การพัฒนาระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายชื่อข้อมูลและเทคโนโลยีไอโอที

Development of an Electrical Load Monitoring System using Named Data Networking and IoT Technology

ศศิรมย์ พานทอง*, เอกอรรณพ ภูพันนา และ วิทวัส วิเศษฤทธิ์

Sasirom Pantong*, Aekoannop Phuphanna and Wittawus Visedrit

สังกัดภาควิชาวิศกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

*Email: sasirom.pa@buu.ac.th

Received: September 05, 2024; Revised: November 14, 2024; Accepted: November 15, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายชื่อข้อมูลร่วมกับเทคโนโลยีไอโอที โดยระบบประกอบด้วยบอร์ดต้นทางที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ จากนั้นส่งข้อมูลไปยังบอร์ดปลายทางเพื่อจัดเก็บข้อมูลลงใน Google Sheets ทำให้สามารถเรียกดูข้อมูลย้อนหลังได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ระบบยังมีการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE Notify เพื่อเตือนผู้ใช้เมื่อค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าหรืออุณหภูมิในระบบมีความผิดปกติ การทดลองดำเนินการในห้องปฏิบัติการ EE209 ของมหาวิทยาลัยบูรพา โดยติดตั้งระบบในตู้โหลดเซ็นเตอร์ระหว่างวันที่ 29 มีนาคม ถึง 1 เมษายน 2567 ผลการทดสอบพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าไม่เกิน 5% และการจัดเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาทีทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ครบถ้วนและถูกต้องผ่านโครงข่ายชื่อข้อมูล ซึ่งคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในสถาปัตยกรรมการสื่อสารในอนาคต

คำสำคัญ : โครงข่ายชื่อข้อมูล, ผลโหลดทางไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This paper presents the development of an electrical load monitoring system utilizing Named Data Networking (NDN) in conjunction with Internet of Things (IoT) technology. The system comprises a source board that measures electrical parameters such as voltage, current, and temperature, and then transmits this data to a destination board for storage in Google Sheets. This setup enables convenient and efficient access to historical data. Additionally, the system includes a notification mechanism via the LINE Notify application to alert users when there are abnormalities in electrical parameters or temperature within the system. The experiment was conducted in the EE209 laboratory at Burapha University, where the system was installed in a load center cabinet from March 29 to April 1, 2024. The results indicate that the measurement error for electrical parameters did not exceed 5%. Data collected every five minutes was successfully and accurately transmitted through the NDN network, highlighting the potential role of NDN in future communication architectures.

Keywords : Name data networking, Electrical Load Monitoring, Internet of things

1. บทนำ

การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ในทุกๆด้าน ทำให้โลกมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ทั้งภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน อย่างไรก็ตามกำลังการผลิตไฟฟ้าในอนาคตอาจจะไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างเพียงพอ ปัจจุบันจึงเกิดแนวคิดเกี่ยวกับการจัดการพลังงานไฟฟ้า และการรณรงค์การใช้พลังงานทดแทน ซึ่งการจัดการพลังงานไฟฟ้าจะสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ต่อเมื่อทราบถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าก่อน คณะผู้วิจัยจึงได้แนวคิดพัฒนาระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที ซึ่งต้องมีข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและสามารถจัดเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละเดือนไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งสามารถตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ย้อนหลังได้หากเกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้น โดยระบบจะทำงานร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ เชื่อมโยงกันได้โดยการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) หรือเทคโนโลยีไอโอที เพื่อควบคุมการรับ-ส่งข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมา โครงข่ายอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในปัจจุบันจะใช้การติดต่อสื่อสารแบบ TCP/IP ซึ่งยังมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีมาก เนื่องจากมีเวลาประวิงที่เกิดจากปัญหาคอขวดของศูนย์กลางการควบคุม และเมื่อพิจารณาในมุมมองของผู้ใช้งานที่มุ่งเน้นไปที่เนื้อหาของข้อมูลที่ต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องสนใจว่าข้อมูลที่ต้องการมาจากที่ใด หรือที่อยู่ไอพีของแหล่งข้อมูลใด รวมถึงการร้องขอข้อมูลโดยไม่ต้องระบุที่อยู่ไอพีปลายทาง กล่าวคือ ถ้าอุปกรณ์ใดที่มีชื่อข้อมูลที่ผู้ร้องขอต้องการ อุปกรณ์นั้นสามารถส่งต่อข้อมูลกลับไปยังผู้ร้องขอได้ทันที จากปัญหาดังกล่าว ทำให้สถาปัตยกรรมชื่อข้อมูล หรือ โครงข่ายชื่อข้อมูล (Named data networking :NDN) [1, 2] ได้รับการเสนอขึ้นใหม่สำหรับอินเทอร์เน็ตในอนาคต (future internet) ซึ่งมุ่งเน้นการให้บริการข้อมูล ตามที่ผู้ร้องขอต้องการ เริ่มแรกงานวิจัยเกี่ยวกับโครงข่ายชื่อข้อมูลจะให้ความสนใจกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบโครงสร้างข้อมูล และกลไกเส้นทางในโครงข่ายของอินเทอร์เน็ต (Internet network) โดยใช้กับโครงสร้างระบบที่ไม่มีการเคลื่อนที่ [3]

งานวิจัยที่ [4] ได้นำเสนอการพัฒนาโครงข่ายชื่อข้อมูลร่วมกับเทคโนโลยีไอโอทีในทางปฏิบัติ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลโดยเน้นไปที่การสื่อสารโดยอิงตามชื่อข้อมูล ทำให้การรับส่งข้อมูลทำได้รวดเร็วและปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งสามารถนำแนวคิดนี้มาใช้งานกับระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายชื่อร่วมกับเทคโนโลยีไอโอที เพื่อให้ผู้ใช้สามารถติดตามปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและสะดวกมากขึ้น โดยสามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้ผ่าน Google Sheets นอกจากนี้ยังมีการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify เมื่อเกิดความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าหรืออุณหภูมิภายในภายในตู้โหลดเซ็นเตอร์ ซึ่งเป็นตู้สำหรับควบคุมและตรวจสอบโหลดไฟฟ้าของระบบ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้ จะเห็นว่าระบบการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจะใช้เซนเซอร์วัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่เหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	บอร์ด	เซ็นเซอร์
อินเตอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่งของการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและบันทึกข้อมูลการใช้พลังงาน [5]	Node MCU Devkit ESP8266	PZEM 004T
ระบบติดตามประมวลผลการทำงานของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลัก [6]	Node MCU Devkit ESP8266	PZEM 004T, DHT22
ระบบตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านเครือข่าย IPv6 แบบไร้สาย [7]	SensorTag 2650stk	PZEM 004T
ระบบบันทึกข้อมูลความปลอดภัยทางไฟฟ้าของห้องปฏิบัติการเคมี [8]	Node MCU ESP32S	PZEM 004T, DHT22

งานวิจัยจึงเลือกใช้อุปกรณ์และเซ็นเซอร์ดังกล่าวเพื่อสร้างระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยพิจารณา ดังนี้

2.1 ความแม่นยำในการวัดพารามิเตอร์ไฟฟ้า

อุปกรณ์และเซ็นเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น เซ็นเซอร์วัดแรงดัน กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ได้รับการพัฒนาให้มีความแม่นยำสูงและสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้อย่างละเอียด จึงทำให้เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการติดตามและตรวจสอบข้อมูลพลังงานไฟฟ้าในระบบเรียลไทม์ได้

