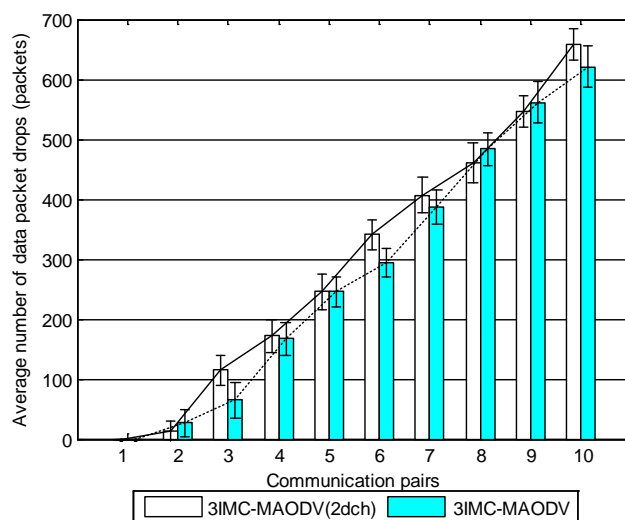
ภาพประกอบ 5-58 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยของทุก โหนดต้นทางของโปรโตคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 3IMC-MAODV

ภาพประกอบ 5-59 แสดงปริมาณงาน โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซซึ่งจะให้ผลที่ไม่แตกต่างจากปริมาณงาน โดยเฉลี่ยเนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างโปรโตคอลที่มีจำนวนอินเตอร์เฟซเท่ากัน

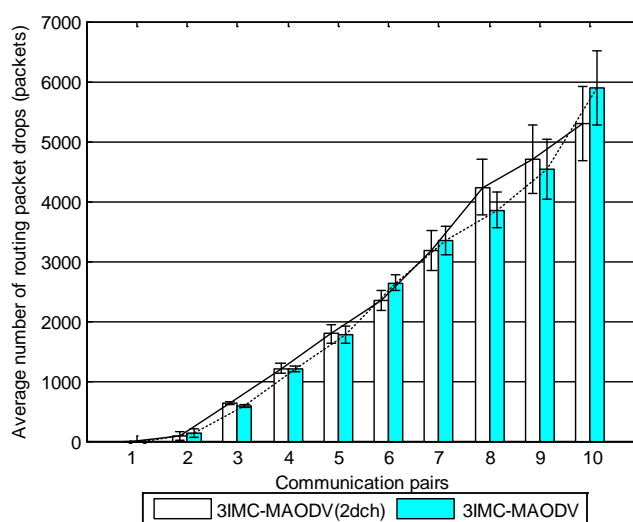


ภาพประกอบ 5-59 ปริมาณงาน โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทุก โหนดต้นทางของโปรโตคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 3IMC-MAODV

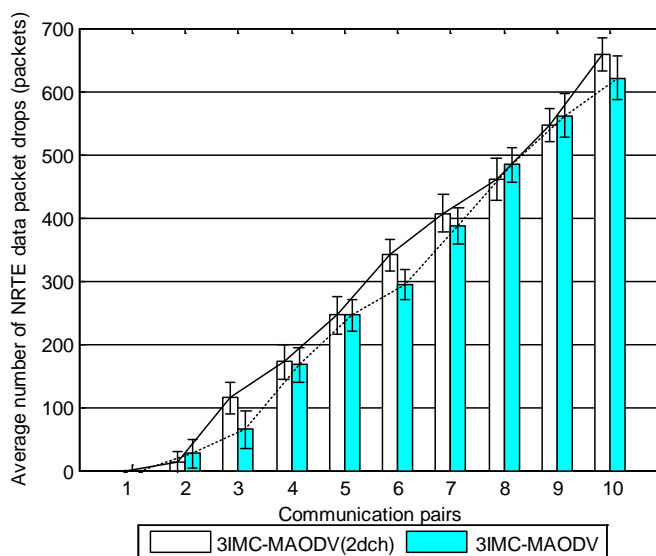
ภาพประกอบ 5-60 และภาพประกอบ 5-61 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูล และแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่อง (ไม่นับรวมช่องสัญญาณที่ใช้ในอินเทอร์เน็ตเฟสรวม) เปรียบเทียบกับโพรโทคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสารให้ผลที่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ โดยในส่วนของ การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลทั้งหมดเกิดขึ้นแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE ซึ่งเป็นผลจากการจัดเส้นทางไม่สำเร็จดังภาพประกอบ 5-62



ภาพประกอบ 5-60 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV

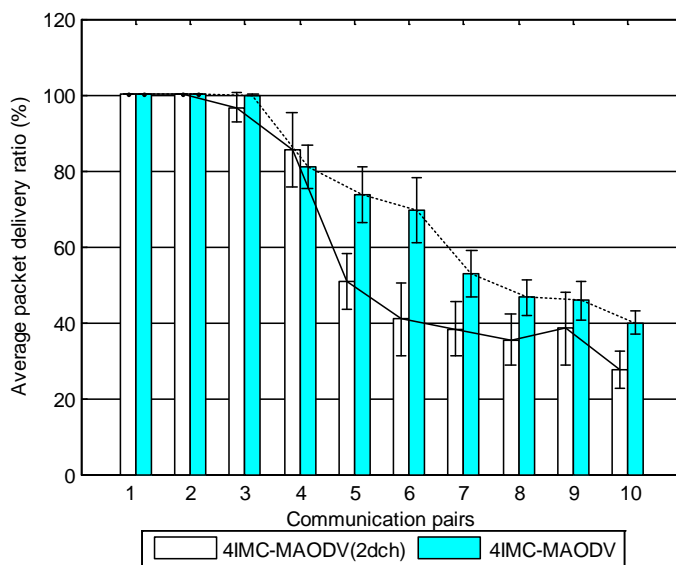


ภาพประกอบ 5-61 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโพรโทคอล 3IMC-MAODV

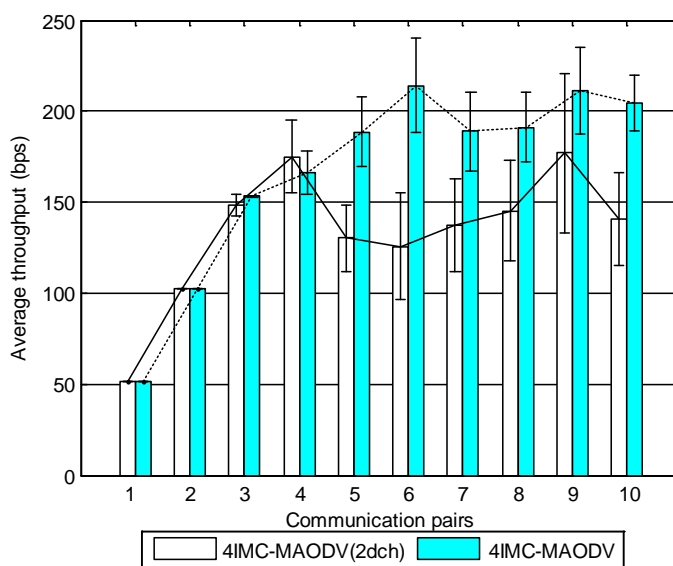


ภาพประกอบ 5-62 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยเฉลี่ยของ
โพรโทคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และ โพรโทคอล 3IMC-MAODV

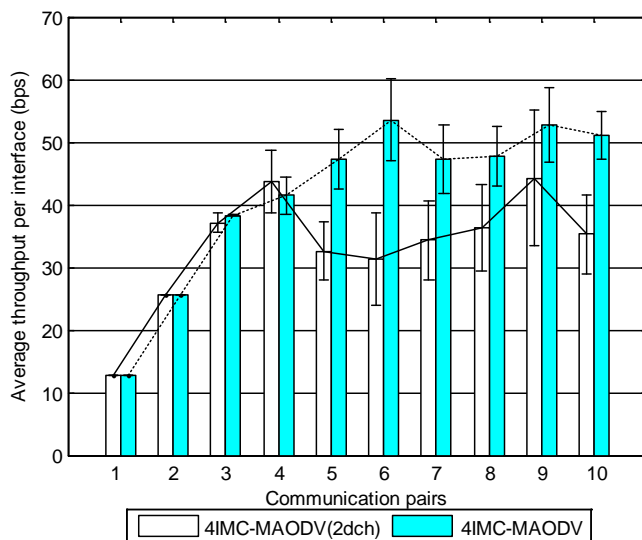
ต่อมาเป็นผลการจำลองของโพรโทคอล 4IMC-MAODV ภาพประกอบ 5-63 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยและภาพประกอบ 5-64 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของโพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่อง เปรียบเทียบกับโพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสารให้ผลที่ไม่ชัดเจนโดยมีบางช่วงคู่การสื่อสารคือ 5 6 7 และ 10 คู่การสื่อสารเท่านั้นที่ 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสารให้สมรรถนะที่ดีกว่า เช่นเดียวกัน ในส่วนของปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟสในภาพประกอบ 5-64 ที่ 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสารมีแนวโน้มจะให้สมรรถนะที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะต่ำลงมีสาเหตุเดียวกันกับกรณี 3IMC-MAODV คือแพคเกจข้อมูลถูกละทิ้งแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE จากการจัดเส้นทางไม่สำเร็จ



ภาพประกอบ 5-63 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV

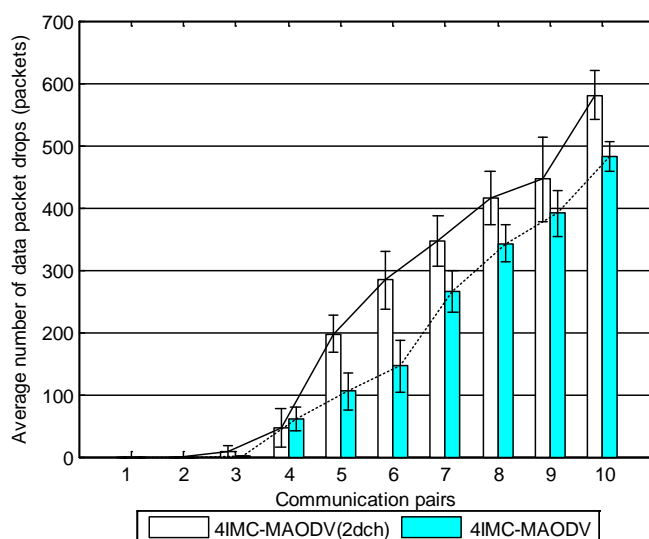


ภาพประกอบ 5-64 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV

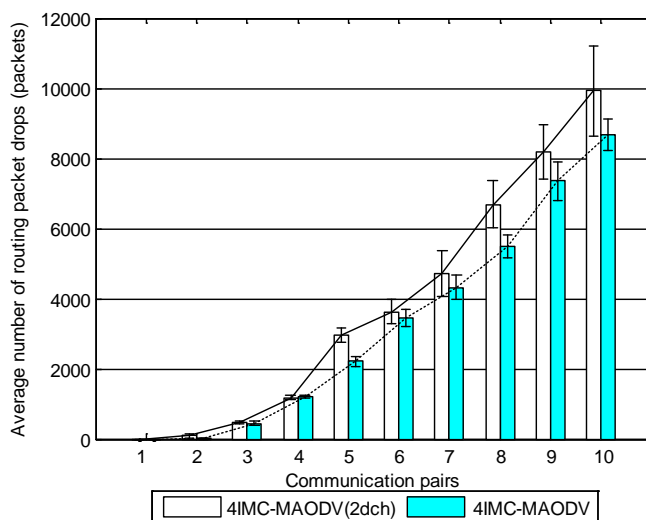


ภาพประกอบ 5-65 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเทอร์เฟซของทุกโหนดต้นทางของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV

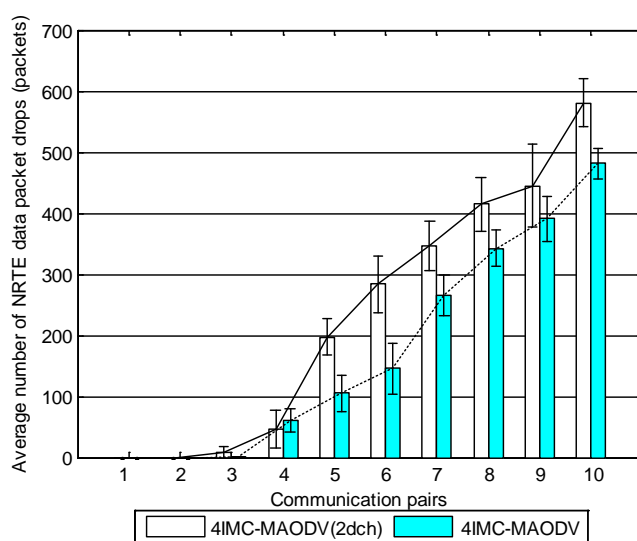
ภาพประกอบ 5-66 และภาพประกอบ 5-67 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูล และแพ็คเกจจัดเส้นทางเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่อง เปรียบเทียบกับโปรโตคอล 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่ การสื่อสารให้ผลที่ไม่ชัดเจน โดยในส่วนของ การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลทั้งหมดเกิดขึ้นแสดงด้วยตัว บ่งชี้ NRTE แสดงดังภาพประกอบ 5-68



ภาพประกอบ 5-66 จำนวนการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV



ภาพประกอบ 5-67 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV

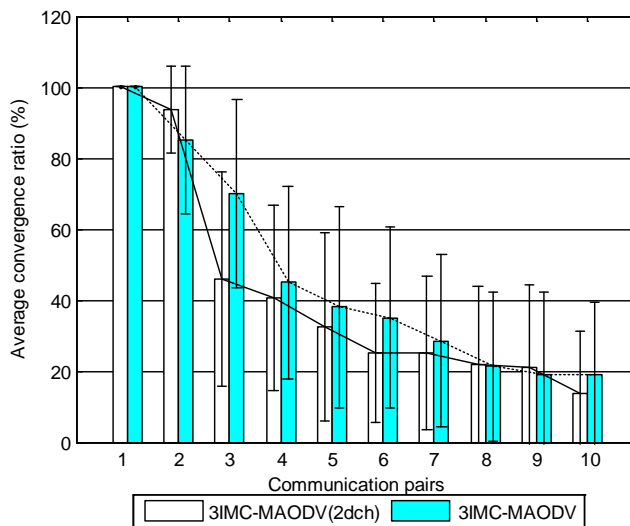


ภาพประกอบ 5-68 จำนวนการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTTE โดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV

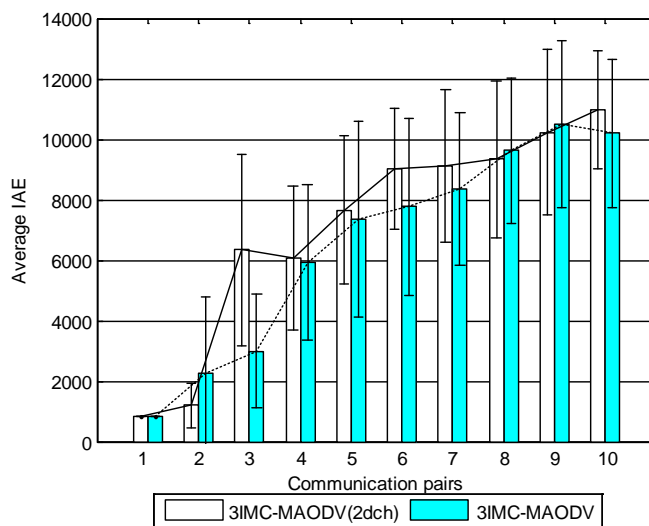
5.6.3.2 ผลจากสมรรถนะของระบบควบคุม

สมรรถนะในระบบควบคุมจะแสดงผลในการทำงานเดียวกันกับสมรรถนะในระบบสื่อสาร โดยภาพประกอบ 5-69 แสดงอัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ย ภาพประกอบ 5-70 แสดงค่า IAE โดยเฉลี่ย ภาพประกอบ 5-71 แสดงช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีที่ระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้และภาพประกอบ 5-72 แสดงค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีที่ระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัว

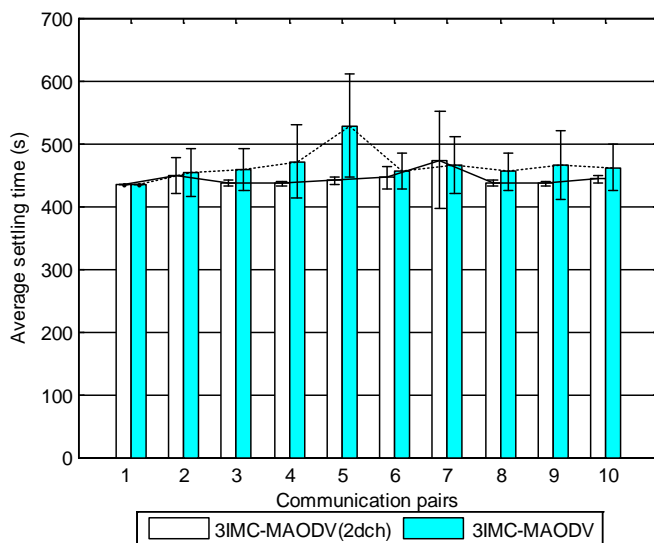
ได้ของโปรโตคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่อง เปรียบเทียบกับโปรโตคอล 3IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสาร จากการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะในระบบควบคุมทั้งหมดให้ผลที่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ



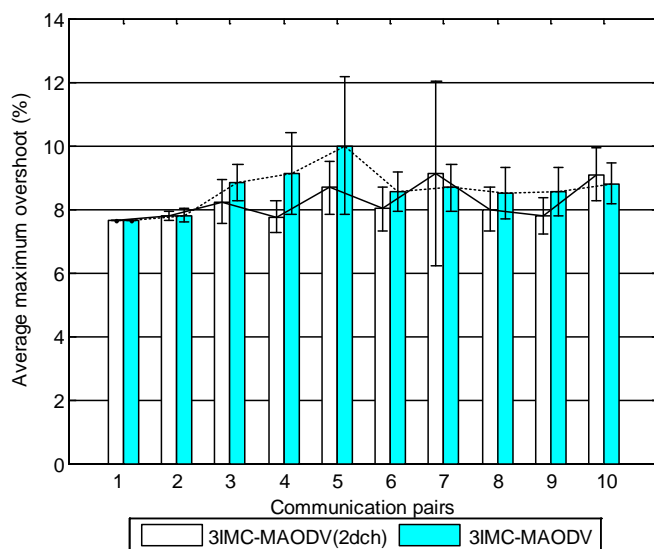
ภาพประกอบ 5-69 อัตราการคู่เข้าโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 3IMC-MAODV



ภาพประกอบ 5-70 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 3IMC-MAODV



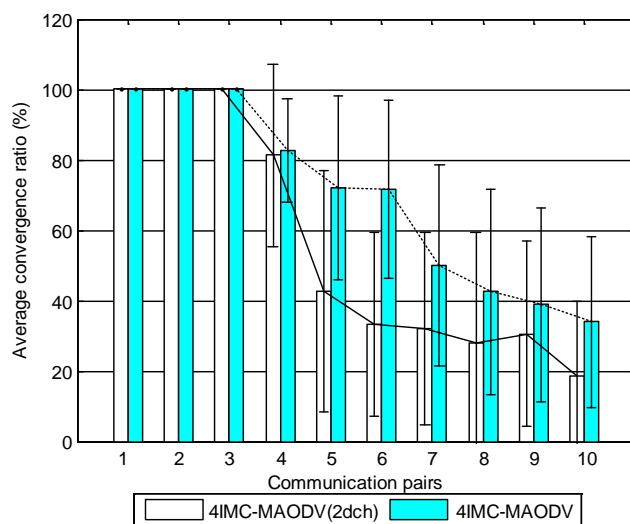
ภาพประกอบ 5-71 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และ
โปรโตคอล 3IMC-MAODV



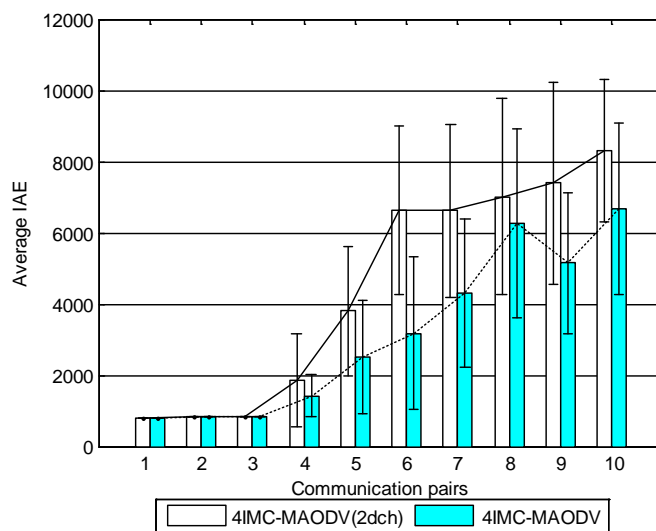
ภาพประกอบ 5-72 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 3IMC-MAODV (2 dch) และ
โปรโตคอล 3IMC-MAODV

พิจารณาสมรรถนะของระบบควบคุมกรณีการเปรียบเทียบในโปรโตคอล 4IMC-MAODV ภาพประกอบ 5-73 แสดงอัตราการลู่เข้าโดยเฉลี่ย ภาพประกอบ 5-74 แสดงค่า IAE โดยเฉลี่ย ภาพประกอบ 5-75 แสดงช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้และ ภาพประกอบ 5-76 แสดงค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ของโปรโตคอล 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่อง เปรียบเทียบกับ

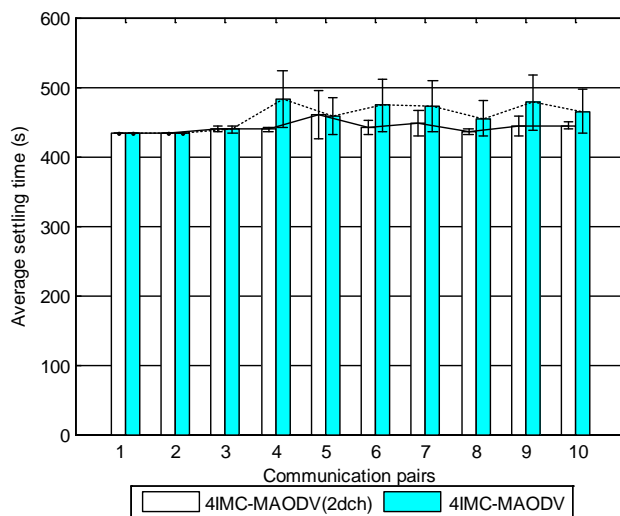
โพรโทคอล 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสารให้ผลที่ไม่มี
ความแตกต่างกันในทางสถิติเช่นเดียวกับกรณี 3IMC-MAODV



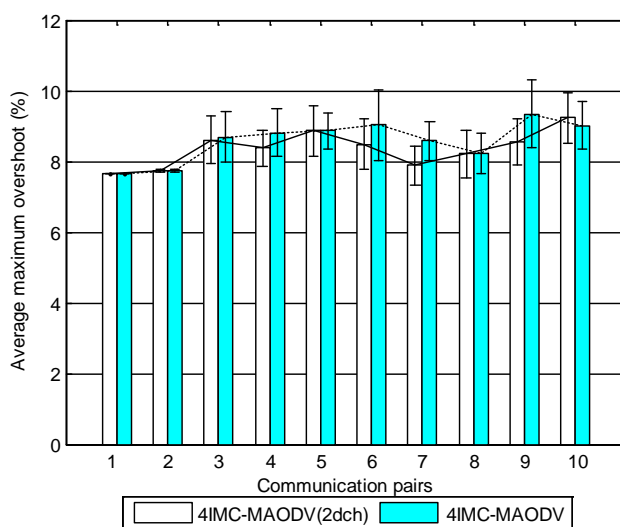
ภาพประกอบ 5-73 อัตราการดูเ้าโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ
โพรโทคอล 4IMC-MAODV



ภาพประกอบ 5-74 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และ
โพรโทคอล 4IMC-MAODV



ภาพประกอบ 5-75 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV



ภาพประกอบ 5-76 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของโปรโตคอล 4IMC-MAODV (2 dch) และโปรโตคอล 4IMC-MAODV

5.6.4 สรุปผลการจำลอง

ผลการจำลองในหัวข้อนี้ทำให้ได้ข้อสรุปว่าสมรรถนะของโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่อง (ไม่นับรวมช่องสัญญาณที่ใช้ในอินเทอร์เน็ตพร้อม) เปรียบเทียบกับโปรโตคอลชนิดเดียวกันที่มีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับคู่การสื่อสารให้สมรรถนะที่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งสมรรถนะในระบบสื่อสารและระบบควบคุม เนื่องจากโปรโตคอลที่ใช้ AODV เป็นพื้นฐานทั้งหมดในการจำลองนี้จะถูก

บังคับให้ทำกระบวนการจัดเส้นทางทุกครั้งที่จะส่งแพคเกจข้อมูลซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณไม่ได้ออกแบบมาเพื่อลดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลที่มีสาเหตุการละทิ้งมาจากกระบวนการจัดเส้นทาง การจำลองนี้จึงไม่สามารถแสดงสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นจากการใช้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณได้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโปรโตคอลที่นำเสนอด้วยตนเอง

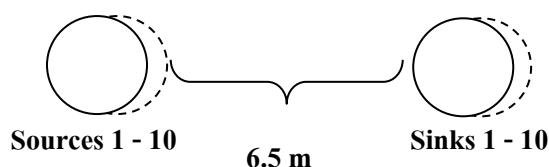
5.7 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีอัตราการส่งข้อมูลสูง

5.7.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโปรโตคอลต้นแบบและโปรโตคอลที่นำเสนอ พร้อมทั้งศึกษาสมรรถนะที่เกิดจากการใช้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณในการส่งแพคเกจข้อมูลภายในเครือข่ายในกรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น และวิเคราะห์การสูญเสียข้อมูลของระบบสื่อสารในกรณีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีความแตกต่างกับกรณีอัตราการส่งข้อมูลต่ำเช่นที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนลึบอย่างไร

5.7.2 การออกแบบการจำลอง

การจำลองนี้ใช้อัตราการส่งแพคเกจข้อมูลเท่ากับ 10 แพคเกจต่อวินาที (0.1 วินาทีต่อแพคเกจ) ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่เครื่องมือจำลอง PiccSIM ที่ผู้วิจัยใช้งานสามารถทำการจำลองได้ จึงทำการทดสอบด้วยอัตราการส่งแพคเกจข้อมูลดังกล่าวซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงคู่การสื่อสารได้สูงสุด 10 คู่การสื่อสารเท่านั้น โดยตำแหน่งการวางโหนดแสดงดังภาพประกอบ 5-77 มีลักษณะในสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริงดังภาพประกอบ 5-31 และเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณข้อมูลตามคู่การสื่อสารเช่นเดียวกับการจำลอง 5.5 ด้วยเหตุผลเดียวกัน การจำลองนี้ใช้อัตราการส่งแพคเกจข้อมูลเร็วกว่า 10 วินาที นั้นหมายความว่าทุกโหนดต้นทางจะทำกระบวนการจัดเส้นทางเพียงครั้งเดียวเท่านั้นหากสามารถจัดเส้นทางได้สำเร็จ การจำลองนี้พิจารณาตัวชี้วัดเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 พารามิเตอร์อื่นๆที่แตกต่างจากการจำลอง 5.2 แสดงดังตาราง 5-6



