

การปรับปรุงความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก ด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 : การวิเคราะห์เชิงทดลองและแบบจำลอง Weibull

Enhancing AC Breakdown Strength of Iron-Contaminated Transformer Oil Using TiO_2 Nanoparticles: Experimental Evaluation and Weibull Analysis

จิรพงศ์ จิตรีเชาว์, ภคพล นาเสถียร, ชินพัฒน์ สุริยะสกุลพงษ์ และ พิชัย เมืองประทุม*

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (HVRU-RMUTI) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: Pichai.mu@rmuti.ac.th

Received 3 December 2025; Received in revised form 13 January 2026; Accepted 16 January 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนอนุภาคเหล็กต่อค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Breakdown Voltage: BDV) ของน้ำมันหม้อแปลง และประเมินศักยภาพของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในการเพิ่มสมบัติฉนวน น้ำมันหม้อแปลงสี่ชุดถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D877 ได้แก่ น้ำมันปกติ น้ำมันผสม TiO_2 น้ำมันปนเปื้อนเหล็ก และน้ำมันปนเปื้อนเหล็กที่ผสม TiO_2 พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูล BDV ด้วยการแจกแจงแบบ Weibull สองพารามิเตอร์ ผลการทดลองพบว่า การเติม TiO_2 ที่ความเข้มข้น 0.01% ช่วยเพิ่มค่า BDV ได้ 11.99% (จาก 74.20 kV เป็น 83.10 kV) ในขณะที่การปนเปื้อนอนุภาคเหล็กทำให้ค่า BDV ลดลง 51.54% (เหลือ 35.47 kV) อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม TiO_2 ในน้ำมันที่ปนเปื้อนเหล็ก ค่า BDV เพิ่มขึ้น 36.53% (เป็น 47.09 kV) แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ TiO_2 ในการลดผลกระทบทางลบจากอนุภาคโลหะ ผลการวิเคราะห์ด้วย Weibull พบว่า ตัวอย่างที่ผสม TiO_2 มีค่า shape parameter และ scale parameter สูงที่สุด และทุกตัวอย่างมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สะท้อนถึงความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของข้อมูล BDV โดยสรุป อนุภาคนาโน TiO_2 มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าและเสถียรภาพของสมบัติฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้และยืดอายุการใช้งานของระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: น้ำมันหม้อแปลง, อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, อนุภาคเหล็ก, ค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

Abstract

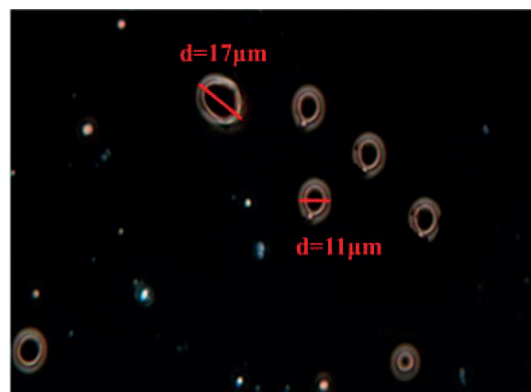
This study investigates the impact of iron particle contamination on the AC breakdown voltage (BDV) of transformer oil and evaluates the effectiveness of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles in enhancing its dielectric strength. Four oil samples were prepared according to ASTM D877: conventional transformer oil, oil with 0.01% TiO_2 nanoparticles, iron-contaminated oil, and contaminated oil enhanced with TiO_2 . BDV data were further analyzed using the two-parameter Weibull distribution to assess reliability and failure probability. The experimental

results indicate that adding TiO_2 increases the BDV by 11.99% (from 74.20 kV to 83.10 kV). In contrast, iron contamination significantly reduces the BDV by 51.54% (down to 35.47 kV). However, incorporating TiO_2 into iron-contaminated oil improves the BDV by 36.53% (47.09 kV), demonstrating its capability to mitigate the detrimental effects of metallic impurities. The Weibull analysis shows that the TiO_2 -enhanced samples exhibit the highest shape and scale parameters, indicating superior insulation consistency and higher breakdown endurance. All samples achieved p-values greater than 0.05, confirming the suitability of the Weibull distribution and the statistical reliability of the BDV measurements. In conclusion, TiO_2 nanoparticles effectively improve both the dielectric performance and the reliability of transformer oil under normal and iron-contaminated conditions, offering a promising approach to enhancing insulation stability and extending the operational lifespan of power transformer systems.

