

การออกแบบชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สำหรับฉนวนเหลว

ตามมาตรฐาน ASTM D1816

Design of the Breakdown Voltage Test Set for Liquid Insulation

According to ASTM D1816

พรหมพัทธ์ บุญรักษา¹ ธนพล วงษ์จิตต์² ณัฐชนน ช้างน้อย²

รัฐนันท์ จันทรเดช² และ ธีระพงษ์ บุญรักษา^{2*}

Promphak Boonraksa¹, Thanapon Vongjodsee², Natchanon Changnoi²,

Rattanan Chandet² and Terapong Boonraksa^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

E-mail: ¹promphak.b@rmutsb.ac.th, ^{2*}terapong.boon@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน ASTM D1816 โดยมีขั้นตอนการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแก๊ป 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะแก๊ป 2.0 มิลลิเมตร พบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยอยู่ที่ 8.67 kV ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 4.34 kV/mm การทดสอบผลของอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงที่มีผลต่อค่าความคงทนแรงดันเบรกดาวน์แสดงให้เห็นว่าฉนวนน้ำมันหม้อแปลงมีค่าความคงทนแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฉนวนน้ำมันสูงขึ้น ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบและการวิเคราะห์คุณภาพของฉนวนเหลวในอุตสาหกรรมไฟฟ้าในอนาคต

คำสำคัญ: แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ฉนวนเหลว มาตรฐาน ASTM D1816 ความเครียดสนามไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the design and construction of a test set for measuring the breakdown voltage of liquid insulation according to ASTM D1816 standards. The testing procedure involved measuring the breakdown voltage of transformer oil insulation at gap distances of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 millimeters. The breakdown voltage tests at a gap distance of 2.0 millimeters, as per ASTM D1816 standards at 25°C, showed an average breakdown voltage of 8.67 kV and an average electric field stress of 4.34 kV/mm. The investigation into the effects of transformer oil temperature on breakdown voltage revealed that the breakdown voltage resistance of transformer oil increases with higher insulation oil temperatures. The results of this research will serve as a crucial foundation for developing testing equipment and analyzing liquid insulation quality in the electrical industry in the future.

Keywords: Breakdown Voltage, Liquid Insulation, ASTM D1816 Standards, Electric Field Stress

1. ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการใช้ไฟฟ้าในลักษณะที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ระดับแรงดันไฟฟ้าที่นำไปใช้มีความแตกต่างกัน จึงมีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้นมาใช้งาน [1] ไฟฟ้าแรงสูง คือ ไฟฟ้าที่มีแรงดันตั้งแต่ 1,000 โวลต์ ขึ้นไป ไฟฟ้าแรงสูง ใช้ในการเพิ่มระยะทางในการส่งกระแสไฟฟ้าไปให้ไกลขึ้น และใช้ในอุตสาหกรรมที่มีเครื่องจักรขนาดใหญ่ ไฟฟ้าแรงสูง มีบทบาทสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีการนำมาใช้ในหลายแง่มุมของการผลิต การส่ง และการแจกจ่ายพลังงาน ไฟฟ้า ไฟฟ้าแรงสูงช่วยให้สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้งานในระยะทางที่ไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานในสายส่ง ทำให้การส่งพลังงานมีความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในการใช้ไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า จึงต้องมีการทดสอบวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในตัวหม้อแปลงให้สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ ดังนั้น วัสดุอุปกรณ์และฉนวนในหม้อแปลงแรงดันสูงจำเป็นต้องมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่อบุคคล สิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้ หรือสัมผัสไฟฟ้าแรงสูง และป้องกันการเกิดลัดวงจรของระบบไฟฟ้า ฉนวนที่ใช้ในระบบแรงดันสูงมีทั้งฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวและก๊าซหรือใช้ทั้ง 3 ชนิด ร่วมกัน ฉนวนเหลวนิยมใช้เป็นฉนวนหลักในหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี โดยมีค่าความคงทนแรงดันเบรกดาวน์สูงและสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ เพื่อระบายความร้อนได้เกือบทุกส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า ในฉนวนเหลวมีโอกาสเกิดเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับอนุภาคเจือปนว่ามีความเจือปนสูงหรือต่ำ [2] โดยโอกาสการเกิดเบรกดาวน์จะขึ้นอยู่กับจุดอ่อนแอที่สุดในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในหม้อแปลงจะมีน้ำมัน เป็นฉนวนเหลวและเป็นฉนวนหลักเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสามารถอธิบายได้โดยการใช้กระบวนการไอออนไนเซชันและการกระตุ้นเช่นเดียวกับในฉนวนก๊าซ แต่จะมีความแตกต่างกัน

