สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

THE STUDY OF TRANSFORMER OIL CHARACTERISTICS

โดย

นาย กิตติ หุตะวาณิชย์กุล
นาย เฉลิมพล รุ่งโรจน์
นาย ชัยวัชร์ ภวังคะนันท์
นาย สุกฤต วัฒนพานิช

มพ.
ก๑๗๓ก
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72999
วัน,เดือน,ปี 27 มิ.ย. 2550

b 11726195
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

THE STUDY OF TRANSFORMER OIL CHARACTERISTICS

โดย

นาย กิตติ หุตะวาณิชย์กุล

นาย เฉลิมพล รุ่งโรจน์

นาย ชัยวัชร์ ภวังคะนันท์

นาย สุกฤต วัฒนพานิช

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

ดร. วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

ผู้จัดทำ

1. นาย กิตติ หุตะวาณิชย์กุล
2. นาย เฉลิมพล รุ่งโรจน์
3. นาย ชัยวัชร์ ภวังคะนันท์
4. นาย สุกฤต วัฒนพานิช

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

นาย กิดติ หุตะวาณิชย์กุล
นาย เฉลิมพล รุ่งโรจน์
นาย ชัยวัชร์ ภวังคะนันท์
นาย สุกฤต วัฒนพานิช
อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงในลักษณะต่างๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในสภาพการใช้งานในทางปฏิบัติ โดยได้ทำการสร้างชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์น้ำมันหม้อแปลงซึ่งใช้อิเล็กโตรดที่เป็นแบบหัวทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และแบบหัวเห็ดรัศมีความโค้ง 25 mm เพื่อทำการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสภาวะต่างๆ และใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) มาจำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ และจำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในสภาวะที่น้ำมันหม้อแปลงมีการเจือปนด้วยกระดาษฉนวน, ผงเหล็ก และหยดน้ำ แล้วเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้ากับการทดสอบจริง ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า และผลที่ได้จากการทดสอบจริง พบว่ามีความสอดคล้องกัน จึงสามารถคาดเดาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF TRANSFORMER OIL CHARACTERISTICS

Kitti Hutavanichgul
Chalermpol Roongroj
Chaiwat Pawangkanan
Sukrit Watanapanich
Norasage Pattanadech Advisor
Dr. Vuttichai Chatpattananan Advisor
2006

ABSTRACT

This project studies the characteristics of transformer oil in different conditions. Test objects to find the breakdown voltage in transformer oil are spherical electrodes with 13 mm radius and partially spherical (mushroom shape) electrodes with 25 mm radius. The electric field was analyzed using finite element program in many different simulated conditions such as pure oil condition, polluted with insulation paper condition, polluted with pieces of metal and water condition. The test results are related with the analysis. These data can be used further to forecast breakdown voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงเป็นอย่างดี อันเนื่องมาจากความช่วยเหลือสนับสนุนจากหลายๆท่าน โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรม อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช และ อาจารย์วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์ ที่คอยให้คำปรึกษาอย่างดียิ่ง ทั้งภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติ โดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขรายงานให้เป็นที่เรียบร้อยสมบูรณ์ บริษัท จรุงไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ เจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ รุ่นพี่ และเพื่อนๆ ทุกท่านที่ช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานนี้ รวมถึงบุคคลอันเป็นที่รักอื่นๆ อีกหลายท่านที่มิได้เอ่ยถึง ด้วยความมีน้ำใจอันประเสริฐของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้โครงงานวิศวกรรมนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

อนึ่งโครงงานวิชาวิศวกรรมนี้ จะประสบความสำเร็จมิได้หากขาด บิดามารดา ที่คอยให้การสนับสนุนส่งเสริมในการเรียนมาโดยตลอด และเป็นกำลังใจที่สำคัญเสมอมา จึงขอขอบพระคุณมาใน ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....I

ABSTRACT.....II

สารบัญ.....III

สารบัญรูป.....V

สารบัญตาราง.....X

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 บทนำทั่วไป.....1

1.2 ความสำคัญของปัญหา.....2

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....3

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....3

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....3

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....4

1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....5

2.1 ชนิดของฉนวนน้ำมัน.....5

2.2 น้ำมันหม้อแปลง.....6

2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนแรงดันไฟฟ้า.....8

2.4 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength).....13

2.5 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลว.....20

2.6 ฉนวนเหลว.....26

2.7 สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมัน.....41

บทที่ 3 ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงและชุดกวนน้ำมัน.....43

3.1 การออกแบบชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง.....43

3.2 เปรียบเทียบชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ออกแบบด้วยโปรแกรม
คอมพิวเตอร์และชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่จัดสร้างขึ้น.....48

3.3 การออกแบบชุดกวนน้ำมัน.....50

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....52

4.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์.....52

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....75

4.3 การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง.....80

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....98

5.1 สรุป.....98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 99
เอกสารอ้างอิง..... 100
ภาคผนวก ก..... 103
ภาคผนวก ข..... 104
ภาคผนวก ค..... 111
กิตติกรรมประกาศ..... 113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ไดอะแกรมของฉนวนเหลว	6
2.2	พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับน้ำมันหม้อแปลง	9
2.3	อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน	14
2.4	เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า	15
2.5	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า	17
2.6	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	17
2.7	ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ	19
2.8	ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็นสุญญากาศ ε_0 และ ε	22
2.9	วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก	23
2.10	มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ	25
2.11	ลักษณะกลไกการเกิดเบรกดาวน์ของหยดน้ำภายในฉนวนของเหลว	35
2.12	ตัวอย่างลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวภายใต้ชุดอิเล็กโตรดทดสอบแบบทรงกลม – แท่งปลายแหลม	37
2.13	กราฟแสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์เป็นฟังก์ชันของระยะห่างของขั้วอิเล็กโตรดจากข้อมูลในตัวอย่าง	38
2.14	กราฟแสดงแรงดันเบรกดาวน์กับเวลาที่จ่ายแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	40
3.1	กล่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง	44
3.2	หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes	45
3.3	หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes	46
3.4	ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง	46
3.5	แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูง	47
3.6	ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์	47
3.7	แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์	47
3.8	ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	48
3.9	ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่จัดสร้างขึ้น	49
3.10	ส่วนประกอบชุดกวนน้ำมัน	50
3.11	ชุดกวนน้ำมันที่จัดสร้างขึ้น	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 วัสดุ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบ..... 52
4.2 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 1.25 mm.....52
4.3 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....53
4.4 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 5 mm.....53
4.5 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 10 mm.....54
4.6 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบ.....54
4.7 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 1.25 mm.....55
4.8 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....55
4.9 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 5 mm.....56
4.10 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 10 mm.....56
4.11 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....57
4.12 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....57
4.13 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....58
4.14 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....58
4.15 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....59
4.16 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....59
4.17 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....60
4.18 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....60
4.19 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....61
4.20 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....61
4.21 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....62
4.22 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....62
4.23 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....63
4.24 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....63
4.25 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....64
4.26 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....64
4.27 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....65
4.28 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....65
4.29 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....66
4.30 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า
4.31 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....67
4.32 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....67
4.33 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....68
4.34 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....68
4.35 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....69
4.36 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....69
4.37 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....70
4.38 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....70
4.39 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....71
4.40 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....71
4.41 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....72
4.42 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....72
4.43 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm.....73
4.44 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับระยะแกปโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์...73
4.45 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับขนาดฟองอากาศโดยการจำลองทาง
คอมพิวเตอร์.....74
4.46 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนากระดาษโดยการจำลองทาง
คอมพิวเตอร์.....74
4.47 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับจำนวนผงเหล็กโดยการจำลองทาง
คอมพิวเตอร์.....74
4.48 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงพิกัด 220 V / 600 kV, 10 mA..... 75
4.49 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV, 50 mA.....75
4.50 RC โวลเดจดิไวเดอร์ AC 100 kV, DC 100 kV..... 76
4.51 ตัวต้านทานน้ำ..... 76
4.52 สายนำส่งแรงสูง..... 77
4.53 สายเคเบิลวัด..... 77
4.54 ตู้ควบคุมแรงดัน..... 78
4.55 ตะขอกราวด์..... 78
4.56 กล่องทดสอบน้ำมัน..... 79
4.57 ชุดกวนน้ำมัน.....79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.58	วงจรปรับเทียบแรงดัน	81
4.59	คลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 10 kV	81
4.60	วงจรการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์	82
4.61	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์	83
4.62	การเกิดเบรกดาวน์ในน้ำมันบริสุทธิ์ภายใต้แรงดันกระแสสลับ	84
4.63	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีกระดาษ	85
4.64	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีผงเหล็ก	87
4.65	การเรียงตัวของอนุภาคของแข็งในน้ำมันก่อนป้อนแรงดัน และขณะป้อนแรงดัน	87
4.66	วงจรการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์	89
4.67	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์	90
4.68	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวนคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด	91
4.69	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงที่มีผงเหล็กเจือปน	92
4.70	การลอยตัวของผงเหล็กภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง	93
4.71	กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงเมื่อมีหยดน้ำเจือปน	94
4.72	การเบรกดาวน์และยืดของหยดน้ำในน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง	94
4.73	กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงในกรณีศึกษาต่างๆ	95
4.74	กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงในกรณีศึกษาต่างๆ	95
4.75	กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes	96
4.76	กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes	96
4.77	กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes	97
4.78	กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes	97
ข.1	เครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง MEGGER FOSTER OTS 80 AF/2	104
ข.2	กล่องบรรจุน้ำมันหม้อแปลง	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.3	ฝาปิดกล่องบรรจุน้ำมันหม้อแปลง	105
ข.4	หัวอิเล็กโตรด และตัววัดระยะแกป	106
ข.5	ตัวควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ	106
ข.6	การบรรจุน้ำมันหม้อแปลง	107
ข.7	การปรับค่าการทดสอบ	108
ข.8	เริ่มนับเวลาย้อนหลัง	108
ข.9	แสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์	109
ข.10	ผลการทดสอบ	109
ข.11	ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง..... 7

2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง..... 8

2.3 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (A) ตามกฎของเฮนรี่ $(\mu atm./(\mu l/l))$ ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 $mmHg$ 11

2.4 ความสามารถในการละลายของก๊าซ $(K,\%Vol)$ ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 $mmHg$ 11

2.5 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า..... 28

2.6 คุณสมบัติของฉนวนน้ำมันชนิดต่างๆ ที่สำคัญ..... 29

2.7 คุณลักษณะจำเพาะ และผลกระทบที่เกิดขึ้น..... 30

2.8 แสดงตัวอย่างของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ต่างๆ..... 41

4.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันบริสุทธิ์..... 83

4.2 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันที่มีกระดาษฉนวนคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด... 85

4.3 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่มีผงเหล็กเจือปน..... 86

4.4 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันบริสุทธิ์..... 90

4.5 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันที่มีกระดาษฉนวนคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด.... 91

4.6 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงที่มีผงเหล็กเจือปน..... 92

4.7 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงที่มีหยดน้ำเจือปน..... 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ในระบบไฟฟ้ากำลัง เริ่มตั้งแต่ระบบการผลิต ระบบส่งจ่าย และจำหน่ายไฟฟ้า โดยจะใช้ระดับแรงดันสูงเป็นแรงดันใช้งานเพื่อที่จะทำให้ระบบไฟฟ้านั้นๆมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในระบบดังกล่าว จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวกับเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลัง ปัจจัยสำคัญที่จะบ่งบอกถึงความสามารถและประสิทธิภาพการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงคือ ระบบการฉนวนที่เหมาะสม ซึ่งปกติแล้วฉนวนอาจจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดด้วยกัน คือ ฉนวนแข็ง, ฉนวนเหลว และฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีอย่างหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะนอกจากจะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีแล้วยังช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ได้ดีด้วย ของเหลวใดๆสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้เสมอ ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีค่าความต้านทานสูงมากพอ และไม่เปลี่ยนสภาพทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าในช่วงเวลาที่นานพอสมควร โดยหลักการแล้วฉนวนเหลวจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าฉนวนก๊าซ และฉนวนของแข็ง ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนก๊าซเพราะว่ามีความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนก๊าซ ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนของแข็งเพราะว่าฉนวนเหลวจะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่า และยิ่งกว่านั้นฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนเองได้ (self – healing) หลังจากเบรกดาวน์ผ่านพ้นไปแล้ว

ฉนวนเหลวที่ดีจะต้องระบายความร้อนได้ดี, ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี, มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง, มีแฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าในไดอิเล็กตริกต่ำ, ทนต่อความร้อนได้สูง หรือติดไฟได้ยาก, ไม่เกิดก๊าซพิษเมื่อติดไฟ และมีความสามารถในการแทรกซึมแทนที่ช่องว่างของการทำฉนวนได้

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำฉนวนเหลวมาใช้ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, หม้อแปลงวัดแรงดัน, หม้อแปลงวัดกระแส, เซอร์กิตเบรกเกอร์, รีแอกเตอร์, เคเบิลแรงสูง, ไดโอด และคาปาซิเตอร์ เป็นต้น โดยฉนวนเหลวทำหน้าที่ดังต่อไปนี้ [1]

- เป็นฉนวนทางไฟฟ้ากั้นระหว่างส่วนที่มีแรงดันไฟฟ้ากับส่วนที่เป็นกราวด์ในหม้อแปลงไฟฟ้า
- เป็นตัวระบายความร้อนด้วยการพาในหม้อแปลงไฟฟ้า และด้วยการไหลวนในเคเบิลแรงสูง
- เป็นฉนวนแทรกซึมในกระดาษ หรือวัสดุอื่นๆในหม้อแปลงไฟฟ้า, เคเบิลแรงสูง, คาปาซิเตอร์
- เป็นดับอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดฉนวนน้ำมัน
- สร้างค่าความจุไฟฟ้าให้สูงสำหรับคาปาซิเต่อร์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลเกี่ยวกับสารฉนวนเหลว [2] ระบุว่าฉนวนเหลวเกือบทั้งหมดที่ใช้มา ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันคือน้ำมันหม้อแปลง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากร และความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในสังคมปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจะได้พยายามนำก๊าซมาเป็นฉนวนในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาก็ตาม เช่น ก๊าซ SF_6 (sulfur hexafluoride) แต่การใช้ก๊าซ SF_6 สามารถก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายและมีผลกระทบต่อ สภาพแวดล้อมได้ [3] ในหลายประเทศจึงพยายามลดการใช้ก๊าซ SF_6 ลง

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า และตัวกลางระบายความร้อนของน้ำมันหม้อแปลงจะลดลงเมื่อมีความชื้น หรือกากตะกอนของอนุภาคเจือปนในหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นระหว่างขบวนการผลิต และขั้นตอนในการนำน้ำมันหม้อแปลงไปใช้งาน โดยในขณะที่ใช้งานที่อุณภูมิสูงขึ้น หรือจากความเครียดทางไฟฟ้า (electrical field stress) ก็อาจจะเกิดก๊าซและกรดที่นำไปสู่การกัดกร่อนวัสดุอื่น ก่อให้เกิดสิ่งเจือปนมากขึ้นได้ [4] โดยที่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันอาจจะสังเกตได้จากสีของน้ำมันที่เปลี่ยนไป แต่เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติต่างๆในระดับสูงเพียงพอเพื่อที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำงานได้ดีและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน หลายองค์กรจึงได้กำหนดคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ต้องการมาเป็นมาตรฐานขึ้น คุณสมบัติหลักที่สำคัญและต้องมีการตรวจสอบอยู่เสมอ คือ การเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เช่น มาตรฐาน IEC 156 [5] เป็นต้น หลายองค์กรทั้งภาครัฐ และบริษัทเอกชนในประเทศไทยที่ประกอบการเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจกลไกการนำไฟฟ้า, การเกิดดีสชาร์จบางส่วนและลักษณะสมบัติด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเป็นอย่างดี และต้องออกแบบให้สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันใช้งานซึ่งเป็นแรงดันกระแสตรง, แรงดันกระแสสลับ และแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า, แรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ เป็นต้น เพื่อให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้ถูกต้องโดยไม่ทำให้เกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

1.2 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น การผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องด้วยการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ปริมาณมากและความสูญเสียต่ำจึงเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง โดยมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ 2 รูปแบบ คือ แรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรง โดยที่ปัญหาในการใช้งานแรงดันสูงก็คือ การฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั่นเอง ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจัดเป็นฉนวนเหลวเชิงการค้าที่มีพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า และอายุการใช้งาน เช่น รูปร่างของอิเล็กโตรด, ระยะแกป, ขนาดอนุภาคเจือปน, องค์ประกอบทางเคมี, ความชื้น, ปริมาณก๊าซ และอุณหภูมิ เป็นต้น [6-12] จึงมีความจำเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ระบุตามมาตรฐาน IEC 156 และมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ศึกษาถึงลักษณะการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบตามมาตรฐาน รวมทั้งผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน

2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง และวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในขณะทดสอบน้ำมันหม้อแปลงโดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

3) ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบมาตรฐาน ที่ใช้ในการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

4) ทำการทดสอบ และวิเคราะห์ผลทดสอบ

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ระบุตามมาตรฐาน IEC 156 และมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ศึกษาถึงลักษณะการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบตามมาตรฐาน รวมทั้งผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน

2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งออกแบบ และจัดสร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน ที่ใช้ในการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

3) วิเคราะห์สนามไฟฟ้าในขณะทดสอบน้ำมันหม้อแปลงโดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

โครงงานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากโปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้า จากน้ำมันหม้อแปลง รวมถึงนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1) ศึกษาทฤษฎีและพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยมุ่งเน้นในส่วนของน้ำมันหม้อแปลง

2) ศึกษามาตรฐานการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 156 รวมทั้งมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

3) ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนแบบเพื่อการวิเคราะห์ เช่น SolidWorks, AutoCad เป็นต้น

4) ศึกษาการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

5) ออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 156

6) ทดสอบ และบันทึกผลการทดสอบ

7) สรุป และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงงานวิจัยฉบับนี้

1) ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอน และวิธีการทดสอบของน้ำมันหม้อแปลง ในปัจจุบัน

2) ทราบถึงปัญหา และเทคนิคต่างๆ ในการทดสอบ และในการแก้ไข

3) เป็นแหล่งข้อมูล และวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันหม้อแปลงแก่นักวิจัย และนักศึกษาที่ต้องการการพัฒนาและศึกษาต่อ

1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) วิทยานิพนธ์ เรื่อง "แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงและสวิตชิ่งอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธุ์" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) วิทยานิพนธ์ เรื่อง "ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) วิทยานิพนธ์ เรื่อง "คุณลักษณะแรงดัน – เวลาของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึง ชนิดของฉนวนเหลว, คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง, พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า และอธิบายกลไกการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวเชิงการค้าทำให้มีความเข้าใจฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดี

ของเหลวใดๆสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้เสมอ ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีค่าความด้านทานสูงมากพอ และไม่เปลี่ยนสภาพทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าในช่วงเวลาที่นานพอสมควร โดยฉนวนเหลวมีคุณสมบัติหลายอย่างที่เป็นประโยชน์ในการเป็นฉนวนมากกว่าฉนวนแข็ง และฉนวนก๊าซเพราะฉนวนเหลวคล้ายกับฉนวนแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่าฉนวนก๊าซประมาณ 1,000 เท่า ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า และฉนวนเหลวยังคล้ายกับฉนวนก๊าซโดยสามารถเข้าไปแทนที่ในช่องว่างในการทำฉนวนได้ดีแต่คุณสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนของฉนวนเหลวมีความสามารถมากกว่าฉนวนก๊าซ (อากาศ, ไนโตรเจน) ประมาณ 10 เท่าเมื่อใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า ถึงแม้ฉนวนเหลวบริสุทธิ์จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมากถึง 10 MV/cm แต่ในฉนวนเหลวเชิงการค้าที่ใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจริงมีค่าประมาณ 100 kV/cm เท่านั้น

ฉนวนเหลวนำมาใช้เป็นฉนวนซึมซาบในเคเบิลแรงสูง และคาปาซิเตอร์ และยังเป็นฉนวนกั้นด้านแรงดันสูงกับกราวด์ในหม้อแปลงไฟฟ้า, เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังเป็นตัวระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า และดับอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์อีกด้วย ฉนวนเหลวโดยทั่วไปมีส่วนผสมของสารไฮโดรคาร์บอน และมีส่วนเจือปนด้วย ฉนวนเหลวที่ดีที่นำมาใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องปราศจากสารเจือปนต่างๆให้ได้มากที่สุด ซึ่งขึ้นกับกระบวนการกลั่น และแยกสิ่งเจือปนออกจากฉนวนเหลวรวมทั้งการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งานด้วย โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามาก เช่น ความชื้น ซึ่งความชื้นแค่ 0.01% ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถลดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 20% [13]

2.1 ชนิดของฉนวนน้ำมัน

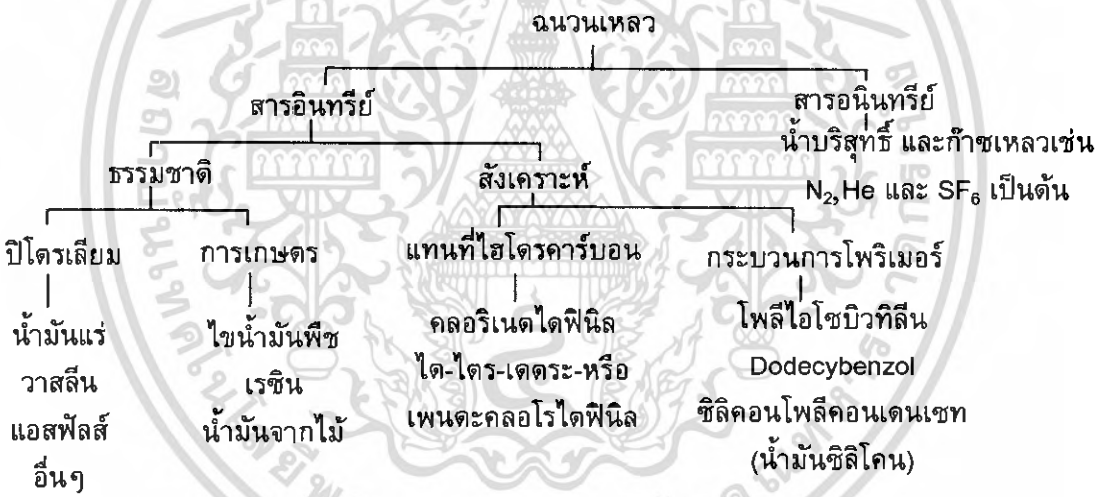
ปัจจุบันได้มีการผลิตฉนวนเหลวหลายชนิดทั้งที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการสังเคราะห์ทางเคมี กระบวนการดังกล่าวทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวนที่ได้มีความแตกต่างกัน สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภท คือ ประเภทสารอินทรีย์กับประเภทสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ตัวอย่าง ฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์ที่ได้จากทางธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม, น้ำมันแร่ (mineral oils), แอลฟัลส์, น้ำมันพืช, ไขมัน (wax) และเรซินธรรมชาติ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์นอกจากจะได้จากธรรมชาติแล้วยังผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี จากกระบวนการแทนที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในสถานะของเหลวและก๊าซ เช่น คลอริเนทไดฟินิล (Chlorinated diphenyles) ปัจจุบันเลิกใช้เนื่องจากเป็นสารอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และราคาแพง เป็นต้น และจากกระบวนการทำให้เกิดโครงสร้างโพลิเมอร์ เช่น โพลีไอโซบิวทิลีน (Polyisobutylene) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และความร้อนดีกว่าน้ำมันแร่ จึงมีการนำไปใช้ในเคเบิลแรงสูง และคาปาซิเตอร์ และซิลิคอนโพลีคอนเดนเซทมีเสถียรภาพสูง (ทำปฏิกิริยากับสารอื่นยาก) และคุณสมบัติทางความร้อนดีกว่าน้ำมันแร่ (ติดไฟที่อุณหภูมิสูง) เป็นต้น

ส่วนฉนวนเหลวประเภทสารอนินทรีย์ เช่น น้ำบริสุทธิ์, ไนโตรเจนเหลว, อาร์กอนเหลว, ออกซิเจนเหลว เป็นต้น น้ำบริสุทธิ์มีราคาถูก และผลิตได้ง่ายสามารถนำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกได้ ส่วนก๊าซเหลวนิยมใช้ในด้านไครโอจีนิก (Cryogenic) [1]

จากรายละเอียดข้างต้น สามารถสรุปประเภทฉนวนเหลวเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมของฉนวนเหลว [1]

2.2 น้ำมันหม้อแปลง

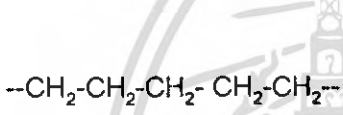
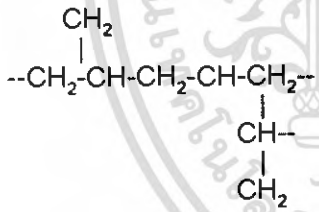
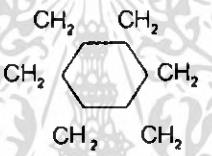
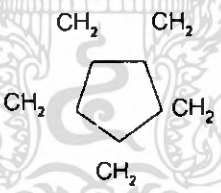
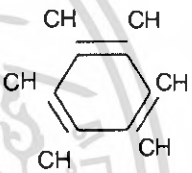
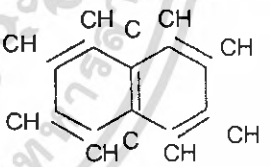
น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นปิโตเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภท คือ พาราฟินิก (parafinic), แนฟทีนิก(napthenic) และอโรมาติก (aromatic) โดยพาราฟินิก และแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ส่วนอโรมาติกไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แต่ละประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาด และความซับซ้อนของโครงสร้างต่างกัน ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะอยู่สถานะก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงมาก และมีโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลับซับซ้อนระเหยยาก และมีความหนืดสูงจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax), แอสฟัลท์ (asphaltic bitumen) เป็นต้น [14]

โดยทั่วไปในน้ำมันดิบจะมีองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วยต้องกำจัดออกไปในกระบวนการกลั่น และในการใช้งานจริงจะพยายามให้อัตราส่วนของอโรมาติกน้อยที่สุดเพราะเป็นสาเหตุสำคัญของการเสียสภาพทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่นิยมให้มีอัตราส่วนแนฟทีนิกมากเพราะจะไม่เกิดขี้ผึ้ง ซึ่งขี้ผึ้งมีผลทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีปัญหาเรื่องการระบายความร้อน ส่วนพาราฟินิกจะมีส่วนประกอบของขี้ผึ้งจำนวนมาก [15] ทั้งนี้โครงสร้างโมเลกุล และสัดส่วนของน้ำมันหม้อแปลงโดยทั่วไปสามารถแสดงดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง [1]

พาราฟินิก	แนฟทีนิก	อโรมาติก
แบบลูกโซ่  หรือ แบบกิ่ง 	 หรือ 	 หรือ 
40 – 60 %	30 – 50 %	5 – 20 %

นอกจากนี้ มีองค์ประกอบดังกล่าวแล้ว ในน้ำมันหม้อแปลงยังมีการใส่สารเติมแต่ง (Additive) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง โดยเฉพาะสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (oxidation inhibitor) ช่วยให้น้ำมันหม้อแปลงเกิดออกซิเดชันยากขึ้นจึงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

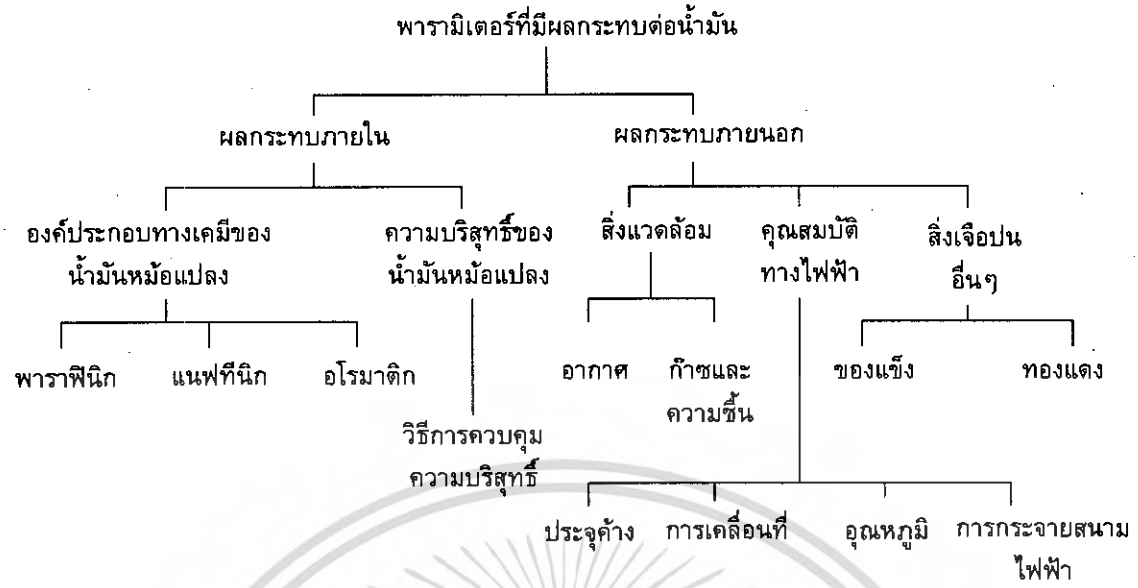
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [15]

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (coefficient of thermal expansion) - ความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (thermal conductivity) - ความถ่วงความร้อนจำเพาะ (specific heat) การเก็บรักษา และปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟทันที (auto ignition temperature)	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของพาราฟินิก, แนฟทีนิก และอโรมาติก - ค่าความเป็นกลาง - แรงดึงผิว (interfacial tension)	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดีสชาร์จบางส่วน และแรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จบางส่วน

2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลงถูกนำไปใช้เป็นฉนวน และตัวระบายความร้อนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยน้ำมันหม้อแปลงต้องมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงที่พิจารณาคือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อน โดยมีพารามิเตอร์หลายชนิดที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้แก่ชนิด และรูปร่างอิเล็กโตรด, ระยะแกป, อัตราการไหลของฉนวนเหลว, ความดัน, อุณหภูมิ อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ เช่น ฟองก๊าซ, อนุภาคเจือปนของแข็ง และความชื้นเป็นต้น ส่วนคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนมีพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบได้แก่ ความหนาแน่น, ความหนืด และอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับน้ำมันหม้อแปลง

1) องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง

องค์ประกอบทางเคมี มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างยิ่ง โดยโครงสร้างโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ เช่น ปริมาณของโครงสร้างอโรมาติกซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัวในน้ำมันหม้อแปลงมีผลต่อความสามารถในการละลายของก๊าซ และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า นอกจากนั้นการเกิดออกซิเดชันก็มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป และกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย แม้แต่การใส่สารเติมแต่งเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงยังส่งผลต่อถึงคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง เช่นการมีสารประกอบโพลีอโรมาติก (Polyaromatic) ที่มีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยมีผลให้ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมันหม้อแปลงที่มีส่วนผสมของแนฟทีนิกมากมีค่าลดลงอย่างมาก [8, 16]

2) ความชื้น

ความชื้นสามารถแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวได้ 3 ลักษณะคือ [14]

1) Dissolved water คือโมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของฉนวนเหลว

2) Condensed water คือโมเลกุลของน้ำที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ในฉนวนเหลว

3) Bound water คือโมเลกุลของน้ำที่ยึดเหนี่ยวอยู่กับโมเลกุลของฉนวนเหลว

ความชื้นมักจะละลายในฉนวนเหลวโดยอยู่ในรูปของ Dissolved water จนถึงสภาวะอิ่มตัวซึ่งเป็นสภาวะที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดที่สามารถอยู่ในรูปของ Dissolved water ได้ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่เกินจากสภาวะอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ Condensed water ส่วน Bound water เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกลั่นที่ไม่ดีพอหรือการเกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถคำนวณหาค่าความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการที่ 2.1 [6]

$$\log W = 7.0895 - \frac{1567}{T} \qquad (2.1)$$

โดยที่ W = ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้น (ppm)

T = อุณหภูมิสมบูรณ์ $(^{\circ}K)$

จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นในอุณหภูมิ 30 $^{\circ}C$ ได้เท่ากับ 82.77 ppm

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงหยดน้ำจะยืดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดเบรกดาวน์ โดยแนวการเบรกดาวน์จะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่อิเล็กโตรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแยกน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ในรูปฟองก๊าซทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน และอาจทำให้เกิดเบรกดาวน์ตามมา

วิธีการป้องกันความชื้นไม่ให้เจือปนในฉนวนเหลวที่ดีที่สุดคือไม่ให้ฉนวนเหลวสัมผัสกับอากาศภายนอกด้วยการบรรจุในภาชนะที่ปิดมิดชิดแต่ต้องมีวิธีแก้ปัญหาการขยายตัวของฉนวนเหลวเมื่อได้รับความร้อนหรือให้สัมผัสกับอากาศโดยผ่านสารดูดความชื้น เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) ก็สามารถลดปริมาณความชื้นจากภายนอกได้

3) ก๊าซ [14]

ภายในน้ำมันหม้อแปลงอาจมีก๊าซปะปนอยู่ แต่ก๊าซจะถูกขจัดออกไปจากน้ำมันหม้อแปลงก่อนการเติมลงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่เนื่องจากสภาพใช้งานจริง เช่น การสัมผัสกับอากาศของกระดาษ และน้ำมันหม้อแปลงจะมีการเสื่อมสภาพขึ้น (Aging) หรือมีการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทำให้มีการเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงได้อีก ฟองก๊าซที่เข้าไปอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงอาจทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นสาเหตุของการที่ทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพ และเกิดการเบรกดาวน์ในที่สุด

ก๊าซสามารถละลายอยู่ในฉนวนเหลวได้ โดยความสามารถในการละลายเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ (Henry's low) ที่กล่าวว่า ความสามารถในการละลาย (saturation solubility, K_a) ของก๊าซใดๆ ที่อยู่เหนือฉนวนเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันบางส่วนของก๊าซนั้น ดังสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_a = A_a K_a \tag{2.2}$$

โดยที่ A_a = ค่าคงที่การละลายของก๊าซ a $(\mu atm./(\mu l/l))$

P_a = ความดันบางส่วนของก๊าซ a (atm)

K_a = ความสามารถในการละลาย $(\%Vol)$

ในสภาวะสมดุลการละลาย ผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมันทั้งหมด $(P_a + P_b + P_c + ...)$ จะเท่ากับผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซเหนือน้ำมัน ตารางที่ 2.3 และ 2.4 แสดงถึงค่าคงที่การละลาย (A) และความสามารถในการละลาย (K) ของก๊าซแต่ละชนิดที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิ 0 – 100 $^{\circ}C$ ความดันบางส่วนของก๊าซเท่ากับ 760 $mmHg$ และพบว่าก๊าซจะละลายได้มากขึ้นหรือน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (A) ตามกฎของเฮนรี่ $(\mu atm./(\mu l/l))$ ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 $mmHg$

อุณหภูมิ(C°)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	9.9	9.7	9.5	9.3	9.1
N_2,ไนโตรเจน	13.0	11.6	11.4	11.1	10.3	10.3
O_2, ออกซิเจน	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8
H_2, ไฮโดรเจน	24.6	20.4	17.5	15.4	13.8	-
CO, คาร์บอนมอนอกไซด์	8.9	8.3	7.9	7.6	7.3	-
CO_2, คาร์บอนไดออกไซด์	0.72	0.89	1.07	1.23	1.5	-

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการละลายของก๊าซ $(K, \%Vol)$ ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 $mmHg$

อุณหภูมิ(C°)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	10.1	0.3	10.5	10.8	10.9
N_2,ไนโตรเจน	7.7	8.6	8.8	9.0	9.7	9.7
O_2, ออกซิเจน	15.6	16.1	16.4	16.7	16.9	17.2
H_2, ไฮโดรเจน	4.1	4.9	5.7	6.5	7.2	-
CO, คาร์บอนมอนอกไซด์	11.2	12.0	12.7	13.2	13.7	-
CO_2, คาร์บอนไดออกไซด์	138.8	112.3	93.5	81.3	66.7	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ประจุค้าง

ประจุค้างเกิดจากการดีสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีความเครียดสูงหรือเกิดหลังจากเกิดเบรกดาวน์ขึ้น ประจุค้างมีผลทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีผลกระทบจากแรงดันที่ขั้วทางไฟฟ้า [17] (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, แรงดันเกินอิมพัลส์) มากกว่าแรงดันที่ไม่มีขั้วทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ประจุค้างยังเกิดจากปรากฏการ streaming electrification ที่น้ำมันหม้อแปลงเคลื่อนที่ และเสียดสีกับฉนวนแข็ง เช่น กระดาษ, แผ่นไม้อัด เป็นต้น และทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าที่ผิวฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีประจุตรงข้ามกัน ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน และดีสชาร์จตามผิวซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ [9]

5) การเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, การทำงานของปั๊มหรือพัดลมในการระบายความร้อน และจากปรากฏการณ์ EHD (electro hydrodynamic) ทำให้เกิดฟองก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง, เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปน และเกิดประจุอิสระเนื่อง จากการเสียดสีระหว่างฉนวนเหลวกับฉนวนแข็งที่เรียกว่าปรากฏการณ์ streaming electrification [8, 18] ซึ่งกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย

6) อุณหภูมิ

คุณสมบัติของพารามิเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ความหนืด, ความดึงผิว และความหนาแน่น ทำให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซ และลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ และมีผลกระทบโดยตรงต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 20 – 100 *ppm* เนื่องจากต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของความชื้นกับน้ำมันหม้อแปลงด้วย [8] ในการศึกษาเราจึงควบคุมปริมาณความชื้นให้ใกล้เคียงกันในการทดสอบแต่ละครั้ง และการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิจะรอให้อุณหภูมินิ่งก่อนจะเริ่มทำการทดสอบ

7) การกระจายสนามไฟฟ้า

ลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงคล้ายกับก๊าซ กล่าวคืออิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะต่ำที่สุด โดยกลไกการเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์โดยตรง ส่วนการเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนก่อนที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ ดังนั้นการออกแบบฉนวนควรออกแบบให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเท่าๆกันในทุกจุดเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดที่ระยะแกปเดียวกัน

8) ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน [19]

แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน, วิธีการป้อน และช่วงเวลาการป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ความเครียดสนามไฟ้าที่จุดต่างๆภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นเรื่องสำคัญมาก วิธีการตรวจสอบคุณภาพการฉนวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบจริง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าคงตัว (แรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับ) ของฉนวนเหลวจะมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

9) อนุภาคเจือปนของแข็ง

อนุภาคของแข็งอาจเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในรูปของไฟเบอร์ (Fiber) หรือฝุ่นละอองซึ่งเกิดมาจากกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมหรือจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟเบอร์ที่เป็นเยื่อของกระดาษฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า, เศษทองแดงหรือเศษเหล็กซิลิคอนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระบวนการผลิต, อนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการทำงานของตัวเปลี่ยนระดับแรงดัน (หรือการดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการดับอาร์กในเซอร์กิดเบรกเกอร์เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเจือปนของแข็งในน้ำมันหม้อแปลงนี้นำไปสู่กลไกการเกิดเบรกดาวน์ได้

