การศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงสำหรับการประหยัดพลังงานในอาคาร

THE STUDY AND ANALYSIS OF HARMONIC FROM USING LIGHT EMITTING DIODE FOR SAVING ENERGY IN BUILDING

ศุลี บรรจงจิตร* *วินัย พรพจน์รัตนะกุล*

***Sulee Bunjongjit**,* *Vinai Pornpojratanakul*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin.

***Corresponding author, e-mail:** suntitiatim@hotmail.com*

***Received:** 19 March 2019; **Revised:** 3 June 2019; **Accepted:** 13 June 2019*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันหลอดไดโอดเปล่งแสงถูกนำมาใช้ในระบบแสงสว่างทั้งภายในและภายนอก อย่างไรก็ตามการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงในระบบแสงสว่างอาจส่งผลต่อคุณภาพไฟฟ้า เนื่องจากหลอดไดโอดเปล่งแสงต้องมีวงจรขับหลอดเพื่อใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิดที่มีการใช้งานจริงในประเทศไทย โดยใช้ชุดทดลอง แบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา ได้แก่ 1. หลอดไดโอดเปล่งแสงขั้ว E27 2. หลอดไดโอดเปล่งแสงแบบ Panel และ 3. หลอดไดโอดเปล่งแสงขั้วหลากหลาย นอกจากนี้ยังนำเสนอการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากการใช้งานหลอดไดโอดเปล่งแสงในสภาวะปกติและในสภาวะการหรี่แสงกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงมีคุณสมบัติประหยัดพลังงาน รวมถึงการหรี่แสงด้วย อย่างไรก็ตามการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงจำเป็นต้องพิจารณาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากหลอดในแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะของฮาร์มอนิกแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

คำสำคัญ: คุณภาพไฟฟ้า หลอดไดโอดเปล่งแสง ฮาร์มอนิก การหรี่แสง

Abstract

Nowadays, LEDs are generally employed in both internal and external lighting systems. However, using a light emitting diode in the lighting system may affect the power quality due to the driver operation-converts alternating current (AC), to direct current (DC). This paper presents the measurement and analysis of the power quality of various LED types used in Thailand by using an experimental setup. The experimental studies are divided into three cases: 1. E27 of LED luminaires, 2. Panels of Led luminaires, and 3. Various lamp bases of LED luminaires. In addition, the current harmonic distortion when the LEDs are dimmed and undimmed are compared to the IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2: 2018 standard. Results show LEDs giving a performance of energy saving and dimming. However, the use of LEDs requires consideration of the harmonic issues, since each type of LEDs different harmonic characteristics depending on the manufacturer.

Keywords: Power quality, Light emitting diode (LED) luminaire, Harmonic, Dimming

บทนำ

ในสมัยก่อนอุปกรณ์กำเนิดแสงสว่างส่วนใหญ่ที่ใช้ในอาคารเป็นชนิดหลอดไส้ (Incandescent Lamp) มีประสิทธิภาพการส่องสว่างต่ำ อายุการใช้งานสั้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1] ต่อมาหลอดไส้จึงถูกแทนที่ด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ได้แก่ หลอดคายประจุความเข้มสูง (High-Intensity Discharge) และหลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescent Lamp) เนื่องจากมีอายุการใช้งานยาวนานและประสิทธิภาพการส่องสว่างที่ดีกว่า [1-2] อย่างไรก็ตามหลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ยังมีข้อเสียสำหรับประสิทธิภาพของแสงสว่างที่เสื่อมลงตามการใช้งานเมื่อเทียบกับแสงสว่างในตอนเริ่มต้นใช้งานและมีสารปรอทบรรจุภายในหลอดด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาแหล่งกำเนิดแสงสว่างชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพทางแสงสว่างและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาทดแทน หนึ่งในอุปกรณ์แสงสว่างที่กำลังเป็นที่นิยมคือการใช้เทคโนโลยีจากสารกึ่งตัวนำเป็นแหล่งกำเนิดแสงสว่าง เรียกว่าหลอดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) ในปัจจุบันเทคโนโลยีหลอดไดโอดเปล่งแสงได้ถูกศึกษาและพัฒนาจนมีประสิทธิภาพมากมาย จนสามารถทดแทนแหล่งกำเนิดแสงสว่างชนิดอื่น ๆ ได้ทั้งหมด [2-3]

ข้อได้เปรียบของหลอดไดโอดเปล่งแสง คือ อายุการใช้งานที่ยาวนาน (มากกว่า 50,000 ชั่วโมง) มีเวลาการตอบสนองเร็ว (การสลับการเปิด - ปิดระดับไมโครวินาที) ขนาดกระทัดลัด การระบายความร้อนดีกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น ไม่มีสารปรอท ไม่มีการปล่อยรังสีอินฟาเรดที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ มีย่านอุณหภูมิสีของแสงหลากหลายและสามารถควบคุมสีของแสงได้หลากหลาย รวมถึงคุณสมบัติในการหรี่แสง [3-4] นอกจากนี้หลอดไดโอดเปล่งแสงยังช่วยลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย [5] ถึงอย่างไรก็ตาม มีงานวิจัย [6-7] กล่าวว่าการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า เช่น การเกิดความผิดพี้ยนฮาร์มอนิก เป็นต้น

