



การศึกษาผลของระยะแกปและรูปร่างอิเล็กโทรดทองเหลืองที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

อัญญารัตน์ สอนสนาม¹ และ ธวัชชัย สอนสนาม^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding author), E-mail: tawatchai.s@dru.ac.th

วันที่รับบทความ: 19 กันยายน 2564; วันที่บทความบทความ: 17 ตุลาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 28 ธันวาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 10 กุมภาพันธ์ 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเป็นตัวกลางในการทดลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทองเหลือง โดยการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 รูปแบบ คือ (1) รูปทรงอิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ (2) รูปทรงอิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบ และ (3) รูปทรงอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ที่ระยะห่างช่องว่างแกป 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ สภาพอากาศแวดล้อมห้องทดลอง มีอุณหภูมิ 30-33 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 755-760 มิลลิเมตรปรอท และความชื้น 60-65 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่า แรงดันเบรกดาวนของอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะแกป 2.5 มิลลิเมตร คือ 18.780 กิโลโวลต์ รองลงมาคือ อิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบและอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ มีแรงดัน 14.082 กิโลโวลต์ และ 11.095 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ที่ระยะช่องว่างแกป 2.5 มิลลิเมตรเท่ากัน โดยทั้งสามรูปแบบมีค่าแรงดันเบรกดาวนต่างกันประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ ของอิเล็กโทรดแต่ละรูปแบบ เมื่อทำการตรวจสอบสภาพความเสียหายของพื้นผิวทองเหลืองพบว่าอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ มีขนาดรอยความเสียหายจากการอาร์กมากที่สุดคือ 50 ไมโครเมตร อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ มีขนาดรอยอาร์ก 27 ไมโครเมตร และอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบความเสียหายน้อยที่สุดมีขนาดรอยอาร์ก 10 ไมโครเมตร ซึ่งค่าความแข็งของรอยอาร์กหลังจากผ่านการทดลองพบค่าความแข็งจะแปรผกผันกับขนาดของรอยความเสียหายจากการอาร์กและแรงดันเบรกดาวนทุกตัวอย่างการทดลอง

คำสำคัญ: แรงดันเบรกดาวน; อิเล็กโทรด; สนามไฟฟ้า

A Study on The Effect of Gap Distance and Brass Electrode Shape to Breakdown Voltage on Transformer Oil

Anyarat Sonsanam¹ and Tawatchai Sonsanam^{2*}

¹ Division of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Division of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: tawatchai.s@dru.ac.th

Received: 19 September 2021; Revised: 17 October 2021; Accepted: 28 December 2021

Online Published: 10 February 2022

Abstract: This research uses transformer oil insulation as an intermediary for testing the electric field pattern of the brass electrode. By supplying high voltage refer to IEC 60156, which divides the test into three forms based on the electrode shape: (1) the plane-plane shape, (2) spherical - plane shape and (3) the rod – plane shape. The gap spacing is 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 mm. The ambient temperature of the test chamber is 30-33 °C, the atmospheric pressure is 755-760 mmHg and the relative humidity is 60-65 %. From the test, it is found that the breakdown voltage of the plane-plane shape is highest at 2.5 mm, 18.780 kV, and the second is the spherical-plane shape and the tipped-plane shape at 14.082 kV and 11.095 kV respectively, and the gap spacing is 2.5 mm. The reduction breakdown voltage is approximately 26 % of each electrode. The damage condition on the brass surface of the electrode is analyzed by SEM. It showed that the plane-plane shape is the most arc damage surface with a diameter of 50 µm, the spherical-plane shape has a diameter of 27 µm and 10 µm on rod-plane electrode shape. After the test, the hardness is varied with the size of the arc damage and the breakdown voltage.

