

บทที่ 5

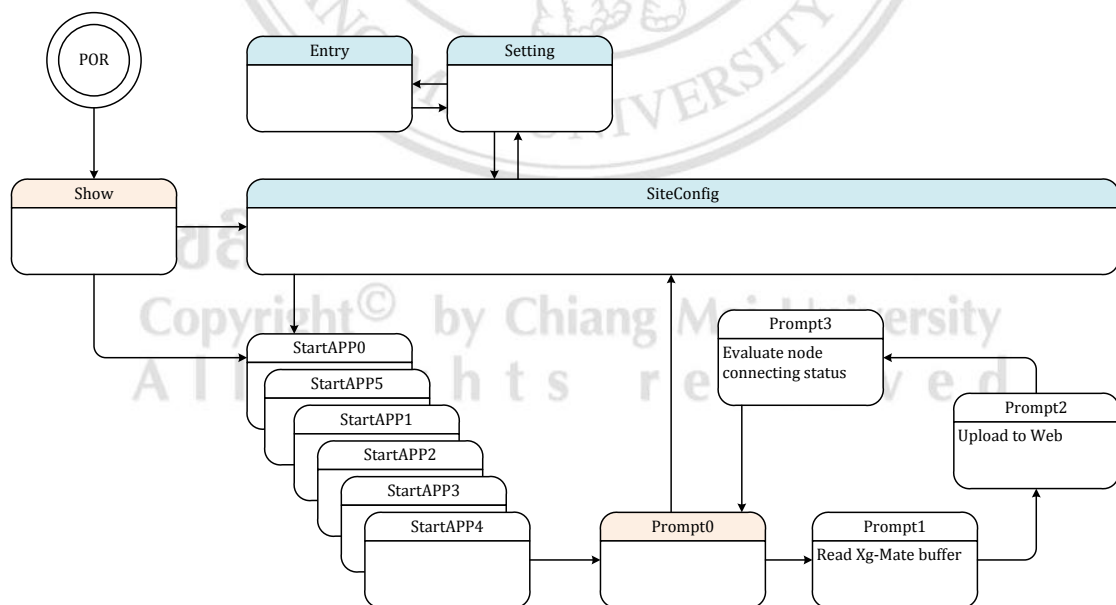
การทดสอบม การใช้งานแพลตฟอร์ม, และ บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้จะเสนอ การใช้งานแพลตฟอร์ม และการทดสอบขั้นโปรโตคอลของเครือข่าย
เซนเซอร์ไร้สายในบางประเด็นที่มีผลต่อการทำงานของแพลตฟอร์ม

5.1 การทดลองใช้งานแพลตฟอร์ม

5.1.1 การใช้งานมาตรฐานในมุมมองผู้ใช้

ในการใช้งานแพลตฟอร์ม ผู้ใช้ จำเป็นต้องตั้งค่าเบื้องต้นให้กับ มาสเตอร์ สำหรับนำข้อมูลส่งขึ้นเซิร์ฟเวอร์ หลังจากตั้งค่าเรียบร้อยแล้วระบบจะทำงานอัตโนมัติ แม้ว่าเกิดเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้องจนทำให้มาสเตอร์หยุดทำงาน แต่เมื่อกระแสไฟฟ้ากลับมาใหม่มาสเตอร์และแพลตฟอร์มจะกลับขึ้นมาทำงานได้เอง ภาพที่ 5.1 แสดงสแตตการทำงานของมาสเตอร์ให้ดูพอสังเขป สเตตที่เรเงาสีฟ้าเป็นสเตตที่ต้องการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ ส่วนสเตตที่ไม่ได้เรเงา มาสเตอร์ทำงานอัตโนมัติ และสเตตที่เรเงาสีส้ม มาสเตอร์ทำงานอัตโนมัติได้แต่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้สั่งงานด้วย



ภาพที่ 5.1 สเตตการทำงานอย่างง่ายของมาสเตอร์

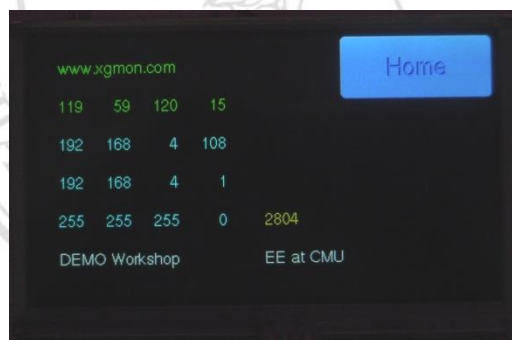
เมื่อเริ่มต้น ได้รับต้นกำลัง (POR: Power On Reset) มาสเตอร์จะเข้าสู่สแตต “Show” เพื่อรอคำสั่งจากผู้ใช้ แต่ถ้าไม่มีการสั่งงานใดๆ มาสเตอร์จะควบคุมแพลตฟอร์มแล้วทำงานตามค่าที่ตั้งไว้เพื่อเข้า

ผู้สแตต “Prompt0” ซึ่งเป็นสแตตหลักของการทำงานอัตโนมัติ, แต่ถ้าหากผู้ใช้สั่งตั้งค่าเมื่ออยู่สแตต “Prompt0” หรือ “Show” มาสเตอร์จะเข้าสู่สแตต “SiteConfig” ซึ่งเป็นสแตตหลักในการตั้งค่า

ภาพที่ 5.2 แสดงหน้าจอหลักของมาสเตอร์ในสแตต “SiteConfig” ซึ่งมีเมนูให้เลือก 5 เมนู ได้แก่ Setting (สำหรับตั้งพารามิเตอร์), Information (แสดงพารามิเตอร์ และ ทดสอบการสื่อสารกับ เซิร์ฟเวอร์), PAN (แสดงโหนดและเอ็นพอยนต์ที่อยู่ในเครือข่าย), Clear (ล้างค่าปริมาณพลังงานสะสม ในกรณีที่ เป็น โหนดวัดพลังงานไฟฟ้า), Start (สั่งเริ่มต้นทำงาน)



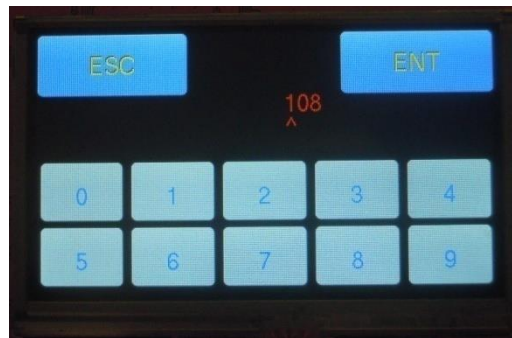
ภาพที่ 5.2 หน้าจอหลัก



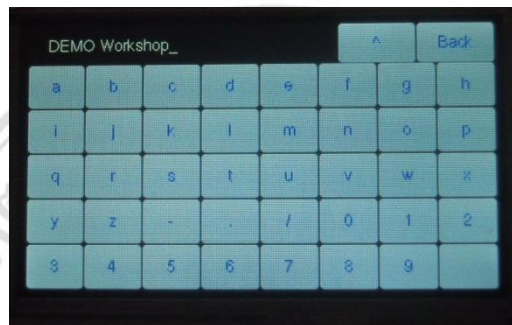
ภาพที่ 5.3 หน้าจอ “Setting”

ภาพที่ 5.3 หน้าจอ “Setting” แสดงพารามิเตอร์ที่จำเป็น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Text และ IP, เป็นพารามิเตอร์ของกลุ่มต่างๆ ดังนี้

- อักษรสีเขียวเกี่ยวกับเซิร์ฟเวอร์ คือ ชื่อ และ IP,
- อักษรสีฟ้า เกี่ยวกับวง LAN ของมาสเตอร์ ได้แก่ IP ของมาสเตอร์, เกตเวย์, และ Sub Network
- อักษรสีขาวเป็นข้อความแสดงบนหน้าจอ
- อักษรสีเหลือง เป็น หมายเลข ไซตงานที่มาสเตอร์นั้นติดตั้งอยู่