ส่วนใหญ่ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกจากหลอดไดโอดเปล่งแสงจะมีค่ามากกว่าการใช้หลอดไฟฟ้าชนิดอื่นเนื่องจากหลอดไดโอดเปล่งแสงจำเป็นต้องใช้วงจรขับหลอด ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่งผลให้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ในงานวิจัย

[8-9] แสดงให้เห็นว่า หลอดไดโอดเปล่งแสงในท้องตลาดปัจจุบันมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกและตัวประกอบกำลังที่หลากหลาย ถึงแม้ว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงมีพิกัดกำลังต่ำอาจไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากนัก แต่เมื่อนำมาใช้ในอาคารในปริมาณมาก ๆ จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้า เช่น ระบบไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบกำลังลดลงและมีค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงไหลเข้าระบบไฟฟ้า ดังนั้นต้องมีมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมการปล่อยฮาร์มอนิกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง เช่น มาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 [10] เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงสว่างจากหลอดไดโอดเปล่งแสงกำลังเป็นที่นิยมและมีการใช้งานกันแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยทางวิชาการหลายบทความศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าหลักจากมีการติดตั้งหลอดไดโดเปล่งแสง [11-14] งานวิจัย [11] ทำการศึกษาการปล่อยฮาร์มอนิกจากหลอดไดโอดเปล่งแสงโดยใช้การจำลองทางซอฟแวร์ ในงานวิจัย [12] ศึกษาคุณภาพไฟฟ้าและผลกระทบต่อการใช้หลอดไดโดเปล่งแสงจากการใช้งานจริง สำหรับงานวิจัย [13-14] เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบจากหลอดไดโอดเปล่งแสงในห้องปฏิบัติการ ผลลัพธ์จากงานวิจัยต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากฮาร์มอนิกของหลอดไดโอดเปล่งแสงเพียงหลอดเดียวส่งผลกระทบต่อค่าความผิดเพี้ยนรวมต่อระบบไฟฟ้าน้อยมาก

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิดที่มีการใช้งานจริงโดยใช้ชุดทดลอง พารามิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่พิจารณา ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง ความถี่ไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกแรงดันไฟฟ้ารวม ($\%THD_V$) และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสไฟฟ้ารวม ($\%THD_i$) รวมถึงการศึกษาคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในขณะทำการหรี่แสง นอกจากนี้ ทำการเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสไฟฟ้าในแต่ละลำดับจากหลอดไดโอดเปล่งแสงแต่ล่ะชนิดกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม C

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิดที่มีการใช้งานทั่วไป
2. ศึกษาคุณภาพไฟฟ้าและการใช้พลังงานของหลอดไดโอดเปล่งแสงในขณะทำการหรี่แสงเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากหลอดไดโอดเปลงแสงในแต่ละชนิดเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม C

วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการศึกษาวิจัยคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดต่าง ๆ ที่มีการใช้งานในอาคารทั่วไป จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลกระทบค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากหลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดต่าง ๆ เทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018

จากตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของหลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาคุณภาพไฟฟ้าจากการใช้งานหลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิด เนื่องจากหลอดไดโอดเปล่งแสงมีหลากหลายยี่ห้อและชนิดการใช้งานในการทดลองนี้จึงทำการเลือกสุ่มตัวอย่างหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีการจำหน่ายตามท้องตลาดมาวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าซึ่งเป็นหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีการใช้งานจริงทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา ได้แก่

กรณีที่ 1 หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดขั้ว E27 มีทั้งหมด 3 หลอด ได้แก่ หลอด E-nD1 พิกัดกำลังไฟฟ้า 8 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด E-D1 พิกัดกำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ สามารถหรี่แสงได้ และหลอด E-D2 พิกัดกำลังไฟฟ้า 9 วัตต์

สามารถหรี่แสงได้ หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้ถูกนำมาใช้แทนหลอดไส้ขั้ว E27 และหลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ขั้ว E27 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการส่องสว่าง การประยัดพลังงานและอายุการใช้งานดีกว่า

กรณีที่ 2 หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิด Panel มีทั้งหมด 6 หลอด ได้แก่ หลอด P-6nD1 พิกัดกำลังไฟฟ้า 6 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด P-6nD2 พิกัดกำลังไฟฟ้า 6 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด P-6nD3 พิกัดกำลังไฟฟ้า 6วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด P-12nD1 พิกัดกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด P-12nD2 พิกัดกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ และหลอด P-12nD3 พิกัดกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในระบบแสงสว่างแบบโคมไฟดาวน์ไลท์

