

ระบบถ่ายโอนข้อมูลและกำลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกันด้วยแอลอีดีส่องสว่างภายในอาคาร

Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer Systems Utilizing Indoor LED Illumination

ภูเบศ แสงมะฮะหมัด¹, บุญฤทธิ์ คุ่มเขต¹, วิโรจน์ พิราจนชัย¹, พุทธิพร เทียมสินสังวร², ภัชดาพร แสงเพชร¹, ธนกร สุธรรม¹ และ ธนาพร เพชรกุล^{1*}

Pubet Sangmahamad¹, Boonyarit Kumkhet¹, Virote Pirajnanchai¹, Puttiporn Thiamsinsangwon²,
Patchadaporn Sangpet¹, Thanakorn Sutham¹, and Tanaporn Pechrkool^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathum Thani, Thailand,

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²Department of Chemical and materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathum Thani, Thailand,

*Corresponding Author E-mail: tanaporn.p@en.rmUTT.ac.th

Received: 14/03/25, Revised: 30/03/25, Accepted: 31/03/25

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ สร้างและทดสอบระบบถ่ายโอนข้อมูลและพลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกันโดยใช้แอลอีดีส่องสว่างภายในอาคาร ประกอบด้วย ภาดส่งและภากรับเชิงแสงที่ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยภาดส่งทำหน้าที่ตรวจวัดและส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นแบบเวลาจริง ผ่านช่องทางสื่อสารอากาศสว่างเสมือนโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ขณะที่ภากรับทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูลและเก็บเกี่ยวพลังงานจากแสงผ่านโฟโอดีไดโอดและวงจรรับสัญญาณเชิงแสง ภากรับติดตั้งโซลาเซลล์ พร้อมวงจรจัดการพลังงานและแบตเตอรี่ เพื่อเก็บเกี่ยวและสำรองพลังงานให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถถ่ายโอนข้อมูลได้โดยมีอัตราความผิดพลาดของข้อมูลต่ำกว่าร้อยละ 30 เมื่อระยะทางไม่เกิน 110 เซนติเมตร ที่อัตราการส่งข้อมูลสูงสุด 200 bps นอกจากนี้ระบบยังสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนจากแสงภายนอกได้ดี ด้านการเก็บเกี่ยวพลังงาน ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ระยะไม่เกิน 50 เซนติเมตร ภายใต้ความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 1200 Lux จากผลการศึกษาระบบที่นำเสนอสามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการถ่ายโอนข้อมูลและพลังงานผ่านคลื่นแสงพร้อมกันในอนาคต เช่น ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายภายในอาคาร หรืออุปกรณ์อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งที่ต้องการพลังงานต่ำ

คำสำคัญ: การถ่ายโอนข้อมูลและกำลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกัน โฟโอดีไดโอด การเก็บเกี่ยวพลังงาน แอลอีดีส่องสว่างภายในอาคาร

Abstract

This research presents the design, development, and testing of a simultaneous lightwave information and power transfer (SLIPT) system utilizing indoor LED illumination. The proposed system consists of a

visible light transmitter and receiver integrated with a microcontroller. The transmitter continuously measures and transmits real-time temperature and humidity data through free-space optical communication, functioning as a node in a wireless sensor network. Meanwhile, the receiver decodes the transmitted data and harvests energy from light using a photodiode and an optical signal reception circuit. Additionally, the receiver is equipped with a solar cell, a power management circuit, and a battery to store harvested energy, ensuring continuous operation. Experimental results demonstrate that the system can successfully transfer data with a bit error rate of less than 30% at a communication distance of up to 110 cm, with a maximum data rate of 200 bps. Furthermore, the system exhibits strong resistance to ambient light interference. In terms of energy harvesting, the system operates efficiently at distances up to 50 cm under an illumination intensity of at least 1200 lux. Based on these findings, this system can serve as a foundation for future advancements in SLIPT technology, particularly for applications in indoor wireless sensor networks and low-power Internet of Things (IoT) devices that rely on alternative energy sources.

Keywords: Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer, Photodiode, Energy harvesting, Indoor LED Illumination

1. บทนำ

การสื่อสารไร้สายมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน โดยเป็นกระบวนการส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับโดยไม่ต้องใช้ตัวนำไฟฟ้า เช่น สายทองแดง เป็นสื่อกลาง นอกจากการสื่อสารระหว่างบุคคลแล้ว

ยังรองรับการเข้าถึงข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต เช่น ภาพ เสียง และมัลติมีเดีย อย่างไรก็ตาม ระบบไร้สายแบบเดิมยังมีข้อจำกัด เช่น ความไม่เสถียรของสัญญาณและความเร็วที่ไม่คงที่ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่อับสัญญาณหรือพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านคลื่นวิทยุ (Radio Frequency : RF) เช่น อาคาร โรงพยาบาล และโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากข้อกำหนดทางกฎหมาย การรบกวนไปยังอุปกรณ์ที่มีความไวต่อคลื่นวิทยุ หรือข้อจำกัดด้านความปลอดภัยของข้อมูลในสภาพแวดล้อมที่อ่อนไหว เพื่อตอบโจทยปัญหาดังกล่าว เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Visible Light Communication : VLC) [1], [2], [3] ได้กลายมาเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสูงเนื่องจากใช้แสงที่มองเห็นเป็นสื่อกลางแทนคลื่นวิทยุ จึงช่วยลดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับคลื่นวิทยุ

