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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงแบบแขวนที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทย การศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่การนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้อยู่ทั่วๆไปมาทำการพัฒนาปรับปรุงคุณลักษณะ เพื่อที่จะเป็นทางเลือกหรือเป็นแนวทางในการศึกษาต่อในกรณีที่จะนำลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับมาใช้งานกับระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวิธีการศึกษาวิจัย โดยอาศัยการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนภายใต้สภาวะการทดสอบกระแสตรงและกระแสสลับในห้องทดสอบ และใช้วิธีการไฟไนอิลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนทำได้โดย การเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ และต่อวงแหวนโคโรนาร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวน ผลการวิจัยสามารถแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวนโดยการเคลือบผิวด้วยสารกึ่งตัวนำ จะพบข้อเด่นอยู่สองประการ คือ ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา ที่ซึ่งนำไปสู่การเกิดการวาบไฟตามผิวจะเกิดได้ยากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทดสอบในกระโจมไอน้ำ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถที่จะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเปรอะเปื้อนได้อีกด้วย ส่วนวิธีการนำวงแหวนโคโรนามาต่อร่วมกับพวงลูกถ้วยฉนวนนั้น ก็สามารถที่จะเพิ่มระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนาที่ซึ่งนำไปสู่การวาบไฟตามผิวได้เช่นกัน

Thesis Title	DC Insulator Analysis and Design by Developing from AC Insulator
Student	Mr. Amornchai Karn
Student ID.	46060714
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Siriwat 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 ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณประยัติ ใจวงศ์ ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุงระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หน่วยงานวิศวกรรม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ ให้การสนับสนุนลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงและกระแสสลับเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความอนุเคราะห์ในการนำกล้องโคโรนาเพื่อใช้ในการถ่ายภาพปรากฏการณ์โคโรนา

ขอขอบคุณ คุณสานิต สมบูรณ์ วิศวกรไฟฟ้า ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในการสนับสนุนอนุเคราะห์กล้องเทอร์โมสแกน เพื่อใช้ในการตรวจเช็คพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของลูกถ้วยฉนวน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการช่วยเหลือเรื่องการทดสอบ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อมรชัย คารว์

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 ทรงกลมเดี่ยวในช่องว่างอากาศ สำหรับออกแบบโคโรนาชีลด์……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 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน……..……...……....19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1 สิ่งเปรอะเปื้อน……19
2.3.2 การวัดค่าระดับความเปรอะเปื้อน……20
2.3.3 การแบ่งระดับความเปรอะเปื้อน……21
2.3.4 การวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน…22
2.3.5 แนวทางแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งาน
ในบริเวณเปรอะเปื้อน……24
2.4 ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ……28
2.4.1 ชนิดและคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวน……..29
2.4.2 ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ……30
2.5 กระแสรั่วไหล……34
2.6 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาพเปรอะเปื้อน……35
2.7 ความสัมพันธ์ของการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงกระแสสลับ……37
2.8 การฉนวนของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง……38
2.9 ปัจจัยต่าง ๆ ต่อสมรรถนะการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน……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 ความไม่สม่ำเสมอของสิ่งเปรอะเปื้อนของพวงลูกถ้วย……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

บทที่ 3 การทดสอบ และปรับปรุงคุณลักษณะของลูกถ้วยฉนวน……...…….....54

3.1 บทนำ…….....54

3.2 การตรวจสอบทางมิติ…….....…….…..56

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าลูกถ้วยผิวแห้งสะอาด……...……58

3.3.1 การทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง…….....58

3.3.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการโคโรนา……64

3.3.3 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ…….....74

3.4 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนที่มีระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ…….....75

3.4.1 ปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับแบบแขวนที่ระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ……75

3.4.2 การทดสอบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนากับลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับในกระโจมไอน้ำ…….....81

บทที่ 4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวน และวิเคราะห์ผล……...……....85