ภาพที่ 5.4 หน้าจอ “Setting” --> “IP”



ภาพที่ 5.5 หน้าจอ “Setting” --> “Text”

ภาพที่ 5.4 และ ภาพที่ 5.5 แสดงตัวอย่างหน้าจอที่ผู้ใช้สามารถเข้าไปตั้งค่า แบบ IP และ Text ได้ตามลำดับ โดยจะสอดคล้องกับสแตต “Entry”, เมื่อผู้ใช้ใส่พารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว ขณะที่กลับจาก หน้า “Setting” สู่นำหลัก มาสเตอร์จะจัดเก็บพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้ใน EEPROM (ไอซี MCP79411)



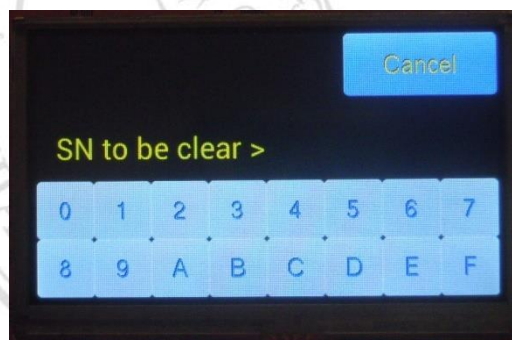
ภาพที่ 5.6 หน้าจอ “Information”

ภาพที่ 5.6 หน้าจอ “Information” แสดงพารามิเตอร์ และใช้ทดสอบการสื่อสารระหว่าง มาสเตอร์กับเซิร์ฟเวอร์



ภาพที่ 5.7 หน้าจอ “PAN/Endpoint”

ภาพที่ 5.7 หน้าจอ “PAN/Endpoint” แสดงโหนดที่เข้าร่วมเครือข่ายแล้ว และคุณสมบัติของเอ็นพอยนต์ คือ หน่วย และ คำอธิบาย ปริมาณที่วัด, ใช้ในขั้นตอนการติดตั้ง เพื่อตรวจสอบว่าโหนดที่ติดตั้งไว้เข้าร่วมเครือข่ายครบถ้วนแล้วหรือยัง, การที่โหนดจะเข้าร่วมเครือข่ายครบและส่งโปรไฟล์ของเอ็นพอยนต์มาให้จนครบนั้นต้องใช้เวลาในหลักนาที การเปิดใช้หน้าจอ “PAN/Endpoint” นี้จึงต้องรอเวลาสักระยะจึงจะได้ข้อมูลครบถ้วน



ภาพที่ 5.8 หน้าจอ “Clear”

ภาพที่ 5.8 หน้าจอ “Clear” ใช้ตั้งค่าพลังงานไฟฟ้าสะสม (Whr) ในโหนดที่ทำหน้าที่วัดพลังงาน, ใช้สำหรับในการติดตั้งและต้องการเริ่มต้นวัดพลังงานใหม่ ซึ่งปกติถ้าไม่ตั้งเคลียร์ค่าปริมาณไฟฟ้าจะสะสมไปอย่างต่อเนื่อง

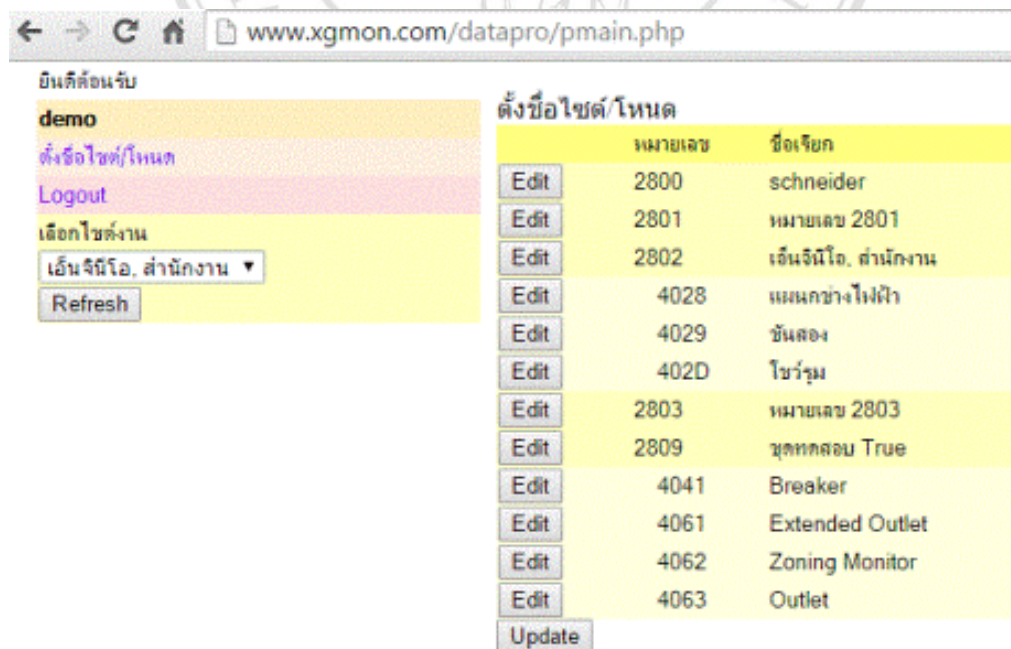
ภาพที่ 5.9 หน้าจอ “Working” เป็นหน้าจอขณะที่มาสเตอร์และแพลตฟอร์ม ทำงานมอนิเตอร์บนหน้าจอแสดง หมายเลขโหนด/เอ็นพอยนต์ พร้อมทั้งเรคอร์ดสุดท้ายที่มาสเตอร์ได้รับเอ็นพอยนต์ใดที่ต้องบันทึกในฐานข้อมูลบนเซิร์ฟเวอร์จะมี ระยะเวลา กำกับด้วย



ภาพที่ 5.9 หน้าจอ “Working”

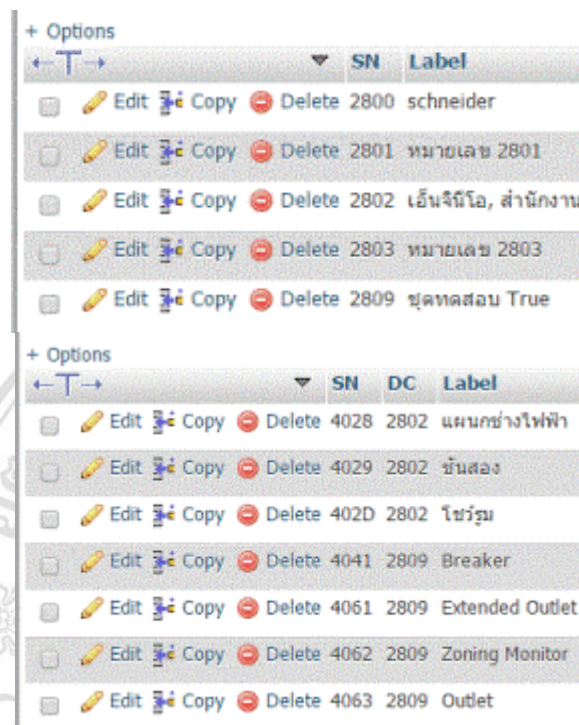
5.1.2 การทดลองใช้งานแพลตฟอร์มในสำนักงานขนาดเล็ก

