

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน
DESIGN AND CONSTRUCTION OF CHAMBER FOR CONTAMINATED
INSULATORS TESTING

โดย

นายจักรพันธ์ ประรตนาฤติ

นายันทวัฒน์ วิวรรณะพงศ์

นายยุทธสิทธิ์ ฤกษ์นิรันดร

นายสุทธิศักดิ์ วัฒนานคร

มท.
๗๓๕๖
๒๕๕๗

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 73000
วัน,เดือน,ปี..... 27 ส.ย. 2550

b. ๗๓๕๖๒๐๑
i.....

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน
DESIGN AND CONSTRUCTION OF CHAMBER FOR CONTAMINATED
INSULATORS TESTING



อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช
รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน

ผู้จัดทำ

- 
1. นายจักรพันธ์ ปรารถนาฤดี
 2. นายนิพนธ์วิวัฒน์ วิวรรณพงษ์
 3. นายยุทธสิทธิ์ ฤกษ์นิรันดร
 4. นายสุทธิศักดิ์ วัฒนานคร



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ วัฒนเดช)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน

นายจักรพันธ์	ปรารภนาถดี	
นายนันท์วัฒน์	วิวรรณพงษ์	
นายยุทธสิทธิ์	ฤกษ์นิรันดร	
นายสุทธิศักดิ์	วัฒนานคร	
อ.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549		

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน และออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อน ในการออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อนเป็นการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 507 จำลองสภาวะเปรอะเปื้อนประเภทไอเกลือเพื่อทดสอบลูกถ้วยฉนวน โดยใช้เกลือผสมกับน้ำเปล่าที่ระดับความเปรอะเปื้อนต่างๆ จากการทดสอบพบว่าในสภาวะที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือน้อย จะทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูง ซึ่งจะมีผลทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวได้ยาก และในสภาวะที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือมาก จะทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนมีค่าต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่ายขึ้น ในส่วนของการออกแบบลูกถ้วยฉนวน จะออกแบบตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 โดยทำการออกแบบปีกและรูปทรงของลูกถ้วยฉนวนให้มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนได้ยาก ทำความสะอาดตัวเองได้ดี และเพิ่มระยะรั้วให้กับลูกถ้วยฉนวน เพื่อลดขนาดของกระแสรั้วไหล โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และการกระจายแรงดันของสนามไฟฟ้า ซึ่งผลการออกแบบพบว่า ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนต้นแบบ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF CHAMBER FOR CONTAMINATED INSULATORS TESTING

Chakkraphan	Pratthananaruedee	
Nantawat	Wiwattanapong	
Yutthasit	Lerknirandorn	
Suttisak	Wattananakorn	
Norrasage	Pattanadech	Advisor
Assoc.Prof.Siriwat	Potivejkul	Advisor

2006

ABSTRACT

The purpose of this project is to design and build a testing laboratory to investigate contaminated insulators. The design follows IEC 507 standard to emulate the contaminated condition in salt-fog type by mixing salt with water in many different ratios. The result shows that a lower salt contaminated concentration condition has more corona discharge than higher salt contaminated concentration condition. Since a higher concentration condition is able to lead a flashover easier than a lower concentration condition. The insulators in the tests followed IEC 815 standard by modifying the insulator designs for the sheds in self-cleaning, increasing the leakage distance to reduce the leakage current. By using finite element program in aiding the design, the designed insulators have less electric field stress than the original insulators.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือสนับสนุนจากหลายท่านโดยเฉพาะท่าน รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และท่านอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหามางอย่างให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมีเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาบัตรนี้ให้เป็นที่เรียบร้อย รวมทั้งคุณประยัติ ใจวงศ์ วิศวกรไฟฟ้า การไฟฟ้าบางพลี ได้ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง คุณอภิสิทธิ์ ไชยแสงกุล นิสิตปริญญาโท ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ในขณะที่ทำการศึกษาค้นคว้า จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี บริษัท ดาดา เอ็นทรี จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องกล่องโคโรนา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวัดค่าความนำไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ยืมถังลมมาใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตปริญญาโท เพื่อนและน้องๆ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลายๆ ท่านที่ยังมิได้เอ่ยถึงที่ให้คำแนะนำกับคณะผู้จัดทำ

