

การวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง  
โดยพัฒนาจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ

DC INSULATOR ANALYSIS AND DESIGN  
BY DEVELOPING FROM AC INSULATOR

อมรชัย คาร์วี

AMORNCHAI KARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

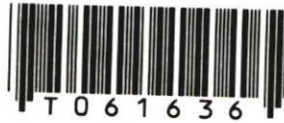
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2452-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง  
โดยพัฒนาจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ

DC INSULATOR ANALYSIS AND DESIGN  
BY DEVELOPING FROM AC INSULATOR



อมรชัย การวี

AMORNCHAI KARN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61636  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก.ค. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2452-8

**DC INSULATOR ANALYSIS AND DESIGN  
BY DEVELOPING FROM AC INSULATOR**

**AMORNCHAI KARN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

**ISBN 974-15-2452-8**



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงโดยพัฒนาจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ
นักศึกษา	นายอมรชัย คาร์วี
รหัสประจำตัว	46060714
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงแบบแขวนที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทย การศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่การนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้อยู่ทั่วไปมาทำการพัฒนาปรับปรุงคุณลักษณะ เพื่อที่จะเป็นทางเลือกหรือเป็นแนวทางในการศึกษาต่อในกรณีที่จะนำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับมาใช้งานกับระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวิธีการศึกษาวิจัย โดยอาศัยการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนภายใต้สภาวะการทดสอบกระแสตรงและกระแสสลับในห้องทดสอบ และใช้วิธีการไฟในอิลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนทำได้โดย การเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ และต่อวงแหวนโคโรนาร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวน ผลการวิจัยสามารถแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ จะพบข้อเด่นอยู่สองประการ คือ ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา ที่ซึ่งนำไปสู่การเกิดการวาบไฟตามผิวจะเกิดได้ยากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทดสอบในกระโจมไอน้ำ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถที่จะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเปราะเปื้อนได้อีกด้วย ส่วนวิธีการนำวงแหวนโคโรนามาต่อร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวนนั้น ก็สามารถที่จะเพิ่มระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาที่ซึ่งนำไปสู่การวาบไฟตามผิวได้เช่นกัน

<b>Thesis Title</b>	DC Insulator Analysis and Design by Developing from AC Insulator
<b>Student</b>	Mr. Amornchai Karn
<b>Student ID.</b>	46060714
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Siritwat Potivejkul

## **ABSTRACT**

This thesis presents the analysis and design of DC insulators, suspension types, which are suitable to use in DC transmission line systems of Thailand environmental conditions. The research will be focused on how to modify and develop characteristics of the AC insulators to be the alternative or guideline for studying in case that there is need to use the AC insulators in the DC systems using the comparison of electrical characteristics under DC and AC tested conditions and Finite Element Method to analyze the distribution of potentials and electric fields. There are two methods for AC insulator in the improvement consisting of coating the insulator surface by semiconductor materials connecting the corona ring with the insulator string. The tested results express that there are two advantages if the AC insulators are improved with the surface coating. Firstly, it is difficult for the corona inception voltage leading to the flashovers to occur with tests in a fog chamber. Secondly, the contamination problem is mitigated. In addition, the AC suspension insulator strings when connected with corona ring, can result in the higher level of the corona inception voltage.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ. ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณประยัติ ใจวงศ์ ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุงระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หน่วยงานวิศวกรรม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ ให้การสนับสนุน ลูกถ้วยฉนวนกระแสดวงและกระแสดลับเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความอนุเคราะห์ในการนำกล้องโคโรนาเพื่อใช้ในการถ่ายภาพปรากฏการณ์โคโรนา

ขอขอบคุณ คุณสานิต สมบูรณ์ วิศวกรไฟฟ้า ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในการสนับสนุน อนุเคราะห์กล้องเทอร์โมสแกน เพื่อใช้ในการตรวจเช็คพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของ ลูกถ้วยฉนวน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการช่วยเหลือเรื่องการทดสอบ และคอยให้ กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อมรชัย คาร์วี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	7
2.1 ทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า.....	7
2.1.1 สนามไฟฟ้า.....	7
2.1.2 ทรงกลมผิวในช่องว่างอากาศ สำหรับออกแบบโคโรนาซีลด์.....	10
2.2 ลูกถ้วยฉนวน.....	12
2.2.1 ส่วนประกอบและการทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน.....	12
2.2.2 กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน.....	13
2.2.3 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน.....	15
2.2.4 ลักษณะสมบัติทางมิติ.....	15
2.2.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	16
2.2.6 การทดสอบ.....	17
2.2.7 การทดสอบรูปร่าง และมิติ.....	17
2.2.8 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	17
2.2.9 การทดสอบทางกล.....	18
2.3 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะ.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 สิ่งเปราะเปื้อน.....	19
2.3.2 การวัดค่าระดับความเปราะเปื้อน.....	20
2.3.3 การแบ่งระดับความเปราะเปื้อน.....	21
2.3.4 การวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน...22	
2.3.5 แนวทางแก้ไขการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งาน ในบริเวณเปราะเปื้อน.....	24
2.4 ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	28
2.4.1 ชนิดและคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวน.....	29
2.4.2 ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ.....	30
2.5 กระแสรั่วไหล.....	34
2.6 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาพเปราะเปื้อน.....	35
2.7 ความสัมพันธ์ของการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงกระแสสลับ.....	37
2.8 การฉนวนของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	38
2.9 ปัจจัยต่าง ๆ ต่อสมรรถนะการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน.....	39
2.9.1 ขั้ว (Polarity).....	39
2.9.2 ESDD (Equivalent Salt Deposit Density).....	40
2.9.3 ความยาว.....	41
2.9.4 จำนวน Nonsoluble Material.....	41
2.9.5 ชนิดของ Salt.....	42
2.9.6 ความไม่สม่ำเสมอของสิ่งเปราะเปื้อนของพวงลูกถ้วย.....	43
2.9.7 อัตราส่วนของ ESDD ระหว่างผิวด้านบน กับพื้นผิวด้านล่าง.....	43
2.9.8 พวงลูกถ้วยฉนวนคู่ และเดี่ยว.....	44
2.10 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง.....	45
2.10.1 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	45
2.10.2 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ.....	47
2.11 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	48
2.11.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FINITE ELEMENT METHOD: FEM).....	49
2.11.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า.....	50
2.11.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์.....	51

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.4 สมการเชิงอนุพันธ์.....	52
<b>บทที่ 3 การทดสอบ และปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวน.....</b>	<b>54</b>
3.1 บทนำ.....	54
3.2 การตรวจสอบทางมิติ.....	56
3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวแห้งสะอาด.....	58
3.3.1 การทดสอบการวาวไฟตามผิวแห้ง.....	58
3.3.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา.....	64
3.3.3 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ.....	74
3.4 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนที่มีระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ.....	75
3.4.1 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบแขวนที่ระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ.....	75
3.4.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนากับลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับในกระโจมไอน้ำ.....	81
<b>บทที่ 4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวน และวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>85</b>
4.1 บทนำ.....	85
4.2 การศึกษา จำลอง และออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน.....	85
4.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า.....	89
4.3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้าระหว่างการคำนวณด้วยมือกับ โปรแกรม FEMLAB.....	89
4.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงโดยโปรแกรม FEMLAB...91	
4.3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับโดยโปรแกรม FEMLAB103	
4.3.4 ผลการวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของแบบจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ.....	105
4.3.5 ผลการวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของแบบจำลองพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่มีการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา.....	115
4.4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวน.....	123
4.4.1 การออกแบบตามมาตรฐาน.....	123

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 การจำลองลูกถ้วยจนวนกระแสดร่งที่ออกแบบด้วยโปรแกรม และวิเคราะห์ผล...	135
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผล.....	141
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	147
6.1 สรุป.....	147
6.2 อุปสรรค และการแก้ไข.....	148
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	148
บรรณานุกรม.....	150
ภาคผนวก.....	152
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบหาค่า Equivalent Salt Deposit Density.....	153
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบหาค่า Non-soluble Salt Deposit Density.....	158
ภาคผนวก ค. การทดสอบหาค่าประกอบของการเปราะเปื้อนที่เกาะตามผิวของลูกถ้วย.....	160
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	162
ประวัติผู้เขียน.....	180

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมวัสดุคืบสำหรับทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน.....	13
2.2 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน.....	21
2.3 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ.....	25
2.4 ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน.....	28
2.5 ระยะ Creepage ต่ำสุดที่แนะนำให้ใช้ในระบบกระแสตรง.....	38
2.6 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย.....	47
3.1 ขนาดมิติของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้ในการทดสอบกระแสสลับ.....	57
3.2 ขนาดมิติของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้ในการทดสอบกระแสตรง.....	57
3.3 ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการทดสอบ.....	59
3.4 แรงดันวาทไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสตรง.....	61
3.5 แรงดันวาทไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสสลับ.....	62
3.6 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง.....	66
3.7 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสสลับ.....	66
3.8 วงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการทดสอบ.....	71
3.9 ระดับแรงดันเกิดโคโรนาของลูกถ้วยกระแสสลับที่สภาวะการทดสอบกระแสตรง.....	72
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา และแรงดันสูงสุดที่ทำการทดสอบของระดับความเปราะเปื้อน (ESDD) ต่าง ๆ กัน.....	79
3.11 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะการทดสอบกระแสตรง.....	82
4.1 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	104
4.2 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	109
4.3 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	112
4.4 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	115
4.5 มิติของวงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการทดสอบ.....	116
4.7 ค่าในการออกแบบที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 แนะนำ.....	124
4.8 เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815.....	127
4.9 ตัวอย่างค่า Specific Leakage Distance ของ Insulator ที่ใช้ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	128
4.10 ขนาด และระยะต่ำสุดของลูกถ้วยแขวนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC305.....	129

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ขนาด และมุมในการออกแบบตามมาตรฐานของ ของ Pin ตามมาตรฐาน IEC120.....	130
4.12 มุมในการออกแบบตามมาตรฐานของCap ตรงบริเวณที่จับยึดกับ Pin.....	131
4.13 ค่าการลื่นของ Pin.....	133
4.14 Clearance ระหว่าง Pin กับ Cap.....	134
5.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB).....	141
5.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการเกิดโตโรนากับสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB).....	143
5.3 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	144

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	3
2.1 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....	8
2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่าง ๆ.....	10
2.3 ทรงกระบอกซ้อนกันแน่น.....	10
2.4 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำลูกถ้วยพอร์ซเลน.....	13
2.5 ลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบเปียกสำหรับลูกถ้วยแขวน....	14
2.6 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยฉนวน.....	15
2.7 (ก) รูปลิซาจัว (Lissajour figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วย ฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวาบไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิก ของอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวน.....	23
2.8 ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน.....	24
2.9 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปราะเปื้อนประเภท ควันเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน.....	25
2.10 (ก) การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งาน 3 ปีในบริเวณเปราะเปื้อน (ข) หยดน้ำทรงกลมบนผิวลูกถ้วยยางซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน.....	27
2.11 ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบคอดันยาวและแบบแขวน.....	28
2.12 การเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลา 25 ปี.....	29
2.13 การเกิดวาบไฟตามผิว (ก) ลูกถ้วยเคลือบปกติ (ข) ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	31
2.14 วงจรสมมูลของพวงลูกถ้วยฉนวน (ก) แบบเคลือบธรรมดาในสภาวะผิวสะอาด (ข) แบบ เคลือบสารกึ่งตัวนำ หรือแบบเคลือบธรรมดาในสภาวะผิวเปราะเปื้อน.....	32
2.15 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (ก) พวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดา 16 และ 31 ยูนิต (ข) พวงลูกถ้วย เคลือบสารกึ่งตัวนำ 16 ยูนิต (ค) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 30 ยูนิต (ง) ลักษณะ สมบัติ RIV ของพวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดาและลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะ เปราะเปื้อน.....	33
2.16 ลักษณะปีกครีบของลูกถ้วยฉนวนคอดันและค่าที่แนะนำให้ใช้.....	36
2.17 ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน.....	37
2.18 รูปร่างที่ต่างกันของลูกถ้วยกระแสสลับและกระแสตรง.....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 CFO ต่อค่าเฉลี่ยของ ESDD.....	40
2.20 ค่า CFO กับความยาวของพวงลูกถ้วยฉนวนและค่าของ ESDD ที่มีค่าการเกาะติดแบบ สม่ำเสมอในลูกถ้วย M fog type.....	41
2.21 ค่า CFO กับการเกาะติดของ Nonsoluble Material [35].....	42
2.22 ผลของชนิดของ Salt ที่มีผลต่อ CFO ในที่ระดับ ESDD ต่าง ๆ [35].....	43
2.23 อัตราส่วน ESDD ของ Top ต่อ Bottom ที่มีต่อค่า CFO.....	44
2.24 การเปรียบเทียบค่า CFO ของลูกถ้วยเดี่ยว และคู่.....	44
2.25 Monopolar HVDC Link.....	46
2.26 Bipolar HVDC Link.....	46
2.27 Homopolar HVDC Link.....	47
2.28 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	49
2.29 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ.....	51
3.1 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใน (ก) สนามไฟฟ้ากระแสตรง (ข) และกระแสสลับ.....	54
3.2 การล้างลูกฉนวนฉนวนกระแสตรงที่มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน.....	55
3.3 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนที่แตกต่างกันระหว่างลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงและสลับ.....	55
3.4 ตัวอย่างลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ.....	58
3.5 การเคลื่อนผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ.....	58
3.6 วงจรการทดสอบ.....	60
3.7 การวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง.....	62
3.8 การวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรงและกระแสสลับ.....	63
3.9 กล้องโคโรนา.....	64
3.10 ปฏิกิริยาโคโรนาของลูกถ้วยภายใต้กระแสตรง.....	65
3.11 ปฏิกิริยาโคโรนาของลูกถ้วยภายใต้กระแสสลับ.....	66
3.12 แรงดันเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ กระแสตรง และกระแสสลับ.....	67
3.13 วงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการออกแบบ.....	69
3.14 วงจรการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง.....	70
3.15 วงแหวนโคโรนา.....	71
3.16 การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยกระแสสลับภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง.....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17	แรงดัน โครโมน่าที่เริ่มเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนวงแหวน โครโมนา.....73
3.18	อุณหภูมิที่ของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ.....74
3.19	การเตรียมสิ่งประกอบเป็อนหรือ ESDD สำหรับจำลองกับลูกถ้วยฉนวนทดสอบ.....76
3.20	ลูกถ้วยฉนวนที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....76
3.21	การอบลูกถ้วยฉนวนเพื่อให้พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนแห้ง.....77
3.22	การพ่น ESDD ที่พื้นผิวด้านบนและด้านล่างของลูกถ้วยฉนวน.....77
3.23	การอบลูกถ้วยฉนวนเพื่อให้พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนแห้งหลังจากพ่น ESDD.....77
3.24	วงจรการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง.....78
3.25	ปรากฏการณ์การเกิด โครโมนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 7 kVAC.....79
3.26	ปรากฏการณ์การเกิด โครโมนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 9 kVAC.....80
3.27	ปรากฏการณ์การเกิด โครโมนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 14 kVAC.....80
3.28	ปรากฏการณ์การเกิด โครโมนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 13 kVDC.....80
3.29	ปรากฏการณ์การเกิด โครโมนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 17 kVDC.....80
3.30	ปรากฏการณ์การเกิด โครโมนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 22 kVDC.....81
4.1	แบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้ในการหาเหตุผลของการออกแบบ.....86
4.2	ผลของการจำลองของลูกถ้วยถึงลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า.....87
4.3	ผลของการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ [39].....90
4.4	ผลของการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEM LAB.....91
4.5	ต้นแบบของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานในประเทศไทย.....92
4.6	การสร้างเอลิเมนต์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงโดยใช้โปรแกรม FEMLAB.....93
4.7	การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังก์ชัน Subdomain setting.....93
4.8	การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังก์ชัน Material/Coefficient Library.....97
4.9	การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังก์ชัน Boundary setting.....99
4.10	ส่วนต่างๆ ของลูกถ้วยฉนวนหลังจากป้อนค่า.....100
4.11	การประมวลผลโดยใช้ฟังก์ชัน Solve problem.....101
4.12	การแสดงผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า.....101
4.13	การแสดงผลการกระจายของสนามไฟฟ้า.....102
4.14	ค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง.....102
4.15	รูปร่างของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง.....103

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	ค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง.....104
4.17	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง.....105
4.18	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ.....105
4.19	การป้อนค่าคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ.....107
4.20	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก.....107
4.21	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก.....108
4.22	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก.....108
4.23	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก.....109
4.24	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านบน.....110
4.25	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านบน.....110
4.26	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านบน.....111
4.27	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านบน.....111
4.28	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....113
4.29	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....113
4.30	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....114
4.31	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....114
4.32	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ.....117

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ.....117
4.34	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ A.....118
4.35	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ A.....118
4.36	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ B.....119
4.37	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ B.....119
4.38	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ C.....120
4.39	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ C.....120
4.40	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ D.....121
4.41	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ D.....121
4.42	ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815.....125
4.43	ขนาดของ Pin.....130
4.44	ขนาดของช่องว่างระหว่าง Cap และ Pin.....132
4.45	ระยะที่เหมาะสมในการถือ Pin.....133
4.46	ระยะของช่องว่างระหว่าง Pin และ Cap บริเวณการสวมเข้า.....134
4.47	ระยะของช่องว่างระหว่าง Pin และ Cap บริเวณภายใน.....135
4.48	มิติของลูกด้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....136
4.49	ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกด้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....136
4.50	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกด้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....137
4.51	ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกด้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....138
4.52	การกระจายของสนามไฟฟ้าลูกด้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครึ่ง...138

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53 การกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีบ และปรับเปลี่ยนรูปร่างของ Cap.....	139
4.54 การกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีบ และปรับเปลี่ยนรูปร่างของ Cap.....	139

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อรักษาเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จึงได้เกิดความร่วมมือขึ้นระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT: Electricity Generating Authority of Thailand) และประเทศมาเลเซีย (TNB: Tenaga Nasional Berhad) ในการจัดตั้งระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบกระแสตรง (DC Link) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 300 กิโลโวลต์ 300 MW ซึ่งมี ระยะทางความยาวประมาณ 110 กิโลเมตร เพื่อรองรับความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งสองประเทศซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่างกัน โดยมีสถานีไฟฟ้าย่อย TNB รัฐ Kuala Lumpur ของประเทศมาเลเซีย กับสถานีไฟฟ้าย่อย คลองแอง อำเภอละแวก จังหวัดสงขลา ของประเทศไทยเป็นจุดเชื่อมต่อของพลังงาน ซึ่งในอนาคตที่อาจจะมีการขยายระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบกระแสตรงที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงกระแสตรงนั้น ต้นทุน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีค่าแพงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการส่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ ดังนั้นเพื่อที่จะลดต้นทุนของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงรวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายให้สูงขึ้น โดยจะพิจารณาในส่วนของการลดขนาดของสายส่งด้วยลวดด้วยแวน ซึ่งลวดด้วยลวดถือว่าเป็นอุปกรณ์ฉนวนที่มีความสำคัญในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และรองรับแรงทางกลจากน้ำหนักของสายไฟ ลวดด้วยลวดที่มีโซอยู่ในระบบส่งจ่ายมีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบ หน้าที่ใช้งาน และสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน สาเหตุหลักของการเกิดไฟฟ้าดับประการหนึ่ง เกิดจากการฉนวนของระบบผิดพร่อง ซึ่งส่งผลให้เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าลดลง

จากการศึกษาและทบทวนข้อมูลต่างๆ ในอดีตถึงความเป็นมาของการออกแบบ และใช้งาน ลวดด้วยลวดกระแสตรง และกระแสสลับ ปัจจัยที่มีผลทำให้ลวดด้วยลวดกระแสตรง และกระแสสลับมีความแตกต่างกันคือ คุณสมบัติของสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้พฤติกรรมการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนที่ลอยอยู่ภายในอากาศของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง จะมีผลกระทบที่รุนแรงกว่าระบบกระแสสลับ จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมต้องมีการแยกการออกแบบ และใช้งาน ระหว่างลวดด้วยลวดกระแสตรง และกระแสสลับ

การศึกษาวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การนำลวดด้วยลวดกระแสสลับแบบแวนมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมาทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเก็บข้อมูลและ

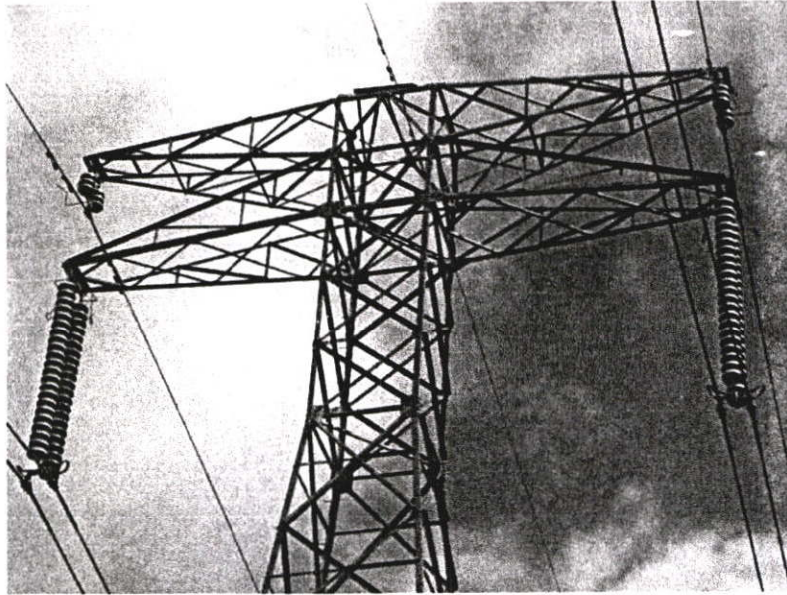
เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง รวมไปถึงการนำวิธีการไฟในอิลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยทั้งสองชนิด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหรือปรับปรุงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีที่จะนำมาใช้ทดแทนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงต่อไป

## 1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการศึกษาวิเคราะห์การออกแบบและใช้งานลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงยังมีอยู่น้อย แต่ก็ยังมีเผยแพร่ในบทความต่างๆ อยู่บ้าง เช่น ออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเลทราย [1] ซึ่งนำเสนอการประยุกต์ออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยให้มีการกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม และลดความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ออกแบบ โดยการทำให้การกระจายของศักย์ไฟฟ้าตามแนวครีบของลูกถ้วยมีความสม่ำเสมอ ผลของการกระจายสนามไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าต่อการเกิดควาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง [2] ผลกระทบของการเกิดควาบไฟตามผิวกระแสตรงกับรูปร่างของลูกถ้วยในสถานะเปราะเปื้อน [3, 4] คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนเซรามิกที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน [5] การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของลูกถ้วยที่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ [6] เป็นต้น

## 1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ จะนำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบแขวนที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมาทำการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง และนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีการใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในประเทศไทย รวมไปถึงมีการนำวิธีการไฟในอิลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยทั้งสองชนิด ซึ่งข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะนำไปใช้ในการศึกษาการประยุกต์ ดัดแปลง หรือปรับปรุงองค์ประกอบของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ ให้สามารถใช้ทดแทนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงการติดตั้งใช้งานของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่มีการใช้งานระหว่าง EGAT ของประเทศไทย และ TNB ของประเทศมาเลเซีย



**รูปที่ 1.1** ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ซึ่งถ้างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ สิ่งที่จะได้รับจะเป็นประโยชน์อย่างสูงกับประเทศชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของกรไฟฟ้าฝ่ายผลิต เพราะสามารถที่จะนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับแบบแขวนที่มีภาระงานอยู่ทุกๆ ไปในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ มาใช้งานทดแทนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงได้ ทำให้ช่วยลดปริมาณการจัดซื้อหรือการเก็บสำรองของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งสองแบบได้ ซึ่งจะเป็นการง่ายต่อการจัดการ และช่วยลดต้นทุนในการผลิตและการขยายโครงการที่จะขยายต่อไปในอนาคตอีกด้วย

#### 1.4 สมมติฐานของการศึกษา

ทำการศึกษาเฉพาะลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบแขวน โดยจะทำการทดสอบในห้องทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรงและกระแสสลับประกอบไปด้วย ทำการทดสอบการวาวไฟตามผิวแบบแห้งสะอาด ทำการทดสอบปรากฏการณ์การเกิดโคโรนา นำวิธีการใช้ไฟในอิลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ห่ออกแบบ และเลียนแบบการใช้งานจริงในห้องทดสอบรวมถึงการพัฒนาต้นแบบในกรณีที่มีอุปกรณ์ประกอบ และทดสอบซ้ำ ซึ่งมีการศึกษาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ รวมไปถึงลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้กล้องโคโรนา และกล้องเทอร์โมสแกนการประยุกต์วิธีการไฟในอิลิเมนต์ มาช่วยในการวิเคราะห์ห่ออกแบบการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยทั้งสองชนิด

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบข่ายของงานวิจัยนี้คือการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง โดยการนำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับมาทำการศึกษา พฤติกรรมและ คุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ เพื่อนำไปใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาวิจัยดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในการส่งจ่ายระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
- 2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้าและไฟในเอลิเมนต์
- 3) ติดต่อประสานงานกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเพื่อขอความอนุเคราะห์เรื่องลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้าในการนำมาทดสอบ
- 4) ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 5) ติดต่อประสานงานกับบริษัทห้างร้าน และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเพื่อขอความอนุเคราะห์เรื่องกล้องโคโรนา
- 6) ติดต่อประสานงานกับการไฟฟ้าฝ่ายภูมิภาคเพื่อขอความอนุเคราะห์เรื่องกล้องเทอร์โมสแกน
- 7) ติดต่อประสานงานกับบริษัทห้างร้าน หรือการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเพื่อขอความอนุเคราะห์ในกรณีที่ไม่สามารถทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- 8) ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า เช่น MATLAB, ANSOFT และ FEMLAB
- 9) ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับการทดสอบ
- 10) จัดเตรียมห้องทดสอบ เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ
- 11) ทำการทดสอบ
- 12) นำผลต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ และสรุปผล
- 13) ทำการสร้างโมเดลจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์เพื่อคุณภาพของการลักษณะกระจายของศักย์ไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้า
- 14) ทำการประยุกต์หรือพัฒนาตามที่ได้ออกแบบ
- 15) ทำการทดสอบซ้ำ
- 16) นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผล
- 17) สรุปผล และข้อเสนอแนะ
- 18) นำข้อมูลทั้งหมดมาทำจัดทำวิทยานิพนธ์

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยสนามไฟฟ้า (Electric Field) ลูกถ้วยฉนวน (Insulator) ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน การวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ และกระแสตรงรวมถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้ในการออกแบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดสอบ และการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบแขวน โดยการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะ และพฤติกรรมพื้นฐานต่างๆ ทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสตรง และกระแสสลับก่อน ซึ่งการทดสอบประกอบด้วย การวาบไฟตามผิว การทดสอบการเริ่มเกิดของปรากฏการณ์โคโรนา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนทดสอบ และ การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำโดยโรงงานอุตสาหกรรม ภายในกระโจมไอน้ำ

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษา จำลอง และออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสสลับแบบพื้นฐาน และทำการจำลองสร้างลูกถ้วยฉนวนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่ทำการปรับปรุง รวมไปถึงการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบแขวนเบื้องต้น เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบัน และเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาต่อไป

บทที่ 5 กล่าวถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบเมื่อทำการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ และทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิว และปรากฏการณ์การเกิดโคโรนา โดยเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง รวมไปถึงค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และหลังจากนั้นนำวงแหวน โคโรนาขนาดต่างๆ ที่ออกแบบมาต่อร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ และเปรียบเทียบผลการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น และสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง ที่ออกแบบตามมาตรฐานเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อเพื่อให้สามารถใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุป ซึ่งประกอบด้วย วิธีการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกด้วยฉนวน กระแสสลับซึ่งมีวิธีการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกด้วยฉนวนได้ 2 วิธี คือ โคขการเคลือบผิวของ ลูกด้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ และการต่อวงแหวนโคโรนาร่วมกับพวงของลูกด้วยฉนวน รวมไปถึง ผลที่ได้จากการจำลองของลูกด้วยฉนวนที่ได้ทำการปรับปรุงโคขอาศัยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ และข้อสรุปของการปรับปรุง พัฒนาลูกด้วยฉนวนกระแสสลับเพื่อใช้งานในระบบการส่งจ่าย ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้ อุปสรรคต่างๆ และการแก้ไข รวมไปถึงข้อเสนอแนะที่จะเป็น ประโยชน์ที่จะนำไปใช้งาน หรือศึกษาต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

### 2.1 ทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า [7]

#### 2.1.1 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆกันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน สนามไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าเป็นประโยชน์มาก เพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ หรือเครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย

การศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)
- 3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

ซึ่งการศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือ สปราร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกันจุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.1)$$

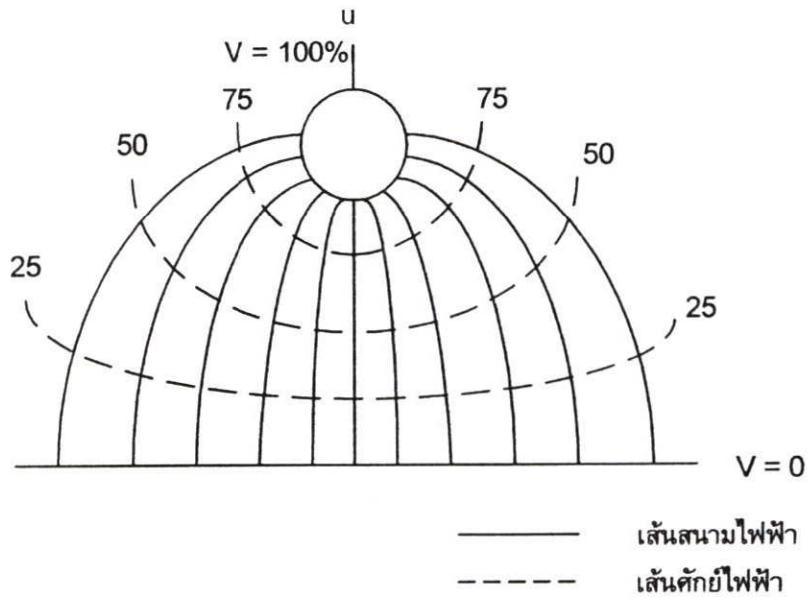
เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor),  $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1$

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

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

จึงอาจกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  ก็คือ ครรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ดังสมการที่ (2.2)

สมการที่ (2.2) นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือ ปริดีสชาร์จ (Predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ (สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะมีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรด และลักษณะสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_b$

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2.2 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ เป็นช่วงๆจึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด

กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกควาน์เรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) หรือ กระแสดีสชาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเวกาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (Space Charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกควาน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ (2.2) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.2) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเวกาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

$U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage)

โดยที่  $E_i$  และ  $U_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการที่ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (Free of Space Charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ สมการที่ (2.3) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage \*, Threshold voltage, Inception Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรกควาน์ (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่ โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกควาน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

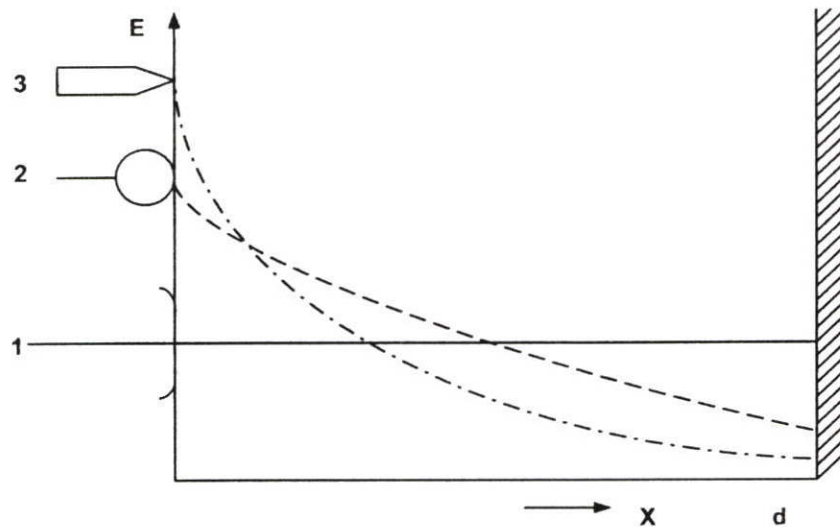
$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.4)$$

เมื่อ  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_b$  และ  $E_i$  คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_b > U_i$  ค่าแรงดันเบรกควาน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้นหรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ นอกจากจะ

ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่นระยะห่างของอิเล็กโทรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ

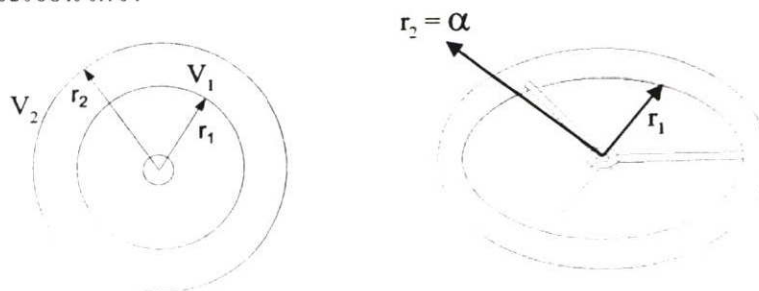


รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

- เมื่อ 1 คือ แบบ Plane-Plane Electrodes สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $\eta^* = 1$   
 2 คือ แบบ Sphere-Plane Electrodes สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย  
 $0.4 < \eta^* \leq 0.8$   
 3 คือ แบบ Rod-Plane Electrodes สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  
 $0.1 < \eta^* \leq 0.3$

### 2.1.2 ทรงกลมเดี่ยวในที่ว่าง (Single sphere in space) [8] สำหรับการออกแบบโคโรนาซีลด์

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของทรงกลมเดี่ยว อาจทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ของอิเล็กโทรดทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมดังแสดงในรูปที่ 2.3 คิดเฉพาะทรงกลมใน ให้ทรงกลมนอกมีรัศมีใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีของทรงกลมใน จึงแทน  $r_2 = \alpha$  ในสมการที่ 2.5 สนามไฟฟ้าที่มีรัศมี  $r$  จะเขียนได้ว่า



รูปที่ 2.3 ทรงกลมซ้อนแกนร่วม

ขนาดของสนามไฟฟ้า ณ รัศมี  $r$  ที่อยู่ระหว่างทรงกลมที่มีรัศมี  $r_1$  และ  $r_2$  ( $r_1 < r < r_2$ )

$$E_r = \frac{U}{r^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (2.5)$$

$$E_r = \frac{r_1 U}{r^2} \quad (2.6)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวทรงกลม  $r_1$

ฉะนั้น

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1} \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์นี้จึงช่วยให้สามารถคำนวณหาขนาดของทรงกลมที่จะใช้เป็นชิลด์ (Shield) ป้องกันไม่ให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จที่ปลายขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินไป เมื่อใส่ชิลด์เข้าไปจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงต่ำกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_c$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $E_c = 30 \text{ kV}_{\text{peak/cm}}$  ทางปฏิบัติใช้  $E_{\max} = E_c = 25 \text{ kV}_{\text{peak/cm}}$

ฉะนั้น รัศมีของชิลด์ทรงกลมคำนวณได้จาก

$$r \geq \frac{U}{E_{\max}} = \frac{U}{25} \text{ เซนติเมตร} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $U$  เป็นค่ายอด  $\text{kV}_{\text{peak}}$

โดยทั่วไปพื้นผิวของอิเล็กโทรดเวลาใช้งานจริงมักจะเปราะเปื้อนด้วยฝุ่นละออง ซึ่งทำให้เกิดดีสชาร์จได้ง่ายขึ้น การคำนวณหาขนาดชิลด์ทรงกลมจึงต้องใช้แฟกเตอร์แห่งความปลอดภัย (Safety factor) คูณ อยู่ในช่วง 1.25 - 2

## 2.2 ลูกถ้วยฉนวน (Insulators)

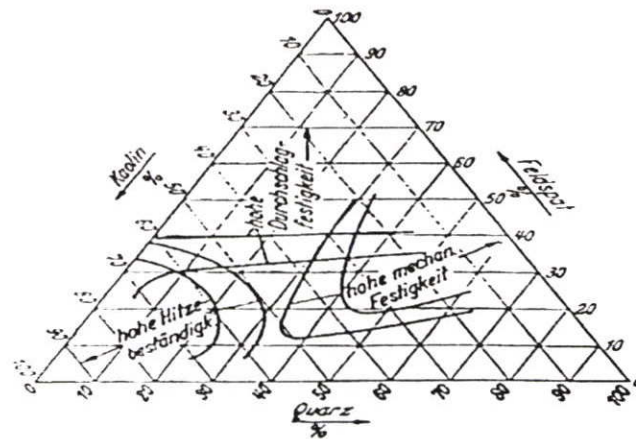
ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึดหรือรองรับตัวนำไฟฟ้า ที่มีแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ดิน ยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ห่างกันอย่างมั่นคงพอที่จะไม่ทำให้แกว่งหรือเคลื่อนไหวเข้าใกล้กันจนทำให้เกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน และเกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน โดยมีตัวกลางอื่นเป็นฉนวนกันคือ อากาศ แก๊ส หรือฉนวนเหลว ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้านอกจากทำหน้าที่ยึดสายไฟแรงสูง บัสบาร์ หรือสวิตช์ตัดคอนแล้วยังใช้เป็นภาชนะถังฉนวนห่อหุ้ม เช่น ปลอกฉนวนนำสาย คือ บุชชิ่ง, เซอร์คิตเบรกเกอร์, ถักคักฟ้าผ่า, หม้อแปลงกระแสและแรงดัน (CT, PT) และตัวเก็บประจุเป็นต้น

ถ้าพิจารณาจากเนื้อสารที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวนอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ พอร์ซเลน (Porcelain) แก้วเหนียว (Toughened Glass) และสารสังเคราะห์ เช่น คาสท์เรซินอีพ็อกซีเรซินใยแก้ว ยาง เป็นต้น ลูกถ้วยฉนวนประเภทสารสังเคราะห์นิยมใช้ภายในอาคารที่ไม่เปียกชื้น ส่วนที่ใช้กลางแจ้งจะเป็นลูกถ้วยฉนวน พอร์ซเลน หรือแก้วเหนียว เพราะมีความคงทนต่อสภาพคินฟ้าอากาศได้ดี ในที่นี้จะกล่าวถึง ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถผลิตขึ้นได้เองโดยใช้วัตถุดิบมากกว่า 85% เป็นของภายในประเทศ

### 2.2.1 ส่วนประกอบและการทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

ในส่วนการใช้งานของลูกถ้วยฉนวน ในขณะที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่นั้น คือต้องรับและทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันใช้งาน หรือแรงดันเกินเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว ลูกถ้วยฉนวนยังต้องทำหน้าที่รับแรงกลจากน้ำหนักของสายไฟ น้ำหนักของลูกถ้วยฉนวนอื่นที่มาต่อซ้อนหรือห้อยต่อให้ยาวขึ้น แรงกลไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสลัดวงจร แรงลมพัดเมื่อเกิดพายุ ซึ่งแรงกลเหล่านี้มีทั้ง แรงดึง แรงกด และแรงบิด ยิ่งกว่านั้นลูกถ้วยก็ยังคงมีความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากแสงแดด หรือความร้อนที่เกิดจากการเกิดวาบไฟตามผิว หรือกระแสอาร์คลัดวงจร หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศอย่างฉับพลัน กล่าวโดยสรุปแล้วคือลูกถ้วยที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้า ทางกลและทางความร้อน ลูกถ้วยจะมีคุณสมบัติด้านใดก็ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสารที่นำมาประกอบเป็นลูกถ้วย ธรรมชาติของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดินเหนียว ดินขาว (China Stone) หินฟันม้า (Felspar) หินแก้ว (Quartz) และอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ส่วนผสมอะไร สัดส่วนมากน้อยของสารเหล่านี้อย่างไร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานลูกถ้วยว่าต้องการให้มีคุณสมบัติเน้นในด้านใด ซึ่งอาจพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 2.4 [7]

ปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบในการทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และชนิดแบบของลูกถ้วยที่นำไปใช้งานที่ต่าง ๆ กัน ในทางปฏิบัติลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำลูกถ้วยพอร์ซเลน

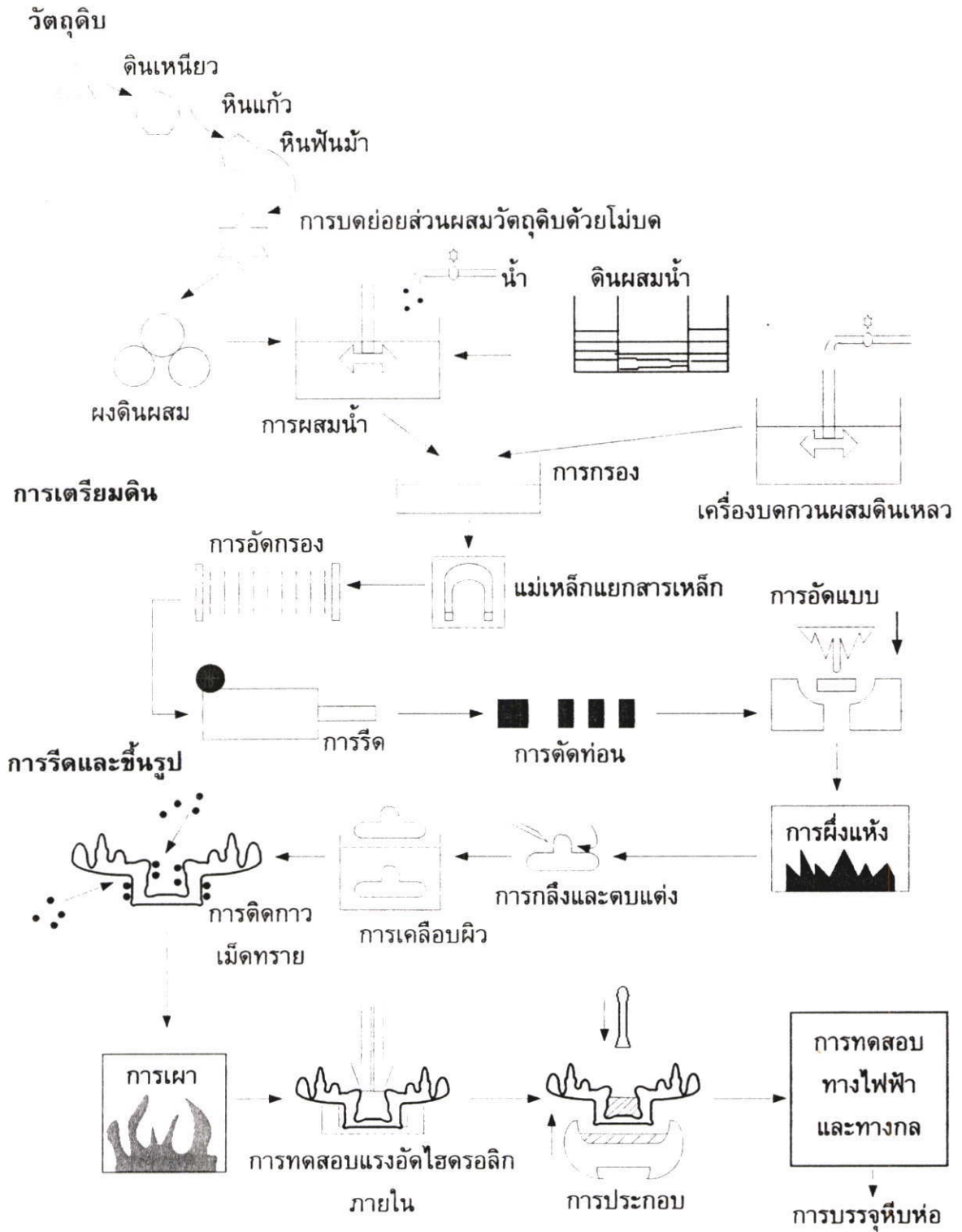
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมวัตถุดิบสำหรับทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน [8]

วัตถุดิบ (เปอร์เซ็นต์)	ขึ้นรูปโดยอาศัย ความเหนียว	ขึ้นรูปโดยการ เทแบบ	อะลูมินาสูง	อะลูมินาดำ
ดินขาว	15	25	15	20
ดินเหนียว	30	20	20	25
หินฟันม้า	35	35	25	35
หินแก้ว	20	20	-	-
อะลูมินา	-	-	40	20

- หมายเหตุ - อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) สูงหมายถึง ลูกถ้วยฉนวนที่ต้องการให้มีเนื้อพอร์ซเลนเหนียว มีความคงทนต่อแรงดึงได้สูง เช่น ลูกถ้วยแขวน เป็นต้น
- เนื้อปกได้รับพวกแรงกด น้ำหนักสาย แรงบิด และแรงลม ไม่ต้องใส่อะลูมินา

### 2.2.2 กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวน พอร์ซเลนอาจทำได้ 2 วิธี วิธีแรกเรียกว่า กระบวนการเปียก (Wet Process) คือขึ้นรูปโดยการเทแบบ หรือการกดอัดลงในแบบในขณะที่ก้อนดินผสมสูตรยังไม่แห้ง คือยังมีส่วนผสมของน้ำหรือความชื้นเพียงพอที่จะกดอัดได้ ตามกระบวนการผลิตลำดับขั้นตอน ดังรูปที่ 2.5 ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นกระบวนการแห้งใช้ดินเป็นผงแล้วอัดขึ้นรูปแบบตามที่เราต้องการแล้วนำไปเผา เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ใช้วิธีการกลึงจากก้อนดินผสมสูตรก่อนข้างแห้ง เป็นการขึ้นรูปจากดินผสมรูปแท่งตันทรงกระบอก โดยวิธีการกลึงที่บังคับด้วยคน หรือกลึงด้วยเครื่องจักรแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตถ้วยจานด้วยจนวนพอร์ซเลนแบบเปือกสำหรับถ้วยด้วยแชน

### 2.2.3 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าถือเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ความบกพร่องหรือความล้มเหลวของลูกถ้วยฉนวนย่อมทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหยุดชะงัก และเป็นผลทำให้เกิดความยุ่งยากและเสียหายต่อเศรษฐกิจ ฉะนั้นลูกถ้วยฉนวนที่ดีจะต้องไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดความบกพร่องในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะใช้งานจะต้องทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ทุกรูปแบบ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแรงกล ความร้อน และปฏิกิริยาเคมี ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวนที่นำมากล่าวในที่นี้ก็คือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับมิติและคุณสมบัติของเนื้อฉนวน

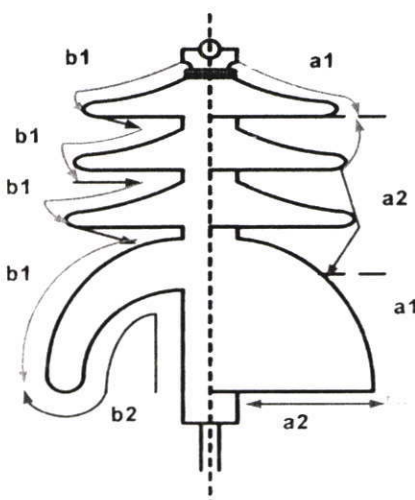
### 2.2.4 ลักษณะสมบัติทางมิติ

ลักษณะทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ควรทราบ ความหมายมีดังต่อไปนี้

1) ระยะรั้ว (Leakage Distance) คือระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั้วจะเป็นส่วนก้นมิให้ผิวเปียกง่ายเมื่อในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้ลูกถ้วยมีสภาพคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น ดังระยะ  $b$  คือ  $(b_1 + b_2)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6

2) ระยะรั้วป้องกัน (Protective Leakage Distance) คือระยะที่ไม่เปียกฝนซึ่งปกติจะหมายถึงระยะในปีกถ้วยหรือส่วนที่เป็นเงาจากการฉายแสงตั้งฉากกับแกนของลูกถ้วย ดังรูปที่ 2.6 คือระยะผลรวมของ  $b_2$

3) ระยะอาร์ค (Arcing Distance) คือระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์คนั่นเอง ระยะอาร์คแบ่งออกเป็นระยะอาร์คแห้ง (Dry Arcing Distance) และระยะอาร์คเปียก (Wet Arcing Distance)



รูปที่ 2.6 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยฉนวน

- ระยะอาร์คแห้ง หมายถึงระยะอาร์คที่วัดในสภาวะลูกถ้วยแห้ง ซึ่งจะมีทั้งลักษณะที่วัดตามผิว และส่วนที่เป็นอากาศ คือระยะผลรวมของ  $a_1$  และ  $a_2$  ในรูปที่ 2.6

- ระยะอาร์คเปียก หมายถึง ระยะอาร์คที่วัดในลักษณะลูกถ้วยเปียก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความแปรปรวน ระยะอาร์คเปียกก็คือ ระยะผลรวมของ  $a_2$  ในรูปที่ 2.6

### 2.2.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ที่ใช้เป็นข้อกำหนดและเกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่ควรทราบมีดังต่อไปนี้

1) แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ (Low Frequency Dry Flashover Voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ทำให้เกิดไฟวาบตามผิวบนลูกถ้วยในสภาพแห้ง

2) แรงดันวาบไฟวาบไฟผิวเปียกความถี่ต่ำ (Low Frequency Wet Flashover Voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ทำให้เกิดไฟวาบตามผิวบนลูกถ้วยในสภาพเปียก

3) แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (Critical Flashover Voltage) หมายถึง ค่าวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วย 50% เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ S

4) ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Voltage) อาจทำได้โดยป้อนแรงดันตามที่กำหนด 15 ครั้งของแต่ละขั้ว และยอมให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ไม่เกิน 2 ครั้ง หรืออาจหาได้จากค่าวาบไฟตามผิว 50% คือหาความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์โดยอาศัยสถิติ คือ

$$U_{w90\%} = U_{50\%} (1 - 1.3\sigma) = 0.96 U_{50\%} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและมีค่าเท่ากับ 0.03 เมื่อกระจายเป็นปกติ

5) แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio Influence Voltage = RIV) ของ ลูกถ้วย หมายถึงค่าแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาบนลูกถ้วย โดยมากจะเกิดตรงที่บริเวณผิวลูกถ้วยใกล้กับที่พาดหรือยึดสายไฟ ซึ่งเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง แล้วส่งคลื่นรบกวนวิทยุ ระบบสื่อสาร ระบบควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ การแก้ปัญหาทำได้โดยเคลือบสารกึ่งตัวนำที่บริเวณร่องพาดสายไฟฟ้า เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า เช่น ในกรณีลูกถ้วยก้านตรงซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนยึดสายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย รูปลักษณะของลูกถ้วยก้านตรงซึ่งมีความหนา เนื้อฉนวนระหว่างก้านโลหะที่ต่อลงดินกับอิเล็กโตรดแรงสูงนั้นน้อย จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สายรัศรอบคอลลูกถ้วย (Tie Wire) ทำให้เกิดโคโรนาขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ลูกถ้วยก้านตรงที่จะใช้ในย่านชุมชนต้องเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำในบริเวณด้านบนของลูกถ้วย เพื่อป้องกันมิให้เกิดโคโรนาขึ้นใน

ขณะที่ใช้งาน การเคลือบสารกึ่งตัวนำจะช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยก้านตรง ทำให้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด  $U_c$  มีค่าสูงขึ้น แต่จะทำให้ค่าแรงดันเบรกควาน์  $U_b$  ลดลง ฉะนั้นการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ส่วนบนจะมีความกว้างที่พอเหมาะ

6) แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (Puncture Voltage) หมายถึงแรงดันที่จะทำให้เกิดการเจาะผ่านเนื้อลูกถ้วย โดยเฉพาะลูกถ้วยที่มีเนื้อฉนวน (พอร์ซเลนหรือแก้ว) มีความหนาระหว่างอิเล็กโตรดน้อยเมื่อเทียบกับระยะอาร์ค เช่น ลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น

นอกจากลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวแล้ว ยังมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ อีกมากมายซึ่งจะดูได้มาตรฐานของลูกถ้วยนั้นๆ

### 2.2.6 การทดสอบ

การทดสอบผลิตภัณฑ์ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าลูกถ้วยที่ผลิตขึ้นในโรงงานนั้นมีคุณสมบัติและคุณภาพได้ตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานแล้วจะทำให้การฉนวนของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ ไม่เกิดบกพร่อง มาตรฐานได้กำหนดให้มีการทดสอบเกี่ยวกับรูปร่างและมิติ คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกล และการอบสังกะสีของส่วนที่เป็นโลหะ อย่างไรก็ตามการทดสอบอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ [5]

- 1) การทดสอบประจำ (Routine Test) หมายถึงลูกถ้วยฉนวนทุกลูกต้องผ่านการทดสอบ
- 2) การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test) เป็นการทดสอบเพื่อขอออกมาตรฐานการรับรอง
- 3) การทดสอบเพื่อตรวจรับ (Acceptance Test)

### 2.2.7 การทดสอบรูปร่างและมิติ

การทดสอบรูปร่างและมิติเป็นการทดสอบลักษณะทั่วไป ลูกถ้วยแต่ละชนิดแบบมาตรฐานจะกำหนดรูปร่างลักษณะมิติไว้แน่นอน พร้อมกับค่าที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้เพราะการเผาแล้วย่อมทำให้มิติหดลงจากมิติที่ยังดิบอยู่ และตรวจสอบสภาพเรียบร้อยทั่วไปของผิวเคลือบฉนวนอย่างไรก็ดีทั้งมิติและสภาพเรียบร้อยของผิวมักจะควบคุมด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลโดยอัตโนมัติ เพราะขนานเล็กเกินไปย่อมทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือทางกลไม่ได้

### 2.2.8 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

รายการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าประกอบด้วย

- 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ ทดสอบแรงดันกระแสสลับ เพื่อดูว่าลูกถ้วยจะทนแรงดันโดยเฉลี่ยได้เท่าใด
- 2) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ ทดสอบแรงดันกระแสสลับเพื่อตรวจดูว่า เมื่อฝนตกผิวลูกถ้วยเปียกแล้วจะทนแรงดันค่าเฉลี่ยเท่าใด

3) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห่งอิมพัลส์วิกฤต ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50  $\mu$ S คือค่า 50%

4) การทดสอบแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio Influence Voltage Test) ทดสอบเกี่ยวกับแรงดันกระแสสลับ เพื่อตรวจสอบว่าลูกถ้วยเมื่อใช้งานจะช็อคหรือรองรับตัวนำไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะต้องไม่สร้างคลื่นออกไปรบกวนระบบสื่อสาร

5) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (Puncture Test) ทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ เพื่อตรวจสอบว่าเนื้อพอร์ซเลนจะทนต่อแรงดันได้มากน้อยเท่าใด โดยปกติการออกแบบจะให้เกิดวาบไฟตามผิวง่ายกว่าการเจาะผ่าน เพราะเมื่อเกิดกาเจาะผ่านเนื้อลูกถ้วยแล้วลูกถ้วยนั้นก็ใช้งานไม่ได้อีก

### 2.2.9 การทดสอบทางกล

ในการใช้งานของลูกถ้วยนอกจากจะต้องมีคุณสมบัติคงทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าแล้ว ลูกถ้วยยังได้รับความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักและแรงดึงกระแทกต่างๆดังต่อไปนี้

1) การทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า ในทางปฏิบัติลูกถ้วยฉนวนใช้งานตามสภาพจริงนั้นจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันของตัวนำ และได้รับแรงกลด้วย ฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันตามที่มาตรฐานกำหนดแล้วจึงป้อนแรงดึงให้กับลูกถ้วย ซึ่งลูกถ้วยฉนวนจะได้ทนมากกว่า เมื่อทดสอบแค่เพียงทางไฟฟ้าหรือทดสอบทางกล

2) การทดสอบความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล (Impact Test) ในการขนส่งการติดตั้ง ลูกถ้วยมีโอกาสที่จะได้รับแรงกระแทกหรือแรงกระทบ ซึ่งลูกถ้วยจะต้องทนต่อแรงกลเหล่านี้ได้ ทดสอบโดยใช้ตุ้มมีน้ำหนัก มีแขนยึดหมุนรอบจุดหมุน ยกน้ำหนักให้สูงระดับหนึ่งเพื่อให้ได้แรงเมื่อตกกระทบลูกถ้วยได้ตามมาตรฐานที่กำหนด หลังจากรับแรงกระทบแล้วต้องเอาไปทดสอบวาบไฟตามผิว ชั่วครู่อีกครั้งหนึ่ง ว่าเกิดรอยร้าวหรือแตกภายในหรือไม่

3) การทดสอบความทนต่อแรงดึง ลูกถ้วยฉนวนในสภาพการใช้งานจะได้รับแรงดึงจากน้ำหนักตัวนำสายไฟ จากลูกถ้วยแขวนลูกต่างๆ จากแรงลม และอื่นๆ จึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดึงด้วย โดยการดึงฝากรอบด้านหนึ่งและที่ก้านต่ออีกด้านหนึ่งในแนวแกนเดียวกัน

4) โหลดเวลา การทดสอบโหลดเวลาเป็นการทดสอบดูความมั่นคงของเนื้อพอร์ซเลน และการเกาะแน่นของส่วนที่เป็นโลหะกับซีเมนต์ จึงดึงลูกถ้วยในแนวแกนด้วยแรงดึงและเวลาที่กำหนด เพราะเวลาใช้งานจริงๆ จะได้รับแรงดึงอยู่ตลอดเวลา หลังการดึงแล้วนำไปทดสอบความมั่นคงทางไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อดูว่ามีรอยร้าวภายในหรือไม่ ลูกถ้วยที่ดีจะไม่เกิดความชำรุดเสียหายหรือรอยร้าวใดๆ

5) ความแข็งแรงส่วนที่เหลือ มีโอกาสเป็นไปได้ที่พวงลูกถ้วยจะได้รับแรงกระแทกจนปีกแตกหลุดออกไปหมด คงเหลือแต่เนื้อพอร์ซเลนภายในฝากรอบโลหะกับก้านต่อ ส่วนที่เหลือนี้

จะต้องรับแรงกลของสายตัวนำต่อไปได้ การทดสอบทำโดยเคาะให้ปลุกด้วยหลอดออกให้หมดก่อนแล้วจึงนำไปทดสอบ

6) การทดสอบความพรุน (Porosity Test) ลูกถ้วยฉนวนจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คั้นนั้นจะต้องไม่มีความพรุนเลย ทั้งนี้เพื่อมิให้ดูดซึมความชื้น ทดสอบโดยการใช้เนื้อ พอร์ซเลนที่ได้จากการทุบให้เป็นชิ้นเล็กๆแล้วใส่ลงไปในถังน้ำยาสารละลายของ เบสิกฟลูกซินคาย อัดความดันประมาณ 2.76 กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หรืออัดความดันประมาณ 6.8 กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื้อพอร์ซเลนที่ดีจะไม่ดูดซึมสีนี้เข้าข้างในเนื้อพอร์ซเลน

7) การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน (Thermal Shock Test) การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันเป็นการตรวจดูความสม่ำเสมอของเนื้อพอร์ซเลน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเย็นไปร้อนและจากร้อนไปเย็นโดยทันทีทันใด หากเนื้อไม่สม่ำเสมอก็จะทำให้เกิดรอยร้าวภายในได้ ฉะนั้นหลังการทดสอบแล้วต้องนำไปทดสอบวาบไฟตามผิวชั่วคราวอีกครั้งหนึ่งว่ายังคงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีอยู่ การทดสอบจะจุ่มน้ำเย็นประมาณ 2 องศาเซลเซียส จุ่มนาน 10 นาที แล้วนำไปจุ่มน้ำร้อนประมาณ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 นาที ทำซ้ำเดิมจนครบ 10 วัฏจักร (โปรดดูตามมาตรฐานเฉพาะของลูกถ้วยนั้นๆ)

## 2.3 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน

สิ่งเปราะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอกหรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและ เป็นสาเหตุทำให้เกิดความไวตามผิวง่าย การเกิดความไวตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดความไวตามผิว [9]

### 2.3.1 สิ่งเปราะเปื้อน

โดยทั่วไปนิยมสิ่งเปราะเปื้อนสามารถแบ่งตามประเภทออกได้เป็น 4 ประเภท ตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งาน [9] ได้แก่ สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปราะเปื้อนอื่น ๆ

1) สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล ได้แก่ พวงไอเกลือ (Sea salt หรือ Sodium Chloride; NaCl) การสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้บนลูกถ้วยฉนวน เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะด้วยกันคือ การ สะสมแบบรวดเร็ว (Rapid pollution) เกิดขึ้นในกรณีที่มีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาเกลือทะเลเข้ามา เช่น พายุไต้ฝุ่น เป็นต้น และการสะสมแบบธรรมดา (Ordinary pollution) เกิดจากลมทะเลที่พัดเป็นฤดู

กาล เป็นการสะสมที่ใช้เวลาค่อนข้างนาน ตามปกติแล้วระดับของสิ่งเปื้อนจะลดลงไปเมื่อลึกลงเข้าไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ตามอาจจะพบเกลือทะเลที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลถึง 100 กิโลเมตร [10]

2) สิ่งเปื้อนเปื้อนจากอุตสาหกรรม ถูกด้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณเขตอุตสาหกรรมจะเปื้อนเปื้อนวันและ เขม่าที่ปล่อยออกมาจากปล่องท่อไอเสีย ระดับของสิ่งเปื้อนเปื้อนชนิดนี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น สิ่งเปื้อนเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด มีส่วนผสมขององค์ประกอบทางด้านเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ

3) สิ่งเปื้อนเปื้อนจากทะเลทราย ทะเลทรายเป็นบริเวณที่สิ่งเปื้อนเปื้อนสามารถที่จะสะสมบนผิวลูกถ้วยได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากปริมาณของฝุ่นที่ตกเพียงเล็กน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งทะเล จะมีสิ่งเปื้อนเปื้อนที่คล้าย ๆ กับสิ่งเปื้อนเปื้อนประเภทฝุ่นแต่สำหรับทะเลทรายที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั้น นอกจากสิ่งเปื้อนเปื้อนประเภทฝุ่นแล้วยังมีเกลือทะเลผสมอยู่ด้วย

