

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดสำหรับทดสอบหา แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 Field Utilization Factor of Electrode for Breakdown Voltage Test for Liquid Insulation According to IEC 60156 Standard

ธนากร น้าหอมจันทร์¹
Thanakorn Namhormchan¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม (Spherical) และทรงกลมบางส่วน (Partial Spherical) สำหรับทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 4-1995, IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 กำหนดผลการทดสอบพบว่าที่ระยะแกป 0.5 ถึง 2.5 มิลลิเมตร ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกลมมีค่าอยู่ในช่วง 0.941 ถึง 0.996 สำหรับอิเล็กโทรดแบบทรงกลมบางส่วนมีค่าประมาณ 0.99

คำสำคัญ: ฉนวนเหลว ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง อิเล็กโทรดแรงสูง แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

Abstract

This paper presents results of field utilization factor analysis of spherical electrode and partial spherical electrode obtained from breakdown voltage test of liquid insulation to meet IEC 60156 standard. The test circuit and high voltage

measurement system used were of IEEE 4-1995, IEC 60060-1 and IEC 60060-2 standard. According to the test at 0.5-2.5 millimeter gap distance, it was found that the field utilization factor of spherical electrode ranged from 0.941 to 0.996 while that of the partial spherical was about 0.99.

Keywords: Liquid Insulation, Transformer Oil Insulation, High Voltage Electrode, Field Utilization Factor

1. บทนำ

น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเหลวที่เป็นทั้งฉนวนหลักและเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รวมถึงใช้ในด้านการศึกษาและการวิจัย [1] มีคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญคือ คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางการระบายความร้อน [2] คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่สำคัญมีดังนี้ มีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนประมาณ 10 ถึง 25 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร มีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ 10^{13} ถึง 10^{14} โอห์มเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสต์เทิร์นเอเซีย Tel. 0-2577-1028 Ext. 452, E-mail: thanakorn@eau.ac.th

20 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ประมาณ 2 ถึง 2.5 และค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ประมาณ 1×10^{-4} ถึง 5×10^{-4} ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ [3] สามารถแทรกซึมในช่องว่างต่างๆ ของอุปกรณ์เพื่อระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟง่าย ดับอาร์คทางไฟฟ้าได้ และมีความสามารถในการคืนตัวเป็นฉนวนได้อีกครั้งหลังจากเกิดการเบรกดาว์น อีกทั้งยังใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์การทดสอบและงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างแพร่หลาย

การทดสอบหาคุณสมบัติการคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 ได้กำหนดรูปลักษณะของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ 2 รูปลักษณะ คืออิเล็กโตรดแบบทรงกลม (Spherical) และทรงกลมบางส่วน (Partial Spherical) เพื่อให้ทราบถึงผลของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นจากรูปลักษณะของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ ดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะทำการทดสอบและวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทั้ง 2 รูปลักษณะ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอน การวิจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงต่อไปในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

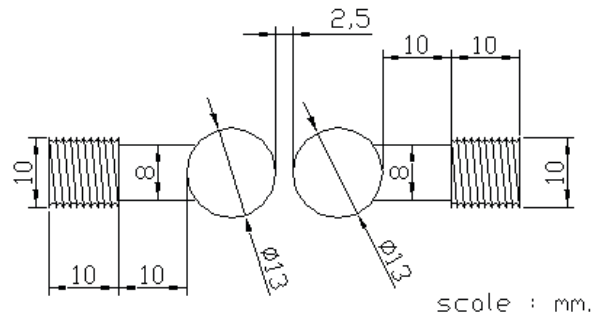
ชุดทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นในฉนวนเหลวที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 [4], [5] กำหนด โดยใช้น้ำมันหม้อแปลง PTT Hivolt 99 ในการทดสอบ วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 4-1995 [6], IEC 60060-1 [7] และ IEC 60060-2 [8] กำหนด โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ขั้วอิเล็กโตรด