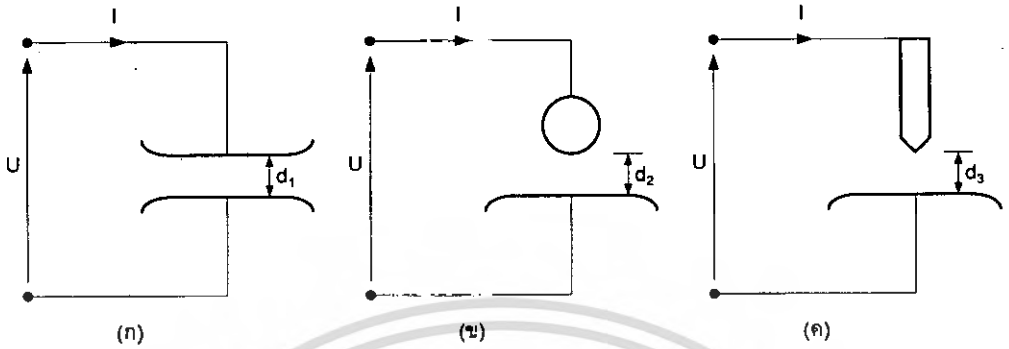
2.4 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) [19]

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field) คือเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (plate – to – plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเดอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E_b = f$ (ลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กดริกและเวลา)



รูปที่ 2.3 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)

ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูป 2.3 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1, d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรดในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเดอร์ต่างๆ หลายประการ

1) อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [19]

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \tag{2.3}$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ. จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

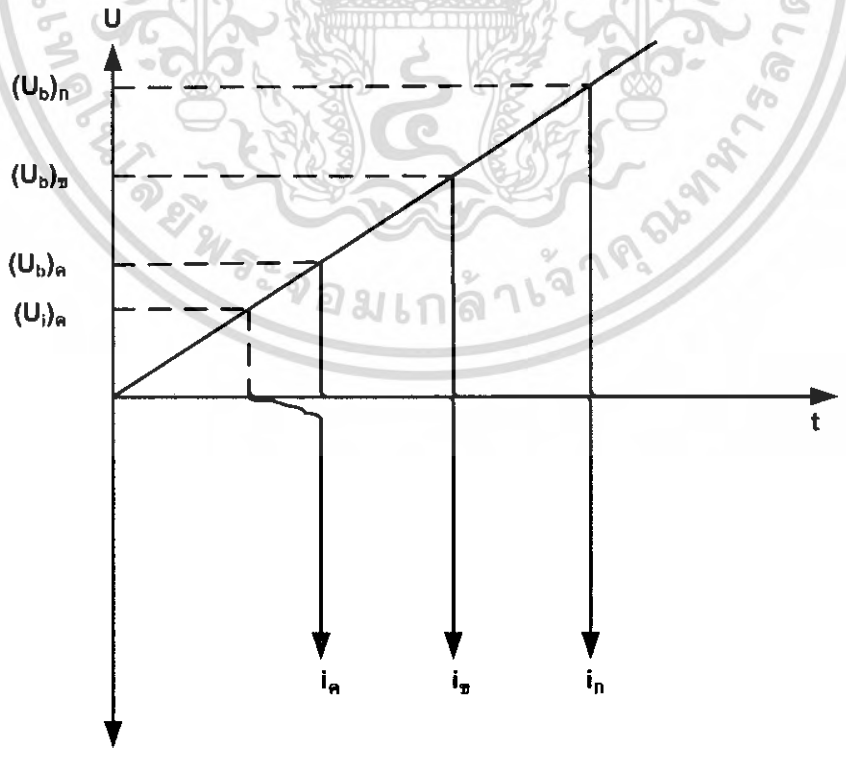
นั่นหมายความว่า เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวน์หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแด็นซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรกดาวน์นั้นค่ากระแสนี้จะวัดไม่ได้ดังในรูป 2.4 (ก) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \tag{2.4}$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของการฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้เสมอ



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโตรดในรูป 2.3 (ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า จะได้ดังในรูป 2.5 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \tag{2.5}$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเดอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) มีคำนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \le 1 \tag{2.6}$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

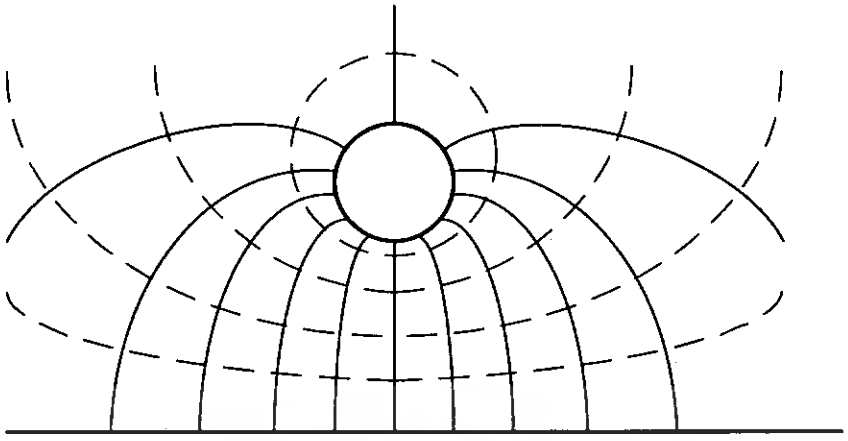
จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเดอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \tag{2.7}$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (Predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ ดังอิเล็กโตรดในรูป 2.3 (ข) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

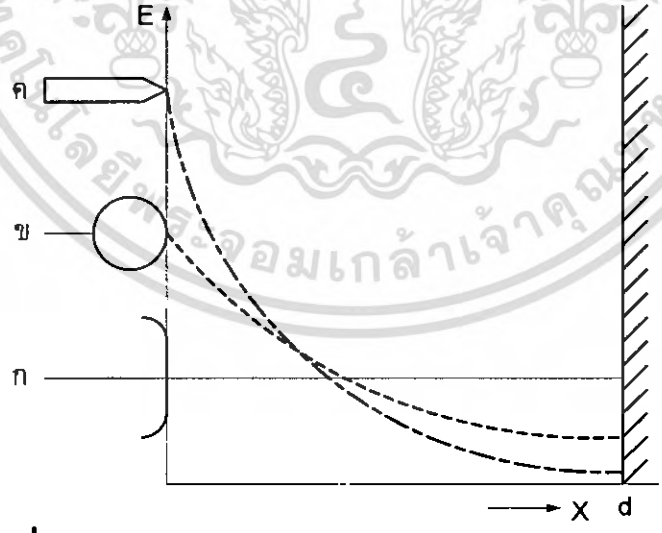


รูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

——— เส้นสนามไฟฟ้า

- - - - - - เส้นศักย์เท่า

ในกรณีที่อิเล็กโดรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูป 2.3 (ค) เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโดรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูป 2.6 อิเล็กโดรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

ในบริเวณใกล้ๆ ผิวอิเล็กโดรด คือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโดรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโดรด) เรียกว่าดีสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
72999

บางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้น และวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์เรียกว่า กระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสพรีดีสชาร์จดังในรูป 2.4 (ค) การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ (2.5) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.7) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ (2.7) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

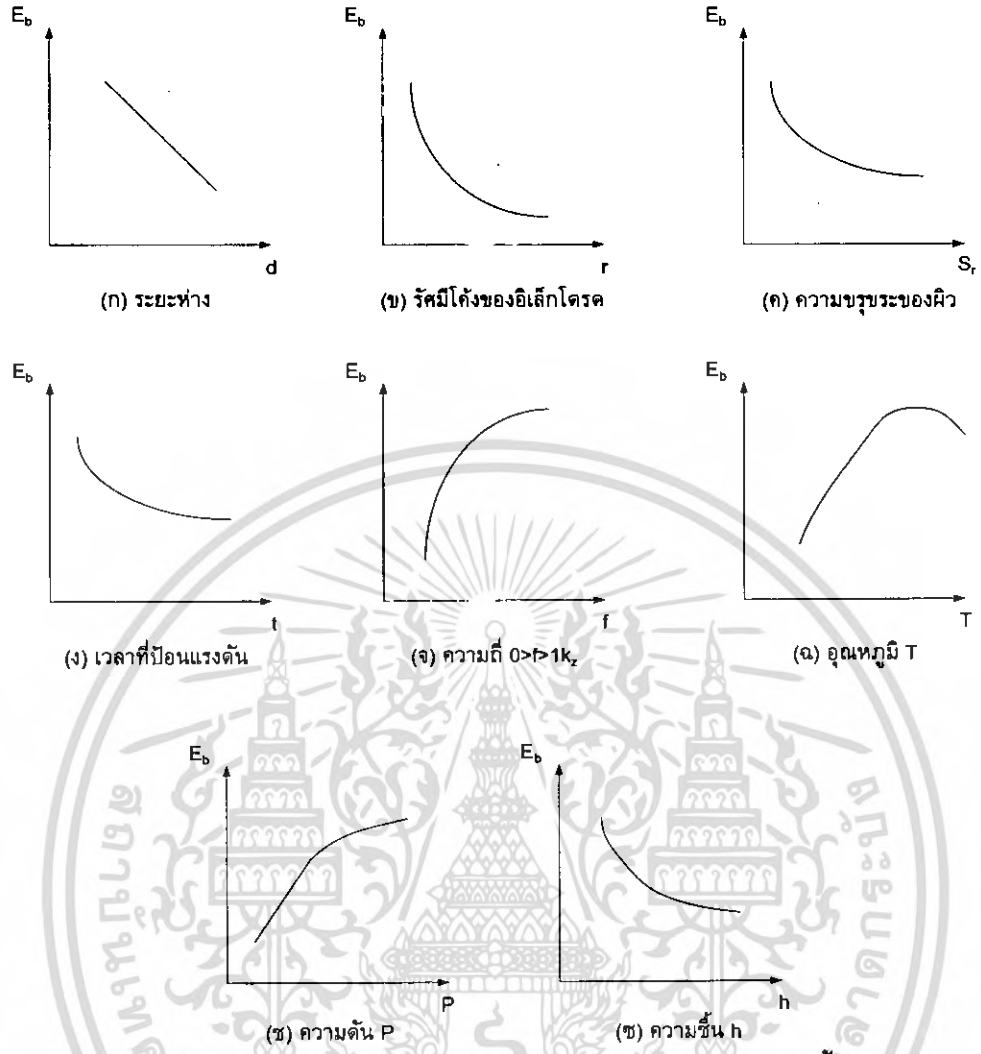
$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \tag{2.8}$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดย E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.8) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีไม่มีประจุค้าง ระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวง่ายๆ ก็คือ สมการ (2.8) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเพิ่ม (starting voltage, threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวนของเหลวขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ

ในช่องระหว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \tag{2.8}$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนค่าแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ ดังที่ได้แสดงรวบรวมไว้โดยสังเขปในรูปที่ 2.7

2.5 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลว [19]

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติ และคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

1. ความต้านทาน
2. เปอร์มิตติวิตี้หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3. แฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

1) ความต้านทานของฉนวน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้นถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนที่ดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโตรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้าง กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน และความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (Surface resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความยาว l พื้นที่หน้าตัด A ของไดอิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กตริก เช่นในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระนาบคาปาซิเตอร์ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.10}$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์แบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho dx}{2\pi l x} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{2.11}$$

เมื่อ x คือ รัศมีใดๆ วัดจากแกนและ dx ความหนาส่วนย่อยของฉนวน

r_1 และ r_2 คือ รัศมีของตัวนำใน และตัวนำนอกตามลำดับ

l คือ ความยาว

2) เปอร์มิตติวิตี้ (permittivity)

เปอร์มิตติวิตี้นี้บางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ε เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติ และเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาปาซิแตนซ์ หรือกล่าวง่ายๆ ε ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาปาซิเตอร์สุญญากาศเมื่อใส่ไดอิเล็กตริกมีเปอร์มิตติวิตี้ ε เข้าไปแทนที่ นั่นคือ

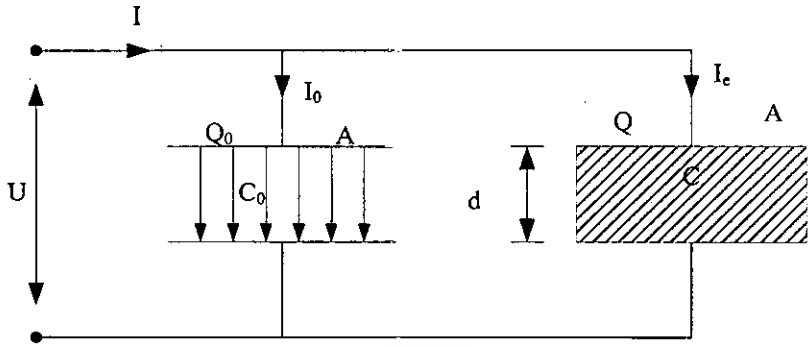
$$c = \varepsilon c_0 \tag{2.12}$$

ปกติเปอร์มิตติวิตี้ ε จะแสดงเป็นความสัมพันธ์ ε_r เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศหรือความว่างเปล่า ε_0

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \tag{2.13}$$

โดยที่ $$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854 \times 10^{-12} \quad F/m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็นสุญญากาศ ε_0 และ ε

และจากความสัมพันธ์ของคาปาซิแดนซ์ $c = \frac{Q}{U}$ จะได้ค่าคาปาซิแดนซ์ของสุญญากาศ

$$c_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.14}$$

ถ้าใส่ไดอิเล็กตริกที่มีสารอื่น (ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง ฉนวนก๊าซ) เข้าไปแทนที่สุญญากาศระหว่างแผ่นอิเล็กโตรด จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสในวงจร จะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าคาปาซิแดนซ์เพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดอิเล็กตริกมากขึ้น

แต่คาปาซิเตอร์สุญญากาศที่มีคาปาซิแดนซ์ c_0 กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$i(t) = c\frac{du(t)}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \bar{r} = j\omega c_0 \bar{U} \tag{2.15}$$

เครื่องหมาย j แสดงให้เห็นเด่นชัดว่ากระแสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ส่วนคาปาซิเตอร์ที่มีสารไดอิเล็กตริก ค่าคาปาซิแดนซ์ c จะไม่เท่ากับ c_0 และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่าในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเปล่าในลักษณะความต้านทาน นั่นแสดงว่าคาปาซิแดนซ์เป็นคอมเพล็กซ์ คือมีค่าจริง และค่าจินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี้ คือ

$$\bar{c} = \overline{\varepsilon_r} c_0 \tag{2.16}$$

โดยที่ $$\overline{\varepsilon_r} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

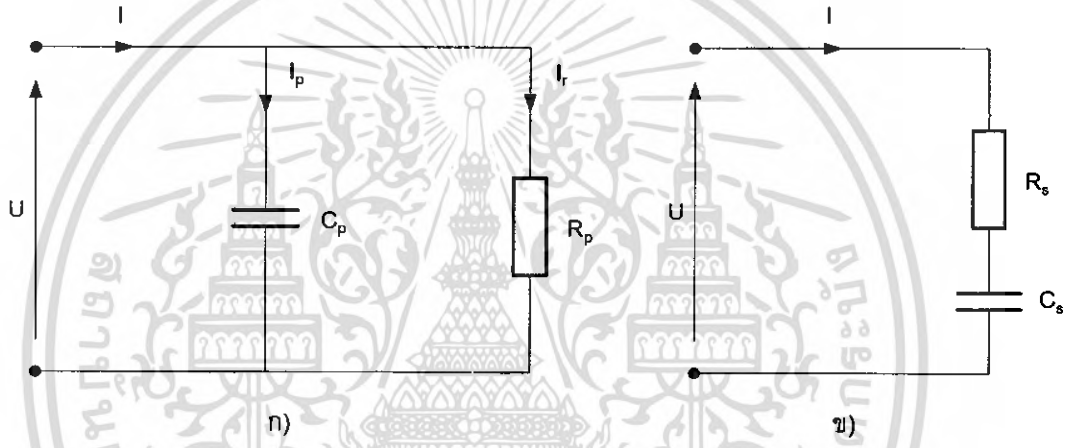
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์

$$\begin{aligned}\bar{I} &= j\omega\bar{c}\bar{U} \\ &= j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')c_0\bar{U} \\ &= j\omega\varepsilon' c_0\bar{U} + \omega\varepsilon'' c_0\bar{U}\end{aligned} \qquad (2.17)$$

เทอมแรกขวามือของสมการ $\bar{I}$ ก็คือ กระแสคาปาซิแดนซ์ I_c และเทอมหลังคือกระแสพลังงานสูญเปล่า I_r คือ $\bar{I} = I_c + I_r$

ไดอิเล็กตริกมีพลังงานสูญเปล่า และสามารถเก็บประจุไว้ในคาปาซิเตอร์ จึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ ดังรูป ก) เป็นวงจรขนาน รูป ข) เป็นวงจรอันดับ



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กตริก

<u>วงจรขนาน</u>

$$c_p = \varepsilon' c_0$$

$$R_p = 1/(\omega\varepsilon'' c_o)$$

$$tg = \frac{1}{\omega R_p c_p} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \qquad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วงจรอันดับ</u>

$$c_s = \frac{\left|\overline{\varepsilon_r}\right|^2}{\varepsilon'} c_0 = \varepsilon' \{1 + (tg.\delta)^2 \} c_0$$

$$R_s = \frac{\varepsilon''}{\omega \left|\varepsilon_r\right|^2 c_0}$$

$$tg.\delta = \omega R_s c_s = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} \qquad (2.19)$$

มุม δ นี้เรียกว่ามุมพลังงานสูญเปล่า (Loss angle)

จากสมการ c_p และ c_s จะเห็นได้ว่า ค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่มีสารไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับวงจรสมมูลย์ ในกรณีที่พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ คือ $\varepsilon'' \langle\langle \varepsilon'$ หรือ $tg\ \delta$ << 1 ค่าคาปาซิแตนซ์ทั้งสองจะเท่ากัน คือ $c_p = c_s$ และจะได้

$$\overline{\varepsilon_r} \rightarrow \varepsilon_r = \varepsilon' \qquad (2.20)$$

นั่นก็คือ ε' จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ (relative dielectric constant) ε_r ที่ใช้กัน

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ ε_r นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปฉนวนที่มีใช้ทั่วไป ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ε_r จะเพิ่มสูงขึ้น

3) แฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริกอาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือพลังงานสูญเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่ความต้านทานไม่ถึงค่าอนันต์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นพลังงานสูญเปล่าเนื่องจากโพลาไรเซชันของไดอิเล็กตริก จัดเป็นพลังงานสูญเปล่าทางไฟฟ้า

ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์กับคาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ กระแสไหลผ่านคาปาซิเตอร์จะมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ $U = U_m \sin \omega t$

$I = \omega C U_m \cos \omega t$

$I = \omega C U$

เมื่อ U เป็น ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลในคาปาซิเตอร์จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.10 ϕ เป็นมุมเฟสของคาปาซิเตอร์ ดังนั้นเพาเวอร์แฟกเตอร์ = $\cos\phi$ หรืออีกอย่างหนึ่งคือ $\sin\delta$ ฉะนั้นกำลังสูญเปล่าในคาปาซิเตอร์ไม่สมบูรณ์ คือ

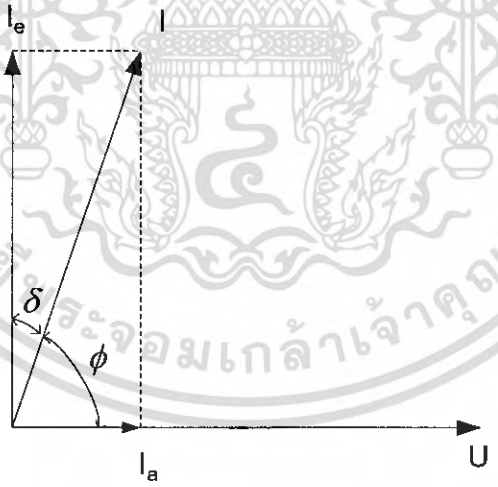
$$UI\cos\phi \text{ หรือ } UI\sin\delta$$

เมื่อ δ มีค่าน้อยๆ $UI\sin\delta = UI\tan\delta$

โดยที่ $\delta = 90^\circ - \phi$

δ = มุมพลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

$tg\ \delta$ = แฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.10 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ

$$tg\ \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \qquad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นพลังงานสูญเปล่า

$$P_d = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p tg\ \delta$$

หรือ

$$P_d' = E^2 \omega \varepsilon\ tg\ \delta \qquad (2.22)$$

เมื่อ P_d' เป็น พลังงานสูญเปล่าต่อปริมาตร
E เป็น ความเครียดสนามไฟฟ้า
ถ้า C เป็น ค่าเก็บประจุไฟฟ้า (ฟารัด)
U เป็น ค่าแรงดันที่ป้อน (โวลต์)
จะได้ P_d เป็น ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (วัตต์)

4) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength) ซึ่งเป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ไดอิเล็กตริกเบรกดาวน์ หาได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน์ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมี และทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็ดีอาจมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือปน

2.6 ฉนวนเหลว

ฉนวนของเหลวถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น สายเคเบิลที่มีฉนวนเป็นกระดาษชุบน้ำมัน หม้อแปลงชนิดฉนวนด้วยน้ำมัน ตัวเก็บประจุแรงสูง และเบรกเกอร์บางชนิด เป็นต้น ลักษณะโมเลกุลของฉนวนของเหลวจะมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลพอๆกับขนาดโมเลกุล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซแล้วจะสั้นกว่ามาก ดังนั้นระยะทางอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้จึงสั้นกว่า พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อย ในการที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสูงมาก ฉนวนของเหลวจึงมีความแตกต่างกับฉนวนแข็ง โดยที่โมเลกุลของฉนวนเหลวไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างหนาแน่นเหมือนโมเลกุลของแข็ง โมเลกุลของเหลวสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระพอสมควร อนุภาคไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าของแข็ง เมื่ออนุภาคไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเหลว ฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในระบบ และอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภท น้ำมันไฮโดรคาร์บอน หรือฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ซึ่งทนความร้อนได้สูง ซึ่งฉนวนประเภทที่มีความบริสุทธิ์แท้นั้นหาได้ยากเช่นเดียวกับก๊าซบริสุทธิ์ ส่วนใหญ่แล้วในฉนวนจะมีสิ่งเจือปนอยู่ไม่มากก็น้อย เช่น ฝุ่น, ความชื้น ดังนั้นการวิเคราะห์เบรกดาวน์ในฉนวนของเหลวจึงต้องมีความสำคัญเดียวกับปัจจัยผลของสิ่งเจือปนเป็นอย่างมาก

ลักษณะคุณสมบัติที่ต้องการของฉนวน สำหรับฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ

1) ความถ่วงจำเพาะ

2) จุดติดไฟ (จุดติดไฟสูง ย่อมหมายถึงโอกาสเกิดเพลิงไหม้ย่อมมีน้อย)

3) ความหนืด (ความหนืดสูง ย่อมหมายถึงความสามารถระบายความร้อนได้ดี)

4) ความเป็นกรด (ซึ่งแสดงถึงปริมาณส่วนที่เป็นกรดผสมอยู่ในของเหลว)

5) แฟกเตอร์พลังสูญเปล่า $\tan\delta$ (เป็นตัวชี้ให้ทราบว่าการเกิดพลังงานสูญเสียมากน้อยเพียงใด)

โดยหลักการแล้วฉนวนของเหลวจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าฉนวนประเภทก๊าซและฉนวนแข็ง ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนก๊าซ เพราะมีความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนก๊าซ ย่อมมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนก๊าซ และจัดว่าดีกว่าฉนวนแข็ง เพราะว่าฉนวนสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่า ที่สำคัญฉนวนของเหลวสามารถกลับคืนสู่การเป็นฉนวนเองได้ภายหลังจากดีสชาร์จผ่านพ้นไปแล้ว ข้อดีอีกประการหนึ่งของฉนวนเหลว คือสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีอย่างไรก็ตามฉนวนของเหลวจะมีข้อดีหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ในทางปฏิบัติเราจะพบว่ามีการใช้ฉนวนของเหลวกันน้อยกว่าฉนวนก๊าซ และฉนวนแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากฉนวนของเหลวที่ใช้กันในเชิงการค้ามักไม่บริสุทธิ์แท้ จึงมักใช้ฉนวนของเหลวในรูปของกระบวนการแช่อิ่ม (Impregnation) มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า

คุณสมบัติ	ชนิดของฉนวนเหลว		
	น้ำมันหม้อแปลง	คลอริเนท	ฟลูออริเนท
ความถ่วงจำเพาะ g/cm^3	0.9	1.4	1.8
จุดติดไฟ ^{o}C	130 – 180	-	-
สภาพนำความร้อน $mW/cm\ ^{o}C$	1.6	1	1
ความต้านทานจำเพาะohm-cmที่ 85 ^{o}C	100×10^{12}	100×10^{12}	10×10^{12}
แฟกเดอร์พลังงานสูญเปล่าที่ 80 ^{o}C 50 Hz	10×10^{-4}	6×10^{-4}	6×10^{-4}
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตาม IEC Standard ที่ 20 ^{o}C kV/mm	10 – 25		
เปอร์มิดดิวิตี้สัมพัทธ์ ε_r (50 Hz)	2 – 2.5		
ความชื้นที่ยอมให้มีได้สูงสุด (ppm)	50		
ความหนืด การขยายตัว (20 – 100 ^{o}C)	$7 \times 10^{-4}\ ^{o}C$		
ผลแตกตัวขององค์ประกอบเมื่อเกิดอาร์กไฟฟ้า	ไฮโดรเจน อะเซตทีลีน	กรด ไฮโดร-คลอริค	กรด ไฮโดร-ฟลูออริค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของฉนวนน้ำมันชนิดต่างๆ ที่สำคัญ

Property	Transformer Oil	Cable Oil	Capacitor Oil	Askerals
Breakdown strength at 20 ^{o}C on 2.5 mm standard sphere gap	15 kV/mm	30 kV/ mm	20 kV/ mm	20 – 25 kV/mm
Relative permittivity (50 Hz)	2.2 – 2.3	2.3 – 2.6	2.1	4.8
Dielectric constant δ loss (50 Hz)	0.001	0.002	0.25×10^{-3}	0.60×10^{-2}
Dielectric constant δ loss (1 kHz)	0.0005	0.0001	0.10×10^{-3}	0.50×10^{-3}
Resistivity (ohm-cm)	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{13} \times 10^{14}$	2×10^{13}
Specific gravity at 20 ^{o}C	0.89	0.93	0.88 – 0.87	1.4
Viscosity at 20 ^{o}C (CST)	30	30	30	100 – 150
Acid value (mg/gm of KOH)	Nil	Nil	Nil	Nil
Refractive index	1.4820	1.4700	1.4740	1.60
Saponification (mg of KOH/gm of Oil)	0.01	0.01	0.01	<0.01
Expansion (20 – 100 ^{o}C)	7×10^{-4} ^{o}C	7×10^{-4} ^{o}C	7×10^{-4} ^{o}C	7×10^{-4} ^{o}C
Maximum permissible water Content (in ppm)	50	50	50	<30 (negligible)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 คุณลักษณะจำเพาะ และผลกระทบที่เกิดขึ้น

คุณลักษณะ	คำอธิบายเพิ่มเติม
ความหนืด	ถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนดี
ความแข็งแรง	ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงเชิงกำบังไฟฟ้ามีค่าต่ำ เชิงกำบังไฟฟ้าแต่จะทำให้ก๊าซที่ละลายในน้ำมันเกิดการแตกตัวมากขึ้น และความเป็นฉนวนของน้ำมันจะลดลง
จุดวาบไฟ	เป็นระดับอุณหภูมิที่ไอบนผิวน้ำมันสามารถติดไฟขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ ถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีจุดวาบไฟต่ำ จะทำให้น้ำมันระเหยได้ง่าย และขยายตัวได้มากนั่นคือ ทำให้ความดันหม้อแปลงมีค่าสูง
ความหนาแน่น	เป็นค่าที่ระบุไว้เพื่อป้องกันมิให้น้ำมันกลายเป็นน้ำแข็งในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปจะกำหนดไว้ประมาณ 0.895 g/cm2 ที่ 20 °C
จุดไหลเท	เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิที่มีค่าต่ำที่สุดที่น้ำมันยังไหลได้
ค่ามูลน้ำมันและค่าความเป็นกรด	เป็นค่าที่เกิดขึ้นภายหลังที่น้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศซึ่งหากมีค่าความเป็นกรดสูง จะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนต่ำ และยังอาจมีผลต่อการไหลเวียนของน้ำมันในท่อน้ำมันด้วย เพราะว่ามูลน้ำมันไปเกาะภายในท่อน้ำมัน
ความแข็งแรงเชิงไฟฟ้า	เป็นค่าที่ระบุความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้น้ำมันคงค่าความเป็นฉนวนได้ดี
การปนเปื้อนของสารอื่น	ได้แก่ สารจำพวก กำมะถัน และน้ำ ซึ่งกรณีของกำมะถันนั้นจะต้องไม่มีอยู่เลยในน้ำมัน ส่วนน้ำก็จะต้องอยู่ในพิกัด ทั้งนี้เพื่อรักษาความเป็นฉนวนของน้ำมัน [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาจากลักษณะโครงสร้าง และองค์ประกอบของฉนวนเหลวอาจแยกได้ 2 ประเภท คือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวเชิงการค้า

1) ฉนวนเหลวเชิงการค้า หมายถึงฉนวนที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่บริสุทธิ์ มีโครงสร้าง หรือส่วนผสมของโมเลกุลยุ่งยากซับซ้อน และอาจมีฟองอากาศเจือปนอยู่

2) ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ หมายถึง ฉนวนของเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีโมเลกุลอย่างง่ายๆ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ปราศจากสิ่งเจือปน หรือบ้างแต่น้อยกว่าค่าคงที่กำหนด

ฉนวนที่ใช้ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะเป็นฉนวนเชิงการค้า อาจมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อให้ฉนวนมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากขึ้น เช่นการลดการเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชัน ช่วยลดความหนืด เป็นต้น ฉะนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่มากน้อยแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามสิ่งเจือปนในฉนวนเหลวอาจจะกรองให้สะอาดใหม่ได้ และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าก็จะสูงขึ้น

1) กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว [19]

กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ เช่นน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ แต่ถ้าเป็นฉนวนเหลวชนิดผสม (Impurities) การเกิดเบรกดาวน์จะอธิบายได้ด้วยผลของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ ทั้งนี้เพราะว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับแฟกเดอร์หลายๆ อย่างประกอบกัน เช่น ลักษณะคุณสมบัติทางฟิสิกส์, ทางเคมี, ทางไฟฟ้า, ชนิด และปริมาณของสิ่งเจือปนตลอดจนลักษณะของรูปทรงอิเล็กโตรด (Electrodes Configuration) ดังนั้นจึงมีทฤษฎีอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ

ทฤษฎีที่ 1 เสนอโดย Lewis Sharbaugh และ Watson Swan โดยสมมติว่าฉนวนเหลวเป็นแบบเนื้อเดียวกันตลอดไม่มีสิ่งเจือปน ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้เช่นเดียวกับก๊าซที่อาศัยการเกิดอะวาลานช์อิเล็กตรอนจากกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) ในสนามไฟฟ้า (Field Emission) หรือกระบวนการ Thermionic Emission

ทฤษฎีที่ 2 พิจารณาจากผลของสิ่งแปลกปลอม ทฤษฎีนี้อาจแบ่งออกเป็นการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากโพรงหรือฟองก๊าซ การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากหยดของเหลวเจือปนชนิดอื่นๆ และผลการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากสิ่งเจือปนที่เป็นของแข็ง

2) กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์เนื่องจากสนามไฟฟ้า

ฉนวนเหลวบริสุทธิ์จะมีเนื้อเดียวกันตลอดปราศจากสิ่งเจือปน กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์จึงอธิบายได้เช่นเดียวกันกับการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ โดยอาศัยกระบวนการที่อิเล็กตรอนแตกตัวออกจากคาโทด (Field Emission and Thermionic Emission) เมื่อพิจารณาจากกระแสคาโทดจะเกิดสภาพการนำไฟฟ้าขึ้น เมื่อเราป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการของชอคกี้ (Schottky's Equation) นั่นคือ

$$J = J_t \times e^{\left(\frac{4.4\sqrt{E}}{T}\right)} \tag{2.23}$$

เมื่อ

$$J_t = AT^2 \times e^{\left(\frac{-e\varphi}{kT}\right)} \tag{2.24}$$

โดยที่ J คือ ความหนาแน่นของกระแส

T คือ อุณหภูมิของฉนวนเหลว

A คือ พื้นที่หน้าตัดของฉนวนเหลว

E คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรด

φ คือ เส้นแรงไฟฟ้า

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

k คือ Thermal Conductivity

เมื่อ J_t คือ ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Tem ionic Current Density) จากสมการแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าอุณหภูมิจะมีผลน้อยมากในช่วงอุณหภูมิค่าสูงๆ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้ามากกว่าหรือขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดนั่นเอง เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วอิเล็กโตรดเข้าไปชนโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้ฉนวนเหลวได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าในทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์นี้สมมติว่าอิเล็กตรอนบางตัวอาจมีพลังงานมากพอ กล่าวคือ มากกว่าการสูญเสียเนื่องจากการชนกันเองของอิเล็กตรอนในโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าจนกระทั่งมีพลังงานมากพอที่จะสามารถไอออไนซ์โมเลกุลโดยการชนกัน และเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดอะวาลานซ์ (Avalanche) ของอิเล็กตรอน

เงื่อนไขการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ได้จากการที่อิเล็กตรอนมีพลังงานสะสมมากกว่าพลังงานไอออไนเซชั่นของโมเลกุล นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e \cdot E \cdot \lambda = c \cdot hv \tag{2.25}$$

เมื่อ e คือ จำนวนอิเล็กตรอน

E คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อน

λ คือ ระยะอิสระของอิเล็กตรอน

hv คือ พลังงานควอนตัมที่สูญเสียในการไอออไนเซชั่นของโมเลกุล

c คือ ความเร็วแสง $\left(3\times10^{8} m/s\right)$

ทฤษฎีนี้จะสามารถทำนายความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันเบรกดาวน์ได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถอธิบายเรื่องเวลาล่าช้า (Time Lag) ที่เกิดขึ้นในกลไกการเกิดเบรกดาวน์กรณีแรงดันอิมพัลส์ได้

3) การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากโพรงหรือฟองก๊าซ (Caviation or Bubble Breakdown) [19, 21]

ในฉนวนเหลวอาจมีฟองก๊าซเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีโพรงก๊าซอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรดหรือเนื่องจากแรงอิเลคโตรสแตติกซ์ (Electrostatic) ระหว่างกลุ่มประจุด้วยกันเอง ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าแรงตึงผิวที่อิเล็กโตรด หรือเกิดฟองก๊าซจากผลของโมเลกุลฉนวนเหลวเกิดการแตกตัว เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน หรือโคโรน่าดีสชาร์จทำให้ฉนวนเหลวระเหยกลายเป็นไอ เป็นต้น เมื่อเกิดฟองก๊าซขึ้นในฉนวนของเหลวฟองก๊าซนั้นจะขยายยืดยาวออกตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า วิศวกรชื่อ "Kao" ได้พยายามคิดหาสมการของสนามไฟฟ้าสำหรับการคำนวณเบรกดาวน์ในฟองก๊าซโดยสมมติให้ปริมาตรของฟองก๊าซที่ยืดยาวออกมีค่าคงที่ เบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเชน (Pachen's Curve) สำหรับฟองก๊าซชนิดนั้นๆ ซึ่งสมการของสนามไฟฟ้าสำหรับการเบรกดาวน์ของฟองก๊าซสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}\left\{\frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{r}\times\left|\frac{\pi}{4}\sqrt{\left(\frac{V_b}{2rE}\right)}-1\right|\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{2.26}$$

โดยที่ σ คือ ความตึงผิวของฉนวนเหลว

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ คือ เปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนเหลว และฟองก๊าซตามลำดับ

r คือ รัศมีเริ่มแรกของฟองก๊าซ (ดอนเริ่มแรกสมมติให้เป็นรูปทรงกลม)

V_b คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมฟองก๊าซ

จะสังเกตเห็นว่าสนามไฟฟ้าในสมการที่ (2.26) ขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซดอนเริ่มแรก ซึ่งขนาดของฟองก๊าซนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวอันเนื่องมาจากหยดของเหลวปนเปื้อนชนิดอื่น

การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวอันเนื่องมาจากหยดของเหลวปนเปื้อนชนิดอื่น เช่น หยดน้ำ หรือของเหลวชนิดอื่น เป็นต้น การเกิดเบรกดาวน์อาจเกิดขึ้นจากความไม่คงรูปของหยดน้ำนี้ภายใต้สนามไฟฟ้า สมมติว่าหยดน้ำรูปทรงกลมนี้มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็น ε_2 จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ ε_1 อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดบนสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เนื่องจากหยดรูปทรงกลมนี้ถูกอัดไม่ได้ ผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดทรงกลมนี้ยืดตัวออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในหยดน้ำรูปทรงกลมที่อัดตัวไม่มีปริมาตรอาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_2 = 2\sqrt{\frac{2\pi\sigma\varepsilon_1}{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2}\frac{\beta^{\frac{1}{3}}}{R}\left(2\beta-1-\frac{1}{\beta^2}\right)} \qquad (2.27)$$

โดยที่ σ คือ ความตึงผิวของฉนวนเหลว

ε_1 คือ เปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนเหลว

ε_2 คือ เปอร์มิตติวิตี้ของรูปทรงกลมเหลวเจือปน

β คือ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนแคบของหยดรูปทรงกลม

R คือ รัศมีของหยดเจือปน

ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าภายในหยดของเหลวเจือปนรูปทรงกลม E_2 กับสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปราศจากหยดเจือปนรูปทรงกลม E อาจเขียนได้ว่า

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 \cdot E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cdot G} \qquad (2.28)$$

เมื่อ $$G = \frac{1}{\beta^2-1}\left\{\frac{\beta\cosh^{-1}\beta}{(\beta^2-1)^{\frac{1}{2}}}-1\right\} \qquad (2.29)$$

จากสมการ (2.28) และ (2.29) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็นดังนี้

$$E = 600\sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}\right)\times\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1-\varepsilon_2}-G\right)\times H} \qquad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = \sqrt{2\beta^{\frac{1}{3}}\left(2\beta - 1 - \frac{1}{\beta^2}\right)} \qquad (2.31)$$

Alstonได้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β กับเทอม $\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right) \times H$ และชี้ให้เห็นว่าถ้าอัตราส่วน $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ มากกว่า 20 ค่า E จะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดแล้วจะเริ่มลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของหยดเจือปนรูปทรงกลมจะไม่เสถียรหรือไม่คงรูปแน่นอนเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤติ แต่ถ้าอัตราส่วน $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ ค่าน้อยกว่า 20 จะไม่มีสนามไฟฟ้าวิกฤติ แม้ว่า β จะเพิ่มขึ้นสูงมากก็ตามในกรณีหยดรูปทรงกลมเจือปนเป็นตัวนำ นั่นคือ $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \to \infty$ จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.30) จะได้ว่า

$$E = 600\sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}\right)GH} \qquad (2.32)$$

นั่นคือเทอม GH จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.45865 เมื่อ β มีค่าประมาณ 1.85 ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติที่ทำให้หยดเจือปนรูปทรงกลมเสียสภาพ (E_{cr}) จะมีค่าเป็น

$$E_{cr} = 487.7\sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon_1 R}} \quad V/cm \qquad (2.33)$$

รูปที่ 2.11 ลักษณะกลไกการเกิดเบรกดาวน์ของหยดน้ำภายในฉนวนของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากสิ่งเจือปนของแข็ง