2.2 การเชื่อมต่อที่รองรับเทคโนโลยีไอโอที

อุปกรณ์ควบคุมและเซ็นเซอร์ในงานวิจัยส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบให้รองรับการเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตหรือโครงข่ายไอโอที ทำให้สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง เหมาะสำหรับการนำข้อมูลไปประมวลผลและแสดงผลผ่านแพลตฟอร์มต่าง ๆ เช่น ระบบคลาวด์หรือแอปพลิเคชัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สอดคล้องกับการใช้งานในโครงข่ายชื่อข้อมูลของงานวิจัยนี้

2.3 ความยืดหยุ่นในการปรับใช้งาน

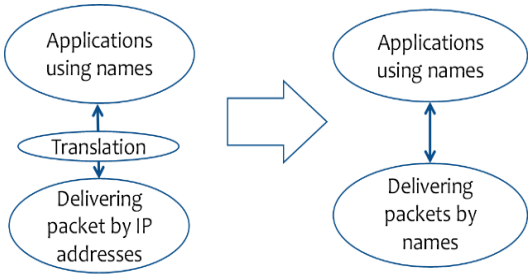
เซ็นเซอร์เหล่านี้มักถูกออกแบบให้สามารถติดตั้งและปรับเปลี่ยนการใช้งานได้ตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ตู้โหลดเซ็นเตอร์หรือสถานที่ที่มีการควบคุมการใช้พลังงาน ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีความยืดหยุ่นในการติดตั้งและการปรับขนาดของระบบตามความต้องการ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงข่ายชื่อข้อมูลและเทคโนโลยีไอโอทีมาใช้เพื่อแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าผ่านบอร์ด Raspberry Pi ที่ติดตั้งโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิมเพื่อทดสอบการสื่อสารแบบโครงข่ายชื่อข้อมูลจำนวน 2 บอร์ด โดยมีบอร์ดต้นทางที่ต่อกับเซนเซอร์ PZCT-02 , PZEM 004T และ DHT22 และส่งข้อมูลไปยังบอร์ดปลายทางเพื่อเก็บข้อมูลและแจ้งเตือนเมื่อพบความผิดปกติ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ภาพรวมของโครงข่ายชื่อข้อมูล

สถาปัตยกรรมชื่อข้อมูล หรือ โครงข่ายชื่อข้อมูล (named data network : NDN) เป็นสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตในอนาคตที่นำมาแก้ปัญหาของสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตแบบ TCP/IP ซึ่งโครงข่ายชื่อข้อมูลมีรากฐานมาจากโครงการก่อนหน้านี้ที่มีชื่อว่า โครงข่ายเนื้อหา (content-centric networking : CCN) โดย Van Jacobson ได้นำเสนอในเดือนพฤศจิกายน 2553 และได้รับทุนจากมูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Science Foundation - NSF) ภายใต้ชื่อโครงการ Future Internet Architecture (FIA) ที่เกิดจากแนวความคิดสถาปัตยกรรม TCP/IP ที่เน้นการเข้าถึงข้อมูลจากที่อยู่ไอพี มาเป็นการเข้าถึงข้อมูลด้วยชื่อของข้อมูล อีกทั้งโครงข่ายการสื่อสารควรเน้นให้ผู้ใช้งานเข้าถึงข้อมูลด้วยชื่อของข้อมูลแทนที่การอ้างอิงตำแหน่งทางกายภาพ หรือที่อยู่ไอพีของข้อมูล การเปรียบเทียบขั้นตอนการสื่อสารดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) การติดต่อสื่อสารระหว่างโครงข่ายแบบดั้งเดิม(TCP/IP)

(ข) แบบโครงข่ายชื่อข้อมูล (NDN)

รูปที่ 1 การติดต่อสื่อสารระหว่างโครงข่ายแบบดั้งเดิม (TCP/IP) และ แบบโครงข่ายชื่อข้อมูล (NDN)

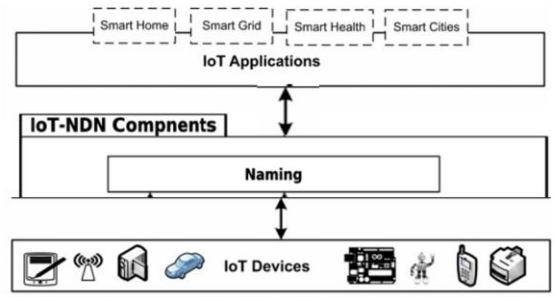
3.2 สถาปัตยกรรมของระบบ IoT-NDN

สถาปัตยกรรมของ IoT-NDN [9-10] สามารถแบ่งได้หลัก ๆ ทั้งหมด 3 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีองค์ประกอบต่อไปนี้

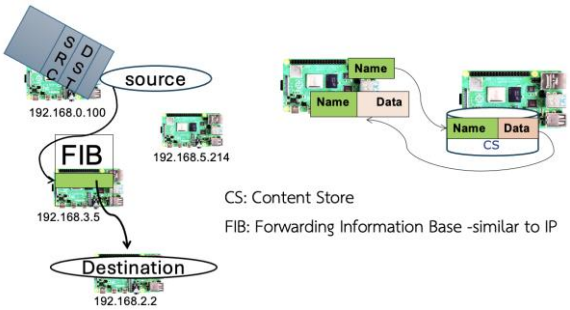
องค์ประกอบที่ 1 คือ การประยุกต์ใช้งานของ ไอโอที สามารถใช้งานได้ใน Smart Home, Smart Grid, Smart Health, Smart Cities เป็นต้น

องค์ประกอบที่ 2 คือ การสื่อสารด้วยโครงข่ายชื่อข้อมูลของอุปกรณ์

องค์ประกอบที่ 3 คือ อุปกรณ์ ไอโอที ได้แก่ กล้องวงจรปิด คอมพิวเตอร์ แท็บเลต โทรศัพท์เคลื่อนที่ ยานพาหนะ หรืออุปกรณ์ ต่าง ๆ ที่มีการติดตั้งการสื่อสารได้



รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมของระบบ IoT-NDN



(ก) การติดต่อสื่อสารระหว่างโครงข่ายแบบดั้งเดิม(TCP/IP)

(ข) แบบโครงข่ายชื่อข้อมูล (NDN)

รูปที่ 3 ขั้นตอนการติดต่อสื่อสารระหว่างโครงข่ายแบบ TCP/IP และ NDN

จากรูปที่ 3 แสดงการทำงานได้ 2 รูปแบบ โดยรูปแบบแรกคือการติดต่อสื่อสารระหว่างโครงข่ายแบบดั้งเดิมหรือแบบ TCP/IP ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

เมื่อโนดต้นทางต้องการติดต่อสื่อสารกับโนดปลายทางจะส่งแพ็กเกตการร้องขอออกไป โดยระบุไอพีของโนดปลายทางที่ส่วนหัวของแพ็กเกต

เมื่อโนดเพื่อนบ้านได้รับแพ็กเกตการร้องขอแล้ว จะค้นหาที่อยู่ไอพีของโนดปลายทาง ในตาราง FIB หลังจากตรวจสอบที่อยู่ไอพีที่ส่วนหัวของแพ็กเกตแล้ว จะส่งต่อแพ็กเกตนั้นไปยังโนดปลายทาง

สำหรับรูปแบบที่สอง คือแบบโครงข่ายชื่อข้อมูล จะมีแพ็กเกตสองชนิด คือ แพ็กเกตการร้องขอ (Interest packet) และ แพ็กเกตข้อมูล (Data packet) เมื่อผู้ ร้องขอมีความต้องการข้อมูลใด ๆ ผู้ร้องขอจะส่งแพ็กเกตการร้องขอออกไป หลังจากนั้น โนดใด ๆ ที่ได้รับแพ็กเกตการร้องขอจะเข้าสู่กระบวนการทำงานแบบโครงข่ายชื่อข้อมูล หากพบว่ามีข้อมูลที่ตรงกับความสนใจก็จะตอบกลับแพ็กเกตข้อมูลไปยังผู้ร้องขอที่ส่งแพ็กเกตการร้องขอมา