ภาพประกอบ 5-77 ตำแหน่งการวางโหนดในการจำลอง 5.7

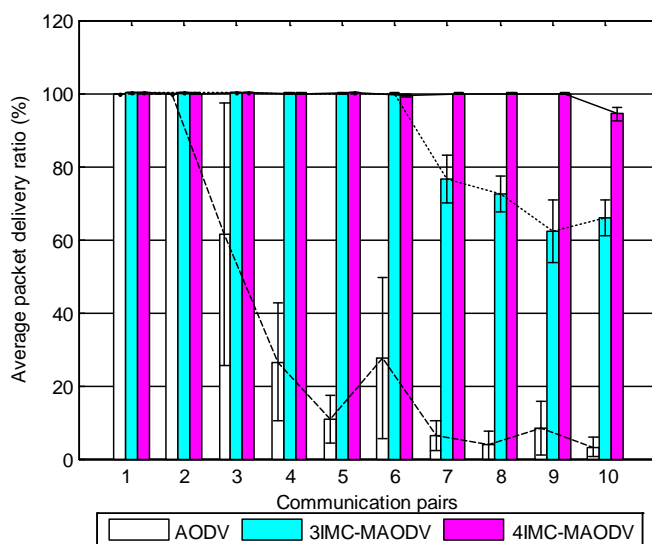
ตาราง 5-6 พารามิเตอร์ที่ใช้และค่าที่กำหนดในการจำลอง 5.7

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนโหนดต้นทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-10 โหนด
จำนวนโหนดปลายทาง	เปลี่ยนแปลงในช่วง 1-10 โหนด
อัตราการส่งแพคเกจข้อมูล	10 แพคเกจต่อวินาที
เวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง	สุ่มในช่วง 0 ถึง 0.1 วินาทีด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม
จำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสำหรับโปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV	ทำการเปลี่ยนแปลงในช่วง 2-10 ช่องสัญญาณตามจำนวนคู่การสื่อสาร

5.7.3 ผลการจำลองและการวิจารณ์ผล

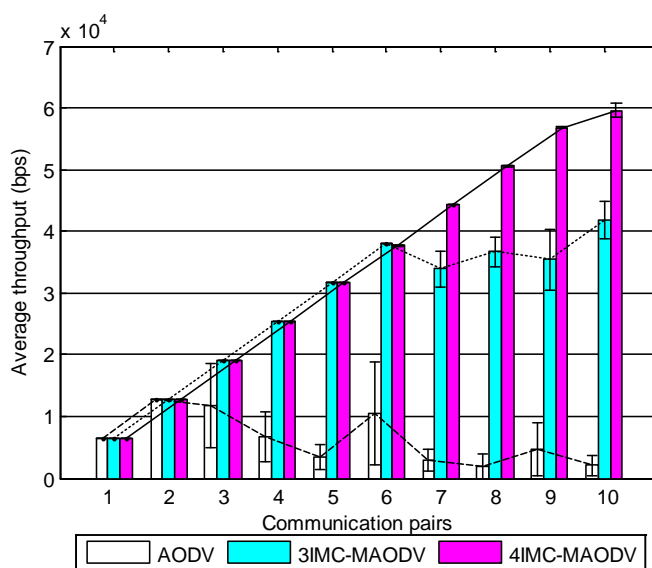
5.7.3.1 ผลจากสมรรถนะของระบบสื่อสาร

ภาพประกอบ 5-78 แสดงอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3 โปรโตคอล ผลที่ได้คือโปรโตคอล AODV ต้นแบบให้สมรรถนะต่ำที่สุดซึ่งอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์เมื่อจำนวนคู่การสื่อสารน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 คู่ ขณะที่ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถรองรับคู่การสื่อสารได้สูงสุดที่ 6 คู่ และ 9 คู่ ตามลำดับ



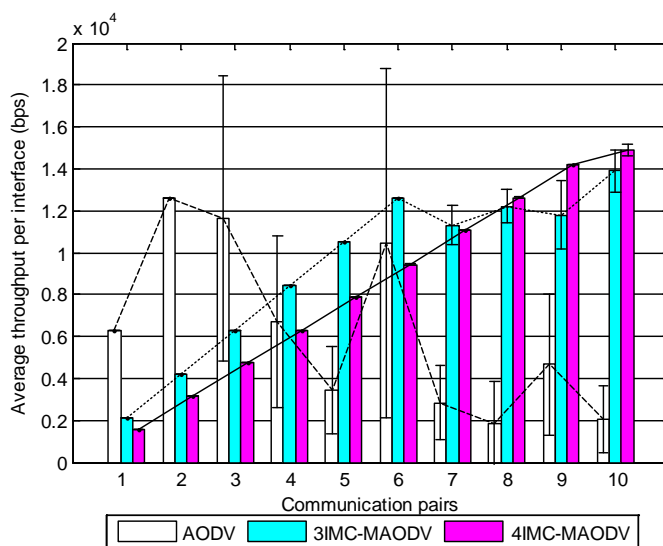
ภาพประกอบ 5-78 อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลโดยเฉลี่ยของทุกโหนดต้นทางของทั้ง 3 โปรโตคอลกรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพคเกจต่อวินาที

ภาพประกอบ 5-79 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ทั้งสามโพรโทคอลทำได้ โดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบให้สมรรถนะต่ำที่สุดซึ่งให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 20 กิโลบิตต่อวินาที ขณะที่ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ให้ปริมาณงานสูงสุดประมาณ 45 และ 60 กิโลบิตต่อวินาที ตามลำดับ หากพิจารณาปริมาณงานโดยเฉลี่ยของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะต่างกันประมาณ 15 กิโลบิตต่อวินาทีเท่านั้นซึ่งค่าที่ได้จากทั้งสองโพรโทคอลมีความแตกต่างอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV ต้นแบบ โดยโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ใช้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณในการส่งแพคเกจข้อมูลภายในเครือข่ายเช่นเดียวกันทำให้สมรรถนะที่ได้สูงกว่า AODV เนื่องจากการส่งแพคเกจข้อมูลด้วยอัตรานี้จะทำให้ความหนาแน่นของข้อมูลในช่องสัญญาณระหว่างกระบวนการส่งข้อมูลมีค่าที่สูง ดังนั้นกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณที่เป็นเทคนิคสำหรับลดความหนาแน่นของข้อมูลและการแย่งชิงช่องสัญญาณในช่วงกระบวนการส่งข้อมูลจะส่งผลให้สมรรถนะที่ได้ในการส่ง-รับแพคเกจข้อมูลสูงกว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบ



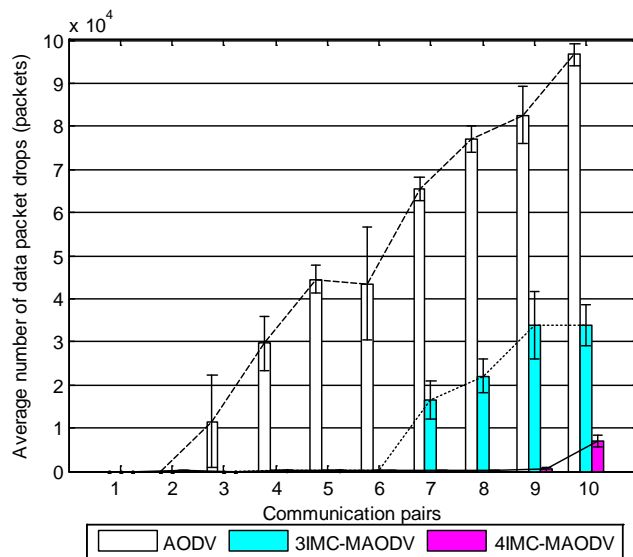
ภาพประกอบ 5-79 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่ทั้งสามโพรโทคอลทำได้กรณีในระบบ มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพคเกจต่อวินาที

ภาพประกอบ 5-80 แสดงปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซของทั้ง 3 โพรโทคอล โดยที่ 1 ถึง 2 คู่การสื่อสาร AODV จะให้ความคุ้มค่าสูงสุด ส่วน 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะให้ความคุ้มค่าสูงกว่า AODV ที่ 7 คู่การสื่อสารเป็นต้นไป ซึ่งในช่วง 1 ถึง 6 คู่การสื่อสาร 3IMC-MAODV จะให้ค่าสูงกว่า 4IMC-MAODV ด้วยเช่นกัน แสดงถึงปริมาณงานต่ออินเตอร์เฟซที่มีความคุ้มค่ามากขึ้นของโพรโทคอลที่นำเสนอเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น



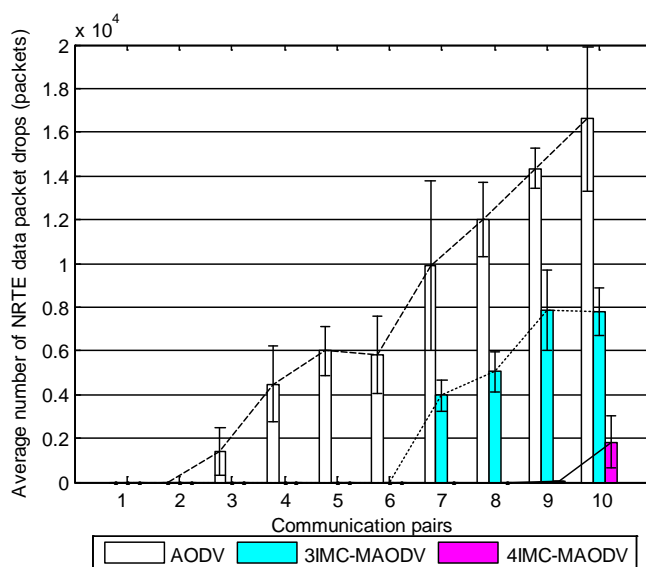
ภาพประกอบ 5-80 ปริมาณงานโดยเฉลี่ยต่ออินเทอร์เฟซที่ทั้งสามโพรโทคอลทำได้กรณีที่ระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที

ภาพประกอบ 5-81 แสดงจำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลโดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบเกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลสูงที่สุดรองลงมาคือโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5-81 จำนวนการละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีที่ระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที

ภาพประกอบ 5-82 แสดงการละทิ้งแพคเกจข้อมูลของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE โดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบเกิดการละทิ้งแพคเกจสูงที่สุดรองลงมาคือ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ตามลำดับโดยจะอธิบายรายละเอียดในส่วนถัดไป

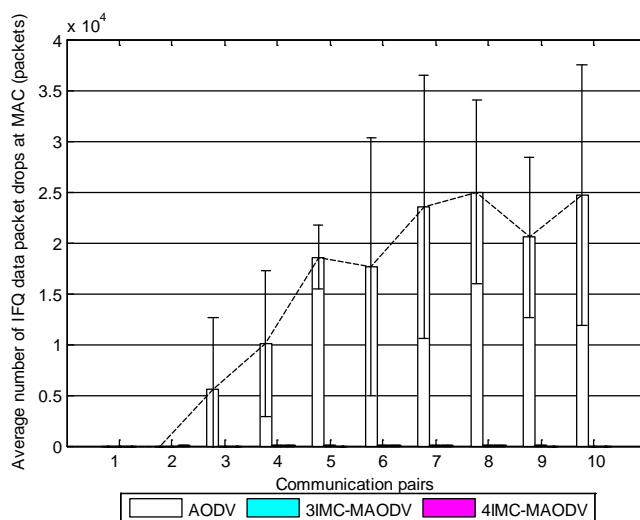


ภาพประกอบ 5-82 การละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE กรณีที่ระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพคเกจต่อวินาที

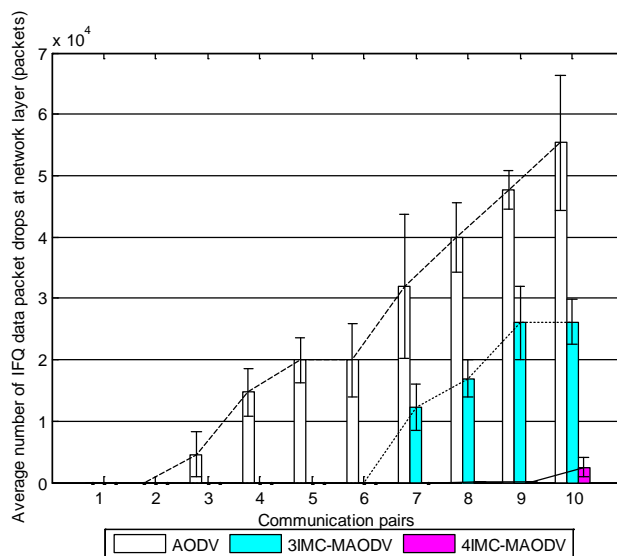
ภาพประกอบ 5-83 แสดงการละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่เกิดจากการล้นของบัฟเฟอร์แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ซึ่งเกิดในช่วงกระบวนการส่งแพคเกจข้อมูลหลังจากสามารถจัดเส้นทางได้สำเร็จ โดยกรณีมีอัตราการส่งข้อมูลสูงจะทำให้เกิดการสะสมแพคเกจข้อมูลจนล้นบัฟเฟอร์เพราะต้องรอช่องสัญญาณว่าง [17] โพรโทคอล AODV ที่มีช่องสัญญาณให้ใช้งานเพียงช่องสัญญาณเดียวจะเกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้สูงสุด ขณะที่โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV แทบจะไม่มีอาการละทิ้งแพคเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้เกิดขึ้นเลยจากความสามารถในการใช้หลายช่องสัญญาณเพื่อส่งแพคเกจข้อมูลและกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณซึ่งจะลดความแออัดของแพคเกจข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณลง ทำให้เหตุการณ์ที่แพคเกจข้อมูลถูกสะสมจนเต็มบัฟเฟอร์เกิดขึ้นนั้นมีน้อย

ภาพประกอบ 5-84 แสดงการละทิ้งแพคเกจข้อมูลของทั้ง 3 โพรโทคอลที่เกิดจากการล้นของบัฟเฟอร์แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้นจัดเส้นทาง (Network layer) จะเกิดขึ้นเมื่อโหนดยังคงอยู่ในกระบวนการจัดเส้นทางและยังไม่สามารถหาเส้นทางมารองรับการส่งแพคเกจข้อมูลที่ไหลเข้ามายังบัฟเฟอร์ในชั้นจัดเส้นทางได้จนบัฟเฟอร์เต็ม โดยเกิดขึ้นในโพรโทคอล AODV สูง

ที่สุด รองลงมาคือ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นที่ 7 และ 10 คู่การสื่อสารตามลำดับ