อนึ่งโครงการชิ้นนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากความตั้งใจและความมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ความสำคัญของปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	4
2.1.1 แรงดันเกินภายนอก	4
2.1.2 แรงดันเกินภายใน	5
2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว	5
2.2 การศึกษาทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า	6
2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า	9
2.3.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน	10
2.4 ชนิดแบบลูกถ้วยฉนวนแรงสูง	14
2.4.1 ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน	14
2.4.2 ลูกถ้วยแก้วเหนียว	14
2.4.3 ลูกถ้วยเนื้อสารสังเคราะห์	14
2.5 รูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า	14
2.5.1 แรงดันวาบไฟตามผิวกับแรงดันเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวน	14
2.5.2 ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวน	15
2.6 การวัดค่ากระแสรั่วไหล	17
2.7 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน	21
2.7.1 สิ่งเปรอะเปื้อน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.2	การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะ เปื้อน	24
2.7.3	แนวทางแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานใน บริเวณเปราะเปื้อน	26
2.7.4	การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาพเปราะเปื้อน	30
2.8	ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	32
2.8.1	วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	33
2.8.2	การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า	34
2.8.3	หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์	34
2.8.4	สมการเชิงอนุพันธ์	36
บทที่ 3	การออกแบบสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อนและการออกแบบ ลูกถ้วยฉนวน	39
3.1	การออกแบบห้องทดสอบ	39
3.1.1	การออกแบบห้องทดสอบ	39
3.1.2	การออกแบบหัวฉีดในการทดสอบแบบ Salt fog	45
3.2	การสร้างห้องทดสอบ	46
3.2.1	การสร้างห้องทดสอบ	46
3.2.2	การสร้างหัวฉีด Salt fog	47
3.2.3	การสร้างโครงสร้างรองรับหัวฉีด	48
3.3	การออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในสภาวะเปราะเปื้อน	49
3.3.1	ขั้นตอนการออกแบบ	49
3.3.2	การวิเคราะห์ผลการออกแบบ	54
บทที่ 4	การทดสอบลูกถ้วยฉนวน	55
4.1	การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	55
4.2	วงจรการทดสอบ	58
4.3	ขั้นตอนการทดสอบ	60
บทที่ 5	สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ	66
5.1	สรุป	66
5.2	อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข	68
ภาคผนวก	69
กิตติกรรมประกาศ	78
เอกสารอ้างอิง	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก, แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว5
2.2	สนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่า7
2.3	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ9
2.4	การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน11
2.5	ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ11
2.6	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย13
2.7	การเกิดแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแห้งและการเจาะทะลุของพวงลูกถ้วยแขวน หลังจากได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า15
2.8	เส้นกราฟแรงดัน ($v - t$)16
2.9	รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันของลูกถ้วยฉนวนระบบ 750 kV18
2.10	การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT เป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแส19
2.11	การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทาน20
2.12	รูปคลื่นกระแสรั่วไหล(a) การตรวจจับด้วย CT(b) การตรวจจับด้วยความต้านทาน20
2.13	การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ลูกถ้วยฉนวน25
2.14	ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งประอะเปื้อน26
2.15	การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งประอะเปื้อนประเภท ควัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน27
2.16	การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุไม่ชอบน้ำ29
2.17	ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 81531
2.18	การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์33
2.19	วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ35
3.1	ระยะที่ต้องการในการทดสอบลูกถ้วย40
3.2	ระยะต่างๆที่ต้องการในการทดสอบลูกถ้วย (ระยะ A B C)41
3.3	ระยะห่างที่ต้องคำนึงในการทดสอบของลูกถ้วยแขวน41
3.4	ขนาดเสาและความห่างของหัวฉัดที่ติดอยู่ที่เสา42
3.5	ชุดแขวนลูกถ้วย43
3.6	การวางวัสดุทดสอบในห้องทดสอบและระยะห่างระหว่างวัสดุทดสอบและหัวฉัด44
3.7	โครงสร้างของห้องทดสอบ44
3.8	การวางวัสดุและอุปกรณ์ทดสอบในห้องทดสอบ45
3.9	ขนาดของท่อหัวฉัดและหัวฉัดที่ได้ทำการออกแบบขึ้น45
3.10	ห้องทดสอบที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ข้อต่อของห้องทดสอบซึ่งสามารถถอดประกอบได้	47
