

การส่งต่อข้อมูลแบบมัลติ-ฮอปสำหรับเอ็มคิวทีทีโพรโทคอล Multi-Hop Relayed Message Sending for MQTT Protocol

ชลทวิ วงศ์พร้อมรัตน์¹, วชระ ฉัตรวิริยะ²

สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ

E-mail: 58601091@kmitl.ac.th¹, watchara.ch@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

เอ็มคิวทีทีโพรโทคอล (MQTT Protocol) เป็นหนึ่งในโพรโทคอลที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบอินเทอร์เน็ตของสิ่ง (Internet of Things) หรือไอโอที (IoT) จากงานวิจัยของเราที่ผ่านมาพบว่าเอ็มคิวทีทีนั้นมีปัญหาในกระบวนการของการการันตีการให้บริการ (Quality of Services) หรือคิวโอเอส (QoS) เราได้นำเสนอวิธีการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงเพื่อลดปัญหาการเชื่อมต่อที่ขาดหายไปเป็นระยะเวลายาวนาน โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาแนวคิดดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงได้ดียิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนรูปแบบการส่งข้อมูลแบบซิงเกิล-ฮอป (Single-Hop) เป็นแบบมัลติ-ฮอป (Multi-Hop) แทน เพื่อส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายอื่นที่การส่งข้อมูลแบบซิงเกิล-ฮอปไม่สามารถส่งได้ โดยระยะเวลาที่ใช้จะน้อยกว่ากระบวนการคิวโอเอสหากปัญหาการเชื่อมต่อมีระยะเวลาที่ยาวนาน

คำสำคัญ: มัลติ-ฮอป, เครือข่ายคอมพิวเตอร์, ไอโอที, เอ็มคิวทีที

Abstract

MQTT is one of many protocol, which be used in Internet of Things system. From our previous research, there is problem about Quality of Service mechanism in this protocol. We purposed solution by using nearby devices for decreasing response time in network problem. For this research, we improve our solution in this protocol for increasing send message chance by changing single-hop communication pattern to multi-hop for sending data to devices in other network which single-hop pattern cannot send data to them. This solution uses less time than processing time in QoS mechanism when the connection problem has a long time.

Keywords: Multi-Hop, Computer Network, IoT, MQTT

1. บทนำ

อินเทอร์เน็ตของสิ่งเป็นระบบที่ทำงานกับอุปกรณ์จำนวนมากเพื่อรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยอาศัยโพรโทคอลที่มีอยู่มากมายในปัจจุบัน หนึ่งในโพรโทคอลที่ได้รับความนิยมในระบบไอโอทีคือเอ็มคิวทีทีเนื่องจากเป็นโพรโทคอลที่มีขนาดเล็ก จึงเหมาะสมกับระบบไอโอทีที่อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการประมวลผลไม่มาก และด้วยขนาดที่เล็กจึงทำให้สามารถลดขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการรับส่งแต่ละครั้งได้

หนึ่งในปัญหาของเอ็มคิวทีทีคือกระบวนการคิวโอเอสจะมีระยะเวลาการส่งซ้ำที่ไม่แน่นอน หากการเชื่อมต่อไปยังโบรกเกอร์ (Broker Server) เกิดปัญหาเป็นระยะเวลานาน ระยะเวลาของการส่งข้อมูลด้วยกระบวนการคิวโอเอสก็จะยาวนานตามไปด้วย เนื่องจากกระบวนการนี้จำเป็นที่จะต้องส่งข้อมูลซ้ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของเรา เราได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้าง เพื่อให้อุปกรณ์รอบข้างเหล่านั้นทำหน้าที่ส่งข้อมูลแทน

ในการส่งข้อมูล อุปกรณ์ตั้งต้นจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้างแบบซิงเกิล-ฮอปเท่านั้น ซึ่งจะมีผลให้หากอุปกรณ์รอบข้างเหล่านั้นยังมีอุปกรณ์รอบข้างหรือเครือข่ายอื่นที่เชื่อมต่ออยู่อีก มันจะไม่สามารถส่งต่อข้อมูลเพิ่มเติมอีกได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ เราจะทำการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลไปยังเครือข่ายของอุปกรณ์ข้างเคียง เพื่อเพิ่มโอกาสในการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่นที่อุปกรณ์ตั้งต้นไม่สามารถเชื่อมต่อได้