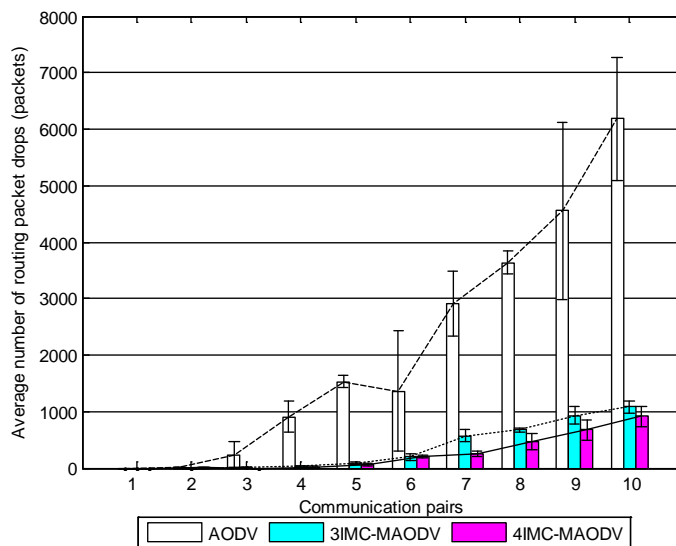
ภาพประกอบ 5-83 การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC กรณีที่ระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพ็คเกจต่อวินาที



ภาพประกอบ 5-84 การละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ Network layer กรณีที่ระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพ็คเกจต่อวินาที

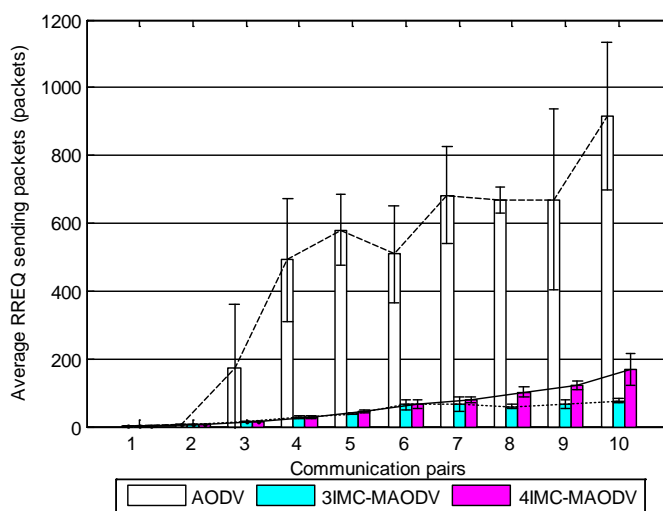
ภาพประกอบ 5-85 แสดงจำนวนการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยทั้งหมดของทั้ง 3 โพรโทคอล โดยโพรโทคอล AODV ต้นแบบเกิดการละทิ้งแพ็คเกจจัดเส้นทางสูงที่สุดใน

ขณะที่โปรโตคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV เกิดการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางที่ต่ำกว่า AODV



ภาพประกอบ 5-85 จำนวนการละทิ้งแพคเกจจัดเส้นทางโดยเฉลี่ยกรณีทีระบบ มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพคเกจต่อวินาที

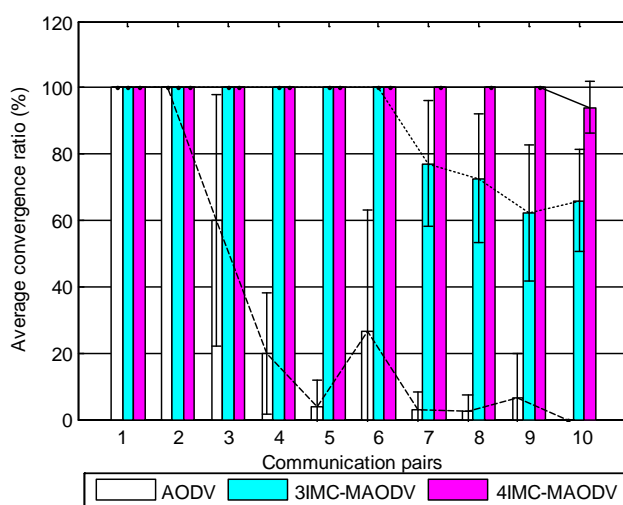
พิจารณาปริมาณการส่ง RREQ แพคเกจในภาพประกอบ 5-86 โปรโตคอล AODV มีปริมาณการส่ง RREQ แพคเกจสูงกว่าโปรโตคอลที่นำเสนออย่างชัดเจนหลังจาก 3 คู่การสื่อสาร



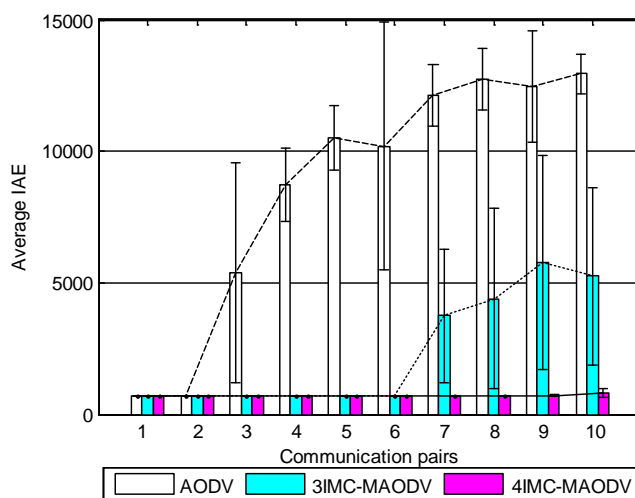
ภาพประกอบ 5-86 จำนวนการส่งแพคเกจร้องขอเส้นทาง RREQ ที่ชั้น MAC โดยเฉลี่ย กรณีทีระบบมีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพคเกจต่อวินาที

5.7.3.2 ผลจากสมรรถนะของระบบควบคุม

ภาพประกอบ 5-87 แสดงอัตราการคู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล โดยโพรโทคอล AODV สามารถรองรับคู่การสื่อสารโดยที่มีอัตราการคู่เข้า 100% ที่ 2 คู่การสื่อสาร ขณะที่ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV รองรับได้ 6 และ 10 คู่การสื่อสาร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพประกอบ 5-88 ที่แสดงค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอล หลังจาก 3 คู่การสื่อสาร เป็นต้นไปโพรโทคอล AODV จะมีค่า IAE สูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ และหลังจาก 6 คู่การสื่อสาร เป็นต้นไป 3IMC-MAODV จะให้ค่า IAE โดยเฉลี่ยสูงกว่า 4IMC-MAODV

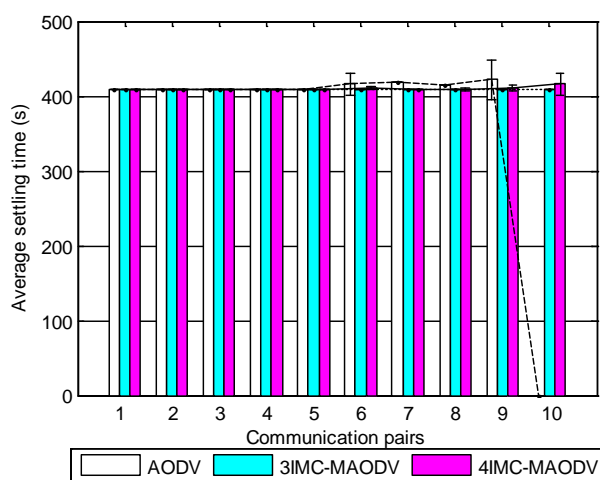


ภาพประกอบ 5-87 อัตราการคู่เข้าโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีในระบบ
มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที

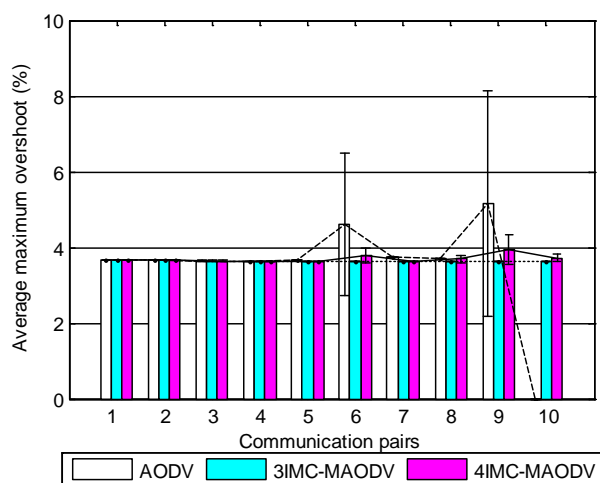


ภาพประกอบ 5-88 ค่า IAE โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีในระบบ
มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที

ภาพประกอบ 5-89 แสดงช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ ทั้งสามโพรโทคอลให้ค่าที่ไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ ยกเว้นที่ 10 คู่ การสื่อสาร โพรโทคอล AODV จะไม่สามารถคำนวณช่วงเวลาเข้าที่ได้เนื่องจากอัตราการคู่เข้าเท่ากับศูนย์ และภาพประกอบ 5-90 แสดงค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ เช่นเดียวกับช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ย ทั้งสามโพรโทคอลไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ยกเว้นที่ 10 คู่ การสื่อสาร โพรโทคอล AODV ไม่สามารถคำนวณค่าพุ่งเกินสูงสุดได้เช่นเดียวกับช่วงเวลาเข้าที่



ภาพประกอบ 5-89 ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที



ภาพประกอบ 5-90 ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 โพรโทคอลกรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูล 10 แพกเกตต่อวินาที

5.7.4 สรุปผลการจำลอง

กรณีโหนดต้นทางมีอัตราการส่งข้อมูลที่ 10 แพกเกตต่อวินาที กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณในกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูลสามารถเพิ่มสมรรถนะของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ให้สูงกว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบได้ทั้งในระบบสื่อสารและระบบควบคุม โดยกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณจะสามารถแสดงสมรรถนะที่ดีขึ้นได้ก็ต่อเมื่อในกระบวนการส่งข้อมูลเกิดความหนาแน่นจากการส่งแพกเกตข้อมูลจนช่องสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวไม่สามารถรองรับอัตราการส่งข้อมูลนั้นได้ ซึ่งโพรโทคอล AODV จะเกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอแทบจะไม่เกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้นี้เลยเนื่องจากส่งแพกเกตข้อมูลในหลายช่องสัญญาณด้วยกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ ต่อมาในส่วนของ การละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE และ IFQ ที่ Network layer เกิดขึ้นสูงสุดในโพรโทคอล AODV ขณะที่ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลที่แสดงด้วยตัวบ่งชี้ดังกล่าวได้จากการใช้งาน Common interface และ Common channel ซึ่ง 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงที่สุดจากกรณีที่มี Common interface 0 และ 1 สำหรับใช้งานในกระบวนการส่งและรับแพกเกตของเส้นทาง RREQ โดยหากทำการพิจารณาปริมาณการส่ง RREQ แพกเกตในการจำลองนี้ โพรโทคอล AODV จะมีจำนวนการส่งแพกเกต RREQ ที่สูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนออย่างชัดเจน สมรรถนะในระบบควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราการส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบ มีสมรรถนะที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนจากทั้ง 3 โพรโทคอล เนื่องจากกระบวนการจัดเส้นทางที่น้อยลงเพราะเป็นการจัดเส้นทางเพียงครั้งแรกครั้งเดียวหากสำเร็จ ส่งผลให้การสูญเสียข้อมูลในเครือข่ายจากความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางลดลง

5.8 สรุปภาพรวมผลการวิเคราะห์สมรรถนะ

หัวข้อนี้ทำการสรุปภาพรวมของการจำลองทั้งหมดในบทที่ 5 และแสดงในมุมมองกว้างเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมในแต่ละการจำลอง

การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะในระบบควบคุมของตาราง 5-7 และตาราง 5-8 ทำให้ทราบว่าค่าจากตัวชี้วัดสมรรถนะทุกตัวที่ได้ในตาราง 5-8 เพิ่มสูงขึ้นจากความแตกต่างของระบบในกรณีที่เป็นระบบแบบต่อเนื่องกับกรณีที่ใช้ช่วงชักตัวอย่างด้วยช่วงเวลาขึ้นส่วนสิบเป็นตัวกำหนดเวลาส่งแพกเกตข้อมูล ซึ่งแบบหลังจะให้ค่าที่สูงกว่า

ตาราง 5-9 แสดงผลกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว หากพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งในระบบสื่อสารและระบบควบคุมทำให้ทราบว่ากรณีที่ระบบมีอัตราการดูเข้า 100%

นั้นไม่ได้หมายความว่าอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลต้องมีสมรรถนะถึง 100% ด้วย โดยผลจากตาราง โพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะดีที่สุดในระบบสื่อสารและระบบควบคุม

ตาราง 5-10 โพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะในระบบสื่อสารที่สูงกว่า 3IMC-MAODV ทั้งจำนวนโหนดต้นทางที่รองรับได้และปริมาณงานโดยเฉลี่ยที่สูงกว่า

เปรียบเทียบตาราง 5-11 กรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียวกับตาราง 5-9 กรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด สมรรถนะที่ได้จากทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมลดลงอย่างชัดเจนซึ่งเป็นผลกระทบจากจำนวนโหนดปลายทางที่เพิ่มขึ้น โดยผลที่ได้นั้น โพรโทคอล 4IMC-MAODV ยังคงให้สมรรถนะสูงที่สุดจากทั้งสามโพรโทคอล

เปรียบเทียบตาราง 5-11 ที่จำกัดให้ส่งข้อมูลด้วยเส้นทางหนึ่งฮอปและตาราง 5-12 ที่ไม่จำกัดจำนวนฮอปค่าที่ได้จากตัวชี้วัดสมรรถนะแต่ละตัวมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดย 4IMC-MAODV ยังคงเป็นโพรโทคอลที่ให้สมรรถนะสูงที่สุด