4) สิ่งเปื้อนเปื้อนอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว เช่น เถ้า หรือ ฝุ่น ภูเขาไฟ หรืออุบัติเหตุเกิดขึ้นโดยการฉีกพ่นให้กับดิน ไม้ พืช ผักหรือการเผาไหม้ของธัญพืชต่าง ๆ นอกจากนี้แล้วจากบทความบางฉบับ [10] ได้กล่าวถึงสิ่งเปื้อนเปื้อนชนิดนี้โดยเน้นไปที่สิ่งเปื้อนเปื้อนจากฝุ่น (Dust Contamination) โดยได้อธิบายว่าเกิดจากการพัดเอาทราย หรือฝุ่นที่เกิดจากดินไปเกาะติดลูกถ้วย ฉนวน ระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อนเปื้อนค่อนข้างต่ำ องค์ประกอบของสิ่งเปื้อนเปื้อนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่

### 2.3.2 การวัดค่าระดับความเปื้อนเปื้อน

การวัดค่าระดับความเปื้อนเปื้อนที่สถานที่ที่ติดตั้งลูกถ้วยฉนวน มีหลายวิธีดังนี้

1) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสิ่งเปื้อนเปื้อนที่รวบรวมโดยวิธี Directional Gauges

2) การวัดค่าปริมาณการสะสมสิ่งเปื้อนเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนเทียบเท่ากับปริมาณเกลือ (NaCl) ซึ่งจะให้ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำสิ่งเปื้อนเปื้อนมาละลายน้ำที่มีปริมาณเท่ากันซึ่งจะเรียกวิธีนี้เรียกว่าการหาค่า ESDD (Equivalent Salt Deposit Density)

3) การนำเอาข้อมูลทางสถิติจำนวนครั้งของการเกิดวาบไฟตามผิวของพวกลูกถ้วยที่มีความยาวแตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์

4) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงผิวของลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง

5) การวัดค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนขณะที่ได้รับแรงดันใช้งานปกติ(เป็นการหาค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา)

การวัดระดับความเปรอะเปื้อนแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันกล่าวคือ วิธีที่ 1 และ 2 สามารถทำได้โดยง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่วิธีที่ 1 นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลลักษณะช่วงเวลาการสะสมและระดับของความเปรอะเปื้อนออกมาโดยตรง วิธีที่ 2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับของความเปรอะเปื้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ผิวถูกด้วยฉนวนมีความเปียกชื้น ความถูกต้องของการวัดทั้ง 2 วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่บ่อยในการวัด ถ้าการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนเกิดขึ้นไม่เรื้อรัง ก็อาจจะทำการวัดเดือนละครั้ง หรือเว้นระยะห่างกว่านี้ แต่ถ้าการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนเกิดขึ้นรวดเร็วก็จะต้องทำการวัดถี่ขึ้น สำหรับวิธีที่ 3 นั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่มีราคาแพง ข้อมูลที่ได้จะถูกต้องเฉพาะถูกด้วยที่มีความยาวใกล้เคียงกับถูกด้วยที่พิจารณาและใช้งานที่ระดับแรงดันใกล้เคียงกัน สองวิธีสุดท้ายต้องการแหล่งพลังงานและอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง วิธีการประเมินค่าระดับของความเปรอะเปื้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่การวัดค่า ESDD การวัดค่าความต้านทานของผิว และการวัดค่ากระแสรั่วไหล [11,12]

การหาค่าระดับความเปรอะเปื้อนนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น IEC 815 [13] ได้แนะนำให้พิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ ลักษณะของพื้นที่แต่ละแห่งที่สัมพันธ์กับระดับความเปรอะเปื้อน และข้อมูลของเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานถูกด้วยฉนวน ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญมาทำการวิเคราะห์

### 2.3.3 การแบ่งระดับความเปรอะเปื้อน

ตามมาตรฐาน IEC 815 [13] ได้แบ่งระดับความเปรอะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน

ระดับของความเปรอะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บริเวณที่ปลอดภัยจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย</li> <li>- บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบอุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยน้อยโดยที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่านหรือมีฝนตกบ่อย</li> <li>- บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง</li> </ul>

## ตารางที่ 2.2 (ต่อ) การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน

2) ปานกลาง (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมา และอาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง</li> <li>- บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นแต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอยๆ</li> <li>- บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลาย ๆ กิโลเมตร)</li> </ul>
3) สูง (Heavy)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง</li> <li>- บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล</li> </ul>
4) สูงมาก (Very heavy)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit</li> <li>- บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมาก ๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเปราะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง</li> <li>- ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและ ไอเกลือเข้ามา</li> </ul>

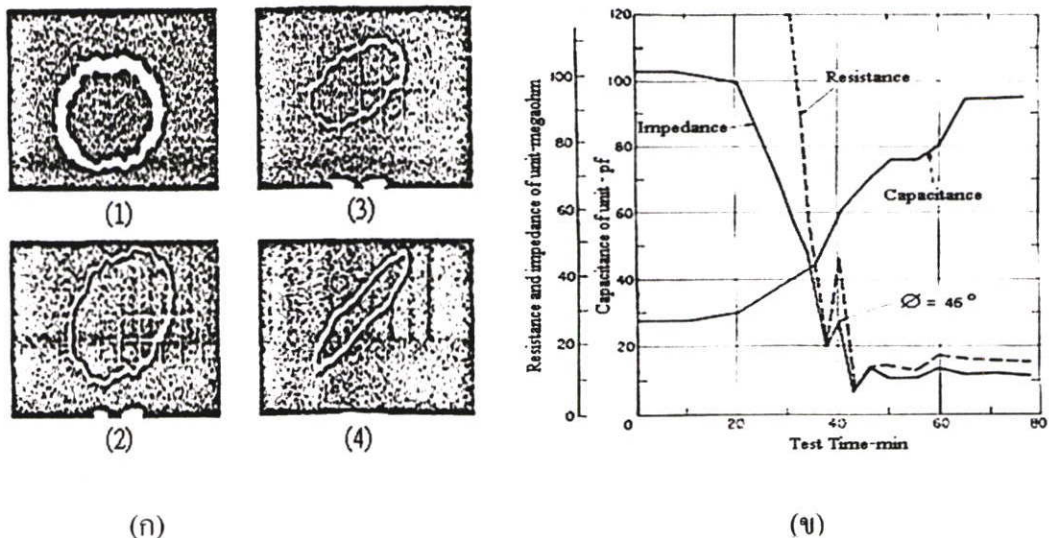
หมายเหตุ 1) บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากธัญพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับความเปราะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง

2) บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

### 2.3.4 การวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน

การศึกษากลไกการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนได้มีการศึกษามานานกว่า 40 ปี แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะเข้าใจได้อย่างถ่องแท้ [14] ความพยายามที่จะทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวจากอดีตที่ผ่านมา เริ่มต้นจากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกายภาพของการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน [14] และได้มีความพยายามที่จะเสนอรูปแบบของสมการและโมเดลขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว [14]

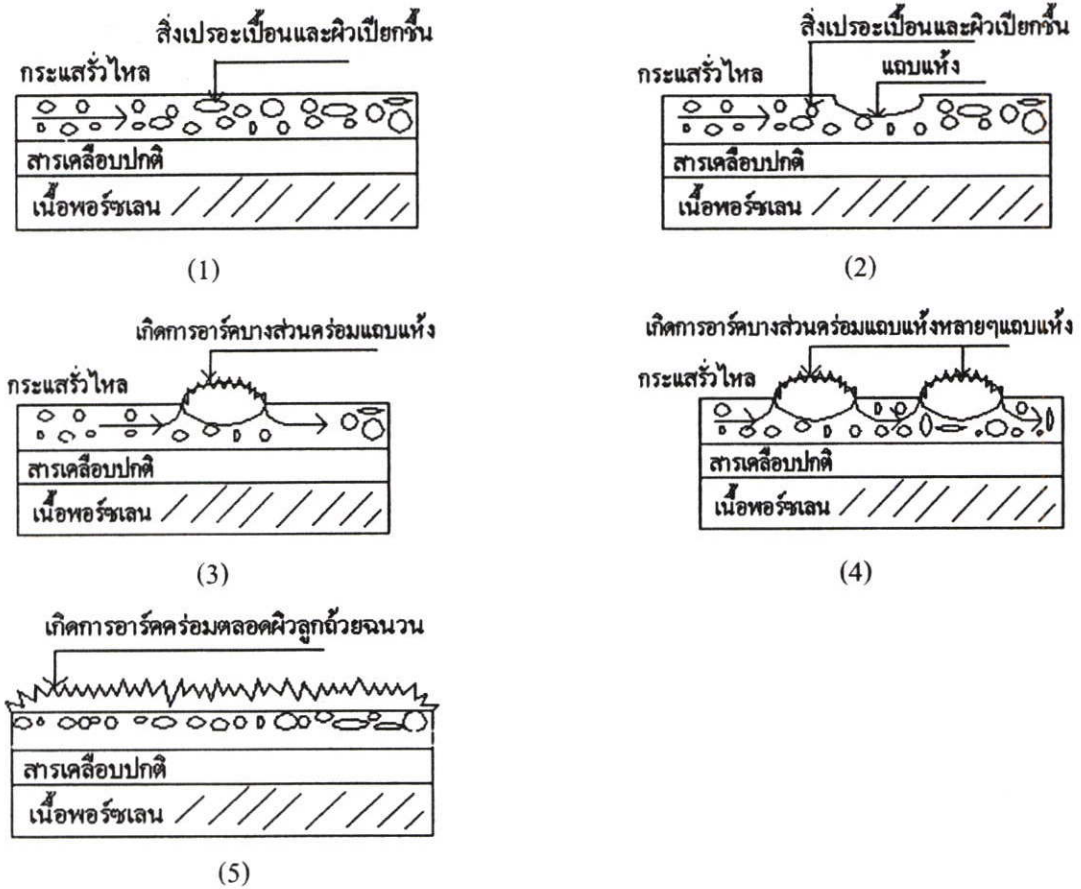
กลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบาๆ สภาพนำไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของผิวของลูกถ้วยฉนวน (Surface Impedance) จะเปลี่ยนสภาพจากค่าปาสซีฟในคอนเริ่มต้นไปเป็นแอมบริซิซิตีฟเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (ก) รูปลิซัจว์ (Lissajour figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวาบไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกของอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวน[14]

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวลูกถ้วย โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่าแถบแห้ง (Dry band) [14] บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น เรียกว่าการเกิดดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิซชาร์จต่อไปอีกการเกิดดิซชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อถึงกันได้ ก็เกิดวาบไฟตามผิวตกคร่อมตลอด

ผิวลูกถ้วยฉนวน ขั้นตอนของการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนของการเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน

### 2.3.5 แนวทางแก้ไขการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน

วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.3.5.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวน

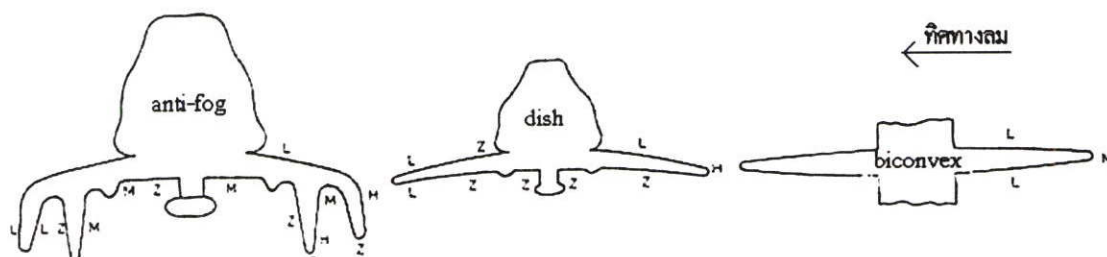
การป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วย โดยวิธีการลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อน ได้แก่ การทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาที่กำหนด หรือ การใช้ลูกถ้วยฉนวนประเภทที่มีรูปทรงที่ขากแก่การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อน (Aerodynamic Profiles)

1) การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามความระยะเวลาที่เหมาะสม [10,14,15]

การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนนั้นเป็นวิธีดั้งเดิม จะทำเมื่อลูกถ้วยฉนวนเริ่มสกปรก สามารถทำได้ทั้งในขณะที่ดับกระแสไฟฟ้า (De-Energize) และขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า

(Hot Line) โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ (Conductivity) ที่ใช้ในการฉีด ระยะห่าง และ แรงดันของน้ำ (Minimum Distance and Nozzle Pressure) ทิศทางลม (Wind Direction) ตลอดจนลักษณะการติดตั้งของลูกถ้วย

2) การออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น [14] จากผลการศึกษาการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนที่มีรูปร่างต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าลูกถ้วยฉนวนแบบ biconvex มีสิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะน้อยที่สุด รายละเอียดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.9 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทควัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน [15]

โดยที่ H คือ บริเวณที่มีการจับเกาะหนาแน่น

M คือ บริเวณที่มีการจับเกาะปานกลาง

L คือ บริเวณที่มีการจับเกาะเบาบาง

Z คือ บริเวณที่ไม่มีการจับเกาะหรือมีการจับเกาะที่น้อยมาก

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ [14]

ความเร็วลม	ลูกถ้วยแบบ anti- fog	ลูกถ้วยแบบ disk	ลูกถ้วยแบบ biconvex
9 m/s	630	390	40
1.5 m/s	150	10	น้อยมาก

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยฉนวน คือการทำความสะอาดตัวเองโดยธรรมชาติ เมื่อมีลมพัดผ่านหรือฝนตก ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti-Fog นั้นออกแบบให้มีระยะรั้วสูงขึ้นแต่จะพบว่าโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีได้สูงสุด ลูกถ้วยแบบ Disk นั้น โอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีมากกว่าลูกถ้วยแบบ Biconvex แต่ก็มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตนเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ดีกว่า

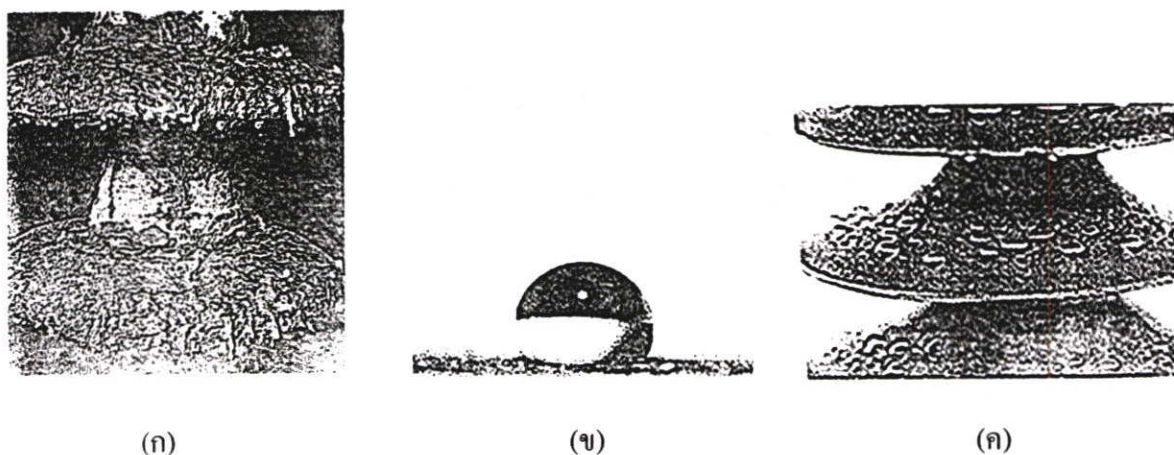
### 2.3.5.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน [14]

สภาพนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิว จะเป็นผลให้ลูกถ้วยฉนวนมีโอกาสที่จะเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย การป้องกันไม่ให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าที่มีลักษณะฟิล์มนำไฟฟ้ากระจายอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถทำได้โดยการเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติต่อต้านการซึมผ่านของน้ำ (Water Repellent หรือ Hydrophobic Material) เช่น พวกรubber Silicone Pastes หรือ Silicone Elastomer หรือการใช้ลูกถ้วยยางซิลิโคน (Silicone rubber insulator) มีรายละเอียดดังนี้

1) Silicone Pastes เป็นส่วนผสมระหว่าง Silicone Oil กับสารประเภท Carrier Powder เช่น Silica Flour เมื่อเคลือบแล้วจะมีรูปร่างคงตัวในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง +200 องศาเซลเซียส Silicone Pastes มีคุณสมบัติดูดซับสิ่งเปรอะเปื้อน โดยเฉพาะสิ่งเปรอะเปื้อนที่เป็นของแข็ง เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว Silicone Paste จะอึดตัวไม่สามารถที่ดูดซับสิ่งเปรอะเปื้อนได้อีก จะต้องล้างสิ่งเปรอะเปื้อนและสารเคลือบออกและทำการเคลือบใหม่ โดยทั่วไปการเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone pastes ในแต่ละครั้ง ลูกถ้วยฉนวนสามารถใช้งานได้ในช่วงระยะเวลาประมาณ 3 ปี โดยที่การอึดตัวของ Silicone Paste จะขึ้นอยู่กับความหนาของ Silicone Paste ที่ใช้เคลือบด้วย ปัจจุบันมีการพัฒนาสารชนิดอื่นเพื่อนำมาเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวน เช่น Basic Hydrocarbon Grease หรือ Controlled-Viscosity gel หรือ Petrolatum Based เป็นต้น

2) Silicone Elastomer หรือ Fluorocabons มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายสีสามารถผสมให้เจือจางเพื่อให้เหมาะสมในการทาหรือพ่นเคลือบ การเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone Elastomer ปกติแล้วจะมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร Silicone Elastomer จะมีคุณสมบัติต่อต้านการจับเกาะของน้ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างน้ำกับผิวที่เคลือบไว้มีค่าน้อย ในสภาพฝนที่ตกปรอยๆ หยดน้ำที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนจะรวมตัวกันเป็นรูปทรงกลมกลิ้งตกไปจากผิวลูกถ้วยฉนวนเหมือนกับน้ำที่กลิ้งบนใบบอน หรือจะแยกเกาะเป็นเม็ดๆ ไม่เชื่อมต่อกันทำให้ทางเดินของกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนไม่ต่อเนื่องและลดน้อยลง โอกาสที่ลูกถ้วยฉนวนจะเกิดวาบไฟตามผิวจึงมีค่าน้อยลง

3) Silicone Rubber Insulator เป็นลูกถ้วยฉนวนที่ทำด้วยยางซิลิโคน มีคุณสมบัติไม่ยอมให้น้ำจับเกาะสูง แต่เมื่อติดตั้งใช้งานกลางแจ้ง จะต้องรับแสงแดด โอโซน หรือฝนตกโดยตรง หรือในกรณีที่มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทไอเกลือและสารเคมีบนผิวลูกถ้วยฉนวนทำให้คุณสมบัติต่อต้านการซึมผ่านของน้ำลดลง คุณลักษณะสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาวิจัย



**รูปที่ 2.10** (ก) การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งาน 3 ปีในบริเวณเปราะเปื้อน [15] (ข) หยค้ำทรงกลมบนผิวลูกถ้วยยางซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยค้ำบนผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน [14]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับลักษณะสมบัติการใช้งานลูกถ้วยฉนวนชนิดยางซิลิโคนมีการทำการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 จนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของยางซิลิโคนอัน ได้แก่ มีน้ำหนักเบา แข็งแรง สามารถที่จะออกแบบเป็นรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้งานลูกถ้วยยางซิลิโคนมีการเผยแพร่อยู่ในบทความวารสารทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าชั้นนำของโลก เช่น IEE หรือ IEEE อยู่เป็นจำนวนมาก

### 2.3.5.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน

การเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเกิดขึ้นถ้าลูกถ้วยฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวสูงขึ้น อาจจะทำให้ได้โดยการเพิ่มระยะรั่ว (Leakage Distance) ของลูกถ้วยฉนวน หรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

1) การเพิ่มระยะรั่วของลูกถ้วยฉนวนทำได้โดยการติดตั้ง Creepage Extender หรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีระยะรั่วมากขึ้น [10,14,15] การเพิ่มระยะรั่วของลูกถ้วยฉนวนให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั่วไหลเกิดขึ้นน้อยลงเช่น ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti Fog มาตรฐาน IEC 815 [13] ได้แนะนำค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance (mm/kV) ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน โดยเป็นฟังก์ชันของระดับของสิ่งเปราะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณประะเื้อน [13]

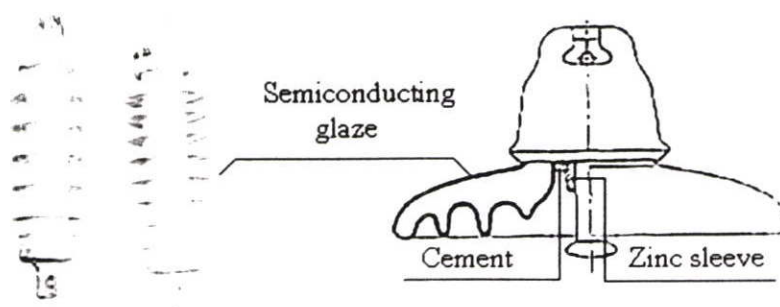
ระดับของความประะเื้อน	ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance (mm/kV)
เล็กน้อย	16
ปานกลาง	20
สูง	25
สูงมาก	31

โดยที่ บริเวณที่มีระดับของความประะเื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การดูแลบำรุงรักษา และบริเวณที่มีระดับของความประะเื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวได้ ดังนั้นควรจะพิจารณาใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีค่า Nominal Specific Creepage Distance เพิ่มขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำ ความสะอาดลูกถ้วยฉนวนหลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบเคลือบลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย

2) การใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้มีกระแสรั่วไหลตามผิวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งอันเป็นสาเหตุการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวได้โดยง่าย [14,15]

## 2.4 ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

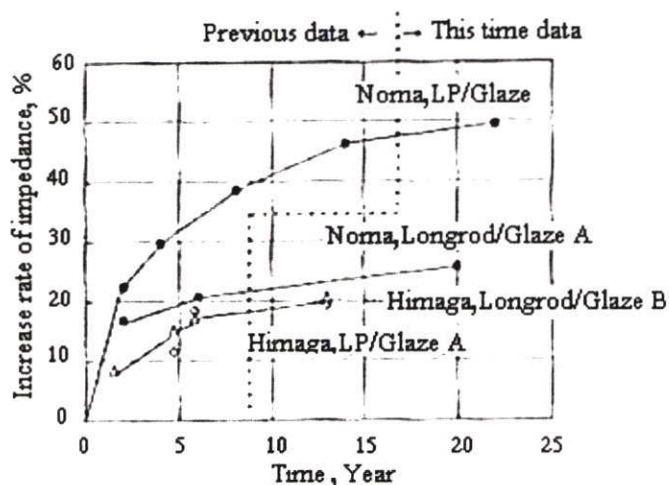
ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ (Resistance Glazed หรือ Semiconducting Glaze Insulator) เป็นลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กันทั่วไปเพียงแต่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแสดงดังรูปที่ 2.11



**รูปที่ 2.11** ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบคอดันยาวและแบบเขวน

### 2.4.1 ชนิดและคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวน

1) สารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบผิวลูกถ้วย สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนในครั้งแรกคือ Iron-Oxide เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสบปัญหาการผุกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ และเกิด Thermal Runaway อันเป็นผลจากสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นลบ (Negative Temperature Coefficient of Resistance) ที่มากเกินไป ต่อมาได้เปลี่ยนมาใช้ Tin-oxide พบว่าสามารถแก้ปัญหาทั้งสองประการดังกล่าวได้ [28] สารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนในปัจจุบันจะใช้ Tin-Oxide ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นหลัก โดยที่มี Antimony ( $\text{Sb}^{5+}$ ) ผสมอยู่เล็กน้อย รวมทั้งเพิ่ม Niobium-Oxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) เพื่อป้องกันความผุกร่อน [14] ผลการทดสอบที่ประเทศญี่ปุ่นเมื่อเร็ว ๆ นี้ หลังจากที่ได้ติดตั้งลูกถ้วยฉนวนเพื่อรองรับสิ่งเปราะเปื้อนในระบบจำหน่าย 33 kV เป็นเวลาประมาณ 25 ปี โดยเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518 ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้คือกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  พบว่าลูกถ้วยกลุ่มที่สองมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นเพียง 25% ในขณะที่ลูกถ้วยกลุ่มแรกมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น 50% จากค่าเริ่มต้น การเพิ่มขึ้นของค่าอิมพีแดนซ์ไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลา 25 ปี [14]

2) การเกิด Thermal Runaway การที่สัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นลบ ถ้าลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเกินอาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Thermal Runaway ขึ้นได้ กล่าวคือผลจากการที่เคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำจะทำให้ลูกถ้วยฉนวนมีความต้านทานอยู่ค่าๆหนึ่งซึ่งเป็นความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบอยู่ ในสภาวะปกติลูกถ้วย

ฉนวนรองรับแรงดันที่พิทัก จะมีกระแสรั่วไหลในปริมาณเล็กน้อยทำให้เกิดความร้อนขึ้นมา เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลจะมีค่าสูงขึ้นเปรียบเสมือนว่าความต้านทานลูกถ้วยฉนวนมีค่าลดลง เป็นผลให้อุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงขึ้นอีก ค่าความต้านทานของลูกถ้วยฉนวนก็จะลดลงในขณะที่ขนาดของกระแสรั่วไหลจะเพิ่มมากขึ้นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านลูกถ้วยฉนวนเรียกว่าการเกิด Thermal Runaway โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการเกิด Thermal Runaway กล่าวคือถ้าสารกึ่งตัวนำมีค่าอิมพีแดนซ์มาก กระแสรั่วไหลก็จะมีค่าน้อย ความร้อนที่เกิดจากกระแสรั่วไหลก็จะมีน้อยด้วย ทำให้ไม่เกิด Thermal Runaway และผลการทดลองต่อมาพบว่า เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมของลูกถ้วยฉนวนสูงขึ้น ความคงทนได้ต่อแรงดันของลูกถ้วยฉนวนจะลดลง [14]

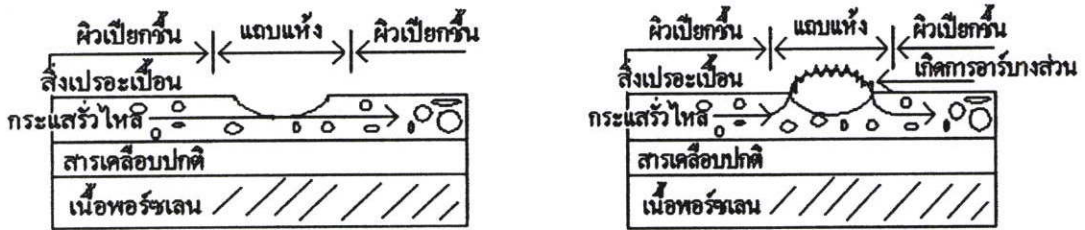
3) อิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ อิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนจะมีผลต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนและการเกิด Thermal Runaway กล่าวคือถ้าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลงค่าความคงทนต่อแรงดันภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าสูงขึ้น แต่จะทำให้ค่าความคงทนต่อการเกิด Thermal Runaway มีค่าลดลง ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำจึงมีความสำคัญที่จะต้องพิจารณา ปกติแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำจะมีค่าอยู่ในช่วง 5-100 เมกกะ โอห์ม แต่จากการพิจารณาถึงปัจจัย 2 ประการดังกล่าวซึ่งมีความขัดแย้งกัน อันเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยฉนวน พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบจะพิจารณาจากผลการเกิด Thermal Runaway เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดสอบพบว่าลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำที่จะนำไปใช้แทนลูกถ้วยฉนวนธรรมดา นั้น ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าความคงทนต่อการเกิดแรงดันวาทไฟตามผิวภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนมากกว่าลูกถ้วยฉนวนเคลือบธรรมดา 2-3 เท่าและค่าความคงทนต่อการเกิดแรงดันวาทไฟตามผิวค่อนข้างจะมีค่าคงที่เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 5-30 เมกกะ โอห์ม จากผลการทดสอบดังกล่าวนำไปสู่การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบลูกถ้วยฉนวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว ที่เคลือบด้วย Tin - Oxide ควรจะมีค่า 15 เมกกะ โอห์ม/หน่วย ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ถ้าออกแบบสำหรับลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิแวดล้อมแตกต่างกันไป [14]

#### 2.4.2 ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ

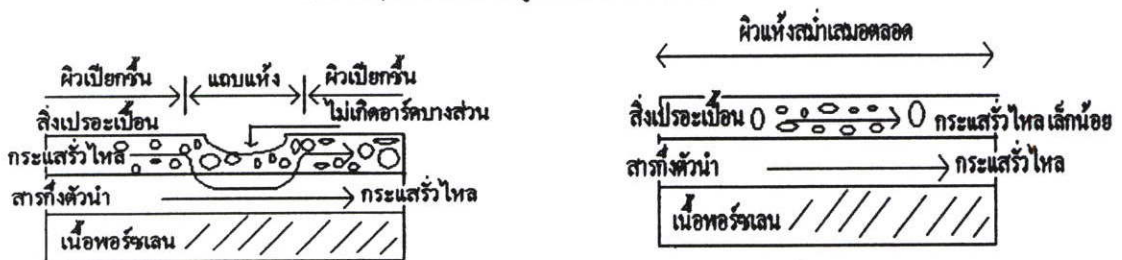
การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำมีประโยชน์อยู่หลายประการ เป็นผลจากการที่มีกระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานปกติเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบกับกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นก่อนการเกิดวาทไฟตามผิวซึ่งมีค่าประมาณ 100 mA – 1A ค่ากระแสรั่วไหลก่อนเกิดวาทไฟตามผิวนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันใช้งานของลูกถ้วยฉนวน กระแสรั่วไหลลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำที่

ระดับแรงดัน 13 kV มีค่า 0.63–0.86 mA และจากรายงานการวิจัย [14] กระแสรั่วไหลลูกถ้วยคอตัน ขาวเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ระดับแรงดัน 33 kV มีค่าประมาณ 2 mA พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก กระแสรั่วไหลที่ระดับแรงดันใช้งานปกติจะมีค่าประมาณ 0.5 W/kV ของแรงดันระบบและอุณหภูมิ ที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส [14] การเคลือบ ผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดคุณสมบัติ 3 ประการ ช่วยป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิว เนื่องจากมลภาวะคือ

1) ไม่เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญของการเกิดวาบไฟตามผิว เนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน กรณีที่มีการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำความร้อนที่เกิดจาก กระแสรั่วไหลมีการกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน ดังนั้นแทบจะไม่มีโอกาสที่ จะเกิดแถบแห้งขึ้นได้ ในกรณีที่มิมีแถบแห้งเกิดขึ้นแรงดันที่ตกคร่อมแถบแห้งจะถูกควบคุมให้มีค่า น้อยๆ ด้วยความต้านทานของสารที่เคลือบผิวดังนั้นจึงไม่เกิดการอาร์คคร่อมแถบแห้งเหล่านั้น รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบผลของการเคลือบปกติและการเคลือบสารกึ่งตัวนำต่อการเกิดการอาร์ค บางส่วนบนผิวลูกถ้วยฉนวน และวงจรสมมูลของพวงลูกถ้วยฉนวนแบบเคลือบธรรมดาและ เคลือบสารกึ่งตัวนำในสภาวะสะอาดและเปรอะเปื้อน แสดงดังรูปที่ 2.14



(ก) พฤติกรรมของลูกถ้วยเคลือบปกติ



(ข) พฤติกรรมของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ

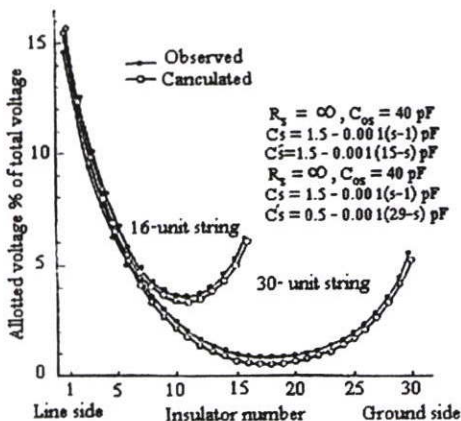
รูปที่ 2.13 การเกิดวาบไฟตามผิว (ก) ลูกถ้วยเคลือบปกติ (ข) ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ [14]

2) อุณหภูมิของผิวลูกถ้วยฉนวนสูงขึ้น เนื่องจากผลของกระแสรั่วไหลที่ไหลบนชั้นของ สารกึ่งตัวนำ ทำให้ความชื้นไม่สามารถถลันตัวบนผิวลูกถ้วยฉนวนได้ ปัญหาที่เกิดจากความชื้น รวมตัวกับสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนแล้วกลายเป็นสภาพนำไฟฟ้าจะหมดไป

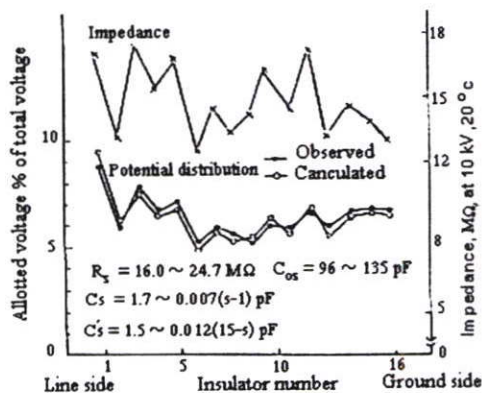


เมื่อ  $C_{os}$  คือ ค่า Self Capacitance  
 $C_s$  คือ ค่า Stray Capacitance ระหว่างลูกถ้วยฉนวนกับกราวด์  
 $C_s'$  คือ ค่า Stray Capacitance ระหว่างลูกถ้วยฉนวนกับตัวนำ  
 $R_s$  คือ ค่า Surface Resistance ถ้าเป็นลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ  $R_s$  คือ ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ และถ้าเป็นลูกถ้วยเคลือบธรรมดา  $R_s$  คือ ความต้านทานของสิ่งเปื้อน

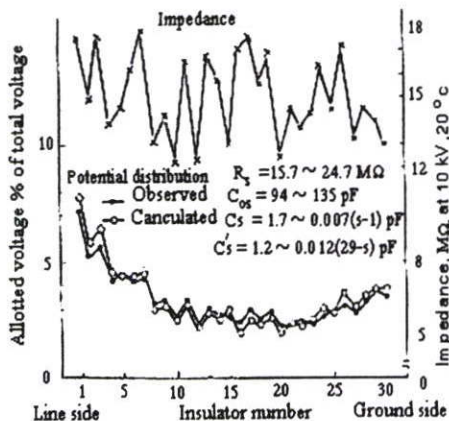
$U(s)$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยลูกที่  $s$



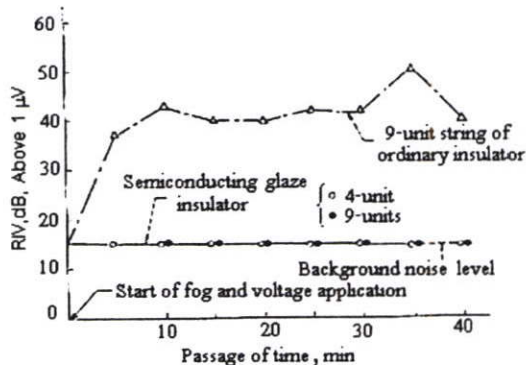
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.15 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (ก) พวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดา 16 และ 31 ยูนิต (ข) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 16 ยูนิต (ค) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 30 ยูนิต (ง) ลักษณะสมบัติ RIV ของพวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดาและลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะเปื้อน [14]

## 2.5 กระแสรั่วไหล

กระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมในการใช้งานลูกถ้วยฉนวน กระแสรั่วไหลเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเกิดควาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเกิดได้ง่ายขึ้น การที่ลูกถ้วยฉนวนมีกระแสรั่วไหลอยู่ต่อเนื่องตลอดจะทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนได้รับความเสียหายโดยเฉพาะลูกถ้วยยางซิลิโคนและลูกถ้วยประเภทวัสดุผสม (Composite insulator) จะทำให้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำลดลง และการกระจายของสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเปลี่ยนแปลงไป การใช้งานลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำจะมีกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ขนาดของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากระแสรั่วไหลสำหรับลูกถ้วยฉนวนชนิดอื่นๆ กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดพลังงานสูญเสียอย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุปกรณ์ประกอบที่ต่อร่วมกับลูกถ้วยฉนวนร้อนขึ้นอีกด้วย จากผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเกี่ยวกับกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวน

กระแสรั่วไหลผ่านผิวลูกถ้วยฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ [14]

- 1) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวน
- 2) ปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน ในกรณีที่เป็นสิ่งเปราะเปื้อนประเภทละลายน้ำได้ เมื่อสิ่งเปราะเปื้อนดังกล่าวเปียกขึ้นความต้านทานผิวของลูกถ้วยฉนวนจะลดลง กระแสรั่วไหลก็จะเพิ่มขึ้น สิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำไม่ได้เป็นสาเหตุให้กระแสรั่วไหลมีขนาดเพิ่มขึ้นแต่จะช่วยให้สิ่งเปราะเปื้อนประเภทละลายน้ำได้เกาะอยู่ตามผิวของลูกถ้วยฉนวน
- 3) คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวน จากรายงานการวิจัยพบว่าในระยะแรกของการติดตั้งใช้งานลูกถ้วยยางซิลิโคน คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของลูกถ้วยยางซิลิโคน มีค่าคงที่ในทุกสภาพเปราะเปื้อน
- 4) แรงดันของระบบ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มของแรงดันใช้งานของลูกถ้วยฉนวนเช่นระบบ 780 kV ขนาดค่าขอดของกระแสรั่วไหลประมาณ 800 mA และค่าขอดอาจจะมีค่าถึง 1.4 A ก่อนที่ลูกถ้วยฉนวนจะเกิดควาบไฟตามผิว ในขณะที่ระบบ 250 kV จะมีค่าขอดของกระแสรั่วไหล ประมาณ 660 mA ก่อนการเกิดควาบไฟตามผิว [14]
- 5) ลักษณะแวดล้อมโดยทั่วไปแล้ว กระแสรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับลักษณะธรรมชาติแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานอยู่ เช่น ความชื้น และการเกิดฝนตก สภาพหมอก เป็นต้น

กระแสรั่วไหลในสภาวะปกติจะเป็นกระแสคาปาซิทีฟ (Capacitive Current) เมื่อลูกถ้วยฉนวนเปราะเปื้อนและเปียกขึ้น ขนาดของกระแสรั่วไหลก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นและกลายเป็นกระแสรีซิสทีฟ (Resistive Current) [14]

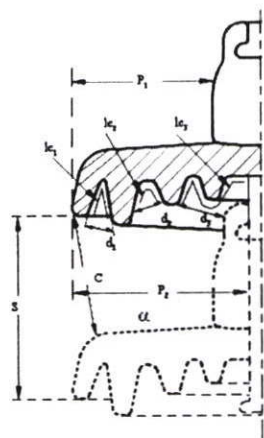
## 2.6 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาพเปรอะเปื้อน [14]

เงื่อนไขการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนจะพิจารณาถึงประเภทของลูกถ้วยฉนวนและสภาพแวดล้อมที่จะนำลูกถ้วยฉนวนไปติดตั้งใช้งาน ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำมาใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อนควรจะได้รับ การออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดควาไฟฟ้าตามผิวได้ง่าย ปัญหาการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ

1) ระดับของความเปรอะเปื้อนและชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อน รวมทั้งสภาพแวดล้อมบริเวณที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือทิศทางการพัดของลม โดยทั่วไประดับของความเปรอะเปื้อนจะพิจารณาเป็นค่า ESDD ค่า ESDD ที่จะนำมาพิจารณานั้นจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดทดสอบมาเป็นระยะเวลาพอสมควร ค่าที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางด้านสถิติ ค่าสูงสุดของ ESDD จะนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อการออกแบบ เมื่อพิจารณาประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนคั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 2.3.1 พบว่าในกรณีสิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล เกลือทะเลจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะทำให้เกิดควาไฟฟ้าตามผิว และในกรณีสิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย พาวด์วัตถุเฉื่อย(Inert material)จะมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า(Withstand voltage) ของลูกถ้วยฉนวน โดยตรง

2) ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวน การออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดแรงดันเกิน ค่าแรงดันที่จะใช้ออกแบบเพื่อให้เป็นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนนั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีระดับเผื่อ (margin) สูงกว่าแรงดันเฟสใช้งานคือประมาณ 10-20% กรณีการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ (Transient overvoltage) ความคงทนต่อแรงดันเกินจะมีค่าลดลง ถ้าผิวของลูกถ้วยฉนวนมีความเปรอะเปื้อน

3) รูปร่างของลูกถ้วยฉนวน กำหนดด้วยการขึ้นรูปของวัสดุในกระบวนการผลิต รูปร่างและขนาดของลูกถ้วยฉนวนจะสัมพันธ์โดยตรงกับการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย การทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยลมและฝน รวมทั้งการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย IEC 815 [13] ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบปีกของลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



$$C > 30 \text{ มม.}$$

$$S/P \geq 0.8$$

$$Ld/d < 5$$

$$P_1 - P_2 \geq 15 \text{ มม.}$$

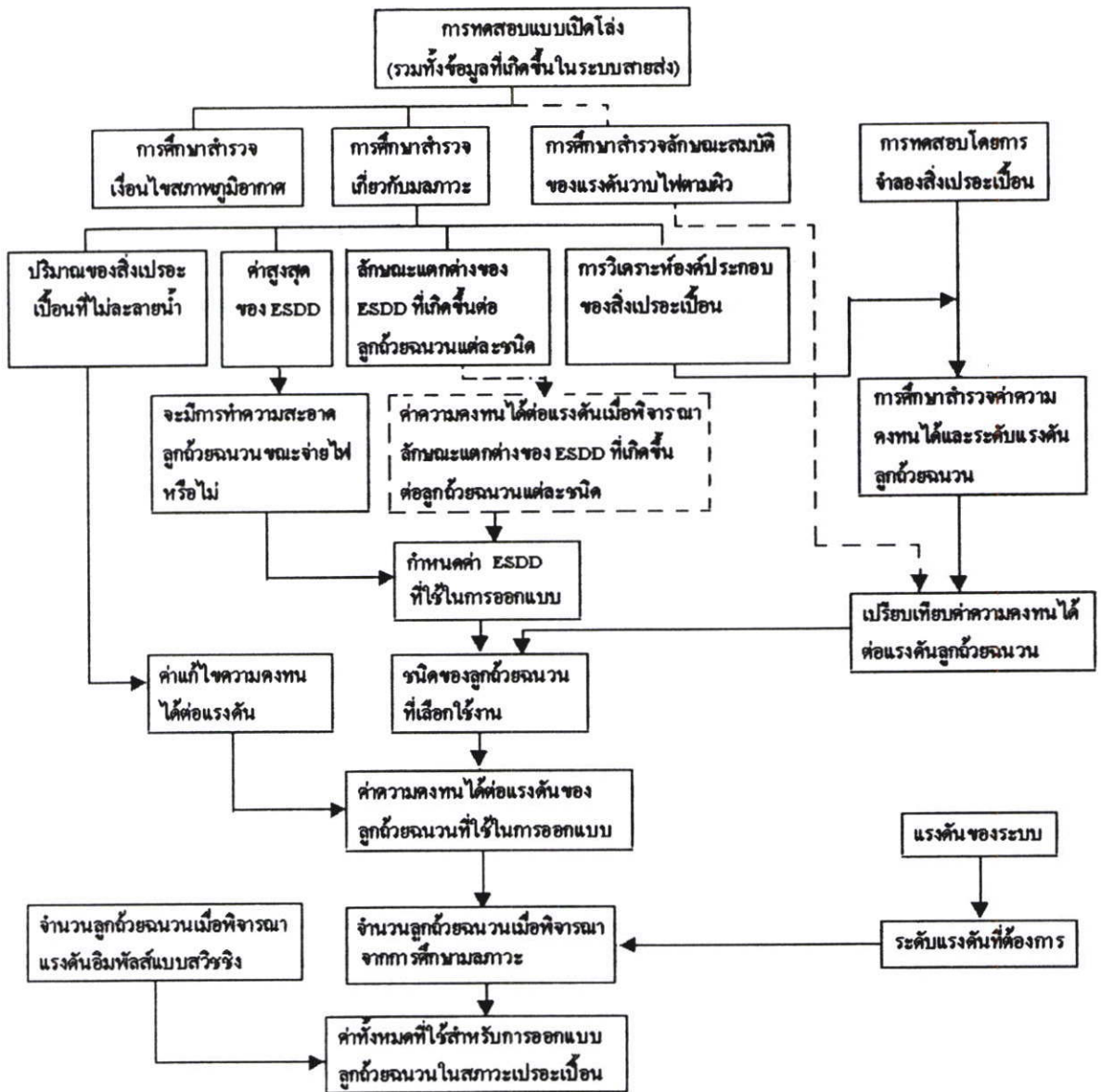
$$\alpha > 5^\circ$$

$$C.F. \leq 4 \text{ ระดับสูงและสูงมาก}$$

$$P.F. > 0.7 \text{ ระดับสูงและสูงมาก}$$

รูปที่ 2.16 ลักษณะปีกครีบของลูกถ้วยฉนวนและค่าที่แนะนำให้ใช้ [13]

- โดยที่
- C คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน
  - S คือ ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใดๆ
  - P คือ ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากคอตัน โดยที่  $P_1$  และ  $P_2$  เป็นความกว้างของปีกยาวและปีกสั้นตามลำดับ
  - d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก
  - $L_c$  คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดควัดค่า
  - $\alpha$  คือ มุมของปีกที่ทำกับแนวระนาบ
  - l คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดควัดค่า
  - C.F. คือ แฟกเตอร์ระยะรั้ว = ระยะรั้วของลูกถ้วย / ระยะอาร์กของลูกถ้วย
  - P.F. คือ แฟกเตอร์ภาพด้านข้าง =  $(2P_1 + 2P_2 + S) / l$

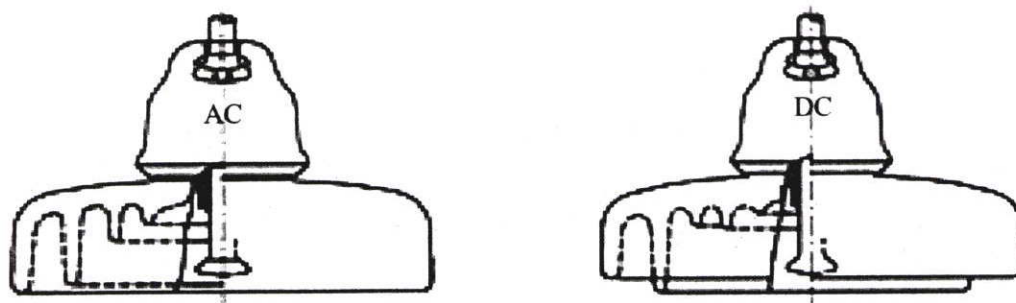


รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อน [14]

## 2.7 ความสัมพันธ์ของการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งและกระแสดลัด

ความแตกต่างระหว่างลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสดร่งและกระแสดลัดคือลักษณะรูปร่างของครีป ดังแสดงในรูปที่ 1 เพราะฉะนั้นคุณลักษณะของลูกถ้วยทั้ง 2 ชนิดจึงจะแตกต่างกัน สามารถเปรียบเทียบแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยทั้ง 2 แบบที่ใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อนรุนแรงด้วยสมการที่ 2.10 ซึ่งค่า F ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5 เป็นประโยชน์ในการนำไปออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสดร่ง [15]

$$F = (\text{Peak AC flashover voltage}) / (\text{DC flashover voltage}) \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.18 รูปร่างที่ต่างกันของลูกถ้วยกระแสสลับและกระแสตรง

ตารางที่ 2.5 ระยะ Creepage ค่าสุดท้ายที่แนะนำให้ใช้ในระบบกระแสตรง [15]

Required for AC (mm/kV(RMS),system)	Indicated severity		Factor F		Deduced DC creepage (mm/kV)	
	Type	mg/cm <sup>2</sup>	Antifog	Standard/ long rod	Antifog	Standard/ long rod
16.0	light	0.03-0.06	1.8	1.4	35.3	27.4
20.0	medium	0.1-0.2	2.1	1.7	51.4	41.6
25.0	heavy	0.3-0.6	2.4	2.0	73.5	61.2
32.0	extreme	> 0.6	> 2.4	> 2.0	> 94.1	> 78.4

## 2.8 การคำนวณของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ปัจจัยที่สำคัญต่อสมรรถนะของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้แก่ คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานในระบบในสภาวะแรงดันปกติของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงเกิดการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเนื่องมาจากการเปรอะเปื้อนหรือเนื่องจากครีมีที่เกิดสภาวะเปียก ทั้งนี้ไม่มีการเกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) ในระบบ สำหรับการป้องกันปัญหาในลักษณะดังกล่าวอาจสามารถทำได้โดยการบำรุงรักษา เช่น การทำความสะอาด การทำเคลือบผิวด้วยสารโพลีโนมิก หรือการเพิ่มฉนวนเข้าไป

ดังนั้นการทราบถึงสมรรถนะของลูกถ้วยฉนวนของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในเรื่องมลภาวะที่เกาะติดผิวลูกถ้วยและในสภาวะสภาพอากาศแบบต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับโดยปกติ Lighting หรือ Switching Surge จะเป็นตัวกำหนดระยะห่างปลอดภัย ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับแรงดันในระดับต่างๆ มีเพียงในบางกรณี เช่น

พื้นที่อยู่ใกล้ทะเล เขตโรงงานอุตสาหกรรม ที่จะใช้ตัวกำหนดค่านมภาวะในการออกแบบ สำหรับในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้ว การวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนยังสามารถเกิดขึ้นในสถานะอื่นอีก เช่น การวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงสามารถเกิดขึ้นได้แม้แต่ในบางพื้นที่ ที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงอยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ซึ่งสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับไม่เกิดการวางไฟตามผิวเลย หรือแม้แต่ในพื้นที่ ที่มีสภาพภูมิอากาศที่ค่อนข้างสะอาดก็สามารถเกิดการวางไฟตามผิวได้

ปัจจัยสำคัญต่อสมรรถนะของการเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนที่มีผลต่อระบบความน่าเชื่อถือของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมากกว่า ลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ทั้งนี้เนื่องมาจากฝุ่นละอองที่มีคุณสมบัติเป็นประจุในบริเวณที่มีแรงดึงดูดของ Electrostatic จากสายส่งไฟฟ้าทำให้ฝุ่นละอองเหล่านี้เกาะติดที่ผิวลูกถ้วย อีกประการหนึ่ง ความคงทนต่อการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสามารถลดน้อยลงกว่าความคงทนของลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่ระดับความเปราะเปื้อนเดียวกัน

ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบการฉนวนของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้แก่ค่า Specific Leakage Distance ซึ่งได้จากค่า Leakage Distance ทั้งหมดของพวงลูกถ้วยฉนวนหารด้วย Pole to Ground Operating Voltage สายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีการใช้ Specific Leakage Distance ที่ในย่านกว้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากการคาดการณ์ของการเปราะเปื้อน หรือสภาพอากาศ และค่า ความคงทนต่อการเกิดวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่เลือก อีกประการหนึ่งลักษณะรูปร่างของลูกถ้วย รวมทั้งชนิด และขนาดมีผลสำคัญต่อความสามารถต่อการเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

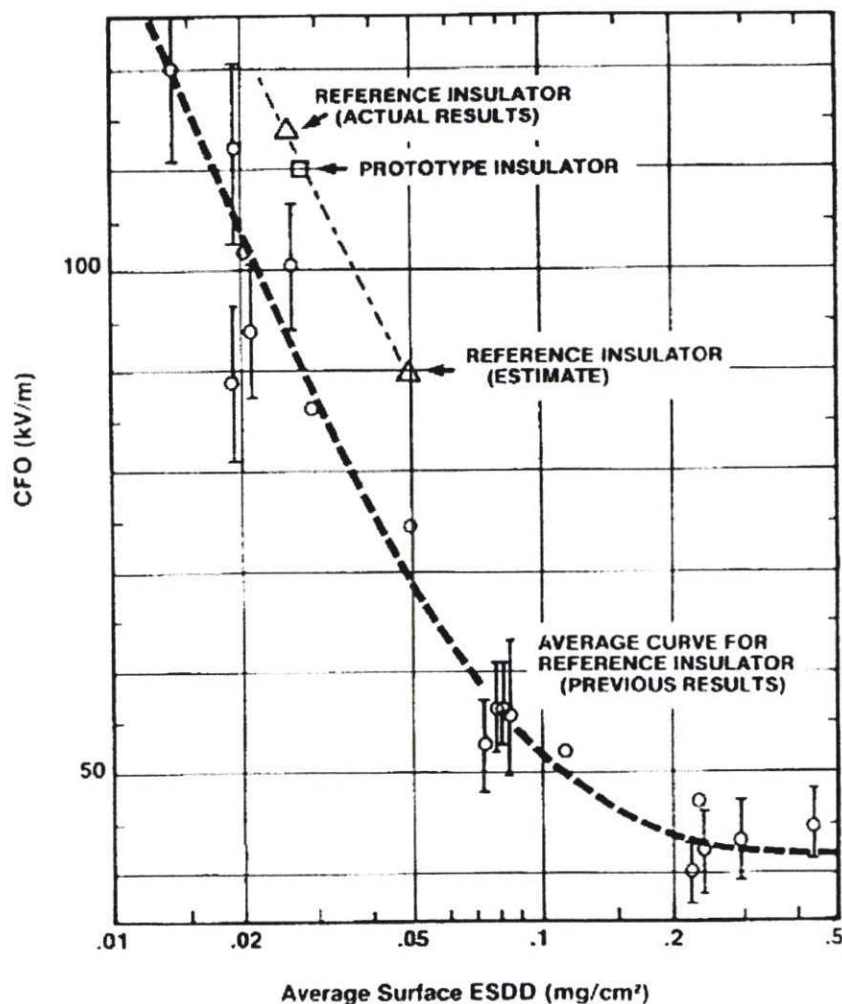
## 2.9 ปัจจัยต่างๆ ต่อสมรรถนะการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน [16]

### 2.9.1 ขั้ว (Polarity)

ได้มีการทดสอบลูกถ้วยสองขั้วต่างกัน ขั้วมีผลต่อการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยในช่วงระดับ ESDD จาก 0.01 – 0.04 mg/cm<sup>2</sup> ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับรายงานอื่นๆ โดยพบว่าขั้วลบมีระดับ Critical Flashover Voltage (CFO) ต่ำกว่าขั้วบวก สำหรับ ฉ. จุดที่ ระดับ ESDD ประมาณเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.01 mg/cm<sup>2</sup> ทั้งสองขั้วมีระดับแรงดันที่เกิดการวางไฟตามผิวใกล้เคียงกัน เนื่องจากแรงดันที่เกิดการวางไฟตามผิวในขั้วลบมีค่าต่ำกว่าดังนั้นในการทดสอบเพื่อข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบลูกถ้วยจะใช้การทดสอบโดยขั้วลบ

### 2.9.2 ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) [17]

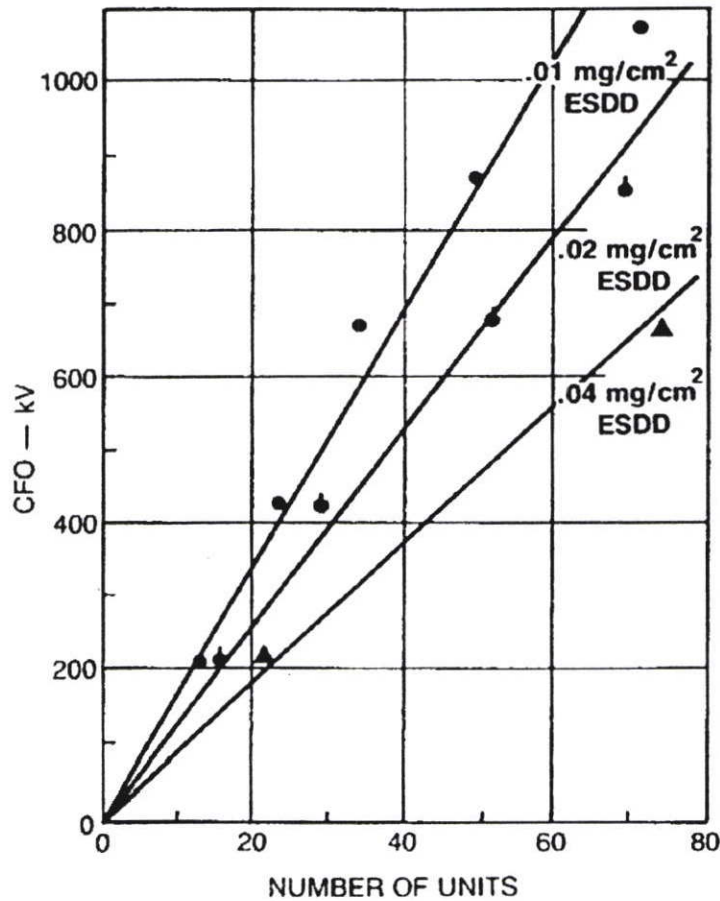
สำหรับลูกถ้วยที่มีการเปราะเปื้อนเกาะติดอยู่จะทำให้ค่า CFO (Critical flashover,  $U_{b50\%}$ ) ของลูกถ้วยลดลงซึ่งแสดงดังรูป โดยในแกนแนวตั้งเป็นค่า CFO ส่วนแนวนอนจะเป็นค่า ESDD ที่เกาะผิว Bottom ของลูกถ้วย จากกราฟช่วงที่น่าสนใจคือ ESDD อยู่ในระหว่างช่วง 0.01 - 0.1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  ที่ความชันของเส้นกราฟลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.19 CFO ต่อค่าเฉลี่ยของ ESDD [17]

### 2.9.3 ความยาว

การทดสอบพบการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของพวงลูกถ้วยฉนวน และระดับความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วย



รูปที่ 2.20 ค่า CFO กับความยาวของพวงลูกถ้วยฉนวนและค่าของ ESDD ที่มีค่าการเกาะติดแบบ

สม่ำเสมอในลูกถ้วย M fog type [17]

### 2.9.4 จำนวน Nonsoluble Material

จากการทดสอบโดยการจำลองโดยใช้ Nonsoluble Material นำมาละลายแล้วพ่นใส่ที่ผิวลูกถ้วยก็จะเกิดฟิล์มบางๆเช่นเดียวกับลักษณะที่มีฝุ่นเกาะ จากการทดสอบพบจำนวนของ Nonsoluble Material มีผลต่อค่าแรงดันวางไฟตามผิว ทำให้ค่าของแรงดันวางไฟตามผิวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ Nonsoluble Material ดังแสดงในรูปที่ 2.21

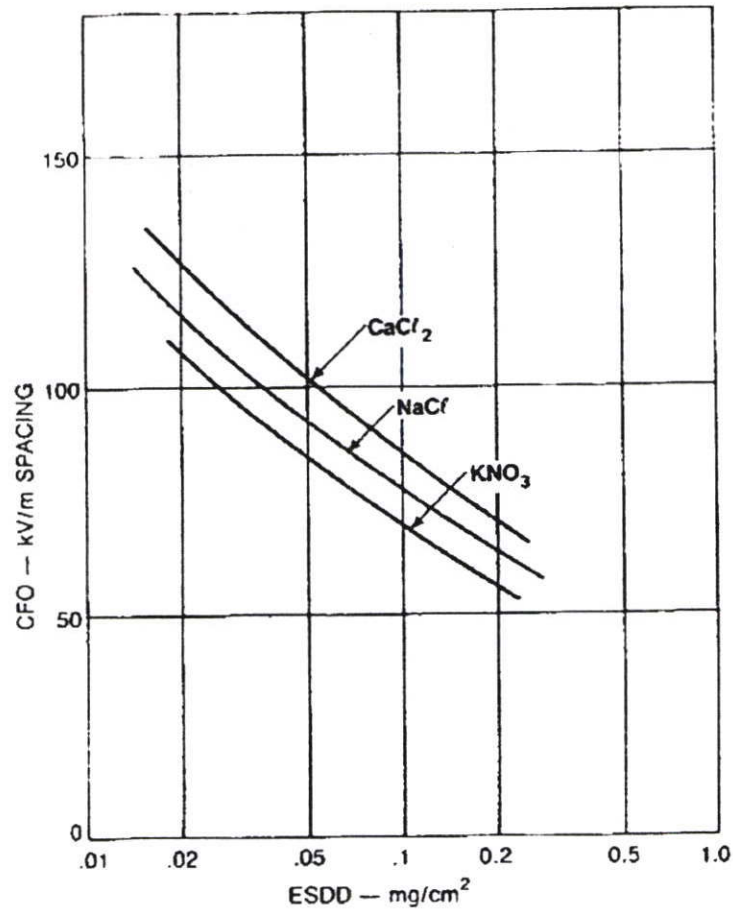
**DEPENDENCE OF CFO ON NONSOLUBLE CONTENT OF SLURRY  
REFERRED TO ESDD = 0.1 mg/cm<sup>2</sup>**

Insulator Type	Slurry (g/l kaolin)/(g/l NaCl)	CFO (per unit, 40/40 = 1)
B	20/40	1.13
	40/40	1.0
	80/80	0.97
D	20/40	1.19
	40/40	1.0
	80/40	0.82
E	20/40	1.17
	40/40	1.0
	80/40	0.94

รูปที่ 2.21 ค่า CFO กับการเกาะติดของ Nonsoluble Material [17]

### 2.9.5 ชนิดของ Salt

โดยปกติ Sodium Chloride จะใช้สำหรับการทดสอบระบบกระแสสลับและ กระแสตรง จากการทดสอบ Salt ชนิดต่างๆจะมีผลต่อค่าแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยต่างกันไป สำหรับในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ Sodium Chloride (NaCl) จะทำให้ค่า CFO ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับ Salt ชนิดอื่นๆ สำหรับในระบบกระแสตรงมีข้อมูลน้อยมากสำหรับผลของความแตกต่างของ Salt ชนิดต่างๆ ได้มีการทดสอบโดยใช้ Calcium Chloride, Sodium Chloride และ Potassium Nitrate ซึ่งผลที่ได้คือรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ผลของชนิดของ Salt ที่มีผลต่อ CFO ในที่ระดับ ESDD ต่างๆ [17]