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะถูกกล่าวตามลำดับต่อไปนี้ บทที่ 2 อธิบายถึงความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดของงานวิจัย บทที่ 4 อธิบายแนวทางการพัฒนาระบบ บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง และบทที่ 6 สรุปผล

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรับส่งข้อมูลด้วยเอ็มคิวทีทีโพรโทคอลถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ตัวส่ง (Publisher) โบรกเกอร์ (Broker) และตัวรับ (Receiver) เมื่อทำการส่งข้อมูล อุปกรณ์ที่ส่งข้อมูลต้นทางจะส่งข้อความ (Message) พร้อมระบุหัวข้อ (Topic) ของข้อความนั้นแล้วส่งไปยังโบรกเกอร์ เมื่อโบรกเกอร์ได้รับข้อความ มันจะทำการส่งต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์

รับปลายทางทุกตัวที่เชื่อมต่อกับมันโดยอ้างอิงจากหัวข้อของข้อความ หากเป็นหัวข้อเดียวกัน อุปกรณ์รับปลายทางก็จะได้รับข้อความจากโบรกเกอร์ แต่ในทางกลับกัน ก็จะไม่ได้รับข้อความ [4]

หนึ่งในกระบวนการหลักที่สำคัญของเอ็มคิวทีทีคือคิวโอเอสซึ่ง เป็นกระบวนการที่ช่วยในเรื่องการรับประกันการรับส่งข้อมูล โดยกระบวนการนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ [1-2] ได้แก่ 1. คิวโอเอสศูนย์ (QoS0) เป็นการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ส่งต้นทางเพียงครั้งเดียว และไม่รอผลลัพธ์กลับ ดังนั้นหากข้อมูลมีการสูญหายก็จะมีการส่งข้อมูลซ้ำเกิดขึ้น 2. คิวโอเอสหนึ่ง (QoS1) เป็นการส่งข้อมูลที่รอผลตอบรับกลับจากโบรกเกอร์หนึ่งครั้ง ซึ่งเป็นการช่วยการันตีการส่งข้อมูล แต่ถ้าหากข้อความที่ตอบกลับจากโบรกเกอร์เกิดการสูญหาย ก็มีโอกาสที่อุปกรณ์ตั้งต้นจะส่งข้อมูลซ้ำได้ 3. คิวโอเอสสอง (QoS2) เป็นการรับส่งข้อมูลที่ปลอดภัยที่สุดสำหรับเอ็มคิวทีทีโพรโทคอล โดยอาศัยหลักการ 4-เวย์แฮนด์เชก (4-way handshake) แต่ก็มีโอกาสที่การส่งข้อมูลจะซ้ำเมื่อเทียบกับระดับอื่น

หนึ่งในวิธีการที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาการส่งข้อมูลล่าช้าที่เกิดจากปัญหาการเชื่อมต่อในคิวโอเอส [1] คือ การส่งข้อมูลออกไปยังอุปกรณ์รอบข้าง เพื่อให้อุปกรณ์รอบข้างทดลองส่งข้อมูลไปยังโบรกเกอร์แทน โดยอาศัยอาร์พีโพรโทคอล (ARP) และ เอชทีทีพีโพรโทคอล (HTTP) ช่วยในการสื่อสารไปยังอุปกรณ์รอบข้าง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา การส่งข้อมูลจะใช้รูปแบบซิงเกิล-ฮอป กล่าวคือ อุปกรณ์ตั้งต้นจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้างเพียงหนึ่งครั้งเท่านั้น และอุปกรณ์รอบข้างจะไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ตัวอื่นเพื่อให้ส่งข้อมูลแทนได้อีก ซึ่งถ้ามีอุปกรณ์อื่นที่เชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์รอบข้าง แต่ไม่ได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตั้งต้น อุปกรณ์เหล่านั้นจะไม่ได้รับข้อมูลเพื่อทดลองส่งข้อมูลไปยังโบรกเกอร์ ทำให้โอกาสที่จะส่งต่อข้อมูลไปยังโบรกเกอร์ลดลง