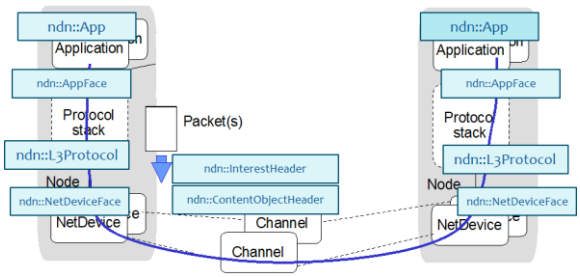
3.2 โปรแกรมจำลองโครงข่ายเอ็นดีเอ็นซิม (ndnSim)

โปรแกรมจำลองโครงข่านเอ็นดีเอ็นซิม (ndnSim) [11] เป็นโมดูลส่วนเสริมของโปรแกรม NS-3 ที่มีการใช้สถาปัตยกรรมการสื่อสารระบบแบบโครงข่ายชื่อข้อมูล ทำให้โปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิม สามารถใช้งานร่วมกันกับรูปแบบโพรโทคอลชั้นเชื่อมโยง (point-to-point CSMA wireless) ชั้นโครงข่าย (IPv4/IPv6) และชั้นขนส่ง (TCP/UDP) ในโปรแกรม NS-3 อย่างไรก็ตามการจำลองจะดำเนินการในรูปแบบโมดูล (module) โดยใช้คลาส C++ แยกต่างหากเพื่อจำลองพฤติกรรมของแต่ละเอนทิตีของโครงข่ายชื่อข้อมูล (PIT FIB CS) และส่วนต่อประสานสำหรับโครงข่าย เป็นต้น โครงสร้างแบบแยกส่วนนี้ช่วยให้เอนทิตีใด ๆ สามารถปรับเปลี่ยนหรือเปลี่ยนได้โดยง่ายโดยไม่มีผลกระทบใด ๆ นอกจากนี้ชุดคำสั่งโปรแกรมต่าง ๆ ยังมีชุดของส่วนต่อประสาน

จากส่วนประกอบที่เพิ่มเข้าสามารถแสดงเพิ่มเติมจากรูปที่ 4 แสดงรูปแบบจำลองโครงสร้างของโปรแกรมเอ็นเอส-3 โดยโมดูลที่เพิ่ม อีกทั้งสามารถใช้โปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิมบนบอร์ด Raspberry Pi [12]

องค์ประกอบที่แสดงเพิ่มเติมของโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิม ได้แก่

- ndn::L3Protocol: เป็นองค์ประกอบหลักของโปรแกรม สำหรับโพรโทคอลของแพ็กเกตการร้องขอและแพ็กเกตข้อมูล จากเลเยอร์บนสู่เลเยอร์ล่างผ่าน ndn::Face
- ndn::Face: เป็นส่วนต่อประสาน เพื่อใช้การสื่อสารระหว่างโปรแกรมประยุกต์และส่วนประกอบอื่น ๆ
- ndn::ContentStore: เป็นที่จัดเก็บข้อมูล
- ndn::Pit: เป็นตารางสำหรับจัดเก็บแพ็กเกตการร้องขอที่รอการตอบกลับ
- ndn::Fib: เป็นตารางสำหรับจัดเก็บส่วนต่อประสานขาออกของการส่งต่อแพ็กเกตการร้องขอ
- ndn::ForwardingStrategy: เป็นขั้นตอนของการส่งต่อข้อมูลในโครงข่ายชื่อข้อมูล



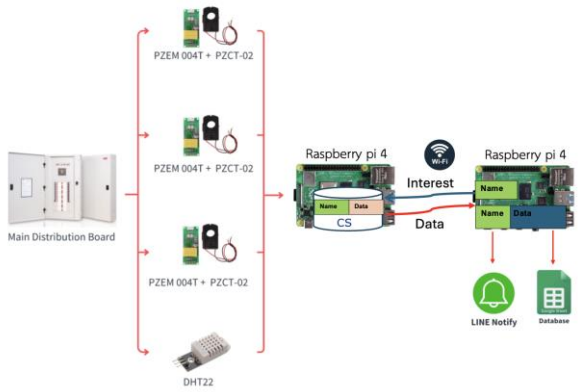
รูปที่ 4 รูปแบบจำลองของโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิม โดยเพิ่มเติมจากโปรแกรมเอ็นเอส-3

3.3 โปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิมบนบอร์ด Raspberry Pi [12]

การติดตั้งโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิมบนบอร์ด Raspberry Pi ช่วยให้สามารถจำลองการทำงานของแบบโครงข่ายชื่อข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริงที่มีทรัพยากรจำกัด เนื่องจากบอร์ด Raspberry Pi เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีราคาย่อมเยาและสามารถเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ได้ ทำให้เหมาะสำหรับการทดลองระบบเทคโนโลยีไอโอทีและการสื่อสารผ่านโครงข่ายชื่อข้อมูลซึ่งต้องการการประมวลผลข้อมูลแบบจำกัด และการส่งข้อมูลในพื้นที่จำกัด ด้วยการใช้งานโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิมบน Raspberry Pi งานวิจัยนี้สามารถทดสอบการส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดต้นทางและปลายทางและจำลองการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง โดยการตั้งค่าให้บอร์ด Raspberry Pi ทำหน้าที่เป็นจุดรับส่งข้อมูล (node) ในโครงข่ายชื่อข้อมูลได้ หลังจากติดตั้งโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิมบนบอร์ด Raspberry Pi สมบูรณ์แล้ว สามารถเขียนโปรแกรมจำลองการสื่อสารโครงข่ายชื่อข้อมูล ได้โดยใช้ภาษา C++ และ ภาษา Python จากตัวอย่างโค้ดจำลองสามารถทำการสร้างโนดและกำหนดการส่งข้อมูลผ่านชื่อที่ตั้งไว้ เช่น ข้อมูลเซ็นเซอร์หรือข้อมูลการใช้พลังงานได้

4. หลักการแนวคิดและการออกแบบ

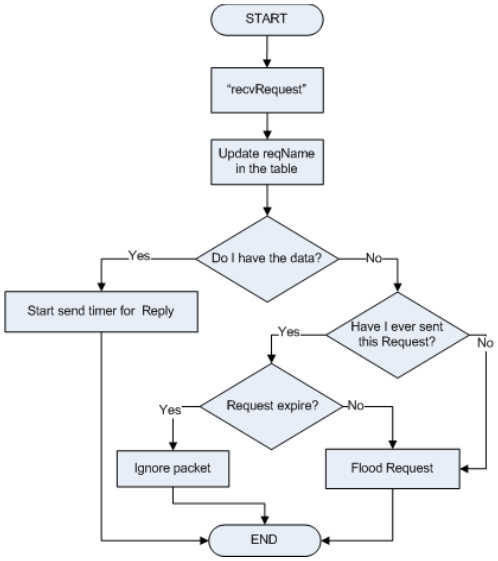
งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโครงข่ายชื่อข้อมูลและเทคโนโลยีไอโอทีมาใช้ในการทำงานของระบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยนำค่าที่วัดจาก PZCT-02 PZEM 004T และ DHT22 ส่งข้อมูลไปยังบอร์ด Raspberry Pi ที่ลงโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิม หลังจากนั้นจะติดต่อสื่อสารบอร์ด Raspberry Pi ที่ลงโปรแกรมเอ็นดีเอ็นซิม จะทำหน้าที่รับข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าของเซนซอร์ของบอร์ดต้นทาง มาเก็บข้อมูลไว้ Google Sheets และมีระบบแจ้งเตือนบนแอปพลิเคชันไลน์เมื่อแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในตู้โหลดเซ็นเตอร์ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5



