

การศึกษาพฤติกรรมความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วย
อนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และแบเรียมไททาเนท

THE STUDIES OF DIELECTRIC BEHAVIOR OF MINERAL OIL WHEN MIXED
WITH TITANIUM DIOXIDE, ZINC OXIDE AND BARIUM TITANATE
NANOPARTICLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-161

การศึกษาพฤติกรรมความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วย
อนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และแบเรียมไททาเนท

THE STUDIES OF DIELECTRIC BEHAVIOR OF MINERAL OIL WHEN MIXED
WITH TITANIUM DIOXIDE, ZINC OXIDE AND BARIUM TITANATE
NANOPARTICLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-D-018-161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDIES OF DIELECTRIC BEHAVIOR OF MINERAL OIL WHEN MIXED
WITH TITANIUM DIOXIDE, ZINC OXIDE AND BARIUM TITANATE
NANOPARTICLES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-D-018-161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาพฤติกรรมความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งออกไซด์และแบเรียมไททาเนท |
| นักศึกษา | นายพิชัย เมืองประทุม |
| รหัสนักศึกษา | 58601304 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2561 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ. ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้ากำลัง โดยทำการศึกษาคคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโน วัสดุนาโนที่จะนำมาศึกษาวิจัยประกอบด้วยสารประกอบนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งออกไซด์ และแบเรียมไททาเนท ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 นาโนเมตร ตัวอย่างของเหลวนาโนในการทดสอบแบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.01 % ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.03 % ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง ก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะทำการทดสอบหาค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโนภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ ทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเบรกดาวน์ทั้งชั่วคราวและชั่วคราวภายใต้อุณหภูมิห้อง ทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับที่อุณหภูมิห้อง และการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส การทดสอบในงานวิจัยนี้ อ้างอิงตามมาตรฐานนานาชาติ ผลการวัดค่าความชื้นในตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของตัวอย่างฉนวนเหลวทั้งหมด พบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโนมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิม ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า พบว่าอนุภาคนาโนซึ่งออกไซด์ ที่ถูกผสมลงในน้ำมันหม้อแปลง เพิ่มความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราว สำหรับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวนั้น น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวลดลง ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน อนุภาคนาโนทั้งสามชนิดมีผลให้ค่าเริ่มต้นการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้น และผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ของตัวอย่างทดสอบของเหลวนาโนทั้งหมด แสดงให้เห็นผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญในทุกอุณหภูมิของการทดสอบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ดีของอนุภาคนาโนที่มีต่อการประยุกต์ใช้ เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ยกเว้นในเรื่องของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาวิเคราะห์ปรับปรุงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis | The Studies of Dielectric Behavior of Mineral Oil When Mixed with Titanium Dioxide, Zinc Oxide and Barium Titanate Nanoparticles |
| Student | Mr. Pichai Muangpratoom |
| Student ID | 58601304 |
| Degree | Doctor of Engineering |
| Program | Electrical Engineering |
| Year | 2018 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech |

Abstract

This thesis presents the study of nanotechnology application in electric power by investigation of the electrical properties of mineral oil when mixed with nanoparticles. The nanomaterials that were studied comprised of Titanium Dioxide, Zinc Oxide, and Barium Titanate nanoparticles, with a diameter less than 100 nanometers. The nanofluid samples used in the experiments were separated into two groups, which were mineral oil mixed with nanoparticles at 0.01% concentration of mineral oil volume, and mineral oil mixed with nanoparticles at 0.03% concentration of mineral oil volume. Before starting the electrical property tests, a moisture content in the samples was measured, Then, electrical property tests were conducted, i.e. AC breakdown voltage at the temperatures of 35-90 degree Celsius, lightning impulse breakdown voltages both positive and negative impulse polarities at the room temperature, partial discharge under AC voltage at room temperature, and dielectric dissipation factor at the temperatures of 35-90 degree Celsius. All tests were performed to compare with unmodified mineral oil. The tests in the research were performed according to international standard references. The results showed that all of the moisture values of the samples were similar. The mineral oil mixed with nanoparticles provided higher AC breakdown voltage than unmodified mineral oil. For lightning impulse breakdown voltage test, only Zinc Oxide nanoparticles added in mineral oil increased positive lightning impulse breakdown voltage, whereas all mineral oil mixed with nanoparticles reduced negative lightning impulse breakdown voltage compared with unmodified mineral oil. Besides, all 3 types of nanoparticles increased partial discharge inception voltage of mixed samples. However, dielectric dissipation factor samples of nanofluids significantly increased. The findings implied a good tendency of nanoparticles in enhancing electrical properties of mineral oil, except dielectric dissipation factor that requires further investigation for improvement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา เกี่ยวกับความรู้ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและงานวิจัยด้านการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงเรื่องอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ผู้เขียนรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิรุณ ฤทธิโกวิท ที่ให้คำแนะนำและเทคนิคต่างๆ ด้านการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้อย่างดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรณวิทย์ วิทยากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการใช้งานอุปกรณ์และคำแนะนำในด้านนาโนเทคโนโลยี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง (ประธานกรรมการสอบ: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน) ที่ให้คำแนะนำ เพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อานันท์ วัฒนคุณากร (กรรมการสอบ) ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชรินทร์ บุญลักษณะนาม (กรรมการสอบ) ที่ให้ข้อเสนอแนะ เพื่อพัฒนาต่อยอดงานวิจัยที่หลากหลายมากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ จิรวิภากร (กรรมการสอบ) ที่ให้ความคิดเห็น และข้อแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้กับผู้เขียน

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สจล. ที่ได้ให้ใช้สถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ดา มณีโรจน์ แห่งบริษัท ละมุลหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ที่เอื้อเฟื้อน้ำมันหม้อแปลงและอุปกรณ์ทดสอบหลายอย่างให้ได้ใช้ศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเพทาย นิมสนอง คุณพัชรี ทองอินตะ คุณกิตติพิศ จรรย์นุรัตน์ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ที่ช่วยเหลือในการทดสอบและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ ดันสังกัต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้โอกาสและทุนการศึกษา ในการมาศึกษาต่อระดับปริญญาเอก

ขอขอบคุณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ทุกๆ ท่านที่คอยสอบถามให้กำลังใจเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุธรรม คุณแม่เรียวร้อย เมืองประทุม คุณพินภาพร ศรีสุคันธ พฤกษ์ (เมืองประทุม) คุณพีรสิทธิ์ เมืองประทุม ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณ คุณอิสราพร เมืองประทุม (ชนชัยภูมิ) ภรรยาผู้อยู่เบื้องหลังและเป็นแรงใจสำคัญที่ทำให้ผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิชัย เมืองประทุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญรูป..... | VII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 1 |
| 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.6 ขั้นตอนการศึกษา..... | 3 |
| 1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 6 |
| 2.1 น้ำมันหม้อแปลง..... | 6 |
| 2.1.1 พาราฟิน..... | 6 |
| 2.1.2 แนฟทีน..... | 7 |
| 2.1.3 อะโรมาติก..... | 8 |
| 2.1.4 โอเลฟิน..... | 8 |
| 2.1.5 น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัย..... | 8 |
| 2.2 วัสดุนาโนเทคโนโลยี..... | 9 |
| 2.2.1 หลักการของโครงสร้างนาโน..... | 12 |
| 2.2.2 วัสดุนาโนที่ใช้ในงานวิจัย..... | 13 |
| 2.3 สารลดแรงตึงผิว..... | 14 |
| 2.4 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว..... | 17 |
| 2.5 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก..... | 18 |
| บทที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลว..... | 22 |
| 3.1 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน..... | 21 |
| 3.2 การทดสอบหาค่าความชื้นในตัวอย่างทดสอบ..... | 25 |
| 3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า..... | 25 |
| 3.3.1 การทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน..... | 25 |
| 3.3.2 การทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนทั้งชั่วบวกและชั่วลบ..... | 27 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.3.3 การทดสอบการเกิดดิซซาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ..... | 28 |
| 3.3.4 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก..... | 29 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลว..... | 31 |
| 4.1 ผลการทดสอบหาค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง..... | 31 |
| 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า..... | 32 |
| 4.2.1 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์..... | 32 |
| 4.2.2 ผลการทดสอบค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ..... | 36 |
| 4.2.3 ผลการทดสอบการเกิดดิซซาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ..... | 42 |
| 4.2.4 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก..... | 45 |
| | |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ..... | 48 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 48 |
| 5.1.1 การทดสอบวัดค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง..... | 48 |
| 5.1.2 ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์..... | 48 |
| 5.1.3 ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ..... | 48 |
| 5.1.4 การเกิดดิซซาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ..... | 49 |
| 5.1.5 ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก..... | 49 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 49 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 50 |
| ภาคผนวก..... | 53 |
| ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 54 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 101 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--------------|---|
| ตารางที่ 2.1 | โครงสร้างโมเลกุลของส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอน.....7 |
| ตารางที่ 2.2 | เปรียบเทียบคุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลงที่แยกตามชนิด.....8 |
| ตารางที่ 2.3 | ข้อมูลจำเพาะของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้.....9 |
| ตารางที่ 2.4 | ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับวัสดุนาโนประเภท TiO_2 , ZnO และ BaTiO_313 |
| ตารางที่ 2.5 | ค่า HLB และการใช้สารลดแรงตึงผิว.....15 |
| ตารางที่ 4.1 | ผลการวัดความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุง คุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน กลุ่มที่ 1 ความเข้มข้น 0.01%.....31 |
| ตารางที่ 4.2 | ผลการวัดความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุง คุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน กลุ่มที่ 2 ความเข้มข้น 0.03%.....32 |
| ตารางที่ 4.3 | ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์น้ำมันหม้อแปลงเดิม ก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน 0.01% และ 0.03% ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....33 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อน ปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง.....38 |
| ตารางที่ 4.5 | ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อน ปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง.....38 |
| ตารางที่ 4.6 | ผลการทดสอบค่า PDIV, Q _{PDIV} และ Q _{max} (บันทึกค่า 1 นาที) ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสม เข้ากับอนุภาคนาโน ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง.....43 |
| ตารางที่ 4.7 | ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับ อนุภาคนาโน ความเข้มข้น 0.01% ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....46 |
| ตารางที่ 4.8 | ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับ อนุภาคนาโน ความเข้มข้น 0.03% ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....46 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|-------------|---|
| รูปที่ 2.1 | องค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง.....6 |
| รูปที่ 2.2 | เปรียบเทียบขนาดนาโนเมตรกับสิ่งต่างๆ.....10 |
| รูปที่ 2.3 | การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ แม้จะมีปริมาตรเดียวกัน.....11 |
| รูปที่ 2.4 | การเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคสารประกอบไฮเลนและโมเลกุลโพลิเมอร์.....12 |
| รูปที่ 2.5 | การจัดเรียงโมเลกุลโซ่โพลิเมอร์ที่ขนานหรือตั้งฉากกับพื้นผิวของอนุภาคนาโน.....12 |
| รูปที่ 2.6 | ภาพ SEM ของอนุภาคนาโน (ก) อนุภาคนาโน TiO ₂ (ข) อนุภาคนาโน ZnO.....13 |
| รูปที่ 2.6 | ภาพ SEM ของอนุภาคนาโน (ต่อ) (ค) อนุภาคนาโน BaTiO ₃14 |
| รูปที่ 2.7 | ภาพประกอบแผนผังของสารลดแรงตึงผิวสี่ประเภท.....15 |
| รูปที่ 2.8 | ภาพประกอบลักษณะอิมัลชันระหว่างน้ำกับน้ำมัน.....16 |
| รูปที่ 2.9 | ภาพประกอบลักษณะสารลดแรงตึงผิวและการประยุกต์ใช้.....17 |
| รูปที่ 2.10 | เปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก.....19 |
| รูปที่ 2.11 | วงจรสมมูลของฉนวนเหลว.....19 |
| รูปที่ 2.12 | คุณลักษณะโพลาริเซชันของฉนวนเหลว.....21 |
| รูปที่ 3.1 | แผนภาพของกระบวนการเตรียมตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน.....23 |
| รูปที่ 3.2 | บล็อกไดอะแกรมอธิบายสิบสองชนิดตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน.....24 |
| รูปที่ 3.3 | บล็อกไดอะแกรมอธิบายหกชนิดตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน.....24 |
| รูปที่ 3.4 | เครื่องมือวัดหาปริมาณความชื้น (Karl Fischer Titrators) เพื่อประเมินปริมาณน้ำที่มีอยู่ในกลุ่มตัวอย่าง.....25 |
| รูปที่ 3.5 | อุปกรณ์การทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ (Model: IJ-II-80).....26 |
| รูปที่ 3.6 | วงจรทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์.....27 |
| รูปที่ 3.7 | แผนภาพวงจรสำหรับการทดสอบหาค่า PD, PDIV.....29 |
| รูปที่ 3.8 | การจัดเตรียมวงจรการทดสอบ.....29 |
| รูปที่ 3.9 | การจัดเตรียมวงจรการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริกสำหรับทดสอบตัวอย่างของเหลว (Model: SOKEN DAC-IM-D6).....29 |
| รูปที่ 4.1 | ผลของอุณหภูมิต่อค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งในกลุ่มที่มีและไม่มี Span 80.....34 |
| รูปที่ 4.2 | ผลของอุณหภูมิโดยการพิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์สำหรับน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งที่มีและไม่มี Span 80.....36 |
| รูปที่ 4.3 | ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการแตร็ปประจุ (charge trapping).....37 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเดิม ก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน..... | 39 |
| รูปที่ 4.5 การเรียงตัวของไอออนภายใต้แรงดันดิมพัลส์ชั่วบวก..... | 41 |
| รูปที่ 4.6 การเรียงตัวของไอออนภายใต้แรงดันดิมพัลส์ชั่วลบ..... | 41 |
| รูปที่ 4.7 การทดสอบ PD ที่ค่า PDIV ของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับ อนุภาคนาโน TiO ₂ ที่มีความเข้มข้น 0.03%..... | 42 |
| รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของปลายเข็มทั้งสแตนท์ที่ใช้ในการทดสอบ..... | 44 |
| รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) น้ำมันหม้อแปลง เดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งที่มีและไม่มี Span 80..... | 47 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power transformer) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบันใช้น้ำมันหม้อแปลง (Mineral oil) เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และช่วยในการระบายความร้อน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใหม่หรือหม้อแปลงไฟฟ้าเก่าที่มีระดับน้ำมันพร่องไปต้องมีการเติมน้ำมันที่ผ่านการทดสอบความเป็นฉนวนตามมาตรฐานทุกครั้ง หากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีปัญหา ก็จะก่อให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและสร้างความเสียหายอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรมและผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นควรมีการดูแลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายขึ้นมา ปัญหาส่วนใหญ่ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เกิดมาจากน้ำมันหม้อแปลงเสื่อมคุณภาพ ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความร้อน ความชื้น เป็นต้น การปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง เป็นการยืดระยะเวลาการใช้งานและลดต้นทุนในการซื้อหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ สามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่าและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ ถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้ากำลัง วัสดุนาโนที่จะนำมาศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ประกอบด้วยสารประกอบนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ Titanium dioxide (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ Zinc oxide (ZnO) และแบเรียมไททาเนต Barium titanate (BaTiO_3) จากรายงานการวิจัยเบื้องต้นจากวารสารวิจัยของ IEEE, IET หรือ ELSEVIER พบว่าการใช้วัสดุนาโนผสมกับน้ำมันหม้อแปลงสามารถเพิ่มค่าความคงทนต่อการเกิดพาร์เซียลดิสชาร์จ และค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะสารประกอบนาโนที่ผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลง
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป
3. เพื่อศึกษากระบวนการวัดและการทดสอบการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป โดยอ้างอิงการทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156
4. เพื่อศึกษากระบวนการวัดและการทดสอบการเกิดแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป โดยอ้างอิงการทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60897
5. เพื่อศึกษากระบวนการวัดและการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป โดยอ้างอิงการทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 61294
6. เพื่อศึกษากระบวนการวัดและการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป โดยอ้างอิงการทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60247

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ มุ่งหวังเพื่อศึกษาหาความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีทางวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า และในฐานะที่เป็นของเหลวใหม่ที่สามารถใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม เพื่อตอบสนองความต้องการในปัจจุบันและอนาคตได้ ดังนั้นก่อนการนำไปใช้งานจริงในหม้อแปลงจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ที่จะต้องศึกษาวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนที่ถูกต้อง และนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติที่ไม่ได้ผสมกับวัสดุนาโน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการประยุกต์ใช้วัสดุนาโนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันสามชนิด คือ TiO_2 , ZnO และ $BaTiO_3$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 นาโนเมตร ได้ถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการผสมวัสดุนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ 0.01% และ 0.03% ของปริมาณน้ำมันหม้อแปลง หลังจากนั้นนำไปสู่กระบวนการวัดและการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ การวัดหาปริมาณน้ำหรือค่าความชื้นในน้ำมัน (Moisture content) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่จำเป็นต้องทำการวัดค่าก่อนที่จะไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ได้แก่ การวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ (AC breakdown voltage) แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ (Impulse breakdown voltage) แรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge inception voltage) และการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric dissipation factor or $\tan \delta$) กระบวนการวัดและการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC, IEEE, ASTM และมาตรฐานอื่นที่เกี่ยวข้อง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป จากนั้นจะศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมวัสดุนาโนลงไป เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับน้ำมันหม้อแปลง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งของการฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะศึกษาคุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์หรือค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโนภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ ศึกษาการเกิดแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่วคราวและชั่วขณะภายใต้อุณหภูมิห้อง ศึกษาพฤติกรรมและรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับและอุณหภูมิห้อง และจะทำการศึกษาวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกโดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาทั้งหมดที่ได้จะสามารถนำมาวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์เพื่อใช้งานจริงและวิจัยต่อยอดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่น่าสนใจ
- 2) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 3) ทำการออกแบบขั้นตอนกระบวนการจัดเตรียมฉนวนเหลวที่ผสมกับวัสดุนาโนในเงื่อนไขต่างๆ
- 4) ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน
- 5) สรุปผลการทดสอบ
- 6) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ความรู้พื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง คุณสมบัติของวัสดุนาโนเทคโนโลยี คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว และ ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

บทที่ 3 กล่าวถึงการทดสอบหาค่าความชื้นและค่าทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบค่าความชื้นและค่าทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยที่ได้ทดสอบมาทั้งหมด

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีเพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ด้านด้วยกันคือ (1) การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนผสมลงไปกับน้ำมันหม้อแปลง และ (2) ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมด้วยอนุภาคนาโน โดยสามารถสรุปประเด็นที่เกี่ยวข้องหลักๆ ได้ดังนี้

ในปี 2011 Rongsheng Liu และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาวิจัย คุณสมบัติความเป็นฉนวนเมื่อใช้วัสดุนาโนผสมลงไปกับน้ำมันหม้อแปลง โดยงานวิจัยนี้ได้ทดลองผสมอนุภาคนาโนหลายชนิดเข้ากับน้ำมันหม้อแปลง นั่นคือ magnetite (Fe_3O_4), maghemite (Fe_2O_3), zinc oxide (ZnO), aluminium oxide (Al_2O_3) และ silicon dioxide (SiO_2) ตามลำดับ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดังกล่าวจะมีขนาดเฉลี่ย 5-20 นาโนเมตร และได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน

ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน ตามมาตรฐาน IEC 60897 พบว่าเมื่อนำน้ำมันหม้อแปลงผสมอนุภาคนาโนชนิด Fe_3O_4 ได้ผลของค่าแรงดันเบรกดาวนชั่วคราวคือ +112.53 kV สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ (+98.77 kV) และพบว่าเมื่อนำน้ำมันหม้อ

แปลงผสมด้วยอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ นั่นคือ Al_2O_3 (0.1425%), ZnO (0.0475%) และ SiO_2 (0.04%) ได้ผลของค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ต่ำกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ และนอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวนซ์ลบลกรณีของน้ำมันหม้อแปลงผสมด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ นั่นคือ $\text{Fe}_3\text{O}_4 = -127.9$ kV, $\text{Al}_2\text{O}_3 = -136.16$ kV, $\text{ZnO} = -102.67$ kV และ $\text{SiO}_2 = -156.42$ kV มีค่าต่ำกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ (-156.56 kV)

ในปี 2012 Diao-Eldin A. Mansour และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อมีการผสมด้วยอนุภาคนาโนชนิดไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งอนุภาคนาโน TiO_2 ถูกเลือกมาใช้ในการวิจัยนี้เพราะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (high dielectric constant) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมกับอนุภาคนาโน TiO_2 รวมถึงพิจารณาผลจากความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโน TiO_2 ที่ผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลง โดยมีค่าความเข้มข้นที่ต่างกันคือ 0.1-0.3 กรัม/ลิตร งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ ด้วยการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ไฟฟ้ากระแสสลับ ตามมาตรฐาน ASTM D1816 โดยกำหนดระยะห่างช่องว่างของอิเล็กโตรด 2.7 มิลลิเมตร และอัตราการป้อนแรงดันไฟฟ้า คือ 500 V/s ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของ TiO_2 ซึ่งพบว่าเมื่อผสมอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในน้ำมันหม้อแปลงที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร ทำให้ผลของค่าแรงดันเบรกดาวนซ์น้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจาก 12 kV เป็น 14 kV และเมื่อความเข้มข้นของ TiO_2 เพิ่มขึ้น 0.3 กรัม / ลิตร ผลของค่าแรงดันเบรกดาวนซ์เพิ่มขึ้นเป็น 26 kV ผลการศึกษานี้จะช่วยในการพัฒนาความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าใหม่ๆ โดยใช้อนุภาคนาโนมาประยุกต์ใช้

และในปี 2012 เช่นกัน T.S.Ramu และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาวิจัย เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเซลลูลอส เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระโหลดของหม้อแปลง โดยทดลองผสมอนุภาคนาโน 2 ชนิด เข้ากับน้ำมันหม้อแปลง คือ magnetite (Fe_3O_4) และ silicon dioxide (SiO_2) และการทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM หลังจากนั้นจะนำน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบบรรจุลงในหม้อแปลงที่พิกัดแรงดัน 5 kV และมีกระแสต่อเนื่อง 1 แอมแปร์ ซึ่งพบว่าผลของค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของอนุภาคนาโนทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่าถึงสองเท่าของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงหม้อแปลงที่มีน้ำมันหม้อแปลงผสมกับอนุภาคนาโน Fe_3O_4 และ SiO_2 ที่มีความเข้มข้นเชิงปริมาตรของอนุภาค 10% สามารถรองรับโหลดเพิ่มขึ้นได้ 40% และ 29% ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระโหลดของหม้อแปลงได้ และคุณสมบัติการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าไม่ได้ถูกลดลง เมื่อใช้ของเหลวฉนวนผสมกับน้ำมันหม้อแปลง

รวมถึงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มสูงขึ้นสำหรับการฉนวนของหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน Fe_3O_4 และ SiO_2

ในปี 2015 J. Ghasemi และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาวิจัย เกี่ยวกับผลของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (magnetic nanoparticle) ที่ผสมกับน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยชนิดของเหลวนาโนที่ใช้ในการผสมกับน้ำมันหม้อแปลง คือ magnetite (Fe_3O_4) ในการทดสอบจะมีค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 0.1-0.6 % พบว่าค่าปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ผสมกับน้ำมันหม้อแปลงที่ 0.3 % ส่งผลให้ค่าความคงทนแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจากเดิม 60.44 kV เป็น 70.16 kV แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนผสมกับน้ำมันหม้อแปลงเป็น 0.6 % กลับส่งผลให้ค่าความคงทนแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมันหม้อแปลงลดลงจากเดิม 60.44 kV เป็น 53.84 kV ซึ่งจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการผสมอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงในปริมาณที่มากเกินไป ก็สามารถส่งผลทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงลดลง ดังนั้นอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่ผสมกับน้ำมันหม้อแปลงก็เป็นทางเลือกในการฉนวนที่ดีสำหรับฉนวนเหลวหม้อแปลง แต่ต้องมีการผสมอนุภาคนาโนในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสม

บทที่ 2

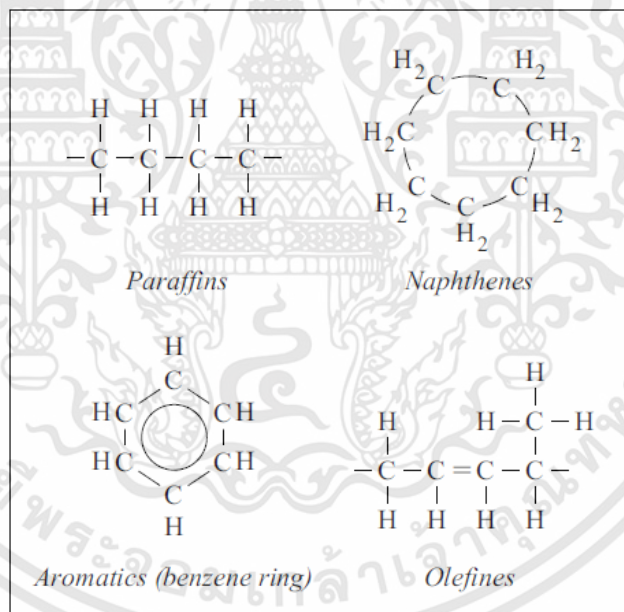
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ความรู้พื้นฐานของน้ำมัน หม้อแปลง คุณสมบัติของวัสดุฉนวน คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

2.1 น้ำมันหม้อแปลง (mineral oil)

น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเหลวที่ถูกนำไปใช้บ่อยที่สุดเนื่องจากมีความหนืดต่ำ จึงมีประโยชน์ในการใช้เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลง การอิมเพริ่งเนตฉนวนกระดาษสำหรับทำเป็นฉนวนให้กับสายเคเบิล ตัวเก็บประจุ หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องมือวัด และบุชชิ่ง เช่นเดียวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก เช่น อิมพัลส์เจนเนอเรเตอร์แหล่งจ่ายไฟสำหรับเลเซอร์ และเครื่องเอ็กซ์เรย์ น้ำมันหม้อแปลงแบบเดิมนั้นได้จากน้ำมันดิบโดยการกลั่น โดยมีองค์ประกอบพื้นฐานดังแสดงในรูปที่

2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง [5]

2.1.1 พาราฟิน (paraffins)

พาราฟิน (หรือรู้จักกันในนามแอลเคนหรือแอลิแฟติกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว) เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ซึ่งโมเลกุลมีจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนสูงสุด ดังนั้นโมเลกุลพาราฟินจึงไม่สามารถเสริมด้วยอะตอมอื่น สูตรทั่วไปของพาราฟินคือ C_nH_{2n+2} โดยที่ n คือจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลพาราฟินและ $n \geq 1$ อะตอมคาร์บอนทั้งหมดในห่วงโซ่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์เดี่ยว โมเลกุลพาราฟินที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด คือมีเทน (CH_4) ซึ่งสมมาตรและมีโมเมนต์ไดโพลเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาราฟินนั้นเป็นทั้งสารละลายไม่มีขั้วหรือมีขั้วอ่อน ซึ่งสามารถละลายได้ในตัวทำละลายแบบไม่มีขั้วหรือมีขั้วอ่อน และไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายมีขั้วอื่น เนื่องจากลักษณะโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว ซึ่งแรงระหว่างโมเลกุลค่อนข้างอ่อน พาราฟินมีจุดเดือดค่อนข้างต่ำ จุดเดือดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนอะตอมในโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น พาราฟินยังมีความเสถียรและไม่เกิดปฏิกิริยาในสภาพปกติ ที่อุณหภูมิสูง สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์หากมีออกซิเจนส่วนเกินหรืออากาศที่มี CO₂ หรือ H₂O เป็นส่วนประกอบ โครงสร้างโมเลกุลของพาราฟิน แสดงในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ โครงสร้างพาราฟินอาจเป็นเส้นตรงหรือกิ่งโซ่ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้ [6]

1) นอร์มัลพาราฟิน (normal paraffins)

โครงสร้างโมเลกุลพาราฟิน ซึ่งมีลักษณะเป็นสายโซ่ต่อเนื่องหรือตรง เรียกว่า “นอร์มัลพาราฟิน” “N- paraffins” หรือ “N - Alkanes” สารไฮโดรคาร์บอนประเภทนี้ มีโครงสร้างเป็นอะตอมของคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นเส้นยาว แต่ละตัวของคาร์บอนก็มีอะตอมไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัว ขนาดโมเลกุลของสารประเภทนี้ในน้ำมันดิบ มีตั้งแต่ตัวที่ประกอบด้วย 1 อะตอมของคาร์บอนไปจนถึง 42 อะตอม

2) ไอโซพาราฟิน (Iso paraffins)

กิ่งโซ่พาราฟิน เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ซึ่งมี Alkanes หรือกิ่งแยกสายโซ่หลัก เรียกว่า “Iso paraffins” หรือ “Iso - Alkanes” โครงสร้างโมเลกุลเหล่านี้ เป็นไปได้เมื่อ $n \geq 4$ โดยทั่วไปสายโซ่ไอโซเมอร์มีจุดเดือดต่ำกว่าไอโซเมอร์โซ่ตรง และยังมีกิ่งมากจุดเดือดจะยิ่งต่ำ

โครงสร้างโมเลกุลของนอร์มัลพาราฟินและไอโซพาราฟิน แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอน [6]

| ส่วนประกอบ | ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุล |
|---------------------|---|
| พาราฟิน (paraffins) | นอร์มัลพาราฟิน: $\dots\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2\dots$ |
| | ไอโซพาราฟิน: $\begin{array}{ccccccc} & & \dots\text{CH}_2 & & & & \\ & & & & & & \\ \dots\text{CH}_2 & - & \text{CH} & - & \text{CH}_2 & - & \text{CH} & - & \text{CH}_2\dots \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & \text{CH} & - & \text{CH}_2\dots \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & \dots\text{CH}_2 & & \end{array}$ |

2.1.2 แนฟทีน (Naphthenes)

แนฟทีน หรือที่รู้จักในชื่อ “ไซโคลพาราฟิน” “ไซโคลแอลเคน” หรือ “อะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว” ประกอบด้วยวงแหวนหนึ่งวงหรือมากกว่า ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนต่อเรียงตัวกันเป็นวง อาจจะเป็นวงละ 5 ตัว 6 ตัว หรือ 7 ตัว มีสูตรทางเคมีเป็น $C_nH_{2n-2} 2R_n$

โดยที่ n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอน และ R_n เป็นจำนวนของวงคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของแนฟทีน แสดงในรูปที่ 2.1

2.1.3 อะโรมาติก (Aromatics)

อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Arenes) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนไม่อิ่มตัว สารประกอบเหล่านี้ มีอะตอมของคาร์บอนที่อาจเชื่อมต่อกับอะตอมเพิ่มเติม อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ประกอบด้วยวงแหวนหนึ่งวงหรือมากกว่า มีสูตรทางเคมี คือ C_nH_n และ C_nH_{2n-6} โดยที่ n คือจำนวนอะตอมของคาร์บอนในอะโรมาติกโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน แสดงในรูปที่ 2.1

2.1.4 โอลิฟิน (Olefins)

โอลิฟิน เรียกอีกอย่างว่าแอลคีน คือไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ซึ่งมีสูตรทั่วไป C_nH_{2n} ที่ $n \geq 2$ โดยที่ n คือจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลโอลิฟินิก โครงสร้างโมเลกุลเป็นพันธะคู่ต่อกันตรงๆ มีแขนงเหมือนกิ่งไม้ อาทิ เอทิลีน (Ethylene) และโพรพิลีน (Propylene) ซึ่งในประเทศไทยวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ผลิตโอลิฟินส์ จะใช้ก๊าซอีเทนและโพรเพนที่ได้จากโรงแยกก๊าซธรรมชาติ และแนฟทาที่ได้จากโรงกลั่นน้ำมัน โครงสร้างโมเลกุลของโอลิฟินไฮโดรคาร์บอน แสดงในรูปที่ 2.1

คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่แยกตามชนิดที่มียุคประกอบพื้นฐานที่ต่างกัน แสดงดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลงที่แยกตามชนิด [6]

| คุณสมบัติ | นอร์มัลพาราฟิน | ไอโซพาราฟิน | แนฟทีน | อะโรมาติก |
|-----------------------|----------------|-------------|---------|------------|
| ดัชนีความหนืด | สูงมาก | สูง | ต่ำ | ต่ำ |
| จุดไหลเท (Pour Point) | สูง | ต่ำ | ต่ำ | ต่ำ |
| ความเสถียรออกซิเดชัน | ดี | ดี | ปานกลาง | ปานกลาง/แย |
| สารต้านอนุมูลอิสระ | ดี | ดี | ดี | แยบางส่วน |
| การระเหย | ดี | ดี/ปานกลาง | ปานกลาง | แย |

2.1.5 น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัย

น้ำมันหม้อแปลงใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ELECTROL®-A เป็นน้ำมันหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและระบายความร้อนที่ดี ใช้กันทั่วไปในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในประเทศไทย คุณสมบัติและข้อกำหนดสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงนี้แสดงในตารางที่ 2.3 [7]

ขั้นแรกการเตรียมตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลง ประกอบด้วยกระบวนการสองขั้นตอนดังนี้: 1) นำน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติให้ความร้อนที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเตาอบสุญญากาศที่ประมาณ 200 mbar เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งส่วนนี้ถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างควบคุมที่ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการทดสอบ 2) อนุภาคนาโนทั้งหมดจะถูกผสมลงในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติที่ผ่านขั้นตอนแรกแล้ว เพื่อเป็นตัวอย่างทดสอบของเฮลวนาโนต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลจำเพาะของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ [7]

| ลักษณะ | ข้อมูลจำเพาะ | วิธีทดสอบ |
|-------------------------|----------------------------|-----------|
| ค่าความหนืด (ที่ 40 °C) | <16.5 mm ² /sec | ISO: 3104 |
| จุดวาบไฟ (Flash Point) | >140 °C | ISO: 2719 |
| จุดไหลเท (Pour Point) | <-30 °C | ISO: 3016 |
| ความหนาแน่น (ที่ 20 °C) | <0.895 kg/dm ³ | ISO: 3675 |
| แรงตึงผิว (ที่ 25 °C) | >0.04 N/m | ISO: 6295 |
| ค่าการทำให้เป็นกลาง | <0.03 mg KOH/g | IEC: 296 |
| Tan δ (ที่ 90 °C) | <0.005 | IEC: 247 |

2.2 วัสดุนาโนเทคโนโลยี (Nanomaterial)

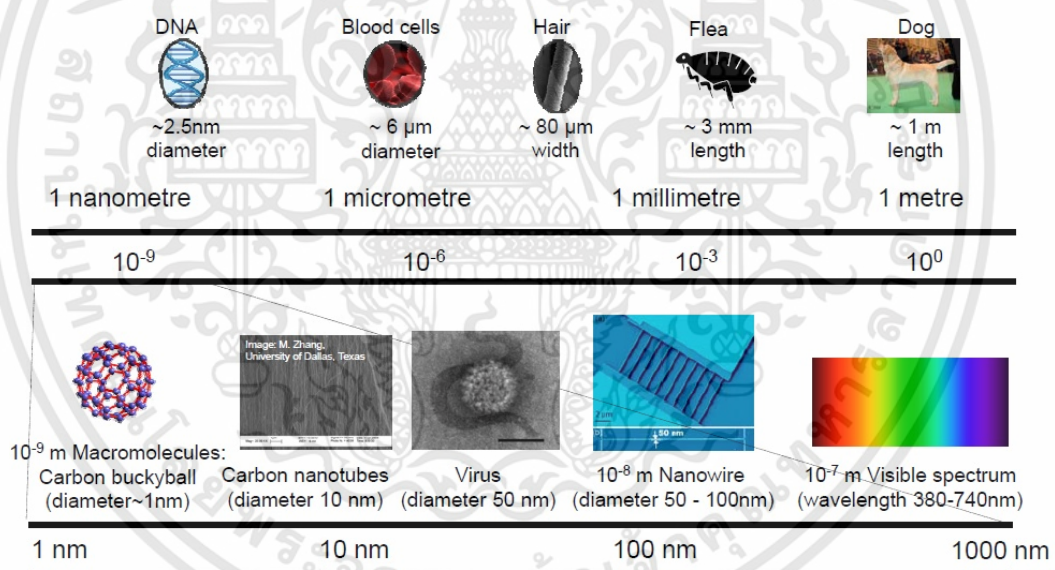
นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการหลากหลายสาขา ตั้งแต่เคมีสังเคราะห์ วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ จึงทำให้ยากต่อการระบุคำนิยามที่ครอบคลุมทั้งหมด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (The International Organization for Standardization: ISO) ได้ให้คำนิยาม “นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)” ว่าหมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เพื่อสังเคราะห์และควบคุมสสารในระดับนาโน เพื่อใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติและปรากฏการณ์เชิงโครงสร้าง ที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กมาก ทำให้มีความแตกต่างไปจากคุณสมบัติของสสารในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ส่วน National Nanotechnology Initiative (NNI) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ให้คำนิยาม “นาโนเทคโนโลยี” ว่าเป็นความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ในการเข้าใจและควบคุมสสารที่มีมิติ ในระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของอนุภาคระดับนาโนทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ใหม่ๆ ได้ [8]

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติซึ่งเป็นหน่วยงานส่งเสริมการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีของประเทศไทยได้ให้คำนิยามที่ครอบคลุมว่า “นาโนเทคโนโลยี” หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือในการสร้างวัสดุที่มีขนาดเล็กมากหรือเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้น ไม่ว่าจะทางด้านฟิสิกส์เคมีหรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยได้ [9]

วัสดุนาโน (nanomaterial) หมายถึง วัสดุที่มีขนาดอย่างน้อยหนึ่งมิติเป็นขนาดนาโน หรือมีโครงสร้างของพื้นผิวหรือของโพรงภายในอยู่ในระดับนาโน กล่าวโดยย่อ วัสดุนาโนหมายถึงเนื้อวัสดุของวัสดุนาโน หรือเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโครงสร้างนาโน ทั้งนี้วัสดุนาโนมีทั้งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นอนุภาคของแร่ต่างๆ หรือที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญ เช่น อนุภาคในควันไฟหรือในไอเสียจากเครื่องยนต์ และวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการออกแบบและผลิตขึ้นอย่างเจาะจง ให้มีสมบัติเฉพาะ และมีขนาดใกล้เคียงกัน วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับ 1 - 100 นาโนเมตร ซึ่งโดยประมาณเทียบได้กับขนาดเฉลี่ยของไวรัส หรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคน ประมาณ 1,000 ถึง 100,000 เท่า ซึ่งสามารถตรวจพบ หรือสัมผัสรับเข้าไปโดยไม่รู้ตัว วัสดุนาโนสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อาจพบได้หลังเกิดไฟฟ้า หรือภูเขาไฟระเบิด บางชนิดอาจอยู่ในรูปของอนุภาคไวรัส ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ส่วนอนุภาคนาโน ที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ได้จากการสังเคราะห์โดยตรง และเป็นสารปนเปื้อนออกมา เช่น จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เครื่องจักร หรือยานพาหนะ หรือจากกระบวนการผลิต ทั้งทางเคมี และชีวภาพ [8]

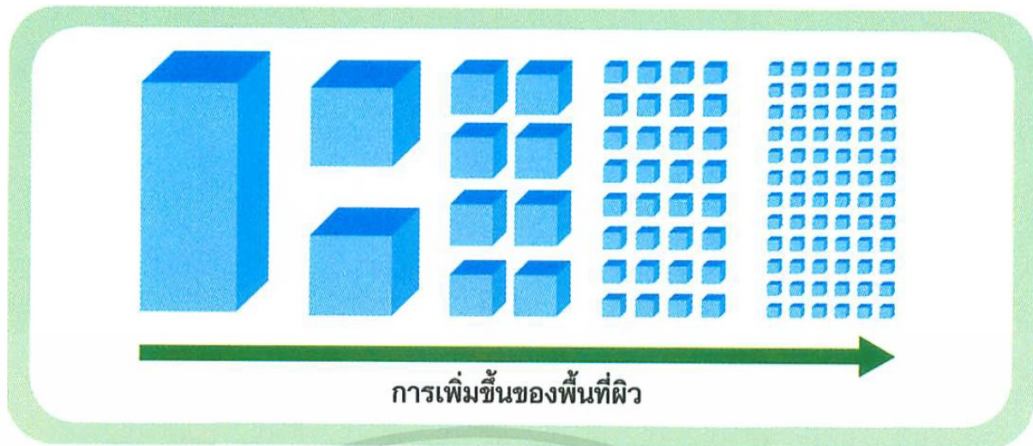
ขนาดนาโนเมตรคำว่า “นาโนเมตร” (Nanometer) หมายถึง สิบกำลังลบเก้าเมตร (10^{-9}) หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 เมตร หากเปรียบเทียบกับสิ่งใกล้ตัว ขนาด 1 นาโนเมตร ก็จะเล็กกว่าเส้นผมประมาณหนึ่งแสนเท่า และเล็กกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงประมาณ 6,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบขนาดนาโนเมตรกับสิ่งต่างๆ [10]

นาโนเทคโนโลยีทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษ ยิ่งขนาดของวัสดุมีขนาดเล็กลงเท่าใด จำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าและผิวสัมผัสของวัสดุก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนมีคุณสมบัติ ทางไฟฟ้า กายภาพ แม่เหล็ก และแสง แตกต่างไปจากเดิมและพิเศษแปลกใหม่อย่างไม่เคยพบมาก่อน การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสจะเห็นได้จากตัวอย่างการแบ่งลูกเต๋าดังแสดงในรูปที่ 2.3 หากนำลูกเต๋าดังขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิว 6 ตารางเมตร มาแบ่งเป็นลูกเต๋าดังขนาดเล็กๆ ขนาดนาโนเมตร จะทำให้ได้ลูกเต๋าดังจำนวน 10^{27} ลูก (10^9 เท่ากับ 1 พันล้านลูก) และมีพื้นที่ผิวถึง 6,000 ตารางกิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ แม้จะมีปริมาตรเดียวกัน [10]

วัสดุนาโนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆ 2 วิธีด้วยกัน [11] ได้แก่

วิธีที่ 1 แบ่งโดยพิจารณาว่าวัสดุนั้นได้รับการผลิตขึ้นโดยตั้งใจหรือไม่ วิธีนี้แบ่งวัสดุนาโนออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. วัสดุนาโนที่พบได้ตามธรรมชาติ (natural nanomaterial) หมายถึงวัสดุนาโนที่มีปะปนอยู่กับสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ บรรยากาศ) ทั่วไป เช่น อนุภาคของแร่ต่างๆ จากไฟไหม้ป่า ฯลฯ
2. วัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยบังเอิญ (incidental nanomaterial) หมายถึงวัสดุนาโนที่ไม่ได้มีอยู่เดิมในธรรมชาติ แต่ก็ไม่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นมาอย่างจงใจ เป็นต้นว่าอนุภาคในควันไฟที่พบได้เสมอในครัว หรือแม้แต่ที่มองไม่เห็นว่าเป็นควัน เช่นจากการเผาเชื้อเพลิงที่เรียกว่าแอลกอฮอล์แข็ง หรือในไอเสียจากเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ วัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยบังเอิญ มักจะมีขนาดต่างๆ กัน ทั้งในระดับนาโนและใหญ่กว่านาโน ปะปนกันอยู่
3. วัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (manufactured nanomaterial) หมายถึงวัสดุนาโนที่ไม่พบปกติในธรรมชาติ แต่ได้รับการออกแบบ และผลิตขึ้นอย่างจงใจ ให้มีสมบัติโดยเฉพาะเจาะจง และมักมีขนาดใกล้เคียงกัน

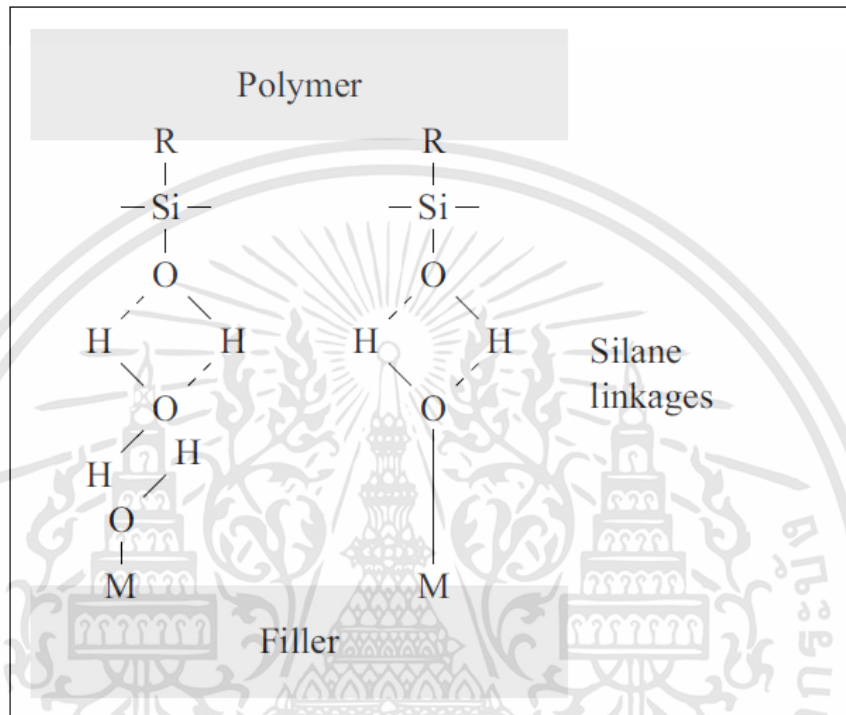
วิธีที่ 2 แบ่งโดยพิจารณาโครงสร้างของวัสดุนั้น ว่ามีขนาดภายนอกอยู่ในระดับของขนาดนาโนหรือไม่ วิธีนี้แบ่งวัสดุนาโนออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. วัสดุนาโน (nano-object) มีขนาดภายนอก ไม่ว่าจะ 1 หรือ 2 หรือทั้ง 3 มิติเป็นขนาดนาโน
2. วัสดุที่มีโครงสร้างนาโน (nanostructured material) ถึงแม้ภายนอกจะมีขนาดใหญ่กว่านาโน แต่ก็มีโพรง มีรู หรือมีส่วนประกอบที่มีขนาดนาโน ผสมหรือเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น ผงที่มีโครงสร้างนาโน (nanostructured powder), วัสดุผสมนาโน (nanocomposite), วัสดุนาโนกระจายตัว (dispersion), วัสดุนาโนที่มีรูพรุน (nanoporous material), วัสดุที่มีนาโนบนพื้นผิว (surface-structured nanomaterial), และ อนุภาคที่มีโครงสร้างนาโนเป็นแกนและเปลือก (nanostructured core-shell particle)