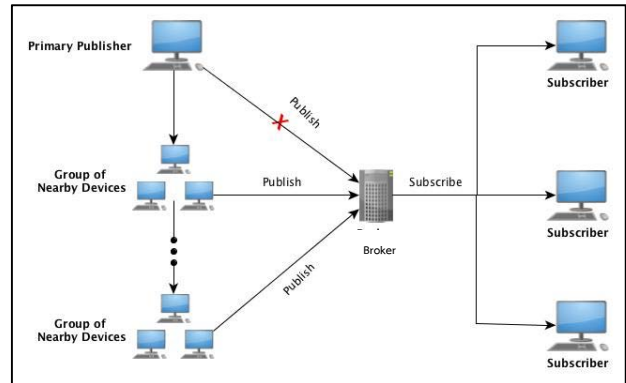
งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลแบบมัลติ-ฮอปเพื่อเพิ่มโอกาสในการส่งข้อมูลไปยังเครือข่ายและอุปกรณ์รอบข้างอื่นที่อุปกรณ์ตั้งต้นไม่สามารถเชื่อมต่อได้

3. แนวคิด

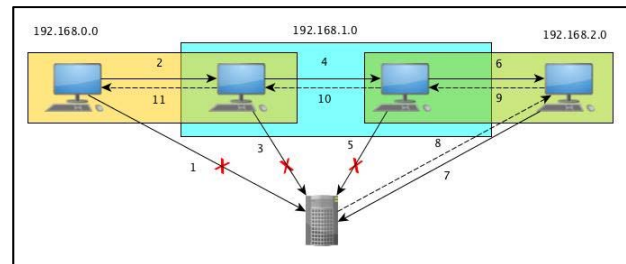
ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอแนวคิดในการส่งข้อมูลแบบมัลติ-ฮอปไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง หนึ่งในปัญหาที่เราพบคือ จะทำอย่างไรให้การส่งข้อมูลแบบมัลติ-ฮอปนี้ ไม่ส่งข้อมูลซ้ำไปยังอุปกรณ์กลุ่มเดิม เนื่องจากการส่งข้อมูลซ้ำไปยังอุปกรณ์เดิมที่ไม่สามารถส่งข้อมูลแทนได้นั้น มีผลทำให้ระยะเวลาในการส่งข้อมูลมากขึ้น

หนึ่งในวิธีการที่สามารถใช้แก้ปัญหานี้ได้คือ ใช้วิธีการตรวจสอบก่อนการส่งข้อมูลว่า อุปกรณ์ที่กำลังจะส่งไปนั้น เคยถูกส่งข้อมูลให้แล้วหรือยัง โดยตรวจสอบจากหมายเลขเครือข่าย (Network IP) โดยทุกครั้งที่มีการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้าง อุปกรณ์ตั้งต้นจะทำการส่งข้อมูลของหมายเลขเครือข่ายที่เคยทดลองส่งข้อมูลแล้วไปพร้อมกัน เพื่อให้อุปกรณ์ภายในเครือข่ายนั้นทำการตรวจสอบก่อนการส่งต่อไปยังอุปกรณ์ในเครือข่ายอื่น หากอุปกรณ์ที่จะส่งไปนั้นอยู่ในเครือข่ายที่อยู่ในรายการ

หมายเลขเครือข่ายที่เคยถูกส่งแล้ว มันก็จะข้ามการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้นไป และหากอุปกรณ์ทุกตัวภายในเครือข่าย ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโบรกเกอร์ได้เลย อุปกรณ์แรกที่รับข้อมูลเข้ามาภายในเครือข่ายนั้น ก็จะทำการส่งหมายเลขเครือข่ายกลับไป เพื่อเป็นการบ่งบอกว่า เครือข่ายนี้ไม่สามารถส่งข้อมูลแทนได้ แต่ในทางกลับกัน หากมีอุปกรณ์ที่สามารถส่งข้อมูลแทนได้ อุปกรณ์แรกที่รับข้อมูลเข้ามาภายในเครือข่ายนั้นก็จะทำการส่งผลลัพธ์ว่าสำเร็จกลับไปยังอุปกรณ์ส่งตั้งต้นแทน



รูปที่ 1 แนวคิดของระบบการส่งต่อข้อมูล



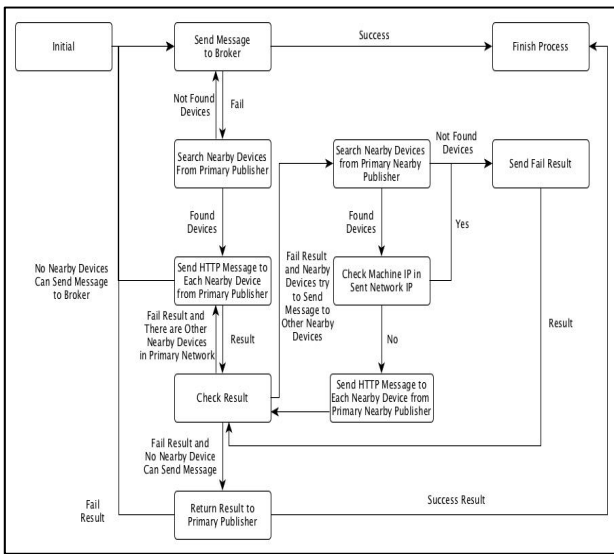
รูปที่ 2 ลำดับการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้างแบบมัลติ-ฮอป