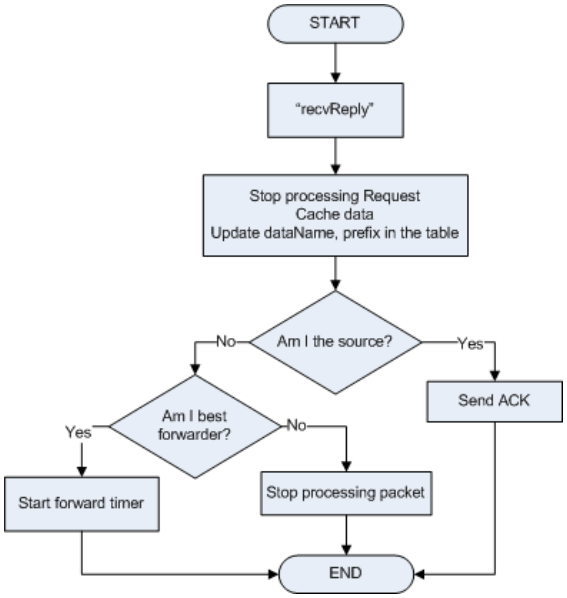
รูปที่ 5 ภาพรวมระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายชื่อข้อมูล

สำหรับอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (VAC) และ กระแสไฟฟ้า (IAC) จากนั้น ตัว ชิปวงจรรวม V9881D ที่อยู่ภายในตัวโมดูล จะทำการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริง (Active power) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy) และความถี่ไฟฟ้า (Frequency) เพื่อมาใช้ในการคำนวณต่อไป

4.1 หลักการติดต่อสื่อสารของโครงข่ายชื่อข้อมูล



รูปที่ 6 ผังงานของบอร์ดต้นทาง



รูปที่ 7 ผังงานของบอร์ดปลายทาง

สำหรับรูปแบบการทำงานของโครงข่ายชื่อข้อมูล มีขั้นตอนการทำงานระหว่างบอร์ด Raspberry Pi ที่เป็นบอร์ดต้นทางและบอร์ดปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ดังนี้

• ขั้นตอนที่ 1 เมื่อบอร์ดต้นทางส่งแพ็กเกตการร้องขอแพร่กระจาย (Broadcast) ออกไป โดยระบุชื่อข้อมูลที่ต้องการในส่วนหัวของแพ็กเกต เมื่อบอร์ดปลายทางได้รับแพ็กเกตการร้องขอ บอร์ดปลายทางจะตรวจสอบแพ็กเกตการร้องขอที่มีชื่อข้อมูล ในส่วนของ Content store หรือ CS ก่อน หากพบว่ามีแพ็กเกตข้อมูลตรงตามแพ็กเกตการร้องขอ บอร์ดปลายทางจะส่งกลับแพ็กเกตข้อมูลไปยังผู้ร้องขอ แต่หากไม่พบแพ็กเกตข้อมูลใน CS บอร์ดปลายทางจะตรวจสอบตาราง Pending interest table หรือ PIT หากพบว่ามีชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอแล้ว แพ็กเกตการร้องขอนี้จะถูกยกเลิกเพราะได้มีการส่งแพ็กเกตการร้องขอออกไปแล้ว แต่หากพบว่าชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอไม่มีในตาราง PIT บอร์ดปลายทางจะตรวจสอบตาราง FIB ต่อไป

• ขั้นตอนที่ 2 เมื่อบอร์ดปลายทางตรวจสอบชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอในตาราง Forwarding information base หรือ FIB แล้วพบว่ามีชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอในตารางแพ็กเกตการร้องขอจะถูกส่งออกไปบนส่วนต่อประสานขาออกที่ระบุไว้ แต่หากชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอไม่ตรงกับข้อมูลในตาราง แพ็กเกตการร้องขอจะถูกแพร่กระจาย (Broadcast) ออกไปก่อนที่จะส่งต่อแพ็กเกตการร้องขอออกไปทั้งในกรณีที่มีหรือไม่มีในตาราง FIB ชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอจะถูกเพิ่มเข้าไปในตาราง PIT เพื่อรอการตอบกลับแพ็กเกตข้อมูล

• ขั้นตอนที่ 3 บอร์ดปลายทางจะตรวจสอบชื่อข้อมูลของแพ็กเกตการร้องขอใน CS ก่อน หากพบว่ามีชื่อข้อมูลที่ตรงกับแพ็กเกตการร้องขอก็จะตอบกลับแพ็กเกตข้อมูลไปยังผู้ร้องขอที่ส่งแพ็กเกตการร้องขอมา

• ขั้นตอนที่ 4 สำหรับเส้นทางที่มีการส่งกลับแพ็กเกตข้อมูล บอร์ดปลายทางจะเก็บข้อมูลหรือสำเนาข้อมูลไว้ก่อนที่จะส่งแพ็กเกตข้อมูลกลับไปยังผู้ร้องขอ หลังจากที่ตอบกลับแพ็กเกตข้อมูลไปยังผู้ร้องขอแล้ว โนดนั้น ๆ จะลบแพ็กเกตการร้องขอนี้ออกจากตาราง PIT

4.2 การตั้งค่าและการทำงานของ Google Sheets

4.2.1 การตั้งค่า Google Sheets สำหรับการจัดเก็บข้อมูล

1. สร้าง Google Sheets ใหม่: เริ่มต้นด้วยการสร้างสเปรดชีตใหม่ในบัญชี Google จากนั้นตั้งค่าชื่อไฟล์และหัวตาราง เช่น วันที่ เวลา แรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (A) กำลังไฟฟ้า (W) อุณหภูมิ (°C) เป็นต้น

2. Google Sheets API: เพื่อให้ Raspberry Pi สามารถบันทึกข้อมูลลงใน Google Sheets ได้โดยอัตโนมัติ ต้องเปิดใช้งาน Google Sheets API และ Google Drive API บน Google Cloud Console จากนั้นสร้าง Credentials (รหัสประจำตัว) ประเภท "Service Account" เพื่อให้สามารถเข้าถึงและอัปเดต Google Sheets ได้

3. การตั้งค่า Script การเชื่อมต่อ: ใช้ไลบรารี gspread (Python) สำหรับเชื่อมต่อ Google Sheets กับ Raspberry Pi โดยกำหนดให้ Python Script ที่รันบน Raspberry Pi รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ แล้วบันทึกลงใน Google Sheets ผ่าน API ตามช่วงเวลาที่กำหนด (เช่น ทุก 5 นาที)

4.2.2 การทำงานของ Google Sheets

เมื่อมีข้อมูลการวัดโหลดใหม่ ระบบจะส่งข้อมูลจากบอร์ดต้นทางไปยังบอร์ดปลายทางเพื่อบันทึกค่าใน Google Sheets ข้อมูลนี้จะถูกบันทึกและสามารถเข้าถึงได้ทันทีในลักษณะของสเปรดชีตซึ่งมีประโยชน์สำหรับการติดตามและวิเคราะห์ย้อนหลังได้ ผู้ใช้สามารถใช้ฟังก์ชันภายใน Google Sheets เช่น กราฟ ตารางสรุป และสูตรคำนวณต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลได้โดยไม่ต้องพึ่งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม นอกจากนี้ การที่ข้อมูลถูกจัดเก็บใน Google Sheets ช่วยให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้จากทุกที่ผ่านระบบคลาวด์