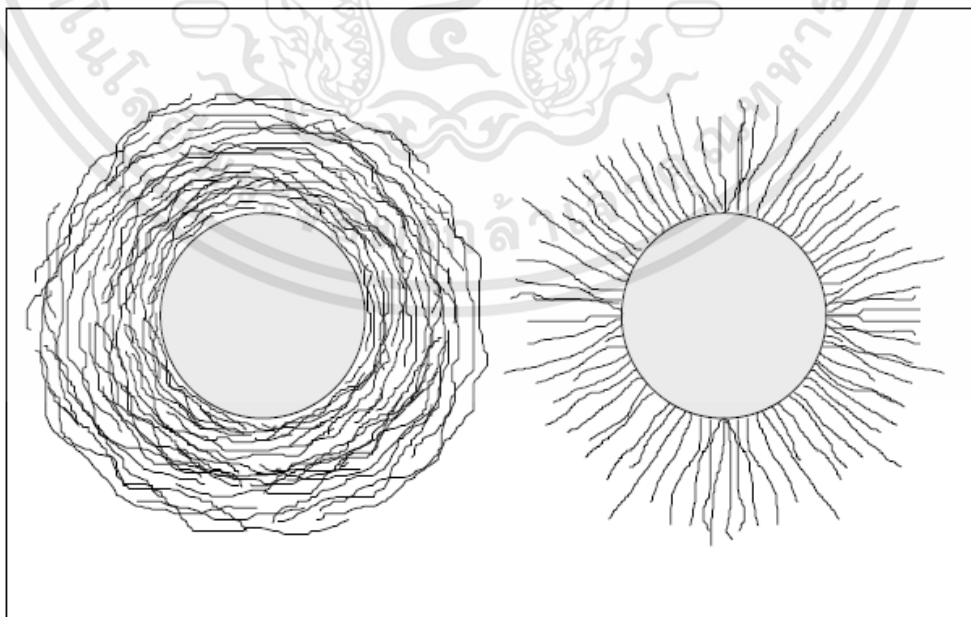
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 หลักการของโครงสร้างนาโน

อนุภาคนาโน สามารถสร้างสารประกอบที่มีเมทริกซ์โพลิเมอร์ เช่นซิลเลน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คุณสมบัติพิเศษในที่นี่คือ พื้นที่ผิวอนุภาคนาโนใหญ่ซึ่งนำไปสู่การเปรียบเทียบที่หลากหลาย และโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวของไฮโมเลกุลโพลิเมอร์โดยรอบ ซึ่งสามารถขนานหรือตั้งฉากกับพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคสารประกอบซิลเลนและโมเลกุลโพลิเมอร์ [5]



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงโมเลกุลโซ่พอลิเมอร์ที่ขนานหรือตั้งฉากกับพื้นผิวของอนุภาคนาโน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

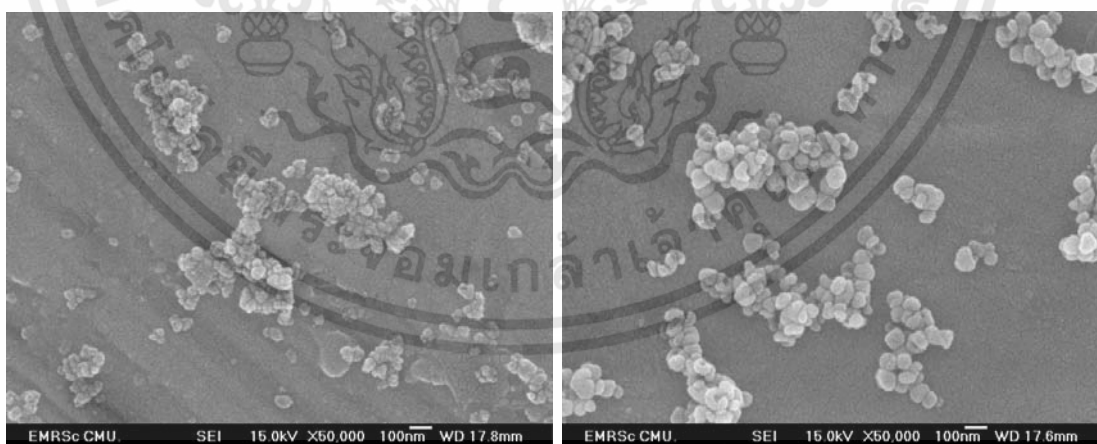
2.2.2 วัสดุนาโนที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุนาโนสามชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ TiO_2 , ZnO เป็นอนุภาคนาโนกลุ่มเซมิคอนดักเตอร์ และ BaTiO_3 เป็นอนุภาคนาโนกลุ่มไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคนาโน TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3 มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 40 นาโนเมตร 30 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ ลักษณะเฉพาะของวัสดุนาโนที่ใช้ในการวิจัยที่ได้จากผู้ผลิต ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 [12]

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับวัสดุนาโนประเภท TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3

| พารามิเตอร์ | TiO_2 | ZnO | BaTiO_3 |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ขนาดอนุภาค | ~ 40 nm | ~ 30 nm | ~ 50 nm |
| ความบริสุทธิ์ | 99.90% | 99.70% | 99.95% |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ | 40 m^2/g | 35 m^2/g | 20 m^2/g |
| ความหนาแน่น | 3.89 g/cm^3 | 5.60 g/cm^3 | 5.85 g/cm^3 |

จากรายงานใน [13] กล่าวถึงความแตกต่างของขนาดอนุภาคนาโนจะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบ เมื่ออนุภาคนาโนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกันในช่วงระหว่าง 40 นาโนเมตร ถึง 80 นาโนเมตร เมื่อถูกเพิ่มลงในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนมีการปรับปรุงคุณสมบัติ ในงานวิจัยนี้ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันโครงสร้างและขนาดของอนุภาคนาโนแห่งทั้งสามชนิดที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้อยกว่า 100 นาโนเมตร

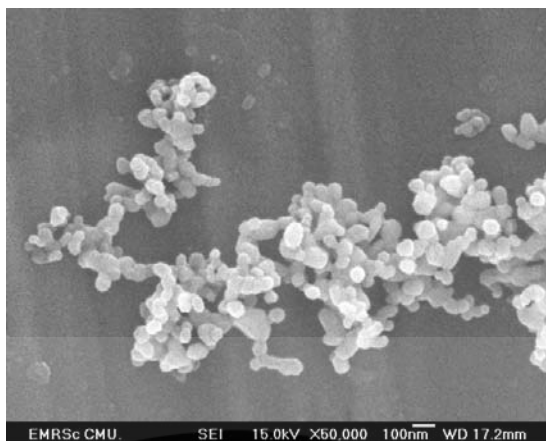


(ก)

(ข)

รูปที่ 2.6 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโน (ก) อนุภาคนาโน TiO_2 (ข) อนุภาคนาโน ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



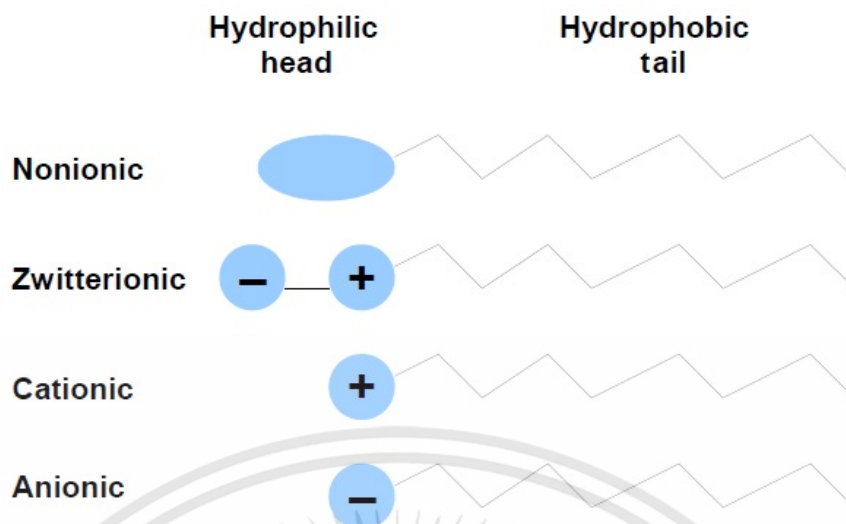
(ค)

รูปที่ 2.6 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโน (ต่อ) (ค) อนุภาคนาโน BaTiO₃

2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

การปรับพื้นผิวอนุภาคนาโนด้วยการเพิ่มสารลดแรงตึงผิวหรือสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มการกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ นั่นคือน้ำมันหม้อแปลงกับอนุภาคนาโน เป็นวิธีการที่ง่ายและประหยัดในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับของเหลวนาโน การปรับพื้นผิวสามารถปรับปรุงการสัมผัสของน้ำมันหม้อแปลงกับอนุภาคนาโนได้ ในของเหลวนาโนสารลดแรงตึงผิวหรือสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มการกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดให้สามารถยึดติดกันเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด [14]

สารลดแรงตึงผิวเป็นวัสดุแอมฟิฟิลิก (amphiphilic materials) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะอยู่ตรงจุดเชื่อมต่อระหว่างวัสดุมีขั้วและไม่มีขั้ว ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะประกอบด้วยส่วนหัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic tail) ซึ่งมักเป็นห่วงโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาว ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิว สามารถแบ่งออกเป็นสี่ประเภทตามองค์ประกอบของส่วนหัวที่ชอบน้ำ นั่นคือ สารลดแรงตึงผิวไม่มีขั้ว (nonionic) สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (anionic) สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (cationic) และสารลดแรงตึงผิวประจุลบและประจุบวก (zwitterionic) โดยสามารถพิจารณารูปแบบสารลดแรงตึงผิวสี่ประเภทนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาพประกอบแผนผังของสารลดแรงตึงผิวสี่ประเภท [14]

สารลดแรงตึงผิวที่มีหรือไม่มีขั้วทั้งหมดมีค่า HLB (hydrophilic-lipophilic balance) เป็นตัวชี้วัดระดับความชอบน้ำหรือชอบน้ำมัน โดยการคำนวณค่าสำหรับบริเวณต่างๆ ของโมเลกุล กลุ่มชอบน้ำมักจะเป็นพอลิไฮดรอกซ์หรือเอทิลีนออกไซด์กลุ่มชอบน้ำมันมักเป็นกรดไขมันหรือแอลกอฮอล์ไขมันค่า HLB สามารถคำนวณได้ตาม [14, 15]

$$HLB = 20 * [Mh/M] \quad (2.1)$$

โดยที่ Mh คือ น้ำหนักโมเลกุลของกลุ่มชอบน้ำ

และ M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

ค่า HLB สามารถใช้ในการทำนายสมบัติของสารลดแรงตึงผิว ตารางที่ 2.5 แสดงค่า HLB และการใช้สารลดแรงตึงผิว

ตารางที่ 2.5 ค่า HLB และการใช้สารลดแรงตึงผิว [14, 16]

| ค่า HLB | การใช้งาน |
|---------|---|
| 1-3 | ผสมน้ำมันต่างชนิดกัน |
| 4-6 | อิมัลชันน้ำในน้ำมัน (W/O) |
| 7-9 | ซึมเข้าไปในน้ำมันด้วยการลดความตึงผิวของน้ำมัน |
| 8-12 | อิมัลชันน้ำมันในน้ำ (O/W) |
| 13-15 | การสร้างสารละลายที่ใช้ทำความสะอาด |

อิมัลชัน (emulsion) คือ ระบบคอลลอยด์ (colloid) ที่ประกอบด้วยเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งปกติไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำกับน้ำมัน สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยไม่แยกชั้น โดยของเหลวส่วนหนึ่งแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ เรียกว่า วัฏภาคภายใน หรือส่วนที่กระจายตัว

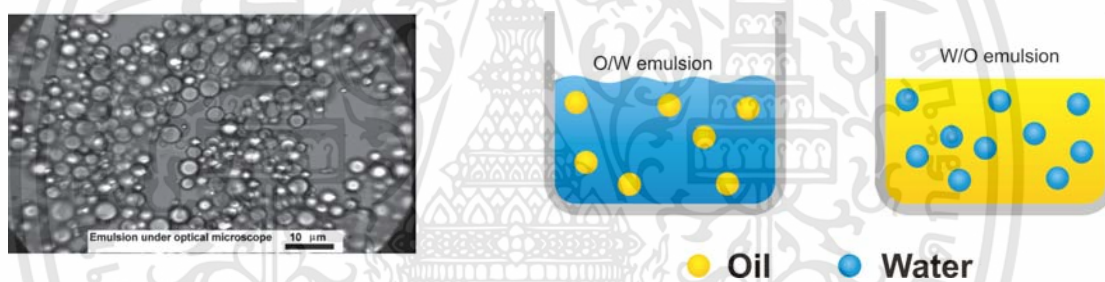
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(internal or dispersed phase) ซึ่งจะกระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า วัฏภาคภายนอกหรือส่วนที่ต่อเนื่อง (external or continuous phase) เพื่อความเข้าใจเพิ่มขึ้นพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8 [17] วัฏภาค หมายถึงส่วนที่เป็นเนื้อเดียวกันในระบบหนึ่ง และมีขอบเขตแน่นอนแยกจากส่วนอื่นๆ ของระบบนั้น เช่น ในภาชนะปิดที่บรรจุน้ำแข็ง น้ำ และไอน้ำ ระบบนี้จะมี 3 วัฏภาค คือ วัฏภาคของแข็ง ได้แก่ น้ำแข็ง วัฏภาคของเหลว ได้แก่ น้ำ และวัฏภาคของแก๊ส ได้แก่ ไอน้ำ [18]

อิมัลชันแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ [17]

อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion, O/W) มีน้ำมันเป็นวัฏภาคภายใน และน้ำเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น นม (milk) ซอสเกตุ หรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำ มีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) สูงกว่า ผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำ (water soluble dye)

อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion, W/O) มีน้ำเป็นวัฏภาคภายใน และน้ำมันเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น เนย (butter) มายองเนส (mayonnaise) น้ำสลัด (salad dressing) ไส้กรอก (sausage) ซอสเกตุ หรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำมัน มีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ต่ำกว่า ผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำมัน (oil soluble dye)



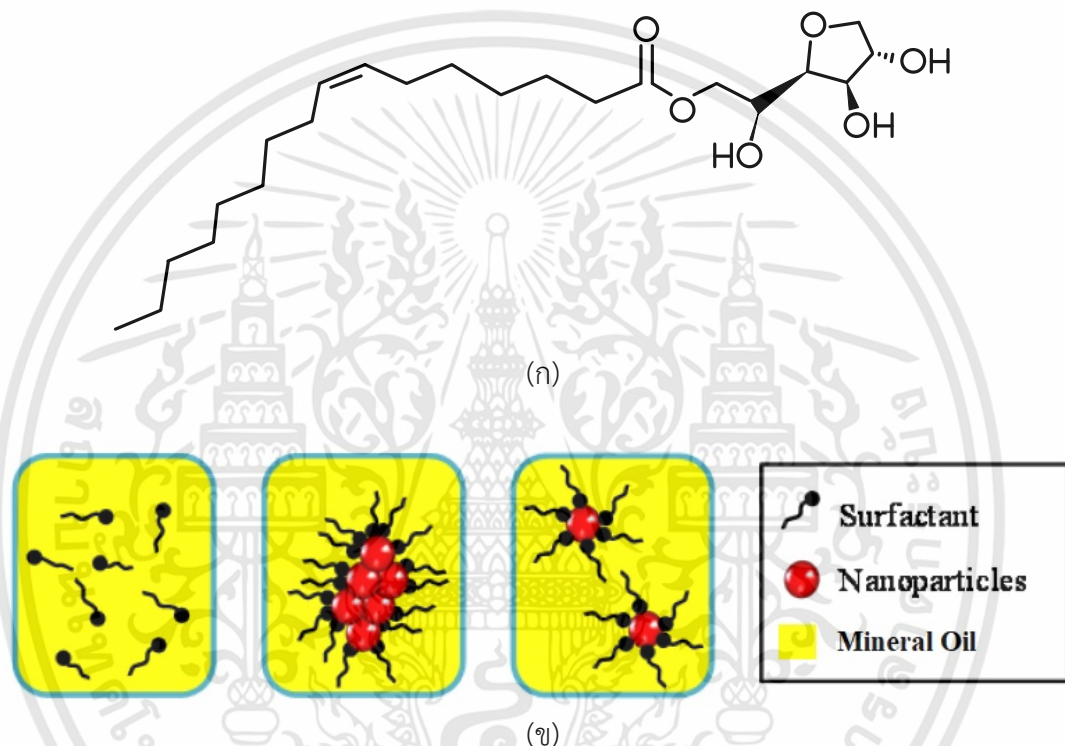
รูปที่ 2.8 ภาพประกอบลักษณะอิมัลชันระหว่างน้ำกับน้ำมัน [17]

สารลดแรงตึงผิวประจุลบจะมีกลุ่มขั้วลบบอยู่ในส่วนหัวที่ชอบน้ำ และสารลดแรงตึงผิวประจุบวกจะมีกลุ่มขั้วบวกอยู่ในส่วนหัวที่ชอบน้ำ สารลดแรงตึงผิวแอมโฟเทอริกมีค่าความเป็นกรด – ด่างขึ้นอยู่กับส่วนหัว

การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิว เป็นหลักสำคัญในการเพิ่มเสถียรภาพของเหลวนาโน หลักการพื้นฐาน คือการเลือกลดแรงตึงผิวตามตัวกลาง หากของเหลวพื้นฐานเป็นน้ำมันสารลดแรงตึงผิวควรเป็นน้ำมันที่ละลายได้ ในกรณีของเหลวนาโนเป็นน้ำ สารลดแรงตึงผิวควรละลายน้ำได้ สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ใช่ไอออนิก การเลือกจะขึ้นอยู่กับค่า HLB สำหรับสารลดแรงตึงผิวไอออนิก ทางเลือกที่จะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโน สารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงเสถียรภาพของของเหลวนาโน

ในงานวิจัยนี้ ได้ประยุกต์ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด ซอร์บิแทน โมโนโอเลอเทต (sorbitan monooleate) หรือ Span 80 ถูกใช้ในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโน Span80 ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการตกตะกอนของอนุภาคนาโนเมื่อผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลง

Span80 ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถป้องกันการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาโน เมื่อผสมกับน้ำมันจากหลายงานวิจัย [14, 19-21] เหตุผลในการเลือก Span 80 เนื่องจากค่า HLB ของ Span 80 มีค่า 4.3 ซึ่งจากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิว Span80 อยู่ในอิมัลชันชนิด น้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion, W/O) นอกจากนี้ กลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group: OH) ของโมเลกุล Span 80 สามารถเชื่อมต่อกับกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ของอนุภาคนาโนผ่านพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่สายโซ่ของโมเลกุล Span 80 อีกด้านจะหันไปเชื่อมต่อกับน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ด้วยเหตุนี้ Span 80 จึงสามารถครอบคลุมพื้นผิวอนุภาคนาโนและลดการเกาะจับตัวของอนุภาคนาโน



รูปที่ 2.9 ภาพประกอบลักษณะสารลดแรงตึงผิวและการประยุกต์ใช้ [14, 22] (ก) โครงสร้างโมเลกุลของ Span80 (ข) ลักษณะสารลดแรงตึงผิวเมื่อผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงและอนุภาคนาโน

2.4 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว (breakdown mechanism in insulating liquid)

สำหรับการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว ยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายผลการทดลองทั้งหมดได้หรือเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสามารถแบ่งได้เป็นสามทฤษฎีดังนี้คือ ทฤษฎีไอออนไนเซชัน ทฤษฎีการเชื่อมต่อที่อ่อนแอ และทฤษฎีสตรีมเมอร์ [14, 23, 24]

ทฤษฎีที่ 1) ทฤษฎีไอออนไนเซชัน (ionization theory) ถูกใช้ในการอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวก่อนช่วงทศวรรษที่ 1940 ไอออนไนเซชันคือการสร้างไอออนบวกโดยวิธีการดึงอิเล็กตรอนออกจากอะตอมที่เป็นกลาง การที่จะดึงอิเล็กตรอนออกจากอะตอมนั้น จำเป็นต้องใส่พลังงานให้แก่อะตอม เช่น ใส่พลังงานกลหรือพลังงานความร้อน ซึ่งการที่ใส่พลังงานให้อะตอมนั้นก็เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการเปลี่ยนระดับของวงโคจรอิเล็กตรอน จากทฤษฎีสันนิษฐานว่าที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูงการปล่อยอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ (emission of electrons at the cathode) เป็นปัจจัยสำคัญ และการเกิดไอออนไนเซชันโดยการชน (ionization by collision) การสะสมของกลุ่มอิเล็กตรอนและประจุบวกนำไปสู่เบรกดาวน์ขั้นสุดท้ายในของเหลว ซึ่งการชนกันของไอออนไนเซชันแบบนี้จะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน หากอิเล็กตรอนมีความเร็วน้อยเกินไป อาจไม่เกิดไอออนไนเซชัน การเกิดไอออนไนเซชันโดยการชนของอิเล็กตรอนนี้ ต้องมีพลังงานกล เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานไอออนไนเซชันของโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลาง เหตุผลประการหนึ่งคืออิเล็กตรอนจะกระจัดกระจายอย่างไม่ต่อเนื่องและมีพลังงานจลน์ไม่เพียงพอสำหรับไอออนไนเซชัน และอีกเหตุผลหนึ่งคืออิเล็กตรอนส่วนใหญ่ยึดติดกับโมเลกุลของเหลวในรูปไอออนลบ ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจึงไม่มากพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ [14, 25]

ทฤษฎีที่ 2) ระหว่างยุคปี ค.ศ. 1940 และ ค.ศ. 1980 ทฤษฎีการเชื่อมต่อที่อ่อนแอ (the weakest-link theory) ถูกนำมาใช้ นักวิจัยตระหนักว่าสมมติฐานหรือตัวประกอบเดี่ยวไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เบรกดาวน์ที่สังเกตได้ในฉนวนเหลว ทฤษฎีการเชื่อมต่อที่อ่อนแอ เป็นตัวกำหนดว่าการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวเริ่มต้นด้วยความไม่เสถียร เนื่องจากข้อบกพร่องในฉนวนเหลวหรือพื้นผิวของอิเล็กโทรด ข้อบกพร่องในของเหลวเหล่านี้ อาจเกิดจากสิ่งสกปรกสารเติมแต่งทางเคมี หรือน้ำเป็นส่วนที่ละลายเข้าไปปนกับน้ำมัน หรืออาจมีก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน สภาพผิววัสดุของอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดอาจมีอิทธิพลต่อเบรกดาวน์ [14, 26]

ทฤษฎีที่ 3) ด้วยการพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพความเร็วสูง ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (streamer theory) ได้รับการพัฒนาขึ้นในช่วงต้นทศวรรษที่ 1970 ทฤษฎีนี้เรียกว่า “ทฤษฎีฟองสบู่ (bubble theory)” จากการสังเกตฟองอากาศในของเหลวก่อนสลายตัว เทคนิคกล้องจุลทรรศน์เริ่มถูกนำมาใช้ตรวจสอบเบรกดาวน์หลังจากทศวรรษที่ 1980 ทำให้นักวิจัยสามารถตรวจสอบรายละเอียดของกระบวนการเบรกดาวน์ได้อย่างละเอียดในฉนวนเหลว กลไกการเบรกดาวน์ แบบสตรีมเมอร์ นี้ แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ (1) กลไกการเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ บวก เสนอโดย Meek และ Loeb กลไกการเบรกดาวน์จะเกิดเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุค้างไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณเท่ากับสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก และ (2) กลไกการเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ลบ เสนอโดย Rather กลไกการเบรกดาวน์จะเกิดเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการไอออนไนเซชัน ประมาณ 10^8 อนุภาค [14, 24]

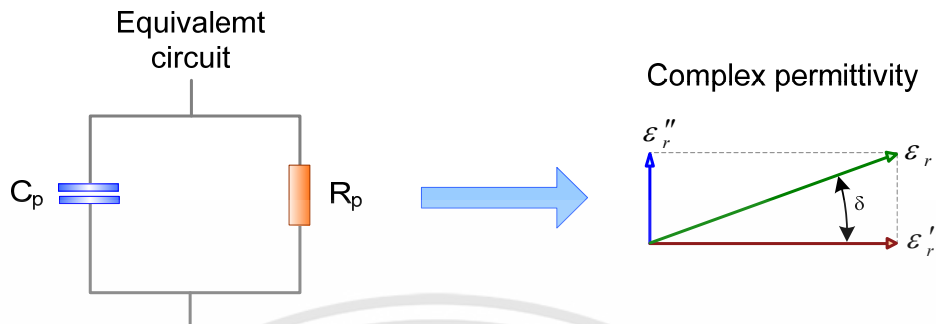
2.5 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric dissipation factor: $\tan \delta$)

ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องพิจารณา ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของอายุการใช้งานฉนวน โดยพิจารณาจากค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก สามารถแสดงเป็นเวกเตอร์โคอะแกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 กล่าวคือ ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เป็นสัดส่วนของพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก (ϵ'')

ต่อพลังงานที่ถูกเก็บในรูปของสนามไฟฟ้า (ϵ') ดังสมการที่ 2.2 [27]

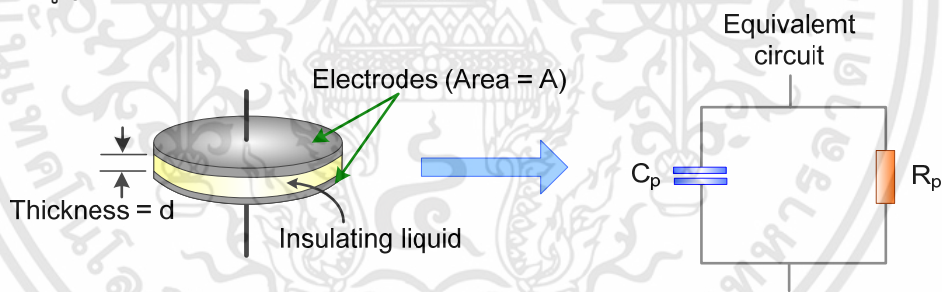
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tan \delta = \text{Dissipation factor} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.10 เปรอ์มิติวิตตี้เชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก [27]

เปอร์มิติวิตตี้เป็นคุณสมบัติของฉนวนเหลวที่บอกให้ทราบว่าฉนวนเหลวดังกล่าวจะมีค่าคาปาซิแตนซ์ เป็นกึ่งเท่าของฉนวนสูญญากาศ เป็นค่าที่มีความสำคัญเนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอก อุณหภูมิของฉนวนเหลว การเรียงตัวของโมเลกุล ส่วนผสมของฉนวนเหลว และโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว วงจรสมมูลของฉนวน แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยที่ C_p แทนคุณสมบัติของฉนวนที่สามารถเก็บประจุและพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้า และ R_p แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในฉนวน



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของฉนวนเหลว [27]

โดยที่
$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \tag{2.3}$$

เนื่องจาก
$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \tag{2.4}$$

- เมื่อ ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิติวิตตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ
- C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุจำเพาะเป็นฉนวน
- C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สูญญากาศเป็นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$Y = \left(\frac{1}{R_p} + j\omega C_p \right) \times \frac{j\omega C_0}{j\omega C_0} = j\omega C_0 \underbrace{\left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{1}{\omega R_p C_0} \right)}_{\varepsilon_r} \quad (2.5)$$

ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุสามารถเขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน (Complex relative permittivity) ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{1}{\omega R_p C_0} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ ε_r' คือ ส่วนจริงของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์เชิงซ้อน เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถของฉนวนในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า

ε_r'' คือ ส่วนจินตภาพของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์เชิงซ้อน เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นฉนวน $C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

ε_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศประมาณ $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ F/m

A คือ พื้นที่หน้าตัดแผ่นตัวนำ

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

ดังนั้น จะได้

$$\varepsilon_r' = \frac{C_p d}{\varepsilon_0 A} \quad (2.7)$$

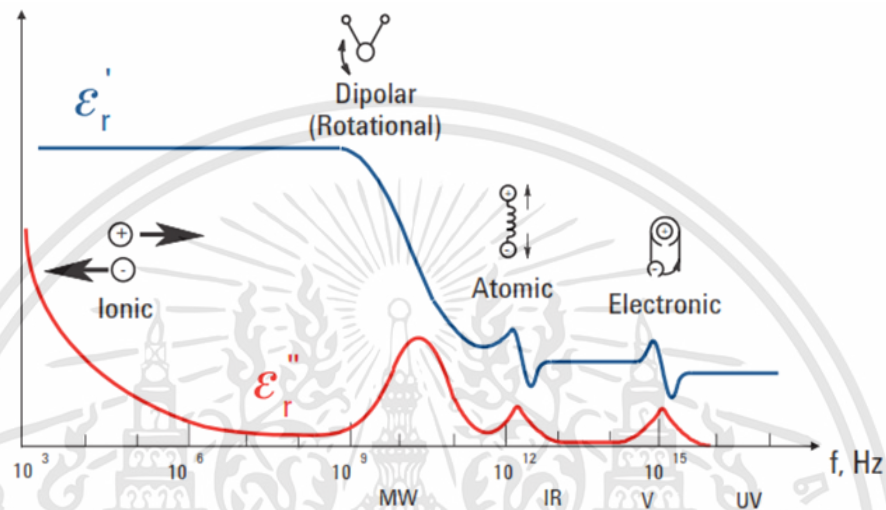
$$\varepsilon_r'' = \frac{d}{\omega R_p \varepsilon_0 A} \quad (2.8)$$

ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ ε_r ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะโพลาริเซชัน (Polarization characteristic) ของฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material) ที่ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.12 กระบวนการโพลาริเซชันมีหลายรูปแบบ เมื่อความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น กระบวนการโพลาริเซชันจะเกิดขึ้นและมีความเปลี่ยนแปลงทำให้ค่า ε_r' เปลี่ยนแปลง หรือความสามารถของฉนวนในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้าจะลดลงและเพิ่มขึ้นตามค่า ε_r' ในขณะที่ตัวประกอบความสูญเสีย (loss factor; ε_r'') จะเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่วิกฤต (critical frequency) และต่อมาจะลดขนาดของค่าเปอร์มิตติวิตี้ของวัสดุ และความถี่คutoff ของฉนวนแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน

การเกิดรีโซแนนซ์ของกระบวนการโพลาไรเซชันโดยทั่วไปแล้วจะสัมพันธ์กับ electronic polarization หรือ atomic polarization ส่วนผลการคลายตัวของกระบวนการโพลาไรเซชัน (relaxation effect) จะสัมพันธ์กับ orientation polarization



รูปที่ 2.12 คุณลักษณะโพลาไรเซชันของฉนวนเหลว [27]

บทที่ 3

การทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลว

ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับการเตรียมน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน การทดสอบคุณสมบัติหาค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน จากนั้นจะทดสอบคุณสมบัติด้านไฟฟ้า คือค่าเบรกดาว์นหรือค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเบรกดาว์นของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโนภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ ทดสอบค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาว์นทั้งชั่วบวกและชั่วลบภายใต้อุณหภูมิห้อง ทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดัน กระแสสลับและอุณหภูมิห้อง และจะทำการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส

3.1 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน

การเตรียมตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโนทั้งหมดเริ่มต้นเป็นไปตามกระบวนการสามขั้นตอนดังต่อไปนี้

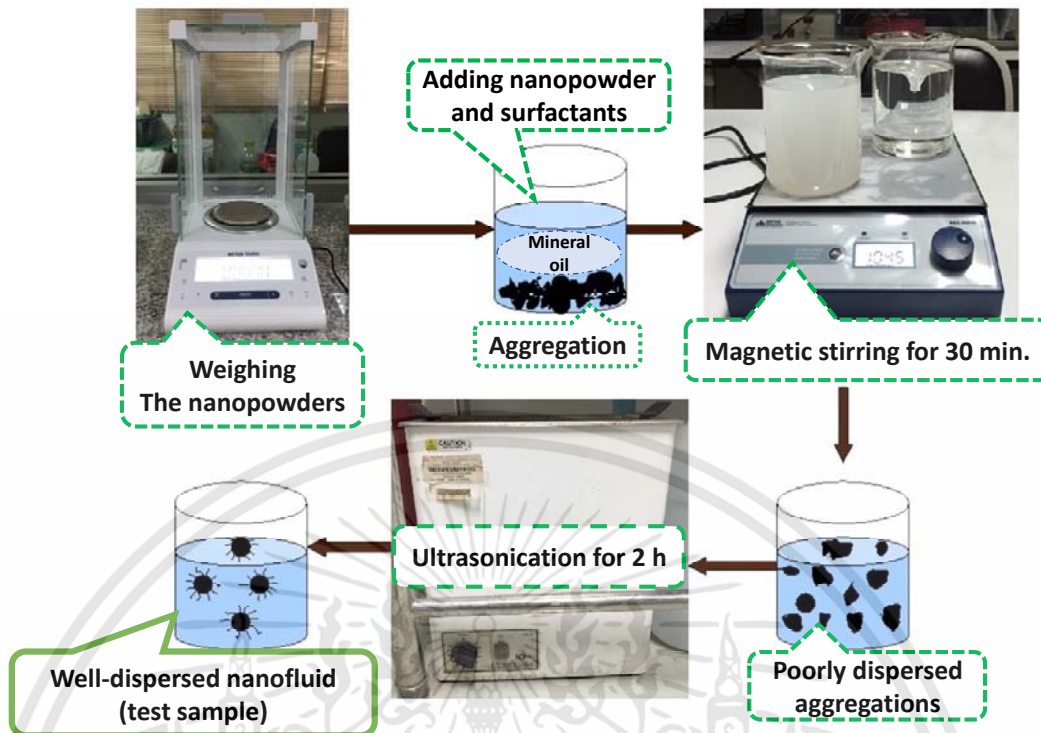
ขั้นตอนที่ 1 นำอนุภาคนาโนตามชนิดและสัดส่วนปริมาณที่ระบุไว้ในงานวิจัยนั้นคือ TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3 ในสัดส่วน 0.01% และ 0.03% (โดยคิดจากปริมาตรของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้) ผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลง ในขั้นตอนนี้ กรณีใส่สารลดแรงตึงผิวจะใส่หลังจากเติมอนุภาคนาโน

ขั้นตอนที่ 2 เทคนิคการทำให้อนุภาคนาโนมีการกระจายตัวในน้ำมันหม้อแปลงจะทำด้วยเครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3 เพื่อให้แน่ใจว่าอนุภาคนาโนที่ผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงมีความสม่ำเสมอของการแพร่กระจายของอนุภาคนาโนในน้ำมันหม้อแปลง โดยจะต้องนำไปเข้าเครื่องเขย่าสารโดยใช้เสียงความถี่สูงด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก (ultrasonic) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สารลดแรงตึงผิว surfactant sorbitan monooleate (Span 80) ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโนนั้นมีการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อป้องกันการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาโนในน้ำมันหม้อแปลง [14, 19, 21, 28] ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน แสดงในรูปที่ 3.1

หลังเสร็จจากขั้นตอนที่ 1-3 ข้างต้น ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนจะถูกนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในเตาอบสูญญากาศที่ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบ

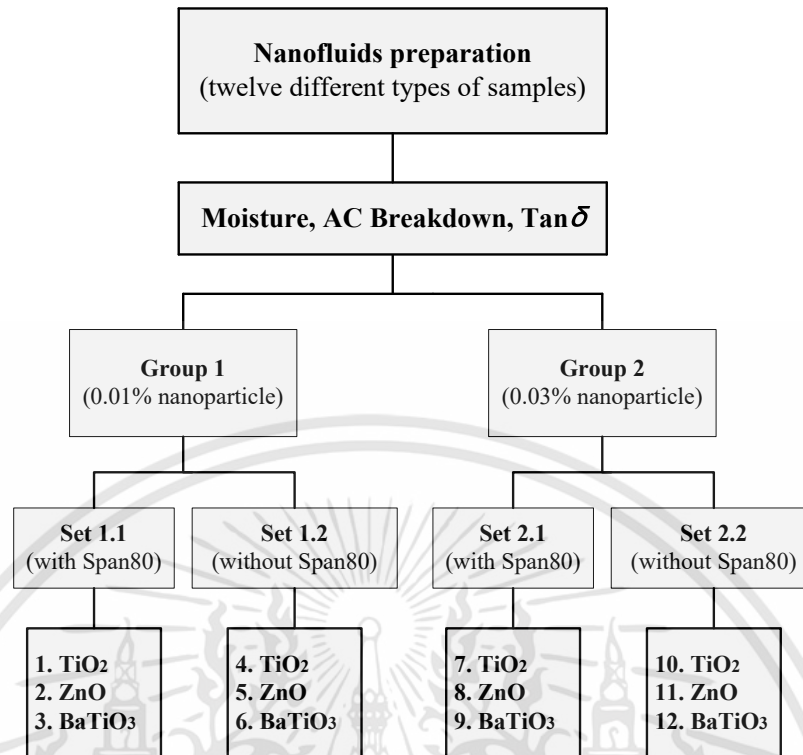


รูปที่ 3.1 แผนภาพของกระบวนการเตรียมตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน

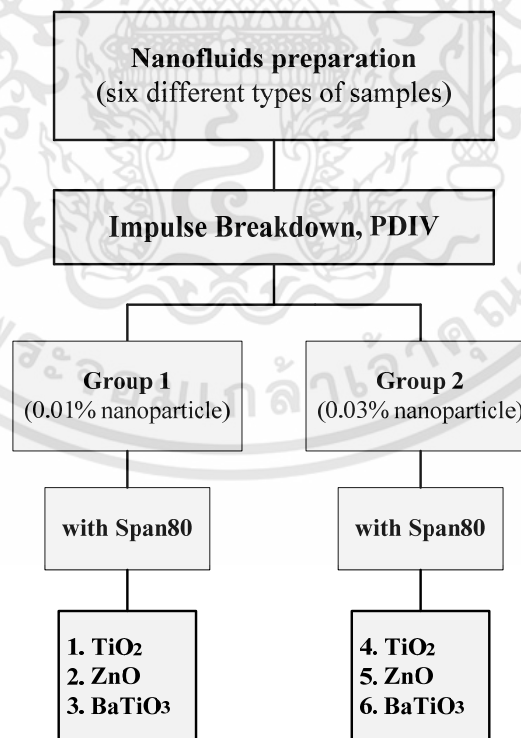
ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนได้จัดทำขึ้นโดยการผสมอนุภาคนาโน TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3 โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยสิบสองตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติหาค่าความชื้น การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก จะประกอบด้วยสิบสองชนิดตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก นั่นคือกลุ่ม 0.01% และกลุ่ม 0.03% โดยปริมาตร ในแต่ละกลุ่มมีสองชุดย่อย คือในกลุ่มที่มี Span 80 และกลุ่มที่ไม่มี Span 80 และแต่ละชุดย่อยจะประกอบด้วยสามประเภทตามอนุภาคนาโน คือ TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3 เพื่อความชัดเจนและเข้าใจเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับกลุ่มตัวอย่างของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน พิจารณาได้จากในรูปที่ 3.2

กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยหกตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่วคราวและชั่วลบ และการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ จะประกอบด้วย หกชนิดตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก นั่นคือกลุ่ม 0.01% และกลุ่ม 0.03% โดยแต่ละกลุ่มที่มี Span 80 จะประกอบด้วยสามประเภทตามอนุภาคนาโน คือ TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3 เพื่อความชัดเจนและเข้าใจเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับกลุ่มตัวอย่างของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน พิจารณาได้จากในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมอธิบายสิบสองชนิดตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน

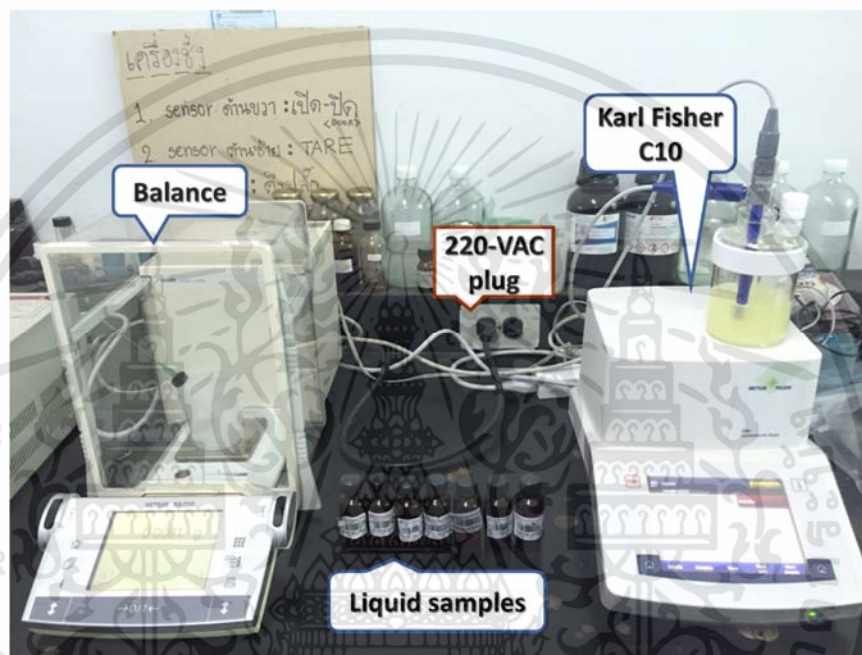


รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมอธิบายหกชนิดตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบหาค่าความชื้นในตัวอย่างทดสอบ

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้ คือการทดสอบวัดหาปริมาณน้ำ (moisture content) ที่อยู่ในตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนและเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ โดยวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดไตเตรท Karl Fischer (รุ่น: METTLER TOLEDO-C10S), ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐานสำหรับวัดความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงตามการทดสอบ ASTM D 1533 [29] เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติหาค่าความชื้นในตัวอย่างทดสอบมีแสดงในรูปที่ 3.4



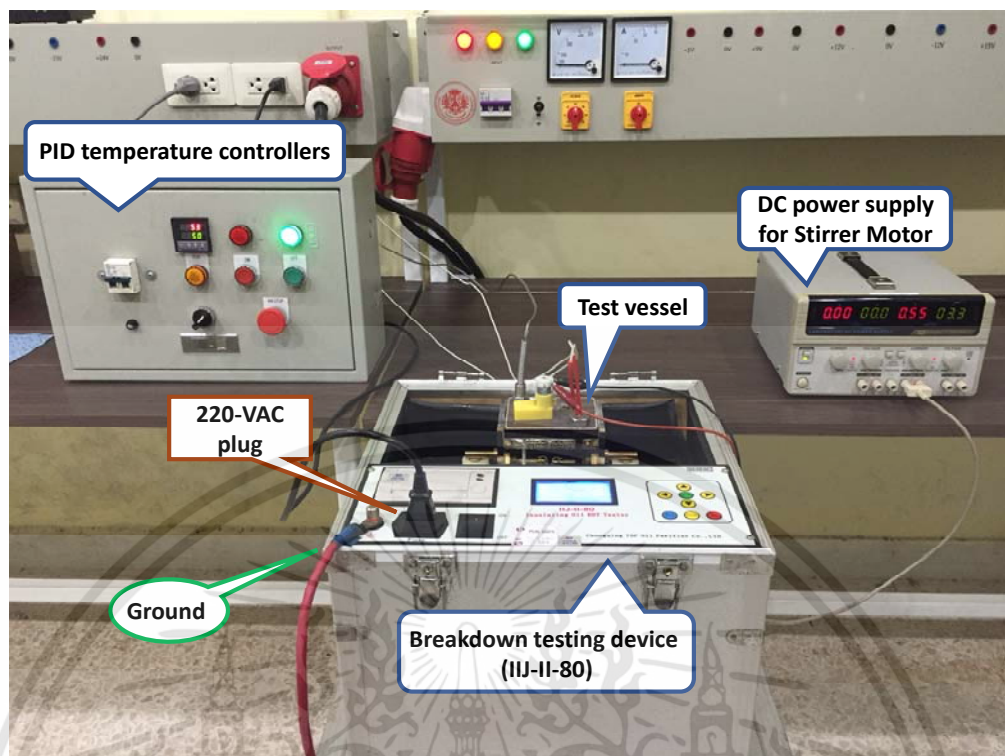
รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดหาปริมาณความชื้น (Karl Fischer Titrators) เพื่อประเมินปริมาณน้ำที่มีอยู่ภายในกลุ่มตัวอย่าง

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

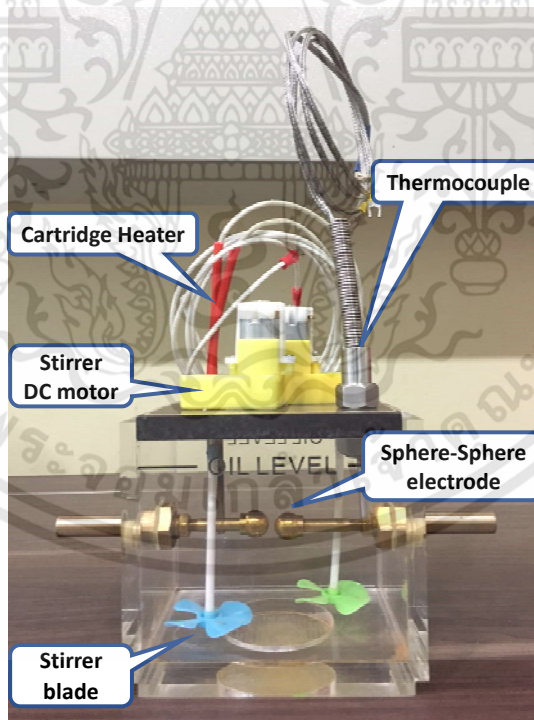
3.3.1 การทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์

การวัดหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ เพื่อเป็นการประเมินคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและสิบสองชนิดตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 โดยการทดสอบในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 [30] ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ โมเดลรุ่น IIJ-II-80 ทำการตั้งค่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบทรงกลมกับทรงกลม (sphere-sphere) ที่ 2.5 มิลลิเมตร ทดสอบเป็นจำนวน 6 ครั้ง และทดสอบที่ความถี่ 50 Hz สำหรับสารตัวอย่างแต่ละชนิด