หลังจากการติดตั้งโหนดในเครือข่าย และ ตั้งค่าพารามิเตอร์ให้กับ มาสเตอร์ ตามหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ในฝั่งของเซิร์ฟเวอร์ จะต้องมีโปรแกรมที่ส่งข้อมูลขึ้นมาให้ด้วย, เพื่อการทดลองใช้แพลตฟอร์มนี้เราได้พัฒนา Web portal ขนาดเล็กขึ้นมาจัดการข้อมูลจากแพลตฟอร์ม ภาพที่ 5.10 แสดงหน้าเว็บที่ใช้ตั้งชื่อ ไซตงาน และ โหนดในไซตงาน, (ไซตงาน คือ บริเวณที่ติดตั้งเครือข่ายไว้สายไว้เราสามารถกำหนดหมายเลขไซตงานให้กับมาสเตอร์ได้) การกำหนดชื่อไซตงานช่วยให้ผู้ใช้อ่านข้อมูลได้สะดวกขึ้น จากตัวอย่างไซตงานที่สำนักงานของบริษัทเอ็นจีไอ คือ หมายเลข 2802 และทดลองติดตั้งโหนดไว้จำนวน 3 โหนด ได้แก่ 4028, 4029 และ 402D



ภาพที่ 5.10 การตั้งชื่อของมาสเตอร์และโหนด สำหรับแสดงผล

สำหรับไซตงานขนาดใหญ่มีพื้นที่มาก สามารถติดตั้งเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจำนวนหลายเครือข่ายให้ใช้เซิร์ฟเวอร์เดียวกันได้



+ Options		SN	Label
☐	Edit Copy Delete	2800	schneider
☐	Edit Copy Delete	2801	หมายเลข 2801
☐	Edit Copy Delete	2802	เอ็นจีโอ, สำนักงาน
☐	Edit Copy Delete	2803	หมายเลข 2803
☐	Edit Copy Delete	2809	ชุดทดสอบ True

+ Options		SN	DC	Label
☐	Edit Copy Delete	4028	2802	แผนผังไฟฟ้า
☐	Edit Copy Delete	4029	2802	บันได
☐	Edit Copy Delete	402D	2802	โซลาร์
☐	Edit Copy Delete	4041	2809	Breaker
☐	Edit Copy Delete	4061	2809	Extended Outlet
☐	Edit Copy Delete	4062	2809	Zoning Monitor
☐	Edit Copy Delete	4063	2809	Outlet

ภาพที่ 5.11 ตาราง ชื่อของมาสเตอร์และโหนด ในฐานข้อมูล

ชื่อของไซตงานและโหนดที่ผู้ใช้กำหนดด้วยหน้าเว็บในภาพที่ 5.10 จะถูกเก็บไว้ในตารางในฐานข้อมูลในภาพที่ 5.11, สิ่งที่สำคัญอีกอย่างสำหรับการจัดการข้อมูลที่ส่งมาจากแพลตฟอร์ม คือ โปรไฟล์ของเอ็นพอยนต์ เราเก็บโปรไฟล์ของเอ็นพอยนต์ไว้ในตารางตามภาพที่ 5.12 สำหรับโปรไฟล์นี้วิศวกรผู้ติดตั้งแพลตฟอร์มจะต้องกำหนดให้ตรงกับโปรไฟล์ที่โหนดส่งมาให้ มาสเตอร์/โคออร์ดิเนเตอร์ จึงจะทำให้หน้า Web Port แสดงผลได้ถูกต้อง

ข้อมูลดิบจะถูกส่งจากมาสเตอร์มาเก็บไว้ในฐานข้อมูลก่อน โดยยังไม่มีการประมวลผลใดๆ เมื่อผู้ใช้เข้าไปหน้า Web portal สคริปต์ PHP จะดึงข้อมูลดิบของไซตงานนั้นออกมาประมวลผล ตามลักษณะโปรไฟล์ของเอ็นพอยนต์ในภาพที่ 5.12 แล้วนำผลลัพธ์ไปแยกเก็บในตารางข้อมูลของโหนด/เอ็นพอยนต์นั้นๆ เพื่อความสะดวกในการนำข้อมูลไปใช้งานในขั้นต่อไป

+ Options							
				id	SN	EP	Mode Unit Caption
☐	Edit	Copy	Delete	0	4028	36	133 W,WHr พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
☐	Edit	Copy	Delete	1	4029	36	133 W,WHr พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
☐	Edit	Copy	Delete	2	4041	36	133 W,WHr พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
☐	Edit	Copy	Delete	3	402D	64	21 C อุ่นภูมิ-อากาศ
☐	Edit	Copy	Delete	4	402D	65	21 %RH ความชื้น-อากาศ
☐	Edit	Copy	Delete	5	4061	36	133 W,WHr พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
☐	Edit	Copy	Delete	6	4062	36	133 W,WHr พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
☐	Edit	Copy	Delete	7	4063	36	133 W,WHr พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

ภาพที่ 5.12 ตาราง โปรไฟล์ของเอ็นพอยนต์ ในฐานข้อมูล

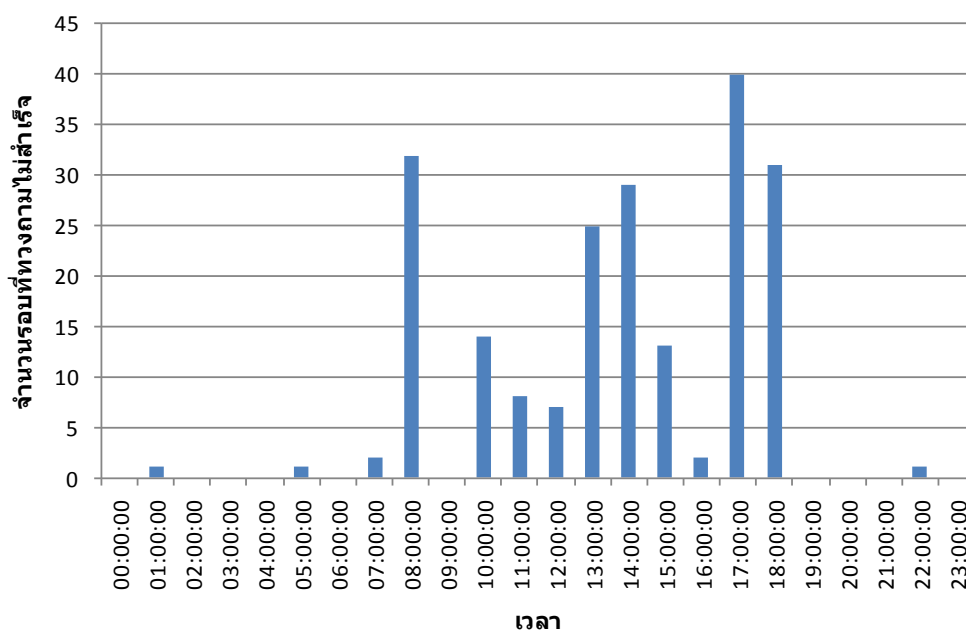
ภาพที่ 5.13 แสดงตัวอย่างกราฟจาก Web portal ที่ดึงข้อมูลจากไชต้งาน 2802 (สำนักงานบริษัทเอ็นจีโอ) กราฟในภาพที่ 5.13 (บน) แสดงโปรไฟล์ของการใช้กำลังไฟฟ้าใน 1 วัน ซึ่งวัดโดยโหนดหมายเลข 4029 ติดตั้งที่ชั้น 2 ของสำนักงาน, จากกราฟดังกล่าวจะเห็นพฤติกรรมการใช้พลังงานคือ เริ่มใช้พลังงานตั้งแต่ 8:00 น., ลดลงในช่วงเวลาพักเที่ยง 12:00 แล้วกลับมาใช้พลังงานมากอีกครั้งในช่วงบ่าย 15:00 น. ไปจนถึงช่วงเย็น 18:00 น.