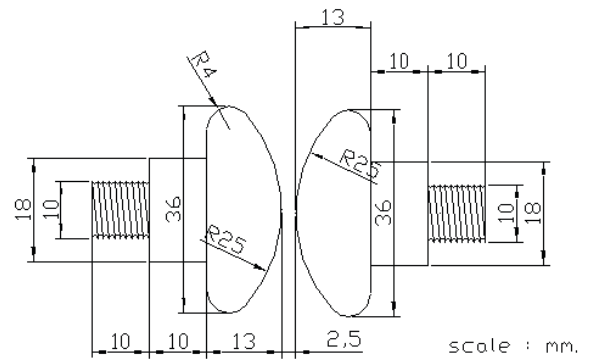
ขั้วอิเล็กโตรดกลิ้งขึ้นรูปจากทองเหลือง ในส่วนของเกลียวสำหรับจับยึดขั้วอิเล็กโตรดเข้ากับชุดปรับระยะแกป เป็นเกลียวขนาดมิลลิเมตร เพื่อความละเอียดของการปรับระยะแกป ขนาดของอิเล็กโตรดตามมาตรฐาน IEC 60156 แบบ Spherical และแบบ Partial Spherical แสดงดังรูปที่ 1

2. วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูง

ระบบวัดแรงดันสูงเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 2 [9]



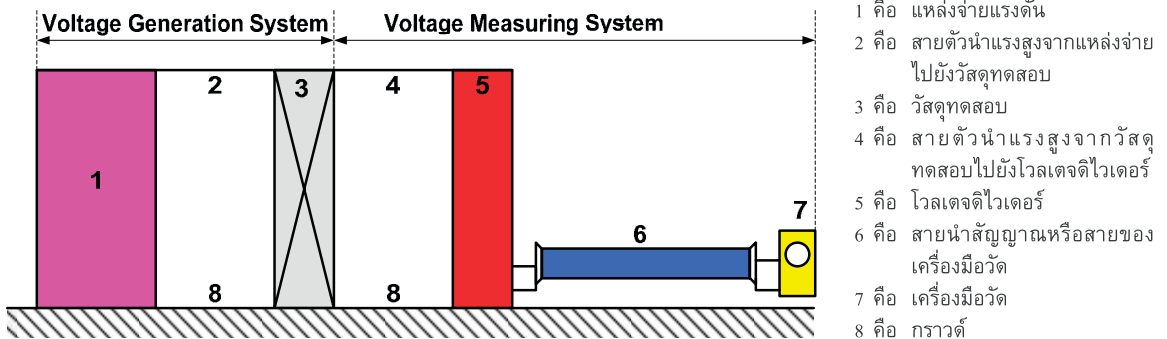
a) ขนาดของอิเล็กโตรดแบบ Spherical



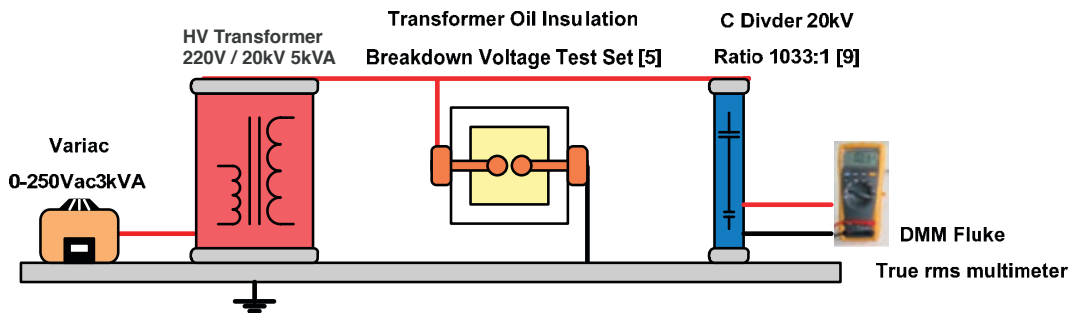
b) ขนาดของอิเล็กโตรดแบบ Partial Spherical

รูปที่ 1 ขนาดของอิเล็กโตรดตามมาตรฐาน IEC 60156

โดยในระบบวัดแรงสูงจะประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบสร้างแรงดันสูง และระบบวัดแรงดันสูง ซึ่งทั้ง 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 4-1995, IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 กำหนดดังนี้ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบแสดงในค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (r.m.s. value) มีความถี่อยู่ในช่วง 45 - 65 Hz รูปคลื่นของแรงดันเป็นไซน์ชอยด์ ทั้งครึ่งคาบบวกและลบ มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 1 เปอร์เซ็นต์ ตลอดการทดสอบระบบวัดแรงดันสูง มีความผิดพลาดไม่เกิน ± 3 เปอร์เซ็นต์ และสเกลแฟกเตอร์ของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 1 เปอร์เซ็นต์ วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับเบื้องต้น [9]



รูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3. ผลการทดลอง

ระเบียบวิธีการการทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 กำหนด โดยมีหัวข้อการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ ดังนี้

1. ทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน
2. เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ระหว่างอิเล็กโตรดมาตรฐานทั้ง 2 แบบ คือ แบบ Spherical และ Partial Spherical ที่ระยะแกประหว่างอิเล็กโตรด 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตรตามลำดับ
3. วิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบ Spherical และแบบ Partial Spherical จากแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ระยะแกปและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้อิเล็กโตรดแบบ Spherical และแบบ Partial Spherical แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ ที่ระยะแกป 0.5 ถึง 2.5 มิลลิเมตร จะสามารถจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอิเล็กโตรดขณะเกิดการเบรกดาวนได้ โดยกำหนดให้ค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ของอิเล็กโตรดและฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเท่ากับ 1 และ 2.5 ตามลำดับ [3] โดยแรงดันที่อิเล็กโตรดจะกำหนดจากแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนเฉลี่ยจากการทดสอบ ($U_{b, AVG}$) ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอิเล็กโตรด โดยใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 [10] ของอิเล็กโตรดแบบ Spherical และ Partial Spherical แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบ Spherical

ระยะแกป (mm.) ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ($U_b : kV_{rms}$)						
	1	2	3	4	5	6	AVG
0.5	2.834	2.780	2.710	2.845	2.762	2.665	2.766
1.0	3.609	3.770	3.801	3.555	3.682	3.795	3.702
1.5	4.422	4.473	4.581	4.548	4.331	4.447	4.467
2.0	4.954	4.797	5.014	4.597	4.887	5.257	4.918
2.5	5.424	5.729	5.796	5.484	5.581	5.717	5.622

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบ Partial Spherical

ระยะแกป (mm.) ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ($U_b : kV_{rms}$)						
	1	2	3	4	5	6	AVG
0.5	1.629	1.547	1.671	1.663	1.731	1.564	1.634
1.0	2.570	2.739	2.381	2.610	2.516	2.422	2.540
1.5	3.787	3.576	3.892	3.885	4.000	3.875	3.836
2.0	5.316	4.921	5.448	5.364	4.957	5.101	5.185
2.5	5.851	6.843	5.686	6.808	6.081	6.343	6.269

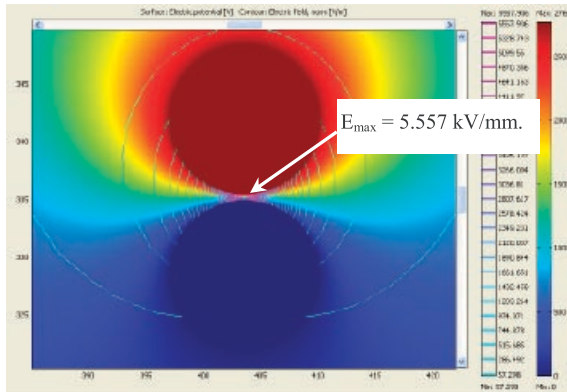
จากผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์และการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้อิเล็กโตรดแบบ Spherical และ Partial Spherical ที่ระยะแกปตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องปรับอากาศ ซึ่งจะพบว่าในการทดสอบที่สภาวะบรรยากาศเดียวกัน ดังนี้ อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 748 มิลลิเมตรปรอท ความชื้น 73 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิฉนวนน้ำมันหม้อแปลง 25 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อวินาที พร้อมทั้งติดตั้งชุดกวนฉนวนเหลวในทิศทางดูลงด้านล่างของชุดทดสอบโดยไม่ทำให้เกิดฟองก๊าซขณะทำการทดสอบ ที่ระยะแกปเท่ากัน แต่ค่าแรงดันเบรกดาวน์และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะ

ไม่เท่ากัน ซึ่งมีสาเหตุจากรูปลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน อันเป็นผลจากอิเล็กโตรดที่ต่างกัน เพื่อให้ทราบถึงแฟกเตอร์หรือรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบได้จากสมการที่ (1) [3], [11],[12]