วิธีการที่นำเสนอจะเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

1. อุปกรณ์ส่งตั้งต้นส่งข้อมูลไปยังโบรกเกอร์ หากไม่สามารถส่งข้อมูลได้อุปกรณ์ตั้งต้นจะทำการค้นหาอุปกรณ์รอบข้างด้วยอาร์พีโพรโทคอล
2. อุปกรณ์ส่งตั้งต้นจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้างผ่านเอชทีทีพีโพรโทคอลที่ละอุปกรณ์ตามหมายเลขอุปกรณ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1
3. อุปกรณ์รอบข้างจะส่งข้อมูลไปยังโบรกเกอร์แทนอุปกรณ์ส่งตั้งต้น หากส่งสำเร็จ มันจะทำการส่งผลลัพธ์ว่าสำเร็จกลับไปยังอุปกรณ์ส่งตั้งต้นและจบกระบวนการลง แต่หากไม่สำเร็จ มันจะทำการค้นหาอุปกรณ์รอบข้าง พร้อมส่งข้อมูลรวมถึงหมายเลขเครือข่ายไปยังอุปกรณ์รอบข้างที่ยังไม่เคยทดลองส่งข้อมูล
4. อุปกรณ์ที่รับข้อมูลจะทำการกระบวนการในข้อที่ 3 ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะไม่มีอุปกรณ์ใหม่ในเครือข่ายที่มันสามารถเชื่อมต่อได้ให้ทดลองส่งอีก

5. อุปกรณ์รอบข้างตัวสุดท้ายที่ทดลองส่งข้อมูลจะทำการส่งผลลัพธ์กลับไปยังอุปกรณ์ที่ส่งข้อมูลให้ ถ้าหากส่งสำเร็จ มันจะทำการส่งผลลัพธ์ว่าสำเร็จไปเรื่อยๆจนกลับไปถึงอุปกรณ์ส่งตั้งต้น แต่ถ้าส่งไม่สำเร็จ มันจะทำการส่งหมายเลขเครือข่ายกลับไปแทน

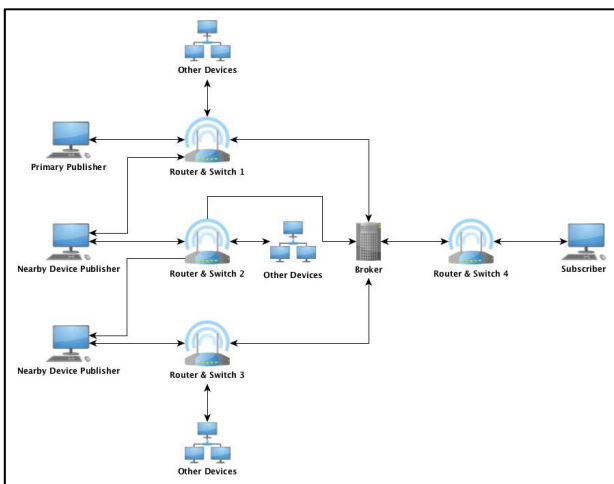
6. หากไม่มีอุปกรณ์ใดเลยสามารถส่งข้อมูลแทนได้ อุปกรณ์ส่งตั้งต้นจะเริ่มทำการกระบวนการทั้งหมดซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 3 แผนภาพสถานะ (State Diagram) ของวิธีการที่นำเสนอ

4. แนวทางการพัฒนาระบบ

เราได้ทำการจำลองระบบขึ้นมาโดยมีระบบเครือข่าย 3 ระบบ เชื่อมต่อกันตามรูปที่ 4 โดยทุกครั้งที่อุปกรณ์ใดก็ตามไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโบรกเกอร์ด้วยตัวเองได้ อุปกรณ์นั้นก็จะทำตามกระบวนการที่กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า