ตาราง 5-13 และตาราง 5-14 เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะระหว่างกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่องกับกรณีมีช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดเท่ากับจำนวนคู่การสื่อสารของทั้งสองโพรโทคอล ค่าที่ได้จากตัวชี้วัดสมรรถนะแต่ละตัวไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพรโทคอลชนิดเดียวกันเนื่องจากการใช้ช่วงซีกตัวอย่างเท่ากับ 12.19 วินาที กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณไม่สามารถแสดงสมรรถนะได้อย่างเต็มที่ดังรายละเอียดในการจำลอง 5.6

ตาราง 5-15 โพรโทคอล 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงที่สุดในระบบสื่อสารและระบบควบคุม โดยจากผลการจำลองในหัวข้อ 5.7 เมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณสามารถแสดงสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนจากการพิจารณาปริมาณงานโดยเฉลี่ยของ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ที่มีค่าสูงกว่า AODV ต้นแบบ 2 และ 3 เท่าตามลำดับ

พิจารณาตาราง 5-16 การละทิ้งแพคเกจข้อมูลกรณีใช้การส่งข้อมูลที่ 12.19 วินาทีต่อแพคเกจโดยส่วนใหญ่เกิดจากกรณีที่ โพรโทคอลจัดเส้นทางไม่สามารถจัดเส้นทางมารองรับการส่งข้อมูลได้แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE รวมทั้งโพรโทคอล AODV จะมีการละทิ้งแพคเกจข้อมูลที่ถูกแสดงด้วยตัวบ่งชี้ LQI และ NOT สูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยเมื่อพิจารณาที่การละทิ้งแพคเกจข้อมูลโดยรวมทั้งหมด โพรโทคอล 4IMC-MAODV จะให้สมรรถนะสูงที่สุด รองลงมาคือ 3IMC-MAODV และ AODV ตามลำดับ

พิจารณาตาราง 5-17 ผลการจำลองกรณีระบบมีอัตราการส่งข้อมูลสูงจะเกิดการละทิ้งแพคเกจข้อมูลสูงที่สุดในโพรโทคอล AODV รองลงมาคือ 3IMC-MAODV และ 4IMC-

MAODV ตามลำดับ โดย 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV แทบจะไม่เกิดการละทิ้งแพ็คเกจ ข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ขึ้น MAC ขึ้นเลยเนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์จากกระบวนการ จัดสรรช่องสัญญาณได้และสามารถลดการละทิ้งแพ็คเกจข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ Network layer และ NRTE ได้ดีกว่าโปรโตคอล AODV ต้นแบบ

ตาราง 5-18 จะแสดงความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเทอร์เน็ตเฟสในแต่ละการ จำลองโดยพิจารณาในมุมมองระบบสื่อสารเท่านั้นโดยไม่สนใจสมรรถนะในระบบควบคุม การ จำลอง 5.2 โปรโตคอล AODV จะให้ความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเทอร์เน็ตเฟสสูงสุดในช่วง การ เปลี่ยนแปลงโหนดต้นทาง 1 ถึง 5 โหนดหลังจากนั้นจะไม่มี ความแตกต่างชัดเจน ต่อมาการจำลอง 5.3 โปรโตคอล 3IMC-MAODV จะให้ความคุ้มค่าสูงกว่า 4IMC-MAODV ที่ 1 ถึง 4 และ 6 โหนด ต้นทาง การจำลอง 5.4 และ 5.5 โปรโตคอล AODV จะให้ความคุ้มค่าสูงกว่าโปรโตคอลที่นำเสนอ ในช่วง 1 ถึง 2 คู่การสื่อสารเท่านั้นโดยที่ 4 ถึง 14 คู่การสื่อสาร โปรโตคอล 4IMC-MAODV จะให้ ความคุ้มค่าสูงสุด การจำลอง 5.6 จะไม่มีความแตกต่างในการเปรียบเทียบระหว่างโปรโตคอล ชนิดเดียวกัน สุดท้ายการจำลอง 5.7 โปรโตคอล AODV จะให้ความคุ้มค่าสูงกว่าโปรโตคอลที่ นำเสนอชัดเจนในช่วง 1 ถึง 2 คู่การสื่อสาร และ 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV จะให้ความ คุ้มค่าสูงสุดในช่วง 7 ถึง 8 คู่การสื่อสารและที่ 9 คู่การสื่อสารเป็นต้นไป ตามลำดับ

ตาราง 5-7 การวิเคราะห์ระบบควบคุมกรณีไม่มีระบบสื่อสารไร้สาย

การวิเคราะห์ระบบควบคุมกรณีไม่มีระบบสื่อสารไร้สาย	
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม	ค่าที่ได้
อินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด	691 ± 0
ช่วงเวลาเข้าที่จากกรณีที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่านั้น (วินาที)	402 ± 0
ค่าพุ่งเกินสูงสุด (%)	2.33 ± 0

ตาราง 5-8 การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณี 1 โหนดต้นทาง 1 โหนดปลายทางและมีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอป

การวิเคราะห์สมรรถนะของโปรโตคอล AODV ต้นแบบกรณี 1 โหนดต้นทาง 1 โหนดปลายทางและมีระยะการสื่อสารหนึ่งฮอป (12.19 วินาทีต่อแพกเกต)	
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม	ค่าที่ได้
อินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ย	815 ± 0
ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยต่ำสุดจากกรณีที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่านั้น (วินาที)	434 ± 0
ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ย (%)	7.65 ± 0

ตาราง 5-9 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลต้นแบบและโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว

5.2 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนดปลายทางโหนดเดียว	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง		
	AODV	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบสื่อสาร			
จำนวนโหนดต้นทางที่รองรับได้โดยที่อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	1	3	7
ปริมาณงานสูงสุดเฉลี่ย (บิตต่อวินาที)	13 - 193.6 ที่ 2 - 10 โหนดต้นทาง	253.77 - 355 ที่ 7 - 10 โหนดต้นทาง	353.01 - 452.36 ที่ 9 - 10 โหนดต้นทาง
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม			
จำนวนโหนดต้นทางที่รองรับได้โดยที่อัตราการสูญเสียให้สมรรถนะ 100%	3	5	10
อินทีก์ลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยสูงสุด	1463.21 - 14843.16 ที่ 4 - 10 โหนดต้นทาง	54 - 7739.8 ที่ 3 - 10 โหนดต้นทาง	548 - 3489.3 ที่ 4 - 10 โหนดต้นทาง
ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีในระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)	384.20 - 586.3 ที่ทุกโหนดต้นทาง	438.60 - 461.12 ที่ทุกโหนดต้นทาง	438.60 - 461.12 ที่ทุกโหนดต้นทาง
ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (%)	7.03 - 14.61 ที่ทุกโหนดต้นทาง	6.842 - 11.23 ที่ทุกโหนดต้นทาง	7.27 - 11.17 ที่ทุกโหนดต้นทาง

ตาราง 5-10 การศึกษาปริมาณงานสูงสุดของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV

5.3 การศึกษาปริมาณงานสูงสุด	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง	
	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบสื่อสาร		
จำนวนโหนดต้นทางที่รองรับได้โดยที่อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	5	6
ปริมาณงานสูงสุดเฉลี่ย (บิตต่อวินาที)	312.5 - 574.55 ที่ 6 - 20 โหนดต้นทาง	601.1 - 732.25 ที่ 13 - 20 โหนดต้นทาง

ตาราง 5-11 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลต้นแบบและโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด

5.4 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนด	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง		
	AODV	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบสื่อสาร			
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	1	1	3
ปริมาณงานสูงสุดเฉลี่ย (บิตต่อวินาที)	26.87 - 56.58 ที่ 2 - 4 คู่การสื่อสาร	77.15 - 135.01 ที่ 3 - 14 คู่การสื่อสาร	189.97 - 274.90 ที่ 7 - 14 คู่การสื่อสาร
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม			
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	1	2	4
อินทิกัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยสูงสุด	7676.70 - 14093.6 ที่ 4 - 14 คู่การสื่อสาร	5255.65 - 13729.07 ที่ 5 - 14 คู่การสื่อสาร	2701.96 - 10087.11 ที่ 6 - 14 คู่การสื่อสาร
ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีในระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)	366.04 - 709.52 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	411.65 - 530.49 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	419.84 - 494.19 ที่ทุกคู่การสื่อสาร
ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (%)	6.237 - 11.1 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.02 - 11.88 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.51 - 10.38 ที่ทุกคู่การสื่อสาร

ตาราง 5-12 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลต้นแบบและโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีโหนดปลายทางหลายโหนดและไม่จำกัดจำนวนฮอป

5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีไม่จำกัดจำนวนฮอปในการส่งข้อมูล	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง		
	AODV	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบสื่อสาร			
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	1	1	3
ปริมาณงานสูงสุดเฉลี่ย (บิตต่อวินาที)	10.00 - 33.00 ที่ 2 - 6 คู่การสื่อสาร	71.50 - 137.12 ที่ 2 - 14 คู่การสื่อสาร	187.27 - 275.64 ที่ 6 - 14 คู่การสื่อสาร
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม			
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	1	2	3
อินทีก์ลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยสูงสุด	7003.17 - 13996.42 ที่ 3 - 14 คู่การสื่อสาร	4121.02 - 13329.54 ที่ 5 - 14 คู่การสื่อสาร	1027.13 - 10014.40 ที่ 6 - 14 คู่การสื่อสาร
ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)	375.75 - 725.75 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	412.19 - 610.27 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	429.39 - 541.18 ที่ทุกคู่การสื่อสาร
ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (%)	5.72 - 12.90 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.46 - 12.15 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.7 - 8.71 ที่ทุกคู่การสื่อสาร

ตาราง 5-13 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่องกับกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดตามจำนวนคู่การสื่อสาร (สมรรถนะในระบบสื่อสาร)

5.6 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีจำนวนช่องสัญญาณสูงสุดต่างกัน	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง			
	3IMC-MAODV(2dch)	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV(2dch)	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบสื่อสาร				
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	2	2	3	3
ปริมาณงานสูงสุดเฉลี่ย (บิตต่อวินาที)	64.45 - 136.62 ที่ 3 - 10 คู่การสื่อสาร	71.54 - 137.1 ที่ 2 - 10 คู่การสื่อสาร	96.11 - 220.61 ที่ 6 - 10 คู่การสื่อสาร	169.59 - 240.51 ที่ 5 - 10 คู่การสื่อสาร

ตาราง 5-14 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของ โพรโทคอลที่นำเสนอกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุด 2 ช่องกับกรณีมีจำนวนช่องสัญญาณข้อมูลสูงสุดตามจำนวนคู่การสื่อสาร (สมรรถนะในระบบควบคุม)

5.6 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีจำนวนช่องสัญญาณสูงสุดต่างกัน	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง			
	3IMC- MAODV(2dch)	3IMC-MAODV	4IMC- MAODV(2dch)	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม				
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	2	2	4	3
อินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยสูงสุด	3186.52 - 12954.01 ที่ 3 - 10 คู่การสื่อสาร	3359.25 - 13255.90 ที่ 4 - 10 คู่การสื่อสาร	4173.00 - 10475.80 ที่ 7 - 10 คู่การสื่อสาร	1027.13 - 9077.37 ที่ 6 - 10 คู่การสื่อสาร
ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีในระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)	396.50 - 550.81 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	412.19 - 610.27 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	425.08 - 495.57 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	429.33 - 523.70 ที่ทุกคู่การสื่อสาร
ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (%)	6.24 - 12.04 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.69 - 12.15 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.35 - 9.93 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	7.66 - 10.32 ที่ทุกคู่การสื่อสาร

ตาราง 5-15 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลต้นแบบและโพรโทคอลที่นำเสนอกรณีระบบมีอัตราการส่งข้อมูลที่ 10 แพกเกตต่อวินาที

5.7 การวิเคราะห์สมรรถนะกรณีอัตราการส่งข้อมูลสูง	ชนิดของโพรโทคอลจัดเส้นทาง		
	AODV	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV
สมรรถนะในมุมมองระบบสื่อสาร			
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	2	6	9
ปริมาณงานสูงสุดเฉลี่ย (กิโลบิตต่อวินาที)	0.47 - 18.46 ที่ 3 - 9 คู่การสื่อสาร	30.45 - 44.47 ที่ 9 - 10 คู่การสื่อสาร	58.43 - 60.83 ที่ 10 คู่การสื่อสาร
สมรรถนะในมุมมองระบบควบคุม			
จำนวนคู่การสื่อสารที่รองรับได้โดยที่อัตราการสูญเสียโดยเฉลี่ยให้สมรรถนะ 100%	2	6	10
อินทีก์ลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยสูงสุด	1213.16 - 14923.04 ที่ 3 - 10 คู่การสื่อสาร	948.16 - 9843.88 ที่ 7 - 10 คู่การสื่อสาร	654.78 - 968.68 ที่ 1 - 10 คู่การสื่อสาร
ช่วงเวลาเข้าที่โดยเฉลี่ยกรณีที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)	395.22 - 448.84 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	408.20 - 410.34 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	401.71 - 431.29 ที่ทุกคู่การสื่อสาร
ค่าพุ่งเกินสูงสุดโดยเฉลี่ยกรณีระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (%)	2.1656 - 8.1656 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	3.64 - 3.82 ที่ทุกคู่การสื่อสาร	3.569 - 4.349 ที่ทุกคู่การสื่อสาร

ตาราง 5-16 สรุปการละทิ้งแพกเกตข้อมูลกรณีใช้การส่งข้อมูลที่ 12.19 วินาทีต่อแพกเกต

การจำลอง	การละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยรวมทั้งหมด	การละทิ้งแพกเกตข้อมูลแยกประเภท (สาเหตุที่ทำให้เกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลที่สูงที่สุดจะถูกระบุด้วย การขีดเส้นใต้)	
		NRTE	LQI และ NOT
5.2	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV = 4IMC-MAODV
5.3	3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	-
5.4	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	-
5.5	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	-
5.6	3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	-