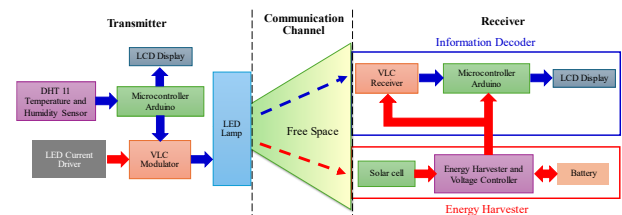
ปัจจุบัน เทคโนโลยี VLC ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากสามารถใช้แอลอีดี (Light-Emitting Diode : LED) เป็นทั้งแหล่งกำเนิดและเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลไร้สายภายในอาคาร [4] ในขณะเดียวกัน แนวคิดเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลและให้กำลังไร้สายแบบส่งพร้อมกัน (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: SWIPT) [5], [6], [7] ได้กลายเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการรองรับอุปกรณ์ไร้สายที่มีข้อจำกัดด้านพลังงาน โดยอาศัยเทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer : WPT) [8] การพัฒนาและความสามารถของเทคโนโลยี VLC และ SWIPT นำไปสู่แนวทางการพัฒนาระบบถ่ายโอนข้อมูลและกำลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกัน (Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer : SLIPT) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานภายในอาคาร เช่น บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) โรงพยาบาล อาคารสำนักงานอัจฉริยะ (Smart Office) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks : WSNs) และอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things : IoT) [9] ที่ต้องการทั้งการเชื่อมต่อไร้สายที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยของการเชื่อมต่อ ลดการใช้สายไฟ และลดความจำเป็นในการเปลี่ยนหรือชาร์จแบตเตอรี่บ่อยครั้ง มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอการนำระบบ SLIPT สำหรับการประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร เช่นการนำใช้ร่วมกับเทคโนโลยี IoT [9], [10] หรือนำมาใช้ใช้ในการสื่อสารเชิงแสงใต้น้ำ [11], [12] รวมถึงการนำมาใช้ร่วมกับระบบการสื่อสารยุคที่ 6 (Sixth Generation : 6G) [13] อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการนำเสนอ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นหลัก และมีเพียงงานวิจัยบางส่วนที่ทำการ ออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบที่นำเสนอ

จากปัญหาและงานวิจัยที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบ สร้าง และทดสอบ ระบบ SLIPT โดยใช้แอลอีดีส่องสว่างภายในอาคาร ที่มีต้นทุนต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับถ่ายโอนข้อมูลและพลังงานไปยังอุปกรณ์รับ ระบบที่นำเสนอสามารถเป็นแนวทางใน

การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ในระบบ IoT หรือ อุปกรณ์สวมใส่ อิเล็กทรอนิกส์ (Wearable Electronics) อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนา เครือข่ายไร้สายที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Energy-Efficient Wireless Networks) โดยช่วยลดการพึ่งพาแบตเตอรี่และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

2. การออกแบบและหลักการทำงานของระบบ SLIPT ที่นำเสนอ

2.1 หลักการทำงานของระบบ



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบถ่ายโอนข้อมูลและกำลังงานแบบพร้อมกันผ่านคลื่นแสงที่มองเห็นด้วยแอลอีดีส่องสว่างภายในอาคารที่นำเสนอ

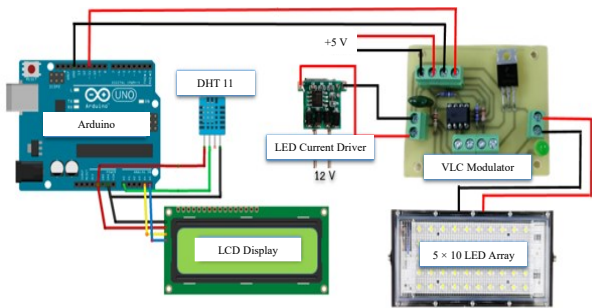
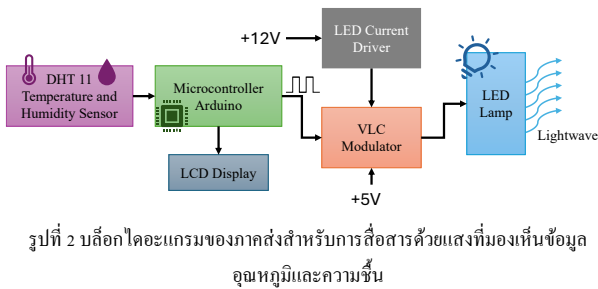
การออกแบบระบบถ่ายโอนข้อมูลและกำลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกัน (Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer : SLIPT) ด้วยแอลอีดีส่องสว่างภายในอาคาร ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่การออกแบบ สร้าง และทดสอบ ระบบ SLIPT ด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อย่างง่าย ต้นทุนต่ำ และสามารถทำซ้ำได้ง่าย เพื่อศึกษาการทำงานและความสามารถในการถ่ายโอนข้อมูลและกำลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกัน ผ่านแอลอีดีส่องสว่างภายในอาคารที่มีขายในท้องตลาด โดยการออกแบบระบบ SLIPT ที่นำเสนอ ประกอบไปด้วย ภาควงส่งแสง (VLC Transmitter) และภาควงรับแสง (VLC Receiver) ร่วมกับหน่วยประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงไดอะแกรมดังรูปที่ 1

โดยภาคส่งในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ตัวตรวจรู้อุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิทัล DHT 11 สำหรับใช้เป็นแหล่งข้อมูลของการส่งในระบบ ซึ่งทำหน้าที่เสมือนตัวตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Node) หลักการทำงานของภาคส่งเริ่มจากไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูอินโน (Arduino) อ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้อุณหภูมิและความชื้น DHT 11 จากนั้นทำการจัดเรียงข้อมูลและส่งข้อมูลเชิงไฟฟ้า (Electrical Signal) ไปมอดูเลตกับสัญญาณแสงที่วางจรมอดูเลตสัญญาณเชิงแสง (VLC modulator) เพื่อรวมสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้ากับคลื่นแสงด้วยหลอดส่องสว่างแอลอีดีแสงขาว (LED Lamp) โดยมีชุดควบคุมกระแสคงที่ทำหน้าที่ขับแอลอีดี (LED Driver) จากนั้นแอลอีดีทำหน้าที่ส่งสัญญาณข้อมูลไปพร้อมกับแสงผ่านช่องทางการสื่อสารอากาศว่าง (Free space)

ในส่วนภาควงรับทำการออกแบบภาควงรับสัญญาณแสงด้วยเทคนิคการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Signal Components Separation : SCS)

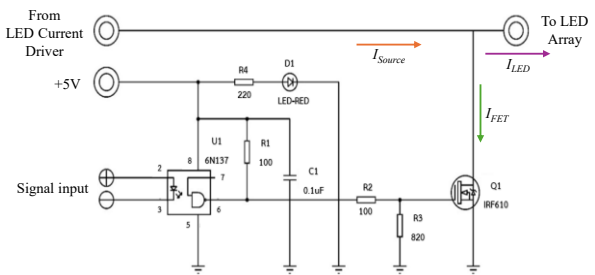
[14] ประกอบไปด้วยส่วนถอดรหัสข้อมูล (Information Decoder) และ ส่วนเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvester) ดังนั้นในส่วนของภาครับ สัญญาณแสงแบบไร้สายจึงประกอบไปด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณแสง 2 ชนิด ได้แก่ โฟโตไดโอดแบบพิน (PIN Photodiode) และ โซลาร์เซลล์ (Solar Cell) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับข้อมูลและรับพลังงานตามลำดับ โดยโฟโตไดโอด ทำหน้าที่รับข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นที่ส่งมา ผ่านช่องทางสื่อสารไร้สายด้วยแสง จากนั้นข้อมูลถูกส่งไปยังวงจรรับ สัญญาณเชิงแสง (VLC Receiver) เพื่อทำการแปลงสัญญาณ ขยายแรงดัน กรองความถี่ พร้อมทั้งปรับระดับสัญญาณข้อมูลที่ได้รับก่อนส่งไปหน่วยประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นผ่านจอแอลซีดี ในขณะที่โซลาร์เซลล์ ทำหน้าที่รับแสง และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ผ่านชุดเก็บเกี่ยวพลังงาน เพื่อประจุ พลังงานให้กับแบตเตอรี่ และเป็นแหล่งพลังงานให้กับส่วนถอดรหัส ข้อมูลต่อไป

2.2 การออกแบบภาคส่งของระบบ SLIPT



การออกแบบภาคส่งของระบบ SLIPT ที่นำเสนอมีโครงสร้าง และ องค์ประกอบดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบ การส่งสัญญาณข้อมูลเชิงแสงผ่านอากาศด้วยแอลอีดีแสงขาว ด้วยเทคนิค การมอดูเลตสัญญาณเชิงแสงแบบความเข้มแสง (Intensity Modulation: IM) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และตัวตรวจรู้อุณหภูมิและความชื้น โดยชุดแอลอีดีส่องสว่างที่ใช้มีโครงสร้างของแอลอีดีแบบอาร์เรย์ ขนาด 5 × 10 ดวง และมีขนาดรวม 10 × 20 ตารางเซนติเมตร สำหรับการส่องสว่างและส่งข้อมูลเชิงแสง และมีวงจรขับแอลอีดีแบบกระแส คงที่ (LED Current Driver) MC33063A [15] จากนั้นทำการออกแบบ

วงจรมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเชิงแสงแสดงวงจรดังรูปที่ 4 โดยมี N-Channel MOSFET IRF610 เชื่อมต่อแบบขนานระหว่างวงจร ขับแอลอีดีและชุดแอลอีดีส่องสว่าง ทำหน้าที่ปรับกระแสที่ไหลผ่าน ชุดแอลอีดีให้มีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณข้อมูลขาเข้า โดยไม่ส่งผล ต่อการกระพริบของแอลอีดีที่มีผลกระทบต่อดวงตามนุษย์ ร่วมกับ ชุดแยกสัญญาณเชิงแสง (Opto-isolator) เพื่อเป็นการส่งข้อมูลผ่านแสง แบบไร้สายโดยมีอากาศเป็นตัวกลาง ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแส แสงดังสมการที่ (1) และมีความสัมพันธ์ระหว่างของข้อมูลขาเข้า กระแสที่ไหลผ่าน N-Channel MOSFET และกระแสที่ไหลผ่านชุด แอลอีดีส่องสว่าง เป็นไปตามสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ



$$I_{LED} = I_{Source} - I_{FET} \quad (1)$$

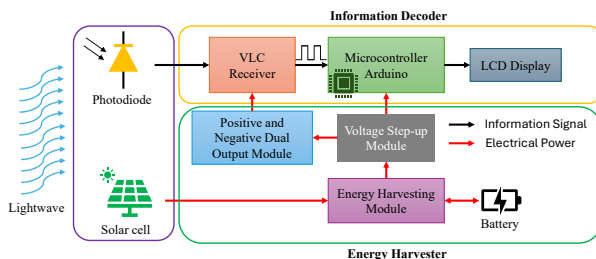
$$I_{FET} = \begin{cases} I_{FET_max} & \text{data} = 0 \\ I_{FET_min} & \text{data} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