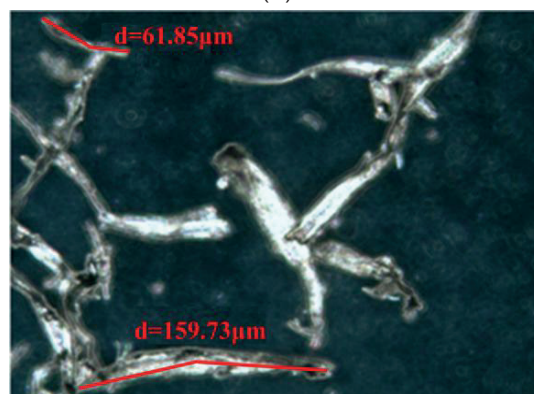
Keywords: Transformer oil, TiO_2 Nanoparticles, Iron particles, AC Breakdown voltage testing

บทนำ

ประสิทธิภาพการทำงานของน้ำมันหม้อแปลงมีความสำคัญอย่างมาก ต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวนไฟฟ้าและช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานอย่างต่อเนื่องของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยรักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่ [1] ความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงอาจได้รับผลกระทบจากอนุภาคปนเปื้อน ซึ่งการมีอยู่ของอนุภาคปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงถือเป็นสาเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า และเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ปริมาณอนุภาคปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นจากการเสื่อมสภาพของวัสดุหรือชิ้นส่วนภายใน ซึ่งส่งผลให้ค่าความเป็นฉนวนลดลงอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของประสิทธิภาพการทำงานของน้ำมันหม้อแปลงในหม้อแปลงระบบไฟฟ้าแรงสูง [2-3] สิ่งสกปรกที่ไม่ใช่อนุภาคโลหะ เช่น อนุภาคเซลลูโลส และฝุ่น สามารถปะปนเข้าไปในน้ำมันฉนวนได้ง่ายระหว่างกระบวนการผลิต หรือการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงการปนเปื้อนจากอนุภาคโลหะ เช่น ทองแดง และเศษเหล็ก อาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของขดลวดตัวนำหรือโครงสร้างหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างของอนุภาคปนเปื้อน [2]
(ก) อนุภาคโลหะ (ข) อนุภาคเซลลูโลส

การวิจัยโดย Suyi และคณะ [4] ได้ดำเนินการทดสอบเกี่ยวกับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเซลล์ูลอส ผลการทดสอบพบว่าอนุภาคเซลล์ูลอสทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าส่งผลให้มีการเชื่อมกันของอนุภาคเซลล์ูลอสทำให้มีความสามารถในการเกิดสะพานของอนุภาคปนเปื้อนระหว่างหัวอิเล็กโทรด เมื่อสะพานก่อตัวขึ้นอาจทำหน้าที่เป็นเส้นทางนำไฟฟ้า เป็นสาเหตุทำให้เกิดการคายประจุบางส่วน และการทดลองโดย Kaizheng และคณะ [5] ได้ทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคกลุ่มโลหะ คือ ชนิดอนุภาคทองแดงและอนุภาคเหล็ก ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผลกระทบรวมกันของประเภท ขนาด และความเข้มข้นของอนุภาค แสดงให้เห็นว่าสารอนุภาคปนเปื้อนมีผลเสียต่อความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้ยังมีรายงานจาก CIGRE อ้างถึงชนิดและขนาดของอนุภาคสารปนเปื้อน และระบุว่าอนุภาคสิ่งเจือปนในน้ำมันฉนวนจะเคลื่อนไปยังพื้นที่สนามไฟฟ้าสูง ซึ่งจะลดความเป็นฉนวนลงอย่างมาก [6]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นาโนเทคโนโลยีกลายเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการนักวิจัยโดยเฉพาะในด้านไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฉนวนไฟฟ้าความน่าสนใจคือ นาโนเทคโนโลยีไม่ได้มีผลแค่ช่วยเสริมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันฉนวนเท่านั้น แต่ยังเพิ่มความสามารถในการนำความร้อนได้อีกด้วย [7] ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อุณหภูมิกานาโนเป็นวัสดุฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองเกี่ยวกับน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยมีการใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SPAN 80 เพื่อให้อนุภาคนาโนสามารถกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบดังกล่าวได้ทดสอบค่าความ

ทนทานต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดันเพิ่มขึ้น 21.2% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงปกติ [8] อย่างไรก็ตามจนถึงขณะนี้ยังขาดการศึกษาทางไฟฟ้าของกรณีการปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโนจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรศึกษาอย่างละเอียด เพื่อพัฒนาแนวทางในการยืดอายุและรักษาประสิทธิภาพในการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทความนี้ได้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคปนเปื้อนหลักที่กระทำต่อคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่เสริมประสิทธิภาพด้วยการผสมสารอนุภาคนาโน TiO_2 โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีหัวอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ ตามมาตรฐาน ASTM D877 และผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคปนเปื้อนหลัก น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคนาโน TiO_2 และน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกที่ดี มีความคงทนต่อการเกิดออกซิเดชันและให้การถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพตรงตามมาตรฐาน IEC 60296 [9] ก่อนการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงจะถูกกรองด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดขนาด 50 ไมครอน เพื่อลดโอกาสจากสิ่งสกปรกแปลกปลอมอื่นๆ เช่น ฝุ่น ตะกอน ซึ่งจะส่งผลต่อความแม่นยำของผลการทดสอบ จากนั้นน้ำมันจะถูกนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ (Vacuum Oven) เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจตกค้างอยู่ในน้ำมัน เนื่องจากความชื้นมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการเป็นฉนวนของน้ำมัน การอบน้ำมันดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 60 °C ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความชื้นโดยไม่ทำลายคุณสมบัติอื่นๆ ของน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้ความดันในตู้อบจะถูกลดลงถึง -0.08 MPa หรือใกล้เคียงกับสูญญากาศสมบูรณ์ ซึ่งช่วยเร่งกระบวนการระเหยน้ำในน้ำมันโดยการอบนี้ใช้

เวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่าความชื้นถูกกำจัดออกให้ได้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกำจัดสิ่งแปลกปลอมในน้ำมันหม้อแปลง และควบคุมความชื้น

2. สารอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก

จากรายงานของ CIGRE [6] การปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ต่ำ กลาง และสูง โดยนักวิจัยบางกลุ่มได้ศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนเหล่านี้ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า และความร้อนของน้ำมันหม้อแปลง วิธีการหนึ่งที่ใช้เพื่อกำหนดความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กที่ปนเปื้อน คือ การตรวจนับจำนวนอนุภาคเหล็กหรือการเพิ่มน้ำหนักอนุภาคเหล็กในรูปเปอร์เซ็นต์แบบเฉพาะเจาะจง

อย่างไรก็ตามวิธีที่นิยมใช้อีกวิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มอนุภาคเหล็กในสัดส่วนของน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของน้ำมัน (%mass per volume, m/v) [10] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปริมาณการปนเปื้อนสารอนุภาคเหล็กที่ 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง โดยอนุภาคปนเปื้อนเหล็กดังกล่าวจัดหามาจาก Thermo Fisher Scientific Inc. (USA) [11] ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

3. สารอนุภาคนาโน

มีงานวิจัยจำนวนมากได้ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เข้ากับน้ำมันหม้อแปลง และทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าการเพิ่มอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในน้ำมันหม้อแปลงทำให้ค่าความฉนวนไฟฟ้าได้ดีกว่า และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ไม่ผ่านการเสริมประสิทธิภาพด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 [12]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชื่อเป็นทางการ	Iron Powder
สูตรโมเลกุล	Fe
ความบริสุทธิ์	99.5 %
ขนาด	20 μm
เกรดมาตรฐาน	ห้องปฏิบัติการ
สี	เทา
รูปร่าง	ผงแข็ง

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อนุภาคนาโน TiO_2 ที่มีขนาด 40 นาโนเมตร (nm) ดังที่แสดงในตารางที่ 2 และมีปริมาณความเข้มข้น 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งโครงสร้างผลึกของอนุภาคนี้นี้ คือ “อนาเทส” โครงสร้างนี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ [13]

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชื่อเป็นทางการ	Titanium Dioxide Nano Powder
สูตรโมเลกุล	TiO_2
ความบริสุทธิ์	99.9%
ขนาด	40 nm
เกรดมาตรฐาน	ห้องปฏิบัติการ
ความหนาแน่น	3.89 g/cm^3
พื้นที่ผิวจำเพาะ	40 m^2/g
สี	ขาว
สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมผัส	100 (F/m)

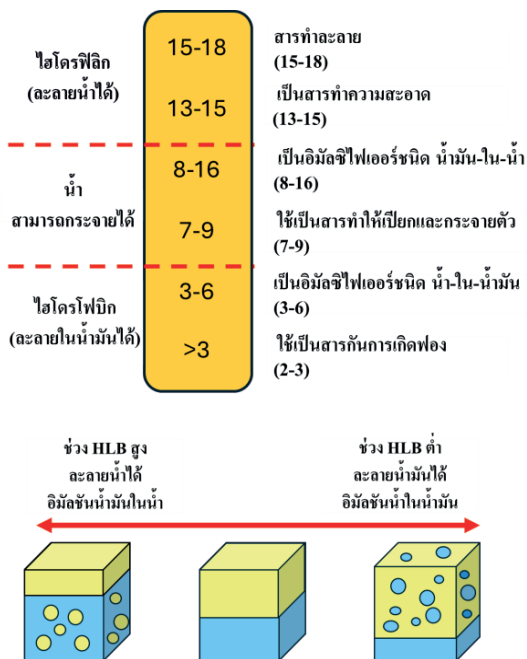
4. สารลดแรงตึงผิว

เนื่องด้วยน้ำมันหม้อแปลงซึ่งเป็นของเหลว และอนุภาคนาโนที่เป็นของแข็ง การรวมกันของ 2 สิ่งจึงเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากอนุภาคนาโนอาจจะไม่สามารถกระจายตัวในน้ำมันหม้อแปลงได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของน้ำมันหม้อแปลงไม่เต็มที่เท่าที่ควร หนึ่งในวิธีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา คือ การใช้ซิลิโคนไฟเบอร์ หรือ