สารไม่บริสุทธิ์ เช่น ผงฝุ่น หรือไฟเบอร์ อาจเจือปนอยู่ในฉนวนเหลวในลักษณะของอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยกระจายอยู่ในเนื้อฉนวนเหลว Kok และ Corbey ได้อธิบายโดยสมมติว่าอนุภาคเป็นลูกทรงกลมมีรัศมี r และมีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็น ε_2 จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็น ε_1 อนุภาคจะถูกโพลาไรซ์ (Polarized) ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคนั้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังสมการ

$$F = \frac{1}{2} r^3 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \cdot grad \quad E^2 \tag{2.34}$$

จาก $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ในกรณีนี้ซึ่งเป็นกรณีของการเจือปนด้วยอนุภาคของแข็งจะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคให้เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสูงกว่า ถ้า $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระทำในทิศทางตรงกันข้ามผลของแรงนี้จะทำให้อนุภาคเรียงตัวกันเป็นลูกโซ่เชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโตรดทำให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นได้

6) การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากผลของรูปทรงอิเล็กโตรด

ทฤษฎีที่นำเสนอมานั้นไม่ได้อธิบายผลของระยะห่าง และรูปทรงอิเล็กโตรดไว้ด้วย เป็นเพียงแต่การกล่าวถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวเนื่องจากสนามไฟฟ้าเท่านั้น ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวอาจเขียนในเทอมของระยะแกป (Gap) ได้ดังสมการ

$$E_b = \frac{V_b}{d \cdot \eta^*} \tag{2.35}$$

เมื่อ E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์

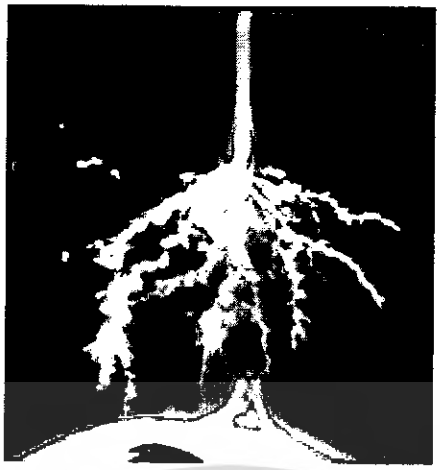
V_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

η^* คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Field Utilization Factor ($\frac{E_{av}}{E_{\max}}$)

ซึ่งปกติจะมีค่า ≤ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวภายใต้ชุดอิเล็กโตรดทดสอบแบบทรงกลม – แท่งปลายแหลม

7) กลไกทางอุณหภูมิของการเกิดเบรกดาวน์ [19]

เทอร์มัลเบรกดาวน์เป็นอีกกลไกหนึ่งที่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวได้เป็นอย่างดี กลไกนี้เป็นการพิจารณาการทดสอบขณะที่เกิดกระแสปริมาณมากๆ ในช่วงก่อนเกิดเบรกดาวน์ โดยวิเคราะห์ให้กระแสนี้เดินทางจากจุดเล็กๆ บนผิวคาโทด (มีความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 A/cm^2)

กระแสที่มีความหนาแน่นสูงนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในฉนวนเหลว และทำให้เกิดฟองไอขึ้น ฟองไอนี้จะฟอร์มตัวกันขึ้นเมื่อพลังงานเกินกว่า 10^7 w/cm^3 และเกิดเบรกดาวน์ตามมา โดยการยืดตัวของฟองก๊าซจนถึงจุดวิกฤตหรือเมื่อช่องว่างที่เกิดขึ้นยืดตัวจนเป็นสะพานระหว่างขั้วอิเล็กโตรด โดยทั้ง 2 กรณีจะสังเกตเห็นการสปาร์คเป็นประกายไฟขึ้น

การพิจารณากลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ จะได้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์แปรผันกับความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของฉนวน ตัวอย่างเช่น n – alkenes จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ขึ้นกับความยาวลูกโซ่ของโมเลกุล อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้จะอธิบายได้เฉพาะในกรณีที่ระยะระหว่างอิเล็กโตรดใกล้ๆ กันเท่านั้น ($\leq$ 100 μm) ไม่สามารถอธิบายการเบรกดาวน์ที่ระยะห่างมากๆ ได้

8) ระยะระหว่างอิเล็กโตรด (gap) กับผลของการเกิดเบรกดาวน์

ทฤษฎีที่ผ่านๆมานั้นจะมีเพียงการคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงสุดของฉนวนที่พิจารณาเท่านั้น แต่ที่จริงแล้วยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวนั่นก็คือ ระยะระหว่างอิเล็กโตรด (Gap length) โดยค่าแรงดันเบรกดาวน์สามารถแสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_b = An^d \tag{2.36}$$

โดย d เป็น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

A เป็น ค่าคงที่

n เป็น ค่าคงที่

A และ n จะหาได้จากการทดสอบเท่านั้น และเราสามารถหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการ

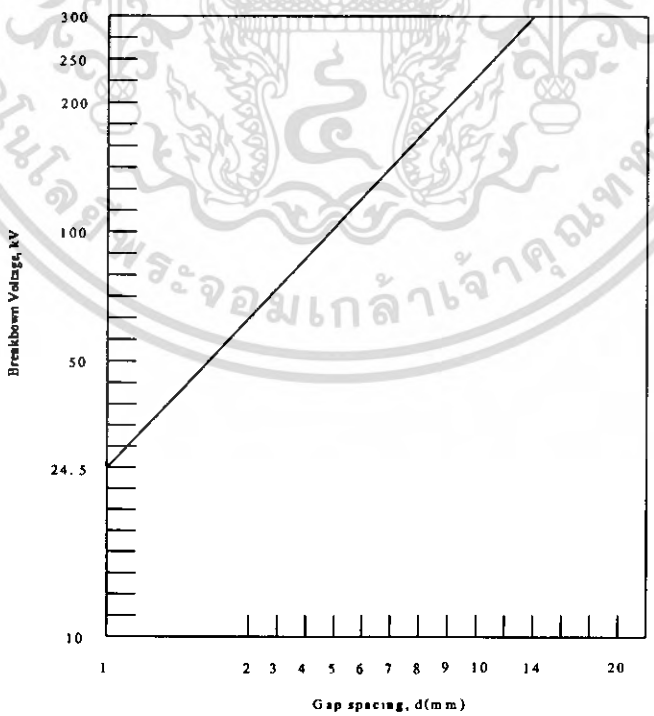
$$E_b = \frac{V_d}{d} \tag{2.37}$$

9) ตัวอย่างการทดสอบการเบรกดาวน์

การทดสอบน้ำมันหม้อแปลงชนิดหนึ่งโดยใช้แกปทรงกลมขนาดหัวอิเล็กโตรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

ระยะห่าง (gap) (mm)	4	6	10	12
แรงดันเบรกดาวน์ (kV)	90	140	210	255

จากผลการทดสอบสามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์เป็นฟังก์ชันของระยะห่างของขั้วอิเล็กโตรดจากข้อมูลในตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ $V_b = Ad^n$

Take log ทั้ง 2 ข้าง $\log V_b = \log A + n\log d$

$$\log V_b - \log A = n\log d$$

$$n = \frac{\log V_b - \log A}{\log d}$$

จากกราฟในรูปที่ 2.13 จะได้ว่า

n = ความชันของกราฟ = 0.947

และ

$$A = 24.5$$

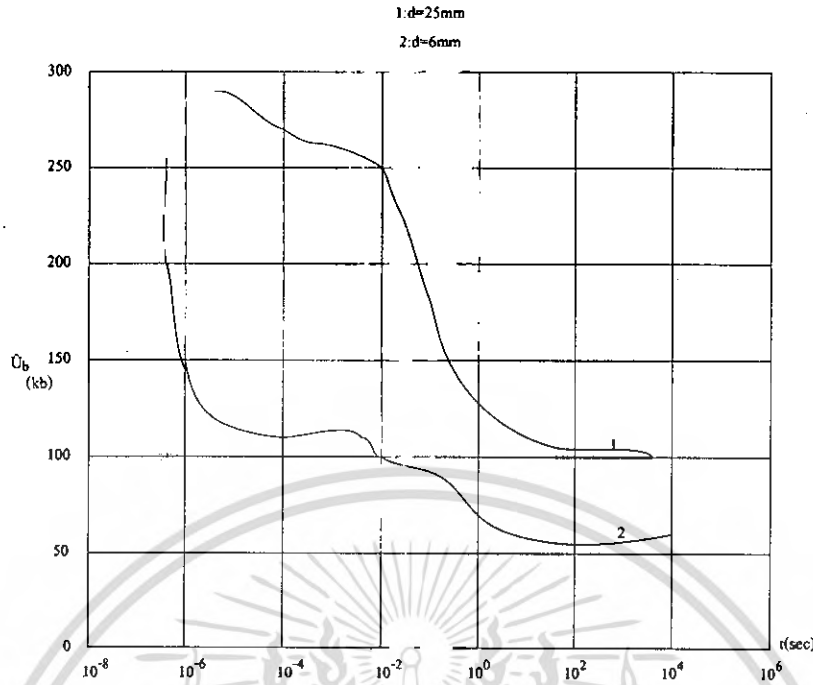
ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของน้ำมันหม้อแปลงที่ทดสอบได้ดังนี้

$$V_d = 24.5d^{0.947}$$

10) รูปคลื่นแรงดันมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน และช่วงเวลาของการป้อนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ค่าความคงทนของฉนวนเหลวต่อแรงดันคงตัว (dc และ ac) จะมีค่าต่ำกว่าค่าของแรงดันอิมพัลส์ดังในรูป 2.14 ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจอธิบายได้ด้วยหลักการของเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงแรงดันดันเบรกดาวน์กับเวลาที่จ่ายแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

11) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

การศึกษาหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจะหาจากแรงดันคงตัวและแรงดันอิมพัลส์โดยใช้อิเล็กโตรดที่มีผิวเรียบสะอาด เป็นรูปส่วนโค้งทรงกลม ในทางปฏิบัติจะพบว่าการที่จะทำให้ผิวอิเล็กโตรดเรียบ และสะอาดอยู่เสมอนั้นทำได้ยาก เพราะการเกิดเบรกดาวน์จะทำให้ผิวอิเล็กโตรดเสียหายรวมทั้งฉนวนเหลวด้วย ปัญหานี้อาจแก้ได้ถ้าใช้แรงดันคงตัว เช่น แรงดันกระแสตรงหรือแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ จะต้องใช้อิเลคทรอนิกส์สวิตช์ทำหน้าที่เบี่ยงเบนพลังงานดีสชาร์จมิให้ผ่านอิเล็กโตรดในช่วงเวลาสั้นที่สุด คือน้อยกว่า 1 μsec เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดแก่อิเล็กโตรดให้น้อยที่สุด จำนวนครั้งที่วัดเบรกดาวน์ไม่ควรมากนัก คือไม่ควรให้มีเขม่าเกาะหรือเกิดรอยขรุขระที่ผิวอิเล็กโตรด ถึงจะใช้วิธีในการหาความคงทนอย่างประณีตอย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ก็ยังกระจัดกระจายถึง 5 – 10 %

ถ้าหากความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวด้วยแรงดันพัลส์ (ช่วงเวลาของแรงดันเพียงไม่กี่ไมโครวินาที) ด้วยแล้ว ผลที่ได้จะยิ่งกระจัดกระจายมากยิ่งขึ้น เพราะขึ้นอยู่กับเรื่องเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ (time lag) เช่นเดียวกับกรณีของการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ และซ้ำยังขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ต่างๆ

Liquid	Maximum breakdown strength (MV/cm)
Hexane	1.1 - 1.3
Benzene	1.1
Transformer Oil	1.0
Silicone	1.0 - 1.2
Liquid Oxygen	2.4
Liquid Nitrogen	1.6 - 1.9
Liquid Hydrogen	1.0
Liquid Helium	0.7
Liquid Argon	1.10 - 1.42

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวดังแสดงไว้ในตาราง 2.8 นี้ใช้ได้กับของเหลวที่มีส่วนประกอบของก๊าซเจือปนน้อยกว่าขีดจำกัด ถ้ามีก๊าซเจือปนมากพอจะทำให้ค่าความคงทนลดน้อยลงโดยเฉพาะมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่

2.7 สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมัน [22]

1) การเสื่อมสภาพทางออกซิเดชัน

การเสื่อมสภาพของน้ำมันเริ่มตั้งแต่น้ำมันถูกบรรจุเข้าไปในอุปกรณ์ โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อยู่ตัว (unstable) ในน้ำมัน จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในอุปกรณ์ (ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนที่ละลายมากับน้ำมัน หรือตกค้างหลังการผลิตจากโรงงาน หรืออาจมาจากอากาศโดยตรง ในกรณีหม้อแปลงระบบปิดที่หายใจผ่านซิลิกาเจล) ภายใต้ความชื้น, ทองแดง, เหล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยา (ความร้อนสนามไฟฟ้า) เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเป็นออกไซด์ในรูปของ เพอโรไซด์, แอลกอฮอล์ และกรดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง กรดที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง, เหล็ก, วานิช หรือสีในหม้อแปลงเกิดสารที่ค่อนข้างนำไฟฟ้า และละลายในน้ำมันได้ปานกลาง เรียกว่า ตะกอน เมื่อตะกอนมีการสะสมตัวมากขึ้นๆ ความสามารถในการละลายจะลดลง เกิดการตกตะกอน และก่อสารที่ข้นหนืดเกาะผิวกระดาษ, ผนังตัวถัง, ร่องน้ำมัน หรือ ครีบระบายความร้อน ทำให้การระบายความร้อนของอุปกรณ์แย่ลง สารเสื่อมสภาพนี้ จะทำให้สีของน้ำมันเหลืองมากขึ้น จนกลายเป็นน้ำตาลอ่อนและน้ำตาลเข้มเมื่อปริมาณตะกอนมากขึ้นน้ำมันที่ใสจะขันขึ้น ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของน้ำมันจะลดลง นอกจากนี้โพลาร์คอมเปาด์ที่เกิดจะลดความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสารเจือปนหรือพวกสารเปรอะเปื้อน ได้แก่ น้ำ, ฝุ่น, และเศษผง จะทำให้น้ำมันขุ่นมัว และการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

2) การเสื่อมสภาพทางไฮโดรไลตริก

เนื่องจากน้ำเป็นสารที่มีขั้ว มีค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนซ์สูง (ราว 80) ในขณะที่ของน้ำมันมีค่า 2.2 หยดน้ำในน้ำมัน ที่อยู่ในบริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง จะสร้างปัญหาของการเกิดดีสชาร์จในน้ำมัน ทำให้ความแข็งแรงทางฉนวนลดลง นอกจากนี้แล้วทำให้เกิดการสูญเสียทางฉนวน (dielectric loss) เพิ่มแฟกเดอร์การสูญเสีย และการนำไฟฟ้า

3) การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้า

ความเครียดของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันสูงขึ้น น้ำมันเสื่อมสภาพเร็วขึ้น อาจจะแก้ไขโดยเติมสารประเภทที่มีตัวยับยั้งเข้าไปในน้ำมัน

สารประเภทที่มีตัวยับยั้ง ที่เติมในน้ำมันเพื่อปรับปรุงสภาพด้านการต่อต้านออกซิเดชันส่วนใหญ่จะลดคุณสมบัติด้านค่าความแข็งแรงอิมพัลส์ของน้ำมัน

4) การเสื่อมสภาพทางความร้อน

ความร้อนจะเร่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพเร็วขึ้น นอกจากนี้ ความร้อนเป็นศัตรูที่สำคัญในการทำให้กระดาษฉนวนเสื่อมสภาพ หากสภาพการระบายความร้อนของน้ำมันแย่ลง อายุการใช้งานของกระดาษฉนวนจะสั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง และชุดกวนน้ำมัน

ในการศึกษาการออกแบบชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง และชุดกวนน้ำมัน นักศึกษาได้มีโอกาสเดินทางไปโรงงานที่ออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ฉนวนน้ำมันเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ประกอบสร้าง โดยส่วนใหญ่แล้วโรงงานประเภทดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องมีเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลงซึ่งปกติจะสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ และได้ศึกษาลักษณะ และคุณสมบัติของเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลงของทางโรงงานมา รวมทั้งศึกษามาตรฐานต่างๆที่เกี่ยวข้อง

3.1 การออกแบบชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

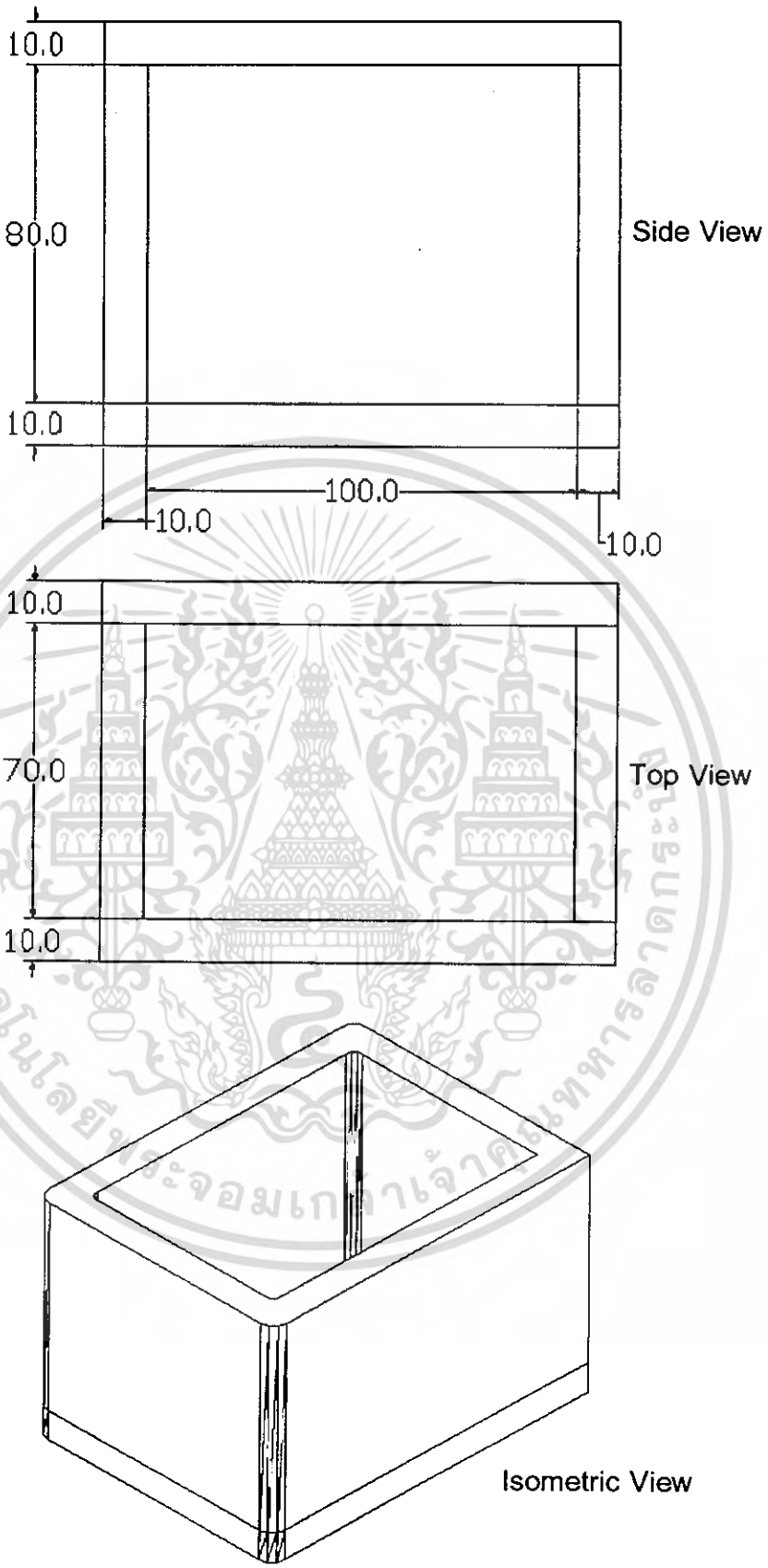
ในการออกแบบชุดทดสอบน้ำมัน จะใช้มาตรฐาน IEC 156 เป็นหลัก มีส่วนประกอบ คือ

1) กล่องบรรจุน้ำมันหม้อแปลง

กล่องทดสอบต้องเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า โปร่งแสง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ทนต่อน้ำมันหม้อแปลง และทนต่อน้ำยาที่ล้าง และกล่องทดสอบต้องเป็นภาชนะปิด และต้องออกแบบให้ชุดอิเล็กโตรดทดสอบสามารถถอดออกได้ สำหรับการทำความสะอาด และซ่อมแซม

ในโครงงานวิศวกรรมนี้จะใช้อะคิลิคใสที่มีความหนา 10 mm ที่มีขนาดการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



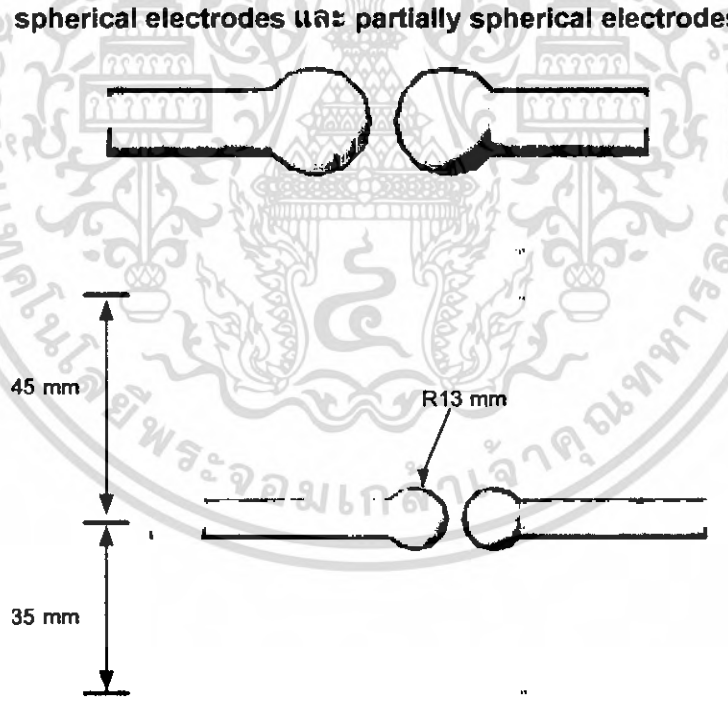
รูปที่ 3.1 กล่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วัสดุที่ใช้ทำหัวอิเล็กโตรด

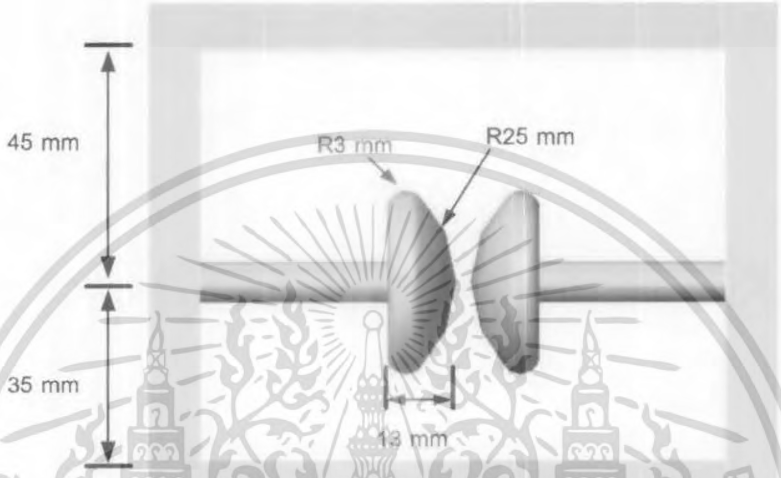
โลหะที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่ไม่บริสุทธิ์หรือเกือบบริสุทธิ์ เช่นทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ที่นำมาทำเป็นขดลวด เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูง หรืออลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% จะถูกใช้เป็นสายไฟฟ้าแรงสูงหรือตกแต่งเนื่องจากเป็นโลหะที่มีพื้นผิวมันวาว แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นโลหะที่มีโลหะอื่นผสมหรือโลหะผสมอยู่เพื่อทำให้โลหะนั้นมีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น เช่นทำให้แข็งขึ้น ไม่เกิดสนิม ทนต่อการกัดกร่อน

โดยในโครงงานวิศวกรรมนี้จะใช้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 156 จะกำหนดวัสดุที่ใช้ทำหัวอิเล็กโตรดอยู่ 3 ชนิด ทองเหลือง (brass) ทองสัมฤทธิ์ (bronze) และเหล็กสแตลเลส (austenitic stainless) ที่มีลักษณะเป็นมันวาว ในโครงงานเลือกใช้ทองเหลือง (brass) จะประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดคือ ทองแดง 70% และสังกะสี 30% หรืออาจจะประกอบด้วยทองแดงและสังกะสีประมาณ 5-40% สังกะสีจะรวมตัวกับทองแดงได้จนถึงประมาณ 35 % โลหะผสมเหล่านี้จะมีความแข็งปานกลาง (34-54 ksi ; 234-374 MPa) ในสภาวะหลังจากถูก annealed และจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อถูก cold-worked



รูปที่ 3.2 หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes

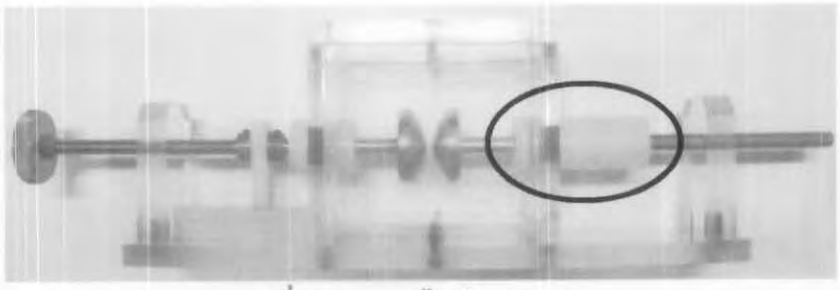
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

3) วัสดุที่ใช้ทำตัวยึดหัวอิเล็กโตรด

ทำจากซุปเปอร์ลีนชนิดพิเศษทนแรงดันสูงอยู่ติดกับแกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ 3.15

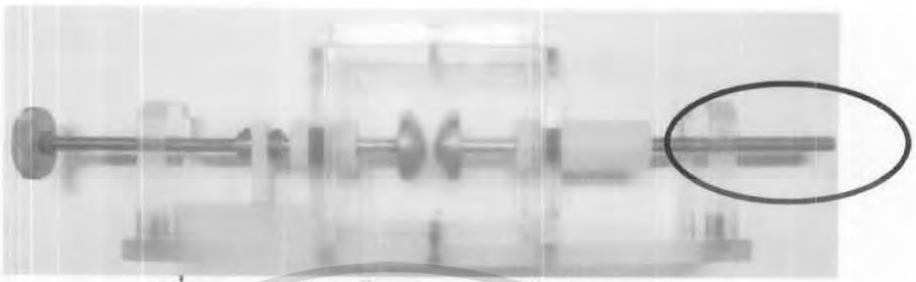


รูปที่ 3.4 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

ทำจากทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 20 cm ไว้เพื่อทำการต่อกับสายตัวนำไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.5 แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

5) ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์

ทำจากซุปเปอร์ลีนชนิดพิเศษทนแรงดันสูงอยู่ติดกับแกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์ ดังรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.6 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์

6) แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์

ทำจากทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 20 cm ไว้เพื่อทำการต่อสายตัวนำกับกราวด์ พร้อมกับตัวปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.7 แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

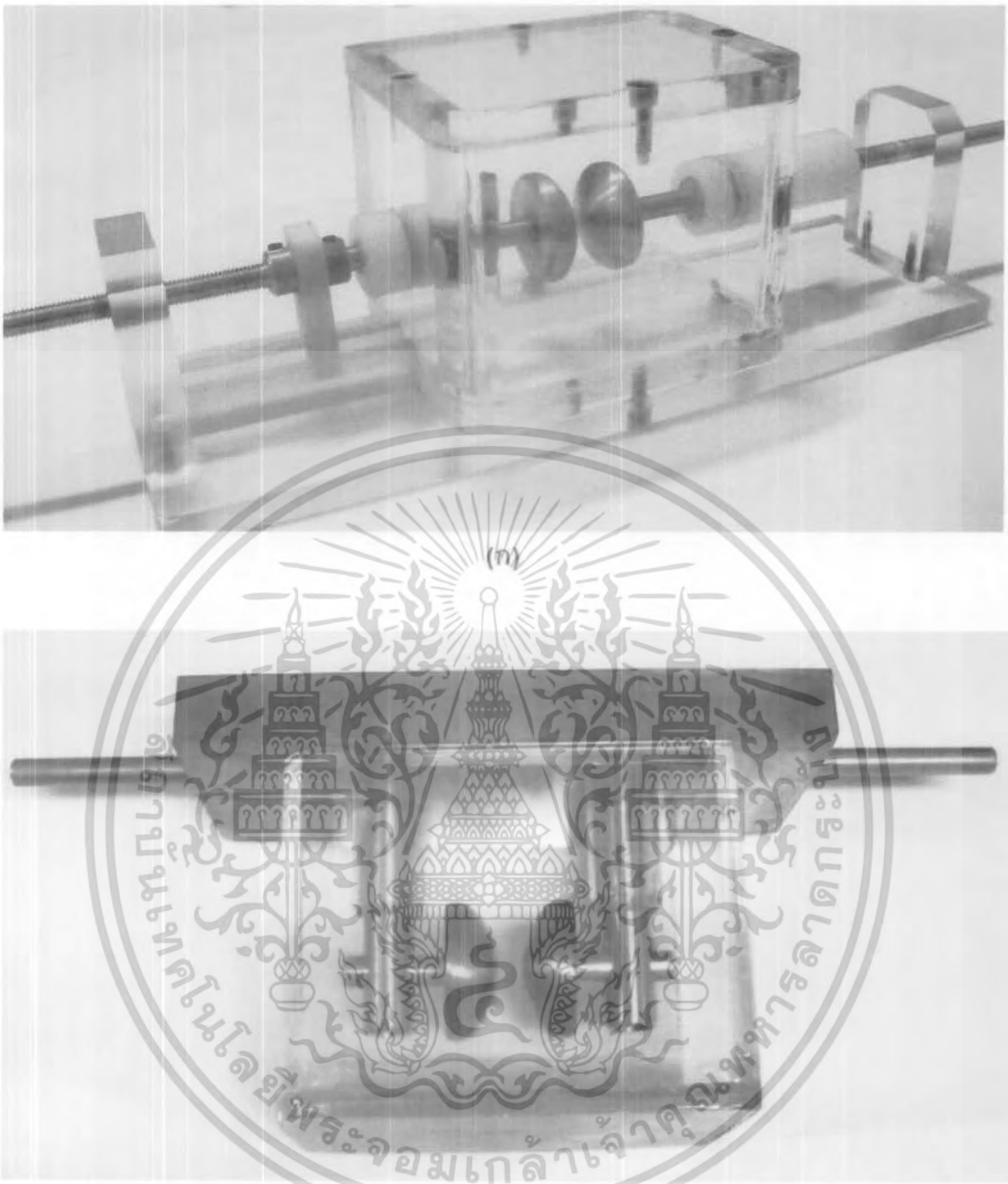
3.2 เปรียบเทียบชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่จัดสร้างขึ้น

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่จัดสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบชุดกวนน้ำมัน

ในการออกแบบชุดกวนน้ำมัน มีส่วนประกอบ คือ

1) กล่องใส่อุปกรณ์ ขนาด 20 cm x 10 cm

2) มอเตอร์ DC 12 V

3) ตัวยึด

3) สายไฟ ยาว 4 เมตร

4) สวิตซ์

5) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 50 kΩ

6) แม่เหล็กแรงสูง

7) AC/DC อะแด๊ปเตอร์

Input AC 220/240 V 50/60 Hz

Output DC 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12 V 500 mA

8) ลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบชุดกวนน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 ชุดกวนน้ำมันที่จัดสร้างขึ้น

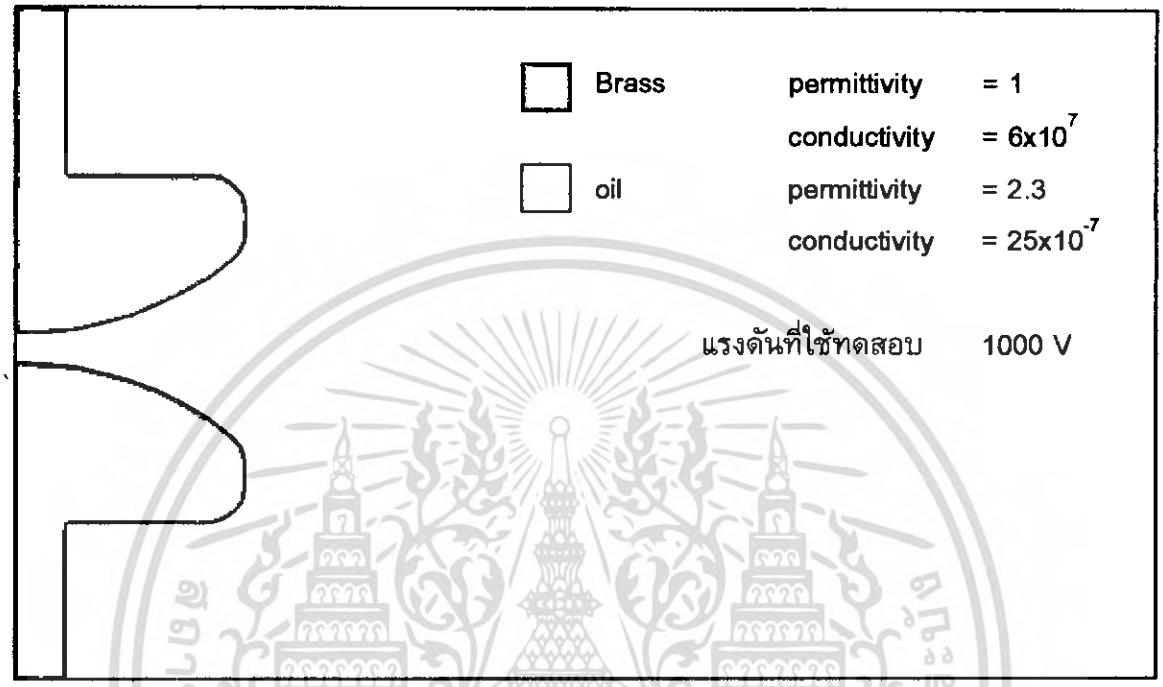
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

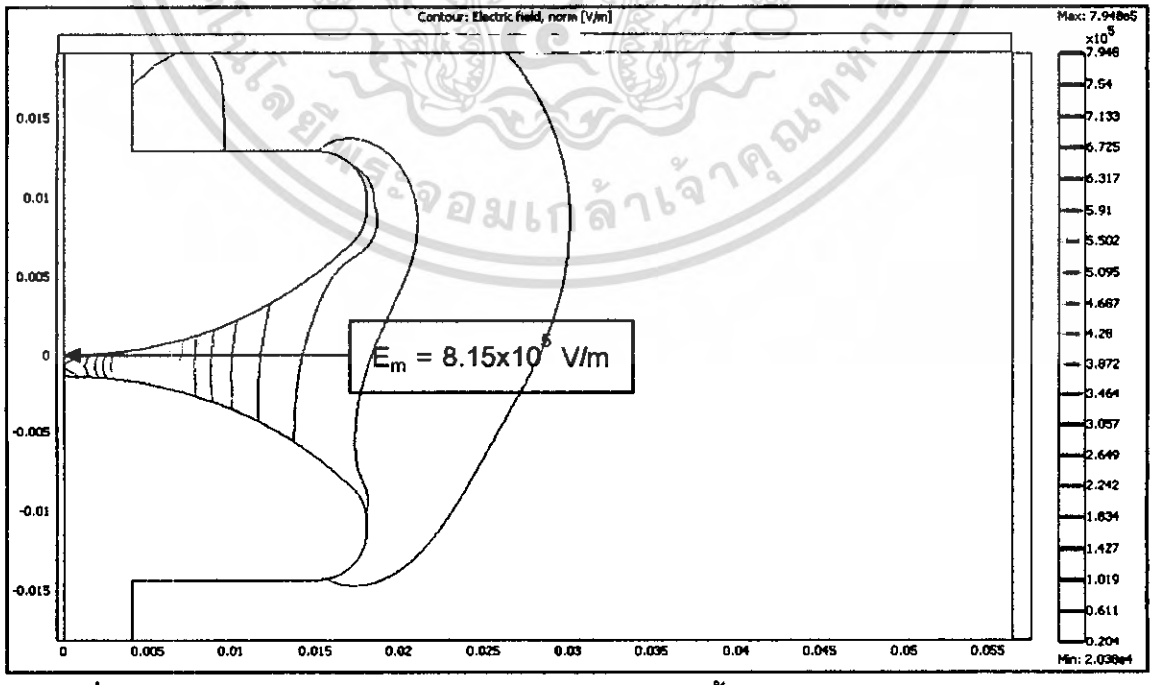
4.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

1) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes



รูปที่ 4.1 วัสดุ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบ

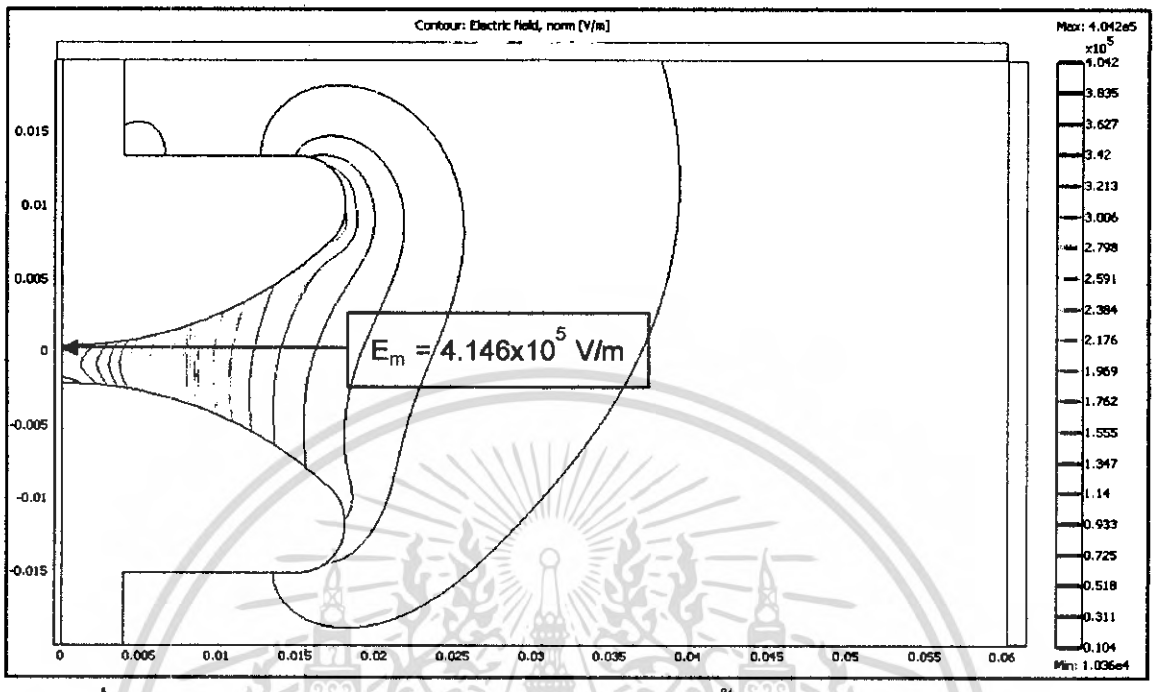
2) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 1.25 mm