กราฟในภาพที่ 5.13 (กลาง-ล่าง) แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิและความชื้นในช่วงเวลา 1 วัน ซึ่งวัดโดยโหนดหมายเลข 402D ติดตั้งที่โซว์รูม, ภายในโซว์รูมมีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศไว้ โปรไฟล์ของอุณหภูมิและความชื้นมีแนวโน้มต่ำ ในช่วงเวลา Office time เมื่อเทียบกับช่วงอื่นของวัน ซึ่งผลเป็นผลมาจากการทำงานของเครื่องปรับอากาศ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.1.3 ผลกระทบข้างเคียงการใช้งานในอาคารสำนักงานขนาดใหญ่

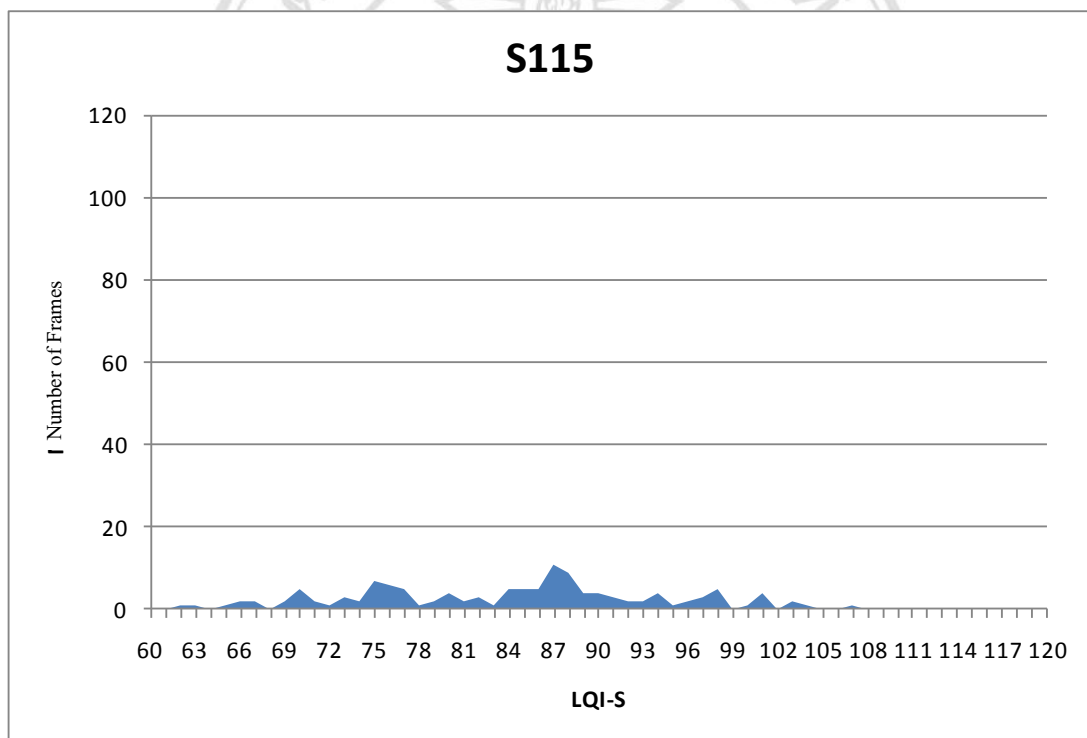
เรานำแพลตฟอร์มไปทดสอบมอนิเตอร์การใช้กำลังไฟฟ้าในอาคารสำนักงาน 4 ชั้น มีพนักงานทำงานอยู่ประมาณ 100 คนอยู่นั้น และทดลองโปรแกรมให้โคออร์ดิเนเตอร์ทวงถามข้อมูลจาก 16 โหนด เมื่อนำเฟรมที่จับได้มาวิเคราะห์หาจำนวนการทวงถามข้อมูลที่ไม่สำเร็จ (หมายถึงรอบที่โคออร์ดิเนเตอร์ได้ข้อมูลไม่ครบจาก 16 โหนด แม้ว่ามีเพียงโหนดเดียวไม่ตอบสนองในเวลาที่กำหนด เราจะถือว่ารอบนั้นทวงถามข้อมูลไม่สำเร็จ) ในเวลา 1 ชั่วโมงโคออร์ดิเนเตอร์จะทวงถามข้อมูล 240 รอบ มีจำนวนที่ทวงถามไม่สำเร็จแสดงในกราฟภาพที่ 5.14 สังเกตได้ว่าในช่วงเวลาทำงานของพนักงานในสำนักงาน การทวงถามไม่สำเร็จจะมีจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลา เริ่มงาน 08:00 น. และช่วงเวลาเลิกงาน 17:30 น., มีข้อสมมติฐานว่าช่วงเวลาดังกล่าวมีการใช้อุปกรณ์สื่อสารประเภท Smart phone และ คอมพิวเตอร์ ที่ใช้งาน WiFi เป็นจำนวนมาก และ WiFi มีย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านเดียวกับตัวรับส่งวิทยุที่ใช้งาน อันเป็นเหตุให้คุณภาพลิงค์ตกลงไปจนการสื่อสารไม่สัมฤทธิ์ผล ถึงแม้ว่าในขั้นตอนสร้างเครือข่ายจะเลือกลิงค์ที่มีคุณภาพด้วยค่า L_{TH} และเลือกใช้ช่องหมายเลข 26 แล้วก็ตาม



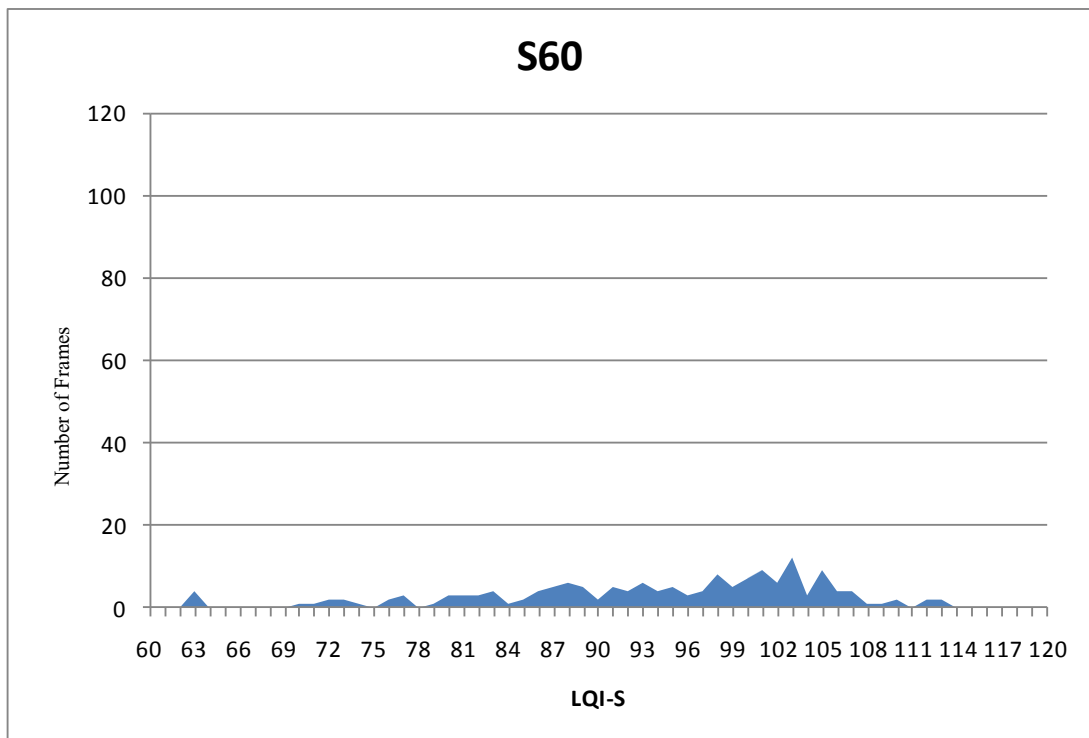
ภาพที่ 5.14 กราฟจำนวนรอบที่ทวงถามข้อมูลไม่สำเร็จในระยะเวลา 1 วัน