ตาราง 5-17 สรุปการละทิ้งแพกเกตข้อมูลกรณีใช้การส่งข้อมูลที่ 10 แพกเกตต่อวินาที

การจำลอง	การละทิ้งแพกเกตข้อมูลโดยรวมทั้งหมด	การละทิ้งแพกเกตข้อมูลแยกประเภท (สาเหตุที่ทำให้เกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลสูงที่สุดจะถูกระบุด้วย การขีดเส้นใต้)		
		NRTE	IFQ (MAC)	IFQ (Network layer)
5.7	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV = 4IMC-MAODV	AODV > 3IMC-MAODV > 4IMC-MAODV

ตาราง 5-18 ความคุ้มค่าของปริมาณงานต่ออินเทอร์เน็ตเฟส

การจำลอง	ช่วงการเปลี่ยนแปลงที่แต่ละโปรโตคอลให้ความคุ้มค่าที่สุดในมุมมองของปริมาณงานต่ออินเทอร์เน็ตเฟส		
	AODV	3IMC-MAODV	4IMC-MAODV
5.2	1 – 5 โหนดต้นทาง	-	-
5.3	ไม่มีการทดสอบ	1 – 4 และ 6 โหนดต้นทาง	-
5.4	1-2 คู่การสื่อสาร	-	4 – 14 คู่การสื่อสาร
5.5	1-2 คู่การสื่อสาร	-	4 – 14 คู่การสื่อสาร
5.6	ไม่มีการทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง 3 โปรโตคอล		
5.7	1-2 คู่การสื่อสาร	7 - 8 คู่การสื่อสาร	9 คู่การสื่อสาร

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเทอร์เฟซหลายช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานบนเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้กับโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ทั้งในมุมมองของระบบสื่อสารและระบบควบคุม ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยมีรายละเอียดของการวิจัยตามบทที่ 3 และบทที่ 5 ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปของงานวิจัย ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น รวมทั้งวิจารณ์ผลพร้อมข้อเสนอแนะสำหรับโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเทอร์เฟซหลายช่องสัญญาณให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดประโยชน์และแนวทางต่อผู้ศึกษาในการนำไปใช้งานหรือพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยด้านเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาทบทวนเอกสารตีพิมพ์พบว่าม้งานวิจัยและบทความที่ศึกษาการใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ที่ถูกใช้งานบนเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 น้อยมาก และพบว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV มีสมรรถนะทั้งในมุมมองระบบสื่อสารและระบบควบคุมต่ำลงเมื่อความต้องการในการส่งข้อมูลและจำนวน โหนดเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นประเด็นที่มีความน่าสนใจว่าจะพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV อย่างไรให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้นเมื่อถูกใช้งานบนเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในสถานการณ์ดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาทบทวนเอกสารตีพิมพ์ที่พิจารณาในส่วน of ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแล้วค้นพบว่าวิธีการเพิ่มอินเทอร์เฟซและช่องสัญญาณสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเทอร์เฟซหลายช่องสัญญาณพร้อมทั้งศึกษาสมรรถนะจากโพรโทคอลที่พัฒนาขึ้นทั้งมุมมองของระบบสื่อสารและระบบควบคุม

ผลการศึกษาและการจำลองในบทที่ 3 ทำให้ทราบว่าการใช้งานโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV จะมีอัตราการส่งและปริมาณงานจากแพกเกตข้อมูลต่ำลงเมื่อความต้องการส่งข้อมูลและจำนวนโหนดต้นทางเพิ่มขึ้น และยังพบว่าการสุ่มเวลาเริ่มต้นส่งข้อมูลของทุกโหนดต้นทางจะให้สมรรถนะสูงกว่ากรณีทุกโหนดต้นทางส่งข้อมูลที่เวลาเริ่มต้นพร้อมกันเนื่องจากประสบความสำเร็จในการหาเส้นทางมากกว่า พร้อมทั้งได้ทำการจำลองเพื่อค้นหาปริมาณงานสูงสุดที่โพรโทคอล AODV ต้นแบบสามารถทำได้กรณีใช้อัตราการส่งแพกเกตข้อมูลด้วยความเร็วช่วงเวลา

ขึ้นส่วนลึบต่อแพกเกต ซึ่งเป็นค่าที่ใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายในบทที่ 5 [22] โดยมีปริมาณงานสูงสุดประมาณ 150 บิตต่อวินาทีเท่านั้นในกรณีที่มีการเพิ่มจำนวนโหนดต้นทาง เหตุผลหลักที่ทำให้สมรรถนะต่ำลงมาจากการละทิ้งแพกเกตข้อมูลเพราะโพรโทคอลไม่สามารถจัดเส้นทางได้แสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE และผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่ากรณีใช้อัตราการส่งแพกเกตข้อมูลด้วยความเร็วช่วงเวลานั้นส่วนลึบต่อแพกเกตที่เป็นการจัดเส้นทางครั้งเดียวจะให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่ากรณีมีการจัดเส้นทางทุกครั้งซึ่งเป็นผลมาจากพารามิเตอร์ ART ของโพรโทคอล AODV เป็นตัวกำหนดเวลาการคงอยู่ของเส้นทางที่จัดขึ้น

การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอล AODV ต้นแบบและโพรโทคอล AODV หลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารบนเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายในบทที่ 5 ทำให้ทราบว่าโพรโทคอล AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณสามารถรองรับจำนวนโหนดเซนเซอร์หรือโหนดต้นทางและโหนดปลายทางได้สูงกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบ ผลการจำลองในบทนี้แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล 4IMC-MAODV จะให้สมรรถนะทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมได้ดีที่สุดรองลงมาคือ โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ AODV ต้นแบบที่ให้สมรรถนะต่ำสุด โดยสิ่งที่ทำให้โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะสูงกว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบมาจากสองส่วนในสองกระบวนการทำงาน ส่วนแรกคือช่วงกระบวนการจัดเส้นทางโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV มีช่องสัญญาณและอินเตอร์เฟซแยกออกมาสำหรับกระบวนการนี้โดยเฉพาะ ซึ่งกรณีที่เป็นการจัดเส้นทางทุกครั้งต่อการส่งแพกเกตข้อมูลหนึ่งแพกเกต การละทิ้งแพกเกตข้อมูลส่วนใหญ่เกิดจากโพรโทคอลไม่สามารถหาเส้นทางไปยังปลายทางได้หรือก็คือการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ NRTE และกรณีที่อัตราการส่งข้อมูลสูงจะเกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ Network layer ซึ่งเป็นผลกระทบจากกระบวนการจัดเส้นทางด้วยเช่นกัน โดยการเพิ่ม Common channel และ Common interface ของโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV สามารถลดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลที่แสดงด้วยสองตัวบ่งชี้นี้ได้ดีกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ส่วนที่สองคือกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูล โดยเมื่ออัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง ช่องสัญญาณเพียงช่องสัญญาณเดียวไม่สามารถรองรับการส่งข้อมูลได้ทันจนเกิดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลจากการล้นของแพกเกตที่บัฟเฟอร์แสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ซึ่งโพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV มีการเพิ่มช่องสัญญาณและอินเตอร์เฟซเพื่อกระจายความแออัดของแพกเกตข้อมูลในช่องสัญญาณพร้อมด้วยกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณที่ช่วยลดการละทิ้งแพกเกตข้อมูลแสดงด้วยตัวบ่งชี้ IFQ ที่ชั้น MAC ได้ดีกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบ จากคำอธิบายที่กล่าวมาจึงทำให้

โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ให้สมรรถนะที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV ต้นแบบทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุม และหากทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความคุ้มค่าของปริมาณงานที่ได้โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซ กรณีที่ระบบมีโหนดปลายทางเพียงโหนดเดียวและมีอัตราการส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนลึบ โพรโทคอลที่นำเสนออาจจะให้ความคุ้มค่าที่ต่ำกว่า AODV หากพิจารณาในมุมมองการสื่อสารเพียงอย่างเดียวแต่อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมโยงกับสมรรถนะในระบบควบคุมโพรโทคอลที่นำเสนอก็เป็นทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับการใช้งาน และเมื่อพิจารณากรณีที่ระบบมีหลายโหนดต้นทางและปลายทางทั้งกรณีอัตราการส่งข้อมูลที่ช่วงเวลาขึ้นส่วนลึบและที่อัตราการส่งข้อมูลสูง โพรโทคอลที่นำเสนอจะให้ความคุ้มค่าของปริมาณงานที่ได้โดยเฉลี่ยต่ออินเตอร์เฟซที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างชัดเจนเมื่อจำนวนคู่การสื่อสารเพิ่มขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามโพรโทคอลจัดเส้นทางที่นำเสนอจะใช้ทรัพยากรสูงกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบในเรื่องของจำนวนอินเตอร์เฟซและความซับซ้อนของกระบวนการจัดเส้นทาง แต่ขณะเดียวกันก็ให้สมรรถนะที่สูงกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV ต้นแบบโดยที่จำนวนแพกเกตจัดเส้นทางในกระบวนการจัดเส้นทางไม่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างและข้อจำกัดของโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลในบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจากหัวข้อ 1.2.2 ได้ดังตาราง 6-1 โพรโทคอล 3IMC-MAODV และ 4IMC-MAODV ที่นำเสนอเป็นโพรโทคอลชนิด Reactive บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่สามารถใช้งาน 16 ช่องสัญญาณได้โดยไม่เกิดการรบกวนซึ่งมากกว่าโพรโทคอลอื่นๆ โพรโทคอลที่นำเสนอได้ทำการแยกอินเตอร์เฟซและช่องสัญญาณสำหรับกระบวนการส่ง-รับแพกเกตจัดเส้นทางโดยเฉพาะ พร้อมทั้งแยกอินเตอร์เฟซสำหรับส่งและรับแพกเกตข้อมูลออกจากกันเพื่อให้สามารถส่งและรับแพกเกตข้อมูลได้พร้อมกันในหลายช่องสัญญาณพร้อมด้วยกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณที่จะลดความหนาแน่นของข้อมูลสำหรับส่งแพกเกตข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณลง จากวิธีการที่กล่าวมาจะช่วยให้โพรโทคอลที่นำเสนอให้สมรรถนะที่สูงขึ้นจากอัตราการสูญเสียข้อมูลที่ลดลงทั้งในกระบวนการจัดเส้นทางและกระบวนการส่งแพกเกตข้อมูลเมื่อจำนวนโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มขึ้น โดยข้อดีของโพรโทคอลที่นำเสนอคือจำนวนอินเตอร์เฟซที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลอื่นๆ

ตาราง 6-1 เปรียบเทียบโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลในบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ

บทความ	มาตรฐานที่ใช้	โพรโทคอลจัดเส้นทาง	จำนวน Interface	จำนวน Channel	Common interface	Common channel	ข้อจำกัด
[8] 2010	IEEE 802.11	AODV (Reactive)	2	12	ไม่ใช่	ใช่	บางเวลาโหนดอาจไม่ได้รับแพคเกจจัดเส้นทาง
[9] 2013	IEEE802.15.4	DSDV (Proactive)	3	16	ใช่	ใช่	มีต้นทุนเพิ่มจากจำนวนอินเตอร์เฟซ
[11] 2006	IEEE 802.11	AODV (Reactive)	2	12	ไม่ใช่	ไม่ใช่	มีความจำเป็นต้องกระจายแพคเกจจัดเส้นทางในทุกช่องสัญญาณ
[12] 2006	IEEE 802.11	OSPF-MCDS (Proactive)	2	12	ใช่	ใช่	ไม่สามารถส่ง-รับข้อมูลพร้อมกันได้
[13] 2006	IEEE 802.11	OLSR (Proactive)	3	11	ใช่	ใช่	มีต้นทุนเพิ่มจากจำนวนอินเตอร์เฟซ
วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้	IEEE802.15.4	3IMC-MAODV (Reactive)	3	16	ใช่	ใช่	มีต้นทุนเพิ่มจากจำนวนอินเตอร์เฟซ
	IEEE802.15.4	4IMC-MAODV (Reactive)	4	16	ใช่	ใช่	มีต้นทุนเพิ่มจากจำนวนอินเตอร์เฟซ (2 Common interfaces)

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

6.2.1 ปัญหา

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณพร้อมทั้งศึกษาสมรรถนะที่ได้จากโพรโทคอลที่พัฒนาขึ้น ทั้งมุมมองของระบบสื่อสารและระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน PiccSIM ที่ประกอบไปด้วยโปรแกรมจำลอง NS2 และ MATLAB/Simulink ซึ่งเดิมถูกพัฒนาโดยผู้อื่น ส่งผลให้การศึกษาใช้งานค่อนข้างมีความซับซ้อนอย่างมาก ทำให้มีข้อจำกัดต่อการศึกษาในบางมุมมองที่ไม่สามารถทำได้เมื่อนำวิธีการหลายอินเตอร์เฟซเข้ามาปรับใช้กับเครื่องมือจำลอง

6.2.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาในเรื่องของพลังงาน

6.2.3 ข้อเสนอแนะ

การทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะต่อไปนี่ที่จะเป็นแนวทางในการพัฒนาโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณให้สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ก) ศึกษาและทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างระบบควบคุมและระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จะช่วยให้ผู้ศึกษามองเห็นช่องว่างและความสัมพันธ์ของทั้งสองระบบทำให้สามารถออกแบบโพรโทคอลที่สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ข) โพรโทคอลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาช่องสัญญาณที่มีผู้ใช้งานสูงสุดเท่านั้นเพื่อเป็นเงื่อนไขสำหรับกระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการพิจารณาช่องสัญญาณที่มีผู้ใช้งานสูงโดยไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นช่องสัญญาณที่มีผู้ใช้งานสูงสุด อาจจะสามารถทำให้กระบวนการจัดสรรช่องสัญญาณมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้