สารลดแรงตึงผิวเป็นตัวเชื่อมระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับอนุภาคนาโน ซึ่งจะทำงานโดยมีส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างทั้งสองสิ่งนี้จะบอกถึงคุณสมบัติการกระจายตัวของสารลดแรงตึงผิวตามที่แสดงในสมการที่ (1) โดยที่ HLB แทนอัตราส่วนของชอบน้ำต่อชอบน้ำมันและ M_h แทนน้ำหนักโมเลกุลของกลุ่มที่ชอบน้ำ M แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว [14]

$$HLB = 20 * \frac{M_h}{M} \quad (1)$$

นอกจากนี้ค่า HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance) ยังสามารถระบุคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่า HLB เหมาะสำหรับการใช้สารลดแรงตึงผิวในงานวิจัยนี้คือประเภทน้ำในน้ำมัน (W/O emulsions) โดยค่า HLB จะอยู่ในช่วง 3-6 ยิ่งสารลดแรงตึงผิวที่มีค่าใกล้เคียงกับ 3 จะมีความสามารถในการละลายน้ำมันได้มากกว่า [15]



รูปที่ 3 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหรือน้ำ [14]

ดังนั้นในการศึกษาจึงได้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิว SPAN 80 ที่ความเข้มข้น 90% ของปริมาณสารอนุภาคนาโน ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้ค่าการทดสอบทาง

ไฟฟ้าที่ดีที่สุด [8] โดยมีค่า HLB ที่ 4.3 เป็นอิมัลซิไฟเออร์น้ำในน้ำมันที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่นำสารลดแรงตึงผิว SPAN 80 ร่วมกับสารอนุภาคนาโน [16-17]

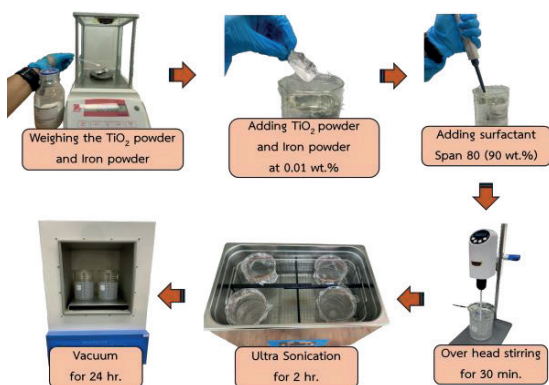
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

1. การผสมสารอนุภาคในน้ำมันหม้อแปลง

หลังจากน้ำมันหม้อแปลงผ่านกระบวนการกรองสิ่งสกปรก และไล่ความชื้นแล้ว จากนั้นการเติมอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก และอนุภาคนาโน TiO_2 ในปริมาณที่กำหนดไว้ที่ 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง การชั่งน้ำหนักของอนุภาคนาโนจะดำเนินการด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูงที่มีความแม่นยำสูงถึง 4 ตำแหน่งทศนิยมเพื่อให้ได้ปริมาณสารที่แม่นยำที่สุด พร้อมทั้งเติมสารลดแรงตึงผิว SPAN 80 ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระจายตัวและการช่วยลดการเกาะกลุ่มของอนุภาคนาโนในน้ำมันหม้อแปลง โดยปริมาณของ SPAN 80 ถูกกำหนดที่ความเข้มข้น 90% ปริมาณสารอนุภาคนาโน กระบวนการผสมสารเริ่มต้นด้วยการเติมสารอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก และสารอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นอย่างเข้มงวด จากนั้นน้ำมันจะถูกกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบเพลตตั้ง (Overhead Stirrer) เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งช่วยให้สารอนุภาคทั้งหมดกระจายตัวในน้ำมันได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) [18] และหลีกเลี่ยงอนุภาคปนเปื้อนเหล็กติดกับแท่งกวนสารแม่เหล็ก (Magnetic Bar) ซึ่งทำให้ปริมาณสารผิดเพี้ยนจากที่กำหนดไว้ที่ 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง หลังจากการกวนเบื้องต้นด้วยเครื่องกวนสารแบบเพลตตั้งเสร็จสิ้นแล้ว กระบวนการต่อไป คือการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultra Sonication) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการช่วยกระจายตัวของอนุภาคนาโนให้เข้ากับน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้เครื่องสร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่ทำงานภายใต้อุณหภูมิ 60°C กระบวนการนี้ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคนาโนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระดับนาโน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการอบไล่ความชื้นในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 24