รูปที่ 4 โครงสร้างระบบเครือข่ายและการเชื่อมต่ออุปกรณ์

รูปที่ 5 เป็นชุดโค๊ดิต (Pseudocode) สำหรับการส่งและรับข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้างด้วยเอชทีทีพีโพรโทคอลซึ่งการส่งนี้จะมีลักษณะเป็นแบบฟังก์ชันรีเคอร์ซีฟ (Recursive Function) ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังทางอุปกรณ์ข้างเคียงได้เรื่อยๆ โดยมีการตรวจสอบว่าอุปกรณ์ปลายทางที่จะส่งไปนั้น อยู่ในเครือข่ายที่เคยทดลองส่งไปแล้วหรือไม่ ซึ่งหากไม่มีอุปกรณ์ใดเลยในเครือข่ายสามารถส่งข้อมูลได้ อุปกรณ์ตั้งต้นของเครือข่ายก็จะส่งหมายเลขเครือข่ายทั้งหมดที่ทดลองส่งกลับไปยังอุปกรณ์ส่งก่อนหน้าเพื่อไม่ให้เกิดการส่งซ้ำของข้อมูลภายในเครือข่าย

```
def mqtt_publish(broker_ip, topic, data, network_ip):
    publish_result = mqtt.publish(broker_ip, topic, data)
    if publish_result == 'Success':
        return 'Success'
    else:
        nearby_device_ip = findNearbyDevice()
        network_ip.add(local_network_ip)
        for each_ip in nearby_device_ip:
            nearby_network_ip = getNetworkIp(each_ip)
            if nearby_network_ip not in network_ip:
                nearby_result = http.send(each_ip, topic, data, network_ip)
                if nearby_result == 'Success':
                    return 'Success'
        return network_ip

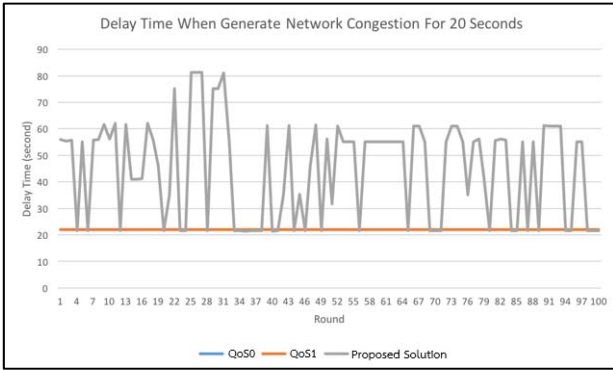
def http_receive(topic, data, network_ip):
    message = http.receive(topic, data, network_ip)
    topic = message[0]
    data = message[1]
    sent_network_ip = message[2]
    send_result = mqtt_publish(broker_ip, topic, data, network_ip)
    return send_result
```

รูปที่ 5 ชุดโค๊ดิตการรับส่งข้อมูลแบบมัลติ-ฮอป

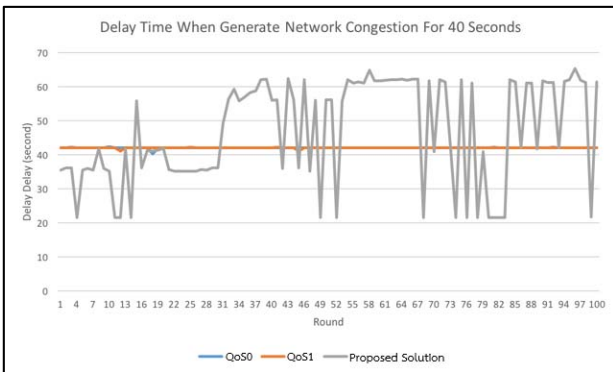
5. การทดลอง

วิธีการทดสอบวิธีการแก้ไขที่เราแนะนำนั้น เราได้ทำการจำลองระบบตามรูปที่ 4 แล้วทำการสร้างความแออัดภายในเครือข่าย (Network Congestion) เป็นเวลา 20 40 และ 60 วินาที เพื่อเก็บผลลัพธ์ความล่าช้า (Delay Time) (จับเวลาการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ส่งตั้งต้นทางจนถึงอุปกรณ์รับปลายทาง) และความเร็วในการตอบสนอง (Response