ค) ประเด็นเรื่องพลังงานเป็นสิ่งที่น่าสนใจหากสามารถวิเคราะห์พลังงานที่เกิดการสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์จากกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV ต้นแบบเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณ เมื่อจำนวนโหนดต้นทางและปลายทางเพิ่มขึ้นโพรโทคอล AODV จะมีอัตราการกินพลังงานที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV แบบหลายอินเตอร์เฟซหลายช่องสัญญาณหรือไม่ โดยหากพิจารณาการจำลอง 5.7 ในส่วนของจำนวนการส่งแพ็กเก็ต RREQ ที่ถูกส่งที่ชั้น MAC จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากรณีระบบมีอัตราการส่งข้อมูลสูงโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถลดจำนวนการส่งแพ็กเก็ตนี้ได้ดีกว่าโพรโทคอล AODV ซึ่งสามารถเชื่อมโยงไปยังเรื่องพลังงานที่สูญเสียจากการส่งแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง RREQ จำนวนมากในโพรโทคอล AODV เมื่อจำนวนคู่สื่อสารเพิ่มขึ้นโดยสามารถ

สันนิษฐานได้ว่า โพรโทคอล AODV จะใช้พลังงานสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ หากการสูญเสียพลังงานจากแต่ละอินเตอร์เฟสในโหมดเตรียมพร้อม (Idle mode) ของโหนดเซนเซอร์น้อยกว่าการสูญเสียพลังงานจากโหมดการส่ง (Transmit mode) แต่อย่างไรก็ตามในเรื่องของพลังงานที่กล่าวมาเป็นเพียงข้อสันนิษฐานเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้มีเป้าหมายในการศึกษาการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์

บรรณานุกรม

- [1] A. Booranawong, "Routing Mechanisms Based on Control System Response for Wireless Sensor and Actuator Networks," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Prince of Songkla University., Songkla, Thailand, 2015.
- [2] C. E. Perkins, E. M. Royer, and S. R. Dos, Ad hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF Internet Draft (draft-ietf-manetaadv-06.txt), July 2000.
- [3] E.M. Royer and C.K. Toh, "A Review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," *IEEE Personal Communications*, pp. 46–55, 1999.
- [4] M. Bjorkbom, S. Nethi, L.Eriksson and R.Jantti, "Wireless Control System Design and Co-simulation," *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 1075–1086, 22 June. 2011.
- [5] S. Lohier, A. Rachedi, I. Salhi, E. Livolant, "Multichannel access for bandwidth improvement in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," *Wireless Days (WD), 2011 IFIP* , pp.1-6, Oct. 2011.
- [6] A. Booranawong, W. Teerapabkajorndet, and C. Limsakul, "Energy Consumption and Control Response Evaluations of AODV Routing in WSANs for Building-Temperature Control," *Sensors*, vol. 13, no. 7, 2013.
- [7] S. Chantaraskul, "Multi-channel Utilization Algorithms for IEEE 802.15.4 based Wireless Network: A Survey," *Eng. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 119–126, Jul. 2013
- [8] T.-T. Luong, B.-S. Lee, C.-K. Yeo, and A. Kassler, "Efficient channel assignment and routing protocol for multiple channels multiple interfaces wireless mesh network," *2010 IFIP Wireless Days*, Oct. 2010.
- [9] S. Songhkao and W. Teerapabkajomdet, "Network Bandwidth Enhancement on Multi-Hop Communications for Multiple Flows of Video over Multi-Channel IEEE 802.15.4 Networks," *Journal of Convergence Information Technology*, vol8, pp. 239-247. 2013.

- [10] J. Nieminen, M. Björkbom, R. Jäntti, and L. Eriksson, "Multichannel Communications in Wireless Automation: Interdependencies between Communication and Control Parameters," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 2012, Mar. 2012.
- [11] P. Kyasanur and N. H. Vaidya, "Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 10, no. 1, pp. 31–43, Jan. 2006.
- [12] U. Lee, S. Midkiff and T. Lin, "Routing in Multi-Channel Wireless Ad-hoc Networks: OSPF-MCDS-MC," *journal of communications*, vol. 1, may. 2006.
- [13] Y. Qu, C.-H. Lung, and A. Srinivasan, "Multi-channel OLSR with a dedicated control interface," in *Proc. Int. Symp. Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, Aug. 2007.
- [14] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393- 422, March, 2002.
- [15] T. Instruments, "CC2420 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf> (accessed on 1 March 2014).
- [16] S. Farahani, *ZigBee wireless networks and Transceivers: The complete guide for RF/wireless engineers*. Amsterdam: Newnes (an imprint of Butterworth-Heinemann Ltd), 2008.
- [17] V. Prakash Rao, *The simulative Investigation of Zigbee/IEEE 802.15.4*. Dresden University of Technology, 2005.
- [18] G. Anastasi, E. Borgia, M. Conti, E. Gregori, A. Passarella, "Understanding the real behavior of mote and 802.11 ad hoc networks: an experimental approach," *Pervasive Mobile Computing*, vol. 1, no. 2, pp. 237-256, 2005.

- [19] B. Latré, P. De Mil, I. Moerman, B. Dhoedt, P. Demeester, and N. Van Dierdonck, "Throughput and delay analysis of Unslotted IEEE 802.15.4," *Journal of Networks*, vol. 1, no. 1, 2006.
- [20] X. Liang and I. Balasingham, "Performance analysis of the IEEE 802.15.4 based ECG monitoring network," in *Proceedings of the 7th IASTED International Conferences on Wireless and Optical Communications*, pp. 99–104, Montreal, Canada, 2007.
- [21] T. R. Burchfield, S. Venkatesan, and D. Weiner, "Maximizing throughput in ZigBee wireless networks through analysis, simulations and implementations," in *Proc. Int. Workshop Localized Algor. Protocols WSNs*, Santa Fe, NM, pp. 15–29, Jun. 2007.
- [22] K. Ji and W.J. Kim, "Optimal bandwidth allocation and QoS-adaptive control co-design for networked control systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 6, pp. 596–606, 2008.
- [23] S. Lohier, A. Rachedi, I. Salhi, E. Livolant, "Multichannel access for bandwidth improvement in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," *Wireless Days (WD), 2011 IFIP*, pp.1-6, Oct. 2011.
- [24] Z. Dahham, A. Sali, and B. M. Ali, "An efficient backoff algorithm for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 75, no. 4, pp. 2073–2088, 2014.
- [25] B. Pavkovic, F. Theoleyre, and A. Duda, "Multipath Opportunistic RPL Routing over IEEE 802.15.4," in *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, New York, NY, USA, pp. 179–186, 2011.
- [26] P. Lute and D.V. Paassen, "Optimal indoor temperature control using predictor," *IEEE Control Systems*, vol. 12, pp. 4–10, 1995.
- [27] R. A. Calvo and J. P. Campo, "Adding multiple interface support in ns-2." [Online]. Available: <http://personales.unican.es/aguerocr/files/ucMultiIfacesSupport.pdf>

ภาคผนวก
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Performance Analysis of Multi-Channel Multi-Interface AODV in IEEE-802.15.4 WSANs

Yuttana Chaichana

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand
E-mail: 5610120028@email.psu.ac.th

Wiklom Teeraparbajornmet

Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand
E-mail: wiklom.t@psu.ac.th

Abstract—Traditional multi-hop wireless sensor and actuator networks (WSANs) based on an IEEE 802.15.4 standard can unintentionally provide poor communication and control performance when a traffic load is high. This paper studies the potential of employing multi-channel and multi-interface (MCMI) communication to improve the performance of WSANs. The Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing protocol is employed in this evaluation. The simulation demonstrates the promising results of using MCMI especially when the WSANs have to support a high number of traffic flows.

Keywords; wireless sensor and actuator networks; control; routing; channel assignment, interference, PiccSIM, NS2

I. INTRODUCTION

How best to utilize WSANs for providing communication among all components in a control application to meet both network and control quality requirements is not well understood. Realizing infrastructureless networked control is the next research challenge due to the advantages in highly flexible installation and modification. System dynamics of both communication and control affect each other rigorously when a controller, an actuator and various sensors in a control system are linked by the contention-based WSANs.

The work in [1] studies how to design wireless control systems by using a co-simulation tool. Discussions on several co-design solutions are provided. [1] investigates the wireless control networks in both medium access control (MAC) and network layers. The wireless systems are based on the IEEE 802.15.4 standard. The work in [1] focuses on effects of consecutive packet drops on control performance. Recently, [2] investigates the interdependencies between control and communication parameters in multi-channel wireless automation. However, the focus in [2] is only at the link level. There is no consideration about the multi-hop communication that can cause the sophistication of WSAN performance. These seminal works inspire us to conduct further research investigation in WSANs.

The multi-channel and multi-interface (MCMI) approach for WSANs is the main focus in this investigation. Note that the interface, which is the technical term used in this paper, is simply a typical radio transceiver. Our work studies the

effects on the control performance when a MCMI AODV routing protocol [3] is employed to allow the multi-hop communication in WSANs. The traditional single-channel and single-interface (SCSI) and the MCMI AODV are compared in both performance aspects of control and communication by simulation. A simple multi-hop network topology is employed and the number of traffic sources is varied in this study. All traffic flows are destined to the same sink in this scenario. The numerical results in this evaluation indicate that the MCMI scheme can improve the performance of WSANs when the number of flows is high.

II. MCMI AODV ALGORITHM

The MCMI scheme requires a node to be equipped with multiple radio interfaces. This paper assumes that all nodes in the network have the same number of interfaces. In addition, the number of different radio channel frequencies required in the networks employing this MCMI scheme must be equal to the number of radio interfaces equipped at each node.

Note that there are 16 channels specified in the IEEE 802.15.4 standard. The radio channels denoted by distinct IDs are centered on different radio frequencies. Assume that there is no adjacent channel interference. In the MCMI scheme, all radio interfaces equipped at the node are manually pre-configured to use different channel IDs. The same set of selected channel IDs is assigned to every node in the network in this paper.

Each radio interface performs its own communication protocols at the physical, MAC and link layers. However, each node equipped with these multiple radio interfaces has only one routing table. The MCMI AODV routing proposed in [3] adds the radio interface identification in the routing table such that the AODV routing can be extended to support MCMI communication services. Correspondingly, the MCMI AODV routing is similar to the original AODV [4]. The MCMI AODV can beneficially provide a better opportunity for discovering a routing path on the radio channel that has less contention and packet error rates. How each node carries out the MCMI AODV routing protocol depending on the node's status (i.e. source, relay or sink) at that time. These mechanisms are explained below.

- Source node status

This status implies that the source has data packets ready for transmissions. The MCMI routing is initiated when the source doesn't have route information to the sink. In the beginning, a route request (RREQ) message is broadcasted on all radio interfaces of the source. Subsequently, the source waits for receiving a route reply (RREP) message originated from either the sink or a relay (which knows this routing information) for a predefined period of time. When the source receives the RREP, it records the received interface identification and the discovered route. The source starts transmitting packets on the established path of that radio interface. The established route is discarded if it is not used in a predefined period of time known as a route active time out.

- Relay node status

When the relay receives multiple duplicate RREQs with the same destination sequence number from its neighboring nodes, only the first received RREQ is broadcasted further. When the relay receives the RREP, it unicasts that RREP back to its neighboring node specified in the reverse path entry, which is created previously from the broadcasted RREQ, in its routing table.

- Sink node status

When the sink receives the RREQ message, it records which radio interface identification that the first RREQ arrives and unicasts the RREP on the reverse path established previously on that interface.

III. EXPERIMENTAL DESIGN

The main objective of this experiment is to analyze the performance of the IEEE-802.15.4 WSANs employing the MCMI AODV compared with the original AODV on a SCSi node. In this evaluation, the MCMI node is equipped with two interfaces of transceivers, namely Interface 0 and Interface 1. This work assumes different radio channels (without adjacent channel interference) are employed on these two interfaces. Similarly, Channel ID 0 is assigned to Interface 0 and Channel ID 1 is assigned to Interface 1. The PccSIM simulation tool [1] is employed in this performance evaluation.

The control application over WSANs studied in this paper is the building-temperature control. The plant model is as same as the system considered in [5]. All parameters in the plant model are set as in [5] except the supply air flow rate which is changed to 0.192 m³/s [6]. The desired temperature is set at 21 °C. There is no zero-order hold in the PID controller simulated in this work. The parameters of the proportional gain (K_P), the integral gain (K_I) and the derivative gain (K_D) are set at 6, 0.05 and 55, respectively. The rise time (T_r) of this control system is 121.96 s.

The simulation scenario investigated in this paper is shown in Fig. 1. Each source node S_1 - S_i measures the temperature of each plant and transmits packets to the same sink. Due to the nodes' locations in Fig 2 and the transmission ranges of all nodes set at 7 m, all source nodes can't reach the sink in one hop. Note that the carrier sensing

range and the transmission range are set equally in this simulation. The two-ray-ground propagation model is assumed here. The transmission rate is 250 kbps according to the IEEE 802.15.4 standard at 2.4 GHz. The number of source nodes is an experimental factor varied in 5 levels. Each level i consists of source nodes S_1 - S_i . All source nodes collect temperature data from their own plants at the same sampling interval. Two levels of the sampling interval are varied in this simulation: $T_r/4$ and $T_r/10$. These two values are the minimum and the maximum levels in the sampling range recommended in [7]. Since the route active time out set in NS2 is 10 s and the values of $T_r/4 = 30.49$ s and $T_r/10 = 12.20$ s, the AODV route discovery occurs every sampling interval for both cases of SCSi and MCMI.

The simulation period of all experiments is 1,000 s. The parameter setting related to packet lengths and buffer sizes for communication is given in Table I.

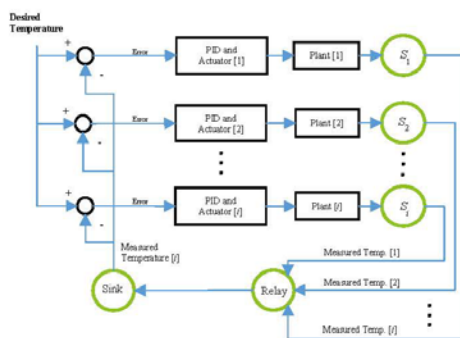


Fig. 1. Simulated WSAN systems.

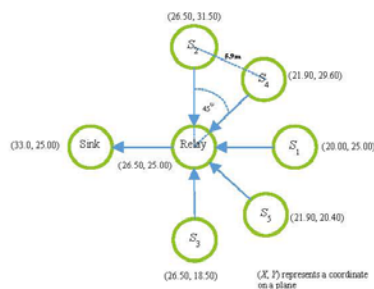


Fig. 2. Evaluated WSAN topology.