ในเรื่องของคุณสมบัติทางกายภาพ [3] เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงของพันธะเคมีระยะอิสระ หรือพลังงานของอิเล็กตรอนในระหว่างการชนแต่ละครั้ง กระบวนการสำคัญที่เกี่ยวข้องในการเกิดการเบรกดาวนสำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 สามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 กระบวนการ ดังนี้ กระบวนการแคโทด กระบวนการชน และกระบวนการแอโนด การเกิดเบรกดาวนโดยตรงของแก๊สจะเกิดจากการขยายตัวดิซซาร์จในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ [4]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน ASTM D1816 เพื่อทราบค่าแรงดันเบรกดาวนในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มีอุณหภูมิ 25, 50, 75 และ 90°C ที่ระยะห่างของอิเล็กโทรด 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 mm โดยมีไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงนํ้าองจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 0-15 kV ให้กับวงจรและวัดค่าแรงดันเบรกดาวนผ่านโพรบวัดแรงดันสูง การออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับฉนวนเหลวนี้นับถึงมาตรฐาน ASTM D1816 ซึ่งจะช่วยให้การทดสอบมีความแม่นยำและเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบและการวิเคราะห์คุณภาพของฉนวนเหลวในอุตสาหกรรมไฟฟ้าในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า
2. เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับฉนวนเหลวโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1816
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อค่าความคงทนแรงดันเบรกดาวนของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การเสีสภาพฉนวนของฉนวนไฟฟ้า

การเกิดเบรกดาวนในทางไฟฟ้า หรือการเสีสภาพฉนวน (Breakdown) หมายถึง การป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าหนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้า หรือทนต่อสนามไฟฟ้านั้นได้ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนนั้น ๆ ทนไม่ไหวจึงเกิดการเบรกดาวนไปในที่สุด การเบรกดาวนนี้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือฉนวนที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า [4] โดยมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนของฉนวน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสามารถหาได้ดังสมการที่ (1)

$$E = \frac{U}{d} \quad (1)$$

เมื่อ	E	คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดขณะเบรกดาวน (kV/mm)
	U	คือ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน (kV _{rms})
	d	คือ ระยะแกป (mm)

ฉนวนเหลวสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ หากว่าของเหลวนั้นมีความต้านทานไฟฟ้าสูงมากพอ และไม่เปลี่ยนสภาพทางฟิสิกส์ในช่วงเวลาที่นานพอสมควร ของเหลวที่นำมาใช้เป็นฉนวนในระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่ จะเป็นประเภทน้ำมันไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันปิโตรเลียม (น้ำมันหม้อแปลง) ซึ่งรู้จักและใช้กันมาเป็นเวลานาน นอกนั้นก็ยังมีฉนวนเหลวสังเคราะห์ ซึ่งทนความร้อนได้สูง เช่น ซิลิโคนกลอรีนหรือฟลูออรีนไฮโดรคาร์บอน ลักษณะสมบัติของฉนวนเหลวสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า [5] กำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญ ได้แก่

1. ความถ่วงจำเพาะ
2. จุดติดไฟ (จุดติดไฟสูง หมายถึง โอกาสเกิดเพลิงไหม้มีน้อย)
3. ความหนืด (ความหนืดต่ำ หมายถึง การระบายความร้อนได้ดี)
4. ความเป็นกรด (แสดงถึงปริมาตรส่วนที่เป็นกรดผสมอยู่ในของเหลว)
5. แพลกเตอร์กำลังสูญเสีย (เป็นตัวชี้ให้ทราบว่าเกิดกำลังสูญเสียมากน้อยเพียงใด)

