



กลไกการจัดเส้นทางตามผลตอบสนองของระบบควบคุมสำหรับเครือข่าย
เซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย

Routing Mechanisms Based on Control System Response for Wireless
Sensor and Actuator Networks

อภิเดช บูรณวงศ์

Apidet Booranawong

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ กลไกการจัดเส้นทางตามผลตอบสนองของระบบควบคุมสำหรับเครือข่าย
 เช่นเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

ผู้เขียน นายอภิเดช บุญวงศ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ธีรภาพขจรเดช)	คณะกรรมการสอบ ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (รองศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ธีรภาพขจรเดช)
..... (รองศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สกุนา เจริญปัญญาศักดิ์)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

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

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกรม ธีรภาพขจรเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ

(นายอภิเดช บุรณวงศ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายอภิเดช บุรณวงศ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ กลไกการจัดเส้นทางตามผลตอบสนองของระบบควบคุมสำหรับเครือข่าย
เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

ผู้เขียน นายอภิเดช บุรณวงศ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย โหนดเซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อมที่สนใจ และส่งต่อข้อมูลที่ได้ไปยังแอคชูเอเตอร์ในลักษณะแบบเป็นทอด ๆ แอคชูเอเตอร์เชื่อมต่อกับตัวควบคุมทำหน้าที่ตัดสินใจ และจัดการควบคุมสภาพแวดล้อมนั้น ๆ โพรโทคอลการจัดเส้นทางเป็นกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์ไปยังแอคชูเอเตอร์ อย่างไรก็ตาม ปัญหาการสูญหายของข้อมูล การเกิดความล่าช้าในการส่ง-รับข้อมูลในเครือข่าย และการที่โหนดเซนเซอร์ใช้พลังงานหมดจนไม่สามารถทำการตรวจวัดและส่งต่อข้อมูล ส่งผลให้แอคชูเอเตอร์ได้รับข้อมูลน้อยลงหรือไม่สามารถรับข้อมูลได้ และเป็นผลให้ไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ตามความต้องการ อย่างไรก็ตาม การใช้งานโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ได้รับการออกแบบให้มีการเลือกใช้เส้นทางอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถช่วยลดปัญหาการวิจัยดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบใหม่สำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการควบคุม ความใหม่ของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ คือ มีการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมอย่างอัตโนมัติและปรับเปลี่ยนได้ตามสถานะของระบบควบคุม โดย ก) หากระบบควบคุมอยู่ในสถานะชั่วคราว จะพิจารณาความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตบนการเชื่อมโยงไร้สายเป็นตัววัดการเลือกเส้นทาง ข) หากระบบควบคุมอยู่ในสถานะอยู่ตัว จะพิจารณาการใช้พลังงานของโหนดเป็นตัววัดการเลือกเส้นทาง และ ค) พิจารณาระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางที่ระบบควบคุมสามารถยอมรับได้ ผลจากการจำลองการทำงานกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร และใช้งานตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอให้สมรรถนะด้านการสื่อสารและด้านการควบคุมสูงกว่ากรณีโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV ภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต จำนวนโหนด และช่วงเวลาการชักตัวอย่าง ทั้งยังช่วยให้สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารเข้าสู่ค่าเป้าหมายรวดเร็วกว่าโพรโทคอล AODV ในกรณีที่ระบบควบคุมถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม และท้ายสุด การกำหนดใช้ระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางที่เหมาะสม สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะด้านการสื่อสารและด้านการควบคุม

Thesis Title Routing Mechanisms Based on Control System Response for Wireless Sensor and Actuator Networks

Author Mr. Apidet Booranawong

Major Program Electrical Engineering

Academic Year 2014

ABSTRACT

In wireless sensor and actuator networks (WSANs), sensor nodes gather information of a physical system and transmit their sensing data to actuators via wireless multi-hop communications. The actuators connected to controllers make decisions and perform their actions upon the physical system. A routing protocol is a mechanism of finding a route for delivering sensing data from a source to a destination. However, packet loss effects, variation of packet transmission delay on wireless links, and the insufficient power of sensor nodes can lead to decrease in a number of successful received packets at the actuators. As a result, the actuators cannot control the physical system to the desirable control level. However, the use of a well-designed routing protocol can help to reduce the chance of this degrading control performance by selecting an appropriate route. This thesis proposes a new routing protocol for control applications. The novelty of the proposed routing is that it automatically and adaptively selects an appropriate route for data transmission based on control system states. In a transient state, it selects a route by considering transmission latency on a wireless link as a routing metric. In a steady state, energy consumption of a node is employed as a routing metric. Finally, an end-to-end delay threshold defined by the control system is also considered. The simulation results from the building temperature control scenario with the PID controller show that the proposed routing protocol gives better communication and control performance than an original AODV under varying packet loss rates, number of nodes, and sampling periods. It also helps the control system reach the desired control level faster than the AODV during the environmental disturbance. Finally, using an appropriate end-to-end delay threshold can help to improve communication and control performance.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ในระดับปริญญาเอกนี้สำเร็จได้ เนื่องจากการช่วยเหลือ สนับสนุน จากบุคคลรอบข้าง ข้าพเจ้าดีใจ และภูมิใจที่ได้ทำงานร่วมกับบุคคลผู้เป็นอัจฉริยภาพ และมีความเมตตากรุณาเป็นที่ตั้ง ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณทุก ๆ ท่าน ไว้ ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกลม ธีรภาพขจรเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยฝึกฝนการทำวิจัยในเชิงลึก ช่วยพัฒนากระบวนการคิด การเรียนรู้ และการแก้ปัญหา ให้ความรู้และคำปรึกษาที่มีคุณประโยชน์ ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา ตลอดจนได้ช่วยตรวจทาน วิจาร์ณ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐฐา จินดาเพ็ชร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แสงสุรีย์ วสุพงศ์อัยยะ ดร. วฤทธิ วิชกุล ดร. ดุจดาว บุรณะพาณิชยกิจ และอาจารย์ภาคภูมิ ห่ออึ้งเจริญ กรรมการสอบประเมินคุณภาพ โครงร่างและรายงานความก้าวหน้าวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกุณา เจริญปัญญาศักดิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก (ผู้ทรงคุณวุฒิ) ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ช่วยวิจารณ์งานเพื่อปรับปรุงแก้ไข ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ และได้ช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (สพท.) สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาในระดับปริญญาเอกแก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้องนักศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ และได้ทำกิจกรรมต่าง ๆ ที่น่าจดจำร่วมกัน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายแพทย์ ญัฐดนัย สกลพรวิสิน ที่ได้ให้การช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าน้อมรำลึกถึงพระคุณบิดา ร้อยตำรวจตรี ยกช้วน บุรณวงศ์ มารดา นางจวีภรณ์ บุรณวงศ์ และครอบครัว ที่ให้ความรักความห่วงใย คอยเอาใจใส่ดูแล ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจที่ดีเยี่ยมแก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนกระทั่งสำเร็จปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

อภิเดช บุรณวงศ์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วิทยวิจัย	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	6
1.7 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	6
1.8 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์	7
2. ทบทวนวรรณกรรม	8
2.1 บทนำ	8
2.2 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย	9
2.2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอ- เตอร์ไร้สาย	9
2.2.2 สรุปช่องว่างของความรู้จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่าย เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย	19
2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง	21
2.3.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง	21
2.3.1.1 โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย	21
2.3.1.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	22
2.3.1.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชู- เอเตอร์ไร้สาย	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 สรุปช่องว่างของความรู้จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอล การจัดเส้นทาง	32
3. แบบจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย	40
3.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ...	40
3.2 แบบจำลองทางด้านการควบคุม	42
3.2.1 แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง	42
3.2.2 ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์	44
3.3 แบบจำลองทางด้านการสื่อสาร	47
3.3.1 แบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ต	47
3.3.2 แบบจำลองพลังงาน	49
3.3.3 แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ	52
4. กลไกการจัดเส้นทางตามผลตอบสนองของระบบควบคุมสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และ แอคชูเอเตอร์ไร้สาย	54
4.1 บทนำ	54
4.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV	55
4.3 แนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR	58
4.3.1 แนวคิดการกำหนดตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR	58
4.3.2 แนวคิดการออกแบบขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR	61
4.3.3 แนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR	63
4.4 กระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR	69
4.4.1 กระบวนการสร้างเส้นทาง	69
4.4.1.1 กระบวนการส่งข้อความ RREQ	69
4.4.1.2 กระบวนการส่งข้อความ RREP	75
4.4.2 กระบวนการเลือกเส้นทางและกระบวนการปรับปรุงตารางเส้นทาง	85
4.4.3 กระบวนการนำส่งข้อมูล	92
4.5 สรุปผังงานกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. การจำลองการทำงาน ผลการจำลอง และการอภิปรายผล	102
5.1 บทนำ	102
5.2 การออกแบบการจำลองการทำงาน	103
5.2.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง	103
5.2.2 เค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานและพารามิเตอร์ที่กำหนด	105
5.2.2.1 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตรา การสูญหายของแพ็กเก็ต	105
5.2.2.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด	112
5.2.2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนช่วงเวลา การชักตัวอย่าง	114
5.2.2.4 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การรบกวนของสภาพ- แวดล้อมต่อระบบควบคุม	115
5.2.2.5 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนระดับกัน ความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	115
5.2.3 ตัววัดสมรรถนะ	116
5.3 ผลการจำลองและการอภิปรายผล	118
5.3.1 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหาย ของแพ็กเก็ต	118
5.3.1.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร	118
5.3.1.2 สมรรถนะทางการควบคุม	125
5.3.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด	128
5.3.2.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร	128
5.3.2.2 สมรรถนะทางการควบคุม	135
5.3.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการชัก ตัวอย่าง	137
5.3.3.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร	137
5.3.3.2 สมรรถนะทางการควบคุม	144

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.4 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การควบคุมของสภาพแวดล้อม ต่อระบบควบคุม	147
5.3.4.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร	147
5.3.4.2 สมรรถนะทางการควบคุม	152
5.3.5 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนระดับกันความ ล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	152
5.3.5.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร	152
5.3.5.2 สมรรถนะทางการควบคุม	157
6. สรุปผลการวิจัย ข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอและแนวทางในการ แก้ไข และข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต	160
6.1 สรุปผลการวิจัย	160
6.2 ข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอและแนวทางในการแก้ไข	161
6.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต	164
บรรณานุกรม	167
ภาคผนวก ก	179
ภาคผนวก ข	182
ภาคผนวก ค	184
ภาคผนวก ง	187
ประวัติผู้เขียน	194

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2-1 สรุปช่องว่างของความรู้จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซิร์ฟเวอร์และแอสซุเอเตอร์ไร้สาย	21
2-2 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย	34
2-3 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซิร์ฟเวอร์ไร้สาย	35
2-4 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซิร์ฟเวอร์และแอสซุเอเตอร์ไร้สาย	37
3-1 พารามิเตอร์และค่าที่กำหนดให้แก่ระบบควบคุม	43
3-2 ผลกระทบจากการปรับเพิ่มค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน ค่าอัตราขยายเชิงอินทิกรัล และค่าอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ต่อเอาต์พุตการควบคุม	45
5-1 พารามิเตอร์ที่กำหนดใช้ในการจำลองการทำงาน	108
5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าที่เฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต	128
5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าที่เฉลี่ยและช่วงเวลากการชักตัวอย่าง	146
5-4 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย	147
5-5 ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย	147
5-6 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่าย	150
5-7 ผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR ที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน	150
5-8 สมรรถนะทางด้านการควบคุมกรณีระบบควบคุมได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ...	152

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
3-1 ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ...	41
3-2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเชิงเวลา	45
3-3 แบบจำลอง Gilbert–Elliott	47
4-1 (ก) โหนดต้นทางคำนวณและฝากตัวแปร <i>State</i> ลงในข้อความ RREQ (ข) กระบวนการส่งข้อความ RREQ	75
4-2 กระบวนการส่งข้อความ RREP	85
4-3 กระบวนการเลือกเส้นทาง (ก) โหนดต้นทางรับข้อความ RREP ลำดับแรกเข้ามาและทำการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง (ข) โหนดต้นทางรับข้อความ RREP ลำดับที่สองเข้ามาและตัดสินใจสลับเส้นทางการส่งข้อมูล	90
4-4 กระบวนการเลือกเส้นทางโดยโหนดระหว่างทาง (ก) โหนด ID 24 ส่งออกข้อความ RREQ ไปยังสองเส้นทางคือเส้นทางไปยังโหนด ID 15 และโหนด ID 25 (ข) โหนด ID 24 รับข้อความ RREP ลำดับแรกและลำดับที่สอง และตัดสินใจปรับปรุงตารางเส้นทาง	92
4-5 กระบวนการนำส่งข้อมูลที่โหนดต้นทาง	94
4-6 ฝั่งงานแสดงกระบวนการรับ–ส่งข้อความ RREQ กรณีการพิจารณาค่า Broadcast ID และการสร้าง reverse route	96
4-7 ฝั่งงานแสดงกระบวนการรับ–ส่งข้อความ RREQ กรณีการบันทึกค่า <i>State</i> การกำหนดค่า sequence number และการส่งต่อข้อความ RREQ และข้อความ RREP	97
4-8 ฝั่งงานแสดงกระบวนการรับ–ส่งข้อความ RREQ กรณีการคำนวณค่า end-to-end delay ค่า delay cost ค่า energy cost และค่า final cost	98
4-9 ฝั่งงานแสดงกระบวนการรับ–ส่งข้อความ RREQ กรณีการเลือกเส้นทางและการบันทึกค่า final cost	99
4-10 ฝั่งงานแสดงกระบวนการรับ–ส่งข้อความ RREQ กรณีการสร้าง forward route การส่งต่อข้อความ RREP และการส่งข้อมูล	100
4-11 ฝั่งงานแสดงกระบวนการตรวจสอบสถานะของระบบควบคุมก่อนทำการส่งข้อมูลโดยโหนดต้นทาง	101

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-1 เค้าโครงเรื่องในการจำลองการทำงานกรณีการปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเกต	107
5-2 ตัวอย่างการวางโหนดแต่ละตัวไว้ในแต่ละห้อง	112
5-3 เค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงาน กรณีการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด (ก) 5 โหนด (ข) 13 โหนด (ค) 25 โหนด (ง) 41 โหนด และ (จ) 61 โหนด	114
5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเกต	118
5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเกต	119
5-6 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลอัตราการส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่อัตราการสูญหายของแพ็กเกตเท่ากับ 0.0, 0.1225, 0.245, 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ	122
5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเกต ...	123
5-8 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่อัตราการสูญหายของแพ็กเกตเท่ากับ 0.0, 0.1225, 0.245, 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ	125
5-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ย และอัตราการสูญหายของแพ็กเกต	127
5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเกต	127
5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยและจำนวนโหนด	130
5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยและจำนวนโหนด	130
5-13 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่จำนวนโหนดเท่ากับ 5, 13, 25, 41 และ 61 โหนด	132
5-14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยและจำนวนโหนด	133
5-15 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่จำนวนโหนดเท่ากับ 5, 13, 25, 41 และ 61.....	135
5-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ยและจำนวนโหนด	136
5-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและจำนวนโหนด	136

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าที่เฉลี่ยและจำนวนโหนด	137
5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้สำเร็จโดยเฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง	138
5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง	138
5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง	139
5-22 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่ช่วงเวลาการชักตัวอย่างเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 วินาที	141
5-23 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง	142
5-24 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่ช่วงเวลาการชักตัวอย่างเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 วินาที ...	144
5-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง	146
5-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง	146
5-27 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน	149
5-28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และระดับกั้นความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	156
5-29 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย และระดับกั้นความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	156
5-30 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่าย และระดับกั้นความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	157
5-31 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ย และระดับกั้นความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	158
5-32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และระดับกั้นความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง	158

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-33 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย และระดับความล่าช้าของการส่งแพ็ก- เกตตลอดเส้นทาง	159
6-1 ผลตอบสนองของระบบควบคุม	162
6-2 ตัวอย่างเค้าโครงเรื่องการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารมากกว่าหนึ่งห้อง (ห้องที่วาง โหนด ID 20 และโหนด ID 40)	166

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

WSANs	Wireless Sensor and Actuator Networks
WSNs	Wireless Sensor Networks
AODV	Ad-Hoc On-Demand Distance Vector
PiccSIM	Platform for Integrated Communications and Control design, Simulation, Implementation and Modeling
NS2	Network Simulator version 2
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning system
GE	Gilbert-Elliott
PID	Proportional Integral Derivative
PHY	Physical Layer
MAC	Medium Access Control
CAP	Contention Access Period
CFP	Contention Free Period
RXThreshold	Receive Threshold
CSThreshold	Carrier Sense Threshold
RF	Radio Frequency
QoS	Quality of Service
TDMA	Time Division Multiple Access
LMNR	Localized Multiple Next-hop Routing
OMNeT	Object-oriented Modular discrete Event Network Simulator
ELRS	Energy-Efficient Layered Routing Scheme
QARP	QoS-Aware Routing Protocol
VMR	Vertex Matrix Routing
QARP-CP	QoS-Aware Routing Protocol-Central Processing
QBRP	QoS-Based Routing Protocol
DSR	Dynamic Source Routing

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

OLSR	Optimized Link State Routing
EACBR	Energy-Aware Cluster-Based Routing
DGR	Dynamic Gradient-based Routing
VDSPT	Voronoi Diagram and Shortest Path Tree
ADCP	Actor Directed Clustering Protocol
GEAR	Geographical and Energy Aware Routing
D-LAOR	Delay-based Load-Aware On-demand Routing
GeRaF	Geographic Random Forwarding
RMCSR	Routing Mechanisms based on Control System Response
DSDV	Destination-Sequence Distance-Vector
C-AODV	Cooperative-queue based AODV
AOD ² V	Ad-hoc On-demand Delay constrained Distance-Vector
SPEED	SPEED routing protocol
MMSPEED	Multi-path and Multi-SPEED routing protocol
RTLTD	Real-Time routing protocol with Load Distribution
ERTLD	Enhanced Real-Time routing protocol with Load Distribution
RLQ	Resource-aware and Link Quality based routing
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GPS	Global Positioning System
RREQ	Route Request Message
RREP	Route Reply Message
RRER	Route Error Message
IAE	Integral of Absolute Error
FIFO	First-In, First-Out
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
UDP	User Datagram Protocol

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย (wireless sensor and actuator networks หรือ WSANs) ประกอบด้วยกลุ่มของโหนดเซนเซอร์ (sensor node) และโหนดแอคชูเอเตอร์ (actuator node) ทำงานร่วมกัน และติดต่อสื่อสารกันผ่านตัวกลางไร้สาย [1, 2] โหนดเซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อมที่สนใจ และส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปยังโหนดแอคชูเอเตอร์ด้วยการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สาย (wireless multi-hop communications) ในขณะที่โหนดแอคชูเอเตอร์ทำหน้าที่ตัดสินใจ และจัดการกับสภาพแวดล้อมที่สนใจโดยอาศัยข้อมูลที่ได้รับจากโหนดเซนเซอร์ เนื่องจากการนำเอาโหนดแอคชูเอเตอร์มาใช้ประโยชน์ ทำให้ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงหรือควบคุมสภาพแวดล้อมที่สนใจ ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลาย ๆ ด้าน เช่น การเฝ้าระวังและควบคุมสภาพแวดล้อม [3] การควบคุมเครื่องจักรอุตสาหกรรม [4, 5] การควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ [6] การประยุกต์ใช้งานในระบบอาคารอัตโนมัติ (building automation) [7–9] การควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก และการติดตามการเจริญเติบโตของพืชผลทางการเกษตร [10, 11] และอื่น ๆ เป็นต้น

ยกตัวอย่างการใช้งานกรณีระบบอาคารอัตโนมัติ ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายสามารถใช้เพื่อควบคุมและรักษาระดับอุณหภูมิภายในอาคาร โหนดเซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิในอาคารและส่งข้อมูลที่ได้ไปยังตัวควบคุม (controller) จากนั้น ตัวควบคุมจะใช้ค่าผิดพลาดการควบคุม (control system error) ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิที่ต้องการ (set point) และค่าอุณหภูมิที่โหนดเซนเซอร์วัดได้ (measured value) เพื่อกำหนดค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม และสั่งการให้แอคชูเอเตอร์ปรับอุณหภูมิดังกล่าวแก่ห้องในอาคาร ผลลัพธ์ที่ได้คืออุณหภูมิภายในอาคารจะเปลี่ยนแปลงไปจากการรับอินพุตเข้ามา จากนั้น โหนดเซนเซอร์จะทำการตรวจวัดและเริ่มกระบวนการข้างต้นใหม่อีกครั้ง จนกระทั่งอุณหภูมิภายในอาคารเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง (routing protocols) เป็นกระบวนการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมเพื่อส่งผ่านข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์หรือโหนดต้นทางไปยังโหนดแอคชูเอเตอร์หรือโหนดปลายทางในลักษณะแบบเป็นทอด ๆ หรือเรียกว่า hop-by-hop อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความไม่

ไม่แน่นอนของการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สาย สามารถส่งผลให้เกิดการสูญหายของข้อมูล (packet loss) และเกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูล (transmission latency) [2] การสูญหายของกลุ่มข้อมูลติด ๆ กัน (consecutive packet loss) จำนวนมาก ตลอดจนเกิดความล่าช้าของการส่ง-รับข้อมูลในช่วงเวลายาวนาน จนโหนดปลายทางหรือตัวควบคุมรับข้อมูลได้น้อยลงหรือไม่สามารถรับข้อมูลได้ จะส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมระบบที่สนใจให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการได้ [12] อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ได้รับการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพช่วยลดปัญหาดังกล่าวข้างต้นนี้ได้ โดยการเตรียมเส้นทางที่เหมาะสมไว้สำหรับส่งข้อมูล นอกจากนี้แล้ว เนื่องจากโหนดเซนเซอร์ที่ใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายมีพลังงานที่จำกัดจากแบตเตอรี่ที่ใช้งาน [1, 2] ดังนั้น จึงมีความต้องการขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง (routing algorithm) ที่สามารถช่วยให้โหนดเซนเซอร์ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือสามารถอนุรักษ์พลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครือข่าย ทั้งนี้ ถ้าหากโหนดเซนเซอร์ใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง จนหมดพลังงาน และไม่สามารถทำการวัดและส่งข้อมูลไปยังแอคชูเอเตอร์ได้ แอคชูเอเตอร์เองก็จะไม่สามารถคำนวณหาอินพุตที่เหมาะสมและป้อนอินพุตดังกล่าวให้กับระบบควบคุมที่สนใจ ซึ่งจะส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่เป้าหมายได้เช่นเดียวกัน

จากการทบทวนวรรณกรรม ดังอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 พบว่า การออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายให้สามารถรักษาสมรรถนะทางการสื่อสาร (communication performance) และสมรรถนะทางการควบคุม (control performance) ได้อย่างเหมาะสม ยังคงเป็นปัญหาการวิจัย (research problem) ในปัจจุบัน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า งานวิจัยโดยส่วนใหญ่ในสาขานี้ทำการวิจัยโดยการแยกมุมมองทางการสื่อสาร (หรือการทำงานของระบบเครือข่ายสื่อสาร) และมุมมองด้านการควบคุม (หรือการทำงานของระบบควบคุม) เป็นอิสระออกจากกัน มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่พิจารณาการทำงานร่วมกันระหว่างระบบสื่อสารและระบบควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่า มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่มีการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ในขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย และท้ายสุด ยังไม่มีงานวิจัยใดในปัจจุบันเสนอขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทางที่มีการพิจารณาการออกแบบร่วมกัน (joint design) ระหว่างมุมมองทางการสื่อสารและมุมมองด้านการควบคุม

จากที่มาและความสำคัญของการวิจัย ปัญหาการวิจัย และช่องว่างการวิจัย ดังอธิบายในข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบใหม่สำหรับระบบเครือข่าย

เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ที่มีการพิจารณาทั้งมุมมองด้านการสื่อสารและมุมมองด้านการควบคุมไว้ในขั้นตอนวิธีการการจัดเส้นทาง เพื่อให้สามารถรักษาสมรรถนะทางด้านการสื่อสารและสมรรถนะทางด้านการควบคุมไว้พร้อมกัน ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการทำวิจัยในมุมมองใหม่ที่นำเอาองค์ความรู้ทางด้านทฤษฎีการสื่อสารและทฤษฎีการควบคุมมารวมกันอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่สามารถใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 ใจหายวิจัย

1. มีวิธีการจัดเส้นทางการสื่อสารในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพอย่างไร ที่สามารถรักษาอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล (delivery ratio) และความล่าช้า (delay) ในการส่งข้อมูล โหนดสามารถประหยัดพลังงาน และทำให้ระบบควบคุมแบบวงปิด (closed-loop control system) สามารถบรรลุเป้าหมายการควบคุม
2. มีวิธีการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทาง (routing metric) อย่างไรให้เหมาะกับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย และสามารถปรับเปลี่ยน (adaptive) ได้ตามสถานะของระบบควบคุม (control system states) อย่างอัตโนมัติ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษากลไกการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายโดยวิธีการจำลองการทำงาน ที่มีทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุม
2. พัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ที่สามารถรักษาอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลและความล่าช้าในการส่งข้อมูล โหนดประหยัดพลังงาน และสามารถบรรลุเป้าหมายการควบคุม
3. พัฒนาวิธีการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมกับระบบควบคุม
4. วิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางและสมรรถนะของการควบคุม กรณีระบบเครือข่ายได้รับผลกระทบจากความไม่แน่นอนของการสื่อสารไร้สาย และกรณีระบบควบคุมได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุม (environmental disturbance)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายได้ทั้งในมุมมองด้านการสื่อสารและมุมมองด้านการควบคุม โดยการรักษาอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลและความล่าช้าในการส่งข้อมูล ยืดอายุการใช้งานของเครือข่าย และสนับสนุนการทำงานของระบบควบคุมจนบรรลุเป้าหมายการควบคุม
2. โพรโทคอลการจัดเส้นทางนำเอาผลลัพธ์จากการควบคุมไปเป็นเกณฑ์ในการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทาง เพื่อให้ได้เส้นทางสื่อสารที่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างอัตโนมัติและเหมาะสมตามสถานะของสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุม
3. แนวคิดการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทางที่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างอัตโนมัติตามสถานะของระบบควบคุมหรือสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง สามารถประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการควบคุมอื่น ๆ เนื่องจากระบบควบคุมใด ๆ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบจากแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ของระบบควบคุมนั้น ๆ
4. ได้แบบจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่มีทั้งฟังก์ชันการสื่อสารและฟังก์ชันการควบคุมทำงานร่วมกันอย่างอัตโนมัติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและพัฒนาทั้งโพรโทคอลการสื่อสาร (communication protocols) และขั้นตอนวิธีการควบคุม (control algorithms) ต่อยอดในอนาคต

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษา พัฒนา และประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอโดยวิธีการจำลองการทำงานด้วยเครื่องมือจำลองชื่อ PiccSIM (Platform for integrated communication and control design, Simulation, Implementation and Modeling) [13] ซึ่งเป็นเครื่องมือจำลองที่นำเอาตัวจำลองเครือข่ายสื่อสารและตัวจำลองทางด้านการควบคุมมาทำงานร่วมกันอย่างอัตโนมัติ โดยที่ ตัวจำลองเครือข่ายสื่อสารที่ใช้งานคือ NS2 (Network Simulator 2) รุ่น 2.33 และตัวจำลองทางด้านการควบคุมที่ใช้งานคือ MATLAB/Simulink
2. พัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ต่อยอดจากโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector

routing) แบบดั้งเดิม [14] สำหรับเหตุผลในการเลือกพัฒนาต่อยอดจากโปรโตคอล AODV อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

3. โหนดเซนเซอร์ในเครือข่ายมีคุณสมบัติหรือความสามารถในการทำงานเท่าเทียมกัน (homogeneous) กำหนดใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ความถี่ใช้งาน 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และกำหนดพารามิเตอร์ทางการสื่อสารตามโมดูลสื่อสาร CC2420 [15] โดยการกำหนดข้างต้นอ้างอิงตามคุณสมบัติของโหนดเซนเซอร์ที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ เช่น โหนด MicaZ โหนด Telos และโหนด Tmote Sky เป็นต้น
4. โหนดเซนเซอร์ในเครือข่ายไม่มีการเคลื่อนที่ กำหนดให้สภาพแวดล้อมในการจำลองการทำงานอ้างอิงจากสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และใช้แบบจำลอง Gilbert–Elliott (GE) เพื่อจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ตแบบเป็นช่วง ๆ (burst loss pattern) สำหรับรายละเอียดของแบบจำลองนี้อธิบายไว้ในบทที่ 3
5. ระบบควบคุมที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร (building temperature control system) [7, 8, 12] โดยที่สถานะของอุณหภูมิภายในห้องอธิบายด้วยแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (zone temperature model) กำหนดให้อินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุม คือ อุณหภูมิลมจ่าย (supply air temperature) โดยแอกชูเอเตอร์ และอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (zone temperature) ตามลำดับ สำหรับรายละเอียดของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารอธิบายไว้ในบทที่ 3
6. ตัวควบคุมที่กำหนดใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ (proportional integral and derivative controller) หรือเรียกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) รายละเอียดของขั้นตอนวิธีแบบพีไอดี (PID algorithm) อธิบายไว้ในบทที่ 3
7. กำหนดให้สถาปัตยกรรมของเครือข่ายเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ (semi-automated architecture) [1] ซึ่งเป็นลักษณะการควบคุมแบบมีศูนย์กลาง (centralized control) โดยตัวควบคุมหรือแอกชูเอเตอร์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ทำการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมโดยรวม (global control strategy) ของศูนย์กลางการควบคุม
8. ในระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารที่ทำการศึกษา กำหนดให้มีห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิเพียงห้องเดียว ตัวควบคุม และแอกชูเอเตอร์ทำการป้อนอุณหภูมิลมจ่าย หรืออินพุตให้แก่ห้องผ่านทางท่อระบายอากาศ (air duct) สำหรับกรณีที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิจำนวนหลาย ๆ ห้อง (ซึ่งไม่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้) ศูนย์กลางการควบคุม

สามารถส่งการแอกชูเอเตอร์ซึ่งในที่นี้คือ เครื่องปรับอากาศ หรือเครื่องทำความร้อน ที่ติดตั้งไว้ในแต่ห้องผ่านการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สาย [7, 12]

9. ทำการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารโดยใช้ตัววัดสมรรถนะ (performance metrics) ทั้งจากมุมมองด้านการสื่อสาร และมุมมองด้านการควบคุม โดยตัววัดสมรรถนะที่ใช้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 5

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรม (literature review) เพื่อให้เข้าใจถึงความรู้ทันสมัย (state of the art) ของงานวิจัยในปัจจุบัน ที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย และโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย
2. ศึกษาโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สายที่มีการพิจารณาการทำงานของทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุม โดยการจำลองการทำงานด้วยเครื่องมือจำลอง PiccSIM โดยในขั้นตอนนี้ เน้นศึกษากระบวนการทำงานของโพรโทคอล AODV และผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอล AODV ต่อสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุม ทั้งในประเด็นอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล การใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ และผลลัพธ์การควบคุม
3. กำหนดโจทย์วิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และขอบเขตการวิจัยตามลำดับ
4. ออกแบบ และพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย
5. ทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง
6. วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.7 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

1. A. Booranawong, W. Teerapabkajorndet and C. Limsakul, "Energy Consumption and Control Response Evaluations of AODV Routing in WSNs for Building-Temperature Control," *Sensors* 2013, vol. 13, no. 7, pp. 8303-8333, 2013.

2. A. Booranawong and W. Teerapabkajorndet, "An Enhanced AODV Routing Protocol for Wireless Sensor and Actuator Networks," in *Proceedings of the International Conference on Communications, Networking and Mobile Computing (ICCNMC-2013)*, pp. 1783-1790, 2013.

1.8 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 6 บท ดังนี้ บทที่ 1 คือ บทนำ อธิบายดังรายละเอียดข้างต้น บทที่ 2 กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งจะนำเสนอการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายและโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย สรุปช่องว่างของความรู้เปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง และสรุปประเด็นวิจัยที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ บทที่ 3 อธิบายแบบจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่ทำการศึกษาวิจัย โดยจะให้รายละเอียดของระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย แบบจำลองที่กำหนดใช้ทั้งแบบจำลองทางการควบคุมและแบบจำลองทางการสื่อสาร ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (zone temperature model) ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ แบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ต (packet loss model) แบบจำลองพลังงาน (energy model) และแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ (radio propagation model) บทที่ 4 อธิบายโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ โดยเนื้อหาจะกล่าวถึง สรุปแนวคิดและการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV แนวคิดในการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ กระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ และสรุปผังงานกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ บทที่ 5 เสนอการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV โดยเนื้อหาจะกล่าวถึง การออกแบบการทดลองโดยการจำลอง ผลการจำลองการทำงาน และการอภิปรายผล บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย อธิบายข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอและแนวทางการแก้ไข และเสนอแผนงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านระบบเครือข่าย เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย และโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ดังที่ได้อธิบายเกริ่นนำไปในบทที่ 1 ก่อนหน้า การออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายให้สามารถรักษาสมรรถนะของทั้งการสื่อสารและการควบคุมพร้อมกันยังคงเป็นปัญหาการวิจัยในปัจจุบัน จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถเกริ่นสรุปช่องว่างของความรู้เป็นสามประเด็นหลักดังนี้

ก) งานวิจัยโดยส่วนใหญ่ทางด้านระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายทำการวิจัยโดยการแยกฟังก์ชันการทำงานของระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายและระบบควบคุมเป็นอิสระออกจากกัน มีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่มีการพิจารณาการทำงานร่วมกันระหว่างระบบสื่อสารและระบบควบคุม และมีการพิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบที่นำเสนอ

ข) ในการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ให้ความสนใจประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดซึ่งเป็นปัญหาการวิจัยหลักในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย [1, 2, 5, 8, 12] ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 1 ก่อนหน้า ในหัวข้อที่มาและความสำคัญของการวิจัย การสูญหายของข้อมูลติด ๆ กันอย่างต่อเนื่อง การเกิดความล่าช้าในการส่ง-รับข้อมูลในเครือข่ายด้วยช่วงระยะเวลายาวนานเกินกว่าที่ระบบควบคุมจะยอมรับได้ และการที่โหนดเซนเซอร์ใช้พลังงานหมดจนกระทั่งไม่สามารถทำหน้าที่ตรวจวัดและส่งข้อมูลได้ จะส่งผลให้ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ได้รับข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์น้อยลง หรือไม่สามารถรับข้อมูลได้ จนเป็นผลให้ไม่สามารถจัดการกับสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุมได้อย่างเหมาะสมและทันท่วงที หรือไม่สามารถควบคุมระบบที่สนใจได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การใช้งานโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ได้รับการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดปัญหาดังอธิบายได้ โดยการค้นหาและเตรียมเส้นทางที่เหมาะสมไว้สำหรับส่งข้อมูล ดังนั้น เพื่อรักษาสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุมไว้ จึงควรมีการพิจารณาปัญหาการสูญหายของข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ในขั้นตอนการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทาง

และ ค) ยังไม่มีงานวิจัยใดในปัจจุบันพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่มีการออกแบบร่วมกัน (joint design) ระหว่างการสื่อสารและการควบคุม โดยการพิจารณาปัจจัยการควบคุม หรือสถานะของระบบควบคุมในขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง (routing algorithm) ของโพรโทคอลการจัดเส้นทางเพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุม

สำหรับเนื้อหาการทบทวนวรรณกรรมในบทนี้ ถูกแบ่งออกเป็นสองหัวข้อใหญ่ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย โดยในแต่ละหัวข้อ ผู้วิจัยอธิบายเนื้อหาการสำรวจงานวิจัยเป็นลำดับแรก และทำการสรุปช่องว่างของความรู้ในตอนท้ายสำหรับในหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (wireless sensor networks) และในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย (wireless ad-hoc networks) ที่มีแนวคิดการออกแบบเพื่อรับมือกับปัญหาการสูญหายของข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ ตลอดจนได้ทำการสรุปการเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทาง (routing metric) ของโพรโทคอลการจัดเส้นทางทั้งหมดไว้ในหัวข้อสรุปช่องว่างของความรู้

2.2 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

2.2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

บทความ [16] เสนอโพรโทคอลการสื่อสารแบบข้ามชั้น (cross layer protocol) สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับการควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม (industrial control applications) โดยโพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอนี้ พิจารณาการประสานงานกันของชั้นกายภาพ ชั้นการควบคุม การเข้าใช้สื่อกลาง และชั้นการกำหนดเส้นทางส่ง-รับข้อมูล การออกแบบโพรโทคอลการสื่อสารดังกล่าว อาศัยปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization problems) โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) เพื่อลดการใช้พลังงานรวมของโหนดเซนเซอร์ในเครือข่ายให้น้อยที่สุด และกำหนดให้ระดับกันความน่าเชื่อถือ (reliability threshold) และระดับกันความล่าช้า (latency threshold) ในการส่งแพ็กเก็ตเป็นเงื่อนไขข้อจำกัด (constraints) บทความนี้ กำหนดนิยามของความน่าเชื่อถือคือ ความน่าจะเป็นของการส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จ (probability of successful packet delivery) และกำหนดนิยามของความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตคือ ความน่าจะเป็นของความล่าช้าสูงสุดในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง (probability of largest end-to-end delay) ที่น้อยกว่าระดับที่กำหนด โดยระดับความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ตต้องมากกว่า 90

เปอร์เซ็นต์ และการส่งแพ็กเก็ตจะต้องทันเวลากำหนดด้วยความน่าจะเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดสอบจริงด้วยโหนด Tmote Sky แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอให้สมรรถนะที่สูงกว่าโพรโทคอลมาตรฐาน IEEE 802.15.4 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าในบทความดังกล่าวได้ทำการกำหนดระดับความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต และขอบเขตความล่าช้าสูงสุดในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางมาจากความต้องการของระบบควบคุม แต่ในขั้นตอนการทดสอบโพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอ ผู้นำเสนอบทความพิจารณาฟังก์ชันการทำงานเฉพาะที่กระบวนการสื่อสาร โดยไม่พิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุม เช่น ตัวควบคุม แอคชูเอเตอร์ และระบบทางกายภาพหรือสภาพแวดล้อมที่ต้องการทำการควบคุม ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ไม่สามารถจัดการ หรือเปลี่ยนแปลงระบบทางกายภาพที่ต้องการทำการควบคุมได้ ด้วยเหตุผลนี้ จึงไม่สามารถประเมินได้ว่าโพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอข้างต้นส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร ระดับความน่าเชื่อถือและความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตที่กำหนดใช้งานมีความเหมาะสม หรือจำเป็นมากน้อยเพียงใดกับแต่ละสถานะของระบบควบคุม เป็นต้น

บทความ [17] และ [18] พัฒนาอัลกอริทึมการควบคุม และกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างแอคชูเอเตอร์สำหรับใช้งานในระบบควบคุมอุตสาหกรรม (industrial control system) ด้วยระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สาย ในการจำลองการทำงาน ผู้นำเสนอบทความกำหนดให้ความไม่แน่นอนของการสื่อสารแบบไร้สายเป็นปัญหาหลักและมีบทบาทโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบควบคุม กำหนดให้ความไม่แน่นอนของการสื่อสารแบบไร้สายแทนด้วยการสูญหายของข้อมูลระหว่างโหนดเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ และกำหนดให้รูปแบบการสูญหายของข้อมูลอธิบายด้วยตัวแปรสุ่มแบร์นูลลี (Bernoulli random variable) ผลจากการจำลองการทำงานยืนยันว่า อัลกอริทึมการควบคุมที่เหมาะสม (optimal control algorithm) ของแอคชูเอเตอร์ และกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างแอคชูเอเตอร์ (collaborative control mechanism) ที่นำเสนอสามารถช่วยให้ระบบควบคุมบรรลุเป้าหมายการควบคุมได้ อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น บทความนี้เน้นแก้ปัญหาและออกแบบกลยุทธ์การควบคุม (control strategy) โดยไม่พิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารในแต่ละชั้น [1] เช่น โพรโทคอลการสื่อสารชั้นกายภาพ โพรโทคอลการสื่อสารชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง และโพรโทคอลการสื่อสารชั้นเครือข่าย เป็นต้น ดังนั้น ในงานวิจัยดังกล่าวจึงไม่ได้มีการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารในแต่ละชั้นต่อสมรรถนะการควบคุม

บทความ [10] ศึกษาการจำลองการทำงานกรณีระบบควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก (greenhouse climate control system) ด้วยระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยใช้

เครื่องมือในการจำลองการทำงานชื่อ TrueTime MATLAB/Simulink [19, 20] ผู้นำเสนอบทความ กำหนดเป้าหมายหลักของการศึกษาคือ เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน เพาะปลูก สำหรับเฝ้าติดตามการเจริญเติบโตของพืชด้วยวิธีการควบคุมตามเหตุการณ์ (event-based control approach) สำหรับระบบควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนเพาะปลูกที่นำเสนอ โหนดเซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น และส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปยังตัวควบคุมโดยการสื่อสารแบบไร้สาย ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) ทำหน้าที่ตัดสินใจและคำนวณหาอินพุทเพื่อสั่งการแอกชูเอเตอร์ให้จัดการกับสภาพแวดล้อม โดยที่แอกชูเอเตอร์ในที่นี้คือ เครื่องระบายอากาศ (ventilator) และเครื่องทำความร้อน (heater) เนื่องจากการใช้งานวิธีการ ควบคุมตามเหตุการณ์ โหนดเซนเซอร์จะส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปยังตัวควบคุมก็ต่อเมื่อ ค่า ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้ในปัจจุบันและค่าที่วัดได้จากครั้งก่อนหน้ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ด้วย วิธีการนี้ ตัวควบคุมจะคำนวณอินพุทใหม่และสั่งการแอกชูเอเตอร์ให้ทำงานก็ต่อ เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงระดับของค่าที่ได้จากการวัด ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า วิธีการ ควบคุมตามเหตุการณ์สามารถช่วยลดจำนวนการส่งข้อมูลและสามารถยืดอายุการใช้งานของ แอกชูเอเตอร์ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดหลักของบทความนี้คือ ในระบบสื่อสารที่นำเสนอมีส่วน การทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารชั้นกายภาพ และชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางอ้างอิง ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แต่ไม่มีส่วนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง นอกจากนี้ แล้ว งานวิจัยดังกล่าวทำการประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอเฉพาะในมุมมองทางด้านการ ควบคุม โดยไม่มีการศึกษาสมรรถนะทางด้านการสื่อสาร

บทความ [11] พัฒนาระบบควบคุมโรงเรือนเพาะปลูกอัตโนมัติ (greenhouse automatic control system) ด้วยระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยมีเป้าหมายหลักของการพัฒนาระบบคือ การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูกให้มีความเหมาะสมกับการ เจริญเติบโตของพืช สำหรับระบบที่นำเสนอ โหนดเซนเซอร์เชื่อมต่อกับโมดูลสื่อสาร CC2420 ทำ หน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูก อุณหภูมิและความชื้นบนใบพืช และทำการส่งข้อมูลดังกล่าวนี้ผ่านการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สายไปยังสถานีฐาน (base station) และโหนดแอกชูเอเตอร์ สถานีฐานทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดไว้เป็นฐานข้อมูล (database) ส่วนโหนดแอกชูเอเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมเครื่องระบายอากาศ และเครื่องทำความร้อน ให้ป้อนอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่โรงเรือนเพาะปลูก ผลจากการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้ (user) สามารถเฝ้าระวังสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกและการเจริญเติบโตของพืชจาก ข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ระบบที่นำเสนอสามารถช่วยรักษาอุณหภูมิ

และความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูกได้อย่างอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม บทความนี้ไม่ได้นำเสนอผลการประเมินสมรรถนะทางการสื่อสารไว้ ตลอดจนไม่ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารและสมรรถนะการควบคุม

บทความ [21] พัฒนาขั้นตอนวิธีการควบคุมแบบไม่อาศัยศูนย์กลาง (decentralized control algorithm) สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมแสงสว่างในอาคาร (lighting control application) ด้วยระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย สำหรับวิธีการควบคุมแบบไม่อาศัยศูนย์กลางที่นำเสนอ โหนดเซนเซอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดการมีอยู่ของคนในอาคาร (occupancy sensors) และจะทำการประมาณค่าแสงสว่าง (brightness of lights) ของหลอดไฟด้วยตัวโหนดเองโดยไม่ต้องอาศัยศูนย์กลางหรือโหนดที่มีศักยภาพสูงทำงานแทน โหนดเซนเซอร์ตรวจวัดสถานะการมีอยู่ของคนในอาคารจะประมาณค่าแสงสว่างเริ่มต้นของหลอดไฟไว้ จากนั้นจะทำการสื่อสารกับโหนดข้างเคียงเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลแสงสว่างระหว่างกัน และจะทำการปรับค่าแสงสว่างใหม่ให้เหมาะสมมากขึ้น ด้วยวิธีการนี้ ความสว่างของหลอดไฟจะขึ้นอยู่กับการมีอยู่ของคนในอาคาร ในบริเวณที่มีคนอาศัยอยู่จะมีแสงไฟที่สว่างจ้า ในขณะที่ในบริเวณที่ไม่มีคนอยู่จะมีมืด ผลจากการทดลองจริงโดยการใช้งานโหนด MICA2DOTs ที่ใช้โมดูลสื่อสาร CC1000 และทำงานที่ยานความถี่ 315 เมกะเฮิรตซ์ แสดงให้เห็นว่า วิธีการควบคุมแบบไม่อาศัยศูนย์กลางให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าวิธีการควบคุมแบบอาศัยศูนย์กลาง (centralized control algorithm) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของบทความนี้คือ ไม่มีการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางต่อสมรรถนะการควบคุมแสงสว่างในอาคาร ระบบสื่อสารที่นำเสนอในงานวิจัยดังกล่าวรองรับการทำงานเฉพาะโพรโทคอลการสื่อสารขึ้นกายภาพ

บทความ [4] พัฒนาระบบที่เรียกว่า GINSENG สำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการไฟัระวังและควบคุมการผลิตน้ำมันในโรงกลั่นน้ำมัน ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ก) ส่วนการสื่อสาร ซึ่งเป็นส่วนของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ข) ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน หรือส่วนการควบคุม ค) ส่วนการเก็บข้อมูล และ ง) ส่วนสนับสนุน หรือส่วนการจัดการบำรุงรักษา สำหรับในส่วนของการสื่อสาร โหนดเซนเซอร์ในเครือข่ายติดต่อสื่อสารกันโดยอาศัยโพรโทคอลการเข้าใช้สื่อกลางแบบการจัดสรรเวลา (TDMA-based MAC protocol) ที่ชื่อว่า GinMAC [22] ซึ่งมีการกำหนดการส่งข้อมูลตามช่องเวลา (time slot) โพรโทคอล GinMAC สามารถรับประกันการส่งข้อมูลให้ทันเวลาและมีความน่าเชื่อถือจากการกำหนดขอบเขตความล่าช้าและระดับความน่าเชื่อถือของแพ็กเก็ตที่ส่ง ในงานวิจัยดังกล่าว กำหนดให้ขอบเขตความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตคือ ช่วงเวลาสูงสุดที่สามารถอนุญาตได้ของการส่งแพ็กเก็ตจากโหนด

เซนเซอร์ไปยังสถานีฐาน และจากสถานีฐานไปยังแอสซอสีเตอร์ โดยขอบเขตความล่าช้าดังกล่าวนี้ กำหนดจากความต้องการของระบบควบคุม สำหรับระดับความน่าเชื่อถือของการส่งแพ็กเก็ตที่กำหนดคือ อัตราการรับแพ็กเก็ต (packet reception rate) ระหว่างคูลิงค์สื่อสารใด ๆ ต้องมากกว่าค่ากำหนด โดยในงานวิจัยดังกล่าวกำหนดเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ ในการทดสอบระบบที่นำเสนอข้างต้นในโรงกลั่นน้ำมัน ผู้เสนอบทความใช้งานโหนด TelosB กำหนดทอพอโลยีของเครือข่ายที่ทดสอบเป็นแบบลำดับชั้น (hierarchical topology) กำหนดให้โหนดเซนเซอร์ตรวจวัดการไหลและความดันของน้ำมันที่อยู่ในท่อ กำหนดให้แอสซอสีเตอร์คือ วาล์วควบคุม และกำหนดให้ตัวควบคุมอยู่ที่ห้องควบคุม ซึ่งเป็นศูนย์กลางของระบบ ผลการทดสอบจริงแสดงให้เห็นว่า ระบบที่นำเสนอสามารถใช้งานเพื่อการเฝ้าระวังและการควบคุม โหนดสามารถส่งข้อมูลได้ทันเวลา และสามารถรับมือกับการสูญหายของข้อมูล ระบบดังกล่าวสามารถรักษาอัตราการไหลและระดับความดันของน้ำมันได้ใกล้เคียงกับกรณีการใช้งานด้วยระบบมีสาย สำหรับบทความที่ [23] ได้ต่อยอดงานวิจัยใน [4] โดยได้ทำการพัฒนาโพรโทคอลการเข้าใช้สื่อกลางแบบการจัดสรรเวลาเพิ่มเติมในประเด็นพลังงาน โดยมีประเด็นวิจัยคือ การกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (transmission power level) ของแต่ละโหนดที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของระบบเครือข่ายที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ทั้งงานวิจัยใน [4] และ [23] ไม่มีการศึกษาวิจัยในส่วนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง

บทความ [9] เสนออัลกอริทึมการควบคุมสำหรับตัวควบคุมโดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดในระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร ซึ่งในที่นี้คือระบบปรับอากาศ HVAC (heating ventilation and air conditioning system) สำหรับวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมคือ เพื่อให้ได้สมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุด ในสามประเด็น คือ ก) ครอบคลุมพื้นที่การควบคุมได้มากที่สุด ข) ลดค่าใช้จ่าย (cost) หรือการทำงานของแอสซอสีเตอร์ ซึ่งในที่นี้คือ supply fans และ heat/cool coils และ ค) ลดจำนวนครั้งในการควบคุม (control interval) ของตัวควบคุมเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน โดยทั้งสามประเด็นข้างต้นถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) และกำหนดเงื่อนไข (constrains) จากการพิจารณาการสูญหายของข้อมูลระหว่างโหนดเซนเซอร์และตัวควบคุม และระหว่างตัวควบคุมและแอสซอสีเตอร์ โดยรูปแบบการสูญหายของข้อมูลอธิบายด้วยตัวแปรสุ่มแบร์นูลลี นอกจากนี้ในการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ ยังสามารถให้ลำดับความสำคัญ (priority) ของสามประเด็นข้างต้นที่แตกต่างกันได้ตามความต้องการ โดยการกำหนดค่าน้ำหนักของแต่ละประเด็นให้มากขึ้นน้อยต่างกัน ผู้เสนอบทความอ้างว่า อัลกอริทึมการควบคุมที่นำเสนอนี้เป็นารออกแบบร่วมกัน (co-design) ระหว่างการสื่อสารและการควบคุม

เนื่องจากการพิจารณาทั้งมุมมองด้านการควบคุมและมุมมองด้านการสื่อสารควบคู่กันไป ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอช่วยให้สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ครอบคลุมพื้นที่การใช้งาน ลดการทำงานหรือการใช้ทรัพยากรของแอคชูเอเตอร์ และลดจำนวนครั้งการควบคุมสั่งการของตัวควบคุม ซึ่งเป็นการลดจำนวนครั้งในการสื่อสารและการใช้พลังงานของโหนดในเครือข่าย อย่างไรก็ตาม เช่นเดียวกันกับบทความที่ [17] และ [18] ของผู้เสนอบทความเอง ดังได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ งานวิจัยดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่มีการพิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารในชั้นกายภาพ ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง และชั้นเครือข่าย เป็นต้น ดังนั้น ในงานวิจัยดังกล่าวจึงไม่มีการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารในแต่ละชั้นต่อสมรรถนะการควบคุม

บทความ [5] เสนออัลกอริทึมการควบคุมสามรูปแบบในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย คือ การควบคุมแบบตามเหตุการณ์ (event-based) การควบคุมแบบคาดการณ์ (predictive based) และการควบคุมแบบผสมผสาน (hybrid) ระหว่างสองแบบข้างต้น ผู้เสนอบทความพัฒนาการควบคุมทั้งสามรูปแบบนี้ โดยอาศัยการพัฒนาโพรโทคอลการเข้าใช้สื่อกลาง (MAC protocol) ในโหมด beacon-enable (beacon-enable mode) บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้สามารถรองรับจังหวะเวลาการควบคุม (control update time) ที่สอดคล้องกับแต่ละรูปแบบการควบคุมข้างต้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับปรุง superframe structure และกำหนดพารามิเตอร์ เช่น CAP (contention access period), CFP (contention free period) และ inactive period ในโพรโทคอลการเข้าใช้สื่อกลาง ดังนั้น วิธีการที่นำเสนอนี้ จึงเป็นการออกแบบร่วมกันระหว่างกระบวนการควบคุมและกระบวนการสื่อสารที่ชั้น MAC ผู้เสนอบทความทดสอบสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอในกรณีระบบการควบคุมระดับน้ำในถัง ซึ่งเป็นกระบวนการควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม ผลการทดลองโดยใช้โหนด Telos กับโมดูลสื่อสาร CC2420 ที่ความถี่ใช้งาน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ แสดงให้เห็นว่า วิธีการทั้งสามรูปแบบสามารถรักษสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุมไว้ได้ โหนดสามารถส่งข้อมูลได้สำเร็จ ใช้พลังงานและแบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการกำหนดจังหวะการส่งข้อมูลที่เหมาะสมตามกระบวนการควบคุมที่พัฒนาและระบบควบคุมสามารถบรรลุเป้าหมายการควบคุมด้วยค่าผิดพลาดการควบคุมที่ยอมรับได้ และใกล้เคียงกับกรณีการควบคุมแบบเป็นช่วงเวลา (periodic control) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยใน [5] ไม่พิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง

บทความ [24] เสนอวิธีการกำหนดช่วงเวลาการชั่งตัวอย่างที่ยืดหยุ่นได้ (flexible time-triggered sampling scheme) ในระบบควบคุมด้วยเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยมีเป้าหมายหลัก

ในการศึกษาคือ เพื่อให้โหนดที่ทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลสามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรตัวอย่าง (sampling period) ได้อย่างอัตโนมัติโดยอาศัยข้อมูลการเปลี่ยนแปลงปริมาณงาน (workload variation) ในเครือข่าย ผู้นำเสนอบทความให้ข้อเสนอว่า ระบบควบคุมอาจไม่เสถียรเนื่องจากการสูญหายและความล่าช้าของการส่ง-รับข้อมูลในสถานะที่มีปริมาณงานจำนวนมากในเครือข่าย ในทางตรงกันข้าม สมรรถนะของระบบมีโอกาสต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากการใช้ทรัพยากรที่ไม่คุ้มค่าในสถานะที่มีปริมาณงานจำนวนน้อยในเครือข่าย ดังนั้น เพื่อรับมือกับประเด็นดังกล่าว ผู้เสนอบทความกำหนดให้แอสซิงโครนัสทำหน้าที่แจ้งโหนดเซนเซอร์ให้คำนวณและปรับช่วงเวลาการซักรตัวอย่างตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณงานในเครือข่าย โดยที่แอสซิงโครนัสสามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณงานในเครือข่ายได้โดยการตรวจสอบตัววัดที่เรียกว่า อัตราการส่งแพ็กเก็ตพลาดเวลากำหนด หรือ deadline miss ratio โดยหากแอสซิงโครนัสไม่ได้รับแพ็กเก็ตภายในแต่ละช่วงเวลาการซักรตัวอย่างที่ใช้งาน ตัววัดดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น แอสซิงโครนัสจะสมมติว่าเกิดการสูญหายและความล่าช้าของการส่ง-รับแพ็กเก็ต หรือมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณงานในเครือข่ายเกิดขึ้น ในการทดสอบสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ ผู้เสนอบทความกำหนดให้เครือข่ายถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย หรือเรียกว่า control loop แต่ละ control loop แทนด้วยระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง (DC motor control system) ซึ่งประกอบด้วยโหนดเซนเซอร์ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) และแอสซิงโครนัสอย่างละหนึ่งตัว โดยทั้งหมดสามารถสื่อสารถึงกันได้ภายในระยะหนึ่งฮอป นอกจากนี้ กำหนดให้ทุกโหนดในเครือข่ายใช้ช่องสัญญาณสื่อสารเดียวกัน และสามารถสื่อสารถึงกันได้ทั้งหมด ผลจากการจำลองการทำงานด้วยเครื่องมือจำลอง MATLAB/TrueTime แสดงให้เห็นว่า วิธีการกำหนดช่วงเวลาการซักรตัวอย่างที่นำเสนอสามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณงานในเครือข่าย และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้ทรัพยากรที่คุ้มค่า อย่างไรก็ตามบทความนี้ไม่พิจารณาการทำงานของโปรโตคอลการจัดเส้นทางในขั้นตอนการวิจัย

บทความ [2] เสนอการออกแบบระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอสซิงโครนัสไร้สายสำหรับการประยุกต์ใช้ทางด้านการควบคุม โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพและเรียบง่ายสำหรับแอสซิงโครนัส ให้สามารถรับมือกับการสูญหายของข้อมูลอันเนื่องมาจากการสื่อสารแบบไร้สาย และสามารถรักษาสมรรถนะการควบคุมไว้ได้ ในกระบวนการควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้ หากแอสซิงโครนัสที่เชื่อมต่ออยู่กับตัวควบคุมไม่ได้รับข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์ แอสซิงโครนัสจะทำการประมาณค่าอินพุตที่จะป้อนให้แก่ระบบทางกายภาพที่ต้องการควบคุม โดยค่าอินพุตดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากอัลกอริทึมการควบคุมแบบพีไอดีที่

ได้รับการปรับปรุงใหม่ให้มีการพิจารณาค่าอินพุตจากครั้งก่อนหน้า (previous control command values) ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ผู้เสนอบทความกำหนดอัตราการสูญหายของข้อมูล (packet loss rate) ที่แต่ละระยะทางทดสอบให้แก่โปรแกรม MATLAB โดยการอ้างอิงจากผลการทดลองจริง จากกรณีการทดสอบในสภาพแวดล้อมนอกอาคาร (outdoor environments) ที่ใช้โหนด MICA2 กับโมดูลสื่อสารไร้สาย CC1000 และทำงานที่ย่านความถี่ 868/916 เมกะเฮิรตซ์ นอกจากนี้ ผู้เสนอบทความได้กำหนดให้การจำลองการทำงานที่แต่ละระยะทางทดสอบ โหนดเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์สามารถสื่อสารถึงกันได้ภายในระยะหนึ่งฮอป ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถรับมือกับการสูญหายของข้อมูลได้ และให้สมรรถนะการควบคุมที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม บทความนี้ไม่พิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง จึงไม่ได้มีการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางต่อสมรรถนะของการควบคุม

บทความ [7] เสนอกรณีศึกษาระบบควบคุมด้วยเครือข่ายไร้สาย (wireless networked control system) ด้วยการจำลองการทำงาน โดยทำการศึกษาในสองกรณีคือ กรณีระบบอาคารอัตโนมัติ (building automation) ซึ่งเป็นการควบคุมระดับอุณหภูมิและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคาร และกรณีการติดตามวัตถุเป้าหมาย (target tracking) สำหรับวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยในบทความนี้คือ เพื่อพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมด้วยเครือข่ายสื่อสารไร้สายโดยใช้เครื่องมือจำลองการทำงานชื่อ PiccSIM [13] เครื่องมือจำลองการทำงานนี้รวมเอาตัวจำลองทางด้านการสื่อสารและตัวจำลองทางด้านการควบคุมเข้าด้วยกัน และทำงานร่วมกันอย่างอัตโนมัติ ระบบเครือข่ายตลอดจนโพรโทคอลการสื่อสารถูกจำลองโดย NS2 ในขณะที่ระบบควบคุม เช่น ขั้นตอนวิธีการควบคุม แอคชูเอเตอร์ และระบบทางกายภาพ ถูกจำลองโดย MATLAB/Simulink นอกจากนี้ผู้เสนอบทความยังได้ทำการศึกษาและประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง LMNR (localized multiple next-hop routing) [25] และโพรโทคอล AODV ในทั้งสองกรณีศึกษาข้างต้น ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล LMNR ซึ่งเป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบหลายเส้นทาง (multi-path) สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือในการสื่อสารได้ อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยหลักของบทความนี้คือ ในกรณีการควบคุมระดับอุณหภูมิและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคาร ผู้เสนอบทความไม่ได้แสดงผลสมรรถนะของการควบคุมซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางทั้งสองไว้ สำหรับในกรณีการติดตามวัตถุเป้าหมาย ผู้เสนอบทความได้แสดงผลสมรรถนะการควบคุมไว้ด้วยค่าระยะทางผิดพลาด (error distance) นอกจากนี้ ข้อจำกัดอีกประเด็นหนึ่งของบทความนี้คือ ทั้งโพรโทคอล

AODV และโพรโทคอล LMNR ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยข้างต้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย ไม่ได้มีแนวคิดการออกแบบเพื่อรับมือกับปัญหาการสูญหายของข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนด ซึ่งเป็นความต้องการหลักโดยตรงสำหรับการควบคุมในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ประเด็นนี้จะถูกอธิบายสรุปอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.3.2 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทาง

บทความ [3] ศึกษาสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายกรณีการควบคุมไฟป่าด้วยวิธีการจำลองการทำงาน ในบทความนี้ แบบจำลองไฟป่า (forest fire model) กำหนดขึ้นจากความน่าจะเป็นของการเกิดการติดไฟ (ignition probability) ความน่าจะเป็นของการเผาไหม้ (burning probability) ทิศทางลม (wind direction) และปรากฏการณ์การแพร่กระจายของไฟในระยะทางไกล ในระบบข้างต้น โหนดเซนเซอร์จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิจากบริเวณที่เกิดไฟไหม้และส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานโดยการสื่อสารแบบหลายทอด ผู้นำเสนอบทความประยุกต์ใช้วิธีการหาตำแหน่ง (localization technique) โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบรู้ตำแหน่งภูมิศาสตร์ (geographical routing protocol) [26] และโพรโทคอลการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (MAC protocol) สำหรับการสื่อสารกันระหว่างโหนดเซนเซอร์และสถานีฐาน สถานีฐานทำหน้าที่สร้างแผนที่การเกิดไฟไหม้ (fire map) และสั่งการให้แอคชูเอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่เกิดไฟไหม้เพื่อทำการดับไฟ สำหรับการประเมินการทำงานของระบบ ผู้เสนอบทความแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของ ประสิทธิภาพของระบบกับระดับความหนาแน่นของโหนดเซนเซอร์และความเร็วในการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์ ผลการจำลองการทำงานยืนยันว่า ขนาดพื้นที่ที่สามารถรักษาต้นไม้ไว้ได้ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์) ขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดเซนเซอร์ที่ใช้งานและความเร็วในการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์ โดยผู้เสนอบทความระบุค่าที่เหมาะสมของจำนวนโหนดเซนเซอร์ที่ใช้งานและความเร็วในการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์ไว้ อย่างไรก็ตาม บทความนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่ได้ทำการออกแบบ และศึกษาผลกระทบจากกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบรู้ตำแหน่งภูมิศาสตร์ [26] ต่อสมรรถนะของการควบคุมไฟป่าโดยตรง ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษาที่ตั้งผู้เสนอบทความได้อ้างไว้ โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบรู้ตำแหน่งภูมิศาสตร์ที่เลือกใช้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย และระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ไม่ได้สำหรับเพื่อใช้งานทางด้านการควบคุม ประเด็นนี้จะถูกอธิบายสรุปอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.3.2 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทาง

บทความ [8] เปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการควบคุมแบบมีศูนย์กลาง (centralized scheme) และวิธีการควบคุมแบบกระจายส่วน (distributed control scheme) ในระบบควบคุม

อุณหภูมิภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ผู้เสนอบทความดำเนินการวิจัยด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้เครื่องมือการจำลองการทำงานที่รวมเอา OMNeT++ และ MATLAB เข้าด้วยกัน ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจำลองโดย OMNeT++ ในขณะที่ระบบควบคุมและวิธีการควบคุมจำลองโดย MATLAB โพรโทคอลการสื่อสารที่ใช้ในการศึกษานี้คือ โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ตระหนักถึงพลังงานและตำแหน่งภูมิศาสตร์ (geographical and energy aware routing) [27] และโพรโทคอลมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในการประเมินสมรรถนะของระบบ ผู้นำเสนอบทความใช้ตัววัดสมรรถนะคือ ค่าผิดพลาดการควบคุมซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิห้องที่ต้องการและค่าอุณหภูมิห้องที่โหนดวัดได้จริง และอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ย อย่างไรก็ตามเป้าหมายหลักของการวิจัยในบทความนี้คือ การพัฒนาวิธีการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย การศึกษาผลกระทบจากระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่ตระหนักถึงพลังงานและตำแหน่งภูมิศาสตร์ต่อสมรรถนะของการควบคุมไม่ได้อยู่ในขอบเขตการวิจัยของบทความนี้ นอกจากนี้ โพรโทคอลการจัดเส้นทางดังกล่าวถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ไม่ได้สำหรับเพื่อระบบควบคุม ประเด็นนี้จะถูกอธิบายสรุปอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.3.2 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทาง

บทความ [6] ศึกษาการควบคุมกลุ่มหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (mobile robot squad) ด้วยระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือ เพื่อทำการวัดและควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ให้ได้ตามความต้องการ ในมุมมองด้านการควบคุม ผู้เสนอบทความกำหนดใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ (parameter tuning) ที่เหมาะสม และตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) เพื่อจัดการผลกระทบจากการสูญหาย ความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ต และประมาณค่าอินพุตเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ สำหรับในมุมมองด้านการสื่อสาร ผู้นำเสนอบทความทำการทดสอบและประเมินสมรรถนะของโพรโทคอล AODV เปรียบเทียบกับโพรโทคอล LMNR บนระบบเครือข่ายไร้สายด้วยมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ผู้เสนอบทความทำการประเมินสมรรถนะของระบบทางด้านการควบคุมโดยใช้ค่าผลรวมของค่าผิดพลาดการควบคุมตลอดเวลาการทำงานเป็นตัววัดสมรรถนะ โดยที่ค่าผิดพลาดการควบคุม คือผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุม ค่าที่ได้จากการวัดคือตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่วัดได้จริง (actual location) และค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมคือตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ต้องการ (desired robot location) ตามลำดับ ผู้นำเสนอบทความกำหนดใช้ตัววัดสมรรถนะสำหรับการประเมินสมรรถนะทางด้านการสื่อสารคือ ความล่าช้าเฉลี่ยของการส่ง

แพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง (average end-to-end delay) อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล (packet delivery ratio) และโอเวอร์เฮดของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง (routing overhead) ผู้นำเสนอบทความสรุปผลที่ได้จากผลการจำลองการทำงานว่า โพรโทคอล LMNR ซึ่งเป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบหลายเส้นทางให้สมรรถนะต่ำกว่าโพรโทคอล AODV ในกรณีสภาพแวดล้อมที่โหนดมีการเคลื่อนที่ ข้อสรุปนี้ต่อยอดการค้นคว้าจากบทความ [7] โดยที่ โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบหลายเส้นทางสามารถช่วยเพิ่มอัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลที่โหนดปลายทางในกรณีสภาพแวดล้อมที่โหนดหยุดนิ่ง อย่างไรก็ตาม ดังที่เคยได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ข้อจำกัดของบทความนี้คือ ทั้งโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล LMNR ที่เลือกใช้ในการทดสอบในบทความ [6] และ [7] ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย ไม่ได้มีเป้าหมายหลักเพื่อการใช้งานด้านการควบคุมในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายโดยตรง

2.2.2 สรุปช่องว่างของความรู้จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

ผู้วิจัยสรุปช่องว่างของความรู้จากเนื้อหาที่นำเสนอในหัวข้อที่ 2.2.1 ดังตารางที่ 2-1 ด้วยรายละเอียดต่อไปนี้ บทความ [16] เสนอโพรโทคอลการสื่อสารสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย บทความข้างต้นนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการสูญหายของข้อมูล การเกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ โดยปัญหาการวิจัยดังกล่าวเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการควบคุมโดยตรง [1, 2, 5, 8, 12] ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอลการสื่อสารข้างต้น มีการพิจารณาเฉพาะการทำงานและการประเมินสมรรถนะของระบบสื่อสารโดยไม่พิจารณาการทำงานของระบบควบคุม แอคชูเอเตอร์ไม่สามารถปฏิบัติงานได้จริงหรือจัดการกับสภาพแวดล้อมที่สนใจได้ และสภาพแวดล้อมที่ควบคุมมีสถานะหรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรไม่ได้มีการศึกษาไว้ ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่า การทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอข้างต้นส่งผลต่อสมรรถนะของการควบคุมอย่างไร และสามารถประยุกต์ใช้งานด้านการควบคุมได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ เพียงใดยังคงเป็นคำถามในการวิจัย หมายเหตุ: การประเมินสมรรถนะทางด้านการสื่อสารหมายถึง มีการประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอด้วยตัววัดสมรรถนะ (performance metrics) เช่น อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล (packet delivery ratio) ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง (end-to-end delay) ช่วงเวลาจิดเตอร์ (jitter duration) และการใช้พลังงานของโหนด (energy consumption) เป็นต้น สำหรับการประเมินสมรรถนะทางด้านการ

ควบคุม หมายถึง มีการประเมินสมรรถนะของระบบที่นำเสนอด้วยตัววัดสมรรถนะดังนี้ เช่น ผลลัพธ์การควบคุม (control system output) ค่าผิดพลาดการควบคุม (control system error) และอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาด (integral of absolute error) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) หรือเวลาที่ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (steady state) เป็นต้น

บทความ [2, 4, 5, 9–11, 17, 18, 21, 23, 24] มีการเตรียมฟังก์ชันการควบคุมไว้ในกระบวนการศึกษาวิจัย อย่างไรก็ตาม บทความดังกล่าวไม่พิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทาง ตลอดจนผลกระทบของกระบวนการตัดสินทางต่อสมรรถนะของการควบคุม เฉพาะบทความ [3, 6, 7] และ [8] ที่มีการพิจารณาการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทางและฟังก์ชันการควบคุมไว้ในการศึกษาวิจัยอย่างพร้อมเพรียงกัน อย่างไรก็ตาม บทความ [7] ไม่มีการประเมินสมรรถนะของการควบคุมในกรณีศึกษาการควบคุมระดับอุณหภูมิและก๊าซคาบอนไดออกไซด์ในอาคาร ส่วนบทความ [3] ไม่ได้ศึกษาผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทางต่อผลลัพธ์การควบคุม จากการศึกษาพบว่า มีเพียงบทความ [6] และ [8] เท่านั้น ที่มีการศึกษาการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทางและกระบวนการควบคุม รวมทั้งได้ทำการประเมินสมรรถนะของระบบทั้งทางด้านการสื่อสารและการควบคุมอย่างพร้อมเพรียงกัน ดังนั้น งานวิจัยทั้งสองจึงเป็นงานวิจัยลำดับแรก ๆ ในสาขาการวิจัยนี้ที่สามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสื่อสารและการควบคุมร่วมกันได้ อย่างไรก็ตาม บทความ [8] มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมที่เหมาะสมแก่ระบบควบคุมเป็นหลัก การศึกษาผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทางต่อสมรรถนะของการควบคุมไม่ได้อยู่ในขอบเขตการวิจัยของบทความ [8] ดังนั้นจึงมีเฉพาะบทความ [6] เท่านั้น ที่ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการตัดสินทางต่อสมรรถนะของการควบคุมโดยตรง อย่างไรก็ตาม บทความ [6] ไม่ได้นำเสนอการออกแบบ หรือพัฒนาโพรโทคอลการตัดสินทางใหม่สำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายเพื่อตอบสนองประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ (หมายเหตุ: ในบทความ [6] ใช้โพรโทคอลการตัดสินทาง AODV และ LMNR ในการศึกษาวิจัย ดังได้อธิบายในรายละเอียดก่อนหน้านี้) นอกจากนี้ โพรโทคอลการตัดสินทางที่นำเสนอและทดสอบในบทความ [6] นี้ ไม่ได้พิจารณาการออกแบบร่วมกันระหว่างการตัดสินทางและการควบคุมในขั้นตอนการตัดสินทาง หรือมีการพิจารณาปัจจัยการควบคุม หรือสภาวะการควบคุมในกระบวนการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทาง ดังข้อเสนอแนะในบทความ [5] และ [9] การพิจารณาการออกแบบร่วมกันระหว่างการสื่อสารและการควบคุมจะสามารถเพิ่มสมรรถนะการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2-1 สรุปช่องว่างของความรู้จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่าย เซ็นเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

งานวิจัย	ฟังก์ชันที่พิจารณา		การประเมินสมรรถนะ	
	ฟังก์ชันการสื่อสาร	ฟังก์ชันการควบคุม	สมรรถนะด้าน การสื่อสาร	สมรรถนะด้าน การควบคุม
	โพรโทคอล การจัดเส้นทาง	ตัวควบคุม แอคชูเอ- เตอร์ และระบบทาง กายภาพที่ควบคุม		
[16]	Breath		✓	
[2, 9–11, 17, 18, 21]		✓		✓
[4, 5, 23, 24]		✓	✓	✓
[7]	AODV และ LMNR	✓	✓	เฉพาะกรณี target tracking
[3]	GeRaF	✓		✓
[6, 8]	AODV และ LMNR สำหรับ [6] GEAR สำหรับ [8]	✓	✓	✓
วิทยานิพนธ์นี้	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ: ก) ระบบสื่อสารที่นำเสนอในบทความ [4, 5, 23, 24] มีส่วนการทำงานของโพรโทคอลการสื่อสารชั้นกายภาพและชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง แต่ไม่มีส่วนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ข) บทความ [6] และ [7] เป็นบทความจากผู้วิจัยในทีมวิจัยเดียวกัน

2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง

2.3.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง

2.3.1.1 โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

บทความ [28] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางชื่อ D-LAOR (delay-based load-aware on-demand routing) สำหรับเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย โพรโทคอล D-LAOR มีกระบวนการจัดเส้นทางที่สามารถตระหนักรู้ปริมาณงาน (load-aware) ในเครือข่าย โดยอาศัยค่าความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตเป็นตัวชี้วัด โพรโทคอล D-LAOR เลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดเพื่อส่งข้อมูลโดยการพิจารณาค่าความล่าช้าโดยรวมของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง (total route delay) และ

จำนวนฮอป (hop-count) เป็นเกณฑ์ โดยจะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีปริมาณงานหนาแน่น ด้วยการเลือกเส้นทางที่ให้ค่าความล่าช้าในเส้นทางและจำนวนฮอปต่ำสุด สำหรับค่าความล่าช้าในเส้นทางสามารถคำนวณได้จากผลรวมของความล่าช้าของแพ็กเก็ตที่รอในบัฟเฟอร์ (queuing delay) ของโหนดใด ๆ ความล่าช้าจากการแย่งชิงช่องสัญญาณ (contention delay) และความล่าช้าจากการส่ง-รับแพ็กเก็ต (transmission delay) ในเครือข่าย ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม NS2 และกำหนดให้แบบจำลองการสูญเสียแบบสะท้อนพื้นผิว (ground-reflected path loss model) แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล D-LAOR ให้สมรรถนะทางด้านการสื่อสารที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV สามารถหลบหลีกเส้นทางที่มีปริมาณงานหนาแน่น เป็นผลให้สามารถเพิ่มอัตราการรับข้อมูลที่โหนดปลายทาง และลดความล่าช้าในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางได้ แต่โพรโทคอล D-LAOR ให้จำนวนสัญญาณโอเวอร์เฮดในการจัดเส้นทาง (routing overhead) สูงกว่าโพรโทคอล AODV สำหรับข้อจำกัดของโพรโทคอล D-LAOR คือ ก) ไม่มีการพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานของโหนดในขั้นตอนการจัดเส้นทาง โพรโทคอล D-LAOR ไม่พิจารณาประเด็นพลังงานเป็นตัววัดการเลือกเส้นทางที่สามารถบ่งชี้อายุการใช้งานของเครือข่ายได้ นอกจากนี้ งานวิจัยดังกล่าวไม่ได้ทำการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในประเด็นพลังงาน ผู้เสนอบทความทำการประเมินสมรรถนะเฉพาะตัววัดอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง และจำนวนการให้สัญญาณโอเวอร์เฮดในการจัดเส้นทาง และ ข) โพรโทคอล D-LAOR ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย ไม่ได้สำหรับเพื่อใช้งานทางด้านการควบคุมในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายโดยตรง จึงไม่ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย ดังนั้น การจะสามารถนำโพรโทคอล D-LAOR ไปประยุกต์ใช้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ยังเป็นคำถามในการวิจัย