กรณีที่ 3 หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดขั้วหลากหลาย มีทั้งหมด 4 หลอด ได้แก่ หลอด C-24nD1 พิกัดกำลังไฟฟ้า 24 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด C-19nD2 พิกัดกำลังไฟฟ้า 19 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอด T-4nD1 พิกัดกำลังไฟฟ้า 4 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ และหลอด T-5nD2 พิกัดกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ ไม่สามารถหรี่แสงได้ หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดหลอด C-24nD1 นำมาใช้งานแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์กลม ส่วนหลอด C-19nD2 นิยมใช้แทนการใช้โคมไฟระย้าหรือโคมไฟซาลาเปาทั่วไป หลอด T-4nD1 และหลอด T-5nD2 นิยมใช้ติดตั้งทดแทนการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์รูปทรงแบบกระบอกตรงยาว (T8 และ T5) ซึ่งหลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้มีขนาด รูปทรงและน้ำหนักที่เบากว่า

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของหลอดไดแดเปล่งแสงชนิดต่าง ๆ

หลอด	รูปภาพ	รายละเอียด	หลอด	รูปภาพ	รายละเอียด
E-nD1		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 806 lm **กำลังไฟฟ้า:** 8W **ชนิด:** E27 **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้	P-12nD2		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 1350 lm **กำลังไฟฟ้า:** 12 W **ชนิด:** Panel
E-D1		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 806-320-80 lm **กำลังไฟฟ้า:** 9-3.5-1.5 W **ชนิด:** E27	P-12nD3		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 1230 lm **กำลังไฟฟ้า:** 12 W **ชนิด:** Panel
E-D2		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 855 lm **กำลังไฟฟ้า:** 9 W **ชนิด:** E27 **คุณสมบัติ:** หรี่แสงได้	C-18nD1		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 1920 lm **กำลังไฟฟ้า:** 24 W **ชนิด:** Circular lamp
P-6nD1		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 540 lm **กำลังไฟฟ้า:** 6W **ชนิด:** Panel **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้	C-19nD2		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 900 lm **กำลังไฟฟ้า:** 19 W **ชนิด:** Ceiling **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้

P-6nD2		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 304 lm **กำลังไฟฟ้า:** 6 W **ชนิด:** Panel **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้	T-4nD1		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 300 lm **กำลังไฟฟ้า:** 4 W **ชนิด:** T5 **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้
P-6nD3		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 340 lm **กำลังไฟฟ้า:** 6 W **ชนิด:** Panel **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้	T-5nD2		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** - **กำลังไฟฟ้า:** 5 W **ชนิด:** LED Super Slim **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้
P-12nD1		**ฟลักซ์การส่องสว่าง:** 900 lm **กำลังไฟฟ้า:** 12 W **ชนิด:** Panel **คุณสมบัติ:** หรี่แสงไม่ได้			

มาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018

มาตรฐานนี้ระบุถึงส่วนประกอบปริมาณฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าขาเข้าที่ถูกสร้างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทดสอบภายใต้เงื่อนไข โดยครอบคลุมในส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีกระแสเข้าไม่เกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟส ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีแรงดันปกติอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 220 โวลต์ โดยมาตรฐานนี้จะทำการแบ่งประเภทอุปกรณ์ เพื่อจัดกลุ่มในการกำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม (A, B, C และ D) ดังนี้

กลุ่ม A: อุปกรณ์ไฟฟ้าแบบสามเฟสสมดุล และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ไม่อยู่ในกลุ่มอื่น ๆ ซึ่งจะมีค่ากำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกตามตารางที่ 2

กลุ่ม B: ในกลุ่มนี้เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถถือได้ขณะใช้งานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้น ๆ (ไม่กี่นาที) เท่านั้น โดยจะมีค่ากำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเป็น 1.5 เท่าของตารางที่ 2

กลุ่ม C: ในกลุ่มนี้จะเป็นอุปกรณ์ส่องสว่าง รวมทั้งอุปกรณ์หรี่แสง จะมีค่ากำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกตามตารางที่ 3

กลุ่ม D: ในกลุ่มนี้จะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นกระแสเข้าพิเศษ และกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้าไม่เกิน 600 วัตต์ จะมีค่ากำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิก ตามตารางที่ 3

โดย กลุ่ม C จะเป็นอุปกรณ์ส่องสว่าง รวมทั้งอุปกรณ์หรี่แสง และมีค่ากำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังตารางที่ 3 อย่างไรก็ดี ถ้าอุปกรณ์ส่องสว่างต่ำกว่าหรือเท่ากับ 25 วัตต์ จะต้องใช้ค่ากำหนดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในกลุ่ม D ดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนั้นในขอบเขตของการศึกษาคุณภาพไฟฟ้าจากการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงในชุดทดลอง ทำการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม

ตารางที่ 2 ค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับอุปกรณ์กลุ่ม A

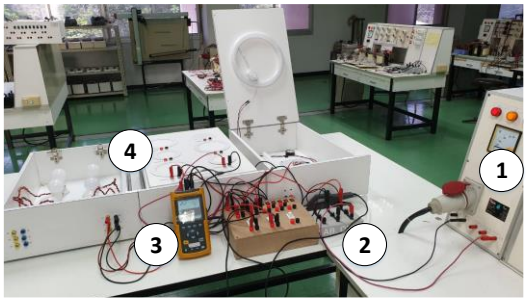
ลำดับฮาร์มอนิกส์ (n)	ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์มากที่สุดที่ยอมรับได้
	ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่
3	2.30
5	1.44
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	0.15x15/n
	ฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	0.23x8/n