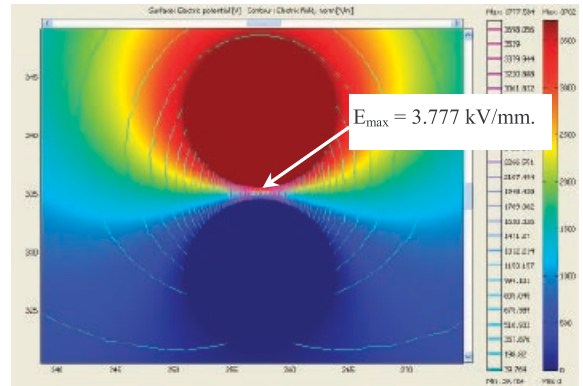
$$\eta^* = \frac{U_b}{d \times E_{b,max}} \quad (1)$$

โดยที่

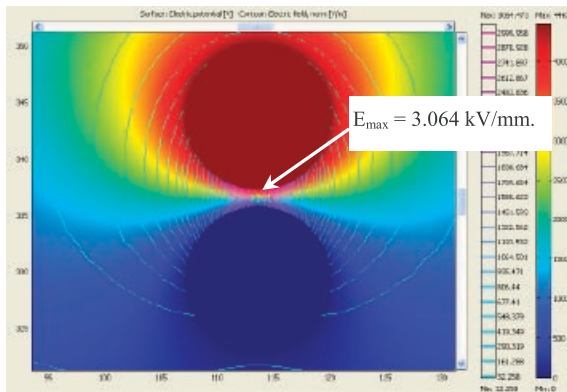
- η^* คือ ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า
 U_b คือ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (kV_{rms})
 d คือ ระยะแกป (mm.)
 $E_{b,max}$ คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดขณะเบรกดาวน์ ($kV/mm.$)



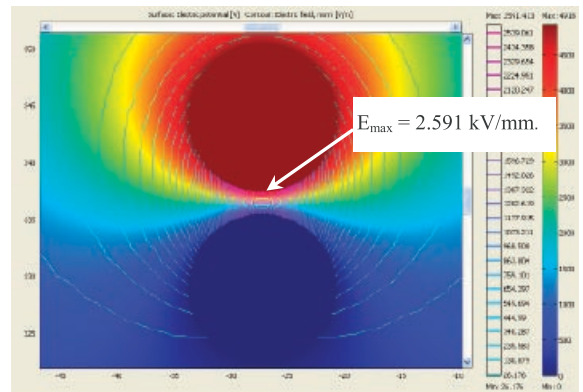
a) $E_{\max} = 5.557$ kV/mm. ที่ระยะแกป 0.5 mm.



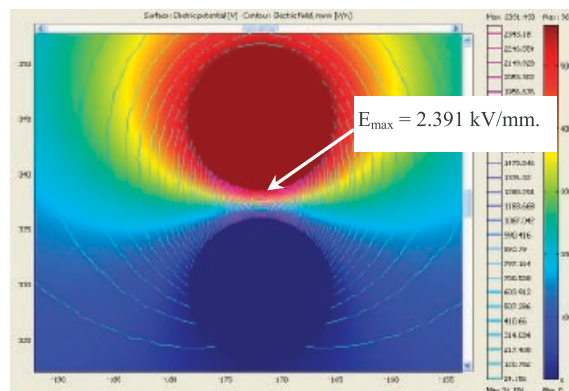
b) $E_{\max} = 3.777$ kV/mm. ที่ระยะแกป 1.0 mm.



c) $E_{\max} = 3.064$ kV/mm. ที่ระยะแกป 1.5 mm.

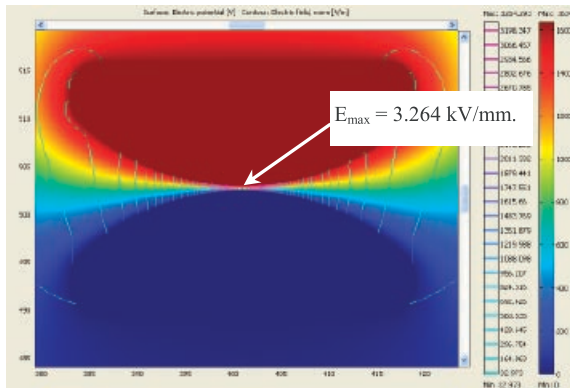


d) $E_{\max} = 2.591$ kV/mm. ที่ระยะแกป 2.0 mm.