ชั่วโมงอีกครั้ง เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจหลงเหลือในน้ำมัน ก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจากความชื้นที่อาจหลงเหลือในน้ำมันหม้อแปลงจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติฉนวน และอาจนำไปสู่ผลการทดสอบที่คลาดเคลื่อน

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการทั้งหมด ตัวอย่างที่ได้ทั้งหมดจะพร้อมทำการทดสอบหาค่าความคงทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยขั้นตอนและรายละเอียดทั้งหมดของกระบวนการนี้แสดงดังในรูปที่ 4



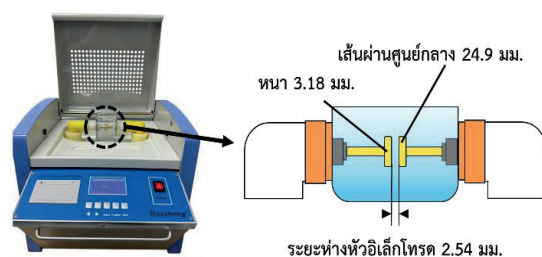
รูปที่ 4 ขั้นตอนการผสมสารอนุภาคในน้ำมันหม้อแปลง

2. การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบนี้ถือเป็นวิธีที่สำคัญในการตรวจสอบคุณสมบัติฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขีดจำกัดของน้ำมันในการทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับก่อนนำไปใช้งานจริง กระบวนการทดสอบนี้ช่วยประเมินความสามารถของน้ำมันในการป้องกันการเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าภายใต้แรงดันสูง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ปรับปรุงด้วยการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ซึ่งช่วยในการเสริมประสิทธิภาพความเป็นฉนวน และกรณีที่น้ำมันหม้อแปลงที่ถูกปนเปื้อนด้วยอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก

การทดสอบดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดันเบรกดาวนรุ่น HZJQ-1 (Transformer Oil BDV Tester) ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่ความถี่ 50 Hz พร้อมอิเล็กโทรดชนิด ระนาบ-ระนาบ มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.54 มิลลิเมตร เส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 24.9 มิลลิเมตร ความหนา 3.18 มิลลิเมตร และรัศมีขอบ 0.254 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าจะถูกเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 3 kV/s การดำเนินการเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D877 [19] เพื่อให้แน่ใจว่าการกระจายตัวของอนุภาคปนเปื้อนเหล็กสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ โดยตัวอย่างน้ำมันจะถูกกวนให้เข้ากันอย่างทั่วถึงเป็นเวลา 2 นาที โดยเครื่องกวน Overhead Stirrer ก่อนการทดสอบทุกครั้ง [20-21] สำหรับประเภทแต่ละตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจะแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบค่าความคงทนต่อไฟฟ้ากระแสสลับและชุดทดสอบหัวอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ลำดับ ตัวอย่าง	ประเภทของตัวอย่างทดสอบ	
	กรณี	รายละเอียด
1	ไม่ปนเปื้อน	Transformer Oil (TO)
2		TO + TiO_2
3	ปนเปื้อน	TO + Iron
4		TO + Iron + TiO_2

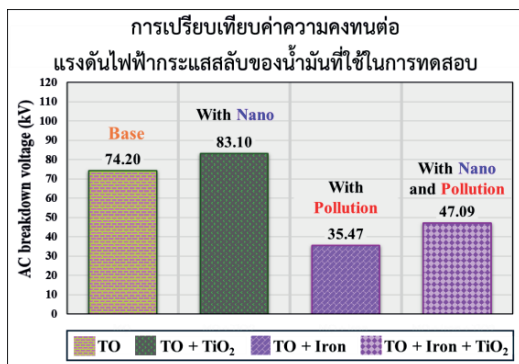
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

จากผลการทดสอบ พบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงขึ้นที่ 11.99% (83.10 kV) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงปกติที่มีการทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 74.20 kV โดยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเติมสารอนุภาคนาโน TiO_2 ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SPAN 80

ซึ่งช่วยให้สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในน้ำมันหม้อแปลง การกระจายตัวนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้การป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโน TiO_2 มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในน้ำมันหม้อแปลงแล้ว อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำมันจะถูกหน่วงหรือชะลอการเคลื่อนที่ซึ่งส่งผลให้กระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนในน้ำมันหม้อแปลงเกิดขึ้นได้ช้าลง [22]