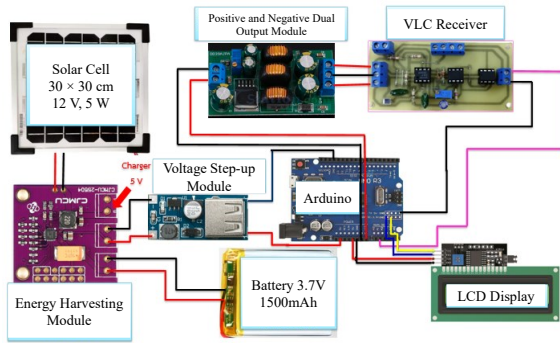
$$I_{LED} = \begin{cases} I_{LED_max} & \text{data} = 1 \\ I_{LED_min} & \text{data} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ I_{Source} คือกระแสของวงจรขับแอลอีดี, I_{FET} และ I_{LED} คือ กระแสของ N-Channel MOSFET และกระแสของชุดแอลอีดีส่องสว่าง ตามลำดับ

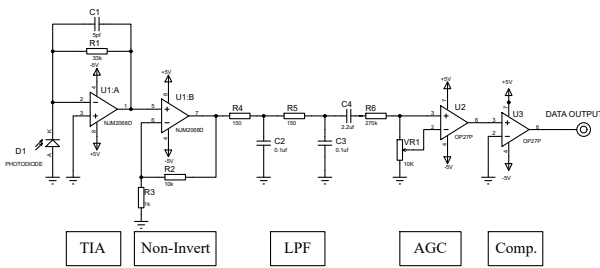
2.3 การออกแบบภาครับของระบบ SLIPT

การออกแบบภาครับของระบบ SLIPT ที่นำเสนอ สำหรับการรับ ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ได้ทำการออกแบบภาครับสัญญาณแสง รูปแบบแยกองค์ประกอบของสัญญาณ โดยประกอบไปด้วยชุดถอดรหัส ข้อมูล ที่มีโฟโตไดโอด เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณ และชุดเก็บเกี่ยวพลังงาน มีโซลาร์เซลล์ทำหน้าที่รับพลังงาน ซึ่งมีไดอะแกรมและโครงสร้างภาครับ ที่นำเสนอ ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

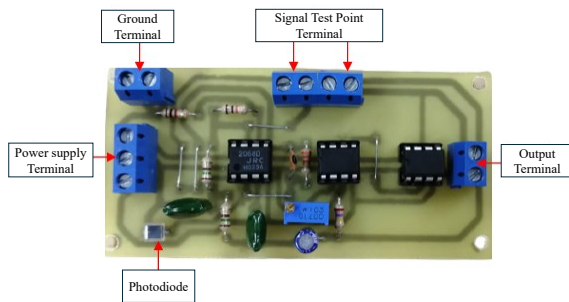




รูปที่ 6 โครงสร้างการรับของระบบ SLIPT ที่นำเสนอ



รูปที่ 7 วงจรการรับสัญญาณของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น



รูปที่ 8 ต้นแบบวงจรการรับสัญญาณของการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น

ส่วนสำคัญของชุดถอดรหัสข้อมูลประกอบไปด้วยวงจรรับสัญญาณเชิงแสงไร้สาย (VLC Receiver) แสดงวงจรและต้นแบบวงจรที่สร้างดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ โดยใช้โฟโตไดโอด เบอร์ BPW34 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเชิงแสงเป็นกระแสไฟฟ้า ร่วมกับวงจรขยายแบบทรานซิมพีแดนซ์ (Transimpedance Amplifier: TIA) และวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier: Non-invert) ด้วยไอซี NJM2068 เพื่อทำหน้าที่แปลงกระแสเป็นแรงดัน และขยายสัญญาณด้วยอัตรายาว 11 เท่า ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณที่ได้ถูกส่งไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter: LPF) ที่มีความถี่ตัด (Cutoff Frequency) 10kHz จากนั้นสัญญาณที่ผ่านกระบวนการกรองความถี่แล้ว ถูกส่งเข้าสู่ OP27G วงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ ที่ออกแบบเป็นวงจรควบคุมอัตรายาวอัตโนมัติ (Automatic Gain Control: AGC) และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator: Comp.) ให้มีระดับแรงดันขาออกของสัญญาณตามความต้องการของระบบ โดยแรงดันขาออกของวงจรเป็นไปตามสมการที่ (4)

$$V_{comp} = \begin{cases} +V_{cc} & \text{if } V_{input} > V_{ref} \\ -V_{cc} & \text{if } V_{input} < V_{ref} \end{cases} \quad (4)$$

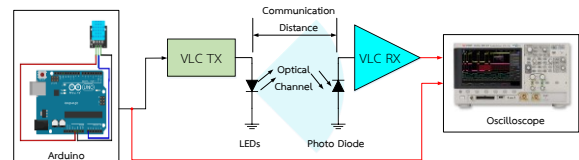
เมื่อ V_{comp} คือแรงดันด้านออกของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ในขณะที่ V_{input} และ V_{ref} คือแรงดันของสัญญาณด้านเข้าและแรงดันอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบแรงดันตามลำดับ

ในการออกแบบและสร้างชุดรับสัญญาณแสงที่มองเห็นเพื่อการประจักษ์ได้ สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของอุปกรณ์ตรวจรู้ในระบบสื่อสารไร้สาย รวมถึงเพิ่มระยะเวลาการใช้งานแบตเตอรี่ ลดจำนวนครั้งการเปลี่ยนหรือการประจุแบตเตอรี่ใหม่ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบชุดเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้โซล่าเซลล์ ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบร่วมกับไอซี BQ25504 ซึ่งเป็นวงจรเพิ่มแรงดันพลังงานต่ำ พร้อมระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน [16] ร่วมกับโซล่าเซลล์ขนาด 12V, 5W และใช้แบตเตอรี่ ขนาด 3.7V 1500 mAh สำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับส่วนถอดรหัสข้อมูล นอกจากนี้โมดูลเพิ่มแรงดัน (Voltage step-up module) ถูกนำมาใช้เพื่อปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมต่อการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

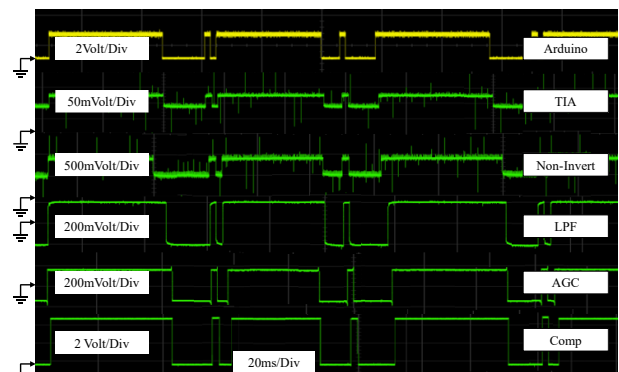
3. ผลการทดสอบ

การทดสอบระบบ SLIPT ที่นำเสนอ ประกอบไปด้วยการทดสอบการถ่ายโอนข้อมูล (Information Transfer) และการถ่ายโอนกำลังงาน (Power Transfer) ผ่านคลื่นแสงที่มองเห็นภายในอาคาร แสดงรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 การทดสอบการถ่ายโอนข้อมูล (Information Transfer)



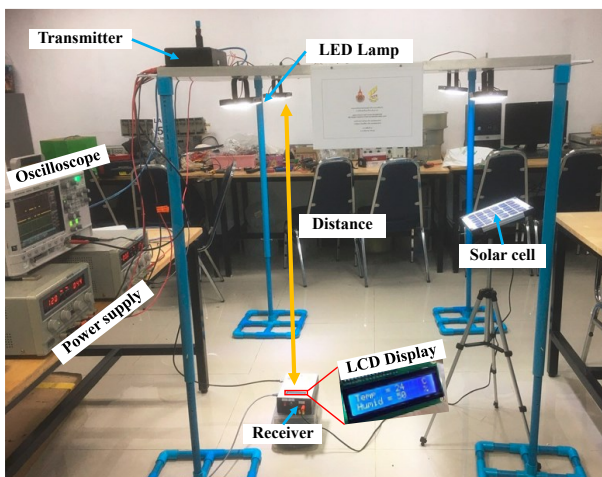
รูปที่ 9 ไลอองแกรมการทดสอบระบบของภาครับและภาคส่งสำหรับการถ่ายโอนข้อมูล



รูปที่ 10 เปรียบเทียบสัญญาณจากภาคส่งและวงจรการรับ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการถ่ายโอนข้อมูลผ่านคลื่นแสงที่มองเห็นภายในอาคาร

การทดสอบการส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นจากภาคส่งไปยังภาครับด้วยแอลอีดีแสงขาวผ่านช่องทางอากาศว่าง ด้วยระยะการสื่อสาร 100 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดสัญญาณของภาคส่งเทียบกับสัญญาณที่ภาครับแต่ละตำแหน่งของวงจร ด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) แสดงไดอะแกรมและผลการทดสอบดังรูปที่ 9 และ รูปที่ 10 ตามลำดับ

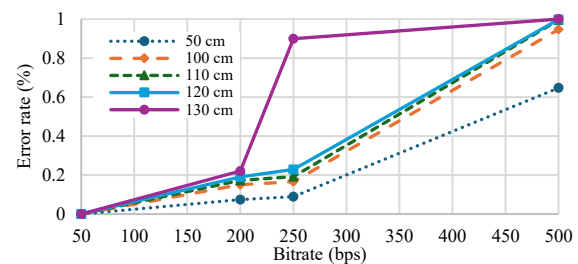
จากรูปที่ 10 แสดงสัญญาณข้อมูลจากภาคส่ง เทียบกับสัญญาณที่รับได้ด้วยภาครับ โดยเรียงลำดับจากบนลงล่างดังนี้: สัญญาณจากภาคส่ง วงจร TIA วงจร Non-invert วงจร LPF วงจร AGC และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ตามลำดับ เห็นได้ว่าสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของภาครับได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมต่อการนำเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับการถอดรหัสข้อมูล โดยกระบวนการในขั้นแรกโฟโต้ไดโอดได้รับสัญญาณแสงและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่วงจร TIA ซึ่งสัญญาณที่ออกจาก TIA นั้นมีขนาดต่ำ (~50mVpp) และมีสัญญาณรบกวนสูง จากนั้น วงจร Non-invert ที่มีอัตราขยาย 11 เท่าทำการขยายสัญญาณให้สูงขึ้น (~500mVpp) แต่ยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่บางส่วน สัญญาณถูกส่งผ่านวงจร LPF เพื่อลดสัญญาณรบกวนดังกล่าว พร้อมทั้งปรับระดับสัญญาณที่เคยมีการขยับระดับ (Offset Level) ให้อยู่ในระดับกราวด์ด้วยตัวเก็บประจุ C4 (DC block) ซึ่งทำให้สัญญาณมีระดับแรงดันแบบแบบสองระดับ (Dual-voltage) จากนั้น วงจร AGC ทำหน้าที่รักษามวลสัญญาณให้คงที่ โดยเฉพาะในกรณีที่ระยะทางการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้สัญญาณอ่อนลง สุดท้ายวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comp.) ทำการตัดสินใจระดับสัญญาณเชิงดิจิทัล โดยใช้แรงดันอ้างอิงที่ 0V ส่งผลให้สัญญาณที่ออกมาจากวงจร Comp. มีแรงดันเป็น 0V และ 5V เหมาะสมสำหรับการนำสัญญาณไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