Keywords: Breakdown Voltage; Electrode; Electric Field



1. บทนำ

ฉนวนที่ใช้ในทางไฟฟ้าแรงสูงมีทั้งฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และก๊าซหรือใช้ทั้งสามแบบประสานสัมพันธ์กัน ฉนวนเหลวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนหลักในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี โดยมีค่าความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์สูงกว่าอากาศที่สภาวะความดันบรรยากาศ มีความสามารถในการคืนตัวเป็นฉนวนอีกครั้งหลังจากเกิดการเบรกดาวน์มีค่าเปอร์มิตติวิตีและความสูญเสียต่ำ ค่าเปอร์มิตติวิตีประมาณ 2 - 2.5 และสามารถไหลแทรกซึม เข้าไปในช่องว่างต่างๆ เพื่อระบายความร้อนได้เกือบทุกส่วนของอุปกรณ์ แต่ในทางปฏิบัตินั้น ฉนวนเหลวเชิงการค้ำจะมีสิ่งเจือปนอยู่เสมอ โอกาสเกิดเบรกดาวน์จึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอนุภาคเจือปนถ้าพบในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าต่ำ โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน์ก็ต่ำ เมื่อใดก็ตามที่อนุภาคเจือปนอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงโอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน์ก็มีความเป็นไปได้สูง โดยโอกาสการเกิดเบรกดาวน์จะขึ้นอยู่กับจุดที่อ่อนแอที่สุด หรือในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในปริมาตรของฉนวนเหลวนั้น เพราะปริมาตรของฉนวนเหลวสัมพันธ์กับปริมาณสิ่งเจือปนทั้งหมดที่มีอยู่ แรงดันเบรกดาวน์จะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาตรความเครียดสนามไฟฟ้าคือ แรงดันเบรกดาวน์ลดลงเมื่อปริมาตรความเครียดสนามไฟฟ้าสูง สมบัติฉนวนเหลวนั้นมีความแตกต่างกับฉนวนแข็ง โดยที่โมเลกุลของฉนวนเหลวไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างหนาแน่นเหมือนโมเลกุลฉนวนแข็ง โมเลกุลฉนวนเหลวจึงสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระพอสมควร อนุภาค

ประจุไฟฟ้าจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าของแข็ง เมื่ออนุภาคประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเหลวดังนั้นฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในระบบและอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทน้ำมันไฮโดรคาร์บอนหรือฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ซึ่งทนความร้อนได้สูง ส่วนใหญ่แล้วฉนวนเหลวจะมีสิ่งเจือปนอยู่ไม่มากก็น้อย เช่น ฟุนละออง ความชื้น อนุภาคเจือปน เป็นต้น [1-4] เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์แรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนของเหลวจึงต้องให้ความสำคัญกับปัจจัยผลของสิ่งเจือปนเหล่านั้นเป็นอย่างมาก

ปัจจัยสำคัญของการใช้แรงดันไฟฟ้าทุกระดับคือการฉนวนซึ่งหมายถึงวัสดุที่นำมาใช้เป็นฉนวนและเทคนิคการใช้ฉนวน กล่าวได้ว่าถ้าได้มีไฟฟ้าแรงดันสูงที่นั่นย่อมมีการฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่บุคคลและสิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้หรือสัมผัสไฟฟ้าแรงดันสูง และป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าระหว่างสายเฟสกับสายเฟสหรือสายเฟสกับสายดิน ในการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะทำให้ได้ง่ายหากมีพื้นที่ว่างมากเพียงพอหรือการฉนวนที่ระดับไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งจะใช้เทคนิคการฉนวนที่ไม่ซับซ้อนเท่าแรงดันสูง หากแต่การฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูงและมีการจำกัดพื้นที่ต้องออกแบบการฉนวนให้ดีและคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ดังนั้น ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งความคงทนของฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าที่ศึกษาจะถูกพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยของระยะแกบ และความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ใน



รูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน [5-8] การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของความคงทนของฉนวนเป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย [9] ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของการใช้ไฟฟ้าทุกระดับแรงดันก็คือ การฉนวน ซึ่งในกรณีแรงดันสูงและมีที่ว่างจำกัดการออกแบบการฉนวนให้ดี และประหยัดจำเป็นต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับแรงดัน ลักษณะสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้า และลักษณะสมบัติของฉนวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า [10-11]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้เกิดแนวคิด ทำการศึกษาลักษณะของสนามไฟฟ้ารูปทรง อิเล็กโทรดแบบต่างๆ คือ อิเล็กโทรดแบบระนาบ อิเล็กโทรดแบบทรงกลมและอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม โดยทดลองให้เกิดเบรกดาวน์ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ผลของแรงดันเบรกดาวน์และความเสียหายต่ออิเล็กโทรดวัสดุทองเหลืองในรูปแบบสนามไฟฟ้าที่ต่างกันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์ความเสียหาย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ

ในการศึกษาได้ออกแบบและสร้างชุดอิเล็กโทรดเพื่อทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 [12] ดังรูปที่ 1 และ 2 ในการศึกษาได้แบ่งอิเล็กโทรดออกเป็น 3 รูปแบบ คือ (1) อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ (2) อิเล็กโทรดแบบ

ทรงกลม-ระนาบ และ (3) อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ วัสดุตัวนำที่ใช้เป็นโลหะทองเหลือง นำมาลึงเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตทั้ง 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 3

วางจรวดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ดังรูปที่ 4-5 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน [13-14] ประกอบด้วย ตัวปรับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ (Variac) 0-220 โวลต์ เชื่อมต่อกับหม้อแปลงทดสอบแรงสูงขนาด 0-130 กิโลโวลต์ (Single-Phase AC Voltage Test Transformer) HIPOT TESTER เพื่อป้องกันแรงดันสูงให้กับชุดทดลอง (Test Object) มีแกปทรงกลม (Sphere Gap) ต่อขนานเพื่อเป็นแกปป้องกันวงจร และใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเพื่อลดทอนแรงดันสูงให้สามารถอ่านค่าแรงดันและบันทึกสัญญาณรูปคลื่นแรงดันผ่านออสซิลโลสโคป

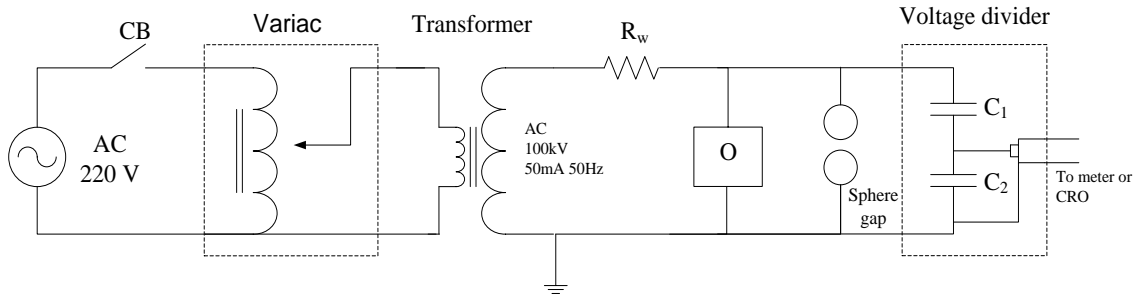
สำหรับลักษณะของน้ำมันหม้อแปลงใหม่ ชนิดที่ 1 ฟิลเลอร์เกจ ชุดวัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เครื่องทดลองความแข็ง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ใช้ในงานวิจัยนั้น แสดงดังรูปที่ 6 – 10 ตามลำดับ

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

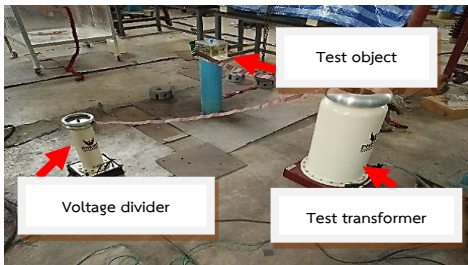
เมื่อเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเรียบร้อยแล้วจึงทดลองโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ใส่อิเล็กโทรดแบบระนาบ – ระนาบ ในชุดทดลองแรงดันเบรกดาวน์ แล้วใช้ฟิลเลอร์เกจ ตั้งระยะห่างช่องว่างแกป 0.5 มิลลิเมตร

2. นำน้ำมันหม้อแปลงชนิดที่ 1 (Type I) ปริมาตร 1.50 ลิตร [15] บรรจุลงชุดทดลองแรงดันเบรกดาวน์ แล้วต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 4



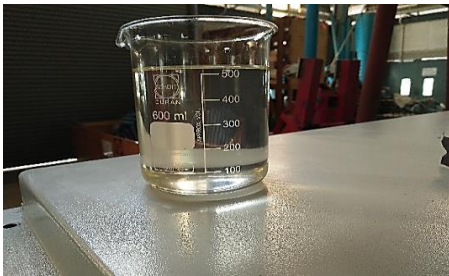
รูปที่ 4 วงจรไฟฟ้าสมมูลการหาแรงดันเบรกดาวน์