รูปที่ 4.2 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 1.25 mm

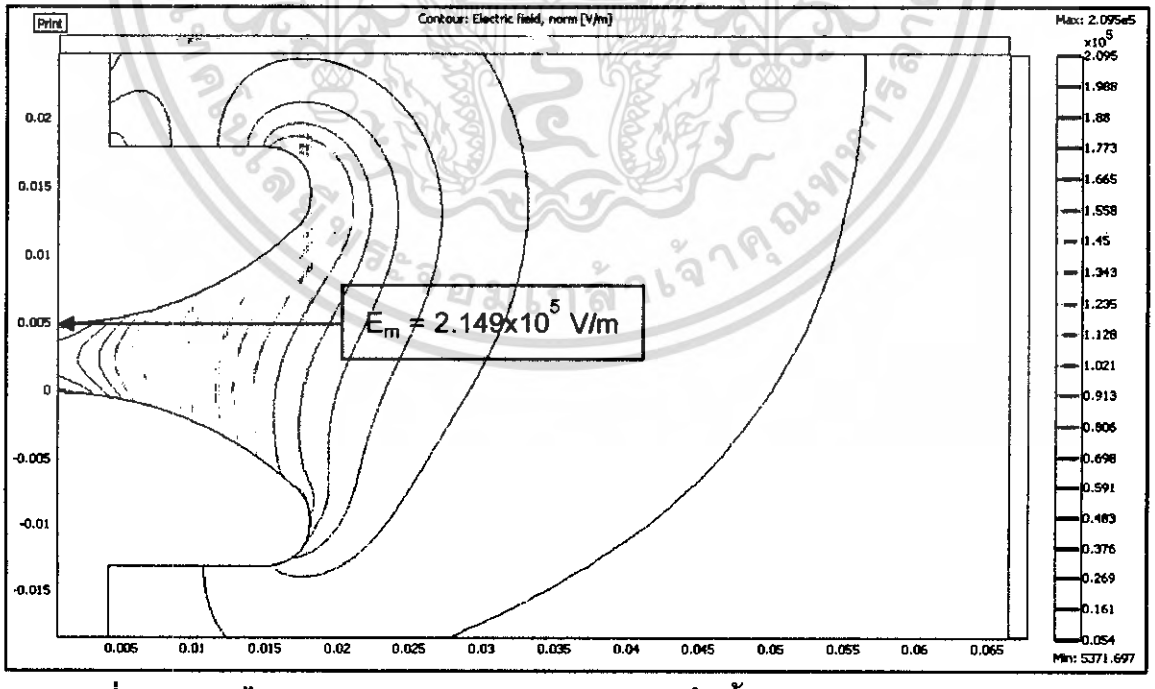
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ **partially spherical electrodes** ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.3 สนามไฟฟ้า **partially spherical electrodes** ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

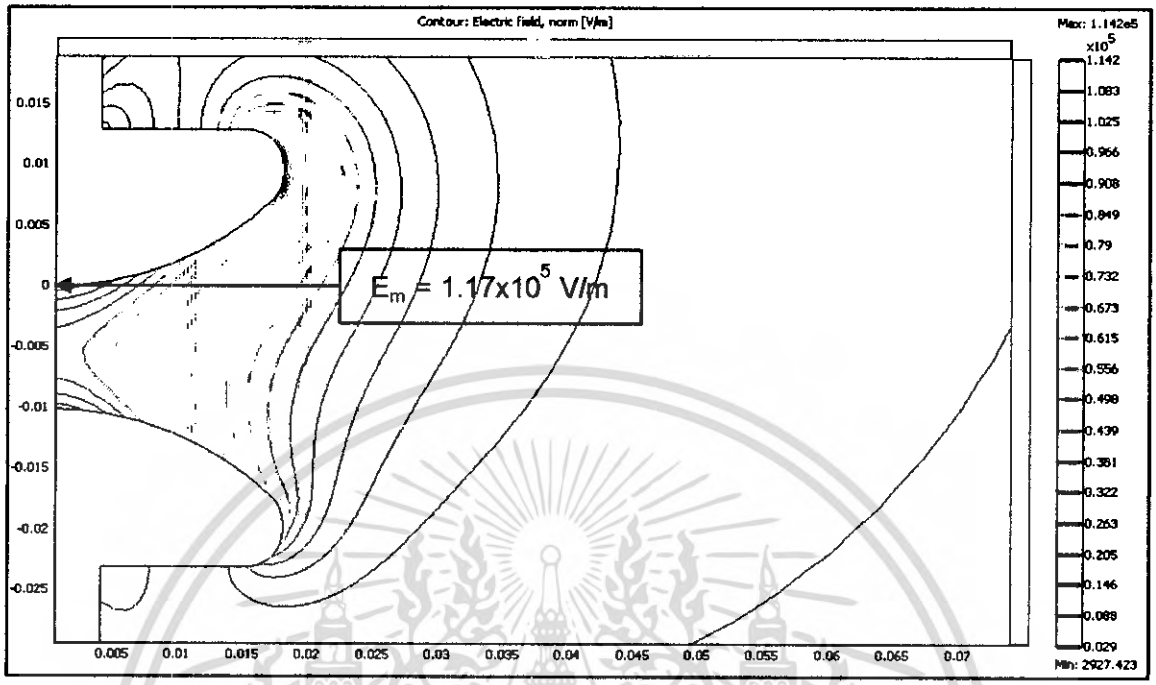
4) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ **partially spherical electrodes** ที่มีระยะห่างแกป 5 mm



รูปที่ 4.4 สนามไฟฟ้า **partially spherical electrodes** ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 5 mm

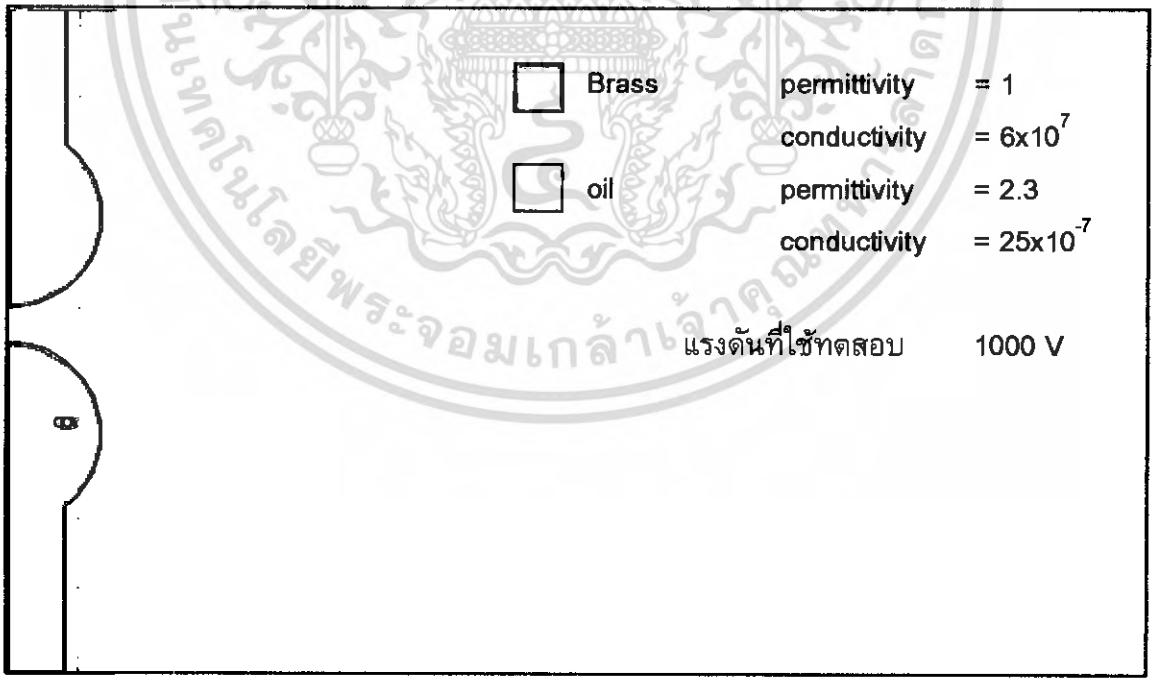
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 10 mm



รูปที่ 4.5 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 10 mm

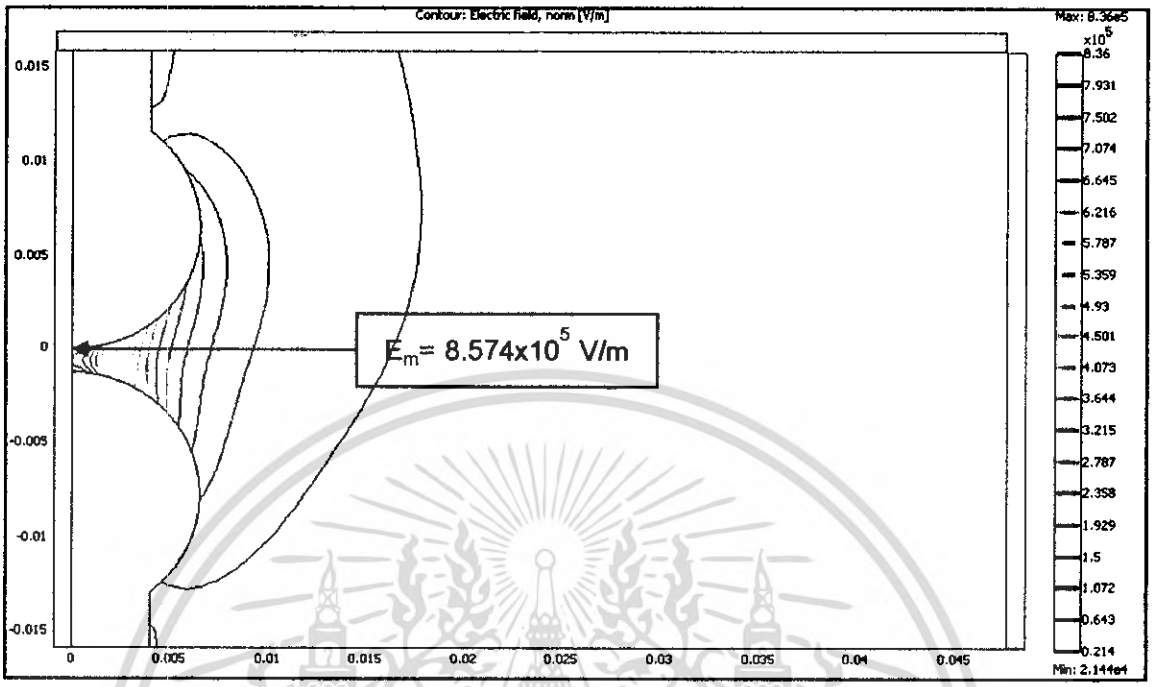
6) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes



รูปที่ 4.6 วัสดุ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบ

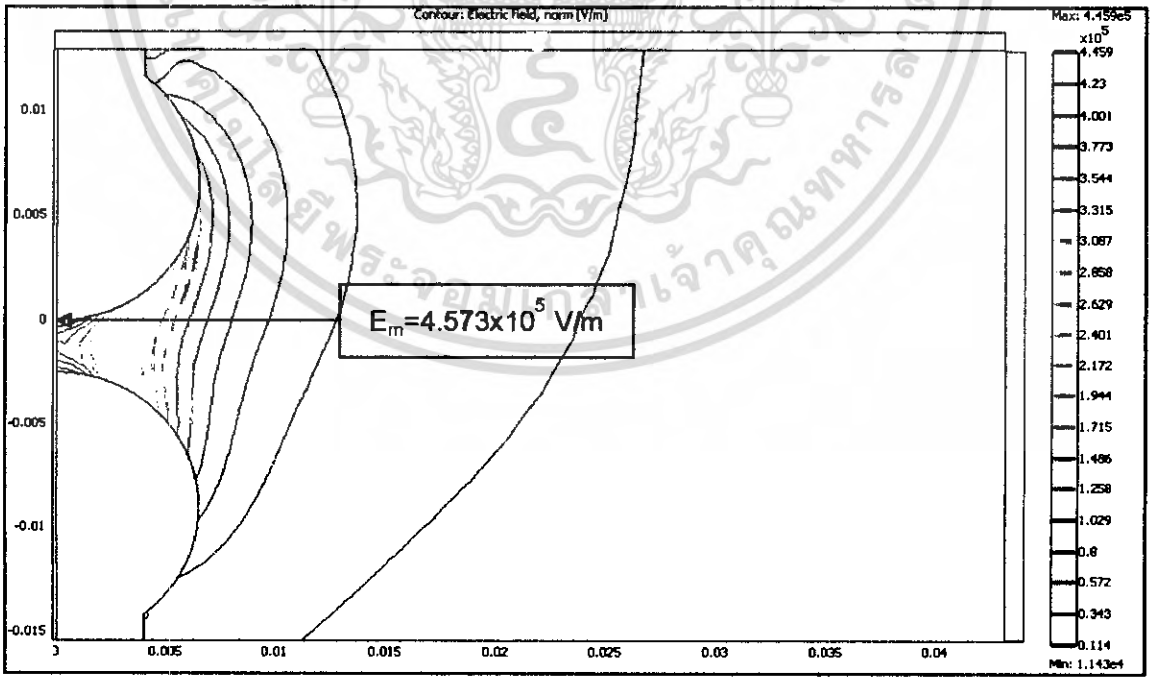
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 1.25 mm



รูปที่ 4.7 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 1.25 mm

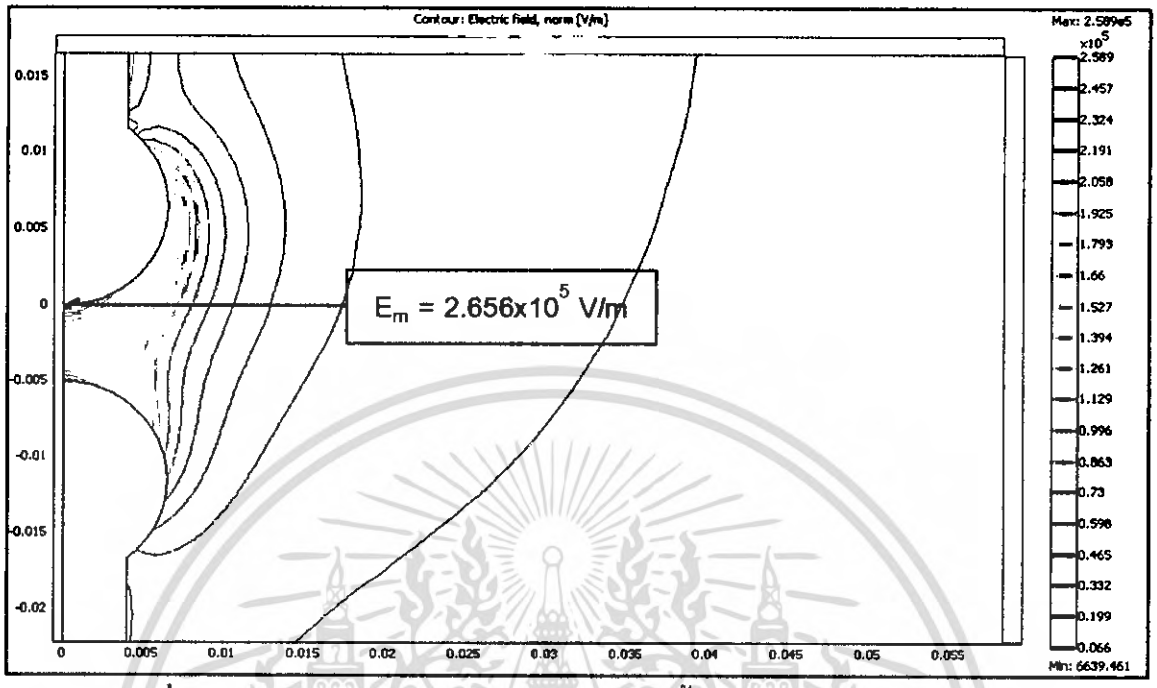
8) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.8 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

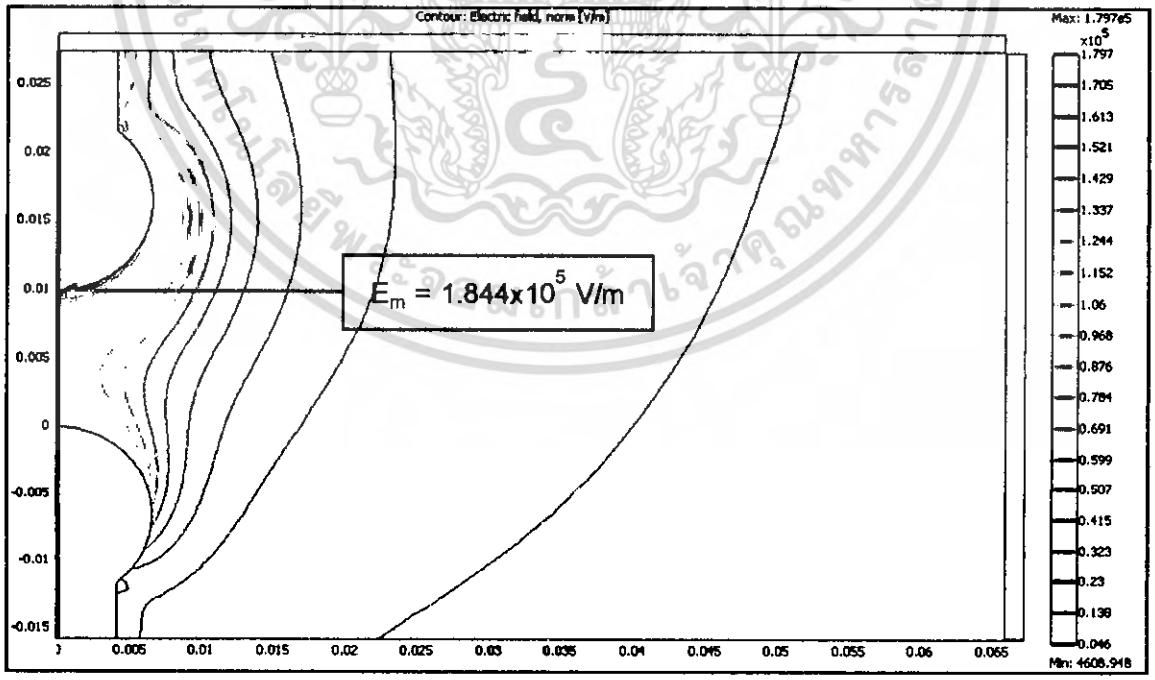
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 5 mm



รูปที่ 4.9 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 5 mm

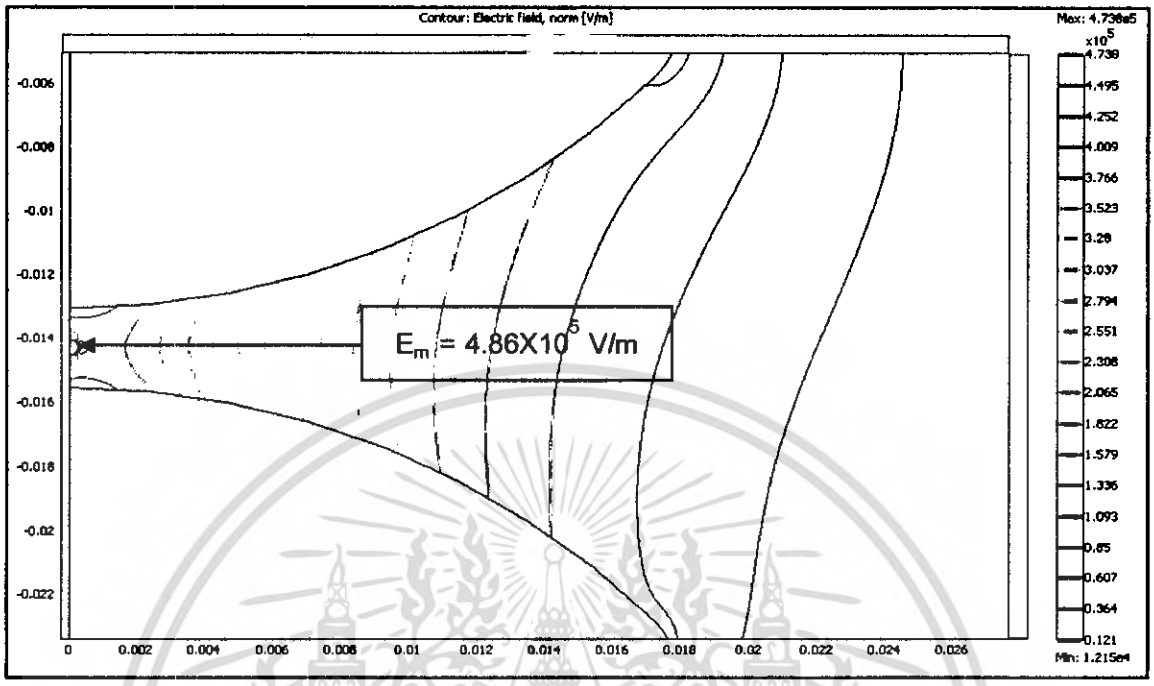
10) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันบริสุทธิ์ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 10 mm



รูปที่ 4.10 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 10 mm

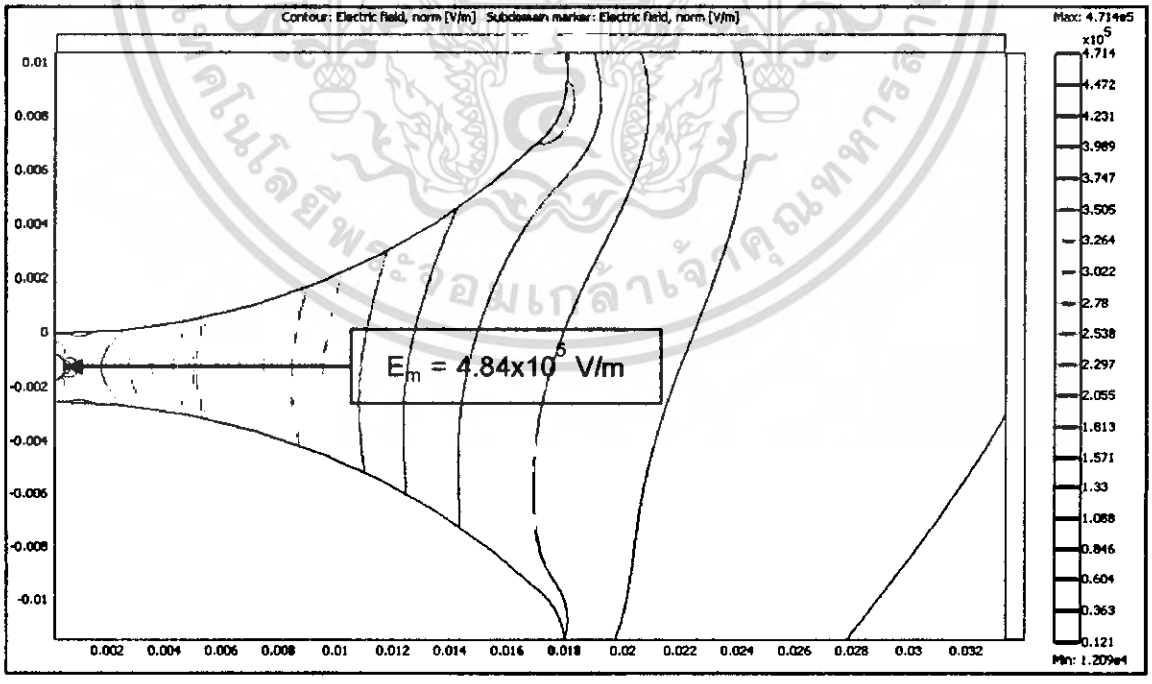
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 0.5 mm ที่หัวอิเล็กโตรด แบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.11 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

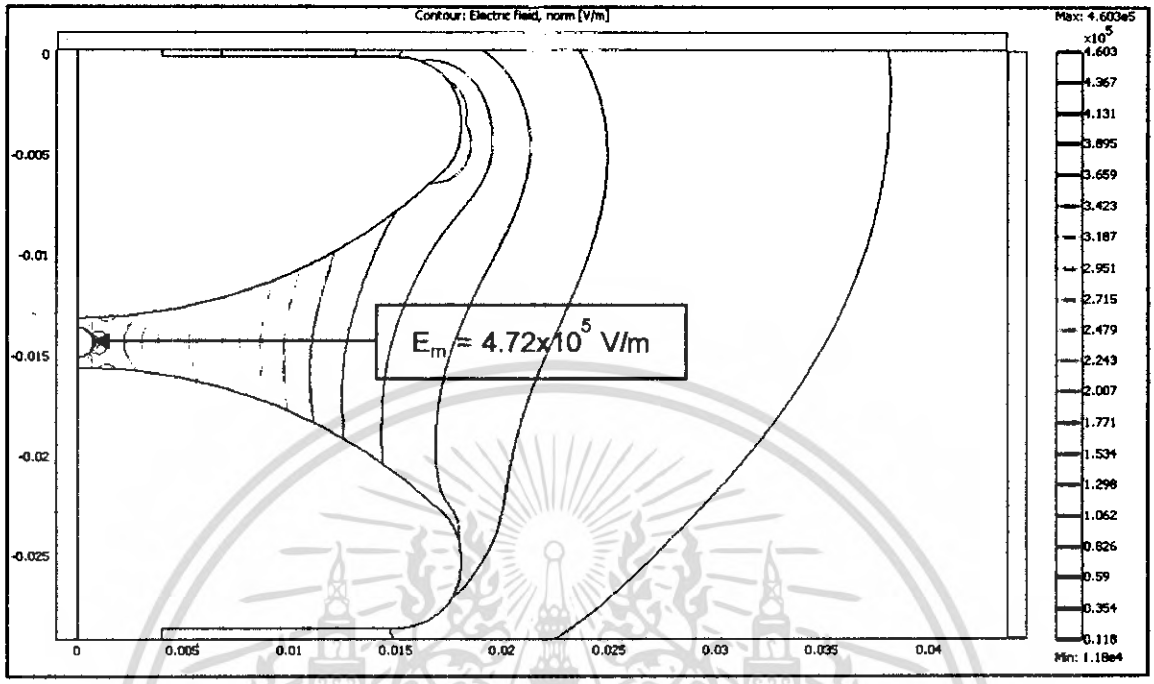
12) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm ที่หัวอิเล็กโตรด แบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.12 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

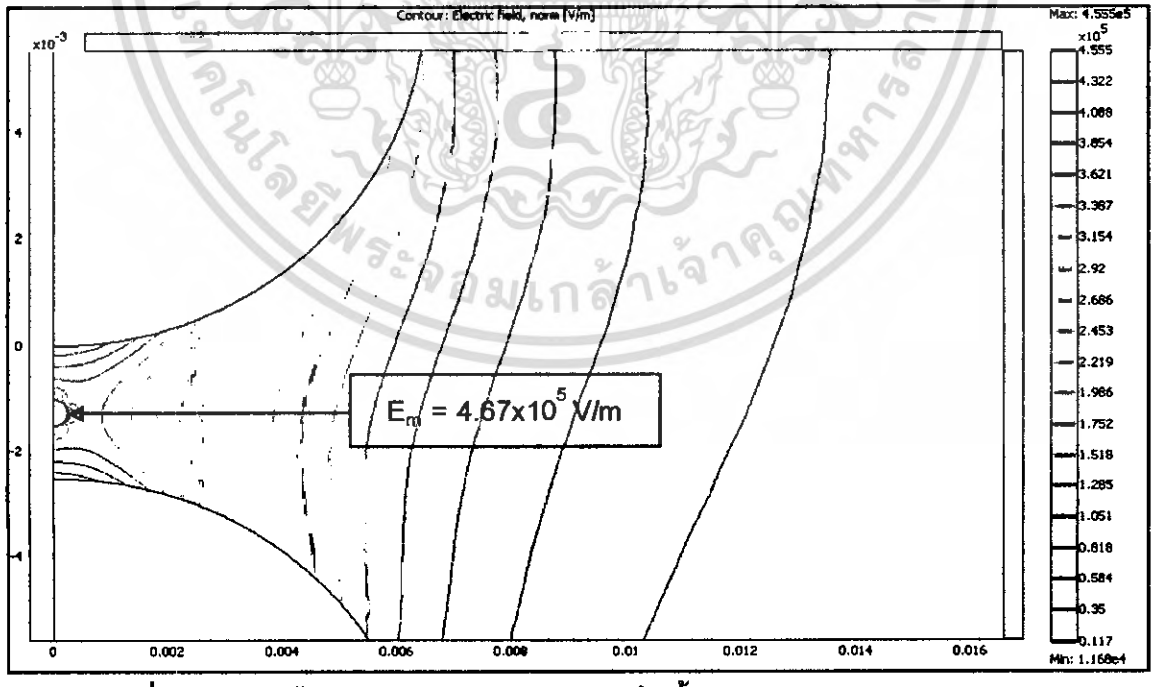
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1.5 mm ที่หัวอิเล็กโตรด แบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.13 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

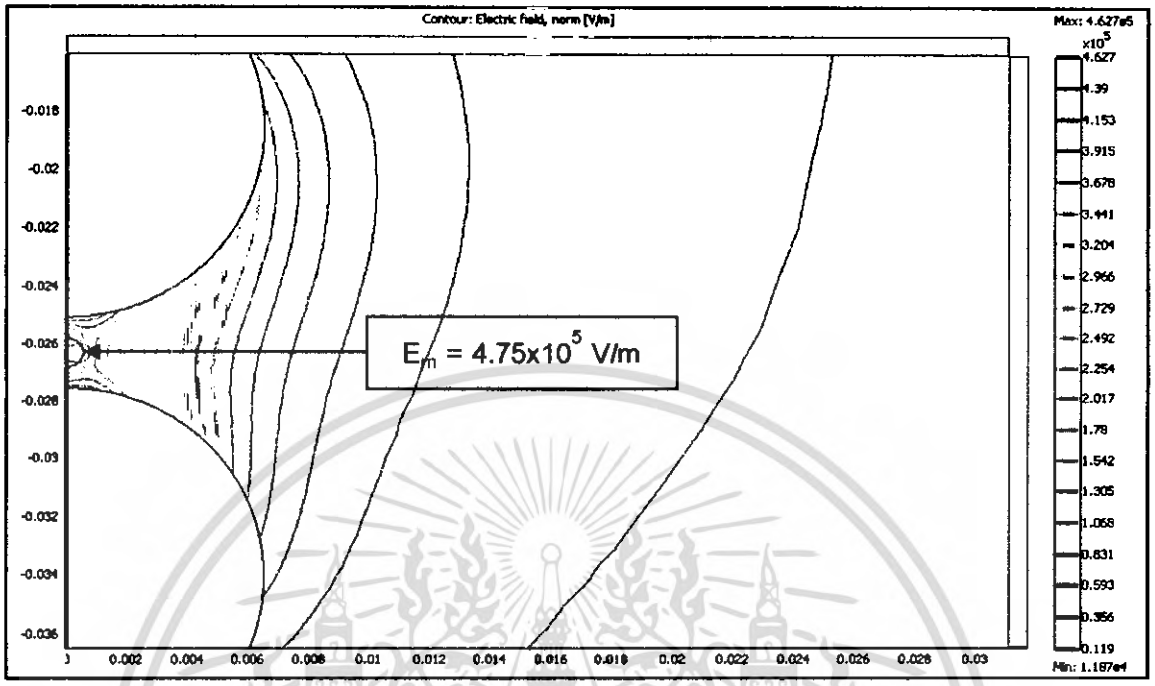
14) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 0.5 mm ที่หัวอิเล็กโตรด แบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.14 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

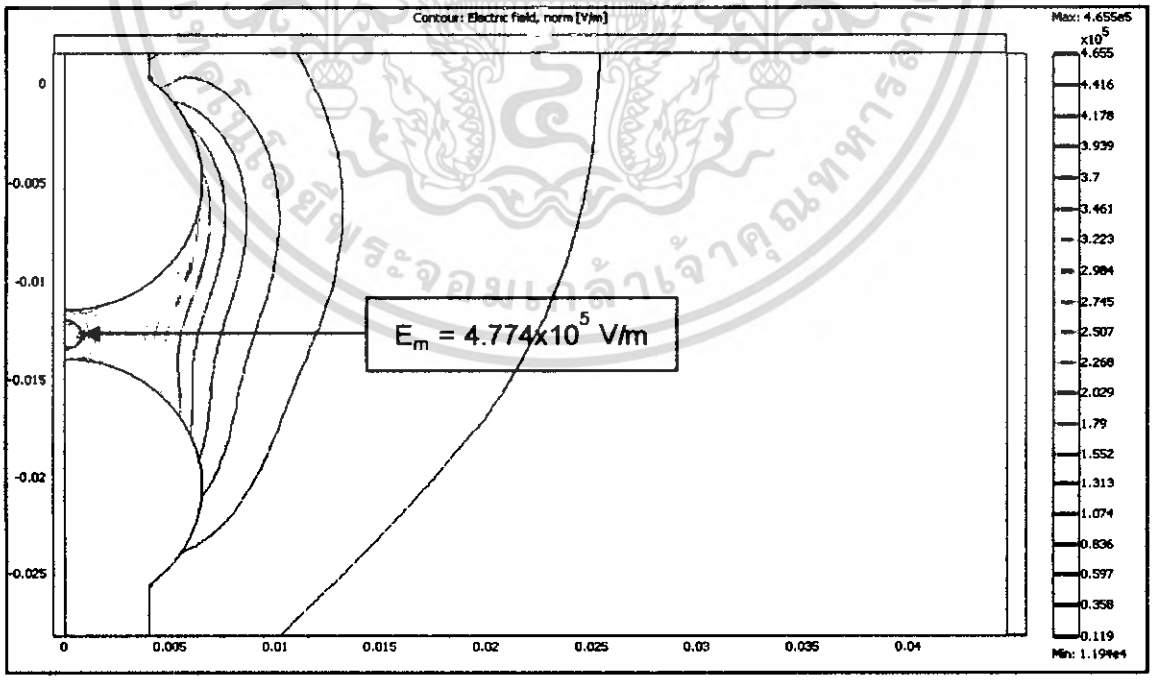
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm ที่หัวอิเล็กโตรด แบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.15 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

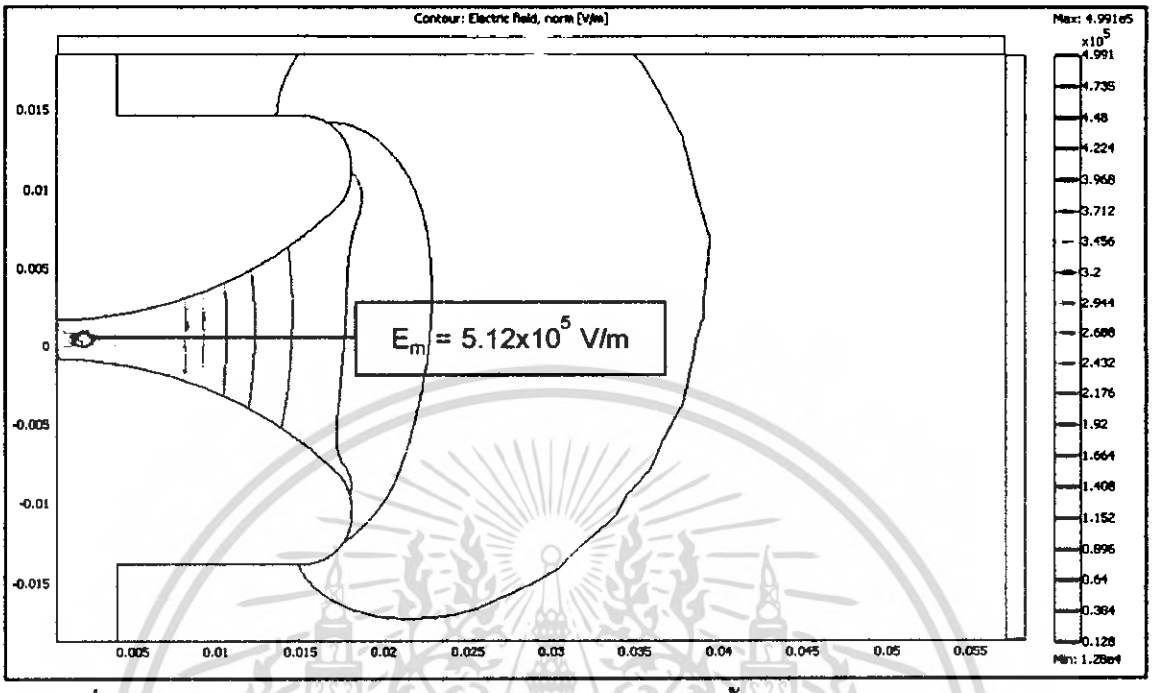
16) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1.5 mm ที่หัวอิเล็กโตรด แบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.16 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

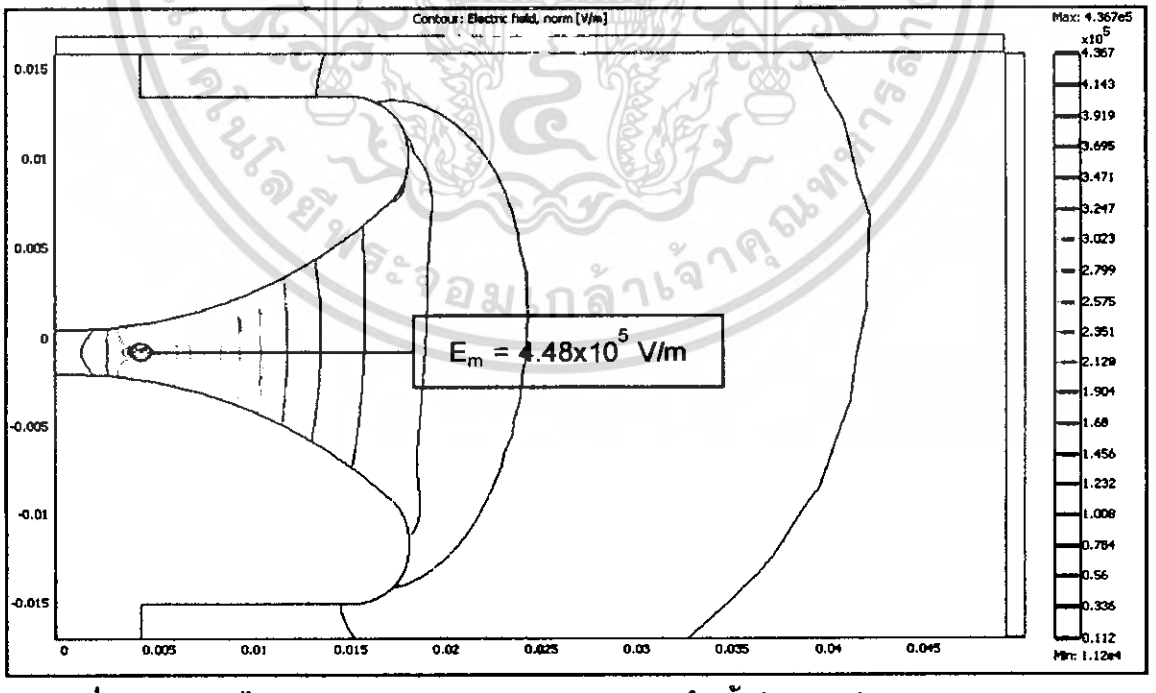
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนแกน x 2 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.17 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