4.1 บทนำ……85

4.2 การศึกษา จำลอง และออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน…….……....85

4.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า.....89

4.3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้าระหว่างการคำนวณด้วยมือกับโปรแกรม 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 การจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบด้วยโปรแกรม 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. การทดสอบหาองค์ประกอบของการเปรอะเปื้อนที่เกาะตามผิวของลูกถ้วย…..160

ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์……..…….162

ประวัติผู้เขียน……..…….……...180

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ส่วนผสมวัตถุดิบสำหรับทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน……...…….……13

2.2 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน…….…...……21

2.3 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ.……...…..……...25

2.4 ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน.....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 แรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสตรง……61

3.5 แรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสสลับ.....62

3.6 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง.....66

3.7 แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสสลับ……66

3.8 วงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการทดสอบ……...71

3.9 ระดับแรงดันเกิดโคโรน่าของลูกถ้วยกระแสสลับที่สภาวะการทดสอบกระแสตรง.....72

3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา และแรงดันสูงสุดที่ทำการทดสอบของระดับความเปรอะเปื้อน (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 มิติของวงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการทดสดสอบ……...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 และมุมในการออกแบบตามาตรฐานของ ของ Pin ตามมาตรฐาน IEC120……..…130

4.12 มุมในการออกแบบตามาตรฐานของCap ตรงบริเวณที่จับยึดกับ Pin…….……...131

4.13 ค่าการล็อคของ Pin…….…...…….……...133

4.14 Clearance ระหว่าง Pin กับ Cap……..…….……...……...……134

5.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB)……141

5.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการเกิดโคโรนากับสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น
โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB)……..143

5.3 เปรียบเทียบการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น…….144

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....3

2.1 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....8

2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเลคโตรดลักษณะต่าง ๆ.....10

2.3 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....10

2.4 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำลูกถ้วยพอร์ซเลน.....13

2.5 ลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบเปียกสำหหรับลูกถ้วยแขวน....14

2.6 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยฉนวน.....15

2.7 (ก) รูปลิซาจัว (Lissajour figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวาบไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิคของอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกด้วยฉนวน.....23

2.8 ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน.....24

2.9 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทควันเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน.....25

2.10 (ก) การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งาน 3 ปีในบริเวณเปรอะเปื้อน (ข) หยดน้ำทรงกลมบนผิวลูกถ้วยยางซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน.....27

2.11 ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบคอตันยาวและแบบแขวน.....28

2.12 การเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ของลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลา 25 ปี.....29

2.13 การเกิดวาบไฟตามผิว (ก) ลูกถ้วยเคลือบปกติ (ข) ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....31

2.14 วงจรสมมูลของพวงลูกถ้วยฉนวน (ก) แบบเคลือบธรรมดาในสภาวะผิวสะอาด (ข) แบบเคลือบสารกึ่งตัวนำ หรือแบบเคลือบธรรมดาในสภาวะผิวเปรอะเปื้อน.....32

2.15 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (ก) พวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดา 16 และ 31 ยูนิต (ข) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 16 ยูนิต (ค) พวงลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ 30 ยูนิต (ง) ลักษณะสมบัติ RIV ของพวงลูกถ้วยเคลือบธรรมดาและลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน.....33

2.16 ลักษณะปีกครีบของลูกถ้วยฉนวนคอตันและค่าที่แนะนำให้ใช้.....36

2.17 ขั้นตอนการออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อน.....37

2.18 รูปร่างที่ต่างกันของลูกถ้วยกระแสสลับและกระแสตรง.....38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.19 CFO ต่อค่าเฉลี่ยของ ESDD……40

2.20 ค่า CFO กับความยาวของพวงลูกถ้วยฉนวนและค่าของ ESDD ที่มีค่าการเกาะติดแบบสม่ำเสมอในลูกถ้วย 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 วิธีการไฟในต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ…….……...51