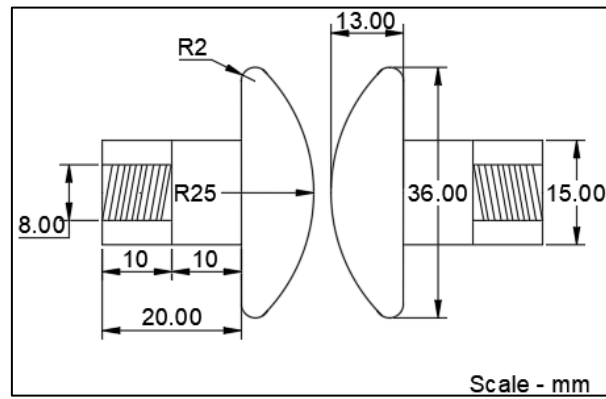
ของเหลวที่นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าสูงมากพอ สามารถคงลักษณะสมบัติ เช่น ความถ่วงจำเพาะ จุดวาบไฟ ความหนืด และแพลกเตอร์กำลังสูญเสียได้ในช่วงเวลาที่นานพอสมควร โดยหลักการแล้วของเหลวสามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีกว่าก๊าซ เนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่าก๊าซจึงมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซ อีกทั้งของเหลวยังมีคุณสมบัติการระบายความร้อนที่ดีกว่าก๊าซ เกิดการไหลวนของฉนวนเหลวภายในอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดได้ดียิ่งขึ้น [5]

4. วิธีดำเนินการวิจัย

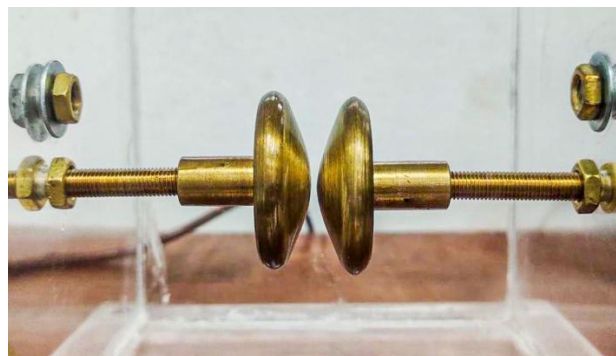
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างเช่น ไฟฟ้าแรงสูง การเกิดเบรกดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์ ฉนวนน้ำมัน เป็นต้น จากนั้นออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ และชุดทดสอบแรงดัน แล้วทดสอบหาค่าต่าง ๆ ตามต้องการเพื่อนำผลการทดสอบมาบันทึกและสรุปผลการทดสอบ

4.1 การกำหนดขนาดของอิเล็กทรอนิกส์

อิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง ขั้วไฟฟ้าที่เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่สัมผัสกับส่วนที่ไม่ใช่โลหะ และเป็นจุดที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น มีอยู่ด้วยกันสองชนิด คือ แอโนด และ แคโทด โดยที่แอโนดและแคโทดจะเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและลบตามลำดับขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของประจุบวก [6],[7] การกำหนดขนาดของแถบตามมาตรฐาน ASTM D1816 เพื่อการทดสอบที่ตรงตามมาตรฐานโดยมีอิเล็กทรอนิกส์แบบครึ่งทรงกลมออกแบบตามมาตรฐาน ASTM D1816 มีขนาดกว้าง 36 mm ยาว 13 mm เกลียวของอิเล็กทรอนิกส์แบบครึ่งทรงกลมกว้าง 8 mm ยาว 20 mm แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงอิเล็กทรอนิกส์ครึ่งทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM D1816