5.2 การทดลองหาค่า LQI-TH

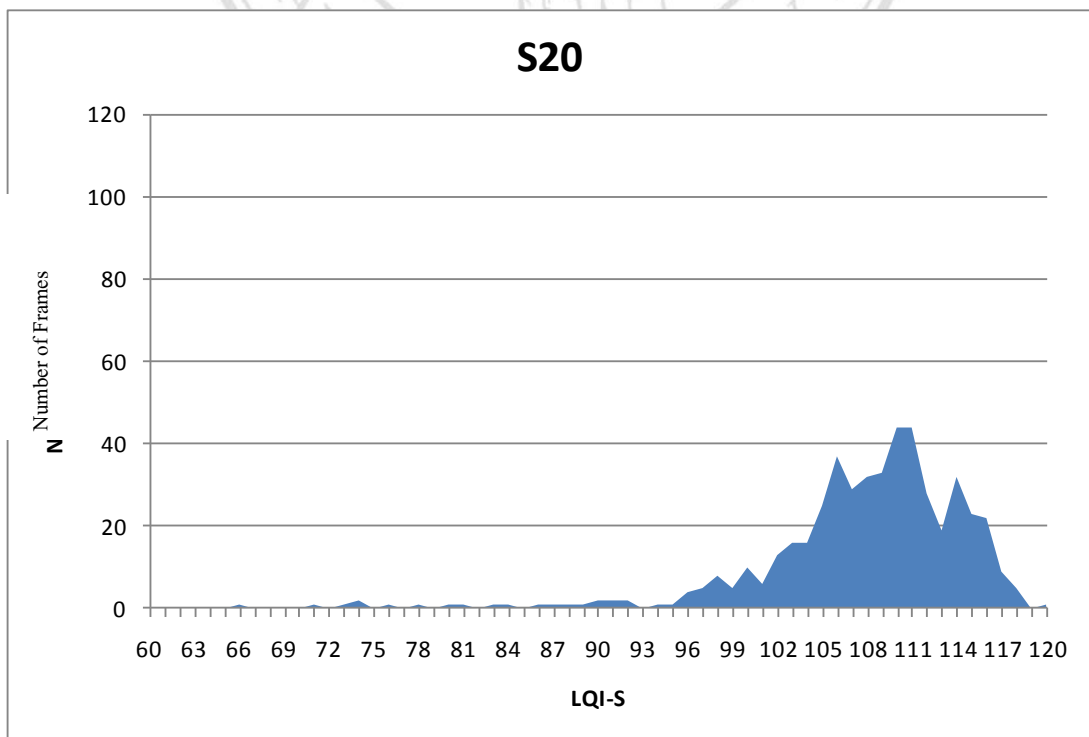
การทดสอบนำโหนด A ถูกนำไปวางห่างจากโคออร์ดิเนเตอร์ที่ระยะต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มในแนวเส้นตรงโดยไม่มีสิ่งกีดขวางหรือสิ่งก่อสร้างอยู่ใกล้เคียง โดยวางโหนด A ในแนวเส้นตรงเดียวกัน แต่วางห่างจากโคออร์ดิเนเตอร์ เป็นระยะ 1, 5, และ 60 เมตร โดยเรียกว่าจุด D01, D05 และ D60 ตามลำดับ และการทดลองอีกหนึ่งชุด วางโหนด A ห่างจากโคออร์ดิเนเตอร์ เป็นระยะ 20, 60 และ 115 เมตร คือจุด S20, S60 และ S115 ตามลำดับ โดยการทดลองชุดนี้จะวางในตำแหน่งที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหลังและด้านข้างของเส้นตรงที่ลากจากโคออร์ดิเนเตอร์ไปหาตำแหน่งต่างๆ ด้วย, การทดลองจะให้โคออร์ดิเนเตอร์ส่งเฟรมทวงถามข้อมูลไปทั้งหมด 500 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 1 วินาที แล้วรอรับเฟรมตอบกลับจากโหนด A



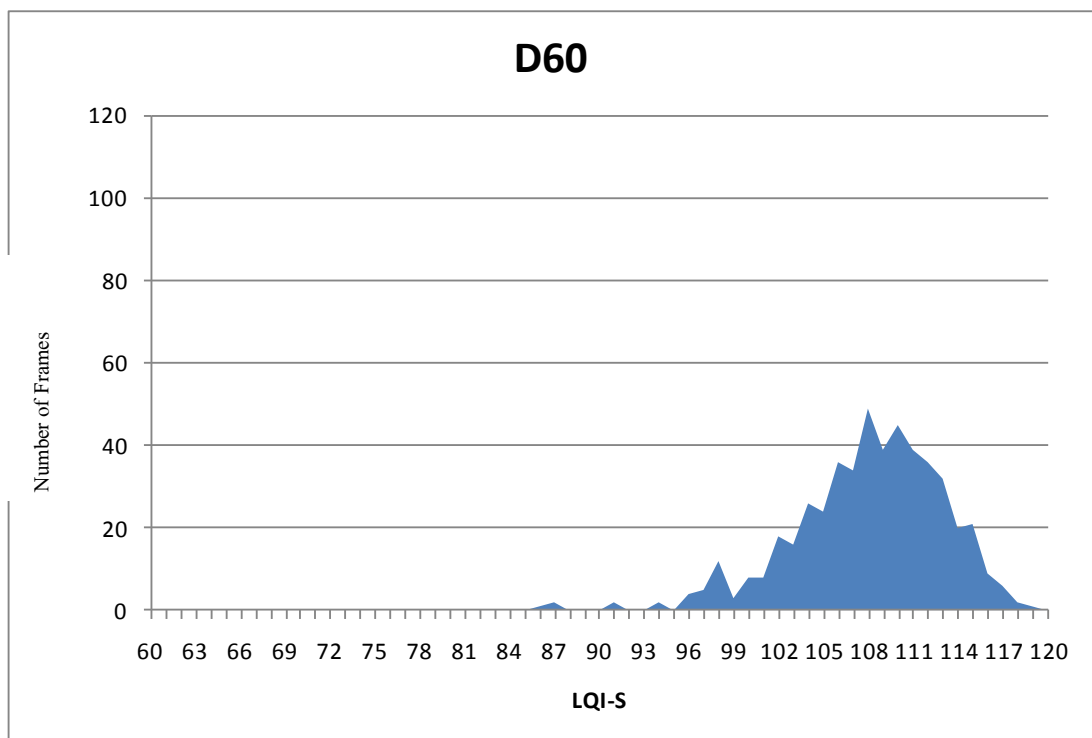
ภาพที่ 5.15 การกระจายของ LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วางที่จุด S115



ภาพที่ 5.16 การกระจายของ LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วางที่จุด S60