นอกจากนี้ ในการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 35°C ถึง 90°C ซึ่งอุณหภูมิที่แตกต่างกันประกอบด้วย 35°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C โดยชุดอุปกรณ์การทดสอบแสดงในรูปที่ 3.5



(ก)



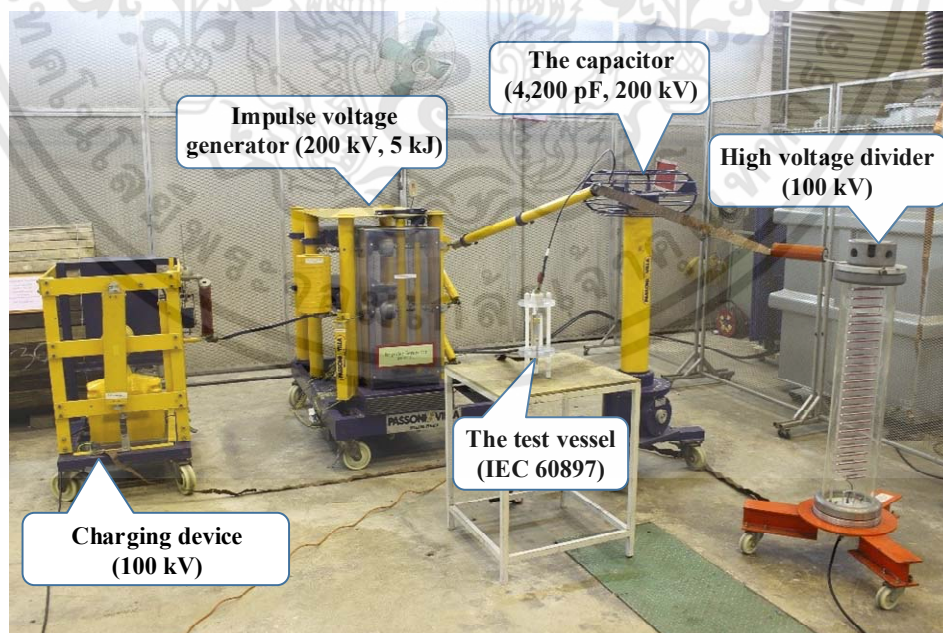
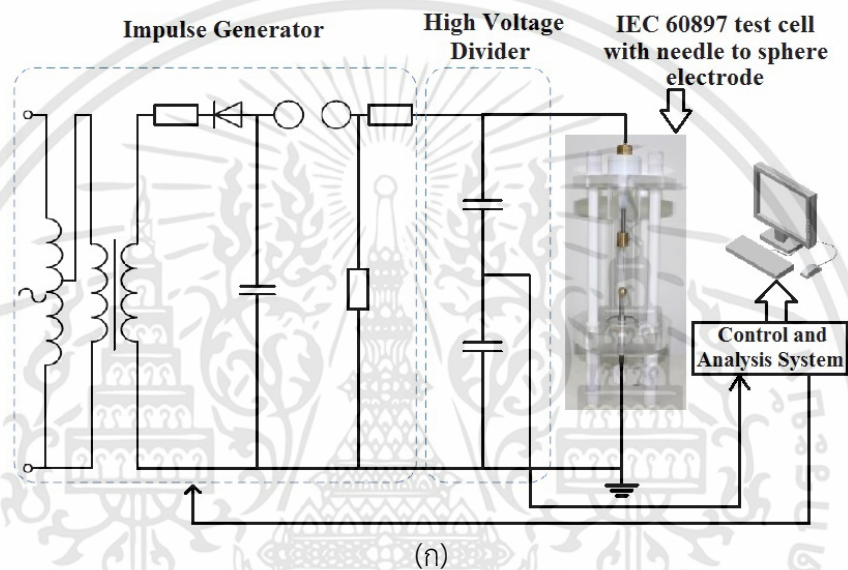
(ข)

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ (Model: IIJ-II-80) (ก) ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ ชุดควบคุมอุณหภูมิ และชุดจ่ายไฟกระแสตรงให้มอเตอร์ (ข) ภาพขณะใส่ตัวอย่างของเหลวเพื่อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนซ์ั่วบวกและชั่วลบ

การทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนซ์ั่วบวกและชั่วลบดำเนินการทดสอบด้วยอิเล็กโทรดแบบเข็มและทรงกลม (needle-sphere) ตามมาตรฐาน IEC 60897 [31] แผนภาพวงจรทดสอบและการจัดเตรียมการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 3.6 ในการทดสอบทำการปรับตั้งระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดเข็มและทรงกลม ที่ระยะ 15 มิลลิเมตร โดยเข็มเป็นชนิดทั้งสแตนเลสที่มีปลายเข็มประมาณ $40\ \mu\text{m}$ ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดด้านแรงสูง ในขณะที่อิเล็กโทรดทรงกลมเป็นชนิดทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดด้านแรงต่ำ วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60897 สำหรับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนซ์ั่วบวกและชั่วลบ



รูปที่ 3.6 วงจรทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนซ์ั่วบวกและชั่วลบ (ก) แผนภาพวงจรทดสอบ (ข) การจัดเตรียม
วงจรถ่ายทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

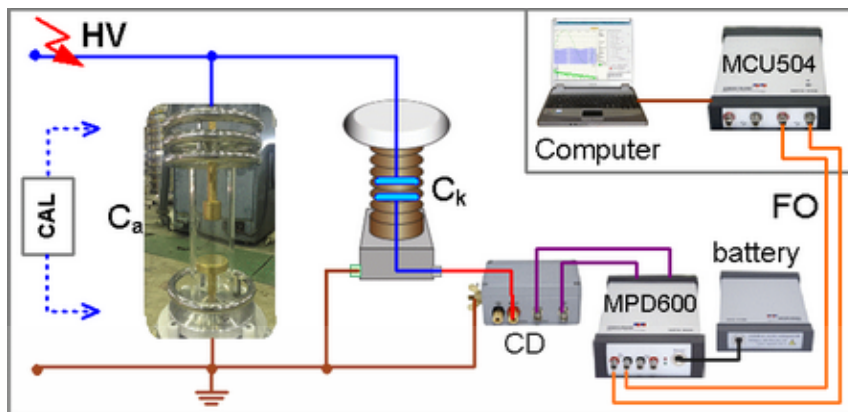
3.3.3 การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ

การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ PD และ PDIV ช่องว่างระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเข็มและระนาบ (needle-plane) ถูกกำหนดระยะห่างคือ 40 มิลลิเมตร โดยเข็มที่ใช้ในการทดสอบเป็นชนิดทั้งสแตนเลสที่มีรัศมีปลายเข็มสามขนาด คือ $10\ \mu\text{m}$ $20\ \mu\text{m}$ และ $40\ \mu\text{m}$ ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดด้านแรงสูง ในขณะที่อิเล็กโทรดระนาบเป็นชนิดทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดด้านแรงต่ำ

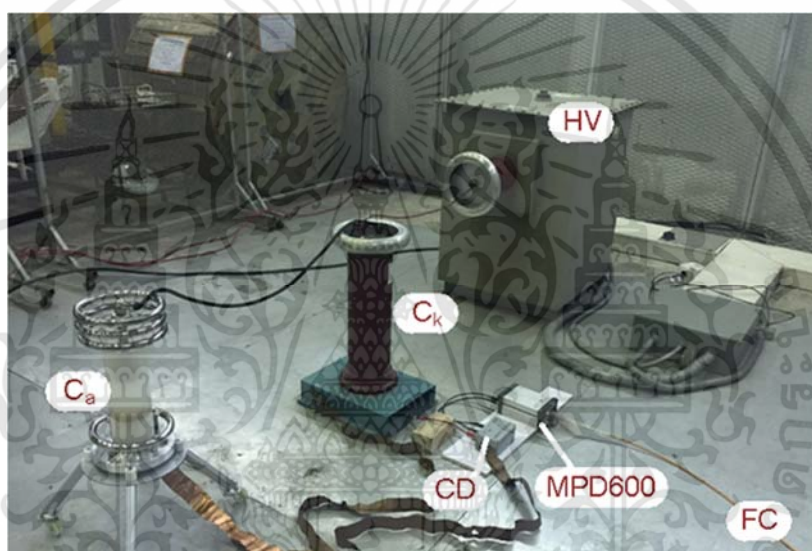
เข็มที่ใช้ในการทดลองผลิตขึ้นจากบริษัทในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีการแนะนำใน IEC 61294 [32] สำหรับการทดสอบ PDIV ของฉนวนเหลวในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เข็ม ที่มีรัศมีปลายเข็ม คือ $10\ \mu\text{m}$ $20\ \mu\text{m}$ และ $40\ \mu\text{m}$ ทั้งนี้ในการเลือกรัศมีปลายเข็มที่มีความแตกต่างกันมีความเป็นไปได้ที่ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [33] ซึ่งรัศมีปลายเข็มสำหรับการวินิจฉัยฉนวนของเหลวอาจแตกต่างกันได้ตั้งแต่ $3\ \mu\text{m}$ ถึง $100\ \mu\text{m}$ กล่าวโดย CIGRÉ [34] นอกจากนี้เข็มทั้งสแตนเลสที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ทนการหลอมละลายสูงที่อุณหภูมิประมาณ 3,653 K หรือประมาณ $3379.850\ \text{°C}$ และความแข็งประมาณ $12-40 \times 10^3\ \text{kg/cm}^2$ [35] โดยทดสอบในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61294

การทดสอบในงานวิจัยนี้ทดสอบด้วยวิธีเพิ่มระดับแรงดัน (ramp voltage) ในอัตรา $1\ \text{kV/s}$ จากศูนย์จนกระทั่งสามารถตรวจจับค่า PDIV ได้ ซึ่ง PDIV คือค่าแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมาก แรงดันต่ำสุดที่สามารถตรวจวัด $\text{PD} \geq 100\ \text{PC}$, ค่า PDIV จะถูกบันทึกไว้ แต่ละอิเล็กโทรดเข็มทำการทดสอบสิบครั้ง ทั้งนี้จะทำการทดสอบเหมือนกันในอิเล็กโทรดแบบเข็มที่มีรัศมีของปลายเข็มทั้งสามขนาด [6, 36-37] อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบด้วยวิธีแรงดันแบบขั้น (step voltage) เป็นวิธีที่มีการประยุกต์ใช้สำหรับการทดสอบ PDIV ซึ่งจะได้ค่าการเกิด PDIV ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยวิธีเพิ่มระดับแรงดัน [14] ซึ่งมีการวิจัยและกล่าวโดย N. Pattanadech [6] อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบ PDIV ด้วยวิธีเพิ่มระดับแรงดัน หรือ ramp voltage ดำเนินการทดสอบโดยการอ้างอิงตาม IEC 61294

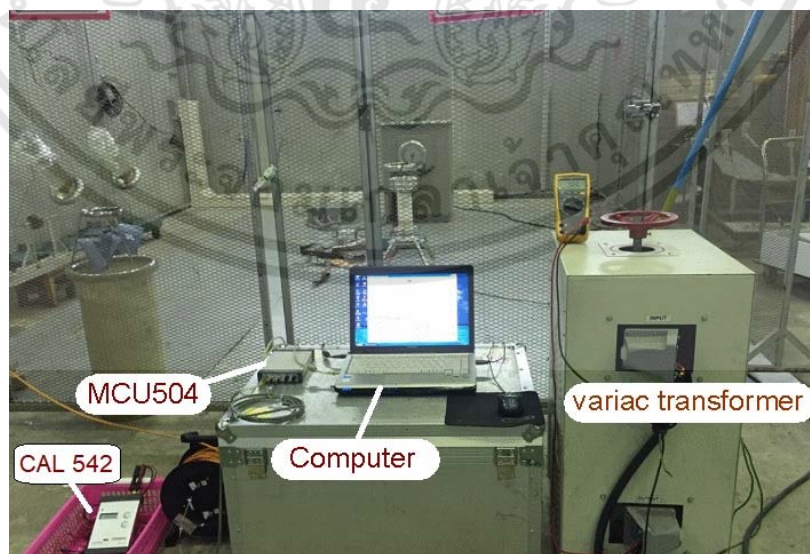
วงจรสำหรับการทดสอบและการจัดเตรียมวงจรการทดสอบหาค่า PD, PDIV อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61294 จะแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 อุปกรณ์ทดสอบ PD ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ HV หมายถึงแหล่งจ่ายแรงดันสูงพิกัด 75 kV, 40 kVA และ Ca คือฉนวนเหลวภายใต้อิเล็กโทรด Ck คือตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวพิกัด 1 nF และ CD คืออุปกรณ์คาบเกี่ยว และ FC คือสายเคเบิลใยแก้วนำแสง MPD 600 คืออุปกรณ์ที่เป็นหน่วยรวบรวมผลการวัดการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Data acquisition unit) และ MCU 504 คือชุดควบคุมการทำงาน (Controller unit) และ CAL 542 คือชุดปรับเทียบระบบวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD Calibrator) สามารถจ่ายพัลส์ปรับเทียบมาตรฐานขนาดตั้งแต่ 1 pC ถึง 100 pC และ PC คือชุดคอมพิวเตอร์ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ mtronix



รูปที่ 3.7 แผนภาพวงจรสำหรับการทดสอบหาค่า PD, PDIV



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 การจัดเตรียมวงจรการทดสอบ (ก) วงจรทดสอบ PD (ข) ระบบการวัดค่า PD

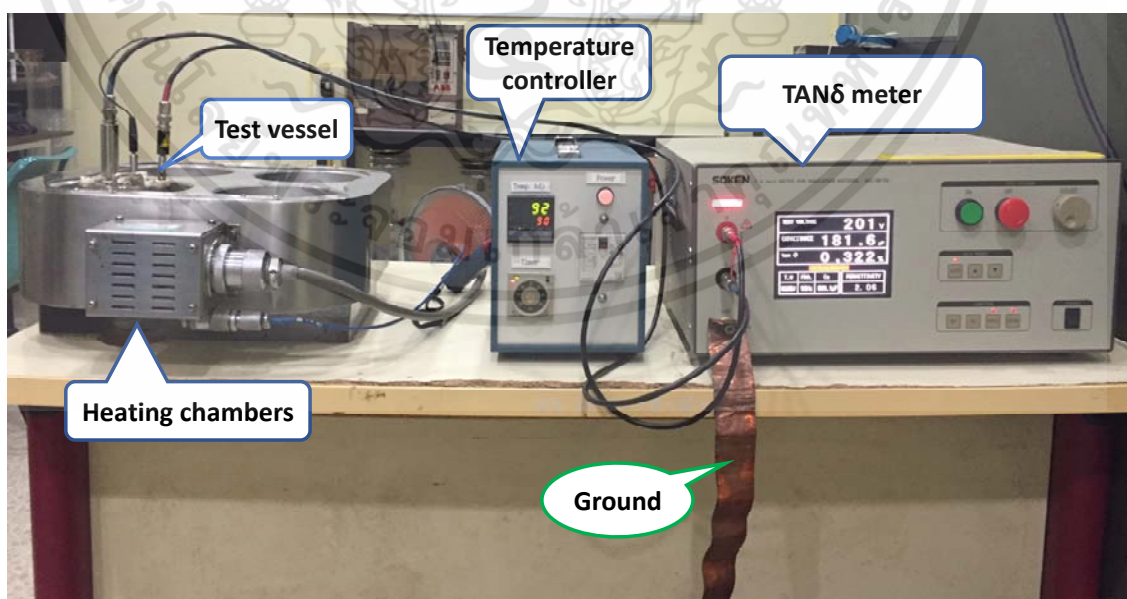
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ สัญญาณรบกวน (background noise) ของวงจรถดสอบ PD เป็นการวัดก่อนทำการทดสอบ ซึ่งจากการทดสอบวัด PD แสดงให้เห็นว่าที่ระดับแรงดัน 40 kV จะไม่เกิดสัญญาณรบกวน โดยจะเกิดเพียงสัญญาณรบกวนพื้นฐานของระบบวัดที่ประมาณ 0.5 pC เมื่อดำเนินการทดสอบหาค่าการเกิด PD ขนาดของสัญญาณ PD เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ในขณะที่ขนาดของสัญญาณรบกวนที่สังเกตเห็นในขณะทดสอบและบันทึกรูปแบบการเกิด PD ซึ่งขนาดของสัญญาณรบกวนยังคงค่าเป็นเช่นเดิมหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถมั่นใจได้สำหรับการจำแนก PD ในน้ำมันจากสัญญาณรบกวน

โดยทั่วไป PDIV ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความชื้น และอุณหภูมิ ของการทดสอบฉนวนเหลว รูปแบบของอิเล็กโทรด นั่นคือขนาดของปลายเข็มและการกำหนดช่องว่างระหว่างระห่างอิเล็กโทรด ในการทดสอบ ค่าความชื้นและอุณหภูมิของของเหลว รวมถึงอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบ จะมีการควบคุมเพื่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนคงที่หรือเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้น ผลการทดสอบที่ได้จากการทดลองนั้นจะแสดงให้เห็นว่าผลขึ้นอยู่กับอนุภาคนาโนที่เพิ่มเข้าไปในน้ำมันหม้อแปลง

3.3.4 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

หลักการการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก หรือ $\tan \delta$ คือเทคนิคการวินิจฉัยที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของฉนวนน้ำมัน [38] ในหัวข้อนี้จะเป็นการวัดการประเมินผลของ $\tan \delta$ ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และสืบสองชนิดตัวอย่างที่แตกต่างกันของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 °C ถึง 90 °C (35 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C และ 90 °C) โดยใช้เครื่องทดสอบน้ำมัน โมเดลรุ่น : SOKEN DAC-IM-D6 โดยการทดสอบในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60247 [39] การจัดเตรียมวงจรการทดสอบ จะแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การจัดเตรียมวงจรการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับทดสอบตัวอย่างของเหลว (Model: SOKEN DAC-IM-D6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลว

ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับผลการทดสอบค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านไฟฟ้า คือ ค่าเบรกดาว์นหรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโนภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ ผลการทดสอบค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาว์นทั้งชั่วววกและชั่วลบภายใต้อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับและอุณหภูมิห้อง และจะกล่าวถึงผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 35-90 องศาเซลเซียส

4.1 ผลการทดสอบหาค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง

ก่อนการทดสอบหาค่าความชื้น ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 ต้องได้รับการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ในเตาอบสูญญากาศที่ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือการตรวจสอบหาค่าความชื้นในตัวอย่างของเหลว โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกวัดด้วยเครื่องไตเตรท Karl Fischer ตามมาตรฐาน ASTM D1533 [29] วัดหาค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ผลการทดสอบหาค่าความชื้น แสดงในตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน กลุ่มที่ 1 ความเข้มข้น 0.01%

| Liquid dielectric | | | Moisture content levels (ppm) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| - | - | Mineral oil | 18.6 |
| Group 1 0.01% nanofluids | With Span80 | Mineral oil with TiO ₂ | 17.6 |
| | | Mineral oil with ZnO | 19.2 |
| | | Mineral oil with BaTiO ₃ | 18.5 |
| | Without Span80 | Mineral oil with TiO ₂ | 17.2 |
| | | Mineral oil with ZnO | 18.9 |
| | | Mineral oil with BaTiO ₃ | 18.2 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน กลุ่มที่ 2 ความเข้มข้น 0.03%

| Liquid dielectric | | | Moisture content levels (ppm) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| - | - | Mineral oil | 18.6 |
| Group 2 0.03% nanofluids | With Span80 | Mineral oil with TiO ₂ | 17.3 |
| | | Mineral oil with ZnO | 19.5 |
| | | Mineral oil with BaTiO ₃ | 18.2 |
| | Without Span80 | Mineral oil with TiO ₂ | 17.2 |
| | | Mineral oil with ZnO | 19.3 |
| | | Mineral oil with BaTiO ₃ | 17.8 |

จากผลการทดสอบหาค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน พบว่าค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน TiO₂ และ BaTiO₃ ทั้งสองความเข้มข้นคือ 0.01% และ 0.03% ไม่ส่งผลให้ค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน ZnO ที่ความเข้มข้น 0.01% และ 0.03% ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้ ในกรณีที่น้ำมันหม้อแปลงผสมกับอนุภาคนาโนพร้อมทั้งเติมสารลดแรงตึงผิวหรือ Span80 ส่งผลให้ค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติม Span80 อย่างไรก็ตาม จากผลของการทดสอบวัดค่าความชื้นในตัวอย่างทดสอบทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีค่าความชื้นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่ส่งผลต่อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

4.2.1 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์

ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการอธิบายถึงความสมบูรณ์ของฉนวนเหลวซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนภายในหม้อแปลง นอกจากนี้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ได้ถูกนำมาตรวจสอบเพื่อประเมินคุณลักษณะและคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง ในการวิจัยนี้มีการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง โดยทำการทดสอบทั้งน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 35°C ถึง 90°C โดยผลการทดสอบจะแสดงในตารางที่ 4.3

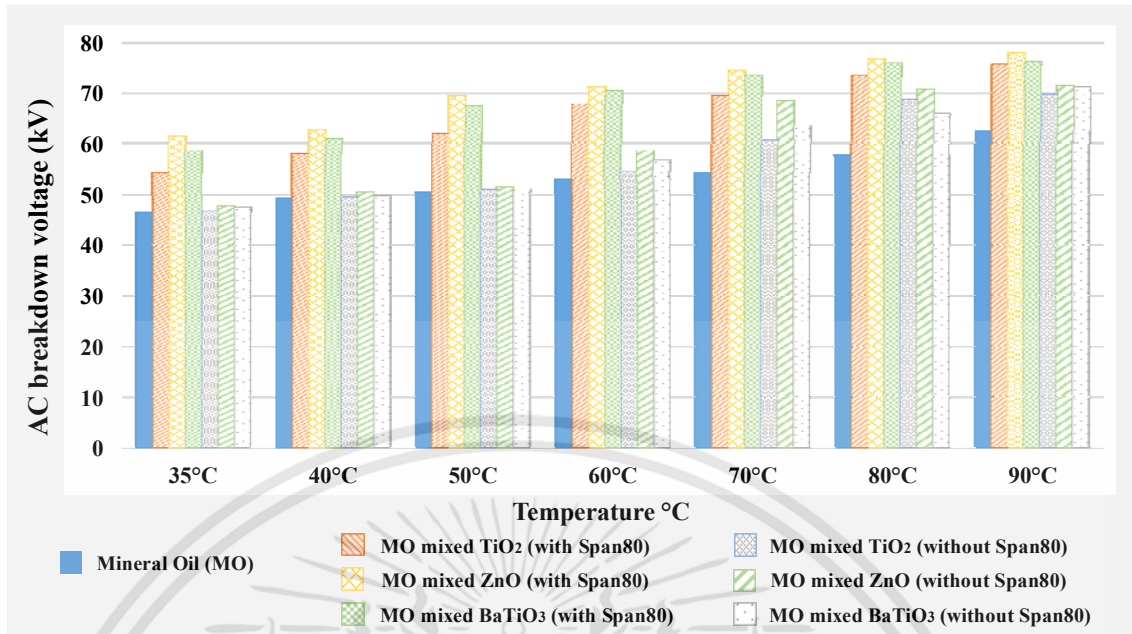
จากผลการทดสอบพบว่ากลุ่มตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนมีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์สูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาว์นของกลุ่มตัวอย่างของเหลวที่หลากหลาย รวมถึงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนมีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่่างของเหลว และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในของเหลว นอกจากนี้ จากผลการทดสอบที่ยืนยันได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาว์นของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนในกลุ่มที่มี Span 80 สูงกว่าในกลุ่มที่ไม่มี Span 80 ตลอดช่วงอุณหภูมิทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาว์น สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งในกลุ่มที่มีและไม่มี Span 80

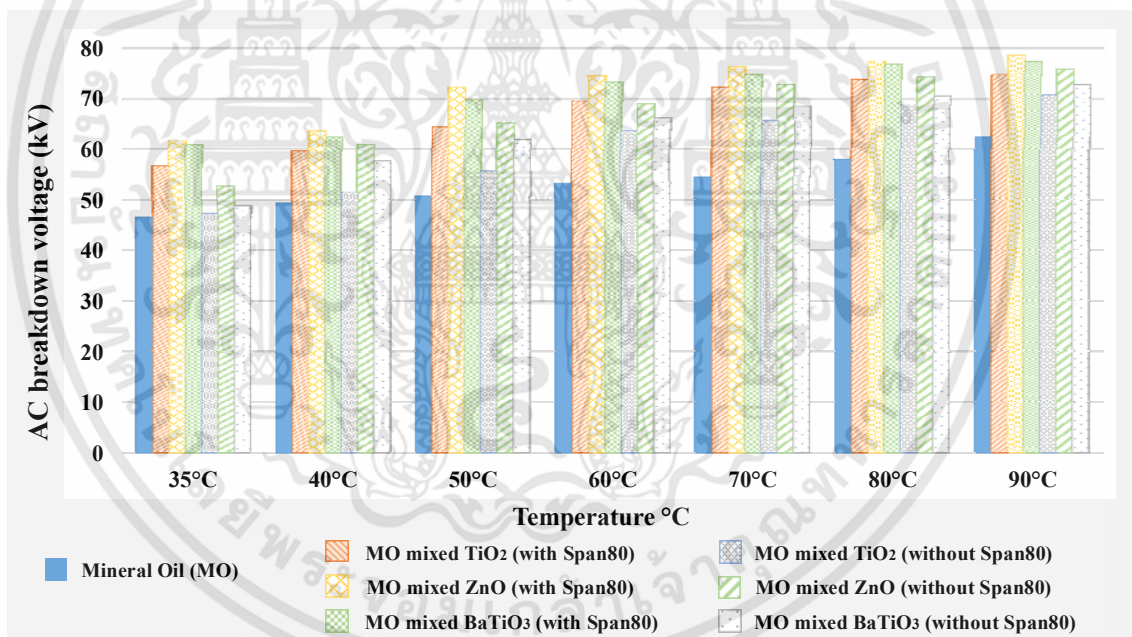
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาว์นน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนความเข้มข้น 0.01% และ 0.03% ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

| AC Breakdown Voltage (kV) | | | | | | | |
|---------------------------|-------------|--|------|--------------------|------------------|------|--------------------|
| °C | Mineral oil | Group 1: Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| | | With Span80 | | | Without Span80 | | |
| | | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 35 | 46.4 | 54.3 | 61.3 | 58.7 | 46.8 | 47.7 | 47.4 |
| 40 | 49.2 | 58.1 | 62.7 | 60.8 | 49.4 | 50.4 | 49.8 |
| 50 | 50.5 | 61.9 | 69.5 | 67.5 | 50.9 | 51.5 | 51.1 |
| 60 | 53.1 | 67.8 | 71.2 | 70.4 | 54.4 | 58.7 | 56.9 |
| 70 | 54.3 | 69.4 | 74.4 | 73.6 | 60.6 | 69.5 | 63.5 |
| 80 | 57.8 | 70.7 | 76.8 | 75.9 | 65.8 | 73.4 | 68.6 |
| 90 | 62.4 | 71.5 | 78.1 | 76.3 | 69.7 | 75.7 | 71.2 |
| °C | Mineral oil | Group 2: Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| | | With Span80 | | | Without Span80 | | |
| | | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 35 | 46.4 | 56.5 | 61.7 | 60.8 | 47.2 | 52.4 | 48.7 |
| 40 | 49.2 | 59.6 | 63.5 | 62.3 | 51.3 | 60.9 | 57.6 |
| 50 | 50.5 | 64.3 | 72.1 | 69.7 | 55.6 | 65.1 | 61.8 |
| 60 | 53.1 | 69.5 | 74.5 | 73.2 | 63.5 | 68.9 | 66.1 |
| 70 | 54.3 | 72.2 | 76.2 | 74.8 | 65.7 | 72.6 | 68.5 |
| 80 | 57.8 | 73.8 | 77.4 | 76.7 | 68.8 | 74.3 | 70.4 |
| 90 | 62.4 | 74.6 | 78.6 | 77.3 | 70.6 | 75.8 | 72.7 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์

(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนความเข้มข้น 0.01% (ข) ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนความเข้มข้น 0.03%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนสามประเภท คือ TiO_2 , ZnO และ BaTiO_3 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 35°C ถึง 90°C กราฟในรูปที่ 4.1 (ก) แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ไม่มี Span 80 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 35°C ถึง 50°C นอกจากนี้จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงผลของ Span 80 ต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากกราฟ จะเห็นว่าสำหรับตัวอย่างของเหลวที่ไม่มี Span 80 จะแสดงให้เห็นผลในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีจุดเริ่มต้นการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์จากอุณหภูมิตั้งแต่ 70°C ขึ้นไป ในขณะที่กลุ่มที่มี Span 80 แสดงให้เห็นถึงค่าที่เพิ่มสูงขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ตั้งแต่เริ่มต้นอุณหภูมิตดสอบจนถึงอุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบ

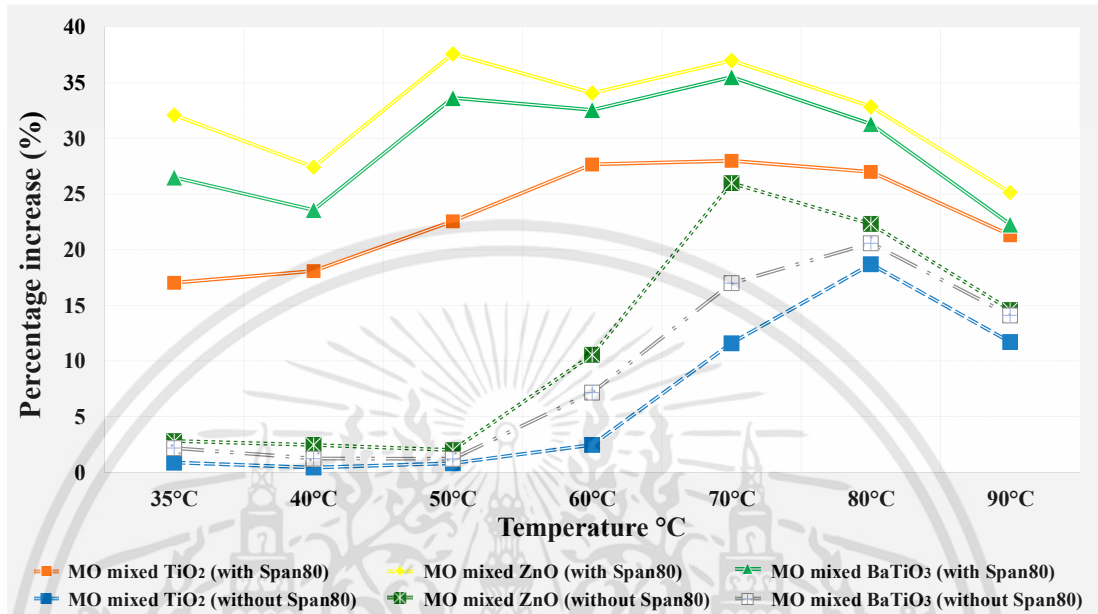
นอกจากนี้กราฟในรูปที่ 4.1 (ข) แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ไม่มี Span 80 ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเห็นได้ชัดที่สุดตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นทดสอบ 35°C แต่เนื่องจากมีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น จาก 0.01% เป็น 0.03% จึงส่งผลในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีจุดเริ่มต้นการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์จากอุณหภูมิตั้งแต่ 40°C จนถึงอุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบคือ 90°C ในขณะที่กลุ่มที่มี Span 80 ยังคงแสดงให้เห็นถึงค่าที่เพิ่มสูงขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ตั้งแต่เริ่มต้นอุณหภูมิตดสอบจนถึงอุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบเช่นกรณีแรก

จากผลการทดสอบสามารถแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์เมื่อผสมอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลง โดยพิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อน้ำมันหม้อแปลงผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ZnO ในความเข้มข้น 0.01% และ 0.03% ที่มี Span 80 โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 50°C อย่างไรก็ตามแนวโน้มของกลุ่มตัวอย่างของเหลวนาโน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำมัน จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของเหลวนาโนมีค่าลดลง โดยมีจุดเริ่มต้นการลดลงของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่ 70°C

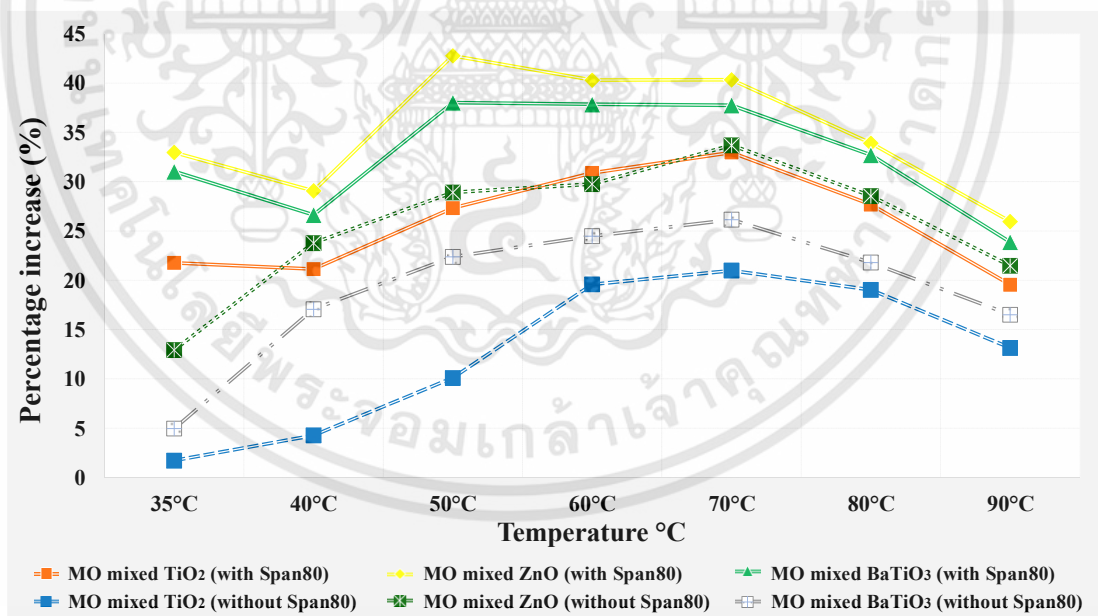
การเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงมักจะเกิดขึ้นในรูปแบบของกลไกการเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ โดยการเริ่มต้นเกิดสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดเกินขีดจำกัดระดับหนึ่ง ซึ่งเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการเพิ่มทวิคูณของอิเล็กตรอนและประจุบวก และในขณะที่มีการเพิ่มอนุภาคนาโนเข้าไปในน้ำมันหม้อแปลง ส่งผลให้ฟรีไอออนและฟรีอิเล็กตรอนเหล่านี้ มีการเกาะกลุ่มรวมเข้ากับไอออนและอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโน ซึ่งทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของไอออนและอิเล็กตรอน ส่งผลทำให้เพิ่มความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งทำให้การเพิ่มขึ้นของการเกิดสตรีมเมอร์ช้าลง และส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในน้ำมันหม้อแปลง จะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคนาโนลดลงและทำให้เกิดแรงยึดติดระหว่างอนุภาคนาโนขึ้น [40] ทั้งนี้ แรงดังกล่าวคือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) เป็นแรงดึงดูดแบบอ่อนๆ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยยึดโมเลกุลเข้าด้วยกัน และเป็นแรงพื้นฐานที่มีผลทำให้อนุภาค สามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าหากแต่ละโมเลกุลมีระยะห่างเกินระยะหนึ่งจะทำให้แรงแวลเดอร์วาลส์ กลายเป็นแรงผลักได้เช่นกัน [41]



(ก)

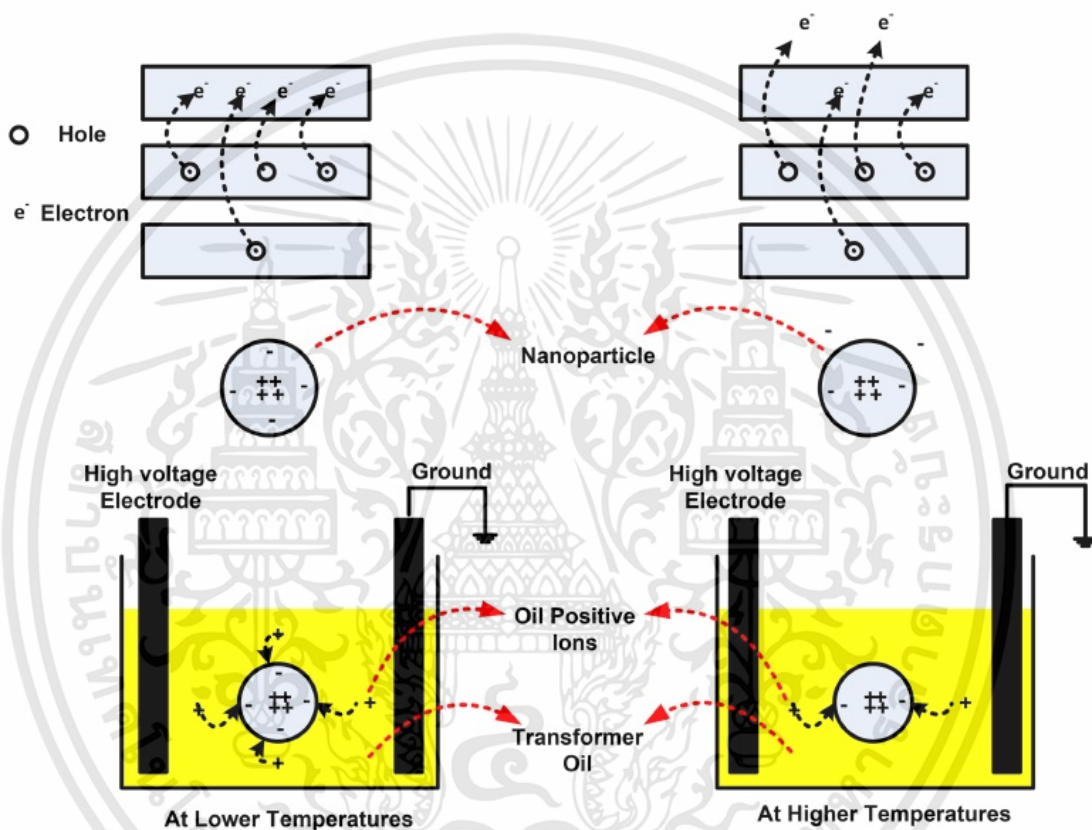


(ข)

รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิโดยการพิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเบรกตวนสำหรับน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งที่มีและไม่มี Span 80 (ก) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากรณีของเฮลวนาโนมีความเข้มข้น 0.01 % (ข) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากรณีของเฮลวนาโนมีความเข้มข้น 0.03 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้น รวมถึงมีค่าสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นทำให้เกิดแรงมากระทำกับอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโน ($F = QE$) และเมื่อมีแรงมากระทำที่มากขึ้นรวมถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีพลังงานมากขึ้นกับอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโน ทำให้สามารถเกิดการหลุดของอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคนาโน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.3 จากรูปแสดงให้เห็นถึง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอนุภาคนาโน และอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอนุภาคนาโนนี้ ส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสตรีมเมอร์และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [40]



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการแตร็ปประจุ (charge trapping) [40]

4.2.2 ผลการทดสอบค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ

ค่าความคงทนแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบและประเมินคุณลักษณะแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง โดยปกติค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์จะนำไปพิจารณาเพื่อประเมินคุณภาพของฉนวนเหลว ตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบของค่าเฉลี่ยความคงทนแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่ววอกและชั่วลบ รวมถึงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ระหว่างน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง

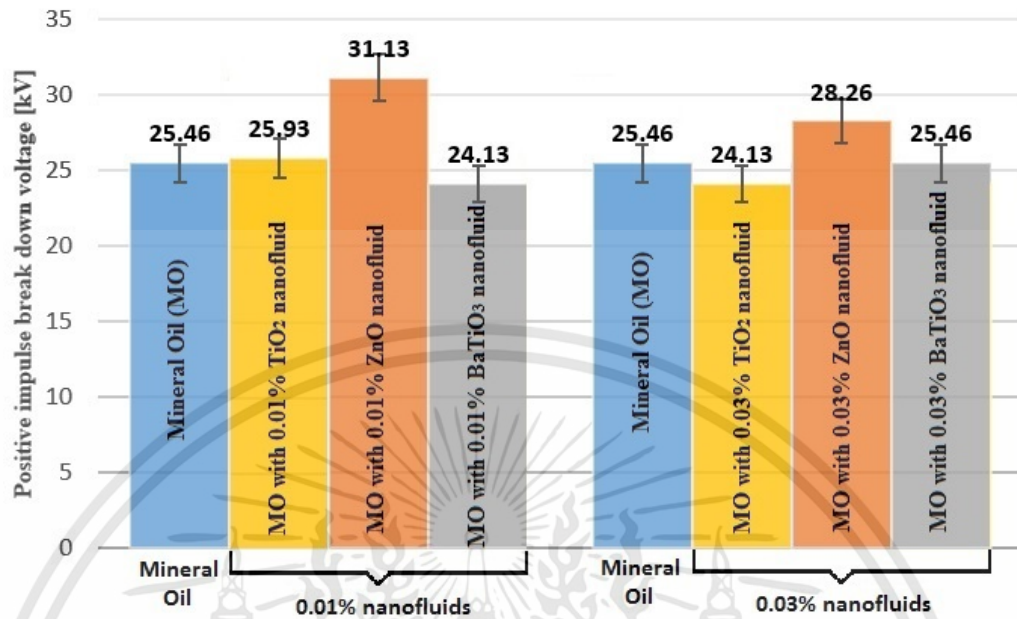
| Impulse Breakdown Voltage (kV) | | | | % increase | | |
|--------------------------------|---|-------|--------------------|------------------|-------|--------------------|
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 25.46 | 25.93 | 31.13 | 24.13 | 1.84 | 22.27 | -5.22 |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 25.46 | 24.13 | 28.26 | 25.46 | -5.22 | 10.99 | 0 |

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง

| Impulse Breakdown Voltage (kV) | | | | % increase | | |
|--------------------------------|---|-------|--------------------|------------------|--------|--------------------|
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 70.66 | 62.66 | 61.27 | 66.5 | -11.32 | -13.28 | -5.88 |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 70.66 | 61.66 | 63.33 | 68.83 | -12.73 | -10.37 | -2.58 |

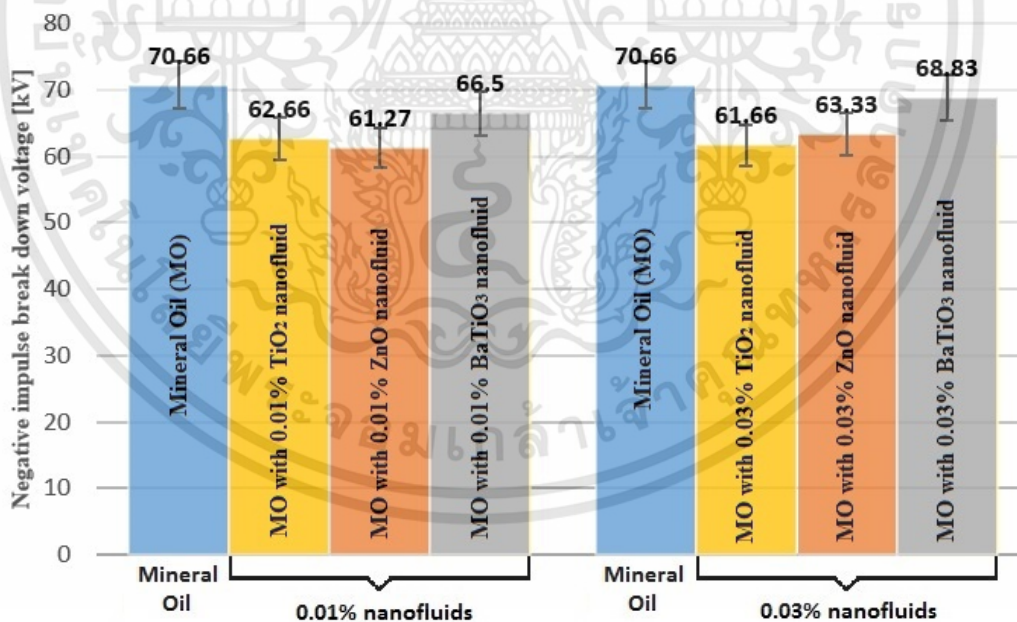
รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน จากกราฟยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ เมื่อน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมอนุภาคนาโนทั้งสามชนิดลงไป จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน ZnO มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อนุภาคนาโน TiO₂ และ BaTiO₃ ที่ผสมกับน้ำมันหม้อแปลงไม่แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวที่ดีขึ้น นอกจากนี้ น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโนทั้งสามชนิดแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ทำให้ค่าความคงทนแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราวมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชนิดและปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนจะมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อผลของความคงทนแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์

Comparison positive impulse breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.01% and 0.03% TiO₂, ZnO and BaTiO₃ nanofluids



(ก)

Comparison negative impulse breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.01% and 0.03% TiO₂, ZnO and BaTiO₃ nanofluids



(ข)

รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน (ก) แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราว (ข) แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดสอบสามารถวิเคราะห์กลไกการเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วคราวและชั่วคราว โดยจะเป็นการพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในตัวอย่างของเหลวระหว่างชั่วคราวและชั่วคราว (space charge) ที่ทำการทดสอบด้วยอิเล็กโทรดแบบเข็มและทรงกลม (needle-sphere)