รูปที่ 5 วงจรจริงในการทดลองหาแรงดันเบรกดาวน์



รูปที่ 8 ชุดวัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ



รูปที่ 6 น้ำมันหม้อแปลงใหม่ ชนิดที่ 1 [15]



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบความแข็ง



รูปที่ 7 ฟิเลเจอร์เกจ

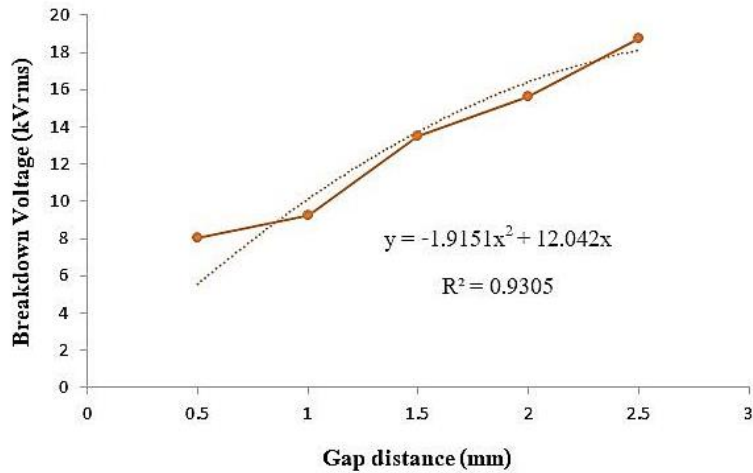


รูปที่ 10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

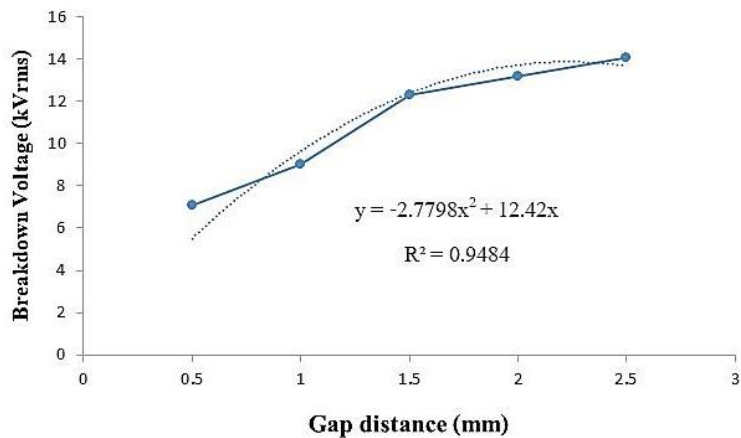


3. ผลการทดลอง

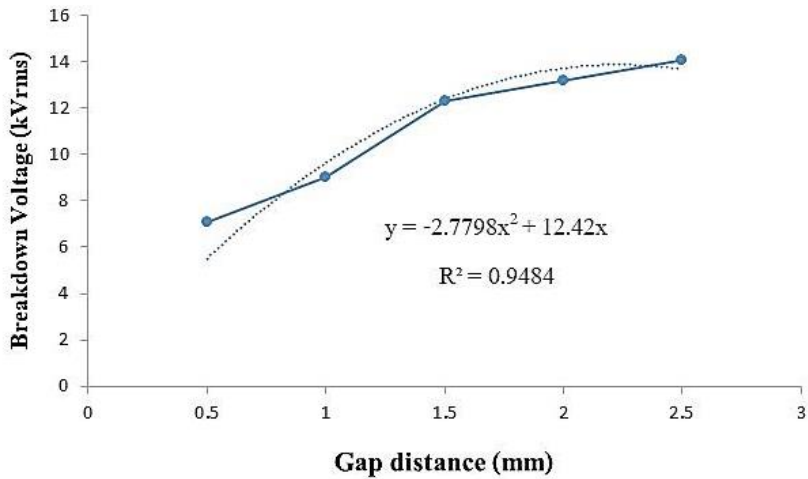
3.1. ผลการตรวจวัดแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์แรงดันเบรกดาว์นกับระยะแกปของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์แรงดันเบรกดาว์นกับระยะแกปของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์แรงดันเบรกดาวนกับระยะแกปของอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ

การทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนกับอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ คือ (1) อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ (2) อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ และ (3) อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยอ้างอิงตามวิธีที่มาตรฐานกำหนด สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้ จากการเปรียบเทียบ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ ระยะห่างของอิเล็กโทรดที่ระยะ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 และ 2.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ สภาวะบรรยากาศห้องทดลอง อุณหภูมิระหว่าง 30-33 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศระหว่าง 755-760 มิลลิเมตรปรอท และความชื้นระหว่าง 60-65 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อปรับระยะห่างของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนที่เกิดขึ้นที่วัดค่าได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนแปรผันตามระยะห่างช่องว่างแกปของอิเล็กโทรดโดยการทดลองของอิเล็กโทรดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-squared, R^2) ระหว่าง 0.9305-0.9484 แสดงให้

เห็นว่าการทดลองทั้ง 3 แบบนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 11-13 พบว่า รูปร่างลักษณะอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูง ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ทรงกลม-ระนาบ) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะไม่แตกต่างกันมากและมีค่าแรงดันเบรกดาวนที่ระยะช่องว่างแกปตั้งแต่ 0.5-2.5 มิลลิเมตรมีค่าระหว่าง 7.101-14.082 กิโลโวลต์ ส่วนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ปลายแหลม-ระนาบ) ค่าแรงดันเบรกดาวนมีค่าระหว่าง 5.049-11.095 กิโลโวลต์ ซึ่งจะต่ำกว่าของอิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ระนาบ-ระนาบ) จะมีค่าแรงดันเบรกดาวนสูงสุดมีค่าระหว่าง 8.041-18.780 กิโลโวลต์ ตามลำดับ



กระบวนการเกิดการเบรกดาวนั้นอธิบายได้ว่าเนื่องจากฉนวนเคลือบที่นำมาทดลองนั้นเป็นฉนวนเคลือบเชิงการค่าที่ไม่บริสุทธิ์ร้อยละร้อยเปอร์เซ็นต์จึงมีอนุภาคเจือปนกระจายอยู่ในฉนวนเคลือบ บริเวณที่มีความอ่อนแอมากที่สุดนั้นในฉนวนของเคลือบคือปริมาตรของน้ำมันที่อยู่ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบและอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ปริมาตรในส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงคือปริมาตรที่อยู่ระหว่างแนวความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับแนว 90 องศาของของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยปริมาตรยิ่งมากเท่าใด โอกาสพบสิ่งเจือปนและจุดอ่อนแอยิ่งมากตามไปด้วย และมีโอกาสเกิดเบรกดาวได้ง่ายขึ้นกว่าบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [9-10] แสดงดังรูปที่ 11-13

กรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ปลายแหลม-ระนาบ) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดจึงทำให้บริเวณนั้นเกิดการเบรกดาวนั้นข้ามผ่านช่องว่างแคบได้ง่ายในกรณีไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ทรงกลม-ระนาบ) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรกดาวนั้นเป็นค่าเดียวกัน [2] อธิบายได้คือเมื่อ ระยะเวลาชั้วกฤตติได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรกดาวทันทีและไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นระหว่างช่องว่างแคบก่อนเบรกดาวนั้นจึงเรียกว่า เบรกดาวนั้นโดยตรงระหว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะมีผลมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดแต่กรณีอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ระนาบ-ระนาบ) จะเกิดเบรกดาวนั้นหรือสปาร์กทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้า

ระหว่างอิเล็กโทรดถึงค่าค่าวิกฤตแต่จะใช้แรงดันมากกว่า [1] เนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอทุกบริเวณและโอกาสเกิดการเบรกดาวนั้นจึงสามารถเกิดที่ตำแหน่งใดก็ได้บนผิวอิเล็กโทรด

ความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโทรดแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะห่างของอิเล็กโทรด รัศมีความโค้ง ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด ซึ่งลักษณะทั่วไปเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของสนามไฟฟ้า [3] ดังนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานไต่ยาวนานการออกแบบฉนวนไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวนและไม่ติสซาร์จบางส่วนในฉนวนที่นำไปใช้งาน