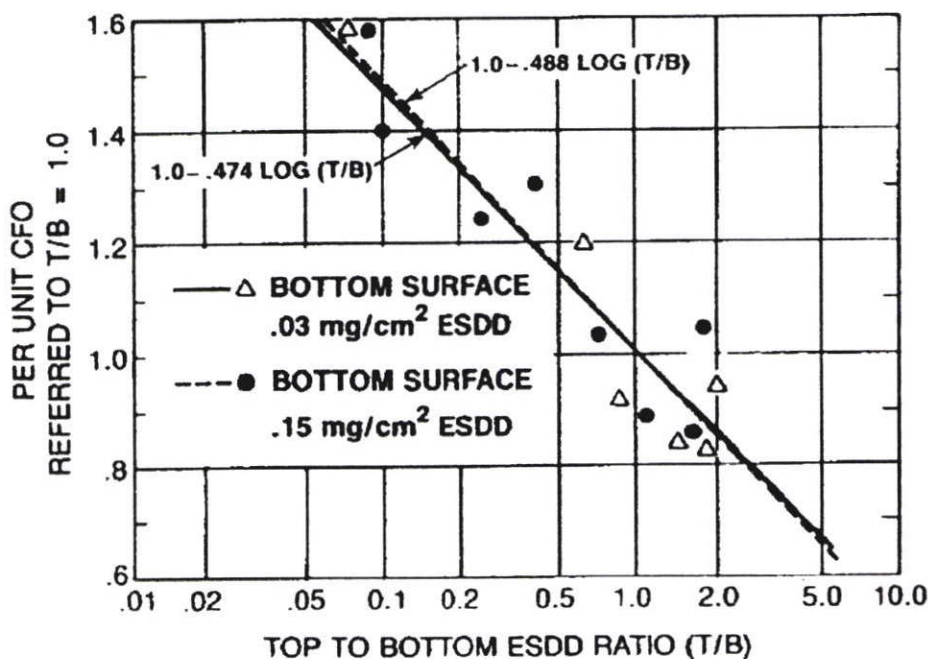
### 2.9.6 ความไม่สม่ำเสมอของสิ่งประอะเป็อนของพวงลูกด้วย

ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ระดับการจับเกาะของสิ่งประอะเป็อนของพวงลูกด้วยฉนวนก่อนข้างเกิดไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการทดสอบโดยการแบ่งพวงลูกด้วยฉนวน ออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรก 64% ที่ติดกับ Ground End มีค่า ESDD 0.04 mg/cm<sup>2</sup> ส่วนที่สอง 21 % อยู่ช่วงกลางพวงลูกด้วยฉนวนมีค่า ESDD 0.08 mg/cm<sup>2</sup> และส่วนที่สามติดกับ Line End จำนวน 15 % มีค่า ESDD 0.16 mg/cm<sup>2</sup> โดยมีค่า ESDD เฉลี่ย 0.07 mg/cm<sup>2</sup> การทดสอบพบว่าค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของพวงลูกด้วยฉนวนมีค่าเท่ากับ ESDD เฉลี่ย จะน้อยกว่าประมาณ 20% ของค่า พวงลูกด้วยฉนวนที่มีค่าเท่ากับ ESDD ที่เกิดอย่างไม่สม่ำเสมอ สำหรับค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของ พวงลูกด้วยฉนวนที่เกิดอย่างไม่สม่ำเสมอสามารถหาได้จากผลรวมของค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของแต่ละลูก

### 2.9.7 อัตราส่วนของ ESDD ระหว่างผิวด้านบน กับพื้นผิวด้านล่าง

จากการวัดค่าของการเกาะติดของสิ่งประอะเป็อน ในลูกด้วยฉนวนกระแสตรงพบมีว่า อัตราส่วนของ ESDD ระหว่างผิว Top กับ Bottom ก่อนข้างอยู่ในย่านกว้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพ

พื้นที่ และช่วงเวลาที่ทำการวัด โดยปกติผิวด้าน Top จะถูกชะล้างโดยลมและฝนได้มากกว่าผิวด้านล่างสำหรับลูกถ้วยแบบ Cap and Pin การทราบถึงผลที่มีต่อผิวด้าน Top ที่ค่อนข้างสะอาดของลูกถ้วยกับ แรงดันวาบไฟตามผิวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมในพื้นที่ที่มีการเกาะจับของสิ่งเปรอะเปื้อน ได้มีการทดสอบโดยจำลองค่าอัตราส่วน ESDD ของ Top ต่อ Bottom โดยคงที่ค่า Bottom ไว้แล้วเปลี่ยนค่า Top แล้วหาค่า CFO ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 อัตราส่วน ESDD ของ Top ต่อ Bottom ที่มีต่อค่า CFO [17]

2.9.8 พวงลูกถ้วยฉนวนคู่ และเดี่ยว

ได้มีการทดสอบสำหรับการใช้ลูกถ้วยเดี่ยวหรือคู่เปรียบเทียบค่า CFO จากการทดสอบพบว่า การวางลูกถ้วยเดี่ยวหรือคู่ ไม่ค่อยมีผลต่อค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.24

PERFORMANCE OF SINGLE AND DOUBLE VERTICAL INSULATORS STRINGS (P3)

Configuration	Polarity	Average ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )	CFO (kV/m spacing)
Single	Negative	.026	102.3
Single	Positive	.023	122.3
Double	Negative	.025	99.7
Double	Positive	.026	119.1

รูปที่ 2.24 การเปรียบเทียบค่า CFO ของลูกถ้วยเดี่ยว และคู่ [17]

## 2.10 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

### 2.10.1 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง [18]

การส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Kind of DC link) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ดังนี้

1) ระบบขั้วเดียว (Monopolar Link) โดยที่ระบบขั้วเดี่ยวนี้อาจมีสายตัวนำ 1 สายตัวนำ ซึ่งโดยปกติจะเป็นขั้วลบ และเส้นทางเดินการไหลกลับถ้าไม่เป็นพื้นดินก็จะเป็นน้ำ ซึ่งโดยปกติแล้วมักใช้ระบบนี้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการส่งจ่าย โครงสร้างของระบบชนิดนี้จะเป็นตัวที่พัฒนาไปสู่การใช้ระบบแบบ Bipolar การใช้พื้นดินแทนในการทำให้ครบวงจร สถานที่หรือพื้นดินที่ใช้ไม่ควรจะเป็นความต้านทานสูงหรือมีสิ่งรบกวนจากใต้ดินและใต้น้ำ รูปแบบตัวนำในการทำให้ครบวงจรจะใช้กับแรงดันค่า ดังแสดงในรูป 2.25

2) ระบบสองขั้ว (Bipolar Link) โดยที่ระบบสองขั้วนี้จะมีสายตัวนำ 2 สายตัวนำ ตัวนำใดตัวนำหนึ่งจะเป็นขั้วบวกหรือลบ ซึ่งแต่ละสถานีในปลายทางนั้นมีระดับในการแลกเปลี่ยนพลังงานเท่าๆกัน โดยในการต่อจะเชื่อมแบบอนุกรมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะมีจุดต่อของกราวด์ระหว่างตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในสภาวะปกติจะมี 2 ขั้วเท่าๆกัน และมีกราวด์ 2 ขั้วสามารถจะมีอิสระ ถ้าขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดแยกออกไปเนื่องจากเกิดความผิดปกติ (Fault) บนตัวนำ ขั้วที่เหลือสามารถจะใช้กราวด์แทนได้ และทำให้ส่วนที่เหลือสามารถส่งแรงดันได้ หรืออาจเมื่อเกิดแรงดันเกิน (overload) ในตอนแลกเปลี่ยนแรงดันกันบนสาย

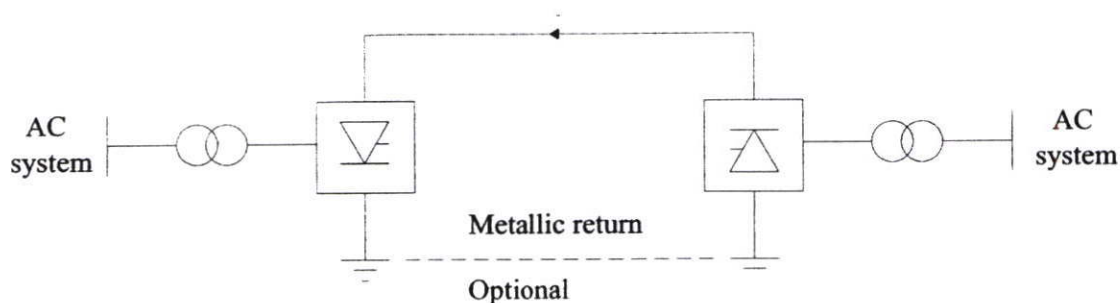
จากภาพแสดงรูปแบบของ HVDC แบบ Bipolar จะเห็นประสิทธิภาพของปริมาณของแรงดันการจ่ายแบบ Double – Circuit ภายใต้อาการที่ปกติ ซึ่งมันทำให้เกิดสัญญาณรบกวนของ Harmonic น้อยกว่าในระบอบทางที่ใกล้เคียง ซึ่งจะดีกว่าแบบ Monopolar และทิศทางของการไหลกลับของกำลังจะได้มาโดยการเปลี่ยนแปลงความแตกต่างของขั้วของการควบคุม (ไม่ใช่กลไกทาง Switch)

ในสภาวะที่กราวด์ไม่ทนพอหรือเมื่อไหร่ขั้วของกราวด์ไม่เหมาะสมเนื่องจากความต้านทานของพื้นดินมีค่าที่สูง ตัวนำกลาง 3 ตัวนำมันจะใช้ในการไหลย้อนกลับและเมื่อไหร่ที่ขั้วใดขั้วหนึ่งออกจากการใช้งานหรือเมื่อเกิดการไม่สมดุลของการทำงานระหว่าง Bipolar ซึ่งจำเป็นจะต้องกำหนดให้ 3 ตัวนำมีจำนวนที่ต่ำและสามารถใช้ในสถานะที่ใช้เกาะสายไฟ เพื่อใช้ในการส่งแบบเหนือศีรษะ ถ้าจำนวนเพียงพอมันสามารถใช้เป็นส่วนรองรับ ดังแสดงในรูป 2.26

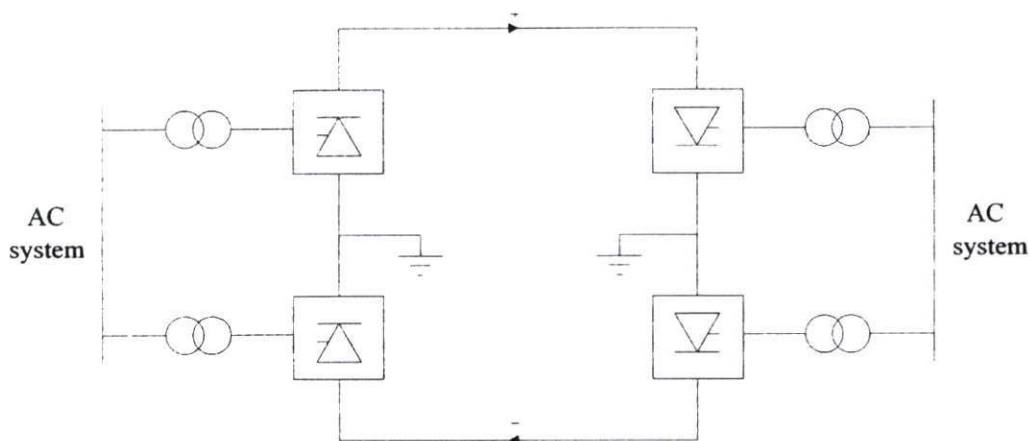
3) ระบบขั้วเดียวร่วมกัน (Homopolar Link) ระบบขั้วเดียวร่วมกันจะมีสายตัวนำ 2 ตัวนำ หรือมีตัวนำมากกว่า ทั้งหมดมีขั้วคล้าย Bipolar ปกติขั้วมักจะเป็นลบมากกว่าเพราะเนื่องจากว่ามันทำให้เกิดสัญญาณรบกวนของ Corona น้อยกว่า โดยจะไหลย้อนกลับเข้าสู่ระบบกราวด์ เมื่อไรที่เกิด Fault บนตัวนำใดตัวนำหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในส่วนที่ตัวนำวางอยู่ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังมากกว่าของกำลังปกติในตอนที่ไม่โหลดมาก ความแตกต่างในแนว

Bipolar ในการเชื่อมต่อของการเปลี่ยนแปลง 1 ขั้วเส้นทางจะมีความยุ่งยากมากกว่าและปกติไม่เหมาะสม ในแบบ Momopolar โครงสร้างมีประโยชน์ในสถานการณ์ที่ระบบกราวด์เป็นแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูป 2.27

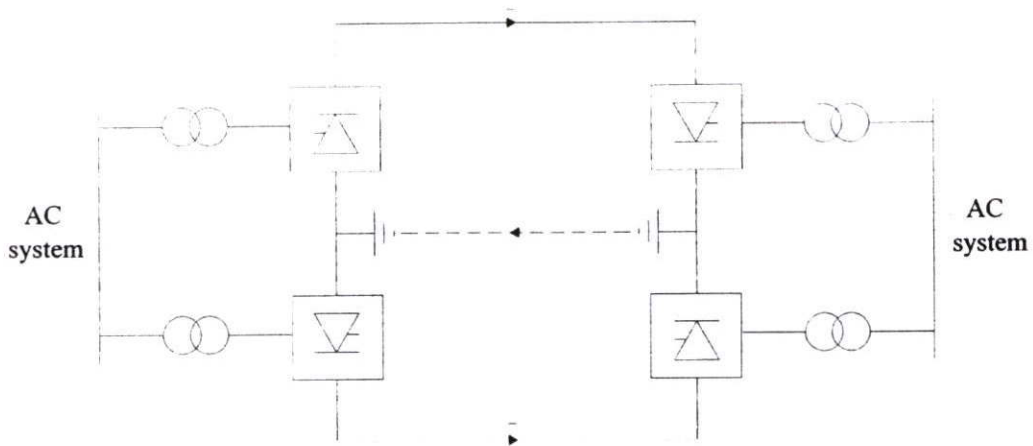
จาก 3 ระบบดังกล่าวเป็นการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง ในกรณีที่ต้องการส่งพลังงานระหว่างหลายจุดก็สามารถที่จะทำได้ ซึ่งเรียกระบบนี้ว่าระบบหลายขั้ว (Multiterminal System) ซึ่งการเชื่อมโยงอาจเป็นแบบขนาน หรืออนุกรมก็ได้



รูปที่ 2.25 Monopolar HVDC Link



รูปที่ 2.26 Bipolar HVDC Link



รูปที่ 2.27 Homopolar HVDC Link

### 2.10.2 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ [18]

1. ระบบผลิต (Generation System)
2. ระบบส่งจ่าย (Transmission System) และระบบส่งจ่ายย่อย (Sub Transmission System)
3. ระบบจำหน่าย (Distribution System)

โดยจะมีการผลิตไฟฟ้าและมีหน้าที่รับผิดชอบด้วยกันคือ 1) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 3) การไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยจะส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 138 ถึง 765 kV เป็นมาตรฐานแรงดันซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน ANSI C-84 (American National Standards Institute) สำหรับแรงดันไฟฟ้าระบบส่งจ่ายย่อยปกติจะมีแรงดันเท่ากับ 34.5 ถึง 115 kV

ตารางที่ 2.6 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย

ประเภทแรงดัน	แรงดันระหว่างไลน์ ( V )
แรงดันต่ำ	220/380 ( 3 เฟส 4 สาย )
แรงดันระดับปานกลาง	12,000
	22,000
	24,000
	33,000
	69,000
แรงดันสูง	115,000
	230,000
	500,000
แรงดันสูงพิเศษ	

เมื่อเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบกระแสสลับ และกระแสตรงพบว่า

1. เมื่อใช้สายตัวนำรวมเท่ากัน ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถส่งจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากในระบบกระแสตรงนั้นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) จะมีค่าเป็นศูนย์ เพราะค่าความถี่เท่ากับศูนย์
2. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จะมีประสิทธิภาพ และค่าแรงดันเรกกูเลชัน (Voltage Regulation) ดีกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะมีความน่าเชื่อถือสูงทางด้านความมั่นคงของการส่งกำลังไฟฟ้า
4. ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะสามารถเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่แตกต่างกันได้ เนื่องจากไม่มีระบบการซิงโครไนส์ (Synchronous)
5. ถึงแม้ว่าราคาของอุปกรณ์ชุดคอนเวอเตอร์ยังมีราคาแพงแต่เมื่อมีการส่งจ่ายที่ระยะทางไกลๆ ค่าใช้จ่ายโดยรวมของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีราคาถูกกว่า เพราะสายส่งกระแสสลับในหนึ่งวงจรจะต้องใช้สายไฟถึง 3 เส้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสตรงจะใช้เพียงแค่ 2 เส้น และในกรณีที่ระบบกระแสตรงใช้ Earth Return จะใช้สายส่งเพียงแค่เส้นเดียวเท่านั้น
6. ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันได้เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งปัจจุบันได้พยายามแก้ไขปัญหานี้โดยการพัฒนา นำเอาสารกึ่งตัวนำมาใช้เป็นสวิตช์

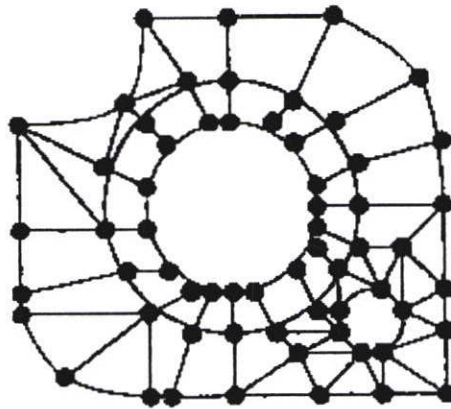
## 2.11 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [20]

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศ และการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่างๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก ความสามารถของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและ โครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าว ทำให้

ให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักรออกแบบทั่วไปอย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวังผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

### 2.11.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FINITE ELEMENT METHOD: FEM)

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแน่นอนตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กัน ตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแน่นอนตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วย เอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการดังกล่าวข้างต้นนี้เป็นนัยว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง

จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่าความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใดลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบการกระจายเชิงเส้นตรง (Linear Distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่าง เช่น หากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ และหาเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ให้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้วอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

### 2.11.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า

เริ่มแรกในปี 1943 ได้นำเอาทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์งานทางด้านโครงสร้างในวิศวกรรมโยธายังมิได้นำมาใช้งานวิศวกรรมไฟฟ้า ต่อมาได้มีการค้นคว้า และนำมาใช้งานหลายแขนง จนกระทั่งในปี 1986 ได้มีผู้ประยุกต์นำเอาหลักการมาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า (Electromagnetic, EM) เป็นงานพื้นฐานไปสู่ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบสมมาตร และอื่นๆ อีกมากมายอย่างการแก้สมการคลื่น (Wave Equation)

สำหรับในโครงการนี้จะได้นำเอาหลัก และวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ มาวิเคราะห์แก้ไขปัญหาสนามไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อจนวนในลักษณะรูปทรงแบบต่างๆ โดยการประยุกต์การประมวลผล, ผลหาค่าตอบจากเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) ลักษณะงานเป็นแบบการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้นเราให้ความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) ในแบบต่างๆซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์ที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด

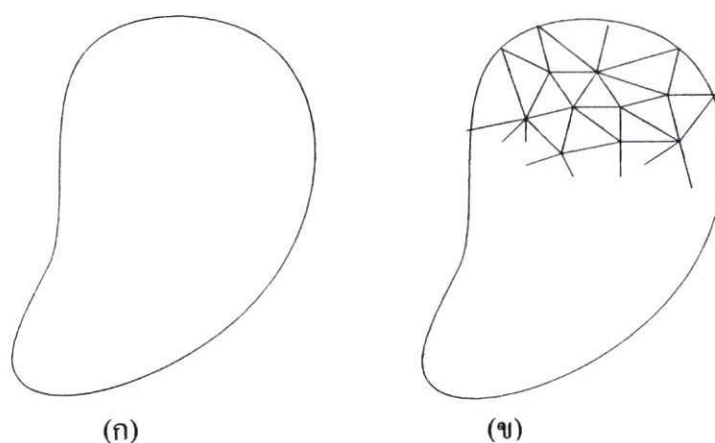
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (Interpolation Functions)” ซึ่งการคำนวณจะต้องทำหลายขั้นตอน

และใช้เวลานานเพื่อกระทำการที่ซ้ำไปซ้ำมาด้วยเหตุนี้เราจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เพื่อให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

### 2.11.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์

วิศวกรมีความจำเป็นมากที่จะต้องทำความเข้าใจกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสิ่งหนึ่งที่สำคัญจำเป็นต้องทราบก็คือลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆเพื่อจะนำไปออกแบบตัวอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการแบ่งรูปทรงโครงสร้างที่ยาก และซับซ้อนออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆที่เรียกว่า “เอลิเมนต์ (Element)” ตามชนิดของการวิเคราะห์ภายในขอบเขตของชิ้นงาน โดยทั่วไปนิยมการวิเคราะห์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ ชิ้นส่วนเล็กๆ ในแต่ละรูปนั้นจะต้องไม่ทับซ้อนกันพิจารณาดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ

- เมื่อ (ก) คือ ขอบเขตของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์  
(ข) คือ การแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นโครงข่าย (Mesh)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.29 (ก) เป็นของเขตงานหรือวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งในระบบหนึ่งนั้นประกอบไปด้วย

1) ระบบ (System) ลักษณะทางกายภาพของงานหรือวัสดุที่เราจะนำมาวิเคราะห์อาจเป็นของแข็ง (Solids), ของเหลว (Liquids), ก๊าซ (Gases), อากาศ (Air) หรือส่วนผสมอันเนื่องมาจากวัสดุสองชนิด

2) โดเมน (Domain) ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตของระบบ ลักษณะส่วนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะของจุดที่ต่างกัน

3) สมการบังคับ (Governing) ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะบอกให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ ในลักษณะที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพจากมวล โมเมนตัม หรือพลังงาน ก็ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการเช่น สมการอนุพันธ์การสมดุล เป็นต้น

4) เงื่อนไข (Loading Condition) เงื่อนไขจากข้อกำหนดภายใน จากแรง (Force), อุณหภูมิ (Temperature), กระแส (Current), สนาม (Field) และอื่นๆ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนแล้วมีผลกระทบซึ่งกันและกันทั้งสิ้น เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบ การกระตุ้นจากโหลดภายในขอบเขตที่เกิดขึ้นกับผลกระทบอื่น นั้นเป็นเงื่อนไขที่เราเรียกว่า “Boundary Condition”

สำหรับรูปที่ 2.29 (ข) เป็นการแบ่งขอบเขตงานออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า “เอลิเมนต์ (Element)” การพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อยจากจุดที่ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบ Interpolation Function จากนั้นก็หาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูป Matrix พิจารณาหาสัมประสิทธิ์เมตริกซ์ (Coefficient Matrix) ให้อยู่ในลักษณะของฟังก์ชัน  $(x, y, z)$  หรือเรียกว่า “สัมประสิทธิ์โกลบอล (Global Coefficient)”

จากนั้นก็แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) หรือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เพราะปัญหาที่สำคัญส่วนมากที่ศึกษาในทางวิศวกรรม จะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ ในลักษณะที่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง เช่น เวลา, ระยะทางอุณหภูมิ, ศักย์ไฟฟ้า สมการและเงื่อนไขที่ต้องการหาจะอยู่ในรูปของโหนด  $(x, y)$  2 มิติ หากเป็นโหนด  $(x, y, z)$  ก็คือ ระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาเราจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดที่ไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง

สมการ และเงื่อนไขที่ต้องการหาจะอยู่ในรูปของโหนด  $(x, y, z)$  ก็คือ ระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาเราจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดที่ไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง

การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์นั้นเราต้องใช้ประสบการณ์ในการแบ่งให้เกิดความเหมาะสมกับงาน หากแบ่งน้อยเกินไป ค่าที่ได้ออกมาก็จะผิดพลาดมาก หากแบ่งมากไปถึงแม้จะได้ค่าที่ละเอียดจริง แต่ที่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณยาวนานทำให้เสียเวลา ฉะนั้นการแบ่งจะต้องให้เหมาะสมในการนี้ จึงพัฒนาเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ในการคำนวณเพื่อความรวดเร็ว และผลของคำตอบที่เที่ยงตรงยิ่งขึ้น

#### 2.11.4 สมการเชิงอนุพันธ์

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้า สามารถประคิษฐ์ขึ้นได้โดยเริ่มจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ดังแสดงดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (2.11)$$

โดย  $\rho_v$  แทนความหนาแน่นของประจุ (volume charge density) และ  $D$  แทนความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) ดังนี้

$$D = \epsilon E \quad (2.12)$$

โดย  $\epsilon$  แทนค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของกลาง และ  $E$  แทนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field intensity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า  $V$  โดย

$$E = -\nabla V \quad (2.13)$$

แทนค่าในสมการก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.14)$$

ในระบบพิกัด x-y (Cartesian coordinates) นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง (second-order partial differential equation) ได้คือ

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.15)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาของการหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า โดยปกติจะประกอบด้วย

1.) การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า  $V_o$  ที่มีค่าคงที่ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง โดยที่  $V_s$  แทนค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนั้น

$$V_s = V_o \quad (2.16)$$

2.) การกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง ดังนี้

$$\nabla V_s = 0 \quad (2.17)$$

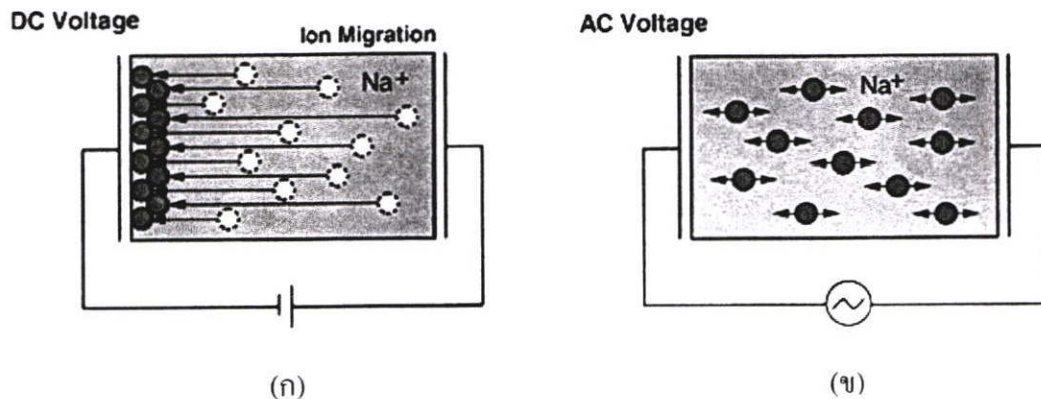
### บทที่ 3

## การทดสอบ และปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวน

### 3.1 บทนำ

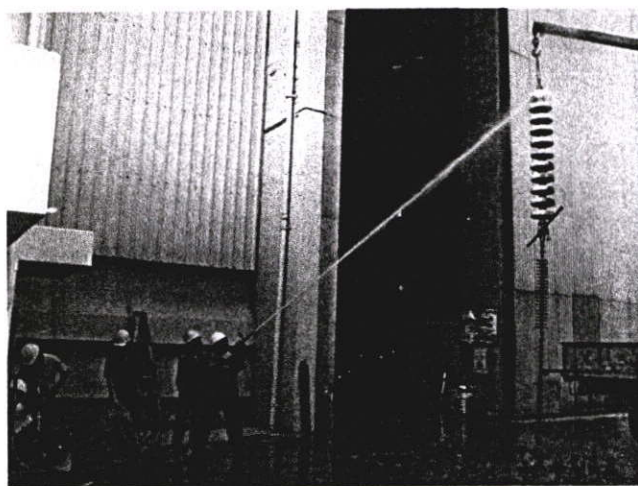
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้แก่ คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานอยู่ในระบบในสภาวะแรงดันปกติ เกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยอันเนื่องมาจากการเปรอะเปื้อน และหรือเนื่องจากครีมาที่เกิดขึ้นจากสถานะเปียก ทั้งนี้ไม่มีการเกิดเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าเกิน สำหรับการป้องกันปัญหาลักษณะดังกล่าว อาจสามารถดำเนินการบำรุงรักษา เช่นการทำความสะอาด การล้าง การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารต่างๆ หรือการเพิ่มฉนวนเข้าไป ดังนั้น การทราบถึงสมรรถนะของลูกถ้วยฉนวนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ในเรื่องของมลภาวะที่เกาะติดผิวลูกถ้วยและในสภาวะสภาพอากาศแบบต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในอนาคต

เป็นที่ทราบโดยทั่วๆ ไปว่าในระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีการเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนสูงกว่าระบบกระแสสลับ สาเหตุเนื่องมาจากในระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีผลของขั้วบวกและลบ เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้แรงที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าระหว่างขั้ว (+) และ (-) มีทิศทางที่แน่นอน คือจะไหลจากขั้วบวกไปขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใน (ก) สนามไฟฟ้ากระแสตรง (ข) และกระแสสลับ

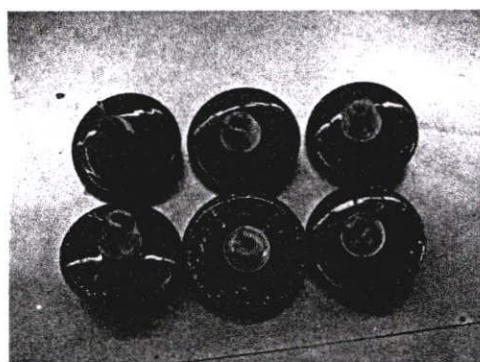
ซึ่งส่งผลให้อนุภาคต่างๆ เช่น ฝุ่น ที่อยู่ภายในสนามในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีการเรียงตัวกันไปจับเกาะที่พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวน มากกว่าลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ รูป 3.2 เป็นการทดสอบการล้างลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนจำนวนมาก และรูป 3.3 ซึ่งแสดงปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนที่มีความแตกต่างระหว่าง ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ



รูปที่ 3.2 การล้างลูกฉนวนฉนวนกระแสดตรงที่มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน



(ก) กระแสดตรง



(ข) กระแสดลับ

รูปที่ 3.3 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนที่แตกต่างกันระหว่างลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงและสลับ

จากจุดมุ่งหมายของการศึกษาวิจัยที่จะทำการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนกระแสดสลับแบบแขวนที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไป เพื่อที่จะใช้งานแทนลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงแบบแขวน นั้นลำดับแรกที่จะต้องทำการศึกษาคือ นำลูกถ้วยฉนวนกระแสดสลับ และลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงมาทำการทดสอบหาคุณลักษณะต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขกระแสดตรง และกระแสดสลับ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1.) การตรวจสอบคุณลักษณะทางมิติ
- 2.) การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวแห้งสะอาด เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลูกถ้วยแต่ละชนิดก่อนว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร และหลังจากนั้นก็ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดสลับให้ดีขึ้นเทียบเคียง หรือดีกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงโดยการปรับปรุงคุณลักษณะ ดังข้อ 3 - 5

- 3.) การทดสอบปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ และทำการทดสอบถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่เปลี่ยนแปลงไป
  - 4.) การทดสอบลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ เมื่อทำการปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาที่ได้ทำการออกแบบไว้ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง
  - 5.) การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวนปกติ กับลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะด้วยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำศึกษา และทดสอบลูกถ้วยฉนวนที่มีการเปราะเปื้อนทั้งในเงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง และกระแสสลับ เพื่อเปรียบเทียบผลของการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนระหว่างเงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง และกระแสสลับ จากการศึกษาที่นำเสนอไปแล้วในบทที่ 2 พบว่า ในระบบกระแสตรงพฤติกรรมของการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนจะสูงกว่าระบบกระแสสลับ ซึ่งได้นำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ ที่ได้ทำปรับปรุงโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีกรรมวิธีที่ได้มาตรฐานจากบริษัทผู้ผลิตลูกถ้วยฉนวน เพื่อมาทำการทดสอบภายใต้การจำลองสภาวะเปราะเปื้อน เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผล เนื่องจากว่าวิธีการแก้ปัญหาเรื่องการเปราะเปื้อนโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำได้เริ่มนำมาใช้แล้วในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ยังไม่พบในระบบกระแสตรง
- ซึ่งจากข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อสรุป ถึงความเป็นไปได้ในการที่จะนำลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสสลับมาใช้ทดแทนลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

### 3.2 การตรวจสอบทางมิติ

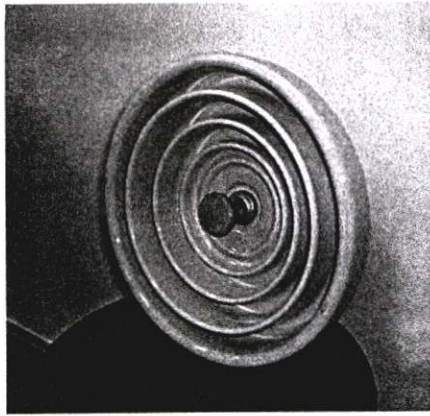
การตรวจสอบรูปร่างทางมิติเป็นการทดสอบลักษณะทั่วไปของลูกถ้วยแต่ละชนิด มาตรฐานจะกำหนดรูปร่างลักษณะมิติไว้แน่นอนพร้อมกับค่าที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ศึกษาทดสอบนี้เป็นลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสสลับและกระแสตรง ดังแสดงในรูป 3.4 ขนาดมิติได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ขนาดมิติของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้ในการทดสอบกระแสลับ

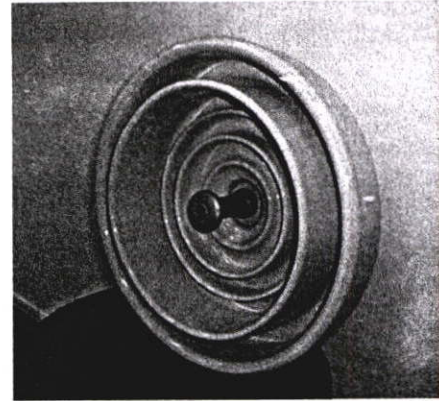
ลักษณะทั่วไป	ผู้ผลิต ชนิดแบบลูกถ้วยแขวน น้ำหนัก/หน่วย สีของวัสดุที่เป็นฉนวน ชนิดของวัสดุที่เป็นฉนวน	NGK, Japan Fog type 7.1 kg Light grey Porcelain
ลักษณะสมบัติทางกล	แรงดึงทดสอบทางกล	160 kN
ขนาด	ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะร้าวของเนื้อฉนวน ระยะอาร์ค	146 mm 280 mm 455 mm 270 mm
ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า	แรงดันวาทไฟตามผิวแห้ง ทางบวก และทางลบ ที่ระดับความ คงทนของแรงดัน 110 % แรงดันวาท ไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	140 kV 140 kV

ตารางที่ 3.2 ขนาดมิติของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้ในการทดสอบกระแสตรง

ลักษณะทั่วไป	ผู้ผลิต ชนิดแบบลูกถ้วยแขวน น้ำหนัก/หน่วย สีของวัสดุที่เป็นฉนวน ชนิดของวัสดุที่เป็นฉนวน	NGK, Japan Fog type 10.5 kg Light grey Porcelain
ลักษณะสมบัติทางกล	แรงดึงทดสอบทางกล	160 kN
ขนาด	ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะร้าวของเนื้อฉนวน ระยะอาร์ค	170 mm 320 mm 570 mm 320 mm
ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า	แรงดันวาทไฟตามผิวแห้งทางบวก และ ทางลบ ที่ระดับความคงทนของแรงดัน 110 % แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	140 kV 140 kV



(ก)



(ข)

### รูปที่ 3.4 ตัวอย่างลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับ (ข) ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง

## 3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวแห้งสะอาด

คุณสมบัติทางไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดและเกณฑ์พิจารณาตัดสินคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนว่าได้มาตรฐานหรือไม่

### 3.3.1 การทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

แรงดันวาบไฟตามผิวแห้ง (Dry Flashover Voltage) หมายถึง ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟบนผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาพแห้ง

#### 3.3.1.1 การเตรียมการทดสอบ

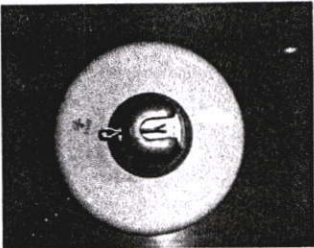
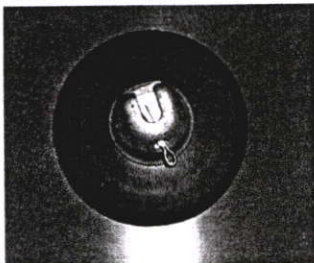
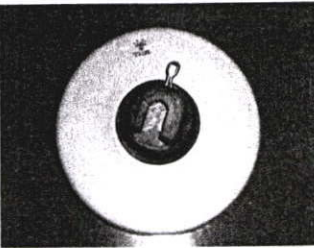
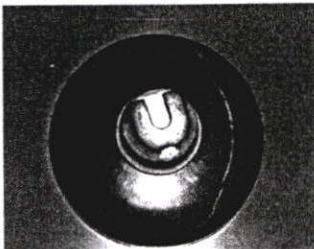
การทดสอบได้ถูกจัดทำขึ้นที่ห้องทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบมีดังนี้

1.) นำลูกถ้วยฉนวนทดสอบกระแสดลับ และกระแสดตรงแบบแฉวนคังแสดงในรูปที่ 3.4 ทั้งแบบปกติ และแบบที่ได้ทำการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.3 มาต่อวงจรตามรูปที่ 3.6 ซึ่งลูกถ้วยฉนวนทดสอบประกอบด้วย



รูปที่ 3.5 การเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ

ตารางที่ 3.3 ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการทดสอบ

รูป	สัญลักษณ์	ความหมาย
	NC/AC	ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดแบบ แขวนปกติ
	SC/AC	ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดแบบ แขวนที่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ
	NC/DC	ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรแบบแขวน ปกติ
	SC/DC	ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรแบบแขวน ที่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนเป็นสารชนิด Tin-oxide ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นหลัก โดยมี Antimony ( $\text{Sb}^{3+}$ ) ผสมอยู่เล็กน้อย รวมถึง Niobium-oxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) เพื่อป้องกันการผุกร่อน ซึ่งมีค่าความนำไฟฟ้าสำหรับลูกถ้วยชนิด SC/AC เท่ากับ  $188 \times 10^{-9}$  S และลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/DC เท่ากับ  $68 \times 10^{-9}$  S โดยมีความหนาในการเคลือบเท่ากับ 0.015 มิลลิเมตร

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

โดยที่รูป 3.6 (ก) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในสภาวะการทดสอบกระแสดร และ 3.6 (ข) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในสภาวะการทดสอบกระแสดลัด

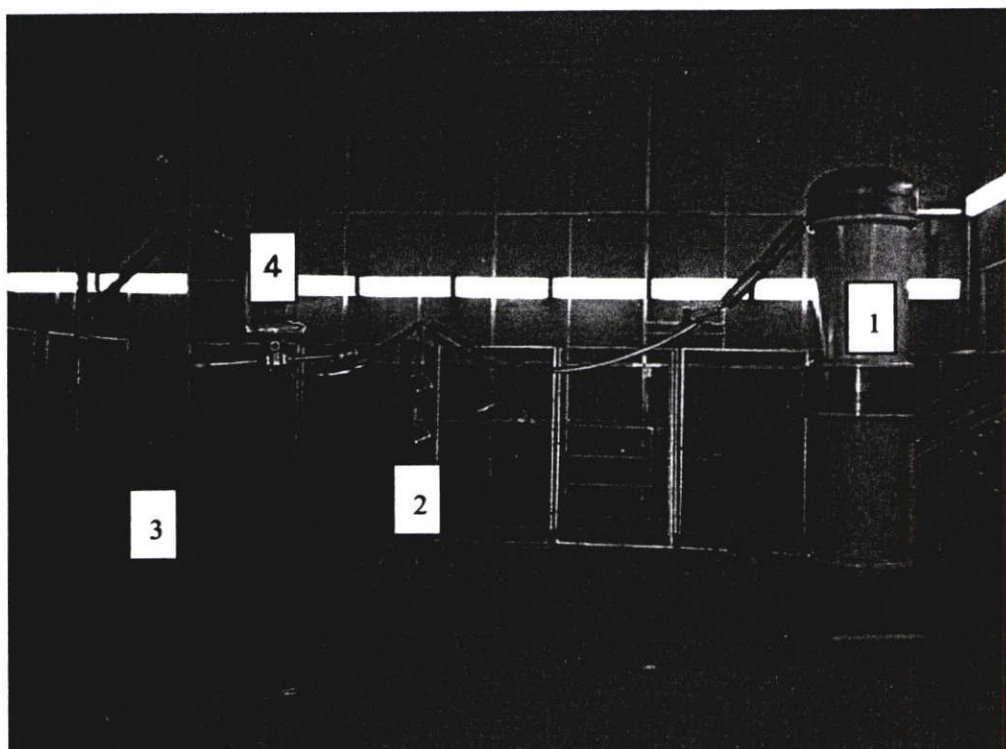
- (ก) 1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 600 kV 10 mA  
 2. Sphere gap diameter 25 mm  
 3. Voltage divider 100 kV, 200 pF and 380 M $\Omega$   
 4. ลูกถ้วยฉนวนทดสอบ
- (ข) 1. หม้อแปลงทดสอบ AC 100 kV  
 2. Voltage divider 100 kV, 200 pF และ 380 M $\Omega$   
 3. ลูกถ้วยฉนวนทดสอบ

### ขั้นตอนการทดสอบ

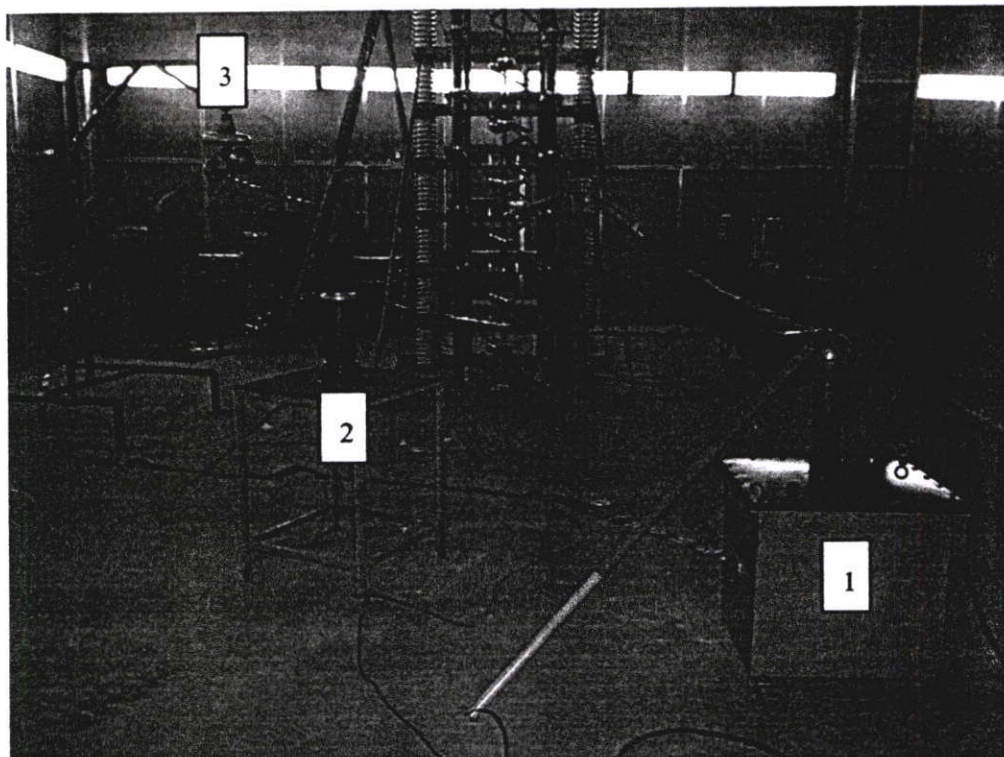
1. จัดเตรียมลูกถ้วยฉนวนทดสอบตามตารางที่ 3.4
2. ต่อยวงจรการทดสอบตามรูปที่ 3.6 ซึ่ง (ก) เป็นวงจรการทดสอบกระแสตรง และ (ข) เป็นวงจรการทดสอบกระแสสลับ

สภาวะการทดสอบ: อุณหภูมิ 32-33 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 751-752 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 71-72 %

3. แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการวาบไฟตามผิวแห้งจะถูกตรวจวัดโดย Resistive Voltage Divider ซึ่งวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.1-1992 [13]



(ก) สภาวะการทดสอบกระแสตรง



(ข) สถานะการทดสอบกระแสสลับ

รูปที่ 3.6 วงจรการทดสอบ

#### ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบค่าแรงดันวบไฟตามผิวกระแสตรงถูกด้วยเขวนผิวแห้งสะอาดแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แรงดันวบไฟตามผิวในสถานะการทดสอบกระแสตรง

ชนิดของลูกถ้วย	แรงดันวบไฟตามผิว (kV)					เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
NC/AC	152.02	149.26	158.71	157.56	151.21	153.33
SC/AC	125.14	126.88	126.52	125.23	127.77	126.18
NC/DC	168.60	169.71	170.67	170.21	168.89	169.66
SC/DC	96.53	97.96	98.64	96.89	98.11	97.71

ผลการทดสอบค่าแรงดันวาบไฟตามผิว 50 Hz ลูกถ้วยแขวนผิวแห้งสะอาดแสดงในตาราง  
ที่ 3.5

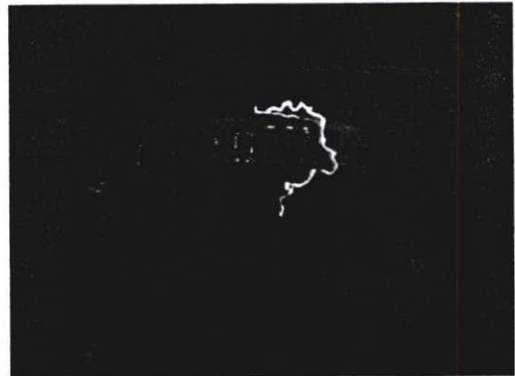
ตารางที่ 3.5 แรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสลับ

ชนิดของลูกถ้วย	แรงดันวาบไฟตามผิว (kV)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
NC/AC	108.65	109.05	111.52	110.09	108.23	109.74
SC/AC	64.41	63.26	62.63	64.11	63.15	63.43
NC/DC	119.98	118.03	123.75	119.75	122.60	120.59
SC/DC	81.08	80.29	81.95	80.95	79.89	80.82

ลักษณะเส้นทางของการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไข  
การทดสอบกระแสตรงของลูกถ้วยทดสอบทั้ง 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



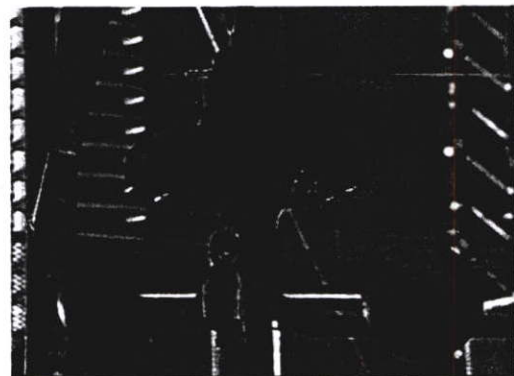
(ก) NC/AC



(ข) NC/DC



(ค) SC/AC

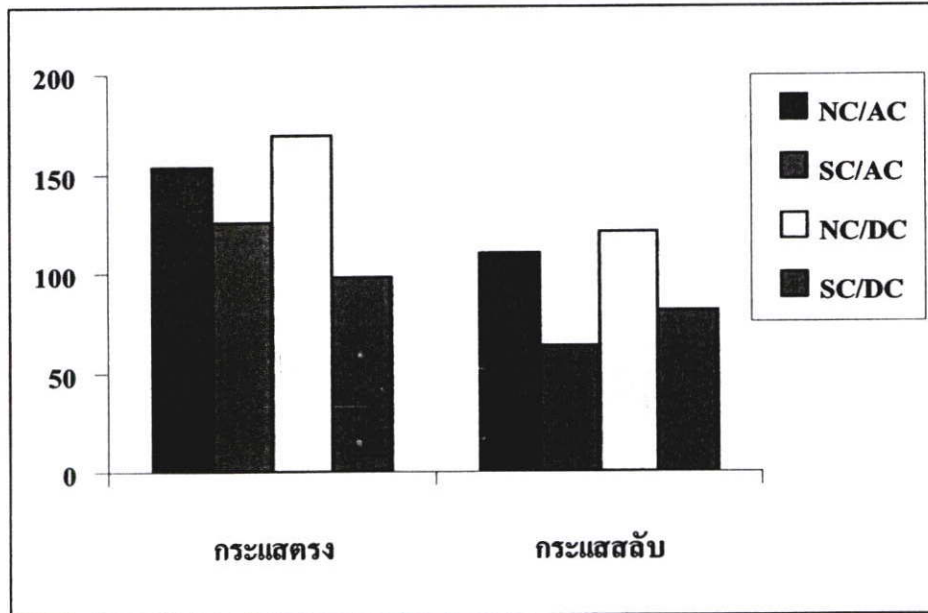


(ง) SC/DC

รูปที่ 3.7 การวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง

### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบค่าแรงดันที่เกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยกระแสตรง และลูกถ้วยฉนวน กระแสสลับภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงพบว่า ระดับแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยกระแสตรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) จะมีระดับสูงกว่าลูกถ้วยกระแสสลับทั่วไป (NC/AC) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.8 เช่นเดียวกันกับการทดสอบด้วยแรงดันทดสอบกระแสสลับ ซึ่งระดับแรงดันที่เกิดการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) จะมีค่าสูงกว่าแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบปกติทั่วไป (NC/AC) ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ รูปที่ 3.8 และในกรณีของการเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเมื่อนำไปทดสอบภายใต้แรงดันทดสอบกระแสตรง พบว่าแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) จะพบระดับแรงดันวาทไฟตามผิวที่สูงกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/DC) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ส่วนในกรณีการทดสอบภายใต้สภาวะกระแสสลับ พบว่าแนวโน้มของระดับแรงดันที่เกิดการวาทไฟตามผิวจะคล้ายกันกับลูกถ้วยแบบธรรมดาที่ไม่มีการเคลือบผิว แต่ต่างกันที่ระดับแรงดันวาทไฟตามผิวจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งสาเหตุเกิดมาจากบริเวณพื้นผิวของลูกถ้วยที่มีการเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำจะมีการรั่วไหลของกระแส



รูปที่ 3.8 การวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรงและกระแสสลับ

เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบเส้นทางที่เกิดการวาทไฟตามผิวระหว่างลูกถ้วยกระแสตรงและกระแสสลับพบว่า ลูกถ้วยกระแสตรงจะมีเส้นทางที่ยาวกว่า เนื่องจากครีบลำดับที่ 2 ของลูกถ้วย

กระแสตรงจะขึ้นออกมาทำให้ค่าระยะอาร์คมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยกระแสสลับซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7

### สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงจะมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับทั้งในสภาวะการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ ซึ่งระดับแรงดันมีความแตกต่างกันไม่สูงมากนัก สาเหตุเนื่องมาจากระยะทางมิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงมีค่าสูงกว่ากระแสสลับ และลักษณะการเกิดการอาร์คบางส่วน (Partial Arc) เนื่องจากลักษณะการวางครีปที่แตกต่างกันระหว่างลูกถ้วยกระแสตรงและสลับ จึงทำให้ระดับแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยกระแสตรงจะมีระดับแรงดันสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ

#### 3.3.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา

โคโรนาเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงต่างๆ ไป การเกิดโคโรนามักจะเกิดขึ้นบริเวณจุดที่มีจุดแหลมคมพื้นผิวไม่เรียบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น โคโรนามีสาเหตุมาจากการแตกตัวของประจุของแก๊สโดยจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงอัลตราไวโอเล็ต คลื่นรบกวนสัญญาณวิทยุ และการเกิดโคโรนายังเป็นสาเหตุของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าและอุปกรณ์ฉนวนอื่นๆ รวมทั้งการเกิดสัญญาณรบกวนของระบบสื่อสาร และการสร้างโอโซนขึ้นมา [10] การตรวจจับโคโรนาในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถใช้กล้องโคโรนาหรือเครื่องมือที่เหมาะสมอื่นๆ

##### 3.3.2.1 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนากับลูกถ้วยฉนวนลูกเดี่ยว

ซึ่งในการทดลองการปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนใช้กล้องโคโรนาชื่อ DayCor II ทำการถ่ายภาพดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยที่วงจรการทดสอบจะใช้วงจรเดียวกันกับการทดสอบการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข) และภาพถ่ายปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบกระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.10

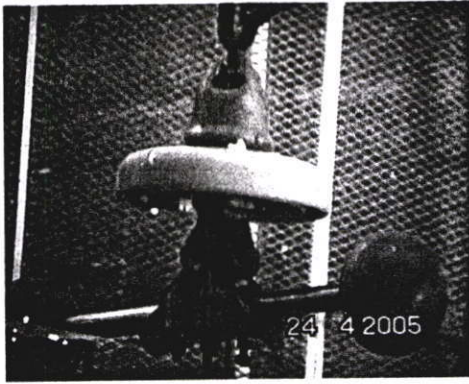


(ก) กล้องโคโรนา



(ข) การบันทึกภาพ

รูปที่ 3.9 กล้องโคโรนา



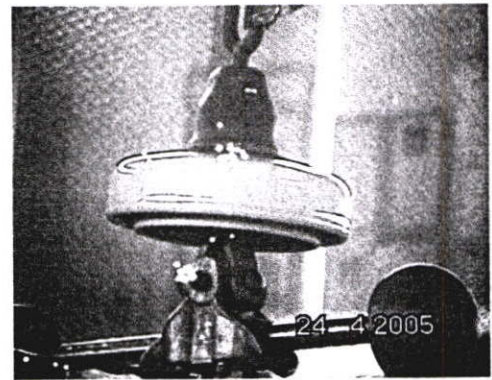
(ก) NC/AC



(ข) SC/AC



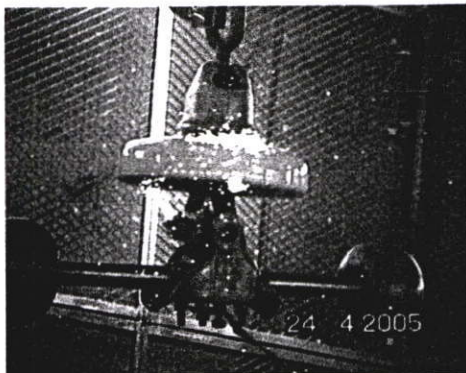
(ค) NC/DC



(ง) SC/DC

รูปที่ 3.10 ปรางภูการโคโรนาของลูกถ้วยภายใต้กระแสตรง

และเมื่อนำลูกถ้วยจนวนทดสอบมาทำการบันทึกภาพปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



(ก) NC/AC



(ข) SC/AC



(ค) NC/DC



(ง) SC/DC

รูปที่ 3.11 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยภายใต้กระแสสลับ

ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยจนวัดทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ กระแสตรง ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสสลับ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง

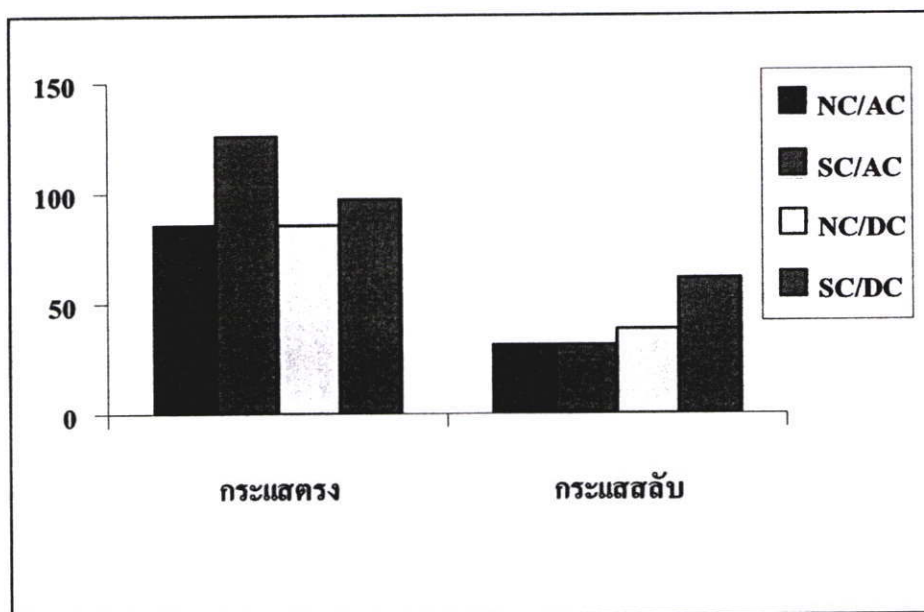
ชนิดของลูกถ้วย	แรงดันเริ่มเกิด โคโรนา (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
NC/AC	84.45	86.67	85.95	85.69
SC/AC	124.68	127.23	126.63	126.18
NC/DC	83.42	84.77	88.13	85.44
SC/DC	98.54	97.98	96.61	97.71

ตารางที่ 3.7 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสสลับ

ชนิดของลูกถ้วย	แรงดันเริ่มเกิด โคโรนา (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
NC/AC	30.08	31.56	31.51	31.04
SC/AC	31.62	31.55	30.58	31.26
NC/DC	36.64	38.81	38.74	38.04
SC/DC	63.93	62.43	58.00	61.45

### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง และลูกถ้วยกระแสดลับภายใต้เงื่อนไขการทดสอบทั้งกระแสดตรง และกระแสดลับพบว่า ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำทั้งกระแสดตรง และกระแสดลับจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันที่สูงกว่า จะสังเกตได้อย่างชัดเจนสำหรับลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC ซึ่งมีระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาเท่ากับ 126.18 kV หรือแม้ว่าจะเทียบเป็นอัตราส่วนของลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสดตรง และกระแสดลับ ในเงื่อนไขการทดสอบกระแสดตรง และกระแสดลับพบว่า สัดส่วนของลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้า โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) จะมีอัตราส่วนที่สูงกว่า เหตุผลเนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่เคลือบทำให้เกิดกระแสบางส่วนรั่วไหลที่บริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวนทดสอบทำให้การกระจายของศักย์ไฟฟ้าดีขึ้น ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นลดลงด้วย จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาเช่นกัน



รูปที่ 3.12 แรงดันเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสดตรง และกระแสดลับ

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ลูกถ้วยฉนวนที่มีการปรับปรุงโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะทำให้ปรากฏการณ์โคโรนาเกิดได้ยากขึ้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) สาเหตุเกิดจากการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ดีขึ้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง

### 3.3.2.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนากับพวงลูกด้วยฉนวนและวงแหวนโคโรนา

จากการทดสอบปรากฏการณ์แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกด้วยฉนวนในหัวข้อที่ 3.3.2.1 พบว่าลูกด้วยฉนวนที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำนั้น จะพบคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ดีขึ้นคือ ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดได้ยากกว่า ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎี และข้อมูลต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่าวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปรากฏการณ์การเกิดโคโรนากับอุปกรณ์ในระบบแรงดันสูง คือ โคโรนาซิลด์ ดังนั้นจึงได้เกิดแนวคิดที่จะประยุกต์ โดยการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาร่วมกับพวงลูกด้วยฉนวน เพื่อให้ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนากับพวงลูกด้วยฉนวนกระแสสลับที่จะนำมาใช้งานในระบบกระแสตรง เกิดได้ยากขึ้น ซึ่งจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในกรณีที่ต้องการนำลูกด้วยฉนวนกระแสสลับไปใช้งานในระบบกระแสตรง

การทดสอบได้ถูกจัดทำขึ้นที่ห้องทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### การออกแบบวงแหวนโคโรนา

สำหรับวงแหวนโคโรนาที่นำมาต่อร่วมกับพวงลูกด้วยฉนวนมีการออกแบบเพื่อคำนวณหาขนาดของวงแหวนโคโรนาตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

1. ระดับแรงดันที่ใช้ในการคำนวณเป็นแรงดันกระแสตรง ที่มีการใช้งานจริงในประเทศไทย เพราะฉะนั้นค่า  $V_{peak}$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{DC}$  ซึ่งเท่ากับ 300 kV ซึ่งใช้กับพวงลูกด้วยฉนวนจำนวน 22 ลูก สำหรับในการทดลองนี้ จะทำการทดสอบกับพวงลูกด้วยแบบฉนวนจำนวน 3 ลูก ที่ระดับแรงดัน 300 kV
2. จากสมการที่ 2.8

$$r \geq \frac{U}{E_{max}} = \frac{U}{25} \quad \text{เซนติเมตร}$$

3. เพราะฉะนั้น ระดับแรงดันที่ใช้ในการคำนวณ ( $U$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{300kV}{22} \times 3 = 49.9 \text{ kV}$$

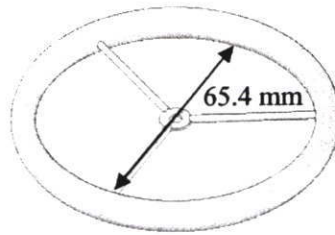
4. หาค่ารัศมีของวงแหวนโคโรนา โดยการแทนค่า  $U$  ลงในสมการที่ 2.8

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad r_1 \geq \frac{49.9kV}{25kV/cm}$$

$$r_1 \geq 1.67 \text{ cm}$$

ใช้ Safety factor 1.25 ~ 2 เท่า

จะได้  $r_1 \approx 3.27 \text{ cm}$  หรือ  $d_1 \approx 65.4 \text{ mm}$  ในที่นี้ใช้ Safety factor 2 เท่า  
 ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงแหวนโคโรนาที่ได้ทำการออกแบบ

5. ขนาดของวงแหวนโคโรนาที่นำมาวิเคราะห์ จะมีด้วยกันทั้งหมด 4 ขนาด ดังนี้

3.1) เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm

3.2) เส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm

3.3) เส้นผ่าศูนย์กลาง 210 mm

3.4) เส้นผ่าศูนย์กลาง 270 mm

ซึ่งวงแหวนโคโรนาทั้งหมดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 19 มิลลิเมตร ซึ่งจากการออกแบบพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนโคโรนาค่อนข้างเล็กมาก (65.4 มิลลิเมตร) ซึ่งกระบวนการผลิตทำได้ค่อนข้างยาก อีกทั้งยุ่งยากต่อการติดตั้งเนื่องจากต้องมีอุปกรณ์ต่อร่วมอีกหลายตัว ดังนั้นสำหรับการศึกษาวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องหาขนาดที่สามารถจัดหาได้ทั่วไป ตามห้างร้านต่างๆ

#### อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 600 kV 10 mA
2. Sphere gap diameter 25 mm
3. ลูกถ้วยฉนวนทดสอบ
4. วงแหวนโคโรนา ดังแสดงในรูปที่ 3.13
5. กิ่งโคโรนา ยี่ห้อ DayCor II ดังแสดงในรูปที่ 3.9

### ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดเตรียมลูกถ้วยฉนวนทดสอบโดยทำการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาตามที่ได้จัดทำไว้โดยเริ่มจากวงแหวนโคโรนาที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุด
2. ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 3.14
3. นำกล็องโคโรนามาทำการติดตั้งโดยตำแหน่งที่ติดตั้งจะต้องอยู่ในรัศมีที่ไม่ทำให้อุปกรณ์เครื่องมือเกิดการชำรุดเสียหายได้
4. เริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์โคโรนา โดยที่แรงดันสูงสุดจะต้องไม่เกิน 300 kV
5. ทำการถ่ายภาพเพื่อดูปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนา
6. ทำการเปลี่ยนวงแหวนโคโรนาจนครบทุกแบบ
7. ทำการทดสอบซ้ำจนครบทุกแบบ

สภาวะการทดสอบ: อุณหภูมิ 32-33 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 751-752 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 71-72 %

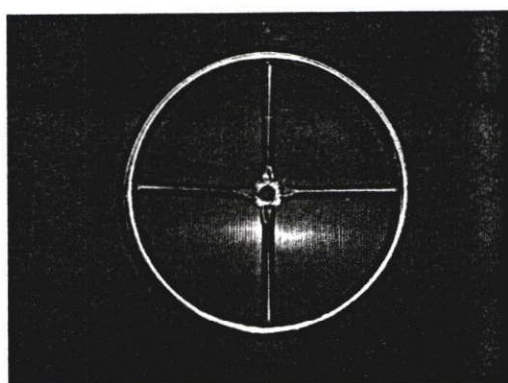


รูปที่ 3.14 วงจรการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง

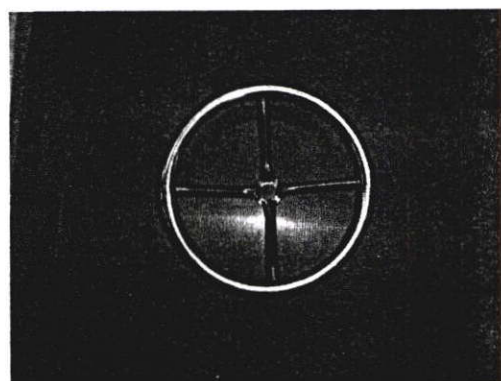
วงแหวนโคโรนาที่ได้ออกแบบเพื่อนำมาต่อร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวนใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.8 วงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับที่	สัญลักษณ์	เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (มิลลิเมตร)	ขนาดท่อ (มิลลิเมตร)
1	A	270	19
2	B	210	19
3	C	200	19
4	D	100	19



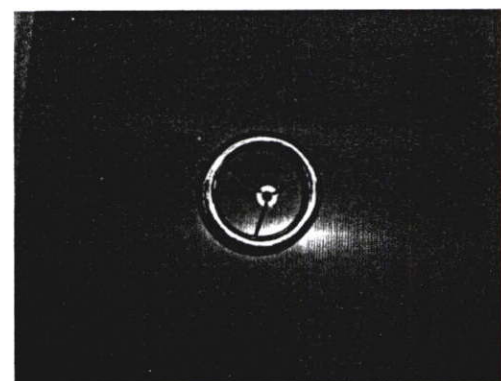
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

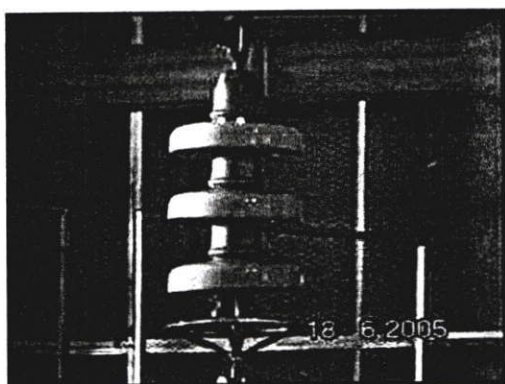
รูปที่ 3.15 วงแหวนโคโรนา

#### ผลการทดลอง

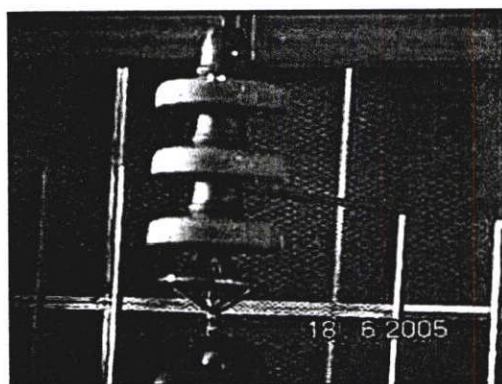
ผลการทดสอบปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของกระแสดรงถูกด้วยเขวนพวง 3 ลูกที่มีการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา ดังแสดงในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.9 ระดับแรงดันเกิดโคโรน่าของลูกถ้วยกระแสดับที่สภาวะการทดสอบกระแสดตรง

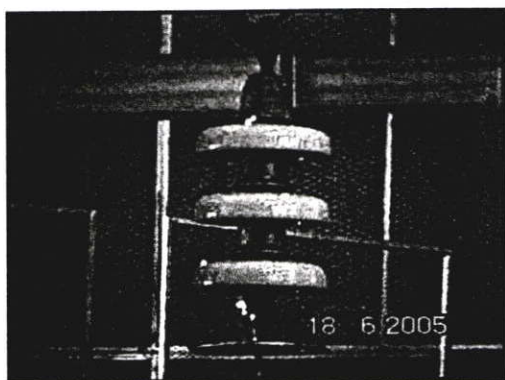
แบบของวงแหวนโคโรน่า	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV) ของพวงลูกถ้วยฉนวน 3 ลูก			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
E (ไม่ต้องวงแหวนโคโรน่า)	138.83	139.85	143.72	140.8
A	185.56	186.65	188.49	186.9
B	182.39	181.98	184.03	182.8
C	135.89	137.33	137.48	136.9
D	127.38	128.76	126.66	127.6



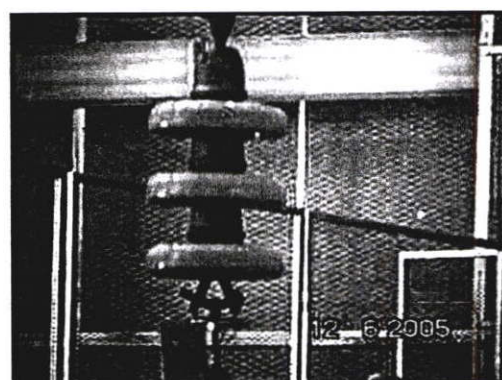
(ก) แบบ A



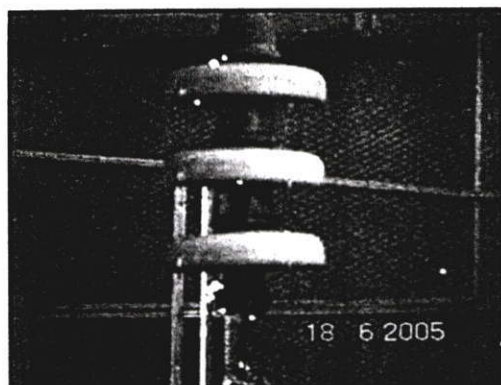
(ข) แบบ B



(ค) แบบ C



(ง) แบบ D

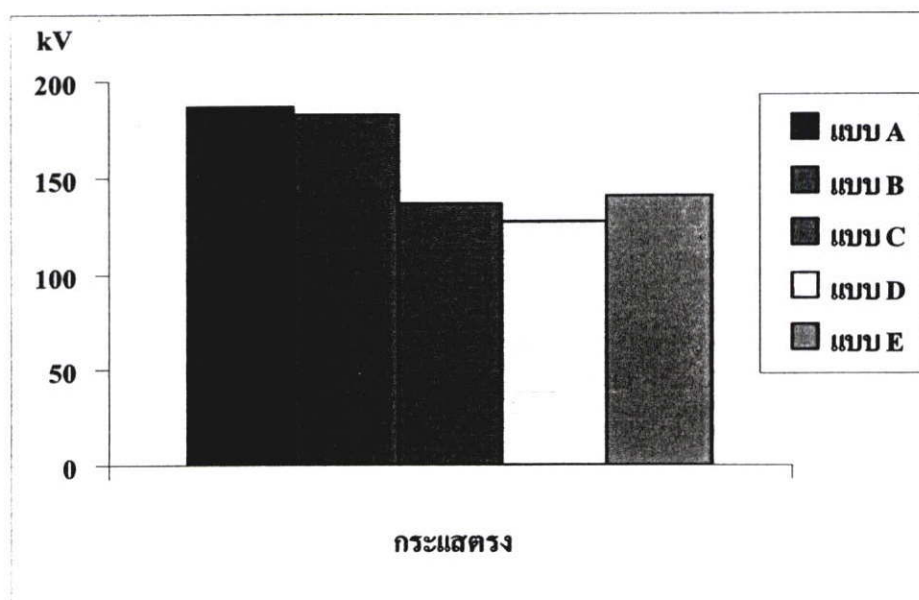


(จ) แบบ E (ไม่ต่อพ่วงกับวงแหวนโคโรนา)

รูปที่ 3.16 การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยกระแสดลับภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันกระแสดตรง

#### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยจำนวน 3 ลูกที่มีการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาพบว่า วงแหวนโคโรนาแบบ A ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดที่ระดับสูงสุด 127.6 kV และ B และ C ตามลำดับ ส่วนวงแหวนโคโรนาแบบ D พบว่าระดับที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดขึ้นที่ระดับต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แรงดันโคโรนาที่เริ่มเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนวงแหวนโคโรนา

ซึ่งพอที่สังเกตได้ว่าเป็นผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี กล่าวคือเมื่อไรก็ตามที่รัศมีของวงแหวนโคโรน่ายิ่งสูงขึ้นตามสมการที่ 2.7 จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เริ่มเกิดโคโรนา

จะยิ่งลดลง ในขณะที่เมื่อทำการทดสอบกับพวงลูกด้วยฉนวนที่ไม่มีการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา พบว่าระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาเมื่อจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดัน 140.8 kV

### สรุปผล

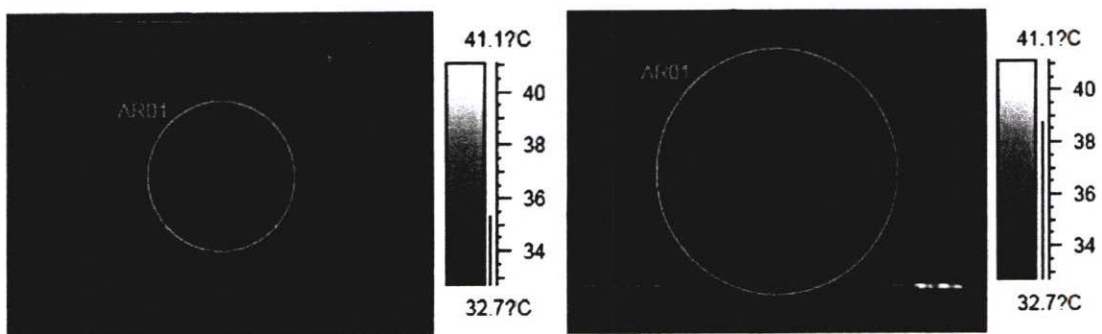
จากการทดสอบพบว่าระดับแรงดันเริ่มต้นที่เกิดปรากฏการณ์โคโรนาของพวงลูกด้วย กระแสสลับที่มีการติดตั้งนำวงแหวนโคโรนาตามที่ได้ทำการออกแบบและทดสอบ ภายใต้งี้อื่นใจ การทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงพบว่า วงแหวนโคโรนาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด หรือ แบบ A ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 270 มิลลิเมตร ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะมีค่าจะเกิดขึ้นยากสุด

#### 3.3.3 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

จากคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำ เมื่อทำการเคลื่อนผิวฉนวนของลูกด้วยฉนวนกระแสสลับ โดยพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านบริเวณพื้นผิวของพื้นที่ที่มีการเคลื่อน ในปริมาณเล็กน้อย ทำให้เกิดความร้อนขึ้น

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของอุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้น ระหว่างลูกด้วยฉนวนกระแสสลับแบบปกติ (NC/AC) กับลูกด้วยฉนวนกระแสสลับที่มีการ ปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยการเคลื่อนผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ ว่าระดับการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิ มากน้อยเพียงไร และจะมีผลกระทบอะไรตามมาหรือไม่

โดยในการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของลูกด้วยฉนวน จะทำการทดสอบภายใต้งี้อื่นใจ การทดสอบกระแสตรง ซึ่งต่อวงจรตามรูปที่ 3.6 (ก) โดยใช้กล้องเทอร์โมสแกนทำการ บันทึกภาพเพื่อดูพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งผลการตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดย ในการทดสอบ จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ที่ระดับแรงดัน ไฟฟ้า 20 kV ทิ้งไว้เป็น เวลา 15 นาที และบันทึกผล พบว่า อุณหภูมิของลูกด้วยฉนวน NC/AC จะมีอุณหภูมิ 35.5 องศาเซลเซียส ในขณะที่ ลูกด้วยฉนวน SC/AC จะมีอุณหภูมิ 39.5 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างกัน 3 องศาเซลเซียส



(ก) NC/AC

(ข) SC/AC

รูปที่ 3.18 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของลูกด้วยฉนวนกระแสสลับ

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวน โดยการเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยฉนวนกระแสดับแบบแขวนปกติทั่วไป (NC/AC) กับลูกถ้วยฉนวนกระแสดังแบบแขวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) พบมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสาเหตุเกิดมาจากการมีกระแสรั่วไหลบริเวณพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะช่วยให้ไม่เกิดปรากฏการณ์แถบแห้ง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญของการเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย อันเนื่องมาจากสิ่งเปรอะเปื้อน

### สรุปผลการทดลอง

ลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะพบทั้งข้อดี และข้อด้อย ซึ่งข้อดีคือ ไม่เกิดปรากฏการณ์แถบแห้ง เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจะมีการกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน ดังนั้นแทบจะไม่มีโอกาสที่จะเกิดแถบแห้งขึ้นเลย แต่จะมีข้อด้อยที่ การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าบางส่วนไป จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Thermal runaway [14]

## 3.4 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนที่มีระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ

### 3.4.1 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดับแบบแขวนที่มีระดับความเปรอะเปื้อนที่ระดับต่างๆ

เนื่องจากในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงไม่ว่าจะเป็นภายในประเทศไทย หรือแม้กระทั่งต่างประเทศก็ตาม ปัญหาเรื่องการเกาะจับของสิ่งเปรอะเปื้อนยังคงเป็นสิ่งที่ต้องทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม เพื่อหาแนวทางป้องกัน เพื่อที่จะยังคงรักษาเสถียรภาพในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในหัวข้อนี้จะเน้นไปที่ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสดัง ซึ่งมีการเปรียบเทียบปรากฏการณ์การเกิดโคโรนา ของพวงลูกถ้วยฉนวน โดยที่จะทำการจำลองระดับความเปรอะเปื้อนที่ค่าต่างๆ เพื่อที่จะกำหนดรูปแบบของการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาต่อไปถึงสิ่งเปรอะเปื้อนต่างๆ ต่อไป

### ขั้นตอนเตรียมการทดลอง

กระบวนการเตรียมสิ่งเปรอะเปื้อน และรายละเอียดของส่วนผสมที่นำมาจำลอง ESDD ดังแสดงในรูปที่ 3.19 [14] ซึ่งระดับความเปรอะเปื้อนที่ค่าต่างๆ รวมไปถึงระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.9 ซึ่งลูกถ้วยฉนวนที่นำมาทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.20 โดยทำการทดสอบในกระโอมไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.24

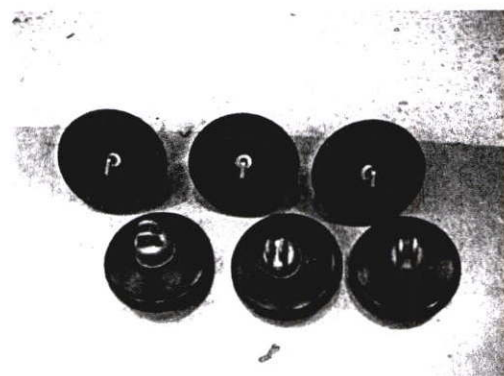
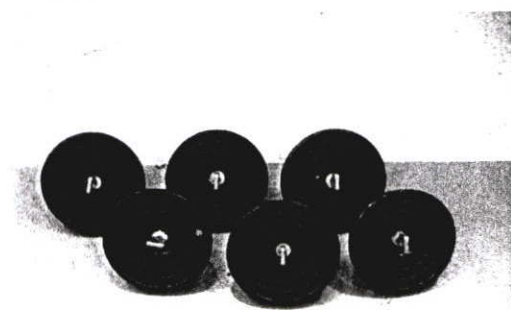


รูปที่ 3.19 การเตรียมสิ่งเปราะเป็อนหรือ ESDD ที่ระดับความเปราะเป็อนสูง

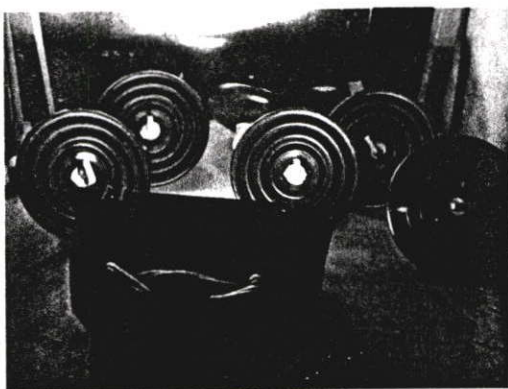
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมและทดสอบ ESDD ประกอบด้วย

1. เกลือแกง (NaCl)
2. เกาลิน (Kaolin)
3. น้ำ De-Ionic
4. ภาชนะตวง
5. กากพ่น
6. ตาชั่ง ยี่ห้อ OHAUS ความละเอียด มิลลิกรัม
7. Conductivity Meter ยี่ห้อ YOKOKAWA รุ่น SC 82
8. แปรง
9. ถังน้ำ
10. ถ้วยลูกถ้วยฉนวน

นำลูกถ้วยทดสอบไปทำการอบแห้งในตู้อบ โดยการอุณหภูมิในตู้อบควบคุมที่ประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เพื่อให้พื้นผิวของลูกถ้วยแห้ง ซึ่งจะทำการกระบวนกาพ่น สิ่งเปราะเป็อน ทำได้ง่ายและได้ผลดี

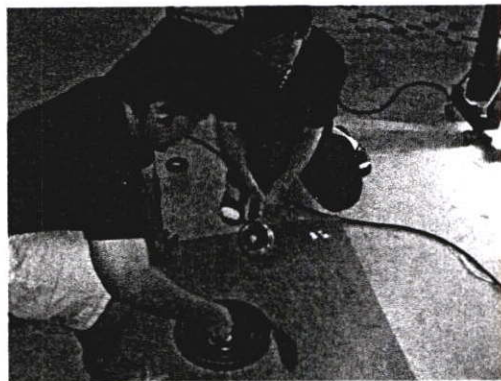


รูปที่ 3.20 ลูกถ้วยฉนวนที่นำมาใช้ในการทดสอบ

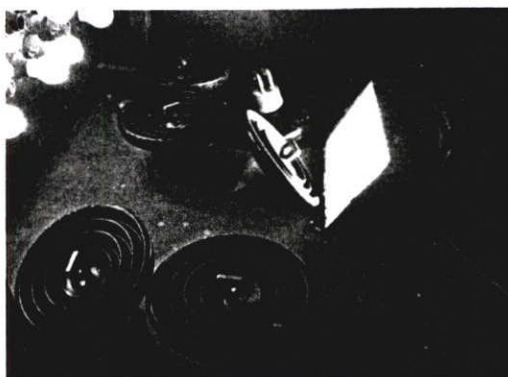


รูปที่ 3.21 การอบลูกด้วยฉนวนเพื่อให้พื้นผิวของลูกด้วยฉนวนแห้ง

นำสิ่งเปราะเปื้อนจำลองที่เตรียมไว้ [14] ทำการพ่นลูกด้วยที่ได้จัดเตรียมไว้ โดยในการพ่นจะแบ่งการพ่นออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นพื้นผิวด้านบน และส่วนที่สองจะเป็นพื้นผิวด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และจากนั้นนำไปอบในตู้อบอีกครั้งเพื่อให้สิ่งเปราะเปื้อนจำลองที่พ่นแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 การพ่นสิ่งเปราะเปื้อนจำลองที่พื้นผิวด้านบนและด้านล่างของลูกด้วยฉนวน



รูปที่ 3.23 การอบลูกด้วยฉนวนเพื่อให้พื้นผิวของลูกด้วยฉนวนแห้งหลังจากพ่นสิ่งเปราะเปื้อนจำลอง

### ขั้นตอนการทดสอบ

ทำการต่อวงจรโดยใช้วงจรการทดลองดังรูปที่ 3.24 โดยนำพวงลูกถ้วยทดสอบติดตั้งในกระโจมไอน้ำ ซึ่งกระโจมไอน้ำจะจำลองเสมือนหมอกที่อึดตัว โดยที่ระยะของลูกถ้วยทดสอบมีระยะห่างจากพื้นมากกว่า 1.5 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 507 และหลังจากนั้นก็ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยใช้กล้องโคโรนาจับภาพปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนา โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายจะต้องไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวเนื่องจากไอน้ำที่อยู่ภายในกระโจม ดังนั้นเมื่อสามารถตรวจจับปรากฏการณ์โคโรนาได้แล้ว จะต้องหยุด และปรับระดับแรงดันลง เพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ทดสอบ

### อุปกรณ์การทดลอง

(ก) 1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 600 kV 10 mA

2. Sphere gap diameter 25 mm

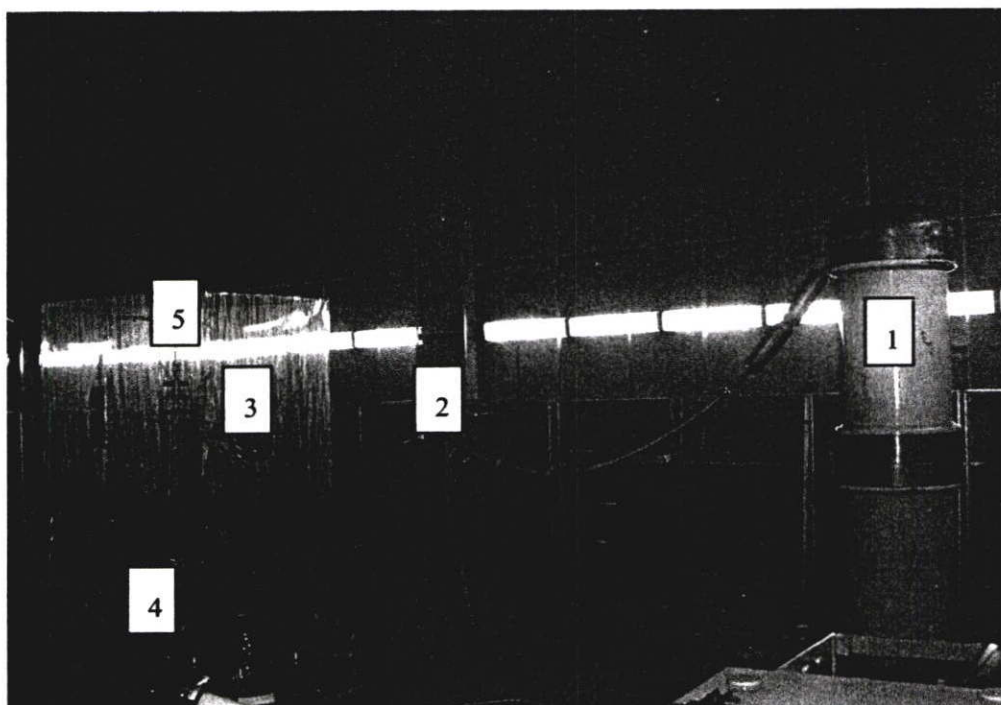
3. กระโจมไอน้ำ (Fog Chamber) ขนาด กว้าง 2.2 เมตร ยาว 2.5 เมตร สูง 3 เมตร

4. หม้อต้มน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 0.5 เมตร

5. ลูกถ้วยทดสอบ

6. กล้องโคโรนา ดังรูปที่ 3.9

สภาวะการทดสอบ: อุณหภูมิ 28-29 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 751-752 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 58-59 %



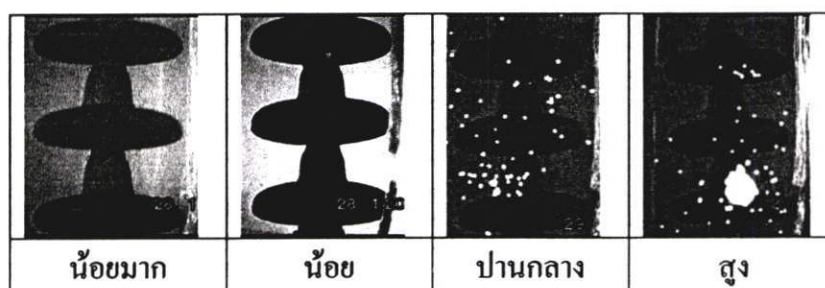
รูปที่ 3.24 วงจรการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง

ผลการทดสอบปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนที่ระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.10

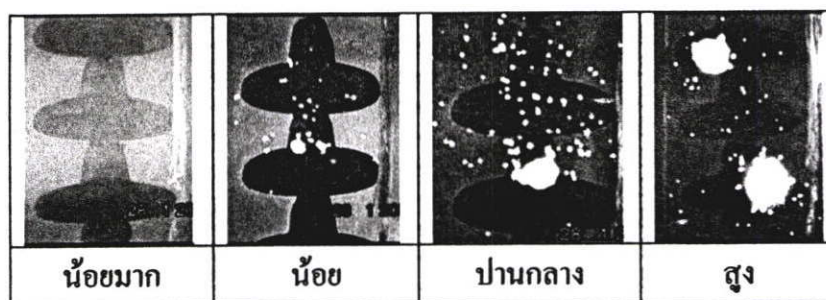
ตารางที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา และแรงดันสูงสุดที่ใช้การทดสอบของระดับความเปรอะเปื้อน (ESDD) ต่าง ๆ กัน

ESDD(mg/cm <sup>2</sup> )		แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (kV)		แรงดันสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ (kV)	
		AC	DC	AC	DC
น้อยมาก	0.006	-	-	30	30
	0.009	17	25	24	30
	0.011	15	24	24	28
	0.020	14	22	18	24
น้อย	0.034	9	14	12	19
	0.048	10	17	13	20
ปานกลาง	0.061	7	13	10	20
	0.070	7	17	11	20
	0.081	7	15	10	20
	0.085	9	15	13	17
มาก	0.108	7	13	9	20
	0.182	9	15	13	17

ผลการทดสอบโดยใช้กล้องโคโรนาในการถ่ายภาพปรากฏการณ์การเกิดโคโรนา จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การทดสอบภายใต้เงื่อนไขกระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ถึง 3.27 และภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง 3.28 ถึง 3.30 ตามลำดับ



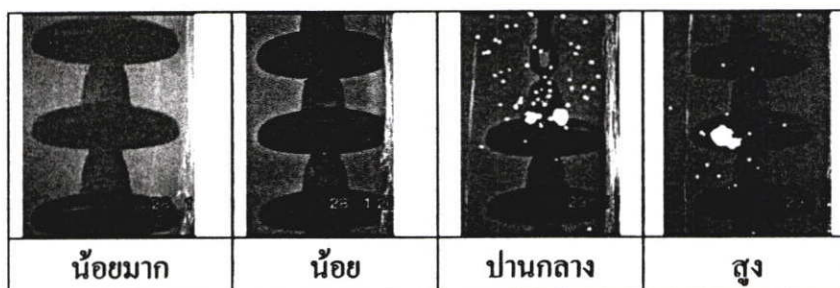
รูปที่ 3.25 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 7 kVAC



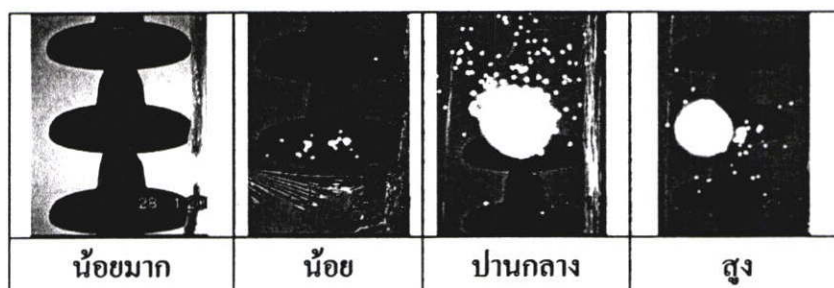
รูปที่ 3.26 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดที่ระดับแรงดัน 9 kVAC

	ระดับแรงดัน สูงสุดที่ ทดสอบน้อย กว่า 14 kV	ระดับแรงดัน สูงสุดที่ ทดสอบน้อย กว่า 14 kV	ระดับแรงดัน สูงสุดที่ ทดสอบน้อย กว่า 14 kV
น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง	สูง


รูปที่ 3.27 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดที่ระดับแรงดัน 14 kVAC



รูปที่ 3.28 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ระดับแรงดัน 13 kVDC



รูปที่ 3.29 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ระดับแรงดัน 17 kVDC

	ระดับแรงดัน สูงสุดที่ ทดสอบน้อย กว่า 22 kV	ระดับแรงดัน สูงสุดที่ ทดสอบน้อย กว่า 22 kV	ระดับแรงดัน สูงสุดที่ ทดสอบน้อย กว่า 22 kV
	น้อยมาก	น้อย	ปานกลาง

รูปที่ 3.30 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ระดับแรงดัน 22 kVDC

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่า ปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาจะสามารถตรวจจับได้ที่ระดับความเปราะเป็อนน้อย และจะเห็นได้ปรากฏการณ์ได้ชัดเมื่อ ระดับความเปราะเป็อนสูงขึ้น หรือระดับแรงดันที่ทำการทดสอบสูงขึ้น ซึ่งข้อมูลการทดสอบนี้ค่อนข้างที่จะมีประโยชน์สูงกับหน่วยการซ่อมบำรุงระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ในการกำหนดระยะเวลาการซ่อมบำรุงเพื่อลดความเสี่ยงของโอกาสเกิดความผิดปกติในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบกระแสดตรงที่อาจจะนำไปประยุกต์ให้เหมาะสมกับประเทศไทย

#### 3.4.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนากับลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับในกระโจมไอน้ำ

ในระบบการการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบกระแสดตรงพบว่าระดับการจับเกาะของสิ่งเปราะเป็อนหรือ ESDD จะมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบกระแสดลับ ซึ่งผลเกิดมาจากผลของสนามไฟฟ้า ดังจะแสดงในบทที่ 4 ซึ่งจากหัวข้อการทดสอบที่ 3.2 พบว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเมื่อทำการเคลื่อนผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) ระดับแรงดันที่เกิดการวางไฟตามผิวจะมีค่าลดลงมาเล็กน้อย เมื่อทำการทดสอบภายใต้สภาวะแห้งสะอาด จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับการเคลื่อนผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ และใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสดลับ พบว่าจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเปราะเป็อนได้ แต่ยังไม่พบว่าได้มีการนำมาใช้ในระบบกระแสดตรง ดังนั้นจากสมมติฐานดังกล่าวจึงได้เกิดการทดลองนี้ขึ้นมา เพื่อศึกษาผลของการเคลื่อนผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับด้วยสารกึ่งตัวนำว่าสามารถที่จะแก้ปัญหาเรื่องการเปราะเป็อนได้หรือไม่ ซึ่งลูกถ้วยฉนวนที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลื่อนผิวด้วยกระบวนการที่ได้มาตรฐาน โดยโรงงานผู้ผลิตลูกถ้วย โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบปรากฏการณ์การเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาโดยทำการจำลองระดับความเปราะเป็อนในระดับสูงสุด ซึ่งค่า ESDD มีค่ามากกว่า  $0.1 \text{ mg/cm}^2$  โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบกระแสดตรง ในกระโจมไอน้ำซึ่งเปรียบเสมือนว่าอยู่ในสภาวะรุนแรงที่สุด

### ขั้นตอนเตรียมการทดลอง

ชุดลูกถ้วยทดสอบประกอบด้วย 6 ชุด โดยที่ 3 ชุดจะเป็นลูกถ้วยฉนวนแบบปกติ และอีก 3 ชุดจะเป็นลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะต่อแฉวนเป็นพวง 3 ลูก โดยระดับความเปรอะเปื้อนที่จำลองเข้าไปจะอยู่ที่ระดับความเปรอะเปื้อนรุนแรง (Heavy) ซึ่งค่า ESDD ที่จำลองเข้าไปมีค่า 0.16 mg/cm<sup>2</sup>

### ขั้นตอนการทดสอบ

ทำการต่อวงจรโดยใช้วงจรการทดลองดังรูปที่ 3.24 โดยนำพวงลูกถ้วยทดสอบติดตั้งในกระโจมไอน้ำ ตามมาตรฐาน IEC 507 และหลังจากนั้นก็ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยใช้กล้องโคโรนาทำการถ่ายภาพปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนา ซึ่งโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายจะต้องไม่ทำให้เกิดการรวบไฟตามผิวเนื่องจากไอน้ำที่อยู่ภายในกระโจม ดังนั้นเมื่อสามารถตรวจจับปรากฏการณ์โคโรนาได้แล้ว จะต้องหยุด และปรับระดับแรงดันลง เพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ทดสอบ

ผลการทดสอบค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ของลูกถ้วยกระแสสลับแบบฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนแบบฉนวนปกติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะการทดสอบกระแสตรง

ชื่อของลูกถ้วย	ESDD ที่จำลอง (mg cm <sup>-2</sup> )		ควมสกปรก (MΩ)		แรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา (kV)			ระดับแรงดันทดสอบที่จ่าย (kV)
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ทว.ที่ 1	ทว.ที่ 2	ทว.ที่ 3	
ปกติ	-	-	2.7	0.7	15	13	16	20
เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ	-	-	0.001	0.001	-	-	-	20
ปกติ	0.16	-	0.004	0.002	9.7	9.5	9.8	20
เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ	0.16	-	0.001	0.001	-	-	-	20

### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยฉนวนทดสอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี

1) การเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยฉนวนแบบฉนวนกระแสสลับแบบปกติทั่วไป กับลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในตารางที่ 3.9 แถวที่หนึ่ง และ สอง ไม่พบ

ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนากับลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่พบปรากฏการณ์การเกิดโคโรนากับลูกถ้วยฉนวนปกติ ที่ระดับแรงดันเฉลี่ย 14.67 kV ตามลำดับ เหตุผลเนื่องมาจากคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบบริเวณพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งลูกถ้วยฉนวนเมื่อทำการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำแล้ว ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมีการกระจายที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ จึงทำให้ไม่พบปรากฏการณ์โคโรนา

2) การเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยฉนวนแบบแกนกระแสดลัดแบบปกติทั่วไป กับลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งลูกถ้วยทั้งสองชนิดมีการจำลองการเปราะเปื้อนเข้าไปด้วยที่ระดับความเปราะเปื้อนรุนแรง และทำการทดสอบเปรียบเทียบเช่นเดียวกับข้อ 1) พบว่าระดับแรงดันที่เกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนแบบปกติ จะลดระดับลงมาซึ่งมีระดับแรงดันเฉลี่ย 9.67 kV หรือประมาณ 66 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่พบปรากฏการณ์โคโรนากับลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งด้วยเหตุผลเดียวกันว่า การกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ เพราะฉะนั้นไม่ว่าจะทำการทดสอบโดยการจำลองสิ่งเปราะเปื้อนเข้าไปหรือไม่ ก็จะไม่ส่งผลกับปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนากับลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ จะเห็นได้ว่าในระดับความเปราะเปื้อนรุนแรง ซึ่งไม่พบปรากฏการณ์การเกิดโคโรนา

#### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้อย่างเจนว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดแบบแกนเมื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ และนำไปทดสอบภายใต้เงื่อนไขจำลองในห้องที่มีหมอกปริมาณสูง พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมาดั่งจะเห็นได้ว่าไม่พบปรากฏการณ์โคโรนาเลย ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนปกติโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการจำลองสิ่งเปราะเปื้อนเข้าไปด้วย พบระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาลดลงเกินกว่าครึ่งเมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนปกติ

## บทที่ 4

# การออกแบบลูกถ้วยฉนวน และวิเคราะห์ผล

### 4.1 บทนำ

ในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง และให้ความสำคัญ ก็คือระดับความรุนแรงของความเปรอะเปื้อน ซึ่งเป็นที่ทราบโดยทั่วๆ ไปแล้วว่าพฤติกรรมกรจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนจะค่อนข้างสูงกว่าปกติโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบกระแสสลับ ซึ่งยังไม่พบการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงในประเทศไทยเลย จากบทที่ 3 ในการทดสอบการเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ ภายใต้งื่อนไขการทดสอบกระแสตรง แสดงไว้อย่างชัดเจนว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำแล้วนั้น เมื่อนำมาทดสอบภายใต้สภาวะจำลองที่มีความเปรอะเปื้อนพบว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนา ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ยากมาก ทำให้ลดโอกาสการเกิดปรากฏการณ์วาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนได้ อีกทั้งเมื่อมีการออกแบบวงแหวนโคโรนาและนำมาต่อร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวน ระดับแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาก็เกิดขึ้นได้ยากเช่นกัน ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอผลของการจำลองโดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (FEMLAB) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดลองเพื่อลดโอกาสผิดพลาด ในการที่จะนำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบแขวนที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะไปทำการศึกษาต่อ หรือใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในประเทศไทยต่อไป

โดยจะนำเสนอตั้งแต่การจำลองลูกถ้วยฉนวนแบบพื้นฐาน ว่ารูปร่างของลูกถ้วยฉนวนที่ดีควรจะมีรูปร่างอย่างไร ที่จะทำให้การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้ามีการกระจายที่สม่ำเสมอ และจะมีการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณของโปรแกรม (FEMLAB) ซึ่ง จะทำการทดสอบเทียบกับการคำนวณด้วยมือ จากนั้นจะเป็นการจำลองลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสสลับที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะ เพื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสตรงที่มีการใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

### 4.2 การศึกษา จำลอง และออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน

ลูกถ้วยฉนวนได้รับความเครียดอย่างต่อเนื่องทั้งทางกล และทางไฟฟ้า ซึ่งจะมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของสายส่งนั้นๆ ความเครียดเหล่านี้จะเพิ่มมากขึ้นตามสภาวะแวดล้อม

ที่ผิดปกติได้ ทางเลือกในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนทั่วไปจะต้องพิจารณาถึงสิ่งเหล่านี้ด้วย ได้แก่ ลักษณะของระบบไฟฟ้าที่จะนำลูกถ้วยมาใช้ ระดับความเชื่อมั่นระบบ ข้อจำกัดที่ยอมรับได้ของความสละควในการปฏิบัติงาน สภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ และผลของความเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาใช้งาน

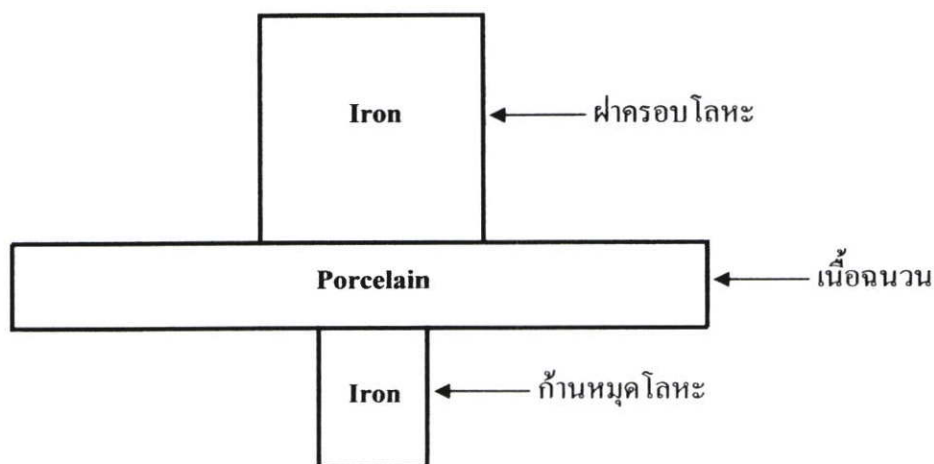
### พื้นฐานในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง

การออกแบบลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยนั้น จะออกแบบให้ครีบริหรือชั้นของลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าเพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ห้ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่กระจายบนลูกถ้วย

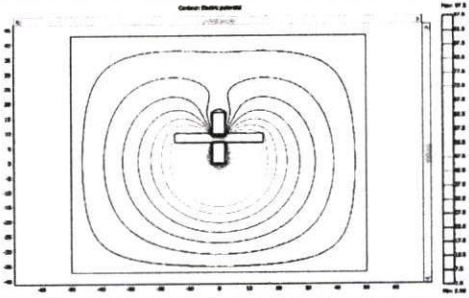
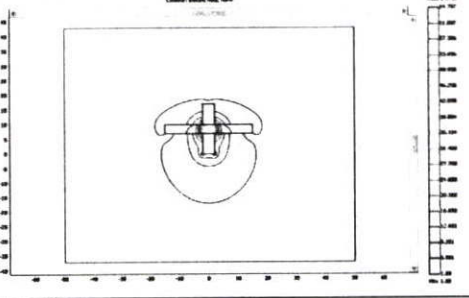
ลูกถ้วยฉนวนในอุดมคติ จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ

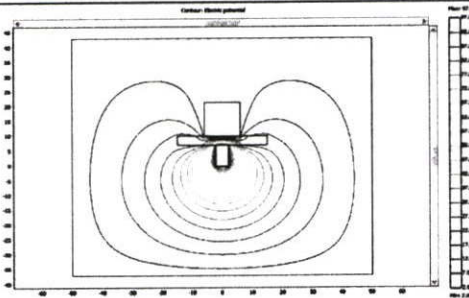
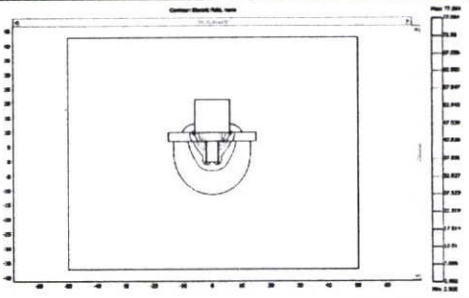
- 1) ฝาครอบโลหะ (Cap)
- 2) เนื้อฉนวน (Insulation)
- 3) ก้านหมุดโลหะ (Pin)

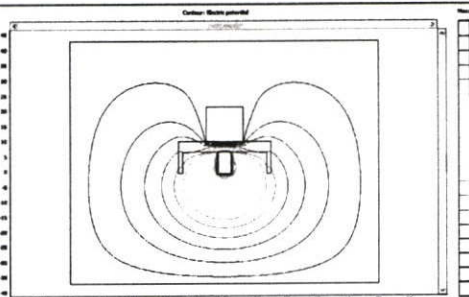
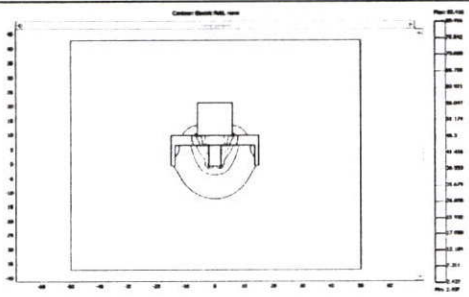
ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งฝาครอบโลหะ และก้านหมุดโลหะ จะเป็นเหล็ก (Iron) ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r = 1$  และมีค่าความไฟฟ้า  $\sigma = 1.12 \times 10^7$  S/m ส่วนชั้นส่วนที่เป็นเนื้อฉนวนจะเป็นวัสดุพอร์ซเลน (Porcelain) ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r = 5.7$  และมีค่าความไฟฟ้า  $\sigma = 1 \times 10^{-14}$  S/m โดยที่กำหนดค่าแรงดันที่จ่ายก้านหมุดโลหะมีค่าเท่ากับ 100 โวลท์ และจ่ายแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 โวลท์ หรือ กราวด์ ให้กับฝาครอบโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อที่จะจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของฝาครอบโลหะให้มีขนาดเล็ก และใหญ่ รวมไปถึงการเพิ่มจำนวนครีบริของเนื้อฉนวน และความยาว เพื่อศึกษาห้ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.2

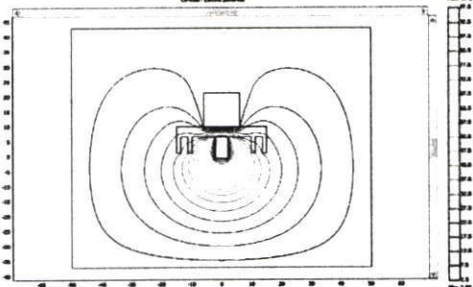
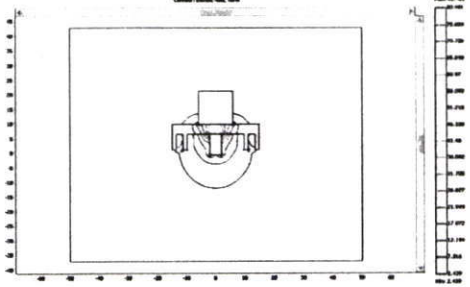


รูปที่ 4.1 แบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้ในการหาเหตุผลของการออกแบบ

การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 75.96 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap เท่ากับ Pin และ ไม่มีครีบริบ	ขนาด Cap เท่ากับ Pin และ ไม่มีครีบริบ
(ก)	(ข)

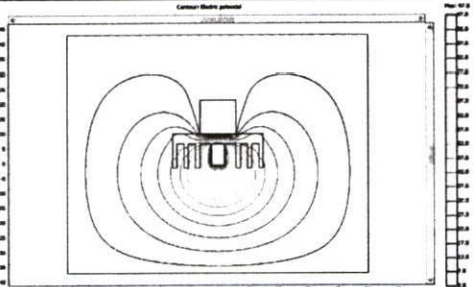
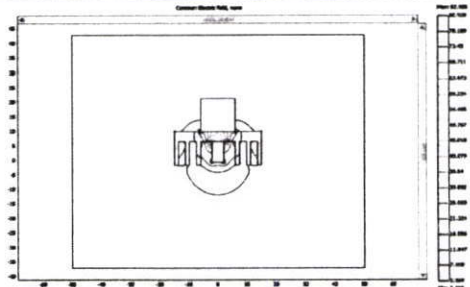
การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 70.515 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และ ไม่มีครีบริบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และ ไม่มีครีบริบ
(ค)	(ง)

การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 74.835 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบริบ 1 ครีบริบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบริบ 1 ครีบริบ
(จ)	(ฉ)

การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 76.747 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบ 2 ครีบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบ 2 ครีบ

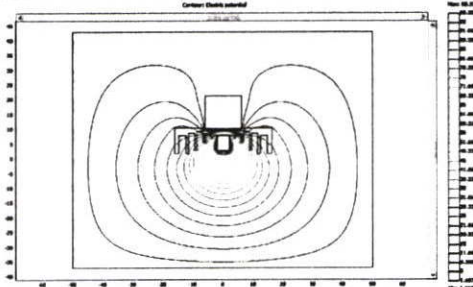
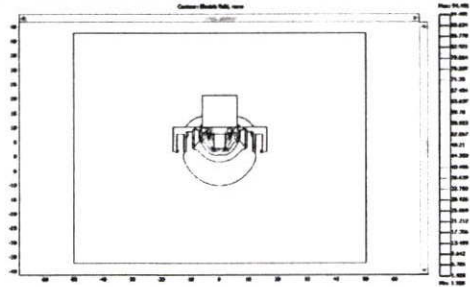
(ข)

(ค)

การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 75.867 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบ 3 ครีบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบ 3 ครีบ

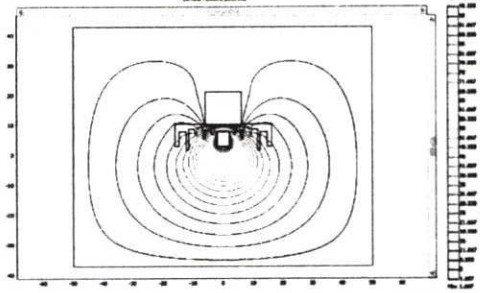
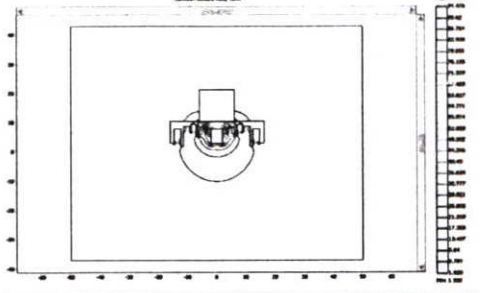
(ง)

(จ)

การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.774 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยลดความยาวครีบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยลดความยาวครีบ

(ฉ)

(ซ)

การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.365 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยครีบริบสั้น ขาว สลับกัน	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยครีบริบสั้น ขาว สลับกัน
(จ)	(จ)

รูปที่ 4.2 ผลของการจำลองของลูกถ้วยถึงลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า

#### วิเคราะห์ผลการจำลอง

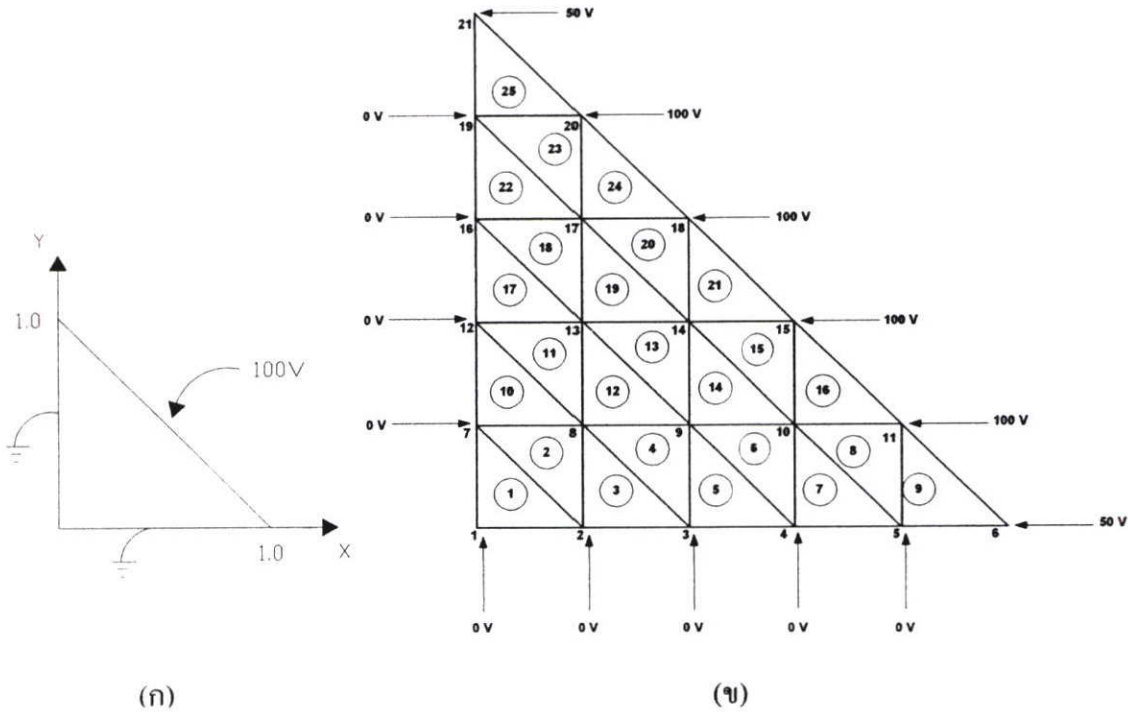
จากการจำลองลูกถ้วยด้วยฉนวน และใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระยะ Creepage ของลูกถ้วยฉนวน โดยการปรับระยะปีกยาวขึ้น การเพิ่มครีบริบซึ่งมีทั้งครีบริบยาว และครีบริบสั้น ตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณา คือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่า การที่กำหนดให้ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยครีบริบสั้น ขาว สลับกัน ดังรูปที่ (จ) กับ การที่กำหนดให้ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยลดความยาวครีบริบ ดังรูปที่ (ข) ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งสิ่งที่พบอีกประการหนึ่งคือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อระหว่าง PIN กับเนื้อฉนวน ดังนั้นการออกแบบจะต้องพยายามออกแบบให้ปีก และครีบริบอยู่ในแนวของเส้นศักย์ไฟฟ้า เพื่อลดการเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด อีกทั้งในการออกแบบ การที่มีครีบริบหรือปีกที่ยาวจะ ช่วยเพิ่มระยะรั่วไหล (Leakage distance) ซึ่งทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าที่ซึ่งนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่ายด้วย

### 4.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้าระหว่างการคำนวณด้วยมือกับโปรแกรม FEM LAB

เพื่อเป็นการตรวจสอบ และยืนยันว่าโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือ ก่อนที่จะนำไปจำลองเพื่อวิเคราะห์ออกแบบลูกถ้วย

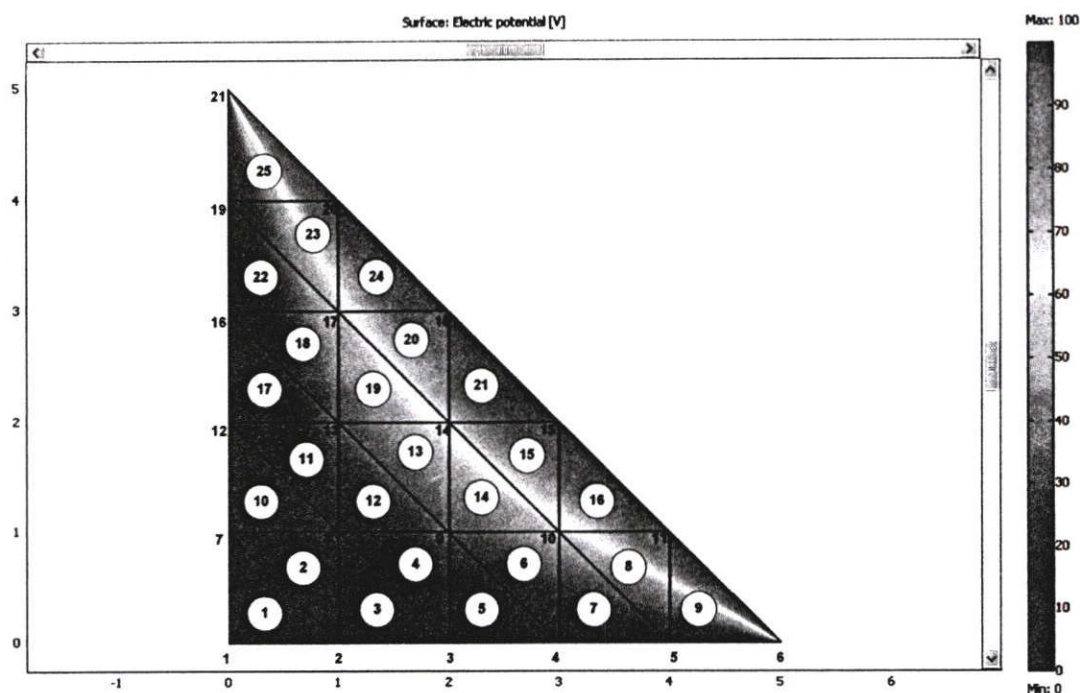
ถนวนกระแสลัดแบบเขวนเพื่อที่จะนำมาใช้งานในระบบกระแสตรงนั้น จึงได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ กับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมว่ามีค่าตรงกัน หรือต่างกันอย่างไร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 [21] และ 4.4 ซึ่งรูปที่ 4.3 จะเป็นผลที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ ส่วนรูปที่ 4.4 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ( FEM LAB Version 3.2 )



โหนด	X	Y	ศักย์ไฟฟ้า (โวลท์)	
			คำนวณด้วยมือ	โปรแกรม FEMLAB
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.20	0.00	0.00	0.00
3	0.40	0.00	0.00	0.00
4	0.60	0.00	0.00	0.00
5	0.80	0.00	0.00	0.00
6	1.00	0.00	50.00	50.00
7	0.00	0.20	0.00	0.00
8	0.20	0.20	18.18	18.18
9	0.40	0.20	36.36	36.36
10	0.60	0.20	59.09	59.09
11	0.80	0.20	100.00	100.00
12	0.00	0.40	0.00	0.00
13	0.20	0.40	36.36	36.36
14	0.40	0.40	68.18	68.18
15	0.60	0.40	100.00	100.00
16	0.00	0.60	0.00	0.00
17	0.20	0.60	59.09	59.09
18	0.40	0.60	100.00	100.00
19	0.00	0.80	0.00	0.00
20	0.20	0.80	100.00	100.00
21	0.00	1.00	50.00	50.00

(ก)

รูปที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ [21]



รูปที่ 4.4 ผลของการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEM LAB

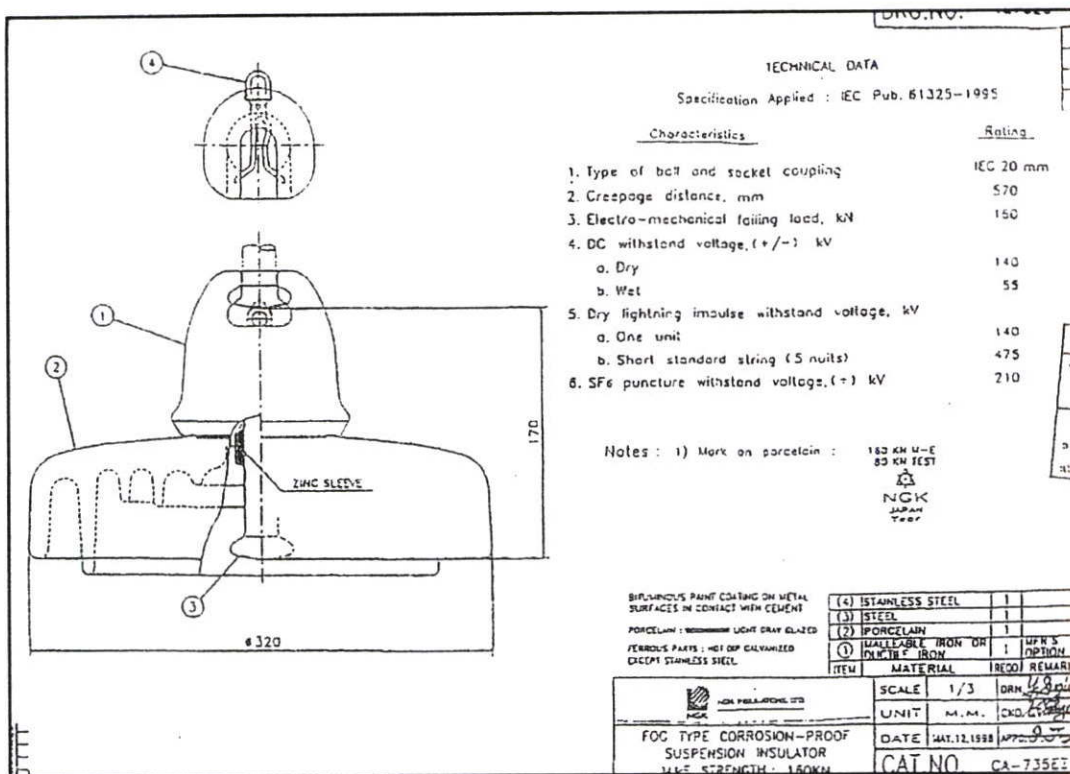
#### วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากการจำลองเพื่อพิสูจน์ว่าโปรแกรม FEM LAB มีความสามารถที่จะคำนวณผลได้ถูกต้อง เมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยมือ พบว่าระดับแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละ โหนดจะมีค่าเท่ากันซึ่งผลจากการคำนวณ โดยโปรแกรม สามารถดูระดับแรงดันที่เกิดขึ้นที่แต่ละ โหนดได้โดยแถบสี

#### 4.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง โดยโปรแกรม FEM LAB

การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ในทาง ไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของ ศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันเพื่อทำการตรวจสอบว่าลักษณะ การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่าไรก่อนที่จะไปทำการปรับปรุง คุณสมบัติต่างๆ ของลูกถ้วยฉนวน เพื่อให้สามารถใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง กระแสดรงได้ รวมไปถึงการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบพื้นฐานใหม่เพื่อเปรียบเทียบ ผลต่างๆ เช่นกัน

ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบแขวนที่มีการใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง กระแสดรงดังแสดงในรูปที่ 4.5 และลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยฉนวนที่จำลองมาจากแบบจริงดัง แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นเป็นตัวอย่างการแสดงผลการสร้างเอลิเมนต์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง แบบแขวน โดยใช้โปรแกรม FEM LAB ในการจำลอง



รูปที่ 4.5 คั้นแบบของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานในประเทศไทย

ประเภทของรูปร่างที่ใช้ในการจำลอง

- ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง

คุณสมบัติขององค์ประกอบย่อยๆ

- Porcelain

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 5.7

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-14}$  siemens/meter

- Cement

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 7

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-7}$  siemens/meter

- Iron

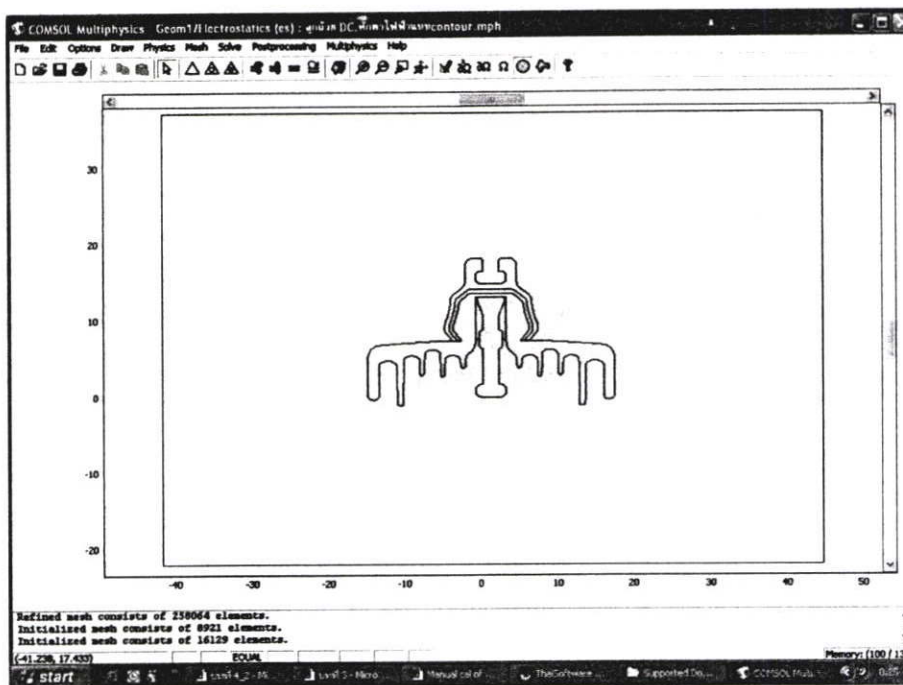
- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 1