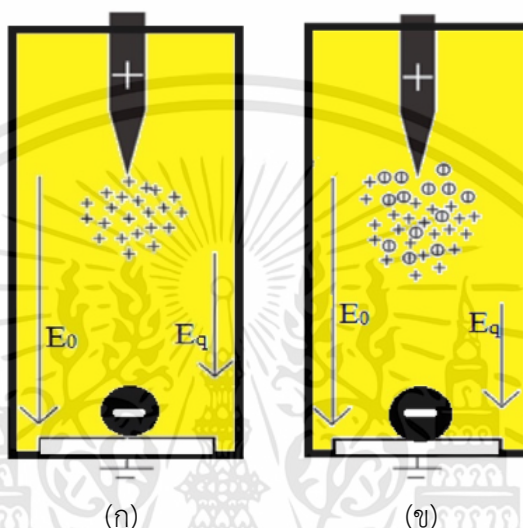
ในกรณีแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนชั่วคราว ที่มีอิเล็กโทรดแบบเข็มเป็นชั่วคราว เมื่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้เกิดโคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับปลายอิเล็กโทรดเข็มชั่วคราว เนื่องจากเกิดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณปลายเข็ม ซึ่งความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายเข็มดังกล่าวนี้ ทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) อิเล็กตรอนแตกตัวออกจากโมเลกุลของน้ำมันหม้อแปลง และมีไอออนบวกเพิ่มขึ้นอยู่ใกล้หรือติดกับปลายอิเล็กโทรดเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และเมื่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวเพิ่มสูงขึ้นไปอีก อิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นจากการชนแตกตัวหรือไอออไนเซชันบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง นั่นคืออิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนโมเลกุลเป็นกลาง เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในน้ำมันหม้อแปลง [24, 42]

ในกรณีของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีความเร็วของการเคลื่อนที่หลังจากเกิดการไอออไนเซชันของโมเลกุลน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน จะมีการเคลื่อนที่อยู่ใกล้บริเวณปลายอิเล็กโทรดเข็มชั่วคราว เนื่องจากมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในขณะที่อิเล็กตรอนส่วนที่เหลือจะถูกยับยั้งการเคลื่อนที่เนื่องจากการยึดเกาะกันหรือเกาะติดกันระหว่างอนุภาคนาโนกับอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) และส่งผลให้อนุภาคนาโนจะกลายเป็นไอออนลบหลังจากมีการยึดเกาะกันกับอิเล็กตรอน ซึ่งไอออนลบเหล่านี้จะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่ช้ากว่าปกติ ทำให้ไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อย และจะอยู่ในบริเวณที่มีการเกิดไอออไนเซชันใกล้กับปลายอิเล็กโทรดเข็มชั่วคราว นอกจากนี้ การเกิดโคโรนาดิสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน จะเกิดขึ้นได้ยากกว่าในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดทรงกลม ในขณะที่ไอออนลบที่เกิดจากการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคนาโนกับอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดเข็ม ผลของการที่มีไอออนลบที่เกิดจากการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคนาโนกับอิเล็กตรอนอยู่ใกล้กับปลายอิเล็กโทรดเข็มชั่วคราว จะส่งผลทำให้การเริ่มต้นเกิดการเบรกดาวนในน้ำมันหม้อแปลงช้าลง [42]

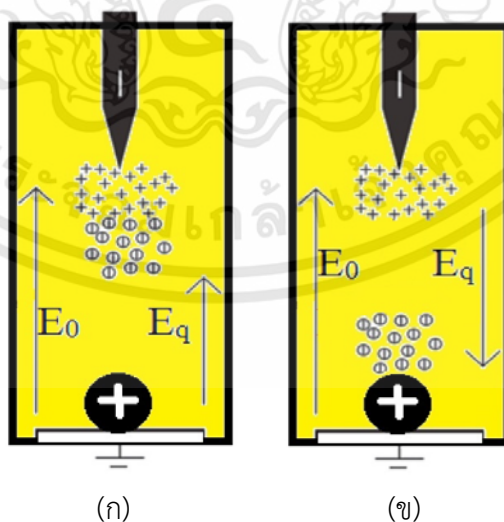
ในทางตรงกันข้ามกับแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนชั่วคราว เจ็อนไซภายใต้แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนชั่วคราว ที่มีอิเล็กโทรดแบบเข็มเป็นชั่วคราว ในกรณีน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ เมื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวไปยังอิเล็กโทรดแบบเข็ม จะเกิดการไอออไนเซชันอิเล็กตรอนแตกตัวออกจากโมเลกุลของน้ำมันหม้อแปลงหลังจากโคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้น ซึ่งการไอออไนเซชันของโมเลกุลจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่สูงและพยายามเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ และปล่อยให้ประจุไอออนบวกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาปลายอิเล็กโทรดเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) ไอออนบวกจะค้างอยู่บริเวณปลายอิเล็กโทรดเข็ม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายอิเล็กโทรดเข็มมีความเครียดเพิ่มสูงขึ้น แต่ในขณะที่ สนามไฟฟ้าบริเวณอิเล็กโทรดทรงกลมจะไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และเนื่องจากมีประจุอิเล็กตรอนค้างบางส่วน จึงทำให้เกิดเบรกดาวนได้ยากขึ้น [24, 42]

ในกรณีของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน อนุภาคนาโนจะยึดเกาะกันกับอิเล็กตรอนหลังจากเกิดการไอออไนเซชันอิเล็กตรอนแตกตัวออกจากโมเลกุลของน้ำมันหม้อแปลง และกลายเป็น

ไอออนลบจำนวนมาก ซึ่งจะยังมีบางส่วนที่อยู่บริเวณปลายอิเล็กโทรดเข็ม เนื่องจากไอออนลบเหล่านี้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำ ด้วยปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ ส่งผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าใกล้กับปลายอิเล็กโทรดเข็มสูง และยังส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่อยู่ใกล้อิเล็กโทรดทรงกลม ดังนั้นการเบรคดาวน์ที่เกิดขึ้นในแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ชั่วพลบ ในกรณีของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโนจึงเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ [42] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข)



รูปที่ 4.5 การเรียงตัวของไอออนภายใต้แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ (E_0 : applied electric field, E_q : space charge electric field) [42] (ก) น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ (ข) น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน



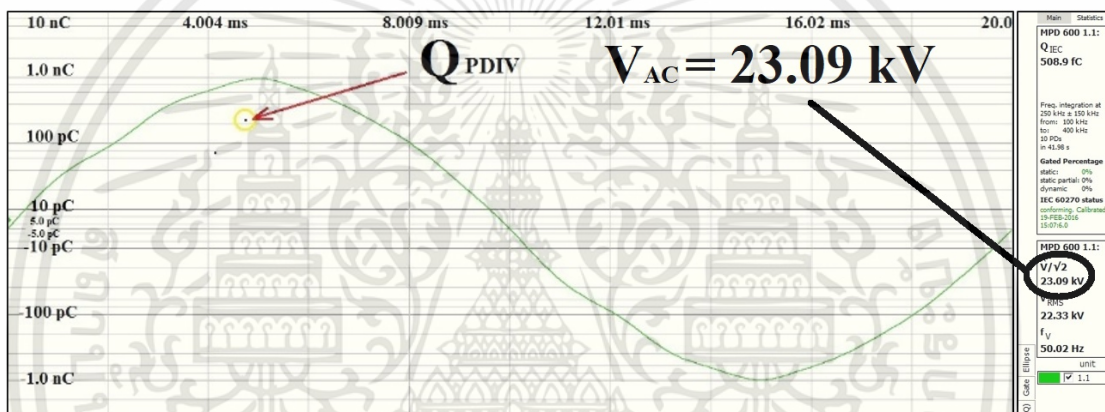
รูปที่ 4.6 การเรียงตัวของไอออนภายใต้แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ (E_0 : applied electric field, E_q : space charge electric field) [42] (ก) น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ (ข) น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

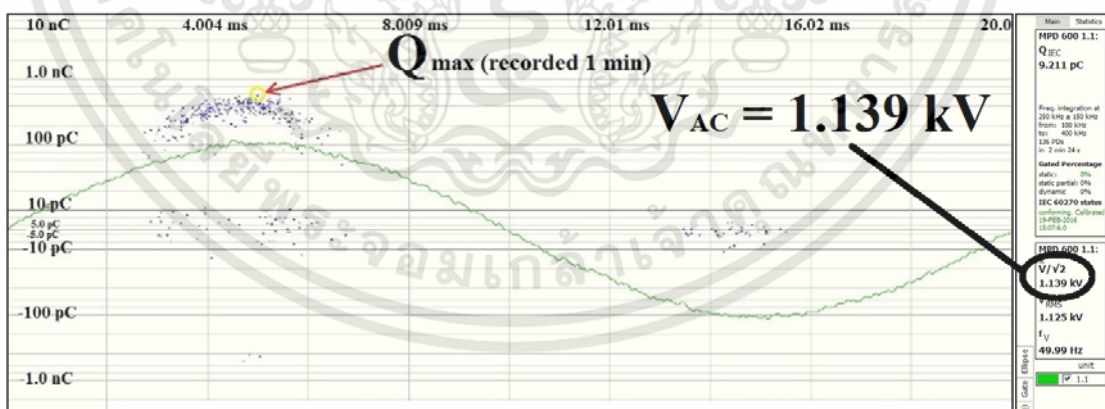
4.2.3 ผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ

การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือ PD ที่ค่า PDIV ในการทดสอบจะประกอบด้วยค่าปริมาณการประจุ (Q_{PDIV}) และค่าปริมาณการประจุสูงสุด (Q_{max}) จะถูกบันทึกเป็นเวลา 1 นาที รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบ PD ที่ค่า PDIV ของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน TiO_2 ที่มีความเข้มข้น 0.03% จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงค่า Q_{PDIV} และค่า Q_{max} นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.7 ขั้วของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีอิทธิพลต่อ PDIV ซึ่งการเกิด PD ในฉนวนน้ำมันจะตรงกันข้ามกับในกรณีของฉนวนอากาศ โดย PD ฉนวนอากาศ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ง่ายที่แรงดันไฟฟ้าลบ หรือค่า PDIV ของแรงดันไฟฟ้าขั้วลบจะน้อยกว่าค่า PDIV ที่เกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าบวก [5, 6]

ในงานวิจัยนี้ ค่า PDIV, Q_{PDIV} และ Q_{max} สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน เป็นการทดสอบโดยการใช้อิเล็กโทรดเข็มและระนาบ (needle-plane) ผลการทดสอบทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.6



(ก)



(ข)

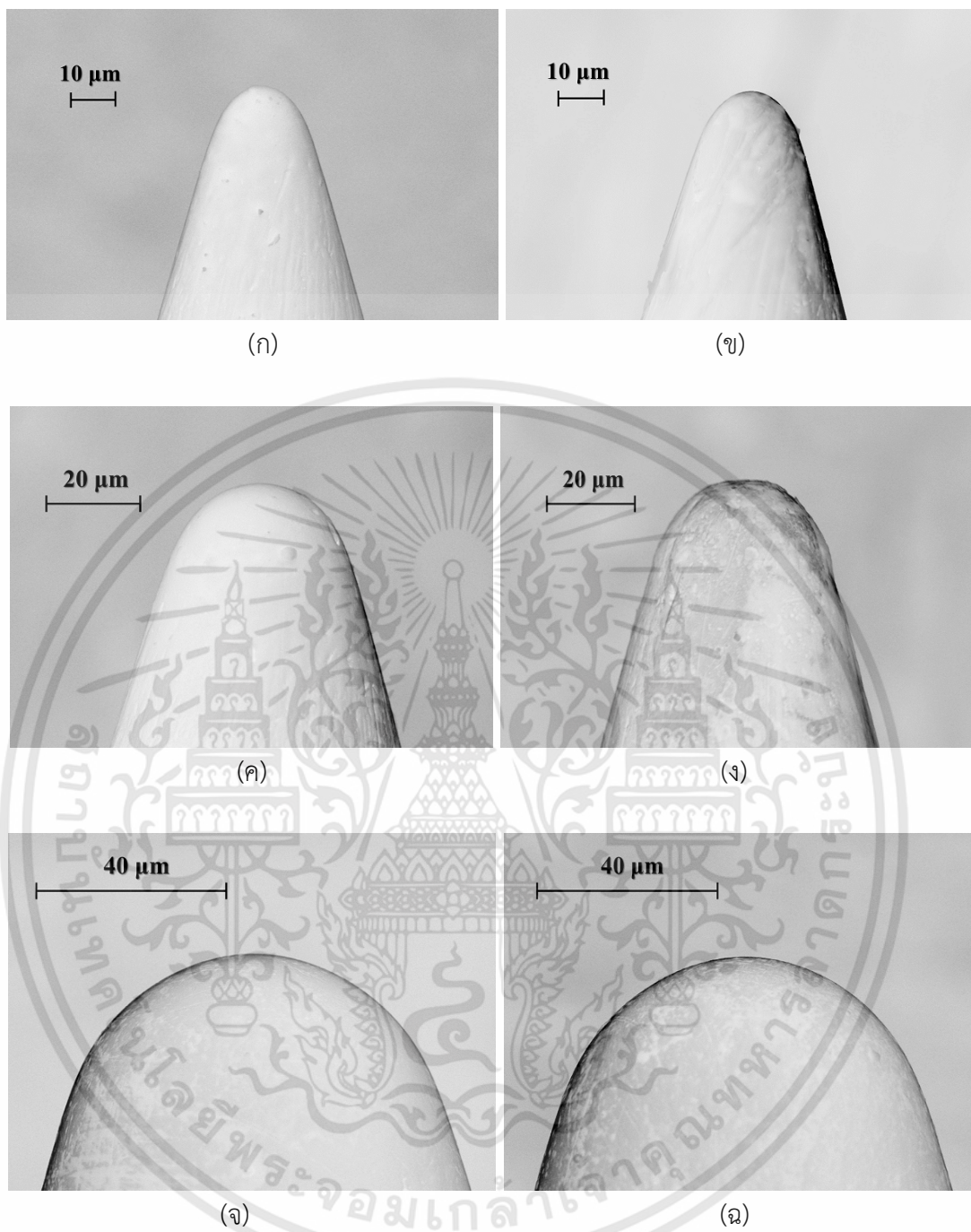
รูปที่ 4.7 การทดสอบ PD ที่ค่า PDIV ของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน TiO_2 ที่มีความเข้มข้น 0.03% (ก) Q_{PDIV} , (ข) Q_{max} (บันทึกค่า 1 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่า PDIV, Q_{PDIV} และ Q_{max} (บันทึกค่า 1 นาที) ของน้ำมันหม้อแปลงเดิม ก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง

| Liquid dielectric | Tip radius (μm) | PDIV (kV) | Q_{PDIV} (pC) | Q_{max} , recorded 1 min (pC) |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------------|------------------------------------|
| Mineral oil (MO) | 10 | 19.7 | 200 | 706 |
| | 20 | 22.1 | 237 | 1,087 |
| | 40 | 28.2 | 474 | 1,841 |
| MO with TiO_2 (0.01%) | 10 | 19.5 | 163 | 635 |
| | 20 | 20.8 | 236 | 631 |
| | 40 | 28.4 | 671 | 1,490 |
| MO with ZnO (0.01%) | 10 | 18.5 | 164 | 547 |
| | 20 | 22.2 | 247 | 896 |
| | 40 | 34.8 | 283 | 1,200 |
| MO with BaTiO_3 (0.01%) | 10 | 21.1 | 338 | 956 |
| | 20 | 25.1 | 416 | 913 |
| | 40 | 29.2 | 667 | 1,888 |
| MO with TiO_2 (0.03%) | 10 | 20.8 | 206 | 628 |
| | 20 | 23.1 | 359 | 809 |
| | 40 | 29.8 | 626 | 1,588 |
| MO with ZnO (0.03%) | 10 | 22.2 | 173 | 325 |
| | 20 | 26.4 | 464 | 848 |
| | 40 | 33.7 | 645 | 1400 |
| MO with BaTiO_3 (0.03%) | 10 | 21.3 | 175 | 569 |
| | 20 | 26.1 | 565 | 1,003 |
| | 40 | 30.4 | 637 | 1,701 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของปลายเข็มทั้งสแตนที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ปลายเข็มขนาด $10\ \mu\text{m}$ ก่อนการทดสอบ (ข) ปลายเข็มขนาด $10\ \mu\text{m}$ หลังการทดสอบ (ค) ปลายเข็มขนาด $20\ \mu\text{m}$ ก่อนการทดสอบ (ง) ปลายเข็มขนาด $20\ \mu\text{m}$ ก่อนหลังการทดสอบ (จ) ปลายเข็มขนาด $40\ \mu\text{m}$ ก่อนการทดสอบ (ฉ) ปลายเข็มขนาด $40\ \mu\text{m}$ หลังการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบ PD เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่มีผลต่อผลการทดสอบ PDIV เป็นดังนี้

(1) เช็มที่ใช้ในการทดสอบเลือกใช้เช็มทั้งสแตนท์มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 3,653 เคลวิน หรือประมาณ 3379.850 °C และมีความแข็งสูงประมาณ $12-40 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ [6, 33, 35]

(2) เช็มที่ใช้ในการทดสอบผลิตขึ้นจากบริษัทในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีการแนะนำใน IEC 61294 สำหรับการทดสอบ PDIV ของฉนวนเหลว [32]

(3) ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบปลายเช็มก่อนและหลังการทดสอบ โดยใช้เทคนิค SEM และพบว่า ปลายเช็มยังคงเหมือนเดิม ดังที่แสดงใน 4.8 รูปภาพเหล่านี้ยืนยันให้เห็นถึงการไม่เปลี่ยนแปลงสภาพของเช็มทดสอบ ซึ่งปลายเช็มไม่เกิดการสึกหรอหรือการกัดเซาะอื่น ๆ

(4) การยืนยันความถูกต้องของการใช้เช็มทั้งสแตนท์เพื่อทำการทดลอง PDIV ซึ่งมีการวิจัยและกล่าวโดย N. Pattanadach [6] โดยมีการทดลอง PDIV ได้ทำ 100 ครั้ง และพบว่าค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ PDIV ที่ 10, 20, 30, 50, 70 และ 100 ครั้ง ได้ผลใกล้เคียงกัน

4.2.4 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) เป็นค่าที่มีความไวต่อความสามารถในการเป็นฉนวนและอายุของน้ำมันหม้อแปลง อีกทั้งยังเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการตรวจสอบการทำงานที่ปลอดภัยของหม้อแปลง ผลการทดสอบทั้งหมดจะแสดงใน ตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 ซึ่งในตารางจะแสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีสารลดแรงตึงผิว หรือ Span 80 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 °C ถึง 90 °C ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 35 °C ถึง 90 °C ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวนเหลวทุกตัวอย่างทดสอบ โดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน จะส่งผลให้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการนำไฟฟ้าของอนุภาคนาโนที่เกิดจากพาหะของประจุไฟฟ้า (charge carriers) นั่นคือ อิเล็กตรอน และ ไอออน (อะตอมที่มีประจุบวกหรือลบ) เคลื่อนที่อิสระที่นำพาประจุไฟฟ้า และสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่มากกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ นอกจากนี้ กระบวนการโพลาไรเซชันประจุ (charge polarization) ในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่มีมากกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ [1] ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดคือปัจจัยที่ทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน มีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติทุกอุณหภูมิทดสอบ

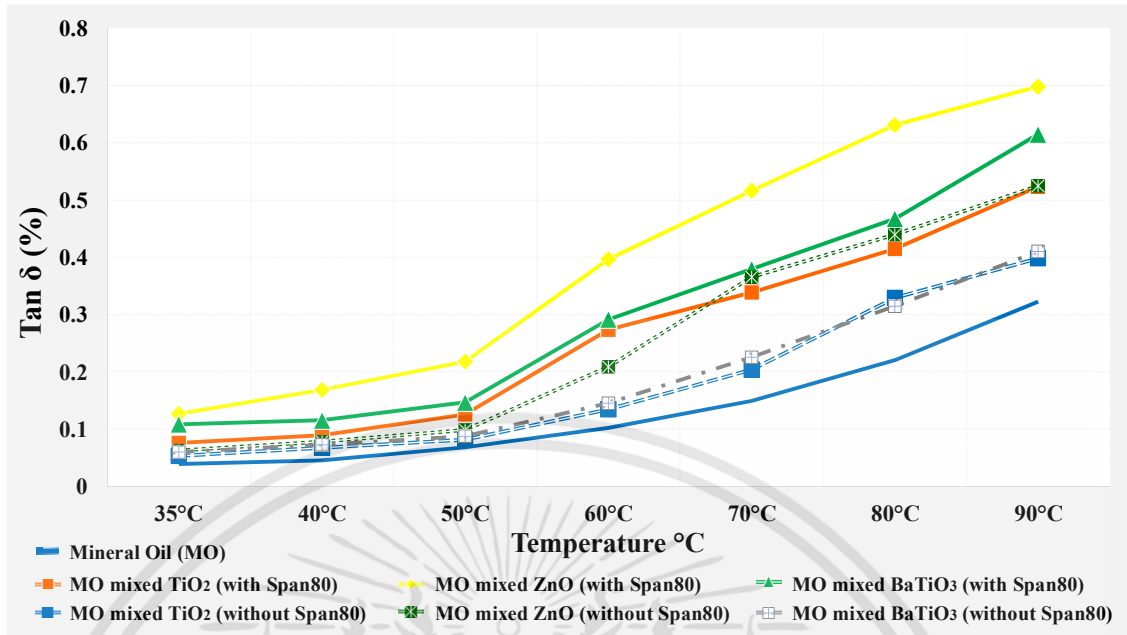
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนความเข้มข้น 0.01% ทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

| The percentage of the dielectric dissipation factor (% tan δ) | | | | | | | |
|---|-------------|--|--------|--------------------|------------------|--------|--------------------|
| °C | Mineral oil | Group 1: Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| | | With Span80 | | | Without Span80 | | |
| | | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 35 | 0.0388 | 0.0759 | 0.1267 | 0.1082 | 0.0532 | 0.0624 | 0.0598 |
| 40 | 0.0453 | 0.0893 | 0.1784 | 0.1154 | 0.0673 | 0.0779 | 0.0724 |
| 50 | 0.0681 | 0.1256 | 0.2679 | 0.1467 | 0.0815 | 0.0983 | 0.0875 |
| 60 | 0.1021 | 0.2735 | 0.3967 | 0.2915 | 0.1345 | 0.2087 | 0.1453 |
| 70 | 0.1490 | 0.3386 | 0.5163 | 0.3794 | 0.2037 | 0.3655 | 0.2256 |
| 80 | 0.2203 | 0.4147 | 0.6312 | 0.4673 | 0.3292 | 0.4396 | 0.3146 |
| 90 | 0.3225 | 0.5233 | 0.6981 | 0.6148 | 0.3983 | 0.5248 | 0.4103 |

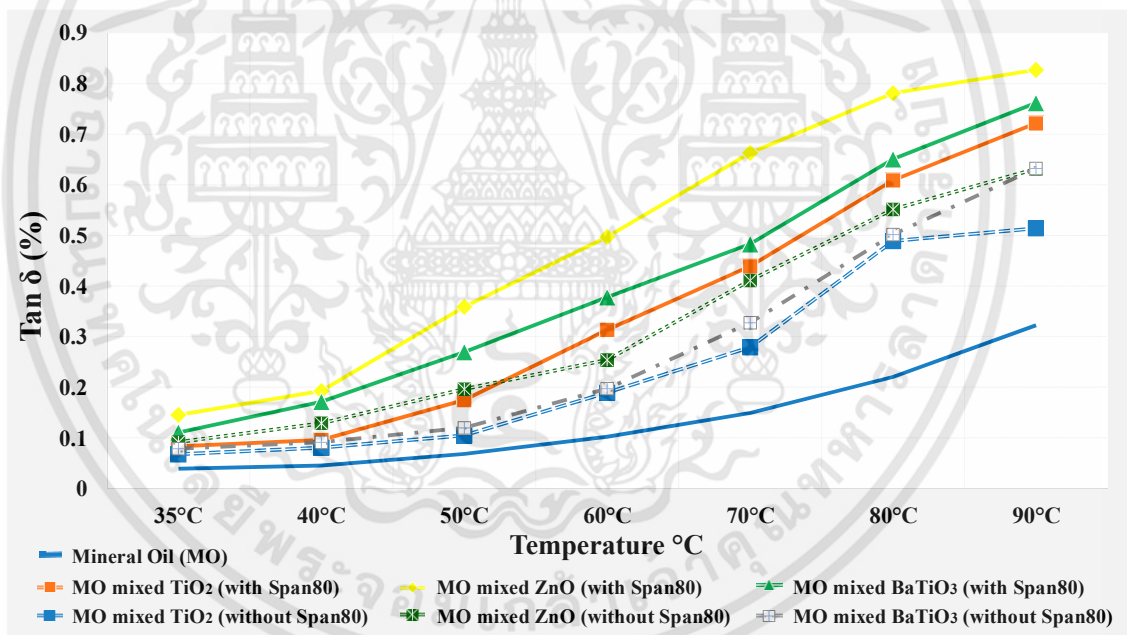
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนความเข้มข้น 0.03% ทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

| The percentage of the dielectric dissipation factor (% tan δ) | | | | | | | |
|---|-------------|--|--------|--------------------|------------------|--------|--------------------|
| °C | Mineral oil | Group 2: Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| | | With Span80 | | | Without Span80 | | |
| | | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ |
| 35 | 0.0388 | 0.0832 | 0.1453 | 0.1106 | 0.0675 | 0.0915 | 0.0784 |
| 40 | 0.0453 | 0.0957 | 0.1926 | 0.1714 | 0.0806 | 0.1287 | 0.0913 |
| 50 | 0.0681 | 0.1746 | 0.3589 | 0.2695 | 0.1047 | 0.1963 | 0.1198 |
| 60 | 0.1021 | 0.3135 | 0.4973 | 0.3782 | 0.1893 | 0.2541 | 0.1972 |
| 70 | 0.1490 | 0.4391 | 0.6632 | 0.4831 | 0.2790 | 0.4112 | 0.3275 |
| 80 | 0.2203 | 0.6093 | 0.7814 | 0.6511 | 0.4891 | 0.5517 | 0.5021 |
| 90 | 0.3225 | 0.7218 | 0.8275 | 0.7622 | 0.5143 | 0.6318 | 0.6327 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) น้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ทั้งที่มีและไม่มี Span 80 (ก) ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก กรณีของเหลวนาโนกลุ่มที่ 1 ความเข้มข้น 0.01 % (ข) ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก กรณีของเหลวนาโนกลุ่มที่ 2 ความเข้มข้น 0.03 %

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 การทดสอบวัดค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง

ผลการทดสอบหาค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติและน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ที่แสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโน TiO_2 และ BaTiO_3 ทั้งสองความเข้มข้นคือ 0.01% และ 0.03% ไม่ส่งผลให้ค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน ZnO ที่ความเข้มข้น 0.01% และ 0.03% ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้ ในกรณีที่น้ำมันหม้อแปลงผสมกับอนุภาคนาโนพร้อมทั้งเติมสารลดแรงตึงผิวหรือ Span80 ส่งผลให้ค่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติม Span80 ใดๆก็ตาม จากผลของการทดสอบวัดค่าความชื้นในตัวอย่างทดสอบทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีค่าความชื้นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่ส่งผลต่อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

5.1.2 ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์

จากผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของตัวอย่างฉนวนทั้งหมด ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโนทั้งหมดมีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเป็นผลมาจากคุณสมบัติของอนุภาคนาโนที่เพิ่มให้กับน้ำมันหม้อแปลงช่วยให้สามารถทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสตรีมเมอร์ช้าลง และส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในน้ำมันหม้อแปลง จะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคนาโนลดลงและทำให้เกิดแรงยึดติดระหว่างอนุภาคนาโนขึ้น นอกจากนี้ สารลดแรงตึงผิวหรือ Span80 ที่ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโน ซึ่ง Span 80 ได้รับการพิสูจน์ให้เห็นถึงการป้องกันการรวมตัวกันเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาโนเมื่อผสมอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคนาโนแสดงคุณสมบัติได้ดีขึ้น

5.1.3 ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ

การทดสอบเกี่ยวกับผลของอนุภาคนาโนเมื่อผสมเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงด้วยการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนส่งผลอย่างมากต่อค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงเมื่อผสมด้วยอนุภาคนาโน ทั้งนี้ ในสามชนิดของอนุภาคนาโน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโน ZnO ที่ถูกเพิ่มลงในน้ำมันหม้อแปลงสามารถให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ในชั่วบวก ส่วนอีกสองอนุภาคนาโนคือ TiO_2

และ BaTiO_3 เมื่อถูกเพิ่มเข้าไปผสมกับน้ำมันหม้อแปลงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราว นอกจากนี้สำหรับผลการทดสอบของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วคราว แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนทั้งสามชนิดที่ถูกเพิ่มเข้าไปผสมกับน้ำมันหม้อแปลง ไม่ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าความคงทนของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ได้ในชั่วเวลา

5.1.4 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้แรงดันกระแสสลับ

ผลจากการทดสอบค่าเฉลี่ย PDIV ของตัวอย่างทดสอบของเหลวนาโนทั้งหมด ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าเฉลี่ย PDIV ของน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโนมีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ ยกเว้นในสองกรณี คือกรณีน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน TiO_2 ที่ความเข้มข้น 0.01% ที่ทดสอบด้วยอิเล็กโทรดที่มีรัศมีปลายเข็มขนาด $10 \mu\text{m}$ และ $20 \mu\text{m}$ และกรณีน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมกับอนุภาคนาโน ZnO ที่ทดสอบด้วยอิเล็กโทรดที่มีรัศมีปลายเข็มขนาด $10 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบอนุภาคนาโนทั้งสามชนิดที่เพิ่มเข้าไปผสมกับน้ำมันหม้อแปลง แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ส่งผลทำให้ค่า PDIV เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า PDIV ของน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติ

5.1.5 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

ผลจากการทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก หรือ $\tan \delta$ สำหรับน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ และน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 35°C ถึง 90°C ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 35°C ถึง 90°C ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวนเหลวทุกตัวอย่างทดสอบ โดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโน จะส่งผลให้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการนำไฟฟ้าของอนุภาคนาโนที่เกิดจากพาหะของประจุไฟฟ้า (charge carriers) นั่นคือ อิเล็กตรอน และไอออน (อะตอมที่มีประจุบวกหรือลบ) เคลื่อนที่อิสระที่นำพาประจุไฟฟ้า และสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่มากกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ นอกจากนี้ กระบวนการโพลาไรเซชันประจุ (charge polarization) ในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมเข้ากับอนุภาคนาโนที่มีมากกว่าน้ำมันหม้อแปลงเดิมก่อนปรับปรุงคุณสมบัติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการพัฒนาศึกษาวิจัยเพิ่มเติมสำหรับ วัสดุนาโนชนิด และประเภทอื่นๆ เช่น อนุภาคนาโนในกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก เพื่อจะได้เป็นตัวเลือกในการนำมาใช้งานจริงได้กับหม้อแปลงในอนาคต นอกจากนี้ก่อนจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในหม้อแปลงควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ในส่วนของฉนวนแข็งภายในหม้อแปลง เช่น ผลของอนุภาคนาโนที่มีต่อกระดาษฉนวนในหม้อแปลง

ในกรณีที่ต้องการนำน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโนไปใช้งานจริง ควรทำการเติมน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมกับอนุภาคนาโนหลังจากเสร็จกระบวนการผสมอนุภาคนาโนทันทีหรือเร็วที่สุด ไม่ควรปล่อยทิ้งไว้นาน เพื่อป้องกันปัญหาการตกตะกอนก่อนใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rongsheng Liu, Leif A.A. Pettersson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam.: **'Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers'**. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 423-427, October 2011.
- [2] Diao-Eldin A. Mansour, Eman G. Atiya, Reham M. Khattab, Ahmed M. Azmy.: **'Effect of titania nanoparticles on the dielectric properties of transformer oil-based nanofluids'**. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 295-298, 2012.
- [3] T.S.Ramu, B.K.Keshavan², K. N. Balasubramanya Murthi **"Application of a Class of Nano fluids to improve the Load ability of Power Transformers"**. IEEE Conf. the Properties and Applications of Dielectric Materials, July 24-28, 2012.
- [4] J. Ghasemi, S.Jafarmadar b, M.Nazari **"Effect of magnetic nanoparticles on the lightning impulse breakdown voltage of transformer oil"**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 148–152, 389 (2015).
- [5] Andreas Küchler, **High Voltage Engineering: Fundamentals · Technology · Applications**, Springer Vieweg, March 2017.
- [6] Norasage Pattanadech.: **'Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil'**. PhD thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [7] **'Wide range of ELECTROL® Transformer oils'**, <http://www.rajgrp.com/wr%20electrol.html/>, accessed 5 December 2016.
- [8] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. ชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการ เรื่อง "ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน (Nano Safety)", 2553.
- [9] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, "นาโนเทคโนโลยีกับเทคโนโลยีอนุภาคใครยิ่งใหญ่กว่า", สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [10] **'NANOYOU'**, <http://www.nanoyou.eu>, accessed 2016.
- [11] Nanosafety Information center of Thailand (NICT). "วัสดุนาโน". [Online]. Available: <http://nict.sc.chula.ac.th>
- [12] **'Inframat Advanced Materials LLC'**, <http://www.advancedmaterials.us>, accessed 22 May 2016.
- [13] Mohamed E. Ibrahim., Amr M. Abd-Elhady., Mohamed A. Izzularab.: **'Effect of nanoparticles on transformer oil breakdown strength: experiment and theory'**, IET Sci. Meas. Technol., pp. 839–845, 10 (2016).

- [14] Huifei Jin.: ‘**Dielectric strength and thermal conductivity of mineral oil based nanofluids**’. PhD thesis, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [15] W.C. Griffin, “**Calculation of HLB Values of Non-Ionic Surfactants**”, Journal of the Society of Cosmetic Chemists, Vol. 5, pp. 249-256, 1954.
- [16] W.C. Griffin, “**Classification of Surface-Active Agents by ‘HLB’**”, Journal of the Society of Cosmetic Chemists, Vol. 1, pp. 311-326, 1949.
- [17] ‘**emulsion / อิมัลชัน**’, <http://www.foodnetworksolution.com>, accessed 2018.
- [18] ‘**พจนานุกรมศัพท์วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี**’, <http://dekgenius.com/dictionary/science/phase-1553.htm>, accessed 2018.
- [19] S.M. Sohel Murshed, S. Tan and N. Nguyen, “**Temperature Dependence of Interfacial Properties and Viscosity of Nanofluids for Droplet-based Microfluidics**”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 41, pp. 1-5, 2008.
- [20] Z. Han, “**Nanofluids with Enhanced Thermal Transport Properties**”, PhD thesis, University of Maryland at College Park, 2008.
- [21] A. Amraei, Z. Fakhroueian and A. Bahramian, “**Influence of New SiO₂ Nanofluids on the Surface Wettability and Interfacial Tension Behaviour between Oil-water Interface in EOR Processes**”, Journal of Nano Research, Vol. 26, pp. 1-8, 2013.
- [22] Eman G. Atiya, Diaa-Eldin A. Mansour., “**Dispersion Behavior and Breakdown Strength of Transformer Oil Filled with TiO₂ Nanoparticles**”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 5; October 2015.
- [23] X. Wang, “**Partial Discharge Behaviours and Breakdown Mechanisms of Ester Transformer Liquid under AC Stress**”, PhD thesis, The University of Manchester, 2011.
- [24] สำรวย สังข์สะอาด, “**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [25] N. Felici, “**High-Field Conduction in Dielectric Liquids,**” IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-20, pp. 233-238, 1985.
- [26] M.G. Danikas, “**Study of Some Factors Affecting the Breakdown Strength of Transformer oil**”, in 1988 International Conference on Dielectric Materials, Measurement and Applications, pp. 9-12, 1988.
- [27] รศ. ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และคณะ, รายงานฉบับสมบูรณ์ “**การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอสเตอรฺ์เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง**”, รหัสโครงการ SCH-NR2015-223, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2559.

- [28] Z. Han.: ‘Nanofluids with enhanced thermal transport properties’. PhD thesis, University of Maryland at College Park, (2008).
- [29] ASTM D1533 – 12: ‘Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration’, December 2012.
- [30] IEC 60156: ‘Insulating liquids determination of the breakdown voltage at power frequency test method’, Second edition 1995-07, Reference number CEI/IEC 156: 1995.
- [31] IEC 60897, "Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids", First edition 1987-03.
- [32] IEC 61294: ‘Insulating liquids – determination of the partial discharge inception voltage (PDIV) – test procedure’, 1993.
- [33] N. Pattanadech and M. Muhr.: ‘Partial Discharge Inception Voltage Investigation of Mineral Oil: Effect of Electrode Configurations and Oil Conditions’. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 5; pp. 2917-2924, October 2016.
- [34] CIGRÉ Working Group A 2.35, CIGRÉ brochure 436, “Experiences in service with new insulating liquids’, October, 2010.
- [35] Ruben D. Garzon, “High Voltage Circuit Breakers: design and applications”, second edition, Marcel Dekker Inc, chapter 5, 2002.
- [36] IEC Publication 60270: ‘High voltage test techniques – Partial Discharge Measurement’, 2000.
- [37] B. Fallou et al, “Development of criteria for the selection of liquid dielectrics”, International Conference on Large High Voltage Electric System, CIGRÉ Paris, Vol.1, 15-10, pp. 1-10, 31st session 1986.
- [38] M. H. A. Hamid, M. T. Ishak, M. F. Md. Din., et al.: ‘Dielectric Properties of Natural Ester Oils Used for Transformer Application under Temperature Variation’. IEEE Inter. Conf. on power and energy, pp. 54–57, 2016.
- [39] IEC 60247: ‘Insulating liquids – Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity’, Third edition 2004-02.
- [40] Amr M. Abd-Elhady, Mohamed E. Ibrahim, T.A. Taha, Mohamed A. Izzularab.: “Effect of temperature on AC breakdown voltage of nanofilled transformer oil”. IET Sci. Meas. Technol., pp.138-144., 12 (2017).
- [41] ‘แรงในธรรมชาติ 2’, <http://www.scimath.org>, accessed 11 August 2017.
- [42] Yuzhen Lv, Muhammad Rafiq, Chengrong Li and Bingliang Shan., “Study of Dielectric Breakdown Performance of Transformer Oil Based Magnetic Nanofluids”, Journal of Energies, 10, 1025; doi:10.3390/en10071025, 2017.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International journal

1. **P. Muangpratoom** and N. Pattanadech “*Breakdown and Partial Discharge Characteristics of Mineral oil-based Nanofluids*”, Journal of IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12, pp. 609–616, (IF: 1.336, Q:2)

International conference papers

2. **P. Muangpratoom**, A. Kunakorn, N. Pattanadech, W. Vittayakorn and K. Thungsook “*Dielectric Properties of Mineral Oil-based Nanofluids using Zinc Oxide Nanocomposites for Power Transformer Application*”, CMD 2018, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, September 23-26, 2018, Perth, Australia, Paper # P195.
3. **P. Muangpratoom**, A. Kunakorn and N. Pattanadech “*Effect of Different Temperatures on AC Breakdown Voltage of Mineral Oil based Nanofluids*”, ECTI 2018, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, July 18-21, 2018, Chiang Rai, Thailand, pp 483-486.
4. **P. Muangpratoom**, N. Pattanadech, A. Kunakorn and W. Vittayakorn “*Impulse Breakdown Characteristic of Mineral Oil Base Nanofluid*”, ICDL 2017, the 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, June 25-29, 2017, Manchester, United Kingdom, pp 89-92.
5. **P. Muangpratoom**, N. Pattanadech, A. Kunakorn and W. Vittayakorn “*Effect of ZnO Nanoparticle on Impulse Breakdown in Mineral Oil*”, ISLH 2017, 3rd International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, March 9-10, 2017, Bangkok, Thailand, pp 57-60.
6. **P. Muangpratoom** and N. Pattanadech “*Dielectric Breakdown Strength of Mineral Oil Based Nanofluids*”, CMD 2016, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, September 25-28, 2016, Xi’an, China, pp 261-264.
7. **P. Muangpratoom**, T. Aapaisutaeporn and N. Pattanadech “*Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Based Nanofluids*”, ISLH 2016, 2nd International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, March 9-10, 2016, Bangkok, Thailand, pp 99-102.

National conference paper (in Thai)

8. **P. Muangpratoom**, P. Nimsanong and N. Pattanadech “*Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on Breakdown Characteristics of Mineral Oil Based Nanofluids*” Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016, EENET2016, Phuket, Thailand, 25-27 May 2016, pp. 13-16.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Breakdown and Partial discharge characteristics of Mineral oil-based nanofluids

ISSN 1751-8822
 Received on 1st March 2017
 Revised 22nd January 2018
 Accepted on 1st March 2018
 E-First on 28th March 2018
 doi: 10.1049/iet-smt.2017.0080
 www.ietdl.org

Pichai Muangpratoom¹ ✉, Norasage Pattanadech¹

¹High Voltage Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

✉ E-mail: tagie_p@hotmail.com

Abstract: In this study, the AC breakdown (BD) voltages and partial discharge (PD) activities of mineral-oil (MO)-based nanofluids were investigated under controlled conditions. The aim of this research is to improve the dielectric properties of MO by amalgamation with various types of nanoparticles, i.e. semiconducting and dielectric nanoparticles. Two types of nanoparticles, i.e. titanium dioxide and barium titanate with mean diameters of <100 nm were used in the nanofluid samples prepared for the experiments. The AC BD voltages of the nanofluids were investigated according to IEC 60156. In addition, PD characteristics of the MO-based nanofluids were examined including PD inception voltage (PDIV) characteristics and PD activity with a needle-plane electrode configuration. The test circuit was set up in accordance with IEC 60270 and the experiment was performed in conformity with IEC 61294 at room temperature. The test results showed that the AC BD voltages of the modified liquids were clearly influenced by the type of nanoparticles added, with the AC BD voltages of the MO with nanoparticles being slightly higher than those of the unmodified MO used for comparison. Furthermore, the nanoparticles also demonstrated a propensity to increase the PDIV of the nanofluids compared with the PDIV of the MO.

1 Introduction

Transformers are one of the most important parts of modern power generation and distribution networks. Generally, there are two kinds of insulating materials used in these transformers, i.e. cellulose and mineral oil (MO). Cellulose is used both for electrically insulating and mechanical purpose, whereas MO is used mainly for its electrical insulating and cooling properties [1–3]. Historically, MO has been used since the first commercial oil-filled transformer was introduced, while dielectric fluids such as synthetic ester and natural ester are seen as a modern alternative. However, MO still plays an important role in the insulation of high-voltage (HV) apparatus, especially power transformers and instrument transformers [4, 5]. Focusing on the advancement of nanotechnologies and their applications, nanoparticles hold promise that they can be used with MOs to enhance their properties, which may lead to more compact designs and the reduction of manufacturing costs [2, 6–11].

The conception of utilising nanoparticles for improving thermal properties of liquids such as thermal conductivity was initiated by Choi in 1993 [12, 13]. Since 1995, the number of publications dealing with nanofluids has been growing at an average of around 32% per year [5]. Research on the dielectric properties of oil-based nanofluids started in 1998 with Segal *et al.* They tried to improve the dielectric properties of transformer oil by adding magnetite nanoparticles [14]. Other research works tested the AC breakdown (BD) strength of MO-based silica (SiO₂) nanofluid samples compared with that of base oil under different degrees of moisture content [15]. Concluding that BD voltage was increased in nanofluid samples that the BD voltages of both MO and SiO₂ nanofluids increased with a decrease of moisture content, as well as observing [16] that the MO-based SiO₂ nanofluid performed better than MO under dc divergent field. In addition, how the interfacial zone affects the dielectric properties of the MO-based nanofluids alumina and titanium dioxide (TiO₂) was investigated, as reported in [17]. Various nanoparticles such as TiO₂ and barium titanate (BaTiO₃) additives have been tested with the aim of improving the dielectric properties of liquid insulating materials. TiO₂ and BaTiO₃ are of interest in nano dielectric applications as reported in

conference papers and journals. However, the characteristics of TiO₂ and BaTiO₃ are very different, because TiO₂ is semiconductive nanoparticle while BaTiO₃ is a dielectric nanoparticle. Generally, the research papers did not comparatively investigate the use of different nanoparticles. Therefore, this research work was designed as a comparative study of the characteristics of MO-based nanofluids using different types of nanoparticles, i.e. semiconducting and dielectric nanoparticles.

In this paper, the experiments performed investigated the dielectric properties of the MO-based nanofluids when selected nanoparticles were mixed into a commonly used MO so that their BD voltage and partial discharge (PD) characteristics including PD inception voltage (PDIV) compared with that of the unmodified MO could be measured and analysed. The working hypothesis of this research work was that the BD and PDIV of the MO would be notably increased with the addition of certain nanoparticles. Accordingly, the nanomaterials TiO₂ and BaTiO₃ were selected to mix with unused and unmodified MO to produce the MO-based nanofluid test samples. It is intended that the findings and conclusions of this research work will help to advance the application of nanoparticles in dielectric materials.

2 Experimental procedure

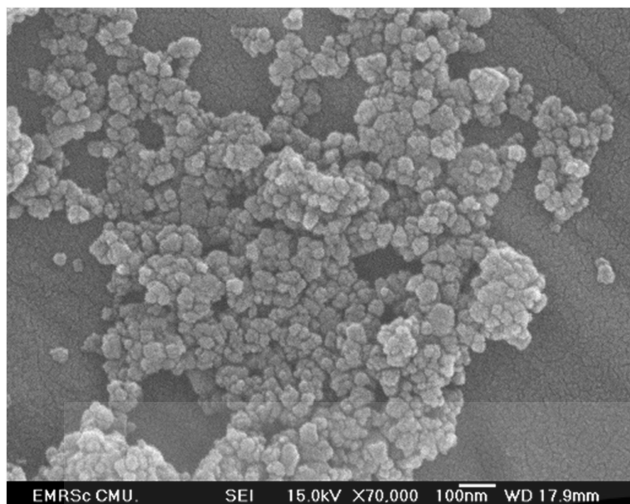
2.1 MO characteristics and preparation for the investigation

The highly refined and unmodified uninhibited MO ELECTROL[®]-A was used in this research because it is widely used in HV transformer applications in Thailand. The specification of this MO is shown in Table 1 [18].

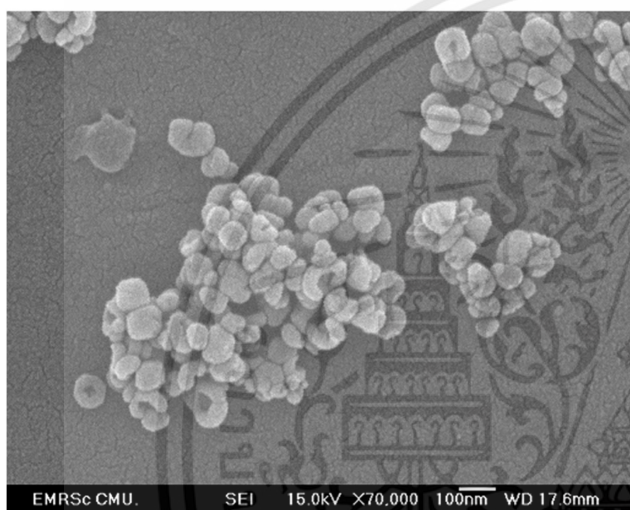
Initially, the MO was heated to 60°C in a vacuum oven at ~200 mbar for 24 h before being mixed with the selected nanoparticles to prepare the MO-based nanofluid samples.