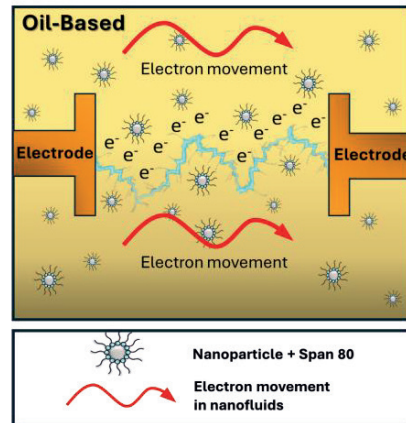
ในกรณีของน้ำมันหม้อแปลงปกติที่ปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก ผลจากการทดสอบพบว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลดลงต่ำสุดที่ 35.47 kV คิดเป็น -51.54% เมื่อเทียบกับผลทดสอบในน้ำมันหม้อแปลงปกติ ในขณะที่น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 และมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 47.09 kV คิดเป็น -36.53% เมื่อเทียบกับผลทดสอบในน้ำมันหม้อแปลงปกติ ซึ่งจากผลทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโน TiO_2 สามารถช่วยให้น้ำมันหม้อแปลงยังคงมีเสถียรภาพต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแม้จะมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ

อีกทั้งอนุภาคนาโน TiO_2 มีการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian Motion) [23] ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่มที่ช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เป็นผลให้กระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ช้าลง ทำให้การเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer

Breakdown) ช้าลง และส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคนาโน TiO_2

ในขณะเดียวกันผลการทดสอบยังสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการนำไฟฟ้าแมกซ์เวลล์ [24] การนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็กสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

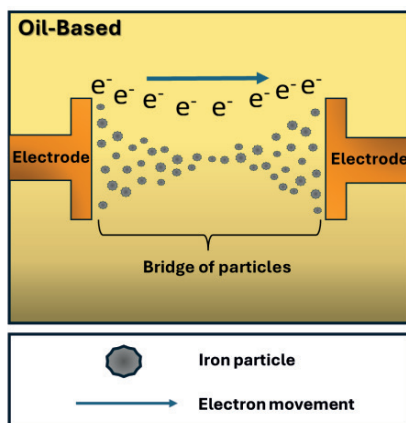
$$\gamma = \gamma_f \left[1 + \frac{3\phi}{(\alpha + 2)/(\alpha - 1) - \phi} \right] \quad (2)$$

โดยที่ γ และ γ_f คือค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตามลำดับ $\alpha = \gamma_p / \gamma_f$ คืออัตราส่วนค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคเซลล์โลสต่อน้ำมันหม้อแปลง และ ϕ คือปริมาณของอนุภาคเหล็กในน้ำมันที่ปนเปื้อน ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของเหล็กมีค่ามากกว่าน้ำมันมาก ดังนั้นจึงสามารถเขียนใหม่ให้ง่ายขึ้นได้ดังสมการที่ (3)

$$\gamma = \gamma_f [1 + 3\phi / (1 - \phi)] \quad (3)$$

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนอนุภาคปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้น จะเกิดฟองก๊าซมากขึ้นเมื่อเกิดความร้อน และความนำไฟฟ้าของน้ำมันทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความคงทนต่อไฟฟ้ากระแสสลับลดลงเมื่อจำนวนอนุภาคเหล็กเพิ่มขึ้น และการลดลงของค่าความคงทนต่อไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้น เมื่ออนุภาคเหล็กมีจำนวน

อนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ตัวของอนุภาคเหล็กจะถูกเหนี่ยวนำเข้าหาหัวอิเล็กโทรดทำให้เกิดสะพานของอนุภาคบนแป้นระหว่างหัวอิเล็กโทรด [25] อนุภาคเหล่านี้ทำให้เกิดการคายประจุบางส่วนและเกิดการเบรกดาวน (Breakdown) ในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และการเกิดสะพานอนุภาค ในน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก

2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Weibull

การศึกษาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับของตัวอย่างทดสอบ ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้การแจกแจงแบบ Weibull Distribution เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Weibull แบบสองพารามิเตอร์เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

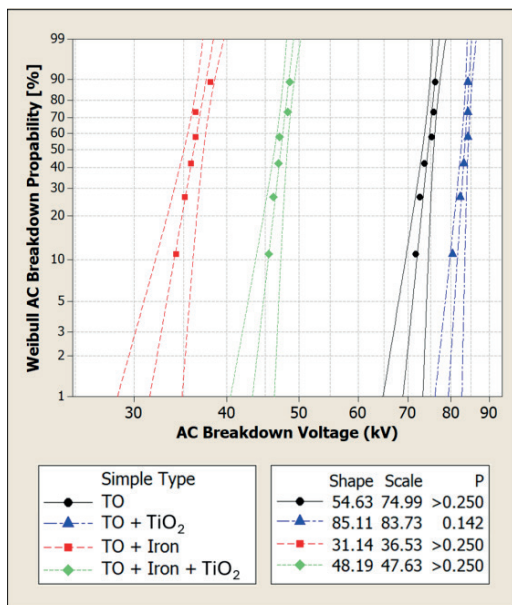
$$F(x) = 1 - e^{\left(-\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (4)$$

ซึ่งกำหนดให้ $F(x)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นสะสมของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน นอกจากนี้ x คือแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน อีกทั้ง β คือพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter) และ η คือพารามิเตอร์สเกล (Scale Parameter) ในกราฟ Weibull ค่าความน่าจะเป็น ρ ใช้เป็นตัวชี้วัดในการทดสอบความเหมาะสมในการกระจายตัวของข้อมูล [26]