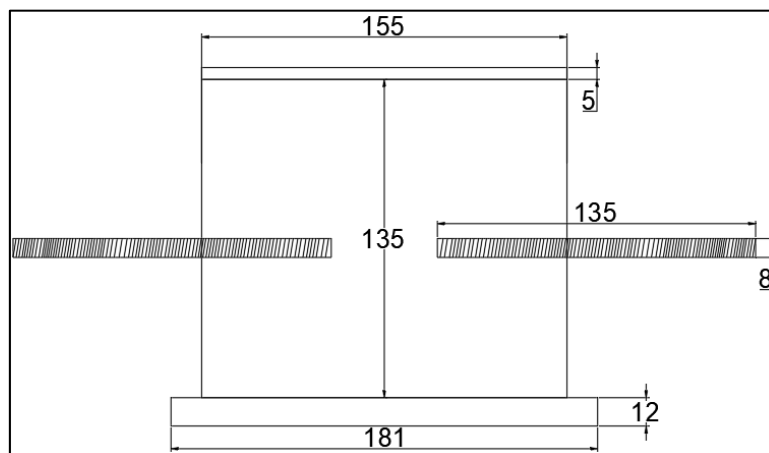
รูปที่ 1 การออกแบบอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM D1816



รูปที่ 2 อิเล็กโตรดครึ่งทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM D1816

4.2 การออกแบบแฉกเบอร์ทดสอบ

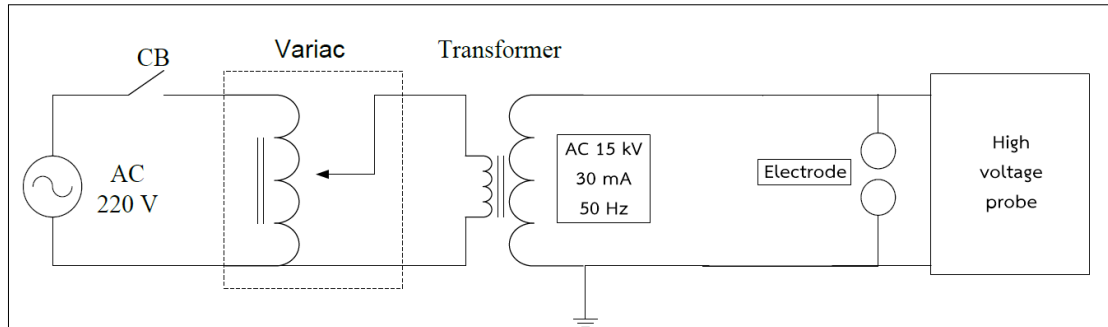
แฉกเบอร์ทำหน้าที่เป็นภาชนะใส่น้ำมันหม้อแปลงเพื่อนำอิเล็กโตรดทั้งสองเข้าไปทดสอบในฉนวนเหลว วัสดุที่ใช้เป็นอะคริลิกใส ไม่มีสี หนา 10 mm แฉกเบอร์มีขนาดกว้าง 15.5 cm ยาว 15.5 cm สูงจากฐานแฉกเบอร์ 13.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 3