4.3 การตั้งค่าและการทำงานของ LINE Notify

4.3.1 การตั้งค่า LINE Notify สำหรับการแจ้งเตือน

1. สร้าง LINE Notify Token: ผู้ใช้ต้องลงทะเบียนและสร้าง Access Token ใน LINE Notify (https://notify-bot.line.me/) ก่อน เพื่อใช้ในการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ LINE โดยเฉพาะ ซึ่งต้องนำ Token ที่ได้มาใส่ในโปรแกรมที่รันบน Raspberry Pi เพื่อส่งการแจ้งเตือน

2. การติดตั้ง LINE Notify API บน Raspberry Pi: ใช้ไลบรารี requests ใน Python เพื่อเรียกใช้ API ของ LINE Notify โดยกำหนดให้ Python Script ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ หากพบว่าเกินค่าที่กำหนดไว้ จะส่งข้อความแจ้งเตือนไปยัง LINE ผ่าน API ทันที

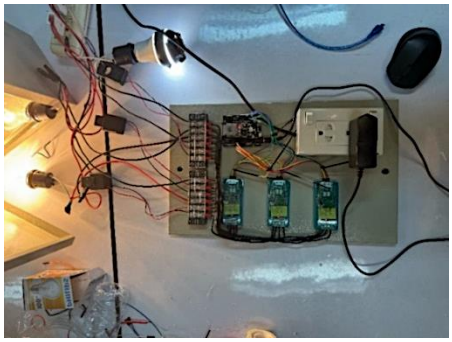
4.3.2 การทำงานของ LINE Notify

เมื่อระบบตรวจพบความผิดปกติ เช่น แรงดันไฟฟ้าต่ำหรือสูงเกินกว่าที่กำหนด หรืออุณหภูมิสูงเกิน 40°C ระบบจะใช้ LINE Notify API ส่งข้อความแจ้งเตือนที่ระบุรายละเอียดความผิดปกติไปยังแอปพลิเคชัน LINE ของผู้ใช้ เช่น "แจ้งเตือน: แรงดันไฟฟ้าสูงเกินมาตรฐานที่กำหนด" หรือ "แจ้งเตือน: อุณหภูมิสูงถึง 42°C" ซึ่งการแจ้งเตือนนี้ช่วยให้ผู้ใช้ได้รับการแจ้งเตือนทันทีเมื่อเกิดเหตุการณ์สำคัญ ทำให้สามารถตอบสนองและแก้ไขปัญหาได้ทันท่วงที ไม่ว่าจะอยู่ที่ใด เพียงมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต

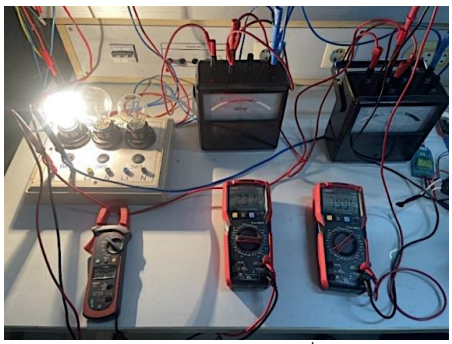
5. ผลการทดสอบ

5.1 การทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ PZEM-004T

การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยใช้โวลมิเตอร์ แคลมป์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ กิโลวัตต์-ฮาวร์มิเตอร์ และมิเตอร์วัดตัวประกอบกำลังดังแสดงในรูปที่ 8



(ก) การวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากับเซนเซอร์ PZEM-004T



(ข) การวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากับเครื่องมือวัด

รูปที่ 8 การวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าระหว่างเซนเซอร์ PZEM-004T กับอุปกรณ์เครื่องมือวัด

ค่าพลังงานในหน่วย kWh คำนวณได้จาก

$$\text{พลังงาน} = \frac{3600}{KX} \quad \text{kWh} \qquad (1)$$

โดย K คือ ค่าคงที่ของกิโลวัตต์-ฮาวร์มิเตอร์ (rev/kWh)

(โดยค่า K ของกิโลวัตต์-ฮาวร์มิเตอร์ ที่ทำการทดลองมีค่าเท่ากับ 1200 rev/kWh)

X คือ เวลาที่จานหมุนของกิโลวัตต์-ฮาวร์มิเตอร์หมุนครบ 1 รอบ (วินาที)

ค่าความคลาดเคลื่อนคำนวณจาก

$$\%\ \text{error} = \left|\frac{\text{Exact value} - \text{Approximate value}}{\text{Exact value}}\right| \times 100\ \% \qquad (2)$$

จากการทดลองในการวัดค่าหลอดไฟทั้ง 3 ขนาดดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 5% แต่จะมีเพียงกระแสไฟฟ้าที่วัดจากหลอดไฟขนาด 7W และ 60W ที่มีค่าเปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อนสูงกว่า 5% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากข้อมูลการวัดนั้นเป็นระดับจุดทศนิยมหลายตำแหน่ง เวลาคำนวณทำให้อาจเกิดข้อผิดพลาดในการวัดได้

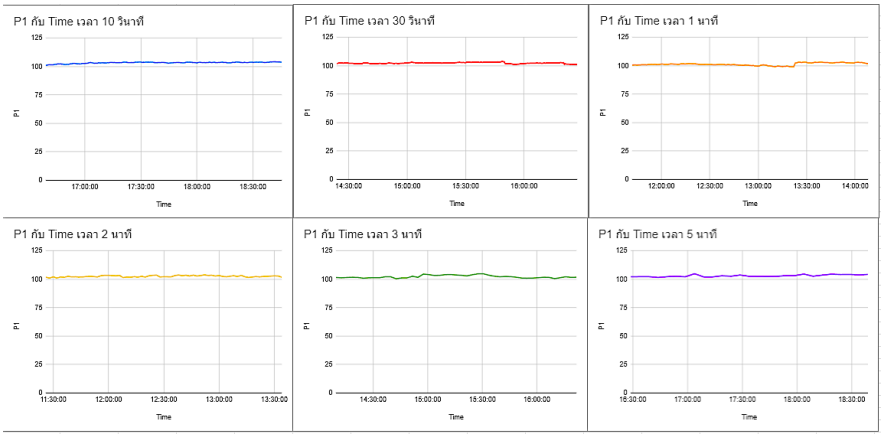
ตารางที่ 2 การวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

หลอดไฟ	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า	ค่าที่วัดจาก PZEM-004T	%Error
100W	แรงดันไฟฟ้า (V)	231.3	230.70	0.2594
	กระแสไฟฟ้า (A)	0.43	0.44	2.3256
	กำลังไฟฟ้า (W)	104.2	101.80	0.6345
	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	0.1069	0.1018	4.7708
	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)	50.00	49.9	0.2000
	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	1	0.99	1.0000
60W	แรงดันไฟฟ้า (V)	230.30	230.70	0.1737
	กระแสไฟฟ้า (A)	0.24	0.28	14.2857
	กำลังไฟฟ้า (W)	67.0	64.60	3.5821
	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	0.0679	0.0646	4.8601
	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)	50.00	50.0	0.0000
	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	1	0.99	1.0000
7W	แรงดันไฟฟ้า (V)	231.80	230.40	0.6040
	กระแสไฟฟ้า (A)	0.05	0.06	20.000
	กำลังไฟฟ้า (W)	7.3	7.60	4.1096
	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	0.0080	0.0076	5.0000
	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)	50.00	49.9	0.2000
	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	0.59	0.57	3.5714

5.2 การทดสอบการทำงานของระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าของบอร์ดต้นทาง

การทดสอบความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลของพลังงานไฟฟ้า (P) เฟสที่ 1 ณ เวลาที่ 10 วินาที, 30 วินาที, 1 นาที, 2 นาที, 3 นาที, และ 5 นาที เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการส่งข้อมูล จากรูปที่ 9 พบว่าในทุกช่วงเวลาของการส่งข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน จึงได้เลือกระยะเวลาในการส่งและจัดเก็บข้อมูลอยู่ ณ เวลาที่ 5 นาที เพื่อลดขนาดของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้วัดโหลดที่ตู้โหลดเซ็นเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลของห้องปฏิบัติการ EE209 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยบูรพา ทุก ๆ 5 นาที ทั้งสามเฟส และระบบจะส่งข้อมูลค่าตารางมิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าความถี่ไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิ ตั้งแต่วันที่ 29/03/2567 – 01/04/2567 ตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time of Use : TOU) และทำการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกจัดเก็บไว้ใน Google Sheets ของแต่ละช่วงเวลามาเฉลี่ย พร้อมบันทึกค่าเฉลี่ยที่ได้ลงในตารางที่ 3 เพื่อที่จะสามารถนำเอาข้อมูลต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ต่อได้

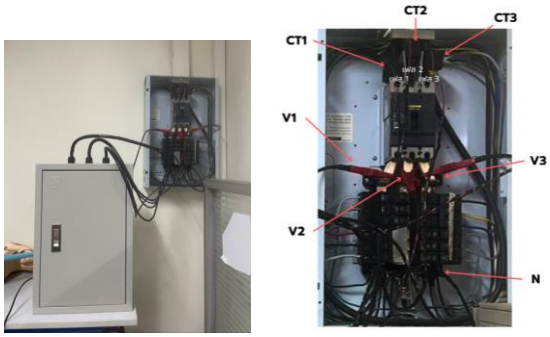
จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของพลังงานในแต่ละช่วงเวลา (เช่น ช่วงกลางวันและกลางคืน) ช่วยให้สามารถระบุพฤติกรรมการใช้พลังงานตามช่วงเวลาได้ เช่น ช่วงเวลา peak load และ off-peak load ซึ่งจะมีประโยชน์ในการจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพ เช่น การปรับลดโหลดในช่วงที่ใช้พลังงานสูง เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย



รูปที่ 9 การทดสอบความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลของพลังงานไฟฟ้า (P) เฟสที่ 1

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิจากการวัดโหลดที่ตู้โหลดเซ็นเตอร์ของห้องปฏิบัติการ EE209 ทุก ๆ 5 นาที ทั้งสามเฟส วันที่ 29/03/2567–01/04/2567 ตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time of Use : TOU) ตั้งแต่เวลา 00.00-24.00 น.

วัน/เดือน/ปี	เวลา	เฟส	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (Watt)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	อุณหภูมิ (°C)
วันศุกร์ 29/03/2567	00.00-09.00 น.	1	233.76	0.12	23.99	17.82	49.98	0.88	32.19
		2	233.62	0.55	97.03	8.37	49.97	0.76	
		3	233.20	0.11	21.17	5.60	49.98	0.80	
	09.00-22.00 น.	1	233.62	0.55	97.03	8.37	49.97	0.76	29.15
		2	231.92	0.70	95.35	19.06	49.97	0.67	
		3	232.37	0.12	22.80	5.90	49.97	0.80	
	22.00-00.00 น.	1	235.85	0.12	24.28	19.11	49.95	0.87	31.26
		2	236.22	0.55	98.24	10.39	49.95	0.75	
		3	235.71	0.12	21.54	5.94	49.94	0.80	
วันเสาร์ 30/03/2567	00.00-24.00 น.	1	233.33	0.87	106.11	21.66	49.97	0.74	30.64
		2	233.96	0.78	131.36	13.51	49.97	0.74	
		3	233.37	0.39	48.56	7.08	49.97	0.72	
วันอาทิตย์ 31/03/2567	00.00-24.00 น.	1	234.74	0.37	67.28	23.28	49.97	0.82	31.21
		2	235.88	0.62	114.97	16.16	49.96	0.78	
		3	234.64	0.12	22.26	7.26	49.97	0.80	
วันจันทร์ 01/04/2567	00.00-09.00 น.	1	234.36	0.12	24.03	23.50	49.98	0.88	31.98
		2	234.10	0.54	96.94	17.03	49.97	0.77	
		3	233.73	0.11	20.96	7.80	49.97	0.80	
	09.00-22.00 น.	1	233.16	1.38	206.92	25.44	49.97	0.66	29.66
		2	234.35	1.05	180.46	19.05	49.97	0.74	
		3	233.17	0.12	22.06	8.09	49.96	0.79	
	22.00-00.00 น.	1	235.93	1.51	225.55	25.89	49.97	0.63	29.02
		2	234.35	1.05	180.46	19.05	49.97	0.74	
		3	235.80	0.11	21.51	8.13	49.98	0.80	



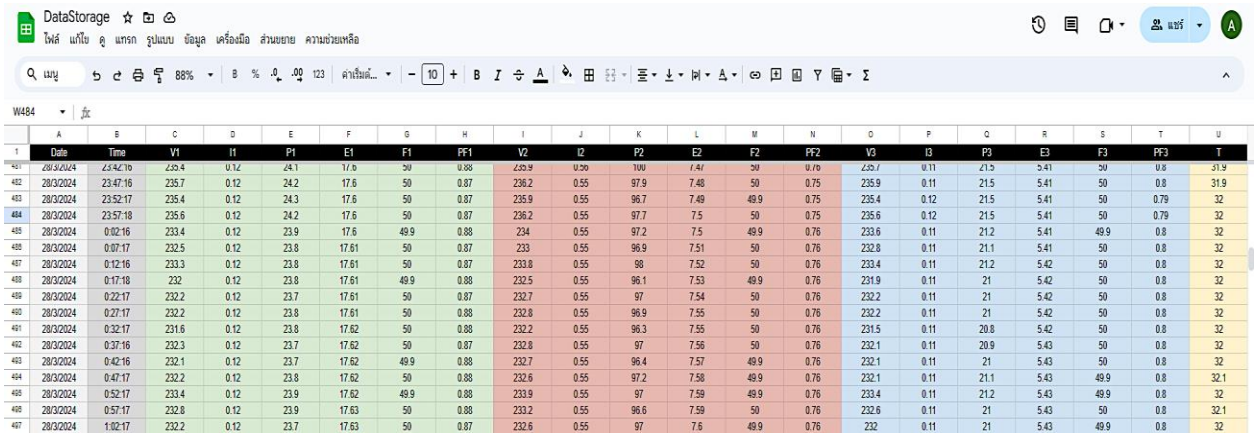
รูปที่ 10 การวัดระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 10 การวัดระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าของบอร์ดต้นทาง เมื่อนำ CT ทั้ง 3 ตัวไปคล้องกับสายไฟฟ้าเฟสที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับเหนือเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในตู้โหลดเซ็นเตอร์ จากนั้นจะนำคลิปหนีบปากจระเข้สีแดง มาหนีบเข้ากับตัวนำไฟฟ้า ของเฟสที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ และนำคลิปหนีบปากจระเข้สีดำ ไปหนีบเข้ากับนิวทรัลบาร์ที่ข้างใต้เซอร์กิตเบรกเกอร์ลูกย่อย