3.1 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใน (ก) สนามไฟฟ้ากระแสตรง (ข) และกระแสสลับ……54

3.2 การล้างลูกฉนวนฉนวนกระแสตรงที่มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน……55

3.3 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนที่แตกต่างกันระหว่างลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงและสลับ….55

3.4 ตัวอย่างลูกถ้วยที่ใช้ในในการทดสอบ……58

3.5 การเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ……..……58

3.6 วงจรการทดสอบ.....60

3.7 การวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง……..……..62

3.8 การวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรงและกระแสสลับ……..63

3.9 กล้องโคโรนา…….……...64

3.10 ปรากฏการโคโรนาของลูกถ้วยภายใต้กระแสตรง.....65

3.11 ปรากฏการโคโรน่าของลูกถ้วยภายใต้กระแสสลับ……...……..66

3.12 แรงดันเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของลูกถ้วยฉนวนภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง และกระแสสลับ……..67

3.13 วงแหวนโคโรนาที่ใช้ในการออกแบบ.....69

3.14 วงจรการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสตรง.....70

3.15 วงแหวนโคโรนา……71

3.16 การเกิดโคโรน่าของลูกถ้วยกระแสสลับภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง……...72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.17 แรงดันโคโรน่าที่เริ่มเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนวงแหวนโคโรนา……..……..……73

3.18 อุณหภูมิที่ของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ.....74

3.19 การเตรียมสิ่งเปรอะเปื้อนหรือ 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 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 7 kVAC...……79

3.26 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 9 kVAC...……80

3.27 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 14 kVAC…….80

3.28 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 13 kVDC……..80

3.29 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 17 kVDC……..80

3.30 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ระดับแรงดัน 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 การสร้างเอลิเมนท์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงโดยใช้โปรแกรม FEMLAB…….93

4.7 การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังค์ชั่น Subdomain setting……..……93

4.8 การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังค์ชั่น Material/Coefficient Library..……..97

4.9 การป้อนค่าให้กับโปรแกรม FEMLAB ในฟังค์ชั่น Boundary setting..……99

4.10 ส่วนต่างๆ ของลูกถ้วยฉนวนหลังจากป้อนค่า……100

4.11 การประมวลผลโดยใช้ฟังค์ชั่น 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 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวน
ด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งลูก.....107

4.21 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
ทั้งลูก.....108

4.22 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
ทั้งลูก.....108

4.23 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
ทั้งลูก.....109

4.24 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านบน.....110

4.25 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านบน.....110

4.26 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านบน.....111

4.27 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านบน.....111

4.28 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....113

4.29 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....113

4.30 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....114

4.31 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับที่เคลือบผิวฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำ
เฉพาะพื้นผิวด้านล่าง.....114

4.32 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ.....117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.33 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับ.....117

4.34 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ A.....118

4.35 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ A.....118

4.36 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ B.....119

4.37 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ B.....119

4.38 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ C.....120

4.39 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ C.....120

4.40 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ D.....121

4.41 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสสลับเมื่อต่อร่วมกับวงแหวน โคโรนา แบบ D.....121

4.42 ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815.....125

4.43 ขนาดของ Pin.....130

4.44 ขนาดของขั้วต่อระหว่าง Cap และ Pin.....132

4.45 ระยะที่เหมาะสมในการล็อค Pin.....133

4.46 ระยะของช่องว่างระหว่าง Pin และ Cap บริเวณการสวมเข้า.....134

4.47 ระยะของช่องว่างระหว่าง Pin และ Cap บริเวณภายใน.....135

4.48 มิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....136

4.49 ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....136

4.50 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....137

4.51 ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ.....138

4.52 การกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีบ...138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.53 การกระจายของศักย์ไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีบ และปรับเปลี่ยนรูปร่างของ Cap……139

4.54 การกระจายของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบเมื่อเพิ่มความยาวครีบ และปรับเปลี่ยนรูปร่างของ Cap……139