ตารางที่ 3 ค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับกลุ่ม C และ D

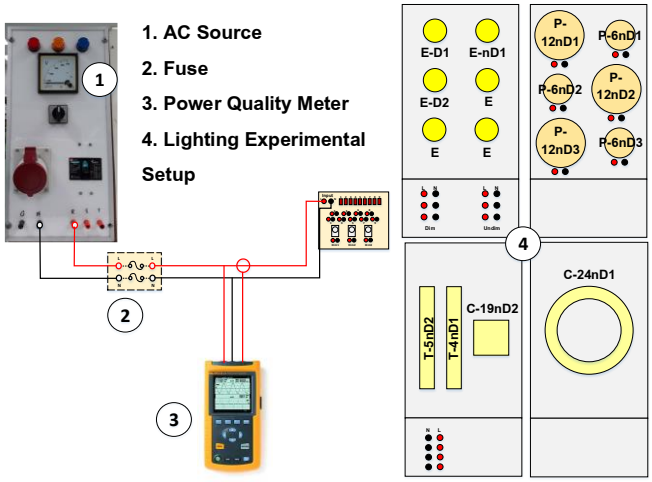
ลำดับฮาร์มอนิก (n)	อุปกรณ์กลุ่ม C	อุปกรณ์กลุ่ม D	
	ค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสความถี่หลักมูล (%f)	ค่ากระแสฮาร์มอนิกมากที่สุดที่ยอมรับได้ต่อวัตต์ (mA/W)	ค่ากระแสฮาร์มอนิกมากที่สุดที่ยอมรับได้ (A)
2	2	3.4	2.03
3	30*λ	1.9	1.14
5	10	1.0	0.77
7	7	0.5	0.40
9	5	0.35	0.33
$11 \leq n \leq 39$ (เฉพาะลำดับคี่)	3	3.85/n	ดูตารางที่ 2

** λ คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor)

ชุดทดลองถูกออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบคุณภาพไฟฟ้าจากการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิด แสดงดังภาพที่ 1 ชุดทดลองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (230 V 50 Hz) จากห้องทดลอง (หมายเลข 1) ผ่านฟิวส์ (หมายเลข 2) สำหรับป้องกันการเกิดการลัดวงจรในขณะทำการทดลอง หมายเลข 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความถี่ ตัวประกอบกำลัง $\%THD_v$ และ $\%THD_i$ หมายเลข 4 แสดง ชุดหลอดไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในการศึกษาคุณภาพไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา ได้แก่ หลอดชนิดขั้ว E27 หลอดชนิดขั้ว Panel และหลอดชนิดขั้วหลากหลาย แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1



(ก) ชุดทดลองการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงหลายชนิด



(ข) แผนภาพแสดงชุดทดลองและการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า

ภาพที่ 1 ชุดทดลอง

ผลการวิจัย

คุณภาพไฟฟ้าจากการตรวจวัดหลอดไดโอดเปล่งแสงแสดงดังตารางที่ 4 สำหรับคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 1 ตารางที่ 5 สำหรับคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 2 และ ตารางที่ 6 สำหรับคุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 3 โดยข้อมูลในตารางประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง ความถี่ ตัวประกอบกำลัง $\%THD_v$ และ $\%THD_i$

จากตารางที่ 4 ผลจากการตรวจวัดหลอดไดโอดเปล่งแสงกรณีที่ 1 โดยใช้พิกัดระบบ 230 V 50 Hz พบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติหรี่แสงได้มีกำลังสูญเสียภายในหลอดสูงกว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติหรี่แสงไม่ได้ พิจารณาเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงของหลอด E-nD1 (ไม่หรี่แสง 1 หลอด) และหลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) พบว่าหลอด E-nD1 มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 33.7% ส่วนหลอด E-D1 มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 48.8% กำลังสูญเสียดังกล่าวเกิดจากการทำงานของชุดขับหลอด ดังนั้นหลอด E-nD1 ไม่มีการทำงานในลักษณะหรี่แสง ส่งผลให้มีกำลังสูญเสียน้อยกว่า สำหรับการหรี่แสงของหลอด E-D1 ที่ 80% และ 50% พบว่าสามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงได้ตามเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการหรี่แสง ดังนั้นการใช้หลอดที่มีคุณสมบัติหรี่แสงจึงสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าการหรี่แสงจะทำให้มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลดลง รวมถึงค่า $\%THD_i$ ที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าสูงในขณะทำการหรี่แสง

สำหรับการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติไม่หรี่แสง (E-nD1) ร่วมกับหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติหรี่แสง (E-D1) ได้แก่ หลอด E-nD1 กับหลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) หลอด E-nD1 กับหลอด E-D1 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) และหลอด E-nD1 กับหลอด E-D1 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) จากการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าพบว่าทั้งสามลักษณะการใช้งานมีกำลังไฟฟ้าจริงที่ตรวจวัดได้มากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงตามค่าพิกัดประมาณ 20% เนื่องจากเป็นกำลังสูญเสียที่เกิดภายในวงจรขับหลอด โดยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและค่า $\%THD_i$ ที่ได้จะอยู่ระหว่างค่าที่ตรวจวัดจากหลอด E-nD1 และหลอด E-D1 ส่งผลให้การใช้หลอด E-nD1 กับหลอด E-D1

(หรี่แสง 50% 1 หลอด) มีค่า %THD_i สูงกว่าการใช้หลอด E-nD1 กับหลอด E-D1 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) และหลอด E-nD1 กับหลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) ตามลำดับ

สำหรับการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติหรี่แสง (E-D1) ร่วมกับหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติหรี่แสง (E-D2) ได้แก่ หลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) หลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) หลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) หลอด E-D1 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) หลอด E-D1 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) และหลอด E-D1 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) พบว่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของหลอดประมาณ 20% เหมือนกับกรณีการใช้หลอดได้โอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติไม่หรี่แสงร่วมกับหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีคุณสมบัติหรี่แสง ถึงแม้ว่าการหรี่แสงจะช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานสำหรับการใช้งานในช่วงที่ไม่ต้องการค่าความสว่างมาก แต่ในช่วงการหรี่แสงของหลอดไดโอดเปล่งแสงจะส่งผลให้มีคุณภาพไฟฟ้าโดยรวมแย่ลง โดยพิจารณาเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและ %THD_i จากการใช้หลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) เทียบกับการใช้หลอด E-D1 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) กับหลอด E-D2 (หรี่แสง 50% 1 หลอด)

ตารางที่ 5 แสดงผลการตรวจวัดหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 2 โดยใช้พิกัดระบบ 230 V 50 Hz แบ่งเป็นการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิดแบบ panel พิกัดกำลังไฟฟ้า 6 W จำนวน 3 หลอด (P-6nD1, P-6nD2, และ P-6nD3) และพิกัดกำลังไฟฟ้า 12 W จำนวน 3 หลอด (P-12nD1, P-12nD2, และ P-12nD3) แสดงให้เห็นว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน สามารถมีคุณภาพไฟฟ้าที่แตกต่างกันได้ จากข้อมูลคุณภาพไฟฟ้าพบว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดมีมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกันด้วย สำหรับค่า %THD_i พบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงในแต่ละชนิดมีค่า %THD_i ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวงจรขับหลอดที่ผู้ผลิตใช้ในแต่ละยี่ห้อใช้ ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้จากข้อมูลที่ระบุไว้กับผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีนี้ไม่ส่งผลต่อค่าความถี่และ %THD_v

ตารางที่ 4 คุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 1

หลอด	ข้อมูล	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้าจริง (W)	ความถี่ (Hz)	ตัวประกอบกำลัง	%THD_v (%)	%THD_i (%)
E-nD1	8 W (ไม่หรี่แสง 1 หลอด)	223.8	0.07	10.7	50	0.70	1.8	96.6
E-D1	9 W (หรี่แสง 100% 1 หลอด)	224.5	0.14	13.4	50	0.30	1.7	251.6
E-D1	9 W (หรี่แสง 80% 1 หลอด)	214.8	0.23	10.7	50	0.22	1.8	444.3
E-D1	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)	224.3	0.19	6.5	50	0.18	1.8	481.7
E-nD1, E-D1	8 W (ไม่หรี่แสง 1 หลอด)	224.0	0.20	20.2	50	0.41	1.5	191.0
	9 W (หรี่แสง 100% 1 หลอด)							
E-nD1, E-D1	8 W (ไม่หรี่แสง 1 หลอด)	223.7	0.24	18.5	50	0.36	1.8	268.4
	9 W (หรี่แสง 80% 1 หลอด)							
	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)							

หลอด	ข้อมูล	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้าจริง (W)	ความถี่ (Hz)	ตัวประกอบกำลัง	$\%THD_v$ (%)	$\%THD_i$ (%)
E-nD1,	8 W (ไม่หรี่แสง 1 หลอด)	223.3	0.20	14.7	50	0.36	2.0	286.3
E-D1	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)							
E-D1,	9 W (หรี่แสง 100% 1 หลอด)	222.4	0.23	21.5	50	0.45	2.0	211.3
E-D2	9 W (หรี่แสง 100% 1 หลอด)							
E-D1,	9 W (หรี่แสง 100% 1 หลอด)	225.2	0.23	19.0	50	0.36	1.9	250.5
E-D2	9 W (หรี่แสง 80% 1 หลอด)							
E-D1,	9 W (หรี่แสง 100% 1 หลอด)	224.9	0.22	16.7	50	0.35	1.9	284.0
E-D2	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)							
E-D1,	9 W (หรี่แสง 80% 1 หลอด)	223.9	0.24	16.9	50	0.34	1.9	287.1
E-D2	9 W (หรี่แสง 80% 1 หลอด)							
E-D1,	9 W (หรี่แสง 80% 1 หลอด)	224.0	0.25	13.1	50	0.29	1.8	335.5
E-D2	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)							
E-D1,	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)	219.4	0.18	10.7	50	0.28	1.4	339.3
E-D2	9 W (หรี่แสง 50% 1 หลอด)							

สำหรับผลการตรวจวัดหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 3 แสดงดังตารางที่ 6 (ทำการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้พิกัดระบบ 230 V 50 Hz) แบ่งเป็นการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าชนิดหลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายขั้ว ได้แก่ หลอด P-24nD1 ขนาด 24 W หลอด P-19nD2 ขนาด 18 W หลอด T-4nD1 ขนาด 4 W และหลอด T-5nD2 ขนาด 5 W พบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงในแต่ล่ะชนิดให้ค่ากำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ระบุไว้บนผลิตภัณฑ์ หลอดไดโอดเปล่งแสงทุกชนิดมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงกันประมาณ 0.6 อย่างไรก็ตามพบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงในแต่ละชนิดจะมีค่า $\%THD_i$ ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ขับหลอดที่ใช้ จากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าพบว่าหลอด T-4nD1 มีค่า $\%THD_i$ สูงกว่าหลอด T-5nD2 หลอด P-24nD1 และหลอด P-19nD2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงทั้งสี่ชนิดนี้ไม่ส่งผลต่อค่าความถี่และ $\%THD_v$

จากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงประเภทต่าง ๆ พบว่าหลอดไดโดเปล่งแสงในแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะ $\%THD_i$ ที่แตกต่างกัน ในส่วนนี้ทำการนำเสนอการเปรียบเทียบหลอดไดโอดเปล่งแสงทั้ง 3 กรณี กรณีที่ 1 หลอดชนิดขั้ว E27 กรณีที่ 2 หลอดชนิด Panel และกรณีที่ 3 หลอดชนิดขั้วหลากหลาย กับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม C เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับกับค่ามาตรฐาน โดยแสดงลำดับฮาร์มอนิกที่ 2, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 แสดงดังภาพที่ 2 สำหรับกรณีที่ 1 ภาพที่ 3 สำหรับกรณีที่ 2 และภาพที่ 4 สำหรับกรณีที่ 3

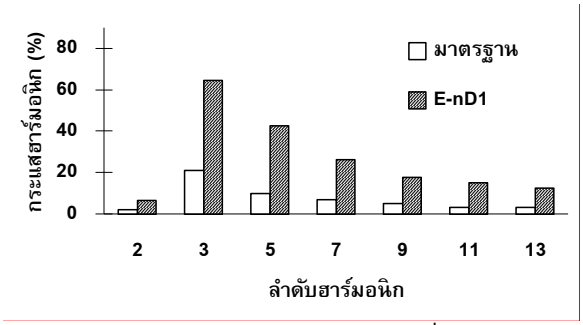
ตารางที่ 5 คุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 2

หลอด	ข้อมูล	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้าจริง (W)	ความถี่ (Hz)	ตัวประกอบกำลัง	% THD_v (%)	% THD_i (%)
P-6nD1	6 W (Panel)	217.8	0.06	7.3	50	0.60	1.2	130.5
P-6nD2	6 W (Panel)	217.5	0.05	6.1	50	0.62	1.3	185.8
P-6nD3	6 W (Panel)	217.5	0.05	6.1	50	0.56	1.3	92.5
P-12nD1	12 W (Panel)	218.3	0.09	11.8	49.95	0.58	1.5	177.6
P-12nD2	12 W (Panel)	218.5	0.09	13.4	49.95	0.61	1.5	127.6
P-12nD3	12 W (Panel)	218.1	0.09	13.8	50.03	0.60	1.5	175.9

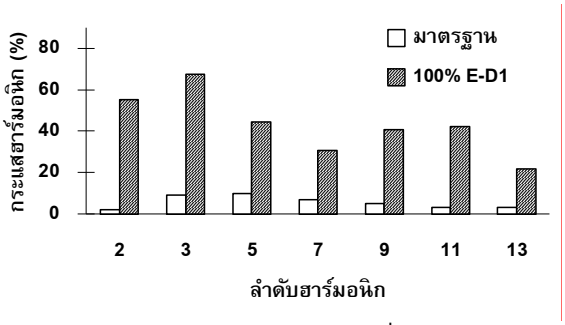
ตารางที่ 6 คุณภาพไฟฟ้าของหลอดไดโอดเปล่งแสงในกรณีที่ 3

หลอด	ข้อมูล	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้าจริง (W)	ความถี่ (Hz)	ตัวประกอบกำลัง	% THD_v (%)	% THD_i (%)
P-24nD1	24 W (circular lamp)	219.3	0.16	21.6	50	0.62	1.4	120.3
P-19nD2	19 W (ceiling)	219.1	0.15	20.0	50	0.62	1.4	98.00
T-4nD1	4 W (T5)	219.7	0.04	4.9	50	0.56	1.5	182.0
T-5nD2	5 W (LED super slim)	219.1	0.05	5.9	50	0.57	1.4	163.8