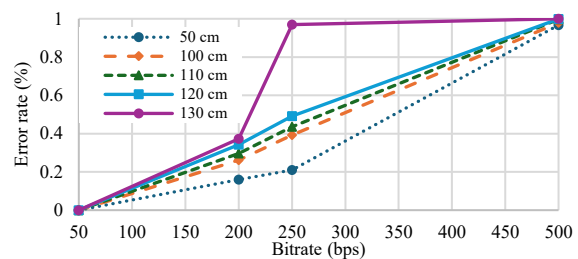
รูปที่ 11 การทดสอบระบบ SLIPT

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายโอนข้อมูล ได้ทำการทดสอบเมื่อระยะทางการสื่อสารไร้สายและอัตราบิตข้อมูล (Bitrate) เปลี่ยนแปลง แสดงการทดสอบดังรูปที่ 11 โดยทำการติดตั้งให้แอลอีดีมีระยะความสูงห่างจากตัวรับตั้งแต่ 50, 100, 110, 120 และ 130 เซนติเมตร

โดยมีความเข้มแสงที่ตกกระทบโฟโต้ไดโอดเท่ากับ 1200, 320, 260, 240, และ 220 Lux ตามลำดับ และทำการปรับอัตราบิตข้อมูลในการส่งเป็น 50, 200, 250, และ 500bps ทำการทดสอบในพื้นที่ปิดปราศจากสัญญาณแสงจากแหล่งกำเนิดอื่นรบกวน จากนั้นทำการส่งข้อมูลด้วยชุดส่องสว่างแอลอีดีแสงขาว 1 ชุด พร้อมทำการส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นจำนวน 1000 ชุดข้อมูล คัดลอกกัน พร้อมบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อหาร้อยละความผิดพลาด (Error rate) ของข้อมูล ผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 ผลการทดสอบร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลอุณหภูมิ

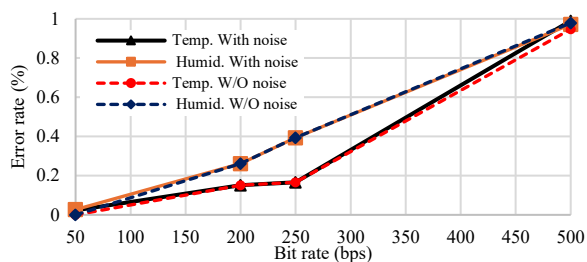


รูปที่ 13 ผลการทดสอบร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลความชื้น

จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราบิตข้อมูลในการส่งมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้อัตราความผิดพลาดข้อมูลสูงขึ้นด้วย ในทางเดียวกันเมื่อระยะทางการสื่อสารเชิงแสงไร้สายมากขึ้น อัตราความผิดพลาดข้อมูลมีแนวโน้มสูงตามไปด้วย โดยเมื่ออัตราการส่งข้อมูลที่ 250bps อัตราความผิดพลาดของข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ เมื่อระยะทางไม่เกิน 50 เซนติเมตร และมีอัตราความผิดพลาดมากกว่าร้อยละ 50 เมื่อระยะทางมากกว่า 130 เซนติเมตร โดยอัตราความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30 ก็ต่อเมื่อระยะทางการสื่อสารต่ำกว่า 110 เซนติเมตร และอัตราบิตการส่งข้อมูลไม่เกิน 200bps

จากนั้นทำการทดสอบระบบ SLIPT ภายใต้สภาวะแสงรบกวน โดยใช้ชุดส่องสว่างแอลอีดี 1 ชุด สำหรับการส่งข้อมูล และกำหนดให้ชุดส่องสว่างอีก 3 ชุด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงรบกวนที่ระยะ 100 เซนติเมตร จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดของข้อมูลระหว่างกรณี ไม่มีแสงรบกวน (W/O noise) และ มีแสงรบกวน (With noise) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 14 จากผลการทดสอบแสดง

ให้เห็นว่าแสงรบกวนจากภายนอกไม่มีผลกระทบต่ออัตราความผิดพลาดของการถ่ายโอนข้อมูลในระบบ SLIPT ที่นำเสนอ