The control response of each plant $[i]$ in the multiple loop control systems in Fig. 1 may or may not converge to the steady state in the simulation period. This result depends on the performance of the underlying WSANs. Accordingly, the performance metrics in this work are measured in both aspects of control and communication. At least five replications of each simulation scenario are run to attain an average result with the confidence interval (c.i.) of 95 %.

In this simulation, the control responses of all plants are recorded. These control responses can result in two categories: steady-state and non-steady-state responses. The ratio of these two control-response categories called a control convergence ratio is the first metric for evaluating the control-application performance. The second metric evaluated from the recorded control responses is an integral absolute error (IAE) which is a typical measure of the control performance. For the communication aspect, an average packet delivery ratio and an average throughput per source are evaluated. To gain better understanding, total packet drops of all nodes in the WSANs are also collected for a further analysis of the performance problem.

TABLE I. PACKET LENGTH AND BUFFER SIZE.

Parameters	Values
-Size of control-application data	46 bytes
-Routing header length	66 bytes
-MAC header length	73 bytes
-Number of packets allowed for AODV routing to buffer	64 packets
-Interface queue size between link and MAC layers	50 packets

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Control performance

Fig. 3 and Fig. 4 illustrate the average control convergence ratios and the average IAEs when the sampling interval is set at $T_s/4$. Both figures indicate that the MCMI AODV can provide better control performance than the SCSI AODV when the number of sources is varied at 4 and 5. The results are not statistically different when the number of sources is lower than 4. Similar interpretations can be used for discussing the numerical results in Fig. 5 and Fig. 6 where the sampling interval is $T_s/10$. The reasons why the MCMI case can provide higher control quality than the SCSI case is due to the effects of wireless network communication discussed in the next subsection.

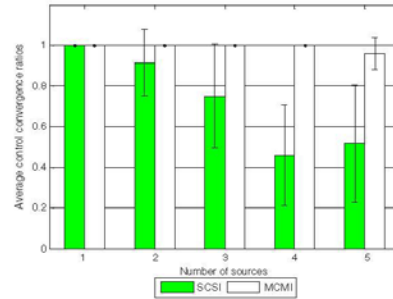


Fig. 3. Average control convergence ratios at $T_s/4$. MCMI are better than SCSI when the number of sources is varied at 4 and 5.

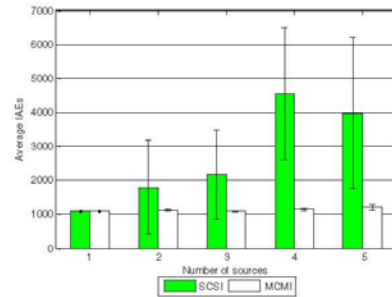


Fig. 4. Average IAEs at $T_s/4$. MCMI are better than SCSI when the number of sources is varied at 4 and 5.

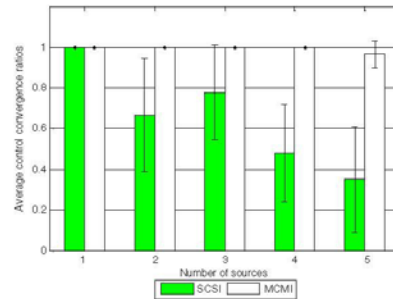


Fig. 5. Average control convergence ratios at $T_s/10$. MCMI are better than SCSI when the number of sources is varied at 4 and 5.

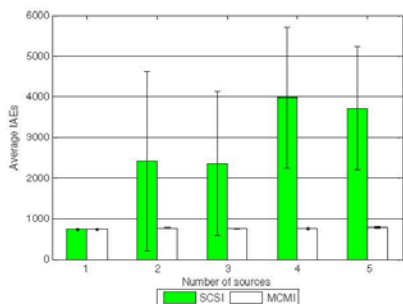


Fig. 6. Average IAEs at $T_s/10$. MCMI are better than SCSI when the number of sources is varied at 4 and 5.

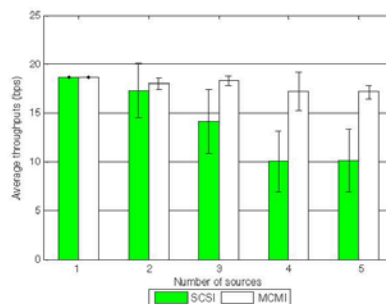


Fig. 8. Average throughputs of MCMI and SCSI at $T_s/4$ are statistically different when the number of sources is varied from 3 to 5.

B. Communication performance

Fig. 7 and Fig. 8 show the average packet delivery ratios and the average throughputs per source when the sampling interval is set at $T_s/4$. The numerical results indicate that the performance metrics are statistically different when the number of sources in the simulation scenario is varied from 3 to 5 sources. The MCMI offers better packet delivery ratios and throughputs than the SCSI in all three numbers of sources. However, there is only little difference between the MCMI and the SCSI in the case of three sources when considering the confidence intervals of both average results. Similarly, the results in Fig. 9 and Fig. 10 when the sampling interval is set at $T_s/10$ show the same trend. Additionally, the average throughputs in Fig. 10 are higher than the results in Fig. 8. This is because the higher traffic load generated from the higher sampling rate of $T_s/10$.

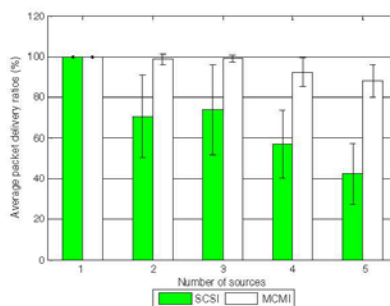


Fig. 9. Average packets delivery ratios of MCMI and SCSI at $T_s/4$ are statistically different when the number of sources is varied from 3 to 5.

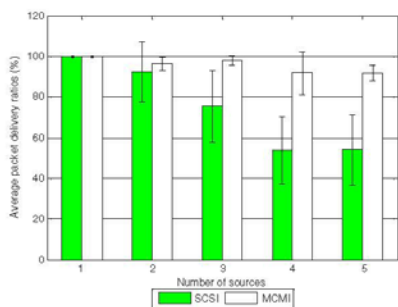


Fig. 7. Average packet delivery ratios of MCMI and SCSI at $T_s/10$ are statistically different when the number of sources is varied from 3 to 5.

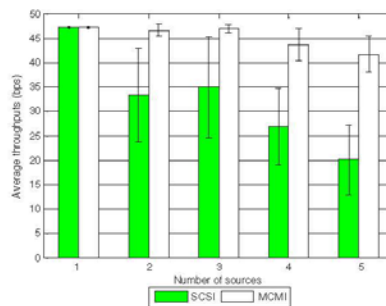


Fig. 10. Average throughputs of MCMI and SCSI at $T_s/10$ are statistically different when the number of sources is varied from 3 to 5.

C. Packets drop analysis

The average number of total packet drops in the multi-hop wireless networks is shown in Fig. 11 for the fixed sampling interval of $T_s/4$. This result complies with the results in Fig. 7 and Fig. 8. Additionally, the number of packet drops is statistically getting higher when the number of sources is increased. This is due to the fact that a higher number of sources can cause more contention in the wireless channel. Fig. 14 illustrates the average packet drops in the networks when the sampling interval is set at $T_s/10$. The result in Fig. 14 shows the trend similar to Fig. 11. The major difference is that the total packet drops in the case of the high sampling rate of $T_s/10$ are larger than the case of the low sampling rate of $T_s/4$.

This investigation further analyzes the causes of packet drops which are provided by various drop flags in NS2. The observation of the numerical results indicates that two main packet drops are marked by LQI and NRTE drop flags. The LQI indicates the number of collisions of data packets at the MAC layer. The LQI drop is flagged when the received packet has a signal to noise ratio (SNR) lower than the acceptable level. This LQI can happen when there are simultaneous transmissions of different nodes due to the hidden terminal problem or the random back off mechanism. The NRTE is flagged on the packet drop in network-layer buffer due to the circumstance of no route time out. This case mostly happens due to the unsuccessful route discovery process.

The LQI and the NRTE results are given in Fig. 12 and Fig. 13 when the sampling interval is set at $T_s/4$. These results indicate that the main cause of the poor performance in the traditional SCSi AODV is NRTE. The MCMi AODV can significantly reduce the number of NRTE packet drops as shown in Fig. 13. Similar results are shown in Fig. 15 and Fig. 16 when the sampling interval is set at $T_s/10$. Comparing the number of packet drops in Fig. 13 and Fig. 16 finds that a higher sampling rate can result much higher NRTE packet drops in the potentially high contention network topology as shown in Fig. 2.

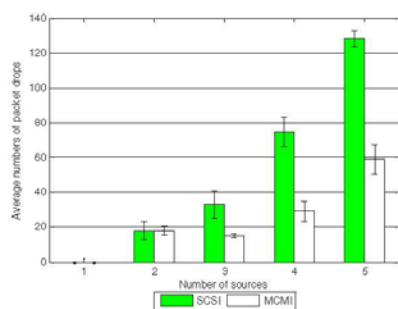


Fig. 11. Average numbers of packet drops of MCMi at $T_s/4$ are better than SCSi when the number of sources is higher than 2.

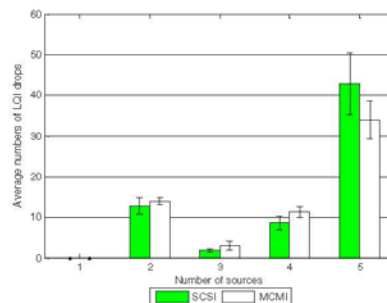


Fig. 12. Average numbers of LQI drops of MCMi and SCSi at $T_s/4$ are not statistically different.

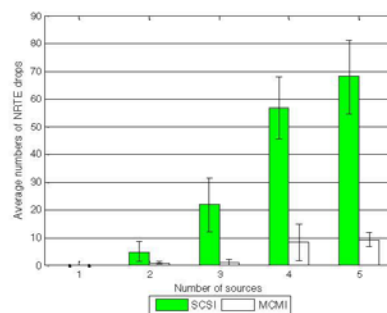


Fig. 13. Average numbers of NRTE drops of MCMi and SCSi at $T_s/4$ are statistically different when the number of sources is varied from 3 to 5.

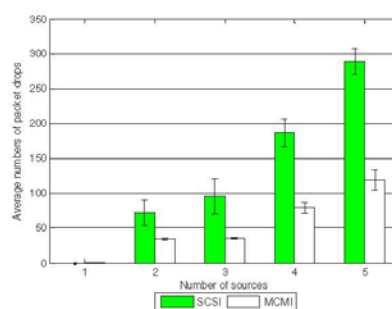


Fig. 14. Average numbers of packet drops of MCMi at $T_s/10$ are better than SCSi when the number of sources is higher than 1.

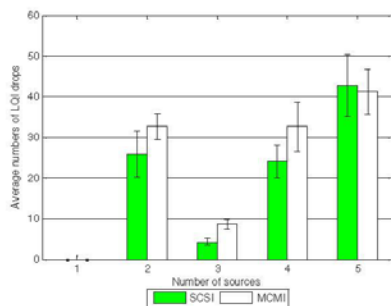


Fig. 15. Average numbers of LQI drops of MCMI and SCSi at $T_i/10$ are not statistically different.

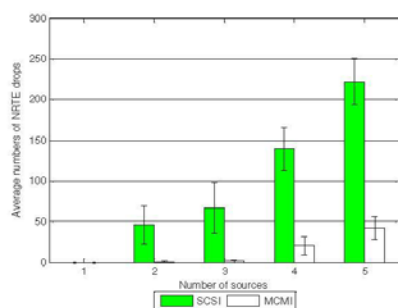


Fig. 16. Average numbers of NRTE drops of MCMI and SCSi at $T_i/10$ are statistically different when the number of sources is varied from 2 to 5.

CONCLUSION

The MCMI AODV approach can provide better control and communication performance than the original SCSi AODV, especially when there is high contention due to the random access in the IEEE-802.15.4 WSNs. Further investigations about the effects of the co-channel interference on the channel selections among multi-hop transmissions are our ongoing research.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported in part by Prince of Songkla University, and in part by NECTEC-PSU center of excellence in Wireless Sensor Networks and Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

REFERENCE

- [1] M. Björkbo, S. Nethi, L. M. Eriksson, and R. Jäntti, "Wireless control system design and co-simulation," *Control Eng. Pract.*, vol. 19, no. 9, pp. 1075–1086, Sep. 2011.
- [2] J. Nieminen, M. Björkbo, R. Jäntti, and L. Eriksson, "Multichannel Communications in Wireless Automation: Interdependencies between Communication and Control Parameters," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 2012, pp. 1–14, Mar. 2012.
- [3] R. A. Calvo and J. P. Campo, "Adding Multi Interface Support in NS-2." [Online]. Available: <http://telecom.inescporto.pt/~rcampos/ucMultifacesSupport.pdf>.
- [4] C. Perkins, E. Royer, and S. Das, "RFC 3561 Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," 2003.
- [5] A. Booranawong, W. Teerapakajornet, and C. Limsakul, "Energy Consumption and Control Response Evaluations of AODV Routing in WSNs for Building-Temperature Control," *Sensors*, vol. 13, no. 7, pp. 8303–8330, Jun. 2013.
- [6] B. Tashtoush, M. Molhim, and M. Al-Rouisan, "Dynamic model of an HVAC system for control analysis," *Energy*, no. 30, pp. 1729–1754, 2005.
- [7] K. Ji and W.-J. Kim, "Optimal Bandwidth Allocation and QoS-Adaptive Control Co-Design for Networked Control Systems," *Int. J. Control Autom. Syst.*, pp. 831–839, Jan. 2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายยุทธนา ไชยชนะ
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120028
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

ทุนศึกษย์ก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Y. Chaichana and W. Teerapabkajorndet, "Performance Analysis of Multi-Channel Multi-Interface AODV in IEEE-802.15.4 WSANs", *the 12 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology (ECTI-CON 2015)*, pp.1-6, June 24-27, 2015.