5.3 การทดสอบการส่งค่าระหว่างบอร์ดต้นทางและบอร์ดปลายทาง

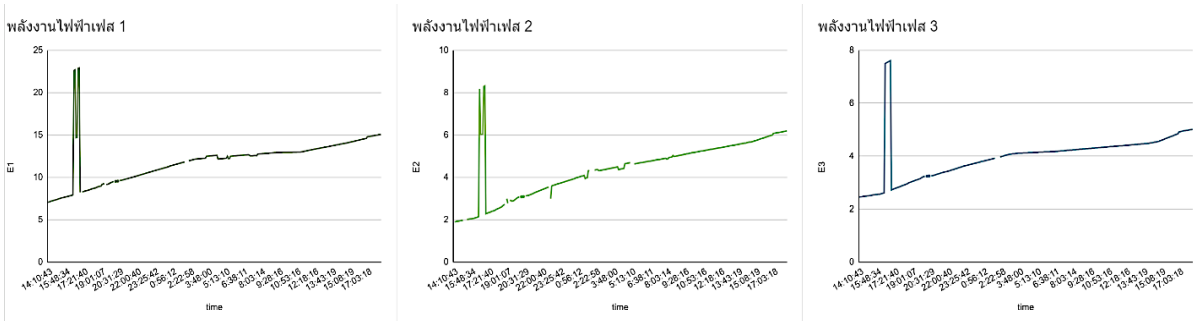
ระบบจะทำการส่งข้อมูลค่าตารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าความถี่ไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิ ของบอร์ดต้นทางไปยังบอร์ดปลายทางโดยใช้โครงข่ายชื่อข้อมูลหลังจากนั้นจะเก็บข้อมูลใน Google Sheets โดยจะแสดงวันที่ และเวลาในการจัดเก็บข้อมูลเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 11 จากการทดสอบพบว่าในระบบทำการส่งข้อมูลได้ถูกต้อง และแม่นยำตามเวลาที่กำหนดทุก ๆ 5 นาที แต่ในบางช่วงเวลายังคงเกิดข้อผิดพลาดที่เซ็นเซอร์วัด ซึ่งเกิดจากสายไฟที่ต่อระหว่างเซ็นเซอร์วัดและบอร์ดการขยับจึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ในบางช่วงเวลา

เมื่อนำข้อมูลของพลังงานไฟฟ้า ทั้ง 3 เฟส ภายในห้อง EE209 ทุก ๆ 5 นาที ทั้งสามเฟส ดังแสดงในรูปที่ 12



	Date	Time	V1	I1	P1	E1	F1	PF1	V2	I2	P2	E2	F2	PF2	V3	I3	P3	E3	F3	PF3	T
481	28/3/2024	23:42:16	235.4	0.12	24.1	17.6	50	0.88	235.9	0.56	100	7.47	50	0.76	235.7	0.11	21.5	5.41	50	0.8	31.9
482	28/3/2024	23:47:16	235.7	0.12	24.2	17.6	50	0.87	236.2	0.55	97.9	7.48	50	0.75	235.9	0.11	21.5	5.41	50	0.8	31.9
483	28/3/2024	23:52:17	235.4	0.12	24.3	17.6	50	0.87	235.9	0.55	96.7	7.49	49.9	0.75	235.4	0.12	21.5	5.41	50	0.79	32
484	28/3/2024	23:57:18	235.6	0.12	24.2	17.6	50	0.87	236.2	0.55	97.7	7.5	50	0.75	235.6	0.12	21.5	5.41	50	0.79	32
485	28/3/2024	0:02:16	233.4	0.12	23.9	17.6	49.9	0.88	234	0.55	97.2	7.5	49.9	0.76	233.6	0.11	21.2	5.41	49.9	0.8	32
486	28/3/2024	0:07:17	232.5	0.12	23.8	17.61	50	0.87	233	0.55	96.9	7.51	50	0.76	232.8	0.11	21.1	5.41	50	0.8	32
487	28/3/2024	0:12:16	233.3	0.12	23.8	17.61	50	0.87	233.8	0.55	98	7.52	50	0.76	233.4	0.11	21.2	5.42	50	0.8	32
488	28/3/2024	0:17:18	232	0.12	23.8	17.61	49.9	0.88	232.5	0.55	96.1	7.53	49.9	0.76	231.9	0.11	21	5.42	50	0.8	32
489	28/3/2024	0:22:17	232.2	0.12	23.7	17.61	50	0.87	232.7	0.55	97	7.54	50	0.76	232.2	0.11	21	5.42	50	0.8	32
490	28/3/2024	0:27:17	232.2	0.12	23.8	17.61	50	0.88	232.8	0.55	96.9	7.55	50	0.76	232.2	0.11	21	5.42	50	0.8	32
491	28/3/2024	0:32:17	231.6	0.12	23.8	17.62	50	0.88	232.2	0.55	96.3	7.55	50	0.76	231.5	0.11	20.8	5.42	50	0.8	32
492	28/3/2024	0:37:16	232.3	0.12	23.7	17.62	50	0.87	232.8	0.55	97	7.56	50	0.76	232.1	0.11	20.9	5.43	50	0.8	32
493	28/3/2024	0:42:16	232.1	0.12	23.7	17.62	49.9	0.88	232.7	0.55	96.4	7.57	49.9	0.76	232.1	0.11	21	5.43	50	0.8	32
494	28/3/2024	0:47:17	232.2	0.12	23.8	17.62	50	0.88	232.6	0.55	97.2	7.58	49.9	0.76	232.1	0.11	21.1	5.43	49.9	0.8	32.1
495	28/3/2024	0:52:17	233.4	0.12	23.9	17.62	49.9	0.88	233.9	0.55	97	7.59	49.9	0.76	233.4	0.11	21.2	5.43	49.9	0.8	32
496	28/3/2024	0:57:17	232.8	0.12	23.9	17.63	50	0.88	233.2	0.55	96.6	7.59	50	0.76	232.6	0.11	21	5.43	50	0.8	32.1
497	28/3/2024	1:02:17	232.2	0.12	23.7	17.63	50	0.87	232.6	0.55	97	7.6	49.9	0.76	232	0.11	21	5.43	49.9	0.8	32

รูปที่ 11 การเก็บข้อมูลใน Google Sheets



รูปที่ 12 ภาพแผนภูมิเชิงเส้นของพลังงานไฟฟ้า ทั้ง 3 เฟส

5.4 การทดสอบการแจ้งเตือน LINE Notify

ระบบจะทำการส่งการแจ้งเตือนเมื่อแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิเกิดความผิดปกติ โดยความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าจะมี 2 ประเภทคือ แรงดันไฟฟ้าสูงผิดปกติ และ แรงดันไฟฟ้าต่ำผิดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยรูปที่ 13 (ก) เป็นการแจ้งเตือนเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ รูปที่ 13 (ข) เป็นการแจ้งเตือนเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ และ รูปที่ 13 (ค) เป็นการแจ้งเตือนเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 40 องศาเซลเซียส

ระบบสามารถส่งแจ้งเตือนเข้ามาที่ไลน์ได้ทันทีเมื่อแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิเกิดความผิดปกติ โดยในการใช้งานจริงจะตั้งค่าให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 200 โวลต์ หรือมากกว่าเท่ากับ 240 โวลต์ ตามมาตรฐานคุณภาพบริการของการไฟฟ้า (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2566). อัตราค่าไฟฟ้า. การปรับปรุงเงื่อนไขหลักเกณฑ์การได้รับสิทธิค่าไฟฟ้าฟรี สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าบ้านอยู่อาศัย ประเภทที่ 1 ข้อ 1.1.1.) จึงส่งการแจ้งเตือน ส่วนทางด้านอุณหภูมิต้องเกิน 40 องศาเซลเซียส จึงจะส่งการแจ้งเตือน

(ก) แรงดันไฟฟ้าสูงผิดปกติ (ข) แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ (ค) อุณหภูมิสูงกว่าปกติ

รูปที่ 13 การแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify

6. อภิปรายผลและสรุป

ผลการวิจัยในการพัฒนาระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายชื่อข้อมูลและเทคโนโลยีไอโอที มีข้อดีและจุดเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเฉพาะในด้านการเชื่อมต่อ การเก็บข้อมูลย้อนหลัง และการแจ้งเตือนในระบบเรียลไทม์ ดังนี้