2.2 Nanoparticle characteristics and preparation

Two different nanoparticle materials, TiO₂ and BaTiO₃, were used in this research. TiO₂ with ~40 nm diameter is a semiconductive nanoparticle, while BaTiO₃ with about 50 nm diameter is a



a



b

Fig. 1 SEM photographs of nanoparticles
(a) TiO₂ nanoparticles, (b) BaTiO₃ nanoparticles

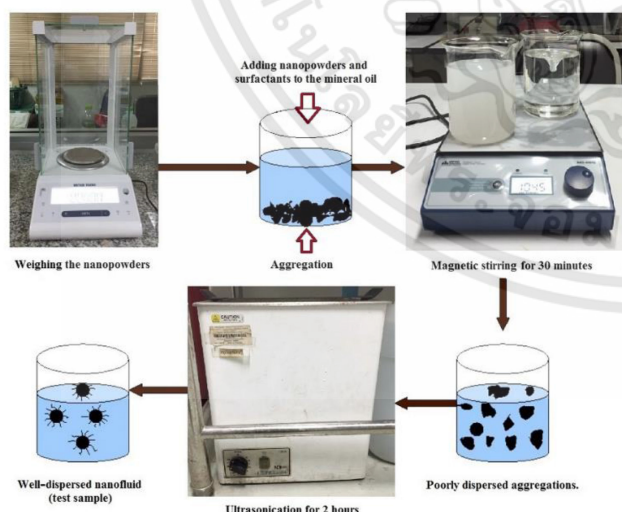


Fig. 2 Schematic diagram of the nanofluid preparation process

dielectric nanoparticle. The specific characteristics of the nanomaterials used in this paper are illustrated in Table 2 [19].

The diameter of the dry nanopowder was ascertained by scanning electron microscope (SEM) techniques as shown in Fig. 1, which shows particle diameter sizes of <100 nm. A

Table 1 Specifications of transformer oil used

| Characteristics | Specification | Test method |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------|
| kinematic viscosity (at 40°C) | <16.5 mm ² /s | ISO:3104 |
| flash point | >140°C | ISO:2719 |
| pour point | <-30°C | ISO:3016 |
| density (at 20°C) | <0.895 kg/dm ³ C | ISO:3675 |
| interfacial tension (at 25°C) | >0.04 N/m | ISO:6295 |
| neutralisation value | <0.03 mg KOH/g | IEC:296 |
| tan δ (at 90°C) | <0.005 | IEC:247 |

Table 2 General specifications for TiO₂ and BaTiO₃ types of the nanomaterials

| Parameters | TiO ₂ | BaTiO ₃ |
|--|------------------|--------------------|
| average grain diameter, nm | 40 | 50 |
| purity, % | 99.90 | 99.95 |
| specific surface area, m ² /g | 40 | 20 |
| density, g/cm ³ | 3.89 | 5.85 |

complete description of the apparatus and the operation procedure of SEM equipment used can be found in [20].

2.3 MO-based nanofluid preparation

The MO-based nanofluids were prepared by mixing the unmodified uninhibited MO separately with TiO₂ and BaTiO₃ nanoparticles. Four different types of nanofluid samples were prepared as follows:

- *Nanofluid sample #1*: A 0.01% volume fraction of TiO₂ mixed with the MO.
- *Nanofluid sample #2*: A 0.01% volume fraction of BaTiO₃ mixed with the MO.
- *Nanofluid sample #3*: A 0.03% volume fraction of TiO₂ mixed with the MO.
- *Nanofluid sample #4*: A 0.03% volume fraction of BaTiO₃ mixed with the MO.

Preparation of the four nanofluid samples consisting of the unmodified MO combined with the four different nanofluid samples was carried out according to the following three processes:

- First, the MO was mixed with the specified nanoparticle with a specified volume fraction. At this stage of the process, a surfactant was also mixed with the MO.
- Second, the nanofluid was dispersed using a magnetic stirrer for 30 min.
- Finally, the ultrasonic dispersion was applied to the prepared nanofluids for 2 h to ensure the homogeneity of the liquids.

In addition, the surfactant sorbitan monooleate (Span 80) was added in order to modify the surface of the nanoparticles. Span 80 has been proven to prevent agglomeration of nanoparticles in MO and it is widely used for this purpose [21–26].

Magnetic stirring was used to disperse the nanopowders evenly in the base fluid; however, as the turbulence created was not enough to break-up all agglomeration of nanoparticles, an ultrasonic mixing device was additionally employed [5–7]. The nanofluid dispersion process is shown in Fig. 2.

As mentioned above, before the experiment was performed, the unmodified MO and the MO-based nanofluid samples were heated at 60°C in a vacuum oven at 200 mbar for 24 h. The purpose of this procedure was to control the moisture content dissolved in the liquid samples. Then, the moisture contents of all samples were measured by a Karl Fischer titrators moisture metre, the moisture content of the unmodified MO and of the MO-based nanofluid samples before testing are shown in Table 3. It can be seen that the nanoparticles under investigation had a small but notable effect on

Table 3 Moisture content of the unmodified MO and of the MO-based nanofluids

| Liquid dielectric | Moisture content levels, ppm |
|------------------------------------|------------------------------|
| MO | 18.6 |
| MO with TiO ₂ (0.01%) | 17.6 |
| MO with BaTiO ₃ (0.01%) | 18.5 |
| MO with TiO ₂ (0.03%) | 17.3 |
| MO with BaTiO ₃ (0.03%) | 18.2 |



a



b

Fig. 3 Dielectric BD testing device and the test vessel
(a) BD measurement testing device, (b) Test vessel

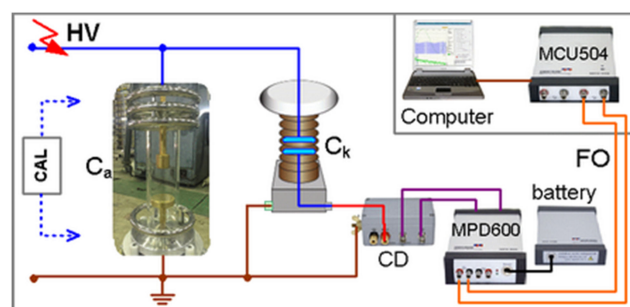
the moisture content of the MO. Therefore, the higher BD strength of the nanofluids compared with that of the unmodified MO should be influenced by the characteristics of nanoparticles to act as electron traps during the process of electron transfer.

2.4 Investigation of AC BD characteristics

The AC BD strength of the unmodified MO and of the MO-based nanofluids was investigated according to IEC 60156 [27] using a FOSTER OTS 60AF oil-BD tester and all with the gap between electrodes fixed at 2.5 mm. All experiments were performed at the room temperature. Tests were carried out six times on each liquid test sample and two samples of each nanofluid type including the unmodified MO were investigated from which results the mean value of the BD test results was calculated. The test equipment is shown in Fig. 3.

2.5 PD experiment setup

In the experiment, the needle-plane electrode configuration was set with a gap spacing of 40 mm used for PD and PDIV investigation of the dielectric liquids. A tungsten needle with a tip radius of 10 μm was utilised as the HV electrode and a 75 mm diameter brass plane was used as the grounded electrode. In addition, 20 and 40

**Fig. 4** Test circuit diagram for the experiment

μm tip radii needles were also utilised as the HV electrode for the PD tests.

The needles used in the experiment were sourced from the Ogura company in Japan as recommended in IEC 61294 [28] for PDIV of liquid insulation testing. In this research work, the needle tips were determined 10, 20 and 40 μm . Different selected needle tips were expected to provide significantly different maximum electric field stress as in [29]. The needle tip radius for liquid insulating research may vary from 3 to 100 μm mentioned by CIGRÉ [30]. Besides, tungsten needles used in this research provide high-melting temperature of about 3653 K and high hardness capacity of about $12\text{-}40 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ [31]. The test procedure was performed in accordance with IEC 61294. The test voltage was increased at a rate of 1 kV/s from zero until PDIV, the initial lowest voltage observed of PD $>100 \text{ pC}$, was detected. Then, the PDIV was recorded. Each needle was tested ten times and three identical needles of each needle tip radius were investigated [4, 32, 33]. The step voltage applied for PDIV experiment of the liquid insulation provides lower PDIV compared with applying the ramp voltage as in [34, 35] and also researched by Pattanadach [4]. However, the applied ramp voltage was selected to perform the experiment following IEC 61294 [31].

The test circuit diagram and the test circuit arrangement for the PD and PDIV experiments according to IEC 60270 [32] are shown in Figs. 4 and 5, respectively. The PD testing apparatus consisted of the following equipment, where HV stands for the high-voltage supply rated of 75 kV, 40 kVA, Ca is the test object, Ck represents the coupling capacitor rated of 1 nF, CD indicates the coupling device, FC stands for the optical fibre cable, MPD 600 and MCU 504 are the acquisition unit and the fibre optic controller, respectively, and PC is the personal computer with mtronix software. CAL in Fig. 4 refers to the charge calibrator which is used to inject a defined charge into and verify the measurement circuit. IEC 60270 requires verifying the test setup prior to conducting measurements, and to achieve this a defined charge pulse was fed into the circuit using CAL 542, with the PD detection system then calibrated to this value.

In addition, the background noise of the PD test circuit was measured before the PD experiments were performed. PD measurements showed that there was no noise signal at 40 kV, except the background noise of about 0.5 pC. When the PD experiments were performed, the magnitude of the PD signal increased with the increase of applied voltage, while the magnitude of the noise signal observed in the recorded PD patterns was the same as the magnitude of the background noise which was still constant. This can be ensured for discriminating PD in oil from the background noise.

Generally, PDIV depends on many factors such as humidity and temperature of the tested dielectric liquid, electrode configuration, i.e. needle tip and gap distance. In the experiment, the humidity and temperature of the tested dielectric liquids and the electrode configuration were controlled as a constant value within small tolerances. Therefore, the test results obtained from the experiment only depended on the nanoparticles added.

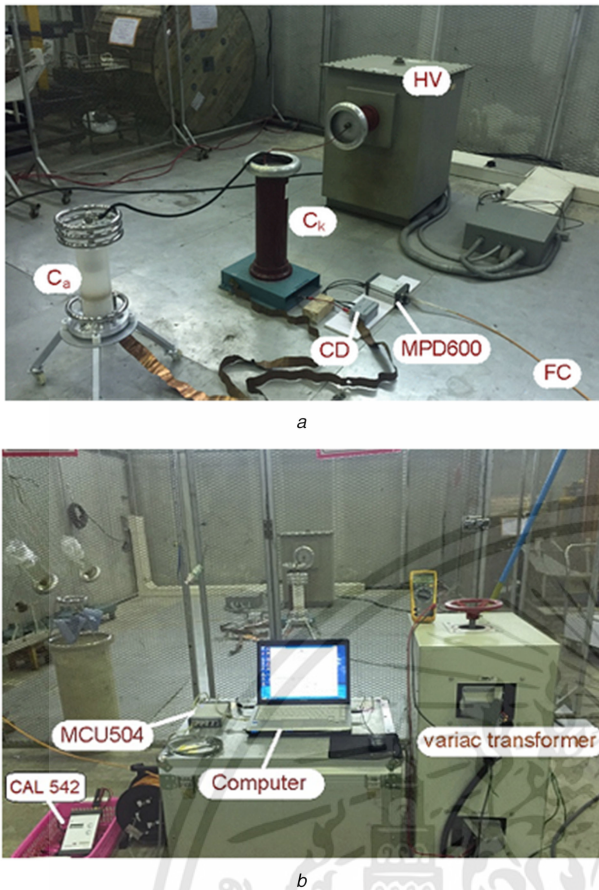


Fig. 5 Test circuit setup
(a) PD test circuit, (b) PD measuring system

Table 4 AC BD voltages for unmodified MO, MO with 0.01% and 0.03% TiO₂ and BaTiO₃

| Liquid dielectric | BD voltage, kV | Percentage increase |
|------------------------------------|----------------|---------------------|
| MO | 37 | — |
| MO with TiO ₂ (0.01%) | 42 | 14 |
| MO with BaTiO ₃ (0.01%) | 45 | 22 |
| MO with TiO ₂ (0.03%) | 45 | 22 |
| MO with BaTiO ₃ (0.03%) | 48 | 30 |

3 Test results and analysis

3.1 AC BD voltage test results

AC BD strength is one of the most important parameters describing the insulation integrity of insulating liquids. Fig. 6 below compares test results of the AC BD voltage value for MO and MO-based nanofluids. Table 4 shows that the AC BD strength of MO with 0.01% volume fraction of TiO₂ and BaTiO₃ increases 14 and 22%, respectively, compared with that of unmodified MO. In case of MO with 0.03% volume fraction of TiO₂ and BaTiO₃, the AC BD strength increases 22 and 30%, respectively.

3.2 Weibull analysis of AC BD test results

Weibull analysis was performed on the AC BD voltage test results from all five oil samples. In this part of the process, two-parameter Weibull distribution plotting was used, with BD probability calculated as in equation below:

$$F(x) = 1 - e^{-[(x/\eta)^\beta]} \quad (1)$$

In this equation, $F(x)$ is defined as the cumulative probability of BD voltage, where x represents AC BD voltage, β represents the shape parameter, and η represents the scale parameter. In Weibull

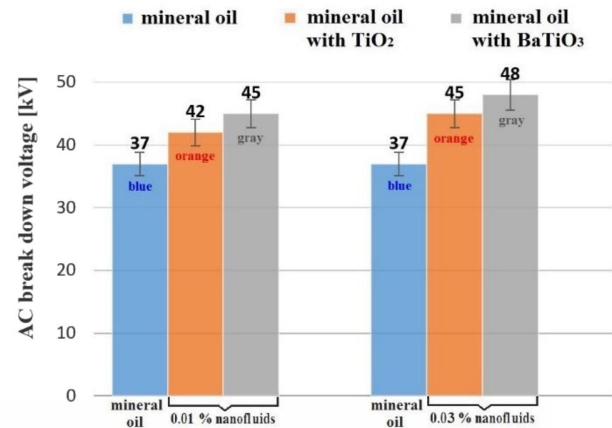


Fig. 6 Comparison of average AC BD voltages of unmodified MO, MO with 0.01 and 0.03% volume fraction of TiO₂ and BaTiO₃ with the blue bar representing unmodified MO, the orange bar representing MO with TiO₂ and the grey bar representing MO with BaTiO₃, minimum and maximum indicated by markers

distribution, the correlation coefficient (denoted as ρ) describes how well the linear regression model fits the data [4, 9]. The correlation coefficient is the statistic value that quantifies the relationship between two variables in unit free terms as described in [36]. In the Weibull plot as seen below, the MO AC BD voltage is represented by the black dots, the AC BD voltage of MO-based TiO₂ nanofluid is designated by the red squares and the AC BD voltage of the MO-based BaTiO₃ nanofluid is indicated by the green diamonds.

Fig. 7 illustrates the two-parameter Weibull plot comparison of the AC BD voltages of the unmodified MO and the MO with 0.01 and 0.03% of TiO₂ and BaTiO₃ with 95% confidence bounds, respectively. Table 5 represents the statistical Weibull parameters and the correlation coefficient of the AC BD of the unmodified MO and of the MO with 0.01 and 0.03% of TiO₂ and BaTiO₃, respectively.

As shown in Fig. 7, the AC BD voltage distribution of the five liquids was almost identical. The Weibull correlation coefficients for the fluids tested using the BD measurement testing device were recorded as 0.334, 0.378, 0.216, 0.199 and 0.482 as shown in Table 5.

3.3 PDIV test results

PD activity at PDIV level both charge quantity (QPDIV) and maximum charge quantity (Q_{max}) was recorded for 1 min. Fig. 8 shows the example of QPDIV and Q_{max} obtained from PDIV testing of the MO with 0.03% TiO₂. The PDIV, QPDIV and Q_{max} for the unmodified MO, the MO with 0.01 and 0.03% TiO₂ and for the MO with 0.01 and 0.03% BaTiO₃ experimented using the needle-plane electrode systems are shown in Table 6.

In Fig. 8, the polarities of the applied voltage have the influence on the PDIV. In case of air insulation PD occurs easily at negative polarity voltages or the PDIV voltage value of negative polarity voltage is less than the PDIV created by the positive polarity voltage. However, in case of oil insulation, the behaviour of PD is opposite to that of the air insulation. The dominant PD value of oil insulation occurs at positive polarity voltage as reported in [37].

The strategy employed to avoid significant needle wear affecting on the PDIV test results was as follows:

- The needles used in the experiment were tungsten needles having a high-melting temperature about 3653 K and high hardness capacity about $12-40 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ [4, 29, 31].
- The needles used in the experiment were from the manufacturer, recommended by IEC TR 61294 for PDIV testing of insulating liquids [28].

Table 5 Parameters and a correlation coefficient of two-parameter Weibull plot of the AC BD voltages of the unmodified MO and the MO with 0.01 and 0.03% TiO₂ and BaTiO₃

| | MO | MO with TiO ₂ , 0.01% | MO with BaTiO ₃ , 0.01% | MO with TiO ₂ , 0.03% | MO with BaTiO ₃ , 0.03% |
|---------|-------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| β | 3.0 | 4.2 | 5.7 | 5.8 | 7.5 |
| η | 41.7 | 45.7 | 48.2 | 48.5 | 51.1 |
| ρ | 0.334 | 0.378 | 0.216 | 0.199 | 0.482 |

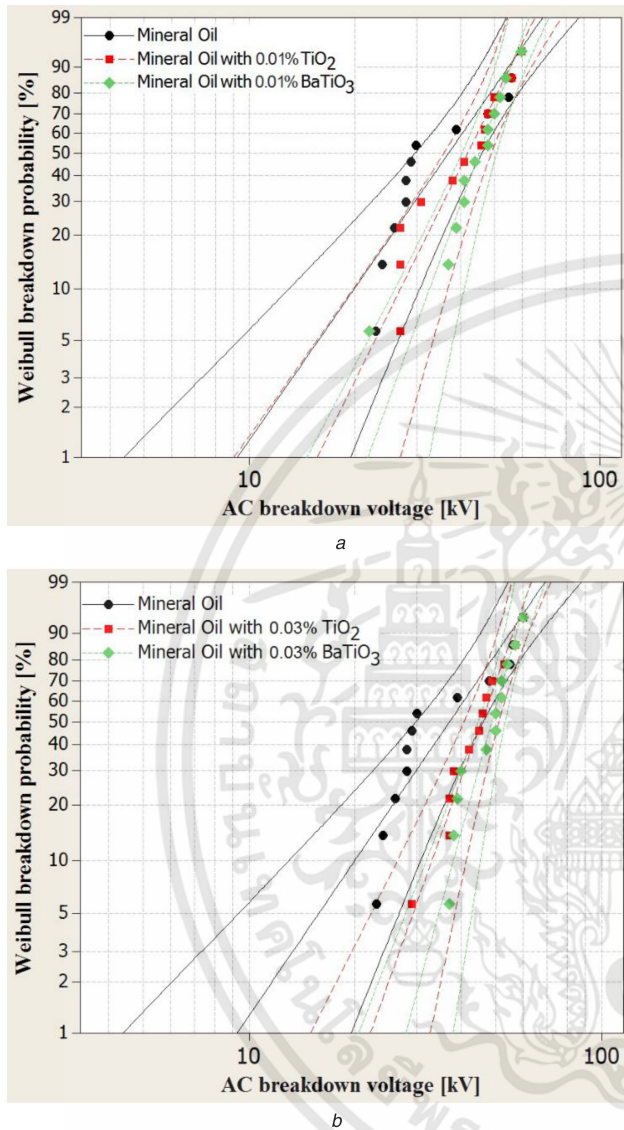


Fig. 7 Two-parameter Weibull distribution of the AC BD voltage (a) AC BD voltages of the unmodified MO and the MO with 0.01% TiO₂ and BaTiO₃, respectively, (b) AC BD voltages of the unmodified MO and the MO with 0.03% TiO₂ and BaTiO₃, respectively

(iii) The authors checked the needle tips before and after the tests using the SEM technique and found that the tip configuration was still the same as shown in Fig. 9.

(iv) Further confirmation of the validity of using tungsten needles to perform the PDIV experiment was also provided by Pattanadech as reported in [4]. The PDIV experiment was done for 100 times and it was found that the average PDIV values at 10, 20, 30, 50, 70 and 100 tests were nearly the same [4].

These pictures confirm that there was no significant problem with needle tip wear or other erosion.

3.4 Weibull analysis of PDIV test results

Weibull fitting was used to analyse PDIV test results for the unmodified MO and the MO with TiO₂ and the MO with BaTiO₃.

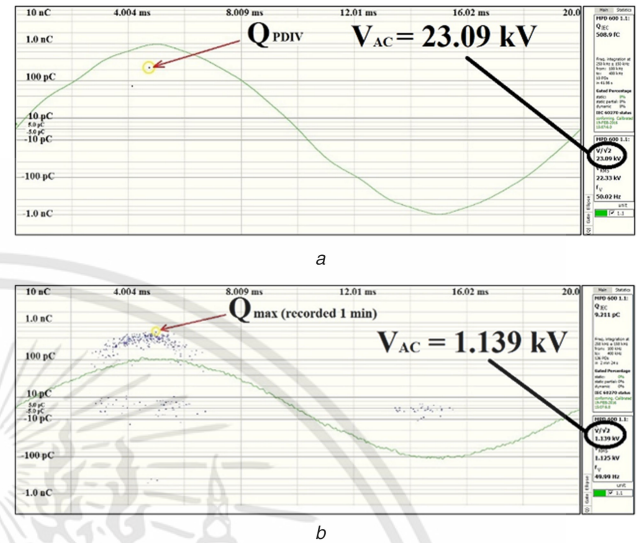


Fig. 8 PD activity at PDIV level of the MO with 0.03% TiO₂ (a) Q_{PDIV} , (b) Q_{max} (recorded 1 min)

In the analysis, PDIV probabilities were calculated using (1); by which PDIV is designated as parameter 'x'. In the Weibull distribution, PDIV of the unmodified MO is represented by the black dots, PDIV of the MO with 0.01% TiO₂ is represented by the red squares, PDIV of the MO with 0.01% BaTiO₃ is represented by the green diamonds, PDIV of the MO with 0.03% TiO₂ is represented by the blue triangles and the orange triangle represents PDIV of the MO with 0.03% BaTiO₃.

As shown in Fig. 10, the PDIV distribution of the five liquids was almost identical. The Weibull correlation coefficients for the fluids tested using the 10 μ m tip radius needle-plane electrode were recorded as 0.484, 0.742, 0.205, 0.661 and 0.788, respectively, as shown in Table 7. Table 8 shows the Weibull correlation coefficient of the five fluids tested using the 20 μ m tip radius needle-plane electrode as 0.417, 0.193, 0.310, 0.682 and 0.767. Table 9 shows the Weibull correlation coefficient of the five fluids tested using the 40 μ m tip radius needle-plane electrode as 0.328, 0.332, 0.260, 0.471 and 0.550.

Table 10 shows a comparison of PDIV at different probabilities of 63.2% with two-parameter Weibull as tested using 10, 20 and 40 μ m tip radius needle-plane electrode for the five fluids. The MO with 0.03% BaTiO₃ tested using the 10 μ m tip radius needle-plane electrode, the 20 μ m tip radius needle-plane electrode and the 40 μ m tip radius needle-plane electrode, respectively, shows the highest increase in PDIV compared with other liquids tested with the same electrode configuration.

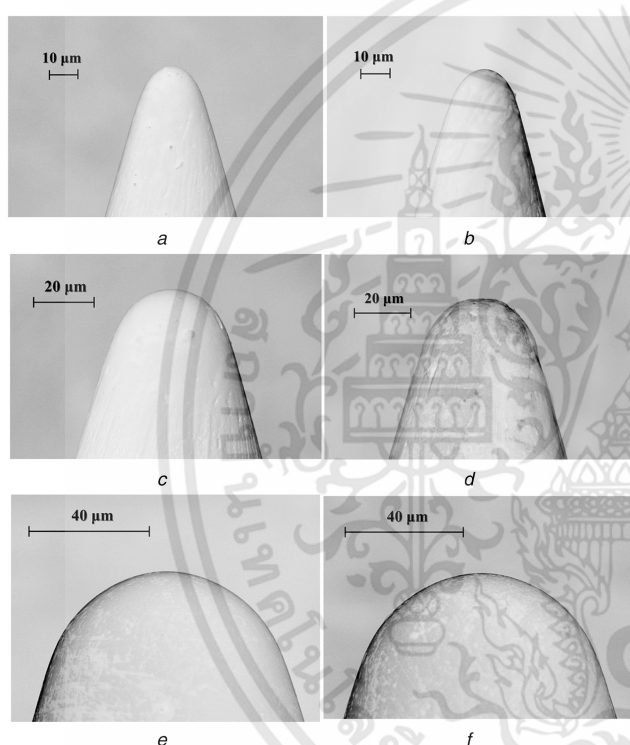
4 Discussion

4.1 AC BD voltage

The AC BD voltage of the liquid test samples is tabulated in Table 4, which indicates that the BD strength of all nanofluid samples was higher than that of the unmodified MO. At a concentration of 0.01% TiO₂ nanofluid, the BD strength increased slightly above that of the unmodified MO; however, using 0.01% BaTiO₃ nanofluid resulted in a BD voltage value 22% higher than that of the unmodified MO. Moreover, testing of 0.03% TiO₂ and BaTiO₃ nanofluids showed an increase in AC BD voltage of about

Table 6 PDIV, Q_{PDIV} and Q_{max} (recorded 1 min) of the unmodified MO and the MO with 0.01 and 0.03% TiO_2 and $BaTiO_3$

| Liquid dielectric | Tip radius, μm | PDIV, kV | Q_{PDIV} , pC | Q_{max} , recorded 1 min, pC |
|---------------------------|---------------------|----------|-----------------|--------------------------------|
| MO | 10 | 19.7 | 200 | 706 |
| | 20 | 22.1 | 237 | 1087 |
| | 40 | 28.2 | 474 | 1841 |
| MO with TiO_2 (0.01%) | 10 | 19.5 | 163 | 635 |
| | 20 | 20.8 | 236 | 631 |
| | 40 | 28.4 | 671 | 1490 |
| MO with $BaTiO_3$ (0.01%) | 10 | 21.1 | 338 | 956 |
| | 20 | 25.1 | 416 | 913 |
| | 40 | 29.2 | 667 | 1888 |
| MO with TiO_2 (0.03%) | 10 | 20.8 | 206 | 628 |
| | 20 | 23.1 | 359 | 809 |
| | 40 | 29.8 | 626 | 1588 |
| MO with $BaTiO_3$ (0.03%) | 10 | 21.3 | 175 | 569 |
| | 20 | 26.1 | 565 | 1003 |
| | 40 | 30.4 | 637 | 1701 |

**Fig. 9** SEM photographs of the tips of tungsten needles used in this experiment before and after testing

(a) 10 μm tip radius needle before test, (b) 10 μm tip radius needle after tests, (c) 20 μm tip radius needle before test, (d) 20 μm tip radius needle after tests, (e) 40 μm tip radius needle before test, (f) 40 μm tip radius needle after tests

22 and 30%, respectively, compared with the unmodified MO-BD voltage.

The effect of the nanoparticles added to the MO on BD strength seems described that an increase in the BD strength of the MO-based nanofluid increased because the nanoparticles, TiO_2 and $BaTiO_3$, obstruct the increase of streamer and also reduced the streamer propagation. Regarding the effect of TiO_2 and $BaTiO_3$ nanoparticles concentrations can be explained as follows. When there was a small concentration of TiO_2 and $BaTiO_3$ nanoparticles, the spacing between particles was large; therefore, the possibility for electrons to be accelerated and ionise oil molecules before they were trapped by nanoparticles was relatively high which explains why the BD strength increased slightly at the concentration of 0.01% in Fig. 6. However, when the concentrations of TiO_2 and $BaTiO_3$ nanoparticles increased, the spacing between particles becomes smaller, and then electrons were trapped rapidly into the

oil gap. This caused BD strength to be enhanced remarkably at 0.03% TiO_2 and $BaTiO_3$ concentration in Fig. 6. However, the suitable concentration value of the nanoparticles added to the MO should be further investigated.

4.2 PD characteristics

According to the experiment, the PDIV depended clearly on the electrode system especially the tip radius of the needle. The average PDIV values of the electrode systems are illustrated in Table 6. The PDIV of the MO-based nanoparticle with higher nanoparticle concentration tends to be higher than that of lower concentration. The reason to explain for such case should be as the same as the mentioned reason for the increase of BD voltage in line with increasing of the liquid concentration of the nanoparticle added.

In the AC BD and PD tests, MO with $BaTiO_3$ nanoparticle exhibited higher BD strength and PDIV compared with MO with the TiO_2 nanoparticle. It is a possibility due to the dielectric properties of $BaTiO_3$ -based ceramics have a high dielectric constant of about 2000 [38], while the dielectric constant of TiO_2 is about 100 [39]. Moreover, the density of $BaTiO_3$ is higher than TiO_2 (see the characteristics of nanomaterials in Table 2) and property modification of $BaTiO_3$ nanoparticles which was high thermal stability as reported in [40].

5 Conclusion

These experiments investigated the effect of nanoparticles TiO_2 and $BaTiO_3$ on the AC BD voltage, PD and PDIV properties of the unmodified MO. Analysis of the data revealed that the AC BD voltages of the MO-based nanofluids were strongly influenced by the type of the nanoparticles added, with the addition of the nanoparticles increasing the AC BD voltages slightly compared with the unmodified MO. Furthermore, the TiO_2 and $BaTiO_3$ nanofluids demonstrated a high propensity to increase the PDIV value of the MO-based nanofluids compared with the unmodified MO. The test results clearly showed that the two nanoparticles used in these experiments have significant potential for dielectric applications by enhancing the dielectric properties of unmodified MOs.

6 Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the technical support from Assistant Professor Dr. Wanwilai Vittayakorn and Ms. Nattakarn Poolphol Ph.D. student, College of Nanotechnology and staff at High Voltage Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). Research Funding was provided by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology

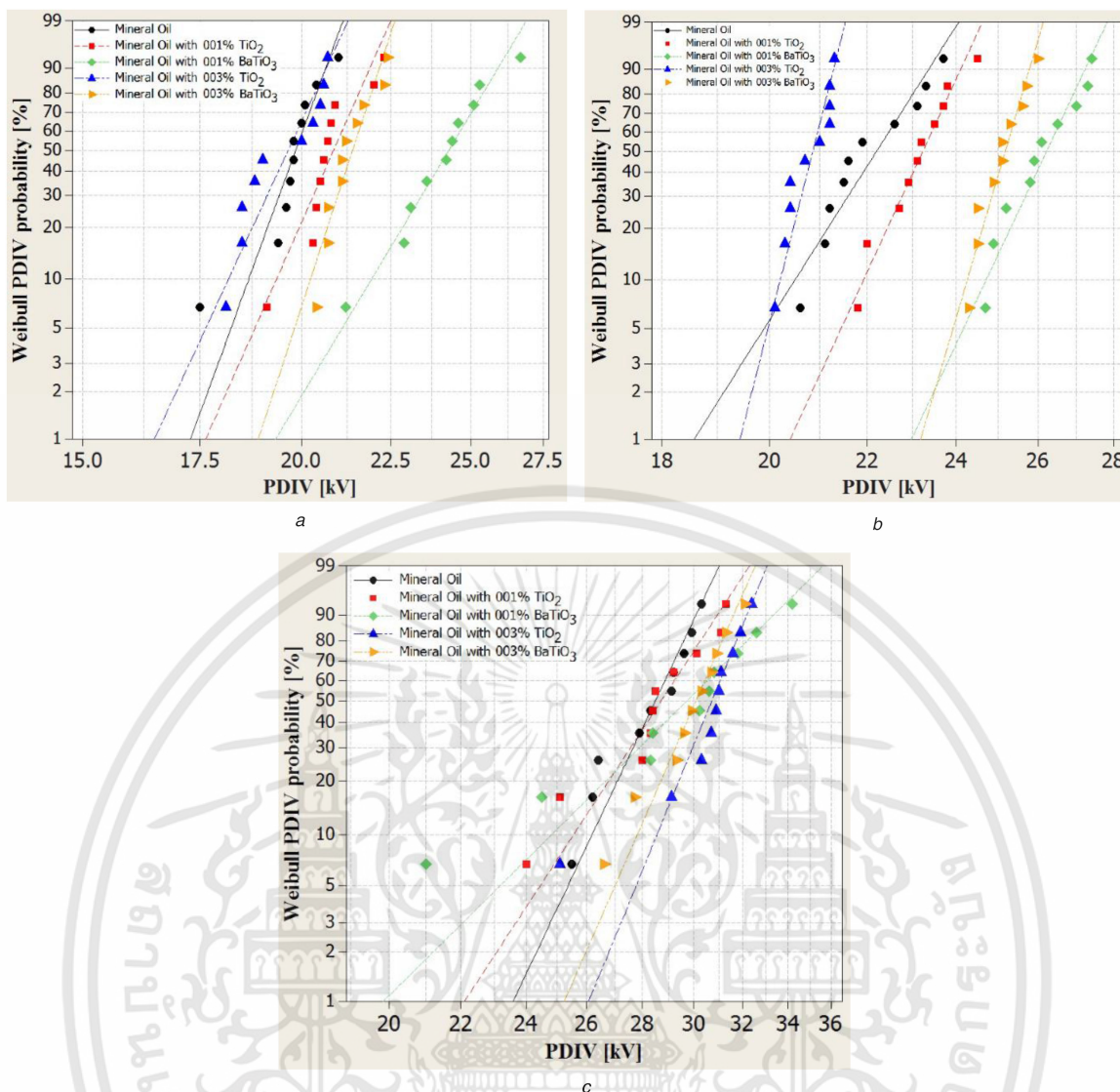


Fig. 10 Two-parameter Weibull plot of PDIV of the unmodified MO and the MO with 0.01 and 0.03% TiO_2 and BaTiO_3

(a) Test using the 10 μm tip radius needle-plane electrode, (b) Test using the 20 μm tip radius needle-plane electrode, (c) Test using the 40 μm tip radius needle-plane electrode

Table 7 Parameters and Weibull correlation coefficient for two-parameter Weibull plot of PDIV values for the unmodified MO and enhanced MO with 0.01 and 0.03% TiO_2 and BaTiO_3 as tested using a 10 μm tip radius needle-plane electrode

| | MO | MO with TiO_2 (0.01%) | MO with BaTiO_3 (0.01%) | MO with TiO_2 (0.03%) | MO with BaTiO_3 (0.03%) |
|---------|-------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| β | 30.5 | 25.1 | 18.5 | 24.0 | 34 |
| η | 20.0 | 21.1 | 24.7 | 19.9 | 21.6 |
| ρ | 0.484 | 0.742 | 0.205 | 0.661 | 0.788 |

Table 8 Parameters and Weibull correlation coefficient for two-parameter Weibull plot of PDIV values for the unmodified MO and enhanced MO with 0.01 and 0.03% TiO_2 and BaTiO_3 as tested using a 20 μm tip radius needle-plane electrode

| | MO | MO with TiO_2 (0.01%) | MO with BaTiO_3 (0.01%) | MO with TiO_2 (0.03%) | MO with BaTiO_3 (0.03%) |
|---------|-------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| β | 23.6 | 32.5 | 32 | 59.3 | 50.8 |
| η | 22.5 | 23.4 | 26.5 | 20.9 | 25.3 |
| ρ | 0.417 | 0.193 | 0.310 | 0.682 | 0.767 |

Table 9 Parameters and Weibull correlation coefficient for two-parameter Weibull plot of PDIV values for the unmodified MO and enhanced MO with 0.01 and 0.03% TiO_2 and BaTiO_3 as tested using a 40 μm tip radius needle-plane electrode

| | MO | MO with TiO_2 (0.01%) | MO with BaTiO_3 (0.01%) | MO with TiO_2 (0.03%) | MO with BaTiO_3 (0.03%) |
|---------|-------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| β | 22.3 | 16.1 | 10.4 | 25.8 | 24.1 |
| η | 28.9 | 29.3 | 30.7 | 31.1 | 30.5 |
| ρ | 0.328 | 0.332 | 0.260 | 0.471 | 0.550 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Table 10 Comparison of PDIV at different probabilities of 63.2% for the unmodified MO and the enhanced mineral with 0.01 and 0.03% TiO₂ and BaTiO₃ tested by various tip radius needle-plane electrode systems

| PDIV probabilities (63.2%), μm | MO | | | MO with TiO ₂ (0.01%) | | MO with BaTiO ₃ (0.01%) | | MO with TiO ₂ (0.03%) | | MO with BaTiO ₃ (0.03%) | |
|---|----------|----------|-------------|----------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| | PDIV, kV | PDIV, kV | Increase, % | PDIV, kV | Increase, % | PDIV, kV | Increase, % | PDIV, kV | Increase, % | PDIV, kV | Increase, % |
| 10 | 20 | 21.1 | 5 | 21.6 | 8 | 19.9 | -0.5 | 24.7 | 23 | | |
| 20 | 22.5 | 23.4 | 4 | 25.3 | 12 | 20.9 | -7 | 26.5 | 18 | | |
| 40 | 28.9 | 29.3 | 1 | 29.3 | 6 | 30.6 | 6 | 31.1 | 8 | | |

Ladkrabang for providing the facility in this research work and the Research Funding no. 2559-01-01021 for financial support, the Thailand Research Fund (TRF) and Ministry of Sciences and Technology 2016.

6 References

- Lee, J.-C., Lee, W.-H., Lee, , *et al.*: 'Positive and negative effects of a dielectric breakdown in transformer oil-based magnetic fluids', *ELSEVIER Mater. Res. Bull.*, 2012, **47**, pp. 2984–2987
- Liu, R., Pettersson, L.A.A., Auletta, T., *et al.*: 'Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), October 2011, pp. 423–427
- Rafiq, M., Wang, W., Ma, K., *et al.*: 'Insulating and aging properties of transformer oil-based TiO₂ nanofluids'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2014, pp. 457–461
- Pattanadech, N.: 'Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil'. PhD thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013
- Jin, H.: 'Dielectric strength and thermal conductivity of mineral oil based nanofluids'. PhD thesis, Delft University of Technology, Amsterdam, The Netherlands, April 2015
- Pugazhendhi, S.C.: 'Experimental evaluation on dielectric and thermal characteristics of nano filler added transformer oil'. IEEE Conf. High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, 17–20 September 2012, pp. 207–210
- Mansour, D.-E.A., Atiya, E.G., Khattab, R.M., *et al.*: 'Effect of titania nanoparticles on the dielectric properties of transformer oil-based nanofluids'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012, pp. 295–298
- Lee, J.-C., Kim, W.-Y.: 'Experimental study on the dielectric breakdown voltage of the insulating oil mixed with magnetic nanoparticles'. *ELSEVIER 18th Int. Vacuum Congress Beijing Int. Convention Center, Physics Procedia*, 2012, vol. **32**, p. 327–334
- Nazari, M., Rasoulifard, M.H., Hosseini, H.: 'Dielectric breakdown strength of magnetic nanofluid based on insulation oil after impulse test', *ELSEVIER J. Magn. Magn. Mater.*, 2016, **399**, pp. 1–4
- Du, Y., Lv, Y., Li, C., *et al.*: 'Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, **19**, (3), pp. 770–776
- Lv, Y., Wang, W., Ma, K., *et al.*: 'Nanoparticle effect on dielectric breakdown strength of transformer oil-based nanofluids'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013, pp. 680–682
- Das, S.K., Choi, S.U.S., Yu, W., *et al.*: 'Nanofluids: science and technology' (Wiley-Interscience, USA, 2008)
- Choi, S.U.S., Eastman, J.A.: 'Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles'. Int. Mechanical Engineering Congress Exposition, 1995, pp. 99–105
- Segal, V., Hjortsberg, A., Rabinovich, A., *et al.*: 'AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles'. 1998 IEEE Int. Symp. Electrical Insulation, 1998, pp. 619–622
- Jin, H., Andritsch, T., Tsekmes, I.A., *et al.*: 'Properties of mineral oil based silica nanofluids', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2014, **21**, (3), pp. 1100–1108
- Cavallini, A., Karthik, R., Negri, F.: 'The effect of magnetite, graphene oxide and silicone oxide nanoparticles on dielectric withstand characteristics of mineral oil', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2015, **22**, (5), pp. 2592–2600
- Mansour, D.A., Elsaeed, A.M., Izzularab, M.A.: 'The role of interfacial zone in dielectric properties of transformer oil-based nanofluids', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2016, **23**, pp. 3364–3372
- [18] 'Wide range of ELECTROL® Transformer oils'. Available at <http://www.rajgrp.com/wr%20electrol.html/>, accessed 5 December 2016
- [19] 'Inframat Advanced Materials LLC'. Available at <http://www.advancedmaterials.us>, accessed 22 May 2016
- [20] Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Joy, D.C., *et al.*: 'Scanning electron microscopy and X ray microanalysis' (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2003, 3rd edn.), pp. 1–17 and 271–323
- [21] Bauman, R.W.: 'Microbiology with diseases by body system' (Pearson Press, Boston, 2005, 5th edn.)
- [22] Ibrahim, M.E., Abd-Elhady, A.M., Izzularab, M.A.: 'Effect of nanoparticles on transformer oil breakdown strength: experiment and theory', *IET Sci. Meas. Technol.*, 2016, **10**, (8), pp. 839–845, doi:10.1049/iet-smt.2016.0104
- [23] Amraei, A., Fakhroueian, Z., Bahramian, A.: 'Influence of new SiO₂ nanofluids on the surface wettability and interfacial tension behaviour between oil–water interface in EOR processes', *J. Nano Res.*, 2013, **26**, pp. 1–8
- [24] Han, Z.: 'Nanofluids with enhanced thermal transport properties'. PhD thesis, University of Maryland at College Park, 2008
- [25] Murshed, S.M.S., Tan, S., Nguyen, N.: 'Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics', *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 2008, **41**, pp. 1–5
- [26] Jin, H., Andritsch, T., Morshuis, P.H.F., *et al.*: 'AC breakdown voltage and viscosity of mineral oil based SiO₂ nanofluids'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2012, pp. 902–905
- [27] IEC 60156: 'Insulating liquids determination of the breakdown voltage at power frequency test method', Second edition 1995–07, Reference number CEI/IEC 156: 1995
- [28] IEC 61294: 'Insulating liquids – determination of the partial discharge inception voltage (PDIV) – test procedure', 1993
- [29] Pattanadech, N., Muhr, M.: 'Partial discharge inception voltage investigation of mineral oil: effect of electrode configurations and oil conditions', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2016, **23**, (5), pp. 2917–2924
- [30] CIGRÉ Working Group A 2.35, CIGRÉ brochure 436, Experiences in service with new insulating liquids, October 2010
- [31] Garzon, R.D.: 'High voltage circuit breakers: design and applications' (Marcel Dekker Inc., New York, 2002, 2nd edn.), chapter 5
- [32] IEC Publication 60270: 'High voltage test techniques – partial discharge measurement', 2000
- [33] Fallou, B., Perret, J., Samat, J., *et al.*: 'Development of criteria for the selection of liquid dielectrics'. Int. Conf. Large High Voltage Electric System, 31st session 1986, CIGRÉ Paris, 1986, vol. **1**, no. 15–10, pp. 1–10
- [34] Wang, X., Wang, Z.D.: 'Insulating liquids-determination of the partial discharge inception voltage (PDIV)-test procedure'. 11th INSUCON Int. Electrical Insulation Conf., Birmingham UK, 2009
- [35] Wang, Z.D., Liu, Q., Wang, X., *et al.*: 'Discussion on possible additions to IEC 60879 and IEC 61294 for insulating liquid tests', *IET Electr. Power Appl.*, 2011, **5**, (6), pp. 486–493
- [36] 'Correlation'. Available at <http://sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/correlation.pdf>, accessed 5 December 2016, pp. 14.1–14.9
- [37] Küchler, A.: 'High voltage engineering: fundamentals technology applications' (Springer Vieweg, Berlin, Germany, 2017)
- [38] Rankin, P.J., Klingenberg, D.J.: 'The electrorheology of barium titanate suspensions'. 1998 The Society of Rheology, [S0148–6055–98]101403–5], 1998
- [39] Moulson, A.J., Herber, J.M.: 'Electroceramics: materials, properties, applications' (Chapman & Hall, New York, 1990)
- [40] Momen, G., Farzaneh, M.: 'Survey of micro/nano filler use to improve silicone rubber for outdoor insulators' advanced study center Co. Ltd., *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 27-2011, pp. 1–13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



CMD 2018 –Curtin University, Perth, Australia,
23-26 September 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dielectric Properties of Mineral Oil-based Nanofluids using Zinc Oxide Nano-composites for Power Transformer Application

P. Muangpratoom*, A. Kunakorn,
N. Pattanadech
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
tagie_p@hotmail.com,

W. Vittayakorn
Electroceramics Research Laboratory,
College of Nanotechnology,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
kvwanwil@kmitl.ac.th

K. Thungsook
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology
Rattanakosin,
Nakhon Pathom, Thailand
poochit.tue@rmutr.ac.th

Abstract — This research paper describes and analyzes various experiments designed to investigate the dielectric properties (at a series of pre-determined test temperatures and % moisture content) of mineral oil-based nanofluids produced by the incorporation of zinc oxide (ZnO) powder (of mean diameter less than 100nm) into a standard mineral oil, with the surfactant sorbitan mono-oleate (Span 80) added to modify the surface of the nanoparticles in all but the control sample. Five different nanofluid test samples (one control sample and four modified samples) based on the standard mineral oil were produced for testing: 1) a control sample containing no Span 80 and no ZnO, 2) a modified sample with Span 80, and ZnO volume fraction of 0.01%, 3) a modified sample without Span 80, and ZnO volume fraction of 0.01%, 4) a modified sample with Span 80, and ZnO volume fraction of 0.03%, and 5) a modified sample without Span 80, and ZnO volume fraction of 0.03%. In addition, the five liquid samples above were tested to determine AC breakdown voltage at seven different temperatures in the range of 35°C to 90°C. The test circuit was set up in accordance with IEC 60156 using a sphere-sphere electrode configuration with gap spacing of 2.5 mm. Several significant results were obtained from the investigation. Firstly, ZnO nanoparticles had a positive effect on all the test solutions in which they were used. Second, a positive relationship was confirmed between breakdown voltages, temperature rise. Third, a negative correlation was established between higher concentration of ZnO nanoparticles and breakdown voltage. Fourth, the use of surfactant proved to have both positive and negative effects on breakdown voltages.