จากการวิเคราะห์ด้วยการแจกแจง Weibull เมื่อพิจารณาจากค่า Shape Parameter (β) ซึ่งใช้บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวน หากค่าสูง ผลทดสอบจะคงที่ไม่กระจาย โดยพบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีค่า Shape สูงสุด แสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงและสม่ำเสมอที่สุด รองลงมาคือน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ ขณะที่การมีอนุภาคเหล็กปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมและไม่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 ทำให้ค่า Shape ลดลง แสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนไม่คงที่ ด้าน Scale Parameter (η) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า พบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีค่า Scale สูงสุด แสดงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีที่สุด รองลงมาคือน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ น้ำมันหม้อแปลงผสมอนุภาคนาโน TiO_2 ที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก และน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก ตามลำดับ ในส่วนของ p-value (ρ) ใช้บ่งบอกถึงความเหมาะสมของการกระจายตัวของข้อมูล โดยทุกตัวอย่างทดสอบมีค่า $\rho > 0.250$ หมายถึงข้อมูลสามารถปรับเข้ากับ Weibull Distribution ได้ดี ยกเว้นน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีค่าที่ 0.142 ซึ่งมีความมากกว่า 0.05 ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ ไม่เบี่ยงเบนจากการแจกแจง Weibull มีความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมเบรกดาวนของน้ำมันทดสอบ [27] ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ Weibull Distribution

ตัวอย่างทดสอบ	β	η	ρ
Transformer Oil (TO)	54.63	74.99	>0.250
TO + TiO_2	85.11	83.73	0.142
TO + Iron	31.14	36.53	>0.250
TO + Iron + TiO_2	48.19	47.63	>0.250



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้การวิเคราะห์ Weibull

สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัย พบว่าเมื่อผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ลงในน้ำมันหม้อแปลงจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความเป็นฉนวนของน้ำมันได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านของค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ เนื่องจากอนุภาคนาโน TiO₂ สามารถชะลอการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ซึ่งผลดังกล่าวสามารถสังเกตได้ทั้งในสถานะที่น้ำมันไม่มีการปนเปื้อน และมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคนาโน TiO₂ และมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก ค่าความทนแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลงแต่ยังคงสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของอนุภาคนาโน TiO₂ ในการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับฉนวนไฟฟ้าในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการดำเนินงาน การนำเสนอ และ

การเผยแพร่ผลงานวิจัยฉบับนี้และขอขอบคุณทีมวิจัยไฟฟ้าแรงสูง หน่วยวิจัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (HVRU-RMUTI)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiosseu, J. L., Mengounou, G. M., Nkouetcha, E. T., and Imano, A. M. (2023). Effect of ageing of monoesters and mineral oil on the propagation of creeping discharges, *Applied Journal of Electrostatics*, vol. 123, pp. 1-13.
- [2] Dan, M., Hao, J., Liao, R., Cheng, L., Zhang, J. and Li, F. (2019). Accumulation behaviors of different particles and effects on the breakdown properties of mineral oil under DC voltage, *Applied Journal of Energies*, vol. 12(12), pp. 1-15.
- [3] Saaidon, S., Chen, G. and Golosnoy, I. (2017). Influence of temperature variation of oil contamination on electrical performance of power transformer, *Applied Conf. IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, United Kingdom, pp. 1-5.
- [4] Xia, S., Pan, C., Yao, Y., Zheng, Z., Qin, S., Tang, J. and Zhu, S. (2023). Bridging characteristics of cellulosic particles in flowing transformer oil, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 30(3), pp. 1056–1065.
- [5] Wang, K., Wang, F., Li, J., Zhao, Q., Wen, G. and Zhang, T. (2018). Effect of metal particles on the electrical properties of mineral and natural ester oils, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25(5), pp. 1621–1627.
- [6] CIGRE, (2000). *effect of particles on transformer dielectric strength*, Working Group 17 of Study Committee 12, pp. 6–42.



[7] Mansour, D. E. A., Shaalan, E. M., Ward, S. A., Dein, A. Z. El., Karaman, H. S. and Ahmed, H. M. (2019). Multiple nanoparticles for improvement of thermal and dielectric properties of oil nanofluids, *Applied IET Science, Measurement & Technology*, vol. 13(7), pp. 968–974.

[8] Suriyasakulpong, C. and Muangpratoom, P. (2024). Effect of span 80 surfactant in transformer oil based TiO_2 nanofluids on the electrical properties of lightning impulse voltage, *Applied Conf. International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, Pattaya Chonburi, Thailand, pp. 1–4.

[9] IEC 60296. (2020). Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment. *International Electrotechnical Commission (IEC)*, Geneva, Switzerland.