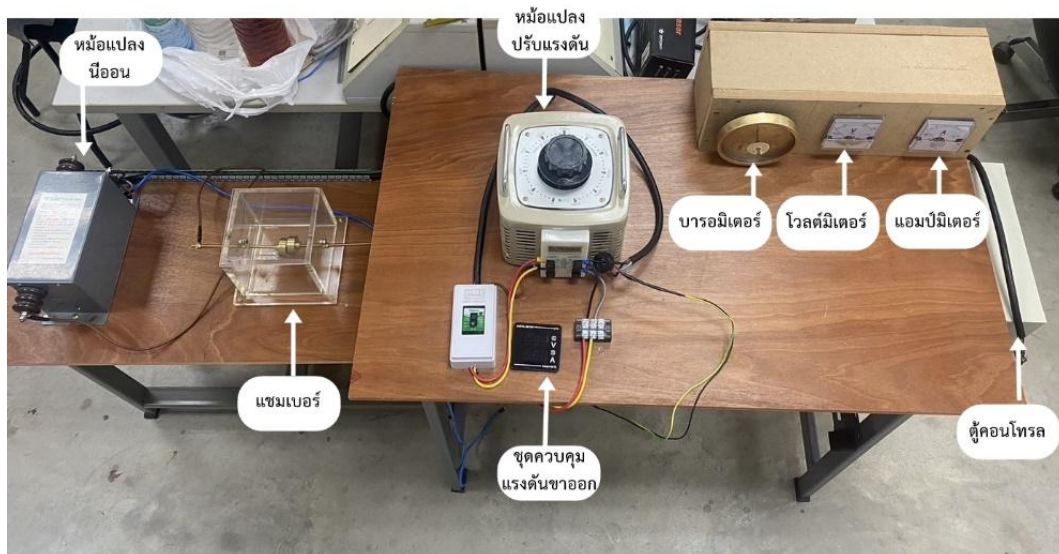
รูปที่ 3 การออกแบบแฉกเบอร์ทดสอบ

4.3 ระบบควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

วงจรการทดสอบและการวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์มีการอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 ประกอบด้วย หม้อแปลงจ่ายแรงดันปรับค่าได้เชื่อมต่อกับหม้อแปลงแรงสูงทดสอบขนาด 15 kV ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับ อุปกรณ์ทดสอบและนำเครื่องมือวัดแรงสูงมาเชื่อมต่อเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ แสดงดังรูปที่ 4 ชุดทดสอบ ที่ติดตั้งอุปกรณ์ครบแล้วพร้อมทำการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 วงจรระบบควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและการวัดไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEC 60060-1



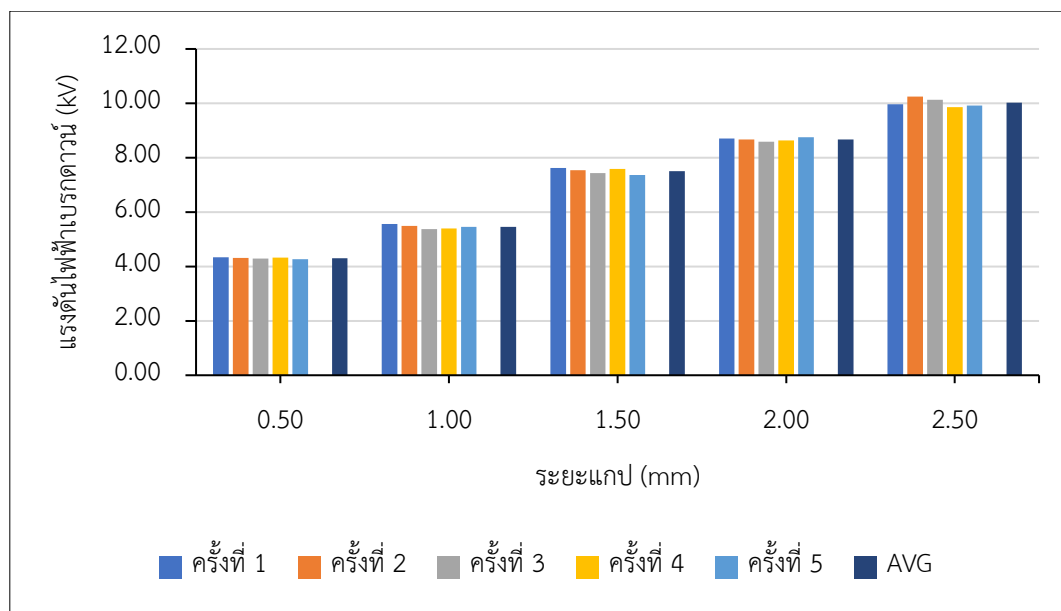
รูปที่ 5 ระบบควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและการวัดไฟฟ้าแรงดันสูง

5. ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง โดยทดสอบในน้ำมันใหม่ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 15 kV โดยปรับแรงดันไฟฟ้าผ่านวารีแอค และอ่านค่าโดยใช้โพรบแรงสูง แบ่งวัดแรงดันต่อกับโวลต์มิเตอร์เพื่ออ่านค่าเป็นอัตราส่วน 1:1000 V ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโทรดที่ระยะห่าง 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 mm เห็นได้ว่าเมื่อมีระยะห่างมากขึ้นค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์จะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างโดยทำการทดสอบเป็นจำนวน 5 ครั้ง ตามมาตรฐาน ASTM D1816 และหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่อุณหภูมิ 25°C