Keywords — mineral oil; nanofluids; AC breakdown voltage; temperature

I. INTRODUCTION

Mineral oils have been used in the vast majority of oil-filled transformers since the first commercial units were introduced, and while dielectric fluids such as synthetic esters and natural esters are increasingly seen as modern alternatives, mineral-oil still plays an important role in the insulation of high voltage apparatus, especially power transformers and instrument transformers [1-3].

Recent advances in nanotechnology suggest that the addition of nanoparticles to mineral oil can enhance performance characteristics of mineral oil, thus improving overall performance of transformers, as well as leading to more compact designs and lower manufacturing costs [4-5].

For this research paper, a series of experiments were designed to investigate the dielectric properties of mineral oil-based nanofluids. In preparation for these experiments, ZnO nanoparticles were mixed into a standard mineral oil in order to produce the various mineral oil-based nanofluid test samples required, after which the experiments measured the breakdown voltage characteristics of the various samples at different temperatures. The breakdown voltage obtained were then analyzed in order to draw conclusions from the performance of the test samples.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Mineral oil characteristics and preparation for investigation

The standard mineral oil used to prepare the test samples was ELECTROL®-A – an uninhibited mineral oil possessing excellent electrical insulating and cooling properties which is widely used in high voltage transformer applications in Thailand. [9].

Preparation of the oil samples consisted of the following two-step process: 1) the standard mineral oil was heated at 60 °C in a vacuum oven at approximately 200 mbar for 24 hours – a portion of this being used as the unadulterated control sample, 2) ZnO nanoparticles were then mixed into the treated mineral oil to produce the various nanofluid test samples required.

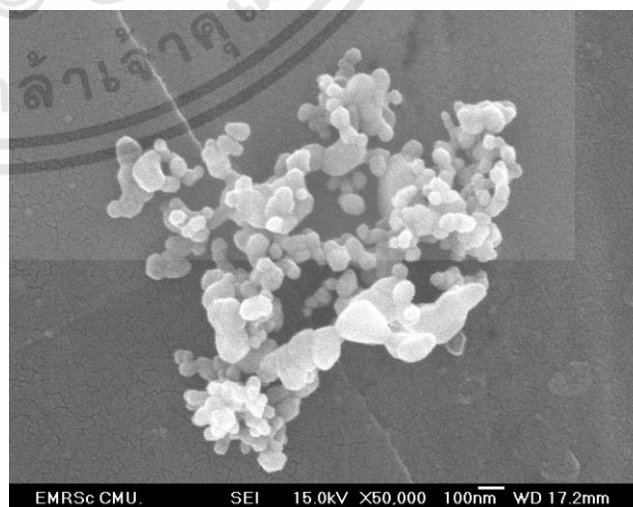


Fig. 1. SEM images of ZnO nanoparticles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น สิทธิทั้งหมดมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

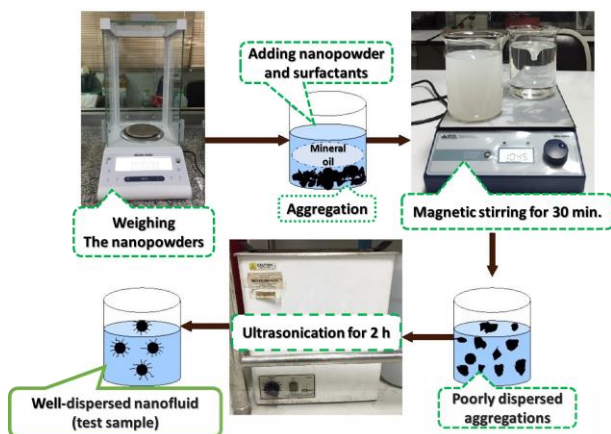
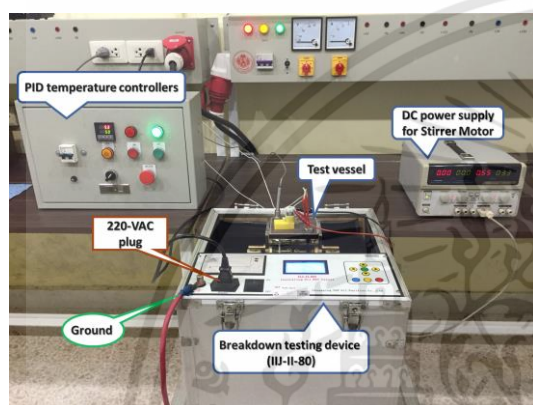
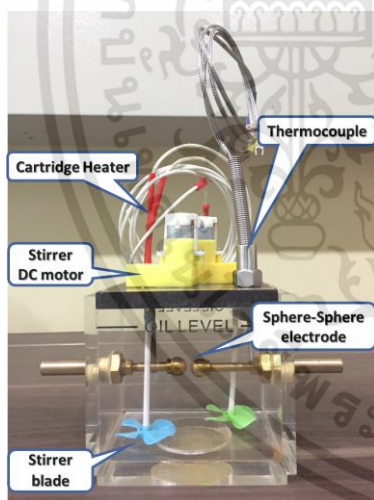


Fig. 2. A schematic diagram of the nanofluid preparation process.



(a)



(b)

Fig. 3. Dielectric breakdown testing device and test vessel. Image (a) shows the Test Circuit. Image (b) shows the Test vessel

B. Nanoparticle characteristics and preparation

ZnO nanoparticles of less than 100 nm diameter were used to prepare the non-control test samples. The specific characteristics of the ZnO used can be found in the data sheet provided by the manufacturer. [10] The diameter of the dry ZnO nano-powder particles was determined using a scanning electron microscope (SEM) techniques as shown in Fig. 1.

C. Mineral oil-based nanofluid preparation

The four mineral oil-based nanofluids were prepared by mixing the ZnO nanoparticles into four separate samples of the treated mineral oil, two of which included the surfactant Span 80 to reduce the surface tension of the oil and thereby improve particle dispersal. The process for the dispersion of the nanoparticles in the mineral oil is shown in Fig. 2. The four different types of nanofluid samples prepared are described below:

Nanofluid sample #1: ZnO 0.01% volume fraction mixed into the mineral oil with Span 80

Nanofluid sample #2: ZnO 0.01% volume fraction of ZnO mixed into the mineral oil without Span 80

Nanofluid sample #3: ZnO 0.03% volume fraction of ZnO mixed into the mineral oil with Span 80

Nanofluid sample #4: ZnO 0.03% volume fraction mixed into the mineral oil without Span 80

Initial preparation of the four nanofluid samples was carried out in accordance with the following three-step process:

Step 1. The specified volume fraction of ZnO was mixed into the mineral oil sample. During this step, the surfactant was also added to Sample #1 and Sample #3 as required.

Step 2. A magnetic stirrer was used for 30 minutes to disperse the nanoparticles.

Step 3. An ultrasonic device was used for 30 minutes to ensure homogeneity of the test samples.

Following completion of Steps 1-3 above, the control sample and the four prepared nanofluid samples were heated at a temperature of 60 °C in a vacuum oven at a pressure of 200 mbar for 24 hours. The purpose of this procedure was to reduce the dissolved water content and thereby improve the uniformity of the samples. Moisture content was measured using a Karl Fischer titrator meter, which is the standard test method for measuring the moisture content in transformer oil according to the ASTM D 1533 test - also known as the Karl Fischer reaction test [11].

D. Investigation of AC breakdown characteristics

Tests for the AC breakdown strength of the unmodified mineral oil control sample and the four mineral oil-based nanofluid samples was performed according to the IEC 60156 [12] using an improved oil-breakdown tester (IJJ-II-80) with the electrode gap set at 2.5 mm. The tests were performed at seven different temperatures in the range of 35°C to 90°C with each of the seven tests conducted six times for each liquid test sample, which allowed individual mean values for the breakdown voltages to be calculated. The test apparatus is shown in Fig. 3 above.

III. TEST RESULTS AND ANALYSIS

A. Moisture content test results

The moisture content levels of the unmodified mineral oil and those of the mineral oil-based nanofluid samples before testing are shown in Table I below, where it can be seen that the addition of the Span 80 surfactant produced a marginal increase in the moisture content of the mineral oil.

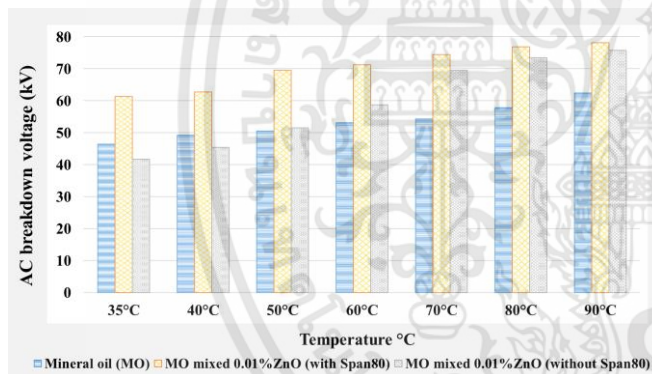
This may lead to the variation in the breakdown strength of the mineral oils with and without nanoparticles due to electron traps during the electron transfer process.

TABLE I. MOISTURE CONTENT OF THE UNMODIFIED MINERAL OIL AND THE MINERAL OIL BASED NANOFLUIDS

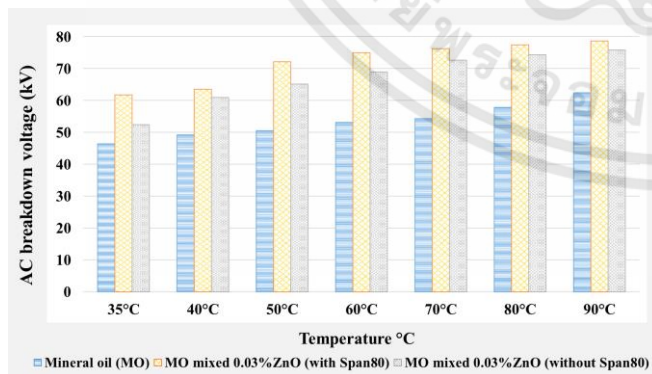
| Liquid dielectric | Moisture content levels (ppm) |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Mineral oil (MO) | 18.6 |
| MO mixed 0.01% ZnO with Span80 | 19.2 |
| MO mixed 0.01% ZnO without Span80 | 18.9 |
| MO mixed 0.03% ZnO with Span80 | 19.5 |
| MO mixed 0.03% ZnO without Span80 | 19.3 |

B. AC breakdown voltage test results

Fig. 4 below provides a graphic comparison of the consolidated AC breakdown voltage tests results.



(a)



(b)

Fig.4. Comparison of average AC breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, both with and without Span80 (a) AC breakdown voltage of the mineral oil and the mineral oil with 0.01% ZnO with and without Span80 (b) AC breakdown voltage of the mineral oil, the mineral oil with 0.03% ZnO with and without Span80

Fig. 4(a) provides results for the control sample and the solutions containing ZnO at 0.01 volume fraction both with and without Span 80.

Fig. 4(b) provides results for the control sample and the solutions containing ZnO at 0.03 volume fraction both with and without Span 80.

The graph in Fig. 4(a) illustrates that the trendlines for breakdown voltage of the control sample and the samples without surfactant remained nearly parallel over the entire temperature range. However, compared to the trendline for the samples without surfactant, the trendline for the samples with surfactant indicates a significant negative effect throughout the temperature range, although the negative effect does diminish with rising temperature. By contrast, the graph in Fig. 4(b) shows three approximately parallel trend lines, the main observation being that the addition of surfactant had a significantly negative effect on breakdown voltage throughout the entire temperature range.

Furthermore, it can be seen that increase in breakdown voltage for the sample containing ZnO at 0.03% volume measurement without surfactant was most noticeable at 50°C.

Tables II and III below provide a graphic representation of the comparative mean AC breakdown voltages, as well as percentage increments of AC breakdown voltage. These confirm that the AC breakdown voltage for samples containing 0.03 % ZnO was slightly higher than for the 0.01% ZnO throughout the temperature test range.

TABLE II. RESULTS OF THE AC BREAKDOWN VOLTAGES OF THE MINERAL OIL AND THE MINERAL OIL WITH 0.01% ZNO WITH AND WITHOUT SPAN80

| °C | Breakdown Voltage (kV) | | | % increase | |
|----|------------------------|----------------------------------|----------------|-------------|----------------|
| | Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% ZnO | | With Span80 | Without Span80 |
| | | With Span80 | Without Span80 | | |
| 35 | 46.4 | 61.3 | 47.7 | 32.11 | 2.80 |
| 40 | 49.2 | 62.7 | 50.4 | 27.43 | 2.43 |
| 50 | 50.5 | 69.5 | 51.5 | 37.62 | 1.98 |
| 60 | 53.1 | 71.2 | 58.7 | 34.08 | 10.54 |
| 70 | 54.3 | 74.4 | 69.5 | 37.01 | 27.99 |
| 80 | 57.8 | 76.8 | 73.4 | 32.87 | 26.98 |
| 90 | 62.4 | 78.1 | 75.7 | 25.16 | 21.31 |

TABLE III. RESULTS OF THE AC BREAKDOWN VOLTAGE OF THE MINERAL OIL AND THE MINERAL OIL WITH 0.03% ZNO WITH AND WITHOUT SPAN80

| °C | Breakdown Voltage (kV) | | | % increase | |
|----|------------------------|----------------------------------|----------------|-------------|----------------|
| | Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% ZnO | | With Span80 | Without Span80 |
| | | With Span80 | Without Span80 | | |
| 35 | 46.4 | 61.7 | 52.4 | 32.97 | 12.93 |
| 40 | 49.2 | 63.5 | 60.9 | 29.06 | 23.78 |
| 50 | 50.5 | 72.1 | 65.1 | 42.77 | 28.91 |
| 60 | 53.1 | 74.5 | 68.9 | 40.30 | 29.75 |
| 70 | 54.3 | 76.2 | 72.6 | 40.33 | 33.70 |
| 80 | 57.8 | 77.4 | 74.3 | 33.91 | 28.54 |
| 90 | 62.4 | 78.6 | 75.8 | 25.96 | 21.47 |

IV. CONCLUSION

This paper has presented analysis of experimental results from an investigation into the effects of adding various combinations of ZnO nanoparticles and Span 80 surfactant on the AC breakdown voltage of mineral oil.

Data analysis provided mixed results. Firstly, it confirmed the positive correlation for all test samples between breakdown voltage and temperature rise across the test range as well as the superior performance of the 0.01% ZnO test samples compared to the 0.03% ZnO test samples.

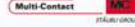
However, it also revealed that, while all the 0.03% ZnO test samples benefitted consistently and significantly across the temperature range from the addition of surfactant and that this improvement was also shown by the 0.01% ZnO test samples which used surfactant, for the 0.01% ZnO test samples without surfactant there were significant negative effects in the lower temperature range and significant positive effects in the higher temperature range.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the present work was supported by Lamool Engineering Co., Ltd. as well as the staff of the High Voltage Engineering Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

REFERENCES

- [1] Rongsheng Liu, Leif A.A. Petterson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam.: 'Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), October 2011, pp. 423-427.
- [2] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [3] P. Muangpratoom and N. Pattanadech.: 'Breakdown and Partial Discharge Characteristics of Mineral oil-based Nanofluids'. IET Sci. Meas. Technol., 2018, doi: 10.1049/iet-smt.2017.0080
- [4] Pugazhendhi Sugumaran.C.: 'Experimental evaluation on dielectric and thermal characteristics of nano filler added transformer oil'. IEEE Conf. High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012, pp. 207-210.
- [5] S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids: Science and Technology*, Wiley-Interscience, 2008.
- [6] S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles" Int'l. Mechanical Engineering Congress Exposition, pp. 99-105, 1995.
- [7] Huiwei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [8] V. Segal, A. Hjortsberg, A. Rabinovich, D. Natrass and K. Raj, "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 619-622, 1998.
- [9] 'Wide range of ELECTROL® Transformer oils', <http://www.rajgrp.com/wr%20electrol.html/>.
- [10] 'Inframmat Advanced Materials LLC', <http://www.advancedmaterials.us>.
- [11] Z. Han.: 'Nanofluids with enhanced thermal transport properties'. PhD thesis, University of Maryland at College Park, 2008.
- [12] ASTM D1533, "Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration1," 2013 Edition, Jul 4, 2013.
- [13] IEC 60156, "Insulating liquids Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method," INTERNATIONAL STANDARD, Second edition 1995-07, Reference number CEI/IEC 156: 1995.



2018 ECTI-CON

18-21 JULY 2018,
CHIANG RAI, THAILAND



15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL
ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER,
TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LANNA
CONFERENCE VENUE : WIANG INN HOTEL

Effect of Different Temperatures on AC Breakdown Voltage of Mineral Oil based Nanofluids

P. Muangpratoom*, A. Kunakorn,
N. Pattanadech

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand

tagie_p@hotmail.com, kkananta@kmitl.ac.th.,
norasage@yahoo.com

W. Vittayakorn

Electroceramics Research Laboratory, College of
Nanotechnology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
kvwanwil@kmitl.ac.th

Abstract— This study seeks to make improvements in the dielectric properties of transformer oil through the application of nanotechnology. In particular, two nanoparticles are examined experimentally: titanium dioxide (TiO_2), and barium titanate (BaTiO_3). Each has a mean diameter not exceeding 100 nm. The nanofluid samples comprised the nanoparticles mixed into the mineral oil through differing procedures. In the first case, the transformer oil was combined with 0.01% volume fraction of the nanoparticle; the second sample used 0.03% volume fraction of the nanoparticle volume fraction. A magnetic stirrer was then used for sample dispersal before an ultrasonic dispersant method was used on the prepared nanofluids so that sample homogeneity could be assured. The experimental process then recorded the AC breakdown voltage characteristics for the liquids through a range of temperatures from 35°C up to 90°C. The findings indicate that the AC breakdown voltages for mineral oils containing nanoparticles exceed those for unmodified mineral oils.

Keywords— mineral oil; temperature; AC breakdown voltage; nanofluids

I. INTRODUCTION

Transformers are vital components within any electrical power distribution system. Inside the transformer should be a layer of solid or cellulose insulation. In some cases, this can be mineral oil, which plays two roles. First, it provides insulation, supporting the insulation materials in the coils and conductors. Secondly it serves as a coolant capable of drawing heat from the core and the windings [1-3]. Due to recent advances in the field of nanotechnology, it has become apparent that nanoparticles might be used in combination with mineral oils to enhance the properties of the latter. In turn this might allow designs to become more compact and for manufacturing costs to be reduced, thus creating significant advantages [4].

The notion of improving the properties of liquids by introducing nanoparticles was first proposed in 1993 by Choi [5-6]. This would allow characteristics such as thermal conductivity in fluids to be positively altered. As a consequence, the number of publications addressing the issue of nanofluids has been growing by around 30% annually since 1995 reflecting this growing interest [7]. Of particular relevance to this study is the work concerning the dielectric properties of oil-based nanofluids carried out by Segal et al. since 1998, which aimed to create improvements in

transformer oil properties by the addition of magnetite nanoparticles [8]. Investigations have been performed to establish the capabilities of various nanomaterials including titanium dioxide (TiO_2) and barium titanate (BaTiO_3) with the goal of enhancing the dielectric properties of liquid materials used for insulation [9]. A majority of these previous experiments have investigated the properties of nanofluids at differing concentrations and when using different preparation processes to produce the nanofluid samples.

This research study conducts experiments to examine the dielectric properties of the mineral oil-based nanofluids containing specific nanoparticles which have been combined with a widely used form of mineral oil. The selected nanomaterials are TiO_2 and BaTiO_3 which are mixed with the unmodified and previously unused mineral oil to create the sample nanofluids. The breakdown voltage (BD) characteristics can then be assessed at different temperatures, while comparisons can also be made between the performance of unmodified mineral oil, and the mineral oil-based nanofluids.

II. EXPERIMENTAL PROCESS

A. Characteristics of mineral oil and the experimental preparation

This study made use of the mineral oil ELECTROL®-A, which is an uninhibited type of mineral oil with excellent insulating and cooling properties. This type of oil is commonly used in Thailand for high voltage transformers. The precise characteristics and attributes can be examined in detail in [10].

Before mixing with the nanoparticles, the mineral oil was heated in a vacuum oven at 60°C for 24 hours at around 200 mbar. Subsequently, the mixing took place to create the mineral oil-based nanofluid samples.

B. Nanoparticle qualities and preparation

This study investigated two nanoparticle materials: TiO_2 and BaTiO_3 . In both cases the diameters were smaller than 100 nm. The manufacturers provide detailed information about the properties and attributes of these materials, as shown in [11].

Measurement of the dry nanopowder diameters could be achieved through the use of scanning electron microscopy (SEM) techniques as indicated in Figure 1. This approach is

effective in cases such as this where the diameters are smaller than 100 nm.

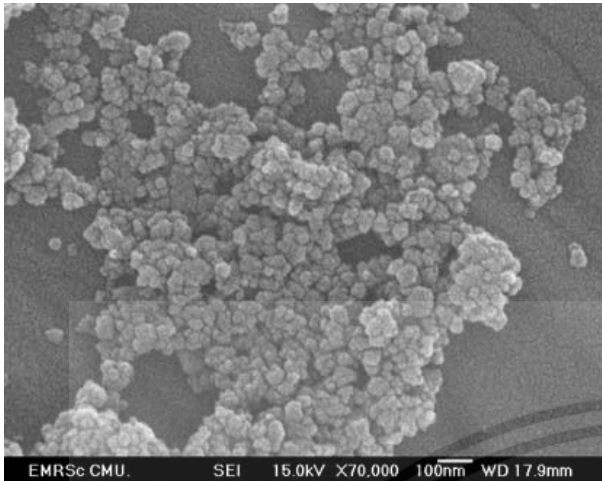
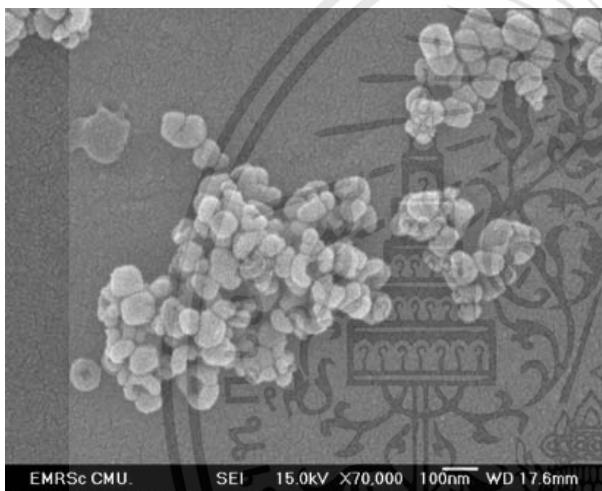
(a) TiO₂(b) BaTiO₃

Fig. 1. Images of the nanoparticles used, via SEM

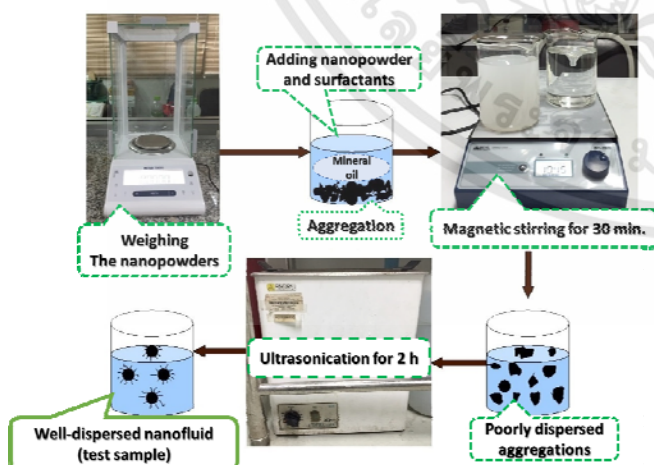


Fig. 2. The preparation process for the nanofluids

C. Preparation of mineral oil-based nanofluids

Preparation of the mineral oil-based nanofluids was carried out through the mixing of unmodified mineral oil with either the TiO₂ or the BaTiO₃ nanoparticles. The process created four different types of nanofluid samples as described below:

- Nanofluid sample No. 1: 0.01% volume fraction of TiO₂ combined with the mineral oil,
- Nanofluid sample No. 2: 0.01% volume fraction of BaTiO₃ combined with the mineral oil,
- Nanofluid sample No. 3: 0.03% volume fraction of TiO₂ combined with the mineral oil,
- Nanofluid sample No. 4: 0.03% volume fraction of BaTiO₃ combined with the mineral oil.

The four different nanofluid samples were prepared using the three processes explained as follows:

- Initially, the mineral oil and nanoparticles were mixed in the required amounts. This is also the point at which a surfactant can be added to the mineral oil.
- Next, a magnetic stirrer was used for dispersal of the nanofluids for 30 minutes.
- The final step involved ultrasonic dispersion of the nanofluids for a period of two hours so that the liquids would be homogenous.

For modification of the nanoparticle surface, the surfactant sorbitan monooleate (Span 80) was used. Span 80 is well known for its ability to stop the agglomeration of nanoparticles mixed in mineral oil [2, 7, 12]. Furthermore, in order to ensure the dispersal of the nanopowders, magnetic stirring and an ultrasonic mixing were used [4, 7]. This procedure is described and illustrated in Figure 2.

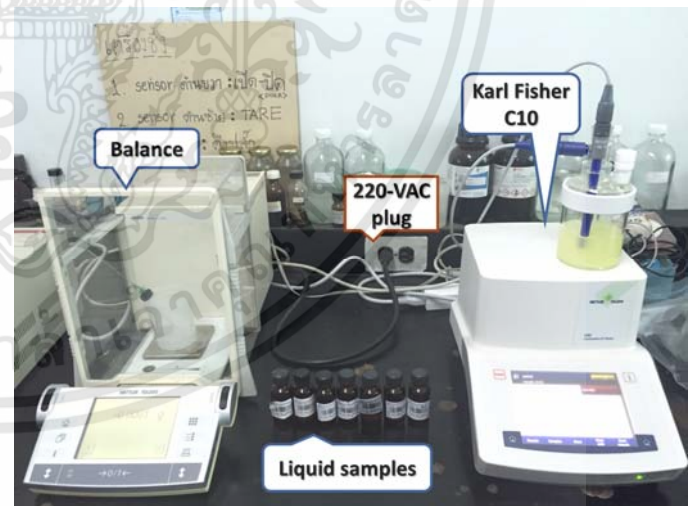
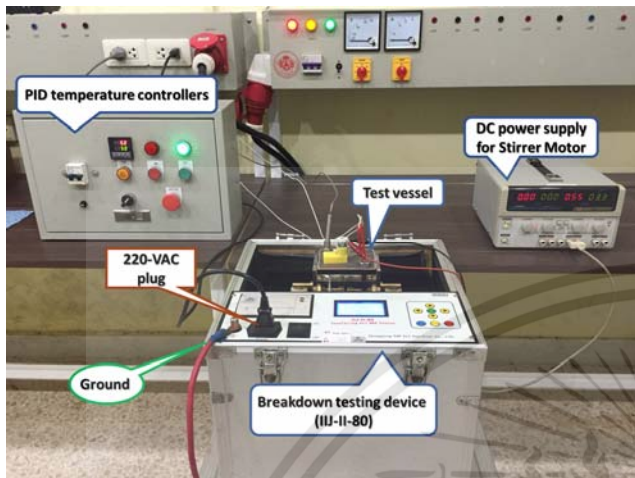


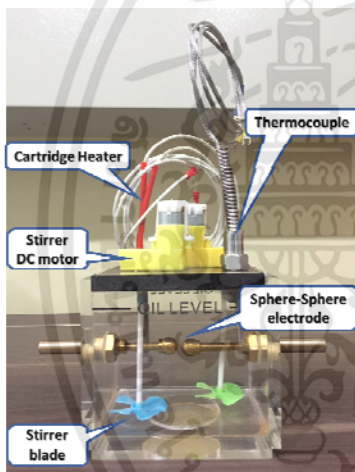
Fig. 3. Moisture meter (Karl Fischer Titrators) to evaluate the water content contained within the samples

Prior to the commencement of the experiment, the unmodified mineral oil and the mineral oil-based nanofluid samples underwent heating in a vacuum oven to 60°C for 24

hours at around 200 mbar. The objective was to ensure that the moisture content within the samples could be controlled. Figure 3 shows the Karl Fischer Titrators equipment used to measure moisture content; the standard technique used to assess water content in transformer oil is the ASTM D 1533 test, or Karl Fischer reaction test [13].



(a) Test circuit used in the experiments for AC breakdown in dielectric liquids



(b) The test vessel

Fig. 4. Devices used for the dielectric breakdown testing including the test vessel

D. Determination of the AC breakdown characteristics

Testing was carried out to determine the AC breakdown strength of both the unmodified mineral oil and the mineral-oil based nanofluids. The process followed IEC 60156 [14] and made use of an oil-breakdown tester (IIJ-II-80) and a constant gap between the electrodes set to be 2.5 mm. Tests were carried out at varying temperatures in the range of 35°C up to 90°C. Six tests were performed on each sample before the mean of the outcomes was calculated. Figure 4 shows the equipment used in the testing process.

III. TEST RESULTS AND ANALYSIS

A. Results of moisture content testing

Table I shows the results for the moisture content measurements for the unmodified mineral oil and the mineral oil-based nanofluid samples prior to the experiments.

It is apparent that the moisture levels are affected by the presence of the nanoparticles. It is possible that this difference will subsequently lead to differences in the breakdown strength of the mineral oils depending upon whether or not the nanoparticles are present, as a result of electron traps arising during the process of electron transfer.

TABLE I. MOISTURE CONTENT OF UNMODIFIED MINERAL OIL AND OF MINERAL OIL-BASED NANOFUIDS

| Liquid dielectric | Moisture content levels (ppm) |
|---|-------------------------------|
| Mineral oil | 18.6 |
| Mineral oil with TiO ₂ (0.01%) | 17.6 |
| Mineral oil with BaTiO ₃ (0.01%) | 18.5 |
| Mineral oil with TiO ₂ (0.03%) | 17.3 |
| Mineral oil with BaTiO ₃ (0.03%) | 18.2 |

B. Results of the AC breakdown voltage testing

Figure 5 presents the findings for the AC breakdown voltage tests in the case of both the mineral oil and mineral oil-based nanofluids at differing temperatures and concentrations, thus allowing comparisons to be made. It can be seen that as the temperature rises from 35°C to 90°C, the breakdown voltage also increases in the case of the unmodified mineral oil and also for the mineral oil-based nanofluids containing TiO₂ and BaTiO₃. In Tables II and III, the mean AC breakdown voltages are shown along with the percentage increments of the data for the nanofluids which were tested.

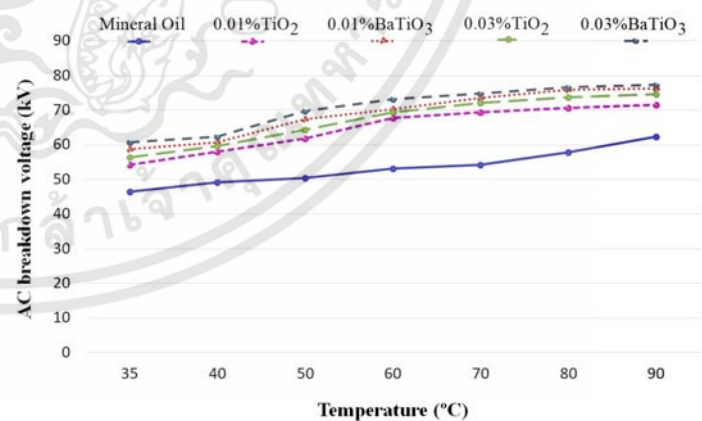


Fig. 5. Presentation of the comparison of the average AC breakdown voltage of mineral oil with mineral oil containing 0.01% and 0.03% TiO₂ and BaTiO₃ over the range of temperatures from 35°C through 90°C

TABLE II. AC BREAKDOWN VOLTAGES FOR MINERAL OIL AND FOR MINERAL OIL WITH 0.01% TiO₂ AND BaTiO₃

| °C | Breakdown Voltage (kV) | | | % increase | |
|----|------------------------|---|--------------------|------------------|--------------------|
| | Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | TiO ₂ | BaTiO ₃ |
| | | TiO ₂ | BaTiO ₃ | | |
| 35 | 46.4 | 54.3 | 58.7 | 17 | 26 |
| 40 | 49.2 | 58.1 | 60.8 | 18 | 22 |
| 50 | 50.5 | 61.9 | 67.5 | 22 | 34 |
| 60 | 53.1 | 67.8 | 70.4 | 26 | 32 |
| 70 | 54.3 | 69.4 | 73.6 | 28 | 35 |
| 80 | 57.8 | 70.7 | 75.9 | 23 | 32 |
| 90 | 62.4 | 71.5 | 76.3 | 14 | 23 |

TABLE III. AC BREAKDOWN VOLTAGES OF MINERAL OIL AND MINERAL OIL WITH 0.03% TiO₂ AND BaTiO₃

| °C | Breakdown Voltage (kV) | | | % increase | |
|----|------------------------|---|--------------------|------------------|--------------------|
| | Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | TiO ₂ | BaTiO ₃ |
| | | TiO ₂ | BaTiO ₃ | | |
| 35 | 46.4 | 56.5 | 60.8 | 22 | 30 |
| 40 | 49.2 | 59.6 | 62.3 | 20 | 26 |
| 50 | 50.5 | 64.3 | 69.7 | 28 | 38 |
| 60 | 53.1 | 69.5 | 73.2 | 30 | 38 |
| 70 | 54.3 | 72.2 | 74.8 | 35 | 37 |
| 80 | 57.8 | 73.8 | 76.7 | 28 | 33 |
| 90 | 62.4 | 74.6 | 77.3 | 19 | 24 |

It is apparent from the results that the nanofluid samples offer greater breakdown strength than is the case for the unmodified mineral oil. Furthermore, altering the nanofluid concentrations can have an effect upon the breakdown strength. As temperature rises, the breakdown strength of the fluids is higher, while increased concentrations of nanoparticles also lead to greater breakdown strength.

IV. CONCLUSION

This research study discussed the influence of the nanoparticles, TiO₂ and BaTiO₃, upon the AC breakdown voltage properties of mineral oil. Data analysis leads to the conclusion that the AC breakdown voltage of the mineral-oil based nanofluids depends on the kind of nanoparticles used. It is also apparent that when nanoparticles are introduced to the mineral oil, the AC breakdown voltage increases as the temperature goes higher.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the technical support from Ms. Nattakarn Poolphol Ph.D. student, College of Nanotechnology. Besides, the present work was supported by Lamool Engineering Co., Ltd. and staff at High Voltage

REFERENCES

- [1] Rongsheng Liu, Leif A.A. Pettersson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam.: 'Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), October 2011, pp. 423-427.
- [2] P. Muangpratoom and N. Pattanadech.: 'Dielectric Breakdown Strength of Mineral Oil Based Nanofluids'. CMD 2016, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi'an, China, September 25-28, 2016, pp 261-264.
- [3] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [4] Pugazhendhi Sugumaran.C.: 'Experimental evaluation on dielectric and thermal characteristics of nano filler added transformer oil'. IEEE Conf. High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012, pp. 207-210.
- [5] S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, Nanofluids: Science and Technology, Wiley-Interscience, 2008.
- [6] S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles" Int'l. Mechanical Engineering Congress Exposition, pp. 99-105, 1995.
- [7] Huiifei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [8] V. Segal, A. Hjortsberg, A. Rabinovich, D. Natrass and K. Raj, "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 619-622, 1998.
- [9] Mahshid Farzaneh Dehkordi.: 'Dielectric behavior of transformer oil when contaminated and/or fortified with nanoparticles'. M.Eng. dissertation, University of Quebec, Quebec, Canada, Summer 2014.
- [10] 'Wide range of ELECTROL® Transformer oils', <http://www.rajgrp.com/wr%20electrol.html/>.
- [11] 'Inframat Advanced Materials LLC', <http://www.advancedmaterials.us>.
- [12] Z. Han.: 'Nanofluids with enhanced thermal transport properties'. PhD thesis, University of Maryland at College Park, 2008.
- [13] ASTM D1533, "Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration1," 2013 Edition, Jul 4, 2013.
- [14] IEC 60156, "Insulating liquids Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method," INTERNATIONAL STANDARD, Second edition 1995-07, Reference number CEI/IEC 156: 1995.

2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2017)

Manchester, United Kingdom
25 – 29 June 2017



IEEE Catalog Number: CFP17CDL-POD
ISBN: 978-1-5090-4878-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Copyright © 2017 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
All Rights Reserved**

Copyright and Reprint Permissions: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.

For other copying, reprint or republication permission, write to IEEE Copyrights Manager, IEEE Service Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854. All rights reserved.

****** This is a print representation of what appears in the IEEE Digital Library. Some format issues inherent in the e-media version may also appear in this print version.***

| | |
|-------------------------|-------------------|
| IEEE Catalog Number: | CFP17CDL-POD |
| ISBN (Print-On-Demand): | 978-1-5090-4878-6 |
| ISBN (Online): | 978-1-5090-4877-9 |
| ISSN: | 2153-3725 |

Additional Copies of This Publication Are Available From:

Curran Associates, Inc
57 Morehouse Lane
Red Hook, NY 12571 USA
Phone: (845) 758-0400
Fax: (845) 758-2633
E-mail: curran@proceedings.com
Web: www.proceedings.com

CURRAN ASSOCIATES INC.
proceedings
.com

Impulse Breakdown Characteristic of Mineral Oil Based Nanofluid

Pichai Muangpratoom^{1*}, Norasage Pattanadech², Anantawat Kunakorn³ and Wanwilai Vittayakorn⁴

High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering¹⁻³

Electroceramics Research Laboratory, College of Nanotechnology⁴

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

E-mail: tagie_p@hotmail.com¹, norasage@yahoo.com², kkananta@kmitl.ac.th.³ and kvwanwil@kmitl.ac.th⁴

Abstract— Mineral-oil based nanofluids are proved that the addition of suitable nanoparticles can increase the AC breakdown voltage and Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) compared with those of the unmodified mineral oil. In this paper, a standard impulse breakdown voltage of the mineral oil and the mineral-oil based nanofluids is investigated. Three types of nanoparticle, i.e., Zinc oxide (ZnO), Barium titanate (BaTiO₃) and Titanium dioxide (TiO₂) with the mean diameter less than 100 nm are used to prepare the nanofluid samples. The first group of the nanofluid sample consists of the mineral oil mixed with the 0.01% volume fraction of nanoparticle. Another group of nanofluid sample comprises the mineral oil mixed with the 0.03% volume fraction of nanoparticle. Besides, the surfactant sorbitan monooleate (Span 80) is added in order to modify the surface of the nanoparticles. The needle-sphere electrode configuration with the gap spacing of 15 mm is employed for impulse breakdown voltage investigation of the dielectric liquids. The test circuit is set up in accordance with IEC 60897, and the test experiment is performed at the room temperature. The results show that the addition of ZnO and TiO₂ nanoparticle leads to the change in the impulse breakdown characteristics of the mineral oil in both positive and negative impulse polarities. However, no significant change in the impulse breakdown characteristics is observed when adding BaTiO₃ to the oil.

Keywords— mineral oil; nanofluids; impulse breakdown voltage; Weibull analysis

I. INTRODUCTION

Mineral oil has been used since the first commercial oil-filled transformer was introduced, while dielectric fluids such as synthetic ester and natural ester are seen as a modern alternative. However, mineral-oil still plays an important role in the insulation of high voltage apparatus, especially power transformers and instrument transformers [1-2]. Focusing on the advancement of nanotechnologies and their application, nanoparticles hold promise that they can be used with mineral-oils to enhance their properties, which may lead to more compact designs and the reduction of manufacturing costs [3-4].

The conception of utilizing nanoparticles for improving physical properties of liquids such as the enhancement of the thermal conductivity of the conventional fluid was initiated by Choi in 1993 [5-6]. Since 1995, a number of publications

dealing with nanofluids have been growing at an average of around 32% per year [2]. Moreover, the research on dielectric properties of oil-based nanofluids started in 1998 by Segal et al. to improve dielectric properties of transformer oil with adding magnetite nanoparticles [7]. Several different nanoparticles, which include the nanomaterials such as Zinc oxide (ZnO), Barium titanate (BaTiO₃) and Titanium dioxide (TiO₂) additives have been investigated with the aim of improving the dielectric properties of liquid insulating materials. Most of research works have dealt with the nanofluid properties with different volume concentration of nanoparticles and various nanofluid preparation procedures.

In this paper the experiments were performed to investigate the dielectric properties of the mineral oil-based nanofluids when selected nanoparticles were mixed into a commonly used mineral oil so that their impulse breakdown voltage characteristics could be observed. The hypothesis of this research work is that the impulse breakdown voltage of the mineral oil would be noticeably increased with the addition of nanoparticles. In this investigation, the nanomaterials, ZnO, BaTiO₃ and TiO₂, were selected to mix with the new unmodified mineral oil to produce the mineral oil-based nanofluid test samples. Comparison of impulse breakdown voltage of the nanomaterial mineral oil and of the mineral oil is presented.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Mineral oil characteristics and preparation for investigation

The mineral oil, ELECTROL®-A, uninhibited mineral oil type, is employed in this study, and this mineral oil which is widely used in high voltage transformers. The mineral oil characteristics are in [8]. The new mineral oil was heated at 60 °C under vacuum condition for 24 hours before it was mixed with the selected nanoparticles to prepare mineral oil-based nanofluid sample.

B. Nanoparticle characteristics and preparation

Three different nanoparticle materials, ZnO, BaTiO₃ and TiO₂ (size < 100 nm) were used in this research. Characteristics of the nanomaterials used in this study can be found from a data sheet provided by the manufacturers [9].

The diameter of the dry nanopowder were examined by scanning electron microscope (SEM) techniques as shown in Fig. 1, which represents that the diameters of the particle sizes of less than 100 nm. For the structure and the operation procedure of SEM equipment, it can be found in [10].

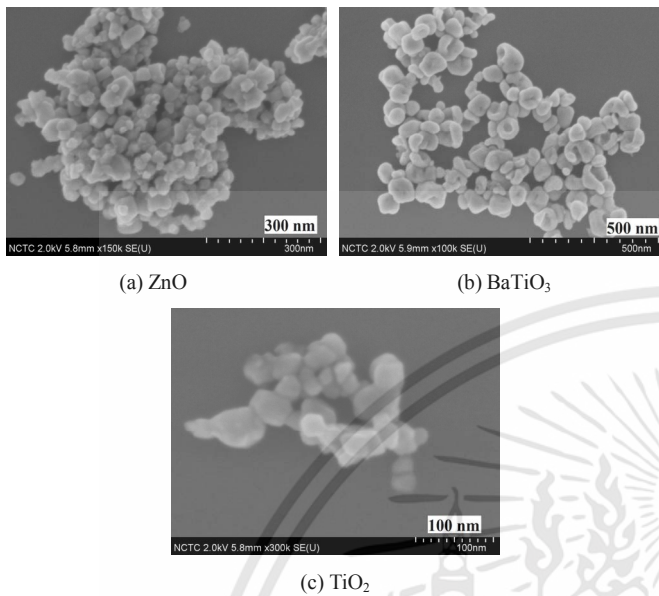


Fig. 1. SEM image of three kinds of nanoparticle

C. Mineral oil-based nanofluid preparation

Mineral oil-based nanofluids were prepared by mixing the unmodified mineral oil with ZnO, BaTiO₃ and TiO₂ nanoparticle. Six types of nanofluid samples were prepared as the followings:

- Nanofluid sample #1 consisted of the new mineral oil mixed with 0.01% volume fraction of ZnO.
- Nanofluid sample #2 prepared by mixing the 0.01% volume fraction of BaTiO₃ with the new mineral oil.
- Nanofluid sample #3 comprised 0.01% volume fraction of TiO₂ mixed with the new mineral oil.
- Nanofluid sample #4 prepared by mixing the 0.03% volume fraction of ZnO with the new mineral oil.
- Nanofluid sample #5 comprised 0.03% volume fraction of BaTiO₃ mixed with the new mineral oil.
- Nanofluid sample #6 consisted of the new mineral oil mixing with 0.03% volume fraction of TiO₂.

Preparation of the six nanofluid samples consisting of the unmodified mineral oil combined with the six different nanofluid samples was carried out according to the following three processes.

- Firstly, the new mineral oil was mixed with the specified nanoparticle with a specified volume fraction. In this stage of the process, the surfactant was also mixed with the mineral oil.
- Secondly, the nanofluid was dispersed using a magnetic stirrer for 30 minutes.

- Finally, ultrasonic dispersion was applied to the prepared nanofluids for 2 hours to ensure the homogeneity of the liquids.

In addition, the surfactant sorbitan monooleate (Span 80) was added in order to modify the surface of the nanoparticles. Span 80 has been proven to prevent agglomeration of nanoparticles in mineral oil and it is widely used for this purpose [11]. Magnetic stirring was necessary to disperse the nanopowders evenly in the base fluid, but the turbulence created was not enough to break-up all agglomeration of nanoparticles, therefore an ultrasonic mixing device was also employed for this purpose [2, 4].

D. Lightning impulse breakdown characteristic investigation

Lightning impulse (LI) breakdown test was performed with a needle-sphere electrode system according to IEC 60897 [12]. The test circuit diagram and experiment test set up are depicted in Fig. 2 and Fig. 3 respectively. In the experiment, the needle-sphere electrode configuration was set with the gap spacing of 15 mm, and the tungsten needle with the tip radius of 40 μ m was utilized as the high voltage electrode whereas the brass sphere with the diameter of 13 mm was used as the grounded electrode. The testing method following IEC 60897 was performed for the lightning impulse breakdown tests.

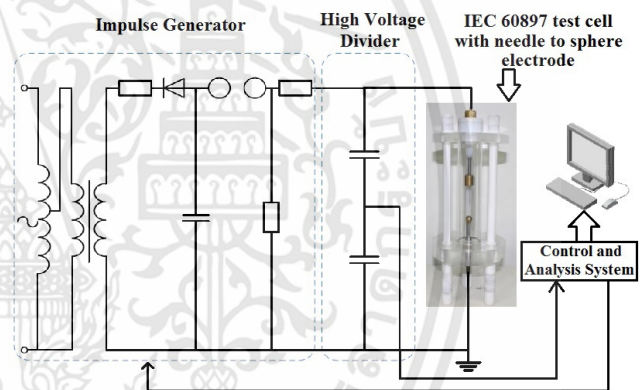


Fig. 2. Test circuit diagram for the experiment



Fig. 3. Test circuit set up for impulse breakdown experiment of the dielectric liquids. Where, 1 stands for the capacitive charger rated of 100 kV, 2 is the impulse generator rated of 200 kV 5 kJ, 3 stands for the capacitor rated of 4,200 pF 200 kV, 4 is the impulse high voltage divider rated of 100 kV and 5 stands for the test vessel according to IEC 60897.