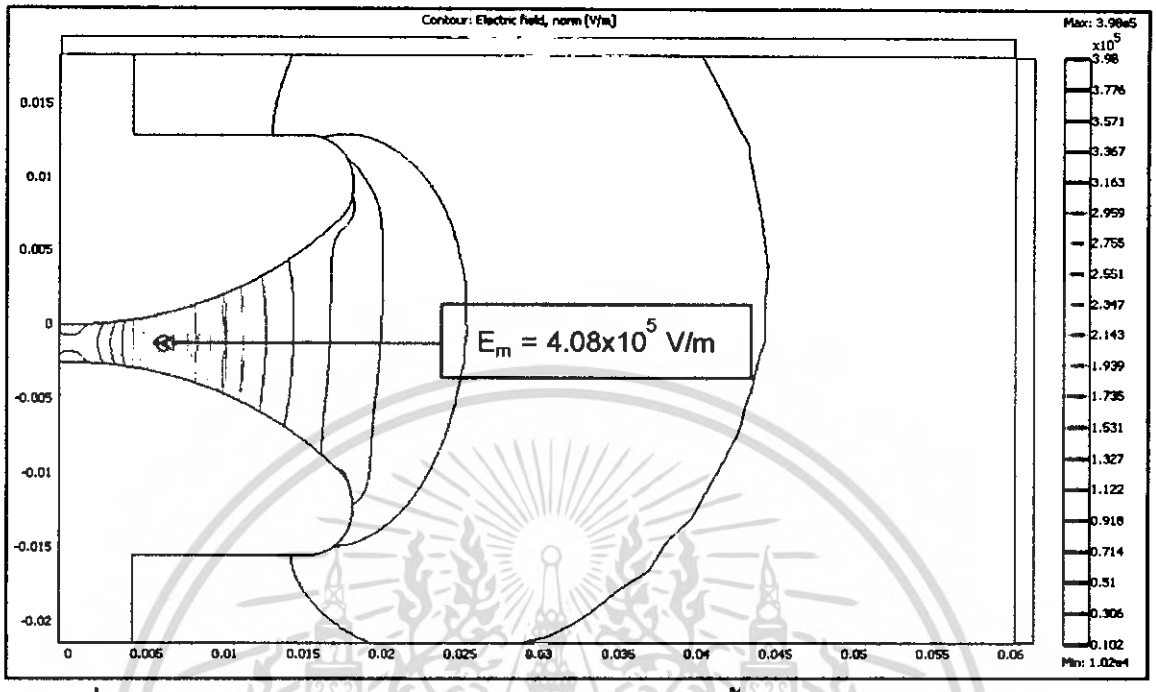
18) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนแกน x 4 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.18 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

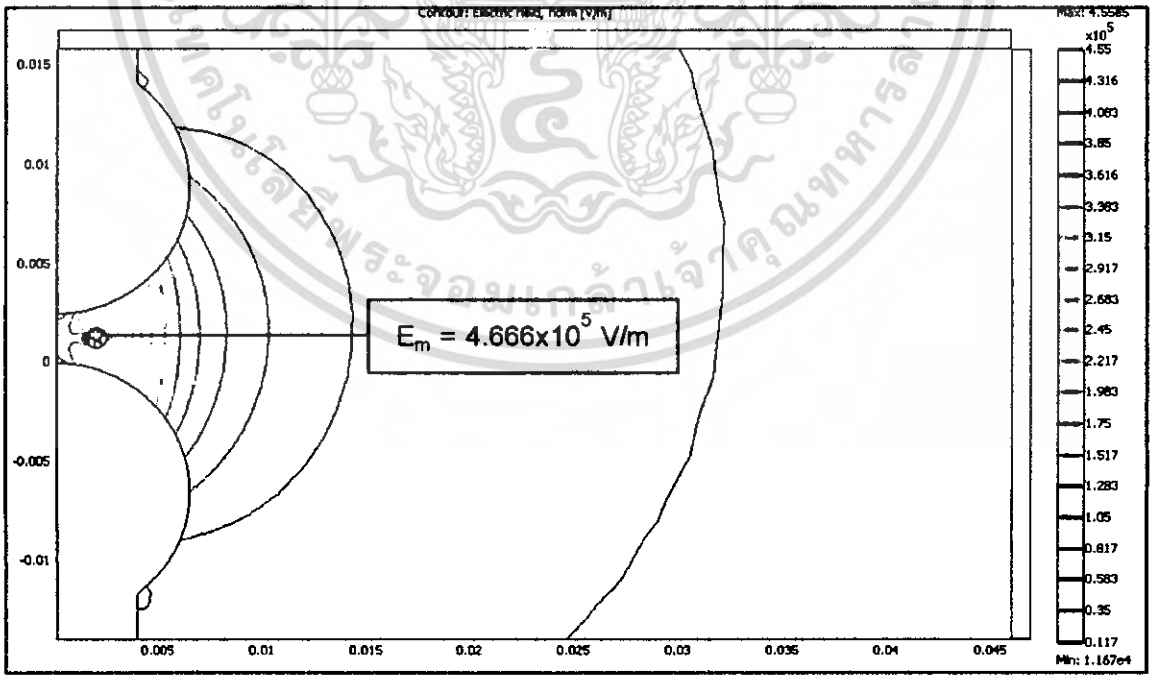
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนแกน x 6 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.19 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

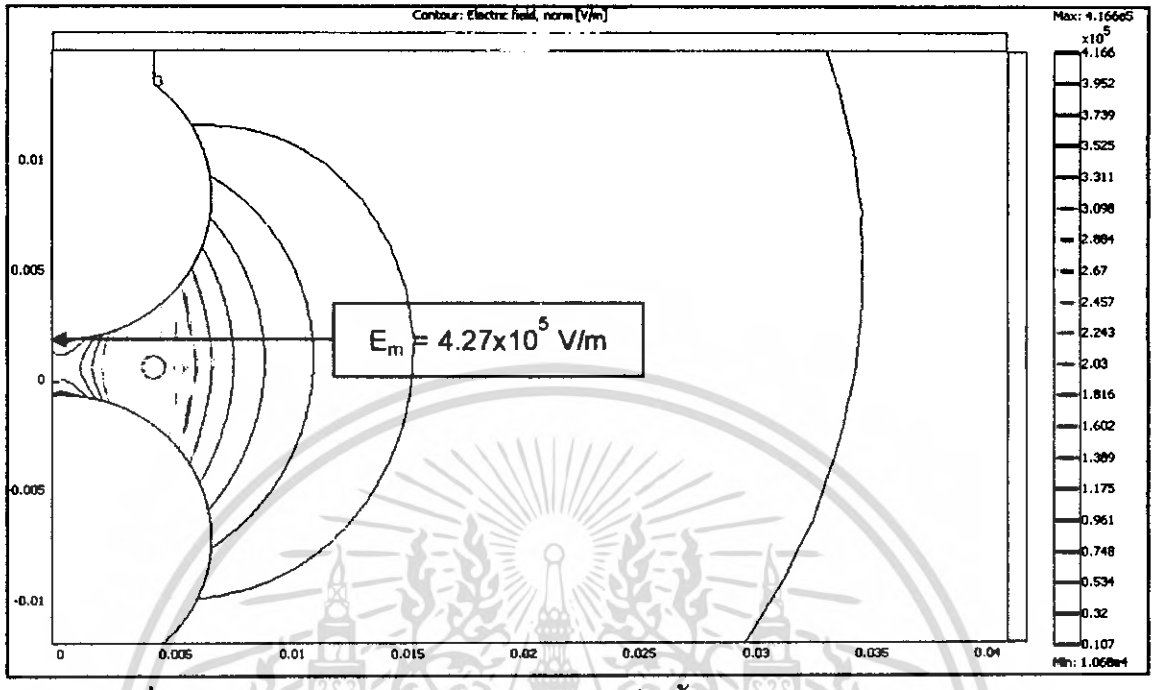
20) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนแกน x 2 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.20 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

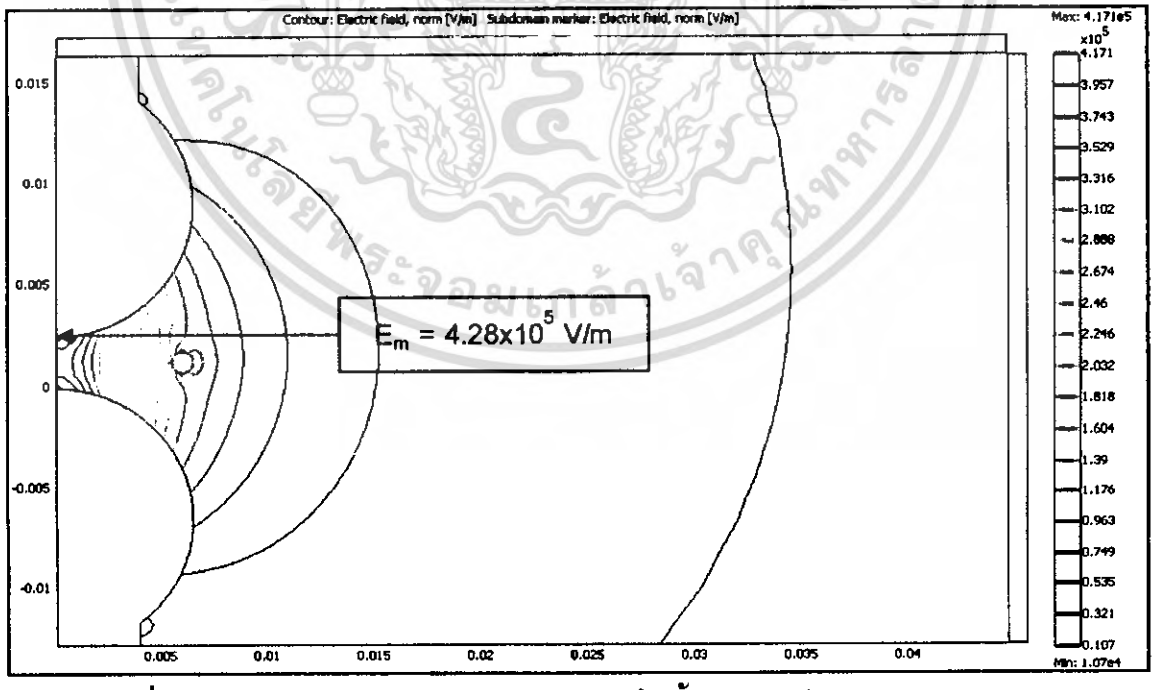
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนแกน x 4 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.21 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

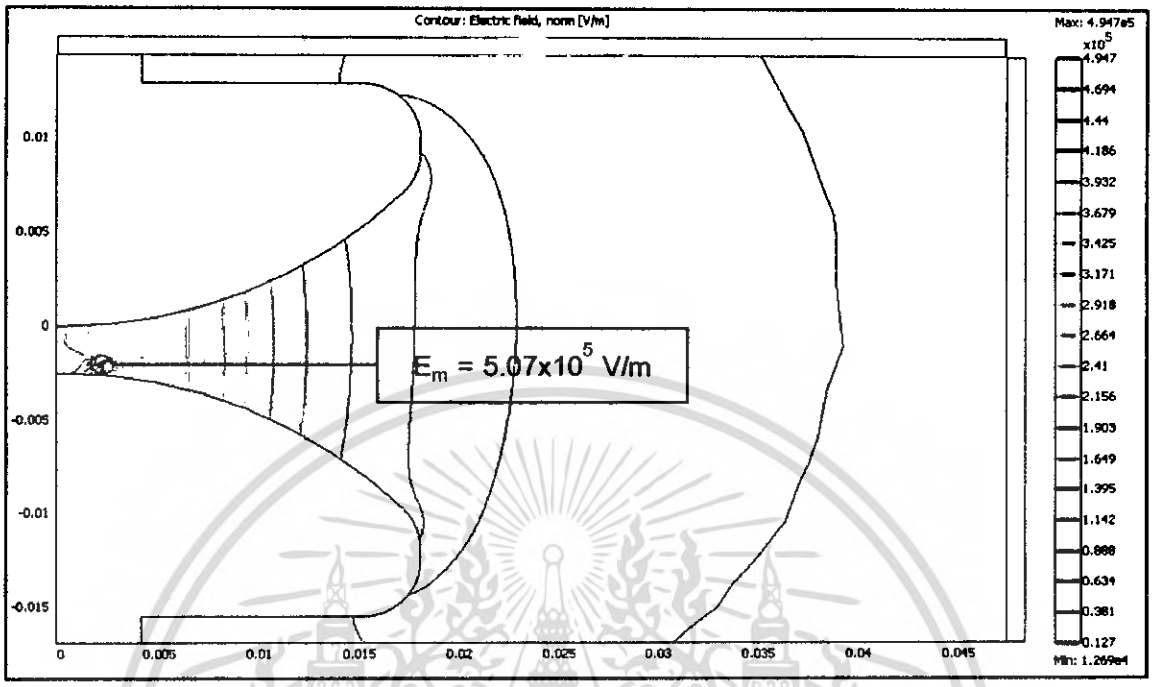
22) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนแกน x 6 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.22 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

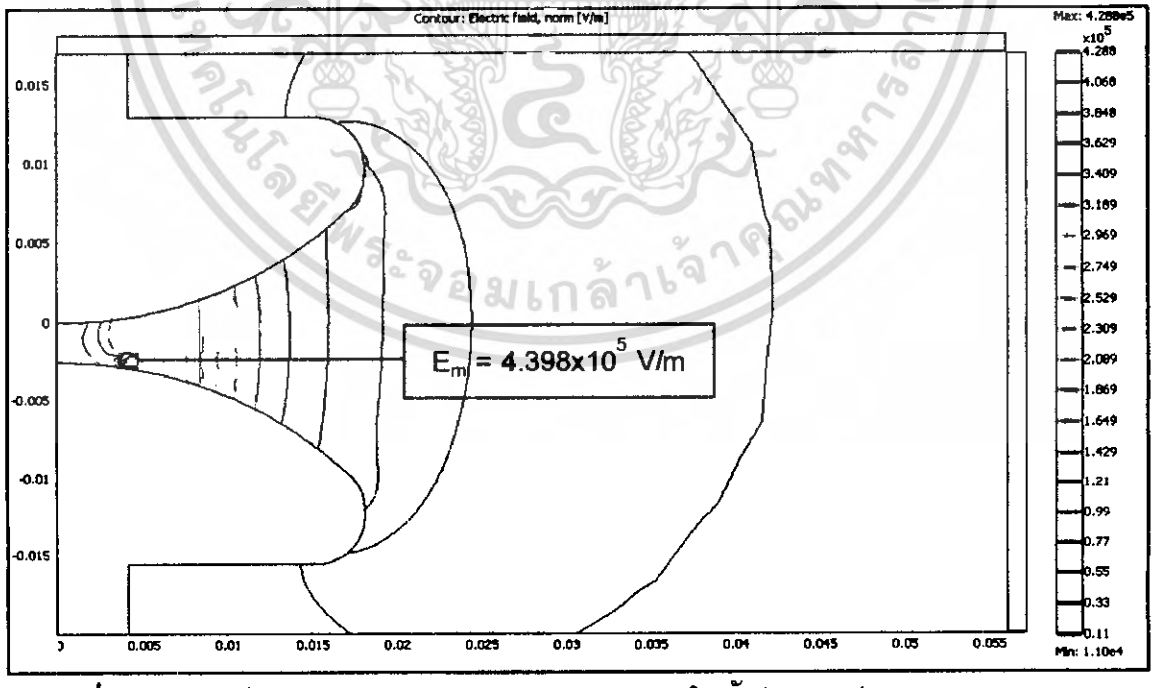
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนตามผิว 2 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.23 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

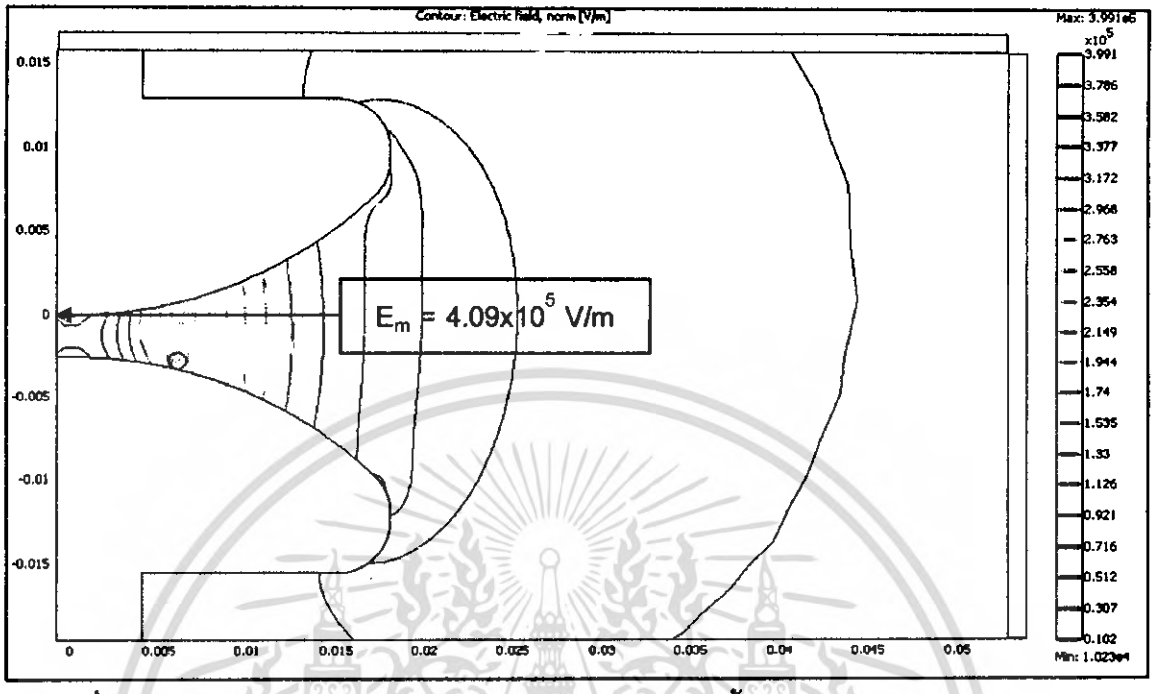
24) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนตามผิว 4 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.24 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

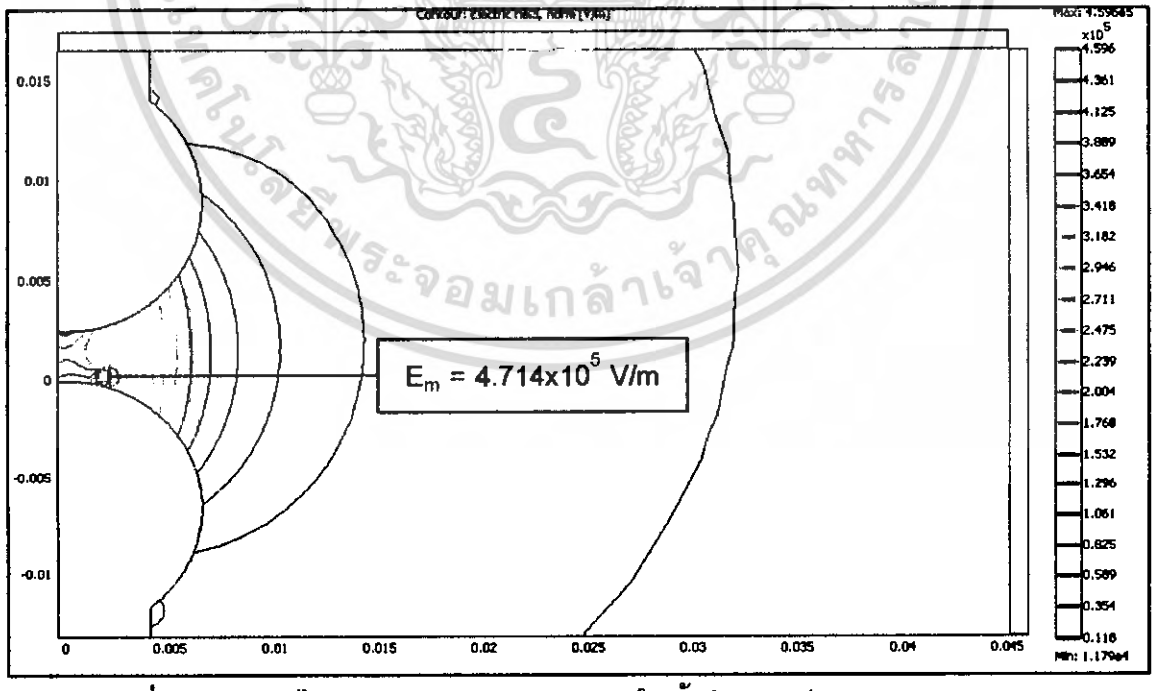
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนตามผิว 6 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.25 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

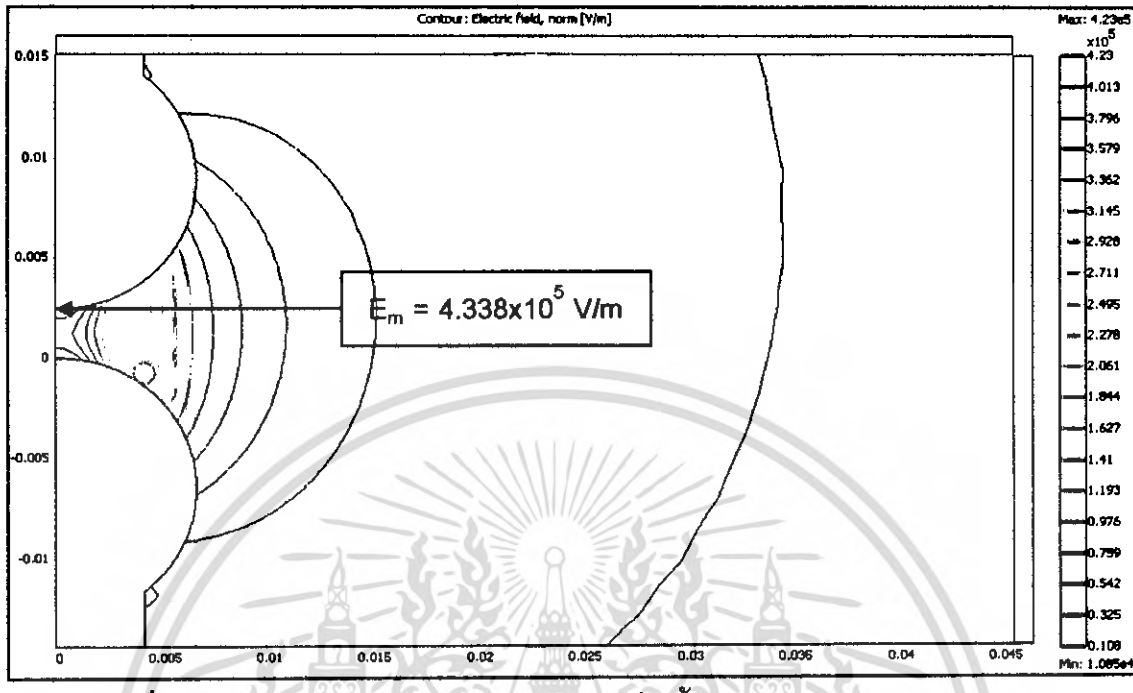
26) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนตามผิว 2 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.26 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

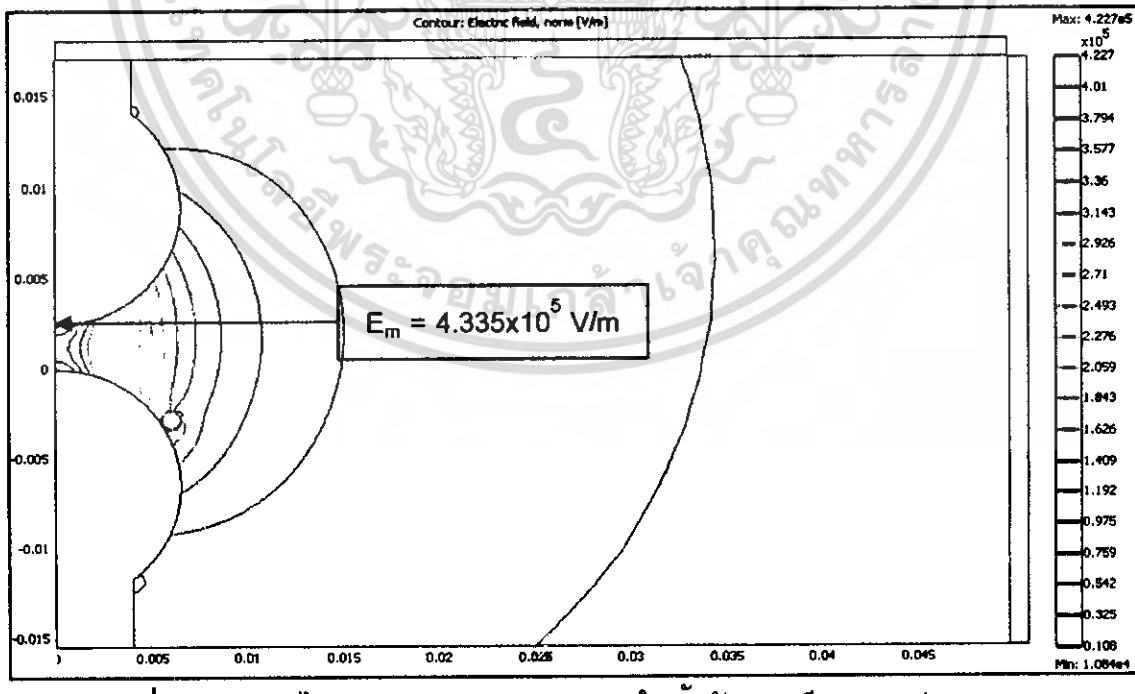
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนตามผิว 4 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.27 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

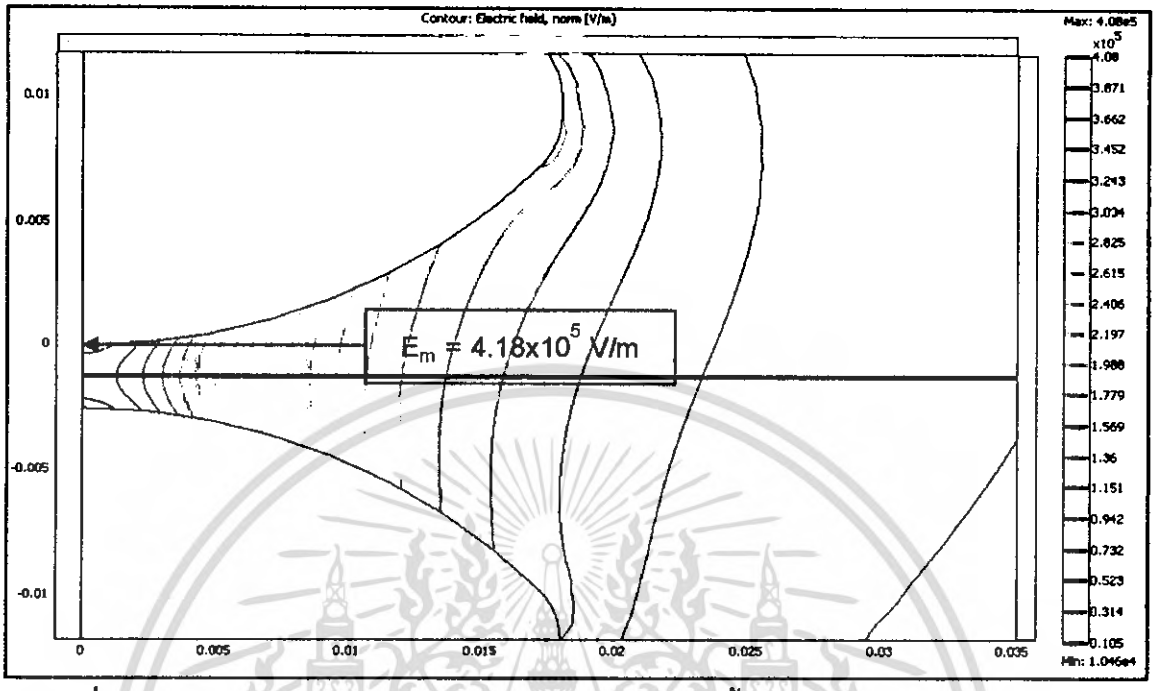
28) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันมีการเจือปนฟองอากาศขนาด 1 mm เลื่อนตามผิว 6 mm ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะห่างแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.28 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

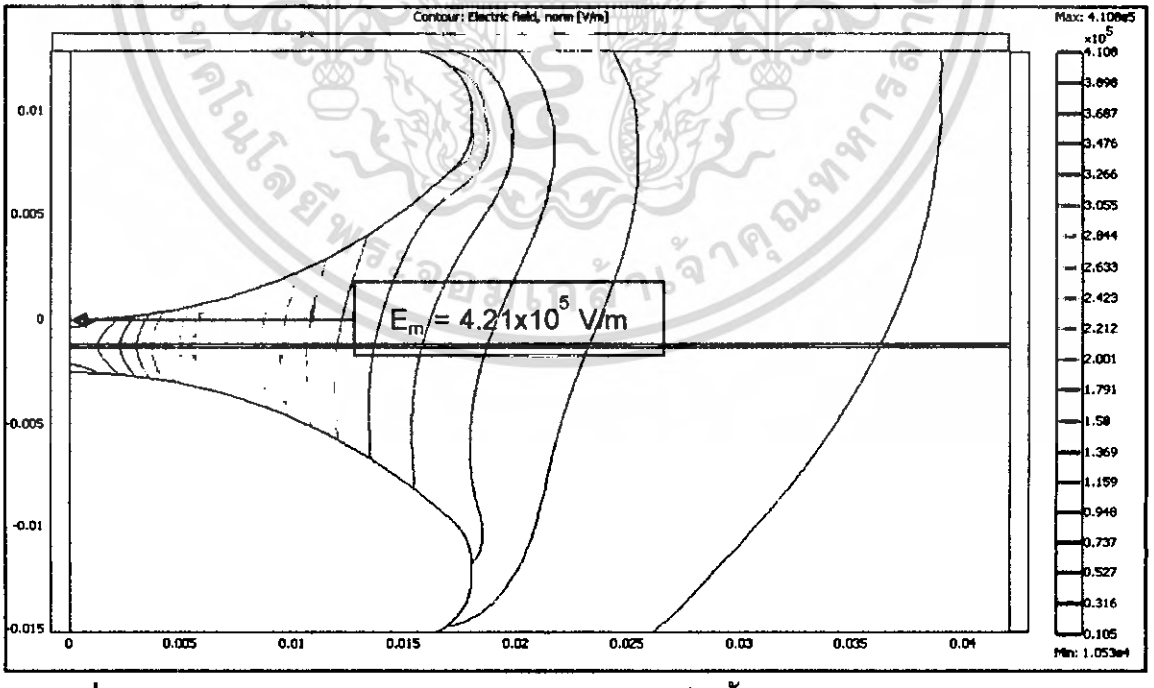
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวน 0.08 mm คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.29 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

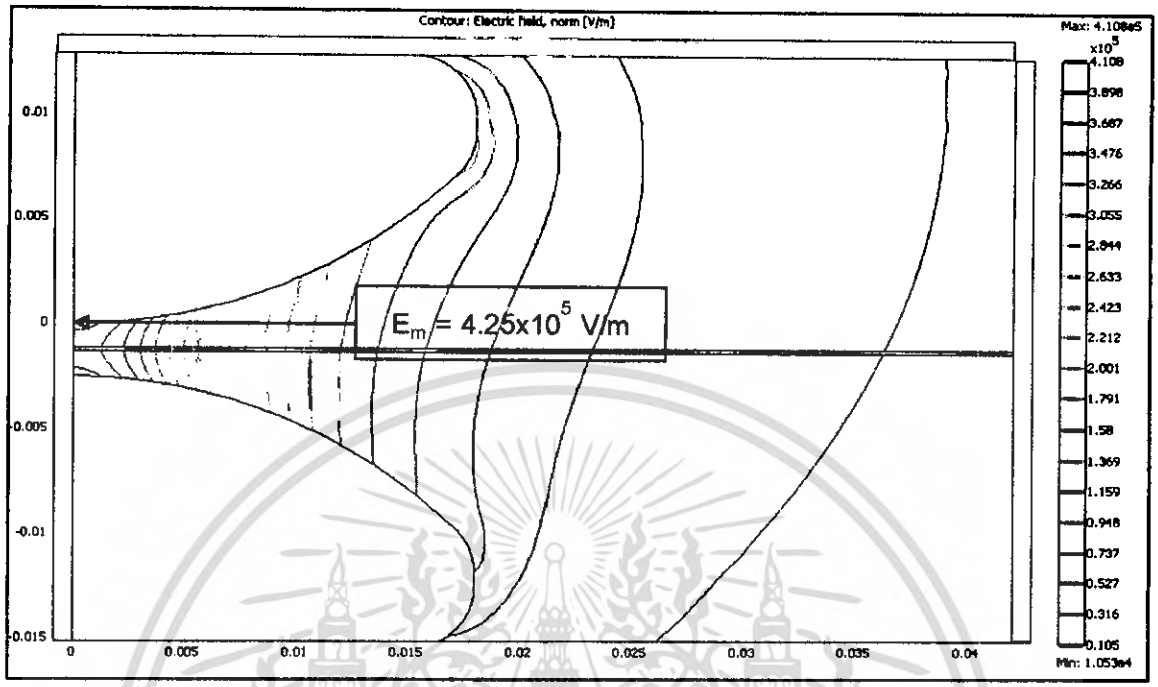
30) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวน 0.13 mm คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.30 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

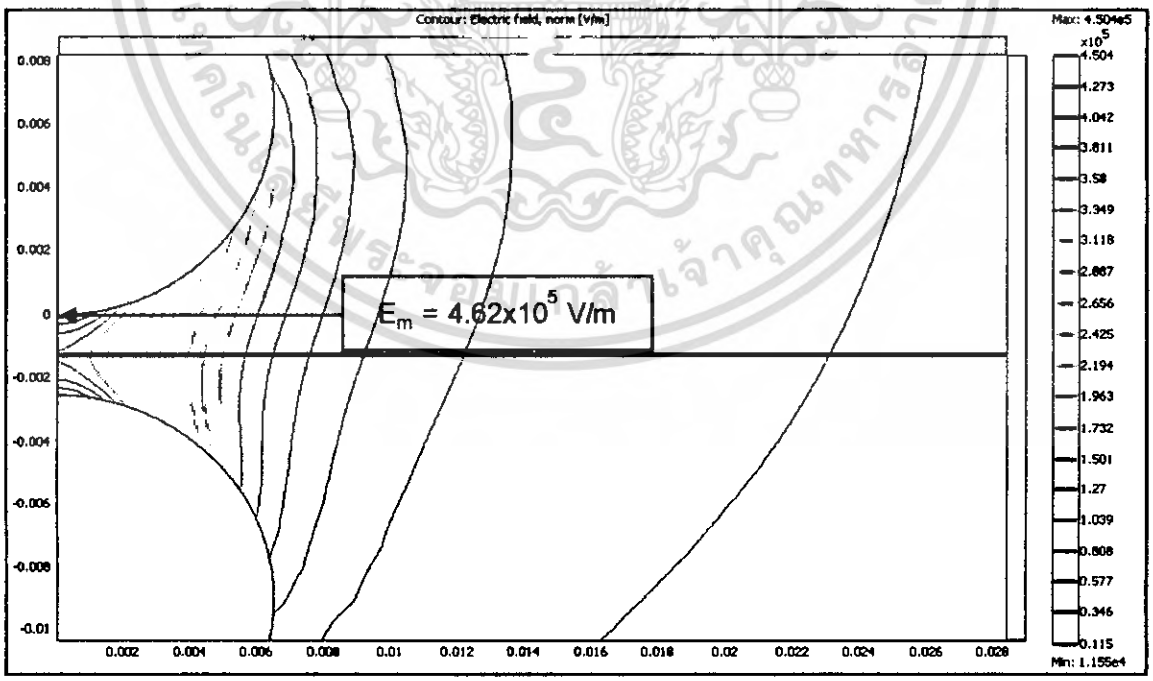
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวน 0.2 mm คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes ที่มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.31 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

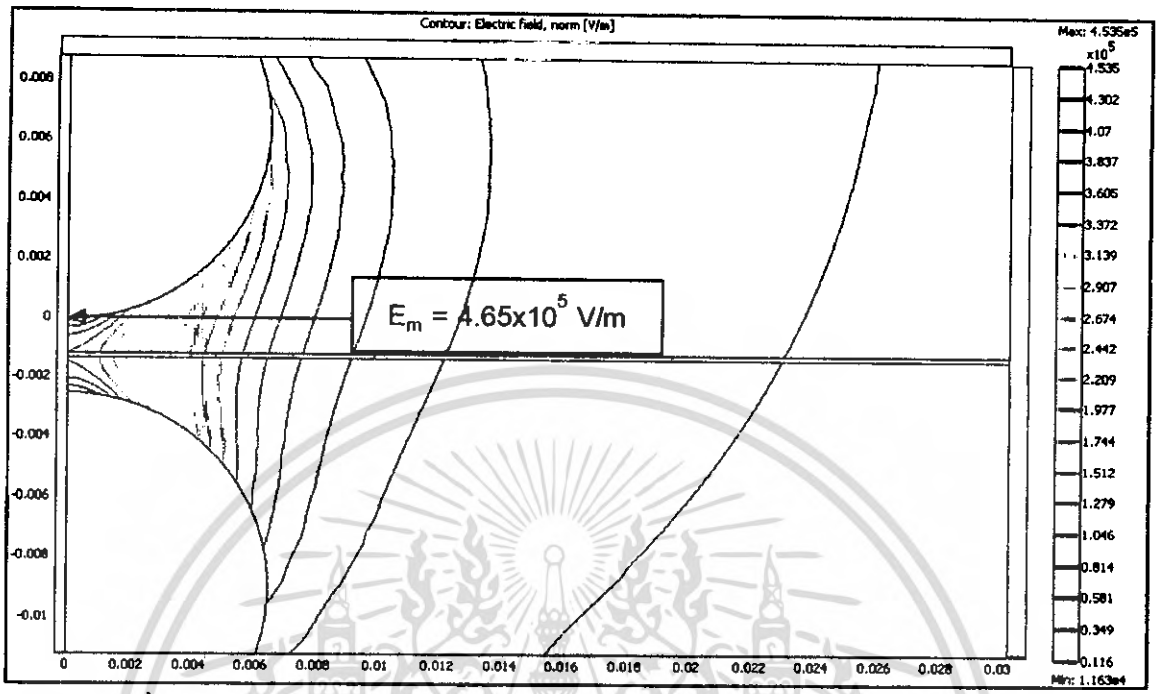
32) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวน 0.08 mm คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.32 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

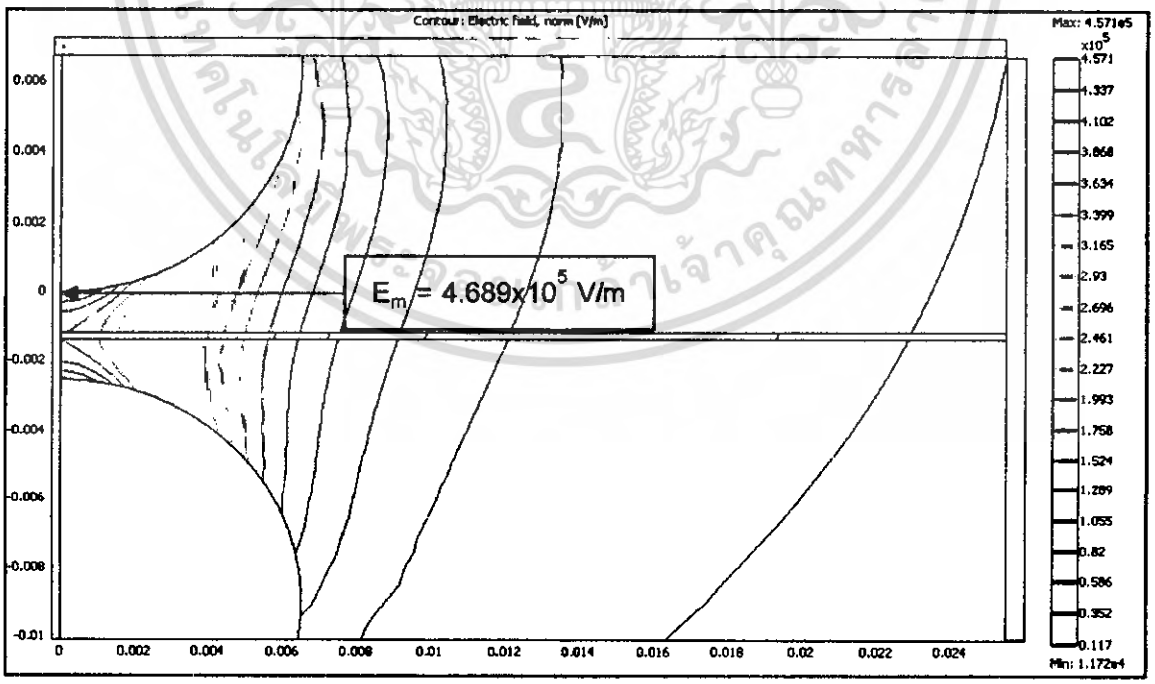
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวน 0.13 mm คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.33 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