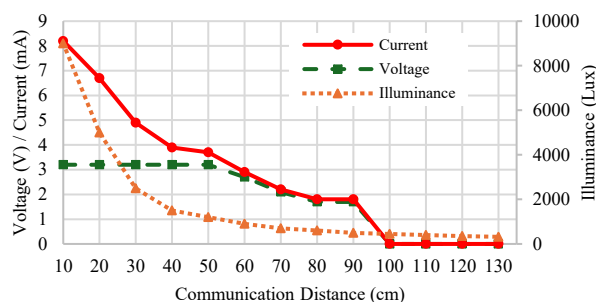
รูปที่ 14 ผลการทดสอบร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลกรณีมีและไม่มีสัญญาณแสงจากภายนอกรบกวน

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระบบนั้นสามารถถ่ายโอนข้อมูลด้วยอัตราบิตข้อมูลไม่สูงมากเนื่องจากปัจจัยหลายประการ โดยประการหลักคือ ความสามารถของแอลอีดีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นแอลอีดีทั่วไปตามท้องตลาด ถูกออกแบบมาสำหรับการส่องสว่างเท่านั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการส่งข้อมูล รวมถึงการออกแบบวงจรภาคส่งและภาครับยังต้องมีการพัฒนาเพื่อให้มีความสามารถในการถ่ายโอนข้อมูลความเร็วสูงได้ ในเบื้องต้นสามารถทำการทดสอบโดยการเพิ่มอัตราขยายของวงจรขยายหลังวงจร TIA ให้สูงขึ้นได้นอกจากนี้แสงที่ใช้สำหรับระบบ SLIPT นั้นทำหน้าที่ทั้งการส่องสว่างสำหรับการถ่ายโอนข้อมูลและพลังงาน ดังนั้นการออกแบบและพัฒนาเทคนิคการมอดูเลตนั้นเป็นส่วนหนึ่งที่สามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลโดยไม่ลดประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน เช่น เทคนิคการมอดูเลตแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) [17] สามารถช่วยเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลและลดสัญญาณรบกวน หรือ การมอดูเลตแบบไฮบริด (Hybrid Modulation) เช่น การใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time-Division Multiplexing : TDM) เพื่อแยกช่วงเวลาการส่งข้อมูลและถ่ายโอนพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [18] แต่ถึงอย่างไรก็ตามความเร็วของอัตราบิตข้อมูลที่ทดสอบนั้น เพียงพอต่อการส่งข้อมูล ในระบบโครงข่ายตรวจรู้ไร้สาย ซึ่งต้องการถ่ายโอนข้อมูลที่มีความเร็วไม่สูงมาก

3.2 การทดสอบการถ่ายโอนกำลังงาน (Power Transfer)

สำหรับการทดสอบการถ่ายโอนกำลังงานผ่านคลื่นแสงที่มองเห็นภายในอาคารนั้น ได้ทำการทดสอบเมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแอลอีดีแสงขาวและโซลาร์เซลล์ ตั้งแต่ 10 ถึง 130 เซนติเมตร ซึ่งส่งผลถึงความเข้มแสงที่ตกกระทบโซลาร์เซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 15 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะทางมากขึ้นความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานลดลง โดยระบบที่นำเสนอสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ดีเมื่อระยะทางการสื่อสารน้อยกว่า 50 เซนติเมตร ซึ่งมีความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 1200 Lux และจะมีแรงดัน

และกระแสที่สามารถเก็บเกี่ยวได้เท่ากับ 3.2V และ 500mA ตามลำดับ สำหรับการทดสอบการถ่ายโอนกำลังงานผ่านคลื่นแสงที่มองเห็นภายในอาคารของระบบ SLIPT ที่นำเสนอ นั้น ได้ทำการทดสอบเมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแอลอีดีแสงขาวและโซลาร์เซลล์ ตั้งแต่ 10 ถึง 130 เซนติเมตร นั้นหมายถึงความเข้มแสงที่ตกกระทบโซลาร์เซลล์เปลี่ยนไป ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 15 จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่าเมื่อระยะทางมากขึ้นความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานลดลง โดยระบบที่นำเสนอสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ดีเมื่อระยะทางการสื่อสารน้อยกว่า 50 เซนติเมตร ซึ่งมีความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 1200 Lux และจะมีแรงดันและกระแสที่สามารถเก็บเกี่ยวได้เท่ากับ 3.2V และ 500mA ตามลำดับ



รูปที่ 15 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของชุดเก็บเกี่ยวพลังงานของภาครับ

ความสามารถของการเก็บเกี่ยวพลังงานของระบบที่นำเสนอ นั้น ยังมีประสิทธิภาพไม่มากนัก โดยมีแนวทางในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังงาน เช่น ตัวรับพลังงานในระบบ SLIPT ต้องสามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้โซลาร์เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ออกแบบชุดเก็บเกี่ยวพลังงาน วงจรควบคุมแรงดัน และไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้พลังงานต่ำ หรือทำการออกแบบวงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ใช้พลังงานต่ำ (Ultra-Low Power Boost Converter) เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ของระบบ เป็นต้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอ ระบบถ่ายโอนข้อมูลและพลังงานผ่านคลื่นแสงแบบพร้อมกัน (Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer : SLIPT) โดยใช้แอลอีดีสำหรับการให้แสงสว่างภายในอาคาร มุ่งเน้นอุปกรณ์ที่เรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และทำซ้ำได้ง่าย เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการทำงานของระบบ ซึ่งประกอบด้วยภาคส่งและภาครับที่ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถถ่ายโอนข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราความผิดพลาดต่ำกว่าร้อยละ 30 ด้วยระยะไม่เกิน 110 เซนติเมตรที่ 200 bps ซึ่งเพียงพอต่อการส่งข้อมูลในระบบโครงข่ายตรวจรู้ไร้สาย ที่ต้องการถ่ายโอนข้อมูลที่มีความเร็วไม่สูงมาก นอกจากนี้ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างเสถียรภายใต้แสงรบกวนจากภายนอก ในด้านการเก็บเกี่ยวพลังงาน พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในระยะ

50 เซนติเมตร ภายใต้ความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 1200 Lux จากการออกแบบ พัฒนา และทดสอบระบบ SLIPT ที่นำเสนอ พบว่า ยังมี ความท้าทายและโอกาสในการวิจัยเพิ่มเติม เช่น การปรับปรุง ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลและพลังงาน การวิเคราะห์จุดสมมูลระหว่าง อัตราการส่งข้อมูลและอัตราการถ่ายโอนพลังงาน การศึกษาผลกระทบ ของสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เช่น แสงรบกวนเงา และการสะท้อน แสง การพัฒนาตัวรับที่สามารถรับพลังงานและข้อมูล ได้อย่างมี ประสิทธิภาพมากขึ้น การปรับปรุงประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดหรือ โซลาร์เซลล์ให้สามารถแปลงพลังงานได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงการพัฒนา กลไก การเข้ารหัสข้อมูลเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของการสื่อสาร ระบบที่นำเสนอ นี้สามารถยังสามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับ การพัฒนาเทคโนโลยี SLIPT ในอนาคต โดยมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับ เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ภายในอาคาร และ อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งที่ต้องการพลังงานต่ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. N. Ismail and M. H. Salih, "A review of visible light communication (VLC) technology," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2213, no. 1, p. 020289, Mar. 2020, doi: 10.1063/5.0000109.
- [2] A. R. Ndjiongue, T. M. N. Ngatched, O. A. Dobre, and A. G. Armada, "VLC-Based Networking: Feasibility and Challenges," *IEEE Network*, vol. 34, no. 4, pp. 158–165, Jul. 2020, doi: 10.1109/MNET.001.1900428.
- [3] R. Sarwar *et al.*, "Visible light communication using a solar-panel receiver," in *2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, Aug. 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICOON.2017.8121577.
- [4] P. Sangmahamad, V. Pirajnanchai, and S. Junon, "Experimental Validation and Performance Analysis for Simultaneous Illumination and Communication System of Indoor Commercial white-LED Lamps," presented at the 13th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Chiang Mai, Thailand. doi: 10.1109/ICITEE53064.2021.9611938.
- [5] ภูเบศ แสงมะสะหมัด และ กำพล วรดิษฐ์, "เทคโนโลยีการสื่อสาร ข้อมูลและให้กำลังไร้สาย," *NBTC JOURNAL*, vol. 2, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2018.
- [6] P. Sangmahamad, K. Woradit, and P. Saengudomlert, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Multi-User OFDMA Networks with Physical Secrecy," *Sensors*, vol. 22, no. 10, Art. no. 10, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22103814.
- [7] S. Ma, F. Zhang, H. Li, F. Zhou, Y. Wang, and S. Li, "Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer in Visible Light Communication Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 12, pp. 5818–5830, Dec. 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2939242.
- [8] A. Alabsi *et al.*, "Wireless Power Transfer Technologies, Applications, and Future Trends: A Review," *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 10, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2025, doi: 10.1109/TSUSC.2024.3380607.
- [9] J. I. D. O. Filho, O. Alkhazragi, A. Trichili, B. S. Ooi, M.-S. Alouini, and K. N. Salama, "Simultaneous Lightwave and Power Transfer for Internet of Things Devices," *Energies*, vol. 15, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15082814.
- [10] P. D. Diamantoulakis and G. K. Karagiannidis, "Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer (SLIPT) for Indoor IoT Applications," in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Dec. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254781.
- [11] S. Ghasvarianjahromi, M. Karbalayghareh, P. D. Diamantoulakis, G. K. Karagiannidis, and M. Uysal, "Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer in Underwater Visible Light Communications," in *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sep. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/PIMRC.2019.8904146.
- [12] K. Ye, C. Zou, and F. Yang, "Dual-Hop Underwater Optical Wireless Communication System With Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer," *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 6, pp. 1–7, Dec. 2021, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3118047.
- [13] V. K. Papanikolaou *et al.*, "Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer in 6G Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 3, pp. 16–22, Mar. 2024, doi: 10.1109/MCOM.002.2300290.
- [14] G. Pan, P. D. Diamantoulakis, Z. Ma, Z. Ding, and G. K. Karagiannidis, "Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer: Policies, Techniques, and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28250–28257, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2901855.
- [15] "MC33063A data sheet, product information and support | TI.com." Accessed: Mar. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/MC33063A>.
- [16] "BQ25504 data sheet, product information and support | TI.com." Accessed: Mar. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/BQ25504>.

- [17] Y. A. Zenhom, E. K. I. Hamad, M. Alghassab, and M. M. Elnabawy, "Optical-OFDM VLC System: Peak-to-Average Power Ratio Enhancement and Performance Evaluation," *Sensors*, vol. 24, no. 10, Art. no. 10, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24102965.
- [18] O. Alamu, T. O. Olwal, and K. Djouani, "Simultaneous lightwave information and power transfer in optical wireless communication networks: An overview and outlook," *Optik*, vol. 266, p. 169590, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169590.