3.2 ผลการศึกษาความเสียหายทางกายภาพรูปบนผิวอิเล็กโทรดโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

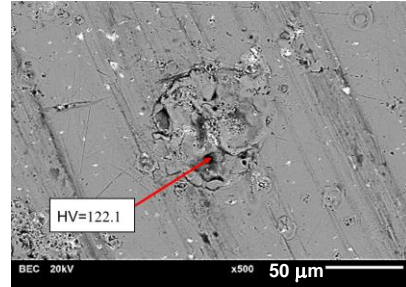
การวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพของพื้นผิวอิเล็กโทรดวัสดุทองเหลืองจากการเบรกดาวนั้นในน้ำมันหม้อแปลงใช้อิเล็กโทรด 3 แบบคือ (1) อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ (2) อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ และ (3) อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ที่ระยะช่องว่างแคบ 2.5 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบความเสียหายในกรณีที่สนามไฟฟ้าและแรงดันเบรกดาวนั้นต่างกันซึ่งได้ผลดังนี้

จากการตรวจสอบสรุปความเสียหายบนพื้นผิวอิเล็กโทรดของโลหะทองเหลืองที่ผ่านการทดลองเบรกดาวนั้นที่ระยะช่องว่างแคบ 2.5 มิลลิเมตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สรุปได้ว่าพื้นผิว

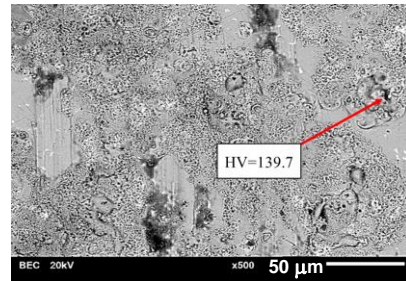


วัสดุของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ มีความเสียหายทางกายภาพมากที่สุด รองลงมาคืออิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ และอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ระนาบ ตามลำดับ เนื่องมาจากอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ จัดอยู่ในรูปทรงทางเรขาคณิตแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ในการเบรกดาวนแต่ละครั้งจึงใช้แรงดันมากกว่ารูปทรงอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่นๆ ที่ระยะช่องว่างแคบเดียวกัน จึงทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของโลหะมากที่สุด ในทำนองเดียวกันอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ และอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ระนาบ รูปทรงทางเรขาคณิตของสนามไฟฟ้าจะเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยกับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จึงทำให้ใช้แรงดันเบรกดาวนต่ำกว่าตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 14-16

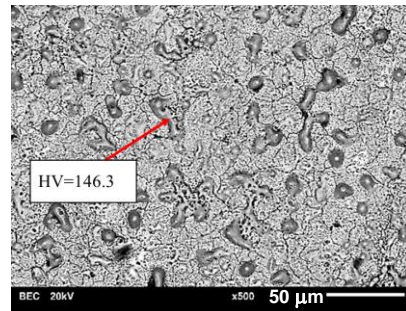
จากผลการวัดค่าความแข็งตามตารางที่ 1 พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อความแข็งของบริเวณรอยอาร์กที่เกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงเฉพาะจุดในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ระนาบ มีผลทำให้จุดบริเวณอาร์กมีขนาดเล็ก เนื่องจากเกิดการเบรกดาวนได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 16 จึงทำให้ค่าความแข็งในบริเวณนั้นมีค่าสูงที่สุดคือ HV = 146.3 ในทำนองเดียวกันอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ มีสนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอจึงทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ยากเมื่อเกิดการเบรกดาวนในตำแหน่งนั้นแล้วรอยอาร์กจะมีขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 14 พบว่าบริเวณนั้นมีค่าความแข็งต่ำที่สุดซึ่งมีค่า HV = 122.1 ส่วนอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ เป็นรูปแบบสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 14 ลักษณะทางกายภาพของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ



รูปที่ 15 ลักษณะทางกายภาพของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ



รูปที่ 16 ลักษณะทางกายภาพของอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ระนาบ

จึงทำให้รอยอาร์กที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่ใหญ่มากแสดงดังรูปที่ 15 และมีค่าความแข็งบริเวณรอบอาร์ก HV = 139.7