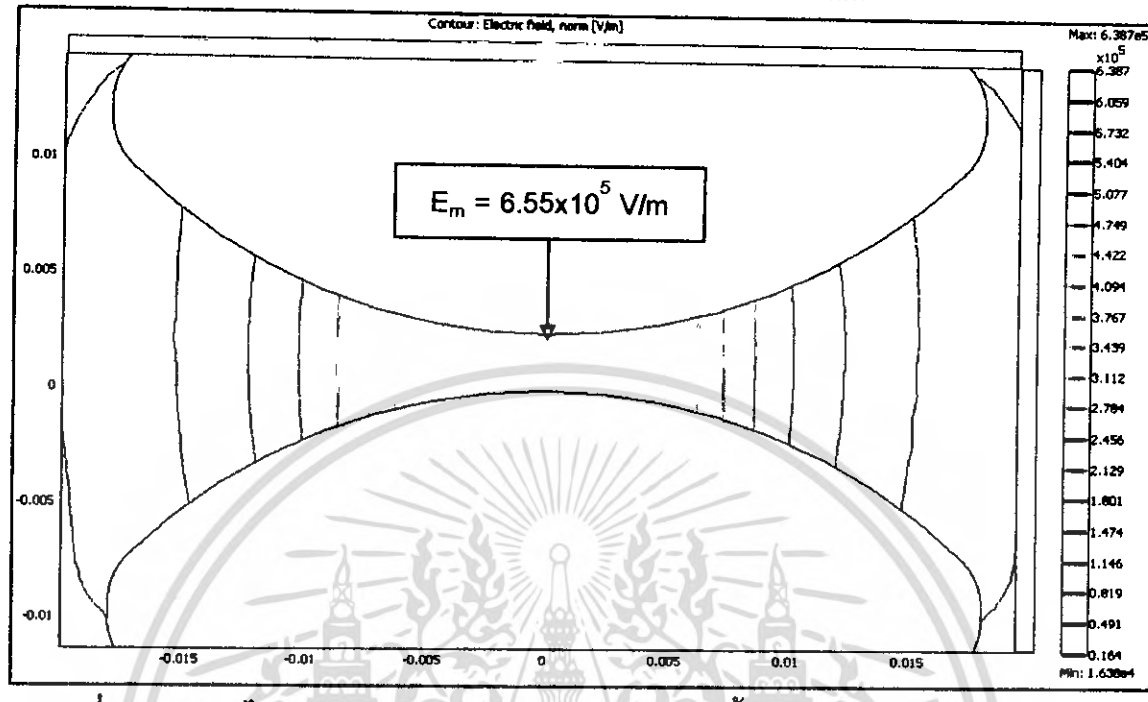
34) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวน 0.2 mm คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ที่มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.34 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

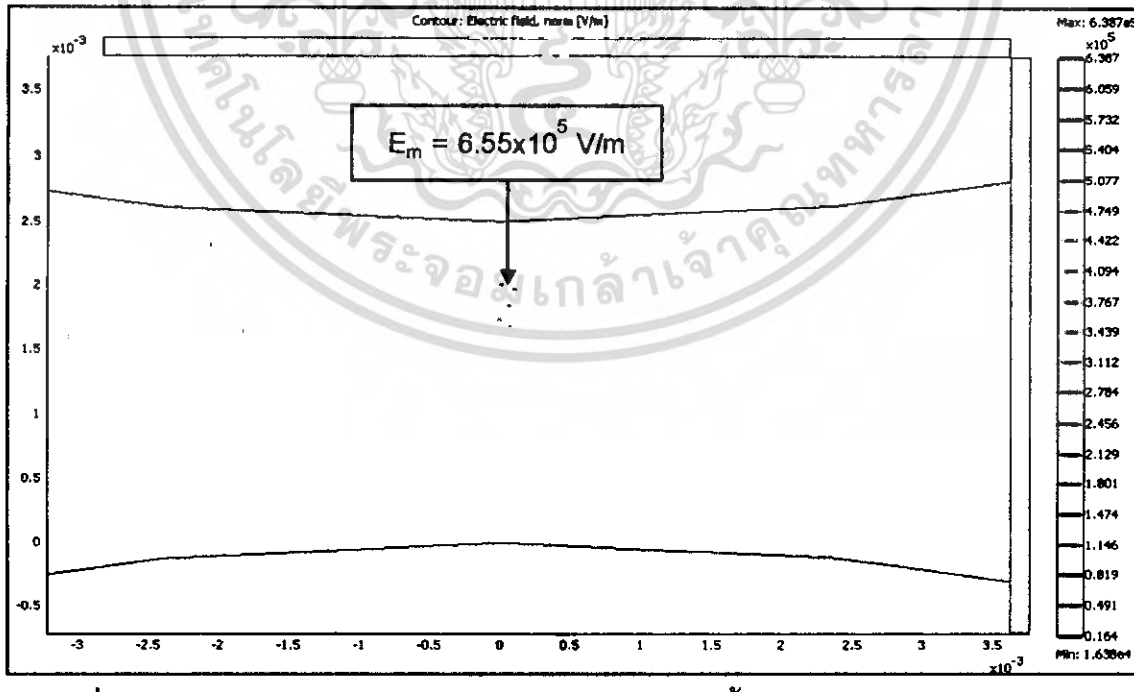
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 5 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.35 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

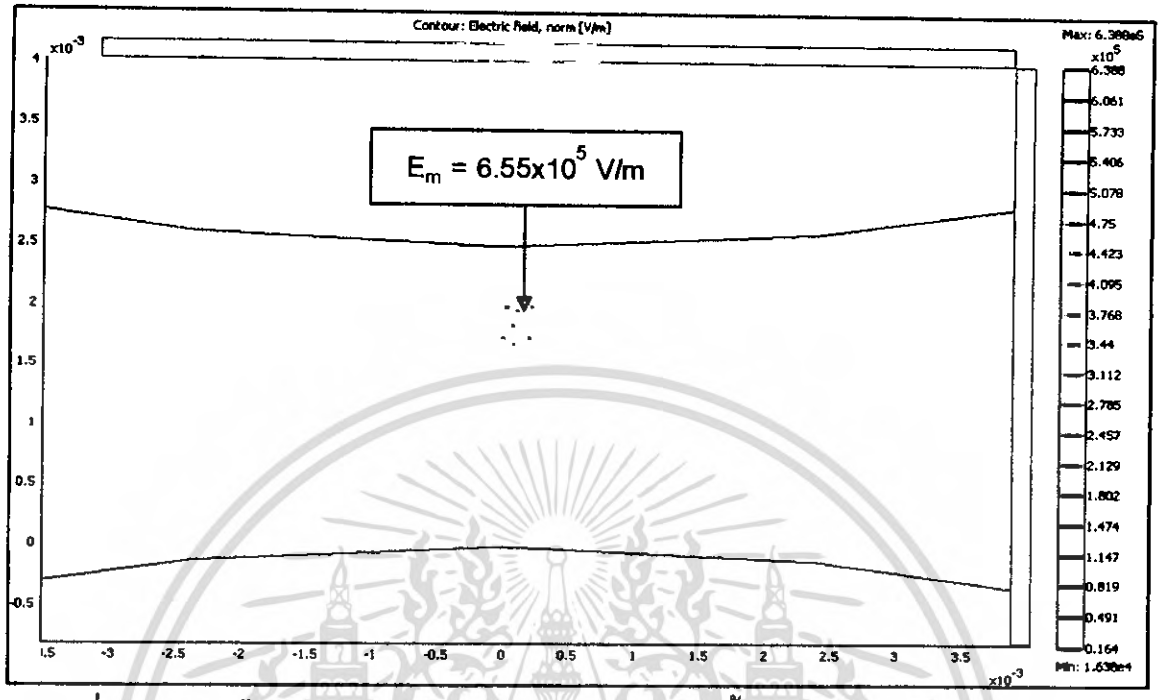
36) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 5 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.36 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

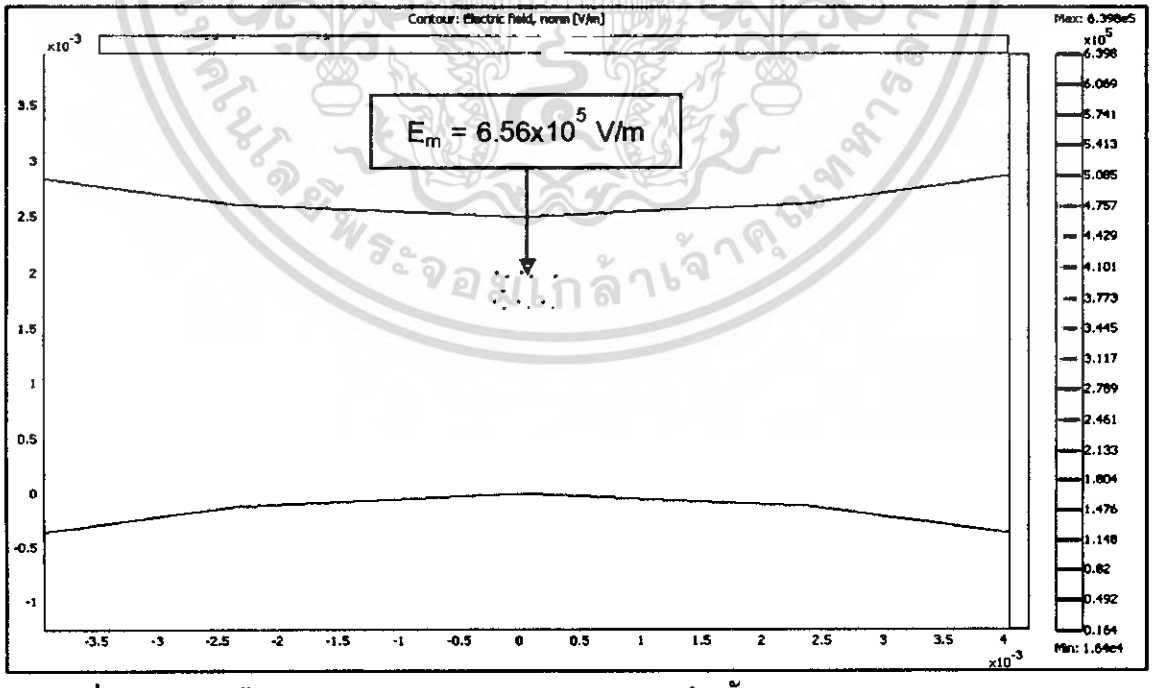
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 10 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.37 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

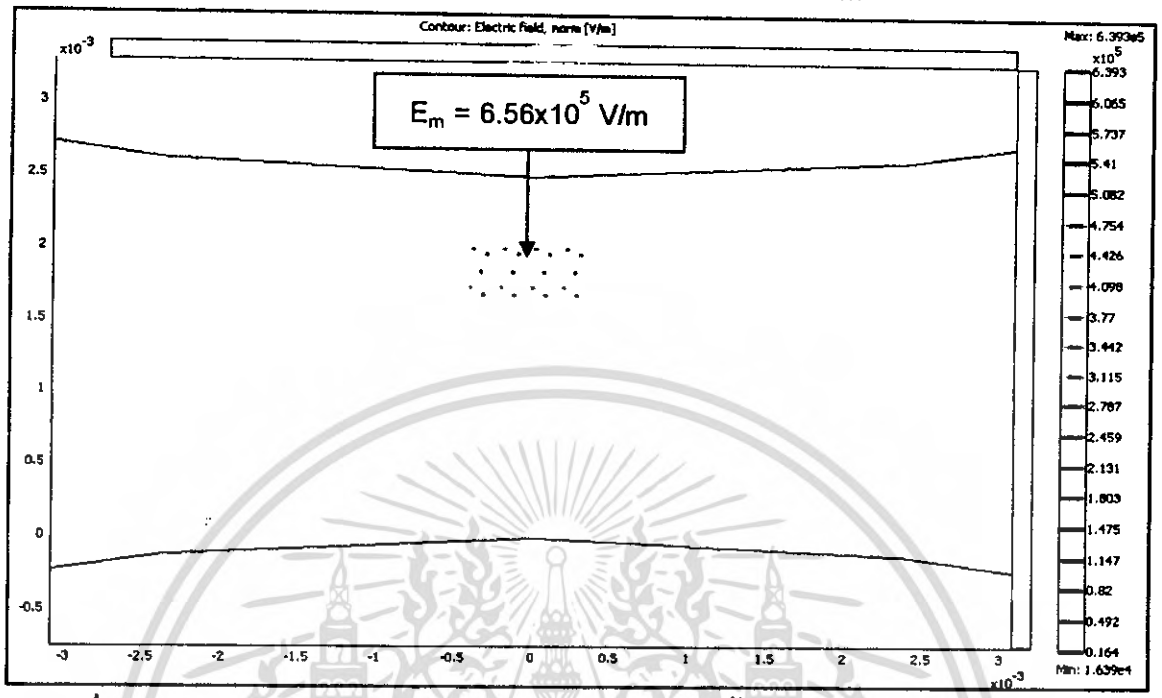
38) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 15 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.38 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

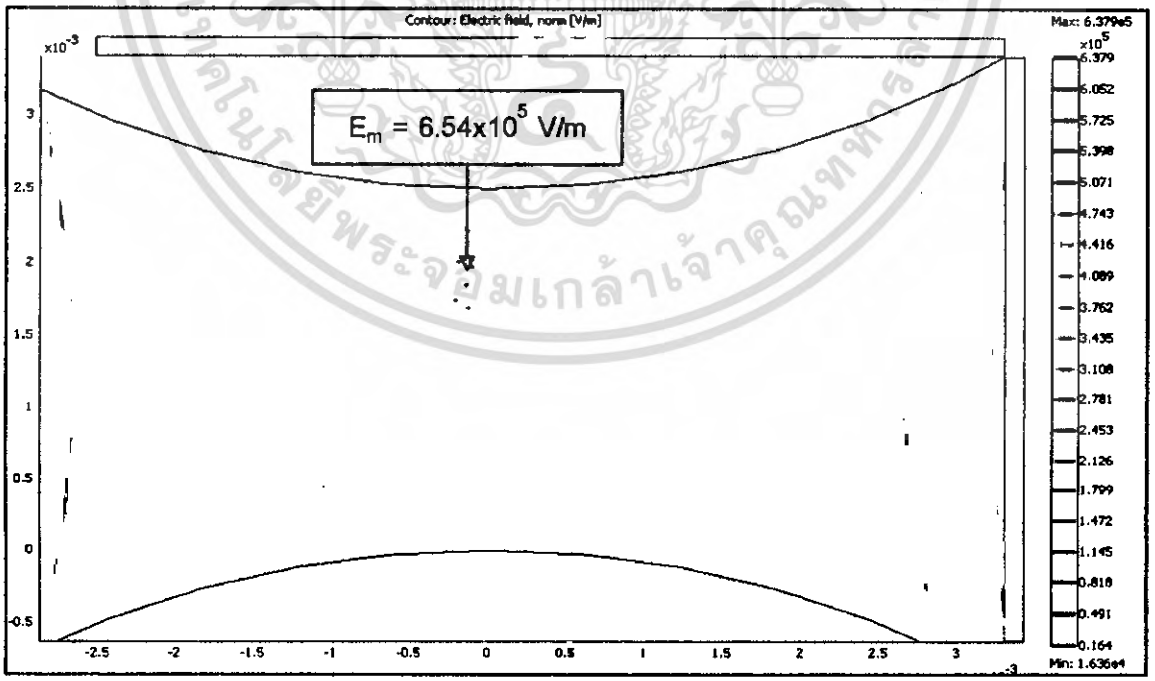
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 20 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.39 สนามไฟฟ้า partially spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

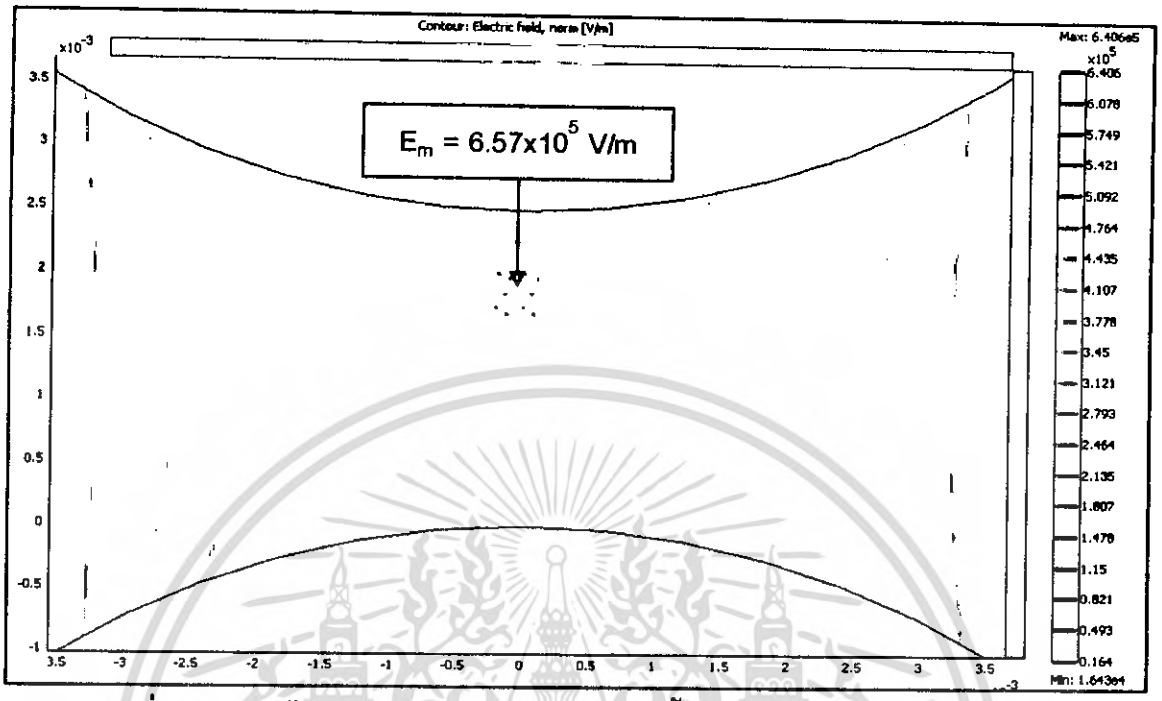
40) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 5 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่ 4.40 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

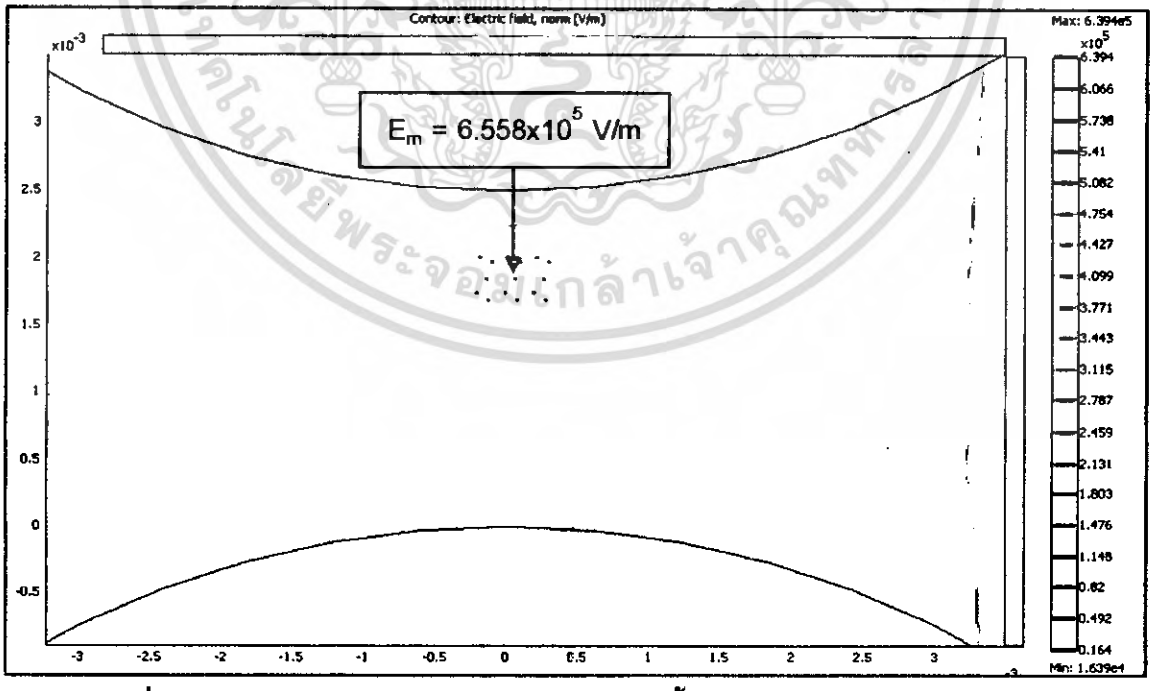
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

41) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 10 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



รูปที่4.41 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

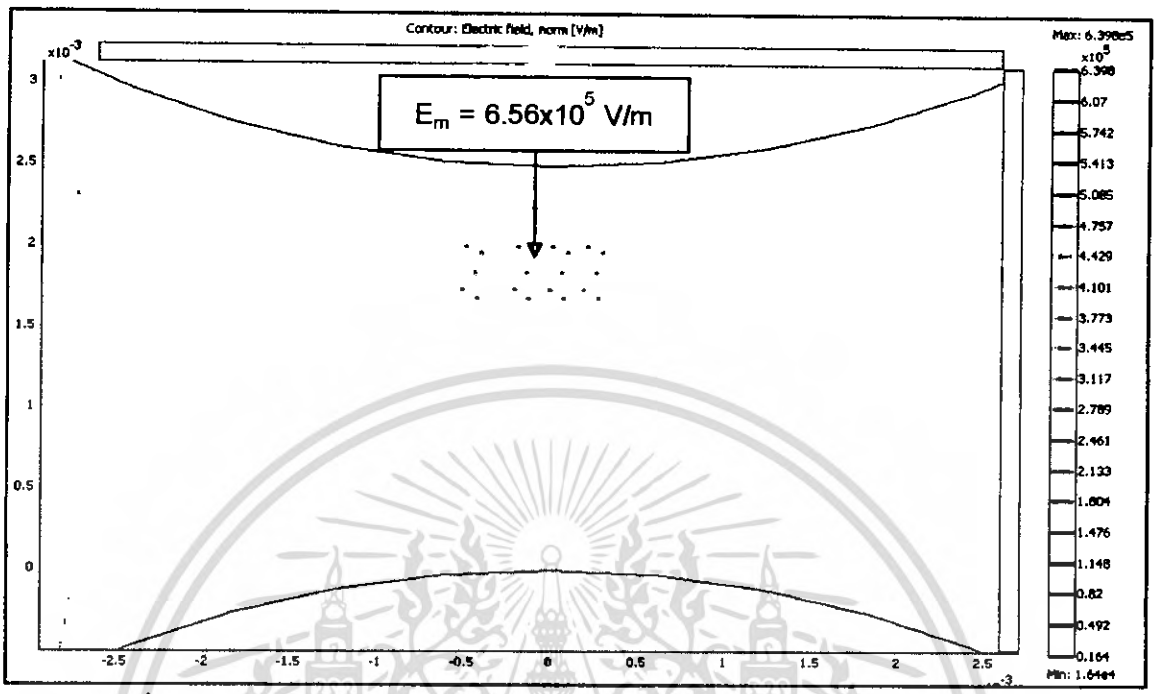
42) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 15 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm



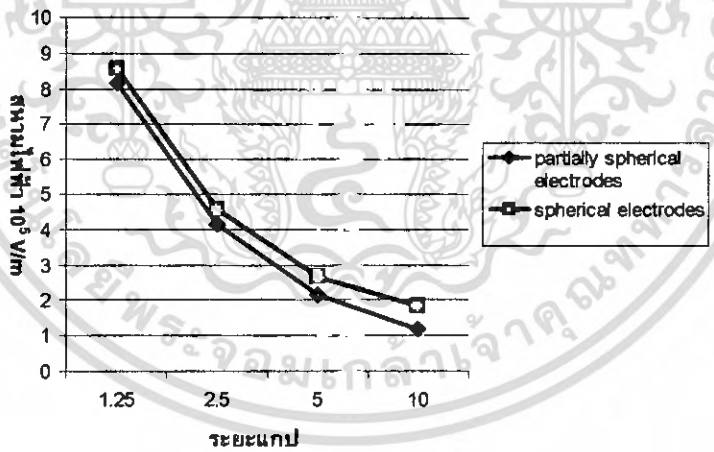
รูปที่ 4.42 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

43) การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันที่มีการเจือปนผงเหล็กขนาด $10\times10\,\mu m$ จำนวน 20 ชิ้น ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes มีระยะแกป 2.5 mm

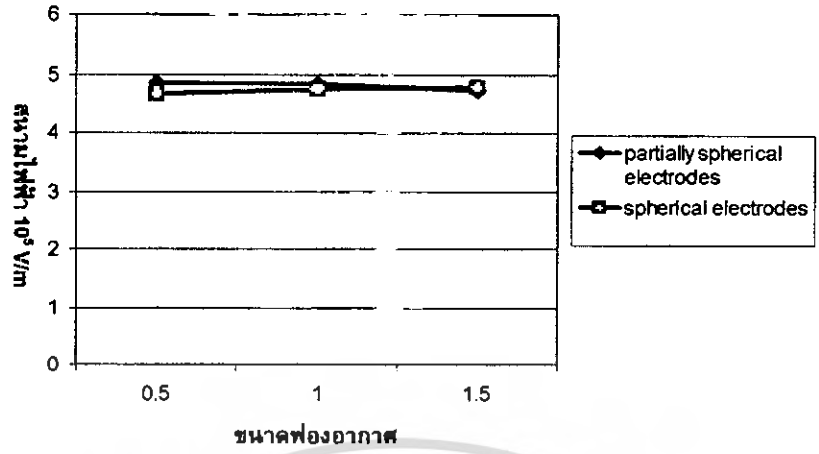


รูปที่ 4.43 สนามไฟฟ้า spherical electrodes ในน้ำมันแบบมีระยะแกป 2.5 mm

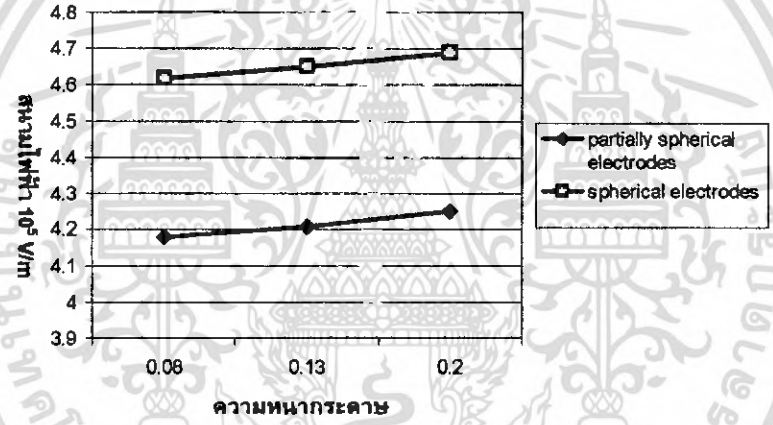


รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับระยะแกปโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

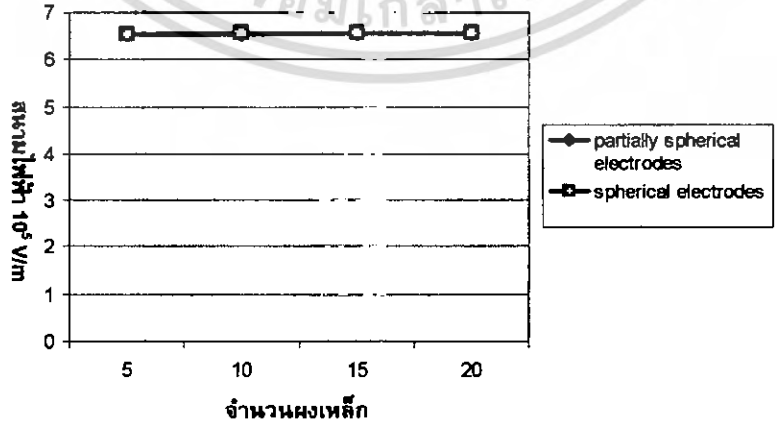
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับขนาดฟองอากาศโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนากระดาษโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.47 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ากับจำนวนผงเหล็กโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดแรงดัน

เครื่องกำเนิดแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบในโครงงานนี้จะมี 2 ตัว

รูปที่ 4.48 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงพิกัด 220 V / 600 kV,10 mA

รูปที่ 4.49 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV, 50 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

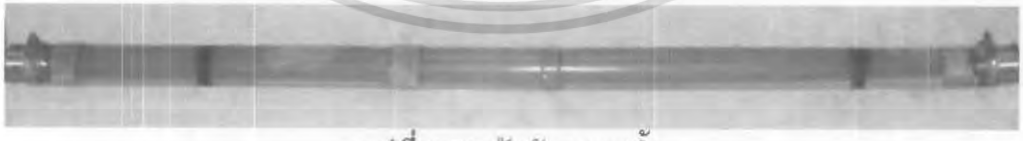
2) Voltage divider วัดแรงดันสูง

เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันโดยการแบ่งทอนแรงดันสูงๆออกเป็นส่วน ให้แรงดันต่ำพอที่จะใช้ Voltmeter วัดได้ โดยการนำเอา impedance ค่าสูงๆต่อขนานกับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอา impedance ที่มีแรงดันตกคร่อมส่วนน้อยออกมาวัดกับ Voltmeter

รูปที่ 4.50 RC โวลเตจดิไวเดอร์ AC 100 kV, DC 100 kV

3) ตัวต้านทานน้ำ

ตัวต้านทาน มีหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงเนื่องจาก ในการทดสอบทุกครั้งจะเกิดการสปาร์กระหว่างหัวอิเล็กโตรด หมายถึงเกิดการลัดวงจรที่หม้อแปลง และขดลวดของหม้อแปลงจะได้รับกระแสสูง ดังนั้นตัวต้านทานจึงเป็นตัวลดกระแสเพื่อป้องกันขดลวดของหม้อแปลงเมื่อเกิดการสปาร์ก



รูปที่ 4.51 ตัวต้านทานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) สายนำแรงสูง

สายนำแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

รูปที่ 4.52 สายนำแรงสูง

5) สายเคเบิลวัด

สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดจากโวลเตจดิไวเดอร์มายังเครื่องมือวัดแรงต่ำ

รูปที่ 4.53 สายเคเบิลวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

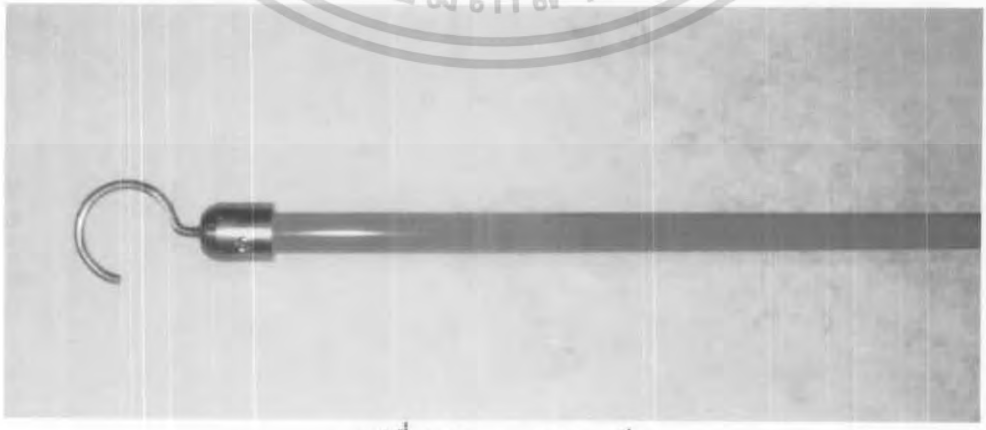
6) ตู้ควบคุมแรงดัน

ตู้ควบคุมแรงดัน เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มหรือลดแรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลง และทำหน้าที่ตัดวงจรเมื่อเกิดการสปาร์ก

รูปที่ 4.54 ตู้ควบคุมแรงดัน

7) ตะขอกราวด์

ในระบบแรงดันสูงเมื่อลดระดับแรงดันหมดแล้ว แต่ประจุที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดสอบจะเป็นอันตรายได้ ดังนั้นจะต้องมีตะขอกราวด์เอาไว้สัมผัสกับอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ดีสชาร์จประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ให้หมด ก่อนที่จะเข้าไปในบริเวณทดสอบ และตะขอกราวด์ควรสัมผัสกับอุปกรณ์ตลอดเวลาเมื่ออยู่ในบริเวณที่ทดสอบ

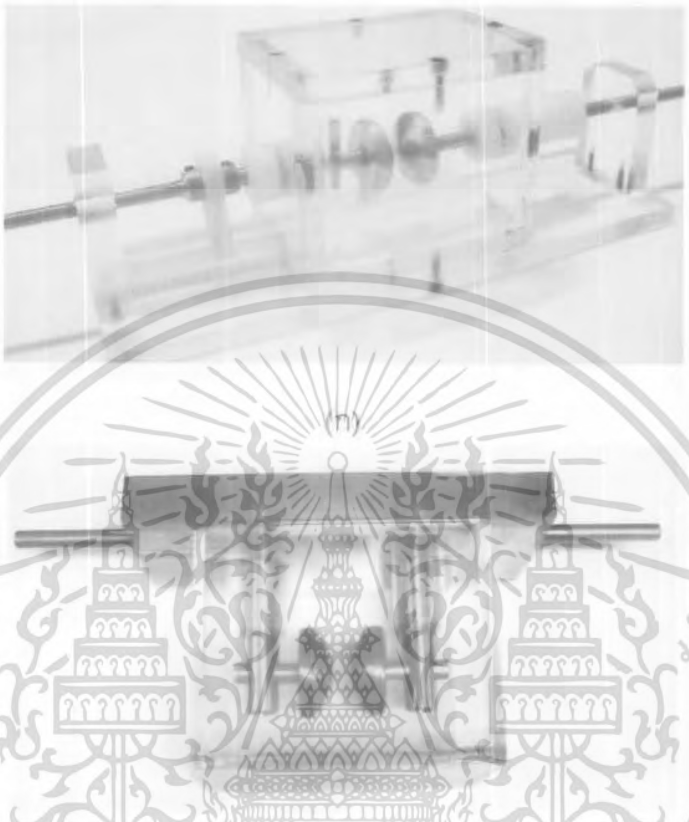


รูปที่ 4.55 ตะขอกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) กล่องทดสอบน้ำมัน

เป็นกล่องทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 ที่สามารถปรับระยะห่างของหัวอิเล็กโตรดได้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.56 กล่องทดสอบน้ำมัน

9) ชุดกวนน้ำมัน

รูปที่ 4.57 ชุดกวนน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 5 แบบ คือ

1) การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

2) การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปครึ่งทรงกลมกับแกปครึ่งทรงกลม

3) การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม

4) การทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปนระหว่างแกปครึ่งทรงกลมกับแกปครึ่งทรงกลม

1) การทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ

<u>อุปกรณ์การทดสอบ</u>

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV, 50 mA

- พิกัดกำลัง : 5 kVA
- อินพุท แรงดัน : 235 V
  กระแส : 22 A
- เอาท์พุท แรงดัน : 100 kV 1 PE
  กระแส : 0.05 A
- ความถี่ : 50 Hz

2) โวลเดจดิไวเดอร์

- พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ : 100 kV
- พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง : 100 kV
- อัตราส่วน (ratio) : 1000:1

3) ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์

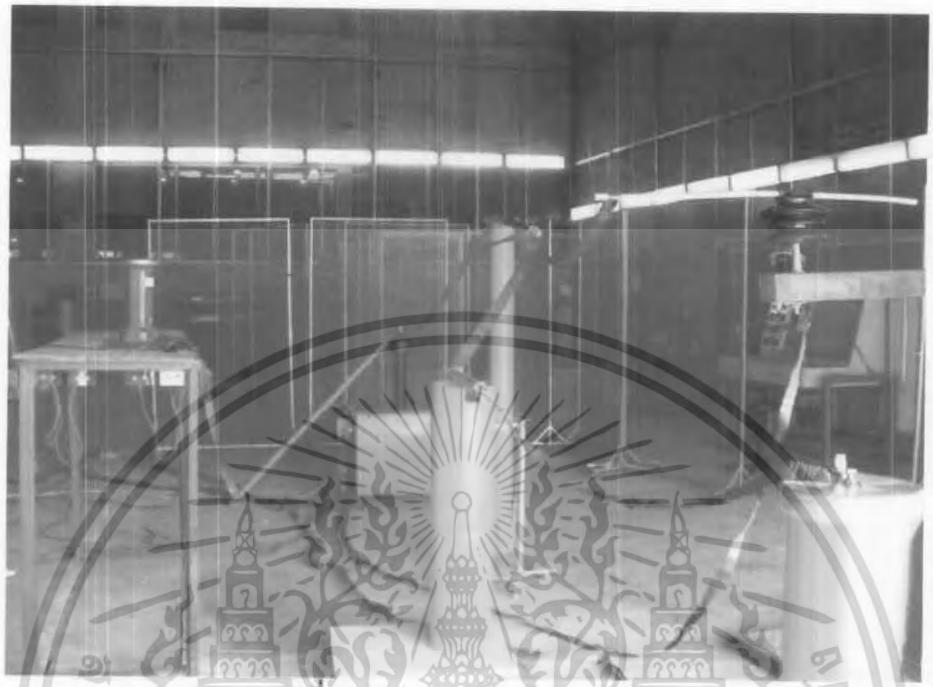
- พิกัด : 0.49 $M\Omega$

4) ชุดทดสอบรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดตามมาตรฐาน IEC 156