3.12 หัวฉีดที่ได้ทำการสร้างตามแบบมาตรฐาน IEC 507	47
3.13 การทดสอบหัวฉีด	48
3.14 ฐานของโครงสร้างหัวฉีด	48
3.15 รูปแบบของปีกประเภทต่าง ๆ	50
3.16 ภาพสเกทของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่าง ๆ (ข) ลูกถ้วยแขวนปีกสลั ความยาวที่แสดงในแบบเป็นมิลลิเมตร	51
3.17 เปรียบเทียบลูกถ้วยแขวนต้นแบบที่มีใช้งานและลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	51
3.18 ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ 2D, 3D	52
3.19 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	53
3.20 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	53
3.21 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขวนปีกแรกจากด้านบนของ ลูกถ้วยแขวนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ	54
4.1 ชนิดของเกลือที่ใช้ในการทดสอบ	56
4.2 ขั้นตอนของการผสมสารละลายกับน้ำ	57
4.3 ลักษณะของลูกถ้วย 52-3 ที่ใช้ในการทดสอบ	57
4.4 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	58
4.5 ภาพจำลองห้องทดสอบด้วยวิธี salt fog และวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิด โคโรนาในสภาวะเปรอะเปื้อน	59
4.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบจริง	60
4.7 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันวาบไฟตามผิวฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน	61
4.8 ห้องทดสอบ	61
4.9 (ก) ไอเกลือที่เกิดขณะทำการทดสอบ (ข) ตรวจสอบแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาด้วยกล้อง โคโรนา	62
4.10 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่เกิดจากการทดสอบและการเกิดโคโรนา	64
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเกลือที่ระดับต่าง ๆ กับ แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวน	65
5.1 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขวนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขวนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ	67
ก.1 ภาพสเกทของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ลูกถ้วยแขวนปีกสลับ ความยาวที่แสดงในแบบเป็นมิลลิเมตร	70
ก.2 เปรียบเทียบลูกถ้วยแขวนต้นแบบที่มีใช้งานและลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	70
ก.3 ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ 2D, 3D	71
ก.4 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	72
ก.5 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	72
ก.6 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขวนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขวนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ	73
ก.7 ภาพสเกทของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ลูกถ้วยแขวนปีกสลับ ความยาวที่แสดงในแบบเป็นมิลลิเมตร	74
ก.8 เปรียบเทียบลูกถ้วยแขวนต้นแบบที่มีใช้งานและลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	74
ก.9 ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ 2D, 3D	75
ก.10 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	76
ก.11 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ	76
ก.12 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขวนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขวนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การดำเนินงาน	2
2.1 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน	23
2.2 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ	27
2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือ เลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน	30
2.4 ข้อดี และข้อเสียของไฟไนต์เอลิเมนต์	38
3.1 ระดับความเปราะเปื้อน	49
3.2 เปรียบเทียบค่ามิตี ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815	52
3.3 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ	52
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือและความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร และความ หนาแน่นของสารละลายตามมาตรฐาน IEC 507	55
4.2 ค่าความนำที่ใช้ในการทดสอบ	56
4.3 ผลการทดสอบ	62
ก.1 เปรียบเทียบค่ามิตี ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815	71
ก.2 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ	71
ก.3 เปรียบเทียบค่ามิตี ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815	75
ก.4 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ลูกถ้วยฉนวน เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่มีความสำคัญในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และรองรับแรงกลจากน้ำหนักของสายไฟ ลูกถ้วยฉนวนที่มีใช้อยู่ในระบบส่งจ่ายมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบ หน้าที่ใช้งาน และสภาพแวดล้อมของการใช้งาน สาเหตุหลักของการเกิดไฟฟ้าดับประการหนึ่ง เกิดจากการฉนวนของระบบผิดพร่อง ซึ่งส่งผลให้เสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าลดลง