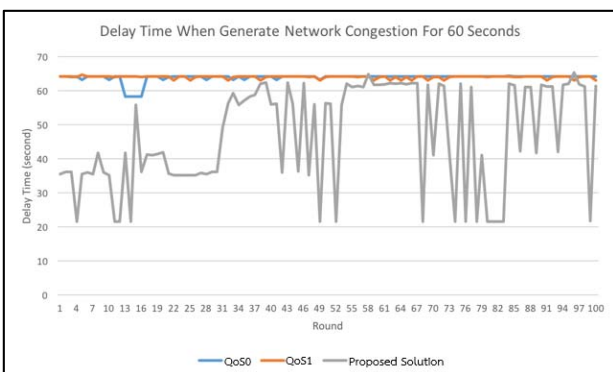
Time) (จับเวลาตั้งแต่การส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ส่งต้นทางจนได้รับผลลัพธ์ตอบกลับ) ในการส่งข้อมูลของกระบวนการคิวโอเอสหนึ่ง คิวโอเอสสอง และวิธีการที่นำเสนอ โดยการส่งข้อมูลขนาด 1,000 ไบท์ ไปยังอุปกรณ์รับปลายทาง รูปที่ 6 7 8 เป็นผลลัพธ์ความล่าช้าของการส่งข้อมูล และ รูปที่ 9 10 11 เป็นความเร็วในการตอบสนอง



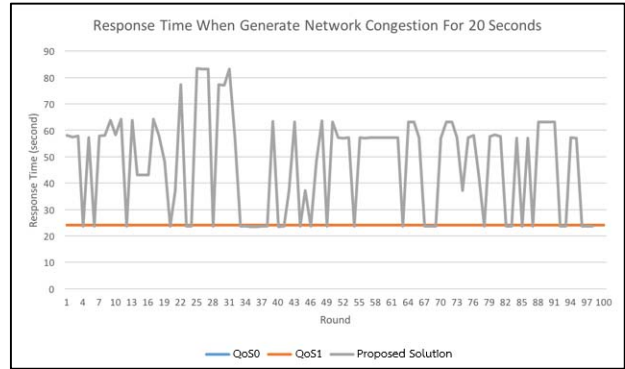
รูปที่ 6 ความล่าช้าของผลลัพธ์เมื่อสร้างความแออัดภายในเครือข่ายเป็นเวลา 20 วินาที



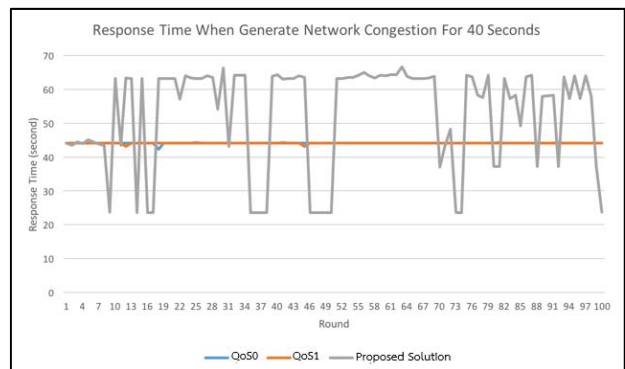
รูปที่ 7 ความล่าช้าของผลลัพธ์เมื่อสร้างความแออัดภายในเครือข่ายเป็นเวลา 40 วินาที



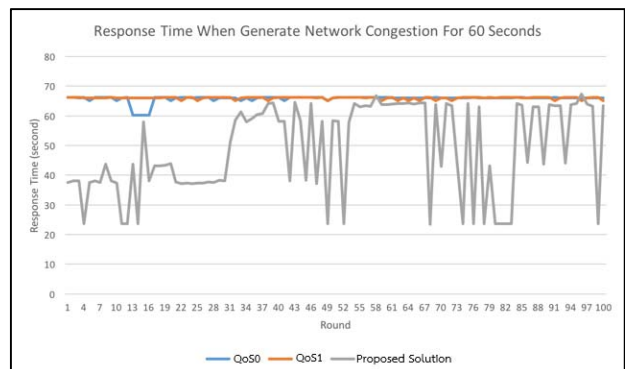
รูปที่ 8 ความล่าช้าของผลลัพธ์เมื่อสร้างความแออัดภายในเครือข่ายเป็นเวลา 60 วินาที



รูปที่ 9 ความเร็วในการตอบสนองของผลลัพธ์เมื่อสร้างความแออัดภายในเครือข่ายเป็นเวลา 20 วินาที



รูปที่ 10 ความเร็วในการตอบสนองของผลลัพธ์เมื่อสร้างความแออัดภายในเครือข่ายเป็นเวลา 40 วินาที