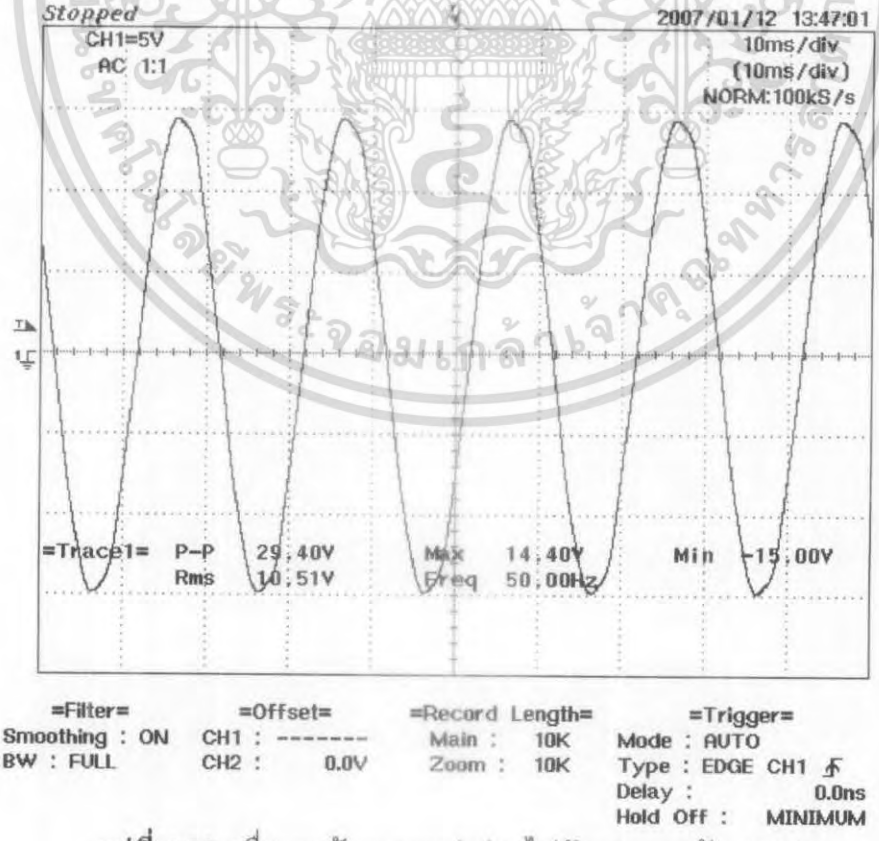
5) โวลต์มิเตอร์, สายโครแอกเซียล 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนทำการทดสอบ นักศึกษาได้ตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันจากหม้อแปลงทดสอบว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEC หรือไม่ วงจรการทดสอบ และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.58 - 4.59



รูปที่ 4.58 วงจรปรับเทียบแรงดัน



รูปที่ 4.59 คลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 10 kV

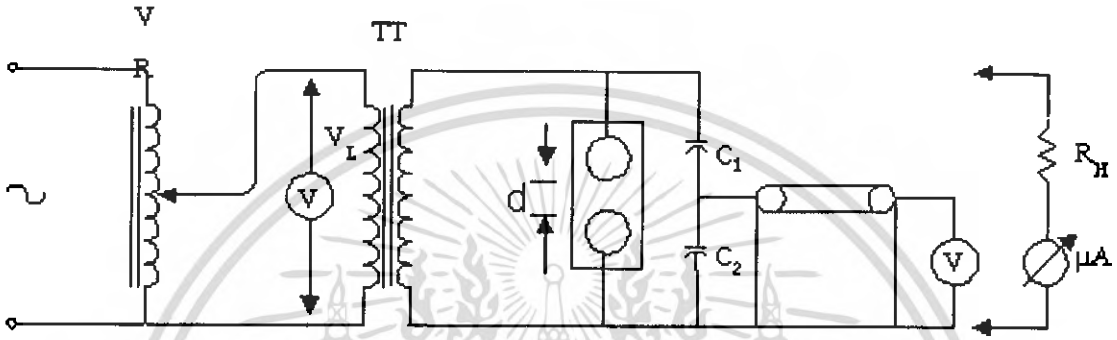
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

1) บันทึกสภาพอากาศของห้องทดสอบ

2) ทำการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบลงในภาชนะที่จะทำการทดสอบ ข้อสำคัญจะต้องไม่ให้มีสิ่งเจือปนลงไปในภาชนะที่จะทดสอบ

3) ต่อวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.60 วงจรการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม



รูปที่ 4.60 วงจรการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์

4) ปรับระยะแกปที่อยู่ในชุดทดสอบ 1.25 mm. และค่อยๆป้อนแรงดันจนเกิดการเบรกดาวน์ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

5) หลังจากทำการทดสอบในระยะแรกเสร็จแล้ว ปรับระยะแกปในชุดทดสอบเป็น 2.5 mm, 5 mm, 10 mm ตามลำดับ

6) เปลี่ยนหัวอิเล็กโตรดเป็นแบบครึ่งทรงกลม ทำการทดสอบตามข้อ 4 และ 5

7) เปลี่ยนน้ำมันแล้วใส่กระดาษที่มีขนาด 0.08, 0.13, 0.2, 0.5 mm ระหว่างหัวอิเล็กโตรด แล้วป้อนแรงดันจนเบรกดาวน์ แล้วบันทึกค่า ตามลำดับ

8) เปลี่ยนน้ำมันแล้วใส่ผงเหล็กเป็นจำนวน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g แล้วป้อนแรงดันจนเบรกดาวน์ แล้วบันทึกค่า ตามลำดับ

9) เปลี่ยนน้ำมันแล้วใส่ปริมาณน้ำเป็นจำนวน 1, 2, 3, 4 cc แล้วป้อนแรงดันจนเบรกดาวน์ แล้วบันทึกค่า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันบริสุทธิ์

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

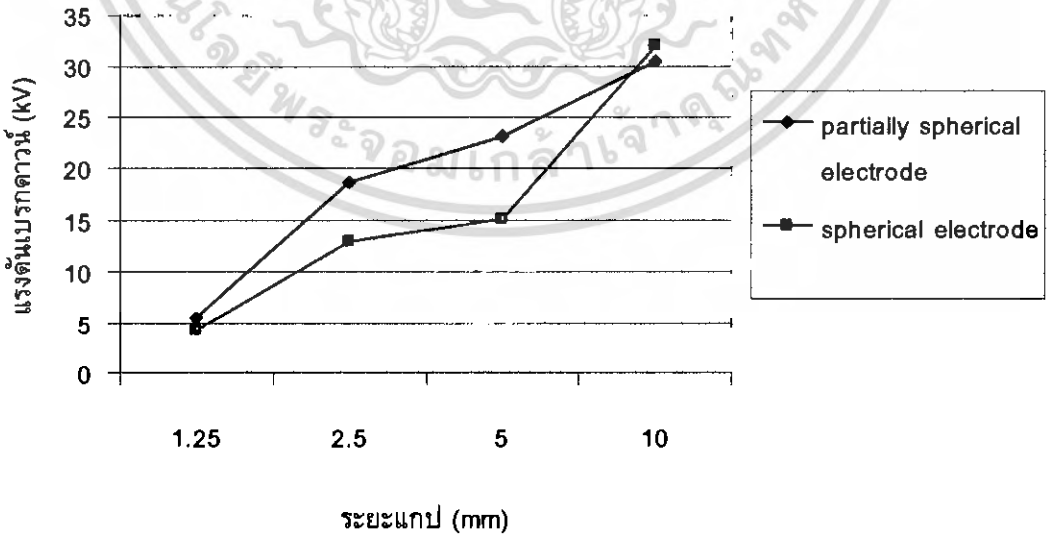
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 66 % อุณหภูมิ 24 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
1.25	5.895	6.44	5.95	4.92	4.85	5.31	5.56
2.5	15.06	23.25	18.37	15.9	24.99	14.56	18.69
5	21.52	25.13	20.64	25.06	26.43	20.13	23.15
10	30.13	30.09	30.17	31.14	30.7	31.29	30.59

หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes

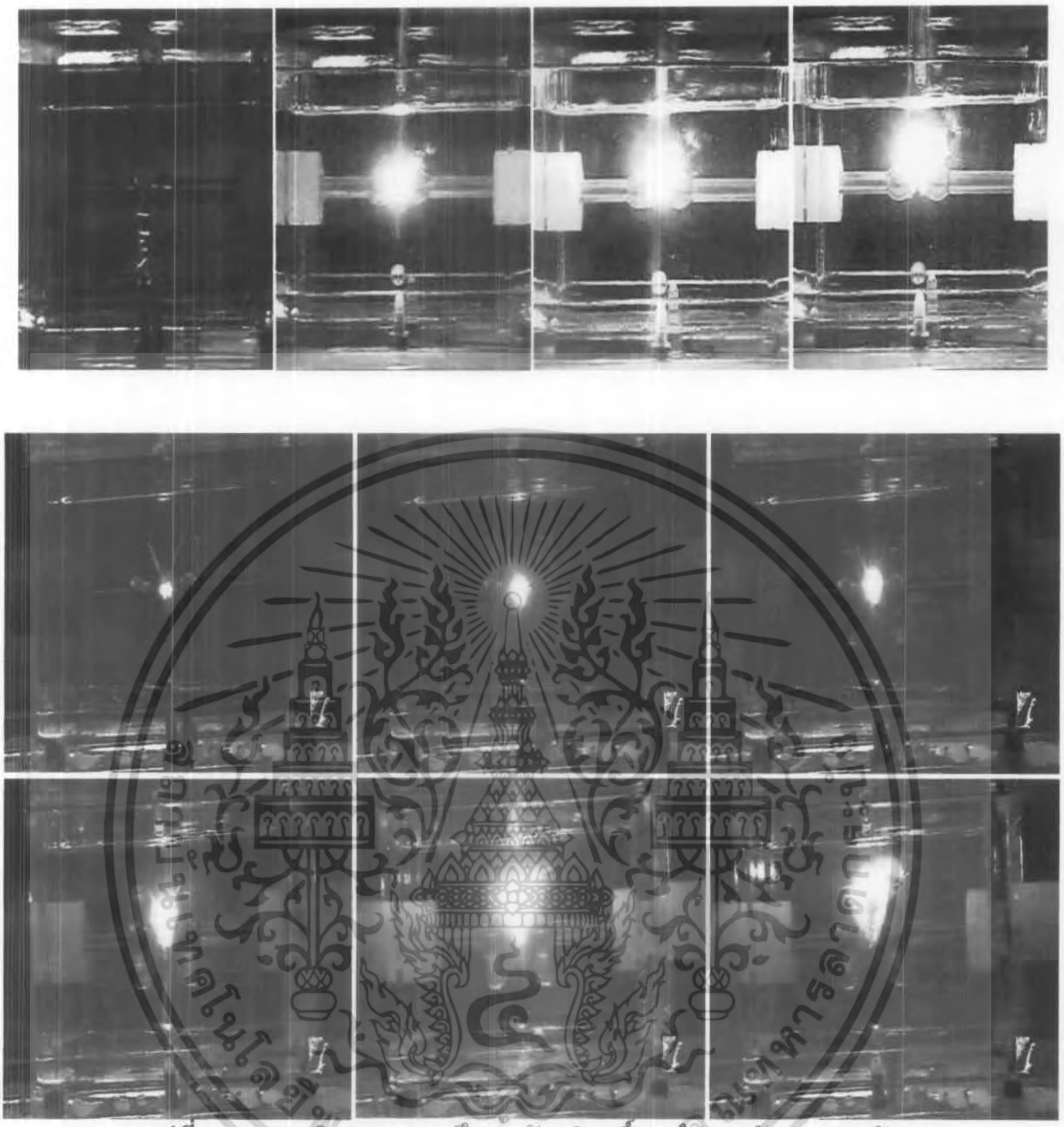
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 66 % อุณหภูมิ 26.3 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
1.25	4.29	3.20	5.08	3.91	4.37	5.3	4.36
2.5	12.13	12.53	14.53	13.32	11.86	13.27	12.94
5	16.94	12.35	13.39	16.27	14.92	16.91	15.13
10	33.9	33.45	30.48	30.91	30.5	32.86	32.02



รูปที่ 4.61 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 การเกิดเบรกดาวน์ในน้ำมันบริสุทธิ์ภายใต้แรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันที่มีกระดาษฉนวนคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

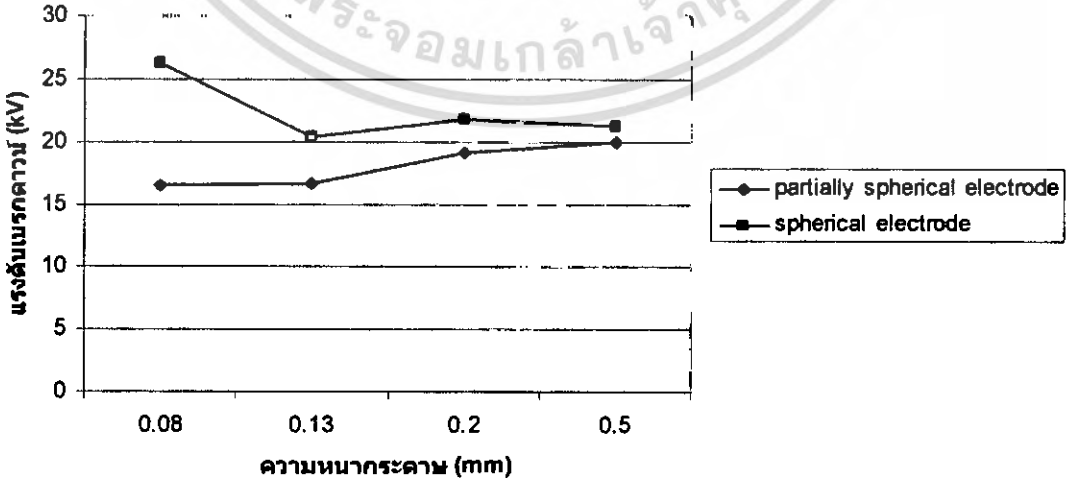
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 77 % อุณหภูมิ 26 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความหนากระดาษ (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.08	17.886	18.553	16.250	13.267	15.124	18.424	16.584
0.13	14.753	17.335	16.519	18.134	16.11	17.00	16.642
0.2	19.335	24.708	16.076	17.037	24.185	13.44	19.13
0.5	17.898	26.078	15.615	17.772	22.284	20.552	20.033

หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes

สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 76 % อุณหภูมิ 26.5 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความหนากระดาษ (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.08	22.317	30.348	27.277	27.404	23.045	27.021	26.23
0.13	22.687	25.286	16.346	15.885	19.739	22.419	20.39
0.2	20.208	23.932	17.951	23.727	21.639	23.632	21.85
0.5	27.591	22.116	19.91	16.477	21.207	20.189	21.25



รูปที่ 4.63 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่มีผงเหล็กเจือปน

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes gap 2.5 mm

สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 69 % อุณหภูมิ 27.5 °C ความดันบรรยากาศ 764.1 mmHg

ผงเหล็ก (g)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.5	5.88	6.27	5.91	5.91	6.92	7.49	6.4
1.0	7.82	7.52	13.7	10.14	7.96	9.78	9.47
1.5	11.32	8.72	10.86	8.46	7.52	6.46	8.96
2.0	4.96	9.23	9.68	6.92	7.73	8.21	7.79

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes gap 5 mm

สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 67 % อุณหภูมิ 28.1 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

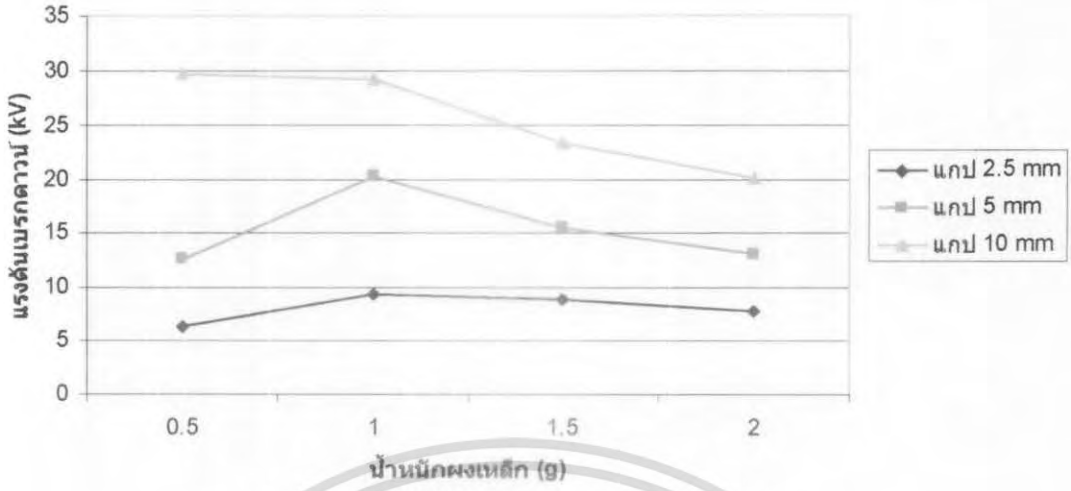
ผงเหล็ก (g)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.5	8.01	12.77	13.05	14.86	13.12	13.70	12.58
1.0	22.23	21.87	28.78	13.45	20.79	14.49	20.27
1.5	14.898	17.646	15.34	16.15	13.733	16.013	15.63
2.0	11.662	11.590	15.846	11.914	15.286	12.350	13.11

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes gap 10 mm

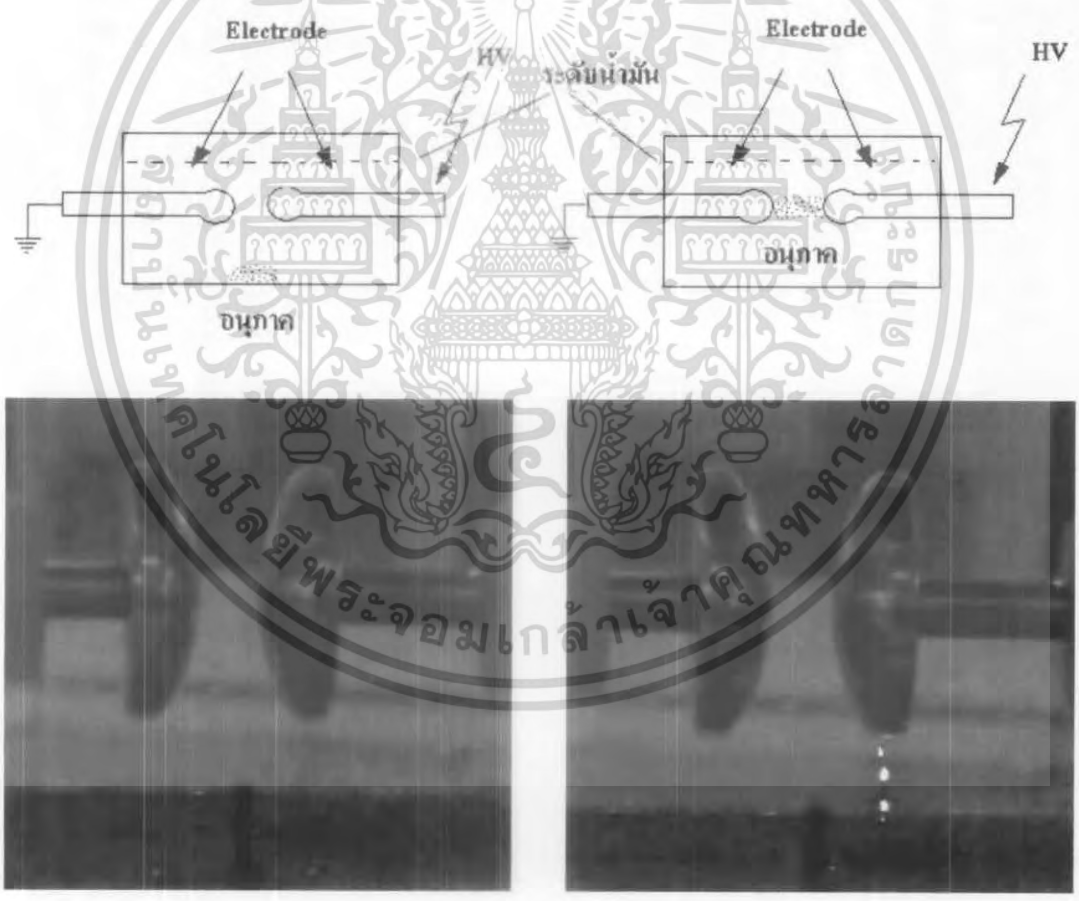
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 65.5 % อุณหภูมิ 28 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ผงเหล็ก (g)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.5	28.024	22.153	33.682	27.00	32.333	36.8	29.67
1.0	25.665	24.986	36.72	42.667	21.335	23.305	29.11
1.5	21.408	25.754	21.733	22.847	30.522	20.402	23.26
2.0	21.00	19.782	19.782	19.355	20.331	20.331	20.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีผงเหล็ก



รูปที่ 4.65 การเรียงตัวของอนุภาคของแข็งในน้ำมันก่อนป้อนแรงดัน และขณะป้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดสอบไฟฟ้ากระแสตรง

<u>อุปกรณ์การทดสอบ</u>

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 600 kV

-อินพุทแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 0-220 V

-เอาท์พุทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-600 kV

-กระแสเอาท์พุทสูงสุด 10 mA

-ชนิดของแรงดันเอาท์พุทเป็นแบบ Negative

2) โวลเดจดิไวเดอร์

- พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ : 100 kV
- พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง : 100 kV
- อัตราส่วน (ratio) : 1000 :1

3) ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์

- พิกัด : 0.49 $M\Omega$

4) ชุดทดสอบรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดตามมาตรฐาน IEC 156

5) โวลต์มิเตอร์, สายโครแอกเซียล 75 Ω

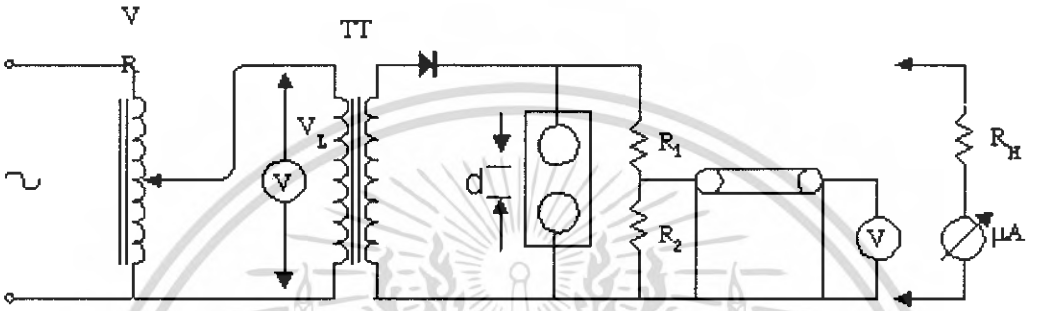
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

1) บันทึกสภาพอากาศของห้องทดสอบ

2) ทำการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบลงในภาชนะที่จะทำการทดสอบ ข้อสำคัญจะต้องไม่ให้มีสิ่งเจือปนลงไปในภาชนะที่จะทดสอบ

3) ต่อวงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.66 วงจรการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ระหว่างแกปทรงกลมกับแกปทรงกลม



รูปที่ 4.66 วงจรการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์

4) ปรับระยะแกปที่อยู่ในชุดทดสอบ 1.25 mm. และค่อยๆป้อนแรงดันจนเกิดการเบรกดาวน์ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

5) หลังจากทำการทดสอบในระยะแรกเสร็จแล้ว ปรับระยะแกปในชุดทดสอบเป็น 2.5 mm, 5 mm, 10 mm ตามลำดับ

6) เปลี่ยนหัวอิเล็กโตรดเป็นแบบครึ่งทรงกลม ทำการทดสอบตามข้อ 4 และ 5

7) เปลี่ยนน้ำมันแล้วใส่กระดาษที่มีขนาด 0.08, 0.13, 0.2, 0.5 mm ระหว่างหัวอิเล็กโตรด แล้วป้อนแรงดันจนเบรกดาวน์ แล้วบันทึกค่า ตามลำดับ

8) เปลี่ยนน้ำมันแล้วใส่ผงเหล็กเป็นจำนวน 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g แล้วป้อนแรงดันจนเบรกดาวน์ แล้วบันทึกค่า ตามลำดับ

9) เปลี่ยนน้ำมันแล้วใส่ปริมาณน้ำเป็นจำนวน 1, 2, 3, 4 cc แล้วป้อนแรงดันจนเบรกดาวน์ แล้วบันทึกค่า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันบริสุทธิ์

หัวอิเล็กโตรดแบบ **partially spherical electrodes**

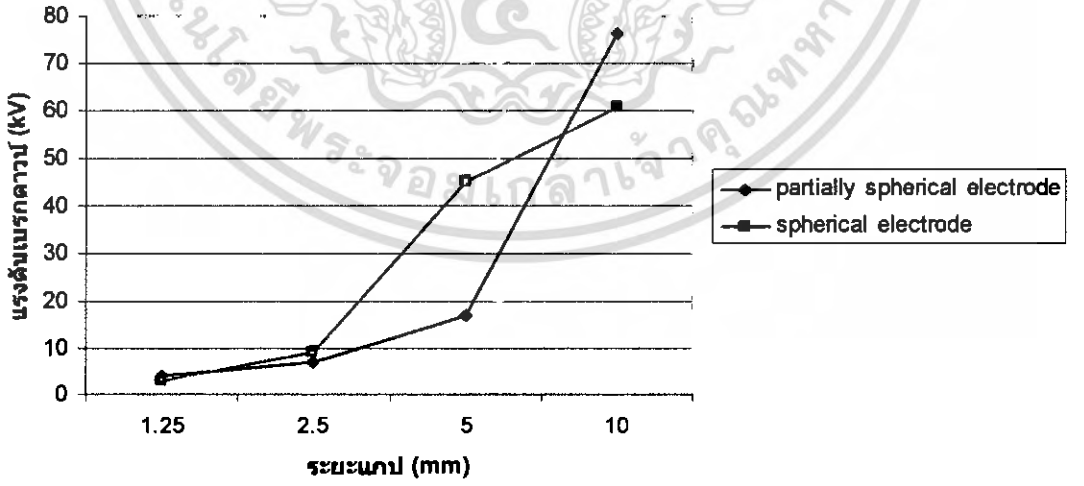
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 68 % อุณหภูมิ 24.5 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
1.25	6.633	4.704	3.332	4.299	3.544	2.71	4.20
2.5	6.842	7.522	6.751	6.747	6.611	7.188	6.94
5	15.419	12.905	19.00	17.00	16.618	21.645	17.1
10	79	76	74	68	80	80	76.17

หัวอิเล็กโตรดแบบ **spherical electrodes**

สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 69 % อุณหภูมิ 24 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
1.25	2.934	2.604	2.604	4.12	2.604	3.824	3.115
2.5	7.478	9.724	9.724	10.281	10.281	7.776	9.21
5	29.966	46.5	44.344	44.656	53.3	53.3	45.34
10	45.107	57	54.5	70	62.5	75	60.68



รูปที่ 4.67 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันที่มีกระดาษฉนวนคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

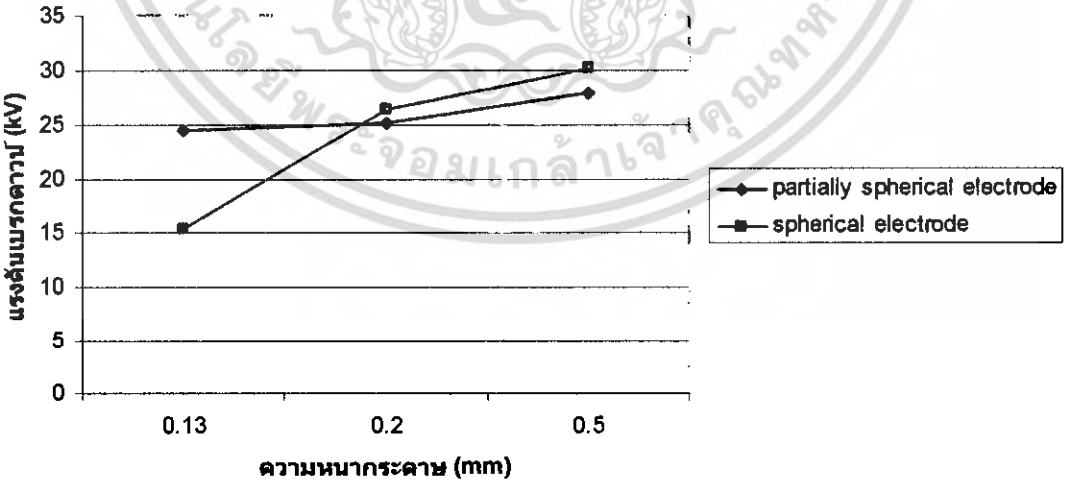
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 73 % อุณหภูมิ 23 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความหนากระดาษ (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.13	23.167	27.774	23.5	23.5	24.341	24.683	24.49
0.2	27.129	22.276	26.103	25.224	24.673	25.635	25.17
0.5	29.845	24.806	28.906	27.864	28.162	27.541	27.85

หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes

สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 73 % อุณหภูมิ 23 °C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความหนากระดาษ (mm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.13	12.571	17.433	17.5	14.273	13.562	17.273	15.44
0.2	23.733	27.226	28.074	26.832	25.382	26.775	26.34
0.5	30.576	29.966	30.03	29.68	31.025	29.112	30.06



รูปที่ 4.68 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันที่มีกระดาษฉนวนคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงที่มีผงเหล็กเจือปน

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

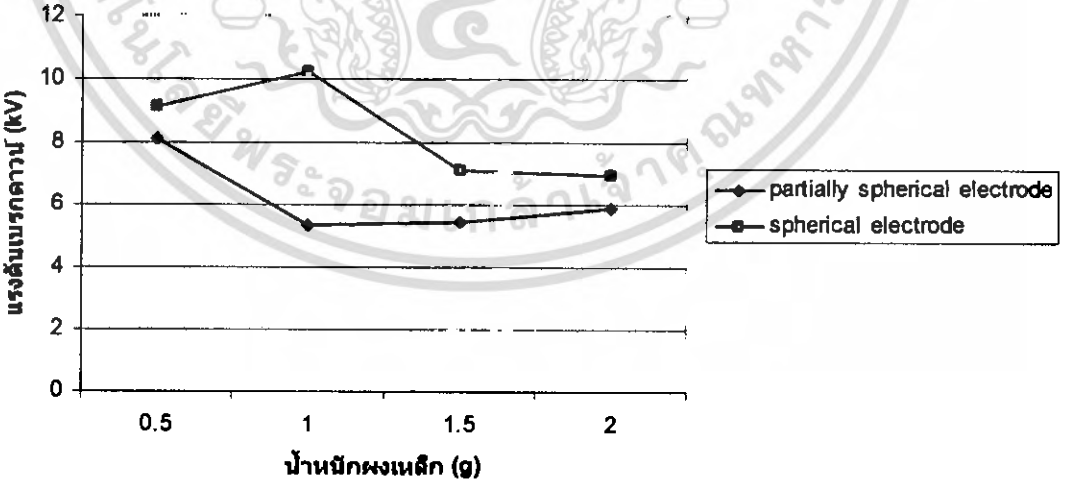
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 67 % อุณหภูมิ 25.2 °C ความดันบรรยากาศ 759.1 mmHg

น้ำหนัก (g)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.5	4.814	8.253	11.2	10.031	8.64	5.66	8.1
1.0	2.835	5.12	5.66	6.678	5.944	5.599	5.306
1.5	5.348	4.408	7.597	6.386	3.912	4.972	5.437
2.0	5.034	5.912	5.912	5.818	7.060	5.442	5.863

หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes 69 % 24.8 °C 759.1 mmHg

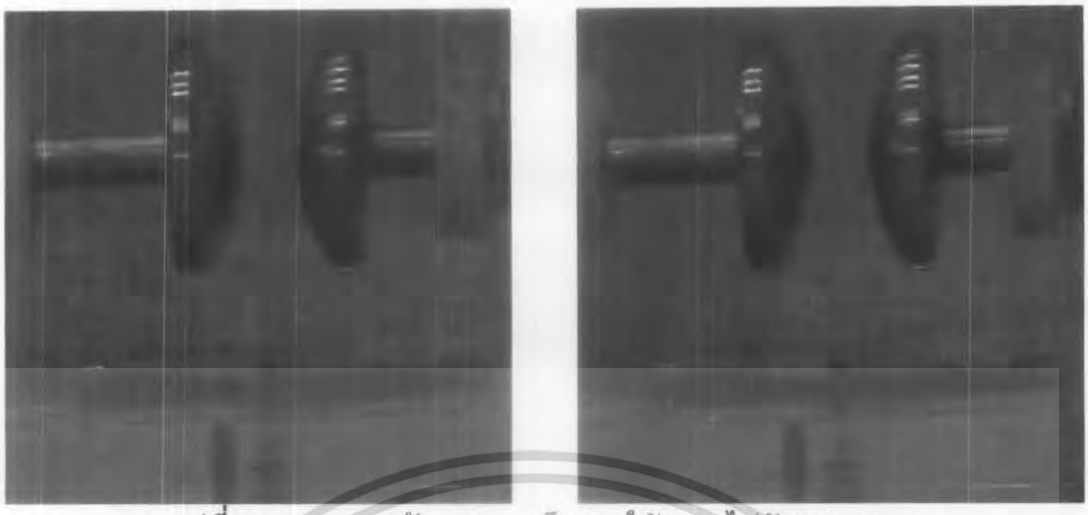
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 69 % อุณหภูมิ 24.8 °C ความดันบรรยากาศ 759.1 mmHg

น้ำหนัก (g)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
0.5	6.444	9.148	9.273	11.971	9.799	8.104	9.12
1.0	8.878	10.688	8.729	9.649	9.073	14.394	10.23
1.5	4.815	5.693	5.133	9.11	9.348	8.521	7.1
2.0	6.854	6.678	6.971	4.470	9.023	7.567	6.93



รูปที่ 4.69 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงที่มีผงเหล็กเจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 การลอยตัวของผงเหล็กภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 4.7 แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงที่มีหยดน้ำเจือปน

หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 71 % อุณหภูมิ 25.4 ° C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

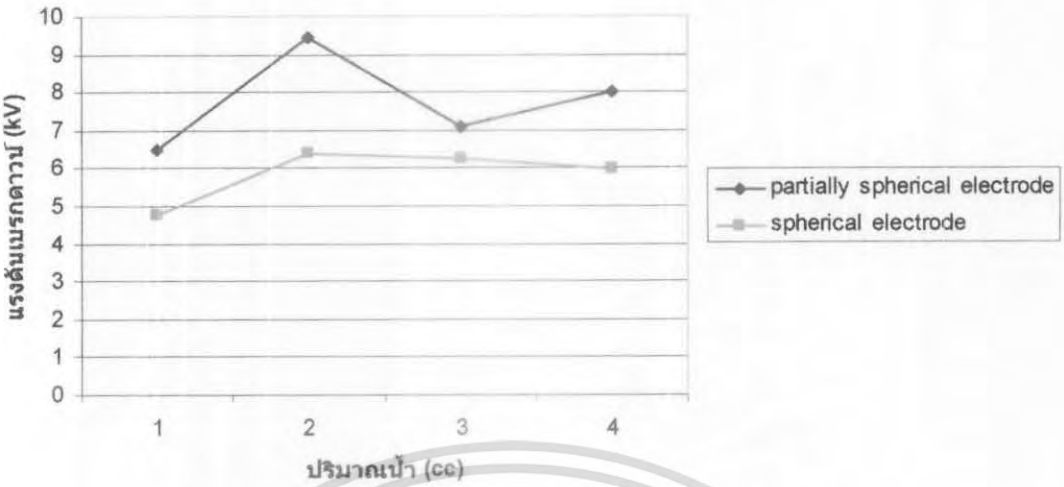
ปริมาณน้ำ (cc)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
1	6.766	8.673	4.408	4.812	7.836	6.444	6.49
2	10.281	8.015	10.594	10.813	8.342	8.67	9.45
3	7.209	8.728	6.591	7.955	6.766	5.16	7.07
4	6.62	9.298	7.06	8.342	7.119	9.674	8.02

หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes

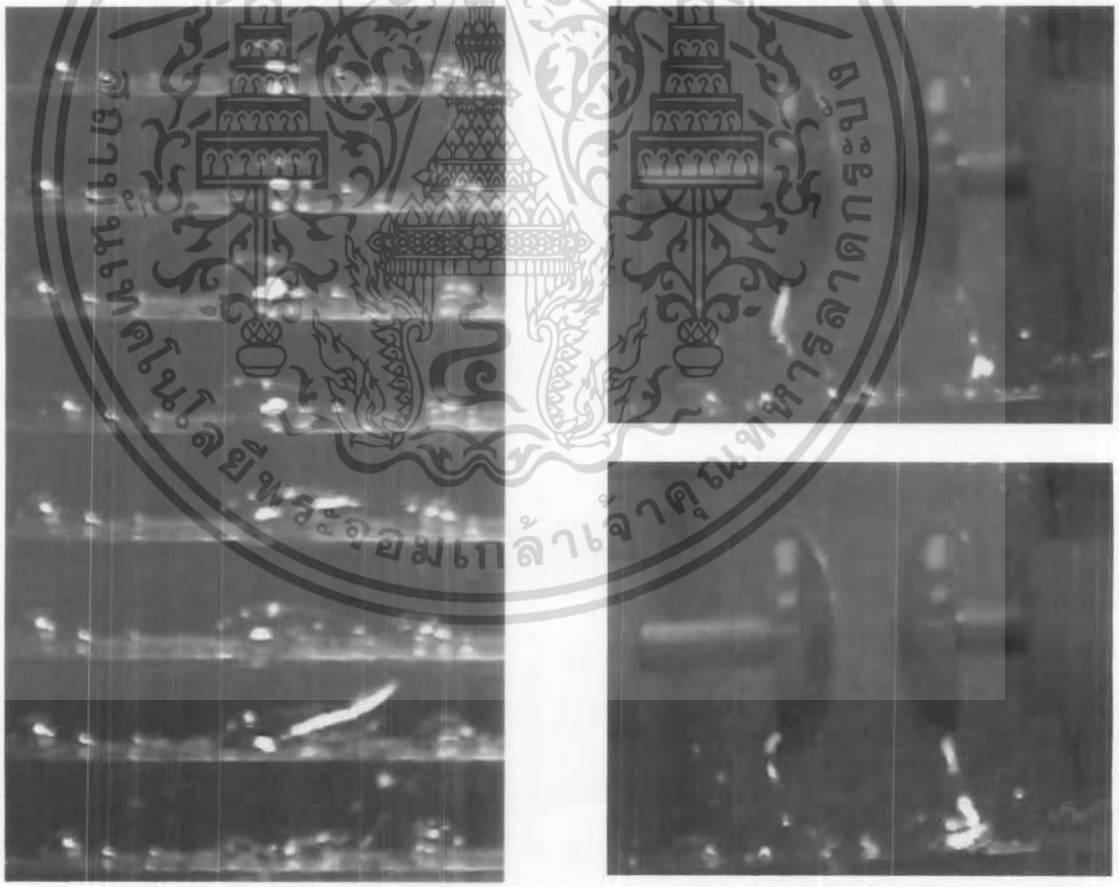
สภาพอากาศห้องทดสอบความชื้น 72 % อุณหภูมิ 24.5 ° C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ปริมาณน้ำ (cc)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U(kV)$						$\overline{U}(kV)$
	1	2	3	4	5	6	
1	3.559	3.912	5.85	5.254	4.502	5.442	4.75
2	6.62	6.678	5.317	7.537	5.818	6.444	6.40
3	5.975	6.035	5.317	7.299	5.85	7.03	6.251
4	6.038	5.944	5.698	5.00	6.678	6.444	5.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