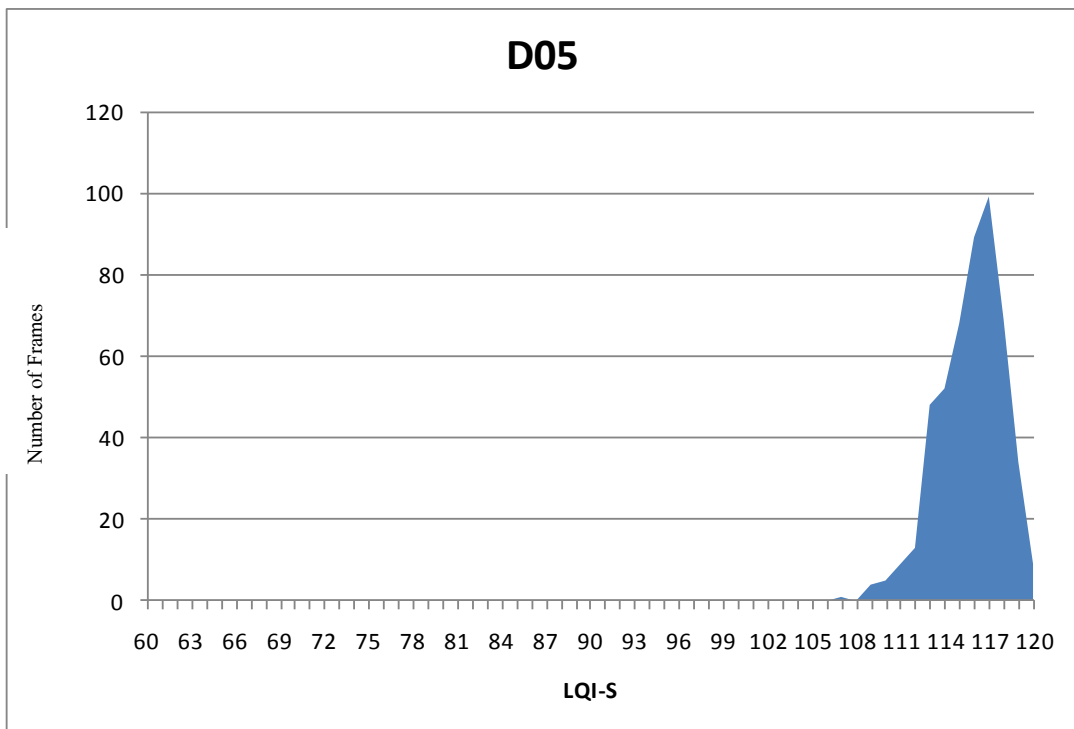


ภาพที่ 5.17 การกระจายของ LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วางที่จุด S20

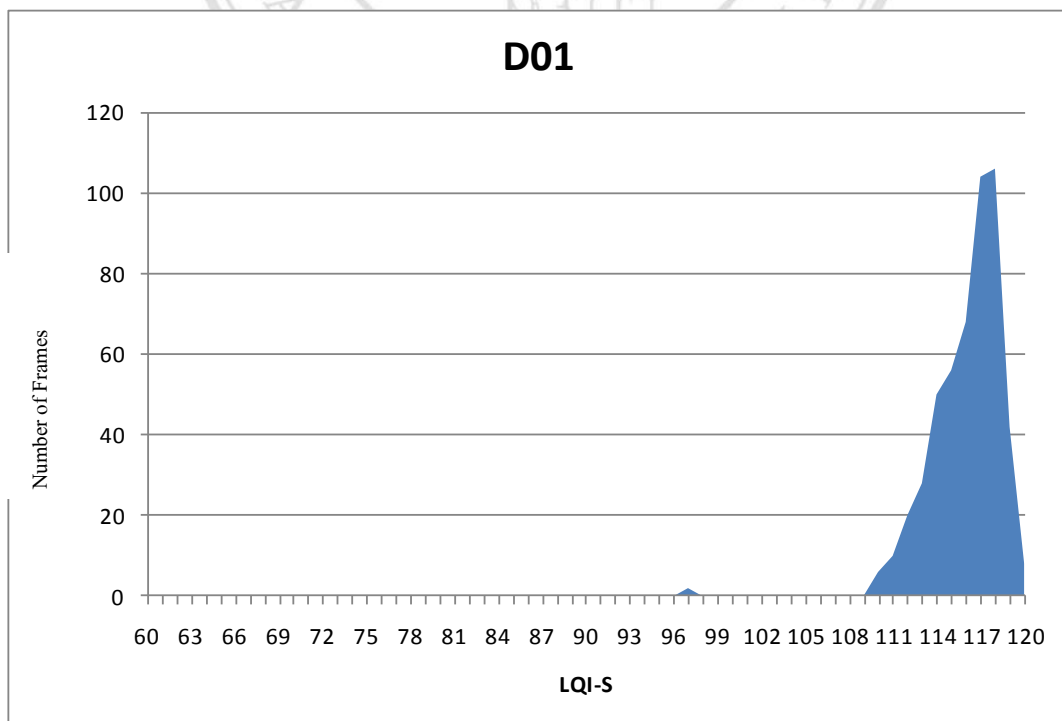


ภาพที่ 5.18 การกระจายของ LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วางที่จุด D60

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved



ภาพที่ 5.19 การกระจายของ LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วางที่จุด D05



ภาพที่ 5.20 การกระจายของ LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วางที่จุด D01

เมื่อนำเฟรมที่รับได้มาเขียนกราฟแสดงการกระจายตัวของ LQI ได้ผลตามภาพที่ 5.15 ถึงภาพที่ 5.20 และสรุปค่าทางสถิติได้ตามตารางที่ 5.1

ณ จุด S115 เป็นจุดที่โหนดอยู่ที่ระยะ 115 เมตรและมีต้นไม้อยู่ด้านหลัง ได้เฟรมเพียง 25.4% ค่าเฉลี่ย LQI ของเฟรมที่ได้เท่ากับ 84.15 และมีการกระจายที่กว้างมาก คุณภาพลิงค์โดยรวมถือว่าแย่ เมื่อเปรียบเทียบกับจุด S60 ซึ่งโหนดอยู่ที่ระยะ 60 เมตร คิดเป็นครึ่งหนึ่งของ S115 แต่ว่าที่ตั้งอยู่ภายในศาลามีหลังคา เสา และ ผนัง อยู่ด้านหลังและข้าง ปรากฏว่าได้เฟรมเพียง 32.2% มีการกระจายที่กว้างมาก คุณภาพลิงค์โดยรวมดีกว่า S115 เล็กน้อย แต่ก็อยู่ในขั้นแย่

ณ จุด S20 เป็นจุดที่โหนดอยู่ที่ระยะ 20 เมตรและกองดินอยู่ข้างเส้นตรงที่ลากจากโหนดไปที่โคออร์ดิเนเตอร์ จะพบว่าได้เฟรม 97.8% ค่าเฉลี่ย LQI ของเฟรมที่ได้เท่ากับ 107.90 และมีการกระจายไม่กว้าง, เทียบกับจุด D60 เป็นจุดที่โหนดอยู่ที่ระยะ 60 เมตรไม่มีสิ่งที่อยู่รอบโหนด ได้เฟรม 100% ค่าเฉลี่ย LQI ของเฟรมที่ได้เท่ากับ 108.12 และมีการกระจายไม่กว้าง ทั้งสองจุดนี้มีค่าทางสถิติใกล้เคียงกัน ถือว่าจัดว่าเป็นลิงค์ที่มีคุณภาพดีทั้งคู่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ณ จุด D05 เป็นจุดที่โหนดอยู่ที่ระยะ 5 เมตรไม่มีสิ่งที่อยู่รอบโหนด ได้เฟรม 100% ค่าเฉลี่ย LQI ของเฟรมที่ได้เท่ากับ 115.82 และมีการกระจายที่แคบ เช่นเดียวกับจุด จุด D01 เป็นจุดที่โหนดอยู่ที่ระยะ 1 เมตรไม่มีสิ่งที่อยู่รอบโหนด ได้เฟรม 100% ค่าเฉลี่ย LQI ของเฟรมที่ได้เท่ากับ 116.13 และมีการกระจายที่แคบ ทั้งสองจุดนี้มีค่าทางสถิติใกล้เคียงกัน ถือว่าจัดว่าเป็นลิงค์ที่มีคุณภาพดีทั้งคู่

ตารางที่ 5.1 ค่าสถิติการกระจาย LQI ของเฟรมที่ได้จากโหนดที่วาง ณ จุดต่างๆ

ตำแหน่ง	S115	S60	S20	D60	D05	D01
ค่าเฉลี่ย	84.15	94.20	107.90	108.12	115.82	116.13
จำนวนเฟรมที่ได้รับ	127	161	489	500	500	500
เฟรมที่ได้รับ [%]	25.4%	32.2%	97.8%	100.0%	100.0%	100.0%
ค่าสูงสุด	101	110	118	117	120	120
ค่าต่ำสุด	67	71	76	94	110	110
พิสัย	34	39	42	23	10	10
ค่าเบี่ยงเบน	8.71	9.45	6.36	4.60	2.05	2.09