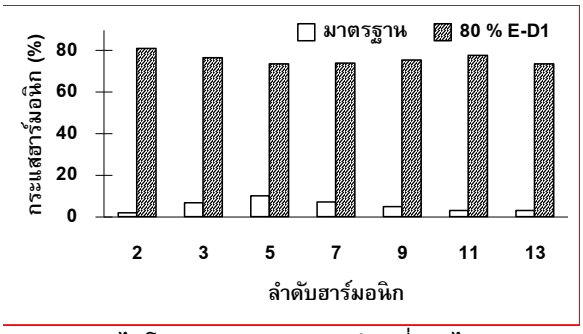
จากการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าในกรณีที่ 1 พบว่าหลอด E-nD1 (ไม่หรี่แสง 1 หลอด) มีค่า %THD_i เท่ากับ 96.6% เป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้งานในลักษณะอื่น ๆ ต่อมาหลอด E-D1 (หรี่แสง 100% 1 หลอด) พบว่ามีค่า %THD_i เท่ากับ 251.6% ในขณะที่ทำการหรี่แสงมีค่า %THD_i เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 444.3% สำหรับหลอด E-D1 (หรี่แสง 80% 1 หลอด) และ 481.7% สำหรับ หลอด E-D1 (หรี่แสง 50% 1 หลอด) อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับมาตรฐาน พบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงทุกชนิดมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนดในทุก ๆ ลำดับฮาร์มอนิก จากภาพที่ 2 สังเกตได้ว่าเมื่อยิ่งทำการหรี่แสงเพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามมา



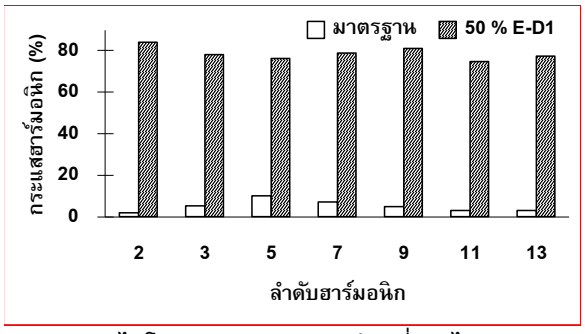
(ก) หลอดไดโอดเปล่งแสงคุณสมบัติหรี่แสงไม่ได้ (E-nD1)



(ข) หลอดไดโอดเปล่งแสงคุณสมบัติหรี่แสงได้ (E-D1) 100% ของความสว่าง



(ค) หลอดไดโอดเปล่งแสงคุณสมบัติหรี่แสงได้ (E-D1) 80% ของความสว่าง

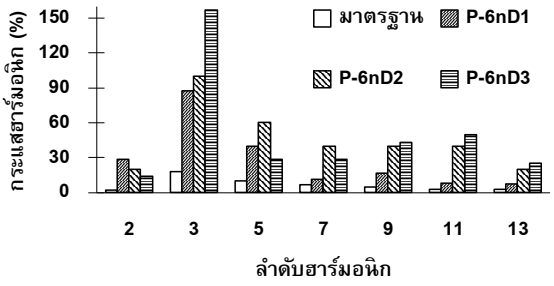


(ง) หลอดไดโอดเปล่งแสงคุณสมบัติหรี่แสงได้ (E-D1) 50% ของความสว่าง

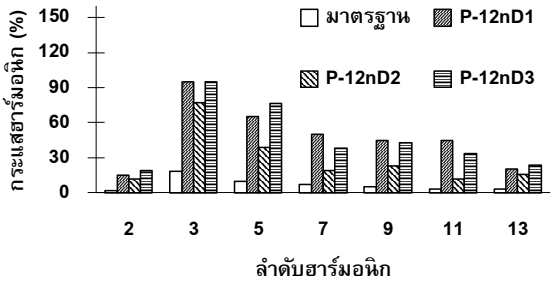
ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม C สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ภาพที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับของการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงกรณีที่ 2 กับมาตรฐาน พบว่าจากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าพบว่าหลอด P-6nD1 หลอด P-6nD2, และหลอด P-6nD3 มีค่า %THD_i เท่ากับ 130.5%, 185.8% และ 92.5% ตามลำดับ เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่าการใช้หลอดชนิด panel ขนาด 6 W มีค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับสูงกว่ามาตรฐานกำหนด สำหรับการใช้งานหลอดชนิด Panel ขนาด 12 W เมื่อเทียบกับมาตรฐานพบว่าการใช้หลอดทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับสูงกว่ามาตรฐานกำหนดเหมือนกับการใช้หลอด panel ขนาด 6 W

ในกรณีการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดหลากหลายขั้ว (กรณีที่ 3) พบว่าการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงในแต่ละชนิดมีค่า %THD_i แตกต่างกัน เมื่อนำค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับจากการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงชนิดหลากหลายขั้วมาเทียบกับมาตรฐาน แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าการใช้งานหลอดไดโอดเปล่งแสงในแต่ละชนิดมีค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับสูงกว่ามาตรฐานกำหนดในทุกลำดับ