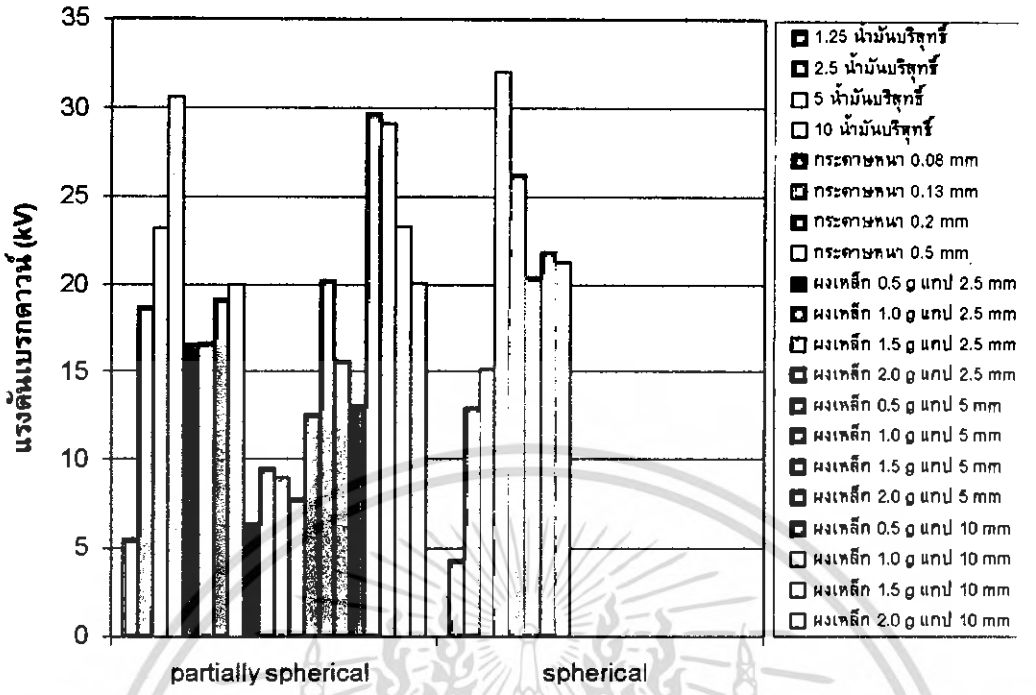


รูปที่ 4.71 กราฟผลการทดสอบการเบรกดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงเมื่อมีหยดน้ำเจือปน

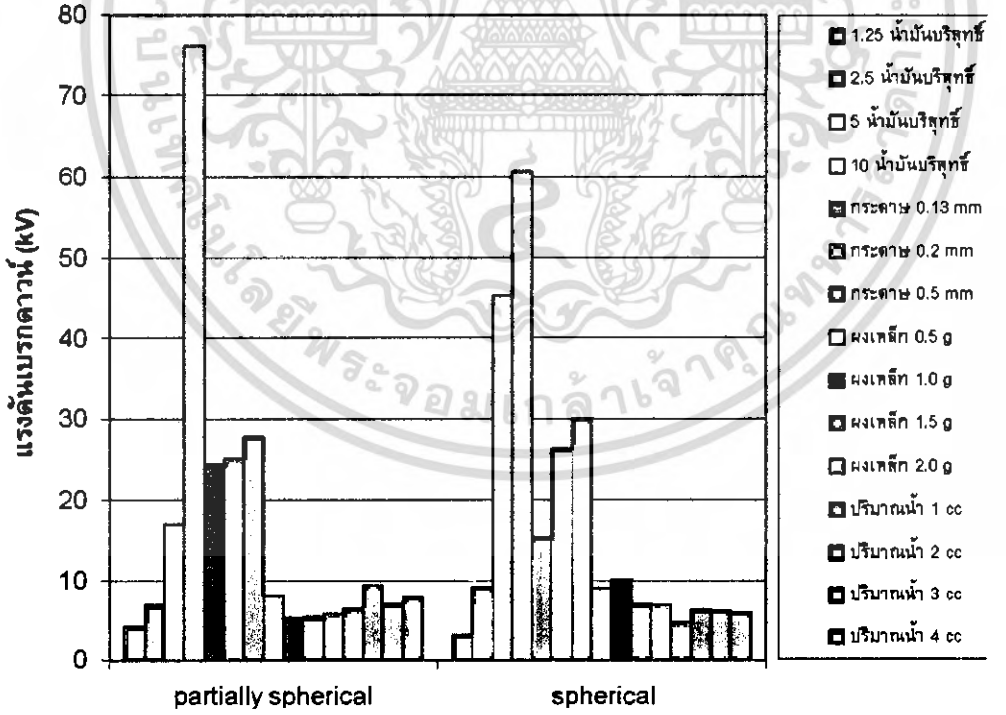


รูปที่ 4.72 การเบรกดาวน์ และยืดของหยดน้ำในน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

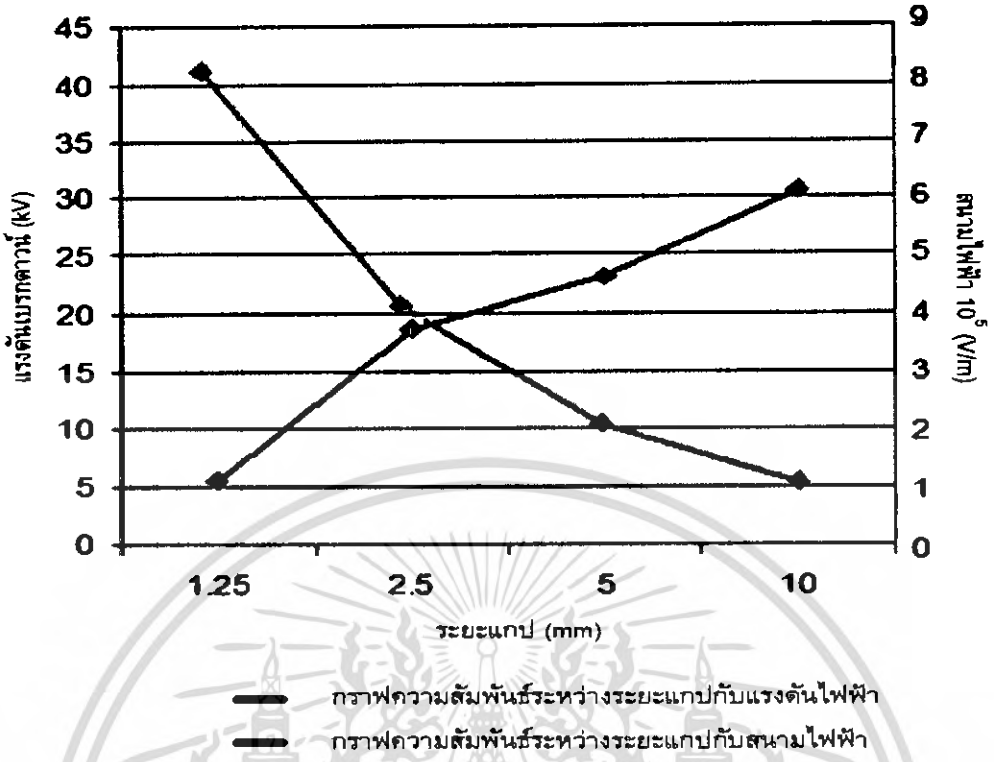


รูปที่ 4.73 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงในกรณีศึกษาต่างๆ

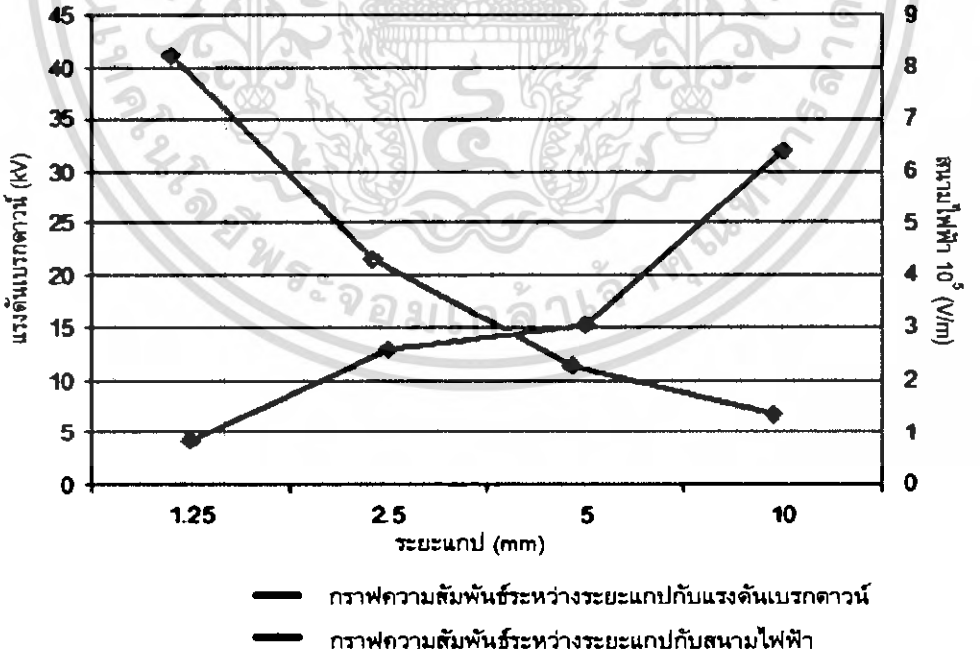


รูปที่ 4.74 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงของน้ำมันหม้อแปลงในกรณีศึกษาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

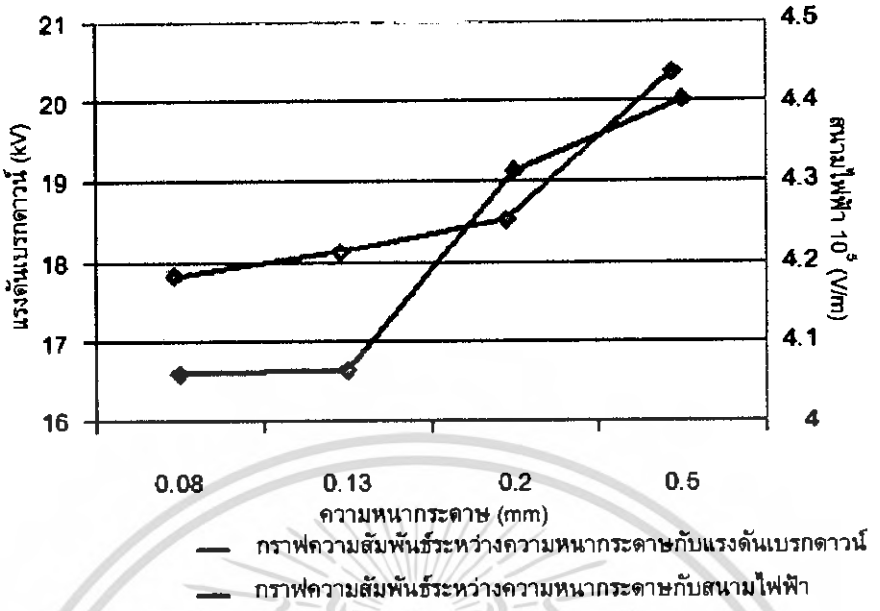


รูปที่ 4.75 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes

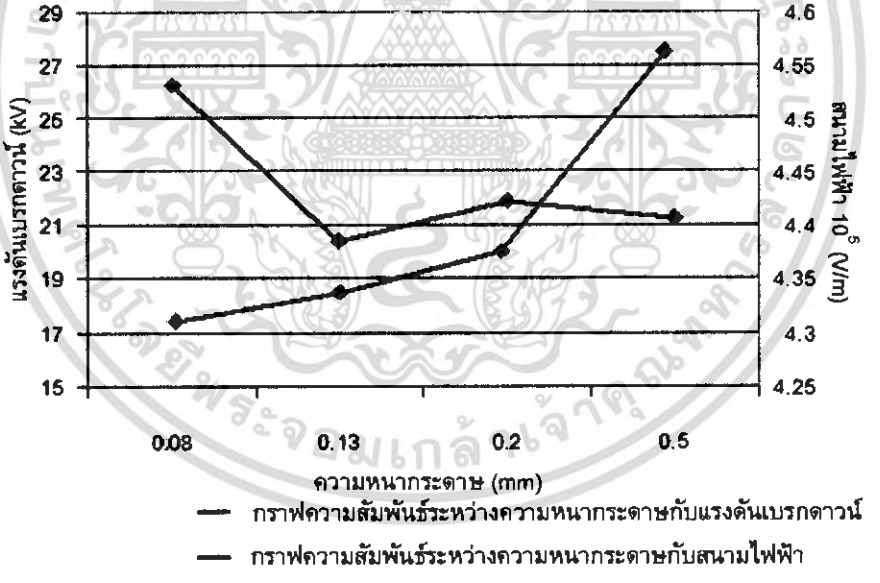


รูปที่ 4.76 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.77 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ **partially spherical electrodes**



รูปที่ 4.78 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กับความเข้มสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์โดยใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ **spherical electrodes**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ผลการศึกษาลักษณะคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงสามารถสรุปออกมาจากรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลการทดสอบจากชุดทดสอบฉนวนน้ำมันที่ได้ประดิษฐ์ทำขึ้นมากับชุดทดสอบน้ำมันที่นำเข้าจากต่างประเทศ

จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากชุดทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเองมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากอัตราการป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงมีค่าช้ากว่าอัตราการป้อนตามมาตรฐาน จึงทำให้มีประจุไฟฟ้าหนาแน่นบริเวณหัวอิเล็กโตรด และเกิดการเบรกดาวน์ตามมา ผลทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกับผลจากชุดทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศจะต้องแก้ไขโดยการควบคุมอัตราการป้อนแรงดันให้มีค่าได้ตามมาตรฐาน

2) ผลของรูปทรงของหัวอิเล็กโตรดต่อการเบรกดาวน์ในไฟฟ้ากระแสสลับ และกระแสตรง

การทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ ที่หัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์น้ำมันบริสุทธิ์สูงกว่า spherical electrodes เนื่องมาจากหัวแบบ partially spherical electrodes รัศมีความโค้งมากกว่าหัวแบบ spherical electrodes จึงมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากกว่าจึงทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่า

การทดสอบไฟฟ้ากระแสตรง ค่าแรงดันของหัวอิเล็กโตรดทั้งสองแบบ ในระยะแกป 3 ระยะแรกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ระยะ 10 mm ของหัวอิเล็กโตรดแบบ spherical electrodes ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้ไม่สามารถเชื่อถือได้เนื่องจากเกินระยะ D/2 ของหัวอิเล็กโตรด

3) การทดสอบเมื่อมีกระดาษคั่นระหว่างหัวอิเล็กโตรด

การทดสอบเมื่อมีกระดาษฉนวน ฉนวนกระดาษเป็นฉนวนของแข็งซึ่งการเบรกดาวน์จะเป็นแบบเจาะทะลุ ซึ่งค่าเบรกดาวน์จะเป็นพฤติกรรมร่วมของการเบรกดาวน์ของฉนวนทั้งสอง เมื่อนำผลทดสอบของหัวอิเล็กโตรดทั้งสองแบบ ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับ และกระแสตรงมาวิเคราะห์ จะพบว่ามีแนวโน้มในทางเดียวกันคือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะห่างของหัวอิเล็กโตรดที่เท่ากัน

4) การทดสอบเมื่อน้ำมันบริสุทธิ์มีสิ่งเจือปน

ในกรณีของน้ำมันบริสุทธิ์ที่มีผงเหล็กเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้า พบว่าสนามไฟฟ้าจะมีผลทำให้ผงเหล็กมีการเคลื่อนที่ ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับผงเหล็กจะเคลื่อนที่เข้าหาทั้งสองหัวอิเล็กโตรด ส่วนภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกผงเหล็กจะเคลื่อนที่เข้าหาหัวอิเล็กโตรดด้านที่ต่อกราวน์ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าอีกด้าน เมื่อผงเหล็กมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอยตัวอยู่ระหว่างหัวอิเล็กโตรดจะทำให้บริเวณผงเหล็กมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก จึงทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำ เมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มขึ้นแนวโน้มแรงดันเบรกดาวน์จะต่ำลง

การทดสอบเมื่อมีหยดน้ำเจือปนในน้ำมันหม้อแปลง น้ำกับน้ำมันหม้อแปลงมีขั้วทางโมเลกุลที่ต่างกันจึงเกิดการแยกชั้น เมื่อป้อนแรงดันผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดน้ำยืดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความเครียดที่หยดน้ำ จึงเกิดการเบรกดาวน์โดยมีหยดน้ำเป็นสื่อในการนำไฟฟ้า ซึ่งหัวอิเล็กโตรดแบบ partially spherical electrodes จะเห็นได้ชัดกว่าหัวแบบ spherical electrodes และในระยะห่างของหัวอิเล็กโตรดที่ใกล้ๆ เมื่อใส่หยดน้ำลงไปหยดน้ำจะตกลงไปอยู่ด้านล่างของกล่องทดสอบซึ่งระยะห่างระหว่างหยดน้ำกับหัวอิเล็กโตรดมีระยะห่างมากกว่าระยะแกปจึงทำให้หยดน้ำยังไม่มีผลกับค่าแรงดันเบรกดาวน์มากนัก ผลเบรกดาวน์จึงมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันบริสุทธิ์

5) พฤติกรรมการเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์กับน้ำมันหม้อแปลงที่มีสิ่งเจือปน จากผลทดสอบทั้งหมดเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าลดลงตามปริมาณ และชนิดของสิ่งเจือปนแต่ละแบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการสร้างเครื่องป้อนแรงดันแบบอัตโนมัติ ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ เพราะอัตราการขึ้นแรงดันที่ไม่เท่ากันทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าไม่เท่ากัน

2) ควรมีการสร้างห้องควบคุมความชื้น เพราะความชื้นมีผลอย่างมาก ที่จะทำให้แรงดันเบรกดาวน์ต่ำ

3) เวลาในการทดสอบควรทำให้น้ำมันมีความบริสุทธิ์มากที่สุด ไม่ควรมีตะกอนหรือสิ่งเจือปนอื่นๆเข้าไปในการทดสอบ และเมื่อเอาน้ำมันออกมาใส่ในกล่องแล้วควรที่จะทดสอบทันทีไม่ควรตั้งทิ้งไว้นานเกินไป

4) ควรมีเครื่องตัดวงจร และบันทึกค่าแรงดันเบรกดาวน์แบบอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Ravindra, A. and Wolfgang, M., **Liquids dielectrics in high-voltage application: High-voltage insulation engineering**. India: Wiley Eastern, 1995.

[2] Rouse, T.O., Mineral Insulating Oil in Transformers, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol.143, pp: 6-16, 1998.

[3] Clavreul, R., Analysis of SF6/N2 Mixture Decomposition by Products in Electric Discharges, **IEE International Conference on Materials Measurements & Application**, 23-26 September 1996.

[4] Pahlavanpour, B. and Roberts, I.A., Transformer Oil Condition Monitoring, **IEE**, Savoy Place, London WC2R 0BL, UK, 1998.

[5] IEC Standard, Publication 156, **Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method**, Second edition, 1995.

[6] Yilmaz, H., and Guler, S., The effect of electrode shape, gap and moisture on dielectric breakdown of transformer oil, **International Conference on conduction and breakdown in dielectric liquids 12th** (1996): 354-357.

[7] Jayaram, S., Effect of thermal and viscous drag forces on ac breakdown characteristics of transformer oil, **Proceedings of the Electrical and Dielectric Phenomena Conference** (1993): 396-401.

[8] Nelson, J.K., An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures, **IEEE tran.EI**, vol.24 (1989): 835-847.

[9] Oommen, T.V., and Lindgren, S.R., Streaming electrification study of transformer insulation system using a paper tube model. **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol.5, no.2 (1990): 972-973.

[10] E.O.Forster, H.Yamashita, C.Mazzetti, M.Pompili, L.Caroli and S.Patrissi, The effect of the electrode gap on breakdown in liquid dielectrics, **IEEE tran. Diel. And Elect. Ins.**, Vol.1, No.3, June 1994.

[11] Danikas, M.G., Breakdown of transformer oil: **IEEE EI magazine**, vol. 6, no. 5 (1990): 27-34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] El-zeftawy, L.A., El-Kholy, S.M., and Eish, T.D., Impulse breakdown of transformer oil under uniform fields, **International conference on Conduction and Breakdown in dielectric liquids 10th** (1990): 584-587.

[13] Naidu, M.S., and Kamaraju, S., **Conduction and breakdown in liquid dielectrics: High-voltage engineering**. New Delhi: Tata Mcgraw-Hill publishing company limited, 1995.

[14] สุรพล ดำรงกิตดิกุล, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่1, เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.

[15] Amanpreet Singh Gill, The Design of Transformer oil, **IEEE Conf. Elect. Ins.**, Anaheim, CA USA, April 5-5, 2000: 247-250.

[16] Beroual, A. and et al., Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, **IEEE El magazine**, vol.14, no.2, March/April 1998: 6-17.

[17] Hauschild, W., and Mosch, W., **Statistical techniques for high voltage engineering**. Peter Peregrinus Ltd, 1992.

[18] Lee, M.J. and Nelson, J.K., Dielectric integrity associated with circulating insulating fluids, **IEEE trans. on EI**, vol.23, no.4 August 1988: 712.

[19] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.

[20] เจษฎา นราธัศจรรย์, พิชัย เดชะเลิศสุวัฒน์, อนุวัต รงค์เหลืองอร่าม, **การทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน**, ปริญญานิพนธ์ (วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า)), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.

[21] กีรติ ชยะกุลศิริ, กฤษดา ปรีชาชน, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, 2538.

[22] สิริวิช ทัดสวน, **การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันที่ภาระเป็นเชิงเส้นและภาระไม่เป็นเชิงเส้น**, วิทยานิพนธ์ (วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สามารถศึกษาข้อมูลต่อไปนี้ได้จาก สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ.)

Thai Industrial Standards Institute

Rama 6 Street, Ratchathewi, Bangkok 10400, THAILAND

Telephone: (662) 202 3301-4

Fax: (662) 202 3415

E-mail: thaistan@tisi.go.th

1. Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method (IEC 156)
2. IEEE Standard Techniques for High – Voltage Testing (IEEE Std. 4)
3. High – voltage test techniques (IEC 60-1, 60-2)

ข้อมูลเครื่องทดสอบฉนวนเหลวที่นำเข้าจากต่างประเทศสามารถดูได้จาก โรงงานไทยทราโฟ แมนูแฟคเจอริ่ง บจก.

Thai Trafo Manufacturing Co., Ltd.

177 Banbung – Klang, Krasaebon, Klang, Rayong 21110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบน้ำมันหม้อแปลงในสถานประกอบการ

เครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง MEGGER FOSTER OTS 80 AF/2 มีพิกัดแรงดัน 80-kV Automatic Oil Test Set

รูปที่ ข.1 เครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง MEGGER FOSTER OTS 80 AF/2

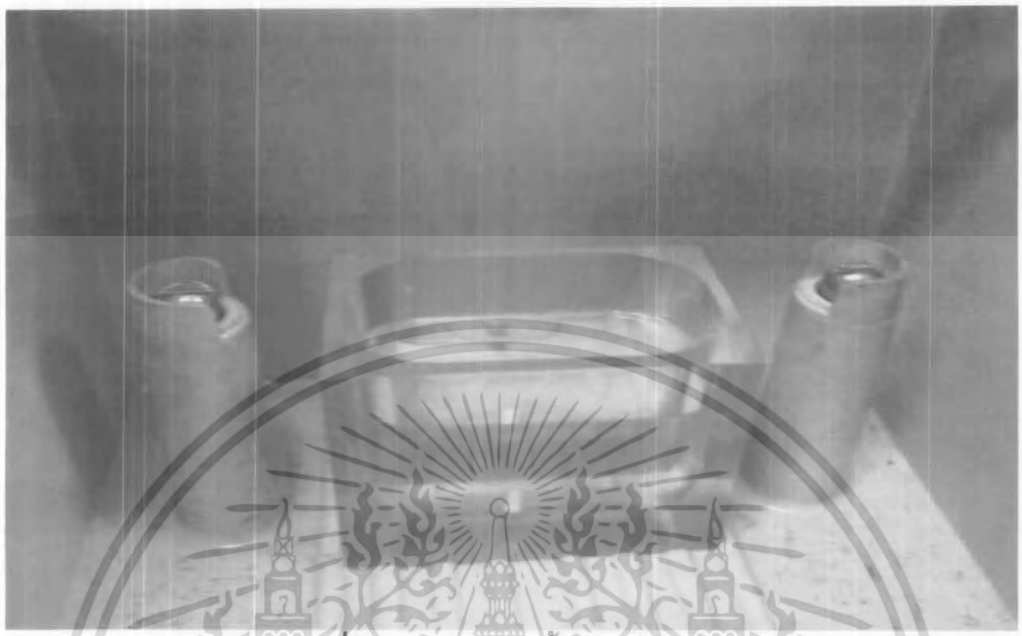
เป็นเครื่องที่สามารถทำการทดสอบน้ำมันตามมาตรฐานได้ดังต่อไปนี้

British-BS 148, BS 5730A, BM 5874
International -IEC 156
American-ASTM D877, ASTM D1816
German-VDE 0370
French-NFC 27
Spanish-UNE 21
Italian-CEI 344
Russian-GOST 6581
South African-SABS 555
Australian-AS 1767
Institute of Petroleum-IP 295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

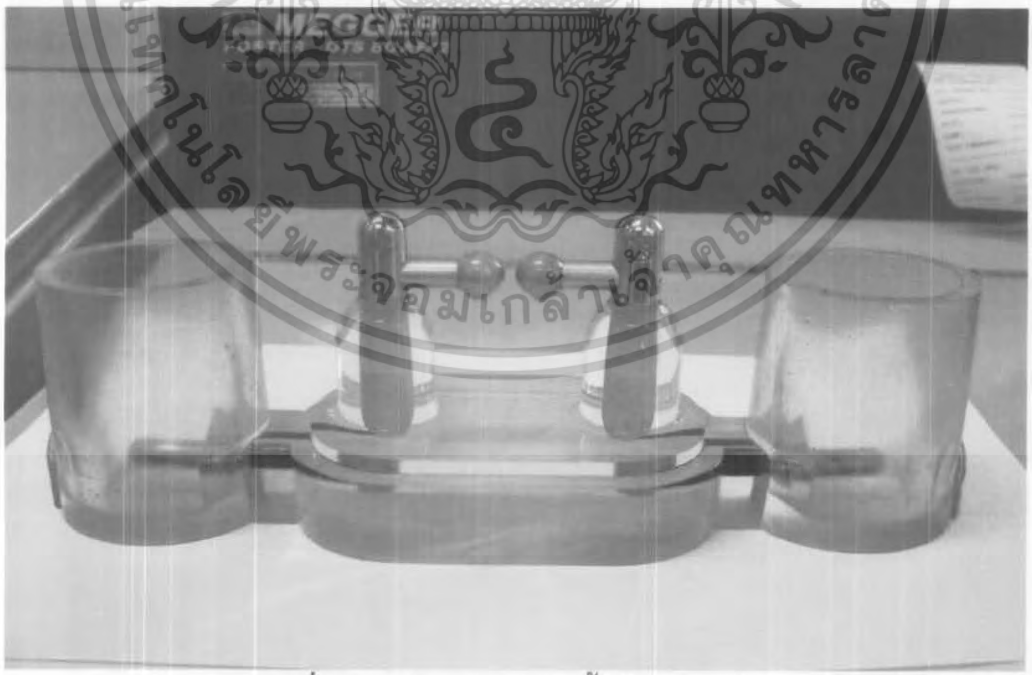
ส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง MEGGER FOSTER OTS 80 AF/2

กล่องบรรจุน้ำมัน



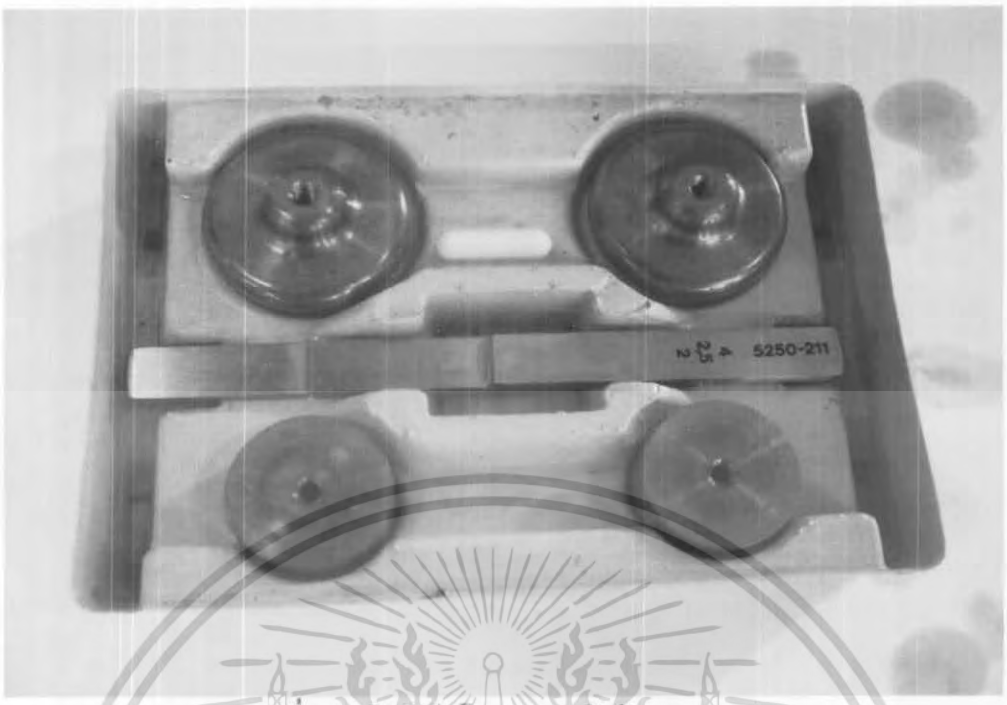
รูปที่ ข.2 กล่องบรรจุน้ำมันหม้อแปลง

หัวอิเล็กโตรด และตัวบอกระยะแกป



รูปที่ ข.3 ฝาปิดกล่องบรรจุน้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 หัวอิเล็กโตรด และตัววัดระยะแกป

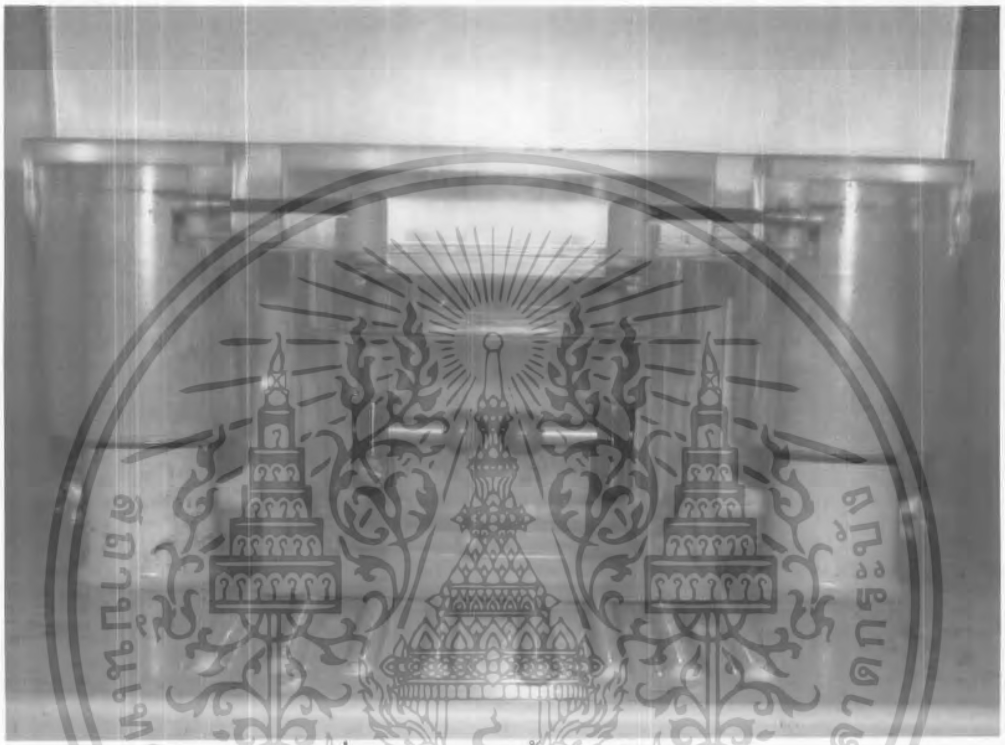
ตัวควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ

รูปที่ ข.5 ตัวควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบน้ำมันของเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง MEGGER FOSTER OTS 80 AF/2

บรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่จะมาทดสอบในกล่องบรรจุน้ำมันโดยให้เหลือช่องว่างอากาศประมาณ 5 mm แล้วทำการติดตั้งลงในเครื่องทดสอบหม้อแปลง MEGGER ซึ่งในการบรรจุน้ำมันจะต้องไม่ให้เกิดฟองก๊าซดังรูป



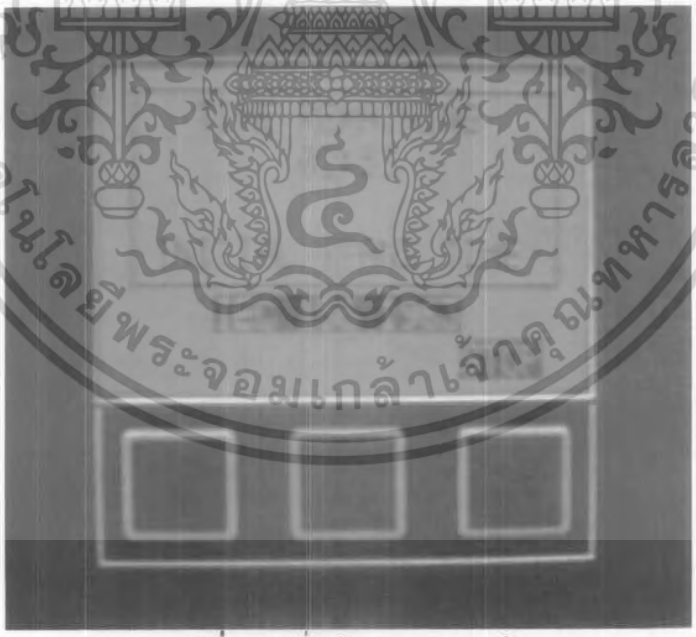
รูปที่ ข.6 การบรรจุน้ำมันหม้อแปลง

ทำการปรับค่าต่างๆ ในเครื่องทดสอบหม้อแปลง MEGGER ให้ตรงกับระยะและชนิดของหัวทดสอบที่อยู่ในกล่องน้ำมัน และเลือกมาตรฐานที่เราใช้ในการทดสอบ ในตัวอย่างการทดสอบนี้จะปรับระยะระหว่างอิเล็กโตรด 2.5 mm เป็นหัวอิเล็กโตรดแบบทรงกลม ใช้มาตรฐาน IEC 156 แล้วกดปุ่ม start เพื่อเริ่มทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.7 การปรับค่าการทดสอบ

เครื่องจะทำการนับเวลาย้อนหลัง 3 นาที หลังจากนั้นจะเริ่มป้อนแรงดันเป็นครั้งแรก ในการทดสอบจะทำการทดสอบ 6 ครั้ง แต่ละครั้งจะมีช่วงเวลาหยุดพัก 2 นาทีดังรูป



รูปที่ ข.8 เริ่มนับเวลาย้อนหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.9 แสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์

เมื่อทำการทดสอบครบแล้ว เครื่องจะทำการพิมพ์ข้อมูลการทดสอบออกมา

รูปที่ ข.10 ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

OTS80AF/2 EDITION 1.2

COPYRIGHT (c) 1996

AVO INTERNATIONAL

OTS SERIAL NO:

SAMPLE:

TEMPERATURE:

DATE: 08-02-07

TIME: 17:26

TEST FREQUENCY: 61.8Hz

IEC 156 1963

STIRRING: MAGNETIC

GAP: 2.5 mm

ELECTRODES: SPHERE MUSHROOM

TEST 1

BREAKDOWN: 19.0 KV

TEST 2

BREAKDOWN: 18.7 KV

TEST 3

BREAKDOWN: 20.4 KV

TEST 4

BREAKDOWN: 17.2 KV

TEST 5

BREAKDOWN: 19.2 KV

TEST 6

BREAKDOWN: 16.9 KV

AVERAGE: 18.6 KV

STANDARD DEVIATION

S = 1.31

$S/\bar{x}$ = 0.07

OTS80AF/2 EDITION 1.2
COPYRIGHT (c) 1996
AVO INTERNATIONAL

OTS SERIAL NO: _____

SAMPLE: _____

TEMPERATURE: _____

DATE: 08-02-07

TIME: 17:26

TEST FREQUENCY: 61.8Hz

IEC 156 1963

STIRRING: MAGNETIC

GAP: 2.5mm

ELECTRODES: SPHERE MUSHROOM

TEST 1
BREAKDOWN: 19.0kV

TEST 2
BREAKDOWN: 18.7kV

TEST 3
BREAKDOWN: 20.4kV

TEST 4
BREAKDOWN: 17.2kV

TEST 5
BREAKDOWN: 19.2kV

TEST 6
BREAKDOWN: 16.9kV

AVERAGE: 18.6kV

STANDARD DEVIATION

s = 1.31
s/x̄ = 0.07

รูปที่ ข.11 ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

Mobil

Mobiltherm 43

Premium Heat Transformer Oil

Product Description

Mobiltherm 43 is a formulated paraffinic type fluid designed for closed heat transfer systems operating at higher bulk temperatures including demanding open systems. It has a high specific heat and thermal conductivity to provide more rapid heating and greater flexibility in a system.

Features & Benefits

When used as recommended, Mobiltherm 43 will provide the following benefits and advantages:

- Resistant to thermal cracking - performs well up to 315.5C(600F)
- Excellent Oxidation Stability - Minimizes sludge and acid formation, extends product life
- Low Temperature Performance - Permits easy cold weather starting in temperatures down to -6.7C(20F)
- High Heating Efficiency - High specific heat and thermal conductivity help keep fuel costs down
- Low Volatility - Reduces potential for pump cavitation

Applications

Mobiltherm 43 is recommended for the following applications

- Asphalt and cold tar storage, transport and compounding
- Dyes, chemicals and pharmaceuticals manufacture
- Lumber drying
- Paper and paperboard production
- Petroleum products processing
- Plywood laminating
- Rubber and plastics molding, extrusion, curing, and calendering
- Sheet metal laminating
- Solar energy heat transfer and storage
- Textiles (hot calendering)
- Tiles, linoleum, and roofing products
- Varnish and resins manufacture

ExxonMobil Lubricants & Specialties
All products may not be available locally. For more information, contact your local sales office or visit www.exxonmobil.com.
ExxonMobil is comprised of numerous affiliates and subsidiaries, many with names that include Esso, Mobil, or ExxonMobil. Nothing in this document is intended to override or supersede the corporate separateness of local entities. Responsibility for local action and accountability remains with the local ExxonMobil-affiliate entities. Due to continual product research and development, the information contained herein is subject to change without notification. Typical Properties may vary slightly.
© 2001 Exxon Mobil Corporation. All rights reserved

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mobil

Typical Properties

Mobiltherm 43	
Product Code	68036-3
CMCS Code, drum	98GB07
Specific Gravity	0.8772
Pour Point, C (F), max, ASTM D 97	-12(10)
Flash Point, C(F), min	198(390)
Viscosity, ASTM D 445	
cSt at 40C	30.6
cSt at 100C	5.1
SUS at 100F	158
SUS at 210	43.3
Auto-Ignition Temperature, C(F)	354(670)
Color, ASTM D 1500	0 5

Health & Safety

Refer to the Material Safety Data Sheet for safety and health information

Material Safety Data Sheets can be obtained from your local distributor, via the Internet on http://www.host1.exxonmobil.com/psims/psims.aspx.

For additional technical information or to identify the nearest U.S. Mobil supply source, call 1-800-662-4525.

The Mobil logotype, the Pegasus design are trademarks of Exxon Mobil Corporation, or one of its subsidiaries.

ExxonMobil Lubricants & Specialties
All products may not be available locally. For more information, contact your local sales office or visit www.exxonmobil.com
ExxonMobil is comprised of numerous affiliates and subsidiaries, many with names that include Esso, Mobil, or ExxonMobil. Nothing in this document is intended to override or supersede the corporate separateness of local entities. Responsibility for local action and accountability remains with the local ExxonMobil-affiliate entities. Due to continual product research and development, the information contained herein is subject to change without notification. Typical Properties may vary slightly.
© 2001 Exxon Mobil Corporation. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้