จากการทดลองจะพบว่าค่า LQI ขึ้นอยู่กับปัจจัยของที่ตั้งและระยะทาง ถ้าโหนดอยู่ในระยะใกล้มีแนวโน้ม LQI ที่ดีกว่าโหนดที่อยู่ระยะไกลที่มีสภาพแวดล้อมเดียวกัน สิ่งที่อยู่ใกล้โหนดหรือเส้นตรงระหว่างโหนดส่งผลกระทบต่อ LQI ถึงแม้ว่ายังไม่สามารถบอกได้ละเอียดว่าปัจจัยต่างๆส่งผลกระทบต่อ LQI อย่างไร แต่เราสามารถใช้ LQI เป็นตัวบอกคุณภาพลิงค์ได้และนำไปสู่การหาค่า LQI ที่เหมาะสมที่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการสร้างเครือข่ายต่อไปได้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็มีค่าน้อยลงเมื่อค่าเฉลี่ยสูงขึ้นด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ความแปรปรวนของลิงค์ที่มีคุณภาพดีจะต่ำกว่าความแปรปรวนของลิงค์ที่มีคุณภาพแย่

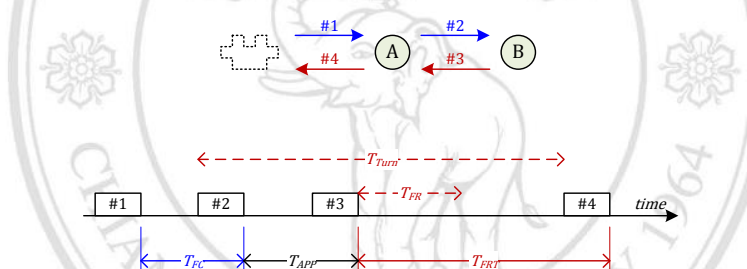
สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อ ค่าเฉลี่ย LQI สูงอัตราการได้รับเฟรมก็สูงตามไปด้วย เมื่อนำค่าทั้งสองจากตารางที่ 5.1 และเลือกระดับการสื่อสารสำเร็จที่ 80% แล้วจะได้ค่า $LQI = 104$ เป็นค่าอินเดกซ์คุณภาพลิงค์ขีดเริ่ม (L_{TH} : Threshold LQI) โดยประมาณ

5.3 การทดสอบด้านความเร็ว

การสื่อสารไร้สาย ระยะเวลาการทำงานก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่จะบ่งชี้ว่าสามารถใช้ในแอปพลิเคชันเป้าหมายได้หรือไม่ เนื้อหาในหัวนี้แสดงการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ทางด้านเวลา

5.3.1 การส่งต่อเฟรม

การทดสอบเวลาในการส่งต่อเฟรมของโหนด สภาพการทดสอบแสดงในภาพที่ 5.21 โคออร์ดิเนเตอร์ส่งเฟรมที่มีเป้าหมายเป็นโหนด B โดยผ่านโหนด A, เฟรมที่ส่งสำหรับใช้งานในชั้นแอปพลิเคชัน ซึ่งชั้นแอปพลิเคชันของโหนด B ถูกโปรแกรมให้คัดลอกข้อมูลที่ได้ส่งกลับให้โคออร์ดิเนเตอร์, จากสภาพการทดสอบนี้จะเกิดเฟรมขึ้นทั้งหมด 4 เฟรมตามลำดับหมายเลขกำกับโหนด A จะทำหน้าที่ส่งต่อเฟรม #1 ให้เป็นเฟรม #2 (จากโคออร์ดิเนเตอร์ไปสู่เป้าหมาย) และ ส่งต่อเฟรม #3 ให้เป็นเฟรม #4 (จากโหนด B สู่โคออร์ดิเนเตอร์)



ภาพที่ 5.21 (บน) สภาพการทดสอบ (ล่าง) ช่วงเวลาการส่งเฟรมต่อ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบช่วงเวลาการส่งเฟรมต่อ

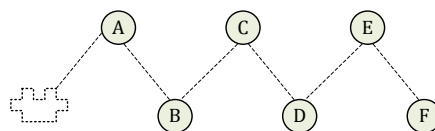
	Mean [ms]	Min [ms]	Max [ms]	SD [ms]
T_{EC} (NSDU Length = 3)	3.47	2.30	4.58	0.77
T_{EC} (NSDU Length = 13)	4.17	3.10	5.33	0.62
T_{EC} (NSDU Length = 23)	4.98	3.86	6.10	0.69
T_{EC} (NSDU Length = 33)	5.77	4.62	6.85	0.67
T_{APP} (NSDU Length = 3)	3.83	2.70	4.94	0.66
T_{APP} (NSDU Length = 13)	4.97	3.81	6.03	0.62
T_{APP} (NSDU Length = 23)	5.96	4.83	7.10	0.74
T_{APP} (NSDU Length = 33)	7.02	5.92	8.14	0.62
T_{ERT} (NSDU Length = 3)	89.09	81.90	97.22	4.56
T_{ERT} (NSDU Length = 13)	88.87	81.25	96.46	4.27
T_{ERT} (NSDU Length = 23)	88.86	81.28	96.43	4.30
T_{ERT} (NSDU Length = 33)	88.39	80.99	95.84	4.23

การทดสอบนี้จะใช้ตัวจับเฟรมที่พัฒนาขึ้น [18] มาจับเฟรมแล้วบันทึกข้อมูลลงไฟล์แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อ แต่เวลาที่ประทับได้เป็นเวลาที่เฟรมนั้นเสร็จสิ้นลง ระยะห่างของเวลาประทับจึงนับรวมเวลาที่เฟรมอยู่ในอากาศเข้ากับเวลาที่โหนดใช้ประมวลผลเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าเฟรมมีความยาว 64 ไบต์ จะใช้เวลาส่งในอากาศ 2.048 ms เป็นต้น ถ้าต้องการคำนวณเฉพาะเวลาของการประมวลผลของโหนดก็สามารถหักเวลาเฟรมออกไปได้ แต่การทดลองครั้งนี้จะรวมเวลาของเฟรมในอากาศไปด้วยเพื่อดูภาพรวมการทำงานของชั้นโปรโตคอล, พิจารณาผังเวลาภาพที่ 5.21 T_{FC} คือเวลาที่โหนด A ใช้ส่งต่อเฟรมจากโคออร์ดิเนเตอร์สู่โหนด, T_{APP} คือเวลาที่โหนด B ใช้ในการตอบสนองต่อเฟรมที่ได้รับแล้วส่งเฟรมตอบกลับออกมา, T_{FR} คือเวลาที่ควรจะเป็นสำหรับโหนด A ใช้ส่งต่อเฟรมจากโหนดสู่โคออร์ดิเนเตอร์ แต่ทว่าโหนด A เพิ่งใช้ตัวส่งวิทยุส่งเฟรม #2 ออกไป ตัวส่งวิทยุต้องการเวลา T_{Turn} จึงจะสามารถส่งเฟรมครั้งต่อไปได้ ดังนั้นเวลาที่โหนด A ใช้ส่งต่อเฟรมขึ้นให้โคออร์ดิเนเตอร์จึงกลายเป็น T_{FRT} ซึ่งรวมเวลารอตัวส่งวิทยุเข้าไปด้วย ในแพลตฟอร์มนี้ตั้งไว้ที่ 81-98 ms โดยประมาณ