III. TEST RESULTS AND ANALYSIS

A. Impulse breakdown voltage test results

The impulse breakdown strength is investigated to evaluate the impulse breakdown characteristics of the mineral oil. Usually the mean breakdown values are determined to estimate the quality of an insulating liquid. However, transformers are designed according to the minimum withstand voltage level of the insulation, rather than the mean withstand voltage. Fig.4 shows the average impulse breakdown voltages with the minimum and maximum values of the mineral oil and the mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃ and TiO₂ nanofluids respectively. The blue bar represents the impulse breakdown voltage of unmodified mineral oil, the orange bar depicts the impulse breakdown voltage of the mineral oil with ZnO nanofluid, the gray bar is for the impulse breakdown voltage of the mineral oil with BaTiO₃ nanofluids and the yellow bar represents the impulse breakdown voltage of the mineral oil with TiO₂ nanofluids.

Table I and Table II, represent the mean impulse breakdown voltages including percent increment of the impulse breakdown voltage of the tested nanofluids. As can be seen from Fig. 4. The positive impulse breakdown of the mineral oil with ZnO is improved while other added nanoparticles have no effect. However, all three nanoparticle types cause lower the negative impulse breakdown voltages compared with those of the unmodified mineral oil. More detail analysis shows that the type and volume fraction of the nanoparticles will strongly influence the impulse breakdown voltage results.

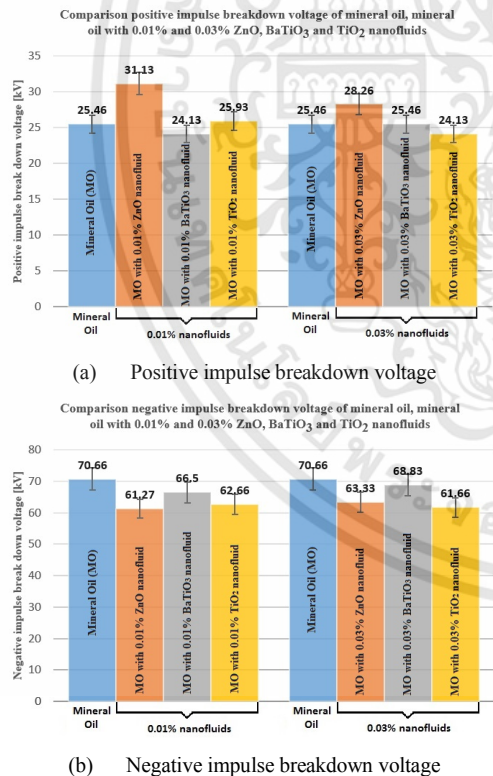


Fig.4. Comparison of average impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃, and TiO₂ minimum and maximum values indicated by markers.

TABLE I. Results of positive impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃, and TiO₂

| Mineral oil | Impulse Breakdown Voltage (kV) | | | % increase | | |
|-------------|---|--------------------|------------------|------------|--------------------|------------------|
| | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| 25.46 | 31.13 | 24.13 | 25.93 | 22.27 | -5.22 | 1.84 |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| 25.46 | 28.26 | 25.46 | 24.13 | 10.99 | 0 | -5.22 |

TABLE II. Results of negative impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃, and TiO₂

| Mineral oil | Impulse Breakdown Voltage (kV) | | | % increase | | |
|-------------|---|--------------------|------------------|------------|--------------------|------------------|
| | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ | ZnO | BaTiO ₃ | TiO ₂ |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| 70.66 | 61.27 | 66.5 | 62.66 | -13.28 | -5.88 | -11.32 |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| 70.66 | 63.33 | 68.83 | 61.66 | -10.37 | -2.58 | -12.73 |

B. Weibull analysis of impulse breakdown voltage test results

Weibull fitting was used to analyze the impulse breakdown results of mineral oil, mineral oil with ZnO, mineral oil with BaTiO₃ and mineral oil with TiO₂ nanofluids. In this work, 2-parameter Weibull plot was used. For 2-parameter Weibull plot, the impulse breakdown probabilities are calculated as:

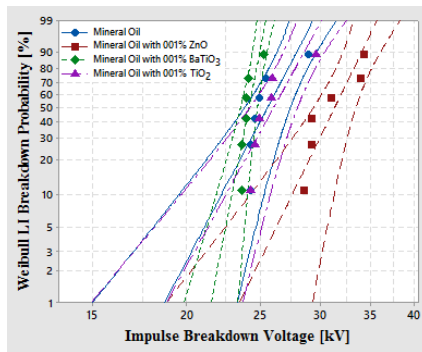
$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

Where $F(x)$ is the cumulative probability of breakdown voltage; x is the impulse breakdown voltage; β is the shape parameter; η is the scale parameter. In the Weibull plot, the correlation coefficient ρ is a measure of how well the linear regression model fits the data [1-2]. Correlation coefficients are statistics that quantify the relation between two variables in unit free terms as described in [13].

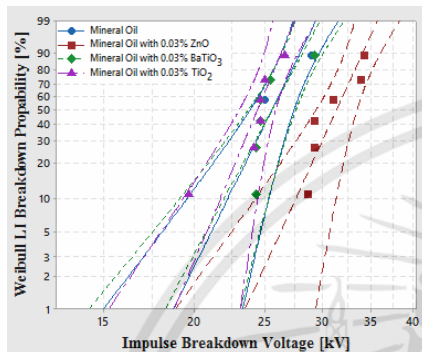
In the Weibull distributions, the impulse breakdown voltage of the mineral oil is represented with blue dots, the impulse breakdown voltage of the mineral oil with ZnO nanofluid is depicted with red square, the impulse breakdown voltage of the mineral oil with BaTiO₃ nanofluid is designated with green diamonds. Whereas purple triangles represent the impulse breakdown voltage of the mineral oil with TiO₂ nanofluid.

TABLE III. Shape & scale parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃, and TiO₂

| | Mineral Oil [MO] | MO with 0.01% ZnO | MO with 0.01% BaTiO ₃ | MO with 0.01% TiO ₂ | MO with 0.03% ZnO | MO with 0.03% BaTiO ₃ | MO with 0.03% TiO ₂ |
|------------------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Positive impulse breakdown voltage | | | | | | | |
| β | 13.53 | 14.62 | 36.64 | 12.99 | 14.62 | 12.44 | 16.09 |
| η | 26.31 | 32.23 | 24.44 | 26.84 | 32.23 | 26.37 | 25.01 |
| ρ | 0.81 | 0.94 | 0.84 | 0.86 | 0.94 | 0.78 | 0.85 |
| Negative impulse breakdown voltage | | | | | | | |
| β | 14.13 | 12.09 | 79.51 | 12.99 | 22.88 | 27.45 | 49.78 |
| η | 72.34 | 64.02 | 67.09 | 65.44 | 64.71 | 70.11 | 62.41 |
| ρ | 0.98 | 0.97 | 0.81 | 0.91 | 0.84 | 0.89 | 0.93 |

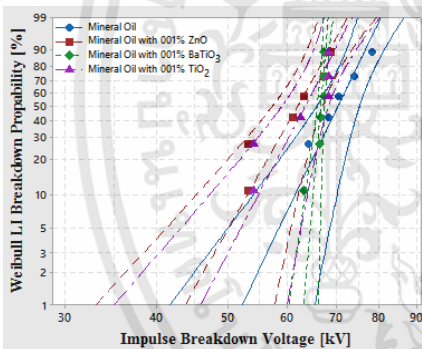


(a) positive impulse breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil mixed with the 0.01% nanoparticle

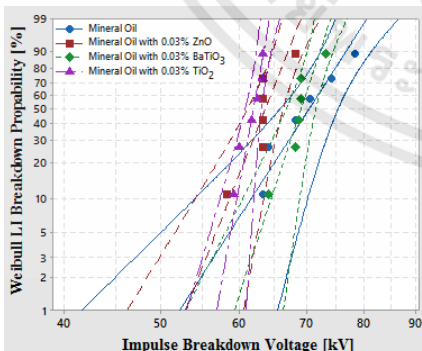


(b) positive impulse breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil mixed with the 0.03% nanoparticle

Fig.5. 2-parameter Weibull plot of the positive impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃, and TiO₂



(a) negative impulse breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil mixed with the 0.01% nanoparticle



(b) negative impulse breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil mixed with the 0.03% nanoparticle

Fig.6. 2-parameter Weibull plot of the negative impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO, BaTiO₃, and TiO₂

To statistically analyze the impulse breakdown voltages, Weibull distribution was used to fit the probability of impulse breakdown voltage test results. Weibull distribution plots of the linear fitting of the data are shown in Fig. 5 and Fig. 6. The Weibull plots of the samples that have a little overlap, which indicates that distinction can be made between the impulse breakdown voltage behavior of these three nanofluids. The scale and shape parameters, including correlation coefficient of Weibull distribution are obtained and given in Table III.

IV. CONCLUSION

This paper has presented experimental investigation of effects of nanoparticles ZnO, BaTiO₃ and TiO₂ on the impulse breakdown voltage properties of the mineral oil. Analysis of the data has shown that the impulse breakdown voltage of the mineral-oil based nanofluids is strongly influenced by the type of the nanoparticles added into the mineral oil. Among three types of the nanoparticles, the results have shown that ZnO, the nanoparticle being added to the mineral oil, can give the increase in the impulse breakdown voltage with the positive polarity. Other two nanoparticles when being added to the mineral oil lead to slight change in the impulse breakdown voltage with the positive polarity. For the negative polarity of the impulse breakdown voltage, there is no improvement being noticed by adding such the nanoparticles into the mineral oil.

REFERENCES

- [1] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [2] Huiwei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [3] Rongsheng Liu, Leif A.A. Pettersson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam.: 'Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), October 2011, pp. 423-427.
- [4] Pugazhendhi Sugumaran.C.: 'Experimental evaluation on dielectric and thermal characteristics of nano filler added transformer oil'. IEEE Conf. High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012, pp. 207-210.
- [5] S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, Nanofluids: Science and Technology, Wiley-Interscience, 2008.
- [6] S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles" Int'l. Mechanical Engineering Congress Exposition, pp. 99-105, 1995.
- [7] V. Segal, A. Hjortstam, A. Rabinovich, D. Natrass and K. Raj, "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 619-622, 1998.
- [8] 'Wide range of ELECTROL® Transformer oils', <http://www.rajgrp.com/wr%20electrol.html/>.
- [9] 'Inframat Advanced Materials LLC', <http://www.advancedmaterials.us>.
- [10] Robert W. Bauman.: 'Microbiology with Diseases by Body System' (Pearson Press, 2005, 5th edn. 2015).
- [11] Z. Han.: 'Nanofluids with enhanced thermal transport properties'. PhD thesis, University of Maryland at College Park, 2008.
- [12] IEC 60897, "Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids", Int'l. Electrotechnical Commission, 1987.
- [13] 'Correlation', <http://sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/correlation.pdf>.

ISLH2017

THE 3rd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
LIGHTNING PROTECTION AND HIGH VOLTAGE ENGINEERING

PROCEEDING BOOK



9-10 MARCH 2017

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
BANGKOK, THAILAND**

ORGANIZED BY

สารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ ใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
การณใดๆทั้งนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งสำหรับการนำไปใช้

ISLH | KMUTL



Effect of ZnO Nanoparticle on Impulse Breakdown in Mineral Oil

Pichai Muangpratoom^{1*}, Norasage Pattanadech², Anantawat Kunakorn³ and Wanwilai Vittayakorn⁴

High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering¹⁻³

Electroceramics Research Laboratory, College of Nanotechnology⁴

King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang

1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

e-mail: tagie_p@hotmail.com¹, norasage@yahoo.com², kkananta@kmitl.ac.th³ and kvwanwil@kmitl.ac.th⁴

Abstract

Mineral-oil base nanofluids are proved that the addition of suitable nanoparticles can increase the AC breakdown voltage and Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) compared with those of the unmodified mineral oil. In this paper, a standard impulse breakdown voltage of the mineral oil and the mineral-oil base nanofluids is investigated. One type of nanoparticle, i.e., Zinc oxide (ZnO) with the mean diameter less than 100 nm are used to prepare the nanofluid sample. The first group of the nanofluid sample consists of the mineral oil mixed with the 0.01% volume fraction of nanoparticle. Another group of nanofluid sample comprises the mineral oil mixed with the 0.03% volume fraction of nanoparticle. Besides, the surfactant sorbitan monooleate (Span 80) is added in order to modify the surface of the nanoparticles. The needle-sphere electrode configuration with the gap spacing of 15 mm is employed for impulse breakdown voltage investigation of the dielectric liquids. The test circuit is set up in accordance with IEC 60897, and the test experiment is performed at the room temperature. The results show that the addition of ZnO nanoparticle leads to the change in the impulse breakdown characteristics of the mineral oil in both positive and negative Impulse polarities.

Keywords: mineral oil, nanofluids, impulse breakdown voltage, Weibull analysis

1. Introduction

Mineral oil has been used since the first commercial oil-filled transformer was introduced, while dielectric fluids such as synthetic ester and natural ester are seen as a modern alternative. However, mineral-oil still plays an important role in the insulation of high voltage apparatus, especially power transformers and instrument transformers [1-2]. Focusing on the advancement of nanotechnologies and their application, nanoparticles hold promise that they can be used with mineral-oils to enhance their properties, which may lead to more compact designs and the reduction of manufacturing costs [3-4]. The conception of utilizing nanoparticles for improving physical properties of liquids such as the enhancement of the thermal conductivity of the conventional fluid was initiated by Choi in 1993 [5-6]. Since 1995, a number of publications dealing with nanofluids have been growing at

an average of around 32% per year [2]. Moreover, the research on dielectric properties of oil-based nanofluids started in 1998 by Segal et al. to improve dielectric properties of transformer oil with adding magnetite nanoparticles [7]. Several different nanoparticles, which include the nanomaterial such as Zinc oxide (ZnO) additives have been investigated with the aim of improving the dielectric properties of liquid insulating materials. Most of research works have dealt with the nanofluid properties with different volume concentration of nanoparticles and various nanofluid preparation procedures.

In this paper the experiments were performed to investigate the dielectric properties of the mineral oil-based nanofluids when selected nanoparticles were mixed into a commonly used mineral oil so that their impulse breakdown voltage characteristics could be observed. The hypothesis of this research work is that the impulse breakdown voltage of the mineral oil would be noticeably increased with the addition of nanoparticles. In this investigation, the nanomaterial, ZnO, was selected to mix with the new unmodified mineral oil to produce the mineral oil-based nanofluid test samples. Comparison of impulse breakdown voltage of the nanomaterial mineral oil and of the mineral oil is presented.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Mineral oil characteristics and preparation for investigation

The mineral oil, ELECTROL®-A, uninhibited mineral oil type, is employed in this study, and this mineral oil which is widely used in high voltage transformers. The mineral oil characteristics are in [8]. The new mineral oil was heated at 60 °C under vacuum condition for 24 hours before it was mixed with the selected nanoparticles to prepare mineral oil-based nanofluid sample.

2.2 Nanoparticle characteristics and preparation

One nanoparticle material, ZnO (size < 100 nm) was used in this research. Characteristics of the nanomaterial used in this study can be found from a data sheet provided by the manufacturers [9].

The diameter of the dry nanopowder were examined by scanning electron microscope (SEM) techniques as shown in Fig. 1, which represents that the diameters of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

particle sizes of less than 100 nm. For the structure and the operation procedure of SEM equipment, it can be found in [10].

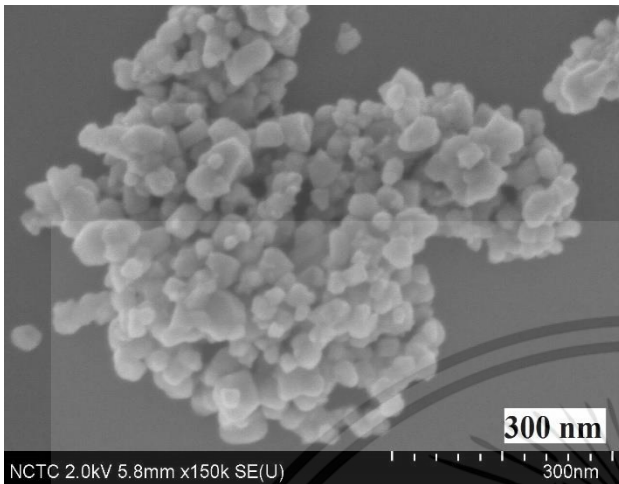


Fig. 1. SEM image of ZnO nanoparticle

2.3 Mineral oil-based nanofluid preparation

Mineral oil-based nanofluid was prepared by mixing the unmodified mineral oil with ZnO nanoparticle. Two types of nanofluid samples were prepared as the followings:

- Nanofluid sample #1 consisted of the new mineral oil mixed with 0.01% volume fraction of ZnO.
- Nanofluid sample #2 prepared by mixing the 0.03% volume fraction of ZnO with the new mineral oil.

Preparation of the two nanofluid samples consisting of the unmodified mineral oil combined with the two different nanofluid samples was carried out according to the following three processes.

- Firstly, the new mineral oil was mixed with the specified nanoparticle with a specified volume fraction. In this stage of the process, the surfactant was also mixed with the mineral oil.
- Secondly, the nanofluid was dispersed using a magnetic stirrer for 30 minutes.
- Finally, ultrasonic dispersion was applied to the prepared nanofluids for 2 hours to ensure the homogeneity of the liquids.

In addition, the surfactant sorbitan monooleate (Span 80) was added in order to modify the surface of the nanoparticles. Span 80 has been proven to prevent agglomeration of nanoparticles in mineral oil and it is widely used for this purpose [11]. Magnetic stirring was necessary to disperse the nanopowders evenly in the base fluid, but the turbulence created was not enough to break-up all agglomeration of nanoparticles, therefore an ultrasonic mixing device was also employed for this purpose [2, 4].

2.4 Lightning impulse breakdown characteristic investigation

Lightning impulse (LI) breakdown test was performed with a needle-sphere electrode system according to IEC

60897 [12]. The test circuit diagram and experiment test set up are depicted in Fig. 2 and Fig. 3 respectively. In the experiment, the needle-sphere electrode configuration was set with the gap spacing of 15 mm, and the tungsten needle with the tip radius of 40 μm was utilized as the high voltage electrode whereas the brass sphere with the diameter of 13 mm was used as the grounded electrode. The testing method following IEC 60897 was performed for the lightning impulse breakdown tests.

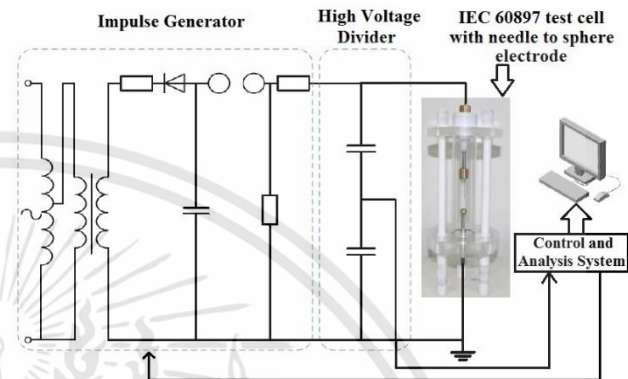


Fig. 2. Test circuit diagram for the experiment



Fig. 3. Test circuit set up for impulse breakdown experiment of the dielectric liquids. Where, 1 stands for the capacitive charger rated of 100 kV, 2 is the impulse generator rated of 200 kV 5 kJ, 3 stands for the capacitor rated of 4,200 pF 200 kV, 4 is the impulse high voltage divider rated of 100 kV and 5 stands for the test vessel according to IEC 60897.

3 Test Results and Analysis

3.1 Impulse breakdown voltage test results

The impulse breakdown strength is investigated to evaluate the impulse breakdown characteristics of the mineral oil. Usually the mean breakdown values are determined to estimate the quality of an insulating liquid. However, transformers are designed according to the minimum withstand voltage level of the insulation, rather than the mean withstand voltage. Fig.4 shows the average impulse breakdown voltages with the minimum and maximum values of the mineral oil and the mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO nanofluids respectively. The blue bar represents the impulse breakdown voltage of unmodified mineral oil, the orange bar depicts the impulse breakdown voltage of the mineral oil with 0.01% ZnO nanofluid and the gray bar is for the impulse breakdown voltage of the mineral oil with 0.03% ZnO nanofluids.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table I, represent the mean positive and negative impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO. As can be seen from Fig. 4, compares test results of the AC impulse breakdown voltage value for mineral-oil and mineral-oil based nanofluids. However, ZnO nanoparticle type cause lower the negative impulse breakdown voltages compared with those of the unmodified mineral oil. More detail analysis shows that the type and volume fraction of the nanoparticles will strongly influence the impulse breakdown voltage results.

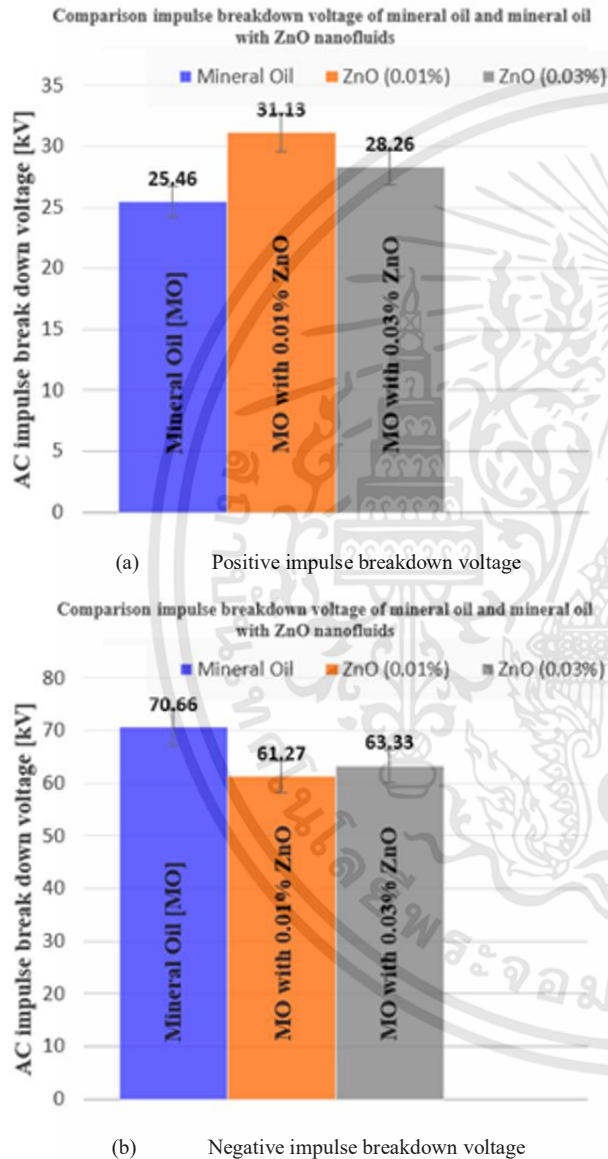


Fig.4. Comparison of average impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO minimum and maximum values indicated by markers.

TABLE I
Results of positive and negative impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO

| | Positive (kV) | Negative (kV) |
|---|---------------|---------------|
| Mineral Oil | +25.46 | -70.66 |
| Mineral oil with addition of ZnO of 0.01% by volume | +31.13 | -61.27 |
| Mineral oil with addition of ZnO of 0.03% by volume | +28.26 | -63.33 |

3.2 Weibull analysis of impulse breakdown voltage test results

Weibull fitting was used to analyze the impulse breakdown results of mineral oil, mineral oil with ZnO nanofluids. In this work, 2-parameter Weibull plot was used. For 2-parameter Weibull plot, the impulse breakdown probabilities are calculated as:

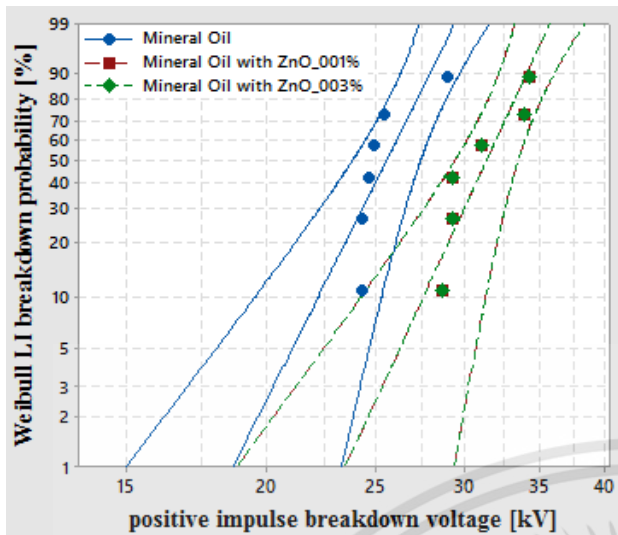
$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

Where $F(x)$ is the cumulative probability of breakdown voltage; x is the impulse breakdown voltage; β is the shape parameter; η is the scale parameter. In the Weibull plot, the correlation coefficient ρ is a measure of how well the linear regression model fits the data [1-2]. Correlation coefficients are statistics that quantify the relation between two variables in unit free terms as described in [13].

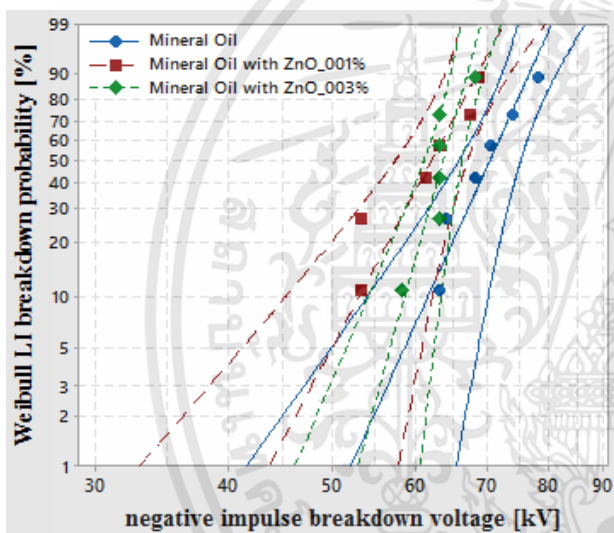
In the Weibull distributions, the impulse breakdown voltage of the mineral oil is represented with blue dots, the impulse breakdown voltage of the mineral oil with 0.01% ZnO nanofluid is depicted with red square, the impulse breakdown voltage of the mineral oil with 0.03% ZnO nanofluid is designated with green diamonds.

TABLE II
Shape & scale parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO

| | Mineral Oil [MO] | MO with 0.01% ZnO | MO with 0.03% ZnO |
|---|------------------|-------------------|-------------------|
| <i>Positive impulse breakdown voltage</i> | | | |
| β | 13.53 | 14.62 | 14.62 |
| η | 26.31 | 32.23 | 32.23 |
| ρ | 0.81 | 0.94 | 0.94 |
| <i>Negative impulse breakdown voltage</i> | | | |
| β | 14.13 | 12.09 | 22.88 |
| η | 72.34 | 64.02 | 64.71 |
| ρ | 0.98 | 0.97 | 0.84 |



(a) positive impulse breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil mixed with ZnO nanoparticle



(b) negative impulse breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil mixed with ZnO nanoparticle

Fig.5. 2-parameter Weibull plot of the impulse breakdown voltage of mineral oil and mineral oil with 0.01% and 0.03% ZnO nanoparticles

To statistically analyze the impulse breakdown voltages, Weibull distribution was used to fit the probability of impulse breakdown voltage test results. Weibull distribution plots of the linear fitting of the data are shown in Fig. 5. The Weibull plots of the samples that have overlap between 0.01% and 0.03% ZnO are depicted in Fig. 5a. However, Fig. 5b the samples that have a little overlap, which indicates that distinction can be made between the impulse breakdown voltage behavior of these three nanofluids. The scale and shape parameters, including correlation coefficient of Weibull distribution are obtained and given in Table II.

4. Conclusion

This paper has presented experimental investigation of effects of nanoparticle ZnO on the impulse breakdown

voltage properties of the mineral oil. Analysis of the data has shown that the impulse breakdown voltage of the mineral-oil based nanofluids is strongly influenced by the type of the nanoparticles added into the mineral oil. Among one type of the nanoparticle, the results have shown that ZnO, the nanoparticle being added to the mineral oil, can give the increase in the impulse breakdown voltage with the positive polarity. For the negative polarity of the impulse breakdown voltage, there is no improvement being noticed by adding such the nanoparticles into the mineral oil.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the technical support from Ms. Nattakarn Poolphol Ph.D. student, College of Nanotechnology and staff at High Voltage Engineering Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

Some part of financial support from Faculty of Engineering, KMITL for providing the facility in this research work and the Research Funding No. 2559-01-01021 for financial support.

References

- [1] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [2] Huifei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [3] Rongsheng Liu, Leif A.A. Pettersson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam.: 'Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers'. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), October 2011, pp. 423-427.
- [4] Pugazhendhi Sugumaran.C.: 'Experimental evaluation on dielectric and thermal characteristics of nano filler added transformer oil'. IEEE Conf. High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012, pp. 207-210.
- [5] S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, Nanofluids: Science and Technology, Wiley-Interscience, 2008.
- [6] S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles" Int'l. Mechanical Engineering Congress Exposition, pp. 99-105, 1995.
- [7] V. Segal, A. Hjortstam, A. Rabinovich, D. Natrass and K. Raj, "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 619-622, 1998.
- [8] 'Wide range of ELECTROL® Transformer oils', <http://www.rajgrp.com/wr%20electrol.html/>.
- [9] 'Inframat Advanced Materials LLC', <http://www.advancedmaterials.us>.
- [10] Robert W. Bauman.: 'Microbiology with Diseases by Body System' (Pearson Press, 2005, 5th edn. 2015).
- [11] Z. Han.: 'Nanofluids with enhanced thermal transport properties'. PhD thesis, University of Maryland at College Park, 2008.
- [12] IEC 60897, "Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids", Int'l. Electrotechnical Commission, 1987.
- [13] 'Correlation', <http://sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/correlation.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CMD2016

International Conference on
Condition Monitoring and Diagnosis

cmd2016.xjtu.edu.cn

25-28 September, 2016 | Xi'an, China





CMD2016

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2016

| | |
|--|----|
| WELCOME MESSAGE FROM THE CHAIRMAN..... | 3 |
| ORGANIZING COMMITTEES..... | 4 |
| LOCATION..... | 6 |
| CONNECTIONS TO XI'AN..... | 8 |
| FLOOR MAP..... | 9 |
| SPONSORS..... | 10 |
| CONFERENCE INFORMATION..... | 13 |
| OFFICAL & SOCIAL EVENTS..... | 16 |
| TECHNICAL TOUR..... | 17 |
| GENERAL INFORMATION..... | 21 |
| PLENARY SPEAKERS..... | 22 |
| TECHNICAL PROGRAM..... | 25 |
| AUTHOR INDEX..... | 60 |

Dielectric Breakdown Strength of Mineral Oil Based Nanofluids

Pichai Muangpratoom^{1*} and Norasage Pattanadech²

High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1 Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

E-mail: tagie_p@hotmail.com¹ and norasage@yahoo.com²

Abstract— In this paper, the dielectric properties of the mineral oil-based nanofluids was studied. The aim of this research is to improve electrical property of the mineral oil by applying nanotechnology knowledge. Three types of nanoparticle i.e. Titanium dioxide (TiO₂), Barium titanate (BaTiO₃) and Zinc oxide (ZnO) with the mean diameter less than 100 nm were used in the experiment. The nanofluid samples, the mineral oil mixed with nanoparticle, were prepared in three processes. Firstly, the mineral oil was mixed with 0.01% of nanoparticle volume fraction of nanoparticle. Besides, the mineral oil was also mixed with 0.03% of nanoparticle volume fraction. Then it was dispersed by using a magnetic stirrer. Finally, the ultrasonic dispersant technique was applied for the prepared nanofluids to ensure the homogeneity of such liquid. To measure the AC breakdown voltages, an oil breakdown tester (FOSTER OTS 60AF) was used. The gap distance between electrodes was set to be 2.5 mm. The testing was carried out 6 times for each liquid test sample according to IEC 60156. The test results showed that the AC breakdown property of the modified liquid was strongly influenced by the type of the nanoparticles added. With the addition of nanoparticles, the AC breakdown voltage increased slightly above that of the mineral oil (37 kV). In case of 0.01% nanoparticle volume fraction, the AC breakdown voltage of the mineral oil with TiO₂, the mineral oil with BaTiO₃ and the mineral oil with ZnO was 42 kV, 45 kV and 46 kV respectively. For 0.03% nanoparticle volume fraction, the AC breakdown voltage of the mineral oil with TiO₂, the mineral oil with BaTiO₃ and the mineral oil with ZnO was 45 kV, 48 kV and 60 kV respectively. From these results, it is indicated that nanoparticles is a good candidate to develop mineral oil-based nanofluids for dielectric applications.

Keywords— mineral oil; nanofluids; breakdown voltage; Weibull analysis

I. INTRODUCTION

Transformer is one of the most important parts of the power generation and distribution network. A transformer transfers electrical energy from a power plant to a user. Generally, there are two kinds of insulating materials using in the transformer, e.g., cellulose and mineral oil. Cellulose is used for electrical insulating and mechanical purpose. Whereas, mineral oil is responsible for both electrical insulating function and cooling media [1-3]. Retrospectively, mineral oil has been used since the first commercial oil-filled transformer was introduced. Currently, alternative dielectric fluids are interested to be used as transformer dielectric materials. However, the mineral oil

still plays an important role for the insulation high voltage apparatus especially power transformers and instrument transformers [4-5]. Focusing on the advancement of nanotechnologies and their application, some kinds of nanoparticles are very promising materials which can be applied with mineral oil to enhance the mineral oil properties which may lead to a compact design and reduced manufacturing cost of transformers [2-4].

In this paper, dielectric properties of the mineral oil-based nanofluids were studied on the basis of experimental works. Selected nanoparticles were mixed into the mineral oil and then their breakdown voltage characteristics were investigated. The hypothesis of this research work was that the breakdown voltage of the mineral oil would be increased with the addition of a certain quantity of nanoparticles. In this investigation, Titanium Dioxide (TiO₂), Barium Titanate (BaTiO₃) and Zinc Oxide (ZnO) were selected to mix with the mineral oil as mineral oil-based nanofluid test sample.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Mineral oil based nanofluid preparation

Mineral oil based nanofluids were prepared by mixing with TiO₂, BaTiO₃ and ZnO (size < 100 nm) nanoparticles. The SEM image of three kinds of nanoparticle are illustrated in Fig.1. For the nanofluid preparation, the nanofluid samples (the mineral oil mixed with nanoparticle) were prepared in three processes. Firstly, the mineral oil was mixed with 0.01% nanoparticle volume fraction of the specified nanoparticle. Besides, the mineral oil was also mixed with 0.03% nanoparticle volume fraction of such nanoparticle. Secondly, the nanofluids was dispersed by using a magnetic stirrer for 30 minutes. Finally, the ultrasonic dispersant technique was done for 2 hours to get a well dispersed nanofluid was applied for the prepared nanofluids to ensure the homogeneity of such liquid. The magnetic stirring helped to disperse the nanopowders evenly in the base fluid, but the energy is not enough to break any agglomeration of nanoparticles. Therefore, the ultrasonic mixing device was used to break the agglomerations of nanoparticles [6-10]. The nanofluids preparation process is depicted in Fig.2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

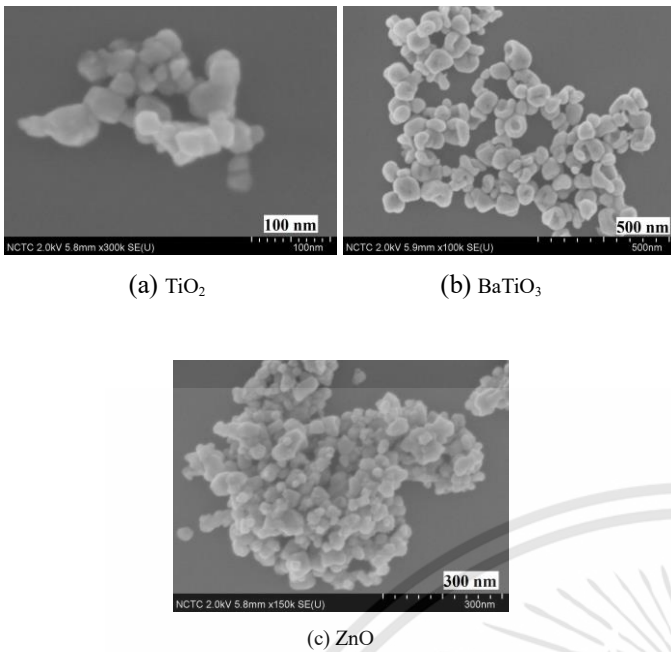


Fig. 1. SEM image of three kinds of nanoparticle

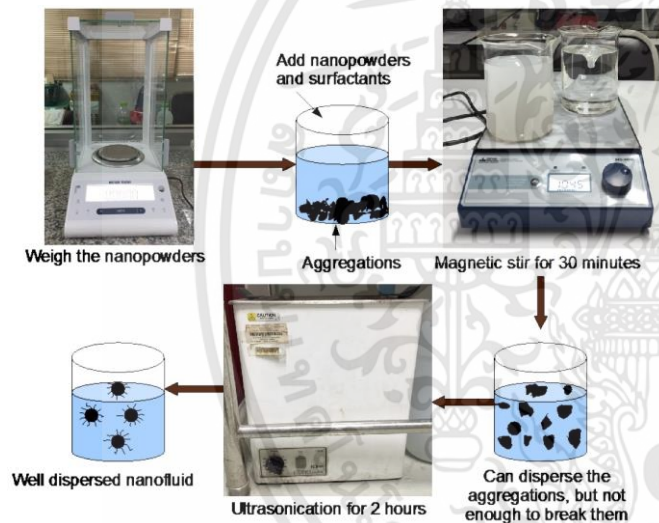


Fig. 2. Schematic diagram of nanofluids preparation process.

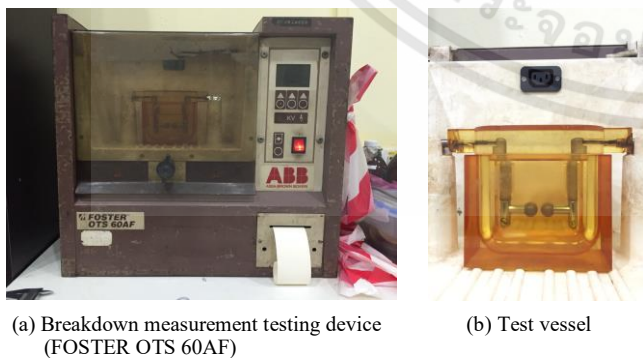


Fig. 3. Dielectric breakdown testing device and test vessel.

B. Breakdown characteristic investigation

The AC breakdown strength of the mineral oil based nanofluids can be tested according to IEC 60156 [11], ASTM D 1816 [12] or ASTM D877 [13]. To investigate AC breakdown voltages of mineral oil based nanofluids, an oil breakdown tester (FOSTER OTS 60AF) was employed. The gap distance between electrodes was fixed at 2.5 mm. The testing was carried out 6 times for each liquid test sample according to IEC 60156. Three samples of each nanofluids were investigated. The mean value of the breakdown test results was computed. All experiments were performed at room temperature. The testing equipment are illustrated in Fig. 3.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. AC breakdown voltage test results

The AC breakdown strength is measured to evaluate the quality of mineral oil. Usually the mean breakdown values are determined to estimate the quality of an insulating liquid. However, transformers are designed according to the minimum withstand voltage level of the insulation, rather than the mean withstand voltage. Fig.4 shows the average AC breakdown voltage with the minimum and maximum values of mineral oil, mineral oil with 0.01% and 0.03% TiO_2 , BaTiO_3 and ZnO nanofluids. The blue bar represents the breakdown voltage of mineral oil, the orange bar depicts the breakdown voltage of mineral oil with TiO_2 nanofluid, the gray bar is for the breakdown voltage of mineral oil with BaTiO_3 nanofluids and the yellow bar represents the breakdown voltage of mineral oil with ZnO nanofluids. Moreover, from Table I, it is observed that there is an increase in the AC breakdown voltage value for 0.01% nanofluids volume fraction about 13.51%, 21.62% and 24.32% for the mineral oil with TiO_2 , the mineral oil with BaTiO_3 and the mineral oil with ZnO respectively. In case of 0.03% nanofluids volume fraction, an increase in AC breakdown is about 21.62%, 29.72% and 62.16% for the mineral oil with TiO_2 , the mineral oil with BaTiO_3 and the mineral oil with ZnO respectively.

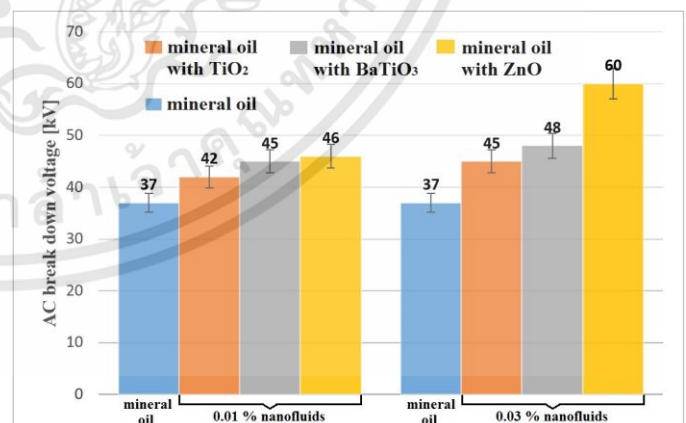


Fig. 4. Comparison of average AC breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.01% and 0.03% TiO_2 , BaTiO_3 , and ZnO , minimum and maximum values indicated by markers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I. Results of the AC breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.01% and 0.03% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO.

| Breakdown Voltage (kV) | | | | % increment | | |
|------------------------|---|--------------------|-----|------------------|--------------------|-------|
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.01% nanofluids | | | | | |
| | TiO ₂ | BaTiO ₃ | ZnO | TiO ₂ | BaTiO ₃ | ZnO |
| | 37 | 42 | 45 | 46 | 13.51 | 21.62 |
| Mineral oil | Mineral oil mixed with 0.03% nanofluids | | | | | |
| | TiO ₂ | BaTiO ₃ | ZnO | TiO ₂ | BaTiO ₃ | ZnO |
| | 37 | 45 | 48 | 60 | 21.62 | 29.72 |

B. Weibull analysis of AC breakdown test results

Weibull fitting was used to analyze the AC breakdown results of mineral oil, mineral oil with TiO₂, mineral oil with BaTiO₃ and mineral oil with ZnO nanofluids. In the analysis, 2-parameter Weibull plot was used. For 2-parameter Weibull plot, the breakdown probabilities are calculated as:

$$F(x) = 1 - \exp\{-(x/\eta)^\beta\} \quad (1)$$

Where $F(x)$ is the cumulative probability of breakdown voltage; x is AC breakdown voltage; β is the shape parameter; η is the scale parameter. In the Weibull plot the correlation coefficient ρ is a measure of how well the linear regression model fits the data [4, 9]. In the Weibull distributions, AC breakdown voltage of the mineral oil is represented with black circles, AC breakdown voltage of the mineral oil with TiO₂ nanofluid is depicted with red square, AC breakdown voltage of the mineral oil with BaTiO₃ nanofluid is designated with green quadrangle. Whereas blue triangle represents AC breakdown voltage of the mineral oil with ZnO nanofluid.

Fig. 5-6 illustrate the 2-parameter Weibull analysis of the AC breakdown voltage of the mineral oil, the mineral oil with 0.01% and 0.03% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO with 95% confidence bounds respectively.

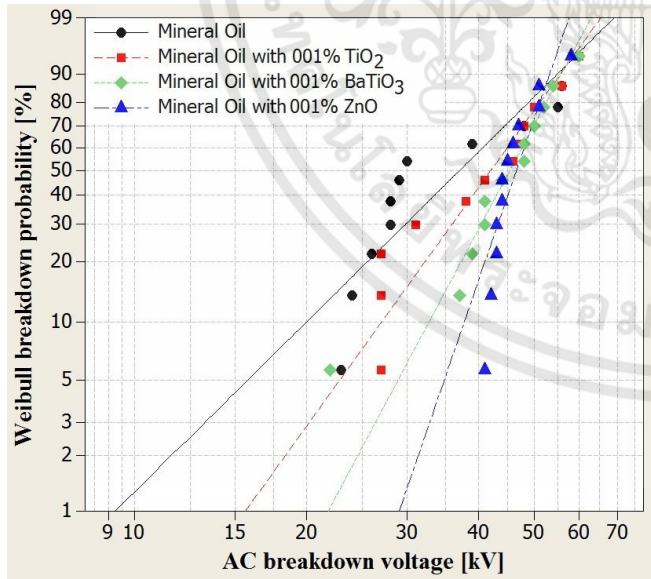


Fig. 5. 2-parameter Weibull plot of the AC breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.01% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO.

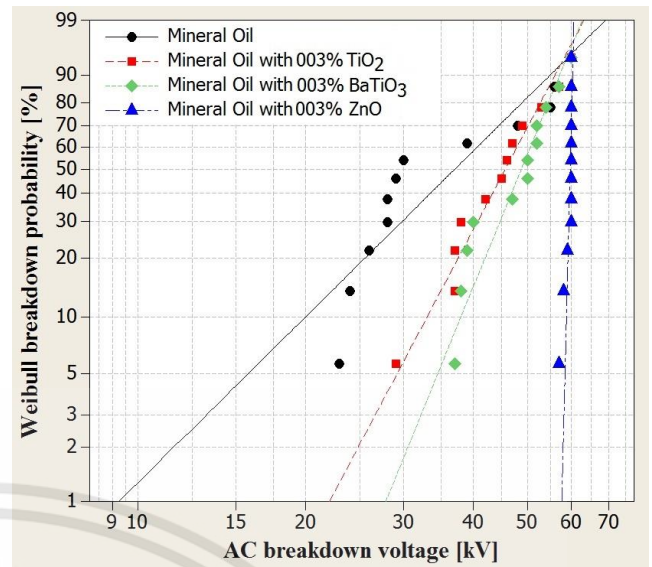


Fig. 6. 2-parameter Weibull plot of the AC breakdown voltage of mineral oil, mineral oil with 0.03% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO.