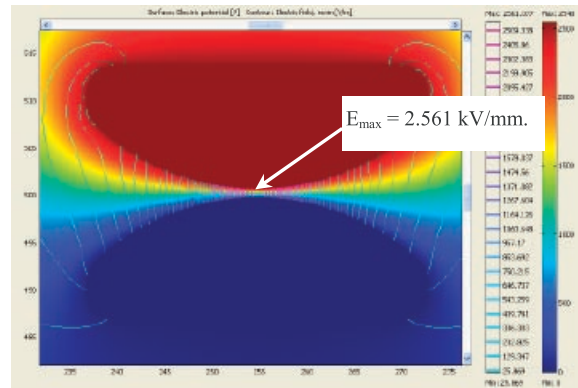


e) $E_{\max} = 2.391$ kV/mm. ที่ระยะแกป 2.5 mm.

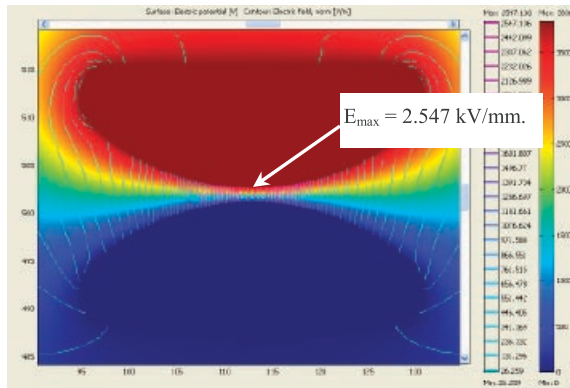
รูปที่ 4 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอิเล็กโทรดแบบ Spherical



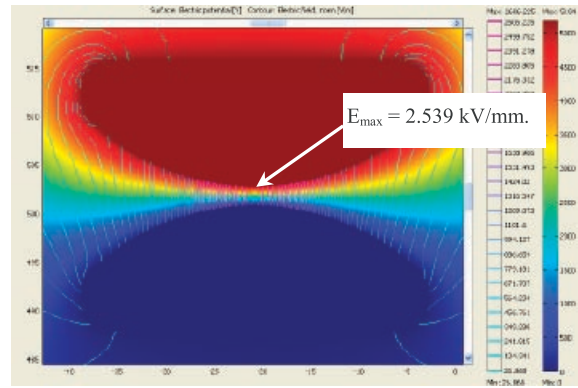
a) $E_{\max} = 3.264$ kV/mm. ที่ระยะแกป 0.5 mm.



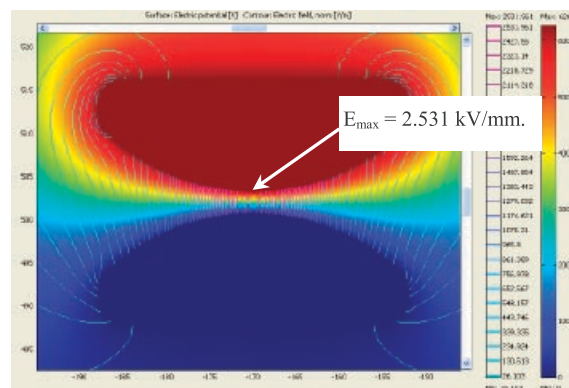
b) $E_{\max} = 2.561$ kV/mm. ที่ระยะแกป 1.0 mm.



c) $E_{\max} = 2.547$ kV/mm. ที่ระยะแกป 1.5 mm.

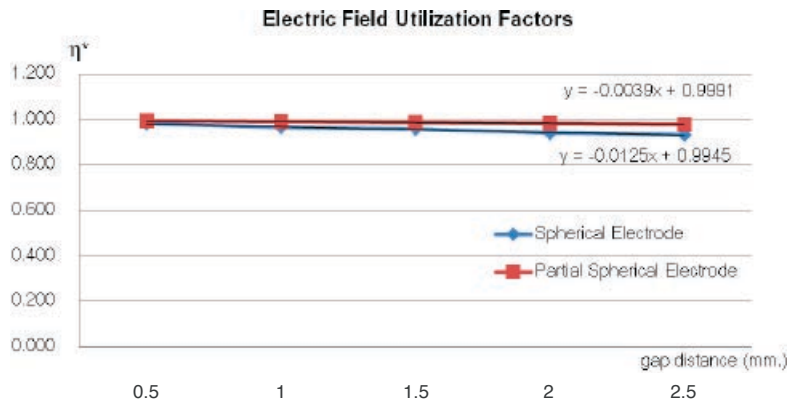


d) $E_{\max} = 2.539$ kV/mm. ที่ระยะแกป 2.0 mm.



e) $E_{\max} = 2.531$ kV/mm. ที่ระยะแกป 2.5 mm.