จากตารางที่ 5.2 จะพบว่าค่า T_{FC} มีค่ามากขึ้นตามความยาวเฟรมที่เพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ย 0.767 ms ต่อ 10 ไบต์ ทั้งที่เวลาออกอากาศของ 10 ไบต์เท่ากับ 0.320 ms จึงแสดงให้เห็นว่าเฟรมที่ยาวขึ้นโหนด A จะใช้เวลาในการส่งต่อมากขึ้น, ส่วนค่า T_{APP} จะเป็นไปทำนองเดียวกัน มีค่ามากขึ้นตามความยาวเฟรมที่เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 1.066 ms ต่อ 10 ไบต์ เมื่อเทียบ T_{FC} ที่ไม่มีการส่งข้อมูลขึ้นชั้นแอปพลิเคชัน เพียงแค่ประมวลผลในชั้นเครือข่ายแล้วส่งต่อ กับเวลา T_{APP} ซึ่งชั้นโปรโตคอลจะต้องส่งข้อมูลขึ้นชั้นแอปพลิเคชันก่อนที่จะกลับลงมาจะใช้เวลามากกว่าโดยเฉลี่ย 0.298 ms, ในขณะที่ T_{RFT} มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงของ T_{Turn} และไม่ขึ้นกับความยาวเฟรม นั้นแสดงว่า T_{Turn} ตัวรับส่งวิทยุ กลายเป็นปัจจัยที่มีนัยสูงกว่าเวลาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ประมวลผล

5.3.2 การทวงถามข้อมูล

การทดสอบการทวงถามข้อมูล ได้จัดโทโพโลยีตามภาพที่ 5.22 เพื่อให้โหนดมีระดับสูงสุดเท่ากับ 6 จากนั้นทดลองให้โคออร์ดิเนเตอร์ทวงถามข้อมูลจากโหนดต่างๆ โหนดละ 100 ครั้ง จับเวลาตั้งแต่เริ่มส่งเฟรมทวงถามออกไปจากโคออร์ดิเนเตอร์ จน โคออร์ดิเนเตอร์ได้รับเฟรมกลับมา



ภาพที่ 5.22 โทโพโลยีสำหรับการทดสอบการทวงถามข้อมูล

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบช่วงเวลาการทวงถามข้อมูลจากโหนดระดับต่างๆ

ระดับของโหนด / ชื่อโหนด	Mean [ms]	Min [ms]	Max [ms]	SD [ms]
1 / โหนด A	3.61	2.43	4.70	0.72
2 / โหนด B	96.64	88.26	105.23	4.69
3 / โหนด C	104.29	96.32	111.94	4.47
4 / โหนด D	112.02	104.22	122.42	4.39
5 / โหนด E	118.87	112.72	125.82	3.34
6 / โหนด F	125.24	116.93	133.34	4.59

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการทวงถามข้อมูลจากโหนดในระดับที่ 1 มีค่าน้อยกว่าระดับอื่นๆ อย่างมีนัย ทั้งนี้เพราะเกิดเฟรมขึ้นเพียง 2 เฟรม คือจากโคออร์ดิเนเตอร์ไปหาโหนด A และจากโหนด A กลับไปหาโคออร์ดิเนเตอร์ เวลาที่เกิดขึ้นจะไม่ได้รับผลจาก T_{Trun} ในขณะที่การทวงถามจากโหนดในระดับ 2 ขึ้นไปจะมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 7.15 ms ต่อหนึ่งระดับ สังเกตเมื่อนำ $96.64 - 7.15$ ms จะได้ 89.49 ms ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของ T_{RFT} จากการทดลองก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่าการทวงถามข้อมูลจะได้รับผลกระทบจาก T_{Trun} ของโหนดก่อนโหนดเป้าหมายเท่านั้น

5.4 การทดสอบความแม่นยำของโหนดวัดพลังงานไฟฟ้า

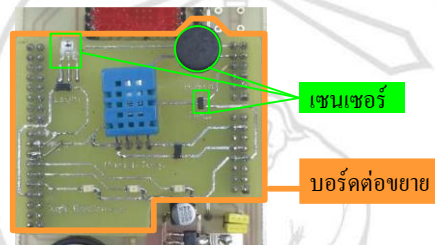
เพื่อทดสอบการทำงานของโหนดวัดกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เราจึงนำไปวัดกำลังงานไฟฟ้าของโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านทั่วไป และวัดเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากมิเตอร์มาตรฐาน ได้ผลออกมาตามตารางที่ 5.4 จากการทดลองจะเห็นว่ามิเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้า 50-4,000 W ได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% ซึ่งต่ำกว่า 5% ตามมาตรฐานความแม่นยำของเครื่องมือวัด Class 5.0

ตารางที่ 5.4 ค่าที่วัดได้จากโหนดกับมิเตอร์มาตรฐาน

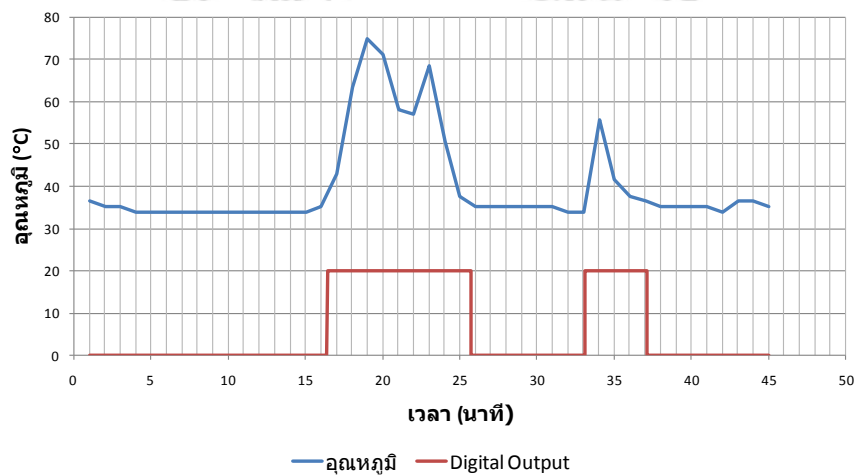
เครื่องใช้ไฟฟ้า	มิเตอร์โครงการ [W]	มิเตอร์มาตรฐาน [W]	คลาดเคลื่อน [%]
หลอดไฟ 60 W	58	59	- 1.69
หลอดไฟ 100 W	97	98	-1.02
เครื่องเป่าผม 1,000 W	950	964	-1.45
เตารีด 1,000 W	995	1,015	-1.97
เตารีดและเครื่องเป่าผม 2,000	1,959	1,991	-1.60

5.5 การทดสอบโหนดที่โปรแกรมได้

เพื่อทดสอบโหนดที่โปรแกรมได้ เราจึงสร้างบอร์ดต่อขยายที่มีเซนเซอร์สำหรับวัด อุณหภูมิ ความชื้น และ ความเข้มแสง รวมทั้ง LED เพื่อใช้เลียนแบบการควบคุมตัวทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 5.23 โหนดถูกโปรแกรมให้ทดสอบ การใช้ AI, DI, และ DO ปรากฏว่าทุกบอร์ดทำงานได้ถูกต้องตาม ฟังก์ชัน สามารถวัดปริมาณต่างๆ และควบคุม LED ได้ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในสคริปต์ XML, กราฟในภาพที่ 5.24 เป็นตัวอย่างข้อมูลจากโหนด ซึ่งถูกโปรแกรมให้ DO ที่ต่อกับ LED ถูกควบคุม ด้วย AI ที่ต่อกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ UTL เทียบเท่า 38.9°C และ LTL ที่ 36.3°C ช่วงที่อุณหภูมิสูง เกิดจากการนำหัวแร้งไปแตะที่เซนเซอร์เพื่อทดลอง



ภาพที่ 5.23 บอร์ดต่อขยายเซนเซอร์และ LED ที่ต่อเชื่อมกับโหนด



ภาพที่ 5.24 ตัวอย่างกราฟของข้อมูลที่ได้จากโหนดใน ภาพที่ 5.23