2.3.1.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

บทความ [29] พัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ชื่อ C-AODV (cooperative-queue based AODV) เพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับการส่งสัญญาณ ECG (electrocardiogram) ในกรณีการเฝ้าระวังสุขภาพ (healthcare monitoring) สำหรับวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบโพรโทคอล C-AODV เพื่อให้สามารถรักษาสมรรถนะของการสื่อสารด้านความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล และเพื่อให้โหนดเซนเซอร์ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเลือกเส้นทางจากการพิจารณาปริมาณข้อมูลในบัฟเฟอร์ของโหนดในเส้นทาง โหนดจะตัดสินใจส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไปก็ต่อเมื่อ

โหนดข้างเคียงนั้น ๆ มีปริมาณข้อมูลในบัฟเฟอร์น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ของขนาดบัฟเฟอร์ ถ้าหากโหนดข้างเคียงมีจำนวนข้อมูลมากกว่าเกณฑ์นี้ โหนดจะเลือกโหนดข้างเคียงอื่น ๆ แทน โดยโหนดในเครือข่ายจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลปริมาณข้อมูลในบัฟเฟอร์กันอย่างต่อเนื่องเป็นระยะ ๆ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล C-AODV สามารถช่วยเพิ่มอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล ลดเวลาในการส่งข้อมูล และโหนดใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในบทความนี้พิจารณาเฉพาะปริมาณข้อมูลในบัฟเฟอร์ของโหนดเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ดังที่ผู้เสนอบทความอ้างไว้ งานวิจัยดังกล่าวไม่ได้มีการพิจารณาประเด็นขอบเขตความล่าช้าในการส่งข้อมูล และประเด็นพลังงานของโหนดเป็นเกณฑ์ในขั้นตอนการจัดเส้นทางเพิ่มเติม ซึ่งเป็นความต้องการหลักสำหรับงานด้านการควบคุมในระบบเครือข่ายเช่น เซอร์และ แอคชูเอเตอร์ไร้สาย ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ โพรโทคอล C-AODV ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบเครือข่ายเช่น เซอร์ไร้สาย จึงไม่ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย

บทความ [30] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางชื่อ SPEED สำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเช่น เซอร์ไร้สาย โพรโทคอล SPEED ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับการสื่อสารแบบเวลาจริง (real-time) โดยการรักษาอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (delivery speed) ระหว่างคู่โหนดสื่อสารในเส้นทางให้อยู่ในระดับที่กำหนด ผู้เสนอบทความกำหนดให้อัตราเร็วในการส่งข้อมูลคืออัตราส่วนระหว่างระยะทางจากโหนดไปยังโหนดปลายทาง (สมมติให้เท่ากับ D) ลบด้วยระยะทางจากโหนดถัดไปไปยังโหนดปลายทาง (สมมติให้เท่ากับ D_{Next}) และหารด้วยเวลาความล่าช้าในการส่งข้อมูลจากโหนดนั้น ๆ ไปยังโหนดถัดไป (สมมติให้เท่ากับ Hop_Delay) ดังนั้น อัตราเร็วในการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดเท่ากับ $(D - D_{Next})/Hop_Delay$ โดยถ้าหากผลต่างระหว่างระยะทางดังกล่าวมีค่ามาก หรือโหนดถัดไปอยู่ใกล้โหนดปลายทาง และเวลาความล่าช้าในการส่งข้อมูลระหว่างฮอปมีค่าน้อย แสดงว่าโหนดสามารถส่งข้อมูลผ่านโหนดถัดไปดังกล่าวไปยังโหนดปลายทางด้วยอัตราเร็วสูง โดยผู้เสนอบทความกำหนดให้ทุกโหนดในเครือข่ายรู้ข้อมูลตำแหน่งภูมิศาสตร์ (geographic location) และมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งกันอย่างต่อเนื่อง ในโพรโทคอล SPEED โหนดจะเลือกโหนดถัดไปเพื่อส่งข้อมูลก็ต่อเมื่อ โหนดถัดไปให้ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ในระดับที่ต้องการ (desired delivery speed) เท่านั้น ถ้าหากไม่มีโหนดข้างเคียงใดให้ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ในระดับดังกล่าวนี้ โหนดจะเลือกโหนดถัดไปจากตัววัดอัตราการผลิตเวลาที่กำหนด (deadline miss ratio) แทน ซึ่งโหนดได้ทำการเก็บข้อมูลดังกล่าวไว้เช่นกัน

เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ด้วยวิธีการดังอธิบายนี้ จะทำให้โหนดสามารถหลบหลีกเส้นทางที่มีปริมาณงานหนาแน่นได้ และถ้าหากไม่มีเส้นทางใด ๆ ที่ให้ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูลหรืออัตราการพลาดเวลาที่กำหนด โหนดจะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่ (re-routing process) ในทันที ผลการจำลองการทำงานด้วยตัวจำลอง GloMoSim แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล SPEED สามารถช่วยลดจำนวนแพ็กเก็ตที่ไม่สามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้ทันเวลา ช่วยสมดุลปริมาณงานในเครือข่าย ตลอดจนสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของเครือข่าย อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล SPEED มีข้อจำกัดคือ ก) ไม่มีการพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานของโหนดซึ่งเป็นตัวบ่งชี้อายุการใช้งานของเครือข่าย เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางโดยตรง ข) ไม่สามารถรองรับการสื่อสารในกรณีการใช้งานที่มีความต้องการเวลาที่กำหนดต่างกัน (different deadline) [31] ค) ผู้เสนอบทความสมมติให้ทุกโหนดในเครือข่ายรู้ข้อมูลตำแหน่งภูมิศาสตร์ ซึ่งในการใช้งานจริง จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเช่น GPS (global positioning system) หรืออาศัยอัลกอริทึมการระบุตำแหน่ง (localization algorithm) เพิ่มเติม ความต้องการดังกล่าวเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย โหนดใช้พลังงานเพิ่มขึ้น และเพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณ นอกจากนี้ หากเกิดความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่งในขั้นตอนการจัดเส้นทาง [32] ก็จะมีผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางโดยตรง สำหรับข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบอาศัยตำแหน่งภูมิศาสตร์ในมุมมองการใช้งานกับระบบควบคุมในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย (รวมโพรโทคอล GaRaF และโพรโทคอล GEAR ในงานวิจัย [3] และ [8] ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้า) จะถูกอธิบายสรุปอีกครั้งในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.3 แนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ และ ท้ายสุด ง) โพรโทคอล SPEED ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ดังนั้นจึงไม่ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย

บทความ [31] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ชื่อ MMSPEED (multi-path and multi-SPEED) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่พัฒนาต่อยอดจากบทความ [30] โพรโทคอล MMSPEED ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถรองรับการสื่อสารที่ตรงเวลา (timeliness) และมีความน่าเชื่อถือในระดับที่แตกต่างกันตามความต้องการของการใช้งาน ในกรณีการรองรับการสื่อสารให้ตรงเวลาด้วยระดับที่แตกต่างกัน โพรโทคอล MMSPEED มีกระบวนการจัดเส้นทางที่กำหนดให้อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (delivery speed) มีค่าต่างกัน โดยแพ็กเก็ตหรือ traffic ที่มีความต้องการในการส่งที่ต่างกันจะถูกกำหนดอัตราเร็วในการส่งต่างกันและจะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์แยกจากกันตามลำดับความสำคัญ (priority) ซึ่งสนับสนุนโดยชั้นการควบคุมการเข้าใช้

สื่อกลาง สำหรับในกรณีการรองรับการสื่อสารให้มีความน่าเชื่อถือในระดับที่แตกต่างกัน โพรโทคอล MMSPEED มีการเตรียมจำนวนเส้นทางตามระดับความน่าเชื่อถือของแพ็กเก็ตที่ต้องการ (required reliability level) แพ็กเก็ตที่ต้องการความน่าเชื่อถือในการส่งสูง จะมีการเตรียมจำนวนเส้นทางไว้มากกว่าแพ็กเก็ตที่ต้องการความน่าเชื่อถือในการส่งต่ำกว่า ซึ่งการส่งแบบหลายเส้นทางจะเป็นการช่วยเพิ่มโอกาสการส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากขึ้น ผลการจำลองการทำงานด้วยตัวจำลองเครือข่าย J-SIM แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล MMSPEED สามารถรองรับการส่งชนิด traffic (traffic type) ที่แตกต่างกันได้ สามารถส่งข้อมูลได้ตรงเวลา (timeliness) และมีความน่าเชื่อถือตามกำหนด อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล MMSPEED มีข้อจำกัดหลักเช่นเดียวกับโพรโทคอล SPEED คือ ไม่มีการพิจารณาประเด็นพลังงานของโหนดเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางโดยตรง ผู้เสนอบทความกำหนดให้ทุกโหนดในเครือข่ายรู้ข้อมูลตำแหน่งภูมิศาสตร์ และโพรโทคอล MMSPEED ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในระบบควบคุมจึงไม่ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย

บทความ [33] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ชื่อ RTLD (real-time routing protocol with load distribution) โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้สามารถรองรับการสื่อสารแบบเวลาจริงและสามารถกระจายภาระงาน (load distribution) ของโหนดในเครือข่ายได้ ในกระบวนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางดังกล่าวนี้ โหนดเลือกโหนดถัดไปซึ่งเป็นโหนดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับส่งข้อมูลจากการพิจารณาตัววัดในการเลือกเส้นทางสามประเด็น คือ ก) คุณภาพของลิงค์สื่อสาร ซึ่งแทนด้วยอัตราความสำเร็จในการรับแพ็กเก็ต (packet reception rate) ข) อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ต (packet velocity) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากระยะทาง (กำหนดให้โหนดรู้ตำแหน่งภูมิศาสตร์ของตนเอง และโหนดรอบข้าง) หารด้วยความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตระหว่างฮอปใด ๆ เมื่อเวลาความล่าช้าดังกล่าวคือ ผลรวมของเวลาการตรวจสอบช่องสัญญาณ (carrier sense delay) เวลารอก่อนเข้าใช้ช่องสัญญาณ (back-off delay) เวลาส่งแพ็กเก็ต (transmission delay) เวลาประมวลผล (processing delay) เวลาที่รออยู่ในบัฟเฟอร์ (queuing delay) และเวลาที่โหนดอยู่ในสภาวะหลับ (sleep delay) และท้ายสุด ค) ระดับพลังงานที่เหลืออยู่ (remaining energy) ของโหนดถัดไป โดยโหนดจะเลือกเส้นทางจากการพิจารณาค่าใช้จ่าย (cost) ซึ่งเป็นผลรวมของทั้งสามฟังก์ชันข้างต้น ผู้เสนอบทความกำหนดลำดับความสำคัญให้ฟังก์ชันแรกมีค่ามากที่สุด และอีกสองฟังก์ชันที่เหลือมีค่าเท่ากัน สำหรับในบทความ [34] ผู้เสนอบทความพัฒนาต่อยอดโพรโทคอล RTLD และตั้งชื่อใหม่ว่าโพรโทคอล ERTLD (enhanced real-time routing protocol with load distribution) โดย

ยังคงรักษาแนวคิดเดิมในการออกแบบไว้ แต่เพิ่มความใหม่ คือ ไม่กำหนดให้โหนดรู้ข้อมูล ภูมิศาสตร์ โหนดสื่อสารกันด้วยการการแลกเปลี่ยนข้อมูลโหนด ID ระหว่างกันแทน นอกจากนี้ ยังกำหนดให้คุณภาพของลิงค์สื่อสารแทนด้วยแรงของสัญญาณวิทยุ (received signal straight) และเพิ่มการทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอล ERTLD กรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่ (mobility) เพิ่มเติม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม NS2 และผลการทดสอบจริงด้วยโหนด TelosB และโหนด MICAz ในบทความที่ [33] และผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม NS2 ในบทความที่ [34] แสดงให้เห็นว่าทั้งสองโพรโทคอลสามารถช่วยเพิ่มอัตราการรับข้อมูล ลดความล่าช้าในการส่งข้อมูล และโหนดมีความสามารถในการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยทั้งสองข้างต้นมีข้อจำกัดคือ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดได้ว่าจะใช้ตัววัดการเลือกเส้นทางใดเป็นเกณฑ์หลักในการเลือกเส้นทางจากการกำหนดลำดับความสำคัญให้ตัววัดที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม ในระหว่างการทำงาน โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอทั้งสองไม่สามารถตัดสินใจและปรับเปลี่ยนได้อย่างอัตโนมัติว่าจะกำหนดใช้งานตัววัดใด และควรกำหนดจากเงื่อนไขใดจึงจะมีความเหมาะสม โดยในประเด็นนี้ผู้วิจัยเองมีความเห็นว่า หากต้องการประยุกต์ใช้งานโพรโทคอลการจัดเส้นทางข้างต้นกับงานด้านการควบคุม การเลือกใช้งานตัววัดการเลือกเส้นทาง ควรคำนึงสภาวะของระบบสื่อสาร หรือสภาวะของระบบควบคุม เป็นองค์ประกอบ สำหรับประเด็นดังกล่าวนี้จะถูกอภิปรายอีกครั้งในบทที่ 4 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ ข้อจำกัดหลักอีกประเด็นหนึ่งของงานวิจัยข้างต้นคือ โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานด้านการควบคุมสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย จึงไม่มีการพิจารณาการทำงานของฟังก์ชันการควบคุมในขั้นตอนการวิจัย ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร ตัววัดการจัดเส้นทางที่กำหนดใช้งานมีความเหมาะสม จำเป็นเพียงใดกับความต้องการของระบบควบคุม หรือสัมพันธ์กับสภาวะการควบคุมอย่างไร

2.3.1.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

บทความ [35] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ชื่อ AOD²V (ad-hoc on-demand delay constrained distance vector) ซึ่งได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจากโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV ความใหม่ของโพรโทคอล AOD²V คือ มีการจัดเส้นทางและเลือกเส้นทางจากความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตเป็นเกณฑ์ เส้นทางที่เลือกสำหรับส่ง-รับข้อมูลต้องมีความล่าช้าโดยรวมตลอดเส้นทางน้อยกว่าค่า

ขอบเขตความล่าช้า (delay bound) ซึ่งจะถูกกำหนดโดยโหนดต้นทาง (source node) ในการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV โหนดต้นทางจะส่งข้อความ RREQ (route request message) ร้องขอไปในเครือข่ายเพื่อค้นหาโหนดปลายทาง ซึ่งจะฝากค่าขอบเขตความล่าช้าที่ต้องการไปด้วยระหว่างที่ข้อความ RREQ แพร่กระจายไปในเครือข่ายจะมีการเก็บค่าความล่าช้าโดยรวมตลอดเส้นทาง ซึ่งประกอบด้วย ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตของคู่ลิงค์ใด ๆ (transmission delay) และความล่าช้ากำหนดเฉพาะที่ (local deadline) ของโหนดที่รับข้อความ RREQ ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างของเวลาที่รับแพ็กเก็ต RREQ เข้ามา (arrival time) และเวลาที่ประมวลผล (processing time) ก่อนส่งแพ็กเก็ตออกไป ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณไหลของโหนดนั้น ๆ ดังนั้นเมื่อโหนดปลายทาง (sink node) รับข้อความ RREQ ก็จะสามารถคำนวณเวลารวมตลอดเส้นทางออกมาได้ และสามารถเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตความล่าช้าที่โหนดต้นทางฝากมาในข้อความ RREQ เช่นเดียวกัน โหนดปลายทางจะตอบข้อความ RREP (route reply message) กลับไปยังโหนดต้นทางและฝากข้อมูลการตัดสินใจ (decision) ลงไปในข้อความ RREP ซึ่งมีค่าเป็น 0 หรือ 1 โดยที่ 0 คือเส้นทางนั้น ๆ ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ทันเวลา และ 1 คือเส้นทางนั้น ๆ สามารถส่งข้อมูลได้ทันเวลา ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล AODV สามารถช่วยเพิ่มจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งได้ทันเวลา กำหนด แต่จะให้จำนวนโอเวอร์เฮดโดยเฉลี่ยในเครือข่ายสูงกว่ากรณีโพรโทคอล AODV จะเห็นได้ว่า กระบวนการทำงานโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอข้างต้นนี้มีการพิจารณาขอบเขตความล่าช้าของการส่งข้อมูลเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง ซึ่งเป็นความต้องการหลักประเด็นหนึ่งสำหรับงานด้านการควบคุม ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงอาจสามารถนำโพรโทคอล AODV นี้ไปประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายได้ อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล AODV ยังคงมีข้อจำกัด คือ ก) ไม่มีการพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานของโหนดเป็นตัววัดในการจัดเส้นทาง ซึ่งเป็นความต้องการหลักที่สำคัญอีกประเด็นหนึ่งสำหรับงานด้านการควบคุม ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้เช่นเดียวกัน โดยในงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้ทำการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอล AODV ในประเด็นพลังงาน ผู้เสนอบทความทำการประเมินสมรรถนะเฉพาะตัววัดความล่าช้าการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง และจำนวนการให้สัญญาณโอเวอร์เฮดในการจัดเส้นทาง ข) ในโพรโทคอล AODV โหนดทำการคำนวณและเก็บค่าความล่าช้าตลอดเส้นทางในขั้นตอนการส่งข้อความ RREQ วิธีการดังกล่าว อาจทำให้ได้ค่าความล่าช้าตลอดเส้นทางที่ไม่สามารถเป็นตัวแทนของกรณีการส่งข้อมูลจริงได้ ทั้งนี้เนื่องจาก ในงานวิจัยดังกล่าว กำหนดส่งข้อความ RREQ ด้วยวิธีการแพร่กระจายสัญญาณ (broadcast) ซึ่งโหนดระหว่างทางจะไม่ทำการส่งแพ็กเก็ตซ้ำหากมีการสูญหายของข้อความ RREQ ตลอดจน

โหนดตัวรับจะไม่มี การตอบข้อความยืนยันที่จัดการโดยชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง หากได้รับข้อความ RREQ ซึ่งเหตุการณ์ดังอธิบายนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนการส่งข้อมูล สำหรับประเด็นดังอธิบายนี้จะถูกอภิปรายอย่างละเอียดอีกครั้งในบทที่ 4 และท้ายสุด ค) งานวิจัยดังกล่าวไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่า โพรโทคอล AOD²V ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร และการใช้งานตัววัดการเลือกเส้นทางที่กำหนดส่งผลต่อสถานะการควบคุมอย่างไร หมายเหตุ: จากข้อเด่นของโพรโทคอล AOD²V ประเด็นการกำหนดขอบเขตความล่าช้าในขั้นตอนการจัดเส้นทาง ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดดังกล่าวมาปรับใช้กับโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับแนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์จะถูกอธิบายอย่างละเอียดอีกครั้งในบทที่ 4

บทความ [36–38] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย เพื่อประยุกต์ใช้งานในกรณีที่มีเหตุการณ์ฉุกเฉิน (emergency applications) ผู้เสนอบทความมีแนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางดังกล่าว เพื่อให้โหนดเซนเซอร์สามารถส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปยังโหนดแอคชูเอเตอร์ได้ทันเวลา มีความน่าเชื่อถือ และโหนดสามารถประหยัดพลังงาน โดยจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้หรือประเภทของงานนั้น ๆ จากแนวคิดนี้ ผู้เสนอบทความอ้างว่ายังไม่ม้งานวิจัยใดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่มีการพิจารณาทั้งสามประเด็นข้างต้นพร้อมกัน สำหรับโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอจะทำการเตรียมเส้นทางและเลือกเส้นทางเพื่อรองรับคุณภาพการบริการ (QoS หรือ Quality of Service) จากสามประเด็นข้างต้น แพ็กเกตที่ต้องการส่งให้ทันเวลาจะถูกส่งตามเส้นทางที่เร็วที่สุด (fastest route) แพ็กเกตที่ต้องการความน่าเชื่อถือในการส่งจะถูกส่งตามเส้นทางที่ให้ความน่าเชื่อถือสูงสุด (reliability route) และแพ็กเกตที่ไม่กำหนดความต้องการใด ๆ จะถูกส่งตามเส้นทางที่ใช้พลังงานน้อยสุด (low energy route) โดยแพ็กเกตที่มีระดับความต้องการในการส่งที่แตกต่างกันนี้จะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ที่มีการกำหนดลำดับความสำคัญต่างกัน ในโพรโทคอลการจัดเส้นทางดังกล่าวนี้ เส้นทางที่เร็วที่สุด มีความน่าเชื่อถือสูงสุด และใช้พลังงานน้อยสุด กำหนดจากตัววัดความล่าช้าในการส่งข้อมูลตลอดเส้นทาง (end-to-end delay) อัตราการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูล (delivery rate) และระดับพลังงานของโหนด (energy level) ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม NS2 แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอข้างต้นสามารถรองรับการทำงานได้ตามรูปแบบที่ต้องการ สามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็ว มีความน่าเชื่อถือ และโหนดประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม ในบทความดังกล่าวนี้ แพ็กเกตหรือ traffic ชนิดใด ๆ จะถูกส่งไปยัง

ปลายทางตามเส้นทางที่พิจารณาจากตัววัดเพียงประเด็นเดียวเท่านั้น ไม่สามารถแยกได้อย่างอัตโนมัติว่า ณ เวลาใด หรือช่วงใด การส่งแพ็กเก็ตนั้น ๆ ควรให้ความสำคัญกับประเด็นความเร็ว ความน่าเชื่อถือ หรือพลังงานของโหนด ตัวอย่างเช่น หากกำหนดตัววัดจากระดับพลังงานของโหนด ก็จะไม่สามารถตอบสนองประเด็นความเร็วและความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลได้ เป็นต้น นอกจากนี้ ในขั้นตอนการวิจัยของบทความดังกล่าวไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่าตัววัดการจัดเส้นทางที่กำหนดใช้งานมีความเหมาะสมหรือส่งผลต่อระบบควบคุมอย่างไร

บทความ [39] เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางชื่อ RLQ (resource-aware and link quality based routing) สำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย โดยมีเป้าหมายในการออกแบบเพื่อให้โหนดสามารถประหยัดพลังงาน และสามารถรับมือกับความแปรปรวนของคุณภาพของลิงค์สื่อสารไร้สายได้ โพรโทคอล RLQ เลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลโดยใช้ตัววัดที่พิจารณาจากค่าใช้จ่ายลิงค์ (link cost) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ใช้ในการส่งและรับแพ็กเก็ต พลังงานที่เหลือของโหนด และคุณภาพของลิงค์สื่อสารไร้สายซึ่งแสดงโดยอัตราความสำเร็จในการรับแพ็กเก็ต (packet reception rate) ความใหม่ของวิธีการที่นำเสนอคือ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดความต้องการได้ว่าจะใช้ตัววัดใดในการเลือกเส้นทางเป็นเกณฑ์หลัก โดยการกำหนดค่าน้ำหนักหรือค่าความสำคัญให้แก่ฟังก์ชันนั้น ๆ เช่น ถ้าให้ความสำคัญกับฟังก์ชันพลังงานที่ใช้หรือที่เหลืออยู่มากที่สุด เส้นทางที่โหนดใช้พลังงานต่ำสุดจะถูกเลือก ถ้าให้ความสำคัญกับฟังก์ชันคุณภาพของลิงค์มากที่สุด เส้นทางที่ให้คุณภาพของลิงค์สูงสุดจะถูกเลือกแทน ถ้ากำหนดให้มีความสำคัญเท่ากัน เส้นทางที่โหนดใช้พลังงานต่ำสุดและให้คุณภาพของลิงค์สูงสุดจะถูกเลือก และถ้าไม่กำหนดความสำคัญ เส้นทางที่มีจำนวนฮอปน้อยสุดจะถูกเลือก ทั้งนี้การกำหนดความสำคัญขึ้นอยู่กับความต้องการเฉพาะเจาะจงของผู้ออกแบบ ผลการทดลองใช้งานจริงด้วยโหนด Tmote Sky บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในกรณีสภาพแวดล้อมแบบในอาคารและมีการรบกวนของสัญญาณวิทยุจากการใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.11b แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล RLQ สามารถเพิ่มความสำเร็จในการส่ง-รับข้อมูล และช่วยยืดอายุการใช้งานของเครือข่าย โดยผลการทดสอบข้างต้นกำหนดให้ค่าน้ำหนักของทั้งสองฟังก์ชันมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล RLQ มีข้อจำกัดคือ ก) ไม่มีการพิจารณาประเด็นขอบเขตความล่าช้าในการส่งข้อมูลเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง ซึ่งเป็นความต้องการหลักประเด็นหนึ่งสำหรับงานด้านการควบคุมตามที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ข) เช่นเดียวกันกับข้ออธิบายในบทความ [33] และ [34] ก่อนหน้า โพรโทคอล RLQ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดได้ว่าจะใช้ตัววัดใดในการเลือกเส้นทางเป็นเกณฑ์หลัก จาก

การกำหนดค่าน้ำหนักให้แต่ละฟังก์ชันแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจากหัวข้อการทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอล RLQ ที่เสนอไว้ในบทความแสดงให้เห็นว่า ในระหว่างการทำงาน โพรโทคอล RLQ ไม่สามารถตัดสินใจปรับเปลี่ยนได้อย่างอัตโนมัติว่าจะใช้หลักเกณฑ์หรือเงื่อนไขใดในการกำหนดค่าน้ำหนัก และจะให้ค่าน้ำหนักกับฟังก์ชันใดก่อนหลัง หรือเวลาใด เป็นต้น และ ค) ไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่า โพรโทคอล RLQ ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร และสามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

บทความ [40] เสนอโพรโทคอลการสื่อสารในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบเพื่อให้โหนดเซนเซอร์และโหนดแอคชูเอเตอร์สามารถติดต่อสื่อสารและส่งข้อมูลระหว่างกันได้แบบเวลาจริง ตลอดจนโหนดแอคชูเอเตอร์สามารถจัดการกับสภาพแวดล้อมที่สนใจได้ทันเวลาจากการประสานงานกัน (coordinate) ระหว่างโหนดเซนเซอร์และโหนดแอคชูเอเตอร์ด้วยกันเอง ในบทความนี้ กำหนดใช้ขอบเขตความล่าช้า (delay bound) ของการส่งแพ็กเก็ตเพื่อรองรับการสื่อสารแบบเวลาจริง ขอบเขตความล่าช้ารวมจะถูกแบ่งออกเป็นขอบเขตความล่าช้าย่อย คือ ขอบเขตความล่าช้าในการส่งข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์ไปยังโหนดแอคชูเอเตอร์ ขอบเขตความล่าช้าจากการประสานงานกันระหว่างโหนดแอคชูเอเตอร์ และขอบเขตความล่าช้าที่ใช้ในการจัดการภาระงานของโหนดแอคชูเอเตอร์ ในบทความนี้ เครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย (cluster) แต่ละกลุ่มมีโหนดแอคชูเอเตอร์เป็นผู้นำกลุ่ม (cluster head) โหนดเซนเซอร์เลือกโหนดแอคชูเอเตอร์ใดเป็นผู้นำกลุ่มจะพิจารณาจากฟังก์ชันน้ำหนัก (weight function) ซึ่งสามารถคำนวณจากพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนดแอคชูเอเตอร์หารด้วยระยะทางจากโหนดเซนเซอร์ไปยังโหนดแอคชูเอเตอร์คูณด้วยปริมาณไหลหรือภาระงานของโหนดแอคชูเอเตอร์ ซึ่งคำนวณได้จากจำนวนแพ็กเก็ตที่โหนดแอคชูเอเตอร์รับในช่วงเวลาหนึ่ง (packets received over a recent time interval) เมื่อเครือข่ายถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ ได้สำเร็จ โหนดเซนเซอร์จะส่งข้อมูลไปยังโหนดแอคชูเอเตอร์โดยอาศัยโพรโทคอลการจัดเส้นทาง GPCR [41] ซึ่งจะมีการค้นหาเส้นทางและเลือกเส้นทางจากข้อมูลตำแหน่งภูมิศาสตร์ของโหนด ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม OMNET++ แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอสามารถสมดุการใช้พลังงานของโหนดแอคชูเอเตอร์ เพิ่มอัตราการรับข้อมูลระหว่างโหนดเซนเซอร์และโหนดแอคชูเอเตอร์ และโหนดแอคชูเอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ไปจัดการกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ทันเวลา อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของงานวิจัยดังกล่าวคือ ก) กระบวนการสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มอาจมีความซับซ้อนสูง ใช้เวลานาน มีการให้โอเวอร์เฮดจำนวนมาก และอาจจำเป็นต้องมีการเลือก

โหนดหัวหน้ากลุ่มให้ทันสมัยอยู่เสมอ ๆ ยิ่งโดยเฉพาะในกรณีเครือข่ายที่มีความพลวัต สำหรับประเด็นนี้จะถูกอภิปรายในรายละเอียดอีกครั้งในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.3 แนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทาง ข) ผู้เสนอบทความสมมติให้ทุกโหนดรู้ข้อมูลตำแหน่งภูมิศาสตร์เพื่อให้สามารถคำนวณฟังก์ชันน้ำหนักและตัดสินใจเลือกโหนดแอสซุเอเตอร์เป็นผู้นำกลุ่มได้ ดังได้อธิบายไว้ในข้างต้น อย่างไรก็ตามการสมมติให้โหนดรู้ข้อมูลตำแหน่ง มีข้อจำกัดเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงดังได้อภิปรายเหตุผลไว้ก่อนหน้าแล้ว และ ค) ในขั้นตอนการวิจัยของบทความดังกล่าวไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่า โพรโทคอลการสื่อสารที่นำเสนอส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมควบคุมอย่างไร

นอกจากบทความทั้งหมดดังอธิบายข้างต้นแล้ว พบว่ายังมีบทความ [42–48] ที่ได้เสนอโพรโทคอลการตัดสินทางสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอสซุเอเตอร์ไร้สาย โดยที่บทความ [42–44] เสนอโพรโทคอลการตัดสินทางที่มีการพิจารณาจำนวนฮอปเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง บทความ [45–47] เสนอโพรโทคอลการตัดสินทางที่มีการพิจารณาการใช้พลังงานของโหนดเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง และบทความ [48] เสนอโพรโทคอลการตัดสินทางที่มีการพิจารณาจำนวนฮอปและการใช้พลังงานของโหนดเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางร่วมกัน จากการกำหนดใช้งานตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการตัดสินทางข้างต้นนี้ โพรโทคอลการตัดสินทางดังกล่าวอาจไม่สามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจาก การขาดการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานงานของโหนด ประเด็นใดประเด็นหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งเป็นความต้องการหลักของการควบคุมดังได้อภิปรายเหตุผลไว้ก่อนหน้านี้ หมายเหตุ: สำหรับตัววัดจำนวนฮอปสามารถบ่งบอกจำนวนครั้งของการส่งแพ็กเก็ต โอกาสการเกิดการสูญหาย และความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตในเส้นทางได้ เส้นทางที่มีจำนวนฮอปมากอาจให้จำนวนครั้งของการส่งแพ็กเก็ตโอกาสเกิดการสูญหาย และความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตมากตามมา อย่างไรก็ตาม ตัววัดจำนวนฮอปไม่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะดังอธิบายนี้ได้โดยตรง โดยเฉพาะกรณีในระบบเครือข่ายที่มีความไม่แน่นอนในการสื่อสารแบบไร้สาย และมีความแปรปรวนของปริมาณงาน เป็นต้น โดยประเด็นนี้จะถูกอภิปรายอีกครั้งในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.1 แนวคิดการกำหนดตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการตัดสินทาง นอกจากนี้ ข้อจำกัดอีกประเด็นหนึ่งของงานวิจัยทั้งหมดข้างต้น คือไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่าโพรโทคอลการตัดสินทางที่นำเสนอส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร และสามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

2.3.2 สรุปช่องว่างของความรู้จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง

ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ เพื่อรักษาสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุม การสูญหายของแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์เป็นประเด็นวิจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย [1, 2, 5, 8, 12] ตัววัดในการเลือกเส้นทาง (routing metric) คือ หน่วยวัดที่ขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง (routing algorithm) ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับส่ง-รับข้อมูล โพรโทคอลการจัดเส้นทางเลือกเส้นทางจากประเด็นใดเป็นหลักสามารถบ่งชี้ด้วยตัววัดในการเลือกเส้นทาง ตารางที่ 2-2 2-3 และ 2-4 แสดงการเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จากตารางที่ 2-2 ถึง 2-4 พบว่า เฉพาะงานวิจัยใน [33, 34, 36-38, 40] ที่กำหนดใช้ตัววัดการเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานงานของโหนดเซนเซอร์ ดังนั้นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่เสนอดังกล่าวอาจสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โพรโทคอลการจัดเส้นทางทั้งหมดข้างต้นยังคงมีข้อจำกัดในประเด็นขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทาง (routing algorithm) ตามเนื้อหาที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในตอนต้น ประกอบกับในงานวิจัยดังกล่าวพิจารณาเฉพาะการทำงานของระบบสื่อสารโดยไม่พิจารณาการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร หรือสามารถประยุกต์ใช้งานเพื่อการควบคุมได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางในหัวข้อที่ 2.3.1 พบว่าไม่มีงานวิจัยใดที่ออกแบบและทดสอบโพรโทคอลการจัดเส้นทางโดยการพิจารณาระบบควบคุมควบคุมในขั้นตอนการวิจัย โพรโทคอลการจัดเส้นทางใน [28] ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย โพรโทคอลการจัดเส้นทางใน [29, 30, 31, 33, 34] ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ดังนั้นจึงไม่ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในขั้นตอนการวิจัย เนื่องจากไม่ได้มีเป้าหมายเพื่อการใช้งานด้านการควบคุมโดยตรงสำหรับโพรโทคอลการจัดเส้นทางใน [35-40, 42-48] ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย แต่ก็ไม่ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันการควบคุมในขั้นตอนการวิจัย

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่าย เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมพร้อมกัน ผู้วิจัยพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่กำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทางจากประเด็นการใช้พลังงานของโหนด ความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และความผิดพลาดการควบคุมของระบบควบคุม แสดงดังการเปรียบเทียบในตารางที่ 2-4 การใช้พลังงานของโหนด ความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต และความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต เป็นตัวบ่งชี้สภาวะของระบบสื่อสาร ในขณะที่ความผิดพลาดการควบคุมเป็นตัวบ่งชี้สภาวะของระบบควบคุมที่สนใจ โดยที่ตัววัดการใช้พลังงานของโหนด การสูญหายของแพ็กเก็ต และความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต จะถูกเลือกใช้งานตามความเหมาะสมและขึ้นอยู่กับสภาวะของการควบคุม (control system state) เป็นหลัก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่มีการพิจารณาการออกแบบร่วมกันระหว่างมุมมองด้านการสื่อสารและมุมมองทางด้านการควบคุม เพื่อรักษาสมรรถนะทางด้านการสื่อสารและสมรรถนะทางด้านการควบคุมให้ได้พร้อมกัน ซึ่งไม่เคยมีงานวิจัยใดนำเสนอประเด็นนี้มาก่อน สำหรับปรัชญาการกำหนดตัววัดการเลือกเส้นทาง การออกแบบขั้นตอนการทำงาน และการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จะถูกอภิปรายในรายละเอียดอีกครั้งในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3 แนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเฉพาะกิจไร้สาย

โพรโทคอล การจัดเส้นทาง	ตัววัดการเลือกเส้นทาง							
	Hop count	Energy resource	Latency	Reliability	Routing table size	Freshness of route	Location information	Control system error
[6, 7] เลือกใช้ AODV LMNR	✓ ✓			✓ Multipath	✓	✓ ✓		
[28] D-LAOR	✓		✓ Route delay					
[44] เลือกใช้ AODV DSR OLSR	✓ ✓ ✓					✓		

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

โพรโทคอล การจัดเส้นทาง	ตัววัดการเลือกเส้นทาง							
	Hop count	Energy resource	Latency	Reliability	Routing table size	Freshness of route	Location information	Control system error
[8] เลือกใช้ GEAR		✓					✓	
[3] เลือกใช้ GeRaF							✓	
[29] C-AODV				✓ Buffer size		✓		
[30] SPEED			✓ Delivery speed Deadline miss ratio				✓	
[31] MMSPEED			✓ Delivery speed Deadline miss ratio	✓ Multipath			✓	

โปรโตคอล การจัดเส้นทาง	ตัววัดการเลือกเส้นทาง							
	Hop count	Energy resource	Latency	Reliability	Routing table size	Freshness of route	Location information	Control system error
[33] RTLD		✓	✓ Packet velocity	✓ Packet reception rate			✓	
[34] ERTLD		✓	✓ Packet velocity	✓ RSSI				

ตารางที่ 2-4 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

โพรโทคอล การจัดเส้นทาง	ตัววัดการเลือกเส้นทาง							
	Hop count	Energy resource	Latency	Reliability	Routing table size	Freshness of route	Location information	Control system error
[16] Breath		✓	✓ Probability of largest end-to- end delay	✓ Probability of successful packet delivery				
[35] AOD ² V			✓ Delay bound			✓		
[36] QARP		✓	✓ End-to-end delay	✓ Packet delivery				
[37] QARP-CP		✓	✓ End-to-end delay	✓ Packet delivery				

โพรโทคอล การจัดเส้นทาง	ตัววัดการเลือกเส้นทาง							
	Hop count	Energy resource	Latency	Reliability	Routing table size	Freshness of route	Location information	Control system error
[38] QBRP		✓	✓ End-to-end delay	✓ Packet delivery				
[39] RLQ	✓	✓		✓ Packet reception rate				
[40] ไม่ระบุชื่อ		✓	✓ Delay bound	✓ Actuator Load Packets received over time interval			✓	
[42] ELRS	✓							
[43] VMR	✓							

โพรโทคอล การจัดเส้นทาง	ตัววัดการเลือกเส้นทาง							
	Hop count	Energy resource	Latency	Reliability	Routing table size	Freshness of route	Location information	Control system error
[45] EACBR		✓						
[46] VDSPT		✓						
[47] ADCP		✓						
[48] DGR	✓	✓						
โพรโทคอลการจัด เส้นทางที่นำเสนอ	✓	✓	✓	✓		✓		✓

หมายเหตุ: โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้พัฒนาต่อยอดมาจากโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV แบบดั้งเดิม ดังนั้น ตัววัดจำนวนฮอป (hop-count) และความใหม่ของเส้นทาง (freshness of route) ยังคงถูกใช้ประโยชน์ในโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ

บทที่ 3

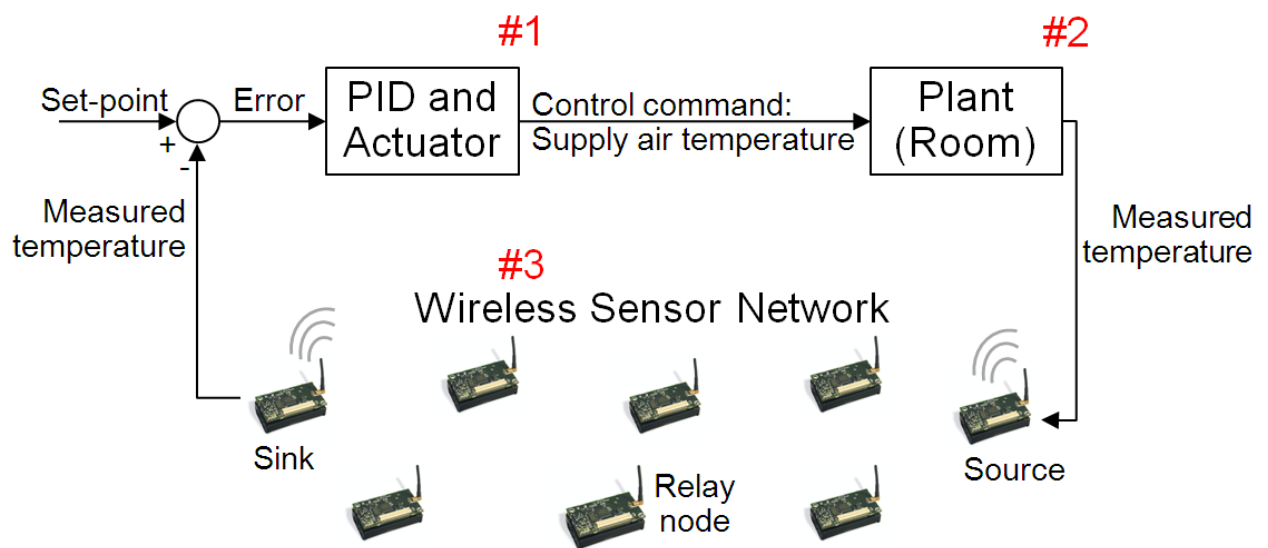
แบบจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย

บทนี้อธิบายแบบจำลองระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สายที่ศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ รายละเอียดของระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย แบบจำลองที่กำหนดให้แก่ระบบทั้งแบบจำลองทางด้านการควบคุมและแบบจำลองทางด้านการสื่อสาร ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์ แบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ต แบบจำลองพลังงาน และแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ อธิบายดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย

ระบบควบคุมที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร แสดงดังภาพประกอบที่ 3-1 วัตถุประสงค์หลักในการทำงานของระบบนี้ คือ เพื่อทำการวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในบริเวณห้องให้อยู่ในระดับที่ต้องการด้วยระบบเครือข่ายสื่อสารมัลติฮอปไร้สาย จากภาพประกอบที่ 3-1 ระบบดังกล่าวประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์ (controller และ actuator) สภาพแวดล้อมที่สนใจหรือระบบทางกายภาพ (physical system หรือ plant) และระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (wireless sensor network) แสดงดังหมายเลขกำกับ #1 #2 และ #3 ตามลำดับ ในกระบวนการควบคุม ตัวควบคุมทำหน้าที่ตัดสินใจและควบคุมแอกชูเอเตอร์ ซึ่งในที่นี้คือตัวทำความร้อนหรือตัวทำความเย็น (heating/cooling actuator) โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากโหนดเซนเซอร์ สภาพวะของอุณหภูมิในบริเวณห้องหรือสภาพแวดล้อมที่สนใจอธิบายได้โดยแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (zone temperature model) นั้น ๆ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในลำดับถัดไป ในวิทยานิพนธ์นี้ โหนดต้นทางถูกวางอยู่ในบริเวณห้อง ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิ ค้นหาเส้นทาง และส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปยังโหนดปลายทางในทุกช่วงเวลาการซึกตัวอย่าง (sampling period) ผ่านเส้นทางการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สาย ตัวควบคุมซึ่งเชื่อมต่อกับโหนดปลายทางทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาดการควบคุม (control system error) ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายหรือค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม (set point หรือ desired value) และค่าอุณหภูมิที่โหนดต้นทางวัดได้ (measured temperature value) เพื่อใช้หาค่าอินพุทหรือค่าอุณหภูมิลมจ่ายที่เหมาะสม (supply air

temperature) และสั่งการให้แอกชูเอเตอร์ป้อนค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้ดังกล่าวสู่บริเวณห้องที่ทำการควบคุม อุณหภูมิภายในห้องก็จะเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลจากการได้รับฉันทจากแอกชูเอเตอร์ จากนั้นโหนดเซนเซอร์ก็จะทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิในห้องครั้งใหม่ และส่งข้อมูลที่ได้ไปยังโหนดปลายทางในช่วงเวลาการชั้กตัวอย่างถัดไป กระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) ลักษณะนี้ดำเนินวนซ้ำอย่างต่อเนื่อง กระทั่งสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการและสามารถรักษาอุณหภูมิที่ค่าดังกล่าวไว้ได้



ภาพประกอบ 3-1 ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย

ผู้วิจัยจำลองระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สายดังอธิบายในข้างต้นโดยใช้เครื่องมือจำลองการทำงานชื่อ PiccSIM tool [13] ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 ก่อนหน้า PiccSIM เป็นเครื่องมือจำลองการทำงานที่รวมเอาตัวจำลองระบบควบคุมและตัวจำลองระบบเครือข่ายเข้าด้วยกันและสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ ตัวจำลองระบบควบคุมในที่นี้คือ MATLAB/Simulink และตัวจำลองระบบเครือข่ายในที่นี้คือ NS2 แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง ตัวควบคุม และแอกชูเอเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-1 ด้วยหมายเลขกำกับ #1 และ #2 ถูกจำลองโดย MATLAB/Simulink ในขณะที่เครือข่ายมัลติฮอปเซนเซอร์ไร้สายบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง ตลอดจนแบบจำลองการ

สูญหายของแพ็กเก็ต แบบจำลองพลังงาน และแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ ซึ่งเป็น ส่วนของหมายเลขกำกับ #3 ถูกจำลองโดย NS2 รุ่น 2.33 บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์

3.2 แบบจำลองทางด้านการควบคุม

3.2.1 แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง

สภาวะของอุณหภูมิภายในบริเวณห้องสามารถอธิบายได้ด้วยระบบทางกายภาพ ซึ่งในที่นี้ คือ แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง แบบจำลองนี้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ภายในบริเวณห้องต่อเวลาดังสมการที่ (3-1)

$$\frac{dT_z}{dt} = \frac{1}{H_a} [F_{sa}\rho_a C_a(T_{sa} - T_z) + U_{Roof}A_{Roof}(T_{Roof} - T_z) + 2U_{Wall1}A_{Wall1}(T_{Wall1} - T_z) + 2U_{Wall2}A_{Wall2}(T_{Wall2} - T_z) + q(t)] \quad (3-1)$$

สมการที่ (3-1) ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสี่ส่วนคือ อุณหภูมิลมจ่ายที่ป้อนโดยแอกชูเอเตอร์ (T_{sa}) อุณหภูมิของหลังคา (T_{Roof}) อุณหภูมิของผนังห้อง (T_{Wall1} และ T_{Wall2}) ทั้งสี่ทิศ และอุณหภูมิที่เกิดจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง โดยที่ T_{sa} คือค่าอินพุทของระบบ ได้จากการคำนวณโดยตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์ สำหรับเอาต์พุทของระบบคือ อุณหภูมิภายในบริเวณห้อง ณ เวลาปัจจุบัน (T_z) โดยโหนดเซนเซอร์จะทำการตรวจวัดค่า T_z นี้ในทุก ๆ ช่วงเวลา การซึกตัวอย่าง และ T_{sa} จะถูกคำนวณใหม่ทุก ๆ ครั้งที่ตัวควบคุมได้รับข้อมูลใหม่จากโหนดเซนเซอร์ จากสมการที่ (3-1) กำหนดให้ผลกระทบจากผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ต่อแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้องมีคุณลักษณะเช่นเดียวกัน และกำหนดให้ผลกระทบจากผนังห้องทางทิศเหนือและทิศใต้ต่อแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้องมีคุณลักษณะเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ สมมติให้มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้องที่เกิดจากคน หลอดไฟ และคอมพิวเตอร์ กำหนดให้ในห้องมีคนทำงานสองคนซึ่งจะให้โหลดเท่ากับ 150 วัตต์ หลอดไฟสองดวงให้โหลดเท่ากับ 50 วัตต์ และคอมพิวเตอร์สองเครื่องให้โหลดเท่ากับ 120 วัตต์ ดังนั้นจะมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้องให้โหลดโดยรวมเท่ากับ 320 วัตต์ (หรือ $q(t)$) การกำหนดข้างต้นอ้างอิงจากงานวิจัยใน [7] และ [49] สำหรับพารามิเตอร์ทั้งหมดที่แสดงในสมการที่ (3-1) และค่าที่กำหนดใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังตารางที่ 3-1

ตาราง 3-1 พารามิเตอร์และค่าที่กำหนดให้แก่ระบบควบคุม

พารามิเตอร์ (หน่วย)	สัญลักษณ์	ค่ากำหนด
ความจุความร้อน ($J/^\circ C$)	H_a	89,036.7 [7]
ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)	ρ_a	1.25 [7]
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($J/kg \ ^\circ C$)	C_a	1,005 [7]
ปริมาตรของห้อง (m^3)	V_z	70.875
อัตราไหลลมจ่าย (m^3/s)	F_{sa}	0.0172 [7]
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของหลังคา ($W/m^2 \ ^\circ C$)	U_{Roof}	1 [49]
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ($W/m^2 \ ^\circ C$)	U_{Wall1}	2 [49]
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางทิศเหนือและทิศใต้ ($W/m^2 \ ^\circ C$)	U_{Wall2}	2 [49]
พื้นที่ของหลังคา (m^2)	A_{Roof}	15.75
พื้นที่ของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก (m^2)	A_{Wall1}	15.75
พื้นที่ของผนังห้องทางทิศเหนือและทิศใต้ (m^2)	A_{Wall2}	20.25
อุณหภูมิของหลังคา ($^\circ C$)	T_{Roof}	10
อุณหภูมิของผนังห้องทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ($^\circ C$)	T_{Wall1}	10
อุณหภูมิของผนังห้องทางทิศเหนือและทิศใต้ ($^\circ C$)	T_{Wall2}	10
อุณหภูมิลมจ่ายที่ป้อนโดยแอดจูสเตอร์ ($^\circ C$)	T_{sa}	-
อุณหภูมิภายในบริเวณห้อง ($^\circ C$)	T_z	-
กำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง (W)	$q(t)$	320 [7]
อุณหภูมิที่ต้องการ ($^\circ C$)	-	21
อุณหภูมิภายในบริเวณห้องเริ่มต้น ที่เวลา 0 วินาที ($^\circ C$)	$T_z(0)$	10
อัตราขยายเชิงสัดส่วน	K_p	6
อัตราขยายเชิงอินทิกรัล	K_I	0.05
อัตราขยายเชิงอนุพันธ์	K_D	55

หมายเหตุ: กำหนดให้ $H_a = C_a \rho_a V_z$ [7] และห้องมีขนาดกว้าง 4.5 เมตร ยาว 3.5 เมตร และสูง 4.5 เมตร ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ของหลังคาและพื้นที่ของผนังห้องทั้งสี่ทิศ ดังแสดงไว้ในตาราง

3.2.2 ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์

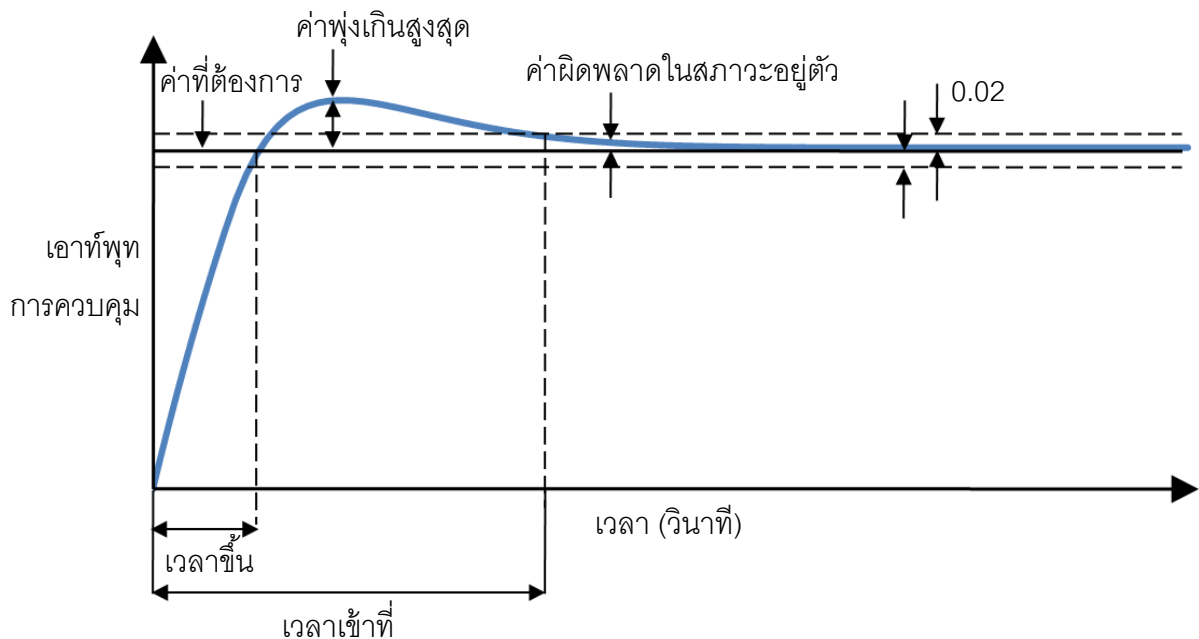
วิทยานิพนธ์นี้ใช้งานตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ (Proportional Integral and Derivative controller) หรือเรียกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีการทำงานไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง จึงถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบควบคุมด้วยเครื่องข่ายเซนเซอร์ไร้สายดังเช่นในงานวิจัยที่ [2, 6, 7, 12] ตัวควบคุมแบบพีไอดีทำหน้าที่คำนวณหาอินพุทของแอกชูเอเตอร์ที่เหมาะสมโดยอาศัยค่าผิดพลาดการควบคุม และสั่งการให้แอกชูเอเตอร์ นำอินพุทที่คำนวณได้ไปปรับให้แก่วงระบบทางกายภาพที่ต้องการควบคุม สำหรับขั้นตอนวิธีแบบพีไอดี (PID algorithm) แสดงด้วยสมการที่ (3-2) เมื่อ $U(t)$ คือ ผลลัพธ์หรือเอาต์พุทที่ได้จากตัวควบคุม (controller output) พารามิเตอร์ K_p คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain) พารามิเตอร์ K_I คือ อัตราขยายเชิงอินทิกรัล (integral gain) พารามิเตอร์ K_D คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain) และ $e(t)$ คือค่าผิดพลาดการควบคุม ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายและค่าที่โหนดเซนเซอร์วัดได้จากสภาพแวดล้อมที่สนใจ ดังได้อธิบายไว้ข้างต้น สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่กำหนดใช้งานแสดงดังตารางที่ 3-1 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ K_p K_I และ K_D ได้จากการทดสอบปรับจูน (PID tuning) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การควบคุมที่เหมาะสม

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) \cdot dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3-2)$$

การหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามด้วยวิธีการทดสอบปรับจูน อธิบายดังรายละเอียดต่อไปนี้ จากสมการที่ (3-2) เอาต์พุทที่ได้จากตัวควบคุม ณ เวลาปัจจุบัน เกิดจากองค์ประกอบของพารามิเตอร์ K_p K_I และ K_D ที่ทำหน้าที่ควบคุมค่าความผิดพลาดการควบคุมที่เกิดขึ้น โดยที่พารามิเตอร์ K_p ทำหน้าที่ควบคุมค่าความผิดพลาดการควบคุม ณ เวลาปัจจุบัน พารามิเตอร์ K_I ทำหน้าที่ควบคุมค่าความผิดพลาดการควบคุมสะสม และพารามิเตอร์ K_D ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดการควบคุม การปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวจะส่งผลกระทบต่อเอาต์พุทการควบคุม (control system output) ที่แตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 3-2 [50–53]

เพื่อประกอบความเข้าใจในการอธิบายตารางที่ 3-2 ผู้วิจัยอธิบายแทรกประเด็นเอาต์พุทการควบคุมที่เกิดจากการควบคุมระบบทางกายภาพที่สนใจดังนี้ จากทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม เอาต์พุทการควบคุมที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ทำการควบคุม แสดงดังผลตอบสนองของระบบควบคุมเชิงเวลา (control system response) ในภาพประกอบที่ 3-2 [54] โดยที่ เวลาขึ้น (rise

time) คือ ช่วงเวลาที่เอาต์พุทของการควบคุมเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 100% ของค่าเป้าหมาย ค่าพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) คือ ค่าสูงสุดของเอาต์พุทการควบคุม เวลาเข้าที่ (settling time) คือ ช่วงเวลาที่เอาต์พุทการควบคุมเข้าสู่ช่วงสัมบูรณ์ 2% จากค่าเป้าหมาย โดยเวลาก่อนช่วงเวลานี้ ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว (transient state) สำหรับเวลาหลังช่วงเวลานี้ ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (steady state) ได้สำเร็จ และท้ายสุด ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady-state error) คือ ค่าผิดพลาดการควบคุมในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะอยู่ตัว สำหรับการควบคุมระบบทางกายภาพใด ๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้เอาต์พุทการควบคุมเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด หรือได้เอาต์พุทการควบคุมที่ให้ค่าเวลาขึ้น ค่าพุ่งเกินสูงสุด เวลาเข้าที่ และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวต่ำที่สุดนั่นเอง



ภาพประกอบ 3-2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเชิงเวลา

ตาราง 3-2 ผลกระทบจากการปรับเพิ่มค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน ค่าอัตราขยายเชิงอินทิกรัล และค่าอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ต่อเอาต์พุทการควบคุม

พารามิเตอร์	เวลาขึ้น	ค่าพุ่งเกินสูงสุด	เวลาเข้าที่	ค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว
K_P	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง
K_I	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลงจนหมดไป
K_D	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จากตารางที่ 3-2 การปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ K_P สามารถช่วยลดเวลาขึ้น และค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวให้น้อยลง แต่ถ้าหากพารามิเตอร์ K_P มีค่ามากเกินไป ก็จะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดมากขึ้นได้ กรณีการปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ K_I สามารถช่วยลดเวลาขึ้นให้น้อยลง และสามารถช่วยลดค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวให้หมดไปได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าหากพารามิเตอร์ K_I มีค่ามากเกินไป ก็จะมีผลให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดมากขึ้น ทั้งยังทำให้เวลาเข้าที่เพิ่มมากขึ้น หรือทำให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้าขึ้นเอง สำหรับกรณีการปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ K_D สามารถช่วยลดค่าพุ่งเกินสูงสุดและเวลาเข้าที่ให้น้อยลง ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยทำการปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D โดยอาศัยตารางที่ 3-2 และทำการปรับจูนเองด้วยมือ (manual tuning) [50, 51] โดยจะเริ่มจากการกำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งสามมีค่าเป็นศูนย์ในตอนเริ่มต้น หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มค่า K_P ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผลตอบสนองของระบบควบคุมเกิดการแกว่ง (oscillate) และเมื่อผลตอบสนองของระบบควบคุมเกิดการแกว่ง ให้กำหนดใช้ค่า K_P เป็นครึ่งหนึ่งของค่าเดิม ในลำดับถัดไป ให้เริ่มปรับเพิ่มค่า K_I จนกระทั่งผลตอบสนองของระบบควบคุมเข้าใกล้ค่าที่ต้องการ และในลำดับท้ายสุด ทำการปรับเพิ่มค่า K_D เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเข้าใกล้ค่าที่ต้องการอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น สำหรับตัวอย่างวิธีการปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D ดังอธิบายนี้ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากบทความที่ [51, 52] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีการปรับจูนเองด้วยมือมีข้อจำกัดคือ ใช้เวลานานและต้องอาศัยความละเอียดของผู้ปรับจูน จากการศึกษาพบว่า ยังมีวิธีการปรับจูนที่ได้รับความนิยมมากกว่าวิธีการนี้ ตัวอย่างเช่น วิธีการปรับจูนแบบซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols) [50, 55] ซึ่งเป็นวิธีการปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อปรับค่าอัตราขยาย เชิงสัดส่วน เวลาอินทิกรัล และเวลาอนุพันธ์ วิธีการปรับจูนดังกล่าวนี้มีข้อดีคือ ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการปรับจูนด้วยมือ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวไม่ได้ช่วยให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เหมาะสมที่สุด พารามิเตอร์ที่ได้เป็นเพียงค่าเริ่มต้นสำหรับการปรับค่าแบบละเอียดต่อไป

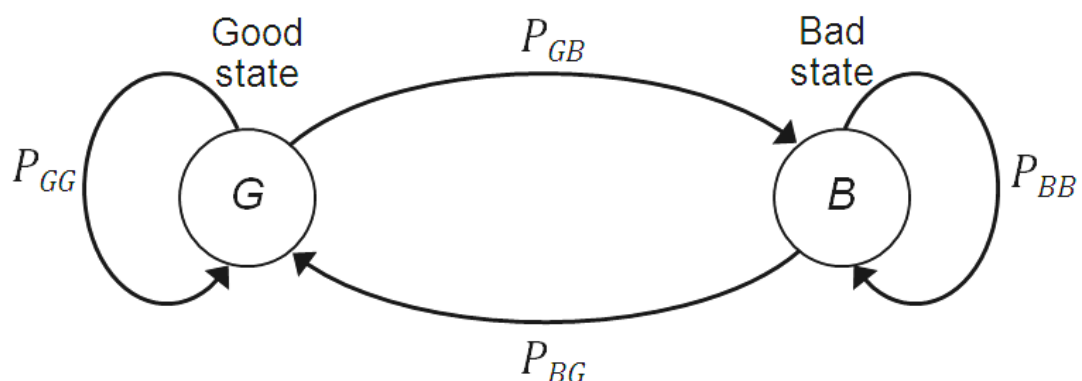
ในงานวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้แอกชูเอเตอร์เชื่อมต่อกับตัวควบคุม ตัวควบคุมทำหน้าที่คำนวณหาค่า $U(t)$ ซึ่งในที่นี้หมายถึงค่าอุณหภูมิลมจ่าย ตัวควบคุมจะส่งต่อค่าอุณหภูมิดังกล่าวนี้ไปยังแอกชูเอเตอร์ เพื่อให้แอกชูเอเตอร์ตรวจสอบอีกครั้งว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่แอกชูเอเตอร์สามารถทำงานได้หรือไม่ ซึ่งในที่นี้คือค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดที่แอกชูเอเตอร์สามารถทำงานได้โดยจะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ที่ใช้งาน (ตัวทำความร้อน หรือตัวทำความเย็น) ถ้าค่าอุณหภูมิลมจ่ายที่ได้อยู่ในช่วงที่แอกชูเอเตอร์สามารถทำงานได้ แอกชูเอเตอร์จะเป่าลมที่อุณหภูมิ T_{sa} ให้กับห้อง แต่ถ้าหากค่าอุณหภูมิลมจ่ายที่ได้อยู่นอกช่วงที่แอกชูเอเตอร์สามารถทำงานได้ แอกชูเอเตอร์

จะเป่าลมให้กับห้องด้วยค่าอุณหภูมิสูงสุดหรือต่ำสุดที่กำหนด นอกจากนี้ กำหนดให้ตัวควบคุมคำนวณค่า $U(t)$ ใหม่ก็ต่อเมื่อตัวควบคุมได้รับข้อมูลใหม่จากโหนดปลายทาง ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าผิดพลาดการควบคุมและคำนวณค่า $U(t)$ ครั้งใหม่ได้ ดังนั้นถ้าตัวควบคุมไม่ได้รับข้อมูลใหม่จากโหนดปลายทาง โหนดแอกชูเอเตอร์จะยังคงป้อนอินพุทให้แก่ระบบด้วยค่าเดิมที่คำนวณได้จากครั้งล่าสุด โดยกระบวนการนี้เรียกว่า zero-order hold [56]

3.3 แบบจำลองทางด้านการสื่อสาร

3.3.1 แบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ต (packet loss model)

เพื่อศึกษาประเด็นการสูญหายของแพ็กเก็ตส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางและการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารอย่างไร ดังจะนำเสนอรายละเอียดในบทถัดไป ผู้วิจัยได้เพิ่มแบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ตลงไปในกรจำลองการทำงาน แบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ตที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ คือ Gilbert–Elliott (GE) error model แบบจำลองนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อจำลองแบบอย่างการสูญหายของแพ็กเก็ตเป็นช่วง ๆ (burst loss pattern) การสูญหายของแพ็กเก็ตลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นปกติในระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะการสื่อสารในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ผลกระทบจากการแพร่กระจายสัญญาณหลายเส้นทาง (multipath propagation) การแทรกสอดของสัญญาณ (interference) การจางหายของสัญญาณ (fading) การสูญเสียในเส้นทาง (path loss) สัญญาณรบกวน (noise) และการเคลื่อนที่ของคนหรือวัตถุ เป็นต้น [57–59] จะส่งผลให้เกิดการสูญหายของแพ็กเก็ตระหว่างการสื่อสาร และจะส่งผลให้สมรรถนะของระบบควบคุมแบบวงปิดต่ำลง [12]



ภาพประกอบ 3-3 แบบจำลอง Gilbert–Elliott [12, 56]

แบบจำลอง GE อาศัยหลักการพื้นฐานของ two-state Markov chain เพื่อจำลองลักษณะการสูญหายของแพ็กเก็ต โดยจะแบ่งการทำงานออกเป็นสองสถานะคือ สถานะที่ไม่มีการสูญหายของแพ็กเก็ต (error-free state) หรือเรียกว่า good state (G) และสถานะที่มีการสูญหายของแพ็กเก็ตเกิดขึ้น (error state) หรือเรียกว่า bad state (B) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-3 ในสถานะ good state การสูญหายของแพ็กเก็ตเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นที่ต่ำ กำหนดให้ความน่าจะเป็นนี้แทนด้วย P_G ในขณะที่ในสถานะ bad state การสูญหายของแพ็กเก็ตเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นที่สูง กำหนดให้ความน่าจะเป็นนี้แทนด้วย P_B สำหรับความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก good state ไปเป็น bad state กำหนดให้แทนด้วย P_{GB} และความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก bad state ไปเป็น good state กำหนดให้แทนด้วย P_{BG} กำหนดให้เมตริกซ์ของความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (state transition probability matrix) แสดงดังสมการที่ (3-3) เมื่อ P_{GG} และ P_{BB} คือความน่าจะเป็นของการคงอยู่ในสถานะ good state และ bad state ตามลำดับ

การกำหนดค่า P_{GB} และ P_{BG} สามารถประมาณได้จากสมการที่ (3-4) และ (3-5) ตามลำดับ [58–61] เมื่อ T_G และ T_B คือช่วงเวลาเฉลี่ยที่ดำรงอยู่ใน good state และช่วงเวลาเฉลี่ยที่ดำรงอยู่ใน bad state ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาที่อยู่ในทั้งสองสถานะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential distribution) [59, 60] จากความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (state transition probability) จะสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นในสถานะอยู่ตัวของการดำรงอยู่ใน good state (steady-state probability of being in good state) และความน่าจะเป็นในสถานะอยู่ตัวของการดำรงอยู่ใน bad state (steady-state probability of being in bad state) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ π_G และ π_B ดังสมการที่ (3-6) และ (3-7) ตามลำดับ ดังนั้น ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ย (average packet loss probability) ที่ได้จากแบบจำลอง GE มีค่าเท่ากับ P_{AVG} แสดงดังสมการที่ (3-8)

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - P_{GB} & P_{GB} \\ P_{BG} & 1 - P_{BG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{GG} & P_{GB} \\ P_{BG} & P_{BB} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$P_{GB} = 1/T_G \quad (3-4)$$

$$P_{BG} = 1/T_B \quad (3-5)$$

$$\pi_G = \frac{P_{BG}}{P_{BG} + P_{GB}} \quad (3-6)$$

$$\pi_B = \frac{P_{GB}}{P_{BG} + P_{GB}} \quad (3-7)$$

$$P_{AVG} = P_G \pi_G + P_B \pi_B \quad (3-8)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ P_{GG} , P_{GB} , P_{BG} , P_{BB} และ P_G มีค่าเท่ากับ 0.99, 0.01, 0.01, 0.99 และ 0.00 ตามลำดับ [12] โดยที่ T_G และ T_B มีค่าเท่ากับ 100 วินาที ในการจำลองการทำงาน ผู้วิจัยทำการปรับเปลี่ยนค่า P_B จาก 0.00 ถึง 0.98 [12] เพิ่มขึ้นทีละ 0.245 (หรือเท่ากับ 0.00, 0.245, 0.49, 0.735 และ 0.98) ดังนั้นจะได้ P_{AVG} ทั้งหมด 5 ระดับที่แตกต่างกันไว้ใช้งาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00, 0.1225, 0.245, 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ สำหรับการกำหนดความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะถูกอธิบายอีกครั้งในบทที่ 5 การจำลองการทำงาน

จากรายละเอียดที่นำเสนอข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้งานแบบจำลอง GE ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน (simulation time) จะเกิดช่วงเวลาของสถานะ good state และ bad state สลับกันไป โดยช่วงเวลาของสถานะ good state และ bad state จะมีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากผลของการสุ่มตามลักษณะการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่กำหนด กรณีที่ช่องสัญญาณอยู่ในช่วงเวลาของสถานะ good state การสูญหายของแพ็กเก็ตเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ P_G ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญหายของแพ็กเก็ตเกิดขึ้นในทุกช่วงของสถานะ good state สำหรับกรณีที่ช่องสัญญาณอยู่ในช่วงเวลาของสถานะ bad state การสูญหายของแพ็กเก็ตเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ P_B ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าดังอธิบายไว้ข้างต้น จากลักษณะเหตุการณ์ที่อธิบายนี้ จะทำให้เกิดการสูญหายของแพ็กเก็ตแบบเป็นช่วง ๆ โดยมีความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ยเท่ากับ P_{AVG}

3.3.2 แบบจำลองพลังงาน (energy model)

แบบจำลองพลังงาน (energy model) ถูกใช้เพื่อคำนวณค่าพลังงานที่โหนดใช้ไป (energy consumption) ในระหว่างการทำงานแบบจำลองพลังงานที่ถูกพัฒนาไว้ในโปรแกรม NS2 แสดงถึงระดับการใช้พลังงานของโหนดในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ในเครือข่าย ในการจำลองการทำงาน ผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดค่าพลังงานเริ่มต้น (initial energy) ซึ่งมีหน่วยเป็นจูลให้กับทุก ๆ

โหนดในเครือข่าย โดยปกติแล้วการกำหนดพลังงานเริ่มต้นสามารถอ้างอิงได้จากพลังงานของแบตเตอรี่ที่ใช้งานจริงกับตัวโหนดเซนเซอร์ ตัวอย่างเช่นในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนดให้พลังงานเริ่มต้นของโหนดมีค่าเท่ากับ 13,000 จูล อ้างอิงจากงานวิจัยใน [62] ซึ่งได้จากการคำนวณและประมาณค่าจากแบตเตอรี่ขนาด AA ยี่ห้อ Energizer เป็นต้น ดังนั้นเมื่อโหนดทำกิจกรรมในเครือข่ายระหว่างการจำลองการทำงาน ค่าพลังงานเริ่มต้นที่กำหนดไว้ก็จะลดน้อยลงตามปริมาณพลังงานที่โหนดใช้ไป

ในการใช้งานแบบจำลองพลังงาน ผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดค่ากำลังที่โหนดใช้ในการทำกิจกรรมในเครือข่าย โดยการกำหนดกำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล (*transmit power*) กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล (*receive power*) กำลังที่ใช้เมื่ออยู่ในสถานะอยู่นิ่ง (*idle power*) กำลังที่ใช้เมื่ออยู่ในสถานะหลับ (*sleep power*) และกำลังที่ใช้เมื่อเปลี่ยนจากสถานะหลับสู่สถานะอยู่นิ่ง หรือจากสถานะอยู่นิ่งสู่สถานะหลับ (*transition power*) ดังนั้น พลังงานที่โหนดใช้ไปในการส่งข้อมูล (E_t) จะเท่ากับกำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล (*txPower*) ในหน่วยวัตต์คูณด้วยเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (*txTime*) ในหน่วยวินาที พลังงานที่โหนดใช้ไปในการรับข้อมูล (E_r) จะเท่ากับกำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล (*rxPower*) ในหน่วยวัตต์คูณด้วยเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูล (*rxTime*) ในหน่วยวินาที พลังงานที่โหนดใช้ไปในสถานะอยู่นิ่ง (E_{idle}) จะเท่ากับกำลังที่ใช้เมื่ออยู่ในสถานะอยู่นิ่ง (*idlePower*) ในหน่วยวัตต์คูณด้วยเวลาที่โหนดอยู่ในสถานะอยู่นิ่ง (*idleTime*) ในหน่วยวินาที พลังงานที่โหนดใช้ไปในสถานะหลับ (E_{sleep}) จะเท่ากับกำลังที่ใช้เมื่ออยู่ในสถานะหลับ (*sleepPower*) ในหน่วยวัตต์คูณด้วยเวลาที่โหนดอยู่ในสถานะหลับ (*sleepTime*) ในหน่วยวินาที และพลังงานที่โหนดใช้ไปในการเปลี่ยนจากสถานะหลับสู่สถานะอยู่นิ่ง หรือจากสถานะอยู่นิ่งสู่สถานะหลับ ($E_{transition}$) จะเท่ากับกำลังที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (*transitionPower*) ในหน่วยวัตต์คูณด้วยเวลาที่โหนดใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (*transitionTime*) ในหน่วยวินาที แสดงดังสมการที่ (3-9) (3-10) (3-11) (3-12) และ (3-13) ตามลำดับ ดังนั้นพลังงานที่โหนดใช้ไป ($E_{consume}$) จึงมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานข้างต้นแสดงดังสมการที่ (3-14)

$$E_t = txPower \times txTime \quad (3-9)$$

$$E_r = rxPower \times rxTime \quad (3-10)$$

$$E_{idle} = idlePower \times idleTime \quad (3-11)$$

$$E_{sleep} = sleepPower \times sleepTime \quad (3-12)$$

$$E_{transition} = transitionPower \times transitionTime \quad (3-13)$$

$$E_{consume} = E_t + E_r + E_{idle} + E_{sleep} + E_{transition} \quad (3-14)$$

$$txTime \text{ or } rxTime = (Packet_Size \times 8) / Data_rate \quad (3-15)$$

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยไม่พิจารณากรณีที่โหนดอยู่ในสภาวะหลับ ดังนั้นโหนดจึงไม่มีการใช้พลังงานในขณะหลับ รวมทั้งพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนจากสภาวะหลับสู่สภาวะอยู่นิ่ง หรือจากสภาวะอยู่นิ่งสู่สภาวะหลับ นอกจากนี้ ผู้วิจัยกำหนดค่า $txPower$ ค่า $rxPower$ และค่า $idlePower$ จากโมดูลสื่อสารที่ใช้งานจริงโดยอ้างอิงจากโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver ที่ระดับกำลังส่งเท่ากับ -25 dBm [15, 63] สาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกใช้งานที่ระดับกำลังส่งนี้เนื่องจากเป็นระดับกำลังส่งน้อยสุดที่สามารถใช้งานได้ (minimum available power level) โดยโหนดจะใช้พลังงานต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระดับกำลังส่งที่มากกว่า ในขณะที่ยังคงสามารถรักษาขอบเขตการสื่อสารในระยะหนึ่งฮอปหรือระยะจากห้องหนึ่งถึงอีกห้องถัดไปไว้ได้ [63] ขอบเขตการส่งสัญญาณไกลสุดระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับที่ระดับกำลังส่ง -25 dBm นี้มีค่าเท่ากับ 9.25 เมตร ดังจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.3 ถัดไป และจากการกำหนดให้ห้องมีขนาดกว้าง 4.5 เมตร ยาว 3.5 เมตร และสูง 4.5 เมตร ระยะทางไกลสุดของสองห้องที่อยู่ติดกันมีค่าน้อยกว่าขอบเขตการส่งสัญญาณไกลสุด สำหรับค่า $txTime$ และค่า $rxTime$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-15) [64–67] เมื่อกำหนดให้ $Packet_Size$ และ $Data_rate$ คือขนาดแพ็กเก็ตใด ๆ ในหน่วยไบต์ และอัตราการส่งข้อมูลในหน่วยกิโลบิตต่อวินาที ตามลำดับ โดยที่ขนาดของแพ็กเก็ตขึ้นอยู่กับชนิดของแพ็กเก็ตที่โหนดทำการส่งหรือรับ ณ เวลานั้น ๆ และอัตราการส่งข้อมูลกำหนดตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ย่านความถี่ในการใช้งาน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 250 กิโลบิตต่อวินาที

3.3.3 แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ (radio propagation model)

แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ ถูกใช้สำหรับอธิบายลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุของโหมดเซนเซอร์ในสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน อาศัยแบบจำลองดังกล่าวนี้ โหนดสามารถคำนวณค่ากำลังหรือความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับได้ (received signal strength) ที่ระยะทางใด ๆ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุที่เรียกว่า log-distance path-loss model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้เพื่ออธิบายลักษณะการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุในกรณีสภาพแวดล้อมใช้งานทั้งแบบนอกอาคารและภายในอาคาร [63] แสดงดังสมการที่ (3-16)

$$PL(d) = PL(d_0) - 10\eta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3-16)$$

$$PL(d_0) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2 L} \right) \quad (3-17)$$

เมื่อ $PL(d)$ คือ กำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้ที่ระยะทาง d ในหน่วยเดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) ค่า $PL(d_0)$ คือกำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้ที่ระยะทางอ้างอิง d_0 และค่า η คือ อัตราการลดทอน (path loss exponent) โดยที่การกำหนดค่าอัตราการลดทอนนี้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน ในทางปฏิบัติ กำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้ที่ระยะทางใด ๆ เกิดจากการรวมกันหรือหักล้างกันของสัญญาณวิทยุที่มาถึงตัวรับมากกว่าหนึ่งเส้นทาง (multi-path) ทั้งนี้เนื่องจากผลของการสะท้อน (reflection) การเลี้ยวเบน (diffraction) และการกระจายออก (scattering) ของสัญญาณที่เจอสิ่งกีดขวาง หรือวัตถุต่าง ๆ เช่น อาคาร กำแพง ต้นไม้ การเคลื่อนที่ของคน หรือยานพาหนะ เป็นต้น ดังนั้นที่ระยะทางใด ๆ ค่ากำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้จึงมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะสภาพแวดล้อมใช้งานนั้น ๆ ด้วยแบบจำลองที่นำเสนอข้างต้น กำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้จะมีค่าลดลงเร็วขึ้นหากอัตราการลดทอนมีค่ามากขึ้น

ค่ากำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้ที่ระยะทางอ้างอิง หรือ $PL(d_0)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-17) ซึ่งเป็นสมการแบบจำลองการสูญเสียในอวกาศว่าง (free space path loss model) โดยที่กำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้จะลดลงตามฟังก์ชันของระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับแต่เพียงปัจจัยเดียว โดยไม่คำนึงผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณวิทยุเมื่อพบกับสิ่งกีดขวาง จากสมการที่ (3-17) กำหนดให้ P_t คือ กำลังของสัญญาณด้านส่งในหน่วย

มิลลิวัตต์ G_t และ G_r คือ อัตราการขยายของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ตามลำดับ λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณวิทยุในหน่วยเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความเร็วแสง ต่อค่าความถี่ของสัญญาณวิทยุ โดยค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที และค่าความถี่ของสัญญาณวิทยุมีค่าเท่ากับ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับ L คือการสูญเสียของระบบ (system loss) โดยในตัวจำลอง NS2 กำหนดให้ d_0 G_t G_r และ L มีค่าเท่ากับ 1

ในการจำลองการทำงาน ผู้วิจัยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้แก่สมการที่นำเสนอข้างต้นโดยการอ้างอิงจากโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver ที่ใช้งานจริงกับตัวโหนดเซนเซอร์ จากโมดูลสื่อสารนี้ ความไวของตัวรับ (receiver sensitivity) หรือกำลังเฉลี่ยต่ำสุดที่ตัวรับสามารถรับสัญญาณวิทยุได้โดยให้อัตราความผิดพลาดบิต (bit-error rate) ไม่เกินค่าที่กำหนด มีค่าเท่ากับ -95 dBm [15] ค่าความไวของตัวรับนี้ถูกกำหนดให้เท่ากับค่า RX Threshold (receive threshold) ในโปรแกรม NS2 [62] จากสมการที่ (3-17) ผู้วิจัยกำหนดให้ P_t มีค่าเท่ากับ -25 dBm [15, 63] ดังนั้นจะได้ $PL(d_0)$ มีค่าเท่ากับ -65.046 dBm และจากสมการที่ (3-16) เมื่อกำหนดให้อัตราการลดทอน η มีค่าเท่ากับ 3.1 ซึ่งอ้างอิงจากการทดลองจริงจากการใช้งานโมดูลสื่อสาร CC2420 ในสภาพแวดล้อมแบบภายในอาคารในงานวิจัยที่ [63] และกำหนดให้ $PL(d)$ มีค่าเท่ากับค่าความไวของตัวรับ ดังนั้น จะได้ระยะทางไกลสุดระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับที่โหนดยังคงสามารถสื่อสารกันได้โดยให้อัตราความผิดพลาดบิตอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (หรือ d_{max}) มีค่าเท่ากับ 9.25 เมตร ซึ่งระยะทางนี้ถูกกำหนดเป็นขอบเขตการส่งสัญญาณวิทยุไกลสุดของโหนด

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังกำหนดให้ระยะทางไกลสุดที่โหนดยังคงได้ยินสัญญาณวิทยุจากโหนดตัวส่ง แต่ไม่สามารถนำสัญญาณนั้นไปใช้ประโยชน์ต่อได้ (เรียกว่า carrier sensing range) เนื่องจากอัตราความผิดพลาดบิตสูง มีค่าเป็นสองเท่าของค่าระยะทางไกลสุดที่โหนดยังคงสามารถสื่อสารกันได้ โดยการกำหนดดังกล่าวนี้อ้างอิงจากการทดลองจริงในงานวิจัยที่ [68] ดังนั้นระยะทางดังกล่าวจึงมีค่าเท่ากับ 18.50 เมตร ซึ่งถูกกำหนดเป็นขอบเขตการได้ยินสัญญาณวิทยุไกลสุดของโหนด และเมื่อแทนค่าระยะทาง 18.50 เมตร กลับลงไปในสมการที่ (3-16) จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณวิทยุที่โหนดรับได้ที่ระยะทางดังกล่าวนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -104.328 dBm โดยที่ค่านี้ถูกกำหนดให้เท่ากับค่า CS Threshold (carrier sense threshold) ในโปรแกรม NS2

บทที่ 4

กลไกการจัดเส้นทางตามผลตอบสนองของระบบควบคุมสำหรับ เครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

4.1 บทนำ

ในบทนี้ เสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ ไร้สาย ชื่อ RMCSR (Routing Mechanisms based on Control System Response) โดยเป้าหมายหลักในการออกแบบโพรโทคอล RMCSR เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมได้ และสามารถรักษาสมรรถนะทางด้านการสื่อสารและสมรรถนะทางด้านการควบคุมไว้พร้อมกัน ดังนำเสนอไว้ในบทที่ 1 หัวข้อโจทย์วิจัยและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

โพรโทคอล RMCSR ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่มีการพิจารณาการออกแบบร่วมกันระหว่างมุมมองทางด้านการสื่อสารและมุมมองทางด้านการควบคุม โดยที่ทั้งคุณลักษณะของการสื่อสารแบบไร้สายและสถานะของระบบควบคุมถูกพิจารณาในกระบวนการเลือกเส้นทาง สำหรับความใหม่ของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลการจัดเส้นทางในงานวิจัยอื่น ๆ คือ โพรโทคอล RMCSR ใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมเพื่อส่ง-รับข้อมูลโดยการพิจารณาจาก ก) ค่าผิดพลาดการควบคุม (control system error) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สถานะของระบบควบคุม (control system states) หรือผลลัพธ์จากการควบคุม ข) ความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ต (packet transmission latency) บนการเชื่อมต่อหรือลิงค์ (link) ไร้สายระหว่างโหนดตัวส่งและตัวรับ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้สถานะของระบบสื่อสารในกรณีความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ค) ระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง (end-to-end delay threshold) ซึ่งเป็นระดับกันความล่าช้าของการส่งข้อมูลจากต้นทางถึงปลายทางที่ระบบควบคุมสามารถยอมรับได้ และ ง) การใช้พลังงานของโหนด (energy consumption) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้สถานะของระบบสื่อสารในกรณีปริมาณงานที่เกิดขึ้นในเครือข่าย

โพรโทคอล RMCSR สามารถเลือกเส้นทางอย่างอัตโนมัติ และสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามสถานะของระบบควบคุม ถ้าระบบควบคุมที่สนใจอยู่ในสถานะชั่วคราว (transient state) โพรโทคอล RMCSR จะเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาจากความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตในคู่ลิงค์สื่อสารเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง และถ้าระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (steady state) โพรโทคอล RMCSR จะเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาจากการใช้พลังงานของโหนดเป็นตัววัดในการเลือก

เส้นทาง ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตในคูลิงคี่สื่อสารเป็นตัวบ่งชี้ความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลในเส้นทาง ในขณะที่การใช้พลังงานของโหนดบ่งชี้ปริมาณงานในเส้นทาง โดยโพรโทคอล RMCSR จะเลือกเส้นทางที่ให้ค่าความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตในคูลิงคี่สื่อสารต่ำสุด ในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในช่วงสภาวะชั่วคราว ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มความสำเร็จในการส่ง-รับข้อมูลในเครือข่าย และช่วยให้ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วขึ้น สำหรับในช่วงสภาวะอยู่ตัว โพรโทคอล RMCSR จะเลือกเส้นทางที่โหนดใช้พลังงานมากที่สุด แต่มีพลังงานเหลืออยู่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโหนดที่ใช้พลังงานมากสุดในเส้นทางทางเลือกอื่น ๆ วิธีการนี้จะเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายให้ยาวนานยิ่งขึ้น นอกจากนี้ เส้นทางที่ถูกเลือกสำหรับส่ง-รับข้อมูลเป็นเส้นทางที่ให้ค่าความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางอยู่ในช่วงที่ระบบควบคุมสามารถยอมรับได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า โพรโทคอล RMCSR สามารถรักษาสมรรถนะของระบบควบคุมและระบบสื่อสารไว้ได้ในคราวเดียวกันจากวิธีการที่นำเสนอนี้ สำหรับรายละเอียดของโพรโทคอล RMCSR ในเชิงลึกถูกอธิบายไว้ในตัวบท

เนื้อหาในบทที่ 4 ประกอบด้วย หัวข้อที่ 4.2 สรุปแนวคิดและการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV ซึ่งเป็นโพรโทคอลพื้นฐานในการพัฒนาโพรโทคอล RMCSR ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ หัวข้อที่ 4.3 เสนอแนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR สำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายกรณีการประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุม โดยผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดของแนวคิดการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทาง แนวคิดการออกแบบขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง และแนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง หัวข้อที่ 4.4 อธิบายรายละเอียดกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR และท้ายสุด หัวข้อที่ 4.5 สรุปผังงานกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR

4.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)

ก่อนที่จะอธิบายแนวคิดและกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR ผู้วิจัยอธิบายแนวคิดและการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV โดยสรุปในหัวข้อนี้เป็นลำดับแรก ทั้งนี้เนื่องจากโพรโทคอล AODV เป็นพื้นฐานในการพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ดังได้เกริ่นนำไว้ข้างต้น โพรโทคอล AODV [14] เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive หรือ on-demand [69] โดยโหนดจะไม่มีเตรียมเส้นทางสื่อสารไว้ล่วงหน้า กล่าวคือ โหนดจะทำการจัดเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลก็ต่อเมื่อมีข้อมูลที่ต้องการจะส่งเท่านั้น ดังนั้นข้อดีของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่มีการทำงานในลักษณะนี้คือ สามารถช่วยลดจำนวน

การให้สัญญาณโอเวอร์เฮด (overhead) ในเครือข่ายให้น้อยลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ proactive [69] เช่น โพรโทคอล DSDV (Destination-Sequence Distance-Vector) [70] ซึ่งจะมีการเตรียมเส้นทางไว้ให้แล้วเสร็จล่วงหน้าก่อนที่จะมีการส่งข้อมูลจริง โดยโหนดในเครือข่ายจะทำการรักษาตารางเส้นทางให้ทันสมัยอยู่เสมอด้วยการแพร่กระจายสัญญาณเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลเส้นทางระหว่างกันเป็นช่วง ๆ อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการจัดเส้นทางแบบ reactive สามารถทำให้เกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูลได้ เนื่องจากการรบกวนกระบวนการค้นหาเส้นทางให้แล้วเสร็จก่อนจะได้ส่งข้อมูล สำหรับข้อดีอีกประการหนึ่งของโพรโทคอล AODV คือการใช้ประโยชน์จาก destination sequence number ในกระบวนการจัดเส้นทางเพื่อรักษาเส้นทางให้ทันสมัยอยู่เสมอและป้องกันการเกิดการวนลูป (routing loop) ในขั้นตอนการส่งข้อมูล [14]

โพรโทคอล AODV ค้นหาเส้นทาง เลือกเส้นทาง และซ่อมแซมเส้นทางโดยอาศัยข้อความ RREQ (route request message) ข้อความ RREP (route reply message) และข้อความ RRER (route error message) เส้นทางที่เร็วที่สุด (fastest route) หรือสั้นที่สุด/หรือมีจำนวนฮอปน้อยสุด (shortest route หรือ minimum hop-count) ที่ข้อความ RREQ และ RREP ถูกส่งไปในเครือข่ายจะถูกเลือกใช้สำหรับส่ง-รับข้อมูล ในกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV เมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง และยังไม่มียังไม่มีข้อมูลเส้นทางในตารางเส้นทางของโหนดเอง หรืออาจเคยมีข้อมูลเส้นทางแต่เส้นทางนั้น ๆ หหมดอายุการใช้งานไปแล้ว โหนดต้นทางจะเริ่มกระบวนการจัดเส้นทางโดยการส่งข้อความ RREQ ไปยังโหนดข้างเคียงทุก ๆ โหนดในเครือข่ายโดยใช้วิธีการแพร่กระจาย (broadcast) โหนดข้างเคียงที่รับข้อความดังกล่าวจะทำหน้าที่ส่งต่อข้อความ กระทั่งข้อความ RREQ ถูกส่งถึงโหนดปลายทาง ในระหว่างการส่งข้อความ RREQ โหนดระหว่างทางทุกโหนดที่รับข้อความ RREQ ลำดับแรกเข้ามาจะทำการจดจำไว้ว่าได้รับข้อความ RREQ นั้นมาจากโหนดใด วิธีการนี้เป็นการกำหนด reverse pointer เพื่อจดจำเส้นทางไว้สำหรับส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางในขั้นตอนถัดไป นอกจากนี้ในการจัดเส้นทางครั้งใด ๆ โหนดระหว่างทางที่เคยรับข้อความ RREQ แล้ว และได้รับข้อความ RREQ ซ้ำ (duplicate RREQ) จากโหนดข้างเคียงอีก โหนดจะไม่ทำการแพร่กระจายข้อความต่อหรือละทิ้ง (discard) ข้อความนั้น โดยการเปรียบเทียบหมายเลข broadcast ID ที่ฝากมากับข้อความ RREQ ในครั้งปัจจุบันกับหมายเลข broadcast ID ที่ได้บันทึกไว้จากการรับข้อความ RREQ ในครั้งก่อนหน้า เมื่อโหนดปลายทางรับข้อความ RREQ ลำดับแรกเข้ามาจะยืนยันเส้นทางโดยการส่งข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางโดยอาศัยข้อมูล reverse pointer ที่โหนดเก็บไว้ และในระหว่างส่งข้อความ RREP โหนดระหว่างทางจะทำการกำหนด forward pointer เพื่อจดจำเส้นทางไว้สำหรับส่งข้อมูลไปยัง

โหนดปลายทาง ในขั้นตอนท้ายสุด เมื่อโหนดต้นทางรับข้อความ RREP โหนดต้นทางจะทำการส่งข้อมูลให้โหนดปลายทางตามเส้นทางที่รับข้อความ RREP เข้ามา โดยโหนดในเส้นทางจะส่งข้อมูลแบบฮอปต่อฮอปไปยังโหนดปลายทางโดยอาศัยข้อมูล forward pointer นำทาง

ในกระบวนการทำงานของโพรโทคอล AODV โหนดระหว่างทางใด ๆ สามารถตอบข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางได้ หากโหนดระหว่างทางนั้น ๆ มีข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการ โดยโหนดระหว่างทางจะทำการตอบข้อความ RREP เมื่อพบว่ามีค่าจำนวนฮอป (hop-count) ในตารางเส้นทางของโหนดเองไม่เท่ากับค่าอนันต์ (infinity) และค่า sequence number ของรายการโหนดปลายทางที่เก็บไว้มากกว่าหรือเท่ากับค่า sequence number ในข้อความ RREQ ที่โหนดระหว่างทางรับเข้ามา สำหรับการปรับปรุงตารางเส้นทางของโพรโทคอล AODV โหนดจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางเดิมจากเงื่อนไขดังนี้คือ โหนดรับข้อความการจัดเส้นทาง (RREQ และ RREP) ที่มีค่า sequence number สูงกว่าค่า destination sequence number ที่เก็บไว้ในตารางเส้นทางเดิม หรือโหนดรับข้อความการจัดเส้นทางที่ให้ค่า sequence number เท่ากันกับค่า destination sequence number ที่เก็บไว้ในตารางเส้นทางเดิม และจำนวนฮอปที่ฝากมากับข้อความการจัดเส้นทางน้อยกว่าค่าจำนวนฮอปที่เก็บไว้ในตารางเส้นทางเดิม

ในระหว่างการส่งข้อมูลตามเส้นทางที่ถูกเลือกตั้งอธิบายจากกระบวนการข้างต้น ถ้าโหนดในเส้นทางมีการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตการสื่อสาร หหมดพลังงาน ไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูล หรือไม่สามารถส่งข้อมูลระหว่างกันได้เนื่องจากเกิดการสูญหายของข้อมูลเกินจำนวนครั้งที่กำหนด เป็นต้น โพรโทคอล AODV จะเริ่มกระบวนการซ่อมแซมเส้นทาง โหนดที่ตรวจสอบได้ว่าไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางได้จะทำการสร้างข้อความ RRER และส่งข้อความ RRER กลับไปยังโหนดต้นทาง โดยในข้อความ RRER จะระบุหมายเลขโหนดปลายทางที่ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (destination IP addresses) รวมทั้งค่า destination sequence number ที่เพิ่มขึ้นจากค่า destination sequence number ล่าสุดของโหนดปลายทางนั้น ๆ เมื่อโหนดระหว่างทางในเส้นทางที่ทำการซ่อมแซมรับข้อความ RRER จะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางโดยการลบรายการเส้นทางของโหนดปลายทางที่ระบุไว้ทิ้ง โดยจะกำหนดให้จำนวนฮอปไปยังโหนดปลายทางนั้น ๆ เท่ากับค่าอนันต์ จากนั้นจะส่งต่อข้อความ RRER ไปยังโหนดต้นทาง เมื่อโหนดต้นทางรับข้อความ RRER จะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางใหม่ สำหรับรายละเอียดเชิงลึกในกระบวนการทำงานของโพรโทคอล AODV สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากบทความที่ [14] และ [71]

4.3 แนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR

แนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR แบ่งออกเป็นสามประเด็นใหญ่ คือ แนวคิดการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทาง แนวคิดการออกแบบขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง และแนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 แนวคิดการกำหนดตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR

การสูญหายของข้อมูลติด ๆ กันอย่างต่อเนื่อง การเกิดความล่าช้าในการส่ง-รับข้อมูลในเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายด้วยช่วงระยะเวลาที่ยาวนานเกินกว่าที่ระบบควบคุมจะยอมรับได้ และการที่โหนดเซนเซอร์หมดพลังงานจนไม่สามารถทำการวัดและส่งข้อมูล จะส่งผลให้ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ได้รับข้อมูลจากโหนดเซนเซอร์น้อยลงหรือไม่สามารถรับข้อมูลได้ และไม่สามารถจัดการกับสภาพแวดล้อมที่สนใจได้อย่างเหมาะสมและทันท่วงที ดังนั้น เพื่อรักษาสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุมไว้ การสูญหายของแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ จึงเป็นปัญหาการวิจัยหลักที่ควรได้รับการพิจารณาในการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย จากเหตุผลดังอธิบายนี้ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดโจทย์วิจัยที่สอดคล้องกับปัญหาการวิจัย ดังนำเสนอไว้ในบทที่ 1 คือ (ก) “มีวิธีการจัดเส้นทางการสื่อสารในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพอย่างไร ที่สามารถรักษาอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลและความล่าช้าในการส่งข้อมูล โหนดสามารถประหยัดพลังงาน และทำให้ระบบควบคุมแบบวงปิดสามารถบรรลุเป้าหมายการควบคุม” และ (ข) “มีวิธีการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทางอย่างไรให้เหมาะกับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย และสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามสถานะของระบบควบคุมอย่างอัตโนมัติ”

ดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3.2 การเปรียบเทียบตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ตัววัดในการเลือกเส้นทางคือ หน่วยวัดที่โพรโทคอลการจัดเส้นทางใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับส่ง-รับข้อมูล จากการสรุปการเลือกใช้ตัววัดในการเลือกเส้นทางของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 2-3 ถึง 2-4 พบว่า เฉพาะงานวิจัยใน [16, 33, 34, 36-38, 40] ที่กำหนดใช้ตัววัดการเลือกเส้นทางจากประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานงานของโหนดเซนเซอร์ ดังนั้น โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ

ในงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นอาจจะสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 ก่อนหน้า ในงานวิจัยที่ [36–38] ข้อมูลที่ได้จากการวัดหรือ traffic ชนิดใด ๆ ของโหนดต้นทางจะถูกส่งไปยังโหนดปลายทางตามเส้นทางที่ถูกเลือกจากตัววัดเพียงประเด็นเดียวเท่านั้น ซึ่งกำหนดโดยผู้ออกแบบโพรโทคอลล่วงหน้า โดยไม่สามารถปรับเปลี่ยนการเลือกใช้ตัววัดการเลือกเส้นทางได้อย่างอัตโนมัติว่า ณ เวลาใด หรือช่วงเวลาใด การส่งข้อมูลชนิดนั้น ๆ ควรให้ความสำคัญกับประเด็นความน่าเชื่อถือ ความล่าช้า พลังงานของโหนด หรือผสมผสานกัน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วในงานวิจัยข้างต้นไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมในการศึกษาวิจัย ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่าตัววัดการเลือกเส้นทางที่พิจารณาจากประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต หรือพลังงานของโหนดมีความสัมพันธ์หรือจำเป็นกับสถานะของระบบควบคุมที่ทำการควบคุมอย่างไร สำหรับงานวิจัยที่ [16, 33, 34, 40] โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ มีการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์เป็นตัววัดการเลือกเส้นทางในคราวเดียวกัน โดยเฉพาะในงานวิจัยที่ [16] ที่มีการกำหนดระดับกันความน่าเชื่อถือ (reliability threshold) และระดับกันความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต (latency threshold) เป็นเงื่อนไขเพิ่มเติมในการเลือกเส้นทาง อย่างไรก็ตาม ทั้งงานวิจัยใน [16, 33, 34, 40] เน้นการวิจัยที่กระบวนการสื่อสารทั้งในขั้นตอนการออกแบบและการทดสอบการทำงาน โดยไม่พิจารณาฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุม เช่น ตัวควบคุม แอคชูเอเตอร์ และระบบทางกายภาพที่สนใจ เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ ก่อนหน้า ดังนั้นจึงไม่สามารถประเมินได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร ระดับความน่าเชื่อถือและระดับความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตที่กำหนดใช้มีความเหมาะสม หรือจำเป็นเพียงใดกับระบบควบคุม ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้งานเพื่อการควบคุมได้หรือไม่

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย และอุดช่องว่างการวิจัยดังกล่าวข้างต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยออกแบบ และพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่กำหนดใช้ตัววัดการเลือกเส้นทางจากประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต การใช้พลังงานของโหนดเซนเซอร์ และสถานะของระบบควบคุม เป็นเกณฑ์ โดยที่ประเด็นการสูญหายของแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานของโหนด จะถูกพิจารณาใช้งานตามความเหมาะสมและสัมพันธ์กับสถานะของการควบคุมเป็นหลัก ดังที่ได้อธิบายเกริ่นนำไปในหัวข้อที่ 4.1 บทนำ ดังนั้น

จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอมีการพิจารณาการออกแบบร่วมกันระหว่างมุมมองด้านการสื่อสารและมุมมองทางด้านการควบคุมผ่านทางการกำหนดตัววัดการเลือกเส้นทาง เพื่อให้สามารถรักษาสมรรถนะทางด้านการสื่อสารและสมรรถนะทางด้านการควบคุมไว้พร้อมกัน ซึ่งไม่เคยมีงานวิจัยใดในปัจจุบันพิจารณาประเด็นนี้มาก่อน ในโพรโทคอล RMCSR ที่นำเสนอ ตัววัดการเลือกเส้นทางที่ใช้เป็นเกณฑ์ประกอบด้วย ก) ความล่าช้าการส่งแพ็กเก็ตสูงสุดของคูลิงคี่สื่อสารในเส้นทาง (maximum link delay) ข) ระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง (end-to-end delay threshold) ค) การใช้พลังงานสูงสุดของโหนดในเส้นทาง (maximum energy consumption) ง) ค่าผิดพลาดการควบคุม (control system error) จ) จำนวนฮอปจากต้นทางถึงปลายทาง และ ฉ) ความใหม่ของเส้นทาง (freshness of route) โดยที่ประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งแพ็กเก็ตแทนด้วยตัววัดความล่าช้าการส่งแพ็กเก็ตสูงสุดของคูลิงคี่สื่อสารในเส้นทาง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ตัววัดดังกล่าวผู้วิจัยจะเรียกว่า delay cost โดยจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณการส่ง-รับแพ็กเก็ต การส่งแพ็กเก็ตซ้ำ ตลอดจนการสูญหายของแพ็กเก็ตที่เกิดขึ้นในเส้นทาง ในประเด็นความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตสามารถแทนได้ด้วยตัววัดระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง ซึ่งกำหนดจากความต้องการของระบบควบคุมที่ศึกษาโดยตรง โดยที่ความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่ากันความล่าช้าที่ระบบควบคุมจะสามารถรับมือได้ ซึ่งจะถูกระบุอธิบายในรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4 สำหรับประเด็นการใช้พลังงานของโหนดแทนด้วยตัววัดการใช้พลังงานสูงสุดของโหนดใด ๆ ในเส้นทาง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ตัววัดดังกล่าว ผู้วิจัยจะเรียกว่า energy cost โดยจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณงานที่เกิดขึ้นในเส้นทางและเครือข่าย และท้ายสุด ประเด็นการติดตามสถานะของระบบควบคุมแทนด้วยตัววัดค่าผิดพลาดการควบคุม ตัววัดนี้คือค่าผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมและค่าจริงที่โหนดเซนเซอร์วัดได้จากสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุม ณ เวลาใด ๆ สำหรับนิยามของทุกตัววัดข้างต้นจะถูกอธิบายในรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 4.4

เนื่องจากโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจากโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV แบบดั้งเดิม (เหตุผลในการเลือกพัฒนาต่อยอดโพรโทคอล AODV อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.3 แนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง) ดังนั้น จำนวนฮอปตลอดเส้นทางใด ๆ และความใหม่ของเส้นทางซึ่งเป็นตัววัดการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV ยังคงถูกใช้ประโยชน์ในโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ โดยที่ตัววัดจำนวนฮอปถูกใช้ประกอบการพิจารณาในขั้นตอนการเตรียมเส้นทางแบบหลายเส้นทางเพื่อค้นหาเส้นทางที่เหมาะสม และเพื่อช่วยเพิ่มโอกาสในการจัดเส้นทางให้สำเร็จมากขึ้น ซึ่งจะถูกระบุ

อธิบายในรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 4.4 ตัววัดจำนวนฮอปสามารถบ่งชี้จำนวนครั้งของการส่งแพ็กเก็ต (number of transmissions) ในเส้นทาง โอกาสการเกิดการสูญหาย และความล่าช้าของการส่ง-รับแพ็กเก็ตในเส้นทาง โดยเส้นทางที่มีจำนวนฮอปมากกว่าจะให้จำนวนครั้งของการส่งแพ็กเก็ต โอกาสการเกิดการสูญหายและความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตมากกว่าเส้นทางที่มีจำนวนฮอปน้อยกว่า อย่างไรก็ตามตัววัดจำนวนฮอปไม่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะดังอธิบายนี้ได้โดยตรง โดยเฉพาะกรณีในระบบเครือข่ายที่มีความไม่แน่นอนในการสื่อสารแบบไร้สาย มีความแปรปรวนของปริมาณไหลในเครือข่าย และเครือข่ายที่มีความพลวัต [72, 73] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาใช้งานตัววัดอื่น ๆ ดังที่นำเสนอในเนื้อหาข้างต้นเพิ่มเติมเพื่อรับมือกับปัญหาดังอธิบาย สำหรับตัววัดความใหม่ของเส้นทางเป็นตัวบ่งชี้ความใหม่ล่าสุดของการจัดเส้นทางครั้งใด ๆ ของโหนดต้นทาง ในโพรโทคอล AODV ความใหม่ของเส้นทางพิจารณาจากค่า destination sequence number ที่ใหม่ที่สุด ถูกใช้เพื่อให้โหนดในเครือข่ายสามารถรักษาเส้นทางให้ทันสมัยอยู่เสมอและเพื่อป้องกันการเกิดการวนลูบในขั้นตอนการส่งข้อมูล ซึ่งจะถูกอธิบายในรายละเอียดในลำดับต่อไป

4.3.2 แนวคิดการออกแบบขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR จะทำการเตรียมเส้นทางและเลือกเส้นทางอย่างอัตโนมัติสำหรับการส่ง-รับข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางโดยการพิจารณาจากสถานะของระบบควบคุมที่สนใจ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ก่อนหน้า จากทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม ความสัมพันธ์ของเอาต์พุตการควบคุมต่อเวลาคือ ผลตอบสนองของระบบควบคุมเชิงเวลา (control system response) สถานะของระบบควบคุมสามารถแบ่งได้เป็นสองสถานะคือ สถานะชั่วคราว (transient state) และสถานะอยู่ตัว (steady state) สถานะชั่วคราว หมายถึง ระบบที่ทำการควบคุมให้ค่าผิดพลาดการควบคุม (control system error) มากกว่าหรือเท่ากับ 0.02 โดยที่ค่าผิดพลาดการควบคุม คือ ค่าสัมบูรณ์ของค่าผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (set point หรือ desired value) ที่ต้องการควบคุม และค่าจริงที่โหนดต้นทางวัดได้ (measured value) จากสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุม [54] สำหรับสถานะอยู่ตัว หมายถึง ระบบที่ทำการควบคุมให้ค่าผิดพลาดการควบคุมน้อยกว่า 0.02 ซึ่งหมายถึงระบบควบคุมสามารถเข้าสู่เวลาเข้าที่ (settling time) หรือเอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายการควบคุมในช่วงที่สามารถยอมรับได้

ในโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR ถ้าระบบควบคุมอยู่ในช่วงสถานะชั่วคราว โหนดจะเลือกเส้นทางที่ให้ค่า delay cost ต่ำสุด เมื่อเทียบกับเส้นทางทางเลือกอื่น ๆ และถ้าระบบควบคุมเข้าสู่ช่วงสถานะอยู่ตัวแล้ว โหนดจะเลือกเส้นทางที่ให้ค่า energy cost ต่ำสุด เมื่อเทียบกับเส้นทาง

ทางเลือกอื่น ๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 ก่อนหน้า delay cost และ energy cost ในที่นี้คือ เวลาการส่งแพ็กเก็ตสูงสุดของคูลิงค์สื่อสารใด ๆ ในเส้นทาง และการใช้พลังงานสูงสุดของโหนดใด ๆ ในเส้นทาง ตามลำดับ สำหรับสมการที่นิยามสองตัววัดนี้จะถูกนำเสนอในรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 4.4 จากการเลือกเส้นทางที่ให้ค่า delay cost ต่ำกว่าเส้นทางทางเลือกอื่น ๆ ในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสถานะชั่วคราว จะเป็นการช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงการเลือกเส้นทางที่มีความหนาแน่นของปริมาณไหลจำนวนมาก เส้นทางที่เกิดการชนกันของแพ็กเก็ตบ่อยครั้ง และเส้นทางที่มีการส่งแพ็กเก็ตซ้ำได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งการเลือกเส้นทางลักษณะนี้เป็นการพิจารณาประเด็นความสำเร็จในการส่ง-รับข้อมูลและความรวดเร็วในการส่ง-รับข้อมูลเป็นหลัก จากผลการศึกษาในงานวิจัยที่ [74] และ [75] ซึ่งเป็นงานวิจัยขั้นต้นของผู้วิจัยเองยืนยันว่า ในเส้นทางที่ให้ค่าความล่าช้าการส่งแพ็กเก็ตระหว่างคูลิงค์สื่อสารใด ๆ สูง ทั้งแพ็กเก็ตการจัดเส้นทางและแพ็กเก็ตข้อมูลที่ได้จากระบบควบคุมจะรออยู่ในบัฟเฟอร์ (buffer) ของโหนดใด ๆ เป็นเวลานานก่อนที่ถูกส่งออกไปยังโหนดเป้าหมาย เนื่องจากผลจากความหนาแน่นของปริมาณไหล การชนกันของแพ็กเก็ต และการส่งแพ็กเก็ตซ้ำดังกล่าวข้างต้นเกิดขึ้นในเส้นทางนั้น ๆ ดังนั้นด้วยวิธีการที่นำเสนอของผู้วิจัย จะทำให้สามารถลดโอกาสการสูญหายของแพ็กเก็ตที่เกิดขึ้นในเส้นทางที่ถูกเลือก ช่วยลดความล้มเหลวในกระบวนการจัดเส้นทางได้ และท้ายสุดจะเป็นการช่วยเพิ่มความสำเร็จในการรับข้อมูลที่โหนดปลายทาง ซึ่งจะช่วยให้ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วขึ้น สำหรับการเลือกเส้นทางที่ให้ค่า energy cost ต่ำกว่าเส้นทางทางเลือกอื่น ๆ ในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสถานะอยู่ตัว จะเป็นการช่วยให้สามารถลดโอกาสการเลือกเส้นทางที่มีโหนดมีพลังงานเหลืออยู่น้อยตลอดจนเส้นทางที่มีปริมาณไหลหนาแน่น ณ ช่วงเวลานั้น ๆ การเลือกเส้นทางที่โหนดใช้พลังงานน้อยกว่าจะช่วยให้สามารถยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายได้ยาวนานยิ่งขึ้น [76] ตลอดจนสามารถช่วยสมดุลภาระงาน (load balancing) ของโหนดในเครือข่าย

นอกจากนี้ ตลอดระยะเวลาการควบคุม เส้นทางที่ถูกเลือกสำหรับส่ง-รับข้อมูลซึ่งอาจจะพิจารณาจากค่า delay cost หรือ energy cost ก็ตาม เป็นเส้นทางที่ให้ค่าความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางต่ำกว่าค่าความล่าช้าสูงสุดที่ระบบควบคุมจะสามารถรับมือได้ โดยที่ค่าความล่าช้าสูงสุดนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ศึกษาโดยตรง โดยระบบควบคุมที่ให้ผลตอบสนองไว (fast response control system) ตัวอย่างเช่น การควบคุมเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม การควบคุมติดตามหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เป็นต้น จะมีค่าความล่าช้าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ต่ำกว่ากรณีระบบควบคุมที่ให้ผลตอบสนองช้ากว่า (slow response control

system) ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิในอาคาร การควบคุมสภาพอากาศและติดตามการเจริญเติบโตของพืชในโรงเรือนเพาะปลูก เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้ ค่าความล่าช้าสูงสุดที่ระบบควบคุมสามารถยอมรับได้ ได้จากการจำลองการทำงานกรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4

4.3.3 แนวคิดการกำหนดรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR

โพรโทคอลการจัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบตามฟังก์ชันการทำงานของโหนด คือ flat-based routing และ hierarchical-based routing [77, 78] ในโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ flat-based โหนดเซนเซอร์ทั้งหมดในเครือข่ายมีฟังก์ชันการทำงานที่เท่าเทียมกัน หรือมีขั้นตอนการค้นหาเส้นทางในลักษณะเดียวกัน สำหรับโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical-based หรือสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า cluster-based routing โหนดเซนเซอร์ในเครือข่ายจะมีฟังก์ชันการทำงานที่แตกต่างกัน โดยที่เครือข่ายจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย แต่ละกลุ่มจะมีโหนดเซนเซอร์หัวหน้ากลุ่ม (cluster head) ซึ่งเป็นโหนดที่มีศักยภาพหรือฟังก์ชันการทำงานที่ต่างจากโหนดอื่น ๆ ในกลุ่ม หรืออาจจะเป็นโหนดที่มีพลังงานหรือกำลังส่งสัญญาณวิทยุสูงสุด เป็นต้น กระบวนการสื่อสาร กระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดจะเกิดขึ้นเฉพาะในกลุ่มโดยมีโหนดหัวหน้ากลุ่มเป็นศูนย์กลางและทำหน้าที่ติดต่อกับโหนดหัวหน้ากลุ่มในกลุ่มอื่น ๆ รวมทั้งสถานีฐาน สำหรับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะการทำงานแบบ flat-based สาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางในรูปแบบนี้เนื่องจากมีลักษณะการทำงานที่ค่อนข้างเรียบง่าย ไม่ซับซ้อนเท่ากรณีโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical-based ทั้งยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะกรณีการใช้งานในเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดไม่มากนัก [77] ผู้วิจัยมีความเห็นว่าในขั้นต้นของการออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และเอคชูเอเตอร์ไร้สาย ความสัมพันธ์ระหว่างการสื่อสารและการควบคุมเป็นประเด็นวิจัยหลักที่จำเป็นต้องศึกษาเป็นลำดับแรก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายในการออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางตามแนวคิดนี้ โพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบ flat-based จึงถูกพิจารณา เช่นเดียวกับงานวิจัยใน [3, 6, 8] ซึ่งเป็นงานวิจัยลำดับต้น ๆ ที่เลือกใช้หรือนำเสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และเอคชูเอเตอร์ไร้สายในรูปแบบนี้ อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ flat-based มีข้อด้อยคือ ให้โอเวอร์เฮดหรือจำนวนการให้สัญญาณในเครือข่ายสูง โหนดอาจใช้พลังงานสิ้นเปลือง อาจใช้เวลานานในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางโดยเฉพาะในกรณีที่เครือข่ายมีโหนดจำนวนมาก

ตลอดจนมีความสามารถในการขยายขนาดเครือข่าย (scalability) ต่ำ [79] ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของระบบควบคุมที่กำหนดใช้งาน และอาจไม่สามารถประยุกต์ใช้งานกับกรณีการควบคุมด้วยเครือข่ายขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นเพื่อบรรเทาและรับมือกับปัญหาที่เกิดจากข้อด้อยดังอธิบายนี้ จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ขอบเขตความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนดในขั้นตอนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR จากข้อด้อยของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ flat-based ดังอธิบาย โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical-based จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายมากกว่า [1] เนื่องจากในกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical-based การให้สัญญาณจะเกิดขึ้นเฉพาะในกลุ่มเท่านั้น วิธีการนี้จะเป็นการจำกัดจำนวนการให้สัญญาณรวมในเครือข่ายซึ่งจะช่วยให้โหนดสามารถประหยัดพลังงานได้ นอกจากนี้ จากแนวคิดการแบ่งเครือข่ายออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ที่เป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถช่วยขยายขนาดของเครือข่ายให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานเป็นบริเวณกว้างได้มากขึ้น สำหรับงานวิจัยที่เลือกใช้หรือนำเสนอโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายในรูปแบบนี้ได้แก่ งานวิจัยที่ [36–38] และ [40] โดยกำหนดให้โหนดแอคชูเอเตอร์ทำหน้าที่เป็นโหนดหัวหน้ากลุ่มของแต่ละกลุ่ม และมีฟังก์ชันการทำงานที่ต่างจากโหนดสมาชิกในกลุ่ม อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยหลักของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical-based คือ มีความซับซ้อนสูงให้อีโเวอร์เฮดจำนวนมาก และใช้เวลานานในขั้นตอนการสร้างเครือข่ายแบบกลุ่ม ทั้งยังจำเป็นต้องมีการเลือกโหนดหัวหน้ากลุ่มและโหนดสมาชิกให้ทันสมัยและเหมาะสมอยู่เสมอ ยิ่งโดยเฉพาะในกรณีระบบเครือข่ายที่มีความไม่แน่นอนในการสื่อสารแบบไร้สายและโหนดมีการเคลื่อนที่ หากไม่สามารถสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มหรือได้เส้นทางส่งข้อมูลที่ไม่เหมาะสม ก็อาจไม่สามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ ดังนั้น ในการพัฒนาโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ hierarchical-based สำหรับใช้งานทางด้านการควบคุมจึงมีความจำเป็นต้องมีการวิจัยต่อยอดในประเด็นดังอธิบายนี้

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR ได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจากโพรโทคอล AODV สาเหตุที่วิทยานิพนธ์นี้เลือกพัฒนาต่อยอดจากโพรโทคอล AODV เนื่องจาก จากการทบทวนวรรณกรรมดังอธิบายไว้ในบทที่ 2 ก่อนหน้า พบว่า โพรโทคอล AODV เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางลำดับต้น ๆ ที่ถูกศึกษาและทดสอบกับงานทางด้านการควบคุมที่มีการพิจารณาการทำงานของทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมอย่างพร้อมเพรียงกัน ดังนำเสนอในงานวิจัยที่ [6] และ [7] ผลการศึกษาจากงานวิจัยทั้งสองแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล AODV สามารถนำมา

ประยุกต์ใช้งานกับกรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร และการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม นอกจากโพรโทคอล AODV แล้ว ยังมีโพรโทคอล LMNR โพรโทคอล GEAR และโพรโทคอล GeRaF ที่ถูกศึกษาและทดสอบกับงานด้านการควบคุมดังกล่าวเสนอในงานวิจัยที่ [3, 6] และ [8] ตามลำดับ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ก่อนหน้า สำหรับโพรโทคอลการกำหนดเส้นทางอื่น ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน ดังนำเสนอในงานวิจัยที่ [35–40] และ [42–48] ไม่ได้ถูกทดสอบกับงานทางด้านการควบคุม หรือไม่มีการพิจารณาฟังก์ชันการควบคุมในกระบวนการวิจัย ดังนั้น โพรโทคอลการกำหนดเส้นทางดังกล่าวจะสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ ยังคงเป็นคำถามในการทำวิจัย ในกรณีโพรโทคอล LMNR เป็นโพรโทคอลการกำหนดเส้นทางแบบหลายเส้นทาง (multi-path routing) ที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจากโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อเพิ่มระดับความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง โพรโทคอลการกำหนดเส้นทางแบบหลายเส้นทางมีข้อดีคือ มีความสามารถในการทนทานต่อความผิดพลาด (fault tolerance) ของระบบสื่อสารที่ใช้ในการส่งข้อมูล เมื่อเส้นทางหนึ่งไม่สามารถใช้งานได้ ก็ยังมีเส้นทางทางเลือกอื่น ๆ ที่สำรองไว้ให้ใช้งานได้โดยอัตโนมัติ ดังนั้นจึงสามารถช่วยเพิ่มระดับความน่าเชื่อถือของการส่งข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางได้ สามารถลดจำนวนครั้งของการพยายามค้นหาเส้นทาง ตลอดจนสามารถช่วยสมดุลปริมาณโหลดในเครือข่ายจากการเลือกและสลับใช้เส้นทางส่งข้อมูลที่เหมาะสม [80] อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลการกำหนดเส้นทางแบบหลายเส้นทางมีข้อด้อยคือ มีความซับซ้อนในขั้นตอนการออกแบบและในขั้นตอนการสร้างเส้นทางแบบหลายเส้นทาง ให้โอเวอร์เฮดสูงขึ้นจากการสร้าง เก็บ และดูแลรักษาเส้นทางเพิ่มเติม [25, 77] และอาจไม่สามารถประยุกต์ใช้งานได้เหมาะสมกับกรณีที่โหนดเซนเซอร์หรือโหนดแอคชูเอเตอร์มีการเคลื่อนที่ ดังเช่นผลจากการศึกษาวิจัยใน [6] ที่ให้ข้อสรุปว่า ในการติดตามและควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ กรณีโพรโทคอลการกำหนดเส้นทาง LMNR จะให้สมรรถนะทั้งทางด้านการสื่อสารและทางด้านการควบคุมสูงขึ้นเมื่อโหนดหยุดนิ่ง แต่จะให้สมรรถนะต่ำกว่าโพรโทคอล AODV ในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่ ดังนั้น จากข้อด้อยดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยจึงเห็นว่าการจะพัฒนาโพรโทคอลการกำหนดเส้นทางเพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานกับกรณีการควบคุมที่โหนดเซนเซอร์หรือโหนดแอคชูเอเตอร์มีการเคลื่อนที่ การเลือกพัฒนาต่อยอดโพรโทคอล AODV จึงมีความเหมาะสมมากกว่าโพรโทคอล LMNR อย่างไรก็ตาม หากต้องการพัฒนาต่อยอดโพรโทคอล AODV ให้เป็นโพรโทคอลการกำหนดเส้นทางแบบหลายเส้นทางเพื่อใช้งานทางด้านการควบคุม ผู้พัฒนาควรจะมีการพิจารณาการลดความซับซ้อนในขั้นตอนการออกแบบและในกระบวนการสร้างเส้นทางแบบหลาย

เส้นทาง การลดโอเวอร์เฮดจากการสร้าง เก็บ และดูแลรักษาเส้นทางเพิ่มเติม และการรองรับการใช้งานกรณีที่มีโหนดมีการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นข้อดีของโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบนี้ดังอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ตัวอย่างโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบหลายเส้นทางที่พัฒนาต่อยอดมาจากโพรโทคอล AODV และมีแนวความคิดการออกแบบเพื่อรับมือกับข้อดีดังกล่าวอธิบาย เช่น โพรโทคอล AOMDV (Ad-hoc On-demand Multi-path Distance Vector) [81] นอกจากนี้แล้ว ผู้พัฒนาจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในประเด็นผลกระทบจากการทำงานของโพรโทคอลของการจัดเส้นทางแบบหลายเส้นทางต่อสมรรถนะการควบคุม ซึ่งยังไม่มีการวิจัยใดในปัจจุบันศึกษาประเด็นดังกล่าวนี้มาก่อน สำหรับกรณีโพรโทคอล GEAR และโพรโทคอล GeRaF เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบอาศัยตำแหน่งภูมิศาสตร์ (location-based routing) โดยโหนดจะทำการค้นหาเส้นทางโดยการใช้ประโยชน์จากข้อมูลตำแหน่งของตัวเอง โหนดข้างเคียง และโหนดปลายทาง ข้อดีของโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบนี้คือ ไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดหมายเลข ID ให้กับโหนด ซึ่งจะสามารถรองรับการใช้งานกรณีที่มีโหนดจำนวนมากได้ นอกจากนี้ในการค้นหาเส้นทาง สามารถจำกัดจำนวนโอเวอร์เฮดจากการส่งสัญญาณสื่อสารไปยังเฉพาะพื้นที่ที่ต้องการแทนที่จะส่งไปทั้งเครือข่าย ซึ่งจะช่วยให้โหนดสามารถประหยัดพลังงานได้ สำหรับข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบนี้คือ ในการระบุตำแหน่งของโหนดจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมให้กับโหนดเช่น เซอร์เช่น GPS (global positioning system) หรือจำเป็นต้องอาศัยอัลกอริทึมการระบุตำแหน่ง (localization algorithms) เพิ่มเติม ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย โหนดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น และเพิ่มความซับซ้อนและเวลาในการคำนวณ ยิ่งโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูงในการระบุตำแหน่ง [77] จากผลการศึกษาวิจัยใน [32] แสดงให้เห็นว่า ความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่ง (location estimation error) ในขั้นตอนการจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบอาศัยตำแหน่งภูมิศาสตร์ ส่งผลให้อัตราการรับข้อมูลได้สำเร็จต่ำลง และโหนดใช้พลังงานมากขึ้นจากการพยายามค้นหาเส้นทางและส่งข้อมูลซ้ำ นอกจากนี้ ในกระบวนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบนี้ โหนดจำเป็นต้องมีการระบุตำแหน่งของโหนดเองให้ทันสมัยอยู่เสมอ ทั้งยังจำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งกับโหนดข้างเคียงอยู่เป็นระยะ ๆ หากโหนดมีการเคลื่อนที่ก็จะต้องทำกิจกรรมดังกล่าวบ่อยครั้ง ซึ่งจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางยาวนานขึ้น เกิดโอเวอร์เฮด และโหนดใช้พลังงานสูงขึ้นตามมา ซึ่งปัญหาจากมุมมองด้านการสื่อสารดังกล่าวนี้สามารถส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมได้โดยตรง ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงไม่เลือกพัฒนาต่อยอดโพรโทคอลการจัดเส้นทางในรูปแบบดังกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้ อย่างไรก็ตาม หาก

ต้องการประยุกต์ใช้งานโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบอาศัยตำแหน่งภูมิศาสตร์เพื่องานทางด้านการควบคุม ควรมีการศึกษาวิจัยในประเด็นผลกระทบจากข้อจำกัดของโพรโทคอลรูปแบบนี้ ดังได้อธิบายในข้างต้น ต่อสมรรถนะของการควบคุมเป็นลำดับแรก

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะการทำงานแบบ reactive หรือ demand-driven เช่นเดียวกันโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV โดยที่โหนดจะทำการจัดเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลก็ต่อเมื่อมีข้อมูลที่ต้องการจะส่งเท่านั้น ดังนั้นจึงมีข้อดีคือ โหนดไม่จำเป็นต้องจัดเส้นทางและดูแลรักษาตารางเส้นทางตลอดเวลา จึงสามารถช่วยลดจำนวนการให้สัญญาณในเครือข่าย และลดการใช้พลังงานของโหนดได้มากกว่ากรณีโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ proactive หรือ table-driven ที่มีการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะมีการส่งข้อมูลจริง โดยโหนดทั้งเครือข่ายจะต้องรักษาตารางเส้นทางให้ทันสมัยอยู่เสมอด้วยการแลกเปลี่ยนข้อมูลเส้นทางระหว่างกันอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ proactive มีข้อดีคือ โหนดสามารถส่งข้อมูลได้ในทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลาในการจัดเส้นทาง ซึ่งต่างจากวิธีการจัดเส้นทางแบบ reactive ที่อาจเกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูลเนื่องจากการรอกระบวนการค้นหาเส้นทางให้แล้วเสร็จ [69] ดังได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ การเกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูล แอคชูเอเตอร์จะไม่สามารถทำการควบคุมระบบที่สนใจได้ทันเวลาที่ ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมต่ำลง ดังนั้นเพื่อรับมือกับข้อด้อยของโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive ในประเด็นนี้ โพรโทคอล RMCSR จึงถูกออกแบบเพิ่มเติมให้มีการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือและความล่าช้าในการส่งข้อมูล เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มความสำเร็จในการจัดเส้นทางและรักษาความล่าช้าในการส่งข้อมูลให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบควบคุม ดังได้อธิบายในเนื้อหาก่อนหน้านี้ จากลักษณะเด่นของการจัดเส้นทางแบบ reactive และ proactive ดังอธิบายมาข้างต้น ผู้วิจัยเห็นว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมที่ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมระบบที่สนใจอยู่ตลอดเวลา เช่น การควบคุมอุณหภูมิในห้องทำงาน ดังเช่นกรณีศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ และการควบคุมเครื่องจักรที่มีการหยุดพัก เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากโหนดจะทำการสร้างและรักษาเส้นทางเฉพาะเมื่อมีความต้องการในการควบคุมเท่านั้น แต่หากเป็นกรณีการควบคุมที่เกิดขึ้นระยะเวลายาวนาน เช่น การควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก เป็นต้น โพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ proactive จะมีความเหมาะสมมากกว่า นอกจากนี้ ในกรณีการควบคุมที่เครือข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีอยู่บ่อย ๆ เช่นการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ [6] กรณีการจัดเส้นทางแบบ proactive อาจไม่เหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากโหนดจำเป็นต้องปรับปรุงตารางเส้นทางให้เป็นปัจจุบันอยู่เสมอด้วยการกระจายสัญญาณให้แก่

โหนดทั้งหมดในเครือข่าย ซึ่งจะทำให้เกิดโอเวอร์เฮด และโหนดใช้พลังงานมากขึ้น [82] ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การจะเลือกใช้งานโพรโทคอลการจัดเส้นทางแบบ reactive หรือ proactive จึงขึ้นอยู่กับงานที่ต้องการควบคุมเป็นปัจจัยสำคัญ

ดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ เพื่อรักษาสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุมไว้พร้อมกัน การสูญหายของแพ็กเก็ต ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต และการใช้พลังงานของโหนดเช่นเซอร์ในเครือข่ายเป็นประเด็นวิจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางสำหรับระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย [1, 2, 5, 8, 12] จากความต้องการข้างต้นนี้ ผู้วิจัยเห็นว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่รองรับคุณภาพการบริการ (QoS-based routing) ซึ่งมีการเลือกเส้นทางจากตัววัดการเลือกเส้นทางที่พิจารณาคุณภาพการบริการ (QoS metrics) มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากโพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบนี้มีวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อต้องการรักษาขอบเขตเวลาและรับประกันระดับความน่าเชื่อถือของการส่งข้อมูลในเครือข่ายให้สามารถอยู่ในระดับที่ต้องการ ตลอดจนการยืดอายุการใช้งานของเครือข่ายให้ยาวนานยิ่งขึ้น ดังเช่น ตามแนวคิดการออกแบบโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยที่ [16, 28–31, 33, 34, 36–38, 39, 40] ที่มีการทำงานในลักษณะนี้ อย่างไรก็ตามก็ ตาม ดังที่ได้เคยอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 การกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทาง กระบวนการวิจัยของงานวิจัยดังกล่าวไม่มีการพิจารณาการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงไม่สามารถตอบได้ว่า การกำหนดคุณภาพการบริการผ่านตัววัดการเลือกเส้นทางที่นำเสนอมีความสอดคล้องและส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมอย่างไร สำหรับโพรโทคอล RMCSR ตามแนวคิดการออกแบบดังนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่รองรับคุณภาพการบริการเช่นเดียวกัน แต่จะมีความต่างจากโพรโทคอลการจัดเส้นทางอื่น ๆ ในรูปแบบนี้คือ โพรโทคอล RMCSR มีการเลือกเส้นทางจากการพิจารณาประเด็นความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และการใช้พลังงานของโหนด ที่กำหนดให้สอดคล้องกับสถานะหรือความต้องการของระบบควบคุมโดยตรง จากการพิจารณาการออกแบบร่วมกันระหว่างมุมมองทางด้านการสื่อสารและมุมมองทางด้านการควบคุมนี้จะสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของทั้งระบบสื่อสารและระบบควบคุมได้มากยิ่งขึ้น ดังข้อสรุปในงานวิจัยที่ [5] และ [9] โพรโทคอล RMCSR เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่มีการรองรับคุณภาพการบริการ แต่ยังคงมีวิธีการค้นหาเส้นทางที่ต้องอาศัยหมายเลข ID ของโหนด (address-centric) เหมือนกันกับโพรโทคอล AODV ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับกรณีการใช้งานทางด้านการควบคุมที่มีโหนดจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากจำเป็นต้องมีการกำหนดและรักษา ID ให้แก่โหนด [77, 83] ดังนั้นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่มีการค้นหา

เส้นทางโดยอาศัยข้อมูลเป็นศูนย์กลาง หรือเรียกว่า data-centric routing อาจจะมี ความเหมาะสมมากกว่า ดังเช่นโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยที่ [36-38] โดยในการ ค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลรูปแบบนี้ สถานีฐานหรือโหนดแอสซิงโครนัสจะร้องขอข้อมูลที่ต้องการ จากโหนดต้นทางใด ๆ โดยการส่งข้อความร้องขอ (query message) ไปในเครือข่ายซึ่งจะอธิบาย รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการ โหนดที่มีข้อมูลหรือเอกลักษณ์ตรงกับข้อความร้องขอจะ ทำการส่งข้อมูลที่มีอยู่กลับไปยังสถานีฐานหรือโหนดแอสซิงโครนัส อย่างไรก็ตามโพรโทคอลการ จัดเส้นทางรูปแบบนี้มีข้อเสียคือ จำเป็นต้องมีวิธีการจับคู่กันระหว่างข้อความร้องขอและข้อมูลที่โหนด มี ซึ่งอาจสามารถเพิ่มเวลาและความซับซ้อนในการทำงานได้ [77, 84] และท้ายสุด โพรโทคอล การจัดเส้นทางในรูปแบบนี้เหมาะสมกับกรณีงานที่ต้องการชนิดข้อมูลที่หลากหลาย แต่ไม่ เหมาะสมกับงานที่ต้องการข้อมูลน้อยชนิด [77] ดังนั้นจึงอาจไม่มีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนา โพรโทคอลการจัดเส้นทางรูปแบบนี้เพื่องานทางด้านความปลอดภัยเพียงกรณีเดียว เช่น การควบคุม อุณหภูมิในอาคาร เป็นต้น

4.4 กระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR

กระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR ตามแนวคิดการออกแบบข้างต้นแบ่ง ออกเป็น 3 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการสร้างเส้นทาง (route establishment process) กระบวนการเลือกเส้นทางและการปรับปรุงเส้นทาง (route selection and route update processes) และท้ายสุด กระบวนการนำส่งข้อมูล (data delivery process) กระบวนการสร้าง เส้นทางเป็นกลไกการค้นหาเส้นทางทางเลือกจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในเครือข่าย ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนการส่งข้อความ RREQ และขั้นตอนการส่งข้อความ RREP สำหรับกระบวนการเลือกเส้นทางและการปรับปรุงเส้นทาง เป็นการเลือกหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด จากทุกเส้นทางทางเลือกเพื่อเตรียมส่งข้อมูล และท้ายสุดกระบวนการนำส่งข้อมูล เป็นขั้นตอนการ ส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางตามเส้นทางที่เหมาะสม

4.4.1 กระบวนการสร้างเส้นทาง

4.4.1.1 กระบวนการส่งข้อความ RREQ

ในขั้นตอนการส่งข้อความ RREQ (RREQ propagation process) ของโพรโทคอล RMCSR กระบวนการจัดเส้นทางโดยส่วนใหญ่ดำเนินการตามกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโท- คอล AODV แบบดั้งเดิม วิทยานิพนธ์นี้แก้ไขสองประเด็นหลักดังนี้ ประเด็นแรกคือ โหนดต้นทางซึ่ง ทำหน้าที่วัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อมหรือระบบควบคุมที่สนใจ ทำการตรวจสอบสถานะของระบบ

ควบคุมและบันทึกค่าสถานะของระบบควบคุมฝากลงไปในข้อความ RREQ ก่อนส่งออกไปในเครือข่าย ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ใช้ประโยชน์ในขั้นตอนการตัดสินใจเลือกเส้นทางในขั้นตอนต่อไป โดยโหนดต้นทางสามารถรู้สถานะของระบบควบคุมได้จากการคำนวณหาค่าผิดพลาดการควบคุม ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 สถานะชั่วคราว หมายถึงระบบควบคุมให้ค่าผิดพลาดการควบคุม (control system error) มากกว่าหรือเท่ากับ 0.02 และสถานะอยู่ตัว หมายถึงระบบควบคุมให้ค่าผิดพลาดการควบคุมน้อยกว่า 0.02 ซึ่งหมายถึงเอาท์พุทของระบบควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายหรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับค่าผิดพลาดการควบคุม (*Control_System_Error*) คือ ค่าสัมบูรณ์ของค่าผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (*Desired_Value*) ที่ต้องการควบคุม และค่าจริงที่โหนดต้นทางวัดได้ (*Measured_Value*) จากสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุม แสดงดังสมการที่ (4-1) ผู้วิจัยกำหนดให้โหนดต้นทางรู้ค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเพื่อให้สามารถคำนวณค่าผิดพลาดการควบคุมได้

$$\text{Control_System_Error} = |\text{Desired_Value} - \text{Measured_Value}| \quad (4-1)$$

โหนดต้นทางจะทำการบันทึกค่าสถานะของระบบควบคุมฝากลงไปในข้อความ RREQ ผ่านทางตัวแปร *State* กำหนดให้ *State* มีค่าเท่ากับ 1 และ 2 หมายถึง สถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ตามลำดับ ดังนั้นด้วยวิธีการที่นำเสนอดังกล่าวนี้ ตัวแปร *State* จะเป็นตัวบ่งบอกว่า ณ เวลาที่ทำการจัดเส้นทางระบบควบคุมอยู่ในสถานะใด ถึงแม้ว่าในโพรโทคอล RMCSR จะมีการฝากค่าตัวแปร *State* ลงไปในข้อความ RREQ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยไม่ได้ทำการเพิ่มขนาดแพ็กเก็ตของข้อความ RREQ แต่อย่างใด ค่าตัวแปร *State* จะถูกเก็บไว้ในส่วนสงวน (reserved field) ของข้อความ RREQ จำนวน 1 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนที่โพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิมอนุญาตให้สามารถใช้งานได้ สำหรับกระบวนการคำนวณค่าผิดพลาดการควบคุม และการฝากตัวแปร *State* ลงในข้อความ RREQ โดยโหนดต้นทางแสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-1

ALGORITHM 4-1:

Control system error calculations and state registrations by the source node

VARIABLES: *Control_System_Error, Designed_Value, Measured_Value, State*

BEGIN

(1) *Control_System_Error* = $|\text{Desired_Value} - \text{Measured_Value}|$;

(2) //FOR TRANSIENT STATE

(3) **IF** (*Control_System_Error* \geq 0.02) **THEN**

(4) Set *State* = 1; //Transient state

(5) Record the *State* in the RREQ message;

ALGORITHM 4-1:

Control system error calculations and state registrations by the source node

```

(6)  END IF
(7)  //FOR STEADY STATE
(8)  IF (Control_System_Error < 0.02) THEN
(9)    Set State = 2; //Steady state
(10)   Record the State in the RREQ message;
(11)  END IF
END

```

สำหรับส่วนแก้ไขประเด็นที่สอง คือ เงื่อนไขการรับข้อความ RREQ ขั้วของโหนดปลายทาง กล่าวคือ ในการจัดเส้นทางโดยโหนดต้นทางครั้งใด ๆ ข้อความ RREQ จะถูกส่งแบบแพร่กระจาย ไปทั้งเครือข่าย ซึ่งจะทำให้โหนดปลายทางอาจรับข้อความ RREQ ขั้วจากโหนดข้างเคียงได้ โดย โหนดปลายทางสามารถรู้ว่ารับข้อความ RREQ ขั้วได้จากการตรวจสอบค่า Broadcast ID ที่ฝาก มากับข้อความ RREQ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับที่เคยได้รับ ในการทำงานของโพรโทคอล RMCSR ขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้โหนดปลายทางสามารถรับข้อความ RREQ ขั้วจากโหนดข้างเคียงได้ หลังจากที่เคยรับข้อความ RREQ มาก่อนหน้า ถ้าค่าจำนวนฮอปที่ได้จากข้อความ RREQ ที่รับได้ ในครั้งล่าสุด มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าจำนวนฮอปที่เก็บไว้ในตารางการจัดเส้นทางจากการรับ ข้อความ RREQ ครั้งก่อนหน้า ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ โพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR จะ สามารถเตรียมเส้นทางไว้หลาย ๆ เส้นทางเท่าที่จะเป็นไปได้ไว้สำหรับกระบวนการเลือกเส้นทางที่ เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป โดยจำนวนเส้นทางทางเลือกที่เป็นไปได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของเครือข่าย การวางโหนด จำนวนโหนด รูปแบบการเชื่อมโยงเครือข่าย ตำแหน่งของโหนด ต้นทางและโหนดปลายทาง ความพลวัตของเครือข่าย และคุณลักษณะของสภาพแวดล้อมที่ใช้ งาน เป็นต้น นอกจากนี้การเตรียมเส้นทางไว้หลายเส้นทางยังมีส่วนในการช่วยเพิ่มความสำเร็จใน การจัดเส้นทาง และช่วยเพิ่มโอกาสในการเลือกได้เส้นทางที่เหมาะสมที่สุดได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มีการศึกษาวิจัยต่อยอดในประเด็นเรื่องการกำหนดจำนวนเส้นทางที่ เหมาะสมว่าควรเป็นเท่าไร สำหรับเหตุผลที่ผู้วิจัยกำหนดให้ ในการจัดเส้นทางครั้งเดียวกันใด ๆ โหนดปลายทางสามารถรับข้อความ RREQ ขั้วได้ หากค่าจำนวนฮอปที่ได้จากข้อความ RREQ ครั้งล่าสุดมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าจำนวนฮอปที่เก็บไว้ในตารางการจัดเส้นทาง เนื่องจาก ตัว วัตจำนวนฮอปที่มีอยู่เดิมในโพรโทคอล AODV สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เลยโดยไม่ต้องมีการ แก้ไขหรือเพิ่มเติมโปรแกรมใหม่ และดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 ก่อนหน้า ตัววัตจำนวนฮอป สามารถบ่งชี้จำนวนครั้งของการส่งแพ็กเก็ตในเส้นทาง โอกาสการเกิดการสูญหาย และความล่าช้า ของการส่งแพ็กเก็ตในเส้นทาง เส้นทางที่มีจำนวนฮอปมากกว่าจะทำให้จำนวนครั้งของการส่ง

แพ็กเก็ต โอกาสเกิดการสูญหาย และความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตมากกว่าเส้นทางที่มีจำนวนฮอปน้อยกว่า อย่างไรก็ตามตัววัดจำนวนฮอปไม่สามารถบ่งชี้คุณลักษณะดังอธิบายนี้ได้โดยตรงในกรณีการใช้งานกับเครือข่ายที่มีความไม่แน่นอนในการสื่อสารแบบไร้สาย มีความแปรปรวนของปริมาณไหลในเครือข่าย และเครือข่ายที่มีความพลวัต เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาตัววัดอื่น ๆ เพิ่มเติม ซึ่งจะอธิบายในลำดับต่อไป

สำหรับกระบวนการรับข้อความ RREQ ของโหนดต้นทางและโหนดระหว่างทาง ใช้วิธีการเดียวกันกับกรณีโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV แบบดั้งเดิม ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ก่อนหน้านี้ ในการจัดเส้นทางโดยโหนดต้นทางครั้งใด ๆ หากโหนดต้นทางได้รับข้อความ RREQ ที่ตนเองส่งออกไป ซึ่งโหนดต้นทางสามารถตรวจสอบได้จากค่า source address ที่อยู่ในข้อความ RREQ จะตรงกันกับของโหนดเอง โหนดจะทำการละทิ้งข้อความ RREQ นั้นเสีย สำหรับโหนดระหว่างทางสามารถรับข้อความ RREQ จากโหนดข้างเคียงได้เพียงข้อความเดียว หากโหนดนั้น ๆ ได้รับข้อความ RREQ จากโหนดข้างเคียงอื่น ๆ โหนดจะทำการละทิ้งข้อความ RREQ นั้นเสีย โดยโหนดสามารถตรวจสอบได้โดยการเปรียบเทียบหมายเลข broadcast ID ที่ฝากมากับข้อความ RREQ ครั้งปัจจุบันกับหมายเลข broadcast ID ที่บันทึกในแคช (cache) จากการรับข้อความ RREQ ครั้งก่อนหน้า กระบวนการรับข้อความ RREQ และการตรวจสอบ Broadcast ID ของโหนดต้นทาง โหนดระหว่างทาง และโหนดปลายทางแสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-2

ALGORITHM 4-2:

RREQ received function; broadcast ID considerations

VARIABLES: *Source_Address_in_RREQ, My_Address, Destination_Address_in_RREQ, BroadcastID_in_RREQ, Hop_Count_in_RREQ, Hop_Count_in_RoutingTable*

BEGIN

```

(1) //FOR THE SOURCE NODE
(2) IF (Source_Address_in_RREQ = My_Address) THEN
(3)   Discard the RREQ message; //I got my own RREQ
(4) //FOR RELAY NODES
(5) IF (Source_Address_in_RREQ != My_Address) and
    (Destination_Address_in_RREQ != My_Address) THEN
(6)   IF (ID lookup(Source_Address_in_RREQ, BroadcastID_in_RREQ)) THEN
(7)     Discard the RREQ message; //I recently heard this RREQ
(8)   ELSE
(9)     //I have never heard before; Cache the broadcast ID
(10)    ID insert (Source_Address_in_RREQ, BroadcastID_in_RREQ);
(11)   END IF
(12) END IF
(13) //FOR THE SINK NODE

```

ALGORITHM 4-2:

RREQ received function; broadcast ID considerations

```

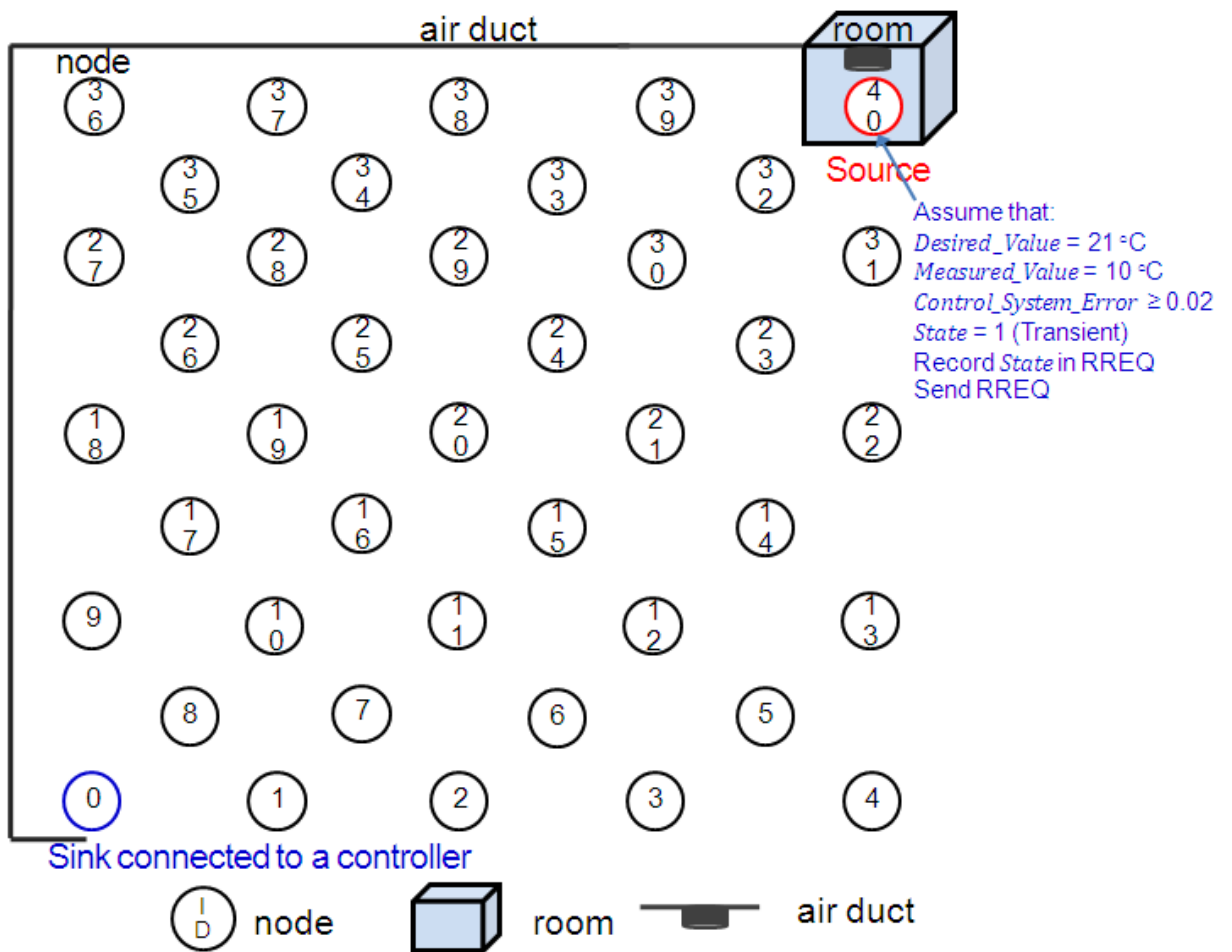
(14) IF (Destination_Address_in_RREQ = My_Address) THEN
(15)   IF (ID lookup(Source_Address_in_RREQ, BroadcastID_in_RREQ)) THEN
(16)     IF (Hop_Count_in_RREQ ≤ Hop_Count_in_RoutingTable) THEN
(17)       Accept this RREQ;
(18)     ELSE
(19)       Discard the RREQ message;
(20)     END IF
(21)   ELSE
(22)     //I have never heard before; Cache the broadcast ID
(23)     ID insert (Source_Address_in_RREQ, BroadcastID_in_RREQ);
(24)   END IF
(25) END IF

```

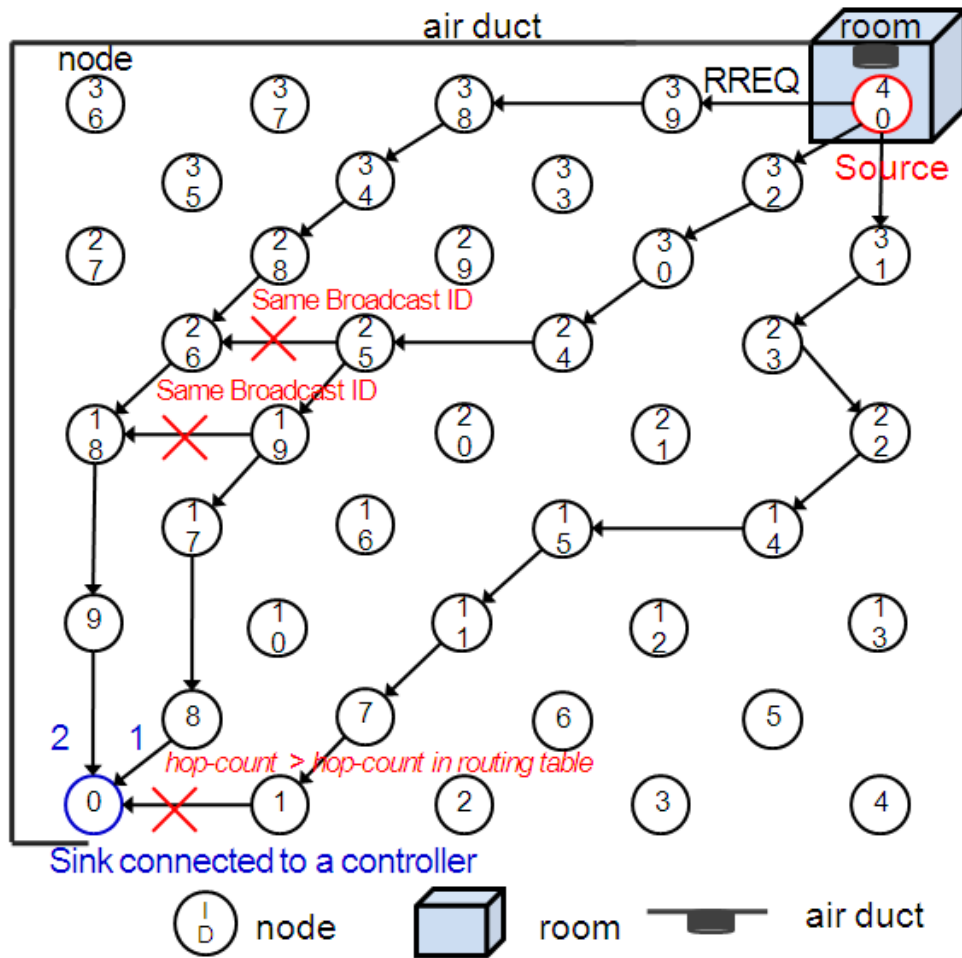
หมายเหตุ: ก) โหนดระหว่างทางและโหนดปลายทางสามารถตรวจสอบได้ว่าทำการรับข้อความ RREQ ซ้ำหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบค่า source address และหมายเลข broadcast ID ที่อ่านได้จากข้อความ RREQ กับข้อมูลเก่าที่เคยบันทึกไว้ในแคช แสดงดังฟังก์ชัน ID lookup ในบรรทัดที่ (6) และบรรทัดที่ (15) และถ้าหากโหนดยังไม่เคยรับข้อความ RREQ มาก่อน โหนดจะทำการบันทึกค่า source address และหมายเลข broadcast ID ที่ฝากมากับข้อความ RREQ นั้น ๆ แสดงดังฟังก์ชัน ID insert ในบรรทัดที่ (10) และบรรทัดที่ (23) ข) ในอัลกอริทึมที่ 4-2 นี้ เฉพาะบรรทัดที่ (16) ถึง (20) ที่ถูกนำเสนอโดยผู้วิจัยเอง ส่วนอื่น ๆ เป็นวิธีการทำงานของโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม

ตัวอย่างการคำนวณและการฝากตัวแปร *State* ลงในข้อความ RREQ ที่โหนดต้นทาง และกระบวนการส่งข้อความ RREQ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ผู้วิจัยสมมติให้โหนด ID 40 เป็นโหนดต้นทางทำการวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อมที่สนใจ ซึ่งในกรณีนี้คือ อุณหภูมิภายในห้อง และสมมติให้โหนด ID 0 เป็นโหนดปลายทางเชื่อมต่ออยู่กับตัวควบคุมและ แอคชูเอเตอร์ จากตัวอย่างในภาพประกอบที่ 4-1 (ก) ก่อนโหนด ID 40 ส่งข้อความ RREQ ไปในเครือข่าย โหนด ID 40 จะทำการคำนวณค่าผิดพลาดการควบคุมจากสมการที่ (4-1) และทำการกำหนดค่า *State* ตามอัลกอริทึม 4-1 จากนั้นจะบันทึกค่า *State* ลงในข้อความ RREQ ก่อนส่งออกไปในเครือข่าย ในภาพประกอบที่ 4-1 (ข) โหนดต้นทางส่งข้อความ RREQ ออกไปในเครือข่าย โหนดระหว่างทางที่รับข้อความ RREQ จะทำการกำหนด reverse pointer กลับไปยังโหนดที่ส่งข้อความ RREQ มา เพื่อจดจำเส้นทางไว้สำหรับส่งข้อความ RREQ ในขั้นตอนต่อไป ในระหว่างการส่งข้อความ RREQ จะเห็นได้ว่าโหนด ID 18 และ 26 ซึ่งเป็นโหนดระหว่างทางจะทำ

การละทิ้งข้อความ RREQ ที่ส่งมาจากโหนด ID 19 และ 25 ตามลำดับ เนื่องจากค่า broadcast ID ในข้อความ RREQ ที่รับเข้ามาซ้ำกับค่า broadcast ID จากข้อความ RREQ ที่เคยรับมาก่อนหน้า ดังอธิบายไว้ในการทำงานข้างต้น นอกจากนี้ โหนด ID 0 จะทำการละทิ้งข้อความ RREQ ที่ส่งมาจากโหนด ID 1 เนื่องจากเงื่อนไขจำนวนฮอปที่ฝากมากับข้อความมากกว่าจำนวนฮอปที่ได้จากข้อความ RREQ ครั้งก่อนหน้าและได้บันทึกไว้ในตารางเส้นทาง



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 4-1 (ก) โหนดต้นทางคำนวณและฝากตัวแปร State ลงในข้อความ RREQ
 (ข) กระบวนการส่งข้อความ RREQ หมายถึง: ผู้วิจัยสมมติให้หมายเลข 1 และ 2 ที่แสดง
 ในภาพในตำแหน่งเหนือโหนด ID 0 คือเส้นทางลำดับที่ 1 และ 2 ที่โหนด ID 0 รับ
 ข้อความ RREQ เข้ามา

4.4.1.2 กระบวนการส่งข้อความ RREP

เมื่อโหนดปลายทาง หรือโหนดระหว่างทางที่มีข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ต้องการ รับข้อความ RREQ (ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2) โหนดปลายทางหรือโหนดระหว่างทางนั้นจะทำการส่งข้อความ RREP ตอบกลับไปยังโหนดต้นทางผ่านทางทุกเส้นทางที่รับข้อความ RREQ เข้ามา โหนดระหว่างทางที่รับข้อความ RREP จะทำการกำหนด forward pointer เพื่อจดจำเส้นทางไว้สำหรับส่งข้อมูล จากนั้นจะทำการส่งต่อข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางผ่านทาง reverse route ที่โหนดเคยจดจำไว้จากกระบวนการรับข้อความ RREQ ก่อนหน้า สำหรับกระบวนการส่งข้อความ RREP ของโพรโทคอล RMCSR ผู้วิจัยพัฒนาสี่ขั้นตอนหลัก คือ ก)

การฝากค่าตัวแปร *State* ที่อ่านได้จากข้อความ RREQ ลงในข้อความ RREP ข) การกำหนดค่า destination sequence number ของข้อความ RREP ที่ส่งออกจากโหนดปลายทาง ค) การคำนวณค่า delay cost หรือค่า energy cost ฝากลงไปข้อความ RREP และท้ายสุด ง) การตรวจสอบค่า end-to-end delay ในระหว่างการส่งข้อความ RREP ออกไปในเครือข่าย อธิบายดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอน ก) ก่อนที่โหนดปลายทางหรือโหนดระหว่างทางที่มีข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางจะทำการส่งข้อความ RREP ตอบกลับ โหนดดังกล่าวจะทำการบันทึกค่า *State* ลงไปในข้อความ RREP ซึ่งค่า *State* อ่านได้จากข้อความ RREQ ที่รับเข้ามาในขั้นตอนก่อนหน้า ทั้งนี้เพื่อจะใช้เป็นประโยชน์สำหรับโหนดในการตัดสินใจเลือกเส้นทางในลำดับต่อไป ค่าตัวแปร *State* จะถูกเก็บไว้ในส่วนสงวนของข้อความ RREP จำนวน 1 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนที่โพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิมอนุญาตให้สามารถใช้งานได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของแพ็กเก็ต RREP ในส่วนนี้

ขั้นตอน ข) โดยอัลกอริทึมการทำงานของโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม ก่อนที่โหนดปลายทางจะทำการตอบข้อความ RREP โหนดปลายทางจะทำการเพิ่มค่า destination sequence number ให้สูงกว่าค่า sequence number ที่ฝากมากับข้อความ RREQ ที่รับเข้ามา โหนดปลายทางจะฝากค่า destination sequence number นี้ลงไปในข้อความ RREP เพื่อให้โหนดในเครือข่ายที่รับข้อความ RREP นี้รับรู้ถึงความใหม่ของเส้นทางและป้องกันการเกิดการวนลูบในขั้นตอนการส่งข้อมูล สำหรับในโพรโทคอล RMCSR การส่งข้อความ RREQ จากการจัดเส้นทางของโหนดต้นทางครั้งใด ๆ โหนดปลายทางสามารถรับข้อความ RREQ ได้จากหลาย ๆ เส้นทาง ถ้าหากเส้นทางที่รับข้อความ RREQ เข้ามาให้ค่าจำนวนฮอปที่ฝากมากับข้อความน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าจำนวนฮอปที่โหนดปลายทางเก็บไว้ในตารางเส้นทางจากการรับข้อความ RREQ ครั้งก่อนหน้า ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1.1 และภาพประกอบที่ 4-1 (ข) ข้างต้น ด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ ถ้าโหนดปลายทางที่รับข้อความ RREQ จากการจัดเส้นทางครั้งเดียวกันทำการเพิ่มค่า destination sequence number และฝากลงไปข้อความ RREP ก่อนส่งออกไปในทุก ๆ ครั้ง จะเป็นผลให้เส้นทางที่ใหม่ที่สุดคือเส้นทางลำดับหลังสุดที่รับข้อความ RREQ เข้ามา ซึ่งผิดหลักคิดในการออกแบบโพรโทคอล RMCSR เพราะในการจัดเส้นทางครั้งเดียวกัน การเตรียมเส้นทางหลาย ๆ เส้นทางไว้ก็เพื่อให้สามารถเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดเพียงเส้นทางเดียวไว้ใช้งาน ดังนั้นด้วยหลักคิดนี้ โหนดปลายทางจะทำการเพิ่มค่า destination sequence number ก็ต่อเมื่อเป็นการจัดเส้นทางครั้งใหม่ของโหนดต้นทาง สำหรับในกรณีการจัดเส้นทางครั้งเดียวกัน โหนดปลายทางจะเพิ่มค่า sequence number ของข้อความ RREP ในลำดับแรกที่ได้รับข้อความ RREQ

เข้ามา สำหรับเส้นทางอื่น ๆ ที่โหนดปลายทางรับข้อความ RREQ เข้ามา โหนดปลายทางจะใช้ค่า destination sequence number เท่ากับค่า destination sequence number ลำดับแรกที่ส่งข้อความ RREP ออกไป โดยโหนดปลายทางจะรู้ได้ว่าเป็นการจัดเส้นทางครั้งเดียวกันหรือไม่จากการตรวจสอบค่า broadcast ID ในข้อความ RREQ ที่รับเข้ามา ถ้าค่า broadcast ID มีค่าเท่ากัน แสดงว่าเป็นการจัดเส้นทางครั้งเดียวกันดังได้อธิบายรายละเอียดไว้ในอัลกอริทึมที่ 4-2 ก่อนหน้า ถึงแม้ว่าในการจัดเส้นทางครั้งเดียวกัน โหนดระหว่างทางในทุกเส้นทางที่รับข้อความ RREP ที่ส่งมาจากโหนดปลายทางจะบันทึกค่า destination sequence number เท่ากัน อย่างไรก็ตาม จะมีเพียงเส้นทางเดียวระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางที่จะถูกเลือกใช้สำหรับส่ง-รับข้อมูล (ซึ่งจะอธิบายในลำดับถัดไป) โหนดในเส้นทางที่ไม่ถูกเลือกใช้งานก็จะลบข้อมูลดังกล่าวนี้ไปในภายหลังอย่างอัตโนมัติ ดังนั้น เส้นทางที่ใหม่สุดก็จะมีเพียงเส้นทางเดียวและเป็นเส้นทางที่โหนดในเส้นทางมีค่า destination sequence number สูงสุด สำหรับกระบวนการฝากค่าตัวแปร State ที่อ่านได้จากข้อความ RREQ ลงในข้อความ RREP และกระบวนการกำหนดค่า destination sequence number ให้แก่ข้อความ RREP ก่อนที่จะส่งออกไปในทุกเส้นทางที่รับข้อความ RREQ เข้ามา แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-3 โดยที่อัลกอริทึมนี้ต่อเนื่องจากอัลกอริทึมที่ 4-2

จากการกำหนดให้โหนดปลายทางตอบข้อความ RREP ไปในทุกเส้นทางที่รับข้อความ RREQ เข้ามาดังอธิบายข้างต้น วิธีการดังกล่าวมีข้อดีคือ เป็นการช่วยเพิ่มโอกาสให้สามารถเลือกได้เส้นทางที่เหมาะสมที่สุดได้มากยิ่งขึ้น [85, 86] ทั้งนี้เนื่องจากเส้นทางที่เหมาะสมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนในการสื่อสารแบบไร้สาย การเกิดการเปลี่ยนแปลงการจราจรในเครือข่าย การเปลี่ยนแปลงทอพอโลยี และการที่คุณภาพของช่องสัญญาณไร้สายเปลี่ยนแปลงตามเวลา เป็นต้น [87] นอกจากนี้แล้ว วิธีการที่นำเสนอยังสามารถช่วยเพิ่มความสำเร็จในการจัดเส้นทาง ลดโอกาสการทำกระบวนการจัดเส้นทางซ้ำ เนื่องจากเกิดการสูญหายของข้อความ RREP ในเครือข่าย ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้ในโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิมที่โหนดปลายทางมีการส่งข้อความ RREP เพียงเส้นทางเดียว [87, 88] และถึงแม้ว่าวิธีการส่งข้อความ RREP ไปหลายเส้นทางจะทำให้เกิดการใช้โอเวอร์เฮดและโหนดใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในส่วนนี้ แต่การที่สามารถลดจำนวนครั้งในการค้นหาเส้นทางได้จะเป็นการช่วยลดเซชข้อด้อยนี้ ดังผลการศึกษาในงานวิจัยที่ [81, 87] และ [88]

ALGORITHM 4-3:

RREQ received function; state registrations and sequence number assignments before sending the RREP (ต่อเนื่องจากอัลกอริทึมที่ 4-2)

VARIABLES: *Destination_Address_in_RREQ, My_Address, State, Destination_Sequence_Number, Sequence_in_RoutingTable, Destination_Sequence_Number_in_RREQ, Hop_Count_in_RoutingTable*

BEGIN

```

(1) //FOR THE SINK NODE
(2)  IF (Destination_Address_in_RREQ = My_Address) THEN
(3)      IF (This is the 1st received RREQ message) THEN
(4)          Destination_Sequence_Number = Max
              (Sequence_in_RoutingTable,
              Destination_Sequence_Number_in_RREQ)+1;
(5)          Record the Destination_Sequence_Number in the routing table;
(6)          Record the State and the Destination_Sequence_Number in the
              RREP message;
(7)          Send the RREP message;
(8)      ELSE
(9)          //Duplicated RREQ messages; with equal or smaller hop-count
(10)         Destination_Sequence_Number = Sequence_in_RoutingTable;
(11)         Record the State and the Destination_Sequence_Number in the
              RREP message
(12)         Send the RREP message;
(13)     END IF
(14) END IF
(15) //I AM NOT THE SINK NODE, BUT I MAY HAVE A ROUTE TO THE SINK
(16) IF ((Hop_Count_in_RoutingTable != Infinity) and
        (Sequence_in_RoutingTable ≥ Destination_Sequence_Number_in_RREQ))
    THEN
(17)     Destination_Sequence_Number = Sequence_in_RoutingTable;
(18)     Record the State and the Destination_Sequence_Number in the
          RREP message
(19)     Send the RREP message;
(20) END IF

```

ขั้นตอน ค) ในระหว่างการส่งข้อความ RREP โหนดระหว่างทางที่รับข้อความ RREP จาก โหนดข้างเคียง จะทำการคำนวณค่า delay cost หรือค่า energy cost และบันทึกค่าที่ได้ลงในข้อความ RREP โดยโหนดจะทำการตรวจสอบค่า *State* ที่ฝากมากับข้อความ RREP ซึ่งแสดงถึงสถานะของระบบควบคุม ดึงนำเสนอนี้ในขั้นตอน ก) ถ้าค่า *State* เท่ากับ 1 หรือระบบควบคุมอยู่ในช่วงสถานะชั่วคราว โหนดที่รับข้อความ RREP จะทำการบันทึกค่า delay cost ลงไปในข้อความ และถ้าหากค่า *State* เท่ากับ 2 หรือระบบควบคุมอยู่ในช่วงสถานะอยู่ตัวแล้ว โหนดที่รับข้อความ

RREP จะทำการบันทึกค่า energy cost ลงไปในข้อความ โดยที่การคำนวณค่า delay cost ระหว่างคู่โหนดสื่อสารใด ๆ ในเส้นทางและค่า energy cost ของโหนดที่รับข้อความ RREP แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-4 ค่า delay cost ของคู่ลิงค์สื่อสารใด ๆ (*Delay_Cost*) ในเส้นทาง คือ ผลต่างระหว่างเวลาที่โหนดตัวรับรับข้อความ RREP ได้สำเร็จที่ชั้นเครือข่าย (*RREP_Receiving_Time*) และเวลาที่โหนดตัวส่งส่งข้อความ RREP ออกจากชั้นเครือข่าย (*RREP_Sending_Time*) ค่า delay cost คำนวณได้จากสมการที่ (4-2) จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า delay cost เป็นค่าความล่าช้าของการส่งข้อความ RREP ระหว่างคู่โหนดสื่อสารใด ๆ ในเส้นทาง วิธีการดังกล่าวนี้จะเป็นการตรวจสอบความหนาแน่นของปริมาณการส่ง-รับแพ็กเก็ต การชนกันของข้อมูล และการส่งข้อมูลซ้ำที่ยอบใด ๆ ในเส้นทาง สำหรับค่า energy cost ของโหนดตัวรับในเส้นทางใด ๆ (*Energy_Cost*) คือ ค่าพลังงานผลต่างระหว่างพลังงานเริ่มต้นของโหนด (*Initial_Energy*) และพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนด (*Residual_Energy*) ดังนั้นค่า energy cost ในที่นี้ก็คือพลังงานที่โหนดใช้ไปนั่นเอง แสดงดังสมการที่ (4-3) สำหรับทุก ๆ เส้นทางที่ข้อความ RREP ถูกส่งผ่าน โหนดระหว่างทาง จะทำการบันทึกเฉพาะค่า delay cost หรือค่า energy cost ที่มีค่ามากที่สุดลงไปข้อความ RREP โดยโหนดระหว่างทางจะเลือกค่าสูงสุดระหว่างค่าที่โหนดเองคำนวณได้กับค่าสูงสุดที่ฝากมากับข้อความ RREP จากโหนดในลำดับก่อน ๆ หน้า ดังนั้นทุก ๆ เส้นทางใด ๆ จะมีค่า delay cost หรือค่า energy cost สูงสุดบันทึกไว้ในข้อความ RREP โดยที่คู่ลิงค์สื่อสารที่ให้ค่า delay cost และโหนดที่ให้ค่า energy cost สูงสุด คือจุดอ่อนของเส้นทางนั้น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากในคู่ลิงค์สื่อสารที่ให้ค่า delay cost สูงสุดจะมีโอกาสเกิดความล่าช้าในการสื่อสารข้อมูลสูงเมื่อเทียบกับคู่ลิงค์อื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นทางเดียวกัน ส่วนโหนดที่ให้ค่า energy cost สูงสุด คือโหนดที่มีโอกาสหมดพลังงานก่อนโหนดอื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นทางเดียวกัน

จากวิธีการที่นำเสนอในขั้นตอน ค) นี้ ผู้วิจัยเพิ่มขนาดแพ็กเก็ตของข้อความ RREP จากกรณีโพรโทคอล AODV รูปแบบเดิม จำนวน 16 ไบต์ โดยเตรียมไว้สำหรับเก็บค่า delay cost หรือค่า energy cost สูงสุด จำนวน 8 ไบต์ และค่า *RREP_Sending_Time* ไว้เพื่อให้สามารถคำนวณค่า delay cost ระหว่างคู่โหนดสื่อสารใด ๆ จำนวนอีก 8 ไบต์ ค่าตัวแปรทั้งสองข้างต้นนี้เป็นเลขทศนิยม (floating point) ดังนั้นจึงถูกเก็บด้วยชนิดข้อมูล double ซึ่งจะใช้หน่วยความจำในการเก็บข้อมูลจำนวน 64 บิต [89, 90]

$$Delay_Cost = RREP_Receiving_Time - RREP_Sending_Time \quad (4-2)$$

$$Energy_Cost = Initial_Energy - Residual_Energy \quad (4-3)$$

ขั้นตอน ง) ในขั้นตอนการส่งข้อความ RREP โหนดระหว่างทางไม่ได้คำนวณเฉพาะ delay cost หรือ energy cost แต่ยังมีตรวจสอบค่า end-to-end delay ของการส่งข้อความ RREP ในเครือข่ายอีกด้วย end-to-end delay ของการส่งข้อความ RREP ในเส้นทางใด ๆ (*ETED*) นิยามโดย เวลาผลต่างระหว่างเวลาที่โหนดใด ๆ รับข้อความ RREP (*RREP_Receiving_Time*) และเวลาที่โหนดปลายทางส่งข้อความ RREP (ผู้วิจัยกำหนดให้เรียกว่า *Time_Stamp*) แสดงดัง สมการที่ (4-4) ถ้าค่า *ETED* ในเส้นทางใด ๆ มีค่ามากกว่าค่า end-to-end delay threshold (*ETED_Threshold*) ที่กำหนดไว้ โหนดที่รับข้อความ RREP จะทำการละทิ้งข้อความและไม่ส่งข้อความนั้นต่อไป วิธีการดังกล่าวแสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-4 ด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ เส้นทางที่ให้ค่า end-to-end delay สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้จะไม่ถูกเลือกเป็นเส้นทางทางเลือกสำหรับส่ง-รับข้อมูล ในวิทยานิพนธ์นี้ ค่า *ETED_Threshold* คือ ระดับกันความล่าช้าที่อนุญาตให้ข้อความ RREP ส่งผ่านในเครือข่ายระหว่างโหนดปลายทางและโหนดต้นทาง กำหนดให้มีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาการ ชักตัวอย่างสูงสุด (maximum sampling period) ที่สามารถใช้งานได้เหมาะสมในระบบ ควบคุม

จากทฤษฎีการควบคุม การรักษาสมรรถนะการควบคุมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feed-back control system) ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ค่าความล่าช้าสูงสุดในวงปิดที่อนุญาตได้ (maximum allowable loop delay) มีค่าเท่ากับค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดที่สามารถ อนุญาตให้ใช้งาน (maximum allowable sampling period) ซึ่งจะต้องน้อยกว่า $T/4$ [91, 92] เมื่อ T_r คือเวลาขึ้น (rise time) ซึ่งเป็นเวลาที่เอาต์พุตของการควบคุม (control system output) เพิ่มขึ้น จาก 0% เป็น 100% ของค่าเป้าหมาย (desired value) [54] ในวิทยานิพนธ์นี้ ระบบควบคุมที่ ศึกษาคือระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ระบบควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองเชิงเวลาของ ระบบที่มีค่าเวลาขึ้นเท่ากับ 179 วินาที ดังนั้นค่า $T/4$ หรือค่าความล่าช้าสูงสุดในวงปิดที่อนุญาต ได้จึงมีค่าเท่ากับ 44.75 วินาที ในการศึกษาี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ *ETED_Threshold* มีค่าเท่ากับ $T/7$ (25.57 วินาที) ค่าที่กำหนดนี้ได้มาจากการทดสอบแสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ก ผล จากการทดสอบกรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคารด้วยเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะหนึ่งฮอป แสดงให้เห็นว่า การใช้ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดเท่ากับค่ากำหนดข้างต้น จะสามารถ ควบคุมระบบให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ภายในเวลาที่กำหนด และเอาต์พุตจากการควบคุมมีค่าพุ่ง เกินสูงสุด (maximum overshoot) มากกว่าค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงสุดที่อนุญาตได้ (maximum allowable temperature) เพียงเล็กน้อย โดยที่ค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงสุดที่อนุญาตได้เป็นระดับ อุณหภูมิที่รู้สึกสบาย (comfortable temperature) สำหรับผู้อยู่อาศัย [93] อุณหภูมิภายในห้อง

สูงสุดที่อนุญาตได้มีค่าเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส [93] จากผลการจำลองการทำงานที่ได้จากภาคผนวก ก หากกำหนดใช้ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ 24 วินาที จะทำให้เอาท์พุทการควบคุมมีค่าพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 25.762 องศาเซลเซียส แต่ถ้าหากกำหนดใช้ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ 25 วินาที จะทำให้เอาท์พุทการควบคุมมีค่าพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 26.034 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงสุดที่อนุญาตได้เล็กน้อย ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยกำหนดให้ *ETED_Threshold* มีค่าเท่ากับ $T/7$ หรือ 25.57 วินาที ทั้งนี้เพื่อให้่ายในการกำหนดซึ่งเป็นสัดส่วนของค่าเวลาขึ้น โดยที่หากกำหนดใช้ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ $T/6$ หรือ 29.833 วินาที จะทำให้เอาท์พุทการควบคุมมีค่าพุ่งเกินสูงสุดมากกว่า 26 องศาเซลเซียส และถ้าหากกำหนดใช้ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ $T/8$ หรือ 22.375 วินาที ก็จะทำให้เอาท์พุทการควบคุมมีค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยกว่า 26 องศาเซลเซียส ดังนั้นค่า $T/7$ จึงเป็นค่าที่ทำให้เข้าใกล้ค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงสุดที่อนุญาตได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า *ETED_Threshold* ในขั้นตอนการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาว่าค่าที่ต่างกันส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอล RMCSR และสมรรถนะของการควบคุมอย่างไร ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 5 การจำลองการทำงาน ในลำดับต่อไป

จากวิธีการที่นำเสนอในขั้นตอน (ง) นี้ หากในการจัดเส้นทางครั้งใด ๆ ไม่มีเส้นทางใดเลยที่ให้ค่า *ETED* น้อยกว่าค่า *ETED_Threshold* หรือหมายถึงข้อความ RREP ถูกทิ้งระหว่างทางจนไปไม่ถึงโหนดปลายทาง ก็จะไม่สามารถสร้างเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลได้ เหตุการณ์ดังกล่าวนี้อาจส่งผลให้สมรรถนะของการควบคุมต่ำลง หรือไม่สามารควบคุมระบบที่สนใจให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากรณีการควบคุมที่มีความเข้มงวดเรื่องประเด็นเวลาที่ใช้ในการส่ง-รับข้อมูลระหว่างโหนดเซนเซอร์และโหนดแอคชูเอเตอร์ เช่น การควบคุมเครื่องจักรที่กำลังทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม การควบคุมติดตามหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และการควบคุมไฟฟ้า เป็นต้น หากโหนดเซนเซอร์ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังตัวควบคุมหรือแอคชูเอเตอร์ได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด แอคชูเอเตอร์ก็อาจจะไม่สามารถควบคุมระบบได้เลย หรือกรณีแย่สุดอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบหรืออุปกรณ์ได้ ดังนั้น การสามารถสร้างเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลได้ แต่หากเส้นทางนั้น ๆ ไม่สามารถรองรับการส่งข้อมูลให้ทันเวลาที่ระบบควบคุมยอมรับได้ ก็อาจไม่เกิดประโยชน์หมายเหตุ: ตัวอย่างดังงานวิจัยที่ [94] ที่ให้ข้อเสนอแนะว่า ในกรณีงานด้านการตรวจตราในสนามรบ สถานีฐานหรือศูนย์กลางการควบคุมจำเป็นต้องได้รับข้อมูลของผู้บุกรุกที่ตรวจวัดโดยโหนดเซนเซอร์ ซึ่งอาจจะเป็นคนหรือพาหนะเคลื่อนที่ภายในขอบเขตเวลาที่กำหนด ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยและเพื่อให้สามารถจัดการผู้บุกรุกได้อย่างทันที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากรณีการ

ควบคุม เช่น การควบคุมอุณหภูมิในอาคาร การควบคุมสภาพอากาศและการติดตามการเจริญเติบโตของพืชในโรงเรือนเพาะปลูก เป็นต้น การที่ไม่มีเส้นทางสำหรับส่งข้อมูลเลยอาจส่งผลเสียมากกว่ากรณีการมีเส้นทางที่ไม่สามารถรองรับการส่งข้อมูลได้ทันเวลากำหนด ทั้งนี้เนื่องจากเอาท์พุทที่ได้จากการควบคุมไม่ได้ส่งผลกระทบต่อระบบ ดังนั้นกรณีการควบคุมในลักษณะนี้หากไม่สามารถหาเส้นทางที่สามารถรองรับการส่งข้อมูลให้ทันเวลากำหนดได้ ก็สามารถเพิ่มเงื่อนไขการค้นหาเส้นทางให้มีการเลือกเส้นทางที่ให้ค่า end-to-end delay ต่ำสุดแทน ดังเช่นข้อเสนอแนะในงานวิจัยที่ [95] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยยังไม่ได้ทำการเพิ่มเติมวิธีการดังอธิบายข้างต้นลงไปในอัลกอริทึมการจัดเส้นทางที่นำเสนอ

$$ETED = RREP_Receiving_Time - Time_Stamp \quad (4-4)$$

ALGORITHM 4-4:

RREP received function; end-to-end delay, delay cost and energy cost calculations

VARIABLES: *ETED, Time_to_Receive_RREP, Time_Stamp, ETED_Threshold, Delay_Cost, Time_to_Send_RREP, Energy_Cost, Initial_Energy, Residual_Energy, State*

BEGIN

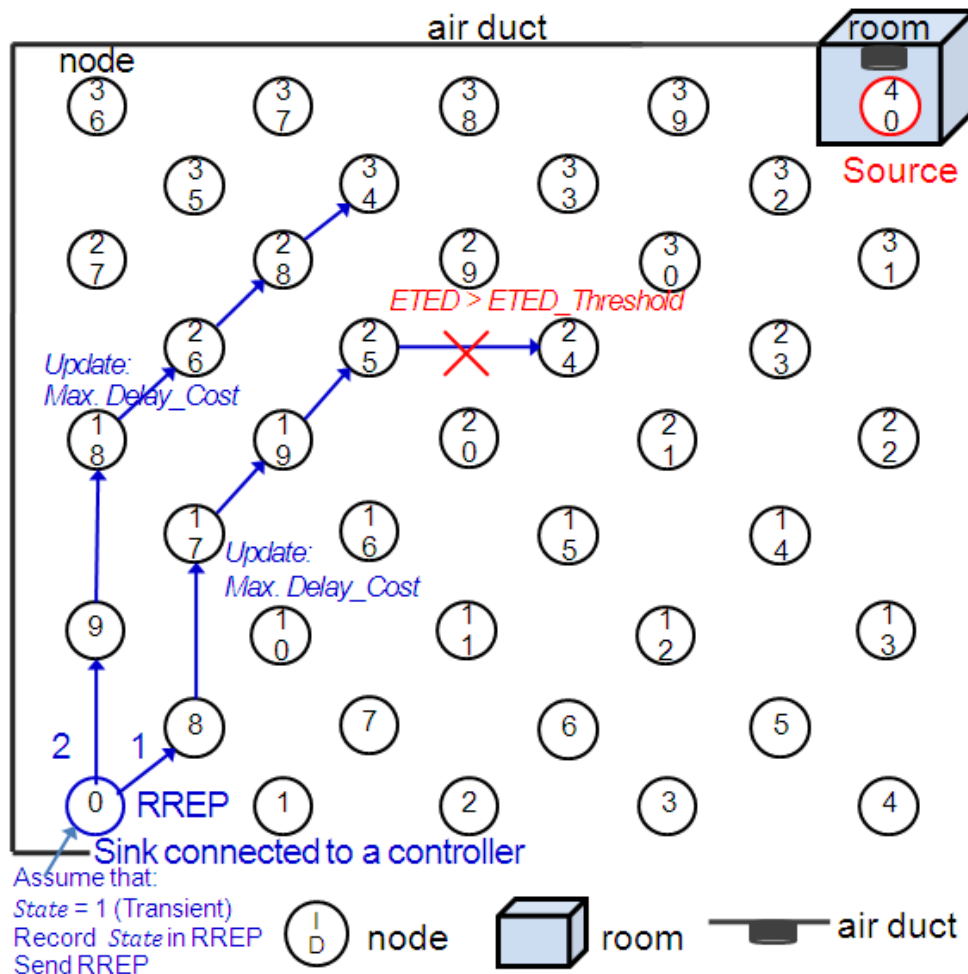
```
(1) //CALCULATE THE END TO END DELAY
(2) ETED = RREP_Receiving_Time - Time_Stamp;
(3) IF (ETED > ETED_Threshold) THEN
(4)   Discard the RREP message;
(5) END IF
(6) //CALCULATE THE DELAY COST AND TNE ENERGY COST
(7) IF (State = 1) THEN
(8)   Delay_Cost = RREP_Receiving_Time - RREP_Sending_Time;
(9)   Compare the delay cost as calculated by myself with the delay cost in
      the received RREP; Record only the maximum value into the RREP;
(10) END IF
(11) IF (State = 2) THEN
(12)   Energy_Cost = Initial_Energy - Residual_Energy;
(13)   Compare the energy cost as calculated by myself with the energy cost
      in the received RREP; Record only the maximum value into the RREP;
(14) END IF
END
```

สำหรับสาเหตุที่วิทยานิพนธ์นี้เลือกคำนวณค่า delay cost ค่า energy cost และทำการตรวจสอบค่า end-to-end delay threshold ในขั้นตอนการส่งข้อความ RREP เนื่องจาก การส่งข้อความ RREP ก็กับการส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงใช้วิธีการส่งแบบเฉพาะเจาะจง (unicast) เหมือนกัน ถ้าหากข้อความ RREP หรือข้อมูลเกิดการสูญหายระหว่างการส่ง ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุการชนกันของแพ็กเก็ต หรือสัญญาณวิทยุที่โหนดตัวรับรับได้ให้ความแรงของสัญญาณต่ำจนไม่สามารถใช้งานได้ หรือแม้แต่การเกิดการสูญหายของข้อความยืนยัน (acknowledgement message) ที่ตอบกลับจากโหนดตัวรับไปยังโหนดตัวส่งที่ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (MAC layer) เป็นต้น ในกรณีดังกล่าว โหนดจะทำกระบวนการส่งแพ็กเก็ตซ้ำตามจำนวนครั้งที่สามารถส่งได้ ซึ่งจะถูกกำหนดโดยชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง จากคุณลักษณะดังกล่าวข้างต้น จะทำให้ค่า delay cost ค่า energy cost และค่า end-to-end delay ที่คำนวณได้จากเส้นทางใด ๆ ในขั้นตอนการส่งข้อความ RREP สามารถแสดงถึงคุณลักษณะของเครือข่ายหรือสภาวะการส่งข้อมูลจริงในเส้นทางนั้น ๆ ได้ใกล้เคียงมากขึ้น สำหรับวิธีการส่งข้อความ RREQ จะแตกต่างกันกับการส่งข้อความ RREP และข้อมูลจริง ข้อความ RREQ จะถูกส่งโดยใช้วิธีการแพร่กระจายสัญญาณ (broadcast) ถ้าข้อความ RREQ มีการสูญหายในระหว่างการส่ง โหนดตัวส่ง (ยกเว้นโหนดต้นทาง) จะไม่ทำกระบวนการส่งแพ็กเก็ตซ้ำ และโหนดตัวรับเองก็ไม่มี การตอบข้อความยืนยันที่จัดการโดยชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง งานวิจัยที่ [30] ให้ข้อเสนอแนะว่า การคำนวณค่าความล่าช้าแบบฮอปต่อฮอปจากแพ็กเก็ตที่ถูกส่งโดยวิธีการส่งแบบเฉพาะเจาะจงเพื่อใช้เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง มีความเหมาะสมมากกว่าการเลือกคำนวณจากแพ็กเก็ตที่ถูกส่งโดยวิธีการแพร่กระจายสัญญาณ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันของเวลาที่ใช้ในการจัดการภายในชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง

ถึงแม้ว่าการส่งแพ็กเก็ตโดยใช้วิธีการแพร่กระจายสัญญาณบนมาตรฐาน ZigBee โหนดตัวส่งจะสามารถส่งแพ็กเก็ตซ้ำได้หากโหนดตัวรับไม่ได้รับแพ็กเก็ตที่โหนดตัวส่งเองแพร่กระจายออกไป โดยจะอาศัยกลวิธีที่เรียกว่า passive acknowledgement (passive acknowledgement method) ซึ่งเป็นการทำงานที่ชั้นเครือข่าย (network layer) [96] กล่าวคือ เมื่อโหนดตัวส่งส่งแพ็กเก็ตโดยใช้วิธีการแพร่กระจายสัญญาณออกไปยังโหนดข้างเคียง โหนดตัวส่งจะทำการรอรับแพ็กเก็ตเดียวกันนี้ที่เกิดจากการแพร่กระจายต่อ (re-broadcast) ของโหนดข้างเคียง ถ้าหากโหนดตัวส่งได้รับสัญญาณดังกล่าวจากโหนดข้างเคียง แสดงว่าโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ตที่โหนดตัวส่งส่งไปก่อนหน้านี้ แต่ถ้าหากโหนดตัวส่งไม่ได้รับสัญญาณดังกล่าวจากโหนดข้างเคียงในช่วงเวลาที่กำหนด โหนดตัวส่งจะทำการส่งแพ็กเก็ตนั้น ๆ ซ้ำ อย่างไรก็ตาม กลวิธี passive

acknowledgement นี้ โหนดไม่ได้มีการส่งข้อความยืนยันจริงจากชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง ดังนั้นจึงยังคงมีความแตกต่างกันกับกรณีการส่งข้อมูลจริงที่ใช้วิธีการส่งแบบเฉพาะเจาะจง โดยเฉพาะประเด็นเรื่องการจัดการเวลาที่ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง นอกจากนี้แล้ว ถึงแม้ว่ากลวิธี passive acknowledgement จะสามารถช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือในการสื่อสารในขั้นตอนการส่งแพ็กเก็ตโดยใช้วิธีการแพร่กระจาย อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยที่ [97] ให้ข้อเสนอแนะว่า การส่งแพ็กเก็ตซ้ำในขั้นตอนการแพร่กระจายจากกลวิธีดังกล่าวสามารถส่งผลให้เกิดปริมาณ traffic จำนวนมาก เกิดโอเวอร์เฮดเพิ่มขึ้น จนทำให้เกิดความล่าช้า การสูญหายของแพ็กเก็ตในเครือข่าย และโหนดใช้พลังงานมากขึ้นตามมาได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิจัยต่อยอดในประเด็นการรักษาสมดุลระหว่างความน่าเชื่อถือในการสื่อสารและข้อดีที่เกิดขึ้นดังอธิบาย หมายเหตุ: อย่างไรก็ตาม ในโปรแกรม NS2 ที่ใช้จำลองการทำงานในวิทยานิพนธ์นี้ ยังไม่มีกลวิธี passive acknowledgement ให้สามารถใช้งานได้

สำหรับตัวอย่างกระบวนการส่งข้อความ RREP แสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 ผู้วิจัยสมมติให้ตัวแปร *State* ที่ฝากไว้ในข้อความ RREP มีค่าเท่ากับ 1 (อ่านได้จากข้อความ RREQ ในขั้นตอนก่อนหน้า) ซึ่งหมายถึง ณ เวลาการจัดเส้นทางนั้น ๆ ระบบควบคุมอยู่ในช่วงสถานะชั่วคราว ดังนั้นโหนดในเส้นทางที่รับข้อความ RREP จะทำการคำนวณและเก็บเฉพาะค่า *Delay_Cost* สูงสุดลงไปข้อความ RREP สมมติให้เส้นทางหมายเลข 1 ค่า *Delay_Cost* สูงสุดเกิดขึ้นที่คู่สื่อสารระหว่างการส่งข้อมูลจากโหนด ID 8 ไปยังโหนด ID 17 อย่างไรก็ตามในเส้นทางนี้ กำหนดให้โหนด ID 24 พบว่าค่า *ETED* ตลอดเส้นทางที่คำนวณมาได้สูงกว่าค่า *ETED_Threshold* ดังนั้นโหนด ID 24 จะไม่ส่งต่อข้อความ RREP ไปยังโหนดถัดไป สำหรับเส้นทางหมายเลข 2 ค่า *Delay_Cost* สูงสุดเกิดขึ้นที่คู่สื่อสารระหว่างการส่งข้อมูลจากโหนด ID 18 ไปยังโหนด ID 26 ค่าที่คำนวณได้นี้จะถูกบันทึกและฝากไปในข้อความ RREP นอกจากนี้ สมมติให้ในเส้นทางหมายเลข 2 ค่า *ETED* น้อยกว่าค่า *ETED_Threshold* ดังนั้นเส้นทางนี้จะเป็นเส้นทางที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลได้ในลำดับต่อไป



ภาพประกอบ 4-2 กระบวนการส่งข้อความ RREP หมายถึง: ค่า Max_Delay_Cost ในภาพประกอบคือ ค่า $Delay_Cost$ สูงสุดในเส้นทางใดๆ ผู้วิจัยสมมติให้หมายเลข 1 และ 2 ที่แสดงในภาพในตำแหน่งเหนือโหนด ID 0 คือเส้นทางลำดับที่ 1 และ 2 ที่โหนด ID 0 ส่งข้อความ RREP ออกไป

4.4.2 กระบวนการเลือกเส้นทาง และกระบวนการปรับปรุงตารางเส้นทาง

เมื่อโหนดระหว่างทางหรือโหนดต้นทางได้รับข้อความ RREP เข้ามา โหนดจะทำการคำนวณค่า $Final_Cost_i$ (กำหนดให้ i คือเส้นทางใด ๆ) และบันทึกค่าที่ได้จากการคำนวณลงไป ในตารางเส้นทาง ค่า $Final_Cost_i$ เป็นตัวชี้วัดในการเลือกเส้นทางและการปรับปรุงตารางเส้นทางแสดงดังสมการที่ (4-5) ค่านี้คือผลรวมของค่า $Delay_Cost$ สูงสุดในเส้นทาง (หรือ $Max_Delay_Cost_i$) คูณด้วยค่าน้ำหนักลำดับแรก (W_1) และค่า $Energy_Cost$ สูงสุดในเส้นทาง (หรือ $Max_Energy_Cost_i$) คูณด้วยค่าน้ำหนักลำดับที่สอง (W_2) โดยที่ค่า $Max_Delay_Cost_i$ หรือ $Max_Energy_Cost_i$ สามารถอ่านได้จากข้อความ RREP ที่โหนด

รับเข้ามา และค่านำหนักถูกกำหนดจากค่าตัวแปร *State* ซึ่งบ่งบอกสถานะของระบบควบคุม โดยที่ค่า *State* สามารถอ่านได้จากข้อความ RREP เช่นเดียวกันดังอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ถ้าระบบควบคุมอยู่ในช่วงสถานะชั่วคราวหรือตัวแปร *State* มีค่าเท่ากับ 1 กำหนดให้ W_1 และ W_2 มีค่าเท่ากับ 1 และ 0 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบควบคุมอยู่ในช่วงสถานะอยู่ตัว หรือตัวแปร *State* มีค่าเท่ากับ 2 กำหนดให้ W_1 และ W_2 มีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ การกำหนดค่านำหนักข้างต้นที่นำเสนอนี้สอดคล้องกับข้อมูลที่มีอยู่ในข้อความ RREP กล่าวคือ ในขั้นตอนการส่งข้อความ RREP ดังอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โหนดจะเก็บเฉพาะค่า delay cost สูงสุด หรือค่า energy cost สูงสุด เพียงค่าเดียว โหนดจะเลือกเก็บค่าใดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร *State* ที่ฝากไว้ในข้อความ RREP ดังนั้นในข้อความ RREP จะมีค่า cost สูงสุดอยู่เพียงค่าเดียวเท่านั้น ด้วยเทคนิคการกำหนดค่านำหนักดังกล่าวข้างต้น delay cost จะถูกพิจารณาให้เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสถานะชั่วคราว ในขณะที่ energy cost จะถูกพิจารณาให้เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางในช่วงที่ระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

$$Final_Cost_i = (W_1 \times Max_Delay_Cost_i) + (W_2 \times Max_Energy_Cost_i) \quad (4-5)$$

เมื่อโหนดรับข้อความ RREP ลำดับแรกเข้ามา จะทำการคำนวณค่า $Final_Cost_i$ ดังอธิบายข้างต้น และบันทึกค่าที่ได้จากการคำนวณลงไปในตารางเส้นทาง ตลอดจนทำการกำหนด forward pointer เพื่อจดจำโหนดลำดับก่อนหน้าที่จะส่งข้อความ RREP มา หากโหนดดังกล่าวเป็นโหนดระหว่างทางจะทำการส่งต่อ (forward) ข้อความ RREP ไปยังฮอปถัดไปโดยดูจาก reverse pointer แต่ถ้าหากโหนดดังกล่าวเป็นโหนดต้นทาง จะทำการส่งข้อมูลที่วัดได้แบบฮอปต่อฮอปไปยังโหนดปลายทางในทันที โดยอาศัย forward pointer นำทาง ในกรณีที่โหนดได้รับข้อความ RREP จากเส้นทางอื่น ๆ ที่มาถึงเป็นลำดับหลังเพิ่มเติม ซึ่งเป็นข้อความ RREP จากการจัดเส้นทางในครั้งเดียวกัน โดยโหนดจะสามารถตรวจสอบได้จากค่า destination sequence number ที่ฝากมากับข้อความ RREP ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่า destination sequence number สูงสุดที่เก็บไว้ในตารางเส้นทาง ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4.1.2 ขั้นตอน ข) กรณีนี้ โหนดจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางใหม่เฉพาะเส้นทางที่ให้ค่า final cost ซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลของข้อความ RREP ที่รับเข้ามาใหม่ ต่ำกว่าค่า final cost ที่เคยเก็บไว้ในตารางเส้นทางซึ่งคำนวณได้จากข้อความ RREP ที่รับเข้ามาในครั้งก่อนหน้า โหนดจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางโดยการบันทึกค่า final cost และกำหนด forward pointer ใหม่ และถ้าหากโหนดที่ทำการปรับปรุงตาราง

เส้นทางใหม่ดังอธิบายนี้คือโหนดต้นทาง โหนดต้นทางจะทำการตอบสนองหรือสลบเส้นทางการส่งข้อมูลไปเป็นเส้นทางที่ให้ค่า final cost ต่ำกว่าในทันที ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ในโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR เส้นทางที่ให้ค่า $Final_Cost_i$ ต่ำกว่า จะถูกเลือกสำหรับใช้ส่ง-รับข้อมูลแทนเส้นทางก่อนหน้า สำหรับในกรณีที่โหนดรับข้อความ RREP เข้ามาใหม่และเป็นข้อความ RREP จากการจัดเส้นทางครั้งใหม่ที่โหนดต้นทางร้องขอ โดยโหนดจะสามารถตรวจสอบได้จากค่า destination sequence number ที่ฝากมากับข้อความ RREP มีค่าสูงกว่าค่า destination sequence number สูงสุดที่เก็บไว้ในตารางเส้นทางของโหนดเอง โหนดระหว่างทางจะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางใหม่ ส่วนโหนดต้นทางจะทำการเลือกเส้นทางนั้นเพื่อส่งข้อมูล เพราะเส้นทางดังกล่าวเกิดจากการจัดเส้นทางครั้งใหม่หรือปัจจุบันที่สุดที่โหนดต้นทางร้องขอ กระบวนการคำนวณ final cost การเลือกเส้นทาง และการปรับปรุงตารางเส้นทางของโหนดดังอธิบายข้างต้นแสดงดังอัลกอริทึม 4-5 โดยอัลกอริทึมนี้ต่อเนื่องจากอัลกอริทึมที่ 4-4

ALGORITHM 4-5:

RREP received function; final cost calculations, route selections, and route update process(ต่อยอดจากอัลกอริทึมที่ 4-4)

VARIABLES: *State, W₁, W₂, Final_Cost_i, Max. Delay_Cost_i, Max. Energy_Cost_i, rt, Destination_Sequence_Number_in_RREP, Destination_Sequence_Number_in_RoutingTable, Final_Cost_in_RoutingTable, Source_Address_in_RREP, My_Address*

BEGIN

```

(1) //CALCULATE THE FINAL COST
(2) //Weight setting
(3) //For transient state
(4) IF (State = 1) THEN
(5)     Set  $W_1 = 1$  and  $W_2 = 0$ ;
(6) END IF
(7) //For steady state
(8) IF (State = 2) THEN
(9)     Set  $W_1 = 0$  and  $W_2 = 1$ ;
(10) END IF
(11) //Calculate the final cost
(12)  $Final\_Cost_i = (W_1 \times Max\_Delay\_Cost_i) + (W_2 \times Max\_Energy\_Cost_i)$ ;
(13) /*RECORD THE FINAL COST IN THE ROUTING TABLE AND SELECT THE
    BEST ROUTE*/
(14) //The final cost is equal to 0 in the routing table (rt)
(15) IF (rt = 0) THEN
(16)     Record the  $Final\_Cost_i$  in the routing table;
(17)     Add the forward pointer;
(18) END IF

```

ALGORITHM 4-5:

RREP received function; final cost calculations, route selections, and route update process(ต่อยอดจากอัลกอริทึมที่ 4-4)

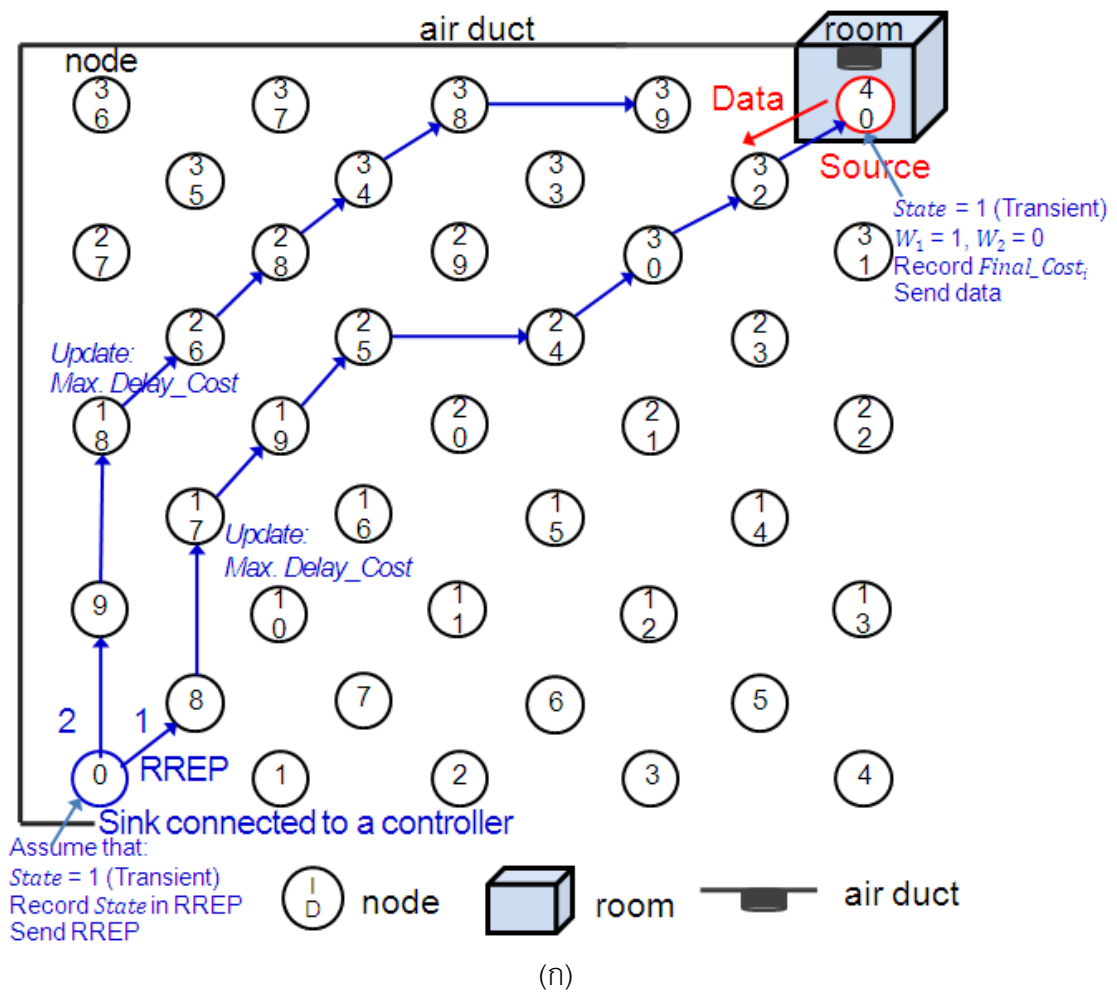
```

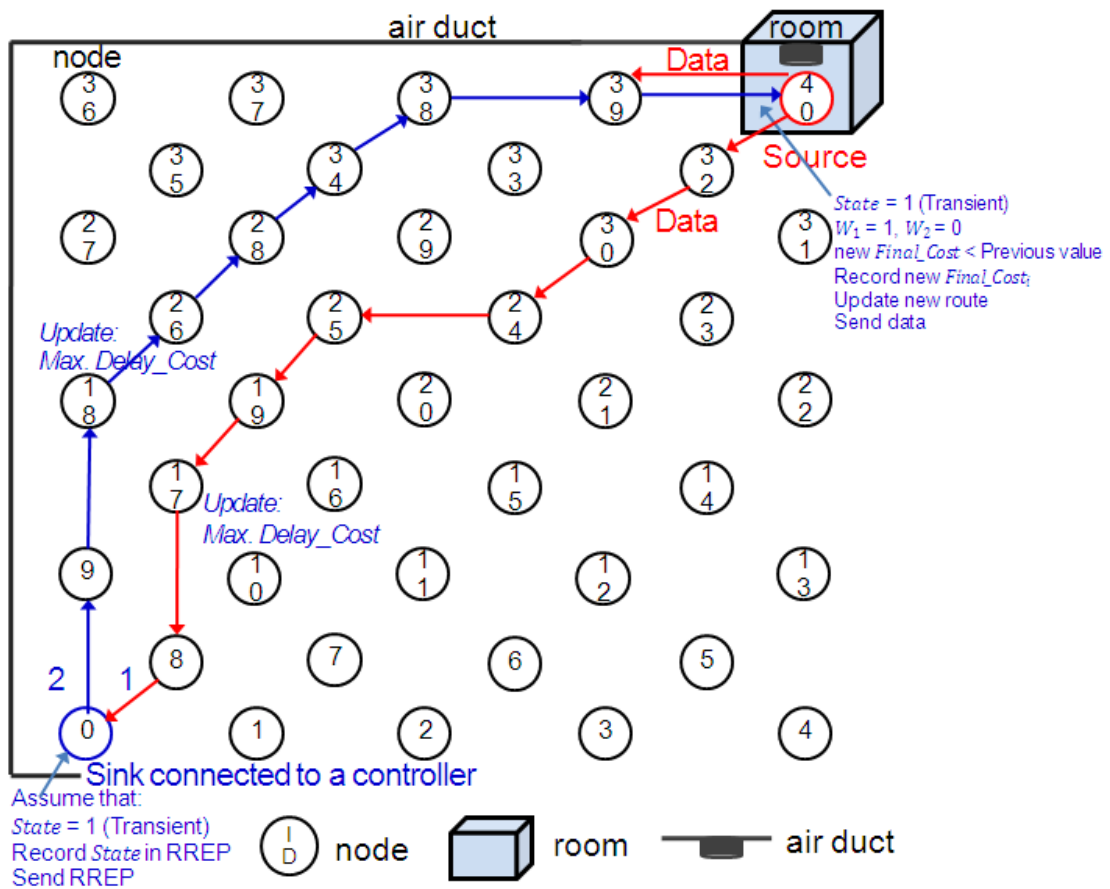
(19) /*The Final cost is not equal to 0 in the routing table, and the
      destination sequence number in the RREP is equal to the destination
      sequence number in the routing table*/
(20) IF ((rt != 0) and (Destination_Sequence_Number_in_RREP =
      Destination_Sequence_Number_in_RoutingTable)) THEN
(21)   IF (Final_Costi >= Final_Cost_in_RoutingTable) THEN
(22)     Discard the RREP message;
(23)   ELSE
(24)     Record the Final_Costi in the routing table;
(25)     Update the forward pointer;
(26)   END IF
(27) END IF
(28) /*The final cost is not equal to 0 in the routing table, and the destination
      sequence number in the RREP is higher than the destination sequence
      number in the routing table*/
(29) IF ((rt != 0) and (Destination_Sequence_Number_in_RREP >
      Destination_Sequence_Number_in_RoutingTable)) THEN
(30)   Record the Final_Costi in the routing table;
(31)   Update the forward pointer;
(32) END IF
(33) //FOR THE ORIGINAL SOURCE NODE
(34) IF (Source_Address_in_RREP = My_Address) THEN
(35)   Record the State in the routing table;
(36)   Send all data packets in the queue;
(37) //FOR A RELAY NODE
(38) ELSE
(39)   Forward the RREP message;
(40) END IF

```

ตัวอย่างกระบวนการเลือกเส้นทางโดยโหนดต้นทางแสดงดังภาพประกอบที่ 4-3 (ก) และ (ข) ในที่นี้ ผู้วิจัยสมมติให้ค่า $ETED$ ของทั้งเส้นทางหมายเลข 1 และ 2 มีค่าน้อยกว่าค่า $ETED_Threshold$ ดังนั้นทั้งสองเส้นทางจะถูกพิจารณาในกระบวนการเลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูล ในภาพประกอบที่ 4-3 (ก) เมื่อโหนดต้นทางรับข้อความ RREP จากเส้นทางหมายเลข 1 โหนดต้นทางจะคำนวณค่า $Final_Cost_i$ โดยอาศัยค่า W_1 และ W_2 ที่กำหนดจากตัวแปร $State$ และค่า $Max_Delay_Cost_i$ หรือค่า $Max_Energy_Cost_i$ ที่ได้จากข้อความ RREP โดยโหนดต้นทางจะเก็บค่า $Final_Cost_i$ ไว้ในตารางเส้นทาง และจะทำการส่งข้อมูลที่วัดได้จากสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุมไปยังโหนดปลายทางในทันที ในภาพประกอบที่ 4-3 (ข) ในการจัด

เส้นทางครั้งเดียวกันนี้ โหนดต้นทางรับข้อความ RREP มาจากเส้นทางหมายเลข 2 เพิ่มเติมและพบว่าค่า $Final_Cost_i$ ที่คำนวณได้จากเส้นทางใหม่น้อยกว่าค่า $Final_Cost_i$ ที่โหนดเก็บไว้ในตารางเส้นทางจากเส้นทางหมายเลข 1 ดังนั้นโหนดต้นทางจะสลับเส้นทางการส่งข้อมูลไปใช้เส้นทางหมายเลข 2 แทน เนื่องจากในเส้นทางหมายเลข 2 มีจุดอ่อนของเส้นทางหรือค่า delay cost สูงสุด ต่ำกว่าค่า delay cost สูงสุดของเส้นทางหมายเลข 1



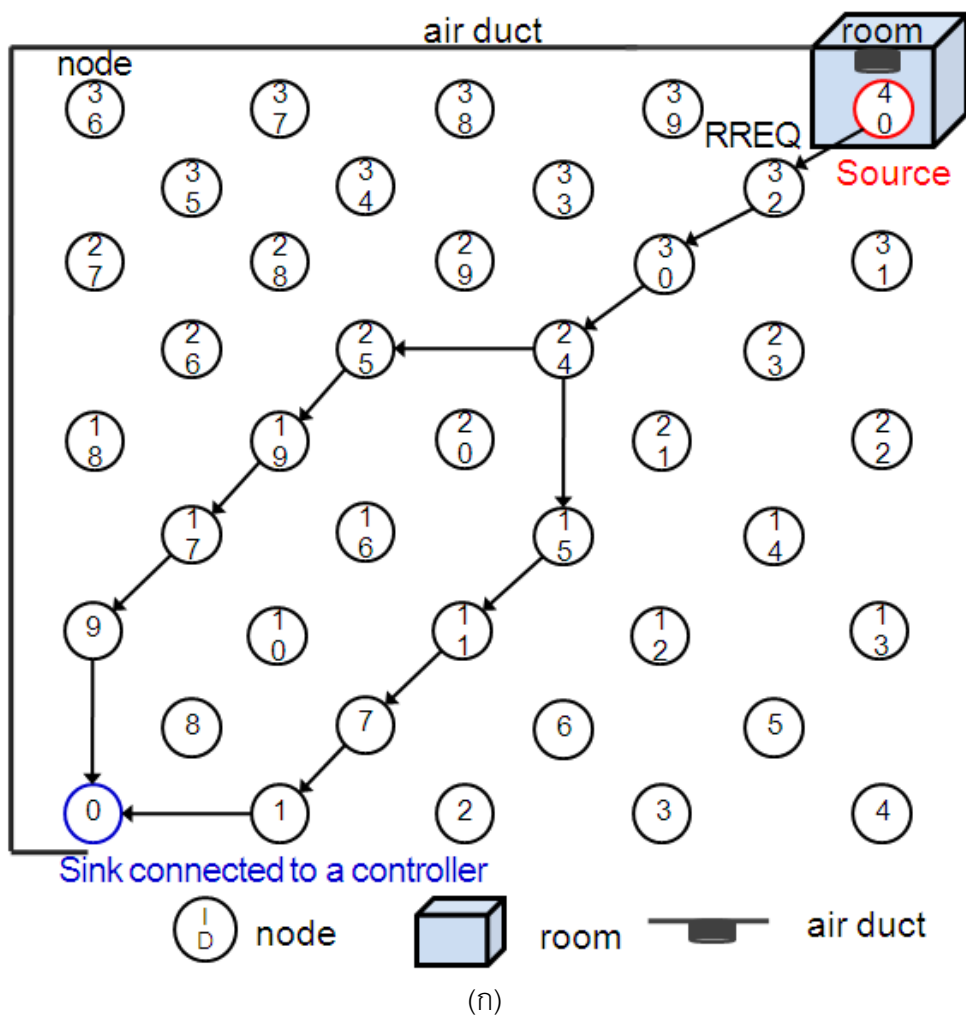


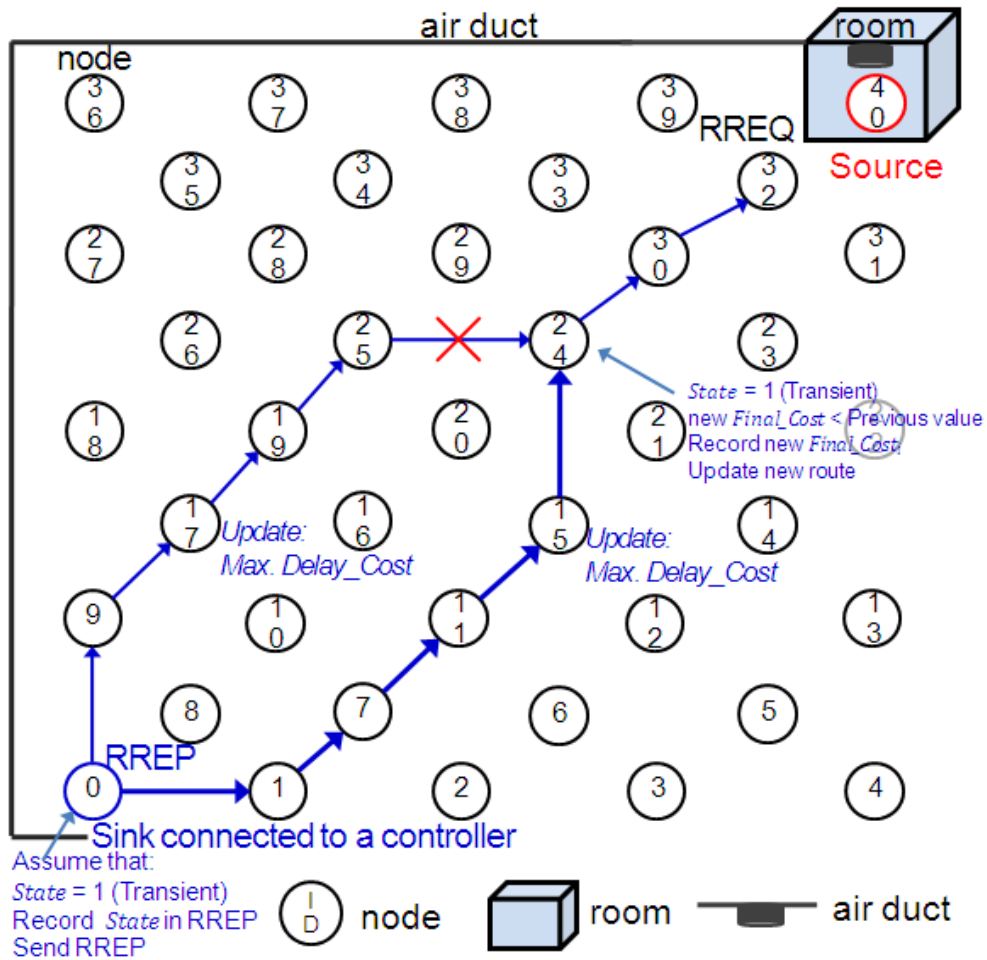
(ข)

ภาพประกอบ 4-3 กระบวนการเลือกเส้นทาง (ก) โหนดต้นทางรับข้อความ RREP ลำดับแรกเข้ามาและทำการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง (ข) โหนดต้นทางรับข้อความ RREP ลำดับที่สองเข้ามาและตัดสินใจสลับเส้นทางการส่งข้อมูล หมายเหตุ: ผู้วิจัยสมมติให้หมายเลข 1 และ 2 ที่แสดงในภาพในตำแหน่งเหนือโหนด ID 0 คือเส้นทางลำดับที่ 1 และ 2 ที่โหนด ID 0 ส่งข้อความ RREP ออกไป

ตัวอย่างกรณีนี้ที่โหนดระหว่างทางรับข้อความ RREP จากโหนดข้างเคียงมากกว่าหนึ่งข้อความในการจัดเส้นทางครั้งเดียวกัน แสดงดังตัวอย่างในภาพประกอบที่ 4-4 (ก) และ (ข) สมมติให้ภาพประกอบ (ก) ข้อความ RREQ ถูกส่งออกจากโหนด ID 24 สองเส้นทางคือเส้นทางไปยังโหนด ID 15 และโหนด ID 25 โดยที่โหนดปลายทางหรือโหนด ID 0 สามารถรับข้อความ RREQ จากสองเส้นทางนี้ด้วยเงื่อนไขจำนวน hop-count ที่เท่ากัน จากนั้นโหนด ID 0 จะตอบข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางแสดงดังภาพประกอบที่ 4-4 (ข) สมมติให้โหนด ID 24 รับข้อความ RREP จากโหนด ID 25 ในลำดับแรก โหนด ID 24 จะคำนวณและเก็บค่า $Final_Cost_i$ ไว้ในตารางเส้นทางของโหนดเองตลอดจนจดจำไว้ว่าโหนดถัดไปที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางคือ

โหนด ID 25 หลังจากนั้นเมื่อโหนด ID 24 รับข้อความ RREP จากโหนด ID 15 และพบว่าค่า $Final_Cost_i$ ที่คำนวณได้ใหม่นี้ต่ำกว่าค่าที่เก็บไว้ในตารางเส้นทางซึ่งก็คือค่า $Final_Cost_i$ ที่ได้จากเส้นทางของโหนด ID 25 ดังนั้นโหนด ID 24 จะทำการปรับปรุงตารางเส้นทางทันทีโดยการบันทึกค่า $Final_Cost_i$ ใหม่ และจดจำว่าโหนดถัดไปที่จะส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางคือโหนด ID 15 เมื่อเสร็จกระบวนการดังอธิบายนี้ โหนด ID 24 จะทำการส่งต่อข้อความ RREP กระทั่งข้อความ RREP ถูกส่งถึงโหนดต้นทาง





(ข)

ภาพประกอบ 4-4 กระบวนการเลือกเส้นทางโดยโหนดระหว่างทาง (ก) โหนด ID 24 ส่งออกข้อความ RREQ ไปยังสองเส้นทางคือเส้นทางไปยังโหนด ID 15 และโหนด ID 25 (ข) โหนด ID 24 รับข้อความ RREP ลำดับแรกและลำดับที่สอง และตัดสินใจปรับปรุงตารางเส้นทาง

4.4.3 กระบวนการนำส่งข้อมูล

เมื่อโหนดต้นทางสามารถเลือกเส้นทางได้สำเร็จจากกระบวนการเลือกเส้นทาง โหนดต้นทางจะทำการส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปยังโหนดปลายทางตามเส้นทางที่เลือกไว้ในทุก ๆ ช่วงเวลาชักตัวอย่างที่กำหนด (sampling period) ในระหว่างการส่งข้อมูล โหนดต้นทางจำเป็นต้องเฝ้าสังเกตสถานะของระบบควบคุมเพื่อติดตามผลลัพธ์จากการควบคุม ถ้าระบบควบคุมสามารถเปลี่ยนจากสถานะชั่วคราวเข้าสู่สถานะอยู่ตัว โหนดต้นทางจำเป็นต้องทำกระบวนการสร้างเส้นทางใหม่ โดยจะใช้ energy cost (ตัวแปร *Energy_Cost*) เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง เช่นเดียวกัน ถ้าในการจัดเส้นทางครั้งก่อนหน้าระบบควบคุมอยู่ในสถานะอยู่ตัว และ

เมื่อเวลาผ่านไประบบควบคุมได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมหรือผลกระทบจากความไม่แน่นอนของการสื่อสารไร้สายจนหลุดออกจากสภาวะอยู่ตัวไปเป็นสภาวะชั่วคราว โหนดต้นทางจำเป็นต้องทำกระบวนการสร้างเส้นทางใหม่ โดยการใช้ *delay cost* (ตัวแปร *Delay_Cost*) เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง ในโพรโทคอล RMCSR ตัวแปร *State* ที่โหนดต้นทางจดจำไว้ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางครั้งล่าสุด และค่า *Control_System_Error* ของระบบควบคุม ณ เวลาที่ส่งข้อมูลปัจจุบันถูกใช้ประโยชน์สำหรับเฝ้าระวังเหตุการณ์ที่อธิบายข้างต้น กล่าวคือ ถ้าตัวแปร *State* มีค่าเท่ากับ 1 และค่า *Control_System_Error* มีค่าน้อยกว่า 0.02 แสดงว่า ณ เวลาปัจจุบันระบบควบคุมได้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว โหนดต้นทางจะทำการค้นเส้นทางใหม่ เช่นเดียวกัน ถ้าตัวแปร *State* มีค่าเท่ากับ 2 และค่า *Control_System_Error* มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.02 แสดงว่า ณ เวลาปัจจุบันระบบควบคุมกลับไปสู่สภาวะชั่วคราว โหนดต้นทางจะทำการค้นหาเส้นทางใหม่เช่นกัน โดยที่ตัวแปร *State* เท่ากับ 1 และ 2 คือ สภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ณ เวลาจัดเส้นทางครั้งก่อนหน้า กระบวนการนำส่งข้อมูลที่โหนดต้นทางดังอธิบายในข้างต้นแสดงดังอัลกอริทึม 4-6

ALGORITHM 4-6:

Data delivery process at the source node

VARIABLES: *Control_System_Error, Designed_Value, Measured_Value, State*

BEGIN

(1) *Control_System_Error* = $|Desired_Value - Measured_Value|$

(2) //TRANSIENT STATE TO STEADY STATE

(3) **IF** (*Control_System_Error* < 0.02) **and** (*State* = 1) **THEN**

(4) Initialize a route establishment process;

(5) **END IF**

(6) //STEADY STATE TO TRANSIENT STATE

(7) **IF** (*Control_System_Error* ≥ 0.02) **and** (*State* = 2) **THEN**

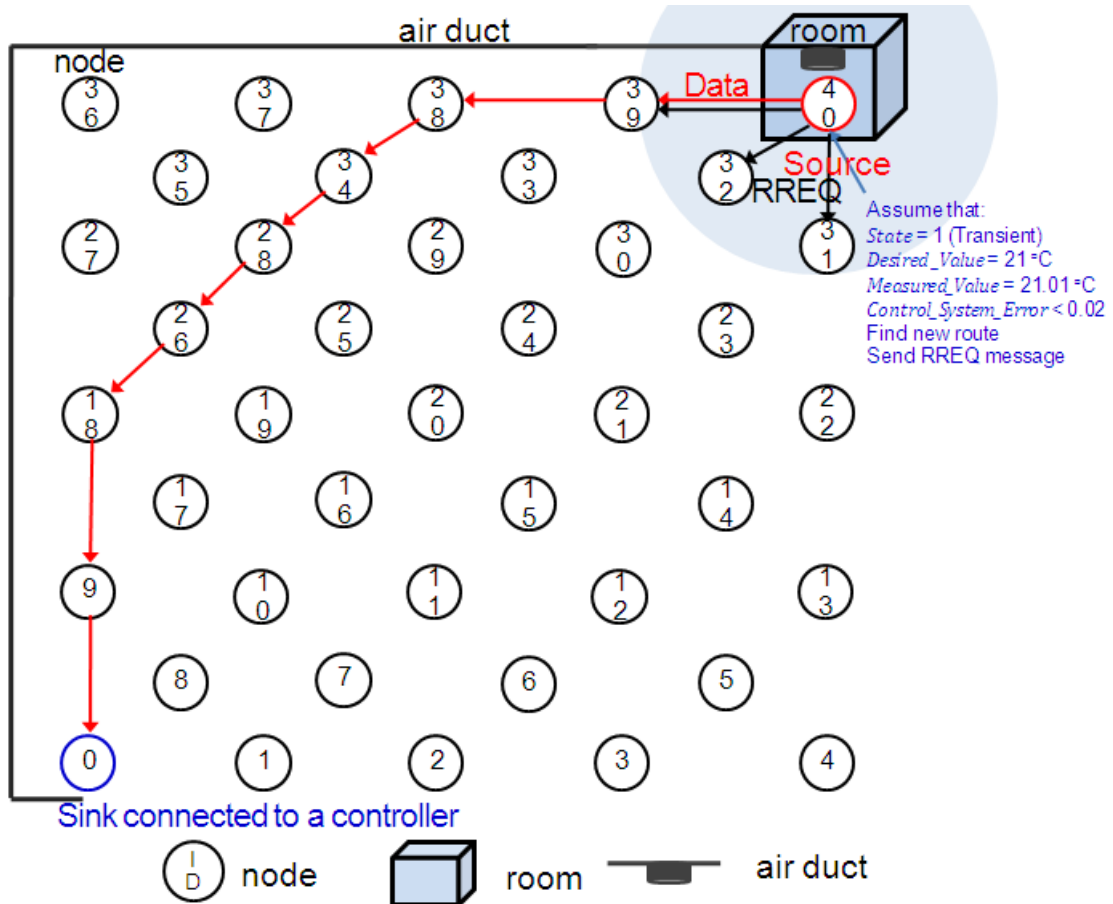
(8) Initialize a route establishment process;

(9) **END IF**

END

ตัวอย่างกระบวนการนำส่งข้อมูลที่โหนดต้นทางแสดงดังภาพประกอบที่ 4-5 (ต่อเนื่องจากภาพประกอบที่ 4-3) ผู้วิจัยสมมติให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวหลังจากส่งข้อมูลไประยะหนึ่ง โดยโหนดสามารถตรวจสอบได้จากค่า *Control_System_Error* น้อยกว่า 0.02 (สมมติให้ *Desired_Value* เท่ากับ 21 องศาเซลเซียส และ *Measured_Value* เท่ากับ 21.01 องศาเซลเซียส) กำหนดให้ตัวแปร *State* จากการเลือกเส้นทางครั้งล่าสุดเท่ากับ 1 (สภาวะชั่วคราว) ซึ่งโหนด

ต้นทางได้บันทึกไว้ ดังนั้นเมื่อโหนดตรวจสอบพบว่าระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว แต่ยังคงใช้เส้นทางที่เลือกจาก delay cost อยู่ โหนดต้นทางจะเริ่มกระบวนการจัดเส้นทางใหม่โดยการส่งข้อความ RREQ กระจายไปในเครือข่าย ดังอธิบายในหัวข้อ 4.3.2.1 โดยที่เส้นทางที่ถูกเลือกเพื่อส่งข้อมูลจะเป็นเส้นทางที่ให้ค่า $Max. Energy_Cost_i$ ต่ำสุดแทน