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1.12 \times 10^7$  siemens/meter

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 100 V

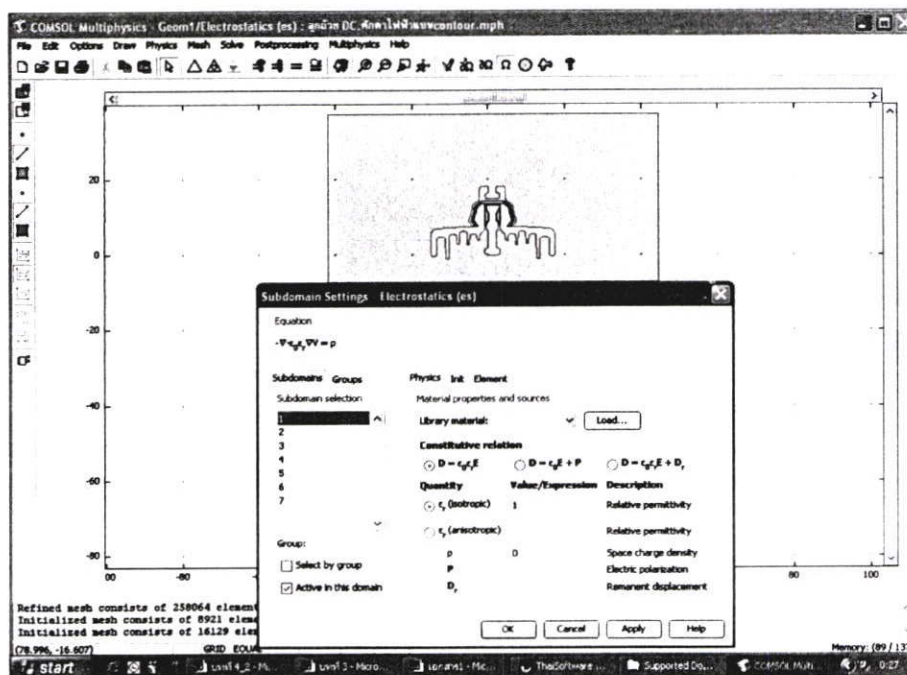
ตัวอย่างการเตรียมข้อมูล และการป้อนค่าสำหรับการจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงเพื่อคำนวณหา ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

- 1.) ทำการวาดแบบของลูกถ้วยฉนวน และสร้างเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

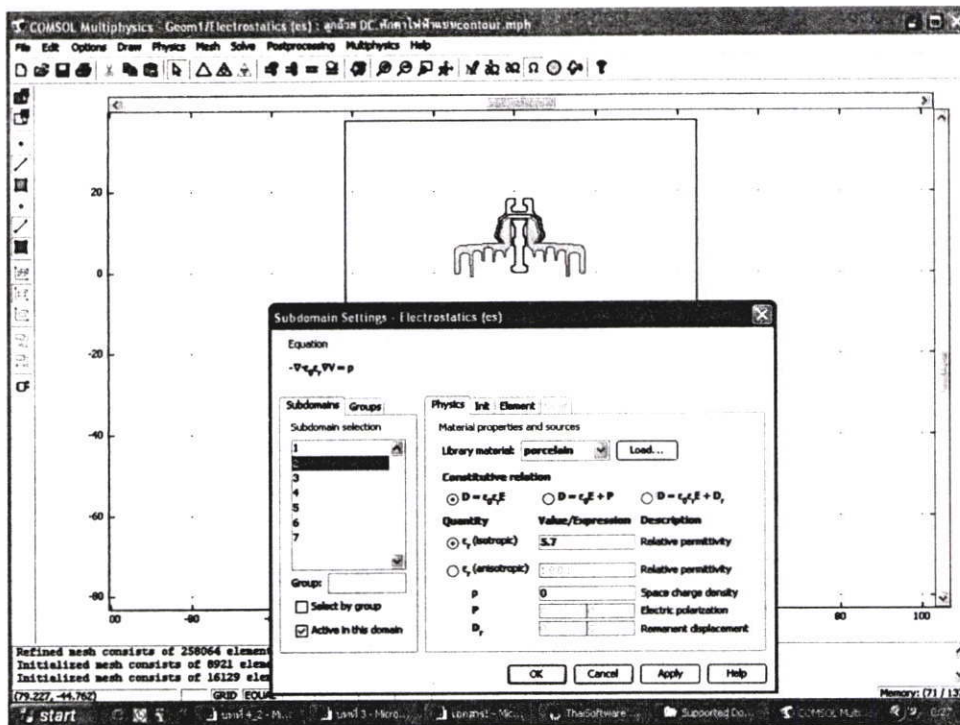


รูปที่ 4.6 การสร้างเอลิเมนต์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงโดยใช้โปรแกรม FEMLAB

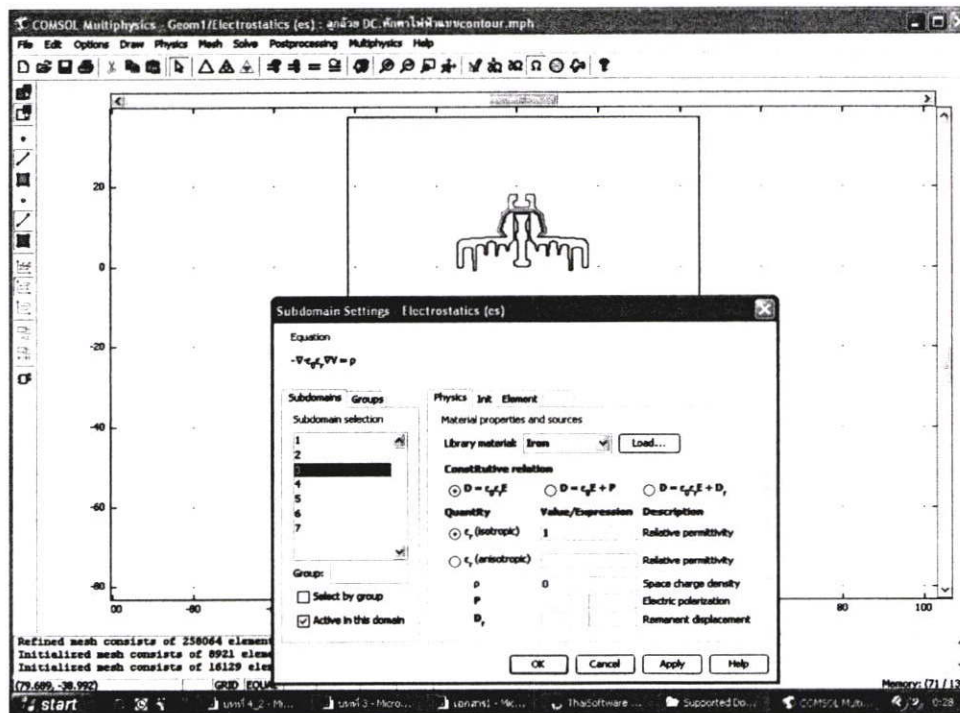
- 2.) ทำการป้อนค่าต่างๆ โดยใช้ฟังก์ชัน Subdomain setting ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่ง ค่าที่ จะต้องป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 7 ค่า เริ่มจาก รูป (ก) ถึง (ข) ตามลำดับ



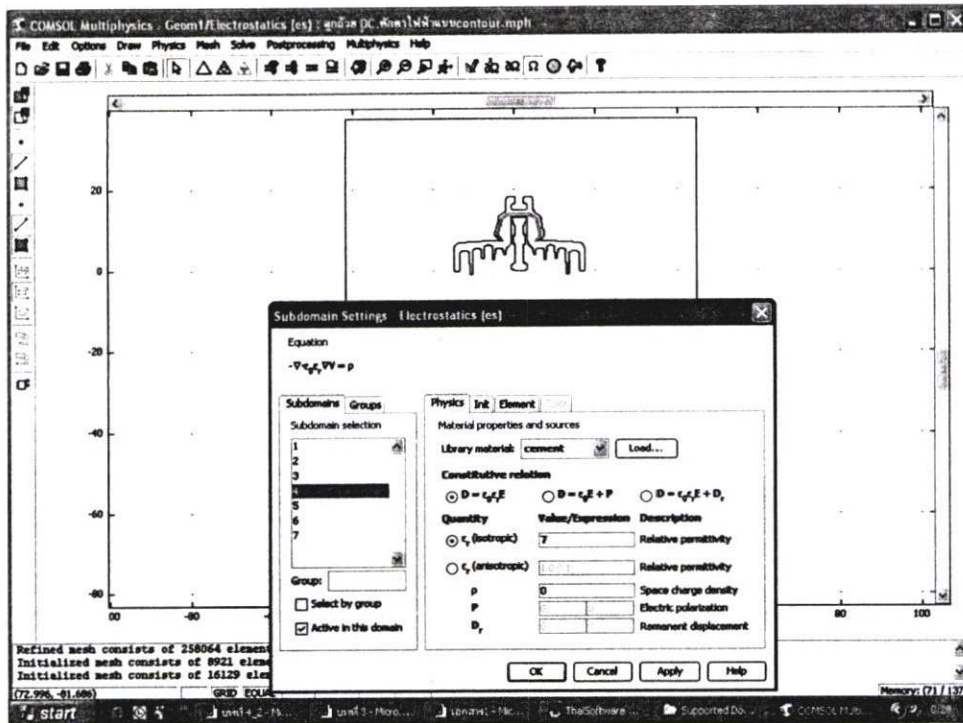
(ก)



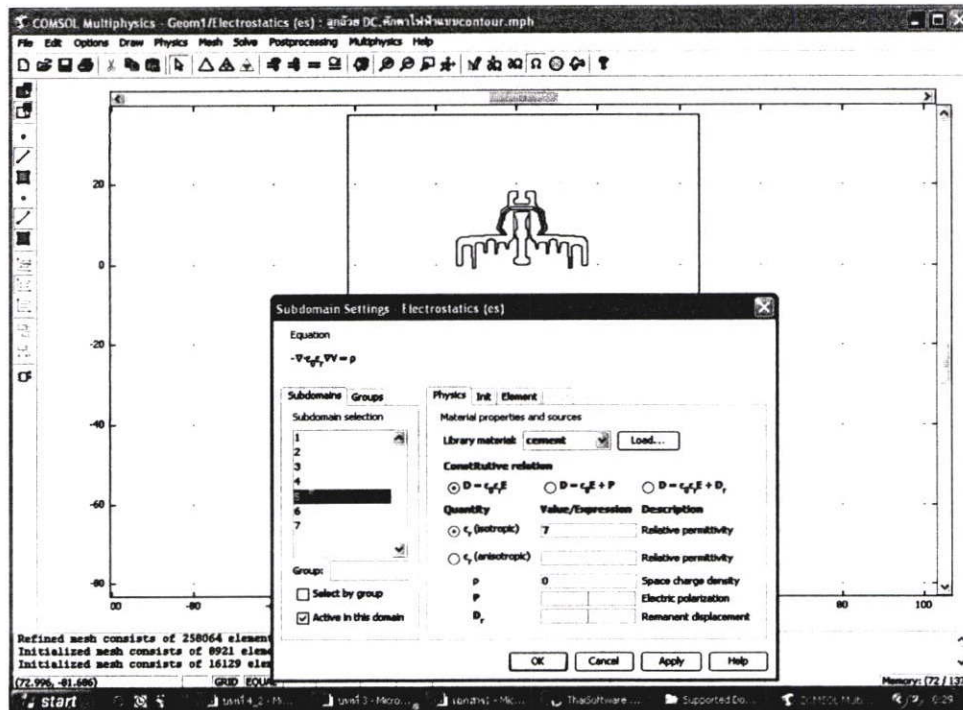
(ก)



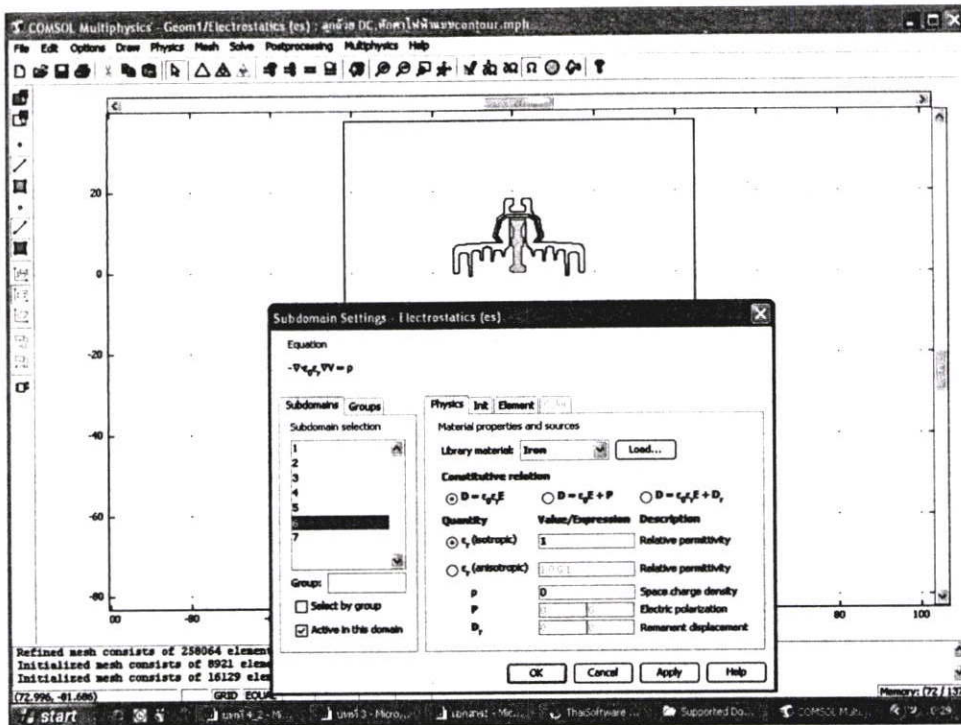
(ข)



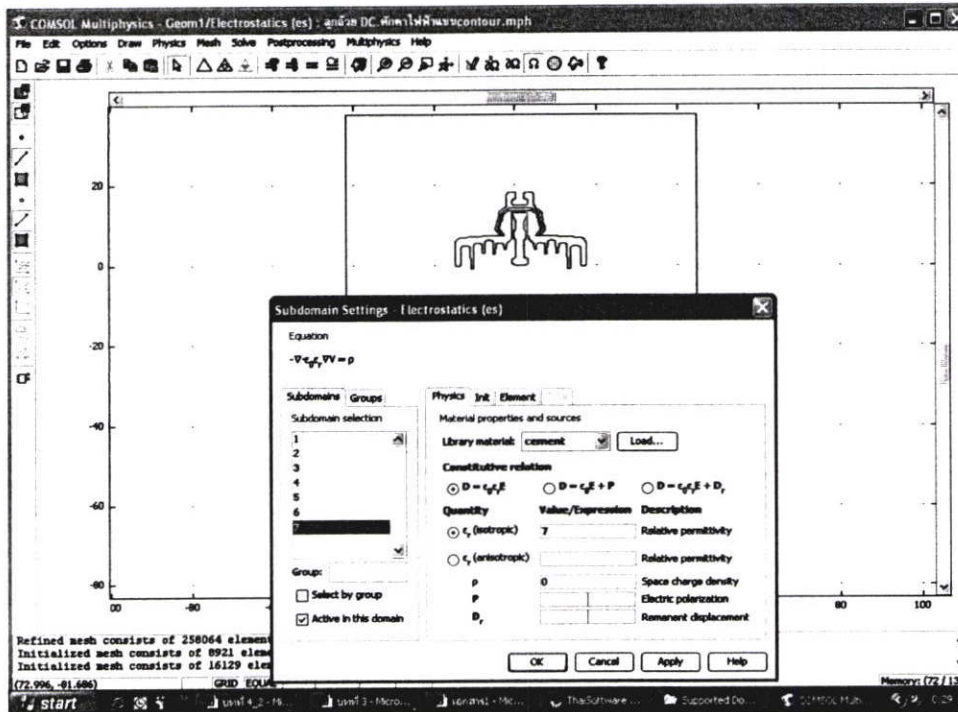
(૧)



(૨)



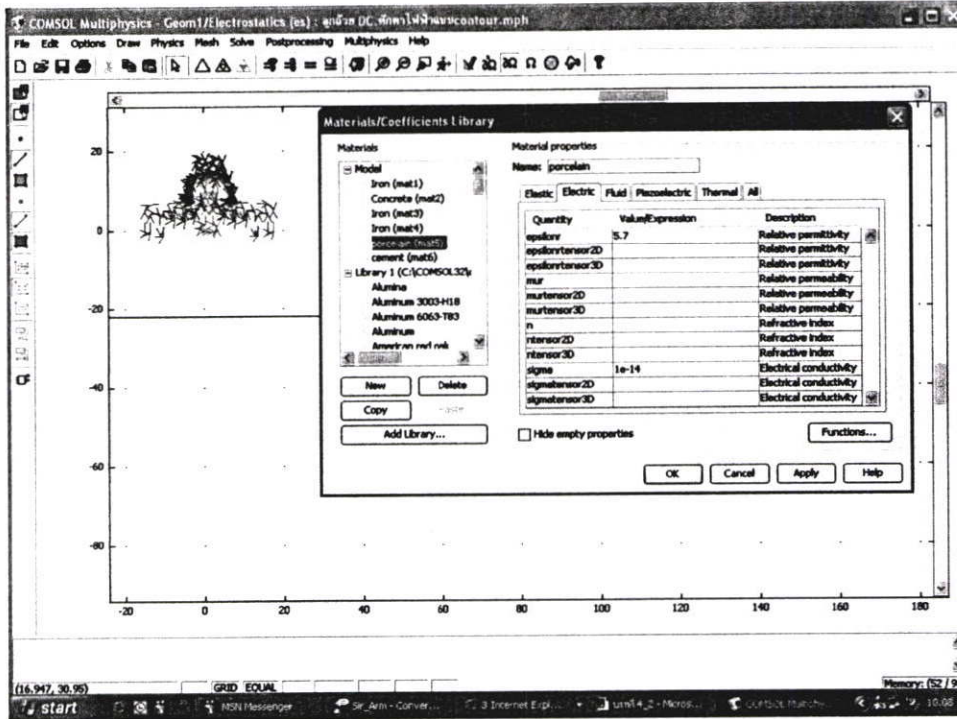
(ก)



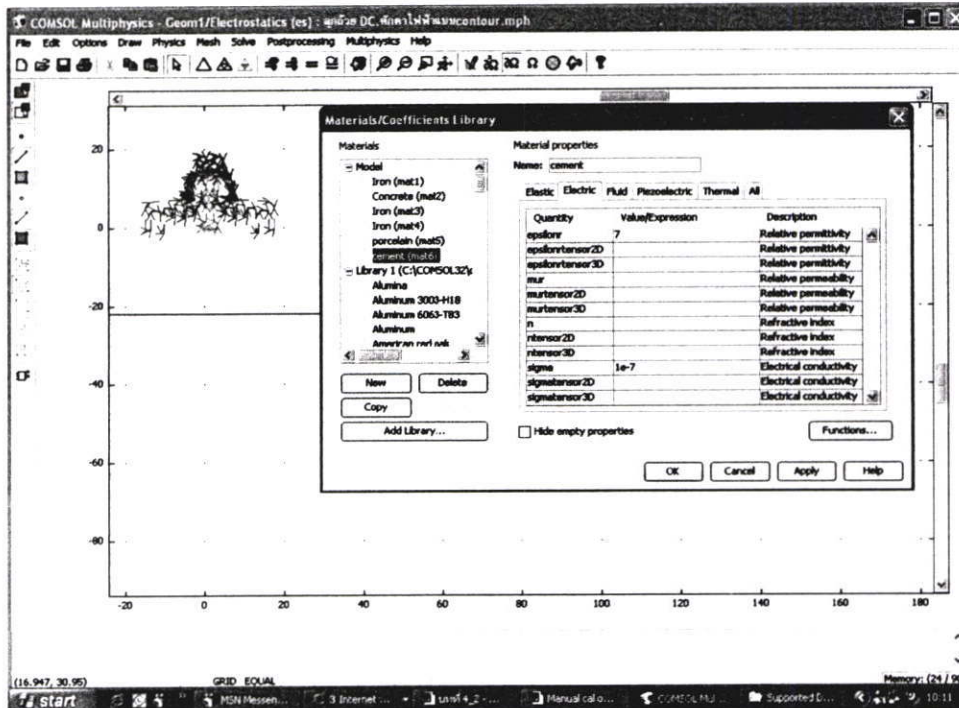
(ข)

รูปที่ 4.7 การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังก์ชัน Subdomain setting

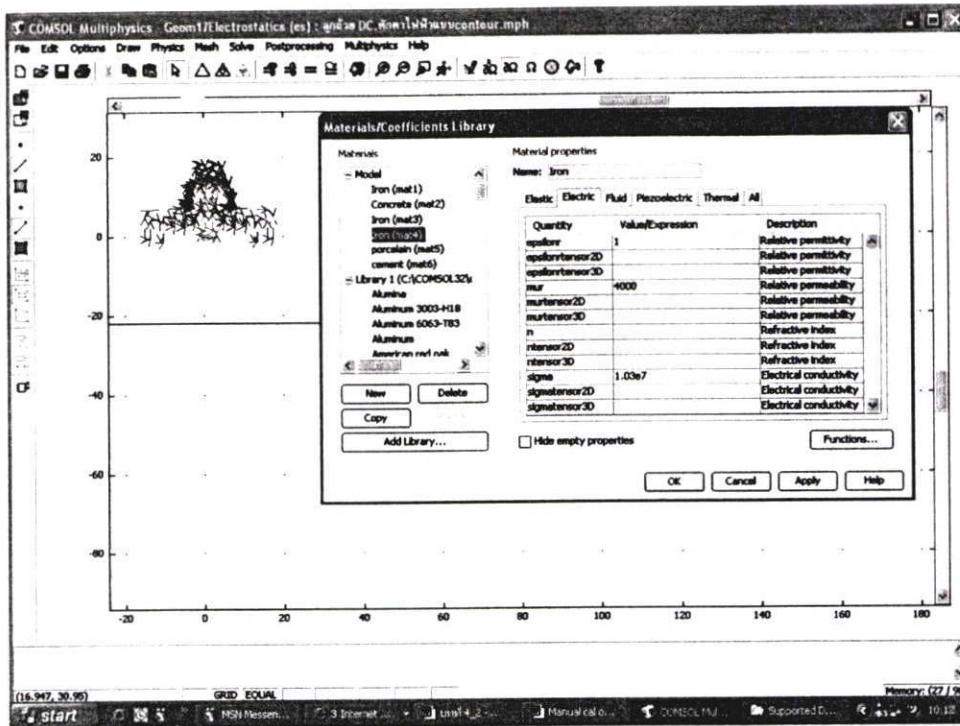
3.) ทำการป้อนค่าต่างๆ โดยใช้ฟังก์ชัน Material/Coefficient Library ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งค่าที่จะต้องป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 3 ค่า เริ่มจาก รูป (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ



(ก) การป้อนค่าคุณสมบัติของ Porcelain



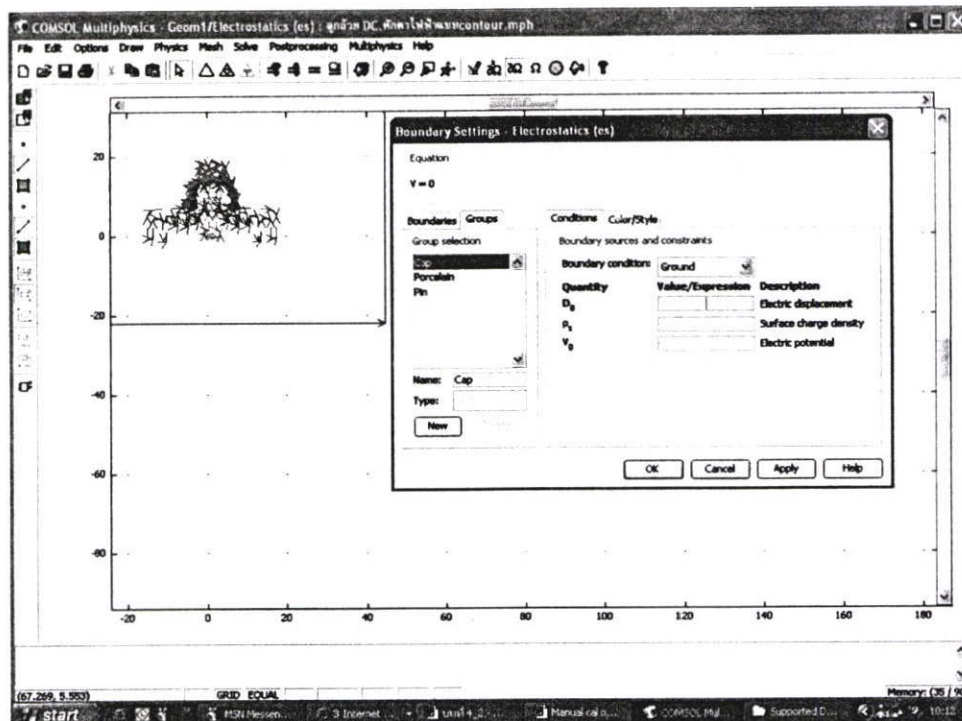
(ข) การป้อนค่าคุณสมบัติของ Cement



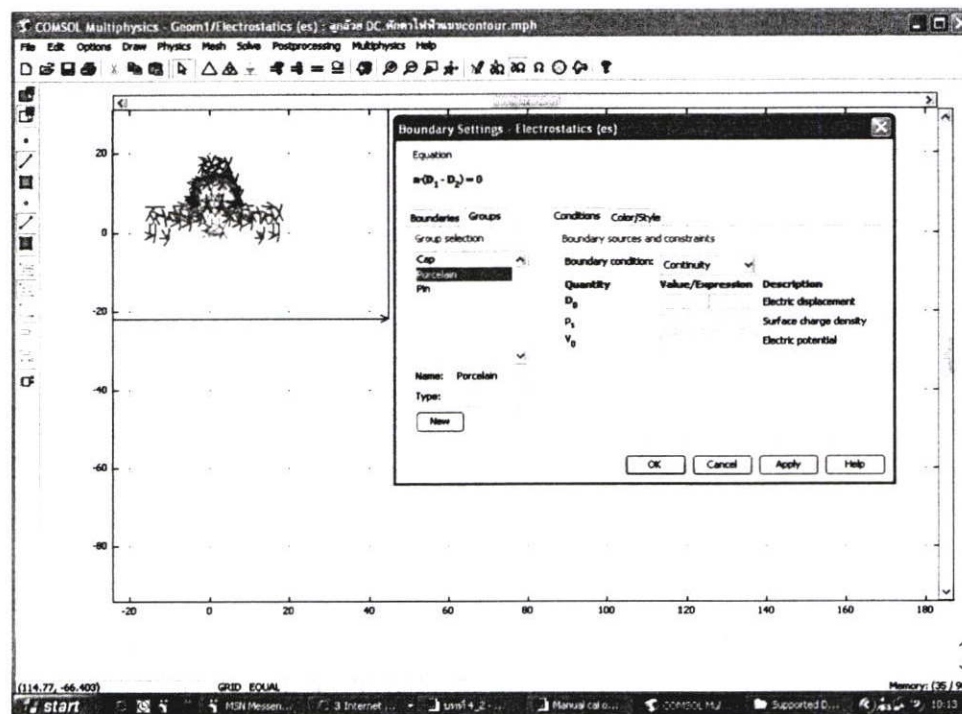
### (ค) การป้อนค่าคุณสมบัติของ Iron

รูปที่ 4.8 การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังก์ชัน Material/Coefficient Library

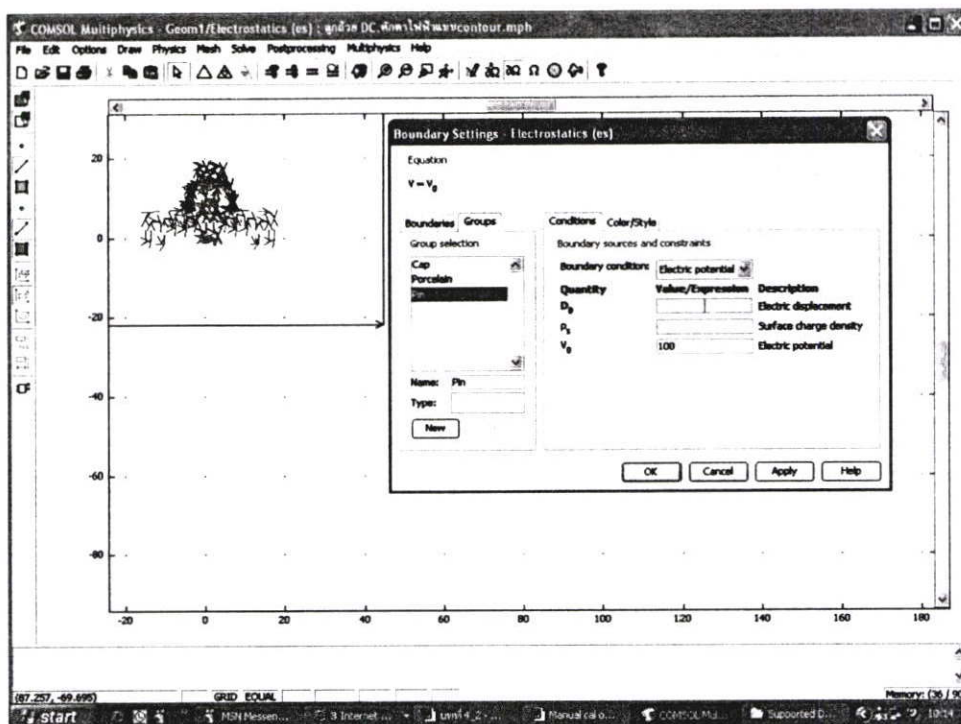
- 4.) ป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับลูกถ้วยฉนวน โดยใช้ฟังก์ชัน Boundary setting กำหนดให้แรงดัน 100 โวลต์ ให้กับทั้งหมดโลหะ หรือตัวนำ มีค่า 100 โวลต์ และ 0 โวลต์ ที่ กราวด์ หรือฝาครอบโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่ง ค่าที่จะต้องป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 3 ค่า เริ่มจาก รูป (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ



(ก) ป้อนค่าแรงดัน 0 โวลต์ หรือ กราวด์ ให้กับฝาครอบโลหะ หรือ Cap



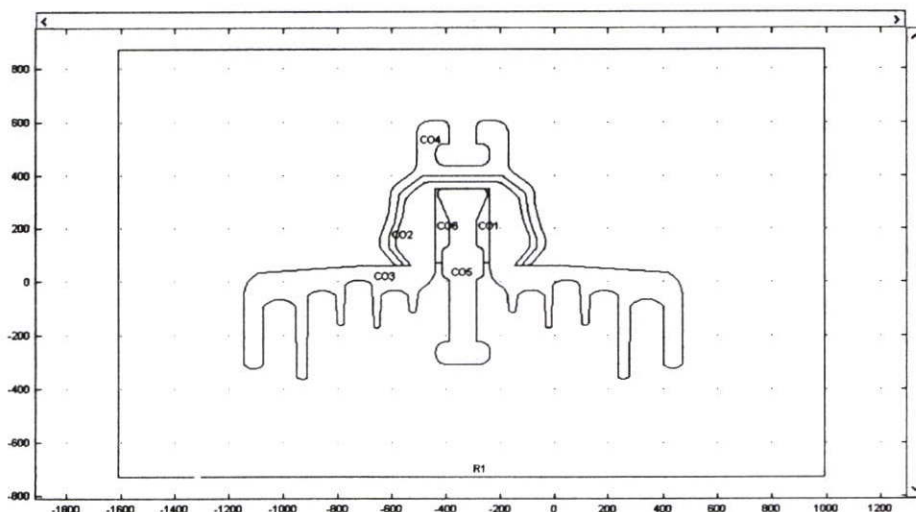
(ข) กำหนด Boundary condition ของ Porcelain เป็น Continuity



(ค) ป้อนค่าแรงดัน 100 โวลต์ หรือ Electric potential ให้กับฝาครอบโลหะ หรือ Pin

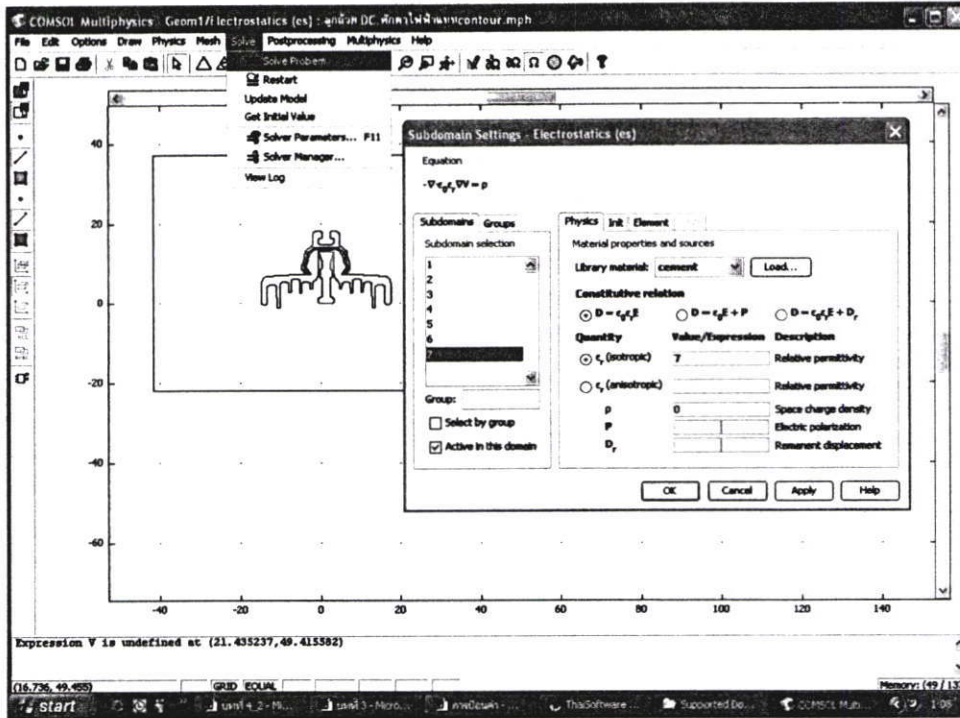
รูปที่ 4.9 การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังก์ชัน Boundary setting

5.) หลังจากป้อนค่าแล้ว โปรแกรมจะแสดงส่วนต่างๆ ที่ได้ทำการป้อนค่าเข้าไปดังรูปที่ 4.10



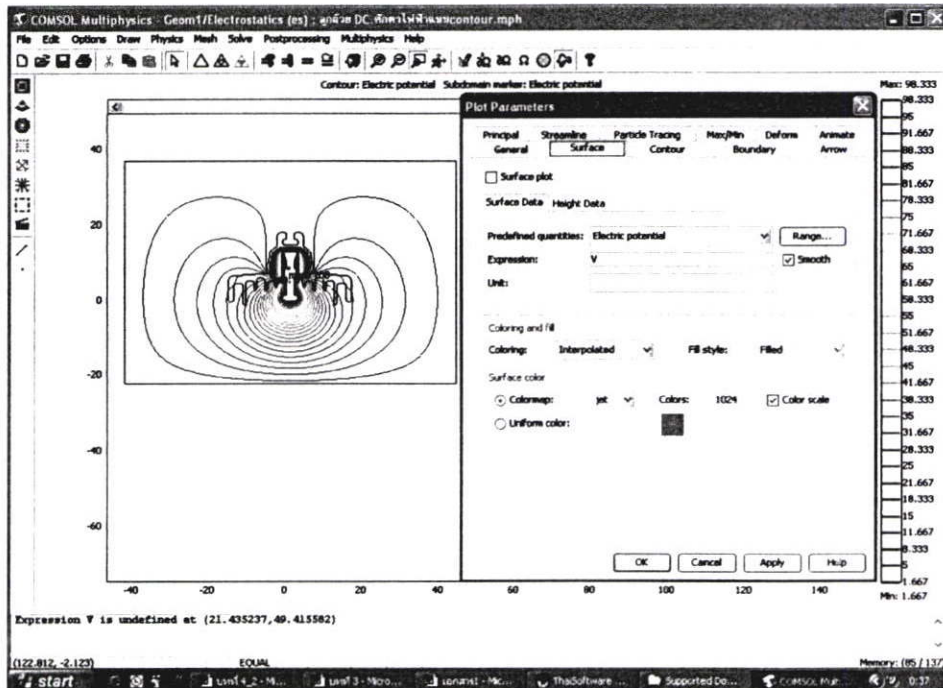
รูปที่ 4.10 ส่วนต่างๆ ของลูกถ้วยฉนวนหลังจากป้อนค่า

6.) ทำการประมวลผล โดยใช้ฟังก์ชัน Solve problem ดังแสดงในรูปที่ 4.11



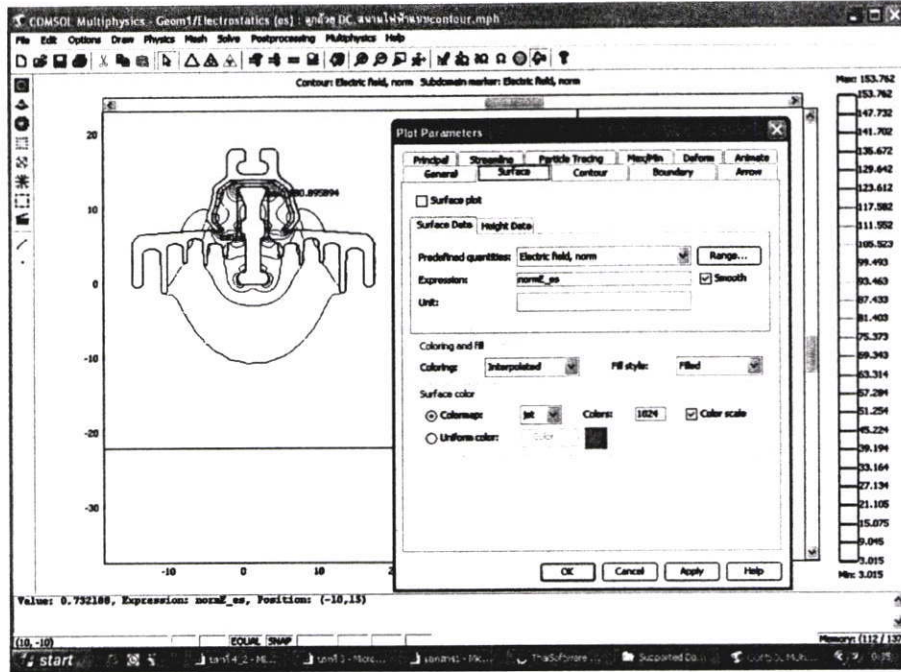
รูปที่ 4.11 การประมวลผลโดยใช้ฟังก์ชัน Solve problem

7.) ทำการแสดงผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า โดยใช้ฟังก์ชัน Plot parameters ดังแสดงในรูปที่ 4.12



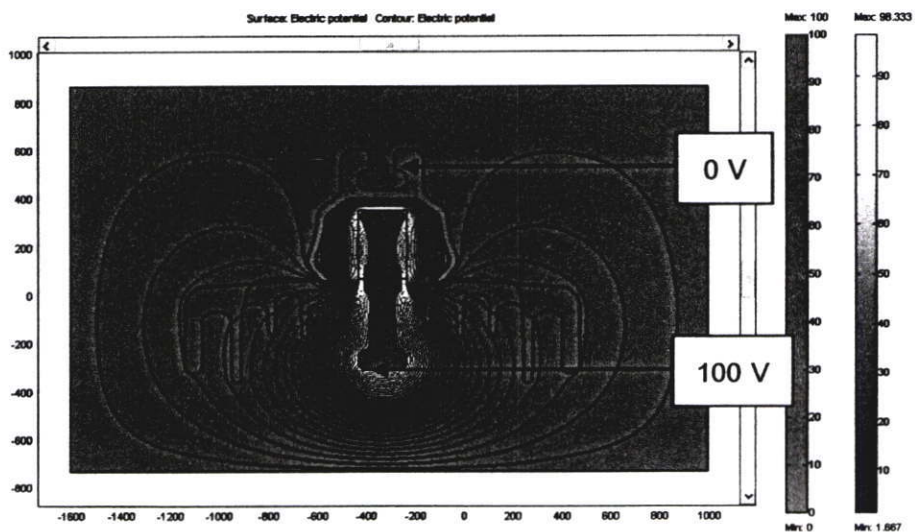
รูปที่ 4.12 การแสดงผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า

8.) ทำการแสดงผลการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยใช้ฟังก์ชัน Plot parameters ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การแสดงผลการกระจายของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.14 แสดงผลการจำลองการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงเมื่อทำการป้อนค่าต่างๆ ตามข้อ 1.) ถึง 8.) พบว่าลักษณะของเส้นศักย์ไฟฟ้าจะมีการกระจายไปตามรูปร่างของครีบ หรือชั้นของผิวลูกถ้วย ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนที่ทำการจำลองจะมีค่าน้อย เป็นผลให้การเกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนจะเกิดขึ้นได้ยาก



รูปที่ 4.14 ค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง

### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ โดยโปรแกรม FEMLAB

จากจุดมุ่งหมายของการศึกษาของงานวิจัยนี้ ที่จะพยายามนำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับมาทำการปรับปรุงคุณลักษณะเพื่อให้สามารถใช้งานในระบบกระแสตรงได้ จึงได้ทำการจำลองแบบของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ เพื่อวิเคราะห์ผลของการกระจายของของศักย์ไฟฟ้าว่ามีความแตกต่าง มากน้อยเมื่อเพียงไร เมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

ประเภทของรูปร่างที่ใช้ในการจำลอง

- ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ

คุณสมบัติขององค์ประกอบย่อยๆ

- Porcelain

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 5.7

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-14}$  siemens/meter

- Cement

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 7

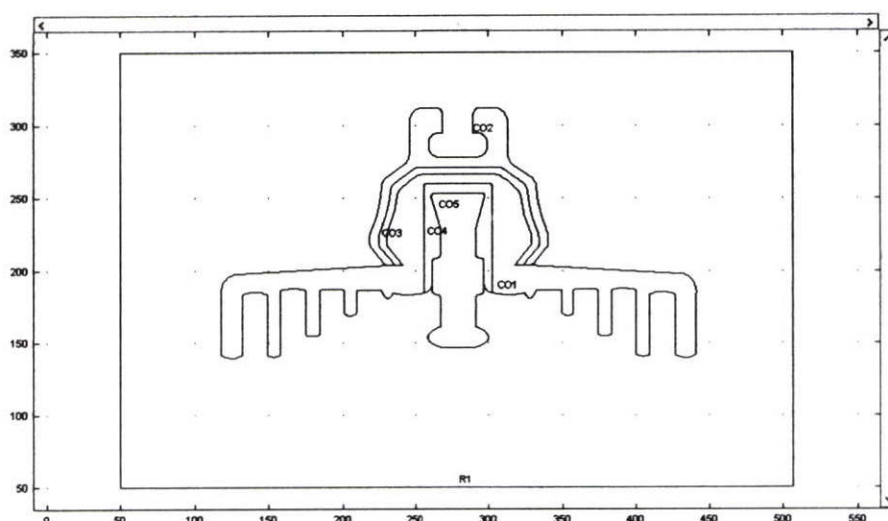
- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-7}$  siemens/meter

- Iron

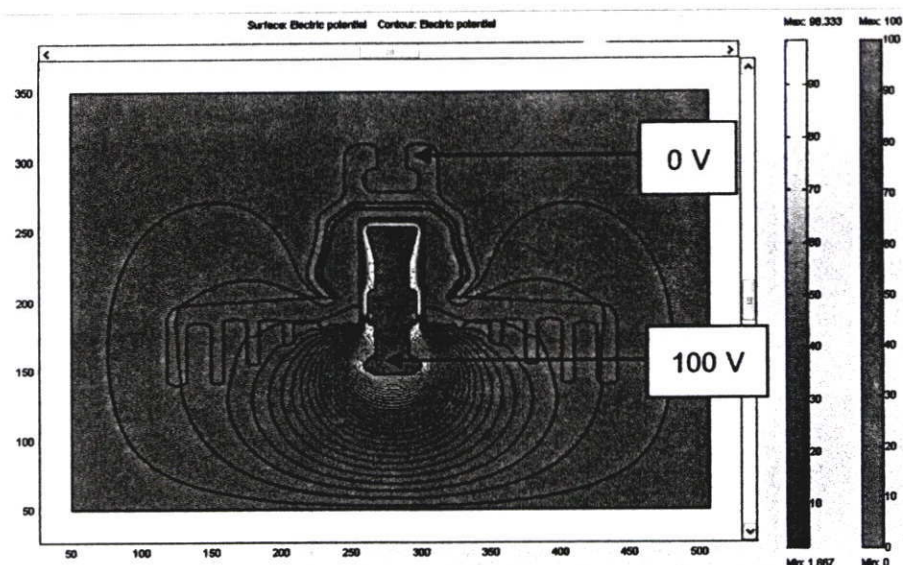
- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 1

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1.12 \times 10^7$  siemens/meter

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 100 V



รูปที่ 4.15 รูปร่างของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ



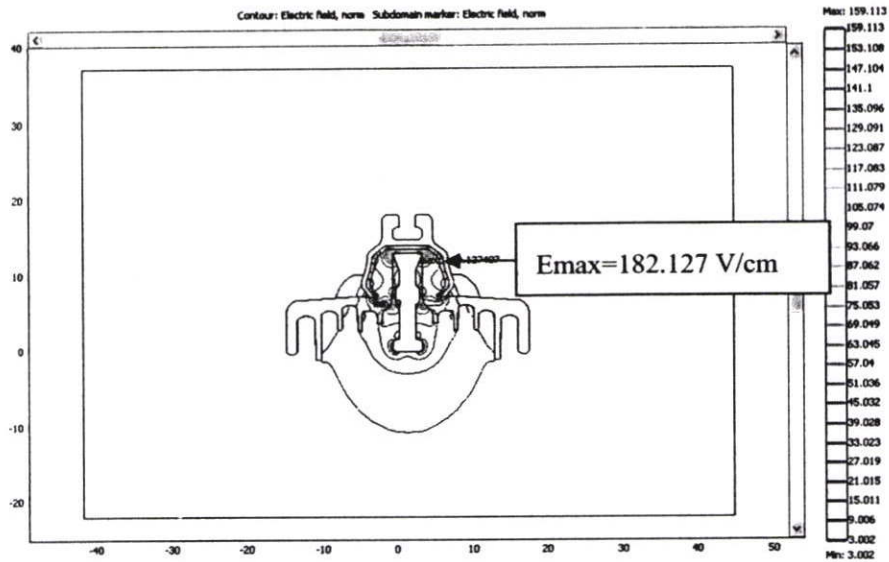
รูปที่ 4.16 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ

#### การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการจำลองที่เกิดขึ้นระหว่างลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงและกระแสสลับ

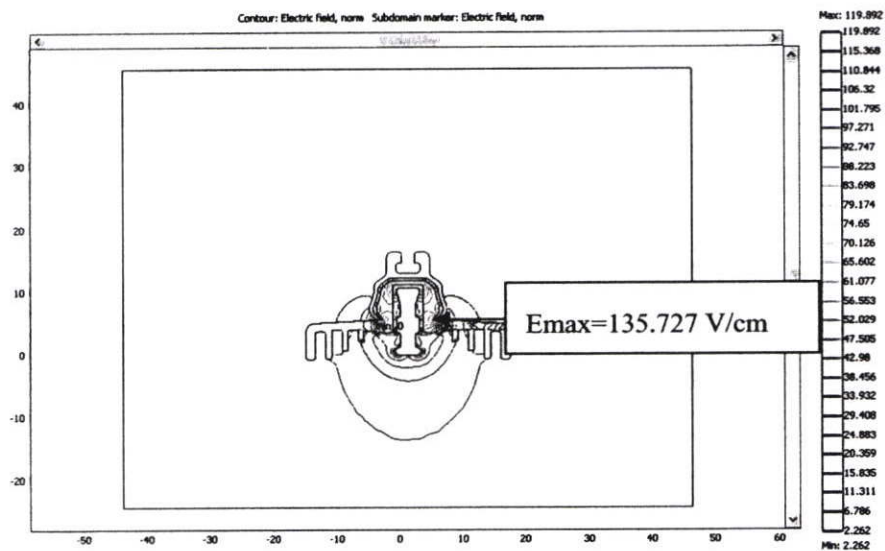
จากผลการจำลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น พบว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับจะมีการกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่เล็กกว่าเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง กล่าวคือ ลักษณะการกระจายของเส้นสมศักย์จะมีลักษณะอยู่แนวเดียวกับครีบ และผิวปีกของลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ แต่จะกระจายดีกว่าสำหรับลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.16 ตามลำดับ ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง จะสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งตำแหน่งที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดเป็นตำแหน่งเดียวกันทั้งลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และกระแสสลับคือ จุดเชื่อมต่อระหว่าง Pin กับ เนื้อ Cement

#### ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	การกระจายของศักย์ไฟฟ้า	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง	สม่ำเสมอน้อยกว่า	182.127
ลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ	สม่ำเสมอมากกว่า	135.727



รูปที่ 4.17 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.18 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และ สนามไฟฟ้าของแบบจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และ สลับที่มีการเคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ โดยจะทำการศึกษาคูสมบัติของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และกระแสสลับแบบแขวน เพื่อทำการพัฒนาหรือปรับปรุงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับให้สามารถใช้งานทดแทนลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงได้ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการศึกษา วิเคราะห์ รวมไปถึงการทดสอบ ลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสตรงและกระแสสลับโดยการ

เคลือบผิวของลูกถ้วยด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบเป็นชนิด Tin-oxide ( $\text{SnO}_2$ ), Antimony ( $\text{Sb}^{5+}$ ) และ Niobium-oxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ โดยในการจำลองผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าจะทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกันทั้งหมด 3 แบบ ประกอบด้วย

- 1) การจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวทั้งลูก
- 2) การจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวเฉพาะพื้นผิวด้านบน
- 3) การจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวเฉพาะพื้นผิวด้านล่าง

และใช้โปรแกรม FEMLAB ทำการจำลอง เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า ซึ่งจะต้องมีการป้อนค่าเพิ่มคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบเพิ่มเติมไปจากหัวข้อที่แล้ว ดังต่อไปนี้

- 1) การจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวทั้งลูก

ประเภทของรูปร่างที่ใช้ในการจำลอง

- ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรง

คุณสมบัติขององค์ประกอบย่อยๆ

- Porcelain

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 5.7

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-14}$  siemens/meter

- Cement

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 7

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-7}$  siemens/meter

- Iron

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 1

- Conductivity ( $\sigma$ )  $1.12 \times 10^7$  siemens/meter

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 100 V

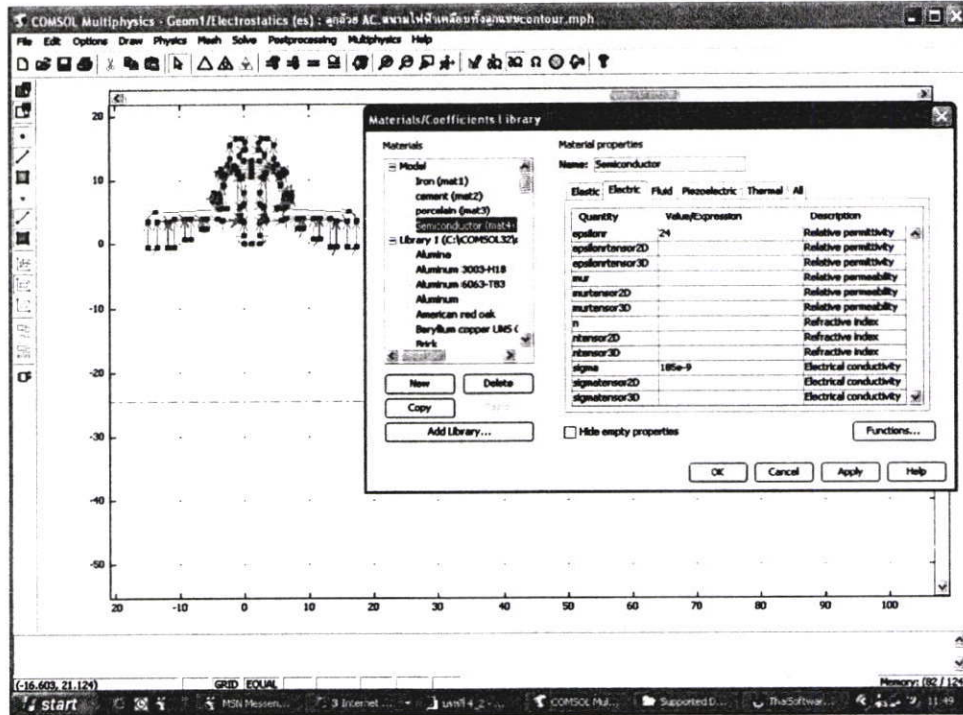
- Semi-conductor

Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 24

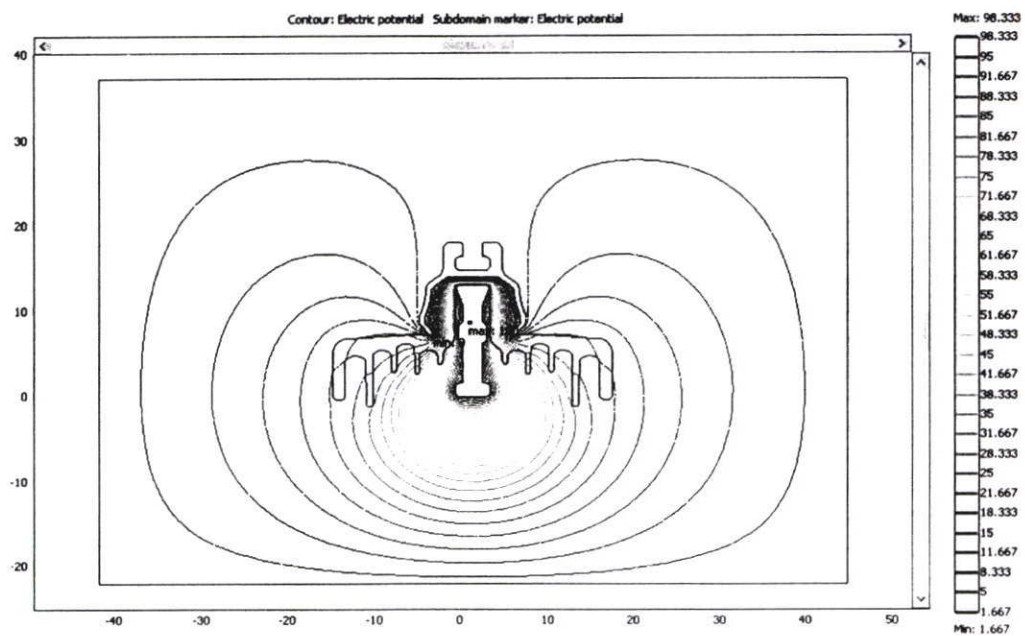
- Conductivity ( $\sigma$ )  $185 \times 10^9$  siemens/meter

เมื่อทำการจำลองปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวน โดยการเคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ จะต้องทำการป้อนค่าคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ส่วน รูปที่ 4.20 และ 4.21 เป็นผลการจำลองการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง กระแสสลับที่มีการ

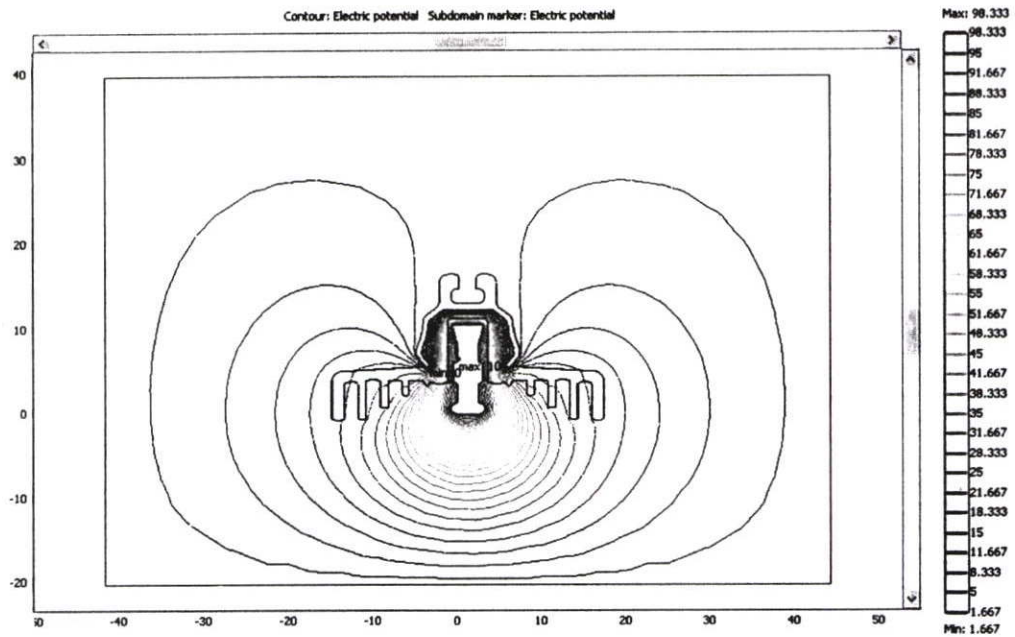
เคลือบผิวของฉนวน Porcelain ทั้งลูก ส่วนผลของการกระจายของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ



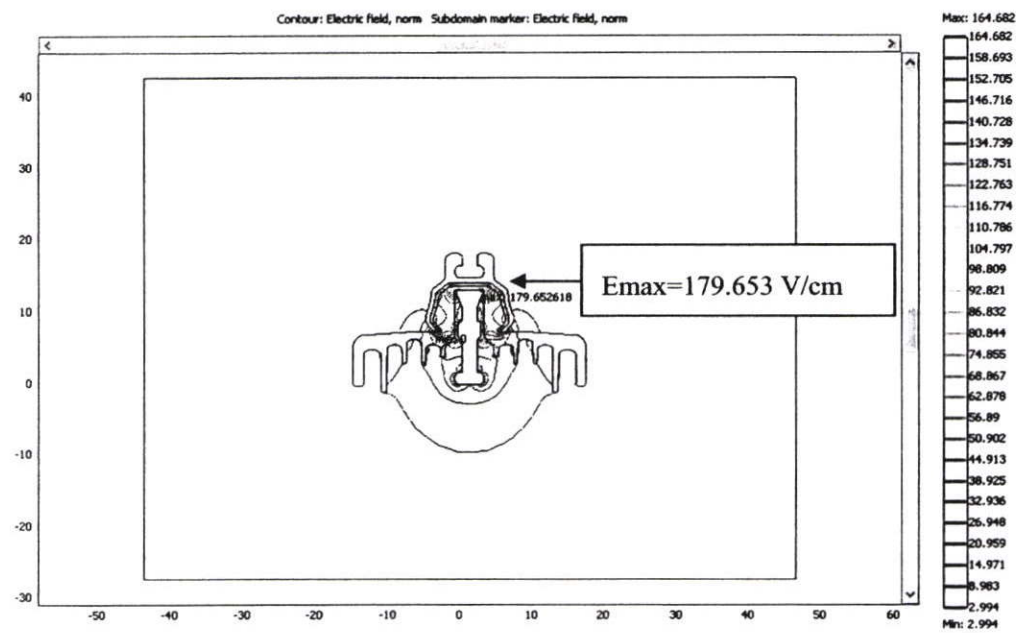
รูปที่ 4.19 การป้อนค่าคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ



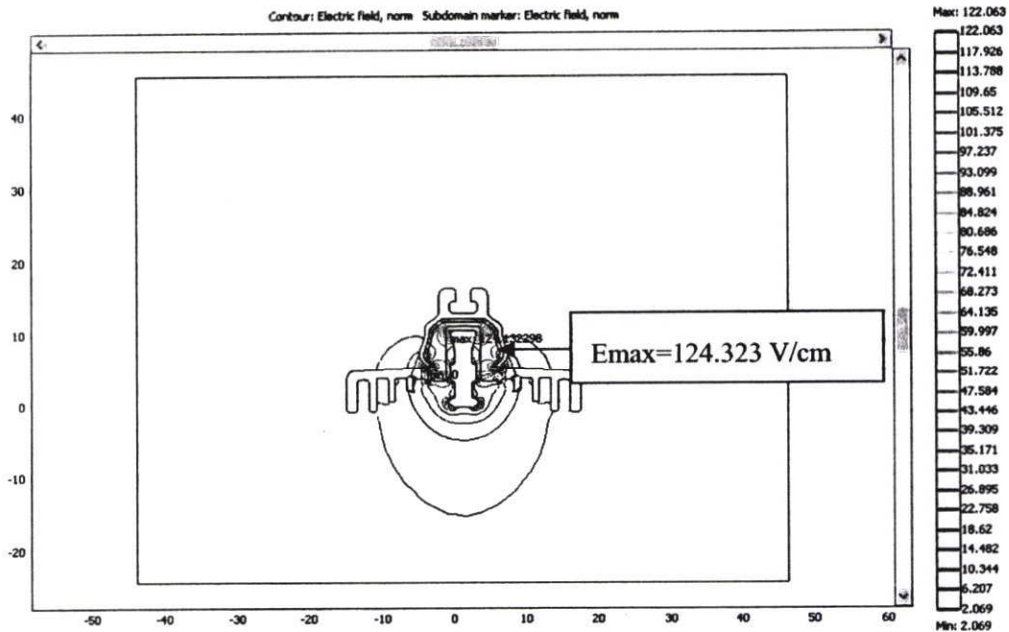
รูปที่ 4.20 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก



รูปที่ 4.21 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก



รูปที่ 4.22 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก



รูปที่ 4.23 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก

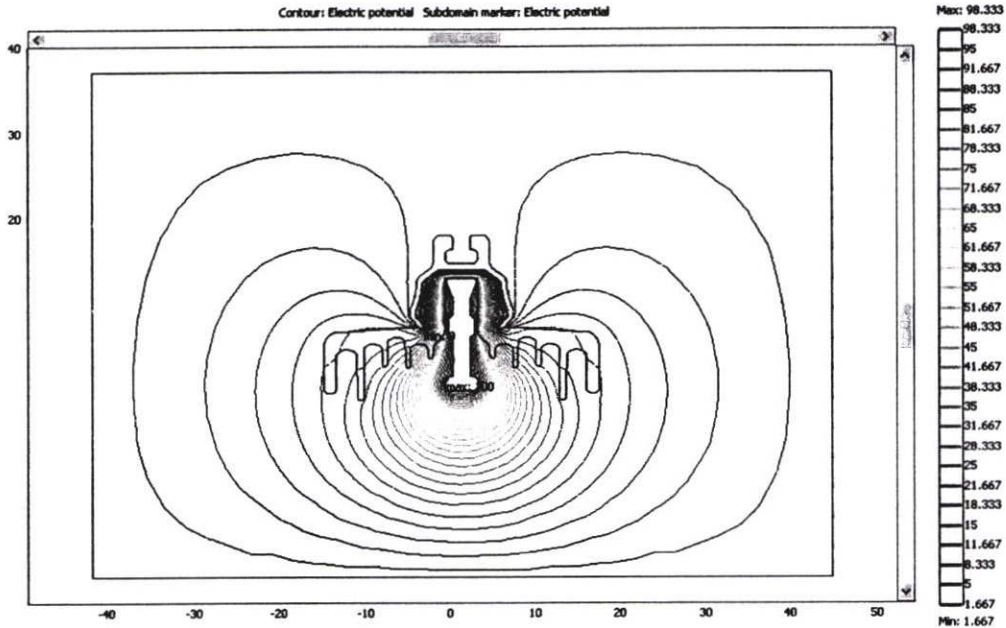
#### วิเคราะห์ผลการจำลองเปรียบเทียบ

จากการจำลองลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสดตรง และกระแสดลัด โดยการเคลือบผิวฉนวน (Porcelain) ด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก พบว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดเมื่อทำการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะพบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) มีค่าน้อยกว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว แต่ตำแหน่งที่ตรวจพบจะเปลี่ยนไป โดยจะพบที่จุดต่อระหว่าง Cap กับ ขอบของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบบนเนื้อ Porcelain ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัด จะพบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง Pin กับ Cement ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.2

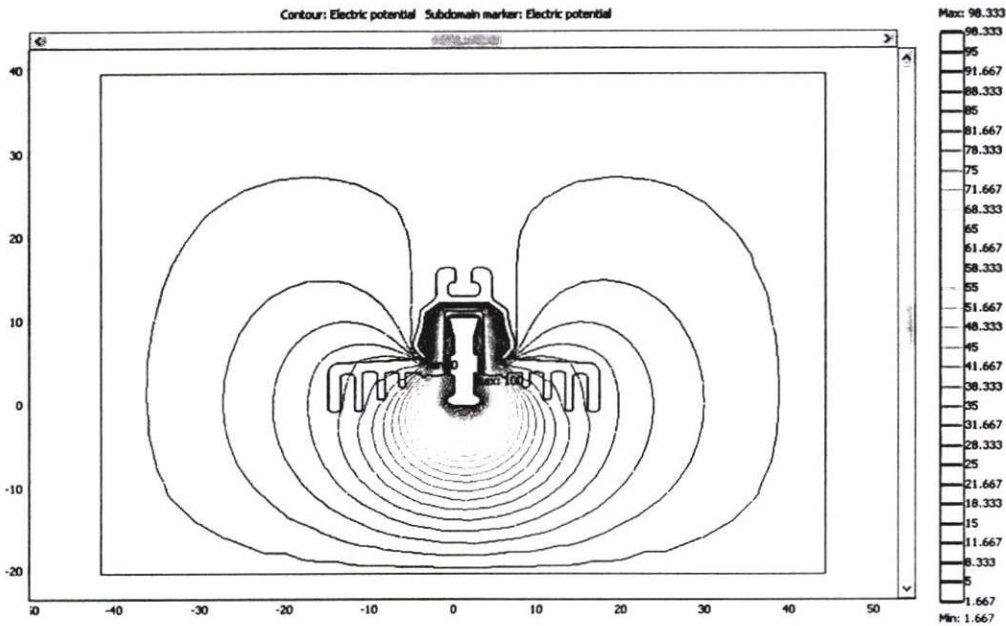
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง	182.127
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	179.653
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัด	135.727
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	124.323

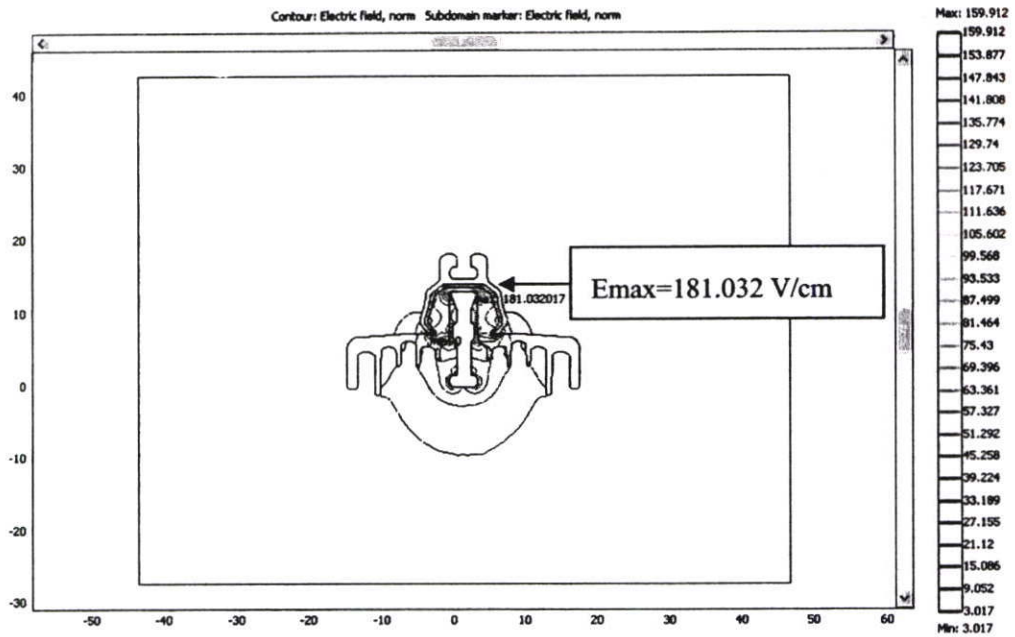
2) การจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวเฉพาะพื้นผิวด้านบน รูปที่ 4.24 และ 4.25 เป็นผลการจำลองการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง กระแสสลับที่มีการเคลือบผิวของฉนวน Porcelain เฉพาะผิวด้านบน ส่วนผลของการกระจายของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



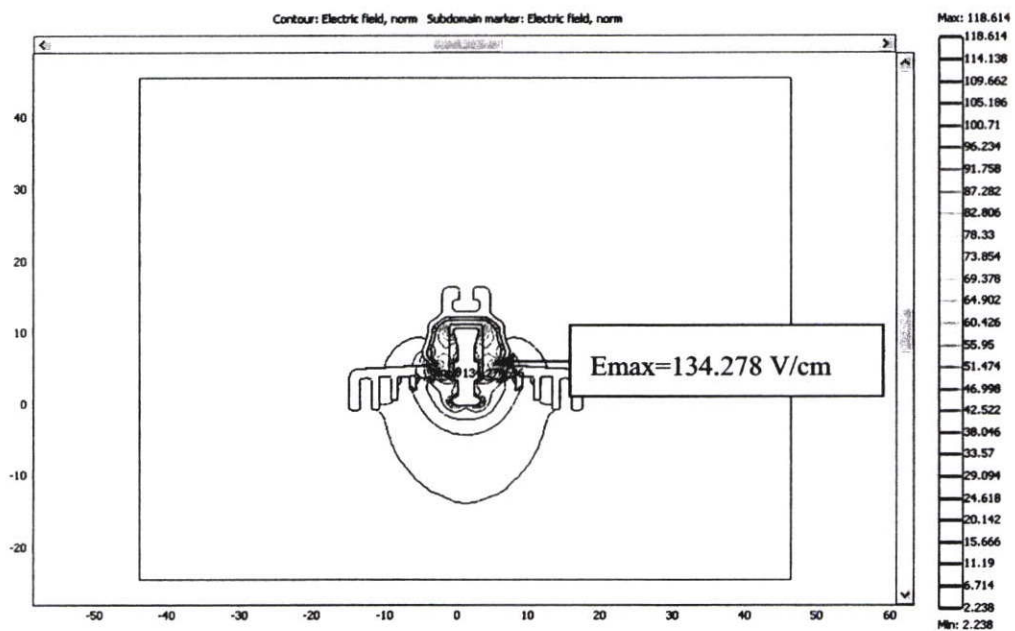
รูปที่ 4.24 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านบน



รูปที่ 4.25 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านบน



รูปที่ 4.26 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าถูกด้วยฉนวนกระแสดตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านบน



รูปที่ 4.27 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าถูกด้วยฉนวนกระแสดลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านบน

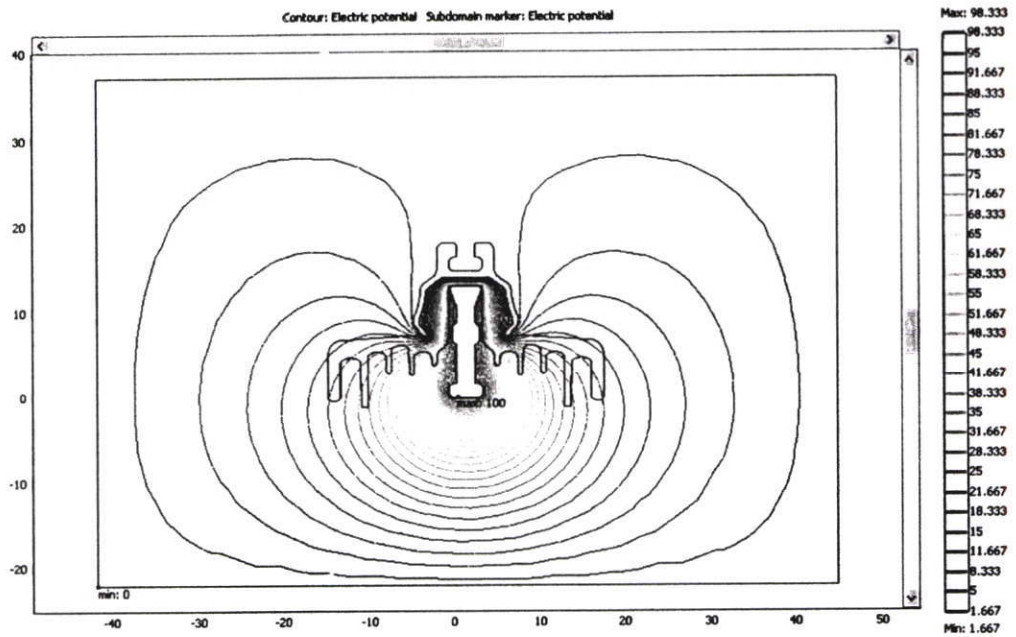
### วิเคราะห์ผลการจำลองเปรียบเทียบ

จากการจำลองลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสดร่ง และกระแสดร่งโดยการเคลือบผิวฉนวน (Porcelain) ด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวฉนวนด้านบน พบว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งเมื่อทำการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะพบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E<sub>max</sub>) ยังคงมีค่าน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว เหมือนกับกรณีของลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบผิวฉนวนทั้งลูกด้วยสารกึ่งตัวนำ แต่ตำแหน่งที่ตรวจพบจะเปลี่ยนไป โดยจะพบที่จุดต่อระหว่าง Cap กับ ขอบของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบบนเนื้อ Porcelain ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่ง จะพบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง Pin กับ Cement ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.3

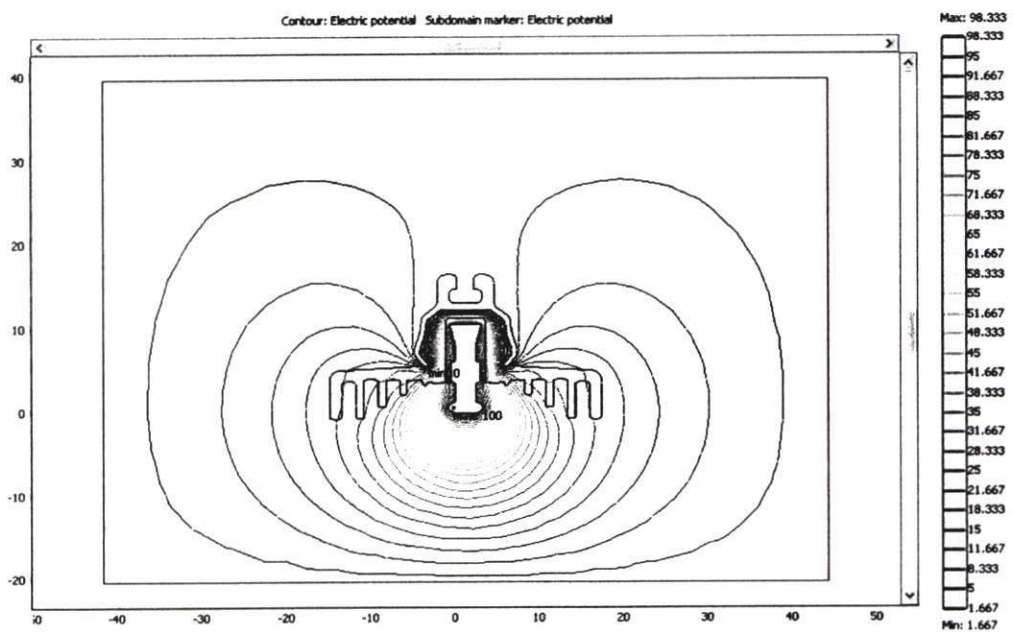
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่ง	182.127
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	179.653
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน	181.032
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่ง	135.727
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	124.323
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน	134.278

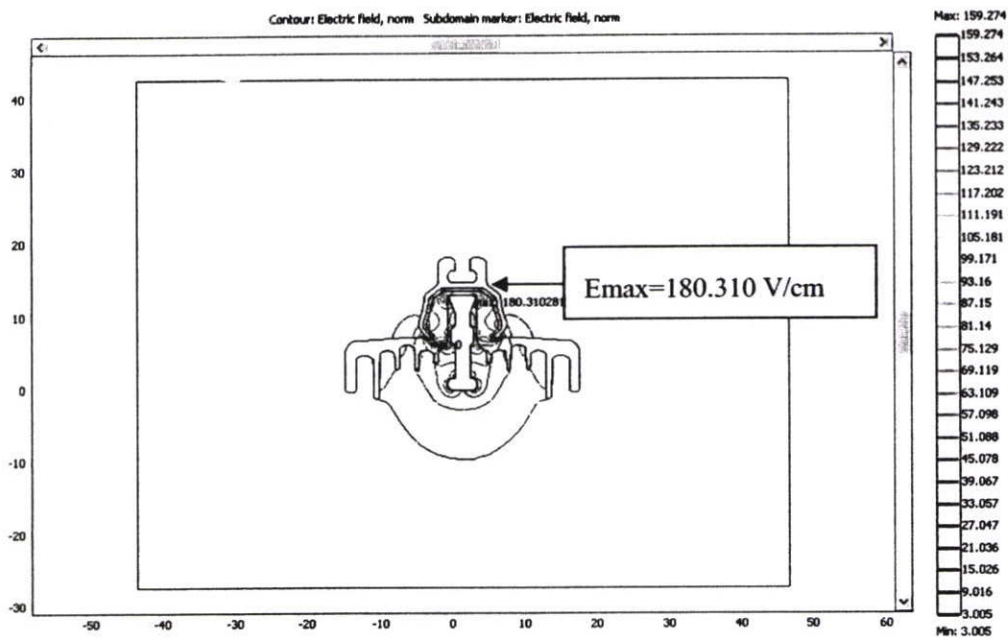
3) การจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีการเคลือบผิวเฉพาะพื้นผิวด้านล่าง รูปที่ 4.28 และ 4.29 เป็นผลการจำลองการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่ง กระแสดร่งที่มีการเคลือบผิวของฉนวน Porcelain เฉพาะผิวด้านล่าง ส่วนผลของการกระจายของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ



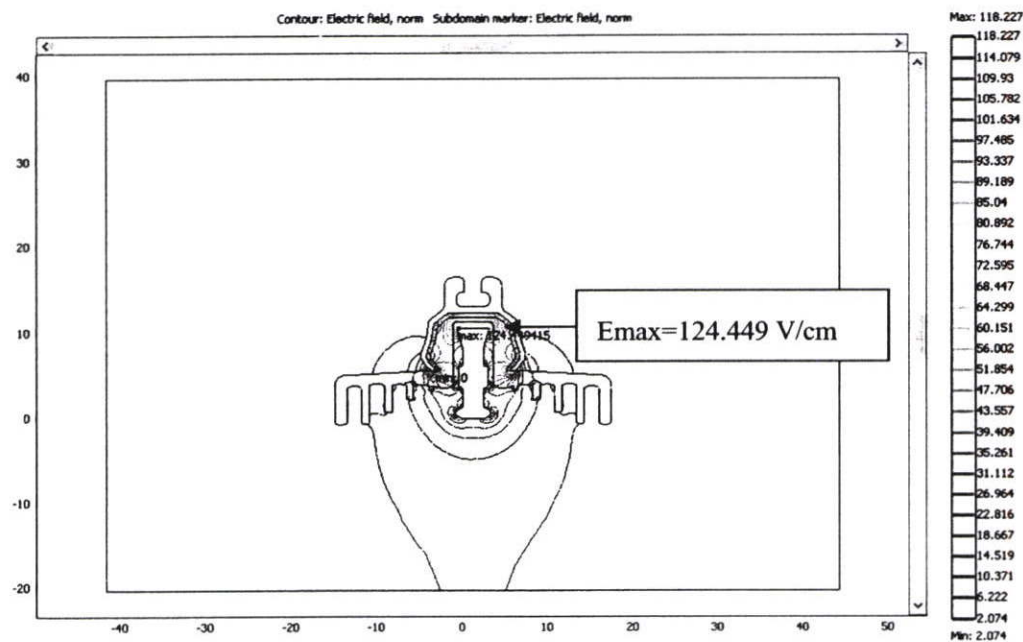
รูปที่ 4.28 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านล่าง



รูปที่ 4.29 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านล่าง



รูปที่ 4.30 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านล่าง



รูปที่ 4.31 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลั้บที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะผิวด้านล่าง

### วิเคราะห์ผลการจำลองเปรียบเทียบ

จากการจำลองลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสดรง และกระแสดลับโดยการเคลือบผิวฉนวน (Porcelain) ด้วยสารกึ่งตัวนำเฉพาะพื้นผิวฉนวนด้านล่าง พบว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเมื่อทำการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะพบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (Emax) มีค่าน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว ซึ่งแตกต่างกับกรณีของลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบผิวฉนวนทั้งลูก และเคลือบผิวฉนวนเฉพาะด้านบนด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งตำแหน่งที่ตรวจพบจะเกิดที่จุดเดียวกันกับจุดเชื่อมต่อระหว่าง Pin กับ Cement ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น



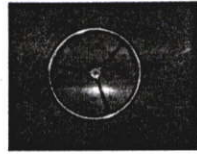
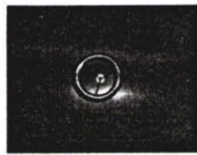
ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง	182.127
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	179.653
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน	181.032
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านล่าง	180.310
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับ	135.727
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	124.323
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน	134.278
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านล่าง	124.449

### 4.3.5 ผลการวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และ สนามไฟฟ้าของแบบจำลองพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับที่มีการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาแต่ละแบบ

การจำลองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับจำนวน 3 ลูก จะทำการเปรียบเทียบว่าเมื่อนำวงแหวนโคโรนาขนาดต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.3.3.2 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงใดเมื่อ

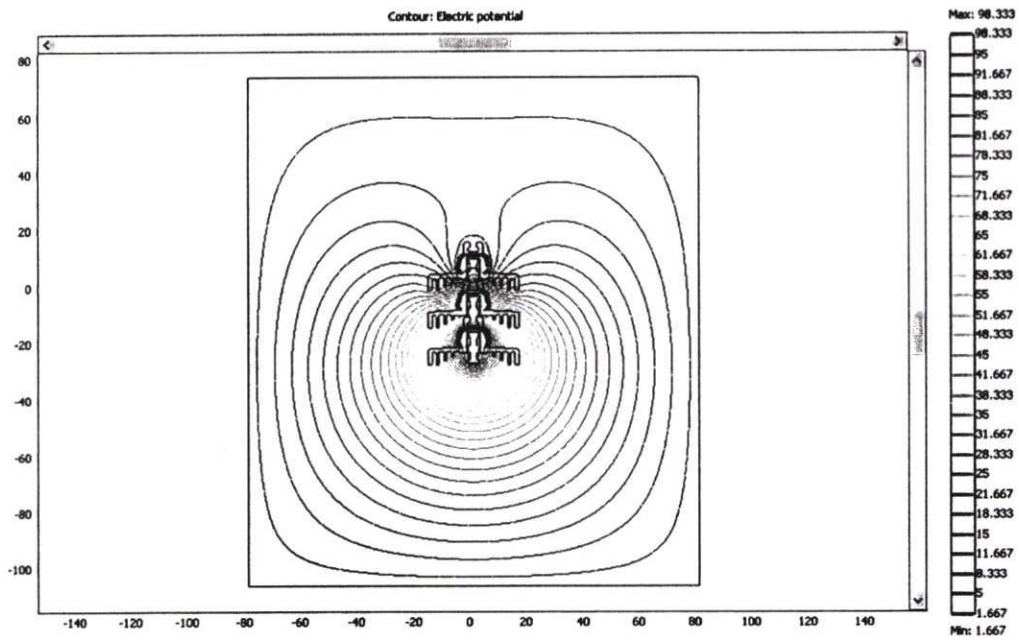
เปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยฉนวนแบบปกติทั่วไป ซึ่งวงแหวนโคโรนาที่ได้ทำการออกแบบมีมิติ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 มิติของวงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการจำลอง

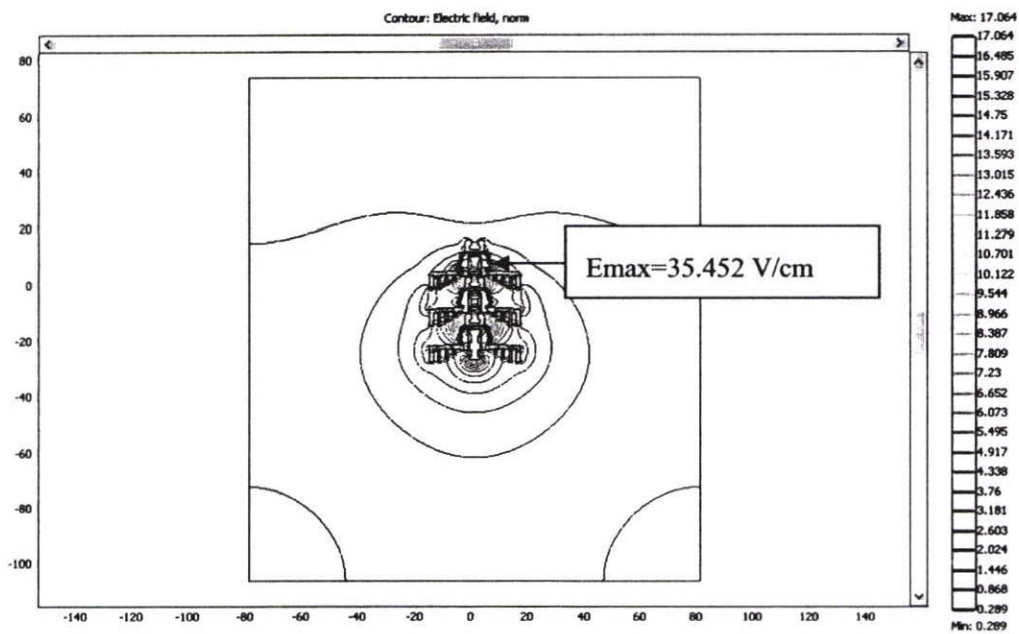
รูป	สัญลักษณ์	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ขนาดท่อ (มิลลิเมตร)
	A	270	19
	B	210	19
	C	200	19
	D	100	19

ในการจำลองสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ทำการจำลองแบบของพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับจำนวน 3 ลูก และทำการวิเคราะห์ผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ เพื่อที่จะใช้การเปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยฉนวนเมื่อทำการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาที่มีขนาดต่าง ๆ

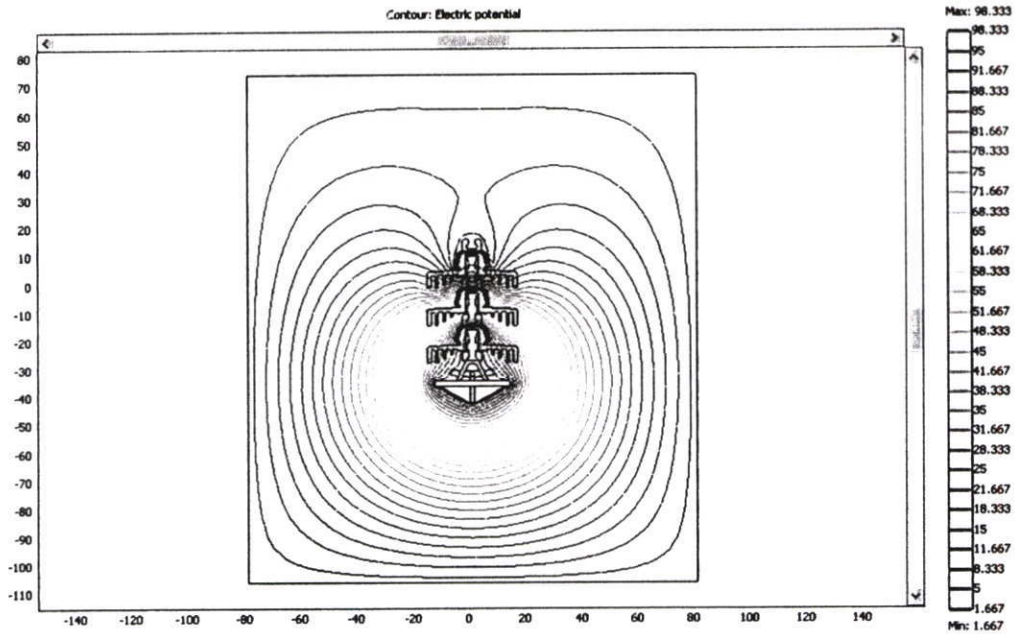


รูปที่ 4.32 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ

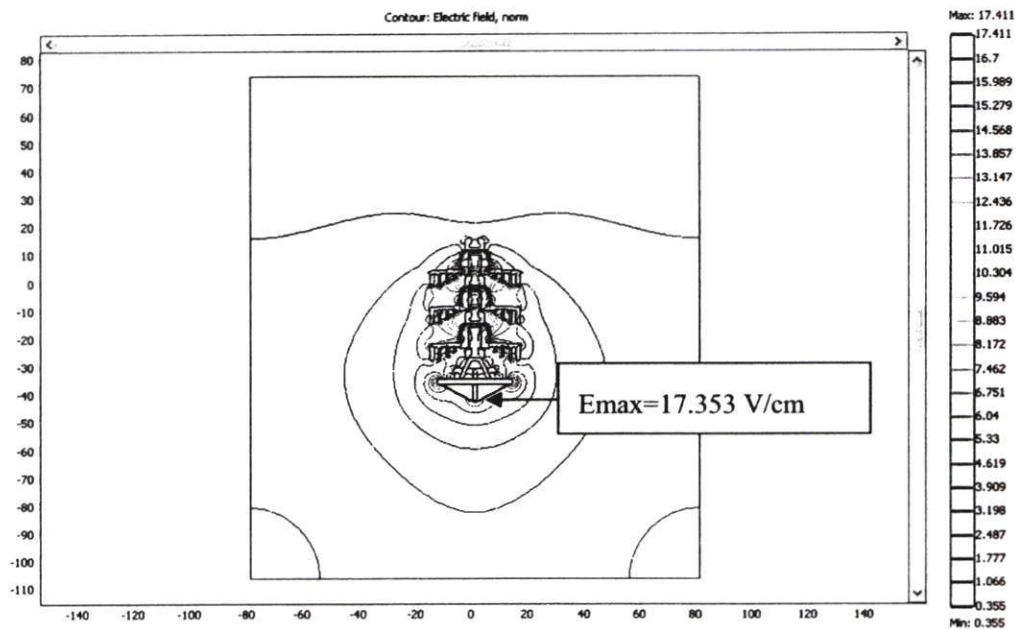


รูปที่ 4.33 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ

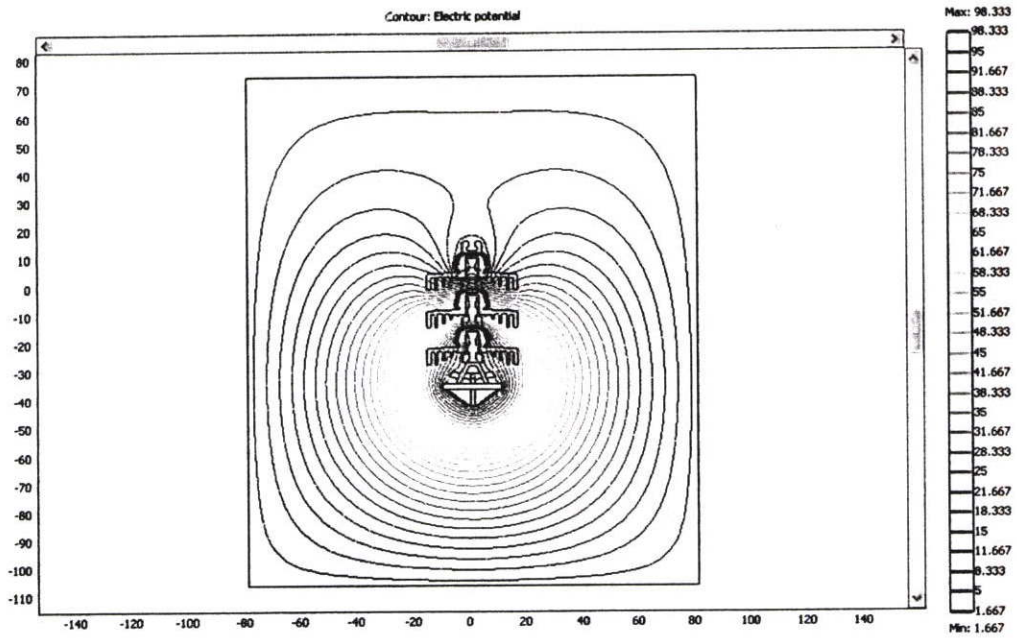
2. ทำการจำลองวงแหวน โคโรนาขนาดต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.5 แล้วทำการต่อร่วมกับ พวงลูกด้วยฉนวน ซึ่งผลการจำลองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และ สนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.34 ถึง 4.41 ตามลำดับ



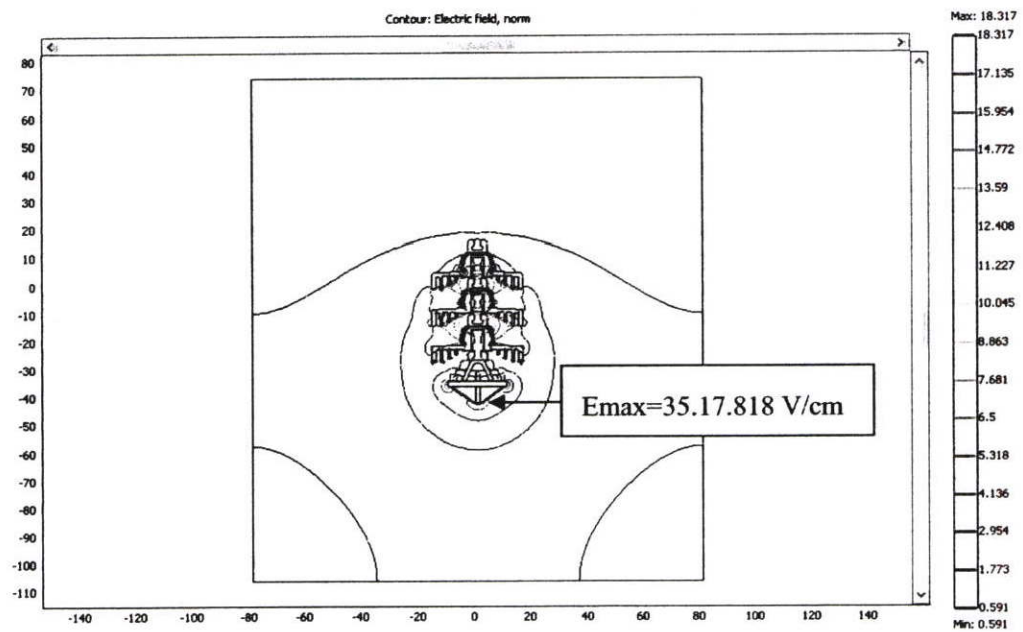
รูปที่ 4.34 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสดสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน  
โคโรนา แบบ A



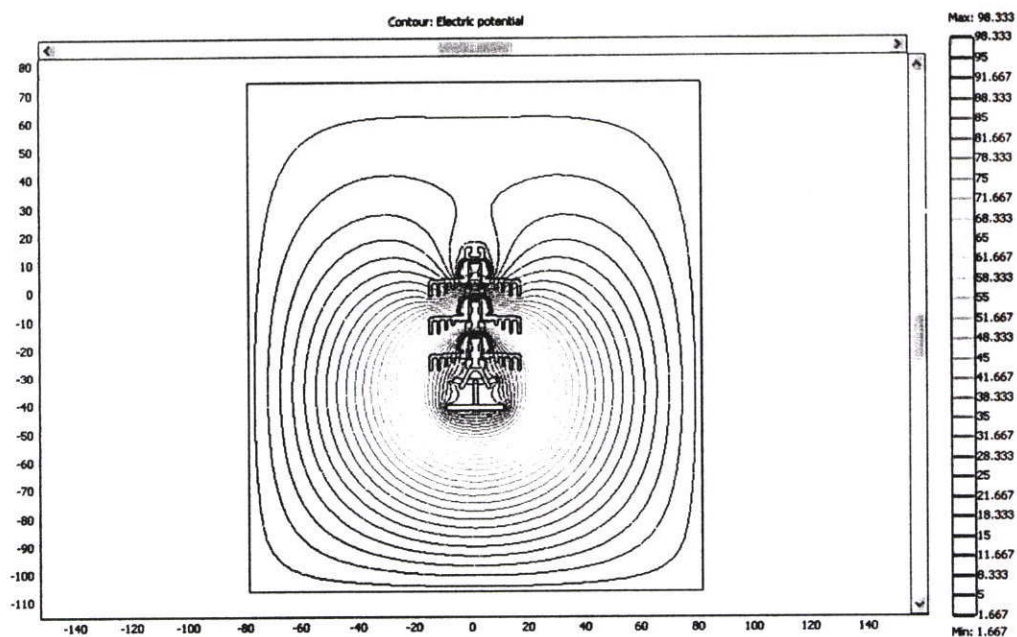
รูปที่ 4.35 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสดสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน  
โคโรนา แบบ A



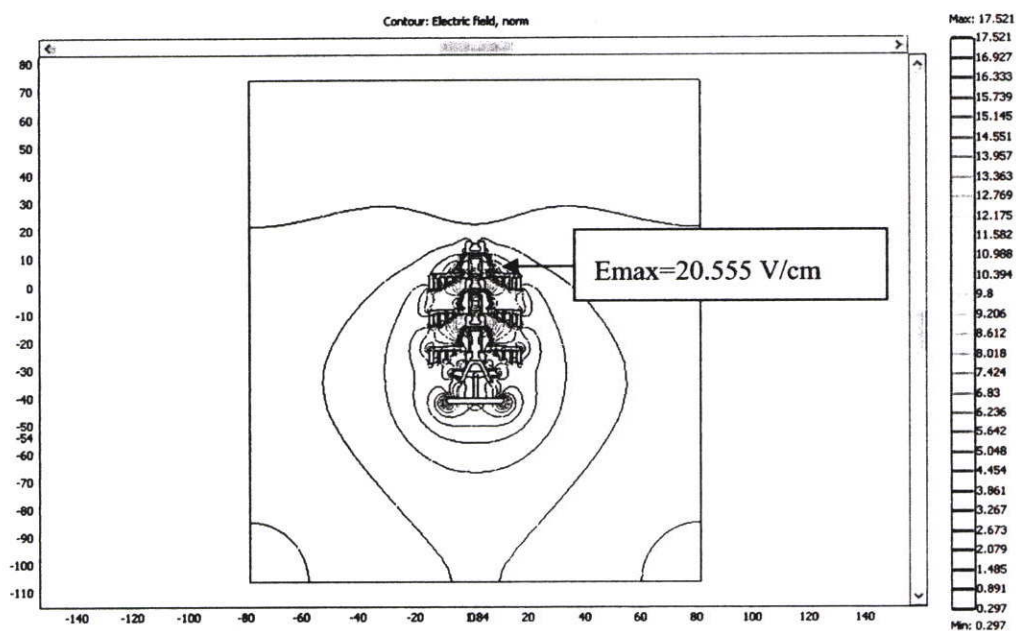
รูปที่ 4.36 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสดลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา แบบ B



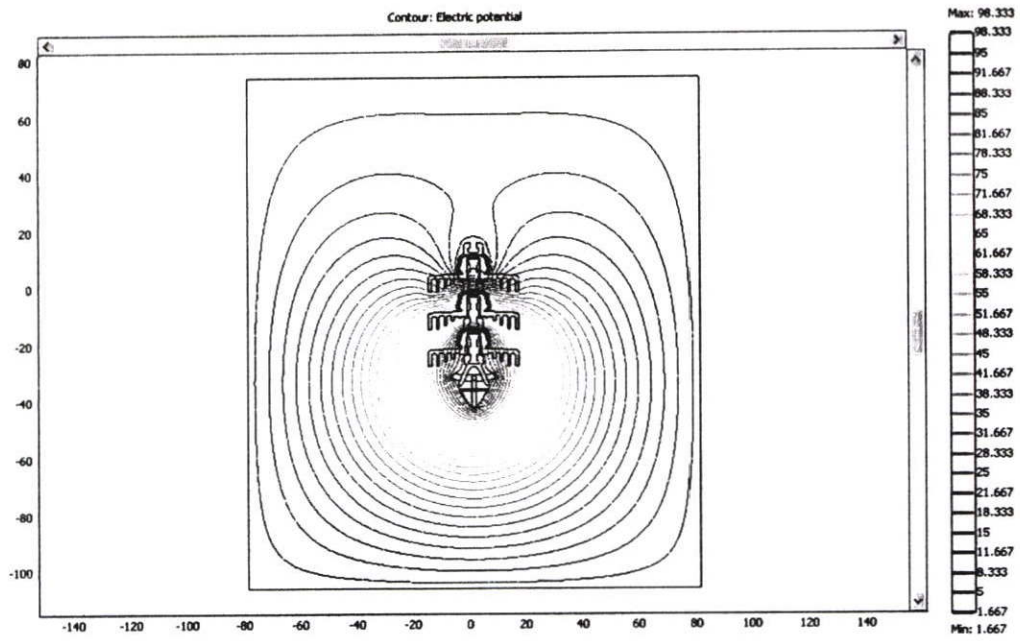
รูปที่ 4.37 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสดลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา แบบ B



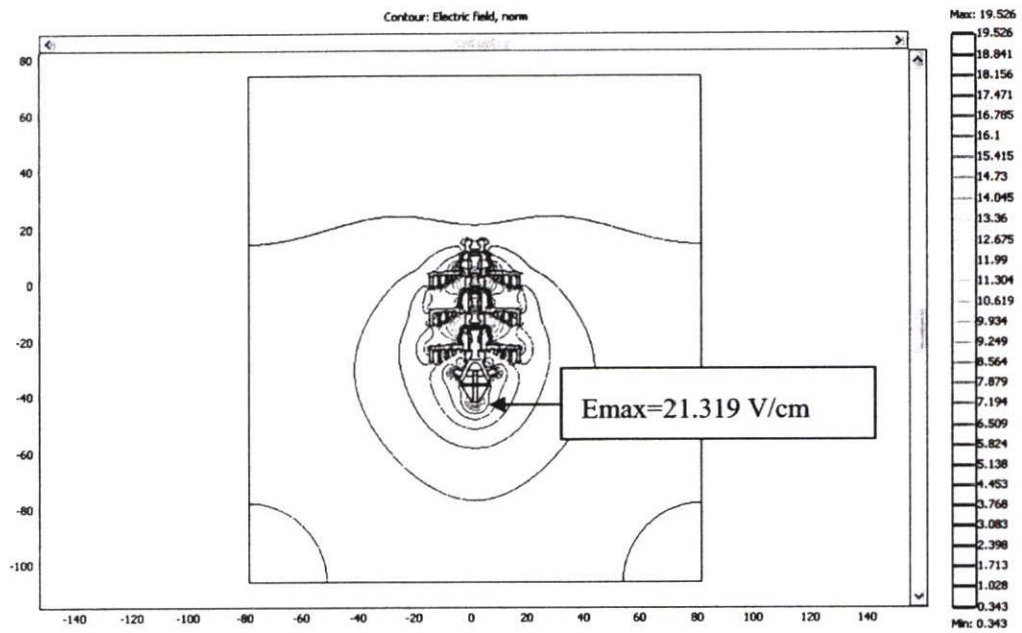
รูปที่ 4.38 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงถูกด้วยฉนวนกระแสดลัดเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน  
โคโรนา แบบ C



รูปที่ 4.39 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงถูกด้วยฉนวนกระแสดลัดเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน  
โคโรนา แบบ C



รูปที่ 4.40 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาแบบ D



รูปที่ 4.41 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกด้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาแบบ D

### วิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง

จากการจำลองผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับพวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับจำนวน 3 ลูก เมื่อทำการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาทั้ง 4 ขนาด ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น พบว่า วงแหวนโคโรนาแบบ A ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 270 มิลลิเมตรจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ที่ตรวจพบมีค่าน้อยสุด และรองลงมาจะเป็นแบบ B, C และ D ตามลำดับ เหตุผลเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างสมการ ของรัศมีของวงแหวนโคโรนากับค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น แสดงไว้ว่าเมื่อรัศมีของวงแหวนโคโรนาเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับรัศมีของวงแหวน กล่าวคือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะลดลง ซึ่งจากผลการจำลองจะเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ โดยที่ตารางที่ 4.6 จะเป็นตารางแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของวงแหวน โคโรนา

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดของพวงลูกด้วยฉนวนเมื่อทำการต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา

แบบของวงแหวนโคโรนาที่ต่อร่วมกับพวงลูกด้วยฉนวน	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
พวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ 3 ลูก	35.452
พวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ 3 ลูกต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนาแบบ A	17.353
พวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ 3 ลูกต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนาแบบ B	17.818
พวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ 3 ลูกต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนาแบบ C	20.555
พวงลูกด้วยฉนวนกระแสลับ 3 ลูกต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนาแบบ D	21.319

#### 4.4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวน

ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน ของสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ได้แก่ ค่า Specific Leakage Distance ซึ่งได้จากค่า Leakage Distance ทั้งหมดของพวงลูกถ้วยฉนวนหารด้วย ระดับแรงดันใช้งาน สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีการใช้ Specific Leakage Distance ที่กว้างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกัดกร่อนของความรุนแรงของการเปรอะเปื้อน หรือสภาพอากาศ และค่าความคงทนต่อการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยที่เลือก อีกประการหนึ่ง ลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยรวมทั้งชนิดของวัสดุและขนาด มีผลที่สำคัญต่อ ความสามารถต่อการเกาะจับของสิ่งเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนในระบบไฟฟ้ากระแสตรง

##### 4.4.1 การออกแบบตามมาตรฐาน [13,23,24]

ซึ่งวัตถุประสงค์หลักในหัวข้อนี้คือ จะนำเสนอการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวนพื้นฐาน เพื่อที่จะเป็นแนวทางต่อไปในอนาคตเพื่อศึกษาเพิ่มเติมเพื่อออกแบบให้ลูกถ้วยฉนวนมีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในประเทศไทย หรือแม้กระทั่งการผลิตลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเองภายในประเทศ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการออกแบบดังนี้

- 1) ทำการหาระยะ Minimum nominal creepage distance ตามสมการที่ 4.1

$$(Lnc) \min = (Lsc) \min \times Um \times kd \quad (4.1)$$

เมื่อ (Lnc) min คือ Minimum nominal creepage distance

(Lsc) min คือ Minimum specific creepage distance สำหรับบริเวณที่มีมลภาวะรุนแรง (Very heavy pollution level) กำหนดให้ใช้ค่า 31 mm/kV ในการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 815 [13]

Um คือ Highest system voltage phase to phase for equipment

ลูกถ้วยฉนวนเป็นแบบแขวน ค่า Dm โดยประมาณหาได้จากสมการที่ (4.2)

$$Dm = (De1 + De2 + 2Di) / 4 \quad (4.2)$$

โดยที่ De1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกใหญ่

De2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกเล็ก

$D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนลูกถ้วย

$K_d$  คือ ตัวประกอบแก้ไข (Correction factor);  $k_d = 1.1$  เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วย  $300 \leq D_m \leq 500$  มิลลิเมตร [13]

ระดับแรงดันที่ใช้ในการออกแบบของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง ทำการออกแบบที่ระดับแรงดันของระบบ 300 kV ออกแบบให้ใช้ลูกถ้วยฉนวนที่ระดับแรงดัน 300 kV จำนวน 22 ลูก ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมต่อลูกถ้วยเท่ากับ = 13.636 kV / ลูกถ้วย

เพราะฉะนั้น แทนค่าลงในสมการที่ 4.1

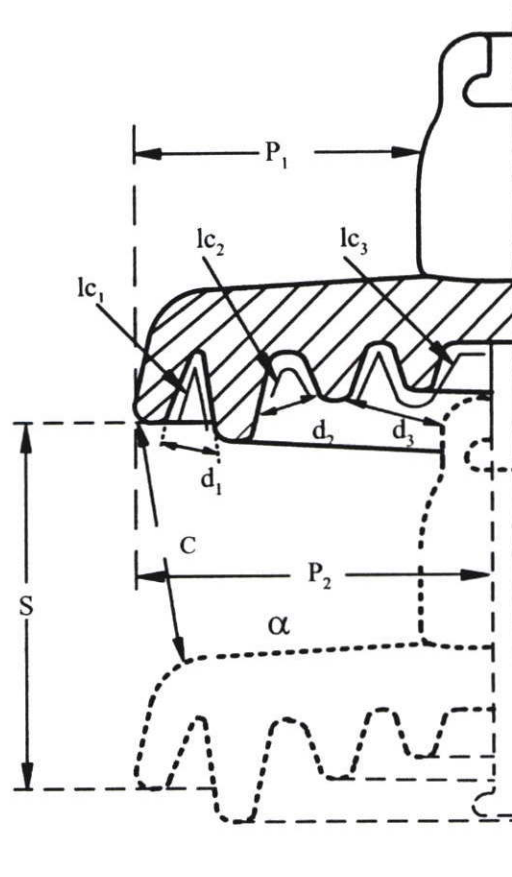
$$(L_{nc})_{\min} = 31 \times 13.636 \times 1.1$$

จะได้ค่า Minimum nominal creepage distance เท่ากับ 465 มิลลิเมตร

2) ทำการหาค่าลักษณะของปีกลูกถ้วย ซึ่งจะอาศัยมาตรฐาน IEC 815 [13] ซึ่งได้แนะนำค่าต่างๆ ในการออกแบบดังตารางที่ 4.7 และลักษณะปีกมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.42

ตารางที่ 4.7 ค่าในการออกแบบที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 [13] แนะนำ

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน
C	มากกว่า 30 ม.ม.
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8
Lc/c	น้อยกว่า 5
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.
$\alpha$	มากกว่า 5 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4
P.F.	มากกว่า 0.7



รูปที่ 4.42 ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815 [13]

เมื่อ	C	คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน
	S	คือ ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใดๆ
	P	คือ ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไป
	Lc	คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดวัดค่า
	$\alpha$	คือ มุมของปีกที่ทำกับระนาบ
	l	คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดวัดค่า

2.1) หาอัตราส่วนช่องว่างระหว่างชั้นปีกต่อความกว้างส่วนปีกที่ยื่นออกมา ( $S/P_1$ )

โดยจากมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดว่า อัตราส่วนค่า ( $\frac{S}{P_1}$ ) ให้มากกว่า 0.8

ดังนั้นสมมุติฐานการออกแบบ กำหนดให้

$$P_1 = 105 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$S = 160 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$P2 = 160.5 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ซึ่งจะได้อัตราส่วนค่า  $(\frac{S}{P1}) = (\frac{160}{105}) = 1.532$  ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานกำหนดไว้

2.2) หาค่าความแตกต่างของปีกสั้นและปีกยาว ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดให้  $(P1 - P2)$  มากกว่า 15 มิลลิเมตร

สมมติฐานการออกแบบ กำหนดให้  $(P1-P2) = (105 - 160.5) = 55.5$  มิลลิเมตร ซึ่งค่ามากกว่าค่ามาตรฐานกำหนด

2.3) หาค่าระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน (C) ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดให้มากกว่า 30 มิลลิเมตร

สมมติฐานการออกแบบ กำหนดให้ C ที่ออกแบบเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

2.4) หาค่าอัตราส่วนระหว่างระยะรั้ว ที่วัดระหว่างจุดที่กำหนด กับระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดให้  $(\frac{lc}{d}) < 5$

สมมติฐานการออกแบบ กำหนดให้

$$\frac{lc_1}{d_1} = \frac{115}{25} \frac{mm}{mm} = 4.6$$

$$\frac{lc_2}{d_2} = \frac{100}{20} \frac{mm}{mm} = 5$$

$$\frac{lc_3}{d_3} = \frac{85}{20} \frac{mm}{mm} = 4.25$$

$$\frac{lc_4}{d_4} = \frac{100}{25} \frac{mm}{mm} = 4$$

ซึ่งค่าที่หาได้ทั้งหมดเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดคือ  $< 5$

2.5) หาค่าการเอนเอียงของปีก ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดให้มุมเอียง  $\infty$  มากกว่า 5 องศา

สมมุติฐานการออกแบบ กำหนดให้  $\infty = 6$  องศา

2.6) หาค่าแฟกเตอร์ระยะรั้วไหลที่ง่ายที่สุด (P.F) ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดให้ P.F. มากกว่า 0.7

$$P.F = \frac{2P1 + 2P2 + S}{lc_1 + lc_2 + lc_3 + lc_4 + d_1 + d_2 + d_3 + d_4}$$

ดังนั้น

$$P.F = \frac{2(105) + 2(160.5) + 160}{115 + 100 + 85 + 100 + 25 + 20 + 20 + 25}$$

เพราะฉะนั้น

$$P.F. = 1.142$$

2.7) หาค่าแฟกเตอร์ระยะรั้ว = ระยะรั้วของลูกถ้วย / ระยะอาร์กของลูกถ้วย ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [13] กำหนดให้ C.F.  $\leq 4$

$$C.F = \frac{lt}{st} = \frac{605}{190} = 3.184$$

นำผลที่ได้จากการออกแบบมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 [13] ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 [13]

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	100 ม.ม.
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	1.532
Ld/d	น้อยกว่า 5	Lc/d = 4.6, 5, 4.25 และ 4
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	55.5 ม.ม.
$\alpha$	มากกว่า 5 องศา	6 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	3.184
P.F.	มากกว่า 0.7	1.142

3) ทำการหาขนาดของ Cap และ Pin โดยนำค่า Minimum nominal creepage distance ซึ่งเท่ากับ 558 มิลลิเมตร มาหาค่ามาตรฐานของ Coupling ตามมาตรฐาน IEC 120 [22] ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยค่าที่เลือกในการออกแบบเลือกค่า U210BP ซึ่ง ค่ามาตรฐานของ Coupling มีค่าเท่ากับ 20

ตารางที่ 4.9 เป็นตารางตัวอย่างที่แสดงค่า Specific Leakage Distance ของ Insulator ที่ใช้ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงของประเทศต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างค่า Specific creepage distance ของ Insulator ที่ใช้ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

HVDC System	Voltage (kV)	Commissioning Date	Specific Leakage (cm/kV)	Type/Configuration
Cahora Bassa	+533	1979	2.3 - 2.7	Glass/Vertical
Hokkaido-Honshu	-250	1980	3.8 - 6.9 3.8 - 6.9	Porcelain/Vertical Porcelain
Inga-Shaba	+/- 500	1983	2.1	Porcelain/Vee
Itaipu	+/- 600	1984	2.8	Porcelain & Glass/ Vertical
Nelson River (Bipole 2)	+/- 500	1985	2.1 2.1	Glass/Vertical Glass
Pacific Intertie Upgrade (LADWP)	+/- 500	1985	2.3 - 2.8 2.5 2.3 - 2.6	Porcelain/Vertical Nonceramic/Vertical Glass
IPP	+/- 500	1986	2.9 - 3.9 3.3 - 3.9	Porcelain/Vee Porcelain
New England-Hydro Quebec Phase I (NEPSCO)	+/- 450	1986	2.9 2.9	Glass/Vee Glass
New England-Hydro Quebec Phase I (Hydro Quebec)	+/- 450	1986	3.2 3.7	Porcelain/Vee Porcelain
Gezhouba-Nan Quiao	+/- 500	1988	4.8 - 5.5 3.5	Porcelain/Vertical Porcelain or Glass

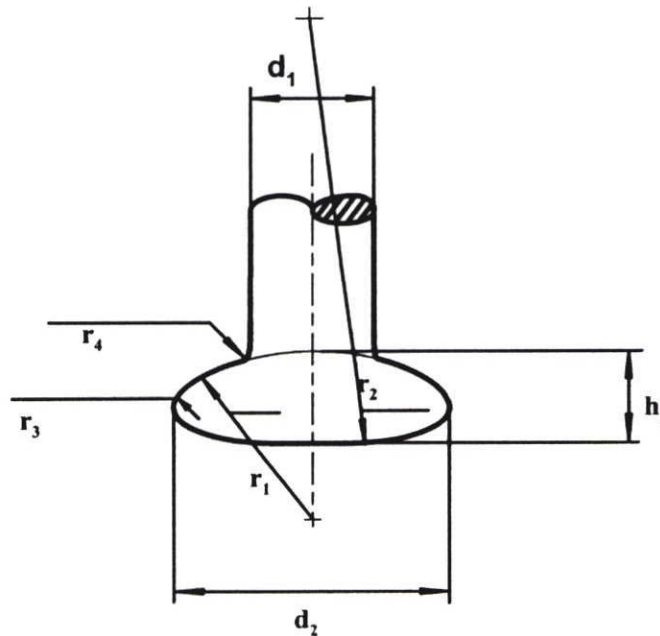
ตารางที่ 4.10 ขนาด และระยะต่ำสุดของลูกถ้วยแขวนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 305 [23]

Designation	Electromechanical or mechanical failing load  kN	Maximum nominal diameter of the insulating part D mm	Nominal spacing  P mm	Minimum nominal creepage distance  mm	Standard coupling according to IEC 120  d1
U 40 B	40	175	110	190	11
U 40 BP	40	210	110	295	11
U 70 BS	70	255	127	295	16
U 70 BL	70	255	146	295	16
U 70 BLP	70	280	146	440	16
U 100 BS	100	255	127	295	16
U 100 BLP	100	255	146	295	16
U 120 B	100	280	146	440	16
U 120 BP	120	255	146	295	16
U 120 BS	120	280	146	440	16
U 160 BS	160	280	146	315	20
U 160 BSP	160	330	146	440	20
U 160 BL	160	280	170	340	20
U 160 BLP	160	330	170	525	20
U 210 B	210	300	170	370	20
U 210 BP	210	330	170	525	20
U 300 B	300	330	195	390	24
U 300 BP	300	400	195	590	24
U 400 B	400	380	205	525	28
U 530 B	530	380	240	600	32

หาค่าขนาด และระยะของ Pin โดยอาศัยมาตรฐาน IEC 120 [22] ซึ่งได้แสดงขนาดและมุมในการออกแบบของ Pin ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.43 แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ต้องหาค่าขนาดของ Pin

ตารางที่ 4.11 ขนาด และมุมในการออกแบบตามมาตรฐานของ ของ Pin ตามมาตรฐาน IEC 120 [22]

Designated size of coupling	$d_1$	$d_2$	$h_1$	$r_1$	$d_2$	$r_3^*$	$r_4$
11	$11.9_{-1.1}^0$	$22.8_{-1.3}^0$	$9.1_{-1.2}^0$	35	35	3.5	$1.5 \pm 0$
16	$17_{-1.2}^0$	$33.3_{-1.5}^0$	$13.4_{-1.3}^0$	23	50	3	$3 \pm 0.5$
20	$21_{-1.3}^0$	$41_{-1.6}^0$	$19.5_{-1.4}^0$	27	60	5.7	$3.5 \pm 1$
24	$25_{-1.4}^0$	$49_{-1.8}^0$	$21_{-1.7}^0$	40	70	6.6	$4 \pm 1.5$
28	$29_{-1.5}^0$	$57_{-1.9}^0$	$23.5_{-1.8}^0$	55	80	8	$4.5 \pm 1.5$
32	$33_{-1.6}^0$	$65_{-2.1}^0$	$27_{-1.9}^0$	70	90	10	$5 \pm 1.5$



รูปที่ 4.43 ขนาดของ Pin

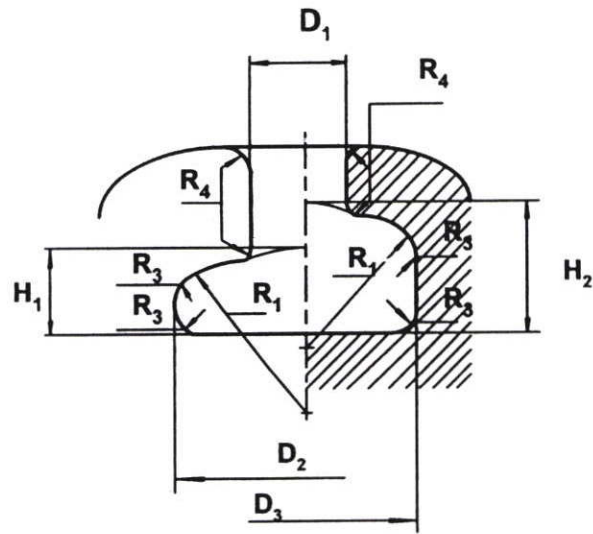
จากตารางที่ 4.11 เมื่อขนาดของ Coupling มีค่าเท่ากับ 20 ดังนั้น ค่าต่างๆ ของ Pin จะมีค่าดังนี้

d1	มีค่าเท่ากับ	21	mm
d2	มีค่าเท่ากับ	41	mm
r1	มีค่าเท่ากับ	27	mm
r2	มีค่าเท่ากับ	60	mm
r3	มีค่าเท่ากับ	5.7	mm
r4	มีค่าเท่ากับ	3.5	mm
h1	มีค่าเท่ากับ	18.1	mm

4) ทำการเลือกค่าขนาดและระยะของ Cap โดยอาศัยมาตรฐาน IEC 120 [22] ซึ่งได้แสดงขนาดและมุมในการออกแบบของ Cap ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.44 แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการค่าขนาดของ Pin

ตารางที่ 4.12 มุมในการออกแบบตามมาตรฐานของ Cap ตรงบริเวณที่จับยึดกับ Pin [22]

Designated size of coupling	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	H2 For W-clips and alternative Split-pins	H2 <sup>3)</sup> For standard split-pins	R <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	T <sup>3)</sup>
					Min.	Min.					Min.
11	12.5 <sup>+1.3</sup> <sub>0</sub>	24.5	24.5	10.5 <sup>+1.3</sup> <sub>0</sub>	15.5	16.3	35	4	1.5	4	4.8
16A <sup>3)</sup>	19.2 <sup>+1.6</sup> <sub>0</sub>	34.5	34.5	14.5 <sup>+1.6</sup> <sub>0</sub>	20.5	21.6	23	3	3	5	5.5
16B <sup>3)</sup>	19.2 <sup>+1.6</sup> <sub>0</sub>	34.5	34.5	17 <sup>+1.6</sup> <sub>0</sub>	25	25.5	23	3	3	5	7.9
20	23 <sup>+2.1</sup> <sub>0</sub>	42.5	42.5	20.5 <sup>+2.1</sup> <sub>0</sub>	28.5	29.3	27	6	3.5	7	7.0
24	27.5 <sup>+2.5</sup> <sub>0</sub>	51	51	23.5 <sup>+2.5</sup> <sub>0</sub>	32.5	33.5	40	5	4	10	8.7
28	32 <sup>+2.9</sup> <sub>0</sub>	59	59	26 <sup>+2.9</sup> <sub>0</sub>	36.5	37.4	55	8	4.5	12	10
32	36 <sup>+3.3</sup> <sub>0</sub>	67.5	67.5	30 <sup>+3.3</sup> <sub>0</sub>	24	43	70	10	5	14	11.5



รูปที่ 4.44 ขนาดของข้อต่อระหว่าง Cap และ Pin

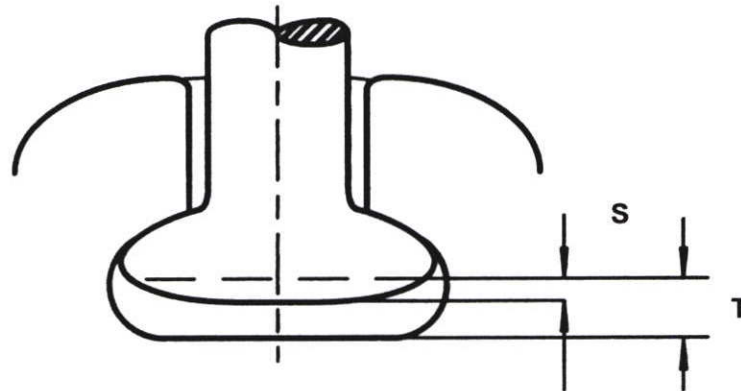
จากตารางที่ 4.12 เมื่อขนาดของ Coupling มีค่าเท่ากับ 20 ดังนั้น ค่าต่างๆ ของ Cap จะมีค่าดังนี้