[10] Amin, N. A. M., Ishak, M. T. and Suhaimi, N. S. (2022). Cellulose Particles' Effect on the Electrical Field Distribution Between Palm Oil and Mineral Oil Insulation Systems, *Applied IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Langkawi Kedah, Malaysia, pp. 464–468.

[11] Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA. (2006). URL: <https://www.thermofisher.com>, access on 25/10/2025

[12] Huang, M., Li, S., Zhang, L., Yao, Y., Lv, Y., Chen, Xi. and Pang, W. (2022). Improvement of breakdown and flashover properties against thermal aging of oil paper insulation through addition of TiO_2 nanoparticles, *Applied IET Generation,*

Transmission & Distribution, vol. 17(7), pp. 821–831.

[13] Inframat Advanced Materials LLC, Company information, 151 Progress Dr, Manchester, CT, USA. <http://www.advancedmaterials.us>, access on 25/10/2025

[14] Al-Yami, A. S., Vikrant, W., Abrar, A. S., and Hussain, A. B. (2018). Emulsifiers used in designing emulsion based drilling fluids. *Journal of Chemistry*, vol. 7(4), pp. 1–20.

[15] Pant, A., Jha, K. and Singh, M. (2019). Role of excipient's HLB values in microemulsion system, *Applied IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, vol. 14(2), pp. 1–6.

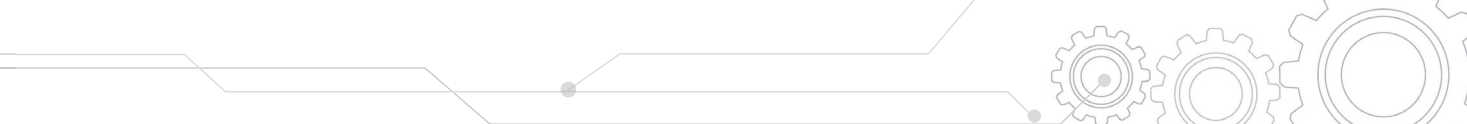
[16] Sima, W., Shi, J., Yang, Q., Huang, S., and Cao, X. (2015). Effects of conductivity and permittivity of nanoparticle on transformer oil insulation performance: experiment and theory, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22(1), pp. 380–390.

[17] Atiya, E. G., Mansour, D. E. A., Khattab, R. M., and Azmy, A. M. (2015). Dispersion behavior and breakdown strength of transformer oil filled with TiO_2 nanoparticles, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22(5), pp. 2463–2472.

[18] Saufi, M. A. and Mamat, H. (2022). Comparison of dispersion techniques of graphene nanoparticles in polyester oil, *Applied Materials Today: Proceedings*, vol. 66(5), pp. 2747–2751.

[19] ASTM D877-02. (2002). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.





[20] Cheng, L., Jiang, Y., Dan, M., Wen, H., Li, Y., Qin, W., and Hao, J. (2020). Effects of fiber and copper particles on conductivity and breakdown characteristics of natural ester and mineral oil under DC voltage, *Applied Energies*, vol. 13(7), pp. 1–16.

[21] Hao, J., Liao, R., Dan, M., Li, Y., Li, J., and Liao, Q. (2017). Comparative study on the dynamic migration of cellulose particles and its effect on the conductivity in natural ester and mineral oil under DC electrical field, *Applied IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11(9), pp. 2375–2383.

[22] Nor, S. F. M., Azis, N., Jasni, J., Ab Kadir, M. Z. A., Yunus, R., and Yaakub, Z. (2017). Investigation on the electrical properties of palm oil and coconut oil based TiO_2 nanofluids, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24(6), pp. 3432–3442.

[23] Fernández, I., Valiente, R., Ortiz, F., Renedo, C. J., and Ortiz, A. (2020). Effect of TiO_2 and ZnO nanoparticles on the performance of dielectric nanofluids based on vegetable esters during their aging, *Applied Nanomaterials*, vol. 10(4), pp. 1–18.

[24] Zhang, J., Li, J., Wang, Y., Li, Y., and Li, X. (2018). Breakdown voltage of transformer oil contaminated with iron particles at pulsating DC voltage, *Applied Electric Power Components and Systems*, vol. 46(11–12), pp. 1321–1329.

[25] Yao, Y., Su, Z., Pan, C., Xia, S., Yu, M., and Tang, J. (2023). Distributed characteristics of free metallic particles in flowing transformer oil under DC and AC voltages, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and*

Electrical Insulation, vol. 30(4), pp. 1441–1450.

[26] Jin, H. (2015). Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands

[27] Safari, M. A. M., Masseran, N., Majid, M. H. A., and Tajuddin, R. R. M. (2025). Robust estimation of the three-parameter Weibull distribution for addressing outliers in reliability analysis, *Applied Scientific Reports*, vol.15(1), pp. 1–14.