รูปที่ 11 ความเร็วในการตอบสนองของผลลัพธ์เมื่อสร้างความแออัดภายในเครือข่ายเป็นเวลา 60 วินาที

ตารางที่ 1 และ 2 เป็นตารางที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยความเร็วในการตอบสนองและความล่าช้าของการผลการทดลองตามลำดับ แม้วิธีการที่นำเสนอ นั้น จะใช้ระยะเวลาที่มากกว่าคิวโอเอสหนึ่งและคิวโอเอสสอง ในช่วงระยะเริ่มต้น แต่หากปัญหาการเชื่อมต่อมีระยะเวลาที่ยาวนาน วิธีการที่นำเสนอจะสามารถช่วยลดระยะเวลาการส่งข้อมูลลงได้ เนื่องจากการส่งต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์ในเครือข่ายอื่นที่ไม่มีปัญหาการเชื่อมต่อหรือมีปัญหาน้อยกว่า

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์เฉลี่ยของความล่าช้า

Network Congestion Time (Second)	Delay Time (second)		
	QoS1	QoS2	Proposed Solution
20	22.05	22.04	45.00
40	42.06	42.04	50.39
60	63.79	63.96	46.76

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์เฉลี่ยของความเร็วในการตอบสนอง

Network Congestion Time (Second)	Response Time (second)		
	QoS1	QoS2	Proposed Solution
20	24.02	24.03	47.09
40	44.06	44.06	52.47
60	65.79	65.97	48.82

แม้วิธีการที่นำเสนอจะใช้ระยะเวลาที่เร็วกว่ากระบวนการคิวโอเอสในกรณีที่เกิดการเชื่อมต่อเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน แต่วิธีการนี้ก็จำเป็นที่จะต้องมียุคประกอบหลายอย่างมากกว่ากระบวนการคิวโอเอสตามปกติ อาทิ อุปกรณ์ที่รองรับวิธีการส่งต่อนี้ และจำนวนของเครือข่ายและอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบ กล่าวคือ หากไม่มีอุปกรณ์ใดเลยที่รองรับการส่งต่อด้วยเอชทีทีพี การส่งต่อข้อมูลก็จะไม่เกิดขึ้น รวมถึงหากจำนวนของเครือข่ายและอุปกรณ์ในระบบมีปริมาณที่มาก เวลาที่ใช้ในการทดลองส่งก็จะมากตามไปด้วย

6. สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอถึงวิธีที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์รอบข้าง จากการส่งแบบชิงเกิล-ฮอปเป็นการส่งแบบมัลติ-ฮอปผ่านทางระบบเครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายในระบบ แม้วิธีการส่งแบบมัลติ-ฮอปจะใช้ระยะเวลาที่มากกว่ากระบวนการคิวโอเอสของเอ็มคิวทีทีโพรโทคอลในช่วงระยะเวลาเริ่มต้น แต่หากระยะเวลาที่เกิดปัญหายาวนาน วิธีการนี้ก็ยังสามารถช่วยลดระยะเวลาในการส่งข้อมูลได้ โดยขึ้นอยู่กับจำนวนอุปกรณ์และจำนวนเครือข่ายภายในระบบ

เอกสารอ้างอิง

[1] C. Wongpromrat and C. Chatwiriya, "Relayed Message Sending for MQTT Protocol", The 2016 International Conference on Embedded Systems and Intelligent

Technology, Chonburi, Thailand, August 5-8, 2016, pp. 42-46.

[2] S. Lee, H. Kim, D.K. Hong and H. Ju., "Correlation Analysis of MQTT Loss and Delay According to QoS Level", 2013 International Conference Information Networking, Bangkok, Thailand, 2013, p. 714-717.

[3] K. Jain, J. Padhye, V.N. Padmanabhan and L. Qiu, "Impact of Interference on Multi-Hop Wireless Network Performance", The 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Sandiego California, USA, September 14-19, 2003.

[4] *MQTT v3.1.1*, ISO/IEC 20922, 2016.

[5] B. Aziz, "A Formal Model and Analysis of the MQ Telemetry Transport Protocol", 9th International Conference on Availability, Reliability and Security, Fribourg, Switzerland, 2014 pp. 59-68.

[6] M.Gerla, K.Tang and R. Bagrodia, "TCP Performance in Wireless Multi-hop Networks", Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, Louisiana, USA, 1999