D1	ค่าเท่ากับ	25	mm
D2	ค่าเท่ากับ	45	mm
D3	ค่าเท่ากับ	42.5	mm
H1	ค่าเท่ากับ	22	mm
H2	ค่าเท่ากับ	29.3	mm
R1	ค่าเท่ากับ	27	mm
R2	ค่าเท่ากับ	6	mm
R4	ค่าเท่ากับ	3.5	mm
R5	ค่าเท่ากับ	7	mm

5) ทหาระยะลื่นของ Pin ที่เหมาะสมโดยอาศัยมาตรฐาน IEC 120 [22] ซึ่งได้แสดง ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.45 แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการค่าขนาดของ Pin

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าการลื่นของ Pin

Designated size of coupling	S
	Min
11	0.9
16A	1.5
16B	1.4
20	2.5
24	2.0
28	2.8
32	3.3



รูปที่ 4.45 ระยะที่เหมาะสมในการลื่น Pin

จากตารางที่ 4.13 เมื่อขนาด Coupling ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 20 ดังนั้นจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

S มีค่าเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

มาตรฐาน IEC 120 [22] กำหนดความหนาต่ำสุดในการลื่น Pin มากกว่า 2.5 มิลลิเมตร

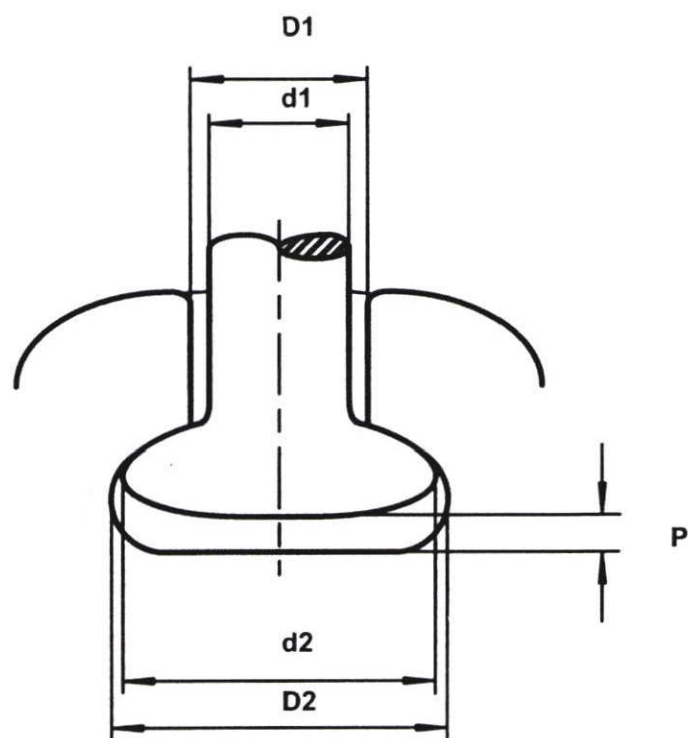
สมมติฐานการออกแบบ กำหนดให้

T มีค่าเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร

6) หาค่า Clearance ระหว่าง Pin กับ Cap โดยอาศัยมาตรฐาน IEC 120 [22] ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.46 และ 4.47 แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ต้องหาค่า

ตารางที่ 4.14 Clearance ระหว่าง Pin กับ Cap

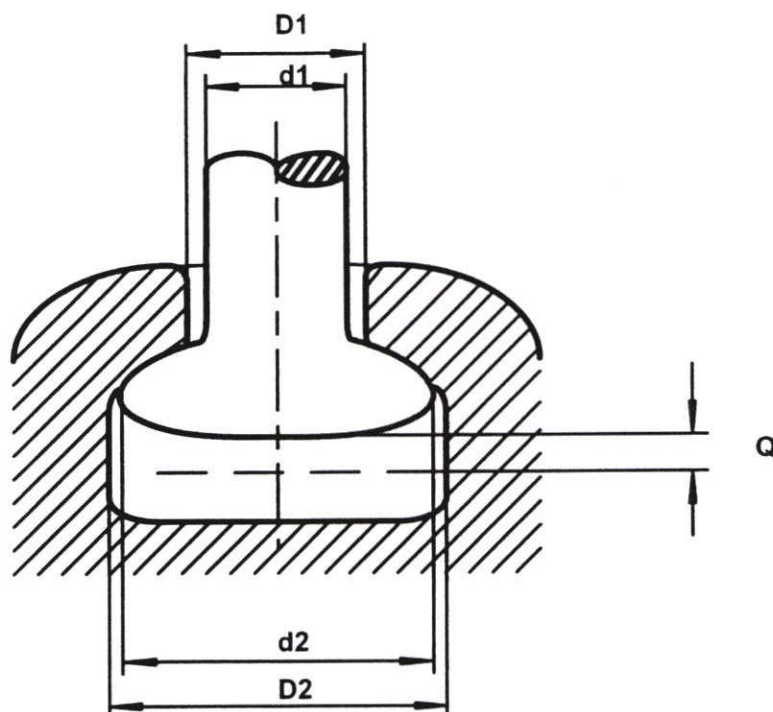
Designated size of coupling	$D_1 - d_1$		$D_2 - d_2$	$D_3 - d_2$	P	Q	
	Min.	Max			Min.	Max.	Min
11	0.6	3.0	1.7	1.7	1.4	3.9	1.6
16A	2.2	5.0	1.2	1.2	1.1	4.0	1.6
16B	2.2	5.0	1.2	1.2	3.6	6.5	3.7
20	2.0	5.4	1.5	1.5	1.0	4.5	2.0
24	2.5	6.4	2.0	2.0	2.5	6.7	2.8
28	3.0	7.4	2.0	2.0	2.5	7.2	3.0
32	3.0	7.9	2.5	2.5	3.0	8.2	3.5



รูปที่ 4.46 ระยะของช่องว่างระหว่าง Pin และ Cap บริเวณการสวมเข้า

จากตารางที่ 4.14 เมื่อขนาด Coupling ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 20 ดังนั้นจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้ เพราะฉะนั้น

P มีค่าเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร

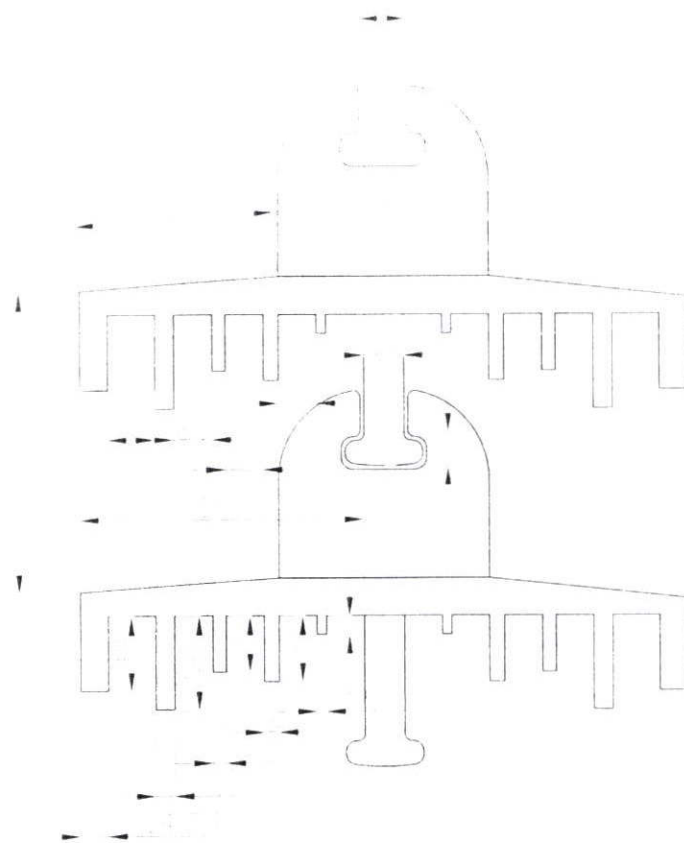


รูปที่ 4.47 ระยะของช่องว่างระหว่าง Pin และ Cap บริเวณภายใน

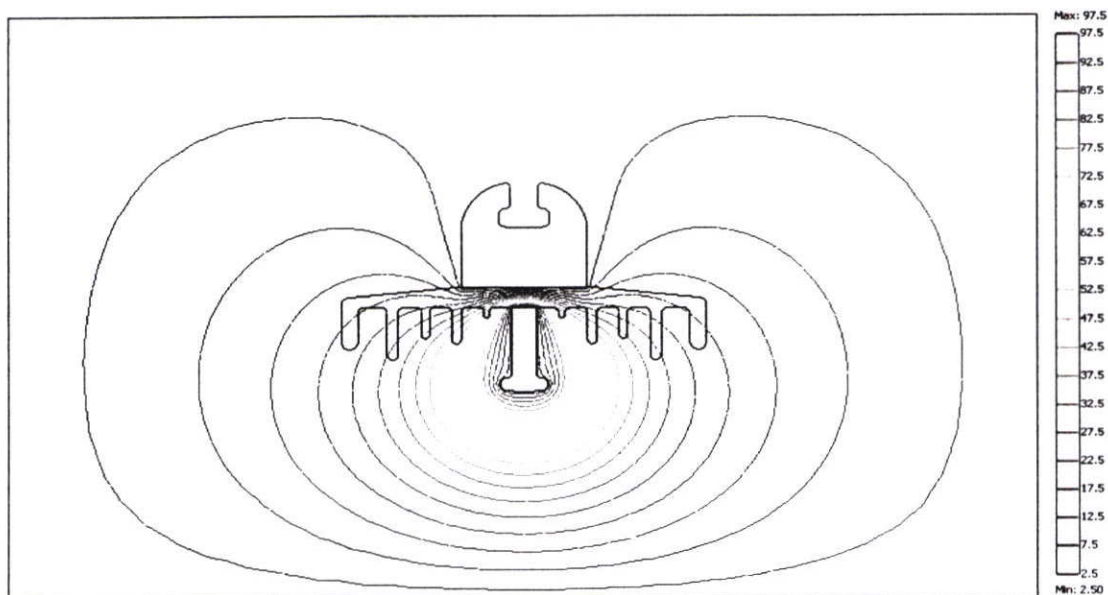
Q มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

#### 4.4.2 การจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสดรึงที่ออกแบบด้วยโปรแกรม และวิเคราะห์ผล

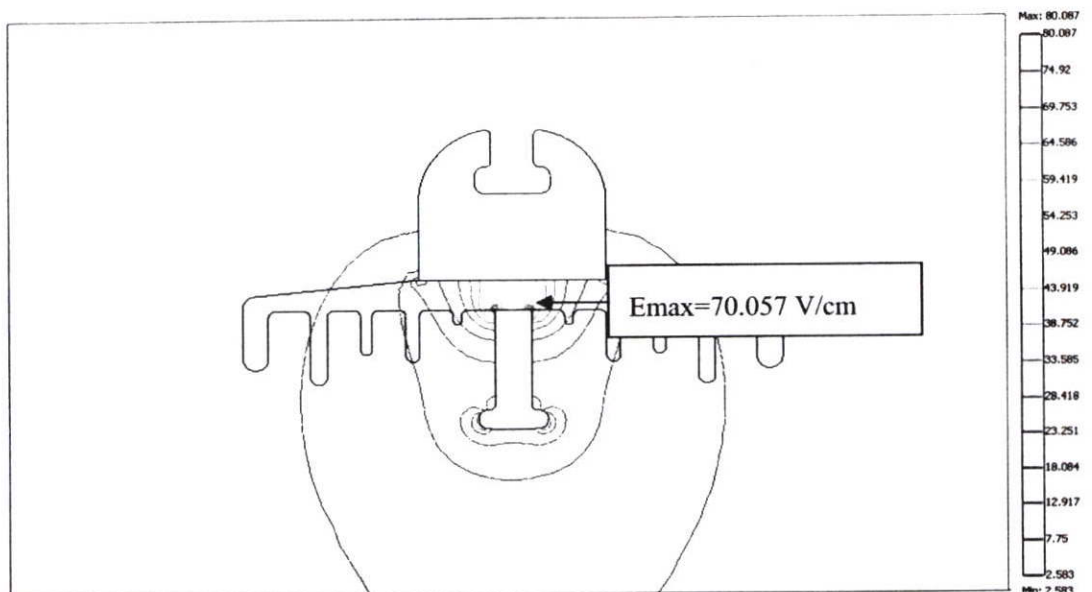
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรึงแบบแขวนที่ทำการออกแบบตามมาตรฐาน [13, 22, 23] ดังแสดงในรูปที่ 4.48 ซึ่งจะแสดงขนาดมิติ หลังจากทำการปรับค่าต่างๆ ตามข้อแนะนำ เช่น การลบมุม เพื่อที่จะลดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จะเกิด เป็นต้น และหลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลของการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ



รูปที่ 4.48 มิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ(หน่วย มิลลิเมตร)



รูปที่ 4.49 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ

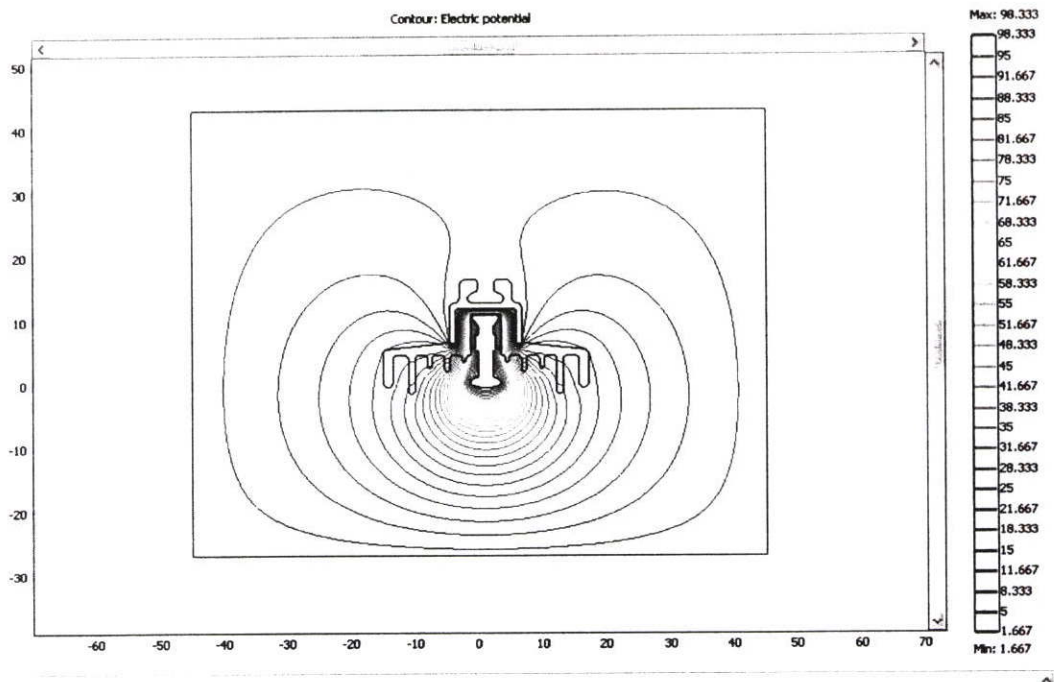


รูปที่ 4.50 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ

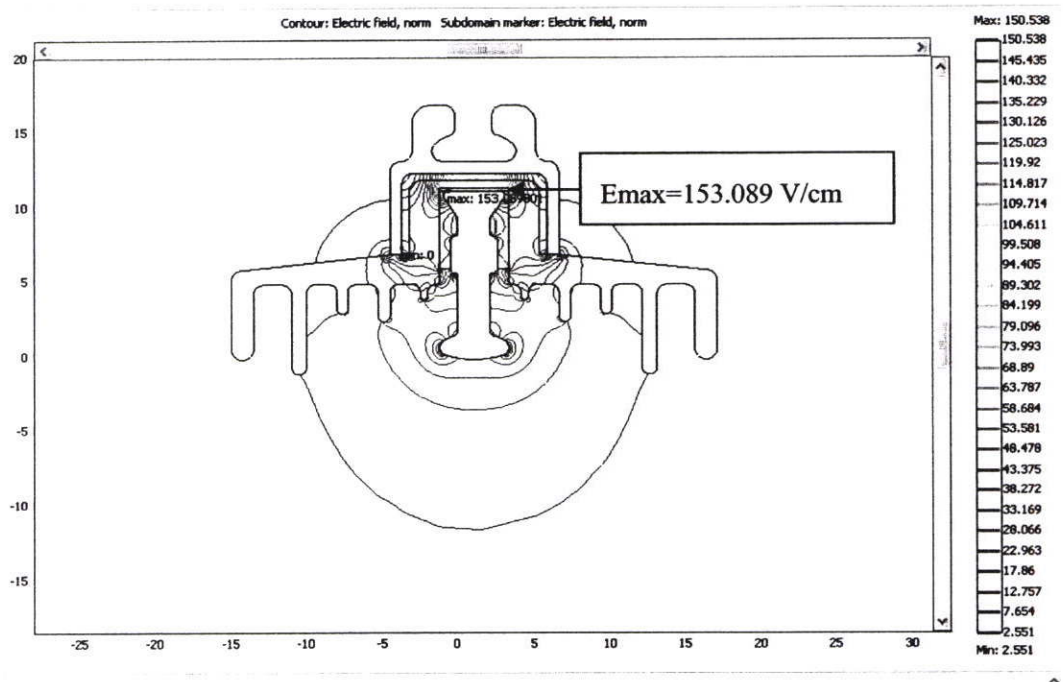
#### วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากการจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงแบบแวนที่ได้ทำการออกแบบมาพบว่า ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้ายังกระจายได้ไม่ดีมากนัก ทำให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นยังคงมีค่าสูงอยู่ มีค่าเท่ากับ 70.057 V/cm ซึ่งจากผลการศึกษาข้อมูล และการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2.1 พบว่า ถ้าหากต้องการให้การกระจายของสนามไฟฟ้าดีขึ้นลักษณะครีบริบ และปีกของพวงลูกถ้วยฉนวนควรจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากขึ้น จำนวนครีบริบมากขึ้น ความหนามากขึ้นจะสามารถทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าดีขึ้น

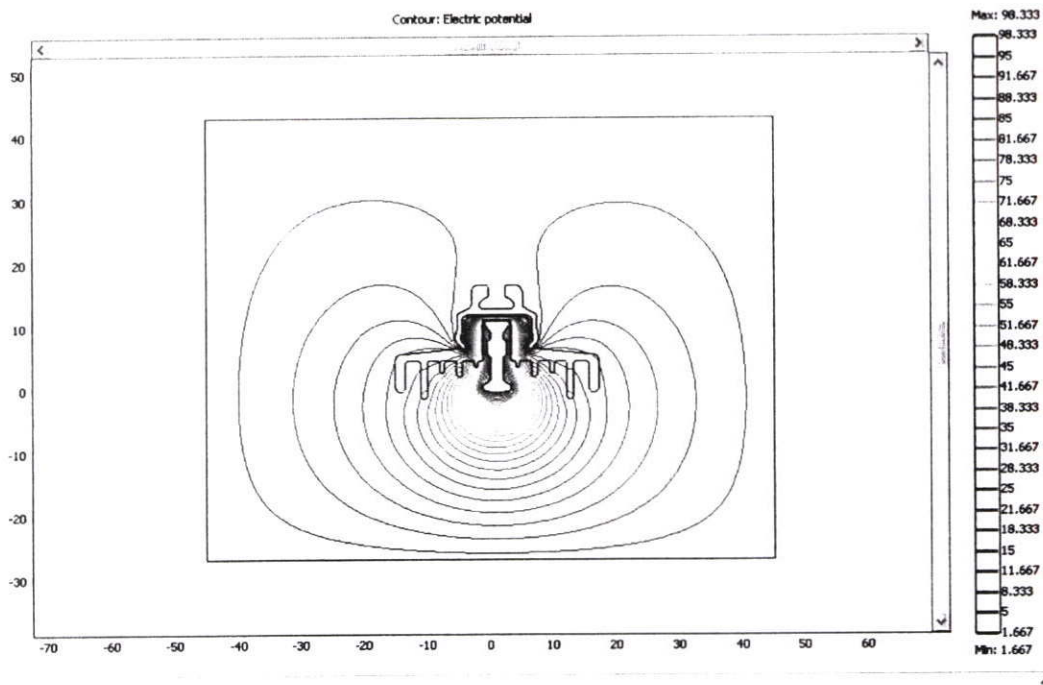
จากผลการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสดตรง ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง การทดสอบ และจากผลการจำลองที่ผ่านมา พบว่าลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสดตรงนั้น ตัวแปรสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาคือ พฤติกรรมการจับเกาะของสิ่งเปื้อนอะเนียงอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า รวมไปถึงลักษณะรูปร่างของปีก ครีบริบ และทิศทางเคลื่อนที่ของลม ซึ่งแสดงประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองโดยธรรมชาติ [15] ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง เพราะฉะนั้นลูกถ้วยฉนวนที่ออกแบบจะถูกปรับเปลี่ยนลักษณะของปีกที่ยื่นออกมา ซึ่งจะด้อยยื่นยาวออกมามากพอที่จะป้องกันการไหลกระทบสัมผัส Pin ของลูกถ้วยฉนวนที่อาจจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นได้ง่าย ซึ่งอาจส่งผลทำให้ระบบการส่งจ่ายล้มเหลวได้ รูปที่ 4.51 และ 4.52 จะเป็นการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนระยะครีบริบของผิวปีกให้ยื่นออกมามากพอที่จะป้องกันการจับเกาะของสิ่งเปื้อนอันเนื่องจากทิศทางลมได้ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.53 และ 4.54 จะเป็นการปรับเปลี่ยนรูปทรงของ Cap ให้มีรูปร่างที่อยู่ในเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า เพื่อลดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น



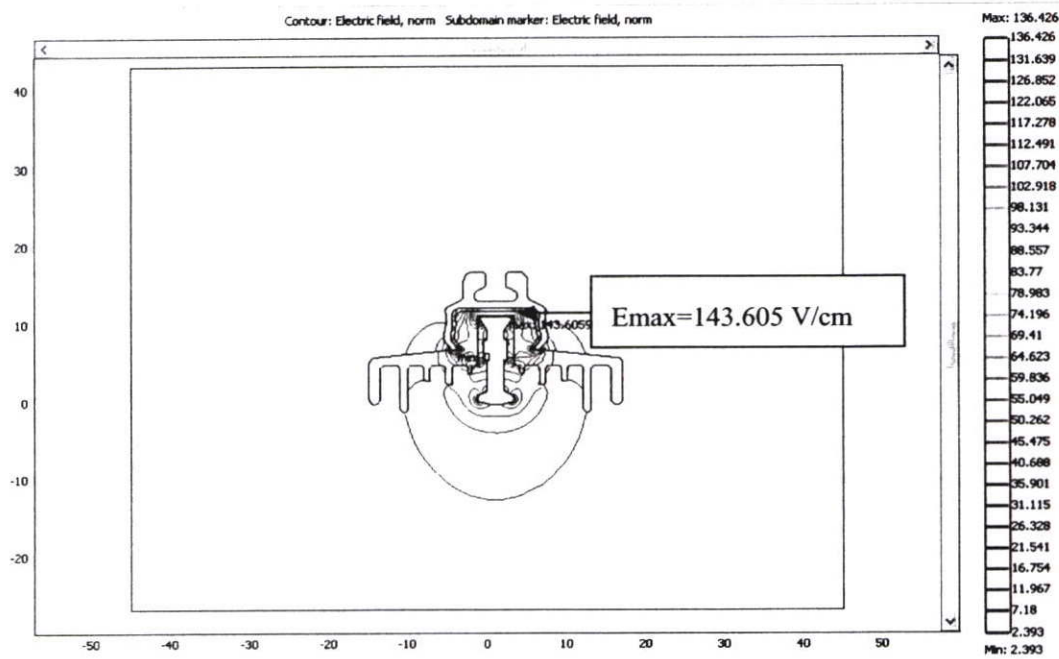
รูปที่ 4.51 การกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวคิริบ



รูปที่ 4.52 การกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวคิริบ



รูปที่ 4.53 การกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีป และปรับเปลี่ยนรูปร่างของ Cap



รูปที่ 4.54 การกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีป และปรับเปลี่ยนรูปร่างของ Cap

### สรุปผลการจำลองลูกถ้วยกระแสตรงพื้นฐาน

การออกแบบลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยนั้น จะออกแบบให้ครีบริหรือชั้นบนของลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential Lines) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน ที่ผิวลูกถ้วยด้านบนที่ติดอยู่กับฝาครอบโลหะจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จะเป็นสาเหตุของการเกิดโคโรนาขึ้นในบริเวณนี้ได้ง่าย และนำไปสู่การวาบไฟตามผิว (Flashover voltage) ดังนั้นแรงดันใช้งานจะต้องต่ำกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (Corona Inception Voltage) ความกว้างของปีกชั้นลูกถ้วย และความหนาของเนื้อลูกถ้วยระหว่างฝาครอบโลหะบน กับก้านยึดส่วนล่าง ต้องออกแบบให้มีความสัมพันธ์กันในด้านความทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือความทนต่อแรงดันวาบไฟ (Flashover Voltage) จะต้องน้อยกว่าความทนต่อแรงดันเจาะทะลุ (Puncture Voltage) ในส่วนครีบริได้ปีกลูกถ้วยนั้นทำไว้เพื่อเพิ่มระยะรั้วซึ่งเป็นส่วนที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยกับอิเล็กโทรด จะเป็นส่วนกันไม่ให้ผิวเปียกได้ง่ายในสภาพฝนตก เป็นผลให้ทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้นด้วย

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ได้ออกแบบตามมาตรฐาน [13, 22, 23] มาทำการปรับเปลี่ยนรูปร่างโดยการยื่นระยะความยาวของครีบริ ให้ยาวพอที่จะป้องกันการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ Pin ของลูกถ้วยฉนวนตามผลการจำลองหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปทรงของ Cap ให้มีรูปร่างเป็นไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้า พบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะลดลงจาก 153.089 V/cm เป็น 143.605 V/cm

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผล

จากผลการทดสอบลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง และกระแสดลัดแบบแขวนแบบปกติทั่วไป และลูกถ้วยฉนวนที่ได้ทำการปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยวิธีการต่างๆ โดยในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะนำเสนอการปรับปรุง พัฒนาคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวน โดย

- 1.) การเคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
- 2.) การต่อพวงลูกถ้วยฉนวนร่วมกับวงแหวนโคโรนา

เพื่อนำมาทดสอบในห้องทดสอบ โดยทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสดตรง และกระแสดลัด เพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB) รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลของการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง ตามมาตรฐาน และทำการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามข้อมูลที่ได้ทำการศึกษา การทดสอบ และการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.) การวิเคราะห์ผลของการทดสอบการเกิดควาบไฟตามผิว และปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนา ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงชนิดแขวนแบบปกติทั่วไป และลูกถ้วยฉนวนกระแสดลัดที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ กับผลการจำลองผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของลูกถ้วยทั้ง 2 ชนิด

จากการทดสอบการเกิดควาบไฟตามผิว และแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสดตรง โดยเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB)

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	แรงดันวาบไฟตามผิว (kV)	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (kV)	สนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
NC/AC	153.33	85.69	124.449
SC/AC	126.18	126.18	134.278
NC/DC	169.66	85.44	180.127
SC/DC	97.71	97.71	181.032

จากตาราง 5.1 แบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) กับลูกถ้วยฉนวนกระสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC)

1.1) การเปรียบเทียบผลการทดสอบการวาวไฟตามผิวภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสดรง พบว่าระดับแรงดันที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) เกิดการวาวไฟมีค่าเท่ากับ 169.66 kV ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนกระสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) เกิดการวาวไฟมีค่าเท่ากับ 126.18 kV หรือลดลงมาประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับการเกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยชนิด NC/DC จะมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC เหตุผลเนื่องมาจากคุณลักษณะทางมิติของลูกถ้วยฉนวนซึ่งลูกถ้วยฉนวนชนิด NC/DC จะมีค่าระยะการอาร์คเท่ากับ 270 มิลลิเมตร ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC จะมีค่าระยะการอาร์คเท่ากับ 320 มิลลิเมตร จึงทำให้ระดับการวาวไฟตามผิวที่ทำการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนชนิด NC/DC สูงกว่าลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC

1.2) การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสดรง พบว่าระดับแรงดันที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) เกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่ระดับแรงดัน 85.44 kV ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนกระสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) เกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่ระดับแรงดัน 126.18 kV หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะเห็นได้ว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ หรือลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC จะพบระดับแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่ระดับแรงดันสูงกว่าลูกถ้วยกระแสดรง หรือ NC/DC เหตุผลเนื่องมาจากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนไป กล่าวคือ สนามไฟฟ้าจะมีการกระจายที่สม่ำเสมอผ่านเนื้อฉนวนที่เคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้แรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนากับลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC จะเกิดขึ้นยากกว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC)

1.3) การเปรียบเทียบผลการจำลองของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) กับลูกถ้วยฉนวนกระสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB) ช่วย พบว่า สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง (NC/DC) มีค่าเท่ากับ 180.127 V/cm ในขณะที่สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระสลับ (SC/AC) มีค่าเท่ากับ 134.278 V/cm ซึ่งจะเห็นได้ว่าลูกถ้วยฉนวนกระสลับที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยการเคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ (SC/AC) จะพบสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นน้อยกว่าลูกถ้วยกระแสดรงแบบปกติทั่วไป (NC/DC) เหตุผลเนื่องมาจากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระสลับ เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนไป กล่าวคือ การกระจายของสนามไฟฟ้าจะสม่ำเสมอกว่าลูกถ้วยฉนวนที่

ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสลับ (SC/AC) จะดีกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง (NC/DC) อย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 5.1

2.) การวิเคราะห์ผลของปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนา ของพวงลูกถ้วยฉนวนเมื่อทำการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา เปรียบเทียบกับการจำลองผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการเกิดโคโรนากับสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB)

แบบของวงแหวน โคโรนา	แรงดันเริ่มเกิด โคโรนา (kV)	สนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
ไม่ต่อวงแหวน โคโรนา	140.8	35.452
A	186.9	17.353
B	182.8	17.818
C	136.9	20.555
D	127.6	21.319

จากตาราง 5.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของพวงลูกถ้วยฉนวนเมื่อทำการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB) พบว่า เมื่อพิจารณาในส่วนองระดับแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนา เมื่อนำวงแหวนโคโรนามาต่อร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง วงแหวนโคโรนาแบบ A ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนเท่ากับ 270 มิลลิเมตร ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 186.9 kV ส่วนวงแหวนโคโรนาแบบ B, C และ D มีติจะลดหลั่นลงมาตามลำดับ ในขณะที่สนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB) วงแหวนโคโรนาชนิด A ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี กล่าวคือ เมื่อพื้นที่ผิวของวงแหวนโคโรนาเพิ่มขึ้นความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง เพราะพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ให้อิเล็กตรอนสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น

3.) การวิเคราะห์ผลการจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสลับที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำในแต่ละแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง	180.127
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับ	135.727
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก	124.323
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน	134.278
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านล่าง	124.449

จากการจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับ โดยการเคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรูปแบบของการจำลองการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำสามารถแยกออกได้เป็น 3 กรณี

- 3.1) ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูก
- 3.2) ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน
- 3.3) ลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านล่าง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น กับลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงแบบปกติทั่วไป พบว่า ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนทั้งลูกจะมีค่าเท่ากับ 124.323 V/cm และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 134.278 V/cm ส่วนค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำที่เนื้อฉนวนเฉพาะด้านล่างจะมีค่าเท่ากับ 124.449 V/cm ซึ่งต่ำกว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 180.127 V/cm และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดลับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 135.727 V/cm เหตุผลเนื่องจากการกระจายที่ค่อนข้างสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า กล่าวคือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าต่ำ

ด้วย

4.) การวิเคราะห์ผลการออกแบบลูกถ้วยฉนวน ที่ออกแบบตามมาตรฐาน และทำการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด เพื่อลดโอกาส หรือความเสี่ยง ที่อาจเกิดกับระบบการฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสดตรงในประเทศไทยได้ ซึ่งจากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ได้ออกแบบตามมาตรฐานมาทำการปรับเปลี่ยนรูปร่างโดยการขึ้นระยะความยาวของครีป ให้ยาวพอที่จะป้องกันการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ Pin ของลูกถ้วยฉนวนตามผลการจำลอง ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปทรงของ Cap ให้มีรูปร่างเป็นไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้า พบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะลดลงจาก 153.089 V/cm เป็น 143.605 V/cm

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุป

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการที่จะนำลูกถ้วยฉนวนกระแสลับ ที่ค่อนข้างใช้งานกันอย่างหลากหลายในประเทศไทย อีกทั้งราคาต่อหน่วยยังถูกกว่าอยู่มาก

ดังนั้นจากการศึกษา ค้นหาข้อมูลต่าง ๆ ไม่ว่าจะในประเทศ หรือแม้กระทั่งการเดินทางไปต่างประเทศ (รัสเซีย) ซึ่งมีการใช้งานระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่น่าจะใหญ่ที่สุดในโลกก็ว่าได้ เพื่อให้งานวิจัยชิ้นนี้เกิดความถูกต้อง สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งพอที่จะสรุปแนวทางที่จะทำการประยุกต์หรือพัฒนาลูกถ้วยฉนวนกระแสลับ ให้สามารถใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้ ดังนี้

1. นำลูกถ้วยฉนวนกระแสลับแบบแขวนมาทำการปรับปรุงคุณลักษณะ โดยเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ

โดยสมมติฐานเริ่มต้นของการศึกษาวิจัย คือในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับมีวิธีการแก้ปัญหาเรื่องการเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับ โดยวิธีการเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ หรือที่เรียกกันว่า Resistance Glazed หรือ Semi-conducting Glazed Insulator มาใช้ทดแทนลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนปกติ เพื่อลดปัญหาการเกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนได้ง่าย ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความน่าเชื่อถือในระบบการส่งจ่ายให้ดีขึ้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวน เพื่อนำมาใช้งานกับระบบกระแสตรง ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบการกระแสตรงพบว่า ระดับการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนจะมีการจับเกาะมากกว่า ซึ่งในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ จะเริ่มตั้งแต่ การทดสอบลูกถ้วยฉนวนทั้งกระแสตรง และกระแสลับ เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ต่างกัน และต่อมาจะทำการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนทั้งลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และกระแสลับ โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกรรมวิธีการทำยังไม่มีความนัก

หลังจากนั้นได้นำลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนทั้งกระแสตรง และกระแสลับมาทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ทางไฟฟ้า เช่น การทดสอบการเกิดวาวไฟตามผิว การทดสอบปรากฏการณ์การเริ่มเกิดแรงดันโคโรนา โดยนำกล้องโคโรนาทำการตรวจจับ รวมไปถึงการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งพบว่า ระดับแรงดันที่เกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสลับ ที่ทำการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะมีระดับแรงดันลดลงจากระดับแรงดันวาวไฟตามผิว เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ของลูกถ้วยกระแสดรงแบบแขวนปกติประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบด้วยไฟฟ้า กระแสดรง โดยที่ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดรง (NC/DC) พบระดับแรงดันวาบไฟตามผิวที่ ระดับแรงดัน 169.66 กิโลโวลท์ ในขณะที่ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดรงแบบแขวน (SC/AC) พบระดับแรงดันวาบไฟตามผิวที่ระดับแรงดัน 126.18 กิโลโวลท์

สำหรับปรากฏการณ์การเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยชนิด NC/DC กับชนิด SC/AC พบว่าลูกถ้วยฉนวนชนิด SC/AC จะพบปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาได้ยากกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบแขวนปกติ หรือ NC/DC ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ เหตุผลเนื่องจากลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะยอมให้กระแสบางส่วน ไหลผ่านผิวฉนวน ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่า ในขณะที่เดียวกันก็ได้ทำการ ตรวจวัดอุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง (SC/AC) ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีเพียงเล็กน้อยที่ ซึ่งไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Thermal runaway

และเพื่อเป็นการยืนยันถึงคุณลักษณะที่ดีขึ้น และสามารถใช้ทดแทนลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดรง ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสดรงของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดรงที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ จึงได้ทำการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงโดยกรรมวิธีของโรงงานที่เป็นผู้ผลิตลูกถ้วยฉนวน และหลังจากนั้นได้นำลูกถ้วยฉนวนที่ได้ทำการปรับปรุงมาทำการทดสอบภายใต้สภาวะจำลอง ที่มีการเปราะเปื้อนระดับสูง โดยการทดสอบในกระโจมไอน้ำ ซึ่งผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนยิ่งขึ้นว่าดัง แสดงในหัวข้อการทดสอบ 3.4 ซึ่งไม่พบปรากฏการณ์โคโรนาที่ซึ่งนำไปสู่การเกิดการวาบไฟเลย กับลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดรงที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ และยังสามารถลด ปัญหาปรากฏการณ์แถบแห้งได้อีกด้วย

ในขณะเดียวกัน จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำแสดงให้เห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนปกติทั่วไป ซึ่งเป็นการยืนยันอีกครั้งว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนดีขึ้นจริง

2. นำวงแหวนโคโรนาขนาดต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบมาต่อร่วมกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบแขวน และใช้กล้องโคโรนาทำการถ่ายปรากฏการณ์การเริ่มโคโรนา ซึ่งพบว่าเมื่อทำการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาแบบ A ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 270 มิลลิเมตร ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาจะสูงกว่าพวงลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ไม่ได้มีการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาสูงถึงประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดรงจะดีขึ้นเมื่อนำมาต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาที่เหมาะสม

ในขณะเดียวกัน จากผลการจำลองการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ที่มีการปรับปรุงคุณลักษณะโดยการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนาที่

ได้ออกแบบขนาดต่างๆ แสดงให้เห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพวงลวดด้วยฉนวนแบบแขวนปกติทั่วไป ซึ่งเป็นการยืนยันอีกครั้งว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลวดด้วยฉนวนดีขึ้นจริงเช่นกัน

ดังนั้นสรุปได้ว่าถ้าจะนำลวดด้วยลวดด้วยฉนวนกระแสลับแบบแขวนมาใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. การเคลือบผิวฉนวนของลวดด้วยฉนวนกระแสลับแบบแขวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
2. นำวงแหวนโคโรนาที่ออกแบบอย่างเหมาะสมมาต่อร่วมกับพวงลวดด้วยฉนวนกระแสลับ

ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แนะนำให้นำลวดด้วยฉนวนกระแสลับแบบแขวน มาทำการพัฒนา หรือปรับปรุงคุณลักษณะโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ มากกว่าการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรนา เพราะพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าในระบบกระแสตรงจะมีผลค่อนข้างรุนแรงมากกับการจับเกาะของสิ่งประอะเปื้อน ซึ่งการปรับปรุงคุณลักษณะโดยวิธีการนี้จะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ได้อีกด้วย

## 6.2 อุปสรรคและการแก้ไข

1. เนื่องจากลวดด้วยฉนวนที่นำมาใช้ในการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งลวดด้วยฉนวนแบบแขวนกระแสตรงซึ่งมีการใช้งานเพียงที่เดียวในประเทศไทย อีกทั้งราคายังสูงกว่าลวดด้วยฉนวนแบบแขวนปกติที่ใช้งานในระบบกระแสลับ ซึ่งค่อนข้างเกิดความยุ่งยากในการขอความอนุเคราะห์และจัดส่งลวดด้วยฉนวนกระแสตรง ซึ่งต้องใช้เวลาในการติดต่อประสานงานค่อนข้างนานมาก ซึ่งวิธีการแก้ไข โดยการให้ญาติที่เป็นผู้อำนวยการเขตภาคใต้ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคช่วยทำการประสานงานให้ จึงสามารถที่จะแก้ปัญหานี้ได้

2. เนื่องจากอุปกรณ์ที่เข้าร่วมในการทดสอบ คือ กิ่งโคโรนา และกิ่งเทอร์โมสแกน มีราคาค่อนข้างสูงมาก และมีแผนการใช้งานเพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงระบบการส่งจ่ายของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และการไฟฟ้าภูมิภาคที่มีความถี่ค่อนข้างสูง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์และผลพลอยได้จากอุปสรรคข้อที่ 1 เช่นเดียวกัน

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการเคลือบผิวของลวดด้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำจะมีกระแสบางส่วนไหลผ่านผิวของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบ ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าบางส่วนที่มีการสูญเสียไป

2. กระบวนการเคลือบผิวของสารกึ่งตัวนำค่อนข้างจะต้องระมัดระวังอย่างยิ่ง เนื่องกระแสที่ไหลผ่านผิวของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งถ้าค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบมีค่าสูง ก็จะมีกระแสรั่วไหลสูง ซึ่งอาจทำให้มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ Thermal Runaway ได้

3. ในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะต่อวงแหวนโคโรนาร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสตรงที่มีจำนวนลูกถ้วยถึง 22 ลูกนั้นจะทำได้ค่อนข้างยาก และจะต้องพิจารณาระยะปลอดภัยของระบบสายส่งด้วย

## บรรณานุกรม

- [1] A.S.Farag, F.M. Zedan “**New Design for Use in the Desert Environment**” IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.25 No.2, April 1990.
- [2] Lichun Shu, Juan Cao, Lihus Wu, JianZheng He and Zhihong Yang “**Effect of the Contour of DC Insulator on Icing Flashover Process and Flashover Voltage**” Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials Jul 1-5 2003 Nagoya
- [3] Zhang Renyu, Zhu Deheng “**Configuration Effect on dc Flashover on Polluted Insulators**” IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 25 No.3, 1990 Page 575-581
- [4] Kenji and MORTITA “Long-Term Performance of Ceramic Insulator” NGK insulators, LTD.
- [5] R.Sandararajan and R.S.Dorur “**Influence of profile on DC Insulator performance under polluted conditions**” Department of Electrical Engineering Arizona State University Tempe, Arizona-85287 USA.
- [6] Hiroshi FUKUI, Tetsuo Fujimura, Katsuhiko NAITO, Takashi IRIE “**Studies on various performance of semiconductor glazed insulator**” NGK Review overseas edition, No. 2, Nov. 1978, page 23-41.
- [7] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, เมษายน 2547.
- [8] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, เอกสารประกอบการบรรยาย **High Voltage Engineering (วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง)**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] NGK INSULATORS, **Technical Guide NGK**, First revision in 1989,LTD.MIZUHO, NAGOYA, JAPAN, pp 33-36.
- [10] Tetsuo FUJIMURA, Katsuhiko NAITO, Takashi IRIE, Yoshihiro SUZUKI, **Anti-contamination design of Insulator**, NGK Review overseas edition, No.3 Aug 1979, pp 12-23.
- [11] J.L. Fierro-Chavez, I. Ramirez, G. Montoya-Tena, **On-line leakage current monitoring of 400 kV insulator string in polluted area**, IEE Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol.143, No.6, November 1996.

- [12] K. Iwai, Y. Hase, E. Nakamura, **Development of a new apparatus for contamination measurement of overhead transmission line insulators**, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.13, No.4, October 1998.
- [13] IEC 815, **Guide for the selection of Insulator of Polluted conditions**, First Edition 1986.
- [14] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **ลักษณะสมบัติของฉนวนถ้วยคอตันยาวปีกสลัดในระบบจำหน่าย, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กุมภาพันธ์ 2545.**
- [15] J.S.T Looms, **Insulator for HIGH VOLTAGE**, IEE Power Engineering Series 7, 1990, pp 195-215.
- [16] นรเศรษฐ พัฒนเดช และ สำรวย สังข์สะอาด, **ฉนวนถ้วยฉนวนคอตันยาวปีกสลัดสำหรับระบบ 33 kV, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 89-94.**
- [17] Insulation และ Maintenance สายส่ง HVDC, **แผนกวิศวกรรมบำรุงรักษาสายส่งกองเทคโนโลยีสายส่งและการบิน, กฟผ, 2005.**
- [18] HVDC Transmission Line Reference Book.
- [19] โคศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, **การผลิต การส่งจ่ายและจ่ายไฟฟ้า**, 2544.
- [20] ปราโมทย์ เจริญอำไพ, **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547., พิมพ์ครั้งที่ 3.**
- [21] MATTHEW N., O. SADIKU, **A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problem**, IEEE Transactions on Education, Vol.32, No.2, May, 1989.
- [22] IEC 120, **Dimension of ball and socket couplings of string insulator units**, Third Edition. 1984.
- [23] IEC 305, **Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V-Ceramic or glass insulator units for a.c.system-Characteristics of insulator units of the cap and pin type**, Fourth Edition, 1995-12.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบหาค่า Equivalent Salt Deposit Density  
(Insulation และ Maintenance สายส่ง HVDC, แผนกวิศวกรรมบำรุงรักษาสายส่งกอง  
เทคโนโลยีสายส่งและการบิน, กฟผ, 2005.)

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบหาค่า Non-soluble Salt Deposit Density  
(Insulation และ Maintenance สายส่ง HVDC, แผนกวิศวกรรมบำรุงรักษาสายส่งกอง  
เทคโนโลยีสายส่งและการบิน, กฟผ, 2005.)

ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

## ภาคผนวก ก

## การทดสอบค่า Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) ของลูกถ้วยฉนวน กระแสตรงที่ใช้งานในระบบสายส่ง

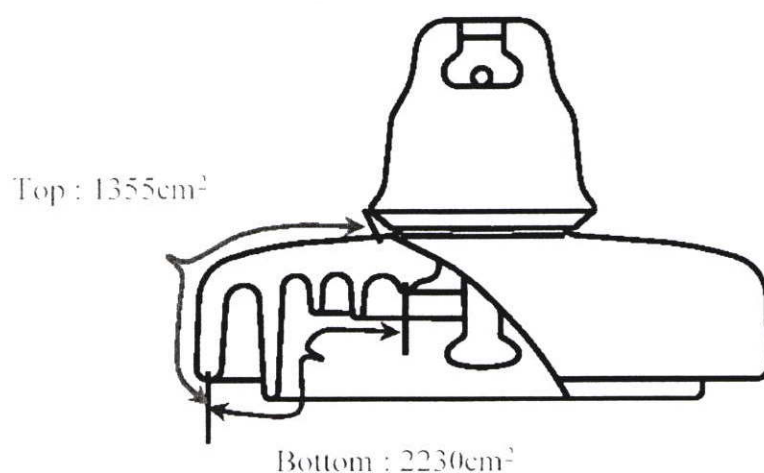
การทดสอบค่า ESDD มีความสำคัญต่อสมรรถนะของลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบ เนื่องจากความรุนแรงของสิ่งเปราะเปื้อนมีผลต่อการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน และสามารถนำข้อมูลอ้างอิงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า รวมไปถึงการบำรุงรักษาลูกถ้วยฉนวนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ระดับความรุนแรงของระดับ ESDD ที่เกาะติดลูกถ้วยฉนวน สามารถแบ่งออกได้เป็นระดับต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ระดับความเปราะเปื้อนของ ESDD

Grade	ESDD Level ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )
Very light	0 - 0.03
Light	0.03 - 0.06
Moderate	0.06 - 0.1
Heavy	Greater than 0.1

Surface area of NGK Cat. CA-735EZ



รูปที่ ก.1 รูปแสดงพื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวนที่ใช้งานในประเทศไทย

### ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบหาค่า ESDD ดำเนินการโดยหาค่า ESDD ของลูกถ้วย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในพวงลูกถ้วย และแยกออกเป็นค่า ESDD ที่พื้นผิวด้านบน และพื้นผิวด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ ก.1 จากนั้นหาอัตราส่วนของ ESDD ระหว่างพื้นผิวด้านบนกับพื้นผิวด้านล่าง โดยวิธีการทดสอบการเก็บตัวอย่างสิ่งเปื้อนดังแสดงในรูปที่ ก.3 ซึ่งมีลำดับขั้นการเก็บตัวอย่างค่า ESDD ดังต่อไปนี้

1) ใช้น้ำ De-Ionic ล้างอุปกรณ์ต่างๆ เช่น บีกเกอร์ กระบอกวัดสาร แปรง และอุปกรณ์อื่นๆ ให้สะอาดก่อนทำการเก็บสะสมสิ่งเปื้อน เพื่อความถูกต้องของผลการทดลองซึ่งควรล้างอย่างน้อย 4 ครั้ง

2) เติมน้ำสะอาดประมาณ 200 ml ในบีกเกอร์ ขนาด 250 ml ปริมาณน้ำสะอาดจะมีผลต่อการอิมตัวของสิ่งเปื้อน

3) นำแปรงสะอาดแช่ในน้ำสะอาด วัดค่าความนำไฟฟ้า และอุณหภูมิของน้ำสะอาด

4) นำแปรงไปเช็ดสิ่งเปื้อนที่ผิวด้านบนของลูกถ้วย แล้วนำแปรงไปจุ่มในบีกเกอร์ที่มีน้ำสะอาด แกว่งแปรงเบาๆ เพื่อให้สิ่งเปื้อนละลายในน้ำ

5) ทำซ้ำข้อ 4 อีกหลายๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีสิ่งเปื้อนเหลืออยู่บนผิวด้านบนของลูกถ้วยจนวน

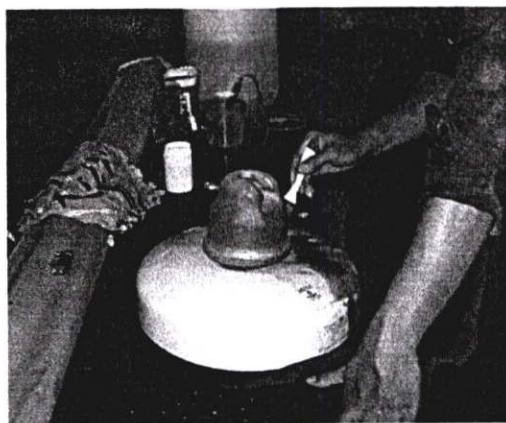
6) วัดค่าความนำไฟฟ้า และอุณหภูมิของน้ำที่มีสิ่งเปื้อน

7) ทำตามข้อ 4 ถึงข้อ 6 กับพื้นผิวของลูกถ้วยด้านล่าง

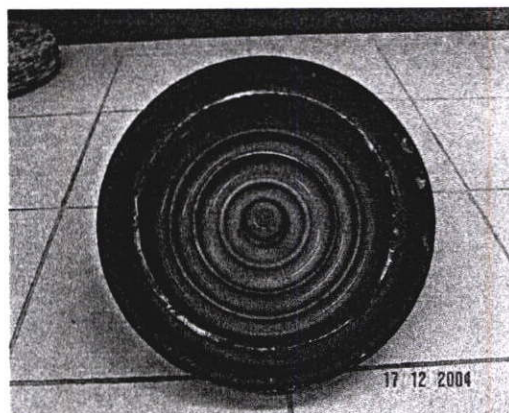
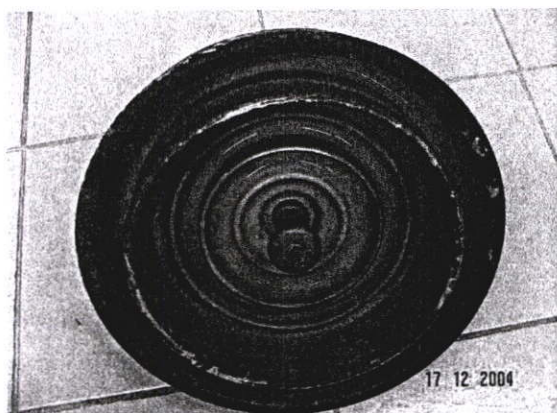
แล้วจากนั้นนำค่าต่างๆ ไปคำนวณค่า ESDD



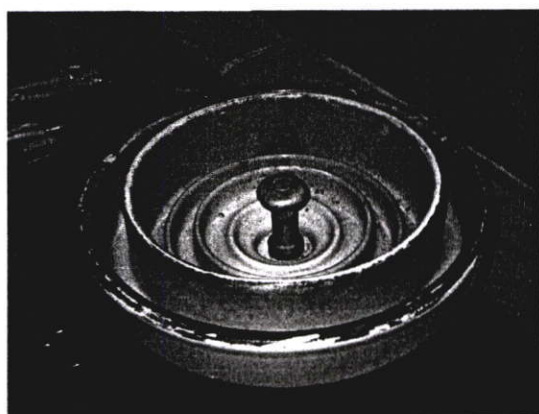
รูปที่ ก.2 สภาพของสิ่งเปื้อนของผิวด้านบนลูกถ้วย



รูปที่ ก.3 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่า ESDD ผิวด้านบนลูกถ้วย



รูปที่ ก.4 สภาพของสิ่งเปราะเปื้อนของผิวด้านล่างลูกถ้วย



รูปที่ ก.5 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่า ESDD ผิวด้านบนลูกถ้วย

## ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบได้ค่า ESDD โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง Very Light รายละเอียดคั่งแสดงในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบได้ค่า ESDD

## Measurement Result Of Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) : Suspension Insulator

Location 300 KV HVDC

Type Of Insulator : Fog Type with Zinc Sleeve around the Pin

Manufacturer NGK

Surface area (Top) 1,355 Sqcm

Surface area (Bottom) 2,230 Sqcm

Tower.

Measurement Result									
Description	Surface	Before or After Collecting Contaminants	Water Volume (CC)	Temp of water (T no C)	Conductivity at (T no C) (us/cm)	Conductivity at (20 no C) (us/cm)	Concentration of salt (%)	Quantity of salt (mg)	ESDD (mg/sq.cm)
I/1	Top	Before	200	25.7	9.80	0.825088807	3.7372E-05	3.08386362	0.002275914
		After	200	24.8	34.60	31.265308801	0.001579304		
	Bottom	Before	200	26.2	0.97	0.851928737	3.86248E-05	1.89700773	0.000850676
		After	200	24.3	21.70	19.81140214	0.000987129		
I/5	Top	Before	200	25.5	1.44	1.282752454	5.8876E-05	16.9957792	0.01254101
		After	200	24.4	177.00	161.2621915	0.008556766		
	Bottom	Before	200	25.6	1.04	0.924552994	4.20205E-05	8.69680755	0.003899914
		After	200	24.4	92.60	84.36654763	0.004390424		
I/10	Top	Before	200	26.1	0.96	0.844846288	3.82941E-05	10.6958575	0.007893622
		After	200	25.5	115.50	102.8874364	0.005386223		
	Bottom	Before	200	25.8	1.04	0.920813181	4.18454E-05	7.89225568	0.003539128
		After	200	24.2	84.00	76.84792926	0.003987973		
I/11	Top	Before	200	26.0	0.99	0.873007041	3.96095E-05	3.81710452	0.002817051
		After	200	24.2	41.90	38.332479	0.001948162		
	Bottom	Before	200	25.9	0.99	0.874772226	3.9692E-05	6.44204965	0.002888812
		After	200	24.0	68.80	63.20330504	0.003260717		

Measurement Result									
Description	Surface	Before or After Collecting Contaminants	Water Volume (CC)	Temp of water (T no C)	Conductivity at (T no C) (us/cm)	Conductivity at (20 no C) (us/cm)	Concentration of salt (%)	Quantity of salt (mg)	ESDD (mg/sq.cm)
I/15	Top	Before	200	25.8	1.20	1.062476748	4.84909E-05	4.15682117	0.003067765
		After	200	24.7	46.10	41.74254302	0.002126901		
	Bottom	Before	200	25.7	1.02	0.90493611	4.11024E-05	3.24338921	0.001464435
		After	200	24.7	36.30	32.86885709	0.001662797		
I/16	Top	Before	200	25.1	0.97	0.871146942	3.95226E-05	9.46172066	0.00698282
		After	200	24.8	101.20	91.44650781	0.004770383		
	Bottom	Before	200	25.6	0.96	0.853433533	3.86951E-05	7.34665559	0.003294465
		After	200	24.6	79.00	71.67994033	0.003712023		
I/22	Top	Before	200	25.8	0.95	0	3.81205E-05	6.50913247	0.004801388
		After	200	25.0	70.90	63.80485169	0.003292687		
	Bottom	Before	200	25.7	0.93	0.825088807	3.7372E-05	9.54371463	0.004279693
		After	200	24.8	102.00	92.36940511	0.004809229		
x1	Top	Before	200	25.6	1.06	0.94233286	4.2853E-05	11.0415046	0.008148712
		After	200	24.8	117.50	106.1755402	0.005563605		
	Bottom	Before	200	25.8	1.04	0.920813181	4.18454E-05	8.86575457	0.003975675
		After	200	24.9	95.30	85.93881176	0.004474723		
x2	Top	Before	200	25.9	1.08	0.954296974	4.34135E-05	8.36301139	0.006171964
		After	200	25.1	90.50	81.2711162	0.004224919		
	Bottom	Before	200	25.7	1.28	1.135606099	5.19321E-05	9.99458896	0.004481878
		After	200	24.6	106.50	96.63181829	0.005049227		

Measurement Result									
Description	Surface	Before or After	Water	Temp	Conductivity	Conductivity	Concentration	Quantity	ESDD (mg/sq. cm)
		Collecting Contaminants	Volume (C.C)	of water (T to C)	at (T to C) (us/cm)	at (20 to C) (us/cm)	of salt (%)	of salt (mg)	
x3	Top	Before	200	25.6	1.84	1.635747606	7.56274E-05	7.17999069	0.00529226
		After	200	24.2	77.40	0.20987668	0.003665623		
	Bottom	Before	200	25.3	1.08	0.965987307	4.39614E-05	8.97498299	0.004024656
		After	200	24.0	94.70	26.9964097	0.004531453		
x4	Top	Before	200	25.5	0.99	0.881892312	4.00248E-05	3.68224883	0.00211521
		After	200	24.2	40.50	37.05164018	0.001881149		
	Bottom	Before	200	25.5	1.08	0.96206434	4.37775E-05	2.04060749	0.000915071
		After	200	23.8	23.10	21.30917829	0.001064081		

Remark: 0 - 0.03 = เบื่อนน้อยมาก      0.03 - 0.06 = เบื่อนน้อย  
0.06 - 0.1 = เบื่อนปานกลาง      0.1 และมากกว่า = เบื่อนมาก

Record Date 20/01/2005

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่าถึงแม้การเกาะติดของสิ่งเประอะเป็อนอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูงมาก แต่ค่า ESDD ที่ได้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งโดยส่วนมากค่าจะอยู่ในช่วง Very Light ดังนั้นการวิเคราะห์ในเบื้องต้นของปัญหาการวางไฟตามผิวอันเนื่องมาจาก ค่า ESDD สูง จึงไม่เป็นปัญหามากนักสำหรับชนิดของสิ่งเประอะเป็อนที่เกาะติดในปัจจุบัน ซึ่งสอดคล้องกับสถิติการเกิดวางไฟตามผิวของลูกถ้วยของสายส่งที่ยังไม่เคยเกิดขึ้นในส่วนรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แต่ค่า ESDD ก็ยังต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะต่อไปอีก และทั้งต้องมีการวิเคราะห์ประกอบร่วมกับปัจจัยอื่นๆอีกเช่นค่า NSDD ที่เกาะติด และยังต้องมีการพิจารณาปัญหาอื่นๆที่เกิดขึ้นอีกเช่น การเกิด Corona ทำให้เกิด Audio Noise (AN), Radio Interference (RI) หรือ TV Interference (TVI)

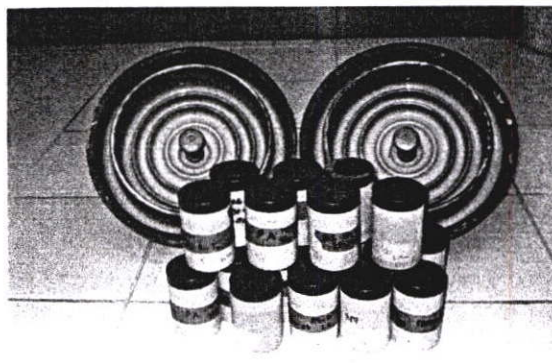
## ภาคผนวก ข

### การทดสอบค่า NSDD ของลูกถ้วยที่ใช้งานในสายส่ง

NSDD เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่า CFO ของลูกถ้วยจากงานวิจัยและรายงาน การสะสมของ Nonsoluble Material ที่เกาะติดลูกถ้วย จะทำให้ค่า CFO ของลูกถ้วยลดลงอันอาจเป็นสาเหตุให้ลูกถ้วยที่ใช้งานอยู่ในระบบเกิดการ Flashover ได้ อีกทั้งข้อมูลที่ได้ยังสามารถใช้ประโยชน์อ้างอิงในการออกแบบสายส่งในอนาคตได้

#### การทดสอบ NSDD

การทดสอบ NSDD ดำเนินการต่อจากการวัดค่า ESDD โดยเก็บตัวอย่างสารที่ได้จากการทดสอบ ESDD แล้วนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านเคมีโดยแผนกวิเคราะห์น้ำและสารทั่วไปฝ่ายเคมี เพื่อแยกส่วนของสารแขวนลอยออกมา วัดเป็น น้ำหนักของสารแขวนลอยต่อ พื้นที่ผิวของลูกถ้วย  $\text{mg}/\text{cm}^2$  นอกจากนี้ยังสามารถหาส่วนประกอบ ของสารแขวนลอยดังกล่าวได้ ตัวอย่างของสิ่งเปราะเปื้อนที่เก็บมาเพื่อนำไปทดสอบหาค่า NSDD ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 การเก็บตัวอย่างของสิ่งเปราะเปื้อนเพื่อนำไปทดสอบหาค่า NSDD

## ผลของการทดสอบค่า NSDD

ผลการทดสอบได้ค่าของ NSDD รายละเอียดดังในตารางที่ ข.1

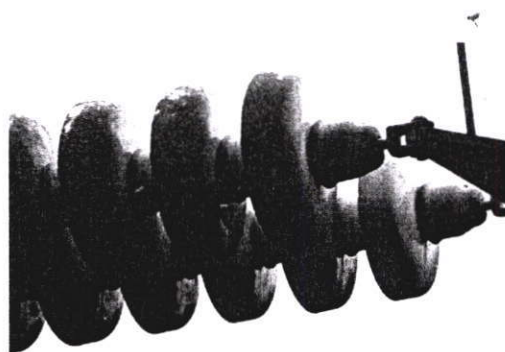
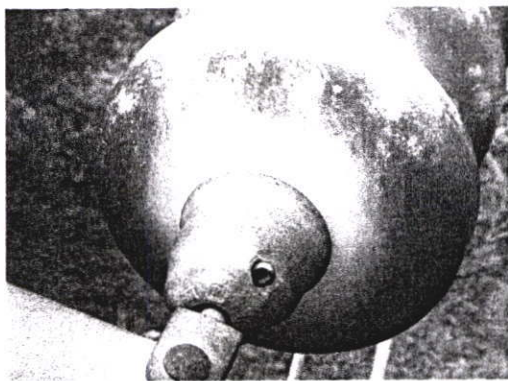
ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบของค่า NSDD

Measurement Result of HVDC Insulators										
No.	Description	Surface	น้ำหนักตะกอน (mg)	Insoluble Component (%)					NSDD (mg/sq. cm.)	ESDD (mg/sq. cm.)
				Fe	Zn	K	Ca	Li		
1	1/1	top	555.60	2.03	0.68	0.06	0.03	0.02	0.41004	0.00227
		bottom	230.40						0.10332	0.00085
2	1/5	top	253.00	2.25	0.94	0.11	0.03	0.04	0.18672	0.01254
		bottom								0.00389
3	1/10	top	683.70	1.72	0.80	0.07	0.05	0.02	0.50458	0.00789
		bottom	265.80						0.11919	0.00353
4	1/11	top	579.60	1.75	0.74	0.06	0.04	0.03	0.42775	0.00281
		bottom	212.70						0.09538	0.00288
5	1/15	top	402.50	2.29	0.89	0.06	0.04	0.02	0.29705	0.00306
		bottom	297.20						0.13327	0.00145
6	1/16	top	471.30	1.73	0.92	0.07	0.07	0.02	0.34782	0.00698
		bottom	179.90						0.00067	0.00329
7	1/22	top	133.80	1.91	1.05	0.07	0.05	0.03	0.09875	0.00480
		bottom	278.80						0.12582	0.00427
8	x1	top	863.30	1.50	0.66	0.06	0.06	0.02	0.63712	0.00814
		bottom	244.00						0.10942	0.00397
9	x2	top	662.90	1.55	0.74	0.07	0.05	0.02	0.48923	0.00617
		bottom	250.90						0.11251	0.00448
10	x3	top	629.00	1.71	0.76	0.08	0.04	0.02	0.46421	0.00529
		bottom	191.70						0.00596	0.00402
11	x4	top	765.30	1.84	0.74	0.06	0.05	0.02	0.56480	0.00271
		bottom	190.90						0.00561	0.00091

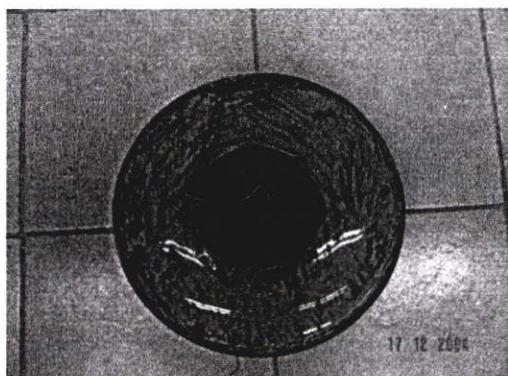
### ภาคผนวก ก

#### การทดสอบหาองค์ประกอบของการเปราะเปื้อนที่เกาะตามผิวของลูกถ้วย

ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของสิ่งเปราะเปื้อน เพื่อหาชนิดของสารที่มาเกาะติด สามารถหาแหล่งที่มาของสิ่งเปราะเปื้อน และ วิเคราะห์องค์ประกอบดังกล่าวว่ามีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าหรือทางกลของลูกถ้วยหรือไม่ การทดสอบหาองค์ประกอบของสิ่งเปราะเปื้อนที่เกาะติดผิวของลูกถ้วย ได้ทำการทดสอบโดยใช้สารแข็งที่เกาะติดลูกถ้วยเนื่องจากจะให้ความแม่นยำขององค์ประกอบมากกว่า ดำเนินการโดยชุดสารที่เกาะติดลูกถ้วยออกมาแสดงดังรูปที่ ก.1 นำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านเคมีโดยแผนกวิเคราะห์น้ำและสารทั่วไป ฝ่ายเคมี เพื่อทำการทดสอบ



รูปที่ ก.1 สภาพของสิ่งเปราะเปื้อนของผิวลูกถ้วยจนวนกระแสดตรง



รูปที่ ก.2 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของสิ่งเปราะเปื้อน

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบหาองค์ประกอบของสิ่งเปราะเปื้อนที่เกาะติดผิวของลูกถ้วย

Item	Unit	Sample		Method
		No.1	No.2	
Moisture as received	% by wt.	5.95	-	Gravimetric
% Loss on ignition at 750° C	% by dry wt.	12.04	-	Gravimetric
Ca	% by dry wt.	0.03	-	AAS.
Mg	% by dry wt.	0.16	-	AAS.
Cu	% by dry wt.	0.05	-	AAS.
Mn	% by dry wt.	0.01	-	AAS.
Zn	% by dry wt.	0.63	-	AAS.
Fe	% by dry wt.	1.62	-	AAS.
Na	% by dry wt.	0.15	-	AAS.
K	% by dry wt.	0.39	-	AAS.
Cl	% by dry wt.	0.22	-	Titrimetric
SiO <sub>2</sub>	% by dry wt.	20.59	-	Gravimetric
SO <sub>4</sub>	% by dry wt.	0.26	-	Colorimetric
PO <sub>4</sub>	% by dry wt.	-	-	Colorimetric
Non soluble in acid	% by dry wt.	4.3	-	Colorimetric

จากผลขององค์ประกอบของสิ่งเปราะเปื้อนจะมีการพิจารณาส่วนประกอบที่จะมีผลต่อการกัดกร่อนของ Pin ของลูกถ้วยที่สำคัญได้แก่ SO<sub>4</sub>, Cl, Ca, SO<sub>2</sub> ผลที่ได้จากการทดสอบมีจำนวนเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักของสารน้อยคั้งนั้นเบื้องต้นการกัดกร่อนของ Pin จึงไม่รุนแรงมากเท่าไรแต่ต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะต่อไป สำหรับแหล่งที่มาของสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้จะทำการเก็บตัวอย่างสิ่งที่คาดว่าจะเปื้อนแหล่งที่มาของสิ่งเปราะเปื้อน ในบริเวณที่สายส่งพาดผ่านเพื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบต่อไป

ภาคผนวก ค  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 - 28<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference



## Volume I

Electrical Engineering

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)  
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)  
ไฟฟ้ากำลัง (PW)



## การเปรียบเทียบพฤติกรรมการเริ่มเกิดโคโรน่าและวาปไฟตามผิว ของถูกด้วยกระแสสลับและกระแสตรง

### Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage of AC and DC Insulator

อมรชัย คาร์ว\* ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล\* นรเศรษฐ พัฒนเศรษฐ\* พีรภูมิ สุทธิโกวิท\*\*

\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\*ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ (02)737-3000 ต่อ 3315 โทรสาร (02) 326-4550; E-mail: Amomchai\_kar@hotmail.com, kpsiriwa@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการเริ่มเกิดโคโรน่าและแรงดันวาปไฟตามผิวของถูกด้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทดสอบทั้งในระบบกระแสสลับและกระแสตรง ถูกด้วยตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าแบบแขวน ซึ่งถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าตัวอย่างจะถูกนำมาประยุกต์โดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ และทำการทดสอบเปรียบเทียบกับถูกด้วยฉนวนปกติทั่วไป จากผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรน่าของถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งกระแสสลับ และ กระแสตรงที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะมีระดับสูงกว่าถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าแบบปกติทั่วไป ในทางตรงกันข้ามระดับแรงดันของถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าที่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำในสภาวะแห้งสะอาดจะมีระดับแรงดันที่เกิดการวาปไฟค่อนข้างต่ำกว่าถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าแบบปกติทั่วไป

**คำสำคัญ :** ถูกด้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ/ตรง, แรงดันวาปไฟตามผิว และ แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า

#### Abstract

This paper presents the behavior of corona inception and flashover voltage of AC and DC insulators on both AC and DC test conditions. The tested insulator specimens were suspension insulators that were modified by semiconductor coating then taken to test and compare their results. The tested result showed that the corona inception voltage of AC and DC insulators coated by semiconductor on both AC and DC test conditions were quite higher than that of the ordinary insulators especially on DC tested condition these insulators only flash over occurred. In opposite way, the flashover voltage of these insulators was lower than that of the ordinary insulators.