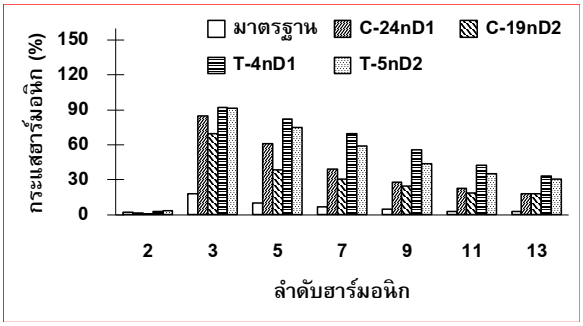


(ก) หลอดไดโอดเปล่งแสง panel 6 W



(ข) หลอดไดโอดเปล่งแสง panel 12 W

ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม C สำหรับกรณีศึกษาที่ 2



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 and IEC 61000-3-2:2018 กลุ่ม C สำหรับกรณีศึกษาที่ 3

สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาคุณภาพไฟฟ้าของการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงหลากหลายชนิดสามารถสรุปได้ว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงในแต่ละชนิดมีคุณลักษณะค่าพารามิเตอร์ทางคุณภาพไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เนื่องจากตัวหลอดไดโอดเปล่งแสงจำเป็นต้องมีตัวขับหลอดที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและ $\%THD_i$ แตกต่างกัน ซึ่งผลจากการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำและค่ากระแสฮาร์มอนิกสูง ส่งผลให้มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงในขณะใช้งาน สำหรับการหรี่แสงพบว่าหลอดที่มีคุณสมบัติการหรี่แสงสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ ในกรณีสำหรับช่วงเวลาไม่จำเป็นต้องใช้แสงสว่างมากได้ ถึงอย่างไรก็ตามการหรี่แสงของหลอดไดโอดเปล่งแสงส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบ เช่น มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลดลงและค่า $\%THD_i$ สูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่ากระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับมาตรฐานพบว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากหลอดไดโอดเปล่งแสงในทุกกรณีศึกษามีค่าเกินกว่ามาตรฐานกำหนด การใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ไฟฟ้าและ $\%THD_v$

ถึงแม้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากหลอดไดโอดเปล่งแสงจะมีขนาดเล็กไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากนัก แต่เมื่อมีการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงจำนวนมาก ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นผลิตภัณฑ์หลอดไดโอดเปล่งแสงควรมีข้อกำหนดที่ชัดเจนสำหรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและค่ากระแสฮาร์มอนิกที่สามารถนำมาใช้งานได้

เอกสารอ้างอิง

[1] United Nations Environment Programme. (June, 2011). *Assessment of opportunities for global harmonization of minimum energy performance standards and test standards for lighting products*. Collaborative Labelling and Appliance Standards Program.

[2] Khan N., & Abas N. (2011). Comparative study of energy saving light sources. *Renew Sustain Energy Rev*, *15*, 296-309.

[3] Almeida A., Santos B., Paolo B., & Quicheron M. (2014). Solid state lighting review – potential and challenges in Europe. *Renew Sustain Energy*, *34*, 30-48.

[4] Chang MH., Das D., Varde PV., & Pecht M. (2012). Light emitting diodes reliability review. *Micro Reliab, 52*, 62-82.

[5] Han HJ., Jeon YI., Lim SH., Kim WW., & Chen K. (2010). New developments in illumination, heating and cooling technogies for energy-efficient buildings. *Energy*, *35*, 47-53.

[6] Gan CK., Sapar AF., Mun YC., & Chong KE. (2013). Techno-economic Analysis of LED Lighting: A Case Study in UTeM's Faculty Building. *Procedia Eng*, *53*, 208-216.

[7] US Department of Energy. (May 2012). *Energy efficiency and renewable energy: building technologies program*. solid-state lighting: L prize drives technology innovation, energy savings.

[8] A.M. Blanco, R. Stiegler, & J. Meyer. (2013). *Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED).* 2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech.

[9] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, & M.A. Hannan. (2012). *An analysis of harmonics from LED lamps*. 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. pp. 837-840.

[10] International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 61000-3-2:2018, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤16 A per phase).* n.p.

[11] S. Uddin, H. Shareef, O. Krause, A. Mohamed, M.A. Hannan, & N.N. Islam. (2015), Impact of large scale installation of LED lamps in a distribution system. *Turk. J. Electr.Eng. Comput. Sci*, *23*(6), 1769-1780.

[12] S.K. Rönnberg, M. Wahlberg, & M.H.J. Bollen. (2012). *Harmonic emission before and after changing to LED lamps-field measurements for an urban area.* 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). pp. 1-6.

[13] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, & M.A. Hannan. (2012). *An analysis of harmonic diversity factors applied to LED lamps.* 2012 IEEE International Conference on Power System Technology.

[14] A. Gil-De-Castro, S.K. Rönnberg, M.H.J. Bollen, & A. Moreno-Muñoz. (2015). Harmonic phase angles for a domestic customer with different types of lighting. *Int.Trans. Electr. Energy Syst*, *25*(7), 1281-1296.