รูปที่ 5 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอิเล็กโทรดแบบ Partial Spherical



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ

จากผลการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนดังตารางที่ 1 และ 2 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ ดังรูปที่ 4 และ 5 และสมการที่ (1) จะสามารถแสดงผลการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ ได้ดังตารางที่ 3 และกราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ แสดงดังรูปที่ 6

และจากผลการคำนวณจะพบว่า ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบที่ระยะแกป 2.5 มิลลิเมตรตามมาตรฐานกำหนด มีค่าประมาณ 3.038 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตรซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน เนื่องจากเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วระยะหนึ่ง โดยฉนวนน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐานจะสามารถทนของการฉนวนทางไฟฟ้าได้ประมาณ 10 ถึง 25 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ

Electrode	Field Utilization Factor (η^*)				
Gap distances (mm.)	0.5	1	1.5	2	2.5
Spherical	0.983	0.968	0.959	0.941	0.934
Partial Spherical	0.996	0.991	0.987	0.983	0.980

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลจากการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ตามระเบียบวิธีที่มาตรฐานกำหนด โดยทดสอบเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ ที่ระยะแกป 0.5 – 2.5 มิลลิเมตร ที่สภาวะบรรยากาศเดียวกันดังนี้ อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 748 มิลลิเมตรปรอท ความชื้น 73 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิฉนวนน้ำมันหม้อแปลง 25 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อวินาที โดยใช้ชุดควบคุมอัตราการเพิ่มแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล [13] พบว่าที่ระยะแกปเท่ากัน ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงระหว่างอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กโตรดแบบ Spherical มีลักษณะของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงกว่าอิเล็กโตรดแบบ Partial Spherical ตลอดช่วงระยะแกป อันเป็นผลมาจากรูปลักษณะของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 6 โดยค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบ Spherical จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.941 – 0.996 สำหรับอิเล็กโตรดแบบ Partial Spherical มีค่าประมาณ 0.99 และผลการทดสอบค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบมีค่าประมาณ 3.038 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร โดยฉนวน

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นฉนวนที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและมีความชื้นสูง ซึ่งจะทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวที่ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด

ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบที่นำเสนอข้างต้นจะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ หรือค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงหรือภายใต้อิเล็กโตรดรูปทรงอื่นๆ สำหรับการออกแบบวัสดุฉนวนโดยใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Chen and M. H. Zuber, "Pre-breakdown Characteristics of Contaminated Power Transformer Oil," *Electrical Insulation Magazine, IEEE Publication Date: Jan.-Feb. 2005*, vol. 21, Issue: 1, pp.11- 19, 2007.
- [2] A. S. Gill, "The Design of Transformer Oil," *2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000*, pp. 247 – 250.
- [3] สำรวัย สังข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [4] International Electrotechnical Commission, *Insulating liquids – Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency – Test Method, IEC std. 60156*, 2nd edition, 1995 – 07.
- [5] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, "รายงานการวิจัย การสร้างชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์," *ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ประจำปีการศึกษา 2551. งานวิจัยลำดับที่ 05 – 2552*.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. IEEE Std. 4 – 1995*.
- [7] International Electrotechnical Commission, *High – voltage test techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements. IEC std. 60060-1*, 2nd edition, 1989 – 11.
- [8] International Electrotechnical Commission, *High – voltage test techniques Part 2: Measuring System. IEC std. 60060-2*, 2nd edition, 1994–11.
- [9] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, "คาปาซิทีฟโวลเตจดีไวเดอร์ พิกัดแรงดัน 20 กิโลโวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม 3 ชั้น ร่วมกับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง," *ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 47 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552, หน้า 293-300*.
- [10] COMSOL AB, *FEMLAB 3 Multiphysics Modeling*. [CD ROM]. Los Angeles: COMSOL, Inc. 2004.
- [11] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals (2nd ed.)*. Great Britain: Newnes, 2000.
- [12] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering, (2nd ed.)*, McGraw-Hill, 1996.
- [13] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, "แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล," *วารสาร RSU JET วิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 32 – 37, กันยายน 2550*.