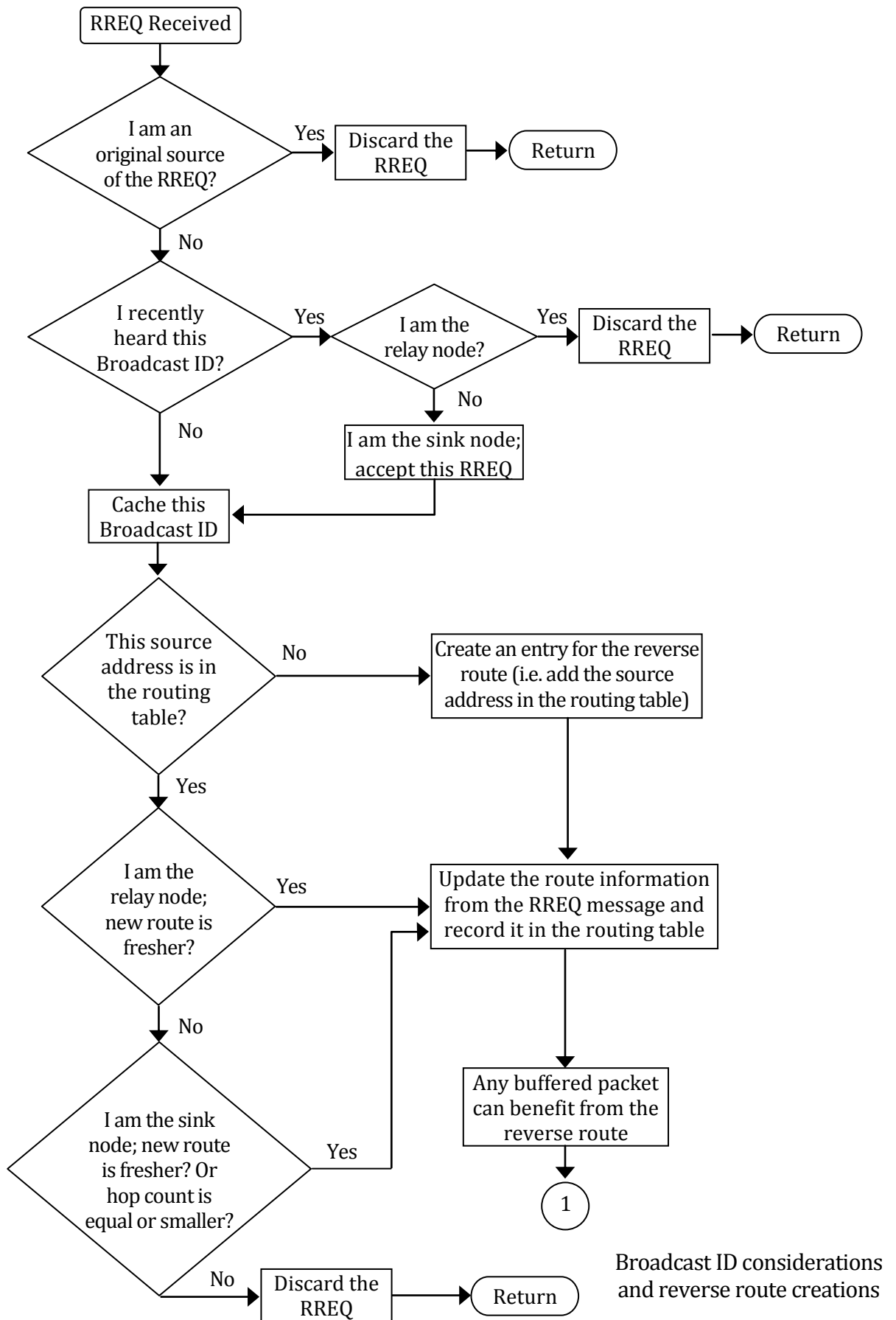


ภาพประกอบ 4-5 กระบวนการนำส่งข้อมูลที่โหนดต้นทาง

4.5 สรุปผังงานกระบวนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR

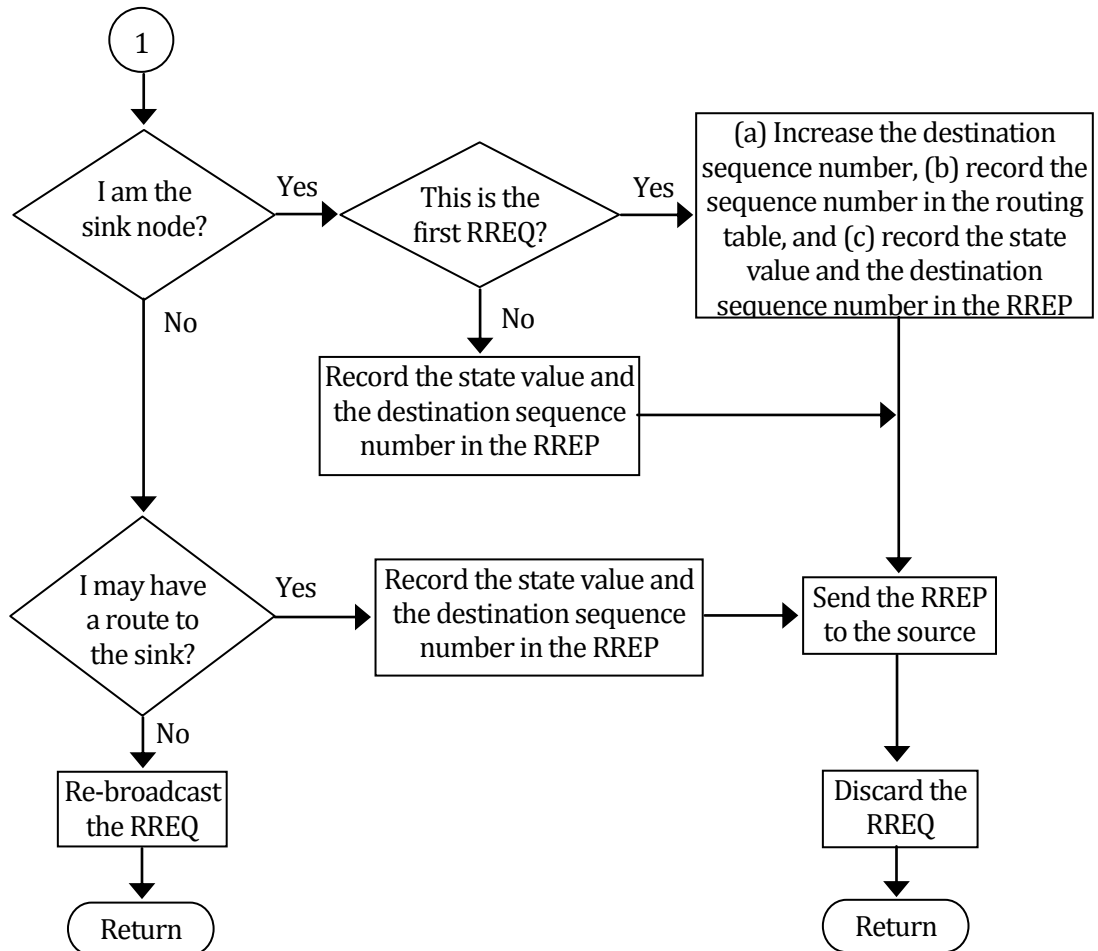
กระบวนการทำงานของโพรโทคอล RMCSR ดึงนำเสนอมานี้จากเนื้อหาในหัวข้อที่ 4-4 ทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปผังงานด้านล่าง โดยที่ ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREQ กรณีการพิจารณาค่า Broadcast ID และการสร้าง reverse route ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREQ กรณีการบันทึกค่า State การกำหนดค่า sequence number และการส่งต่อข้อความ RREQ และข้อความ RREP ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREP กรณีการคำนวณค่า

end-to-end delay ค่า delay cost ค่า energy cost และค่า final cost ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREP กรณีการเลือกเส้นทางและการบันทึกค่า final cost ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREP กรณีการสร้าง forward route การส่งต่อข้อความ RREP และการส่งข้อมูล และภาพประกอบที่ 4-11 แสดงผังงานแสดงกระบวนการตรวจสอบสถานะของระบบควบคุมก่อนทำการส่งข้อมูลที่โหนดต้นทาง ผู้วิจัยไม่อธิบายกระบวนการทำงานของโพรโทคอล RMCSR จากผังงานในภาพประกอบที่ 4-6 ถึง 4-11 นี้ใหม่ซ้ำ ทั้งนี้เนื่องจากได้อธิบายรายละเอียดทั้งหมดไว้ในหัวข้อที่ 4.4 แล้ว หมายเหตุ สำหรับการวิเคราะห์ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR เปรียบเทียบกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV อธิบายเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ง



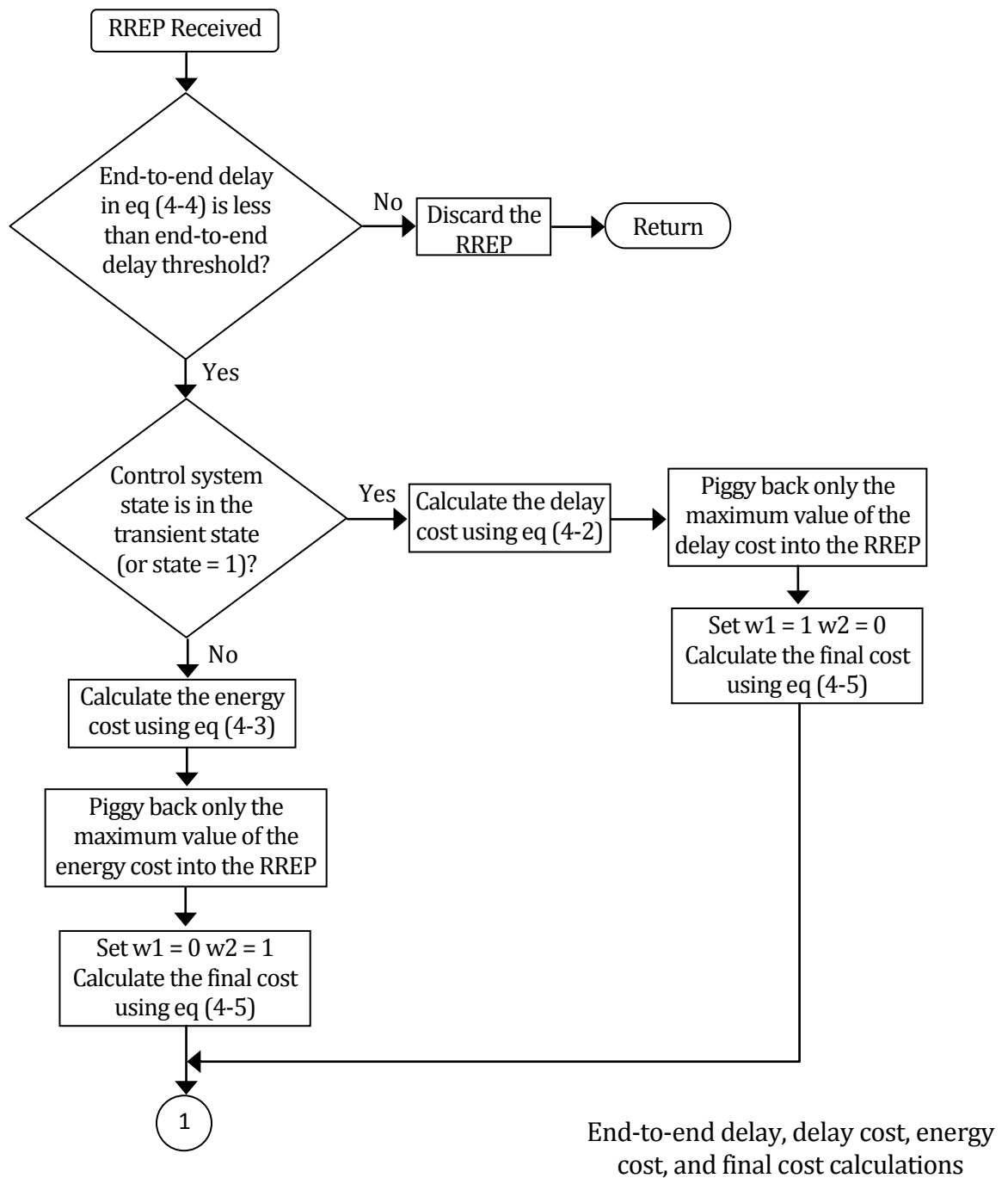
Broadcast ID considerations and reverse route creations

ภาพประกอบ 4-6 ฝั่งงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREQ กรณีการพิจารณาค่า Broadcast ID และการสร้าง reverse route

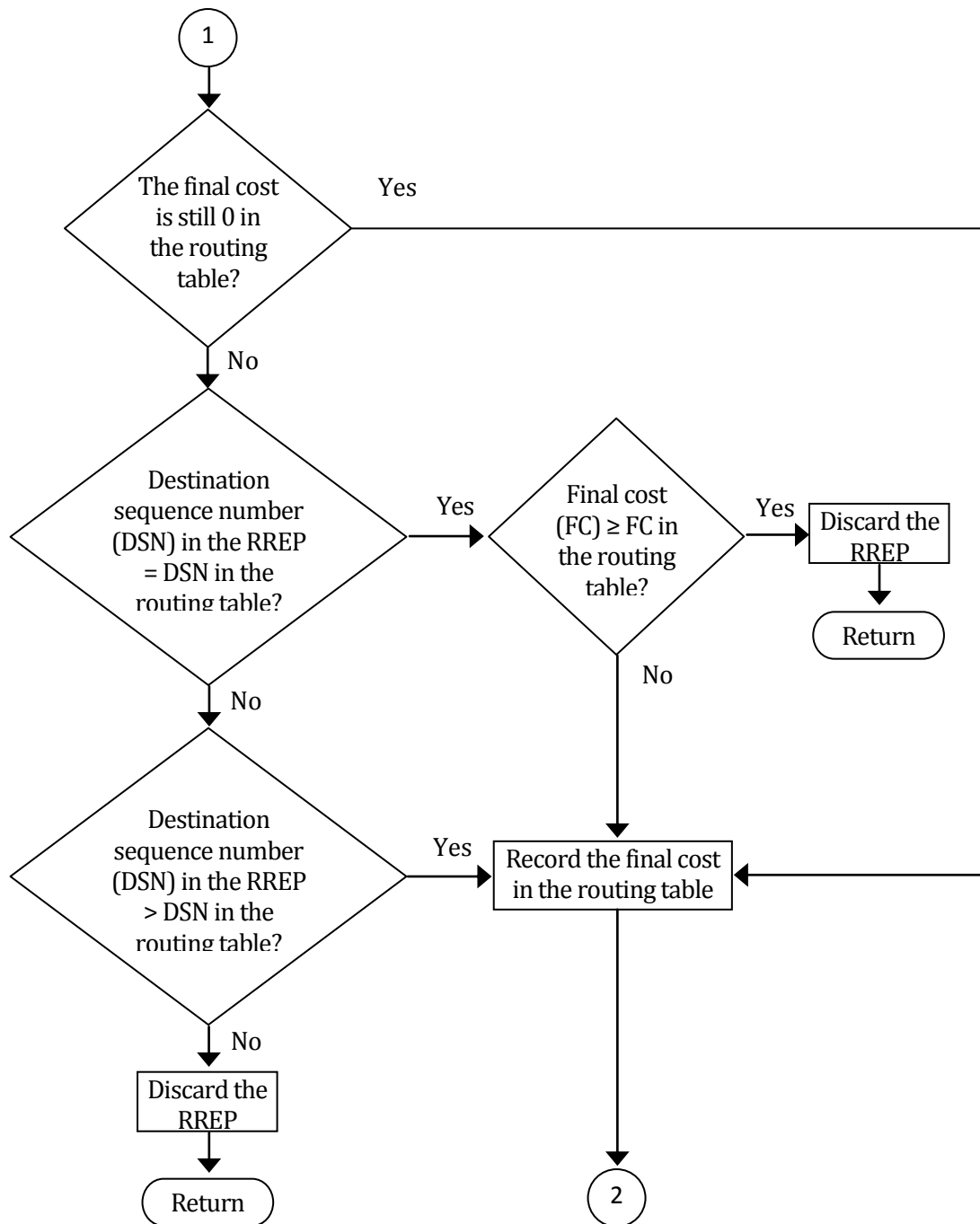


State registrations, sequence number assignments, RREQ and RREP forwarding

ภาพประกอบ 4-7 ผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREQ กรณีการบันทึกค่า State การกำหนดค่า sequence number และการส่งต่อข้อความ RREQ และข้อความ RREP

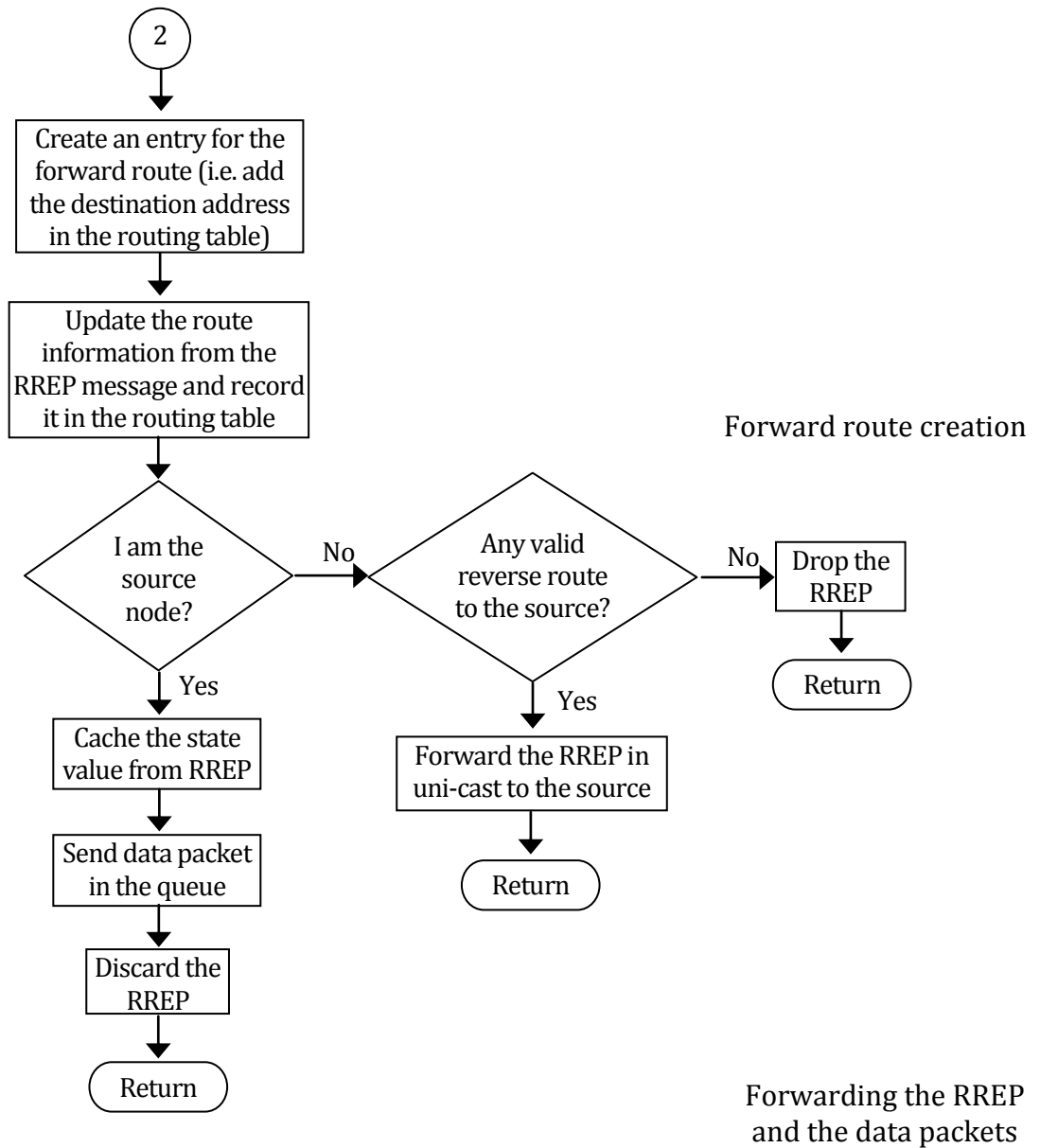


ภาพประกอบ 4-8 ผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREP กรณีการคำนวณค่า end-to-end delay ค่า delay cost ค่า energy cost และค่า final cost

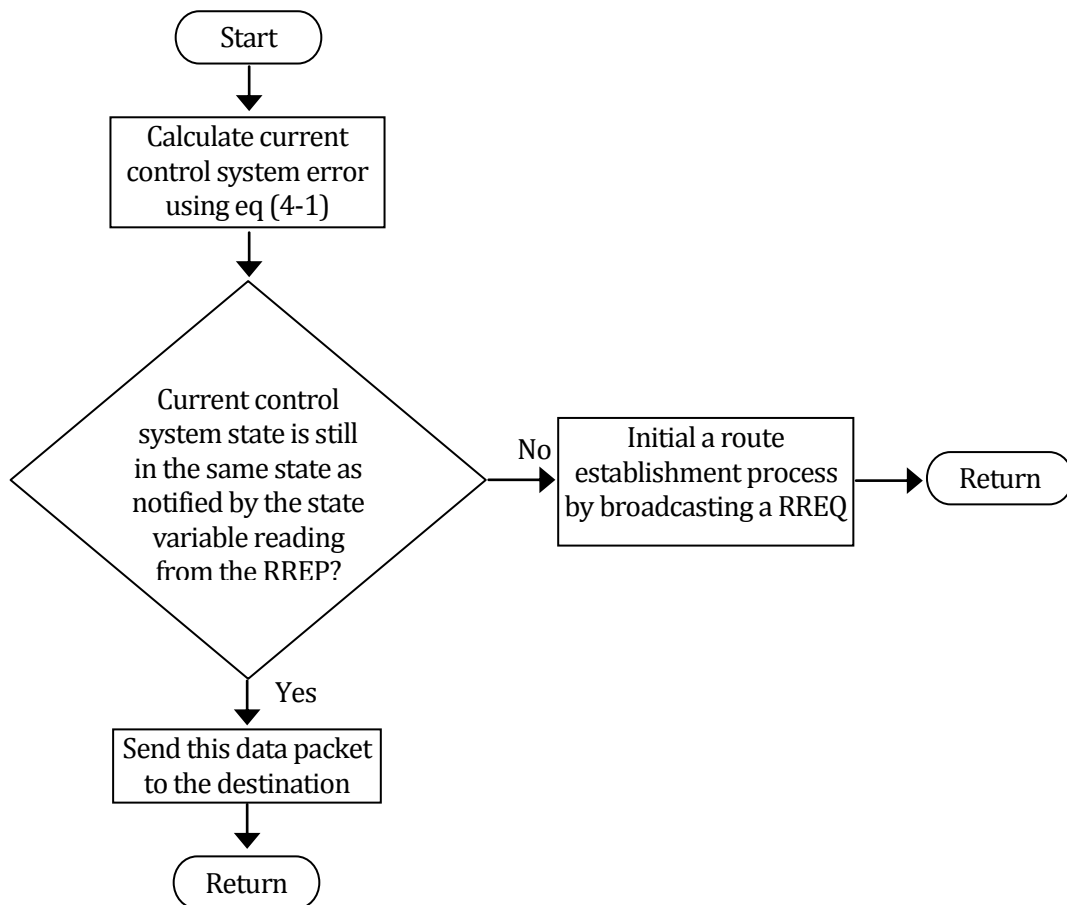


Route selections and final cost registrations

ภาพประกอบ 4-9 ผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREP กรณีการเลือกเส้นทาง และการบันทึกค่า final cost



ภาพประกอบ 4-10 ผังงานแสดงกระบวนการรับ-ส่งข้อความ RREP กรณีการสร้าง forward route การส่งต่อข้อความ RREP และการส่งข้อมูล



ภาพประกอบ 4-11 ผังงานแสดงกระบวนการตรวจสอบสถานะของระบบควบคุมก่อนทำการส่งข้อมูลโดยโหนดต้นทาง

บทที่ 5

การจำลองการทำงาน ผลการจำลอง และการอภิปรายผล

5.1 บทนำ

บทนี้แสดงรายละเอียดการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR ดังที่ได้นำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 ผู้วิจัยทำการทดสอบโพรโทคอล RMCSR เปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV ในกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร ด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย รายละเอียดของระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ก่อนหน้า ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้เพิ่มแบบจำลองการสูญหายของแพ็กเก็ตลงไปในการจำลองการทำงาน เพื่อจำลองพฤติกรรมการสูญหายของแพ็กเก็ตจากการสื่อสารไร้สายกรณีสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อนิววิธีการจัดเส้นทางและระบบควบคุมที่ศึกษา ในการศึกษาและประเมินสมรรถนะของระบบ มีการทดสอบการจำลองการทำงาน (simulation test) 5 รูปแบบที่แตกต่างกัน คือ ก) โพรโทคอล RMCSR ภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต (packet loss rate) ในระดับที่ต่างกัน ข) โพรโทคอล RMCSR ภายใต้การปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด (number of nodes) ในระดับที่ต่างกัน ค) โพรโทคอล RMCSR ภายใต้การปรับเปลี่ยนระยะเวลาการชักตัวอย่าง (sampling periods) ในระดับที่ต่างกัน ง) โพรโทคอล RMCSR ภายใต้การรบกวนของสภาพแวดล้อม (environmental disturbances) และ จ) โพรโทคอล RMCSR ภายใต้การปรับเปลี่ยนค่า *ETED_Threshold* ในระดับที่ต่างกัน

ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของการควบคุมสัมพัทธ์โดยตรงกับกระบวนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง โดยที่โพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR สามารถเพิ่มสมรรถนะทั้งด้านการสื่อสารและสมรรถนะทั้งด้านการควบคุมได้สูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต จำนวนโหนด และระยะเวลาการชักตัวอย่าง นอกจากนี้ โพรโทคอล RMCSR ยังสามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าโพรโทคอล AODV ในกรณีที่ระบบควบคุมถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม และท้ายสุด การกำหนดใช้ *ETED_Threshold* ที่เหมาะสมสำหรับโพรโทคอล RMCSR สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบทั้งทั้งทางการสื่อสารและด้านการควบคุม จึงสรุปได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR สามารถประยุกต์ใช้งานได้ ในกรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย

เนื้อหาในบทที่ 5 ประกอบด้วยหัวข้อย่อยต่อไปนี้เป็นหัวข้อที่ 5.2 อธิบายการออกแบบการจำลองการทำงาน (simulation setup) โดยจะรวมถึงวัตถุประสงค์ของการจำลอง คำาโครงเรื่องในการจำลอง (simulation scenario) พารามิเตอร์ที่กำหนด (simulation parameters) ให้แก่การจำลองการทำงานทั้ง 5 รูปแบบข้างต้น และตัววัดสมรรถนะ (performance metric) ที่กำหนดใช้ทั้งทางด้านการสื่อสารและการควบคุม และหัวข้อที่ 5.3 อธิบายผลการจำลอง และการอภิปรายผล

5.2. การออกแบบการจำลองการทำงาน (simulation setup)

เพื่อศึกษาและประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR กรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร ผู้วิจัยจำลองการทำงานด้วยเครื่องมือ ชื่อ PiccSIM simulator [13] ดังที่ได้เคยอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ PiccSIM เป็นเครื่องมือจำลองการทำงานที่นำเอาโปรแกรม NS2 รุ่น 2.33 และโปรแกรม MATLAB/Simulink มาทำงานร่วมกันอย่างอัตโนมัติ ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายรวมทั้งโพรโทคอลการสื่อสารจำลองโดยโปรแกรม NS2 ในขณะที่ระบบควบคุม เช่น แบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง ตัวควบคุมแบบพีไอดี และแอกชูเอเตอร์ จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และดังที่ได้เกริ่นนำไว้ข้างต้น ในการศึกษาี้ สามารถแบ่งการจำลองการทำงานเป็น 5 รูปแบบที่แตกต่างกัน

5.2.1 วัตถุประสงค์ของการจำลอง

ผู้วิจัยเลือกศึกษาการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอใน 5 ประเด็นดังอธิบายข้างต้นเนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้ กรณีการทดสอบการปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเกตในข้อ ก) ดังได้อธิบายไว้ในปัญหาการวิจัยในบทที่ 1 ก่อนหน้า การสูญหายของแพ็กเกตในระหว่างการสื่อสารเกิดขึ้นเป็นปกติในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์ไร้สาย โดยเฉพาะกรณีการสื่อสารแบบหลาย ๆ ทอด ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร จากปัญหาดังกล่าวตัวควบคุมหรือแอกชูเอเตอร์อาจไม่สามารถรับแพ็กเกตที่ส่งจากโหนดต้นทาง หรืออาจรับแพ็กเกตได้ล่าช้า จนไม่สามารถควบคุมระบบที่สนใจได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมแบบวงปิดต่ำลง โดยความรุนแรงของปัญหาดังอธิบายนี้จะมากขึ้น เมื่อมีการสูญหายของแพ็กเกตจำนวนมากเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง [12] ดังนั้น ภายใต้การกำหนดอัตราการสูญหายของแพ็กเกตในเครือข่ายที่แตกต่างกัน โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอสามารถรับมือกับปัญหานี้อย่างไร และส่งผลต่อสมรรถนะทางด้านการสื่อสารและการควบคุมอย่างไร จึงถูกศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

ในกรณีการทดสอบการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดในข้อ ข) สำหรับกรณีการทดสอบที่กำหนดขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ การเพิ่มโหนดในเครือข่ายให้มีจำนวนมากขึ้น และกำหนดพื้นที่

ทดสอบในการวางโหนดให้มีขนาดใหญ่ตาม (ความหนาแน่นของจำนวนโหนดต่อขนาดพื้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.2.2 ต่อไป) จะทำให้ระยะทางการสื่อสารหรือจำนวนฮอประหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของจำนวนโหนดและระยะทางการสื่อสารนี้จะส่งผลให้มีโอกาสเจออุปสรรคและปัญหาในระหว่างการสื่อสารมากขึ้นตามมา ตัวอย่างเช่น มีจำนวนการให้สัญญาณในเครือข่ายมากขึ้น มีจำนวนโหนดที่อยู่ในขอบเขตการได้ยินสัญญาณมากขึ้น หรือสามารถส่งสัญญาณวิทยุรบกวนกันได้มากขึ้น และมีโอกาสเกิดความล่าช้าและการสูญหายของแพ็กเก็ตที่ส่งมากขึ้นระหว่างการสื่อสารในระยะทางที่ไกลขึ้น เป็นต้น โดยที่ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่น่าเสนอ ตลอดจนผลลัพธ์ทั้งทางด้านการสื่อสารและทางด้านการควบคุมโดยตรง

ในกรณีการทดสอบการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างในข้อ ค) ช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างของโหนดต้นทางแสดงจังหวะการตรวจวัดข้อมูลและการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง ช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างส่งผลต่อความถี่ในการส่งรับแพ็กเก็ตของโหนด ปริมาณโหนดที่เกิดขึ้นในเครือข่าย การใช้พลังงานของโหนด โอกาสการเกิดการสูญหายและความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตในเครือข่าย ตลอดจนจังหวะการรับข้อมูลและจังหวะการทำงานของตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ ประกอบกับจากผลการจำลองการทำงานที่น่าเสนอในภาคผนวก ก ในหัวข้อผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างต่อสมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร กรณีการจำลองการทำงานด้วยเครือข่ายไร้สายระยะหนึ่งฮอปและกำหนดใช้งานโพรโทคอล AODV แสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมแบบป้อนกลับโดยตรง การกำหนดใช้ช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างที่เหมาะสมตามทฤษฎีการควบคุม ซึ่งอยู่ในช่วง $T/10$ ถึง $T/4$ [91, 92] ช่วยให้สามารถรักษาสสมรรถนะของการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่น่าเสนอภายใต้เครือข่ายสื่อสารไร้สายแบบหลายทอด ในกรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร เพื่อทดสอบทฤษฎีการกำหนดใช้ช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างที่เหมาะสมดังอธิบาย และเพื่อทดสอบหาช่วงเวลาการซักรหัสตัวอย่างที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้เลือกประเด็นดังอธิบายนี้มาทำการทดสอบ

ในกรณีการทดสอบการรบกวนของสภาพแวดล้อมต่อระบบควบคุมในข้อ ง) สภาพวะของระบบควบคุมใด ๆ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาในระหว่างทำการควบคุม อันเนื่องมาจากการรบกวนของสภาพแวดล้อมรอบข้าง ตัวอย่างเช่น ในกรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ผู้ใช้งานอาจเปิดประตูห้องที่ต้องการจะควบคุมอุณหภูมิค้างไว้ หรืออาจมีการเปิดประตูห้องเพื่อเข้าออกบ่อยครั้ง จากเหตุการณ์ดังกล่าวจะส่งผลให้อุณหภูมิจากภายในห้องเปลี่ยนแปลงไป

เนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิจากนอกห้องที่เข้ามาบรรจบกัน ซึ่งจะทำให้สถานะของระบบควบคุมในปัจจุบันเปลี่ยนแปลงไป เช่น เปลี่ยนจากสถานะอยู่ตัวสู่สภาวะชั่วคราว หรือไม่สามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ตามเป้าหมาย เป็นต้น และเนื่องด้วยโพรโทคอลการตัดสินทางที่นำเสนอมีกระบวนการเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาสถานะของระบบควบคุมเป็นเกณฑ์ ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้า ดังนั้นเพื่อทดสอบกระบวนการทำงานของโพรโทคอลการตัดสินทางที่ได้ออกแบบไว้ ตลอดจนเพื่อศึกษาความสามารถในการรับมือกับปัญหาที่เกิดขึ้นดังอธิบาย ผู้วิจัยจึงเลือกประเด็นนี้มาทดสอบ สำหรับในกรณีการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่า *ETED_Threshold* ในข้อ ๑) ผู้วิจัยกำหนดการทดสอบนี้ขึ้นเพื่อต้องการศึกษาว่าช่วงเวลา *ETED_Threshold* ที่กำหนดเป็นเกณฑ์ในการเลือกเส้นทางดังได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 4 จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการสื่อสารและสมรรถนะการควบคุมอย่างไร ตลอดจนเพื่อต้องการทดสอบหาค่า *ETED_Threshold* ที่เหมาะสมในกรณีที่ใช้งาน

การทดสอบและการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการตัดสินทางที่นำเสนอ นอกจากทั้ง 5 ประเด็นการทดสอบข้างต้นแล้ว ผู้วิจัยมีความเห็นว่า ยังคงมีประเด็นอื่น ๆ ที่ควรได้รับการศึกษาทดสอบเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่น ผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโหนดเซนเซอร์ ผลกระทบจากการเพิ่มจำนวนโหนดต้นทางหรือการเพิ่มจำนวนห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ ผลกระทบจากการวางตำแหน่งของโหนดต้นทาง ตัวควบคุม และแอคชูเอเตอร์ ผลกระทบจากการกำหนดทอพอโลยีที่แตกต่างกัน และผลกระทบจากความหนาแน่นของจำนวนโหนดต่อพื้นที่ที่ทดสอบเหล่านี้ เป็นต้น โดยแต่ละประเด็นการทดสอบดังกล่าวนี้จะให้ผลลัพธ์หรือองค์ความรู้ที่แตกต่างกันออกไป และจะได้พัฒนาต่อยอดโพรโทคอลการตัดสินทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยกรณีประเด็นการทดสอบเพิ่มเติมดังเสนอข้างต้นสามารถเป็นงานวิจัยในอนาคตต่อไป

5.2.2 เค้าโครงการจำลองการทำงานและพารามิเตอร์ที่กำหนด

5.2.2.1 โพรโทคอลการตัดสินทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเกต

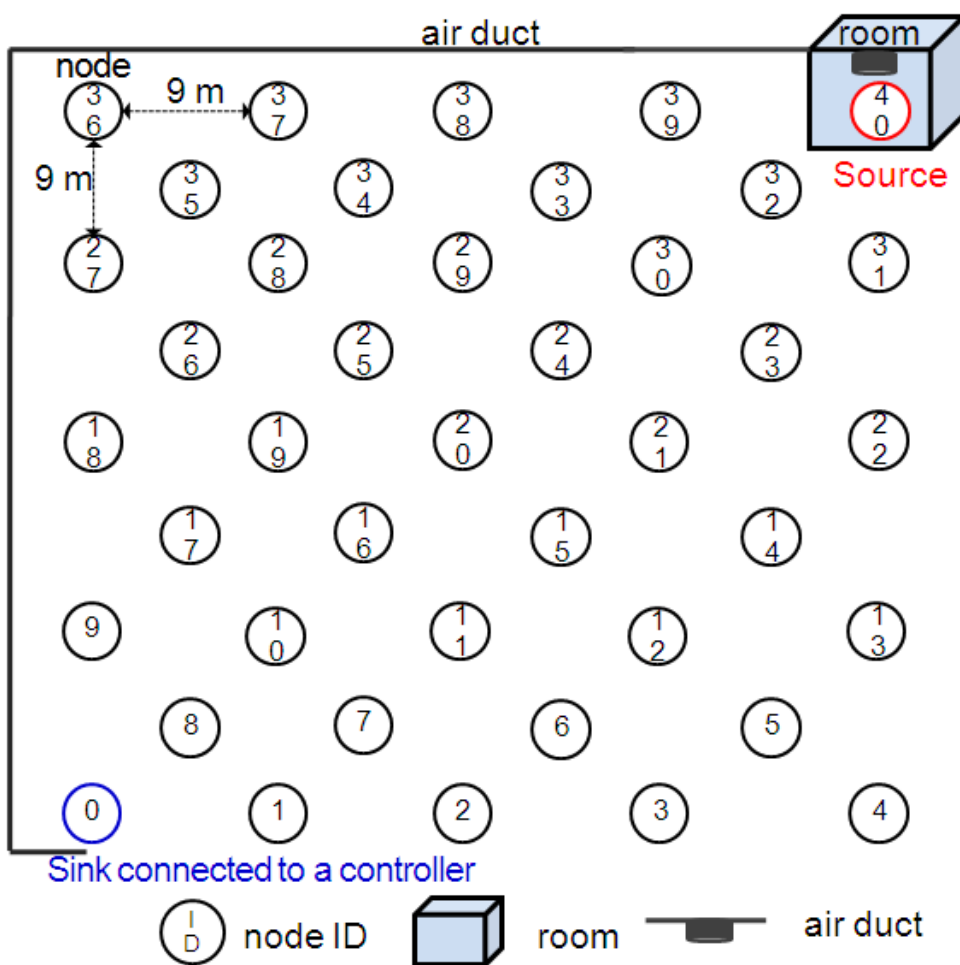
เพื่อศึกษาประเด็น อัตราการสูญหายของแพ็กเกตส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการตัดสินทางและการควบคุมอุณหภูมิในอาคารอย่างไร จำเป็นต้องกำหนดแบบจำลองการสูญหายของแพ็กเกตในการจำลองการทำงาน ดังได้เกริ่นนำไว้ก่อนหน้า ในวิทยานิพนธ์นี้ จำลองการสูญหายของแพ็กเกตด้วยแบบจำลอง Gilbert–Elliott (GE) รายละเอียดของแบบจำลองนี้ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 กำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเกตโดยเฉลี่ย (average packet loss probability หรือ P_{AVG}) มีค่าเท่ากับ 0.00 0.1225 0.245 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ อ้างอิงจาก

งานวิจัยที่ [12] สำหรับการคำนวณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ก่อนหน้าแล้ว นอกจากนี้ ในการทดสอบนี้ กำหนดระดับกันความล่าช้าที่อนุญาตให้ข้อความ RREP ส่งผ่านในเครือข่ายระหว่างโหนดปลายทางและโหนดต้นทาง (หรือ *ETED_Threshold*) ของขั้นตอนวิธีจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR เท่ากับ $T/7$ ดังได้อธิบายเหตุผลไว้ในบทที่ 4

สำหรับเค้าโครงเรื่องที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงดังภาพประกอบที่ 5-1 โหนด ID 40 คือโหนดต้นทาง ทำหน้าที่ตรวจวัดและเก็บค่าอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อม หรือห้องในอาคาร และส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง คือโหนด ID 0 ทุก ๆ ช่วงเวลาชักตัวอย่าง การทดสอบนี้กำหนดใช้ช่วงเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที [7] โหนดปลายทางจะส่งต่อค่าอุณหภูมิที่ได้จากโหนดเซนเซอร์ต้นทางไปยังตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ เพื่อทำการคำนวณและปรับอุณหภูมิภายในห้อง ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนด (set point) โดยการเป่าลมด้วยอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณผ่านทางท่อระบายอากาศ (air duct) ภายในอาคาร กำหนดให้โหนดทุกโหนดอยู่หนึ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่ ขอบเขตการสื่อสาร (transmission range) ของโหนดไม่เกินระยะหนึ่งฮอป โดยพารามิเตอร์ที่กำหนดให้โหนดอ้างอิงจากโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver [15, 63] การใช้พลังงานของโหนดอ้างอิงจากโมดูลสื่อสารนี้เช่นกัน และอาศัยแบบจำลองพลังงานในโปรแกรม NS2 เพื่อคำนวณการใช้พลังงานของโหนดระหว่างการจำลองการทำงาน โดยรายละเอียดของแบบจำลองพลังงานได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 สำหรับพารามิเตอร์ทั้งหมดที่กำหนดใช้ในการจำลองการทำงาน แสดงไว้ในตารางที่ 5-1

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนดขนาดแพ็กเก็ต (packet size) ของข้อความ RREP ในโพรโทคอล RMCSR เท่ากับ 40 ไบต์ เพิ่มจากขนาดแพ็กเก็ต RREP ของโพรโทคอล AODV เดิม 16 ไบต์ ซึ่งกำหนดไว้สำหรับเก็บค่า delay cost หรือค่า energy cost สูงสุด จำนวน 8 ไบต์ และค่าเวลาที่โหนดตัวส่งส่งข้อความ RREP (หรือ *RREP_Sending_Time*) ไว้เพื่อคำนวณค่า delay cost ระหว่างคู่โหนดสื่อสารใด ๆ จำนวนอีก 8 ไบต์ โดยรายละเอียดของส่วนที่เพิ่มเติมในข้อความ RREP ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.4.1.2 ดังนั้นเมื่อรวมส่วนหัว (header) ของชั้นเครือข่าย (network layer) อีก 20 ไบต์ ซึ่งเป็น IP header จะทำให้ข้อความ RREP มีขนาดเท่ากับ 60 ไบต์ สำหรับที่ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (MAC layer) ข้อความ RREP จะมีขนาด 67 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนของ MAC header จำนวน 5 ไบต์ และ MAC footer จำนวน 2 ไบต์ ท้ายสุด ที่ชั้นกายภาพ (physical layer) ข้อความ RREP จะมีขนาด 73 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนของ synchronization header จำนวน 5 ไบต์ และ PHY header จำนวน 1 ไบต์ โดยขนาดของ header ที่เพิ่มเข้ามาอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และในมาตรฐานนี้รองรับการขนาดแพ็กเก็ตได้ไม่เกิน 133

ไบต์ ที่ชั้นกายภาพ สำหรับกรณีข้อความ RREQ ทั้งโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR กำหนดให้แพ็กเก็ต RREQ มีขนาด 28 ไบต์ เท่ากัน และเมื่อรวมส่วนหัว (header) ของชั้นเครือข่าย อีก 20 ไบต์ ซึ่งเป็น IP header จะทำให้ข้อความ RREQ มีขนาดเท่ากับ 48 ไบต์ ถึงแม้ว่าในโพรโทคอล RMCSR จะมีการฝากค่า State ลงไปในข้อความ RREQ เพื่อบ่งบอกสถานะของระบบควบคุม ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4.1.1 ก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยไม่ได้เพิ่มขนาดของข้อความ RREQ แต่อย่างใด ค่า State จะถูกเก็บไว้ในส่วนสงวน (reserved) ของข้อความ จำนวน 1 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนที่โพรโทคอล AODV ได้มออนุญาตให้ใช้งาน สำหรับที่ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง ข้อความ RREQ จะมีขนาด 55 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนของ MAC header จำนวน 5 ไบต์ และ MAC footer จำนวน 2 ไบต์ สำหรับที่ชั้นกายภาพ ข้อความ RREQ จะมีขนาด 61 ไบต์ ซึ่งเป็นส่วนของ synchronization header จำนวน 5 ไบต์ และ PHY header จำนวน 1 ไบต์



ภาพประกอบ 5-1เค้าโครงเรื่องในการจำลองการทำงานกรณีการปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต

ตาราง 5-1 พารามิเตอร์ที่กำหนดใช้ในการจำลองการทำงาน

พารามิเตอร์ (คำอธิบาย/หน่วย)	ค่าที่ใช้งาน
เวลาในการจำลองการทำงาน (วินาที)	1000
ขนาดพื้นที่ทดสอบ (ตารางเมตร)	36 × 36
จำนวนโหนดในเครือข่าย (โหนด)	41
ขนาดบัพเฟออร์ (แพ็กเก็ต)	64 [98]
ช่วงเวลาซักรับตัวอย่าง (วินาที)	10 [7]
แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ	Log-distance path-loss model
อัตราการลดทอนสัญญาณวิทยุ	3.1 (Indoor) [63]
ความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)	2.4 [15, 63]
แบนด์วิดท์ (กิโลบิตต่อวินาที)	250 [15, 63]
ความไวของโหนดตัวรับสัญญาณ (dBm)	-95 [15, 63]
RX Threshold (dBm)	-95 [15, 63]
CS Threshold (dBm)	-104.328
ขอบเขตการส่งสัญญาณไกลสุดของโหนด (เมตร)	9.25
ขอบเขต carrier sensing ของโหนด (เมตร)	18.50
กำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ -25 dBm (วัตต์)	0.01530 [15, 63]
กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล (วัตต์)	0.03384 [15, 63]
กำลังที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะอยู่นิ่ง (วัตต์)	0.0007668 [15, 63]
พลังงานเริ่มต้นของโหนด (จูล)	13,000 [62]
ชั้น PHY และ MAC	IEEE 802.15.4 ใช้งาน CSMA/CA
ชั้นสื่อสื่อนำส่งข้อมูล (Transport layer)	UDP [12, 13]
P_{GG} P_{GB} P_{BG} P_{BB}	0.99, 0.01, 0.01 และ 0.99 [12]
P_G	0.0 [12]
P_B	0.0, 0.245, 0.49, 0.735 และ 0.98
P_{AVG}	0.0, 0.1225, 0.245, 0.3675 และ 0.49
T_G และ T_B (วินาที)	100
จำนวนครั้งในการทดลอง (ครั้ง)	15
คุณหมุมเป้าหมายที่ต้องการ (องศาเซลเซียส)	21

หมายเหตุ: ค่ากำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล ค่ากำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล และค่ากำลังที่ใช้ในสถานะอยู่หนึ่งของโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver อธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ค

กรณีการทดสอบในหัวข้อที่ 5.2.2.1 นี้ ผู้วิจัยกำหนดเวลาในการจำลองการทำงานเท่ากับ 1,000 วินาที แสดงดังในตารางที่ 5-1 เนื่องด้วยเหตุผลดังอธิบายต่อไปนี้ ในขั้นตอนแรกของการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคาร จำเป็นต้องทำการทดสอบระบบควบคุมที่ศึกษาในกรณีการเชื่อมต่อแบบมีสายเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_I และค่า K_D ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่กำหนดใช้งาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6, 0.05 และ 55 ตามลำดับ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งสามนี้ได้มาจากการทดสอบปรับจูน (PID tuning) เพื่อให้ได้เอาต์พุตการควบคุมที่เหมาะสม ดังได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.2 ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์ ก่อนหน้า ซึ่งเอาต์พุตการควบคุมที่ได้นี้ ให้ค่าเวลาขึ้นหรือ T_r เท่ากับ 179 วินาที ให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 21.4 องศาเซลเซียส และให้ค่าเวลาเข้าที่เฉลี่ยเท่ากับ 608 วินาที โดยที่ค่าเวลาเข้าที่เฉลี่ยคือช่วงเวลาที่ยานเอาต์พุตการควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนด หรือก็คือเวลาที่ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้นการกำหนดเวลาการจำลองการทำงานเท่ากับ 1,000 วินาที เป็นเกณฑ์โดยประมาณ จึงเพียงพอที่จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของระบบควบคุมจากสภาวะชั่วคราวสู่สภาวะอยู่ตัว

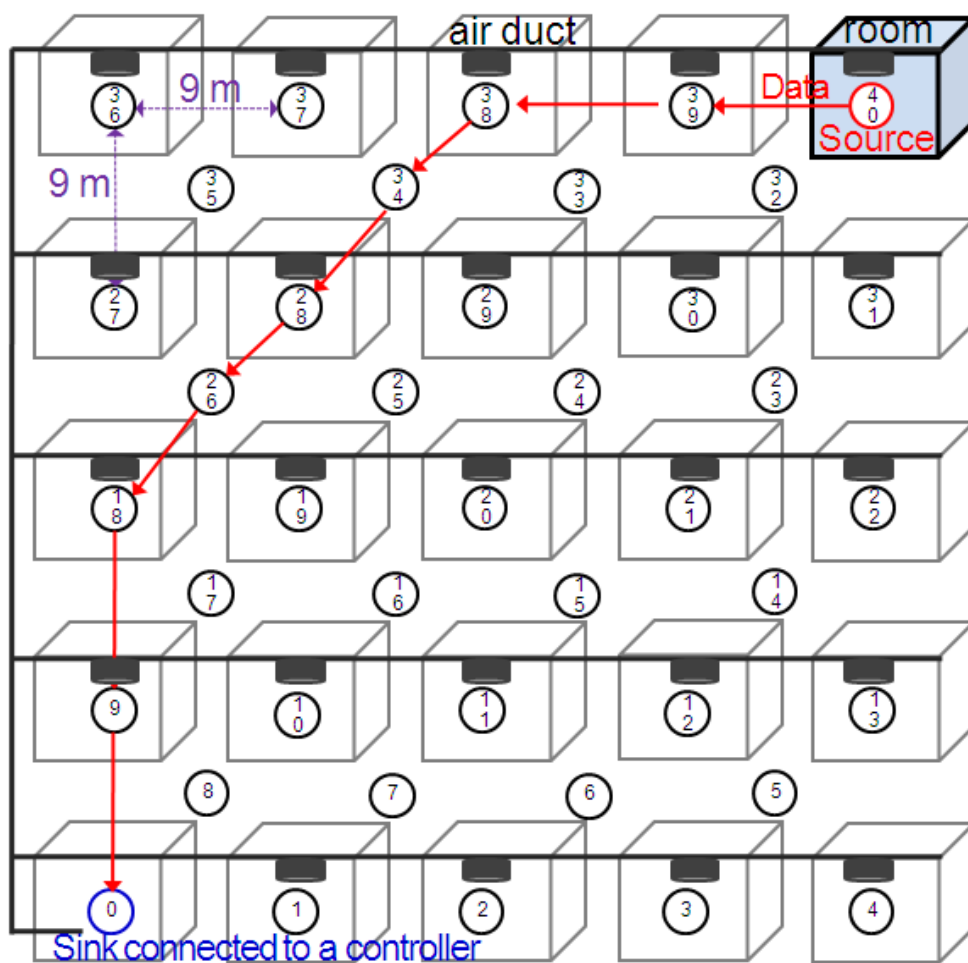
ในการทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอลการตัดสินทางที่นำเสนอตามเค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานดังภาพประกอบที่ 5-1 ผู้วิจัยกำหนดช่วงเวลากการชั้กตัวอย่างของโหนดต้นทางเท่ากับ 10 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 5-1 อ้างอิงจากงานวิจัยที่ [7] ซึ่งเป็นกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารแบบเดียวกันกับกรณีการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบกับ จากผลการจำลองการทำงานในภาคผนวก ก หัวข้อผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนช่วงเวลากการชั้กตัวอย่างต่อสมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร กรณีการจำลองการทำงานด้วยเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะหนึ่งฮอป แสดงให้เห็นว่า การกำหนดให้ช่วงเวลากการชั้กตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ภายในเวลาการจำลองการทำงานและเอาต์พุตการควบคุมที่ได้ให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยไม่เกินอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถอนุญาตได้อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีการทดสอบการปรับเปลี่ยนช่วงเวลากการชั้กตัวอย่างจะถูกศึกษาในหัวข้อที่ 5.2.2.3 ในลำดับต่อไป

ผู้วิจัยกำหนดรูปแบบเครือข่ายที่ทำการทดสอบดังภาพประกอบที่ 5-1 ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการกำหนดเค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร โดยโหนดจะถูกวางอยู่ในห้อง แต่ละห้องจะอยู่เรียงกันในลักษณะเป็นแถวและหลัก แสดงดังตัวอย่างเช่น

งานวิจัยใน [12, 99] และ [100] ที่ทำการทดสอบระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายภายในอาคารที่มีห้องเรียงกันเป็นแถวและหลัก จากรูปแบบเครือข่ายที่กำหนดนี้ ผู้วิจัยทดสอบวางโหนดจำนวน 41 โหนด ทั้งนี้เพื่อให้มีจำนวนโหนดใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ [7, 12] ซึ่งเป็นงานวิจัยอ้างอิงหลักของวิทยานิพนธ์นี้ โดยในงานวิจัยดังกล่าวทดสอบวางโหนดจำนวน 40 โหนด อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีการทดสอบการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดและขนาดพื้นที่ทดสอบจะถูกศึกษาในหัวข้อที่ 5.2.2.2 ในลำดับต่อไป จากเค้าโครงเรื่องการทดสอบดังภาพประกอบที่ 5-1 ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับตัวอย่างในภาพประกอบที่ 5-2 กำหนดให้โหนดแต่ละตัวถูกวางไว้ในแต่ละห้อง โหนดแต่ละตัวทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิในห้องนั้น ๆ และทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลอุณหภูมิของห้องนั้น ๆ ตลอดจนส่งผ่านข้อมูลอุณหภูมิจากห้องอื่น ๆ ไปยังโหนดปลายทางซึ่งเชื่อมต่อไปยังตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 และ 3.3.3 ก่อนหน้า ผู้วิจัยกำหนดให้โหนดส่งข้อมูลด้วยกำลังส่งเท่ากับ -25 dBm [15, 63] อ้างอิงจากโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver ซึ่งเป็นระดับกำลังส่งต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้ สาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกใช้งานที่กำลังส่งดังกล่าวเนื่องจากเหตุผลดังนี้ ดังที่ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ค การใช้งานโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver ผู้ใช้สามารถเลือกใช้กำลังส่งข้อมูลได้หลายระดับ ตั้งแต่ที่ระดับ 0 dBm -1 dBm -3 dBm -5 dBm -7dBm -10 dBm -15 dBm และ -25 dBm โดยที่แต่ละระดับกำลังส่งข้อมูลจะให้ขอบเขตการส่งสัญญาณวิทยุไกลสุดและการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ 0 dBm จะให้ขอบเขตการส่งสัญญาณวิทยุไกลสุดมากกว่าที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ -25 dBm แต่ที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ 0 dBm โหนดจะใช้พลังงานมากกว่าที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ -25 dBm [15, 63, 104] ดังนั้น เพื่อรักษาขอบเขตการสื่อสารในระยะหนึ่งฮอป หรือระยะทางจากโหนดในห้องหนึ่งถึงอีกโหนดในห้องถัดไป (กำหนดให้ห้องมีขนาดกว้าง 4.5 เมตร ยาว 3.5 เมตร และสูง 4.5 เมตร) ในขณะที่โหนดใช้พลังงานต่ำสุด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระดับกำลังส่งข้อมูลต่ำสุดที่ -25 dBm โดยจะให้ขอบเขตการส่งสัญญาณไกลสุดระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับเท่ากับ 9.25 เมตร ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3.3 ก่อนหน้า ซึ่งเพียงพอสำหรับการสื่อสารระหว่างโหนดจากห้องหนึ่งไปยังอีกห้องหนึ่ง

อย่างไรก็ตาม ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.5 ขอบเขตการวิจัย ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ทำการควบคุมอุณหภูมิเพียงห้องเดียว ดังในภาพประกอบที่ 5-1 และ 5-2 ห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิคือห้องที่วางโหนด ID 40 ไว้ โดยโหนด ID 40 ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้อง และส่งต่อข้อมูลดังกล่าวไปยังโหนดปลายทางผ่านโหนดระหว่างทางที่อยู่ในห้องอื่น ๆ สำหรับกรณีที่ต้องการควบคุม

คุณหมูกิจจำนวนหลาย ๆ ห้อง ไม่ได้ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เนื่องจาก ก) การจำลองการทำงานกรณีการควบคุมคุณหมูกิจจำนวนหลาย ๆ ห้อง จำเป็นต้องมีการพัฒนาแบบจำลองคุณหมูกิจภายในบริเวณห้องดังแสดงไว้ในสมการที่ (3-1) ใหม่เพิ่มเติม ซึ่งมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากคุณหมูกิจจากห้องที่อยู่ใกล้เคียงกันจากแต่ละทิศสามารถส่งผลกระทบถึงกันและกันได้ [12, 56] ข) มีจำนวนคนและอุปกรณ์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนภายในแต่ละห้องที่แตกต่างกัน และผู้ใช้เข้าใช้งานแต่ละห้องในเวลาที่แตกต่างกัน เป็นต้น และ ค) จำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบการควบคุมแบบมีศูนย์กลางเพิ่มเติม เพื่อรองรับการควบคุมจำนวนหลาย ๆ ห้องให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนำเสนอไว้ในงานวิจัยที่ [8] ดังนั้น จากความต้องการเพิ่มเติมดังอธิบายข้างต้นนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมจำลองการเดินทางสำหรับระบบเครือข่าย เซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายเป็นลำดับแรก วิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้มีการควบคุมคุณหมูกิจเพียงห้องเดียว ดังแสดงในเค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานที่ทำการทดสอบในภาพประกอบที่ 5-1 และ 5-2 สำหรับกรณีการศึกษาการควบคุมคุณหมูกิจจำนวนหลาย ๆ ห้อง อธิบายไว้ในบทที่ 6 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต



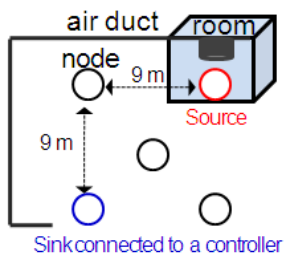
ภาพประกอบ 5-2 ตัวอย่างการวางโหนดแต่ละตัวไว้ในแต่ละห้อง หมายเหตุ: กำหนดให้ ก) ห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิคือห้องที่วางโหนด ID 40 ข) ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์สามารถป้อนอุณหภูมิลมจ่ายไปยังห้องที่วางโหนด ID 40 ผ่านทางท่อระบายอากาศโดยไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิในห้องอื่น ๆ และ ค) อุณหภูมิของหลังคา อุณหภูมิของผนังห้องแต่ละทิศ และอุณหภูมิภายในบริเวณห้องเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1

5.2.2.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

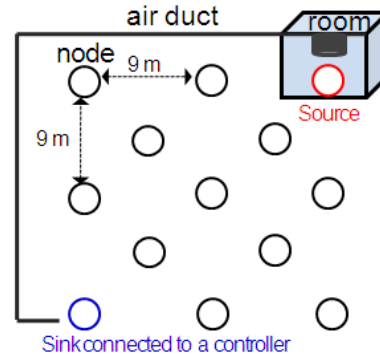
เพื่อศึกษาประเด็น จำนวนโหนดส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางและการควบคุมอุณหภูมิในอาคารอย่างไร ผู้วิจัยกำหนดการทดสอบโดยใช้เค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานที่มีจำนวนโหนดต่างกัน 5 ระดับคือ 5 โหนด ภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 9×9 ตารางเมตร 13 โหนด ภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 18×18 ตารางเมตร 25 โหนด ภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 27×27 ตารางเมตร 41 โหนด ภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 36×36 ตารางเมตร และ 61 โหนด ภายในพื้นที่ทดสอบขนาด 45×45 ตารางเมตร ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบที่ 5-3 (ก) ถึง (จ)

ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ย (P_{AVG}) มีค่าเท่ากับ 0.245 ซึ่งเป็นค่ากลางของการทดสอบในหัวข้อที่ 5.2.2.1 ก่อนหน้า และกำหนดค่า $ETED_Threshold$ ของขั้นตอนวิธีจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR เท่ากับ $T/7$ สำหรับพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้การทดสอบนี้กำหนดเหมือนกันกับตารางที่ 5-1

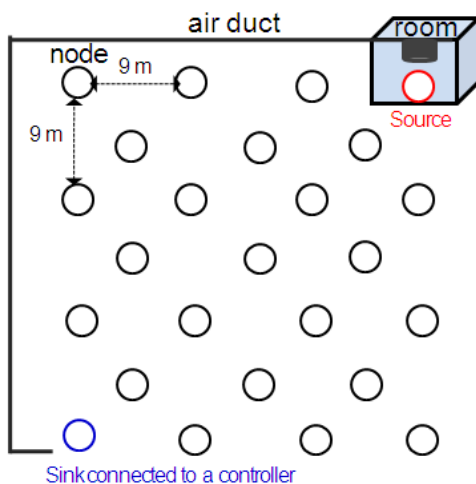
ผู้วิจัยทำการทดสอบหัวข้อที่ 5.2.1.1 เป็นลำดับแรก ก่อนที่จะทำการทดสอบในหัวข้ออื่น ๆ และผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อที่ 5.3.1 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอให้สมรรถนะทั้งทางด้านการสื่อสารและการควบคุมต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น เมื่อได้ข้อสรุปดังอธิบายนี้ ดังนั้นเพื่อทำการทดสอบในหัวข้ออื่น ๆ หรือเพื่อศึกษาประเด็นอื่น ๆ ต่อไป ผู้วิจัยจึงควบคุมปัจจัยที่เกิดจากการสูญหายของแพ็กเก็ต โดยการกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ยในเครือข่ายที่ทำการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.245 ซึ่งเป็นค่ากลางของการทดสอบแรก



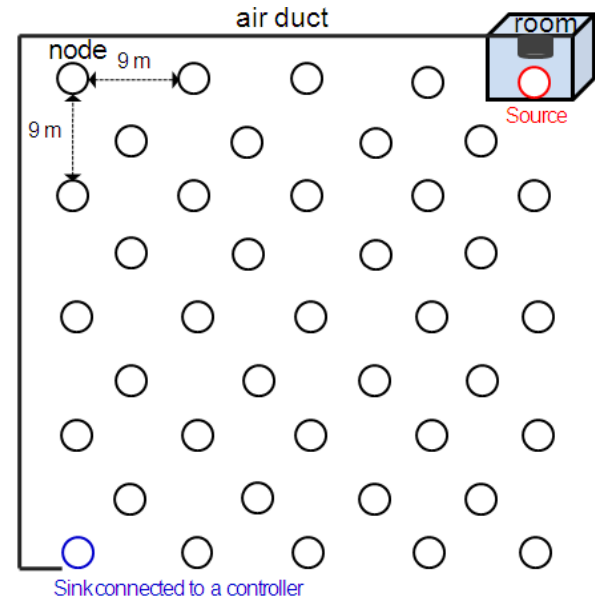
(ก)



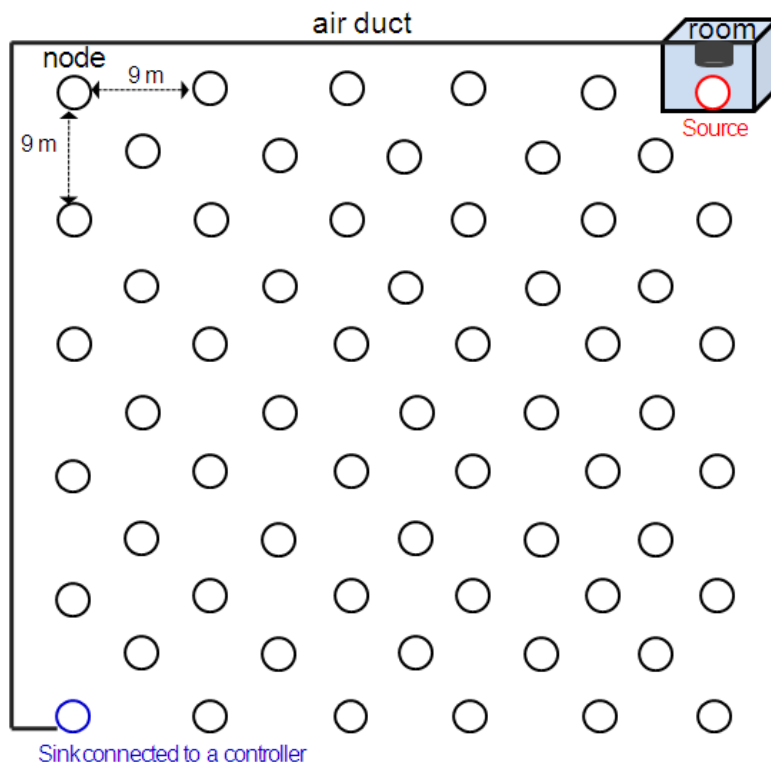
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพประกอบ 5-3 เค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงาน กรณีการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด (ก) 5 โหนด (ข) 13 โหนด (ค) 25 โหนด (ง) 41 โหนด และ (จ) 61 โหนด กำหนดขนาดพื้นที่ทดสอบในภาพประกอบ 5-2 (ก) ถึง (จ) เท่ากับ 9×9 ตารางเมตร 18×18 ตารางเมตร 27×27 ตารางเมตร 36×36 ตารางเมตร และ 45×45 ตารางเมตร ตามลำดับ

5.2.2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการชั้กตัวอย่าง

เพื่อศึกษาประเด็น ช่วงเวลาการชั้กตัวอย่างของการส่งข้อมูลที่โหนดต้นทางส่งผลต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางและการควบคุมอุณหภูมิในอาคารอย่างไร ผู้วิจัยกำหนดการทดสอบโดยใช้เค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานที่มีช่วงเวลาการชั้กตัวอย่างต่างกัน 5 ระดับ คือ 10 วินาที 20 วินาที 30 วินาที 40 วินาที และ 50 วินาที ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาชั้กตัวอย่างที่กำหนดนี้ครอบคลุมช่วงเวลาชั้กตัวอย่างต่ำสุดและสูงสุดที่สามารถกำหนดใช้งานได้เหมาะสมในการควบคุม [91, 92] โดยในที่นี้ ช่วงเวลาชั้กตัวอย่างต่ำสุดเท่ากับ $T/10$ หรือ 17.90 วินาที และช่วงเวลาชั้กตัวอย่างสูงสุดเท่ากับ $T/4$ หรือ 44.75 วินาที ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และภาคผนวก ก การกำหนดช่วงเวลาการชั้กตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น ยังช่วยให้สามารถศึกษาได้ว่าการกำหนดให้ช่วงเวลาการชั้กตัวอย่างที่น้อยกว่า $T/10$ และมากกว่า $T/4$ จะให้ผลการทดสอบ

เป็นอย่างไร นอกจากนี้ ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ย (P_{AVG}) มีค่าเท่ากับ 0.245 และกำหนดค่า $ETED_Threshold$ ของขั้นตอนวิธีจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR เท่ากับ $T/7$ กำหนดเค้าโครงเรื่องที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่นเดียวกันกับการทดสอบแรก หัวข้อ 5.2.2.1 ดังภาพประกอบ 5-1 และกำหนดพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้การทดสอบเหมือนกันกับตารางที่ 5-1

5.2.2.4 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การรบกวนของสภาพแวดล้อมต่อระบบควบคุม

เพื่อศึกษาประเด็น การรบกวนของสภาพแวดล้อมส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางและการควบคุมอุณหภูมิในอาคารอย่างไร ผู้วิจัยกำหนดให้มีการเปิดประตูห้องที่ทำการควบคุมอุณหภูมิทิ้งไว้ช่วงเวลานึง หลังจากทีระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว หรืออุณหภูมิภายในห้องเข้าสู่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายแล้ว การกำหนดดังกล่าว จะสามารถศึกษาได้ว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทางจะรับมือกับเหตุการณ์นี้ได้อย่างไร และให้ผลการควบคุมเป็นอย่างไร สำหรับรายละเอียดการจำลองเหตุการณ์กรณีการเปิดประตูห้อง แสดงดังรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (zone temperature model) ดังอธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.1 ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้เวลาการจำลองการทำงานเท่ากับ 4,000 วินาที กำหนดให้ประตูห้องถูกเปิดและปิดที่เวลา 2,000 วินาที และ 2,300 วินาที ตามลำดับ เพื่อให้อุณหภูมิจากด้านนอกเข้ามาภายในห้อง การกำหนดดังกล่าวนี้ จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบควบคุม จากสภาวะชั่วคราวสู่สภาวะอยู่ตัว และจากสภาวะอยู่ตัวสู่สภาวะชั่วคราว เป็นต้น ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ย (P_{AVG}) มีค่าเท่ากับ 0.245 และกำหนดค่า $ETED_Threshold$ ของขั้นตอนวิธีจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR เท่ากับ $T/7$ กำหนดเค้าโครงเรื่องที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่นเดียวกันดังภาพประกอบ 5-1 และกำหนดพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้การทดสอบเหมือนกันกับตารางที่ 5-1

5.2.2.5 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง

เพื่อศึกษาประเด็น ช่วงเวลา $ETED_Threshold$ ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR และการควบคุมอุณหภูมิในอาคารอย่างไร และค่า $ETED_Threshold$ ที่เหมาะสมมีค่าเป็นเท่าไร ผู้วิจัยทำการทดสอบโดยกำหนดค่า $ETED_Threshold$ ของ

ขั้นตอนวิธีจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR ต่างกัน 8 ระดับคือ $T/22$ (8.136 วินาที) $T/19$ (9.421 วินาที) $T/16$ (11.187 วินาที) $T/13$ (13.769 วินาที) $T/10$ (17.900 วินาที) $T/7$ (25.570 วินาที) $T/4$ (44.750 วินาที) และ $T/1$ (179 วินาที) ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกค่าที่ 8 ระดับดังกล่าวนี้เพื่อทำการทดสอบ เนื่องจาก ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.4.1.2 ขั้นตอน (ง) *ETED_Threshold* ที่ค่าเท่ากับ $T/7$ หรือ 25.57 วินาที เป็นค่าที่เหมาะสมแก่การกำหนดใช้งาน ดังนั้นที่ค่าน้อยหรือมากกว่าค่าดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อสมรรถนะของการสื่อสารและการควบคุมอย่างไร สำหรับสาเหตุที่กำหนดให้จำนวนระดับที่ทำการทดสอบที่มีค่าน้อยกว่า $T/7$ มากกว่าจำนวนระดับที่ทำการทดสอบที่มีค่ามากกว่า $T/7$ ทั้งนี้เนื่องจาก ผู้วิจัยต้องการศึกษาว่าค่า *ETED_Threshold* ที่มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจะให้ผลการทดสอบเป็นอย่างไร นอกจากนี้ผู้วิจัยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการสูญหายของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ย (P_{AVG}) มีค่าเท่ากับ 0.245 กำหนดเค้าโครงเรื่องที่ใช้ในการจำลองการทำงานเช่นเดียวกันดังภาพประกอบ 5-1 และกำหนดพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้การทดสอบเหมือนกันกับตารางที่ 5-1

5.2.3 ตัววัดสมรรถนะ (performance metric)

ผู้วิจัยทำการประเมินสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอใน 5 การทดสอบข้างต้น ด้วยตัววัดสมรรถนะจากทั้งมุมมองทางด้านการสื่อสารและทางด้านการควบคุม ดังต่อไปนี้

- ก) **อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย (average packet delivery ratio)** ตัววัดนี้คือ อัตราส่วนของจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้สำเร็จต่อจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดต้นทางส่ง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ตัววัดนี้แสดงถึงความน่าเชื่อถือของขั้นตอนวิธีจัดเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทางเพื่อส่ง-รับข้อมูลในเครือข่าย
- ข) **ช่วงเวลาจitterเฉลี่ย (average jitter duration)** ตัววัดนี้คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยระหว่างสองแพ็กเก็ตข้อมูลที่อยู่ติดกัน ที่โหนดปลายทางสามารถรับได้สำเร็จ มีหน่วยเป็นวินาที ช่วงเวลาจitterเฉลี่ยบ่งชี้ความแปรปรวนของความล่าช้า (delay variation) ของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ส่งผ่านเครือข่าย
- ค) **พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ย (average total energy consumption)** ตัววัดนี้คือ พลังงานรวมที่ทุก ๆ โหนดใช้ไปในการทำกิจกรรมในเครือข่ายระหว่างการจำลองการทำงาน ซึ่งเป็นพลังงานที่โหนดใช้ในสถานะส่ง-รับแพ็กเก็ต และอยู่นิ่ง มีหน่วยเป็นจูล ดังได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.2 แบบจำลองพลังงาน ก่อนหน้า

- ง) **ช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย (average settling time)** ตัววัดนี้คือ ช่วงเวลาที่เอาต์พุตการควบคุม (control system output) ซึ่งในที่นี้คือค่าอุณหภูมิในบริเวณห้อง (zone temperature) อยู่ในช่วงสัมบูรณ์ 2% จากค่าอุณหภูมิเป้าหมาย มีหน่วยเป็นวินาที ระยะเวลาเข้าที่เฉลี่ยนี้ ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว [54] ดังนั้น ถ้าหากไม่สามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่ช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ยได้ภายในระหว่างเวลาการจำลองการทำงาน แสดงว่าไม่สามารถควบคุมระบบควบคุมนั้นได้ หรือระบบควบคุมยังคงอยู่ในสภาวะชั่วคราว
- จ) **ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย (average maximum overshoot)** ตัววัดนี้คือ ค่าสูงสุดของเอาต์พุตของการควบคุมในระหว่างระยะเวลาการควบคุม ซึ่งในที่นี้คือค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงสุด มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส โดยในการควบคุมระบบควบคุมที่ดี ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิเป้าหมาย
- ฉ) **อินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (average integral of absolute error)** หรือเรียกว่า IAE เฉลี่ย [2, 75] ตัววัดนี้คือ ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมาย (desired value) และค่าเอาต์พุตที่ได้จากการควบคุม (หรือค่าที่วัดได้จริง (measured value)) ตลอดช่วงเวลาการควบคุม แสดงดังสมการที่ (5-1) โดย $e(t)$ คือค่าความผิดพลาดการควบคุม มีนิยามเดียวกันกับสมการที่ (4-1) ดึงนำเสนอไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้า โดยหาก IAE มีค่ามาก สมรรถนะของการควบคุมจะต่ำ

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (5-1)$$

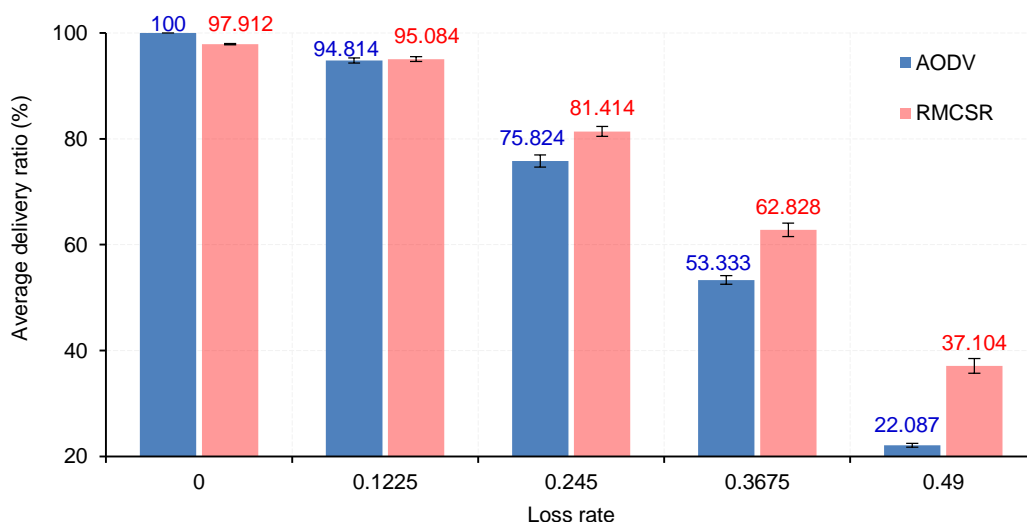
จากตัววัดที่ใช้ในการทดสอบข้างต้น จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย และพลังงานรวมที่โหนดใช้โดยเฉลี่ย เป็นตัวประเมินสมรรถนะของระบบทางมุมมองด้านการสื่อสารที่แสดงถึง อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล ความล่าช้าในการส่งข้อมูล และพลังงานของโหนดเซนเซอร์ ในขณะที่ ค่าช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และค่า IAE เฉลี่ย เป็นตัวประเมินสมรรถนะของระบบทางมุมมองด้านการควบคุมโดยตรง ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงสามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สายและการควบคุมได้อย่างพร้อมเพรียงกันจากตัววัดข้างต้น สำหรับผลการทดลองจากตัววัดทั้งหมดข้างต้นที่นำเสนอในบทที่ 5 ถูกแสดงด้วยค่าเฉลี่ยที่มีช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (95% confidence interval)

5.3 ผลการจำลอง และการอภิปรายผล

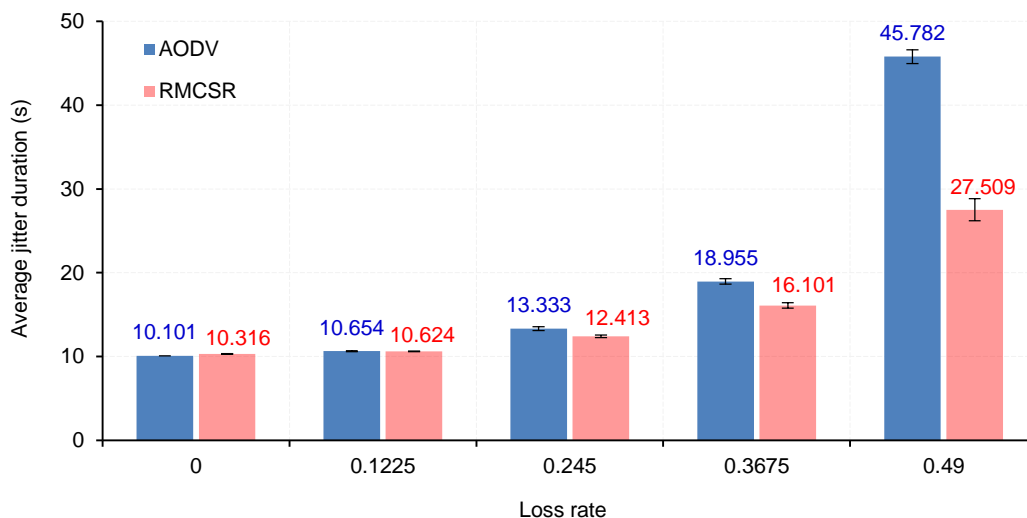
5.3.1 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต

5.3.1.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร

ผลการจำลองการทำงานในมุมมองด้านการสื่อสารแสดงดังนี้ ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย แสดงดังภาพประกอบที่ 5-4 และ 5-5 ตามลำดับ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าทั้งโพรโทคอล RMCSR และ AODV ให้ผลจากสองตัววัดข้างต้นต่ำลงเมื่ออัตราการสูญหายเฉลี่ยของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะสูงกว่าโพรโทคอล AODV ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.245 0.3675 และ 0.49 สำหรับที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.0 หรือไม่กำหนดอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต โพรโทคอล AODV ให้สมรรถนะสูงกว่าโพรโทคอล RMCSR และที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.1225 ผลการจำลองที่ได้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เนื่องจากผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยจากโพรโทคอล RMCSR สูงกว่ากรณีโพรโทคอล AODV ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.245 ถึง 0.49 จึงทำให้ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ได้รับได้สำเร็จที่โหนดปลายทางน้อยกว่าตาม



ภาพประกอบ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต

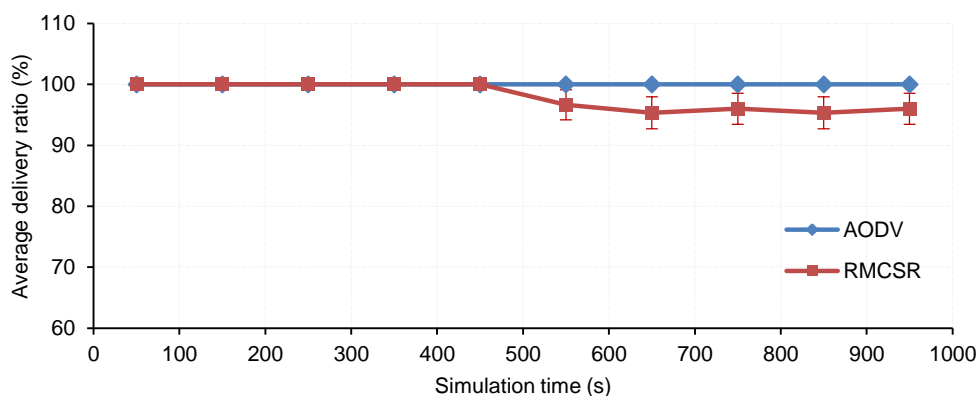


ภาพประกอบ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจitterเฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต

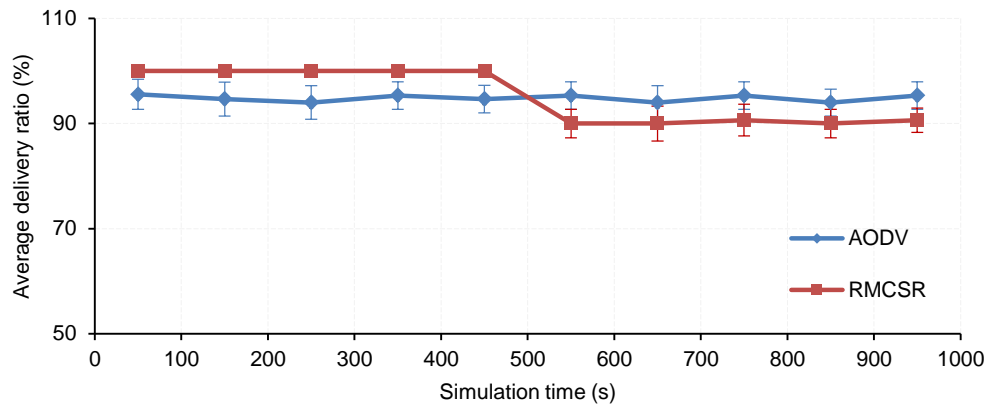
ภาพประกอบ 5-6 แสดงอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลาตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน ผลการจำลองในภาพประกอบ 5-6 (ก) แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ไม่กำหนดแบบจำลองการสูญหายของข้อมูลในการจำลองการทำงาน หรืออัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.0 โพรโทคอล AODV ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอล RMCSR เฉพาะที่ช่วงเวลาหลัง 500 วินาที โดยประมาณ สำหรับเวลาก่อนหน้าเวลาดังกล่าว โพรโทคอลทั้งสองให้สมรรถนะที่เท่าเทียมกัน เวลาก่อนและหลังนาทีที่ 500 โดยประมาณ แสดงถึง สภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวของระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ดังจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 5.3.1.2 สมรรถนะทางด้านการควบคุม ผลการจำลองข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากโพรโทคอล RMCSR เลือกเส้นทางที่ให้ค่า $delay_cost$ ต่ำสุดสำหรับส่งข้อมูลในช่วงเวลา 0 ถึง 500 วินาที โดยประมาณ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบควบคุมยังอยู่ในสภาวะชั่วคราว การเลือกเส้นทางโดยให้ค่า $Max_Delay_Cost_i$ ต่ำสุดสามารถช่วยหลบหลีกสิ่งสื่อสารหรือเส้นทางที่มีโอกาสเกิดการสูญหายของข้อมูลสูงได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสำเร็จในการส่งรับข้อมูล ดังนั้นช่วงเวลาดังกล่าว โพรโทคอล RMCSR ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างต่อเนื่อง สำหรับที่เวลาหลังวินาทีที่ 500 โดยประมาณ โพรโทคอล RMCSR สามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้สำเร็จ ดังนั้นโพรโทคอล RMCSR จะพิจารณา $energy_cost$ เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางแทน โดยการเลือกเส้นทางที่ให้ค่า $Max_Energy_Cost_i$ ต่ำสุด การเลือกเส้นทางจากประเด็นพลังงานมีโอกาสทำให้เกิดการสูญ

หายของข้อมูลเกิดขึ้นได้ จึงเป็นผลให้อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยต่ำลงหลังช่วงวินาทีที่ 500

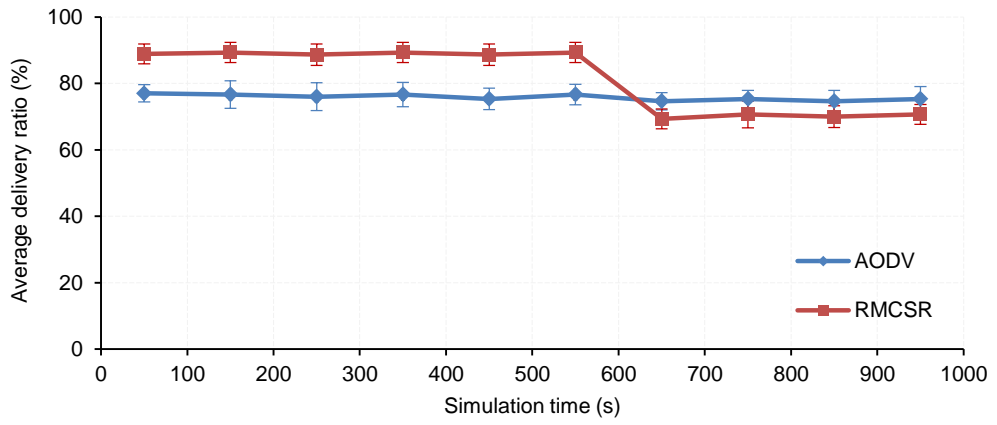
ภาพประกอบ 5-6 (ข) (ค) (ง) และ (จ) โพรโทคอล RMCSR ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอล AODV ก่อนวินาทีที่ 500 600 700 และ 900 โดยประมาณที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.1225 0.245 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ หลังจากเวลาดังกล่าว ทั้งสองโพรโทคอลให้สมรรถนะที่ไม่แตกต่างกัน โดยที่เวลาดังกล่าวนี้คือช่วงที่ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โพรโทคอล RMCSR จะเลือกเส้นทางที่ให้ค่า $Max.Delay_Cost_i$ น้อยสุดในช่วงก่อนเวลาดังกล่าว และเลือกเส้นทางที่ให้ค่า $Max.Energy_Cost_i$ น้อยสุดหลังเวลาดังกล่าวนี้ จากผลการจำลอง จะเห็นได้ว่าโพรโทคอล RMCSR สามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้สำเร็จถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตในเครือข่ายดังกล่าวที่กำหนด ในขณะที่โพรโทคอล AODV ช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้ากว่ากรณีโพรโทคอล RMCSR ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.1225 ถึง 0.3675 และโพรโทคอล AODV ไม่สามารถทำให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 โดยผลการจำลองการทำงานในประเด็นนี้จะอธิบายอีกครั้งในหัวข้อ 5.3.1.2 สมรรถนะทางการควบคุม



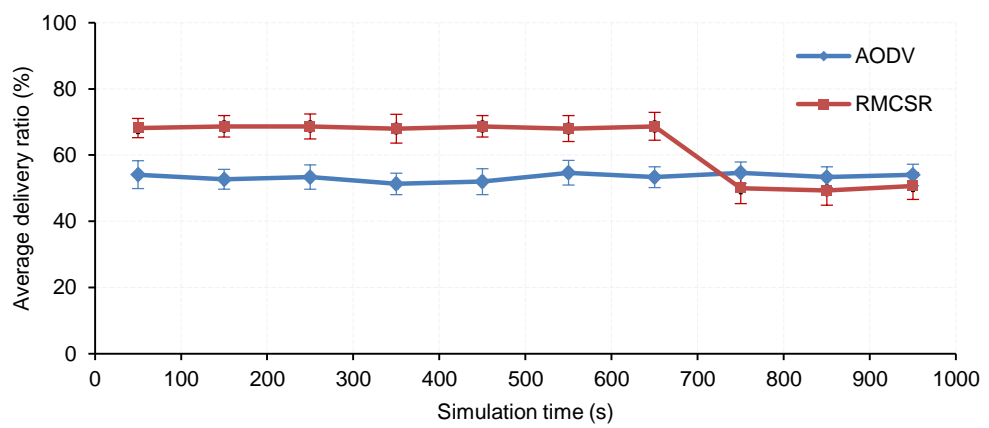
(ก)



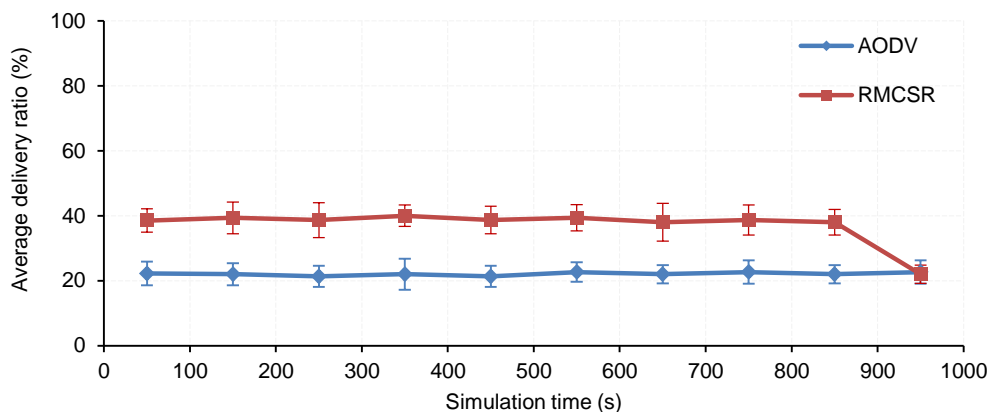
(a)



(b)



(c)

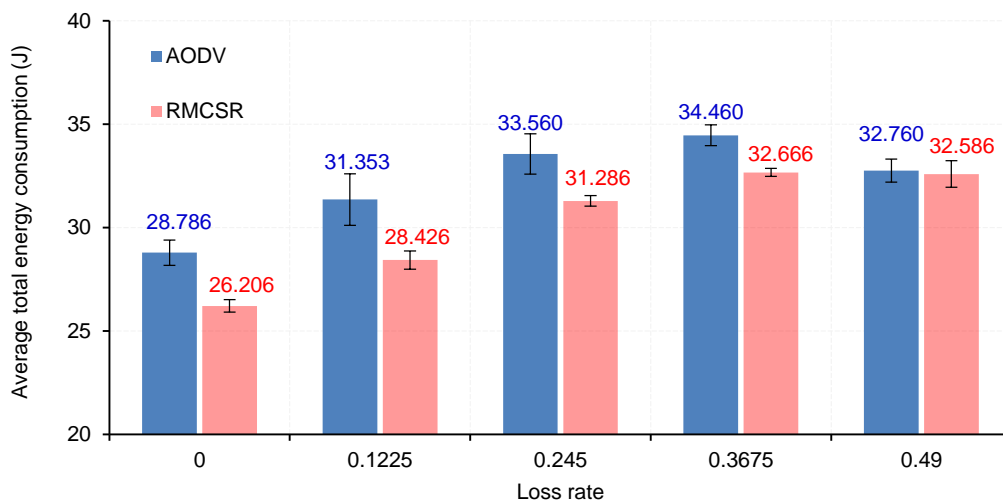


(จ)

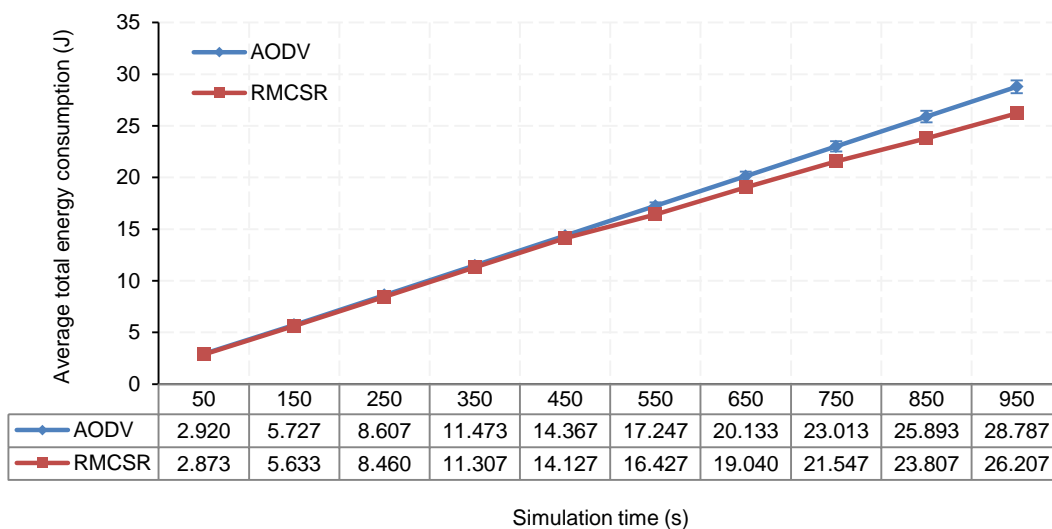
ภาพประกอบ 5-6 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.0, 0.1225, 0.245, 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ

ภาพประกอบที่ 5-7 แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล RMCSR ใช้พลังงานรวมโดยเฉลี่ยน้อยกว่าโพรโทคอล AODV โดยเฉพาะที่ระดับอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.0 ถึง 0.3675 สำหรับที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 โพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV ให้ผลการใช้พลังงานไม่แตกต่างกัน ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 มีการสูญหายของแพ็กเก็ตจำนวนมากเกิดขึ้นในเครือข่าย ส่งผลให้โหนดไม่สามารถทำการจัดเส้นทางเพื่อที่จะส่งข้อมูลได้สำเร็จ หรือมีโอกาสจัดเส้นทางได้สำเร็จน้อยลง และถึงแม้ว่าโหนดจะสามารถจัดเส้นทางได้สำเร็จ แต่ก็มีโอกาสสูงที่จะไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ ดังนั้นจึงเป็นผลให้จำนวนการให้สัญญาณที่เกิดขึ้นในเครือข่ายลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.3675 ซึ่งเป็นระดับที่โหนดในเครือข่ายให้สัญญาณในเครือข่ายสูงกว่า (โหนดพยายามจัดเส้นทางและส่งข้อมูลได้สำเร็จมากกว่า ในขณะที่มีการสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้นจำนวนมาก) ดังนั้น การใช้พลังงานรวมของโหนดที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 จึงลดน้อยลง ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 นี้ โพรโทคอล RMCSR มีความสามารถในการจัดเส้นทางและส่งข้อมูลได้สำเร็จมากกว่ากรณีโพรโทคอล AODV ยืนยันดังผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยในภาพประกอบที่ 5-6 (จ) ก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล RMCSR ให้ผลการใช้พลังงานไม่ต่างกับกรณีโพรโทคอล AODV สำหรับผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลาตลอด

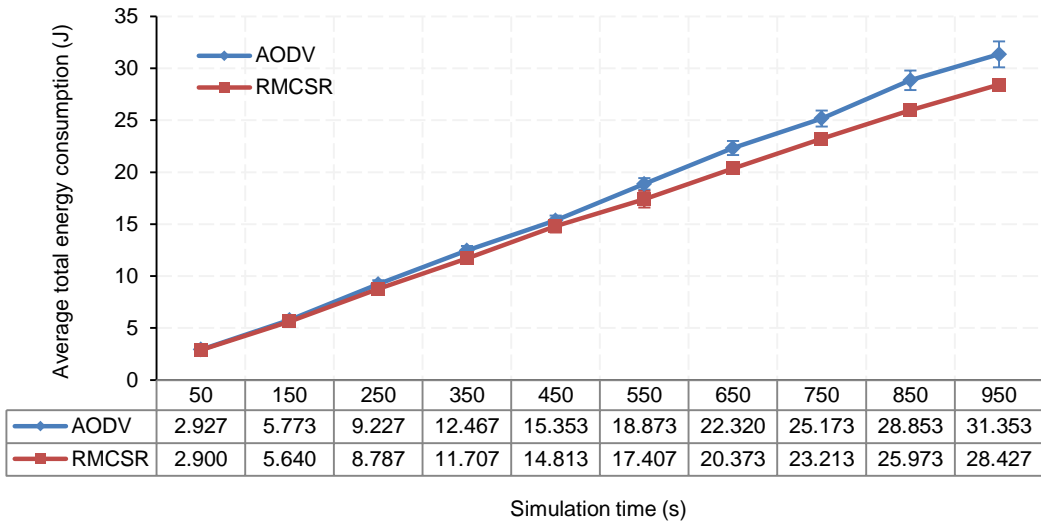
ระยะเวลาการจำลองการทำงานแสดงดังภาพประกอบที่ 5-8 จะเห็นได้ว่า โพรโทคอล RMCSR ใช้พลังงานโดยรวมน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน ยกเว้นที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 ผลการจำลองนี้สัมพันธ์กับผลการจำลองที่ได้นำเสนอในภาพประกอบที่ 5-7 ก่อนหน้า



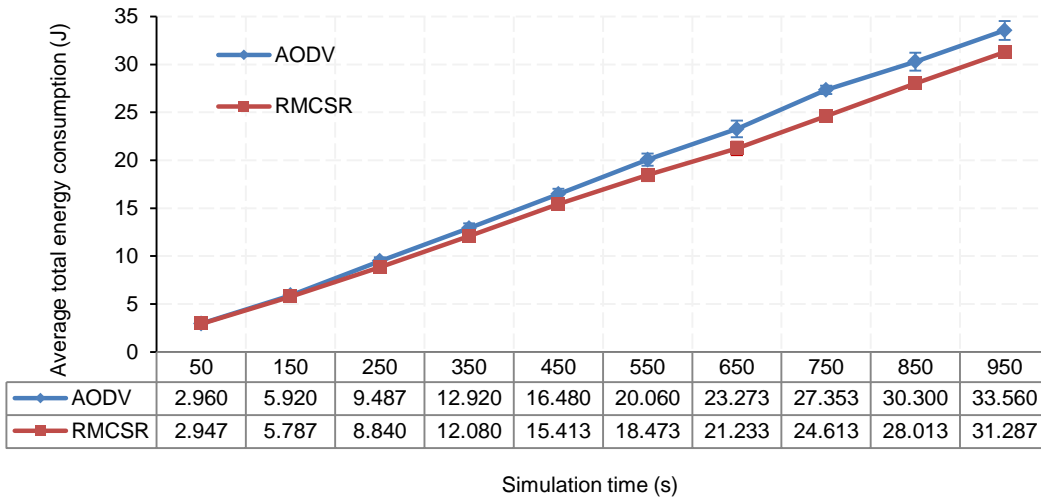
ภาพประกอบ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต



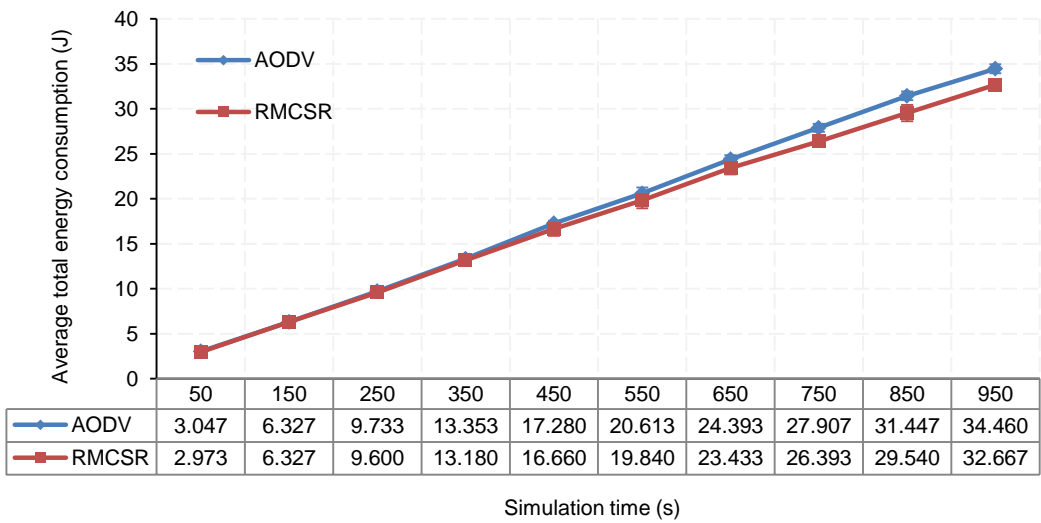
(ก)



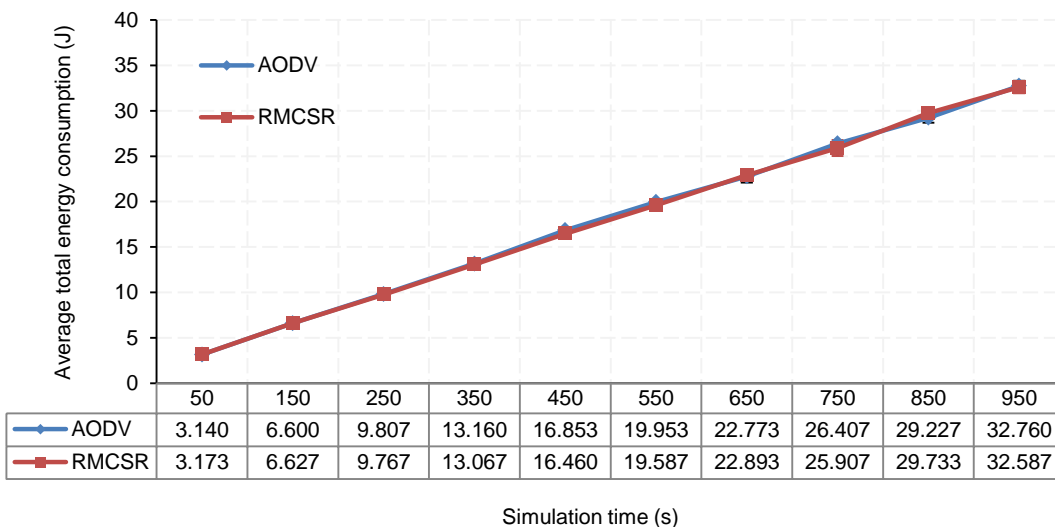
(a)



(b)



(c)



(จ)

ภาพประกอบ 5-8 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.0, 0.1225, 0.245, 0.3675 และ 0.49 ตามลำดับ

5.3.1.2 สมรรถนะทางการควบคุม

ผลสมรรถนะทางการควบคุมแสดงโดยอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดเฉลี่ย หรือ IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต แสดงดังภาพประกอบที่ 5-9 5-10 และตารางที่ 5-2 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะทางการควบคุมทั้งกรณีการใช้งานโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV ต่ำลงเมื่ออัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะทางการควบคุมสูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างมีนัยยะทางสถิติ ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.1225 ถึง 0.49 สำหรับที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.0 โพรโทคอลทั้งสองให้สมรรถนะทางการควบคุมที่ไม่แตกต่างกัน

ในกรณีโพรโทคอล RMCSR ที่ทุกระดับอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต โหนดปลายทางซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับตัวควบคุม สามารถรับข้อมูลอุณหภูมิซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยโหนดต้นทางได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว ซึ่งยืนยันด้วยผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย ดังภาพประกอบที่ 5-6 ดังนั้น ตัวควบคุมหรือแอกชูเอเตอร์ก็จะสามารถคำนวณ และป้อนค่าอินพุตซึ่งก็คือค่า supply air temperature หรืออุณหภูมิลมจ่ายที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมปัจจุบันไปควบคุมอุณหภูมิภายในห้องได้อย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้เข้าสู่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการได้โดยใช้

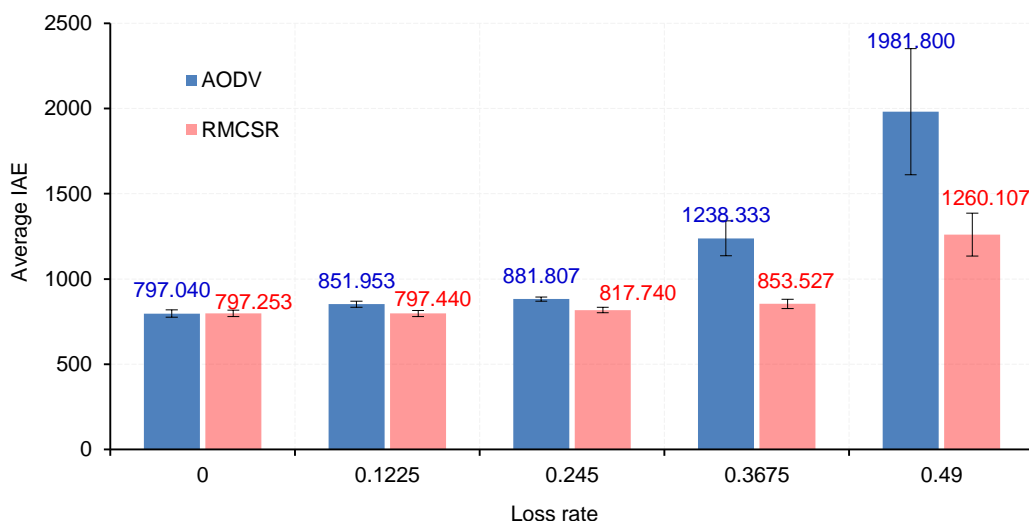
เวลาน้อย และเมื่อระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว โพรโทคอล RMCSR เลือกลงเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลจากการใช้พลังงานของโหนดเป็นเกณฑ์ จึงส่งผลให้มีการสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้นได้ แสดงถึงผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่มีค่าลดลง ดังภาพประกอบที่ 5-6 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีการสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้น ระบบควบคุมก็ยังสามารถอยู่ในสภาวะอยู่ตัวต่อไป

การสูญหายของข้อมูลที่เกิดขึ้นหลังจากที่ระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวไปแล้วส่งผลกระทบต่อสภาวะของระบบควบคุม (เฉพาะระบบควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองค่อนข้างช้า) โดยสามารถอธิบายด้วยเหตุผลดังนี้ เมื่อระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว อุณหภูมิภายในบริเวณห้องที่ทำการควบคุมจะคงตัว และมีค่าอยู่ในช่วงสัมบูรณ์ 2% จากค่าอุณหภูมิเป้าหมาย ถ้าโหนดปลายทางไม่สามารถรับข้อมูลจากโหนดต้นทางได้ในช่วงสภาวะดังกล่าว ตัวควบคุมหรือแอสชูเอเตอร์จะยังคงป้อนค่า supply air temperature ไปควบคุมอุณหภูมิภายในห้องด้วยค่าอุณหภูมิเดียวกันกับครั้งก่อนหน้า (previous temperature value) ที่ใช้งาน ซึ่งตัวควบคุมคำนวณได้จากค่าผิดพลาดการควบคุมครั้งล่าสุด (the latest control system error) [56] ในช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะอยู่ตัวนี้ ค่า supply air temperature เป็นค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับห้อง ณ สภาพแวดล้อมนั้น ๆ (ถ้าสภาพแวดล้อมไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน) ดังนั้นอุณหภูมิภายในห้องก็จะยังคงอยู่ในช่วงค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการต่อไป ถึงแม้ว่าแอสชูเอเตอร์จะไม่สามารถรับข้อมูลที่ได้จากการวัดใหม่จากโหนดต้นทาง

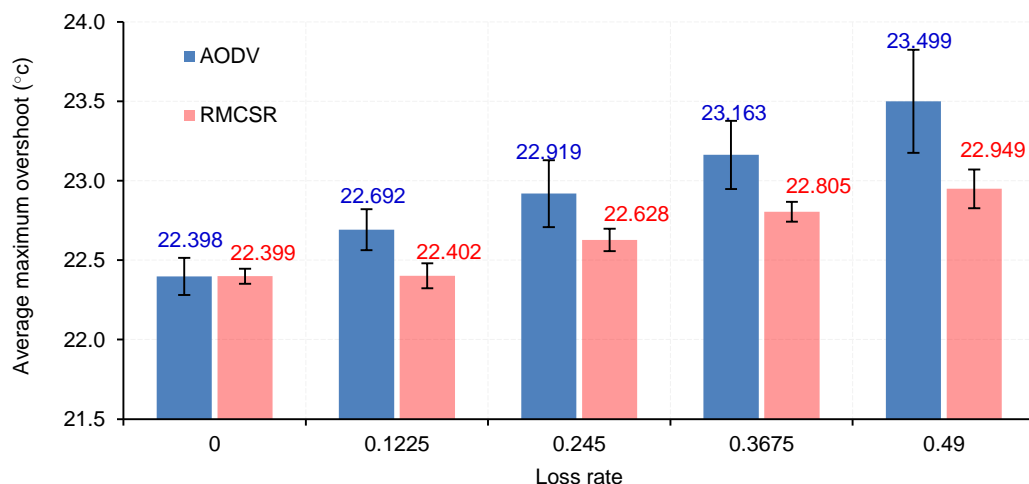
ผลการทดลองจากตารางที่ 5-2 ยืนยันว่า ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตทุกระดับที่ทำการทดสอบ โพรโทคอล RMCSR สามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่ช่วงเวลาเข้าที่ได้อีก และยังรวดเร็วกว่ากรณีโพรโทคอล AODV ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.1225 ถึง 0.49 นอกจากนี้ ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 โพรโทคอล AODV ไม่สามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ภายในระยะเวลาการจำลองการทำงาน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเวลาเข้าที่เฉลี่ยมากกว่า 1,000 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 มีการสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้นจำนวนมากตลอดระยะเวลาจำลองการทำงาน โดยสามารถยืนยันได้จากผลช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย (average jitter duration) ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาเฉลี่ยที่โหนดปลายทางสามารถรับข้อมูลได้สำเร็จ ดังภาพประกอบที่ 5-5 ก่อนหน้า โดยถ้าค่าช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยมีค่ามากกว่าค่าความล่าช้าสูงสุดในวงปิดที่อนุญาตได้ (maximum allowable loop delay) ซึ่งเท่ากับ $T/4$ [91, 92] จะไม่สามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4.1.2 ค่าความล่าช้าสูงสุดในวงปิดที่อนุญาตได้ของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร มีค่าเท่ากับ $T/4$ ซึ่งเท่ากับ 44.75 วินาที ค่านี้เท่ากับค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดที่อนุญาตได้ (maximum

allowable sampling period) จากภาพประกอบที่ 5-5 ที่อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.49 โพรโทคอล AODV ให้ค่าจิตเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 45.782 วินาที (มีช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ เท่ากับ 0.810) ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดข้างต้น

จากการทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยใน [93] แนะนำว่า กรณีการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ค่าเอาท์พุทการควบคุมสูงสุดหรืออุณหภูมิภายในห้องสูงสุดที่อนุญาตได้ (maximum allowable temperature) ควรมีค่าน้อยกว่า 26 องศาเซลเซียส [93] ซึ่งแสดงถึงระดับอุณหภูมิที่รู้สึกสบาย (comfortable temperature) สำหรับผู้อาศัย จากผลการจำลองในภาพประกอบที่ 5-10 ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยจากทั้งสองโพรโทคอลมีค่าต่ำกว่า 26 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าพิจารณาในมุมมองของค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย ทั้งสองโพรโทคอลให้สมรรถนะการควบคุมที่ยอมรับได้



ภาพประกอบ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ย และอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต



ภาพประกอบ 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต

ตาราง 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าที่เฉลี่ยและอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต

อัตราการสูญหาย ของแพ็กเก็ต	เวลาเข้าที่เฉลี่ย (วินาที)			
	AODV	95% c.i.	RMCSR	95% c.i.
0.000	589.600	1.676	589.600	1.280
0.1225	592.133	2.357	589.667	1.292
0.2450	622.333	8.706	600.333	5.863
0.3675	970.857	12.612	733.333	13.738
0.4900	> 1000	-	960.500	18.110

หมายเหตุ: 95% c.i. ดังแสดงในตารางที่ 5-2 คือ ช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95%

5.3.2 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

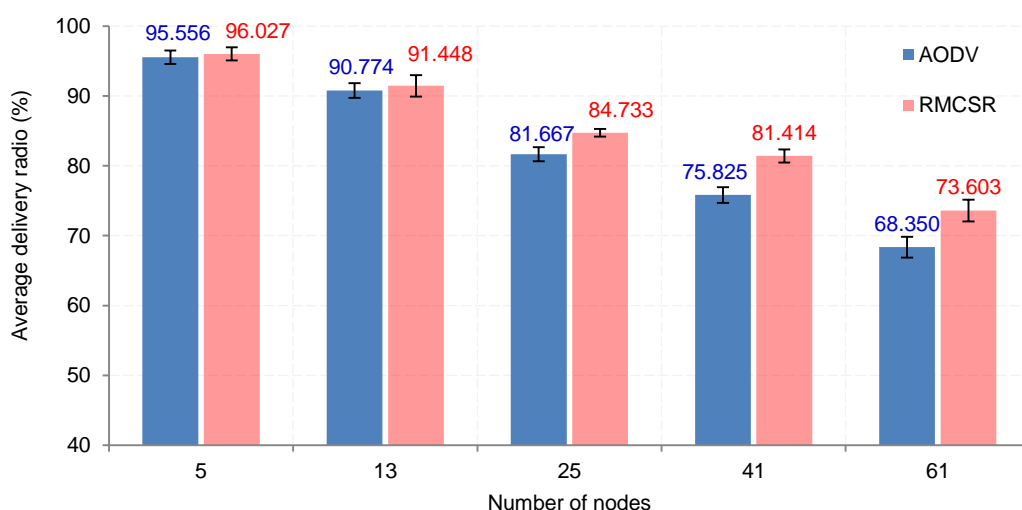
5.3.2.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร

ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย แสดงดังภาพประกอบที่ 5-11 และ 5-12 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า ทั้งโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV ให้สมรรถนะจากทั้งสองตัววัดนี้ต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนโหนดในเครือข่าย อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างเห็นได้ชัดที่จำนวนโหนดเท่ากับ 25 โหนด ถึง 61 โหนด สำหรับที่จำนวนโหนดเท่ากับ 5 โหนด และ 13 โหนด ทั้งสองโพรโทคอลให้สมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน

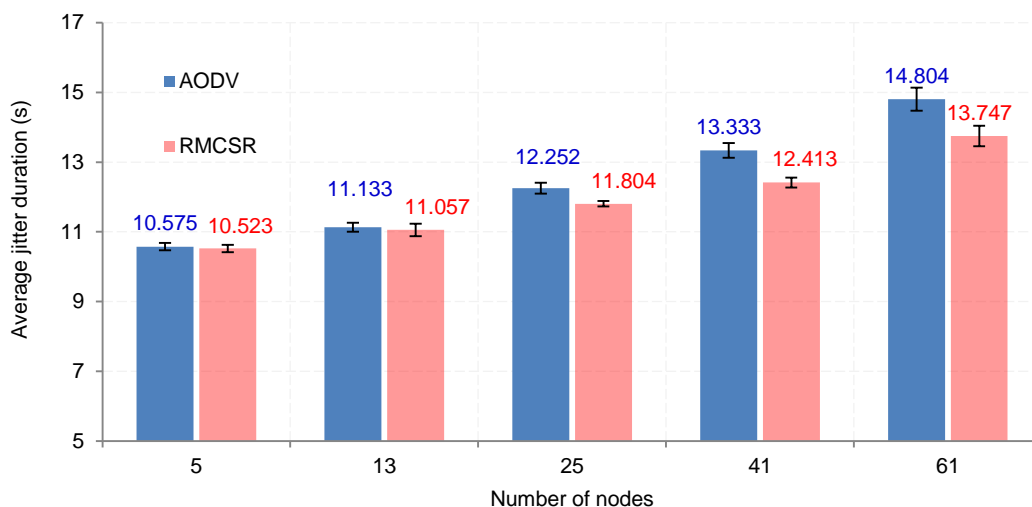
จากเค้าโครงเรื่องการจำลองการทำงานกรณีการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด ดังแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 5-3 ก่อนหน้า การเพิ่มจำนวนโหนดในเครือข่ายจะทำให้ระยะทางการสื่อสาร หรือจำนวนฮอประหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเพิ่มมากขึ้น โดยจากภาพประกอบที่ 5-3 จำนวนฮอปต่ำสุดที่จำนวนโหนดทดสอบ 5 โหนด 13 โหนด 25 โหนด 41 โหนด และ 61 โหนด มีค่าเท่ากับ 2 ฮอป 4 ฮอป 6 ฮอป 8 ฮอป และ 10 ฮอป ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นของจำนวนโหนดต่อขนาดพื้นที่ ที่จำนวนโหนดทดสอบ 5 โหนด 13 โหนด 25 โหนด 41 โหนด และ 61 โหนด มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเท่ากับ 0.061 0.040 0.034 0.031 และ 0.030 โหนดต่อตารางเมตร ตามลำดับ การเพิ่มจำนวนโหนดในเครือข่ายและการเพิ่มระยะทางการสื่อสารในขณะที่ยังคงมีการกำหนดอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตในการจำลองการทำงาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.245 จะทำให้การสื่อสารระหว่างโหนดสื่อสารใด ๆ ในเครือข่ายมีโอกาสเจออุปสรรคมากขึ้น ตัวอย่างเช่น เกิดการให้

สัญญาณในปริมาณที่มากขึ้น เกิดการช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโหนดที่อยู่ในขอบเขตการได้ยินสัญญาณ เกิดความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต เกิดการสอแตกของสัญญาณจนทำให้อัตราความผิดพลาดบิตสูง หรือเกิดการชนกันของแพ็กเก็ตมากขึ้น เป็นต้น ด้วยผลกระทบของเหตุการณ์ดังกล่าวนี้จะทำทั้งโพรโทคอล RMCSR และ โพรโทคอล AODV สามารถจัดเส้นทางและส่งข้อมูลได้สำเร็จน้อยลง อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล RMCSR สามารถทำงานได้ดีหรือให้สมรรถนะที่สูงกว่ากรณีโพรโทคอล AODV

ผลการจำลองการทำงานจากภาพประกอบที่ 5-11 และ 5-12 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ทั้งโพรโทคอล RMCSR และ โพรโทคอล AODV สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมภายใต้การปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดที่ทำการศึกษา โดยสามารถรับมือกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในเครือข่ายได้เมื่อจำนวนฮอปมากขึ้น จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า ยังสามารถเพิ่มจำนวนโหนดในการทดสอบให้มากกว่า 61 โหนดได้ ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองโพรโทคอลให้ผลช่วงเวลาคาดเดิมน้อยกว่าค่าความล่าช้าสูงสุดในวงปิดที่อนุญาตได้ ซึ่งเท่ากับ 44.75 วินาที ดังได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ด้วยจำนวนโหนดตามเค้าโครงเรื่องที่กำหนดในการทดสอบนี้ ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ทุกกรณี อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดคือ มีโหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลเพียงโหนดเดียว และมีอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตในการทดสอบเท่ากับ 0.245 ดังนั้น ถ้าหากมีจำนวนโหนดต้นทางหรือมีอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตมากขึ้น ก็จะทำให้สมรรถนะของทั้งสองโพรโทคอลต่ำลงได้ ดังกรณีผลการจำลองในหัวข้อที่ 5.3.1 ก่อนหน้า



ภาพประกอบ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และจำนวนโหนด

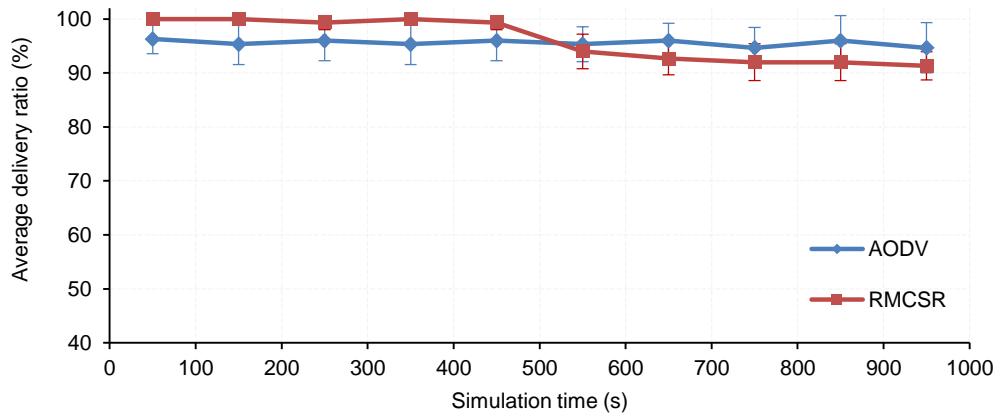


ภาพประกอบ 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจitterเฉลี่ยและจำนวนโหนด

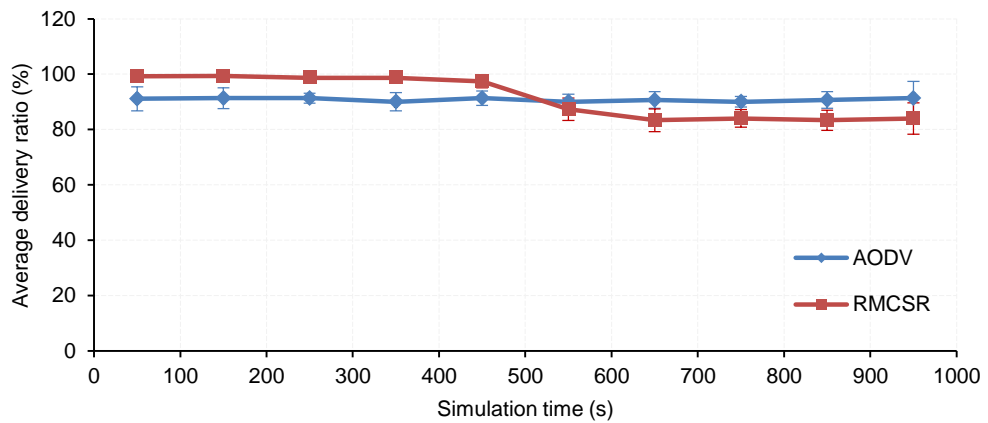
ภาพประกอบที่ 5-13 แสดงอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลาของระยะเวลาการจำลองการทำงาน ในภาพประกอบ 5-13 (ก) (ข) และ (ค) โพรโทคอล RMCSR ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอล AODV ตลอดช่วงเวลา 500 วินาทีแรกโดยประมาณ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว หลังช่วงเวลาดังกล่าว ทั้งสองโพรโทคอลให้สมรรถนะไม่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าที่จำนวนโหนดเท่ากับ 5 โหนด และ 13 โหนด อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ตลอดช่วงเวลา 500 วินาทีแรก นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่จำนวนโหนดทดสอบ 5 โหนด 13 โหนด และ 25 โหนด ซึ่งมีจำนวนฮอปต่ำสุดเพิ่มขึ้นจาก 2 ฮอป เป็น 4 ฮอป และ 6 ฮอป ตามลำดับ โพรโทคอล RMCSR ก็ยังคงให้สมรรถนะที่ดีอย่างต่อเนื่อง โดยทำให้ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแนวโน้มของเส้นกราฟที่ตกลงที่หลังวินาทีที่ 500 โดยประมาณ โดยสมรรถนะทางการควบคุมจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 5.3.2.2 ลำดับต่อไป

สำหรับในภาพประกอบที่ 5-13 (ง) และ (จ) โพรโทคอล RMCSR ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอล AODV ตลอดช่วงเวลา 600 วินาทีแรก โดยประมาณ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว หลังช่วงเวลาดังกล่าว (ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว) ทั้งสองโพรโทคอลให้สมรรถนะไม่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนโหนดในเครือข่ายทำให้โอกาสในการส่งข้อมูลได้สำเร็จลดน้อยลง จึงทำให้ช่วงระยะเวลาที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราวยาวนานขึ้น นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่จำนวนโหนดทดสอบ 41 โหนด และ 61 โหนด ซึ่งมีจำนวนฮอปต่ำสุดเพิ่มขึ้นจาก 8 ฮอป เป็น 10 ฮอป โพรโท-

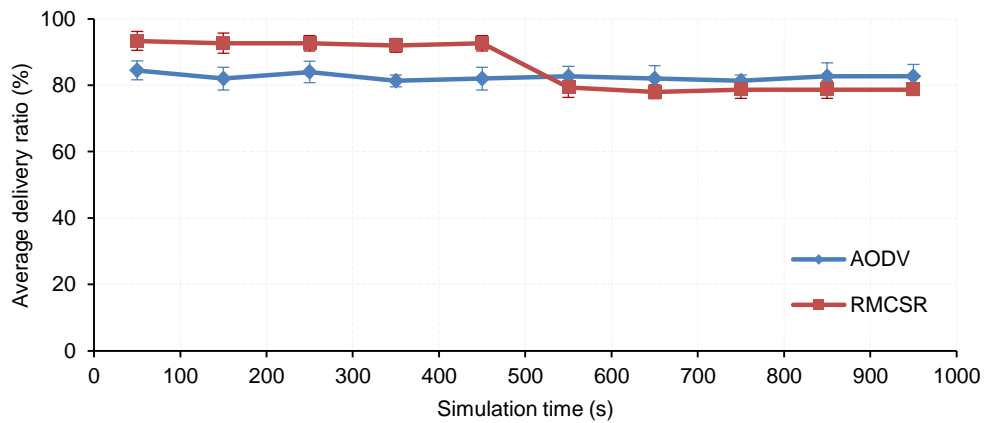
คอล RMCSR ให้สมรรถนะที่ไม่ต่างกันมาก โดยทำให้ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน



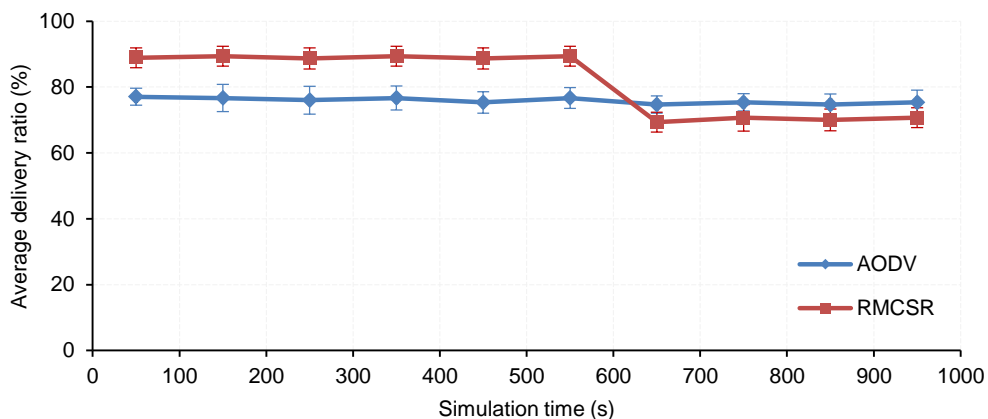
(ก)



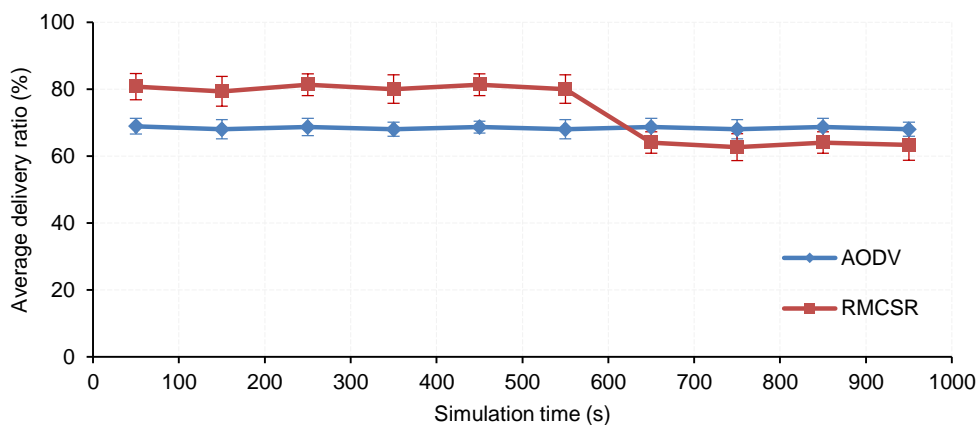
(ข)



(ค)



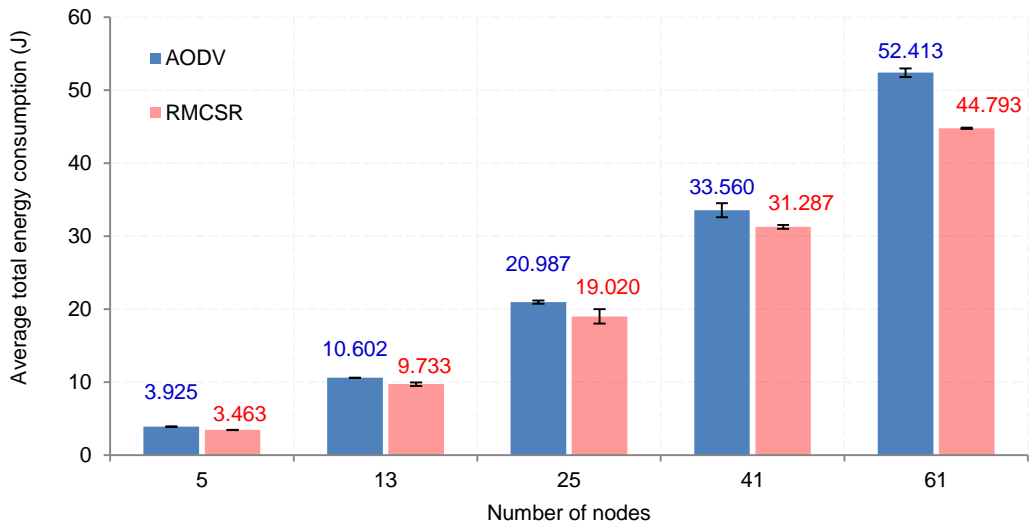
(ง)



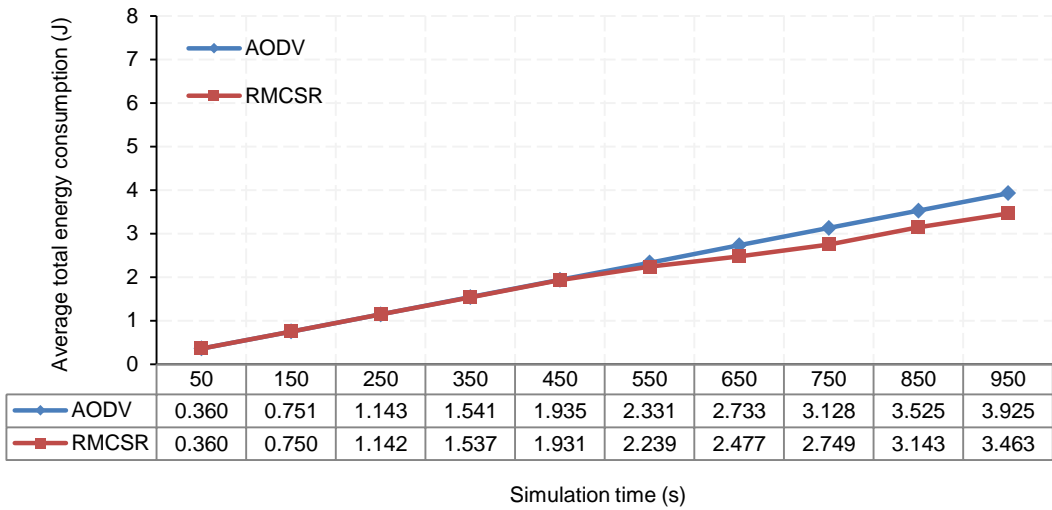
(จ)

ภาพประกอบ 5-13 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่จำนวนโหนดเท่ากับ 5, 13, 25, 41 และ 61 โหนด ตามลำดับ

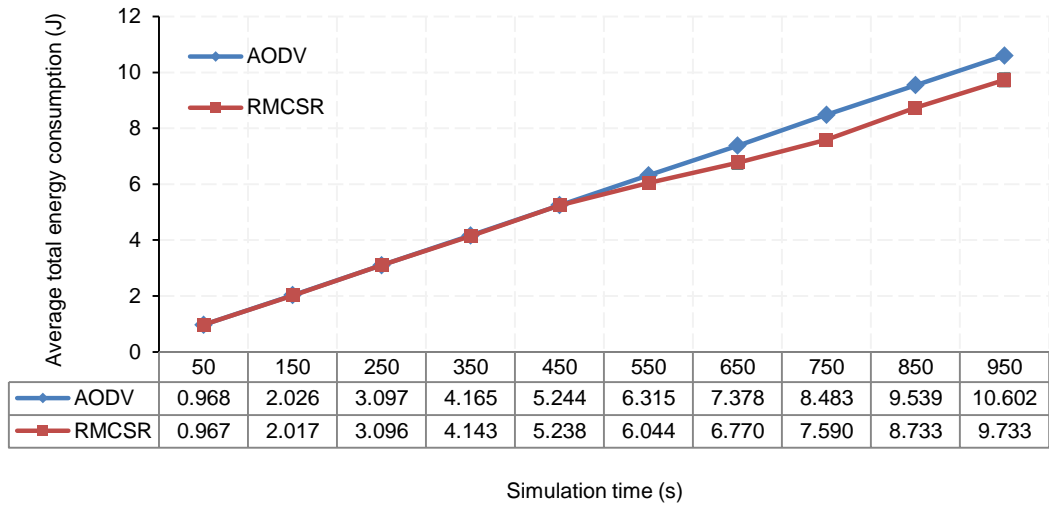
ภาพประกอบที่ 5-14 แสดง ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายเมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอล RMCSR ใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ที่ทุกระดับจำนวนโหนดทดสอบ โดยผลการใช้พลังงานระหว่างสองโพรโทคอลจะยิ่งต่างกันมากขึ้นเมื่อจำนวนโหนดในเครือข่ายมากขึ้น โดยเฉพาะที่จำนวนโหนดเท่ากับ 61 โหนด ผลต่างของพลังงานจะสูงขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับผลการใช้พลังงานรวมโดยเฉลี่ยของโหนดในเครือข่ายที่แต่ละช่วงเวลาการจำลองการทำงาน แสดงดังภาพประกอบที่ 5-15 (ก) ถึง (จ) ผลการจำลองที่ได้สัมพันธ์กับผลการจำลองในภาพประกอบที่ 5-14 ที่ทุก ๆ จำนวนโหนดทดสอบ โพรโทคอล RMCSR ใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน



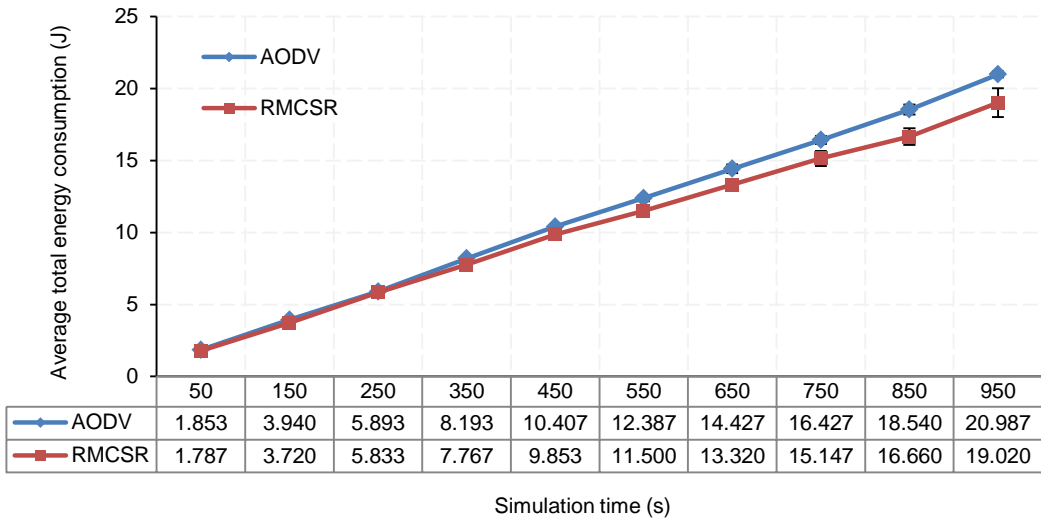
ภาพประกอบ 5-14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยและจำนวนโหนด



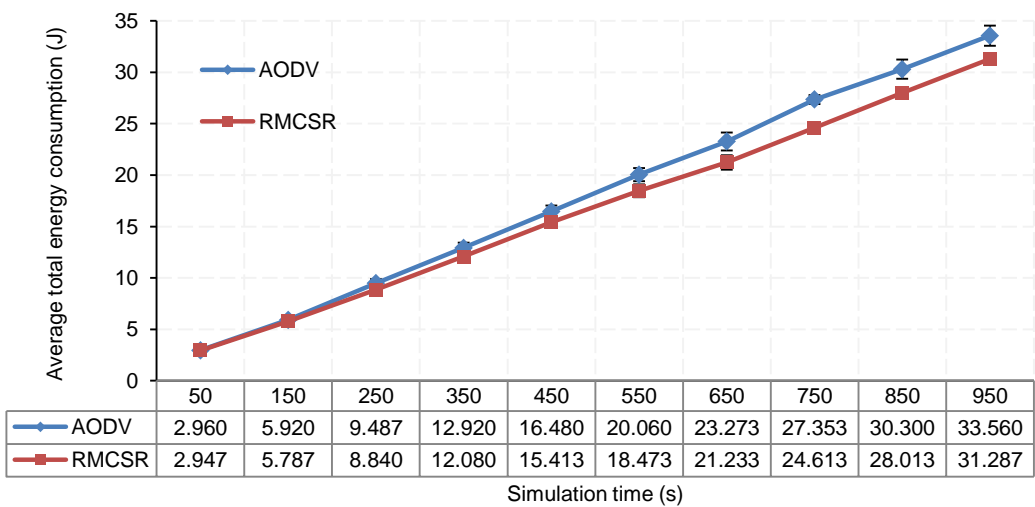
(ก)



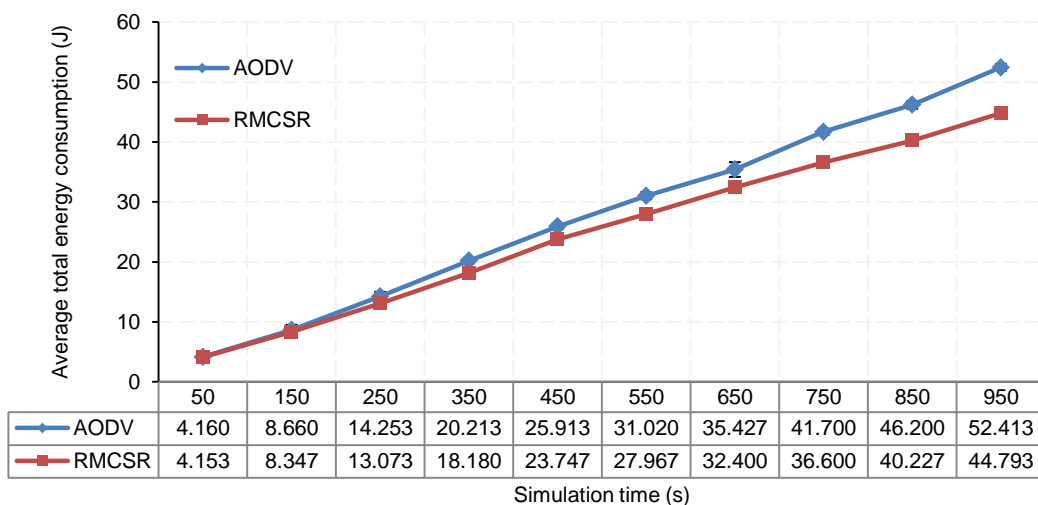
(a)



(b)



(c)



(จ)

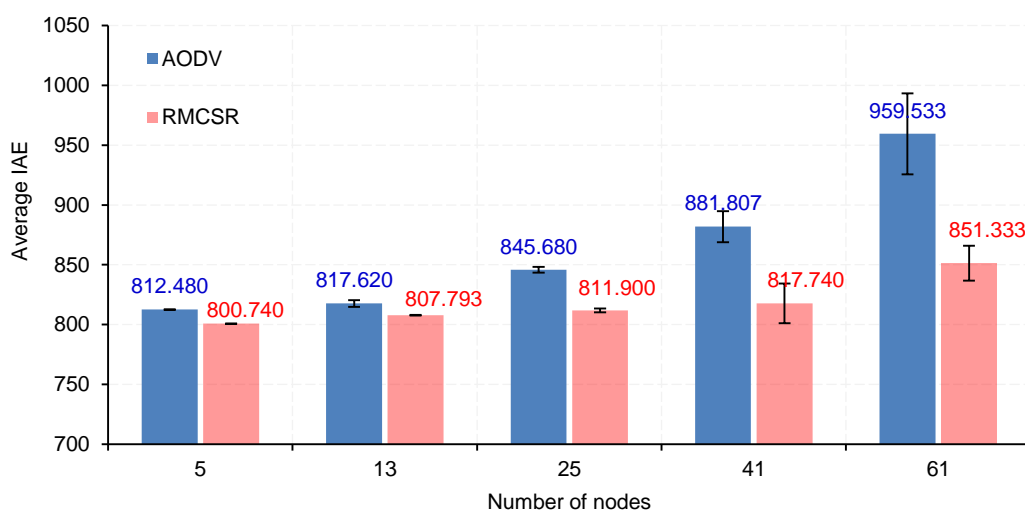
ภาพประกอบ 5-15 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่จำนวนโหนดเท่ากับ 5, 13, 25, 41 และ 61 ตามลำดับ

5.3.2.2 สมรรถนะทางการควบคุม

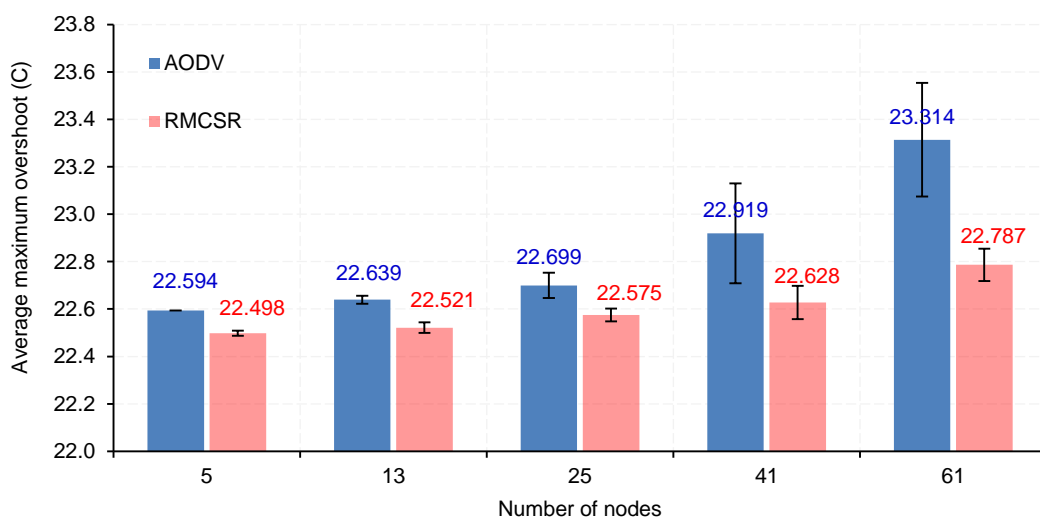
ผลสมรรถนะทางการควบคุมแสดงโดย IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุด และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดในเครือข่าย แสดงดังภาพประกอบที่ 5-16 5-17 และ 5-18 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะทางการควบคุมทั้งกรณีโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV จะต่ำลงเมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น โดยโพรโทคอล RMCSR ให้ผล IAE เฉลี่ย และค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ในทุก ๆ จำนวนโหนดทดสอบ แต่จะให้เวลาเข้าที่เฉลี่ยน้อยกว่าโพรโทคอล AODV อย่างชัดเจนที่จำนวนโหนดทดสอบมากกว่า 25 โหนด

ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มจำนวนโหนดในเครือข่าย ค่า IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และเวลาเข้าที่เฉลี่ยในกรณีโพรโทคอล RMCSR จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีโพรโทคอล AODV และสมรรถนะทางการควบคุมจะยิ่งต่างกันมากขึ้นเมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบที่ 5-16 ผล IAE เฉลี่ย กรณีโพรโทคอล RMCSR เพิ่มขึ้นจาก 800.740 ถึง 815.333 ในขณะที่ผล IAE เฉลี่ย กรณีโพรโทคอล AODV เพิ่มขึ้นจาก 812.480 ถึง 959.530 ในภาพประกอบที่ 5-17 ผลค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยกรณีโพรโทคอล RMCSR เพิ่มขึ้นจาก 22.498 ถึง 22.786 ในขณะที่ผลค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยกรณีโพรโทคอล AODV เพิ่มขึ้นจาก 22.594 ถึง 23.314 และท้ายสุด ในภาพประกอบที่ 5-18 ผลเวลาเข้าที่เฉลี่ยกรณีโพรโทคอล RMCSR เพิ่มขึ้นจาก 589.666 ถึง 632.266 ในขณะที่ผลเวลาเข้าที่เฉลี่ยกรณีโพรโทคอล AODV

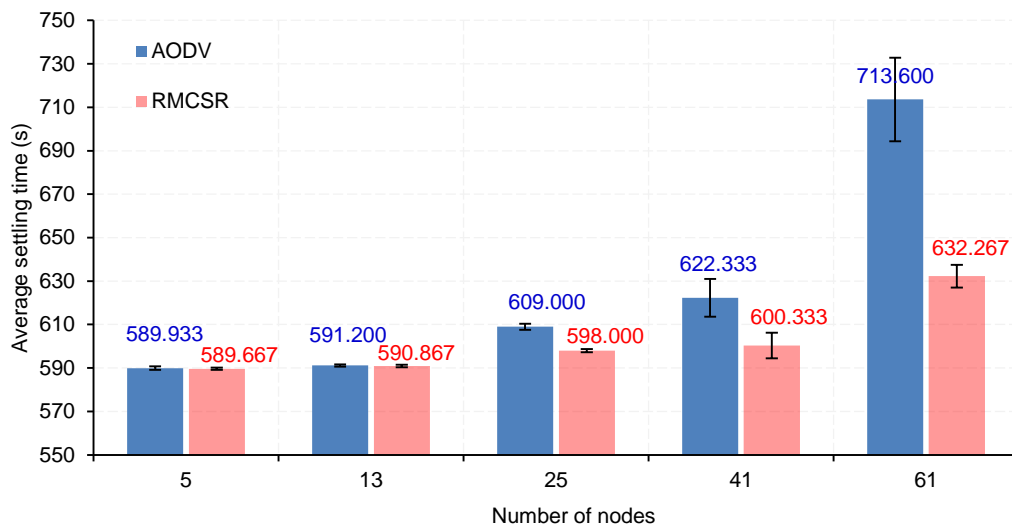
เพิ่มขึ้นจาก 589.933 ถึง 713.600 ผลการจำลองในส่วนนี้ยืนยันว่า เมื่อมีการเพิ่มจำนวนโหนดในเครือข่าย โพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะทางการควบคุมที่ดีกว่ากรณีโพรโทคอล AODV โดยที่สมรรถนะทางการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก หรือสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้โครงเรื่องการจำลองการทำงานที่ทำการทดสอบ โพรโทคอล RMCSR สามารถทนทาน (tolerate) หรือรับมือกับปัญหาที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนโหนดจาก 5 โหนด ถึง 61 โหนด (12 เท่า โดยประมาณ) หรือการเพิ่มขึ้นของจำนวนฮอปต่ำสุดจาก 2 ฮอป ถึง 10 ฮอป (5 เท่า) โดยสามารถทำให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวด้วยเวลาที่ห่างกันเพียง 42.6 วินาที สำหรับเหตุผลว่าทำไมโพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะทางการควบคุมสูงกว่าโพรโทคอล AODV สามารถอธิบายด้วยการอธิบายเดียวกันในหัวข้อ 5.3.1.2 ก่อนหน้า



ภาพประกอบ 5-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ย และจำนวนโหนด



ภาพประกอบ 5-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและจำนวนโหนด



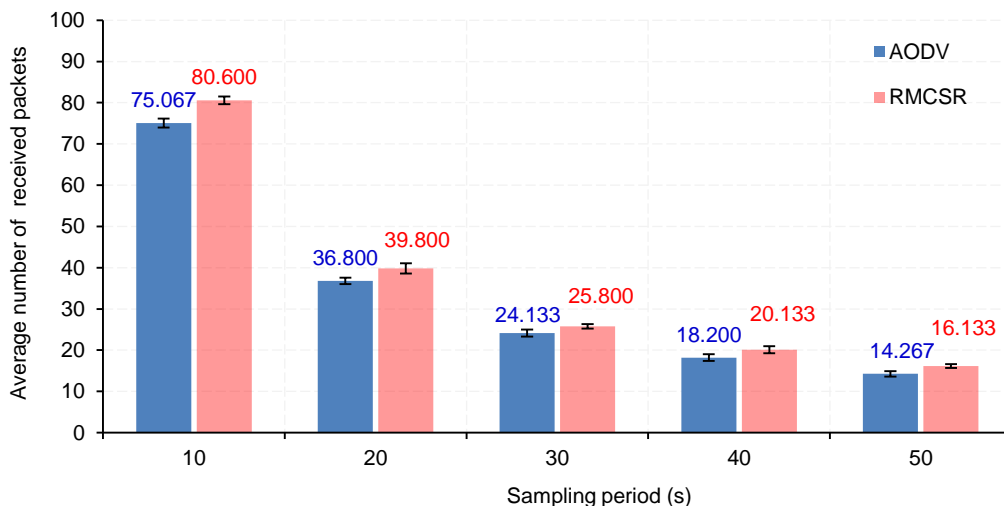
ภาพประกอบ 5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าที่เฉลี่ยและจำนวนโหนด

5.3.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง

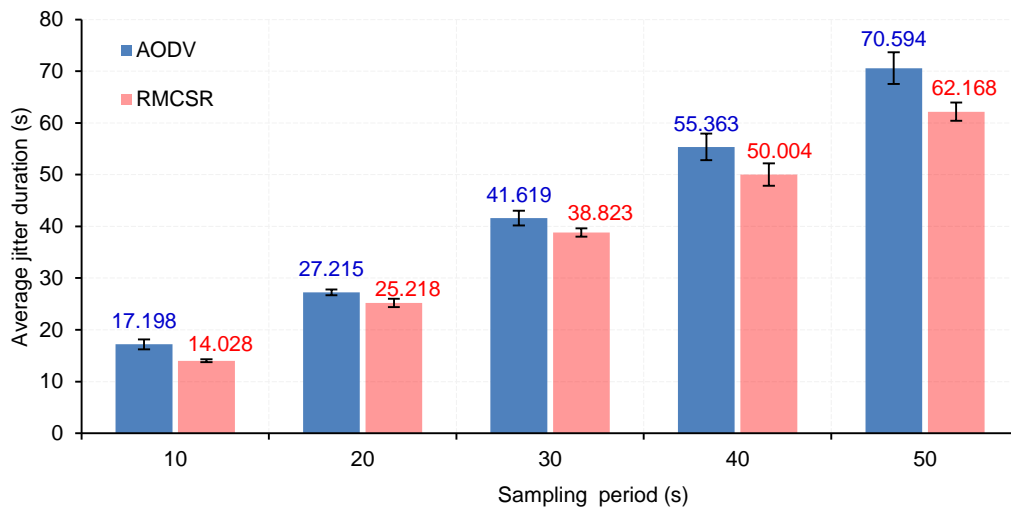
5.3.3.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร

ผลการจำลองการทำงานกรณีจำนวนข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้สำเร็จโดยเฉลี่ย (average number of received packets) แสดงดังภาพประกอบที่ 5-19 ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าทั้งโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV ให้สมรรถนะที่ต่ำลงเมื่อช่วงเวลาการซักรั่วอย่างมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตาม โพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะที่สูงกว่าในทุกระดับช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง จากการที่โพรโทคอล RMCSR ให้จำนวนข้อมูลที่รับได้ที่โหนดปลายทางมากกว่ากรณีโพรโทคอล AODV ในขณะที่กำหนดให้ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างของโหนดต้นทางมีค่าเท่ากัน สามารถเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่า ขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทางและการส่งข้อมูลของโพรโทคอล RMCSR มีประสิทธิภาพสูงกว่า หรือโพรโทคอล RMCSR สามารถรับมือกับความไม่แน่นอนของการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สายได้สูงกว่า ในภาพประกอบที่ 5-20 ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างที่มากขึ้น จะทำให้จำนวนข้อมูลที่ส่งที่โหนดต้นทางและรับที่โหนดปลายทางได้น้อยลง ดังนั้นจึงเป็นผลให้ช่วงเวลาจិតเตอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น สำหรับผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยแสดงดังภาพประกอบที่ 5-21 ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลาการซักรั่วอย่างที่ทำการทดสอบของโพรโทคอล RMCSR หรือโพรโทคอล AODV มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกำหนดให้ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างมีค่ามากขึ้น จำนวนข้อมูลที่ส่งโดยโหนดต้นทางก็จะน้อยลง และจำนวนข้อมูลที่รับได้ที่โหนดปลายทางก็จะลดลงตามอย่างเป็นสัดส่วน ดังนั้นภายใต้คุณลักษณะของเครือข่ายที่ทำการทดสอบแบบเดียวกัน ซึ่งในที่นี้คือ การ

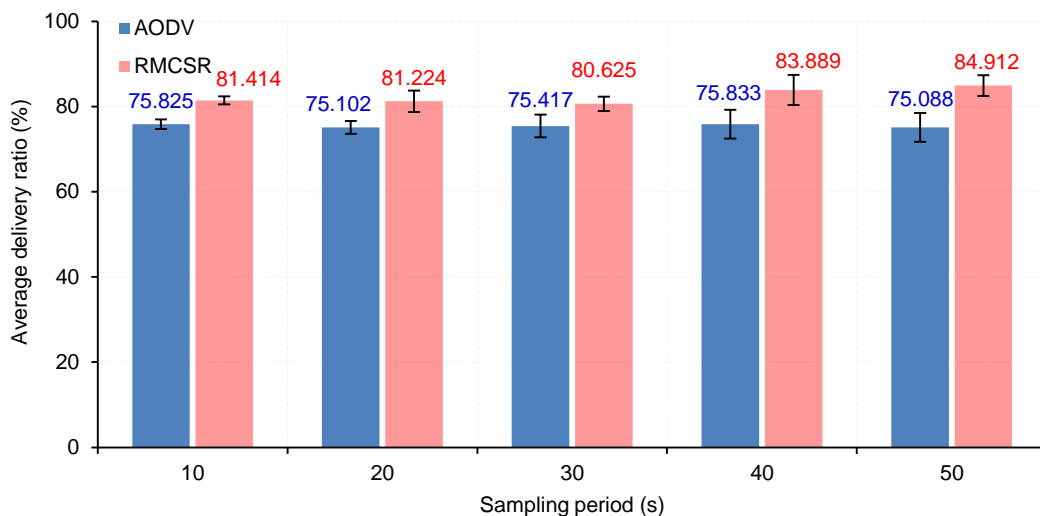
กำหนดจำนวนโหนด และอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากัน จึงเป็นผลให้อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลาชักตัวอย่างของแต่ละโพรโทคอลไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้สำเร็จโดยเฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง

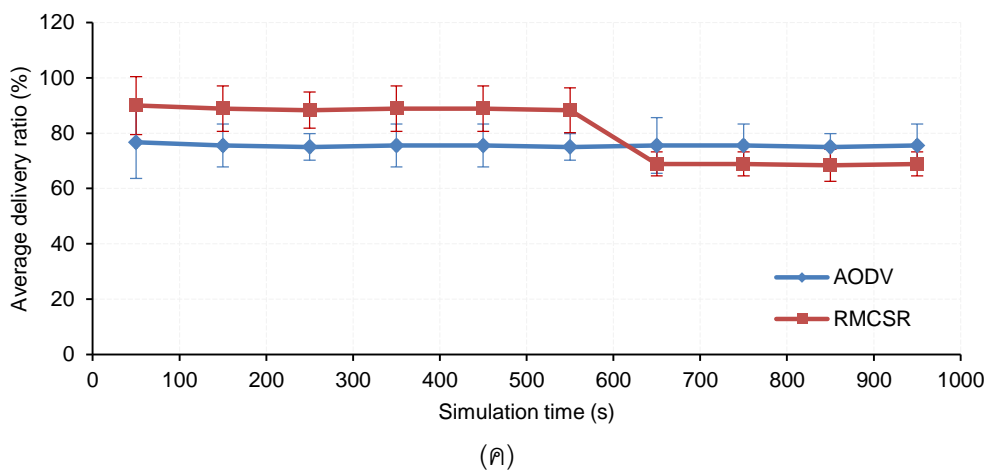
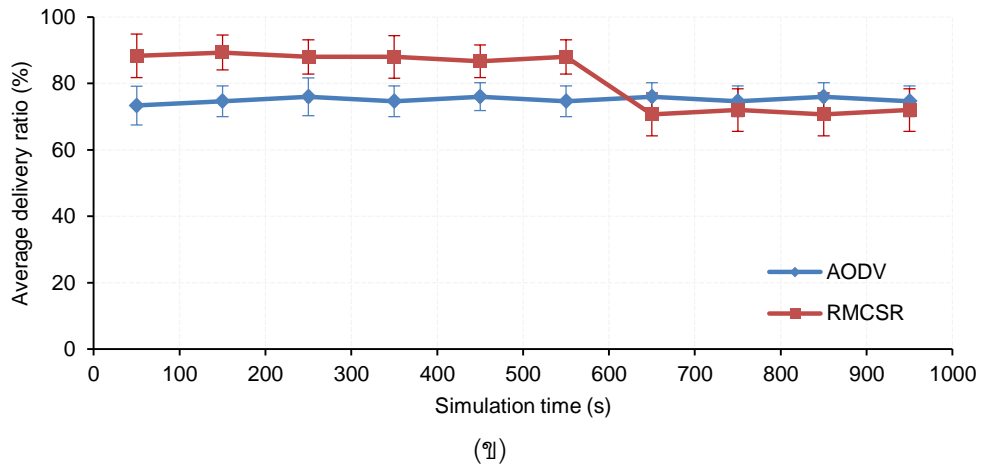
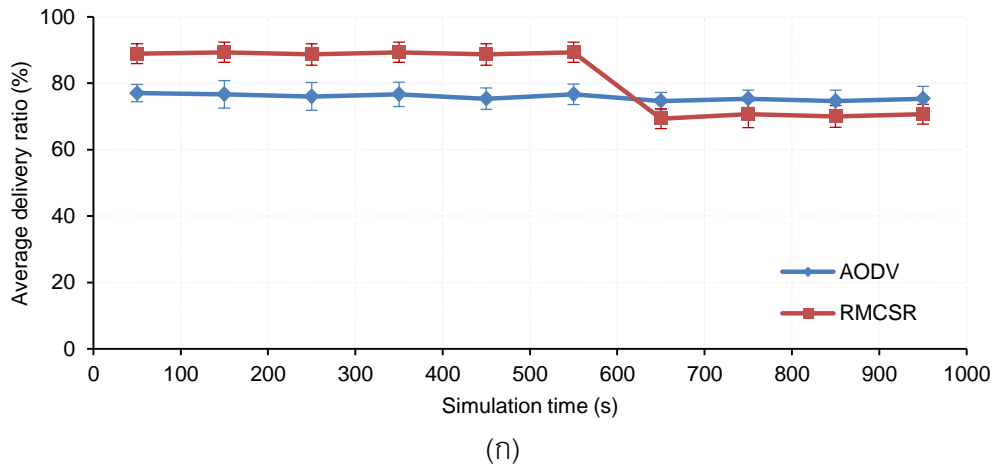


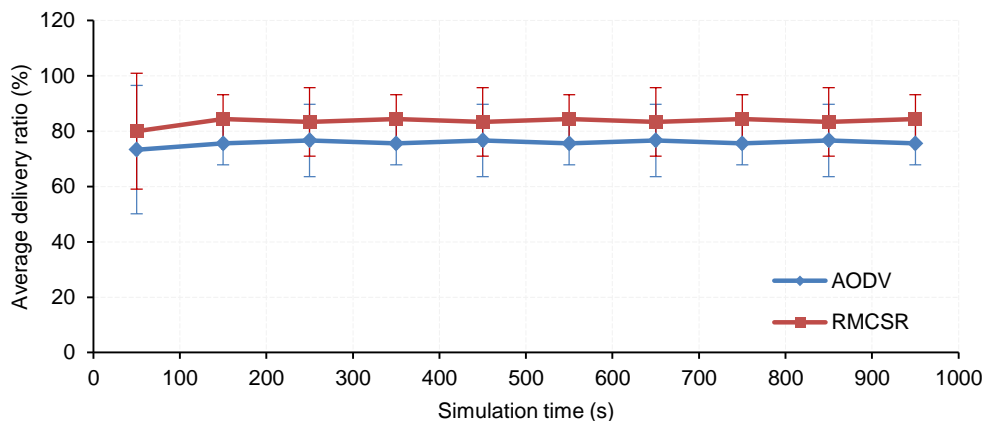
ภาพประกอบ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจitterเฉลี่ยและช่วงเวลาการชักตัวอย่าง



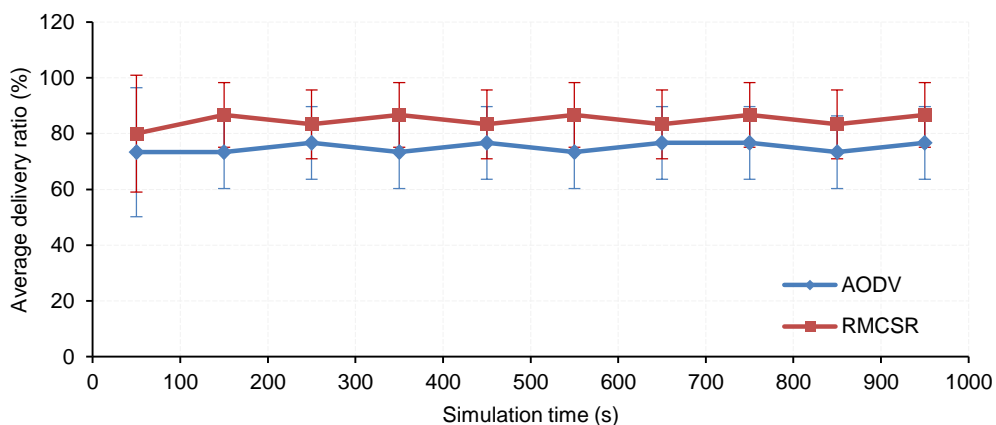
ภาพประกอบ 5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาการซักรับตัวอย่าง

ภาพประกอบที่ 5-22 แสดงอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน ในภาพประกอบที่ 5-22 (ก) (ข) และ (ค) โพรโทคอล RMCSR ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอล AODV ตลอดช่วงระยะเวลา 600 วินาทีแรก โดยประมาณ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว หลังจากช่วงเวลาดังกล่าว ทั้งสองโพรโทคอลให้สมรรถนะไม่แตกต่างกัน ผลการจำลองการทำงานในส่วนนี้ ยังแสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาการซักรับตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจาก 10 วินาที จนถึง 30 วินาที โพรโทคอล RMCSR ก็ยังคงให้สมรรถนะทางด้านการสื่อสารที่ดีอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถทำให้ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแนวโน้มของเส้นกราฟที่ตกลงที่หลังวินาทีที่ 600 โดยประมาณ ซึ่งหมายถึงโพรโทคอล RMCSR สลับเส้นทางไปเลือกเส้นทางจาก ประเด็นพลังงานแทน เนื่องจากระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้แล้ว สำหรับที่ช่วงเวลาการซักรับตัวอย่างเท่ากับ 40 วินาที และ 50 วินาที แสดงดังภาพประกอบที่ 5-22 (ง) และ (จ) ตามลำดับ โพรโทคอล RMCSR ให้ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าโพรโทคอล AODV อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งหมดเวลาการจำลองการทำงาน ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยไม่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่า ไม่สามารถควบคุมระบบควบคุมให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ที่ช่วงเวลาซักรับตัวอย่างทดสอบดังกล่าว (แสดงด้วยผลการจำลองในหัวข้อที่ 5.3.3.2 สมรรถนะทางด้านการควบคุม ลำดับต่อไป) โพรโทคอล RMCSR จึงไม่มีการสลับเส้นทางไปเลือกเส้นทางที่พิจารณาประเด็นพลังงานเพื่อเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง





(ง)

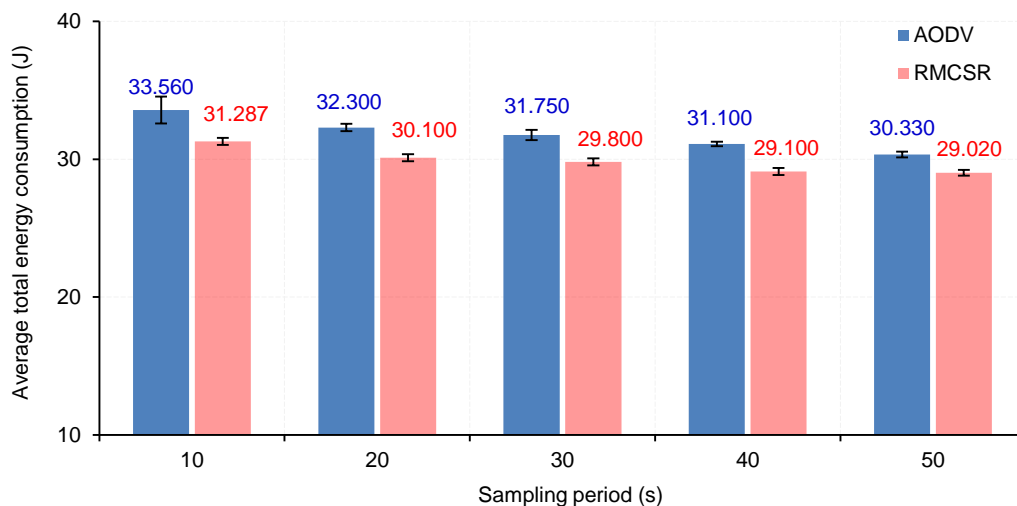


(จ)

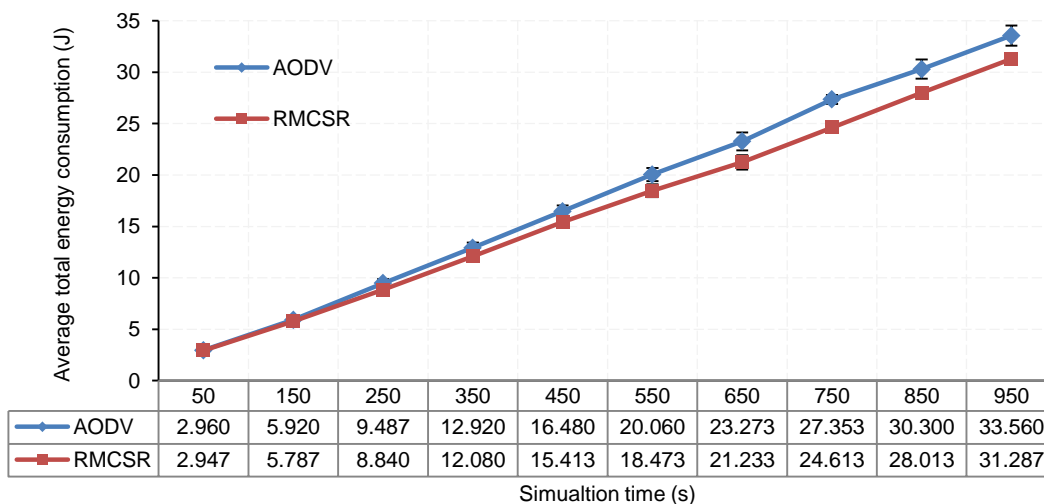
ภาพประกอบ 5-22 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่ช่วงเวลากการชักตัวอย่างเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 วินาที ตามลำดับ

ภาพประกอบที่ 5-23 แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายเมื่อทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลากการชักตัวอย่าง ทั้งโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV ให้แนวโน้มการใช้พลังงานค่อย ๆ ลดลง เมื่อช่วงเวลากการชักตัวอย่างมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่โพรโทคอล RMCSR ใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอล AODV ที่ทุกระดับช่วงเวลากการชักตัวอย่างที่ทดสอบสังเกตได้ว่า แนวโน้มการใช้พลังงานของโพรโทคอล RMCSR จะค่อย ๆ ลดลง (จาก 31.286 จูล ถึง 29.020 จูล) เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโพรโทคอล AODV (จาก 33.560 จูล ถึง 30.300 จูล) ผลการจำลองการทำงานกรณีพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายที่แต่ละช่วงเวลา ตลอด

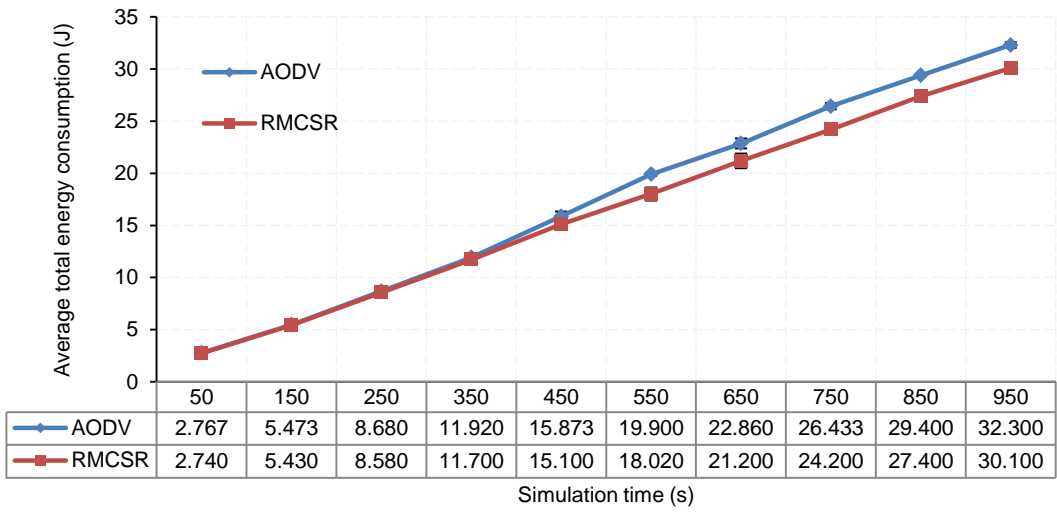
ระยะเวลาการจำลองการทำงาน แสดงดังภาพประกอบ 5-24 (ก) ถึง (จ) โดยผลการจำลองในส่วนนี้สอดคล้องกันกับผลการจำลองในภาพประกอบ 5-23



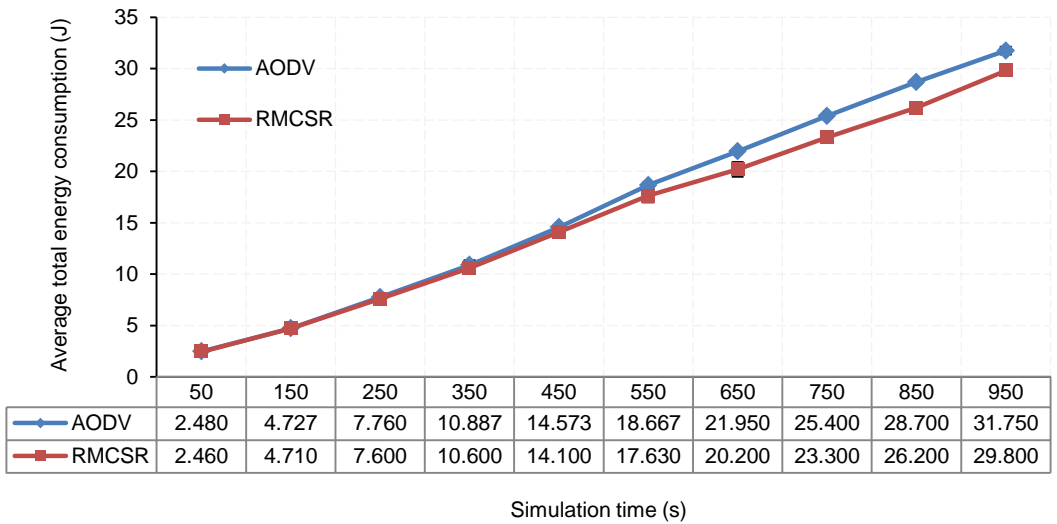
ภาพประกอบ 5-23 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยและช่วงเวลาการซักรตัวอย่าง



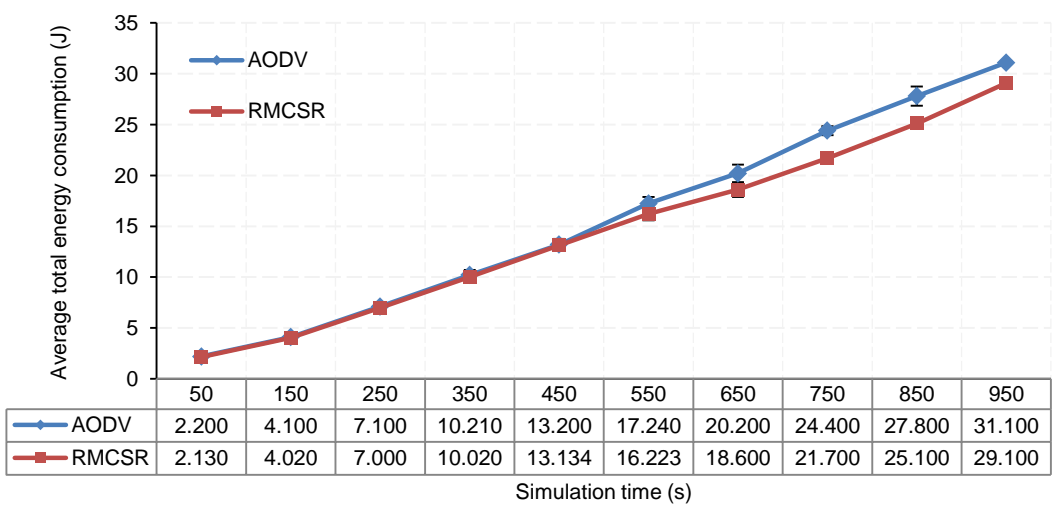
(ก)



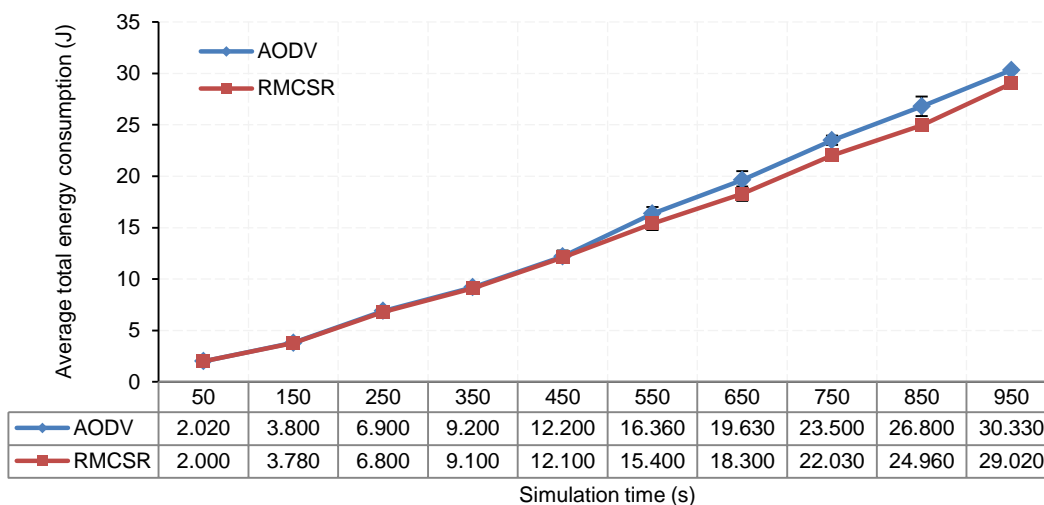
(a)



(b)



(c)



(จ)

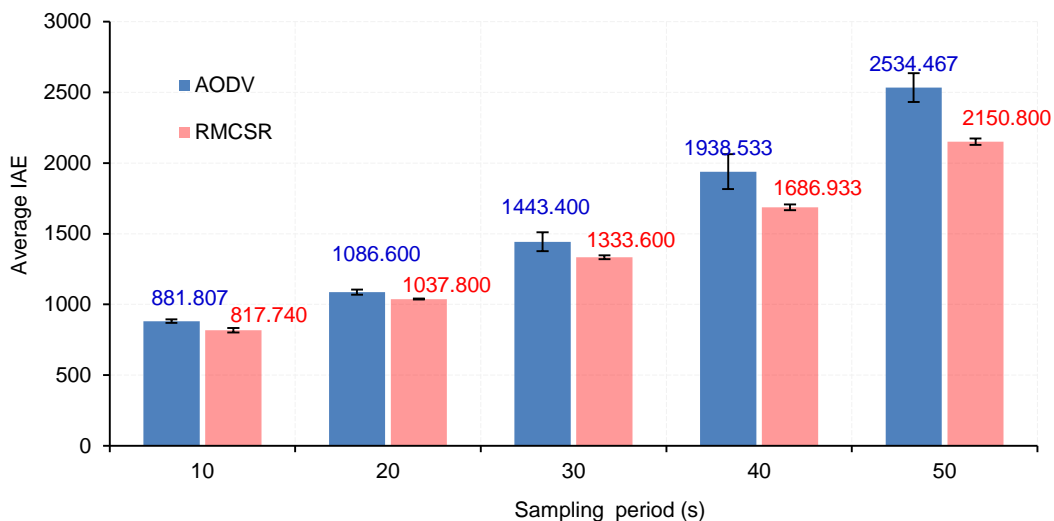
ภาพประกอบ 5-24 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยที่ช่วงเวลาการซักร้อยอย่างเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 วินาที ตามลำดับ

5.3.3.2 สมรรถนะทางการควบคุม

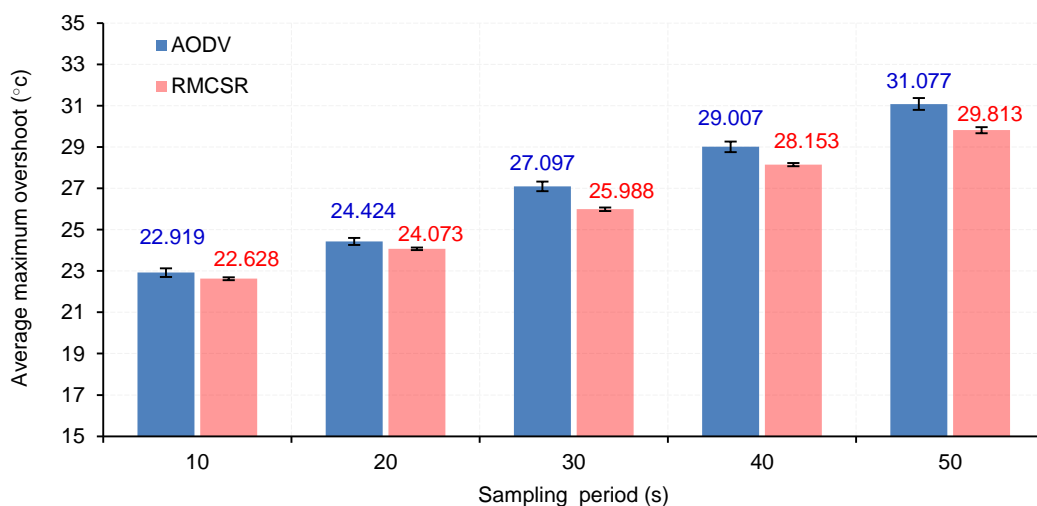
ผลสมรรถนะทางการควบคุมแสดงโดย IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักร้อยอย่าง แสดงดังภาพประกอบที่ 5-25 5-26 และตาราง 5-3 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะทางการควบคุมทั้งกรณีการใช้งานโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV จะต่ำลงเมื่อช่วงเวลาการซักร้อยอย่างมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามโพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะทางการควบคุมสูงกว่าโพรโทคอล AODV ในทุกช่วงเวลาการซักร้อยอย่างที่ทดสอบ ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ที่ช่วงเวลาการซักร้อยอย่างมีค่ามาก ปริมาณข้อมูลที่ส่งโดยโหนดต้นทางและรับได้ที่โหนดปลายทางจะมีจำนวนน้อยลง ดังนั้น ตัวควบคุมหรือแอกชูเอเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่กับโหนดปลายทางจะได้รับข้อมูลด้วยช่วงระยะเวลาที่ห่างกันมากขึ้น และถ้าหากมีการสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้นระหว่างการสื่อสารในเครือข่าย แอคชูเอเตอร์ก็จะยิ่งได้รับข้อมูลอย่างไม่ต่อเนื่องมากขึ้น ลักษณะดังกล่าว จะส่งผลให้ตัวควบคุมและแอกชูเอเตอร์เองไม่สามารถคำนวณ และป้อนค่าอินพุตที่ได้รับการปรับปรุงให้ทันสมัยอยู่เสมอ เพื่อไปควบคุมอุณหภูมิภายในห้องได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้เข้าสู่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการได้ หรือสามารถควบคุมได้โดยใช้เวลานาน จึงเป็นสาเหตุให้สมรรถนะทางการควบคุมต่ำลง

เมื่อพิจารณาประเด็นผลช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ยในตารางที่ 5-3 ถึงแม้ว่าโพรโทคอล RMCSR จะให้สมรรถนะทางการควบคุมที่สูงกว่าโพรโทคอล AODV ในทุกช่วงเวลาการซักรั่วอย่างที่ทำ การทดสอบ แต่ระบบควบคุมก็ไม่สามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ในระยะเวลาการจำลองการทำงาน ที่ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างเท่ากับ 40 วินาที และ 50 วินาที ผลการจำลองจากตารางที่ 5-3 นี้ สัมพันธ์โดยตรงกับผลช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย ดังนำเสนอในภาพประกอบ 5-20 ก่อนหน้า ดังที่ได้ อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้า ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยที่มากกว่า $T/4$ หรือ 44.75 วินาที จะทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ ดังเช่นที่ช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง เท่ากับ 40 วินาที และ 50 วินาที ทั้งในกรณีโพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV นอกจากนี้ ในกรณีของโพรโทคอล AODV ถึงแม้ว่าที่ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างเท่ากับ 30 วินาที ระบบควบคุม สามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ แต่เมื่อพิจารณาผลค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยดังในภาพประกอบที่ 5-26 จะเห็นได้ว่าค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยมีค่ามากกว่าค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงสุดที่อนุญาตได้ ซึ่งแสดง ถึงระดับอุณหภูมิที่รู้สึกสบายของผู้อาศัย โดยกำหนดไว้เท่ากับ 26 องศาเซลเซียส [93] ในขณะที่ โพรโทคอล RMCSR ให้ค่าสูงสุดในระดับที่ยอมรับได้

จากผลการจำลองการทำงานที่ได้ในส่วนนี้ ผู้วิจัยสรุปว่า ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างที่สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมกับระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคารภายใต้ลักษณะเครือข่ายที่ทำการทดสอบอยู่ในช่วง 10 วินาที ถึง 30 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากสามารถทำให้ระบบควบคุมเข้าสู่ สภาวะอยู่ตัวได้สำเร็จ อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างเท่ากับ 10 วินาที ให้สมรรถนะ ทางด้านการควบคุมที่ดีที่สุด โดยสามารถยืนยันได้จากผล IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และ ช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย ซึ่งให้ค่าน้อยสุด และเมื่อพิจารณาสมรรถนะทางการสื่อสาร ที่ช่วงการ เวลาซักรั่วอย่างเท่ากับ 10 วินาทีนี้ ให้ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายมากกว่าที่ ช่วงเวลาการซักรั่วอย่างเท่ากับ 20 วินาที และ 30 วินาที ไม่มากนัก



ภาพประกอบ 5-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ย และช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง



ภาพประกอบ 5-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง

ตาราง 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าที่เฉลี่ยและช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง

ช่วงเวลาการซักรั่วอย่าง (วินาที)	เวลาเข้าที่เฉลี่ย (วินาที)			
	AODV	95% c.i.	RMCSR	95% c.i.
10	622.333	8.706	600.333	5.863
20	652.533	12.746	620.800	10.712
30	718.533	20.248	672.800	9.718
40	>1000	-	>1000	-
50	>1000	-	>1000	-

5.3.4 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การรบกวนของสภาพแวดล้อมต่อระบบควบคุม

5.3.4.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร

เพื่อศึกษาประเด็น การรบกวนของสภาพแวดล้อมส่งผลอย่างไรต่อการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางและสมรรถนะของระบบควบคุม ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.1.4 ก่อนหน้า ผู้วิจัยทำการทดสอบในประเด็นนี้โดยการกำหนดให้ประตูห้องถูกเปิดและปิดที่วินาทีที่ 2,000 และ วินาทีที่ 2,300 ตามลำดับ โดยกำหนดเวลาการจำลองการทำงานเท่ากับ 4,000 วินาที ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 5-4 และ 5-5 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอล RMCSR และโพรโทคอล AODV ให้สมรรถนะทางการสื่อสารจากทั้งสองตัววัดไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตาราง 5-4 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง	อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย (%)	95% c.i.
AODV	75.405	0.719
RMCSR	76.057	0.770

ตาราง 5-5 ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย

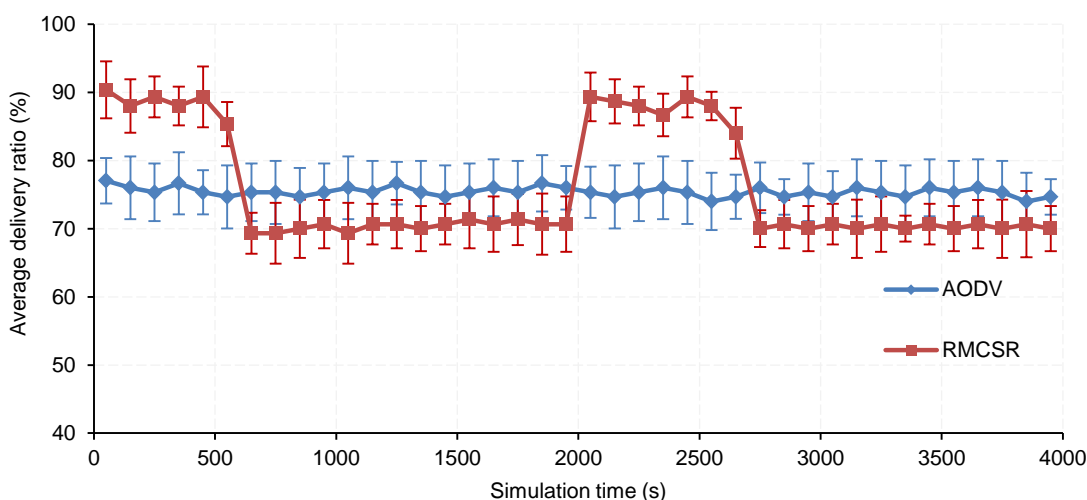
โพรโทคอลการจัดเส้นทาง	อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย (%)	95% c.i.
AODV	13.299	0.126
RMCSR	13.186	0.134

ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน แสดงดังภาพประกอบที่ 5-27 ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยในกรณีของโพรโทคอล RMCSR มีค่าสูงกว่ากรณีของโพรโทคอล AODV อย่างต่อเนื่องในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 500 และในช่วงวินาทีที่ 2,000 ถึงวินาทีที่ 2,700 โดยประมาณ นอกช่วงเวลาดังกล่าว อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยของทั้งสองโพรโทคอลให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน เหตุผลว่าทำไมโพรโทคอล RMCSR ให้อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่สูงกว่าในช่วงเวลาดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่

500 โดยประมาณ ระบบควบคุมยังคงอยู่ในช่วงสภาวะชั่วคราว โพรโทคอล RMCSR เลือกเส้นทางส่งข้อมูลโดยพิจารณาจาก delay cost เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง ดังได้อภิปรายไว้ในผลการจำลองการทำงานในหัวข้อก่อนหน้านี้ การเลือกเส้นทางจาก delay cost สามารถช่วยเพิ่มความสำเร็จในการรับข้อมูลที่ไหลบ่าทางได้มากขึ้น สำหรับในช่วงเวลาหลังวินาทีที่ 500 ถึงวินาทีที่ 2,000 โดยประมาณ ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ ดังนั้น โพรโทคอล RMCSR จึงเลือกเส้นทางส่งข้อมูลโดยพิจารณาจาก energy cost แทน จึงทำให้มีโอกาสเกิดการสูญหายของข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวได้ และเป็นผลให้อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยลดลง ดังเคยได้อภิปรายไว้ก่อนหน้านี้

เนื่องจากประตูห้องถูกเปิดออกในช่วงวินาทีที่ 2,000 ถึงวินาทีที่ 2,300 จึงส่งผลให้ระดับอุณหภูมิภายในห้องซึ่งเดิมที่อยู่ในช่วงค่าอุณหภูมิเป้าหมายเกิดการเปลี่ยนแปลงเพราะผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอกห้องที่เข้ามา เป็นผลให้ระบบควบคุมหลุดออกจากสภาวะอยู่ตัว โพรโทคอล RMCSR สามารถตรวจสอบสถานการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ได้อย่างอัตโนมัติโดยอาศัยวิธีการดัดแปลงในอัลกอริทึมที่ 4-6 กระบวนการนำส่งข้อมูล กล่าวคือ ในระหว่างการส่งข้อมูล โหนดต้นทางจะทำการเฝ้าสังเกตสภาวะของระบบควบคุมเพื่อคอยติดตามผลลัพธ์การควบคุม หากระบบควบคุมหลุดออกจากสภาวะอยู่ตัวสู่สภาวะชั่วคราว โหนดต้นทางจะเริ่มกระบวนการสร้างเส้นทางใหม่โดยใช้ delay cost เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางแทน โหนดต้นทางสามารถรู้การเปลี่ยนแปลงดังอธิบายนี้ได้จากการตรวจสอบค่าตัวแปร *State* ที่โหนดเองได้จดจำไว้ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางครั้งก่อนหน้านี้ และค่า *Control_System_Error* ของระบบควบคุม ณ เวลาที่ส่งข้อมูลปัจจุบัน โดยถ้าหากตัวแปร *State* มีค่าเท่ากับ 2 (หมายถึง ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะอยู่ตัว ณ เวลาการจัดเส้นทางครั้งก่อนหน้านี้) และค่า *Control_System_Error* มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.02 แสดงว่า ณ เวลาปัจจุบันระบบควบคุมกลับไปสู่สภาวะชั่วคราว โหนดต้นทางก็จะทำการค้นหาเส้นทางใหม่ในทันทีและกำหนดให้ delay cost เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความสำเร็จในการรับข้อมูลที่ไหลบ่าทางได้มากขึ้น ในการทดสอบนี้ เมื่อทำการปิดประตูห้องที่วินาทีที่ 2,300 ระบบควบคุมยังไม่สามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ในทันที จากผลการจำลอง ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ที่วินาทีที่ 2,700 โดยประมาณ โดยเมื่อระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โพรโทคอล RMCSR จะสลับเส้นทางไปเลือกเส้นทางจาก energy cost แทน โหนดต้นทางสามารถรู้การเปลี่ยนแปลงดังอธิบายจากการตรวจสอบตัวแปร *State* ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 (ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว ณ เวลาการจัดเส้นทางครั้งก่อนหน้านี้) และ *Control_System_Error* มีค่าน้อยกว่า 0.02 หรือหมายถึง ณ เวลาปัจจุบันระบบควบคุมได้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว การเลือก

เส้นทางส่งข้อมูลจากการพิจารณา energy cost เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางจึงทำให้มีโอกาสเกิดการสูญหายของข้อมูล และเป็นผลให้อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยลดลงได้ ผลการจำลองการทำงานในหัวข้อนี้ยืนยันว่า โพรโทคอล RMCSR สามารถเลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลได้อย่างอัตโนมัติ และสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามสถานะของระบบควบคุมหรือผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ได้เสนอไว้



ภาพประกอบ 5-27 อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน

ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายแสดงดังตารางที่ 5-6 ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า การใช้งานโพรโทคอล RMCSR ในกรณีที่ระบบควบคุมถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม โหนดในเครือข่ายสามารถประหยัดพลังงานได้สูงกว่ากรณีการใช้งานโพรโทคอล AODV อย่างมีนัยยะทางสถิติ สำหรับตารางที่ 5-7 แสดงผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR ที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน กำหนดให้ตัวแปร EC_AODV และ EC_RMCSR ดังแสดงในตารางที่ 5-7 คือ พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยในกรณีโพรโทคอล AODV และในกรณีโพรโทคอล RMCSR ตามลำดับ ดังนั้น $EC_AODV - EC_RMCSR$ คือผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอลทั้งสอง ผลการจำลองการทำงานในส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า โพรโทคอล RMCSR ใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอล AODV โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบควบคุมสามารถเข้าสู่ช่วงสถานะอยู่ตัวได้แล้ว ผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR ลดลงจาก 4.053 จูล เป็น 3.747 จูล ในช่วงวินาทีที่ 1,950 ถึงวินาทีที่ 2,050 โดยประมาณ สำหรับที่ในช่วงวินาทีที่

2,050 ถึงวินาทีที่ 2,650 ผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR ยังคงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ที่วินาทีที่ 2,750 โดยประมาณ โดยที่ช่วงเวลาระหว่างวินาทีที่ 2,050 ถึงวินาทีที่ 2,650 คือช่วงที่ระบบควบคุมอยู่ในสภาวะชั่วคราว ผลการจำลองการทำงานนี้ยืนยันการปฎิปรายในข้างต้น

ตารางที่ 5-6 พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่าย

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง	พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่าย (จูล)	95% c.i.
AODV	138.680	0.523
RMCSR	131.587	0.565

ตารางที่ 5-7 ผลต่างของพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยระหว่างโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR ที่แต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน

ช่วงเวลา (วินาที)	$EC_AODV - EC_RMCSR$ (จูล)	95% c.i.
50	0.093	0.056
150	0.107	0.137
250	0.240	0.121
350	0.360	0.270
450	0.420	0.283
550	1.100	0.367
650	1.727	0.450
750	1.880	0.399
850	2.067	0.631
950	2.373	0.475
1,050	2.733	0.659
1,150	3.060	0.607
1,250	3.140	0.671
1,350	3.367	0.453
1,450	3.473	0.372

ช่วงเวลา (วินาที)	<i>EC_AODV</i> – <i>EC-RMCSR</i> (จุด)	95% c.i.
1,550	3.533	0.534
1,650	3.607	0.852
1,750	3.767	0.546
1,850	3.873	0.592
1,950	4.053	0.553
2,050	3.747	0.650
2,150	3.727	0.747
2,250	3.580	0.784
2,350	3.440	0.579
2,450	3.407	0.588
2,550	3.380	0.893
2,650	3.367	0.716
2,750	3.753	0.779
2,850	4.020	0.765
2,950	4.107	0.868
3,050	4.173	0.745
3,150	4.227	0.800
3,250	4.793	0.816
3,350	4.947	0.887
3,450	5.693	0.700
3,550	5.707	0.973
3,650	5.853	0.701
3,750	6.673	0.763
3,850	6.760	0.806
3,950	7.093	0.694

หมายเหตุ: *EC_AODV* และ *EC_RMCSR* ดังแสดงในตารางที่ 5-7 คือ พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ย

ในกรณีโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR ตามลำดับ

5.3.4.2 สมรรถนะทางการควบคุม

สมรรถนะทางการควบคุมแสดงโดยผล IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และเวลาเข้า-ที่เฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 5-8 ผลการจำลองการทำงานที่ได้ยืนยันว่า โพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะทางการควบคุมสูงกว่าโพรโทคอล AODV ในทุกตัววัด โดยโพรโทคอล RMCSR สามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่ช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ยหรือสภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่า และให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยต่ำกว่า ถึงแม้ว่าสมรรถนะทางการสื่อสารกรณีผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยในตาราง 5-4 และ 5-5 จะมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมตามสภาวะของระบบควบคุมสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะในการควบคุมได้ การเพิ่มสมรรถนะทางการสื่อสารในช่วงเวลาที่จำเป็นและเหมาะสมแก่ระบบควบคุม ช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายการควบคุมได้ในที่สุด

ตาราง 5-8 สมรรถนะทางการควบคุมกรณีระบบควบคุมได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม

โพรโทคอล	IAE เฉลี่ย	95% c.i.	ค่าพุ่งเกินสูงสุด		เวลาเข้าที่	
			เฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	95% c.i.	เฉลี่ย (วินาที)	95% c.i.
AODV	1355.130	40.444	23.002	0.248	3102.800	56.711
RMCSR	1194.800	10.334	22.410	0.114	2712.930	24.651

5.3.5 โพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอภายใต้การปรับเปลี่ยนระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง

5.3.5.1 สมรรถนะทางการสื่อสาร

ผลการจำลองการทำงานดังเสนอในหัวข้อที่ 5.3.1 ถึง 5.3.4 ก่อนหน้า ผู้วิจัยกำหนดใช้ *ETED_Threshold* ซึ่งเป็นค่าเวลาสูงสุดที่อนุญาตให้ข้อความ RREP ส่งผ่านในเครือข่ายระหว่างโหนดปลายทางและโหนดต้นทางในขั้นตอนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR เท่ากับ $T/7$ หรือ 25.570 วินาที ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.1.5 สำหรับในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาประเด็นการปรับเปลี่ยนช่วงเวลา *ETED_Threshold* ในขั้นตอนการจัดเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR ส่งผลต่อสมรรถนะการสื่อสารและการควบคุมอุณหภูมิในอาคารอย่างไร ผู้วิจัยทดสอบ *ETED_Threshold* ต่างกัน 8 ระดับคือ $T/22$ (8.136 วินาที) $T/19$ (9.421 วินาที) $T/16$ (11.187 วินาที) $T/13$ (13.769 วินาที) $T/10$ (17.900 วินาที) $T/7$ (25.570 วินาที) $T/4$ (44.750 วินาที)

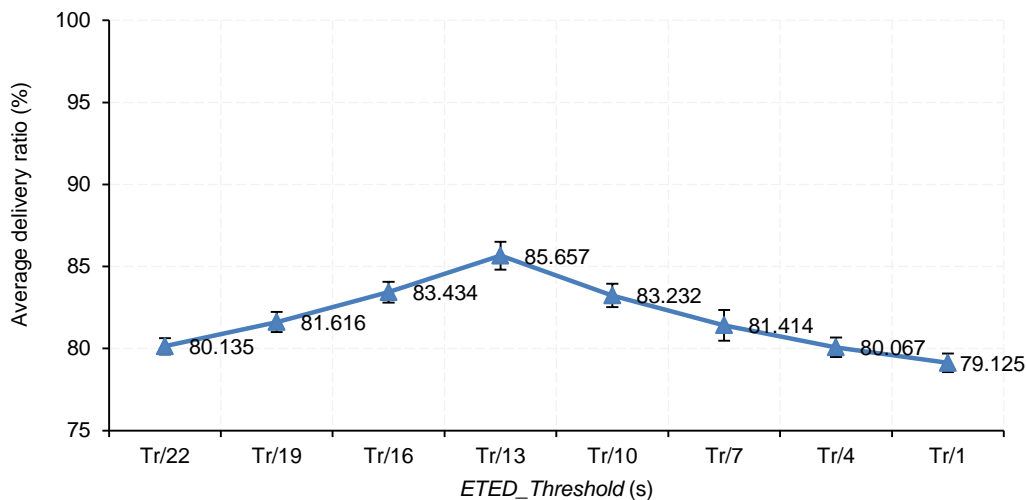
และ $T/1$ (179 วินาที) ตามลำดับ ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลา จิตเตอร์เฉลี่ย แสดงดังภาพประกอบที่ 5-28 และ 5-29 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า การกำหนดใช้ $ETED_Threshold$ ที่แตกต่างกัน ทำให้ได้สมรรถนะทางด้าน การสื่อสารที่ต่างกัน โดยที่ $ETED_Threshold$ ที่ช่วง $T/22$ ถึง $T/13$ ให้ผลอัตราส่วนการรับ ข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อ $ETED_Threshold$ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก $T/13$ ถึง $T/1$ ผลอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยจะต่ำลง และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยจะมีค่ามากขึ้น โดยที่ค่า $ETED_Threshold$ ที่ให้สมรรถนะจากทั้งสองตัววัดข้างต้นดีที่สุดคือ $T/13$

การทดสอบในหัวข้อที่ 5.3.5 นี้ กำหนดค่าเวลาการชักรั่วอย่างในการส่งข้อมูลของโหนด ต้นทางเท่ากับ 10 วินาที [7] ดังกำหนดไว้ในตารางที่ 5-1 ดังนั้น ถ้าโหนดปลายทางสามารถรับ ข้อมูลจากโหนดต้นทางได้ในทุก ๆ ช่วงเวลาการชักรั่วอย่างตลอดระยะเวลาการจำลองการทำงาน โดยไม่มีการสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้น จะทำให้ได้ผลช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 10 วินาที โดยประมาณ เหมือนดังตัวอย่างผลการจำลองการทำงานที่ได้จากโพรโทคอล AODV ในกรณีที่ไม่ มีการกำหนดอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตในเครือข่าย ดังภาพประกอบที่ 5-5 ก่อนหน้า ซึ่งให้ผล ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 10.101 วินาที อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ เครือข่ายที่ทำการทดสอบมีจำนวนโหนดถึง 41 โหนด และกำหนดอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต ในการจำลองการทำงานเท่ากับ 0.245 ดังนั้น จึงทำให้มีโอกาสเกิดการสูญหายของแพ็กเก็ต และ เกิดความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตมากขึ้นตามมา ซึ่งจะทำให้ผลช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยมีค่ามากขึ้น ผลการจำลองการทำงานจากภาพประกอบที่ 5-29 แสดงให้เห็นว่าที่ $ETED_Threshold$ มีค่า เท่ากับ $T/13$ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับลักษณะเครือข่ายที่ทำการทดสอบ โดยให้ผลช่วงเวลา จิตเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 11.797 วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงเวลาการชักรั่วอย่างมากที่สุด หมายเหตุ: จากภาพประกอบที่ 5-5 ก่อนหน้า ที่จำนวนโหนดในเครือข่ายเท่ากับ 41 โหนด และอัตราการสูญ หายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.245 โพรโทคอล AODV ให้ผลช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 13.333 วินาที ผลการจำลองที่ได้จากภาพประกอบที่ 5-29 นี้ แสดงให้เห็นว่า ที่ค่า $ETED_Threshold$ มี ค่ามากเกินไป เช่นที่ $T/1$ โพรโทคอล RMCSR ให้ผลช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 12.768 วินาที ซึ่งใกล้เคียงใกล้เคียงกรณีโพรโทคอล AODV ดังนั้น ที่ค่าดังกล่าวนี้จึงไม่เหมาะสมแก่การใช้งาน สำหรับที่ ค่า $ETED_Threshold$ มีค่าน้อยเกินไปก็เช่นเดียวกัน เช่นที่ $T/22$ จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาจิตเตอร์ เฉลี่ยมีค่ามากขึ้น หรือเท่ากับ 12.607 วินาที ซึ่งเข้าใกล้ 13.333 วินาที

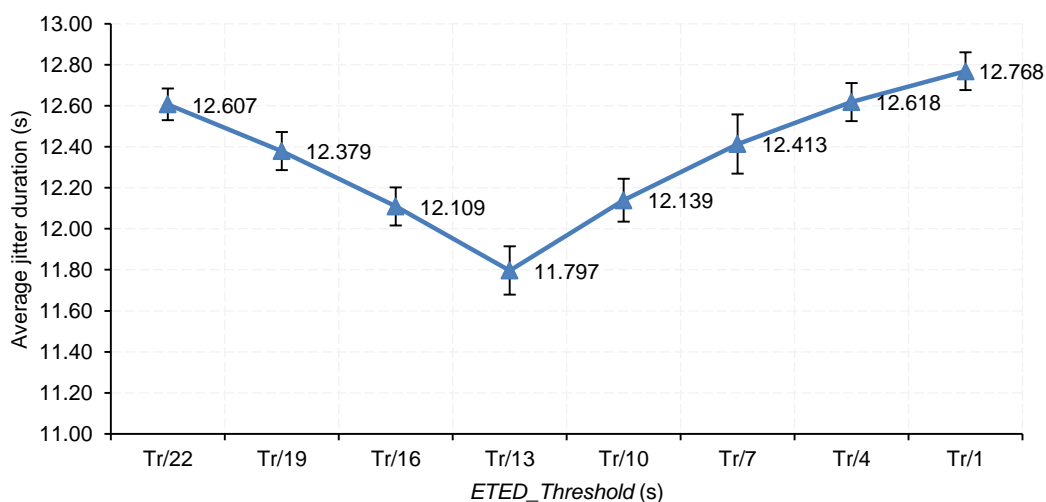
กระบวนการทำงานของโพรโทคอล RMCSR อาศัยพื้นฐานการทำงานของโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม เมื่อโหนดต้นทางต้องการจะส่งข้อมูล จะเริ่มกระบวนการค้นหาเส้นทางโดยการส่งข้อความ RREQ ไปในเครือข่าย ข้อความ RREQ อาจจะไม่สามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้สำเร็จหรือใช้เวลานานในการส่ง เนื่องจากผลของความไม่แน่นอนของการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สาย หากโหนดต้นทางรอข้อความ RREP นานเกินกว่าช่วงระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งกำหนดเท่ากับ $RREP_WAIT_TIME$ (หรือเท่ากับ 1 วินาที) โหนดต้นทางจะส่งข้อความ RREQ ใหม่ซ้ำ โดยจะส่งไม่เกินจำนวนครั้งที่อนุญาตได้ ซึ่งกำหนดเท่ากับ $RREQ_RETRIES$ (3 ครั้ง) โหนดต้นทางจะรอส่งข้อความ RREQ ใหม่ซ้ำด้วยระยะเวลาที่กำหนดจากรูปแบบที่เรียกว่า binary exponential backoff โดยการรอส่งข้อความ RREQ ซ้ำในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ $2^n * RREP_WAIT_TIME$ เมื่อ n คือจำนวนครั้งของการส่งข้อความ RREQ ดังนั้น ด้วยรูปแบบการรอข้างต้น จึงมีโอกาสที่โหนดปลายทางจะไม่สามารถส่งข้อความ RREP กลับมายังโหนดต้นทางได้สำเร็จภายในหนึ่งช่วงเวลาการซักรั่วอย่างซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 10 วินาที สามารถอธิบายตัวอย่างดังนี้ โหนดต้นทางส่งข้อความ RREQ แรกที่วินาทีที่ 10 หลังจากนั้นอีก 1 วินาที หากโหนดต้นทางยังไม่ได้รับข้อความ RREP จากโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะเริ่มส่งข้อความ RREQ ใหม่ซ้ำครั้งที่หนึ่ง และจะทำการรอข้อความ RREP ด้วยเวลาเท่ากับ $2^1 * 1$ หรือ 2 วินาที หากโหนดต้นทางไม่ได้รับข้อความ RREP ในช่วงเวลาดังกล่าว โหนดต้นทางก็จะส่งข้อความ RREQ ซ้ำเป็นครั้งที่สองและรอข้อความ RREP ด้วยเวลาเท่ากับ $2^2 * 1$ หรือ 4 วินาที หากโหนดต้นทางยังไม่ได้รับข้อความ RREP อีก ก็จะทำการส่งข้อความ RREQ ซ้ำเป็นครั้งที่สาม (ครั้งสุดท้าย) และรอข้อความ RREP ด้วยเวลาเท่ากับ $2^3 * 1$ หรือ 8 วินาที จากตัวอย่างดังกล่าวนี้ เวลาทั้งหมดที่ใช้ไปกรณีโหนดต้นทางไม่ได้รับข้อความ RREP เท่ากับ 15 วินาที (ผลรวมของ 1 วินาที 2 วินาที 4 วินาที และ 8 วินาที ตามลำดับ) ถ้าโหนดต้นทางพยายามส่งข้อความ RREQ จนครบจำนวน $RREQ_RETRIES$ แล้ว และยังไม่ได้รับข้อความ RREP โหนดต้นทางจะละทิ้งข้อมูลที่เก็บไว้ในบัฟเฟอร์ด้วยเงื่อนไข $DROP_RTR_NO_ROUTE$ หรือไม่มีเส้นทางสำหรับส่งข้อมูล และจะพยายามจัดเส้นทางหรือส่งข้อความ RREQ ใหม่ในช่วงเวลาการซักรั่วอย่างถัดไป สำหรับจากตัวอย่างข้างต้นนี้ หากโหนดต้นทางไม่ได้รับข้อความ RREP จากโหนดปลายทางภายในเวลา 8 วินาที หลังจากที่ได้ส่งข้อความ RREQ ซ้ำครั้งที่สาม โหนดต้นทางจะละทิ้งข้อมูลที่เก็บไว้ในบัฟเฟอร์ทันที อย่างไรก็ตาม ณ เวลาดังกล่าวที่โหนดต้นทางละทิ้งข้อมูล คือ วินาทีที่ 25 (โหนดต้นทางเริ่มจัดเส้นทางที่วินาทีที่ 10 และรอด้วยเวลาอีก 15 วินาที) ซึ่งเลยเวลาการซักรั่วอย่างครั้งถัดไปที่โหนดต้นทางจะต้องส่งข้อมูลใหม่หรือวินาทีที่ 20 ดังนั้น ทั้งข้อมูลแพ็กเกตก่อนหน้าทีวินาทีที่ 10 และข้อมูลแพ็กเกตลำดับถัดมาที่

วินาทีที่ 20 ที่ถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ของโหนดต้นทางจะถูกทิ้งเนื่องจากยังไม่มีเส้นทางสำหรับส่งข้อมูล โดยโหนดต้นทางจะทำจัดเส้นทางใหม่อีกครั้งที่ช่วงเวลาการชักตัวอย่างถัดไป

จากข้อมูลดังอธิบายในข้างต้น ผู้วิจัยมีความเห็นว่าการใช้งาน *ETED_Threshold* ในขั้นตอนการส่งข้อความ RREP เช่นที่ค่าเท่ากับ $T/13$ หรือ 13.769 วินาที นานเกินระยะเวลาที่โหนดต้นทางจะรอข้อความ RREP ได้ จากที่อธิบายไว้ข้างต้น สังเกตได้ว่า หลังจากโหนดต้นทางส่งข้อความ RREQ ครั้งใด ๆ ออกไป โหนดต้นทางไม่สามารถรอข้อความ RREP ได้ถึง 13.769 วินาที (สูงสุดได้ 8 วินาที) อย่างไรก็ตาม ประโยชน์ของการกำหนดใช้งาน *ETED_Threshold* อธิบายดังตัวอย่างต่อไปนี้ สมมติให้ในการจัดเส้นทางครั้งใด ๆ โหนดต้นทางส่งข้อความ RREQ ออกไปในเครือข่าย แต่โหนดต้นทางไม่ได้รับข้อความ RREP ภายในเวลากำหนด โหนดต้นทางจึงทำการส่งข้อความ RREQ ซ้ำ แต่ถ้าหากข้อความ RREQ ในครั้งก่อนหน้าถูกส่งถึงโหนดปลายทางและโหนดปลายทางได้ส่งข้อความ RREP มาในเครือข่ายแล้ว หรือโหนดระหว่างทางใด ๆ รับข้อความ RREP ได้ โดยที่ความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางของการส่งข้อความ RREP ดังกล่าวยังคงน้อยกว่าค่า *ETED_Threshold* (แต่นานเกินกว่าที่โหนดต้นทางจะรอไหว) จากเหตุการณ์ดังอธิบายนี้ หากโหนดระหว่างทางดังกล่าวได้รับข้อความ RREQ ที่ส่งมาจากโหนดต้นทางครั้งใหม่ (โหนดระหว่างทางสามารถรับข้อความ RREQ ที่ส่งซ้ำโดยโหนดต้นทางได้เนื่องจากค่า broadcast ID ในข้อความ RREQ ครั้งใหม่จะมีค่าสูงกว่าครั้งก่อนหน้า) โหนดระหว่างทางนั้น ๆ สามารถตอบข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางได้ในทันที โดยไม่ต้องรอให้ข้อความ RREQ ครั้งใหม่ส่งถึงโหนดปลายทาง และเมื่อข้อความ RREP ถูกส่งถึงโหนดต้นทางโดยที่ค่าความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทางยังคงน้อยกว่าค่า *ETED_Threshold* อยู่ เส้นทางนั้น ๆ ก็สามารถใช้สำหรับส่งข้อมูลได้ทันที อย่างไรก็ตาม จากที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้านี้ โหนดระหว่างทางสามารถตอบข้อความ RREP ได้ก็ต่อเมื่อ โหนดนั้น ๆ มีข้อมูลเส้นทางไปยังโหนดปลายทางที่โหนดต้นทางต้องการ โดยสามารถตรวจสอบได้จากค่าจำนวนฮอปในตารางเส้นทางของโหนดเองซึ่งต้องไม่เท่ากับค่าอนันต์ และค่า sequence number ของรายการโหนดปลายทางที่เก็บไว้มากกว่าหรือเท่ากับค่า sequence number ในข้อความ RREQ ที่โหนดนั้น ๆ รับเข้ามา อย่างไรก็ตาม จากตัวอย่างข้างต้น เนื่องจากโหนดระหว่างทางในเส้นทางดังอธิบายเคยรับข้อความ RREP มาก่อนหน้าแล้ว จึงมีข้อมูลเส้นทางเก็บไว้ในตารางเส้นทางของโหนดเอง



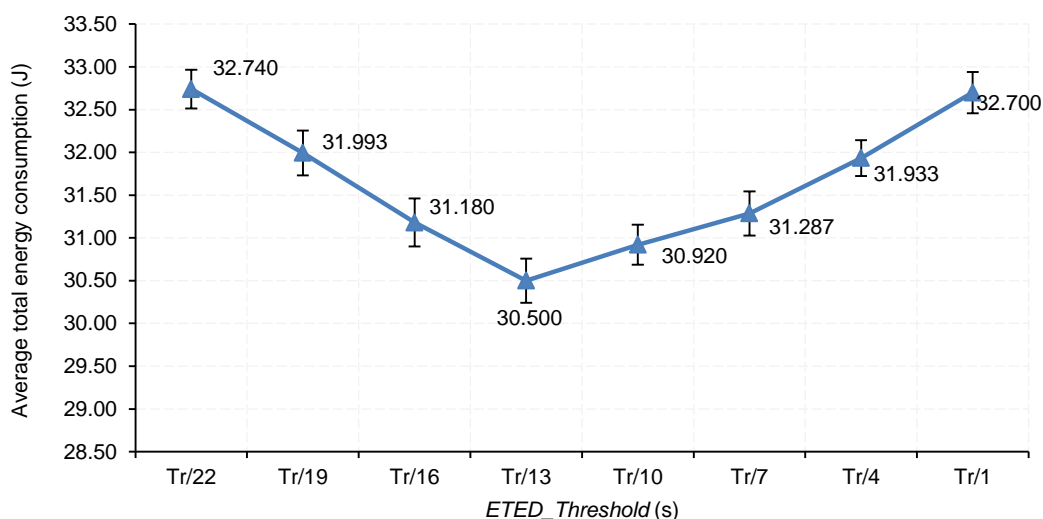
ภาพประกอบ 5-28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง



ภาพประกอบ 5-29 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาจitterเฉลี่ย และระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง

พลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่ายเมื่อทำการปรับเปลี่ยน *ETED_Threshold* แสดงดังภาพประกอบที่ 5-30 ผลการจำลองการทำงานที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบในภาพประกอบที่ 5-28 และ 5-29 ก่อนหน้า ซึ่งจะให้ผลกราฟที่มีแนวโน้มรูปแบบเดียวกัน โดยที่ *ETED_Threshold* ที่ช่วง $T_{/22}$ ถึง $T_{/13}$ จะให้ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยลดลง และเมื่อ *ETED_Threshold* มีค่าเพิ่มขึ้นจาก $T_{/13}$ ถึง $T_{/1}$ จะให้ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จากภาพประกอบที่ 5-7 ก่อนหน้า ที่จำนวนโหนดในเครือข่ายเท่ากับ 41 โหนด และอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.245 โพรโทคอล AODV ให้ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.560

จุด สำหรับผลการจำลองที่ได้จากภาพประกอบที่ 5-30 แสดงให้เห็นว่าที่ค่า *ETED_Threshold* เท่ากับ $T_r/1$ และ $T_r/22$ โพรโทคอล RMCSR ให้ผลพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.7 จูล และ 32.74 จูล ซึ่งใกล้เคียงกันกับกรณีโพรโทคอล AODV ดังนั้น ที่ค่าดังกล่าวนี้จึงไม่เหมาะสมแก่การใช้งาน



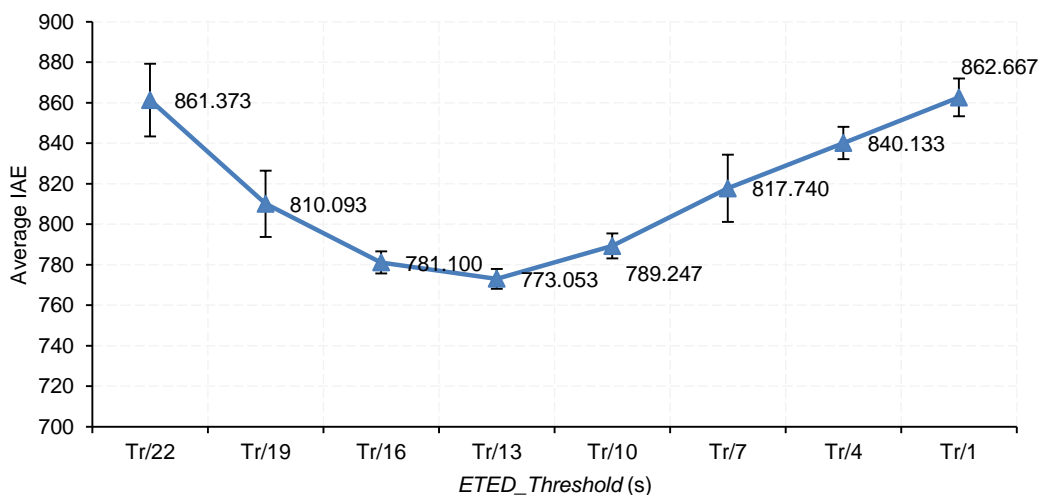
ภาพประกอบ 5-30 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่าย และระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง

5.3.5.2 สมรรถนะทางการควบคุม

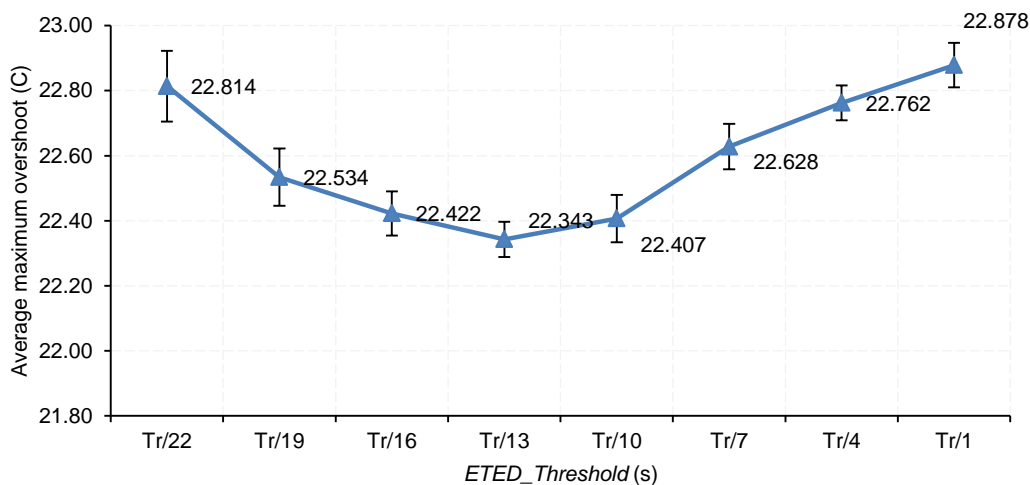
ผลสมรรถนะทางการควบคุมแสดงโดย IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า *ETED_Threshold* แสดงดังภาพประกอบที่ 5-31 5-32 และ 5-33 ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า ผลกราฟที่ได้ในภาพประกอบทั้งสามให้แนวโน้มสอดคล้องกันกับผลกราฟที่ได้จากทางการสื่อสารดังแสดงไว้ด้านบน จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยเป็นตัวกำหนดสมรรถนะทางการควบคุม เมื่ออัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่มีค่าน้อย หรือช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยมีค่ามาก ตัวควบคุม หรือแอกชูเอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับโหนดปลายทางจะได้รับข้อมูลด้วยช่วงระยะเวลาที่กว้างขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีการคำนวณ และป้อนค่าอินพุตเพื่อไปควบคุมอุณหภูมิภายในห้องด้วยความถี่ที่ช้าลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้เข้าสู่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายได้โดยใช้เวลารวดเร็ว จึงเป็นสาเหตุให้สมรรถนะทางการควบคุมต่ำลง ในทางตรงกันข้าม เมื่ออัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ยมีค่ามาก หรือช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ยมีค่าน้อย ตัวควบคุม หรือแอกชูเอเตอร์ ก็จะสามารถป้อนค่าอินพุตเพื่อไปควบคุมอุณหภูมิภายในห้องด้วยความถี่ที่มากขึ้น จึงเป็นผลให้สามารถควบคุมอุณหภูมิ

ภายในอาคารให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้รวดเร็วขึ้น และได้สมรรถนะทางด้านการควบคุมดีขึ้นตาม

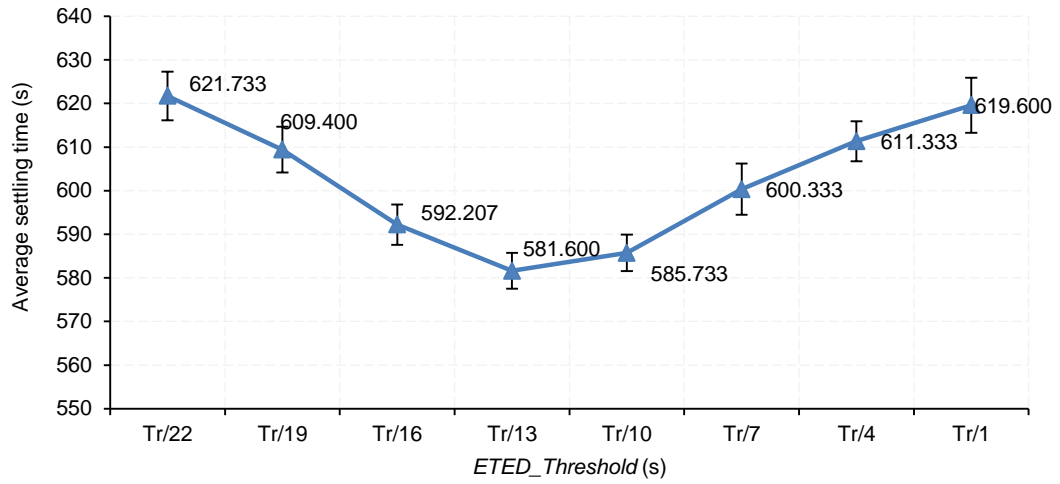
จากภาพประกอบที่ 5-9 5-10 และตารางที่ 5-2 ก่อนหน้า ที่จำนวนโหนดในเครือข่ายเท่ากับ 41 โหนด และอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.245 โพรโทคอล AODV ให้ผล IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ยเท่ากับ 881.807 22.919 องศาเซลเซียส และ 622.333 วินาที ตามลำดับ สำหรับผลการจำลองที่ได้จากภาพประกอบที่ 5-31 5-32 และ 5-33 แสดงให้เห็นว่าที่ค่า *ETED_Threshold* เท่ากับ $T_r/1$ และ $T_r/22$ โพรโทคอล RMCSR ให้ผล IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย ใกล้เคียงกันกับกรณีโพรโทคอล AODV ดังนั้นที่ค่าดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมแก่การกำหนดใช้งาน



ภาพประกอบ 5-31 ความสัมพันธ์ระหว่าง IAE เฉลี่ย และระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง



ภาพประกอบ 5-32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ยและระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง



ภาพประกอบ 5-33 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ยและระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตตลอดเส้นทาง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย ข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอ และแนวทางในการแก้ไข และข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

บทนี้สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษาโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR สำหรับการควบคุมคุณภาพภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย สรุปข้อจำกัดของโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่นำเสนอและแนวทางในการแก้ไข และท้ายสุด เสนอแนะงานวิจัยในอนาคต โดยมีเนื้อหาดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษามรรถนะของโพรโทคอล RMCSR เปรียบเทียบกับโพรโทคอล AODV กรณีการควบคุมคุณภาพภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย จากรูปแบบการจำลองการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนำเสนอในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่า กระบวนการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะของการสื่อสารและสมรรถนะของการควบคุมการเตรียมเส้นทางอย่างเหมาะสมของโพรโทคอล RMCSR ที่มีการพิจารณาทั้งคุณลักษณะของการสื่อสารแบบไร้สาย และสถานะของระบบควบคุมที่ศึกษาในขั้นตอนวิธีการเลือกเส้นทางสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะทางการสื่อสารและสมรรถนะทางการควบคุมได้สูงกว่าโพรโทคอล AODV โพรโทคอล RMCSR ให้สมรรถนะทางการสื่อสารแสดงโดย อัตราส่วนการรับข้อมูลต่อการส่งข้อมูลเฉลี่ย ช่วงเวลาจิตเตอร์เฉลี่ย และพลังงานรวมที่ใช้โดยเฉลี่ยของเครือข่าย และให้สมรรถนะทางการควบคุมแสดงโดย IAE เฉลี่ย ค่าพุ่งเกินสูงสุดเฉลี่ย และช่วงเวลาเข้าที่เฉลี่ย สูงกว่ากรณีโพรโทคอล AODV อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต จำนวนโหนด และระยะเวลาการชັกด่วนอย่าง ยิ่งไปกว่านั้น โพรโทคอล RMCSR สามารถช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้รวดเร็วกว่าโพรโทคอล AODV ในกรณีที่ระบบควบคุมถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม และท้ายสุด การกำหนดใช้ระดับกันความล่าช้าของการส่งแพ็กเก็ตที่เหมาะสมในขั้นตอนวิธีการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล RMCSR สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบทั้งทางการสื่อสารและด้านการควบคุม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถประยุกต์ใช้งานกับกรณีการควบคุมคุณภาพภายในอาคารด้วยเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สายได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

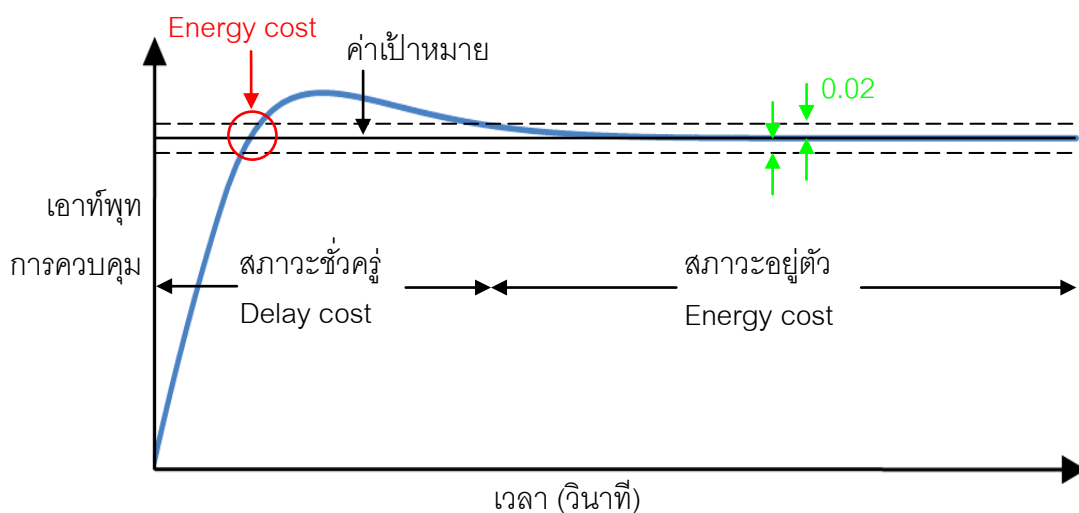
6.2 ข้อจำกัดของโพรโทคอลการแจ้งเตือนที่นำเสนอและแนวทางในการแก้ไข

จากกระบวนการทำงานของโพรโทคอล RMCSR ดังอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 กลไกการแจ้งเตือนตามผลตอบสนองของระบบควบคุมสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ผู้วิจัยสรุปข้อจำกัดของวิธีการที่นำเสนอตลอดจนแนวทางในการแก้ไขในสี่ประเด็น ดังนี้

ก) ผู้วิจัยกำหนดให้โหนดต้นทางรู้สถานะของระบบควบคุมได้จากการคำนวณหาค่าผิดพลาดการควบคุม โดยที่ค่าผิดพลาดการควบคุมคือ ผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายและค่าจริงที่โหนดต้นทางวัดได้จากสภาพแวดล้อมที่ทำการควบคุม ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1.1 ค่าผิดพลาดการควบคุมจะถูกใช้เพื่อกำหนดตัวแปร *State* และโหนดจะใช้ประโยชน์จากตัวแปรนี้เพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดตัววัดในการเลือกเส้นทาง ดังนั้นความแม่นยำในการคำนวณค่าผิดพลาดการควบคุมจึงส่งผลโดยตรงต่อการตัดสินใจเลือกเส้นทางของโหนด ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้โหนดต้นทางรู้ค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุม และโหนดต้นทางสามารถอ่านค่าที่ได้จากการวัดจริงโดยไม่มีความผิดพลาด ซึ่งในการใช้งานจริงโหนดต้นทางมีโอกาสอ่านค่าที่ได้จากการวัดผิดพลาดเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน คุณลักษณะของเซนเซอร์ (sensor characteristic) และอายุการใช้งานของเซนเซอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากกระบวนการทำงานของโพรโทคอล RMCSR ดังนำเสนอในหัวข้อที่ 4.4.3 กระบวนการนำส่งข้อมูล โหนดต้นทางจะทำการตรวจสอบสถานะของระบบควบคุมอย่างต่อเนื่องเพื่อติดตามผลลัพธ์จากการควบคุมในทุก ๆ ครั้งก่อนการส่งข้อมูลจริง การเพิ่มความถี่ในการตรวจสอบสถานะของระบบควบคุมสามารถช่วยติดตามสถานะจริงของระบบควบคุมได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ระบบควบคุมที่ทำการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้คือระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่ให้ผลตอบสนองค่อนข้างช้า ความผิดพลาดที่เกิดจากการอ่านค่าส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์การควบคุมน้อยกว่ากรณีระบบควบคุมที่ให้ผลตอบสนองรวดเร็ว

ข) ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 โพรโทคอลการแจ้งเตือน RMCSR เลือกเส้นทางตามสถานะของระบบควบคุม ณ เวลาปัจจุบัน ถ้าระบบควบคุมอยู่ในสถานะชั่วคราว โหนดจะเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาจากความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตเกิดเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง และถ้าระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัว โหนดจะเลือกเส้นทางโดยการพิจารณาจากการใช้พลังงานของโหนดเป็นตัววัดในการเลือกเส้นทางแทน ด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ ในช่วงที่ระบบควบคุมยังคงอยู่ในสถานะชั่วคราวแต่โหนดต้นทางคำนวณค่าผิดพลาดการควบคุมได้ค่าน้อยกว่า 0.02 ซึ่งเป็นจังหวะที่ค่าเอาต์พุตจากการควบคุมเท่ากับค่าเป้าหมาย (set point หรือ desired value) เป็นครั้งแรก แสดงจังหวะดังกล่าวนี้ดังเครื่องหมายวงกลมในภาพประกอบที่ 6-1 โหนดต้นทางจะเข้าใจว่าระบบ

ควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว และจะเลือกเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลจาก energy cost เป็นตัววัดในการเลือกเส้นทาง โดยความรุนแรงของความผิดพลาดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของช่วงเวลาชักตัวอย่าง หรือ sampling period ของการส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง ถ้าช่วงเวลาชักตัวอย่างมีค่ามาก เหตุการณ์ดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อการควบคุมน้อยลง อย่างไรก็ตาม ในการทำงานของโพรโทคอล RMCSR เมื่อพ้นช่วงเวลาดังกล่าวโหนดต้นทางจะกลับไปเลือกเส้นทางจาก delay cost ในทันที จากผลการจำลองการทำงานในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเหตุการณ์ดังกล่าวแทบไม่ส่งผลกระทบต่อ การควบคุม สำหรับแนวทางในการแก้ไขเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถทำได้ดังนี่คือ โหนดต้นทางจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าระบบควบคุมอยู่ในช่วงสภาวะใด โดยการจดจำสภาวะของระบบควบคุมไว้ช่วงหนึ่ง ถ้าระบบควบคุมอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งเกินจำนวนครั้งการตรวจสอบที่เหมาะสม ก็สามารถทำให้แน่ใจได้ว่าระบบควบคุมอยู่ในสภาวะนั้น ๆ จริง เป็นต้น



ภาพประกอบ 6-1 ผลตอบสนองของระบบควบคุม

ค) ในโพรโทคอล RMCSR โหนดคำนวณ delay cost และ end-to-end delay จากสมการที่ 4-2 และ 4-4 ตามลำดับ โดยอาศัยผลต่างของเวลาการส่งแพ็กเก็ตระหว่างโหนดตัวรับและโหนดตัวส่ง ดังนั้นโหนดในเครือข่ายจึงจำเป็นต้องมีการประสานเวลาให้ตรงกัน (time synchronization) ด้วยการกำหนดเวลาเริ่มต้นและจังหวะการเดินทางของเวลาให้ตรงกัน ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนดให้เวลาเริ่มต้นและจังหวะการเดินทางของเวลาของทุก ๆ โหนดตรงกัน ซึ่งในการใช้งานจริงถ้าไม่มีเทคนิคการปรับเวลาให้ตรงกันก็จะเกิดความผิดพลาดในการคำนวณ delay cost และ end-to-end delay ได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาการประสานเวลาให้ตรงกัน สามารถปรับปรุงการ

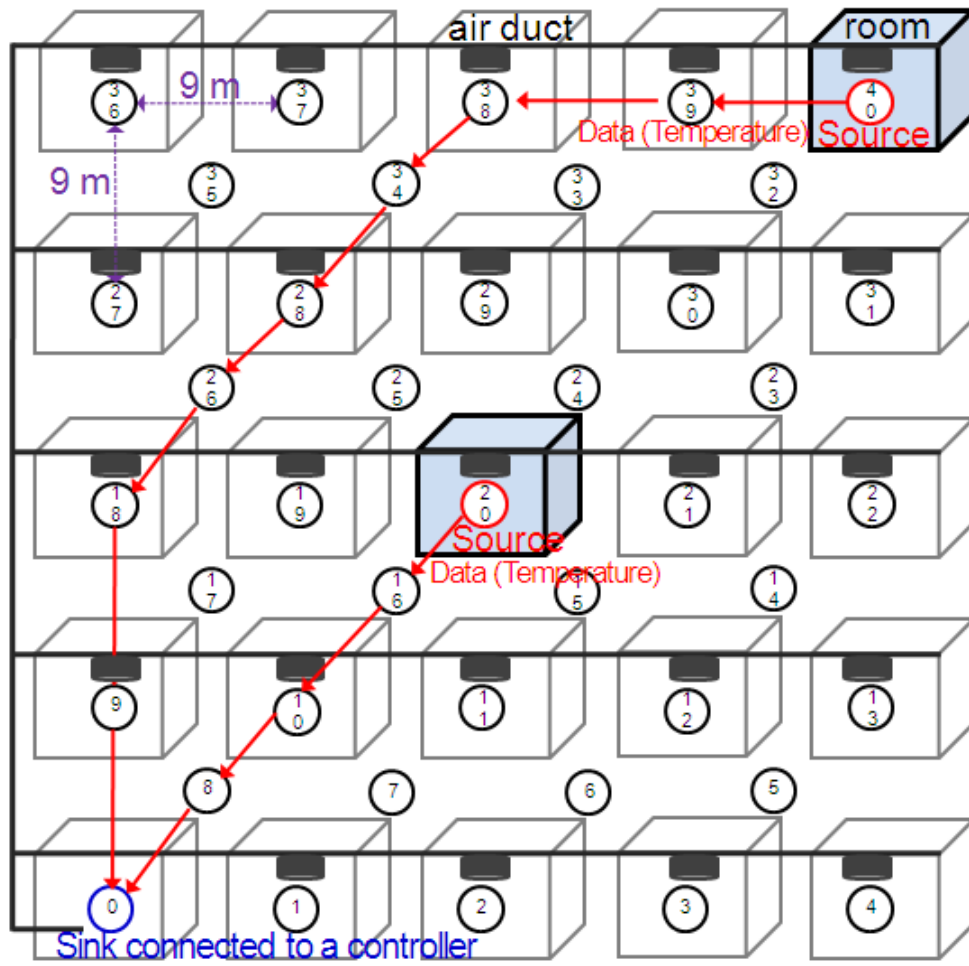
คำนวณ delay cost และ end-to-end delay ของโพรโทคอล RMCSR ได้ตั้งแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยที่ [30] กล่าวคือ กรณีการหาค่า delay cost ของคูโหนดการสื่อสารใด ๆ สามารถเปลี่ยนมาคำนวณที่โหนดใด ๆ แทน โดยที่ค่า delay cost คือช่วงเวลาที่โหนดใด ๆ รับข้อความ RREP เข้ามากระทั่งสามารถส่งข้อความ RREP ออกไปได้สำเร็จ (จนกว่าจะสำเร็จ) หาก delay cost ที่คำนวณได้จากวิธีการใหม่นี้มีค่ามาก แสดงว่า ณ โหนดนั้น ๆ อาจมีแพ็กเก็ตจำนวนมากที่รอส่ง หรืออาจมีการสูญหายและการส่งแพ็กเก็ตซ้ำเกิดขึ้น เป็นต้น ส่วนในกรณีการหาค่า delay cost สูงสุดของเส้นทางใด ๆ ยังคงสามารถใช้วิธีการเดิมที่นำเสนอในบทที่ 4 คือ โหนดระหว่างทางที่รับข้อความ RREP จะทำการบันทึกเฉพาะค่า delay cost ที่มีค่ามากที่สุดลงไปข้อความ RREP สำหรับการคำนวณค่า end-to-end delay ก็เช่นเดียวกัน แต่ละโหนดจะบวกค่าความล่าช้าที่ตนเองคำนวณได้ตามวิธีการใหม่ดังอธิบายในข้างต้นลงไปข้อความ RREP เพื่อสะสมเป็นค่า end-to-end delay ตลอดเส้นทาง ด้วยแนวคิดจากงานวิจัยที่ [30] ดังอธิบายนี้ ทุกโหนดในเครือข่ายจึงไม่มีความจำเป็นจะต้องประสานเวลาให้ตรงกัน เพราะการคำนวณค่าความล่าช้าเกิดขึ้นที่ตัวโหนดเอง

ง) ในการคำนวณ energy cost หรือในวิทยานิพนธ์นี้คือพลังงานที่โหนดใช้ไป แสดงดังสมการที่ (4-3) ผู้วิจัยกำหนดให้ทุก ๆ โหนดในเครือข่ายมีค่าพลังงานเริ่มต้นเท่ากันหมดในตอนเริ่มต้นการทำงาน การกำหนดดังกล่าวเป็นผลให้เกิดความยุติธรรมในการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานสูงสุดของแต่ละเส้นทาง เส้นทางใดที่มีโหนดใช้พลังงานมาก ก็จะส่งผลให้เส้นทางนั้นมีอายุการใช้งานที่สั้นลง อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริง โหนดมีพลังงานเริ่มต้นที่แตกต่างกันได้ ซึ่งอาจจะเกิดจากการใช้แบตเตอรี่ต่างชนิดกัน หรือการวางโหนดใหม่เพิ่มเติมโดยผู้ใช้งาน เป็นต้น ในกรณีที่โหนดมีพลังงานเริ่มต้นที่แตกต่างกัน การพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานของโหนดจะไม่สามารถบ่งชี้อายุการใช้งานของเส้นทางได้โดยตรง ยกตัวอย่างเช่น กรณีมีเส้นทางแข่งขันสองเส้นทาง ทั้งสองเส้นทางมีโหนดที่ให้ค่าการใช้พลังงานสูงสุดเท่ากัน แต่ถ้าเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งมีพลังงานเริ่มต้นที่น้อยกว่ามาก เส้นทางนั้นก็จะมีพลังงานที่เหลืออยู่ (remaining energy) น้อยกว่ามากเช่นกัน ดังนั้นเส้นทางดังกล่าวจะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าอีกเส้นทางหนึ่ง ดังนั้น ประเด็นการเลือกเส้นทางจากพลังงานควรพิจารณาทั้งกรณีการใช้พลังงานของโหนดและพลังงานที่เหลืออยู่ของโหนด [102, 103] จึงจะสามารถบ่งบอกได้ถึงสถานะของ traffic load ที่เกิดขึ้นในเส้นทางตลอดจนอายุการใช้งานของเส้นทางนั้น ๆ

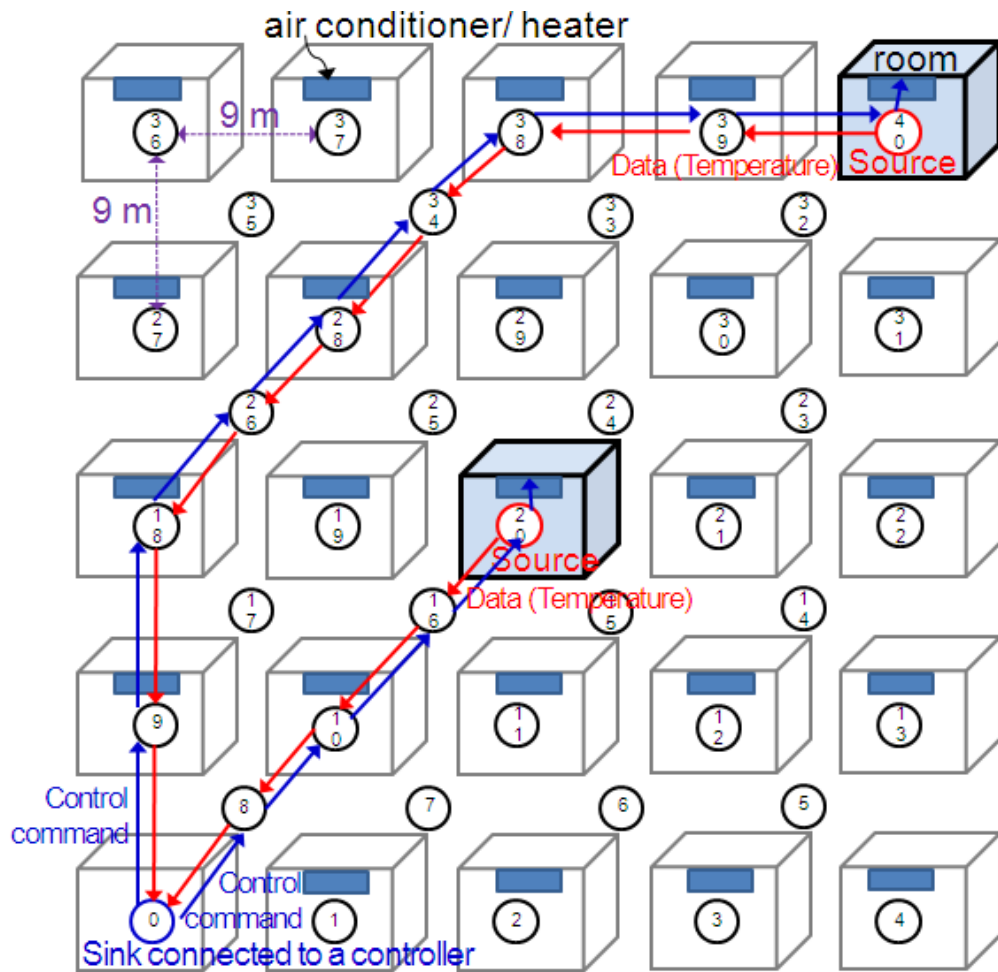
6.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

การศึกษารณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย ดังนำเสนอในบทที่ 5 ผู้วิจัยกำหนดให้มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงห้องเดียว หรือมีโหนดต้นทางส่งข้อมูลอุณหภูมิเพียงโหนดเดียว แสดงดังตัวอย่างในภาพประกอบที่ 5-1 และ 5-2 ก่อนหน้า สำหรับแนวทางการศึกษารณีการควบคุมอุณหภูมิจำนวนหลาย ๆ ห้อง หรือมีโหนดต้นทางจำนวนหลาย ๆ โหนดทำการส่งข้อมูลอุณหภูมิจากห้องที่ต้องการควบคุม จำเป็นต้องมีการพิจารณาประเด็น ดังนี้ ก) จำเป็นต้องมีการพัฒนาแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้องดังแสดงในสมการที่ (3-1) เพิ่มเติม โดยการพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิจากห้องที่อยู่ใกล้เคียงกัน (จากทุกทิศ) ต่ออุณหภูมิของห้องที่ต้องการควบคุม งานวิจัยใน [7, 12, 56] เสนอแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้องที่พิจารณาประเด็นดังอธิบายนี้ ข) จำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบการควบคุมแบบออสซิลเลชันกลางของตัวควบคุมเพิ่มเติม เพื่อรองรับการควบคุมจำนวนหลาย ๆ ห้อง แสดงดังตัวอย่างในงานวิจัยที่ [8, 9] และ ค) ควรมีการพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานจริง เช่น ในแต่ละห้อง มีคนเข้าทำงานและมีการใช้อุปกรณ์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง ในเวลาที่แตกต่างกัน [7, 12, 56] เป็นต้น

ตัวอย่างเค้าโครงเรื่องการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารมากกว่าหนึ่งห้อง แสดงดังภาพประกอบที่ 6-2 (ก) และ (ข) โดยในภาพประกอบที่ 6-2 (ก) ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ป้อนอุณหภูมิลมจ่ายไปยังห้องที่ต้องการควบคุม หรือห้องที่วางโหนด ID 20 และโหนด ID 40 ผ่านทางท่อลมระบายอากาศ ในระบบปรับอากาศ HVAC สำหรับในภาพประกอบที่ 6-2 (ข) ตัวควบคุมส่งการผ่านการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สายไปยังแอคชูเอเตอร์ ซึ่งในที่นี้คือเครื่องปรับอากาศ (air conditioner) หรือเครื่องทำความร้อน (heater) ที่ติดตั้งไว้ในห้องที่วางโหนด ID 20 และโหนด ID 40 ให้ป้อนอุณหภูมิลมจ่ายแก่ห้องดังกล่าว [12, 56] โดยกรณีตัวอย่างในภาพประกอบที่ 6-2 (ก) และ (ข) นี้ จำเป็นต้องมีการพัฒนาแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง และกระบวนการควบคุมแบบออสซิลเลชันกลางของตัวควบคุมเพิ่มเติม ดังได้อธิบายไว้ในข้อ ก) และข้อ ข) ข้างต้น สำหรับประเด็นในข้อ ค) งานวิจัยใน [7, 12, 56] เสนอให้โหนดเซนเซอร์ที่วางไว้ในห้องทำหน้าที่ตรวจวัดสถานะการมีอยู่ของคนในห้องนั้น ๆ หากมีคนเข้ามาในห้อง หรือออกไปจากห้อง โหนดเซนเซอร์จะทำการแจ้งไปยังศูนย์กลางการควบคุมโดยการสื่อสารแบบมัลติฮอปไร้สาย และศูนย์กลางการควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดไฟภายในห้องอย่างอัตโนมัติ โดยวิธีการดังอธิบายนี้ แหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง ซึ่งหมายถึง คน และหลอดไฟ ดังแสดงในสมการที่ (3-1) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างอัตโนมัติตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานจริง



(n)



(ข)

ภาพประกอบ 6-2 ตัวอย่างเค้าโครงเรื่องการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารมากกว่าหนึ่งห้อง (ห้องที่วางโหนด ID 20 และโหนด ID 40) (ก) ตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ป้อนอุณหภูมิลมจ่ายไปยังห้องที่วางโหนด ID 20 และโหนด ID 40 ผ่านทางท่อลมระบายอากาศ ในระบบปรับอากาศ HVAC และ (ข) ตัวควบคุมสั่งการผ่านการสื่อสารแบบมัลติ-ฮอปไร้สายไปยังแอคชูเอเตอร์ (เครื่องระบายอากาศ หรือเครื่องทำความร้อน) ที่ติดตั้งไว้ในห้องที่วางโหนด ID 20 และโหนด ID 40 ให้ป้อนอุณหภูมิลมจ่ายแก่ห้องดังกล่าว

บรรณานุกรม

- [1] I.F. Akyildiz and I.H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 351–367, 2004.
- [2] X. Feng, T. Yu-Chu, L. Yanjun and S. Youxian, "Wireless sensor/actuator network design for mobile control applications," *Sensors 2007*, vol. 7, no. 10, pp. 2157–2173, 2007.
- [3] P. Kulakowski, E. Calle and J.L. Marzo, "Performance study of wireless sensor and actuator networks in forest fire scenarios," *International Journal of Communication Systems*, vol. 26, pp. 515–529, 2012.
- [4] T. O'Donovan, J. Brown, F. Busching, A. Cardoso, J. do O, P. Furtado, P. Gil, A. Jugel, W.B. Pottner, U. Roedig, J.S. Silva, R. Silva, C.J. Sreenan, V. Vassiliou, T. Voigt, L. Wolf, and Z. Zinonos, "The GINSENG system for wireless monitoring and control: design, and deployment experiences," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 10, no. 1, 2013.
- [5] J. Araujo, M. Mazo, A. Anta, P. Tabuada and K.H. Johansson, "System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems," *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 175–184, 2014.
- [6] M. Pohjola, S. Nethi and R. Jantti, "Wireless control of a multihop mobile robot squad," *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, pp. 14–20, 2009.
- [7] S. Nethi, M. Pohjola, L.M. Eriksson and R. Jantti, "Simulation case studies of wireless networked control system," in *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 100–104, 2007.
- [8] J. Chen, X. Cao, P. Cheng, and Y. Xiao, "Building-environment control with wireless sensor and actuator networks: centralized versus distributed," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 11, pp. 3596–3605, 2010.

- [9] X. Cao, P. Cheng, J. Chen and Y. Sun, "An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems," *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, vol.9, no. 1, pp. 439–450, 2013.
- [10] A. Pawlowski, J.L. Guzman, F. Rodriguez and M. Berenguel, "Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control," *Sensors 2009*, vol.9, pp. 232–252, 2009.
- [11] D.H. Park, B.J. Kang, K.R. Cho, C.S. Shin, S.E. Cho, J.W. Park and W.M. Yang, "A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network," *Wireless Personal Communications*, vol. 56, pp. 117–130, 2011.
- [12] M. Bjorkbom, S. Nethi, L.M. Eriksson and R. Jantti, "Wireless control system design and co-simulation," *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 1075–1086, 2011.
- [13] T. Kohtamaki, M. Pohjola, J. Brand and L.M. Eriksson, "PiccSIM toolchain-design, simulation and automatic implementation of wireless networked control systems," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Networking Sensing and Control*, pp. 49–54, 2009.
- [14] C.E. Perkins and E.M. Royer, "Ad-hoc on demand distance vector routing," in *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA-1999)*, pp. 90–100, 1999.
- [15] T. Instruments, "CC2420 datasheet," Available online: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf> (accessed on 1 March 2014).
- [16] P. Park, C. Fischione, and A. Bonivento, "Breath: an adaptive protocol for industrial control application using wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, pp. 281–332, 2010.
- [17] X. Cao, J. Chen, C. Gao and Y. Sun, "An optimal control method for applications using wireless sensor/actuator networks," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 35, pp. 748–756, 2009.
- [18] J. Chen, X. Cao, P. Cheng and Y. Xiao, "Distributed collaborative control for industrial automation with wireless sensor and actuator networks," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 4219–4230, 2010.

- [19] D. Henriksson, A. Cervin and K.E. Arzon, "TrueTime: real-time control system simulation with MATLAB/Simulink," in *Proceedings of the Nodic MATLAB Conference*, 2003.
- [20] M. Andersson, D. Henriksson, A. Cervin and K.E. Arzen, "Simulation of wireless networked control systems," in *Proceedings of the 44th International Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, pp. 476-481, 2005.
- [21] N. Masayuki, S. Atsushi and N. Jiro, "Distributed environment control using wireless sensor/actuator networks for lighting applications," *Sensors 2009*, vol. 9, pp. 8593–8609, 2009.
- [22] P. Suriyachai, J. Brown and U. Roedig, "Time-critical data delivery in wireless sensor networks," In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS-2010)*, pp. 216–229, 2010.
- [23] W.B. Pottner, H. Seidel, J. Brown, U. Roedig, and L. Wolf, "Constructing schedules for time-critical data delivery in wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 10, no. 3, 2014.
- [24] X. Feng and Z. Wenhong, "Flexible time-triggered sampling in smart sensor-based wireless control systems," *Sensors 2007*, vol. 7, pp. 2548–2564, 2007.
- [25] S. Nethi, C. Gao, R. Jantti and M. Pohjola, "Localized multiple next-hop routing protocol," in *Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunication (ITST-2007)*, pp. 1–5, 2007.
- [26] M. Zorzi and R.R. Rao, "Geographic random forwarding (GeRaf) for ad hoc and sensor networks: multihop performance," *IEEE Transaction on Mobile Computing*, vol. 2, pp. 337-348, 2003.
- [27] Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin, "Geograohical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless energy sensor networks," *Technical report ucla/csd-tr-01-0023*, UCLA Computer Science Department, 2001.
- [28] J.H. Song, V. Wong and V.C.M. Leung, "Load-aware on-demand routing (LAOR) protocol for mobile ad-hoc networks," in *Proceedings of the 57th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2003 spring)*, pp. 1753–1757, 2003.

- [29] S. Manfredi, "Reliable and energy-efficient cooperative routing algorithm for wireless monitoring systems," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 2, pp. 128–135, 2012.
- [30] T. He, J.A. Stankovic, C. Lu and T.F. Abdelzaher, "A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks," *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, vol. 16, no. 10, pp. 995–1006, 2005.
- [31] E. Felemban, C.G. Lee, and E. Ekici, "MMSPEED: multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks," *IEEE Transaction on Mobile Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 738–754, 2006.
- [32] A.M. Popescu, N. Salman and A.H. Kemp, "Geographic routing resilient to location errors," *IEEE Wireless Communication Letters*, vol. 2, no. 2, 2013.
- [33] A.A. Ahmed and N. Fisal, "A real-time routing protocol with load distribution in wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 31, pp. 3190–3203, 2008.
- [34] A.A. Ahmed, "An enhanced real-time routing protocol with load distribution for mobile wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 57, pp. 1459–1473, 2013.
- [35] A.R. Sama and K. Akkaya, "Real-time routing for mobile sensor/actor networks," in *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN - 2008)*, pp. 821–828, 2008.
- [36] A. Boukerche, R.B. Araujo and L. Villas, "A wireless actor and sensor networks QoS-aware routing protocol for the emergency preparedness class of applications," in *Proceedings of the 31st Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 832–839, 2006.
- [37] A. Boukerche, R.B. Araujo and L. Villas, "Optimal route selection for highly dynamic wireless sensor and actor networks environment," in *Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 21–27, 2007.
- [38] A. Boukerche, R. B. Araujo and L. Villas, "A novel QoS based routing protocol for wireless actor and sensor networks," in *Proceedings of the IEEE Global Communication Conference*, pp. 4931–4935, 2007.

- [39] V.C. Gungor, C. Sastry, Z. Song, and R. Integlia, "Resource-aware and link quality based routing metric for wireless sensor and actor networks" in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC-2007)*, pp. 3364–3396, 2007.
- [40] Y. Zeng, D. Li and A.V. Vasilakos, "Real-time data report and task execution in wireless sensor and actuator networks using self-aware mobile actuators," *Computer Communications*, vol. 36, pp. 988–997, 2013.
- [41] B. Karp and H.T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom)*, pp. 243–254, 2000.
- [42] P. Han, H. Wu, D.M. Dilin and C.S. Gao, "ELRS: an energy-efficient layered routing scheme for wireless sensor and actor networks," in *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, vol. 2, pp. 452–460, 2006.
- [43] J. Chen, Y. Zhang, X. Cao and Y. Sun, "A Communication paradigm for wireless sensor/actuator networks," in *Proceedings of the International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 70–75, 2007.
- [44] M. Garcia, H. Coll, B. Bri and L. Lloret, "Using MANET protocol in wireless sensor and actor networks," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM-2008)*, pp. 154–159, 2008.
- [45] Z. Dai, Z. Li, B. Wang and Q. Tang, "An energy-aware cluster-based routing protocol for wireless sensor and actor networks," *Information Technology Journal*, vol. 8, pp. 1044–1048, 2009.
- [46] Z. Dai, B. Wang, Z. Li and A. Yin, "VDSPT: A sensor-actor coordination protocol for wireless sensor and actuator network based on Voronoi diagram and shortest path tree," in *Proceedings of the International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology*, pp. 1–4, 2009.
- [47] M.A. Khan, G.A. Shah, M. Ahsan and M. Sher, "An efficient and reliable clustering algorithm for wireless sensor actor networks (WSANs)," in *Proceedings of the 53rd*

- IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 332–338, 2010.
- [48] Y. Guo, Z. Xu, C. Chen and X. Guan, “DGR dynamic gradient-based routing protocol for unbalanced and persistent data transmission in wireless sensor and actor networks,” *Journal of Zhejiang University Science C*, vol. 12, pp. 273–279, 2011.
- [49] B. Tashtoush, M. Molhim and M. Al-Rousan, “Dynamic model of an HAVC system for control analysis,” *Energy*, vol. 30, pp. 1729–1754, 2005.
- [50] J. Zhong (Spring 2006), “PID controller tuning: a short tutorial,” Available online: <http://saba.kntu.ac.ir/eecd/pcl/download/PIDtutorial.pdf>. (accessed on 25 December 2014).
- [51] R. Nguyen and S. Richter, “IfA Fachpraktikum-Experiment 2.7: Air Ball,” Automatic Control Laboratory, ETH Zurich, 2013.
- [52] D. Zhou, “Lab 5, tuning of a PID controller,” Available online: www.d.umn.edu/~dzhou/ (accessed on 25 December 2014).
- [53] O. J. Oguntoyinbo, “PID control of brushless dc motor and robot trajectory planning and simulation with MATLAB/Simulink,” Vaasan Ammattikorkeakoulu University of Applied Sciences, Thesis, 2009.
- [54] N.S. Nise, “Control systems engineering,” 4th Edition, John Wiley: New York, 2004.
- [55] D. Xue, Y. Chen and D.P. Atherton, “Linear feedback control; analysis and design with MATLAB,” Springer-Verlag, 2002.
- [56] M. Bjorkbom, “Wireless control system simulation and network adaptive control,” *Ph.D. Dissertation*, Department of Automation and Systems Technology, Aalto University, Finland, 2010.
- [57] C. Jiao, L. Schwiebert and B. Xu, “On modeling the packet error statistics in bursty channels,” in *Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN-2002)*, pp. 534–541, 2002.
- [58] K. Tsiknas and G. Stamatelos, “Comparative performance evaluation of TCP variants in WiMAX (and WLANs) network configurations,” *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2, pp. 1–9, 2012.

- [59] K. Xu, Y. Tian and N. Ansiri, "Improving TCP performance in integrated wireless communications networks," *Computer Networks*, vol. 47, pp. 219–237, 2005.
- [60] Y. Zhou, J. Li, L. Lamont and C.A. Rabbath, "A markov-based packet dropout model for UAV wireless communications," *Journal of Communications*, vol. 7, no. 6, pp. 418–426, 2012.
- [61] M.A. Ulusoy, "Design, implementation and analysis of wireless model based predictive networked control system over cooperative wireless network," *Master Thesis*, Sabanci University, 2009.
- [62] V.A. Rao, "The simulative investigation of Zigbee/IEEE 802.15.4," *Master Thesis*, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Dresden University of Technology, 2005.
- [63] P. Pivato, L. Palopoli and D. Petri, "Accuracy of RSS-based centroid localization algorithm in an indoor environment," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 10, pp. 3451–3460, 2011.
- [64] J.C. Cano and P. Manzoni, "A performance comparison of energy consumption for mobile ad hoc networks routing protocols," in *Proceedings of the 8th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOT-2000)*, pp. 57–64, 2000.
- [65] T.H. Tie, C.E. Tan, and S.P. Lau, "Alternate link maximum energy level ad-hoc distance vector scheme for energy efficient ad hoc network routing," in *Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE-2010)*, pp. 1–6, 2010.
- [66] Y. Li, M.T. Thai, and W. Wu, "Wireless sensor networks and applications," Springer Publisher, 2007.
- [67] T. Sutaria, I. Mahgoub, A. Humos, and A. Badi, "Implementation of an energy model for JiST/SWANS wireless network simulator," in *Proceedings of the 6th International Conference on Networking (ICN-2007)*, 2007.

- [68] G. Anastasi, E. Borgia, M. Conti, E. Gregori and A. Passarella, "Understanding the real behavior of mote and 802.11 ad hoc networks: an experimental approach," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 1, no. 2, pp. 237–256, 2005.
- [69] 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.
- [70] C.E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," in *Proceedings of ACM SIGCOMM Conference on Communications architectures, Protocols and Applications*, pp. 234–244, 1994.
- [71] C. Perkins, E.B. Royer and S. Das "Ad-hoc on-demand distance vector (AODV) routing (RFC-3561)," Available online: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.text> (accessed on 24 May 2015)
- [72] R. Draves, J. Padhye and B. Zill, "Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks," in *Proceedings of ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, pp. 133–144, 2004.
- [73] L. Cao, K. Sharif, Y. Wang and T. Dahlberg, "Adaptive multiple metrics routing protocols for heterogeneous multi-hop wireless networks," in *Proceedings of the 5th IEEE International Consumer Communications and Networking Conference (CCNC-2008)*, pp. 13–17, 2008.
- [74] A. Booranawong and W. Teerapabkajornmet, "An enhanced AODV routing protocol for wireless sensor and actuator networks," in *Proceedings of the International Conference on Communications, Networking and Mobile Computing (ICCNMC-2013)*, pp. 1783–1790, 2013.
- [75] A. Booranawong, W. Teerapabkajornmet and C. Limsakul, "Energy consumption and control response evaluations of AODV routing in WSNs for building-temperature control," *Sensors 2013*, vol. 13, no. 7, pp. 8303–8330, 2013.
- [76] J. Li, D. Cordes and J. Zhang, "Power-aware routing protocols in ad hoc wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 69-81, 2005.

- [77] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, 2004.
- [78] L.J.G. Villaba, A.L.S. Orozco, A.T. Cabrera and C.J.B. Abbas, "Routing protocol in wireless sensor networks" *Sensors 2009*, vol. 9, pp. 8399–8421, 2009.
- [79] M. Abolhasan, T. Wysocki and E. Dutkiewicz, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 1–22, 2004.
- [80] M. Radi, B. Dezfouli, K. Bakar and M. Lee, "Multipath routing in wireless sensor networks: survey and research challenges," *Sensors 2012*, vol. 12, no. 1, pp. 650–685, 2012.
- [81] M. Marina and S. Das, "Ad hoc on-demand multipath distance vector routing," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 6, no. 7, pp. 969–988, 2006.
- [82] A. Boukerche, "Performance evaluation of routing protocols for ad hoc wireless networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 9, no. 4, pp. 333–342, 2004.
- [83] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad hoc networks*, vol. 3, no. 3, pp. 325–349, 2005.
- [84] K. Bur, P. Omiyi and Y. Yang, "Wireless sensor and actuator networks: enabling the nervous system of the active aircraft," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 7, pp. 118–125, 2010
- [85] J. Ledy, H. Boeglen, B. Hilt, A. Abouaissa and R. Vauzelle, "An enhanced AODV protocol for VANETs with realistic radio propagation model validation," in *Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST-2009)*, pp. 398–402, 2009.
- [86] J. Park, S. Moh and I. Chung, "A multipath AODV routing protocol in mobile ad hoc networks with SINR-based route selection," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Wireless Communication systems (ISWCS-2008)*, pp. 682–686, 2008.
- [87] C. Kim, E. Talipov and B. Ahn, "A reverse AODV routing protocol in ad hoc mobile networks," *Emerging Directions in embedded and biquitous Computing, Lecture Notes in computer Science*, vol. 4097, pp. 522–531, 2006.

- [88] P. Sambasivam, A. Murthy and E. Belding-Royer, "Dynamically adaptive multipath routing based on AODV," in *Proceedings of the 3rd IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Working Workshop (Med-Hoc-Net-2004)*, 2004.
- [89] K. Fall and K. Varadhan (Eds.), "The ns manual (formerly ns notes and documentation)," *The VINT Project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC*, November 2011, Available online: http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf (accessed on 31 January 2015).
- [90] W. Savitch, "Problem solving with C++," 6th Edition, Pearson/Addison-Wesley, 2006.
- [91] 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.
- [92] T. Bai, Z.M. Wu and G.K. Yang, "Optimal bandwidth scheduling of networked control systems (NCSs) in accordance with jitter," *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, vol. 6, no. 4, pp. 535–542, 2005.
- [93] P. Lute and D.V. Paassen, "Optimal indoor temperature control using predictor," *IEEE Control Systems*, vol. 12, pp. 4–10, 1995.
- [94] C. Lu, B. Blum, T. Abdelzaher, J. Stankovic and T. He, "Rap: a real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks," in *Proceedings of the 8th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS-2002)*, pp. 55–66, 2002.
- [95] Q. Ma and P. Steenkiste, "Quality-of-service routing for traffic with performance guarantees," in *Proceedings of the IFIP International Workshop on Quality of Service*, pp. 115–126, 1997.
- [96] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Newnes, 2008.
- [97] T.W. Sung, T.T. Wu, C.S. Yang and Y.M. Huang, "Reliable data broadcast for Zigbee wireless sensor networks," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 504–520, 2010.

- [98] S. Rangwala, E. Gummadi, R. Govindan, and K. Psounis, "Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks", in *Proceedings of Special Interest Group on Data, Communication (SIGCOMM'06)*, pp. 63-74, 2006.
- [99] V. Handziski, A. Kopke, A. Willig and A. Wolisz, "TWIST: a scalable and reconfigurable testbed for wireless indoor experiments with sensor networks," in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: from Theory to Reality*, pp. 63–70, 2006.
- [100] T. Lin, I. Ng, S. Lau, K. Chen and P. Huang, "A microscopic examination of an RSSI-signature-Based indoor localization system," *HotEmNets Charlottesville, Va*, 2008.
- [101] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," in *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom-2003)*, pp. 134–146, 2003.
- [102] J. Li, D. Cordes and J. Zhang, "Power-aware routing protocols in ad hoc wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 69–81, 2005.
- [103] D. Kim, J. Garcia-Luna-Aceves, K. Obraczka, J. Cano and P. Manzoni, "Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, no. 2, pp. 161–173, 2003.
- [104] J. Kim, R.A. Swartz, J.P. Lynch, J.J. Lee and C.G. Lee, "Rapid reconfigurable wireless structure monitoring systems using extended-range wireless sensors," *Smart Structures and Systems*, vol. 6, no. 5-6, pp. 505-524, 2010.
- [105] M. Mallinson, P. Drane and S. Hussain, "Discrete radio power level consumption model in wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS-2007)*, pp. 1-6, 2007.
- [106] T. Instruments, "CC2420 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2400.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [107] T. Instruments, "CC2480 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2480a1.pdf> (accessed on 31 July 2015).

- [108] T. Instruments, "CC2430 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2430.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [109] T. Instruments, "CC1000 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [110] T. Instruments, "CC1010 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1010.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [111] T. Instruments, "CC2500 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [112] T. Instruments, "CC2520 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2520.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [113] T. Instruments, "CC2530 datasheet," Available online:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf> (accessed on 31 July 2015).
- [114] H. Cao, K.W. Parker and A. Arora, "O-MAC: a receiver centric power management protocol," in *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP-2006)*, pp. 311-320, 2006.
- [115] G. Deng, "Receiver-cost cognizant maximal lifetime routing in embedded networks: model and solutions," *Ph.D. Dissertation*, Arizona state university, 2009.
- [116] K.T. Lee, "Designing a zigbee-ready IEEE 802.15.4-compliant radio transceiver," *RF Design*, vol. 27, pp. 42-50, 2004.
- [117] C. Liu and J. Kaiser, "A survey of mobile ad-hoc network routing protocols*," *Technical Report (Nr. 2003-2008)*, University of Ulm, pp. 1-37, 2003.
- [118] X. Hong, K. Xu and M. Gerla, "Scalable routing protocols for mobile ah hoc networks," *IEEE Network*, vol. 16, pp. 11-21, 2002.
- [119] C.K. Toh, "Load balanced routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 78-84, 2009.
- [120] C.K. Toh, "Associativity-based routing for ad hoc mobile networks," *Wireless Personal Communication*, vol. 4, pp. 103-139, 1997.

ภาคผนวก ก

ผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรีดอย่างต่อสมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร กรณีการจำลองการทำงานด้วยเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะหนึ่งฮอป

ภาคผนวกนี้อธิบายผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการซักรีดอย่างต่อสมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิในอาคารในระบบเครือข่ายเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ไร้สาย กรณีการสื่อสารระยะหนึ่งฮอป (single-hop communication) ในการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว ผู้วิจัยทดสอบการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรีดอย่างของโหนดต้นทางเพื่อติดตามผลกระทบที่เกิดกับผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการออกแบบการจำลองการทำงาน กำหนดให้โหนดต้นทางถูกวางอยู่ในห้อง ทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิและส่งข้อมูลที่ได้ไปยังโหนดปลายทางซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับตัวควบคุมและแอคชูเอเตอร์ โดยโหนดต้นทางสามารถติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทางได้ภายในระยะเพียงฮอปเดียว สำหรับพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองการทำงาน กำหนดเหมือนกันกับตารางที่ 5-1 ในบทที่ 5 อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยไม่ได้เพิ่มแบบจำลองการการสูญหายของแพ็กเก็ต ลงไปในการจำลองการทำงานเหมือนเช่นการทดสอบอื่น ๆ ที่นำเสนอในบทที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยต้องการศึกษาผลกระทบของช่วงเวลาการซักรีดอย่างต่อเอาท์พุทการควบคุม โดยไม่มีผลเกี่ยวข้องมาจากความล่าช้าที่เกิดจากการสูญหายของข้อมูล ดังนั้นสมรรถนะการควบคุมที่ได้จากช่วงเวลาการซักรีดอย่างใด ๆ ที่กำหนดในการทดสอบนี้ คือผลการจำลองที่ดีที่สุดของช่วงเวลาการซักรีดอย่างนั้น ๆ ผู้วิจัยกำหนดระยะเวลาการจำลองการทำงานเท่ากับ 1,000 วินาที ซึ่งเท่ากับกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยการเชื่อมต่อแบบมีสาย (wired connection) ในการจำลองการทำงาน ผู้วิจัยกำหนดให้ทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการซักรีดอย่างเริ่มต้นที่ 10 วินาที [7] จนถึง 100 วินาที เพิ่มขึ้นทีละ 10 วินาที ผลการจำลองการทำงานแสดงดังตารางที่ ก-1 หมายเหตุ: ผู้วิจัยศึกษากรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยการเชื่อมต่อแบบมีสาย เพื่อต้องการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (PID tuning) ที่ให้ผลลัพธ์การควบคุมที่เหมาะสม

ตาราง ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการชักตัวอย่างและสมรรถนะการควบคุม

ช่วงเวลาชักตัวอย่าง (วินาที)	IAE	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (องศาเซลเซียส)	เวลาเข้าที่ (วินาที)
10	803	22.525	575
20	1136	24.771	595
30	1485	27.220	669
40	1914	29.263	912
50	2728	30.904	–
60	3899	32.830	–
70	4989	33.967	–
80	5950	34.828	–
90	6714	35.642	–
100	7264	36.377	–

เครื่องหมาย – ดังแสดงในตารางที่ ก-1 หมายถึงระบบควบคุมไม่สามารถเข้าสู่เวลาเข้าที่ได้ภายในระยะเวลาการจำลองการทำงาน หรือระบบควบคุมไม่สามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้

ตารางที่ ก-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาชักตัวอย่างและสมรรถนะการควบคุม ผลการจำลองการทำงานจากค่าเวลาเข้าที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดใช้ช่วงเวลาชักตัวอย่างด้วยค่ามากขึ้น จะทำให้ระบบควบคุมใช้เวลาเข้าสู่เวลาเข้าที่หรือสภาวะอยู่ตัวนานขึ้น และเมื่อกำหนดช่วงเวลาชักตัวอย่างมากกว่า 40 วินาที โดยประมาณ จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในอาคารให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ภายในช่วงเวลาการจำลองการทำงาน ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้า จากทฤษฎีการควบคุม ในการรับประกันสมรรถนะของการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ช่วงเวลาชักตัวอย่างของระบบควบคุมที่ศึกษาควรกำหนดเท่ากับ 4 ถึง 10 ครั้งต่อค่าเวลาขึ้น (rise time หรือ T_r) [91, 92] ดังนั้นค่า $T_r/4$ คือค่าช่วงเวลาชักตัวอย่างสูงสุดที่สามารถอนุญาตให้ใช้งานได้ (maximum allowable sampling) หรือจะเรียกค่าเวลานี้ว่าค่าความล่าช้าสูงสุดในลูปที่สามารถอนุญาตให้ใช้งานได้ (maximum allowable loop delay) [91, 92] จากผลการศึกษาของผู้วิจัยกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยการเชื่อมต่อแบบมีสายพบว่า เมื่อกำหนดใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยค่าพารามิเตอร์ K_p ค่า K_I และค่า K_D เท่ากับ 6, 0.05 และ 55 ตามลำดับ ดังกำหนดไว้ในตารางที่ 3-1 บทที่ 3 จะได้ผลตอบสนองการควบคุมที่

ให้ค่า T_r เท่ากับ 179 วินาที ดังนั้นค่าช่วงเวลาชักตัวอย่างสูงสุด ($T/4$) ที่สามารถใช้งานได้เหมาะสมในกรณีระบบควบคุมที่ศึกษาจึงมีค่าเท่ากับ 44.75 วินาที

อย่างไรก็ตามงานวิจัยใน [93] ให้ข้อเสนอแนะว่า ในการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถอนุญาตได้ (maximum allowable temperature) ควรต่ำกว่า 26 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ค่านี้แสดงถึงระดับอุณหภูมิที่รู้สึกสบายของผู้อยู่อาศัย (comfortable temperature for human) [93] จากข้อเสนอดังกล่าวนี้ ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดดังแสดงในตารางที่ ก.1 ต้องไม่มากกว่า 30 วินาที เนื่องจากที่ค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างนี้ให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 27.220 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถอนุญาตได้ ดังนั้นเพื่อที่จะหาค่าช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดที่จะสามารถใช้งานได้โดยที่ค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 26 องศาเซลเซียสมีค่าเป็นเท่าไร ผู้วิจัยทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาชักตัวอย่างที่ 20 วินาที ถึง 30 วินาที เพิ่มขึ้นทีละ 1 วินาที ผลจากการจำลองการทำงานดังตาราง ก-2 แสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาการชักตัวอย่างสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ในกรณีการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยเครือข่ายสื่อสารระยะหนึ่งฮอปมีค่าเท่ากับ 25 วินาที โดยประมาณ ที่ช่วงเวลาการชักตัวอย่างนี้ให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 26.034 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกันกับ 26 องศาเซลเซียส

ตาราง ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาชักตัวอย่างและสมรรถนะการควบคุม กรณีเพิ่มช่วงเวลาชักตัวอย่างทีละ 1 วินาที

ช่วงเวลาชักตัวอย่าง (วินาที)	IAE	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (องศาเซลเซียส)	เวลาเข้าที่ (วินาที)
20	1136	24.771	595
21	1171	25.027	597
22	1250	25.301	604
23	1240	25.539	613
24	1275	25.762	622
25	1310	26.034	634
26	1345	26.336	643
27	1380	26.614	648
28	1415	26.849	658
29	1450	27.045	663
30	1485	27.220	669

ภาคผนวก ข

การปรับปรุงแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง กรณีการเปิด-ปิดประตูห้อง

เพื่อศึกษาประเด็นการรบกวนจากสภาพแวดล้อมส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิในอาคาร และการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางอย่างไร ดังเสนอในหัวข้อที่ 5.2.1.4 และ 5.4.4 ผู้วิจัย กำหนดให้มีการเปิดประตูห้องที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิหลังจากที่ระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวไปแล้วไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง การกำหนดข้างต้นจะเป็นการไปรบกวนระบบควบคุม อุณหภูมิภายในห้องจะออกจากค่าเป้าหมายเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิก่อนที่เข้ามา ดังนั้นระบบควบคุมจะกลับไปสู่สภาวะชั่วคราวอีกครั้ง ในการทดสอบเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้เวลาการจำลองการทำงานเท่ากับ 4,000 วินาที ประตูห้องถูกเปิดและปิดที่เวลา 2,000 วินาที และ 2,300 วินาที ตามลำดับ

ในการจำลองการทำงานกรณีการเปิด-ปิดประตูห้องดังอธิบายข้างต้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (zone temperature model) ดังนี้ จากแบบจำลองอุณหภูมิภายในบริเวณห้องดังอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 อุณหภูมิภายในห้องอธิบายด้วยสมการที่ (ข-1) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักสี่ส่วนคือ อุณหภูมิลมจ่ายที่ป้อนโดยแอกชูเอเตอร์ (T_{sa}) อุณหภูมิของหลังคา (T_{Roof}) อุณหภูมิของผนังห้อง (T_{Wall1} และ T_{Wall2}) ทั้งสี่ทิศ และอุณหภูมิที่เกิดจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง โดยที่อินพุตและเอาต์พุตของระบบคือ T_{sa} และอุณหภูมิภายในบริเวณห้อง (T_z) ตามลำดับ สมการที่ (ข-1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (ข-2)

$$\frac{dT_z}{dt} = \frac{1}{H_a} [F_{sa}\rho_a C_a (T_{sa} - T_z) + U_{Roof}A_{Roof}(T_{Roof} - T_z) + 2U_{Wall1}A_{Wall1}(T_{Wall1} - T_z) + 2U_{Wall2}A_{Wall2}(T_{Wall2} - T_z) + q(t)] \quad (ข-1)$$

$$\frac{dT_z}{dt} = \frac{1}{H_a} [F_{sa}\rho_a C_a (T_{sa} - T_z) + U_{Roof}A_{Roof}(T_{Roof} - T_z) + U_{Wall1.1}A_{Wall1.1}(T_{Wall1.1} - T_z) + U_{Wall1.2}A_{Wall1.2}(T_{Wall1.2} - T_z) + 2U_{Wall2}A_{Wall2}(T_{Wall2} - T_z) + q(t)] \quad (ข-2)$$

เมื่อ U_{Roof} , $U_{Wall1.1}$, $U_{Wall1.2}$ และ U_{Wall2} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของหลังคา สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางด้านทิศตะวันออก สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางด้านทิศตะวันตก และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของผนังห้องทางด้านทิศเหนือและใต้ ตามลำดับ A_{Roof} , $A_{Wall1.1}$, $A_{Wall1.2}$ และ A_{Wall2} คือพื้นที่ของหลังคา พื้นที่ของผนังห้องทางด้านทิศตะวันออก พื้นที่ของผนังห้องทางด้านทิศตะวันตก และพื้นที่ของผนังห้องทางด้านทิศเหนือและใต้ ตามลำดับ และ T_{Roof} , $T_{Wall1.1}$, $T_{Wall1.2}$ และ T_{Wall2} คืออุณหภูมิของหลังคา อุณหภูมิของผนังห้องทางด้านทิศตะวันออก อุณหภูมิของผนังห้องทางด้านทิศตะวันตก และอุณหภูมิของผนังห้องทางด้านทิศเหนือและใต้ ตามลำดับ ผู้วิจัยกำหนดให้ผนังห้องทางด้านทิศตะวันออกเสมือนเป็นประตูห้อง ดังนั้นเมื่อเปิดประตูที่เวลา 2,000 วินาที สมการที่ (ข-2) จะกลายเป็นสมการที่ (ข-3) ด้านล่าง

$$\begin{aligned} \frac{dT_z}{dt} = \frac{1}{H_a} [&F_{sa}\rho_a C_a(T_{sa} - T_z) + U_{Roof}A_{Roof}(T_{Roof} - T_z) \\ &+ U_{Air1.1}A_{Air1.1}(T_{Air1.1} - T_z) + U_{Wall1.2}A_{Wall1.2}(T_{Wall1.2} - T_z) \\ &+ 2U_{Wall2}A_{Wall2}(T_{Wall2} - T_z) + q(t)] \end{aligned} \quad (ข-3)$$

เมื่อ $U_{Air1.1}$, $A_{Air1.1}$ และ $T_{Air1.1}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของอากาศ พื้นที่ของอากาศซึ่งเท่ากับพื้นที่ของผนังห้องทางด้านทิศตะวันออก และอุณหภูมิของอากาศด้านนอกที่เข้ามา (outside temperature) ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $U_{Air1.1}$ เท่ากับ 16.6 W/m^2 อ้างอิงจากงานวิจัยใน [49] และ $T_{Air1.1}$ เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการปิดประตูห้องที่เวลา 2,300 วินาที สมการที่ (ข-3) จะกลับเป็นสมการที่ (ข-2) ตามเดิม

ภาคผนวก ค

กำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล และกำลังที่ใช้ในสถานะอยู่นิ่ง ของโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver

ภาคผนวกนี้อธิบายรายละเอียดของค่ากำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล (transmit power) กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล (receive power) และกำลังที่ใช้ในสถานะอยู่นิ่ง (idle power) ดังนำเสนอไว้ในตารางที่ 5-1 พารามิเตอร์ที่กำหนดใช้ในการจำลองการทำงาน ค่ากำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล และกำลังที่ใช้ในสถานะอยู่นิ่ง ของโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver แสดงดังตารางที่ ค-1 โดยที่ค่ากำลังที่ใช้สามารถคำนวณได้จากกระแส (current) ที่ใช้ในแต่ละสถานะ ในหน่วยแอมแปร์ คูณด้วยแรงดัน (voltage) ที่ใช้ในแต่ละสถานะ ในหน่วยโวลต์

ตาราง ค-1 กำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูล และกำลังที่ใช้ในสถานะ
อยู่นิ่ง ของโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver [15]

สถานะ	กระแส (แอมแปร์)	แรงดัน (โวลต์)	กำลังที่ใช้ (วัตต์)
ส่งข้อมูลที่ 0 dBm	0.0174	1.8	0.03132
ส่งข้อมูลที่ -1 dBm	0.0165	1.8	0.02970
ส่งข้อมูลที่ -3 dBm	0.0152	1.8	0.02736
ส่งข้อมูลที่ -5 dBm	0.0140	1.8	0.02520
ส่งข้อมูลที่ -7 dBm	0.0125	1.8	0.02250
ส่งข้อมูลที่ -10 dBm	0.0110	1.8	0.01980
ส่งข้อมูลที่ -15 dBm	0.0099	1.8	0.01782
ส่งข้อมูลที่ -25 dBm	0.0085	1.8	0.01530
รับข้อมูล	0.0188	1.8	0.03384
อยู่นิ่ง	0.000426	1.8	0.007668

จากตารางที่ ค-1 ในการใช้งานโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver ผู้ใช้สามารถเลือกกำลังส่งข้อมูลที่ระดับ 0 dBm -1 dBm -3 dBm -5 dBm -7dBm -10 dBm -15 dBm หรือ -25 dBm ได้ตามความเหมาะสมของการใช้งาน โดยที่กำลังส่งข้อมูลในระดับที่แตกต่างกันจะให้

ขอบเขตการส่งสัญญาณวิทยุไกลสุด และการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ 0 dBm ซึ่งเป็นระดับกำลังส่งสูงสุด จะให้ขอบเขตการส่งสัญญาณวิทยุไกลกว่าที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ -25 dBm ซึ่งเป็นระดับกำลังส่งต่ำสุด อย่างไรก็ตาม ที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ 0 dBm โหนดจะใช้พลังงานมากกว่าที่ระดับกำลังส่งข้อมูลเท่ากับ -25 dBm [15, 63, 104] เป็นต้น รายละเอียดเพิ่มเติมกรณีความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังส่งข้อมูลของโมดูลสื่อสาร CC2420 RF transceiver และขอบเขตการส่งสัญญาณวิทยุ (จากการทดสอบใช้งานโหนด Tmote Sky) สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [105] สำหรับเหตุผลที่ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดใช้กำลังส่งข้อมูลที่ -25 dBm ได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 5 ก่อนหน้านี้แล้ว

ตาราง ค-2 เปรียบเทียบค่ากระแส (ในหน่วยแอมแปร์) ที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ 0 dBm และค่ากระแสที่ใช้ในการรับข้อมูล ของโมดูลสื่อสาร CC2420 และโมดูลสื่อสารอื่น ๆ จากบริษัท Texas Instruments

สภาวะ	CC2420 [15]	CC2400 [106]	CC2480 [107]	CC2430 [108]	CC1000 [109]	CC1010 [110]	CC2500 [111]	CC2520 [112]	CC2530 [113]
ส่งข้อมูล	0.0174	0.0190	0.0270	0.0270	0.0165	0.0170	0.0212	0.0258	0.0290
รับข้อมูล	0.0188	0.0240	0.0270	0.0270	0.0096	0.0119	0.0188	0.0185	0.0240

หมายเหตุ ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 1.5 ขอบเขตของการวิจัย วิทยานิพนธ์นี้กำหนดพารามิเตอร์ด้านการสื่อสารจากโมดูลสื่อสาร CC2420 อ้างอิงตามคุณสมบัติของโหนดเซนเซอร์ที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ เช่น โหนด MicaZ โหนด Telos และโหนด Tmote Sky โมดูลสื่อสาร CC2420 ทำงานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่ความถี่ใช้งาน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ [15, 116]

ตารางที่ ค-2 แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแส (ในหน่วยแอมแปร์) ที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ 0 dBm และค่ากระแสที่ใช้ในการรับข้อมูลของโมดูลสื่อสาร CC2420 และโมดูลสื่อสารอื่น ๆ จากบริษัท Texas Instruments จะเห็นได้ว่าโมดูลสื่อสารเช่น โมดูลสื่อสาร CC1000 โมดูลสื่อสาร CC1010 โมดูลสื่อสาร CC2500 โมดูลสื่อสาร CC2520 และโมดูลสื่อสาร CC2530 ใช้กระแสในการส่งข้อมูลสูงกว่ากระแสที่ใช้ในการรับข้อมูล กรณีโมดูลสื่อสาร CC2480 และโมดูลสื่อสาร CC2430 ใช้กระแสในการส่งข้อมูลและกระแสที่ใช้ในการรับข้อมูลเท่ากัน และท้ายสุด กรณีโมดูลสื่อสาร CC2420 และโมดูลสื่อสาร CC2400 ใช้กระแสในการส่งข้อมูลน้อยกว่ากระแสที่ใช้ในการรับข้อมูล จากตารางการเปรียบเทียบข้างต้น จะเห็นได้ว่าโมดูลสื่อสารแต่ละตัวจะใช้กระแสในการ

ส่งหรือรับข้อมูลมากน้อยต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรภาคส่ง-รับสัญญาณวิทยุ และกระบวนการทำงานต่าง ๆ ของภาคส่ง-รับสัญญาณวิทยุ งานวิจัยใน [114, 115] ได้อธิบายไว้ในอนาคต กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูลของโมดูลสื่อสารมีแนวโน้มสูงกว่ากำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล ทั้งนี้เนื่องจากความซับซ้อนที่เพิ่มมากขึ้นของภาครับสัญญาณวิทยุ

ภาคผนวก ง

ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR เปรียบเทียบกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV

ภาคผนวกนี้อธิบายการวิเคราะห์ความซับซ้อน (complexity) ในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง RMCSR เปรียบเทียบกับโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV เนื้อหาประกอบด้วย ก) การวิเคราะห์ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ข) การเปรียบเทียบขนาดแพ็กเก็ต RREQ และขนาดแพ็กเก็ต RREP ค) การเปรียบเทียบข้อมูลในตารางเส้นทาง และ ง) การเปรียบเทียบกระบวนการจัดเส้นทาง

ง.1 ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง

ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางสามารถพิจารณาจาก ความซับซ้อนทางพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล หรือเรียกว่า storage complexity ความซับซ้อนทางเวลา หรือจำนวนขั้นตอนที่ใช้ในการทำงาน หรือเรียกว่า time complexity และความซับซ้อนทางการสื่อสาร หรือเรียกว่า communication complexity [117] โดยที่ ความซับซ้อนทางพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล อ้างอิงจากขนาดพื้นที่ที่ใช้เก็บข้อมูลตารางเส้นทาง [117, 118] ความซับซ้อนทางเวลาที่ใช้ในการทำงาน อ้างอิงจากจำนวนขั้นตอนที่ใช้ในการจัดเส้นทาง [69, 117] และความซับซ้อนทางการสื่อสาร อ้างอิงจากจำนวนข้อความที่ใช้ในการจัดเส้นทาง [69, 117, 118]

ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลการจัดเส้นทางดังอธิบาย คิดจากกรณีที่ย่ำแย่ที่สุด (worst case) หรือหมายถึง โพรโทคอลการจัดเส้นทางใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูล ใช้เวลาในการทำงาน และใช้จำนวนข้อความในการจัดเส้นทางมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลสามารถแสดงด้วยสัญลักษณ์ Big O หรือ $O(f(n))$ โดยที่ความซับซ้อนในการทำงานของโพรโทคอลเพิ่มขึ้นตาม n

ตาราง ง-1 แสดงการเปรียบเทียบความซับซ้อนทางพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ความซับซ้อนทางเวลาที่ใช้ในการทำงาน และความซับซ้อนทางการสื่อสาร ในขั้นตอนการเริ่มต้นสร้างเส้นทาง (initialization) ของโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR โดยโพรโทคอล AODV ใช้พื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลตารางเส้นทางมากที่สุดเท่ากับ $O(D)$ เมื่อ D คือ จำนวนโหนดปลายทางที่ต้องการสูงสุด (number of maximum desired destination) [117] ใช้เวลาหรือจำนวนขั้นตอนใน

การจัดเส้นทางมากที่สุดเท่ากับ $O(2d)$ เมื่อ d คือ network diameter [69, 117] และใช้จำนวนข้อความในการจัดเส้นทางมากที่สุดเท่ากับ $O(2N)$ เมื่อ N คือ จำนวนโหนดในเครือข่าย (number of nodes in the network) [69, 117, 118] สำหรับกรณีโพรโทคอล RMCSR ใช้พื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลตารางเส้นทางมากที่สุดเท่ากับ $O(D)$ เท่ากันกับกรณีของโพรโทคอล AODV แต่จะใช้เวลาหรือจำนวนขั้นตอนในการจัดเส้นทางมากที่สุดเท่ากับ $O(2d + xd)$ เมื่อ x คือ จำนวนเส้นทางที่ให้จำนวนฮอปน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนฮอปในเส้นทางแรก และใช้จำนวนข้อความในการจัดเส้นทางมากที่สุดเท่ากับ $O(2N+x(d+1))$ ดังนั้นโพรโทคอล RMCSR จึงมีความซับซ้อนทางเวลาที่ใช้ในการทำงาน และมีความซับซ้อนทางการสื่อสารมากกว่ากรณีโพรโทคอล AODV

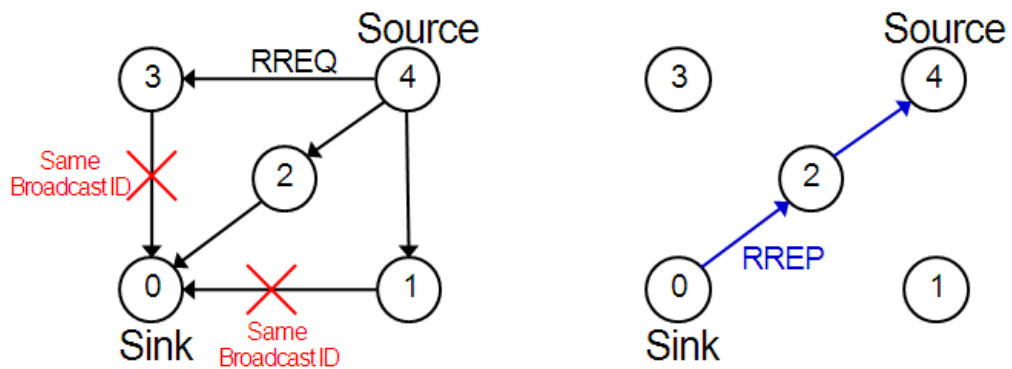
ตาราง ง-1 เปรียบเทียบความซับซ้อนทางพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ความซับซ้อนทางเวลาที่ใช้ในการทำงาน และความซับซ้อนทางการสื่อสาร ในขั้นตอนการเริ่มต้นสร้างเส้นทาง (initialization) ของโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR

โพรโทคอลการจัดเส้นทาง	ความซับซ้อนทางพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล	ความซับซ้อนทางเวลาที่ใช้ในการทำงาน	ความซับซ้อนทางการสื่อสาร
AODV	$O(D)$ [117]	$O(2d)$ [69, 117]	$O(2N)$ [69, 117, 118]
RMCSR	$O(D)$	$O(2d + xd)$	$O(2N+x(d+1))$

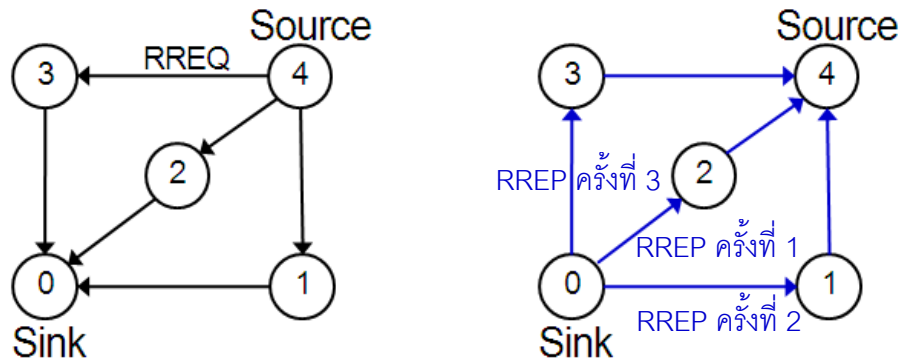
หมายเหตุ: เมื่อ D คือ จำนวนโหนดปลายทางที่ต้องการสูงสุด d คือ network diameter N คือ จำนวนโหนดในเครือข่าย และ x คือ จำนวนเส้นทางที่ให้จำนวนฮอปน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนฮอปในเส้นทางแรก

สาเหตุที่โพรโทคอล RMCSR มีจำนวนขั้นตอนในการจัดเส้นทางมากกว่ากรณีโพรโทคอล AODV สามารถอธิบายได้ดังตัวอย่างในภาพประกอบที่ ง-1 สมมติให้ network diameter มีค่าเท่ากับ 2 ฮอป ในกรณีโพรโทคอล AODV โหนดต้นทางส่งข้อความ RREQ ไปยังโหนดปลายทางในระยะ 2 ฮอป และโหนดปลายทางก็สามารถตอบข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางได้ในระยะ 2 ฮอป เช่นเดียวกัน ดังนั้นจำนวนขั้นตอนในการจัดเส้นทางจึงมีค่าเท่ากับ $O(2d)$ ต่างจากโพรโทคอล RMCSR ที่อนุญาตให้โหนดปลายทางสามารถรับข้อความ RREQ เข้าจากโหนดข้างเคียงในเส้นทางอื่น ๆ ได้ (ถึงแม้ว่า Broadcast ID ที่อ่านได้จากข้อความ RREQ จะมีค่าเท่ากัน) หากเส้นทางนั้น ๆ ให้จำนวนฮอปน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนฮอปที่โหนดปลายทางเคยได้รับจากเส้นทางแรก (วิธีการดังอธิบายนี้ไว้สำหรับเตรียมเส้นทางแบบหลาย ๆ เส้นทางเพื่อเลือก

เส้นทางที่เหมาะสม ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1.1 ก่อนหน้า) ดังนั้น โหนดปลายทางจึงสามารถตอบข้อความ RREP กลับไปยังโหนดต้นทางได้อีกจำนวนสองเส้นทางซึ่งเป็นเส้นทางที่ให้จำนวนฮอปน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนฮอปของเส้นทางแรก เป็นผลให้จำนวนขั้นตอนในการจัดเส้นทางมีค่าเท่ากับ $O(2d + xd)$ อาศัยแนวคิดเดียวกันดังอธิบายข้างต้นนี้ ความซับซ้อนทางการสื่อสารของโพรโทคอล RMCSR จึงมีค่าเท่ากับ $O(2N + x(d+1))$ สำหรับตัวอย่างการคำนวณความซับซ้อนทางเวลาหรือจำนวนขั้นตอนที่ใช้ในการทำงาน และความซับซ้อนทางการสื่อสารของโพรโทคอลการจัดเส้นทางสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยใน [119, 120]



(ก) โพรโทคอล AODV



(ข) โพรโทคอล RMCSR

ภาพประกอบ ง-1 ตัวอย่างขั้นตอนการส่งข้อความ RREQ และข้อความ RREP ในระยะ 2 ฮอป (ก) โพรโทคอล AODV และ (ข) โพรโทคอล RMCSR

ง.2 ขนาดแพ็กเก็ต RREQ และขนาดแพ็กเก็ต RREP

ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4 โพรโทคอล RMCSR พัฒนาต่อยอดจากโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเพิ่มเติมข้อมูลลงไปในแพ็กเก็ต RREQ และแพ็กเก็ต RREP ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ ตารางที่ ง-2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดแพ็กเก็ต RREQ กรณีโพรโทคอล AODV และกรณีโพรโทคอล RMCSR และตารางที่ ง-3 แสดงการเปรียบเทียบขนาดแพ็กเก็ต RREP กรณีโพรโทคอล AODV และกรณีโพรโทคอล RMCSR (อ้างอิงจากโปรแกรมการจำลองการทำงาน NS2 รุ่น 2.33 ที่ใช้งาน)

ตาราง ง-2 เปรียบเทียบขนาดแพ็กเก็ต RREQ กรณีโพรโทคอล AODV และกรณีโพรโทคอล RMCSR

แพ็กเก็ต RREQ กรณีโพรโทคอล AODV		แพ็กเก็ต RREQ กรณีโพรโทคอล RMCSR	
ส่วนประกอบ	จำนวนไบต์	ส่วนประกอบ	จำนวนไบต์
Packet type	1	Packet type	1
Reserved field	2	Reserved field (เก็บตัวแปร State)	2
Hop-count	1	Hop-count	1
Broadcast ID	4	Broadcast ID	4
Destination address	2	Destination address	2
Destination sequence number	4	Destination sequence number	4
Source address	2	Source address	2
Source sequence number	4	Source sequence number	4
Timestamp	8	Timestamp	8
	รวม 28 ไบต์		รวม 28 ไบต์

ตาราง ง-3 เปรียบเทียบขนาดแพ็กเก็ต RREP กรณีโพรโทคอล AODV และกรณีโพรโทคอล RMCSR

แพ็กเก็ต RREP กรณีโพรโทคอล AODV		แพ็กเก็ต RREP กรณีโพรโทคอล RMCSR	
ส่วนประกอบ	จำนวนไบต์	ส่วนประกอบ	จำนวนไบต์
Packet type	1	Packet type	1
Reserved field	2	Reserved field (เก็บตัวแปร State)	2
Hop-count	1	Hop-count	1
Destination address	2	Destination address	2
Destination sequence number	4	Destination sequence number	4
Source address	2	Source address	2
Lifetime	4	Lifetime	4
Timestamp	8	Timestamp	8
		Maximum delay cost หรือ Maximum energy cost	8
		RREP sending time (ใช้สำหรับคำนวณตามสมการ (4-2))	8
	รวม 24 ไบต์		รวม 40 ไบต์

จากตารางที่ ง-2 จะเห็นได้ว่า ทั้งโพรโทคอล AODV และโพรโทคอล RMCSR แพ็กเก็ต RREQ มีขนาด 28 ไบต์ เท่ากัน ถึงแม้ว่าในกรณีของโพรโทคอล RMCSR จะมีการฝากค่าตัวแปร State จำนวน 1 ไบต์ ลงไปในแพ็กเก็ต RREQ เพื่อบ่งชี้สถานะของระบบควบคุม ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4.1.1 ก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ทำการเพิ่มขนาดของแพ็กเก็ต RREQ ค่าตัวแปร State ถูกเก็บไว้ในส่วนสงวน หรือเรียกว่า reserved filed ซึ่งเป็นส่วนที่โพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิมอนุญาตให้ใช้งานได้ สำหรับในตารางที่ ง-3 กรณีโพรโทคอล RMCSR แพ็กเก็ต RREP มีขนาด 40 ไบต์ ใหญ่กว่ากรณีโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม 16 ไบต์ ซึ่งกำหนดไว้สำหรับเก็บค่า delay cost หรือค่า energy cost สูงสุดในเส้นทาง จำนวน 8 ไบต์ และค่าเวลาที่โหนดตัวส่งส่งข้อความ RREP (RREP sending time) ไว้สำหรับคำนวณค่า delay cost ระหว่างคู่ลิงค์สื่อสารใด ๆ ในเส้นทาง อีกจำนวน 8 ไบต์

จากข้อมูลข้างต้น หากพิจารณาที่ขนาดแพ็กเก็ต จะเห็นได้ว่าเฉพาะกรณีแพ็กเก็ต RREP ที่โพรโทคอล RMCSR มีการใช้พื้นที่หรือจำนวนไบต์ในการเก็บข้อมูลสูงกว่ากรณีโพรโทคอล AODV สำหรับในกรณีแพ็กเก็ต RREQ ทั้งสองโพรโทคอลใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลเท่าเทียมกัน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาประเด็นจำนวนขั้นตอนในการทำงาน โพรโทคอล RMCSR มีจำนวนขั้นตอนในการทำงานที่มากกว่าโพรโทคอล AODV กล่าวคือ กรณีแพ็กเก็ต RREQ โหนดจำเป็นต้องทำการคำนวณและบันทึกค่าตัวแปร State ลงในแพ็กเก็ต RREQ (แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-2 บรรทัดที่ (1) ถึง (11) ในหัวข้อที่ 4.4.1.1) สำหรับกรณีแพ็กเก็ต RREP โหนดจำเป็นต้องทำการบันทึกค่าตัวแปร State (แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-3 บรรทัดที่ (6) (11) และ (18) ในหัวข้อที่ 4.4.1.2) และคำนวณและบันทึก ค่า delay cost สูงสุด หรือค่า energy cost สูงสุด และค่า RREP sending time (แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-4 บรรทัดที่ (6) ถึง (14) ในหัวข้อที่ 4.4.1.2) ลงในแพ็กเก็ต RREP

ง.3 ข้อมูลในตารางเส้นทาง

การเปรียบเทียบข้อมูลในตารางเส้นทางกรณีโพรโทคอล AODV และกรณีโพรโทคอล RMCSR แสดงดังตารางที่ ง-4 จะเห็นได้ว่า กรณีโพรโทคอล RMCSR โหนดจะทำการบันทึกค่า state (เฉพาะโหนดต้นทางที่บันทึกค่านี้) และค่า final cost (แสดงดังสมการที่ 4-5) ลงในตารางเส้นทางเพิ่มเติมจากกรณีโพรโทคอล AODV แบบดั้งเดิม ค่า state และค่า final cost ดังกล่าว ถูกบันทึกไว้ในตารางเส้นทางโดยใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลจำนวน 1 ไบต์ และ 8 ไบต์ ตามลำดับ ดังนั้น โพรโทคอล RMCSR จึงใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลมากกว่ากรณีโพรโทคอล AODV จำนวน 9 ไบต์ และหากพิจารณาประเด็นจำนวนขั้นตอนในการทำงาน โพรโทคอล RMCSR มีจำนวนขั้นตอนในการทำงานที่มากกว่าโพรโทคอล AODV เนื่องจากโหนดจำเป็นต้องทำการคำนวณและบันทึกค่า State และค่า final cost ลงในตารางเส้นทาง (แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-5 บรรทัดที่ (1) ถึง (39) ในหัวข้อที่ 4.4.2)

ตาราง ง-4 เปรียบเทียบข้อมูลในตารางเส้นทางกรณีโพรโทคอล AODV และกรณีโพรโทคอล RMCSR

ตารางเส้นทางกรณีโพรโทคอล AODV	ตารางเส้นทางกรณีโพรโทคอล RMCSR
Destination address	Destination address
Next hop address	Next hop address
Hop count	Hop count

ตารางเส้นทางกรณีโพรโทคอล AODV	ตารางเส้นทางกรณีโพรโทคอล RMCSR
Destination sequence number	Destination sequence number
List of precursors	List of precursors
Lifetime	Lifetime
	State
	Final cost

ง.4 กระบวนการจัดเส้นทาง

นอกเหนือจากที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ ง-2 และ ง-3 ข้างต้น โพรโทคอล RMCSR มีจำนวนขั้นตอนในการทำงานที่มากกว่าโพรโทคอล AODV ดังนี้ ก) กระบวนการรับข้อความ RREQ ซ้ำ ของโหนดปลายทาง สำหรับการเตรียมเส้นทางไว้หลาย ๆ เส้นทางเพื่อเลือกเส้นทางที่เหมาะสม แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-2 บรรทัดที่ (16) ถึง (20) ในหัวข้อที่ 4.4.1.1 ข) กระบวนการเพิ่มค่าและฝากค่า destination sequence number ในข้อความ RREP ของโหนดปลายทาง เพื่อแจ้งให้โหนดในเครือข่ายที่รับข้อความ RREP ดังกล่าว รับรู้ถึงความใหม่ของเส้นทางและป้องกันการเกิดการวนลูบในขั้นตอนการส่งข้อมูล แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-3 บรรทัดที่ (8) ถึง (13) ในหัวข้อที่ 4.4.1.2 ค) กระบวนการคำนวณและเปรียบเทียบค่า end-to-end delay ของการส่งข้อความ RREP ในเครือข่าย กับค่า end-to-end delay threshold เพื่อตรวจสอบระดับความล่าช้าของการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทางที่ระบบควบคุมสามารถยอมรับได้ แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-4 บรรทัดที่ (1) ถึง (5) ในหัวข้อที่ 4.4.1.2 และท้ายสุด ง) กระบวนการตรวจสอบสถานะการควบคุมในขั้นตอนการนำส่งข้อมูลของโหนดต้นทาง เพื่อตรวจสอบสถานะของระบบควบคุม ณ ปัจจุบัน ให้สอดคล้องกับตัววัดการจัดเส้นทางที่ใช้งาน แสดงดังอัลกอริทึมที่ 4-6 บรรทัดที่ (1) ถึง (9) ในหัวข้อที่ 4.4.3

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	อภิเดช บุญดวงศ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210130024	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า โทรคมนาคม)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2550
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนโครงการ NTC Scholarship สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (สพท.) สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

A. Booranawong, W. Teerapabkajorndet and C. Limsakul, "Energy Consumption and Control Response Evaluations of AODV Routing in WSAWs for Building-Temperature Control," *Sensors* 2013, vol. 13, no. 7, pp. 8303-8333, 2013.

A. Booranawong and W. Teerapabkajorndet, "An Enhanced AODV Routing Protocol for Wireless Sensor and Actuator Networks," in *Proceedings of International Conference on Communications, Networking and Mobile Computing (ICCNMC-2013)*, pp. 1783-1790, 2013