ระยะแกป (mm)	แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (kV)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0.50	4.34	4.31	4.29	4.33	4.27	4.31
1.00	5.56	5.49	5.38	5.40	5.46	5.46
1.50	7.62	7.54	7.43	7.59	7.37	7.51
2.00	8.71	8.67	8.59	8.63	8.75	8.67
2.50	9.97	10.25	10.13	9.86	9.92	10.03



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่อุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

อุณหภูมิของฉนวน น้ำมันหม้อแปลง	ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย (kV)				
	ระยะแกป 0.50 mm	ระยะแกป 1.00 mm	ระยะแกป 1.50 mm	ระยะแกป 2.00 mm	ระยะแกป 2.50 mm
25 °C	4.31	5.46	7.51	8.67	10.03
50 °C	4.52	5.74	8.19	9.38	10.78
75 °C	4.90	6.09	8.83	10.01	11.66
90 °C	5.86	6.87	9.63	11.33	13.12

จากตารางที่ 2 แสดงผลจากการทดสอบการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ของอีเล็กโตรดครึ่งทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM D1816 ที่ระยะแกป 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 mm เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ 25, 50, 75 และ 90°C ผลจากการทดสอบปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิฉนวนหม้อแปลงสูงขึ้นค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิมากขึ้น น้ำมันมีการดูดความชื้นมากขึ้น ดังนั้น ทำให้ความสมดุลของน้ำระหว่างน้ำมันและอนุภาค

มีการเปลี่ยนแปลง แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่สูงขึ้น โดยทั่วไปเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งอนุมานได้ว่า อนุภาคคุดความชื้นจึงทำให้น้ำมันมีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

6. สรุปผล

การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน ASTM D1816 เป็นมาตรฐานสากลที่ระบุวิธีการกำหนดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ฉนวนเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นตัวนำและนำไฟฟ้าของ ฉนวนเหลว แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ฉนวนเริ่มทำงานเป็นตัวนำและนำไฟฟ้า คือ แรงดันขั้นต่ำที่ทำให้เกิดการเสีย สภาพฉนวนหรือคายประจุไฟฟ้าในฉนวนเหลว การทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น ตามมาตรฐาน การเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และจำนวนครั้งของการทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนด จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดมากขึ้นแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อการทดสอบอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงตาม มาตรฐาน ASTM D1816 และใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการเสื่อมสภาพของฉนวนเหลวหลากหลายชนิด

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนกร น้ำหอมจันทร์. (2554). แพลกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดสำหรับทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ สำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 21(3), 541-548.
- [2] อัญญรัตน์ สอนสนาม และ ธวัชชัย สอนสนาม. (2565). การศึกษาผลของระยะแกปและรูปร่างอิเล็กโทรด ทองเหลืองที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 8(2), 21-32.
- [3] ธวัชชัย สอนสนาม, ศุภกิตติ์ โชติโก และ บุญเหนือ พิงศิริ. (2555). การศึกษาผลของอุณหภูมิและแรงดันเบรก ดาวน์ต่อค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงที่ความถี่ต่างๆ. *การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50*. กรุงเทพมหานคร, 31 ม.ค.-2 ก.พ. 2555, หน้า 198-206.
- [4] สำรวย สังข์สะอาด. (2549). *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- [5] พรพงษ์ ศิริรัตน์สกุล. (2565). *การเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานพาล์มและกระดาษฉนวนภายใต้ การบ่มเร่งเชิงความร้อน*. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์). คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [6] Liu, Q., & Wang, Z. D. (2013). Breakdown and withstand strengths of ester transformer liquids in a quasi-uniform field under impulse voltages. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 20(2), 571-579.
- [7] Martin, D. (2007). *Evaluation of the Dielectric Capability of Ester-Based Oils for Power Transformers*. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering and Physical Sciences, (School of Electrical and Electronic Engineering). The University of Manchester.