**ตารางที่ 1** ความแข็งของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบ

Electrode Type	Vickers Hardness (HV)
Base	149.4
Plane-plane	122.1
Sphere-plane	139.7
Rod-plane	146.3

เมื่อเทียบความแข็งบริเวณรอยอาร์กของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ กับค่าความแข็งฐาน (base) ของอิเล็กโทรดที่ยังไม่ผ่านการอาร์ก พบว่าอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ ค่าความแข็งลดลง 18.27 เปอร์เซ็นต์ อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ ค่าความแข็งลดลง 6.49 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ค่าความแข็งลดลง 2.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่จนวนสภาพจนวนจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้าและจะเกิดความเค้นหรือความเครียดทางไฟฟ้าถ้าจนวนนั้นไม่สามารถทนต่อความเครียดทางไฟฟ้านั้นได้ จนวนนั้นจะเสียสมบัติของการเป็นจนวนไฟฟ้าดังกล่าว ลักษณะอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอสูง รูปทรงลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดในวัสดุจนวนน้ำมันหม้อแปลงจะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากัน เมื่อทำการบ้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดจนเกิดเบรกดาวนทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลและนำประจุไฟฟ้าข้ามช่องว่างแยกจากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยัง

อิเล็กโทรดหนึ่ง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะเกิดเบรกดาวน คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า ยิ่งอิเล็กโทรดมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงจะทำให้มีสนามไฟฟ้าสูงที่จุดใดจุดหนึ่งจึงทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ง่าย และรอยอาร์กที่เกิดขึ้นในจนวนน้ำมันหม้อแปลงมีผลความสัมพันธ์กับค่าแรงดันเบรกดาวน ความเครียดสนามไฟฟ้า ความแข็งของผิววัสดุ อีกทั้งขนาดรอยอาร์กทางกายภาพ พบว่าหากรอยความเสียหายจากการอาร์กมีขนาดใหญ่ความแข็งบริเวณนั้นจะมีค่าต่ำแต่แรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงและมีความเครียดของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนานการออกแบบจนวนไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของจนวน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือจ่ายและวัดแรงดันสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.S. Naidu and V. Kamaraju, High voltage engineering, McGraw Hill Inc., NY, USA, 1995.
- [2] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, High-voltage engineering, Butterworth Heinemann Inc., Oxford, UK, 2000.



- [3] A.S. Mazen, A. Hussein, M. Ahdab and R. Roshdy, High voltage engineering theory and practice, Marcel Dekker Inc., NY, USA, 2000.
- [4] W.T. Shugg, Handbook of electrical and electronic insulating materials, Van Nostrand Reinhold Inc., NY, USA, 1986.
- [5] https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/78710103/FULL_TEXT.PDF. (Accessed on 29 October 2021)
- [6] K. Swati, K.S. Yadav, R. Sarathi, R. Vinu and M.G. Danikas, Understanding corona discharge activity in titania nanoparticles dispersed in transformer oil under ac and dc voltages, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4), 2325–2336.
- [7] M. Alharthi, S.M. Ghoneim and B.M. Taha, Breakdown voltage of the transformer oils under certain conditions, International Journal of Applied Engineering Research, 2018, 13(6) 3810-3815.
- [8] S. Tawatchai and H. Montri, Study of electrode to breakdown voltage to electrode shapes oxygen and air, The National Conference on Technical Education, Proceeding, 2016, 9-14. (in Thai)
- [9] P. Norasage, Electrical engineering materials: Insulation and electrical insulation, 1st Ed., King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang, Thailand. 2009.
- [10] S. Sumruay, High voltage engineering, 3rd Ed., Chulalongkorn University, Thailand, 2006.
- [11] S. Suwarno, F. Salim, Effects of electric arc on the dielectric properties of liquid dielectrics, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceeding, 2007, 482-485.
- [12] IEC 60156, Insulating Liquids Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency–Test Method, 1995.
- [13] IEC 60060-1, High Voltage Test Techniques, 1989.
- [14] IEEE Std. 4a, Amendment to Standard Techniques for High Voltage Testing, 2001.
- [15] ASTM D 3487-08, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus, 2004.