TABLE II. Parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil, mineral oil with 0.01% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO.

| Parameters | Mineral oil | Mineral oil with 0.01% TiO ₂ | Mineral oil with 0.01% BaTiO ₃ | Mineral oil with 0.01% ZnO |
|------------|-------------|---|---|----------------------------|
| β | 3.048 | 4.279 | 5.787 | 8.965 |
| η | 41.75 | 45.74 | 48.28 | 48.50 |
| ρ | 0.834 | 0.378 | 0.216 | 0.909 |

TABLE III. AC breakdown voltage at different breakdown probabilities of mineral, mineral oil with 0.01% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO with 2-parameter Weibull calculation

| Breakdown probabilities [%] | Mineral oil | Mineral oil with TiO ₂ (0.01%) | | Mineral oil with BaTiO ₃ (0.01%) | | Mineral oil with ZnO (0.01%) | |
|-----------------------------|-------------|---|----------|---|----------|------------------------------|----------|
| | BD [kV] | BD [kV] | increase | BD [kV] | increase | BD [kV] | increase |
| 1 | 9.2 | 15.6 | 70% | 21.8 | 137% | 29 | 215% |
| 5 | 15.7 | 22.8 | 45% | 28.8 | 83% | 34.8 | 122% |
| 20 | 25.5 | 32.2 | 26% | 37.2 | 46% | 41 | 61% |
| 63.2 | 41.7 | 45.7 | 10% | 48.2 | 16% | 48.5 | 16% |

TABLE IV. Parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil, mineral oil with 0.03% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO.

| Parameters | Mineral oil | Mineral oil with 0.03% TiO ₂ | Mineral oil with 0.03% BaTiO ₃ | Mineral oil with 0.03% ZnO |
|------------|-------------|---|---|----------------------------|
| β | 3.048 | 5.830 | 7.547 | 122 |
| η | 41.75 | 48.58 | 51.18 | 59.87 |
| ρ | 0.834 | 0.199 | 0.382 | 2.938 |

TABLE V. AC breakdown voltage at different breakdown probabilities of mineral, mineral oil with 0.03% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO with 2-parameter Weibull calculation

| Breakdown probabilities [%] | Mineral oil | Mineral oil with TiO ₂ (0.03%) | | Mineral oil with BaTiO ₃ (0.03%) | | Mineral oil with ZnO (0.03%) | |
|-----------------------------|-------------|---|----------|---|----------|------------------------------|----------|
| | BD [kV] | BD [kV] | increase | BD [kV] | increase | BD [kV] | increase |
| 1 | 9.2 | 22 | 140% | 27.8 | 202% | 57.6 | 526% |
| 5 | 15.7 | 29.1 | 85% | 34.5 | 120% | 58.4 | 272% |
| 20 | 25.5 | 37.5 | 47% | 41.9 | 64% | 59.1 | 132% |
| 63.2 | 41.7 | 48.5 | 16% | 51.1 | 23% | 59.8 | 43.4% |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table II represents the correlation coefficient of the mineral oil, the mineral oil with 0.01% TiO₂, BaTiO₃ and ZnO which are 0.834, 0.378, 0.213 and 0.909 respectively. Besides, the correlation coefficient of the Weibull fits of such four fluids are 0.834, 0.199, 0.382 and 2.938 respectively.

Table III represents the mean value of AC breakdown voltage of the mineral oil compared with that of the mineral oil with nanoparticle. The breakdown voltage of the mineral oil nanofluid increases 10%, 16% and 16% for the mineral oil mixed with 0.01% TiO₂, 0.01% BaTiO₃ and 0.01% ZnO respectively. In case of 0.03% volume fraction of nanoparticle, the mineral oil mixed with 0.03% TiO₂, 0.03% BaTiO₃ and 0.03% ZnO respectively causes the increasing of the breakdown voltage 16%, 23% and 43.4% respectively.

IV. CONCLUSIONS

In this study, the AC breakdown voltage characteristics of the mineral oil based nanofluids were investigated. The test results showed that the AC breakdown property of the modified liquid was strongly influenced by the type of the nanoparticles added. With the addition of nanoparticles, the AC breakdown voltage increased slightly above that of the mineral oil. From the test result, it was indicated that the nanoparticles used in the experiment were good candidates to develop mineral oil for dielectric applications.

ACKNOWLEDGMENT

The present work was supported by Assistant Professor Dr. Wanwilai Vittayakorn and staff of College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). The authors gratefully acknowledged the support of all staff at high voltage laboratory, KMITL.

Some part of financial support from Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work and the Research Funding No. 2559-01-01021 for financial support.

REFERENCES

- [1] Jong-Chul Lee, Hyeon-Seok Seo, Youn-Jea Kim, "The increased dielectric breakdown voltage of transformer oil-based nanofluids by an external magnetic field," 2012 ELSEVIER, pp. 29-33, International Journal of Thermal Sciences 62, (2012).
- [2] Rongsheng Liu, Leif A.A. Pettersson, Tommaso Auletta, Olof Hjortstam, "Fundamental Research on the Application of Nano Dielectrics to Transformers," 2011 IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 423-427, October 2011.
- [3] Muhammad Rafiq, Wei Wang, Kaibo Ma, You Zhou, Qi Wang, ChengrongLi, YuzhenLv, "Insulating and Aging Properties of Transformer Oil-Based TiO₂ Nanofluids," 2014 IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 457-461, 2014.
- [4] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.

- [5] Huifei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [6] Pugazhendhi Sugumaran.C, "Experimental Evaluation on Dielectric and Thermal Characteristics of Nano Filler Added Transformer Oil," 2012 IEEE, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, pp. 207-210, September 17-20, 2012.
- [7] Diaa-Eldin A. Mansour, Eman G. Atiya, Reham M. Khattab, Ahmed M. Azmy, "Effect of Titania Nanoparticles on the Dielectric Properties of Transformer Oil-Based Nanofluids," 2012 IEEE, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report, pp. 295-298, 2012.
- [8] J. Kudelcik, P. Bury, P. Kopcansky, M. Timkob, "Dielectric breakdown in mineral oil ITO 100 based magnetic fluid," 2010 ELSEVIER, pp. 78-81, 12th International Conference on Magnetic Fluids, (2010).
- [9] J. Ghasemi, S.Jafarmadar, M.Nazari, "Effect of magnetic nano particles on the lightning impulse breakdown voltage of transformer oil," 2015 ELSEVIER, pp. 148-152, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2015).
- [10] Yuzhen. Lv, Wei. Wang, Kaibo. Ma, Shengnan. Zhang, You. Zhou, Chengrong. Li, Qi Wang, "Nanoparticle Effect on Dielectric Breakdown Strength of Transformer Oil-Based Nanofluids," 2013 IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 680-682, 2013.
- [11] IEC 60156, "Insulating liquids Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method," INTERNATIONAL STANDARD, Second edition 1995-07, Reference number CEI/IEC 156: 1995.
- [12] ASTM D1816, "Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes," 2012 Edition, June 15, 2012.
- [13] ASTM D877, "Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes," 2nd Edition, 2007.



Pichai Muangpratoom received B.Eng. and M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand in 2006 and 2009 respectively. In 2016 he started his Ph.D. research in High Voltage Engineering Laboratory, department of electrical engineering at KMITL. His research interests include nanocomposite high voltage insulation material, partial discharge in insulating liquid, high voltage testing and high voltage measurement techniques.



Norasage Pattanadech received B.Eng. and M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 1998 and Chulalongkorn University in 2002, Thailand respectively. He was also rewarded for Dr. techn. from the Institute of High Voltage Engineering and System Management, Graz University of Technology, Austria, in 2013. Currently, he works as Associate Professor at King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His research activities have been mainly involved partial discharge in insulating liquid, solid insulator characteristics, high voltage testing and high voltage measurement techniques, high voltage equipment monitoring and diagnostic, lightning and grounding problems, and electromagnetic compatibility in high voltage field.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISLH 2016

The 2nd International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering



March 9-10, 2016
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

ISLH | KMUTL²⁰¹⁶

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION AND HIGH VOLTAGE ENGINEERING 2016



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Based Nanofluids

Pichai Muangpratoom¹, Thanatepon Apaisutaeporn² and Norasage Pattanadech³

High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok, Thailand

*Email: Tagie_p@hotmail.com¹, haed.thanetpol@gmail.com² norasage@yahoo.com³

Abstract

In this paper, the dielectric properties of transformer oil-based nanofluids was investigated. The aim of this research is to improve electrical property of the transformer oil by applying nanotechnology knowledge. Nanoparticles i.e., Barium Titanate (BaTiO_3) with the mean diameter less than 100 nm were used in the experiment. The nanofluid samples, mineral oil mixed with nanoparticle, were prepared in three processes. Firstly, the transformer oil was mixed with 0.01% volume fractions of the nanoparticle. Then, it was dispersed by using a magnetic stirrer. Finally, the ultrasonic dispersant technique was applied for the prepared nanofluids to ensure the homogeneity of such liquid. In addition, this paper is to describe the study of the Partial Discharge (PD) and Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) characteristics of mineral oil based BaTiO_3 nanofluids examined using the needle – plane electrode configurations. The tungsten needle electrodes with the tip radius of 10 μm , 20 μm , and 40 μm respectively were used as the high voltage electrode while the brass plane electrode with 75 mm diameter was used as the grounded electrode. The gap distance of the electrode system was set up at 40 mm. The test circuit was set up according to IEC 60270. The test procedure was performed in accordance with IEC 61294 under room temperature. From the test results, BaTiO_3 nanofluids demonstrated their properties to increase PDIV of the mineral oil based nanofluids compared to the reference mineral oil. From these results, it is indicated that the studied nanoparticles are good candidate to develop oil-based nanofluids for dielectric applications.

Keywords: breakdown voltage, partial discharge inception voltage, nanofluids, barium titanate, mineral oil

1. INTRODUCTION

Transformer is one of the most expensive and important parts of the power generation and distribution network. A transformer transfers electrical energy from the power plant to the user. Generally there are two kinds of insulating materials using in the transformer, e.g., cellulose and mineral oil. Cellulose is used for electrical insulating and mechanical purpose. Mineral oil is responsible for two major tasks: (1) as an insulating material; it prevents the passage of electricity to the outside of the electrical components and (2) as a cooling fluid, it transfers heat generated in the active parts of the transformer to the outside [1-3]. The mineral oil has been used

since the first commercial liquid-insulated transformer was produced. Currently, alternative dielectric fluids are interested to be used for dielectric applications. However, the mineral oil still plays an important role for insulation for high voltage apparatus especially for power transformers and instrument transformers [4]. Focusing on the advancement of science, nanotechnologies have potential to be applied for transformers in enhancing material properties which may lead to a compact design of transformer and reduced manufacturing cost [5]. In this paper, dielectric properties of nanofluids are studied on the basis of experimental works. Selected nanoparticles were added into the mineral oil. Then their Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) and Partial Discharge (PD) was investigated. The hypothesis of this research work was that PDIV of the mineral oil would be increased with the addition of a certain nanoparticle. Barium Titanate (BaTiO_3) was selected to mix with the mineral oil for investigation.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Mineral oil based nanofluid preparation

Mineral oil based nanofluid were prepared by mixing the mineral oil with BaTiO_3 (size < 100 nm) nanoparticles. The SEM Image of BaTiO_3 nanofillers is shown in Fig.1.

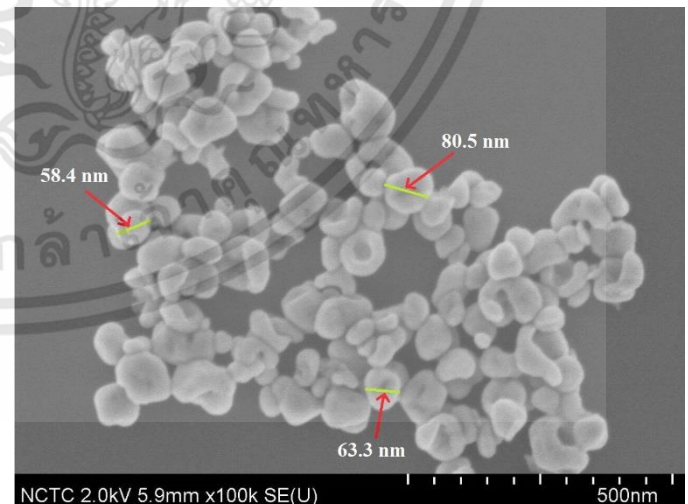


Figure 1. SEM Image of BaTiO_3 nanofiller

For nanofluid preparation in this study, the nanofluid samples, mineral oil mixed with nanoparticle, were prepared in three processes. Firstly the mineral oil was mixed with 0.01% nanoparticle volume fractions. Besides, the mineral oil

was also mixed with 0.03% nanoparticle volume fraction. Then, it was dispersed by using a magnetic stirrer at ambient temperature for 30 minutes. Finally, the ultrasonic dispersant technique was done for 2 hours to get a well dispersed nanofluid to ensure the homogeneity of such liquid. The magnetic stirring helps to disperse the nanopowders evenly in the base fluid, but the energy is not enough to break any agglomeration of nanoparticles. So an ultrasonic bath is used to break the agglomerations of nanoparticles [5-7]. The nanofluid dispersion process is shown in Fig.2.

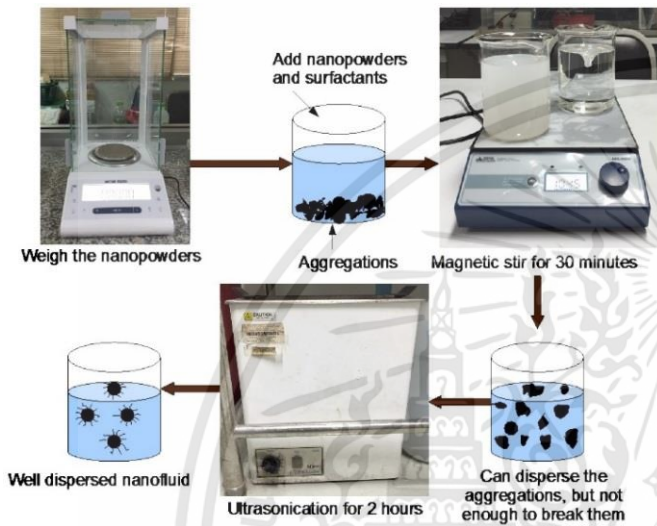


Figure 2. Schematic diagram of nanofluids dispersion process

2.2 Partial discharge measurement setup

PD and PDIV experiment, the test circuit diagram is illustrated in Fig. 3 and the PD the test circuit arrangement was set up according to IEC 60270 as shown in Fig.4. The measurement system comprises High-Voltage supply (HV), coupling capacitor (Ck), coupling device (CD), test object (Ca), fiber optical cable (FC) and PC with mtronix software [4, 8-9].

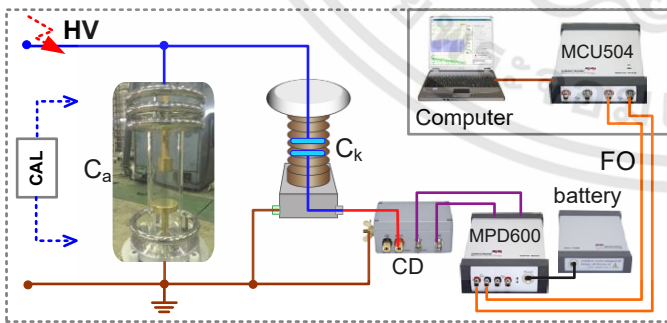


Figure 3. Test circuit diagram for the experiment



Figure 4. Test circuit set-up

Where HV: High-Voltage supply 75 kV, Ca: Test vessel, Ck: Coupling capacitor 1 nF, CD: Coupling device, FO: Fiber optics cable, MPD600: Acquisition unit and MCU504: Fiber optic controller

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 PDIV test results

The examples of PD activity at PDIV level, Q_{PDIV} and $Q_{max (record 1 min)}$ obtained from the conventional PD measuring system are illustrated in Fig. 5. Table I shows results of PDIV, Q_{PDIV} and $Q_{max (record 1 min)}$ of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids by using tungsten needle electrodes with the tip radius of 10 μm , 20 μm , and 40 μm respectively.

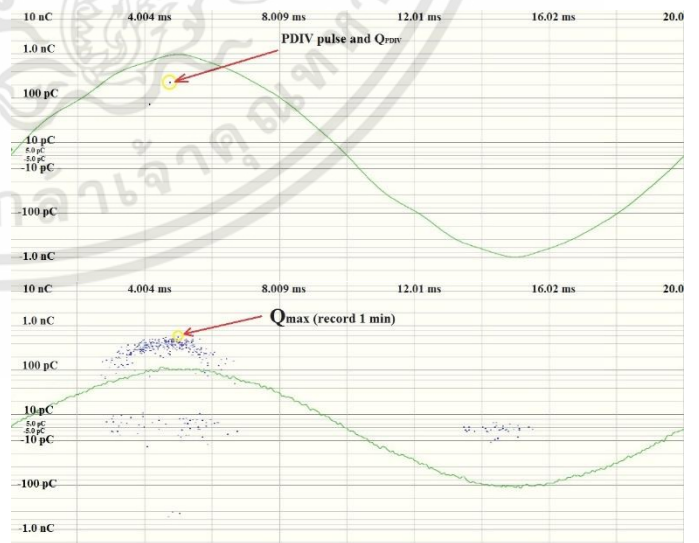


Figure 5. PD activity at PDIV level, Q_{PDIV} and $Q_{max (record 1 min)}$ of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids.

TABLE I
PDIV, Q_{PDIV} and Q_{max} (record 1 min) of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids.

| Liquid dielectric | Tip radius | PDIV (kV) | Q_{PDIV} (pC) | Q_{max} (record 1 min) (pC) |
|----------------------------|------------|-----------|-----------------|-------------------------------|
| Mineral oil | 10 μ m | 19.7 | 200 | 706 |
| | 20 μ m | 22.1 | 237 | 1,087 |
| | 40 μ m | 28.2 | 474 | 1,841 |
| BaTiO ₃ (0.01%) | 10 μ m | 21.1 | 338 | 956 |
| | 20 μ m | 26.1 | 565 | 1,003 |
| | 40 μ m | 29.2 | 667 | 1,888 |
| BaTiO ₃ (0.03%) | 10 μ m | 21.3 | 175 | 569 |
| | 20 μ m | 25.1 | 416 | 913 |
| | 40 μ m | 29.8 | 626 | 1588 |

3.2 Weibull analysis of PDIV test results

Weibull fitting was used to analyze PDIV results of mineral oil and BaTiO₃ nanofluids. In the Weibull plot, black circles represent mineral oil, red square represent 0.01% BaTiO₃ nanofluid and green quadrangle represent 0.03% BaTiO₃ nanofluid. In the analysis, 2-parameter Weibull plot are used. For 2-parameter Weibull plot, PDIV probabilities are calculated as:

$$F(x) = 1 - \exp\{-(x/\eta)^\beta\} \quad (1)$$

Where $F(x)$ is the cumulative probability of PDIV; x is PDIV; β is the shape parameter; η is the scale parameter. In the Weibull plot the correlation coefficient ρ is a measure of how well the linear regression model fits the data [4, 6, 10].

Fig. 6, 7-8 show the 2-parameter Weibull plot of PDIV of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 10, 20 and 40 μ m tip radius needle plane electric respectively. From such figures the distributions of the three liquids are almost identical. The parameters and correlation coefficient, including PDIV at different weibull probabilities are shown in Table II-VII respectively.

The correlation coefficient ρ of the Weibull fits of the three fluids are 0.564, 0.205, and 0.488 respectively according to Table II. In Table III, the 1% quantile of mineral oil is increased by 12% in case of 0.01% BaTiO₃ nanoparticles and 9% in case of 0.03% BaTiO₃ nanoparticles. The mean PDIV of mineral oil is increased by 23% due to 0.01% BaTiO₃ nanoparticles and 8% because of 0.03% BaTiO₃ nanoparticles.

In Table IV, the correlation coefficient ρ of the Weibull fits of the three fluids are 0.417, 0.310, and 0.267 respectively. In Table V, the mean PDIV of mineral oil is increased by 18% due to 0.01% BaTiO₃ nanoparticles and 12% because of 0.03% BaTiO₃ nanoparticles.

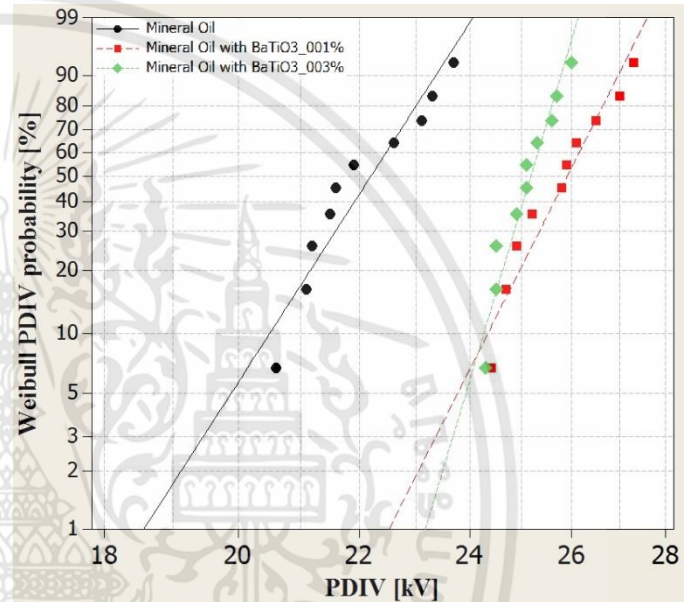


Figure 7. 2-parameter Weibull plot of PDIV of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 20 μ m tip radius needle plane electrode.

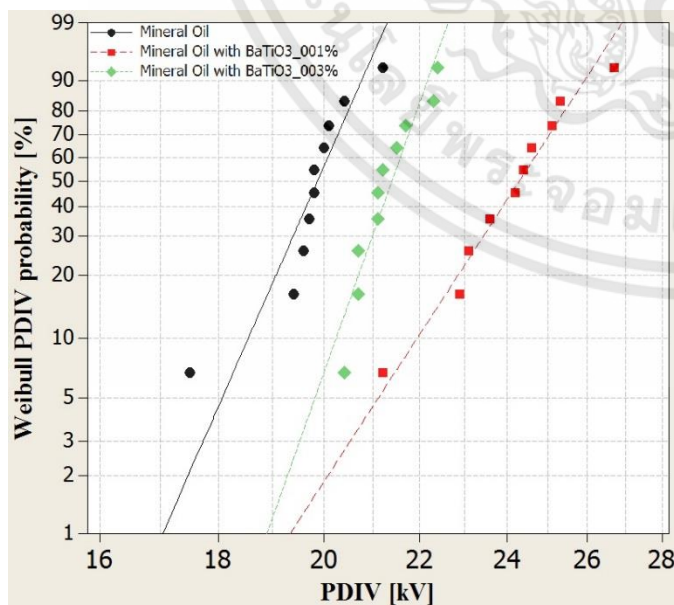


Figure 6. 2-parameter Weibull plot of PDIV of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 10 μ m tip radius needle plane electrode.

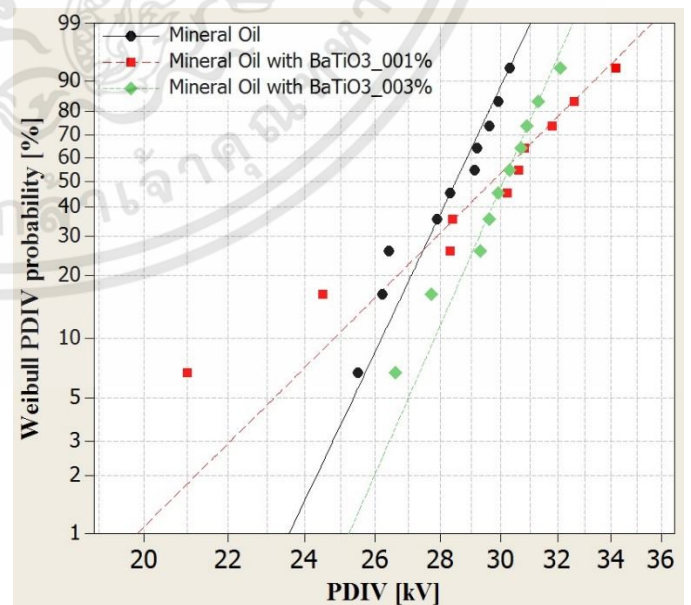


Figure 8. 2-parameter Weibull plot of PDIV of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 40 μ m tip radius needle plane electrode.

TABLE II

Parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 10 μm tip radius needle plane electrode.

| Parameters | Mineral oil | BaTiO ₃ (0.01%) | BaTiO ₃ (0.03%) |
|------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| β | 27.43 | 18.55 | 34 |
| η | 20.13 | 24.78 | 21.63 |
| ρ | 0.564 | 0.205 | 0.488 |

TABLE III

PDIV at different probabilities of mineral, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ with 2-parameter Weibull calculation tested by 10 μm tip radius needle plane electrode.

| PDIV probabilities [%] | Mineral oil | BaTiO ₃ (0.01%) | | BaTiO ₃ (0.03%) | |
|------------------------|-------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| | PDIV [kV] | PDIV [kV] | increase | PDIV [kV] | increase |
| 1 | 17.2 | 19.3 | 12% | 18.8 | 9% |
| 5 | 18.2 | 21.1 | 16% | 19.8 | 9% |
| 20 | 19.1 | 22.8 | 19% | 20.6 | 8% |
| 63.2 | 20.1 | 24.7 | 23% | 21.6 | 8% |

TABLE IV

Parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 20 μm tip radius needle plane electrode.

| Parameters | Mineral oil | BaTiO ₃ (0.01%) | BaTiO ₃ (0.03%) |
|------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| β | 23.64 | 32 | 50.89 |
| η | 22.55 | 26.52 | 25.36 |
| ρ | 0.417 | 0.310 | 0.267 |

TABLE V

PDIV at different probabilities of mineral, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ with 2-parameter Weibull calculation tested by 20 μm tip radius needle plane electrode.

| PDIV probabilities [%] | Mineral oil | BaTiO ₃ (0.01%) | | BaTiO ₃ (0.03%) | |
|------------------------|-------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| | PDIV [kV] | PDIV [kV] | increase | PDIV [kV] | increase |
| 1 | 18.5 | 22.9 | 24% | 23.1 | 25% |
| 5 | 19.8 | 24.1 | 22% | 23.9 | 21% |
| 20 | 21.1 | 25.3 | 20% | 24.6 | 17% |
| 63.2 | 22.5 | 26.5 | 18% | 25.3 | 12% |

TABLE VI

Parameters and correlation coefficient of 2-parameter Weibull plot of mineral oil, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ nanofluids tested by 40 μm tip radius needle plane electrode.

| Parameters | Mineral oil | BaTiO ₃ (0.01%) | BaTiO ₃ (0.03%) |
|------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| β | 22.34 | 10.47 | 24.12 |
| η | 28.97 | 30.77 | 30.54 |
| ρ | 0.328 | 0.26 | 0.15 |

TABLE VII

PDIV at different probabilities of mineral, 0.01% and 0.03% BaTiO₃ with 2-parameter Weibull calculation tested by 40 μm tip radius needle plane electrode.

| PDIV probabilities [%] | Mineral oil | BaTiO ₃ (0.01%) | | BaTiO ₃ (0.03%) | |
|------------------------|-------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| | PDIV [kV] | PDIV [kV] | increase | PDIV [kV] | increase |
| 1 | 23.5 | 19.8 | -16% | 25.2 | 7% |
| 5 | 25.3 | 23.1 | -9% | 27 | 7% |
| 20 | 27 | 26.6 | -1% | 28.6 | 6% |
| 63.2 | 28.9 | 30.7 | 6% | 30.5 | 6% |

Besides, In Table VI, the correlation coefficient ρ of the Weibull fits of the three fluids are 0.328, 0.26, and 0.15 respectively. In Table VII, the mean PDIV of the mineral oil is increased by 6% due to 0.01% BaTiO₃ nanoparticles and 6% because of 0.03% BaTiO₃ nanoparticles.

4. CONCLUSION

In this study, PD and PDIV characteristics of mineral oil based nanofluids were investigated. With the addition of nanoparticles, PDIV increased slightly above that of the mineral oil. From these results, it is indicated that nanoparticles is a good candidate to develop oil-based nanofluids for dielectric applications.

ACKNOWLEDGMENT

The present work was supported by Asst. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakorn and staff of College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). The authors gratefully acknowledged the support of all staff at high voltage laboratory, KMITL.

REFERENCES

- [1] Jong-Chul Lee, Won-Ho Lee, Se-Hee Lee, Sangyoun Lee., "Positive and negative effects of dielectric breakdown in transformer oil based magnetic fluids," 2012 ELSEVIER, pp. 2984–2987 Materials Research Bulletin 47 (2012)
- [2] Liu, R.; Pettersson, L.A.A.; Auletta, T.; Hjortstam, O. , "Fundamental Research on the Application of Nano Dielectrics to Transformers," 2011 IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 423-427, October 2011.
- [3] Muhammad Rafiq, Wei Wang, Kaibo Ma, You Zhou, Qi Wang, Chengrong Li, Yuzhen Lv, "Insulating and Aging Properties of Transformer Oil-Based TiO₂ Nanofluids," 2014 IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 457461, 2014.
- [4] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 Ph.D. dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [5] Diaa-Eldin A. Mansour, Eman G. Atiya, Reham M. Khattab, Ahmed M. Azmy, "Effect of Titania Nanoparticles on the Dielectric Properties of Transformer Oil-Based Nanofluids," 2012, IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report pp. 295-298, 2012.
- [6] Huifei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [7] Pugazhendhi Sugumaran.C, "Experimental Evaluation on Dielectric and Thermal Characteristics of Nano Filler Added Transformer Oil," 2012 IEEE, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, pp. 207-210, September 17-20, 2012.
- [8] IEC Publication 60270, High Voltage test techniques – Partial Discharge Measurement", 2000.
- [9] IEC 61294, Insulating Liquids – determination of the partial discharge inception voltage (PDIV) – test procedure, 1993.
- [10] Yuefan Du, Yuzhen Lv, Chengrong Li, Mutian Chen, Yuxiang Zhong, Jianquan Zhou, Xiaoxin Li, You Zhou, "Effect of Semiconductive Nanoparticles on Insulating Performances of Transformer Oil" 2012, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 3; June 2012.



EENET2016

Innovation for Sustainability Entrepreneur

**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8**

**The 8th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology**

**25-27 May 2016, Duangjitt Resort & Spa,
Patong Beach, Phuket**

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

ผลของอนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อคุณลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของเหลวนาโน

Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on Breakdown Characteristics of Mineral Oil based Nanofluids

พิชัย เมืองประทุม เพทชาย นิมิตานอง และ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ +66(0) 2329 8000 E-mail: tagie_p@hotmail.com, norasage@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของเหลวนาโน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางด้านนาโน ทั้งนี้อนุภาคนาโนที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้คืออนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งขนาดของอนุภาคนาโนที่นำมาประยุกต์ใช้นั้นจะมีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร ในบทความนี้ได้ทำการทดลองผสมอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนผสมอนุภาคนาโน 0.01 % และ 0.03% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าเป็นการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของเหลวนาโน ด้วยเครื่องทดสอบ FOSTER OTS 60 AF ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 มิลลิเมตร และทดสอบเป็นจำนวน 6 ครั้ง การทดสอบในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้นของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของเหลวนาโน ผลจากการศึกษานี้ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ดีของอนุภาคนาโนที่มีต่อการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

คำสำคัญ: แรงดันเบรกดาวน์ ของเหลวนาโน ไททาเนียมไดออกไซด์ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

Abstract

In this paper, the dielectric properties of transformer oil-based nanofluids was studied. The aim of this research is to improve electrical property of the mineral oil by applying nanotechnology knowledge. Nanoparticle i.e. Titanium dioxide (TiO₂) with the mean diameter less than 100 nm was used in the experiment. To measure AC breakdown voltages, an oil breakdown tester (FOSTER OTS 60 AF) was used. The gap distance between electrodes was set to be 2.5 mm. The testing was carried out 6 times for each of the liquid test sample

according to IEC 60156 standards. The test results showed that the addition of nanoparticles, the breakdown voltage of the mineral oil based nanofluids increased slightly above that of the mineral oil. From these results, it is indicated that the studied nanoparticles are good candidate to apply developing oil-based nanofluids for dielectric applications.

Keywords: breakdown voltage, nanofluids, titanium dioxide, mineral oil

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบันใช้น้ำมันหม้อแปลง (Mineral oil) เป็นฉนวนทางไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใหม่หรือหม้อแปลงไฟฟ้าเก่าที่มีระดับน้ำมันพร่องไปต้องมีการเติมด้วยน้ำมันที่ผ่านการทดสอบความเป็นฉนวนตามมาตรฐานทุกครั้ง หากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีปัญหาจะก่อให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและสร้างความเสียหายอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรมและผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นควรมีการดูแลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายขึ้นมา ปัญหาส่วนใหญ่ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เกิดมาจากน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมคุณภาพ ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความร้อน ความชื้น เป็นต้น การปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการยืดระยะเวลาการใช้งานและลดต้นทุนในการซื้อหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ สามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่าและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง [1] งานวิจัยนี้นำเสนอถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยการใช้เทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้ากำลัง จากรายงานการวิจัยเบื้องต้นจากวารสารวิจัยของ IEEE, IET หรือ ELSEVIER พบว่าการใช้วัสดุนาโนผสมลงไปกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเพิ่มค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าได้ วัสดุนาโนที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง 25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต โดยใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

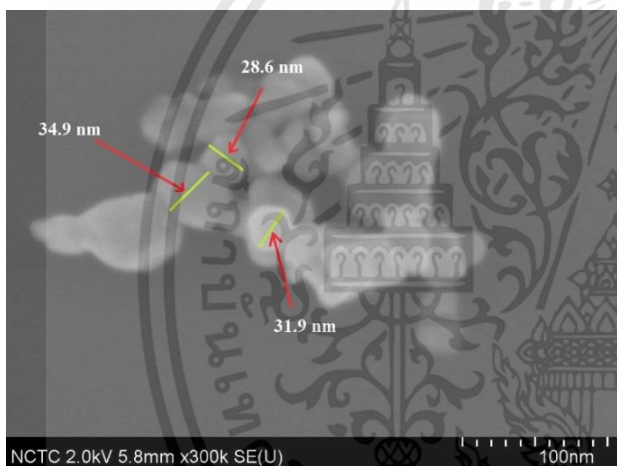
Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

นำมาศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า คือสารประกอบนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ Titanium dioxide (TiO₂)

2. ขั้นตอนการทดลอง

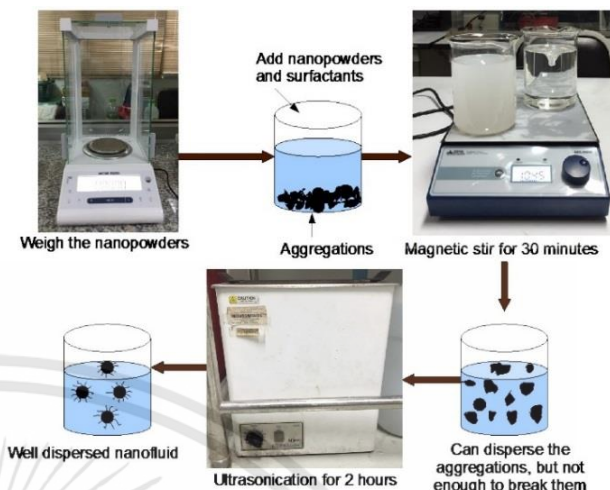
2.1 ขั้นตอนการผสมอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของอนุภาคนาโน ได้จัดเตรียมโดยการผสมน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากับ TiO₂ (ขนาด <100 นาโนเมตร) โดยรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของอนุภาคนาโน TiO₂ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคนาโน TiO₂ ที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM)

สำหรับการเตรียมของเหลวนาโน น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าผสมกับอนุภาคนาโน ในการศึกษาประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ประการแรกผสมอนุภาคนาโน TiO₂ ปริมาตร 0.01% และ 0.03% ชนิดผงเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นนำสารผสมมาวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และสุดท้ายคือการผสมสารด้วยเครื่องเขย้าสาร โดยใช้เสียงความถี่สูงด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของเหลวนาโนเป็นเนื้อเดียวกัน [2-5] ขั้นตอนการผสมอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการผสมอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2 การทดสอบคุณลักษณะความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

สำหรับการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของอนุภาคนาโน จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ FOSTER OTS 60 AF ทำการตั้งค่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 มิลลิเมตร และทดสอบเป็นจำนวน 6 ครั้ง สำหรับสารตัวอย่างแต่ละชนิด การทดสอบประกอบด้วย 1. น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการผสมสารนาโน 2. น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO₂ ปริมาตร 0.01% และ 3. น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO₂ ปริมาตร 0.03% โดยทำการทดสอบในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง [6-9] อุปกรณ์สำหรับการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ในงานวิจัยนี้ จะแสดงดังรูปที่ 3



(ก) ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ (ข) ภาชนะใส่ของเหลว รูปที่ 3 อุปกรณ์การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

2.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในส่วนนี้ แสดงการวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงคุณสมบัติของค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นการประเมินคุณภาพของน้ำมันหม้อ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

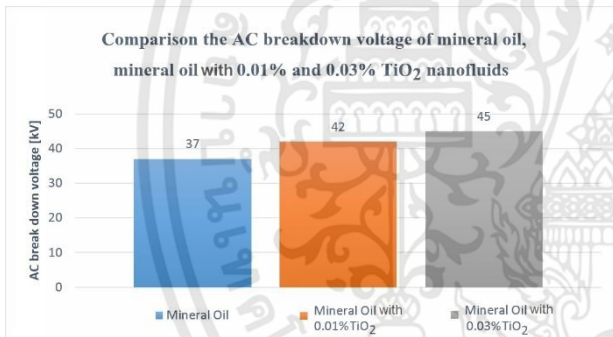
แปลงไฟฟ้า โดยการหาค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำมาประเมินคุณภาพของน้ำมันที่นำมาทดสอบ จากตารางที่ 1 สังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน โดยเมื่อมีการผสมสารนาโน TiO₂ ในปริมาณที่ 0.01% และ 0.03% ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มีการเพิ่มขึ้นประมาณ 14% และ 22% ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบได้ดังแสดงในรูปที่ 4

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

- เมื่อ F(x) คือ ความน่าจะเป็นที่เพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวน์
- x คือ แรงดันเบรกดาวน์
- β คือ พารามิเตอร์รูปร่าง
- η คือ พารามิเตอร์สเกล
- ρ คือ ตัวชี้วัดแบบจำลองเชิงเส้นที่ดีที่สุดเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

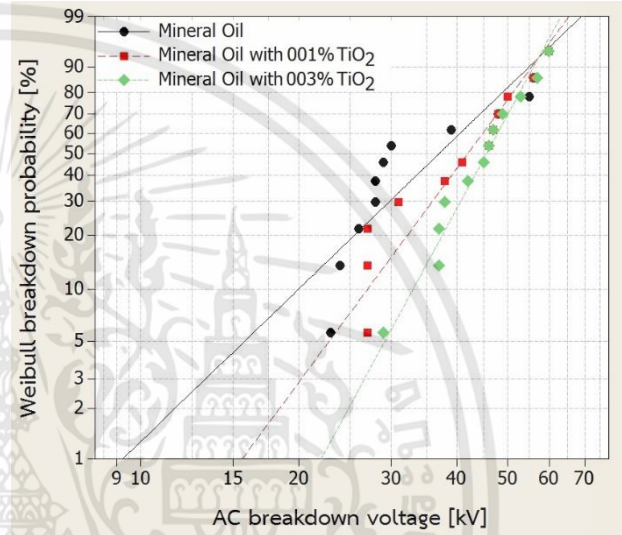
| ชนิดฉนวนเหลว | แรงดันเบรกดาวน์ [kV] | % การเพิ่มขึ้น |
|---|----------------------|----------------|
| Mineral oil | 37 | - |
| Mineral oil with TiO ₂ (0.01%) | 42 | 14 |
| Mineral oil with TiO ₂ (0.03%) | 45 | 22 |



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์

2.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบไวบูลล์

การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบไวบูลล์ มีการใช้อย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของงานวิจัยนี้ ในกราฟพล็อตแบบไวบูลล์ วงกลมสีดำแทนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการผสมสารนาโน ส่วนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO₂ ปริมาณ 0.01% แทนด้วยสี่เหลี่ยมสีแดง และสี่เหลี่ยมขั้วมหาดัดสีเขียวแทนด้วยน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO₂ ปริมาณ 0.03% ในการวิเคราะห์กราฟพล็อตแบบไวบูลล์ เป็นแบบ 2-พารามิเตอร์ฟังก์ชัน และเป็นการคำนวณเชิงสมการด้านล่าง [4, 9]



รูปที่ 5 กราฟพล็อตแบบไวบูลล์ 2-พารามิเตอร์ฟังก์ชัน แรงดันเบรกดาวน์

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์และความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์ของกราฟพล็อตแบบไวบูลล์ 2-พารามิเตอร์ฟังก์ชัน

| Parameters | Mineral oil | Mineral oil with TiO ₂ (0.01%) | Mineral oil with TiO ₂ (0.03%) |
|------------|-------------|---|---|
| β | 3.048 | 4.279 | 5.830 |
| η | 41.75 | 45.74 | 48.58 |
| ρ | 0.834 | 0.378 | 0.199 |

ตารางที่ 3 แรงดันเบรกดาวน์ที่ความน่าจะเป็นที่แตกต่างกันที่คำนวณด้วยไวบูลล์ 2-พารามิเตอร์ฟังก์ชัน

| Breakdown probabilities [%] | Mineral oil | Mineral oil with TiO ₂ (0.01%) | | Mineral oil with TiO ₂ (0.03%) | |
|-----------------------------|-------------|---|----------|---|----------|
| | BD [kV] | BD [kV] | increase | BD [kV] | increase |
| 1 | 9.2 | 15.6 | 70% | 22 | 139% |
| 5 | 15.7 | 22.8 | 45% | 29.1 | 85% |
| 20 | 25.5 | 32.2 | 26% | 37.5 | 47% |
| 63.2 | 41.7 | 45.7 | 10% | 48.5 | 16% |

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

รูปที่ 5 แสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่วิเคราะห์ด้วยไวบูลล์ 2-พารามิเตอร์ ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการผสมสารนาโน และ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO_2 ปริมาตร 0.01% และ 0.03% โดยสามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ดังในตารางที่ 2 ซึ่งผลของตัวชี้วัดแบบจำลองเชิงเส้นที่ตีความกับข้อมูลหรือค่า ρ ของแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการผสมสารนาโน และ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO_2 ปริมาตร 0.01% และ 0.03% มีค่า 0.834, 0.378 และ 0.199 ตามลำดับ และนอกจากนี้ในตารางที่ 3 ยังแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ย (63.2%) ของแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการผสมสารนาโน TiO_2 ปริมาตร 0.01% และ 0.03% ที่เพิ่มมากขึ้น คือ 10% และ 16% ตามลำดับ

3. สรุป

ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึง คุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้นของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผสมด้วยของเหลวนาโน โดยผลการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงมากขึ้นกว่าน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการผสมนาโน ผลจากการศึกษานี้ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ดีของอนุภาคนาโนที่มีต่อการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณวิทย์ วิทยาการ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) และทีมงานห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. นอกจากนี้แล้ว นักวิจัยขอขอบคุณ งบประมาณสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ รหัสโครงการ 2559-01-01021 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Norasage Pattanadech, "Partial discharge inception voltage characteristics of mineral oil," 2013 *Ph.D. dissertation*, Graz University of Technology, Graz, Austria, December 2013.
- [2] Huiwei Jin, "Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids," 2015 *Ph.D. dissertation*, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands, April 2015.
- [3] Pugazhendhi Sugumaran.C, "Experimental Evaluation on Dielectric and Thermal Characteristics of Nano Filler Added Transformer Oil," 2012 *IEEE, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China*, pp. 207-210, September 17-20, 2012.
- [4] Diaa-Eldin A. Mansour, Eman G. Atiya, Reham M. Khattab, Ahmed M. Azmy, "Effect of Titania Nanoparticles on the Dielectric Properties of Transformer Oil-Based Nanofluids," 2012 *IEEE, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report*, pp. 295-298, 2012.

- [5] IEC 60156, "Insulating liquids Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method," INTERNATIONAL STANDARD, Second edition 1995-07, Reference number CEI/IEC 156: 1995.
- [6] J. Kudelcik, P. Bury, P. Kopcansky, M. Timkob, "Dielectric breakdown in mineral oil ITO 100 based magnetic fluid," 2010 *ELSEVIER, 12th International Conference on Magnetic Fluids*, pp. 78-81, 2010.
- [7] J. Ghasemi, S.Jafarmadar, M.Nazari, "Effect of magnetic nanoparticles on the lightning impulse breakdown voltage of transformer oil," 2015 *ELSEVIER, Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 148-152, 2015.
- [8] Jong-Chul Lee, Hyeon-Seok Seo, Youn-Jea Kim, "The increased dielectric breakdown voltage of transformer oil-based nanofluids by an external magnetic field," 2012 *ELSEVIER, International Journal of Thermal Sciences* 62, pp. 29-33, 2012.
- [9] Yuzhen. Lv, Wei. Wang, Kaibo. Ma, Shengnan. Zhang, You. Zhou, Chengrong. Li, Qi Wang, "Nanoparticle Effect on Dielectric Breakdown Strength of Transformer Oil-Based Nanofluids," 2013 *IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 680-682, 2013.



นายพิชัย เมืองประทุม สำเร็จการศึกษา วศ.บ. และ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สจล. ในปี 2548 และ 2552 ตามลำดับ ปัจจุบัน กำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก วศ.ด. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ สจล.



นายเพทาย นิมสนอง สำเร็จการศึกษา วศ.บ. และ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สจล. ในปี 2549 และ 2553 ตามลำดับ ปัจจุบัน กำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก วศ.ด. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ สจล.



ดร. นเรศรฐ พัฒนเดช สำเร็จการศึกษา วศ.บ. และ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สจล. และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2541 และ 2545 ตามลำดับ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก the Institute of High Voltage Engineering and System Management, Graz University of Technology, Austria. ในปี 2556 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต โดยใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพิชัย เมืองประทุม
 วัน เดือน ปีเกิด 31 ธันวาคม 2522 ที่ อ.บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น
 ที่อยู่ปัจจุบัน 138/12 หมู่ที่ 4 ซอย ศรีจันทร์ 16
 ถนน ศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง
 จังหวัดขอนแก่น 40000



ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 พ.ศ. 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
 วิทยาเขตขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น