**Keywords:** HVAC insulator, HVDC insulator, flashover voltage, corona inception voltage.

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมาใช้ในประเทศไทย ซึ่งระบบนี้ได้ถูกนำมาติดตั้ง และใช้งานเพื่อเชื่อมคอรระหว่างสถานีไฟฟ้าอ้อย GURUN ทางตอนเหนือของประเทศมาเลเซีย (TNB) ถึงสถานีไฟฟ้าอ้อย คลองแจะ จังหวัดสงขลา (EGAT) ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 300 MW 300 kV มีระยะทางประมาณ 110 กิโลเมตร เพื่อส่งจ่าย และรองรับการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภคในภาคใต้ของประเทศไทย อย่างไรก็ตามระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงยังไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายมากนักเนื่องจากเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสายส่งที่มีระยะทางการส่งสั้นๆ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนยังคงค่อนข้างสูงอยู่ จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ที่พยายามจะนำเอาอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่มีใช้กันอยู่มาใช้ไปมาประยุกต์ใช้ทดแทนในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในสภาวะเปราะบาง เพื่อลดต้นทุน และแก้ปัญหาการวาปไฟตามผิวได้ง่ายของถูกด้วยฉนวนในสภาวะเปราะบางอีกด้วย

เมื่อพิจารณางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการศึกษาวิเคราะห์การออกแบบและใช้งานถูกด้วยฉนวนกระแสตรงยังมีอยู่น้อย แต่ก็ยังมีเผยแพร่ในบทความของ IEEE อยู่บ้าง เช่น ออกแบบถูกด้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเลทราย [1] ซึ่งนำเสนอการประยุกต์ออกแบบรูปร่างของถูกด้วยให้มีการกระจายของศักดาไฟฟ้าที่เหมาะสม และลดความเครียดสนามไฟฟ้าของถูกด้วยที่ออกแบบโดยการทำให้การกระจายของศักดาไฟฟ้าตามแนวกริบของถูกด้วยมีความสม่ำเสมอ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของถูกด้วยกระแสตรงภายใต้สภาวะที่มีการเปราะบาง [2] พฤติกรรมของการเกิดวาปไฟตามผิวของถูกด้วยฉนวนกระแสตรงที่มีลักษณะรูปแบบแตกต่างกัน [3] เป็นต้น

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการเริ่มเกิดโคโรน่า และวาปไฟตามผิวของถูกด้วยฉนวนกระแสตรง และกระแสสลับที่มีการประยุกต์ด้วยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ เพื่อนำไปสู่การศึกษาต่อไปถึงความเป็นไปได้ในกรณีที่จะนำถูกด้วยกระแสสลับทดแทนการใช้ถูกด้วยกระแสตรง

2. หลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสัมพันธ์ของการวางไฟตามผิวของลูกถ้วย  
ฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ [4]

ความแตกต่างระหว่างลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงและ  
กระแสสลับคือลักษณะรูปร่างของครีป ค้างแสดงในรูปที่ 3 เพราะฉะนั้น  
คุณลักษณะของลูกถ้วยทั้ง 2 ชนิดจึงจะแตกต่างกัน สามารถเปรียบเทียบ  
แรงดันวางไฟตามผิวของลูกถ้วยทั้ง 2 แบบที่ใช้ในงานในสภาวะเปรอะ  
เปื้อนรุนแรงแสดงด้วยสมการที่ (1) ซึ่งค่า F ที่ได้ค้ำแสดงในตารางที่ 1  
นั้นเป็นประโยชน์ในการนำไปออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง

$$F = (\text{Peak AC flashover voltage})/(\text{DC flashover voltage}) \quad (1)$$



รูปที่ 1 รูปร่างที่ค้ำกันของลูกถ้วยกระแสสลับและกระแสตรง

ตารางที่ 1 REQUIRED SPECIFIC CREEPAGES FOR DC LINES [4]

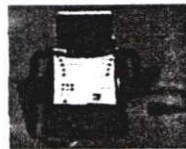
Required for AC (mm/kV(RMS),system)	Indicated severity		Factor F			Deduced DC creepage (mm/kV)	
	Type	mg/cm <sup>2</sup>	Antifog	Standard/ long rod	Antifog	Standard/ long rod	
16.0	light	0.03-0.06	1.8	1.4	35.3	27.4	
20.0	medium	0.1-0.2	2.1	1.7	51.4	41.6	
25.0	heavy	0.3-0.6	2.4	2.0	73.5	61.2	
32.0	extreme	> 0.6	> 2.4	> 2.0	> 94.1	> 78.4	

2.2 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่เคลือบผิวโดยสารกึ่งตัวนำ

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่เคลือบผิวโดยสารกึ่งตัวนำจะมีคุณลักษณะ  
ทางไฟฟ้าที่ค้ำมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะเปรอะเปื้อน [2, 3] ในการ  
เปรียบเทียบค่าความคงทน พบว่าจะมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบ  
ทั่วไป อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีข้อค้ำอยู่ คือ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าอัน  
เนื่องมาจากกระแสรั่วไหลบริเวณผิวที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งปัจจุบัน  
ได้มีการนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดนี้ไปทดสอบใช้งานในบางบริเวณ  
ที่มีปัญหาของการเปรอะเปื้อนในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง  
ที่ระดับแรงดัน 24 kV และ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคตามถ้ำค้ำ  
และได้มีการคิดค้ำใช้งานทั้งลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบ Post และ Pin ใน  
ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตอีกด้วย ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า  
แบบ Post ที่มีการเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้า  
230 kV ที่สถานีไฟฟ้าช้อยกรุงเทพฯได้ ซึ่งได้คิดค้ำเพื่อใช้งานมาแล้วเป็น  
เวลามากกว่า 10 ปี โดยยังคงไม่พบปัญหาใดๆ เลย นอกจากนั้นได้มีการ  
นำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทอร์ชเลน แบบ Disc ชนิดแขวนมาทำการเคลือบ  
ด้วยสารกึ่งตัวนำและนำไปใช้งานที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 230 kV ด้วยเพื่อ  
เชื่อมค้ำของเกาะกุกค้ำซึ่งยังคงไม่พบปัญหาเช่นเดียวกัน

2.3 ปรากฏการณ์โคโรน่า

โคโรน่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติพบที่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าใน  
ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงค้ำสูงท้วๆไป บริเวณที่มักจะมีกรเกิดโคโรน่าขึ้น  
จะเป็นบริเวณที่มีจุดแหลมคมหรือพื้นผิวไม่เรียบ เป็นต้น โคโรน่าเป็น  
สาเหตุของการแตกค้ำของประจุของแก๊สที่ปล่อยพลังงานในรูปของ  
แสงอัลตราไวโอเล็ต คลื่นรบกวนสัญญาณวิทยุ และยังเป็นปัญหาของการ  
สูญเสียกำลังไฟฟ้าไปในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงค้ำสูงและอาจนำไปสู่  
การเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าและอุปกรณ์ฉนวนอื่น ๆ รวมทั้ง  
สัญญาณรบกวนของระบบสื่อสาร และการสร้างโอโซนขึ้นมา [6] การ  
ตรวจจับโคโรน่าในระบบไฟฟ้ากำลังอาจจะใช้กล้องโคโรน่าในการ  
ตรวจจับค้ำแสดงค้ำรูปที่ 2 (ก) ซึ่งได้นำมาใช้ในการตรวจจับโคโรน่าในการ  
ทดลองนี้ด้วย [7] และกล้องเทอร์โมสแกนค้ำแสดงในรูปที่ 2 (ข)



(ก) กล้องโคโรน่า [7]



(ข) กล้องเทอร์โมสแกน [8]

รูปที่ 2 รูปกล้องที่ใช้ในการทดลอง

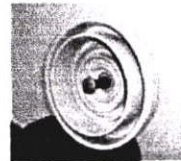
3. การทดสอบ

3.1 การเตรียมการทดสอบ

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาทดสอบนี้เป็นลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า  
แบบแขวนกระแสสลับและกระแสตรง ค้ำแสดงในรูป 3 ขนาดมีค้ำแสดง  
ไว้ในตารางที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ตัวอย่างลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับ (ข) ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง

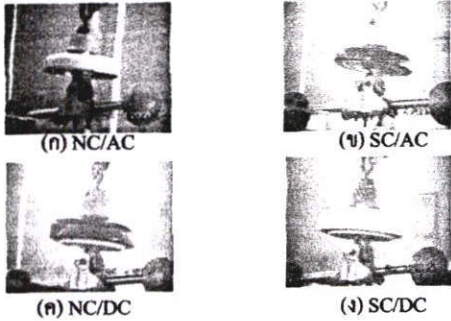
ตารางที่ 2 ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของลูกถ้วยค้ำ	สัญลักษณ์	Leakage distance (mm)	Arcing distance (mm)
1) Ordinary AC insulator	NC/AC	463	271
2) Ordinary AC insulator coated by semiconductor	SC/AC	463	271
3) Ordinary DC insulator	NC/DC	568	320
4) Ordinary DC insulator coated by semiconductor	SC/DC	568	320

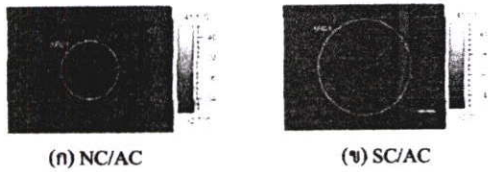
ค่าความนำไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนหลังจากที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำมี  
ค่าค้ำนี้ DC = 68 × 10<sup>-9</sup> S; AC = 188 × 10<sup>-9</sup> S



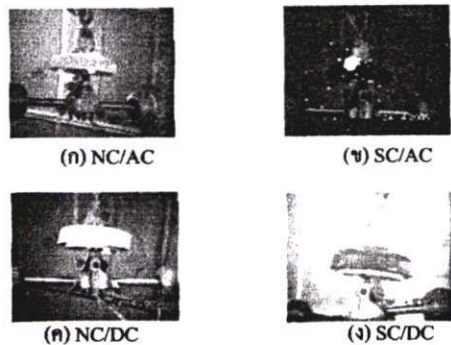
ในการเปรียบเทียบแรงดันที่เกิดจากไฟของทั้ง 2 เงื่อนไขสภาวะการทดสอบพบว่าถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าที่มีการเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำ SC/AC และ SC/DC จะมีระดับแรงดันที่เกิดการวาวไฟต่ำกว่าถูกด้วยแบบปกติทั่วไป NC/AC และ NC/DC ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้กล้องเทอร์โมสแกนทำการถ่ายภาพถูกด้วยฉนวนไฟฟ้า กระแสสลับแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าถูกด้วยฉนวนกระแสสลับที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ SC/AC จะมีค่าอุณหภูมิ สูงกว่าถูกด้วยกระแสสลับแบบธรรมดา NC/AC เล็กน้อย เนื่องจากมีกระแสรั่วไหลที่ผิว



รูปที่ 8 ปรากฏการโคโรน่าของลูกถ้วยภายใต้กระแสตรง



รูปที่ 9 อุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 10 ปรากฏการโคโรน่าของลูกถ้วยภายใต้กระแสสลับ

5. สรุปผล

จากผลการศึกษาวัดพบว่าค่าแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรน่าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งกระแสสลับ และ กระแสตรงที่มีการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำจะมีระดับสูงกว่าถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าแบบปกติทั่วไป ในทางตรงกันข้าม ระดับแรงดันของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่เคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำในสภาวะแห้งสะอาดจะมีระดับแรงดันที่เกิดการวาวไฟค่อนข้างต่ำกว่าถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าแบบปกติทั่วไป ดังนั้นความเป็นไปได้ในการนำลูกถ้วยกระแสสลับใช้ทดแทนกระแสตรง จะต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

เช่น การประยุกต์โดยการต่อร่วมกับวงแหวนโคโรน่า การจำลองโมเดลของลูกถ้วย และใช้ไฟในทีโอลีเมนต์ทำการศึกษวิเคราะห์เพื่อผลของการกระจายของสนามไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.S.Farag, F.M. Zedan " New Design for Use in the Desert Environment" IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.25 No.2, April 1990.
- [2] Kenji and MORTITA "Long-Term Performance of Ceramic Insulator" NGK insulators, LTD.
- [3] S. Sangkasaad "Research and Experience with New Insulator Technologies in Thailand" 2001 World congress & Exhibition/ Shanghai, China. Nov.18-21, 2001.
- [4] J.S.T.Looms."Insulator for HIGH VOLTAGES" IEEE Power Engineering Series 7, 1990. P142-143.
- [5] N. Pattanadech, S. Sangkasaad " Electrical Characteristics of Polluted Semiconducting glazed Insulator" EECON 23, Center of Excellence in Electrical Power Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand. EECON 23
- [6] N. Pattanadech and P. Yuthagowith "Punctured Insulator Examination of A String Insulator" Powertech 2005, St.Petersburg Russia.
- [7] DayCor®II, Daytime Corona Camera specifications, EGAT Transmission Line Maintenance Division.
- [8] THERMOVISION S50, Thermo Scan Camera specification, PEA.
- [9] ANSI C29.1-1992 American National Standard for test method for electrical power insulator.

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานการศึกษาวัดนี้ได้รับความช่วยเหลือจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้สนับสนุนอนุเคราะห์กล้องโคโรน่า และลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในการทดสอบ รวมถึงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในความอนุเคราะห์ให้ยืมกล้องเทอร์โมสแกน และกลุ่มนักศึกษานิพนธ์ช่วยเหลือเรื่องการจัดเตรียมห้องทดสอบต่างๆ

ประวัติผู้เขียน



อนรรชัย ชัยจร การศึกษานิพนธ์ปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



ศิริวัฒน์ โปฒวิฆกุล จบการศึกษาม.ศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และสารอินทรีย์เคมีผลงานตีพิมพ์ทั้งในระดับประเทศและนานาชาติหลายบทความ



นรเศรษฐ วัฒนเดช จบการศึกษานิพนธ์ปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และปริญญาโท จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าและ EMC



ศิริวุฒิ อุทธิวิท จบการศึกษานิพนธ์ปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และปริญญาโทจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงรวมถึงถูกด้วยฉนวนไฟฟ้าและ EMC

# IPEC2005

## IPEC2005 The 7th International Power Engineering Conference

### ABSTRACTS & PROGRAM

29 November – 2 December 2005  
MARINA MANDARIN HOTEL  
Singapore



TECHNOLOGICAL



IEEE



NUS

NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE



# Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage between HVAC and HVDC Insulator

A. Karn, S. Potivejkul, N. Pattanadech and P. Yuthagowit

**Abstract--** This paper presents the behavior of corona inception and flashover voltage of AC and DC insulators on both AC and DC test conditions. The tested insulator specimens were suspension insulators, each kind of the tested insulator consisted of surface coating and no coating. The tested results showed that the corona inception voltage of AC and DC insulators coated by semiconductor on both AC and DC test conditions were quite higher than that of the ordinary insulators especially on DC tested condition these insulators only flash over occurred. In opposite way, the flashover voltage of these insulators was lower than that of ordinary insulators. This data will be useful to be guidelines in case we need to take AC insulators coated by semiconductor replace DC insulators in a DC transmission line system to reduce the cost of investment. Moreover, it will be useful to select or design the suitable DC insulators for using in pollution area in Thailand as well.

**Index Terms--** HVAC insulator, HVDC insulator, flashover voltage, corona inception voltage

## I. INTRODUCTION

THE high voltage DC transmission line system has been taken to use in Thailand presently. This system has established and energized with 300 MW power rated at voltage level of 300 kV DC from Gurun converter station in northern Malaysia to Khlong Ngae converter station in southern Thailand at a distance of 110 kilometers. However, this system is not widespread in Thailand due to the economic reason especially in the transmission line that its distance is quite short; the investment cost for DC system is still higher than AC system. Therefore, this is the interesting point that the

---

A. Karn. is with Electrical Engineering Dept. Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, 10520, Tel. 662-3264550, (e-mail: Amornchai\_kar@bangkokranch.co.th).

S. Potivejkul. is with Electrical Engineering Dept. Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, 10520, Tel. 662-3264550, (e-mail: kpsiriwa@kmitl.ac.th).

N. Pattanadech. is with Electrical Engineering Dept. Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, 10520, Tel. 662-3264550, (e-mail: norasage@yahoo.com).

P. Yuthagowit is work for Center of Excellence in Electrical Power Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Tel. 662-2186547 (e-mail: pearawut@yahoo.com).

high voltage AC equipment using in the existing AC transmission line systems especially HVAC insulators might be modified to replace the HVDC insulators used in the polluted areas to decrease the investment cost and solve the contaminated insulator problem also.

The main objective of this paper is to study the behavior of corona inception and flashover voltage of suspension DC and AC insulators that were modified by coating with semiconductor. This result will be leading to the feasibility study of replacing DC insulators for using in DC system with AC insulators onwards.

## II. RELEVANT THEORY

### A. Characteristics of ac and dc insulators

The characteristics of an energized DC insulator is different from the corresponding insulator which using in AC power system in many cases, the mechanical of pollution and propagation of discharge to flashover, the surface of erosion and corrosion of cement and metalwork, and the aging of dielectric. Considering the examination procedure of the insulators, the number of DC test facilities for insulators and the reliability of test results have been limited by the difficulty and high cost of providing sources of voltage of realistically low impedance. Therefore, the data must be treated as somewhat speculative. Some differences may, however, be deducted as following. The contamination process must have worse effects on DC than AC because electrically charged airborne material will dirt towards one or another electrode under the steady electric field, depending on polarity. Any discharges on, or adjacent to, the insulator itself will generate copious flows of ions, which, also, will attach to particles and cause their precipitation.

The absence of zero voltage on DC, and of polarity reversals, must favor development of primary discharges to complete flashover. Since the voltage distribution either between units in a string of discs, or along the body of dielectric on a post, rod or housing, can not depend on capacitance, when DC is applied, but solely on resistance. Surface erosion must be worse with DC because of the sustained mature of any surface discharges. For corrosion of metal terminals, swelling of buried metal in cemented fittings and growth of the cement itself, DC is known to be far worse than AC.

### B. Relative flash over voltage of DC and AC insulator

There is different in shape of AC and DC insulators as shown in fig 1. So, the flash over voltage and other characteristics of both insulators are clearly different. When flashover voltages are compared, using a given type of insulator and severity of pollution, the ratio (F) determined by the following equation is found to vary with shape of insulators as shown in table 1 which useful for dc insulator design.

$$F = (\text{Peak AC flashover voltage})/(\text{DC flashover voltage}) \quad (1)$$

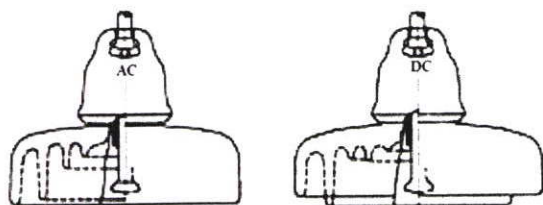


Fig. 1. Different profile: AC and DC

Large diameter gives maximum creepage for DC  
Skirt tips spaced for DC to reduce bridging by persistent arcs [1]

TABLE I  
REQUIRED SPECIFIC CREEPAGES FOR DC LINES [1]

Required for AC (mm/kV(RMS),system)	Indicated severity		Factor F			Deduced DC creepage (mm/kV)	
	Type	mg/cm <sup>2</sup>	Antifog	Standard/ long rod	Antifog	Standard/ long rod	
16.0	light	0.03-0.06	1.8	1.4	35.3	27.4	
20.0	medium	0.1-0.2	2.1	1.7	51.4	41.6	
25.0	heavy	0.3-0.6	2.4	2.0	73.5	61.2	
32.0	extreme	> 0.6	> 2.4	> 2.0	> 94.1	> 78.4	

### C. Semi-conducting glazed insulator (or RG insulator)

A semi-conducting glazed insulator has very good electrical characteristic for contamination condition [2, 3]. It has higher withstand voltage comparing with the conventional insulator. Therefore the semi-conducting glazed insulator is suitably used for countermeasure against contamination. However, it is still discussing on power loss due to leakage current flowing continuously through semi-conducting glazed. In Thailand semi-conducting glazed insulator are utilized in some polluted areas. In distribution lines of 24 kV system of Metropolitan Electricity Authority and 33 kV system of Provincial Electricity Authority, RG line post and pin insulators are used. For Electricity Generating Authority of Thailand system, semi-conducting glazed post insulators are used in 230 kV south Bangkok substations. Insulators have been installed for more than 10 years and there is no problem in operation. Besides, semi-conducting glazed suspension disc porcelain insulators have been used in 230 kV line connecting between the main land and Phuket island. There is no problem reported after installation.

### D. Corona Phenomena

Corona is a natural phenomenon found on practically any piece of high voltage equipment. It always occurs at the points, sharp edges, and surface roughness of electrodes. Corona is

caused by the ionizing of gas which releases energy in form of the ultra violet light, the audio sound, and the radio noise. It is responsible for power losses from high voltage transmission lines and often leads to the deterioration of any insulator material of the insulation systems, the rising of interference in communication system, and generating ozone [4].

The high voltage insulator diagnosis tool is a PD detector, an infra-red camera, and a corona camera. While corona takes place, the light and the sound are irradiated. The light whose spectrum primarily falls within ultra- violet light with 300-400 wave lengths as shown in the figure 2 can be detected by the corona camera used in this experiment [5].

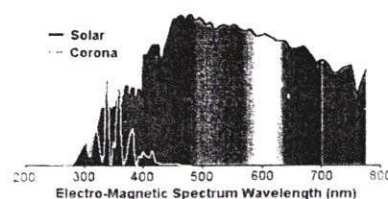


Fig. 2. Spectral irradiance of corona and solar energy [5]



Fig. 3. Corona camera [5]

## III. EXPERIMENTAL

### A. Insulator specimen

The insulators for experimental study were AC and DC suspension insulators as shown in fig.4 which their dimensions were shown in table 2

TABLE II  
INSULATOR SPECIMENS

Kinds of insulators Sample	Code and coating profile	Leakage distance (mm)	Arcing distance(m)
1) Ordinary AC insulator	NC/AC	463	271
2) Ordinary AC insulator	SC/AC	463	271
3) Ordinary DC insulator	NC/DC	568	320
4) Ordinary DC insulator	SC/DC	568	320

The meanings of insulator code are as follows:

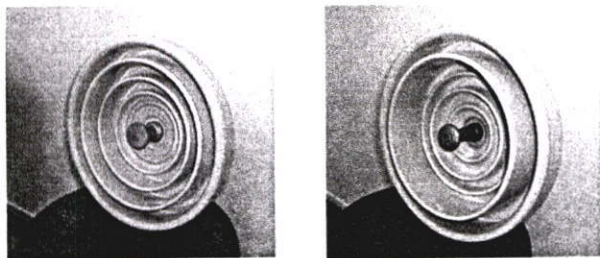
- NC/AC = No coating of HVAC insulator
- SC/AC = Surface coating of HVAC insulator
- NC/DC = No coating of HVDC insulator
- SC/DC = Surface coating of HVDC insulator

Conductivity value of semiconductor after coating:

DC insulator =  $68 \times 10^{-9}$  S and AC insulator =  $188 \times 10^{-9}$  S.

Semiconductor is made up of Tin oxide (SnO<sub>2</sub>), Antimony oxide (Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and fills Niobium Oxide (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

The semiconductor thickness is 0.015 millimeter.



(a) (b)  
Fig. 4. Photo of specimen insulators for experimenting  
(a) AC suspension insulator (b) DC suspension insulator

**E. Experimental Set Up and Test Procedure**

**1) Experimental Set Up**

The experimental set up was performed in the high voltage laboratory of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang by using the testing equipment as shown in fig. 5 and 6

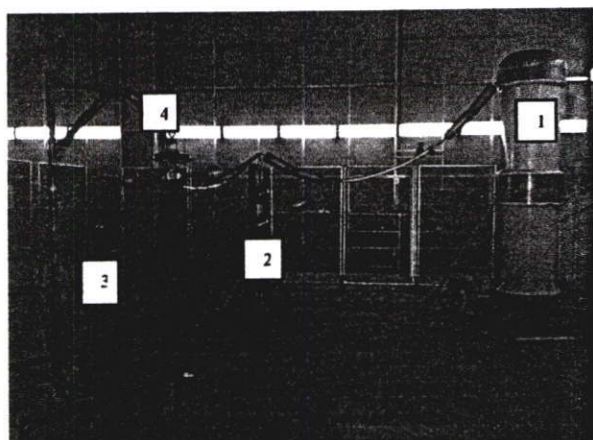


Fig. 5. Circuit connection arrangement of DC flashover voltage test

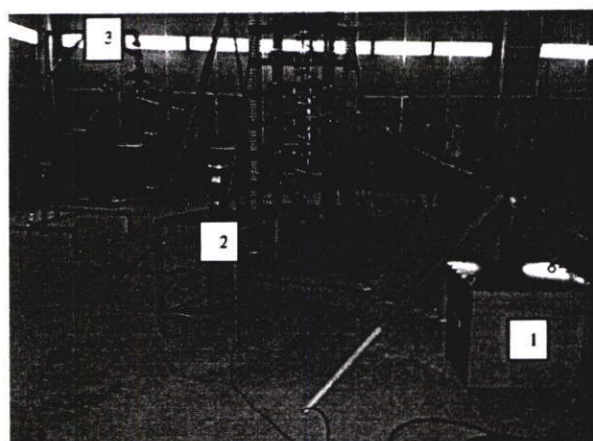


Fig. 6. Circuit connection arrangement of low-frequency dry flashover voltage test

Where (Fig.5) 1: Testing transformer of DC 600 kV 10 mA  
2: Standard sphere gap, 25 mm diameter  
3: Voltage divider 100 kV, 200pF and 380 MΩ  
4: Tested insulators

(Fig.6) 1: Testing transformer of AC 100 kV  
2: Voltage divider 100 kV, 200pF and 380 MΩ  
3: Tested insulators

Tested condition: 32-33 degrees Celsius, 751-752 mmHg atmosphere pressure and 71-72 % RH

Relative air density ( $\delta$ ) = 0.96-0.97 and humidity corrective factor (Kh) = 0.91-0.92

**2) Test Procedure**

Using the test circuits as shown in figure 5 and 6, the flashover voltage of the tested insulators were measured by the resistive voltage divider. The tested procedure was complied with ANSI C29.1-1992 [6]. The kinds of specimen insulators were shown as fig 7.

**3) Test Experiment and Test Results.**

The initial applied voltage might be quickly raised to approximately 75% of the expected flashover voltage value. Then the voltage applied to the insulators was raised with constantly continuous rated until the flash over of the tested insulator occurred within 5–30 seconds. The voltage was kept constant at this value about 5 seconds.

The tested results of flashover voltages were shown in table 3–4 respectively. And the corona inception voltages were shown in fig. 8–9 and table 5–6 respectively.

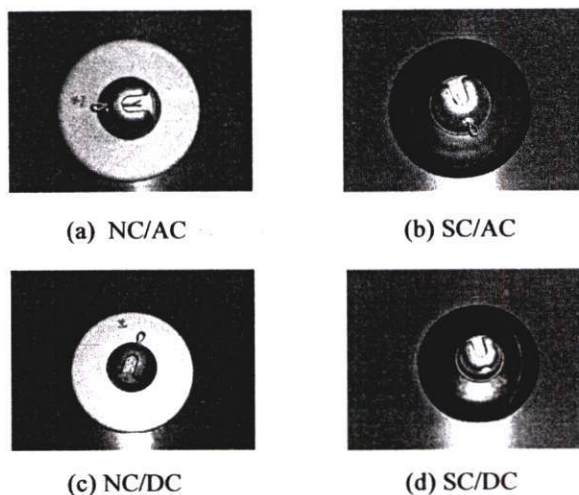


Fig. 7. Kinds of specimen insulators

TABLE III  
DC DRY FLASHOVER VOLTAGE TEST OF ONE UNIT INSULATOR

Kinds of insulators	Flashover voltage (kV)
	One unit
NC/AC	153.33
SC/AC	126.18
NC/DC	169.66
SC/DC	97.71

TABLE IV  
LOW-FREQUENCY DRY FLASHOVER VOLTAGE TEST OF ONE UNIT INSULATOR

Kinds of insulators	Flashover voltage (kV)
	One unit
NC/AC	85.28
SC/AC	44.86
NC/DC	77.61
SC/DC	57.16

TABLE V  
CORONA INCEPTION VOLTAGE IN DC TEST CONDITION

Kinds of insulators	Corona inception voltage (kV)
	One unit
NC/AC	85.69
SC/AC	-
NC/DC	85.44
SC/DC	-

TABLE VI  
CORONA INCEPTION VOLTAGE IN AC TEST CONDITION

Kinds of insulators	Corona inception voltage (kV)
	One unit
NC/AC	21.95
SC/AC	22.11
NC/DC	26.92
SC/DC	43.46

4) Result Analysis.

As tested results, it was found that the corona inception voltages of AC and DC insulators coated by semiconductor, SC/AC and SC/DC, were higher than ordinary insulators, NC/AC and NC/DC, as shown in fig 8. Especially in case of SC/AC and SC/DC on DC test condition, the corona phenomena could not be detected. The initial location of corona phenomena of AC and DC insulators in this testing were almost found at the cap and under rib shed of the insulators as shown in fig 10-11 respectively.

The tested results on both AC and DC test conditions show that the flashover voltage level of AC and DC insulators coated by semiconductor, SC/AC and SC/DC, were detected at the lower voltage level than that of AC and DC insulators without coating, NC/AC and NC/DC, as shown in fig 9.

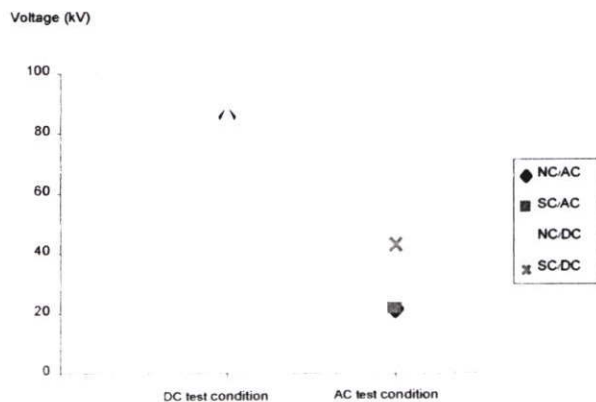


Fig. 8. Comparison of corona inception voltages between AC and DC test

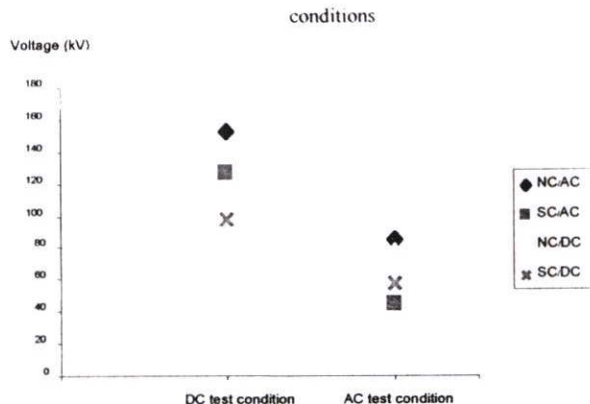


Fig. 9. Comparison of flashover voltages between AC and DC test conditions

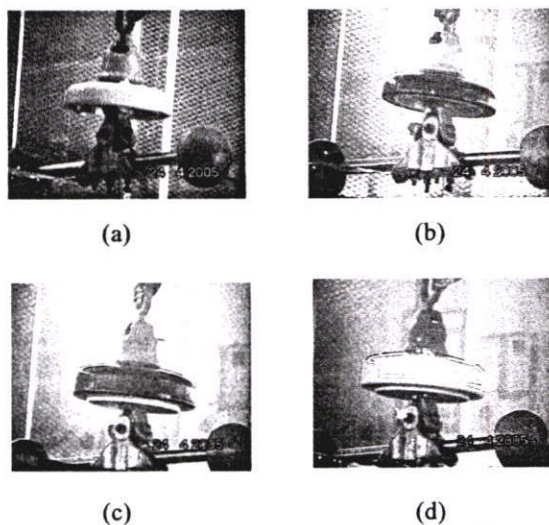


Fig. 10. Corona phenomena of the tested insulators at the tested voltage of 90 kVDC test condition (a) NC/AC (b) SC/AC (c) NC/DC (d) SC/DC

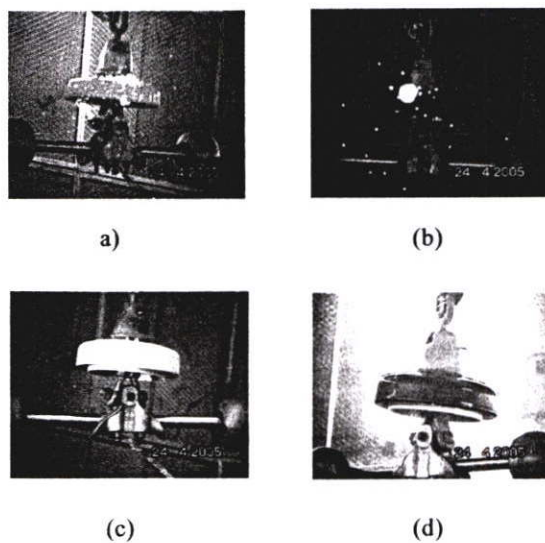


Fig. 11. Corona phenomena of the tested insulators at the tested voltage of 44 kVAC test condition (a) NC/AC (b) SC/AC (c) NC/DC (d) SC/DC

#### IV. CONCLUSION

As the study, it was found that the corona inception voltages of both AC and DC insulators coated by semiconductor will be higher than that of the ordinary insulators. In the opposite way, the flashover voltage values of these insulators were quite lower compared with the flashover voltage of the ordinary insulators. So, the possibility for taking the AC insulators to replace DC insulators for using in DC transmission line system must be more study and research in many cases, for example the application of installing the corona ring with the string insulator and/or improving the insulator modeling using Finite Element Method to simulate for checking the propagation of electric field onwards etc.

#### V. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to say very thank you to Mr. Nuttaphan Boonsaner and also Mr. Sithisak Klenhom who helped for all test providing. Furthermore, special thanks for Mr. Prayat Jaiwong, head of transmission line maintenance of EGAT, who prepared insulator testing and coordinated for laboratory.

#### VI. REFERENCES

- [1] J.S.T.Looms."Insulator for HIGH VOLTAGES" IEEE Power Engineering Series 7, 1990. P142-143.
- [2] S. Sangkasaad "Research and Experience with New Insulator Technologies in Thailand" 2001 World congress & Exhibition/ Shanghai, China, Nov.18-21, 2001.
- [3] N. Pattanadech, S. Sangkasaad " Electrical Characteristics of Polluted Semiconducting glazed Insulator" Center of Excellence in Electrical Power Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.
- [4] N. Pattanadech and P. Yutthagowit " Punctured Insulator Examination of A String Insulator" Powertech 2005, St.Petersburg Russia.
- [5] CoraCam III, User Manual, Data N-try, 1997.
- [6] ANSI C29.1-1992 American National Standard for test method for electrical power insulator.

#### VII. BIOGRAPHIES



**Amornchai Karn** was born in Nakornsritumarat, Thailand in 1977. He received B.Eng in electrical engineering from Mahanakorn University of Technology in 1999. He joined Bangkok Ranch Public Company Limited until now. He is now a graduate student in Electrical Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.



**Siriwat Potivejkul** received the B.Eng. degree and the M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His research interests include high voltage and power system engineering and power electronics applied to power system. Currently, he is working as an Associate Professor with Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.



**Norasage Pattanadech** was born in Surathani, Thailand in 1975. He received B.Eng and M.Eng in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in 1997 and Chulalongkorn University in 2001 respectively. He joined Mahanakorn University of Technology in 2001 – 2003 before working in KMITL until now. His research activities have been mainly involved Insulators, high voltage testing and equipment and electromagnetic Compatibility.

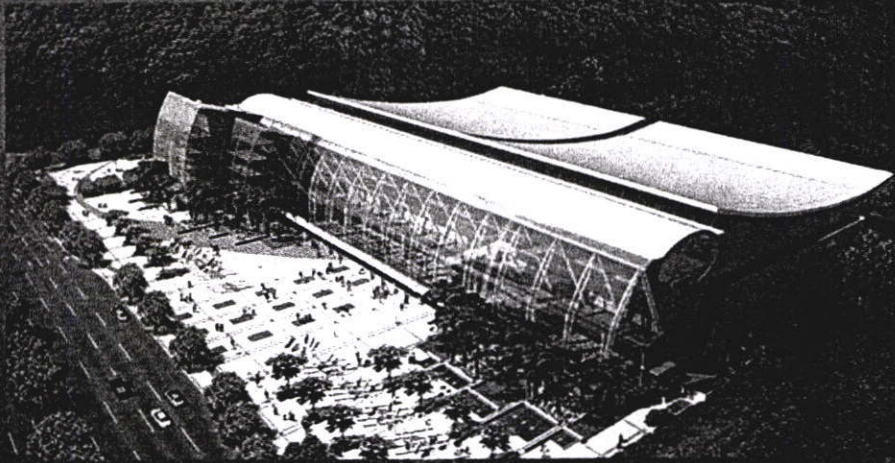


**Pearawut Yutthagowit** was born in Bangkok, Thailand in 1976. He received B.Eng and M.Eng in electrical engineering from Chulalongkorn University in 1997 and 2000 respectively. He joined Mahanakorn University of Technology in 2001 – 2003 before working in Center of Excellence in Electrical Power Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, until now. His research activities have been mainly involves high voltage testing and electromagnetic Compatibility.

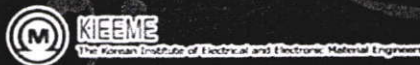
# CMD 2006

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis  
Changwon, Korea, April 2~5, 2006

Program /Abstract



Organized by



Technically Sponsored by



# Corona Phenomena of AC Semi-Conducting Glazed Insulators under DC Test Condition

Amornchai Karn, Siriwat Potivejkul, Pattanadech Norasage

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

[Amornchai\\_kar@hotmail.com](mailto:Amornchai_kar@hotmail.com), [kpsiriwa@kmitl.ac.th](mailto:kpsiriwa@kmitl.ac.th), [norasage@yahoo.com](mailto:norasage@yahoo.com)

Yutthagowith Pearawut

Electrical engineering dept. Faculty of Engineering Pathumwan Institute of Technology  
833, Rama I Road, Pathumwan, Bangkok, Thailand

[pearawut@yahoo.com](mailto:pearawut@yahoo.com)

**ABSTRACT** — This paper presents the behavior of corona phenomena of ac suspension insulators on dc test conditions. The tested insulator specimens are comprised of ordinary suspension ac insulators and ac resistance glaze insulators. The tested result shows that there was no corona phenomena of RG insulators on dc test condition in fog chamber but the corona phenomena can be detected especially when the artificial contamination was applied to the tested ordinary ac suspension insulators, the corona inception voltage level occurred at the very low voltage level. Employing finite element program, it was found that the electric field propagation of RG insulator is more uniform than that of ordinary insulator. The test results suggest that ac semi-conducting glazed insulator can properly replace dc insulators in the high voltage dc transmission line especially in the polluted areas.

**Index Terms** — Corona inception voltage, ac insulator, dc insulator, ac resistance glazed insulator.

## I. INTRODUCTION

THE high voltage dc transmission line system has been taken to use in Thailand presently. This system has established and energized with 300 MW power rated at voltage level of +300 kV dc from Gurun converter station in northern Malaysia to Khlong Ngae converter station in southern Thailand at a distance of 110 kilometers. However, this system is not widespread in Thailand due to the economic reason especially in the transmission line that its distance is quite short; the investment cost for dc system is still higher than ac system. Therefore, this is the interesting point that the high voltage ac equipment using in the existing ac transmission line systems especially ac high voltage insulators might be modified to replace the dc high voltage insulators used in the polluted areas to decrease the investment cost and solve the contaminated insulator problem as shown in figure 1.

The main objective of this paper is to study the behavior of phenomena of corona inception voltage in the artificial polluted condition of ac suspension insulator and that were modified by coating with semiconductor. This result will be leading to the feasibility study of replacing dc insulators for using in dc system with ac insulators onwards.



Fig. 1. Contaminated dc insulator obtained from high voltage dc transmission line of EGAT

## II. RELEVANT THEORY

### A. Characteristics of ac and dc insulators

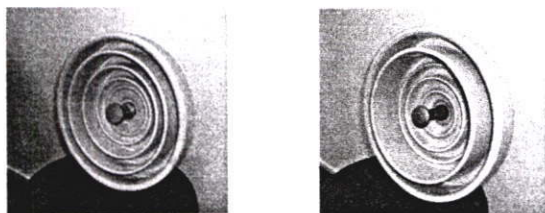
The characteristics of an energized dc insulator is different from the corresponding insulator which using in ac power system in many cases, the mechanical of pollution and propagation of discharge to flashover, the surface of erosion and corrosion of cement and metalwork, and the aging of dielectric. Considering the examination procedure of the insulators, the number of dc test facilities for insulators and the reliability of test results have been limited by the difficulty and high cost of providing sources of voltage of realistically low impedance. Therefore, the data must be treated as somewhat speculative. Some differences may, however, be deducted as following. The contamination process must have worse effects on dc than ac because electrically charged airborne material will dirt towards one or another electrode under the steady electric

field, depending on polarity. Any discharges on, or adjacent to, the insulator itself will generate copious flows of ions, which, also, will attach to particles and cause their precipitation.

The absence of zero voltage on dc, and of polarity reversals, must favor development of primary discharges to complete flashover. Since the voltage distribution either between units in a string of discs, or along the body of dielectric on a post, rod or housing, can not depend on capacitance, when dc is applied, but solely on resistance. Surface erosion must be worse with dc because of the sustained nature of any surface discharges. For corrosion of metal terminals, swelling of buried metal in cemented fittings and growth of the cement itself, dc is known to be far worse than ac.

#### B. Relative flash over voltage of dc and ac insulator

There is different in shape of ac and dc insulators as shown in fig 2. So, the flash over voltage and other characteristics of both insulators are clearly different.



(a) (b)

Fig. 2. Insulator profile

(a) ac suspension insulator (b) dc suspension insulator

#### C. Semi-conducting glazed insulator (or RG insulator)

A semi-conducting glazed insulator has very good electrical characteristic for contamination condition [1, 2]. It has higher withstand voltage comparing with the conventional insulator. Therefore the semi-conducting glazed insulator is suitably used for countermeasure against contamination. However, it is still discussing on power loss due to leakage current flowing continuously through semi-conducting glazed. In Thailand semi-conducting glazed insulator are utilized in some polluted areas. In distribution lines of 24 kV system of Metropolitan Electricity Authority and 33 kV system of Provincial Electricity Authority, RG line post and pin insulators are used. For Electricity Generating Authority of Thailand system, semi-conducting glazed post insulators are used in 230 kV south Bangkok substations. Insulators have been installed for more than 10 years and there is no problem in operation. Besides, semi-conducting glazed suspension disc porcelain insulators have been used in 230 kV line connecting between the main land

and Phuket island. There is no problem reported after installation.

#### D. Corona Phenomena

Corona is a natural phenomenon found on practically any piece of high voltage equipment. It always occurs at the points, sharp edges, and surface roughness of electrodes. Corona is caused by the ionizing of gas which releases energy in form of the ultra violet light, the audio sound, and the radio noise. It is responsible for power losses from high voltage transmission lines and often leads to the deterioration of any insulator material of the insulation systems, the rising of interference in communication system, and generating ozone [3].

The high voltage insulator diagnosis tool is a PD detector, an infra-red camera, and a corona camera. While corona takes place, the light and the sound are irradiated. The light whose spectrum primarily falls within ultra- violet light with 300-400 wave lengths can be detected by the corona camera used in this experiment [4].



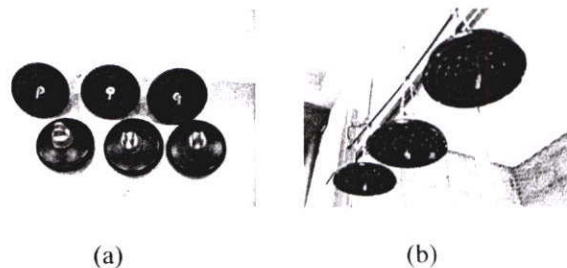
Fig. 3. Corona camera, DAYCOR II [5]

### III. EXPERIMENTAL

#### A. Insulator Specimen

The insulators for experimental were ac suspension insulators that were done by manufacturing producing as shown in fig.4 where

- (a) RG insulators
- (b) Ordinary ac insulators that were applied with artificial contamination at level of Equivalent Salt Deposit Density (ESDD);  $0.16 \text{ mg/cm}^2$



(a) (b)

Fig 4. Specimen insulators for experiment

## B. Experimental Set Up and Test Procedure

### 1) Experimental Set Up

The experimental set up was performed in the high voltage laboratory of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Thailand by using the testing equipment as shown in fig. 5

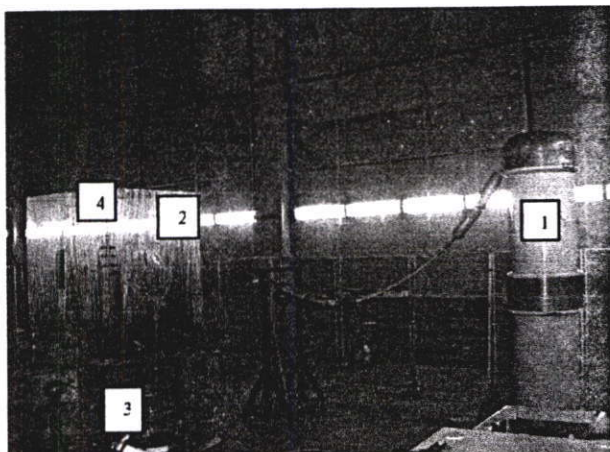


Fig. 5. Circuit connection arrangement of dc system

Where 1: Testing transformer of DC 600 kV 10 mA  
2: Fog chamber  
3: Boiling tank  
4: Tested insulators string

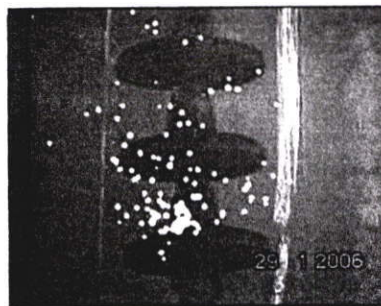
### 2) Test Experiment and Test Results.

After installing the contaminated string insulator in the test chamber, the fog was fed into the chamber until it saturated. The dc voltage was applied to the string insulator at the same time, the corona phenomena was investigated.

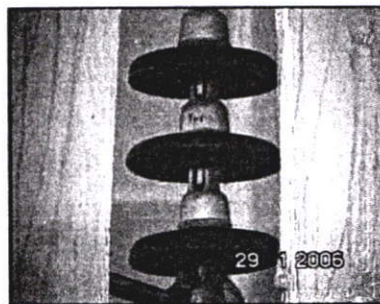
The tested results of corona inception voltage were shown in table 2 and the fig. 6 shows the corona phenomena of tested insulator string (a) ac suspension string insulator at 10 kV applied voltage (b) RG string insulator at 33 kV applied voltage.

TABLE 2  
CORONA INCEPTION VOLTAGE IN DC TEST CONDITION

Kinds of insulators	Corona inception voltage of insulator string (kV)			
	No.1	No.2	No.1	Average
ac insulator	15	13	16	14.67
RG insulator	-	-	-	-
ac insulator/ESDD	9.7	9.5	9.8	9.67
RG insulator/ESDD	-	-	-	-



(a)



(b)

Fig 6. Corona phenomena of tested insulators

In case of phenomena of corona inception voltage test on dc tested dry condition, the corona inception voltage of ac insulator was occurred at higher level [5] and the leakage current test of tested ac RG insulators are in the acceptable range that will not be cause of thermal runaway problem.

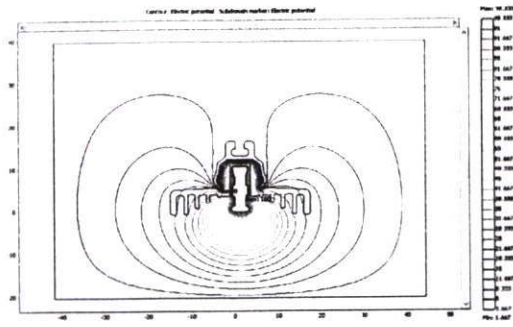
### 3) Result Analysis.

The tested results show that the corona phenomena will not occurred in case of ac RG insulators tests both dry test and test in the fog chamber at the peak applied voltage 33 kV while this phenomena will be occurred with ac suspension insulators. The reason is that the leakage current will flow through the insulator surface of ac RG insulator resulting to no dry band problem.

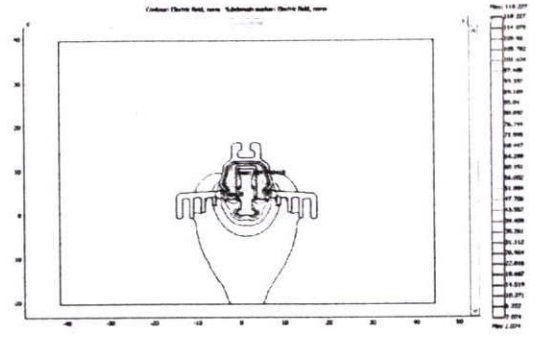
The location that found the corona phenomena of almost tested sets is the conjunction between cap and top surface of the insulator as shown in fig.7 (a).

## IV. SIMULATION RESULT

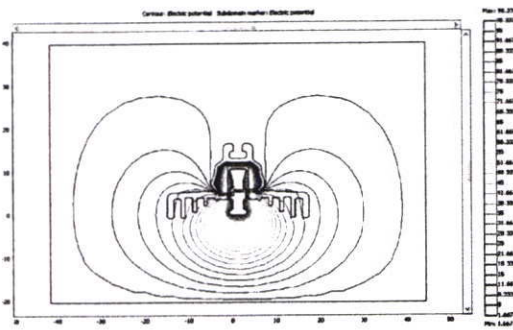
The finite element program was used to simulate the voltage distribution and electric field propagation of the ac suspension insulator, ac RG insulator, dc suspension insulator and dc RG insulator. The simulating result is shown in fig. 7 and 8 respectively



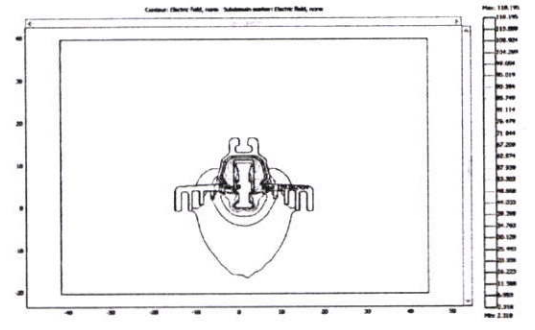
(a)



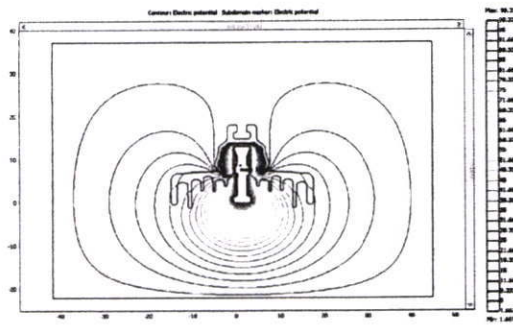
(a)



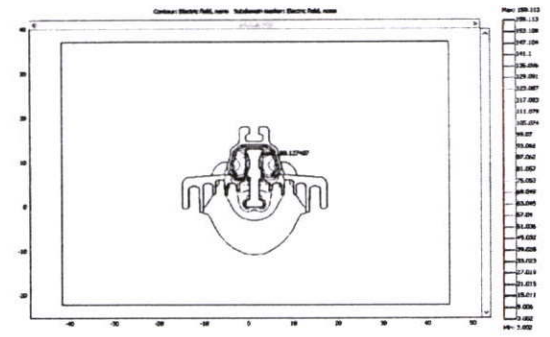
(b)



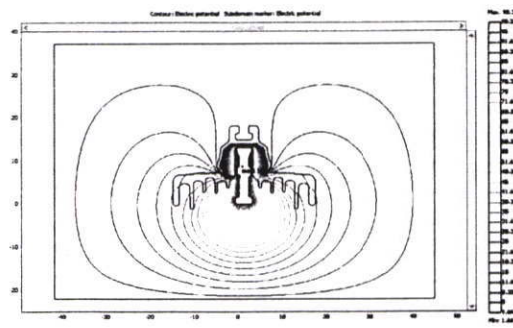
(b)



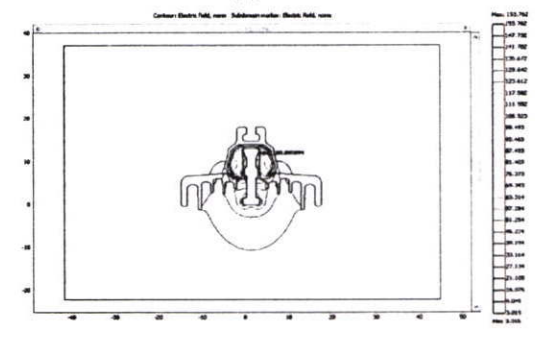
(c)



(c)



(d)



(d)

Fig. 7. Voltage distribution of simulated insulators  
 (a) ac suspension insulator (b) ac RG insulator  
 (c) dc suspension insulator (d) dc RG insulator

Fig.8. Electric field of simulated insulators  
 (a) ac suspension insulator (b) ac RG insulator  
 (c) dc suspension insulator (d) dc RG insulator

#### IV. CONCLUSION

The electrical characteristic of RG insulator is quite well especially in contaminated condition because the corona phenomena will difficultly occur. One reason is that the electric field propagation is uniform and another reason is no dry band problem but there are still some disadvantages of power loss due to leakage current flowing through the semiconductor surface and also thermal run away problem.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to give special recognition to the staffs of HV Laboratory of KMITL for helping and supporting in this research.

#### REFERENCES

- [1] S. Sangkasaad "Research and Experience with New Insulator Technologies in Thailand" 2001 World congress & Exhibition/ Shanghai, China. Nov.18-21, 2001.
- [2] N. Pattanadech, S. Sangkasaad " Electrical Characteristics of Polluted Semiconducting glazed Insulator" Center of Excellence in Electrical Power Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. Thailand.
- [3] N. Pattanadech and P. Yutthagowith " Punctured Insulator Examination of A String Insulator" Powertech 2005, St.Petersburg Russia.
- [4] CoraCam III, User Manual, Data N-try, 1997.
- [5] A. Karn, S. Pitivejkul, N. Pattanadech and P. Yutthagowith "Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage between HVAC and HVDC insulator" IPEC 2005, Nov.29-Dec 2 2005, Singapore

## ประวัติผู้เขียน



นายอมรรัช คาร์ว เกิดเมื่อ วันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิค หาดใหญ่ สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี 2541 ศึกษาต่อ ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2546