6.1 การเก็บข้อมูลย้อนหลังในระบบคลาวด์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องบางฉบับเลือกใช้การจัดเก็บข้อมูลภายในอุปกรณ์หรือในระบบเซิร์ฟเวอร์ท้องถิ่น ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านการเข้าถึงข้อมูลย้อนหลัง ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการวางแผนระยะยาวทำได้ยากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยการเก็บข้อมูลพลังงานใน Google Sheets ซึ่งสามารถเรียกดูได้จากทุกที่ทุกเวลา การจัดเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาทีและการตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้อย่างสะดวกทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิเคราะห์ได้ทันที ผู้ใช้สามารถวางแผนการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6.2 การแจ้งเตือนความผิดปกติ

งานวิจัยที่ผ่านมาใช้การแจ้งเตือนผ่านระบบเครือข่ายภายในหรือส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันเฉพาะ การวิจัยนี้เพิ่มประสิทธิภาพการแจ้งเตือนโดยใช้ LINE Notify ทำให้ผู้ใช้ได้รับการแจ้งเตือนทันทีแม้อยู่นอกเครือข่าย เช่น เมื่อแรงดันไฟฟ้าหรืออุณหภูมิสูงเกินมาตรฐานที่กำหนด การส่งแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ช่วยให้ผู้ใช้สามารถแก้ไขปัญหาได้ทันท่วงที และเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบมากขึ้น

6.3 การรองรับการขยายตัวของระบบ

ในงานวิจัยที่ใช้โครงข่าย TCP/IP พบว่าการขยายระบบให้ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่หรือเพิ่มจุดเชื่อมต่อต้องเพิ่มโครงสร้าง หมายเลขไอพีเพิ่มเติมซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องความซับซ้อนและภาระงานการจัดการระบบ การวิจัยนี้ใช้โครงข่ายชื่อข้อมูล ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงกว่า TCP/IP ในการขยายเครือข่าย เนื่องจากโครงข่ายชื่อข้อมูลใช้การเข้าถึงข้อมูลตามชื่อข้อมูล ทำให้การขยายตัวระบบสามารถทำได้ง่ายกว่าและไม่จำเป็นต้องเพิ่มหมายเลขไอพีใหม่ในแต่ละจุดเชื่อมต่อ ส่งผลให้การขยายเครือข่ายรองรับได้ดีกว่าระบบแบบเดิม

6.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีและโครงข่ายชื่อข้อมูล ร่วมกันในระบบ

งานวิจัยใช้เทคโนโลยีไอโอที กับเซ็นเซอร์ในการตรวจวัด ส่วนใหญ่ใช้การสื่อสารแบบ TCP/IP เพื่อส่งข้อมูลในระบบเรียลไทม์ แต่ไม่ได้มีการใช้งานกับโครงข่ายชื่อข้อมูล การวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบเพื่อให้การรับส่งข้อมูลเป็นไปอย่างเสถียรและปลอดภัย รวมถึงรองรับการแจ้งเตือนแบบทันที

6.5 สรุปผล

การออกแบบและติดตั้งระบบแสดงผลโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีไอโอทีและการสื่อสารแบบโครงข่ายชื่อข้อมูลเพื่อให้ผู้ใช้งานทราบถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน คือ สามารถดูปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและดูข้อมูลย้อนหลังได้ผ่าน Google Sheets โดยจะแสดงข้อมูล วันที่ เวลา และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กระแสไฟฟ้า (แอมป์) กำลังไฟฟ้า (วัตต์) พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ความถี่ไฟฟ้า(เฮิรตซ์) ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิ (องศา) พร้อมทั้งมีระบบการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify เมื่อเกิดความผิดปกติของไฟฟ้าและอุณหภูมิขึ้น จากผลการทดสอบพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน

ของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซนเซอร์มีค่าไม่เกิน 5% และการจัดเก็บข้อมูลที่ Google Sheets ทุกๆ 5 นาที สามารถแสดงข้อมูลและจัดเก็บข้อมูลได้อย่างครบถ้วนและถูกต้อง จากการเข้าถึงข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบนี้จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลจากระบบไปวิเคราะห์และนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการจัดการพลังงานต่อไปได้

7. ข้อเสนอแนะ

1. เลือกใช้อุปกรณ์ในการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ครอบคลุมพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่านี้

2. การจัดเก็บข้อมูล Google Sheets ในระยะยาว จะมีประสิทธิภาพที่ลดลง เพราะยิ่งมีข้อมูลที่มาก จะยิ่งทำให้การแสดงผลของข้อมูลที่จัดเก็บมีความช้าลง

3. เมื่อระบบไฟฟ้าภายในอาคารเกิดการขัดข้อง ระบบจะไม่สามารถใช้งานได้จนกว่าระบบไฟฟ้าภายในอาคารจะกลับมาใช้งานได้ปกติ

4. แนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต สามารถเพิ่มฟังก์ชันการทำนายการใช้พลังงานโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น Machine Learning หรือ Deep Learning และการขยายระบบให้รองรับการตรวจวัดในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้นโดยปรับโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบ Mesh Network ที่ช่วยให้เซ็นเซอร์หลายตัวทำงานร่วมกัน และส่งข้อมูลไปยังศูนย์กลางผ่านโครงข่ายชื่อข้อมูล ทำให้สามารถขยายระบบให้ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่และติดตามการใช้พลังงานจากหลายจุดพร้อมกันได้

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ วจพ.๔/๒๕๖๖

9. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs and R. L. Braynard “Networking named content,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York, USA*, Dec. 2009, pp. 1-12.

[2] L. Zhang et al. “Named data networking (NDN) project” Sep. 2010, [online]. Available: https://named-data.net/.

[3] H. Yuan and P. Crowley, “Scalable Pending Interest Table design: From principles to practice,” in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, ON, Canada,* 2014, pp. 2049-2057.

[4] A. Abane, M. Daoui, S. Bouzefrane, S. Banerjee, and P. Mühlethaler, “A Realistic Deployment of Named Data Networking in the Internet of Things,”*Journal of Cyber Security and Mobility*, vol.9,no.1,PP.1-26,2020.

[5] T. Kamolchum, H. Pinitsuwan and S. Chaysin, “Internet of things for applicance control and energy data logger,” Department of Electrical Engineering, Srinakharinwirot University, Bangkok 2016 (in Thai).

[6] T. srison, and T. Wanawiwit, “System for monitoring and processing the operation of the main electrical control cabinet,” Department of Electrical Engineering, Burapha University, Chonburi 2022 (in Thai).

[7] T. Wongpaiboon, “Electric Energy Consumption Measurement using Wireless IPv6 Network,” Department of Computer Engineering, Kasetsart University, Bangkok 2015 (in Thai).

[8] T. Mekhi and K. Kaeworasan, “Chemical laboratory electrical safety data recording system,” Department of Electrical Engineering, Burapha University, Chonburi 2022 (in Thai).

[9] M. Amadeo, C. Campolo, A. Iera and A. Molinaro, “Named data networking for IoT: An architectural perspective,” in *Proceedings of 2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Bologna, Italy, 2014, pp. 1-5.

[10] M. A. M. Hail, “Efficient Management, Control and Analysis of IoT-NDN Devices through NDN4IoT App Integrated with FIWARE,” in *Proceedings of 2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro, 2023, pp. 1-4.

[11] S. Mastorakis, A. Afanasyev, I. Moiseenko, and L. Zhang, “ndnSIM 2.0: A new version of the NDN simulator for NS-3,” NDN, Technical Report NDN-0028, 2015. Available: https://ndnsim.net

[12] Play NDN on Raspberry Pi. [Online]. Available: https://www2.cs.arizona.edu/people/philoliang/ndnpi/