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระดับแรงดันมักจะเป็นลูกถ้วยแขวน (Cap and pin หรือ Suspension insulator) ที่ต่อกันเป็นพวง (string) ชนิดเนื้อฉนวนโดยทั่วไปจะเป็นพอร์ซเลน (Porcelain) ในการใช้งานลูกถ้วยฉนวนในระยะเวลานาน ๆ จะทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการสะสมสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวของลูกถ้วยฉนวน สิ่งเปรอะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอกหรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของลูกถ้วยฉนวนมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดวาทไฟ ตามผิวได้ง่าย การเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดวาทไฟตามผิว ดังนั้นในโครงการนี้ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน เพื่อวิเคราะห์แก้ปัญหาการใช้งานลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อนและทำการออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้มีมิติเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อนโดยการออกแบบอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 815 และห้องทดสอบที่ทำการสร้างขึ้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 507

1.2 ความสำคัญของปัญหา

การใช้งานลูกถ้วยฉนวนในระบบไฟฟ้ามักจะมีปัญหาต่างๆ เช่น การเกาะทะลุเนื้อฉนวนแข็ง การเกิดวาทไฟตามผิว หลังจากได้ติดตั้งใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าที่มีความชันหน้าคลื่นสูง และในกรณีที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งเปรอะเปื้อน เช่น ฝุ่น ควัน สารเคมี และเกลือ เป็นต้น ผลกระทบจากสิ่งเปรอะเปื้อนต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนอาจทำให้เกิดวาทไฟตามผิว ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับในระบบจำหน่าย ทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าลดลง

1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. เพื่อศึกษาและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนเปราะเปื้อน
2. เพื่อศึกษาการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน
3. เพื่อศึกษาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน
4. เพื่อออกแบบมิติที่เหมาะสมของลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสมกับระดับความเปราะเปื้อน

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. สามารถออกแบบและสร้างห้องทดสอบเพื่อทดสอบลูกถ้วยฉนวนโดยวิธี Salt Fog อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 507
2. ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน พร้อมกับการผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบ
3. สามารถทำการจำลองแบบลูกถ้วยฉนวนโดยใช้โปรแกรม Auto Cad , Solid works
4. สามารถวิเคราะห์และออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสมกับระดับความเปราะเปื้อนโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ.2549							พ.ศ.2550	
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง	■	■	■						
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■	■						
3. ศึกษามาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการออกแบบและการทดสอบ	■	■	■						
4. ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	■	■	■	■	■	■	■		
5. สร้างห้องทดสอบ	■	■	■	■	■	■	■		
6. สร้างเสาและหัวฉีด				■	■	■	■		
7. ทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะปกติและในสภาวะเปราะเปื้อน					■	■	■	■	■
8. วิเคราะห์ผล และออกแบบลูกถ้วยฉนวน							■	■	■
9. สรุป และประเมินผลการทดสอบ							■	■	■
10. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								■	■
	■ การวางแผน				■ การปฏิบัติงานจริง				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในระดับความเปราะเป็อนที่แตกต่างกันได้
2. สามารถใช้โปรแกรม Auto Cad , Solid works ในการจำลองแบบ และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบและวิเคราะห์ปัญหาได้เป็นอย่างดี
3. สามารถใช้เครื่องมือทดสอบที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพโดยไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [1]

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า ส่วนประการที่สองเป็นแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น โดยช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกิน มีค่าแตกต่างกัน การเกิดแรงดันเกินสวิตช์ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2 เท่า ของพิกัดแรงดันซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อระบบส่งจ่ายมากนัก แต่แรงดันเกินฟ้าผ่าจะทำอันตรายกับระบบส่งจ่าย เนื่องจากขนาดของแรงดันสูงเป็นล้านโวลต์เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายโดยตรง

2.1.1 แรงดันเกินภายนอก

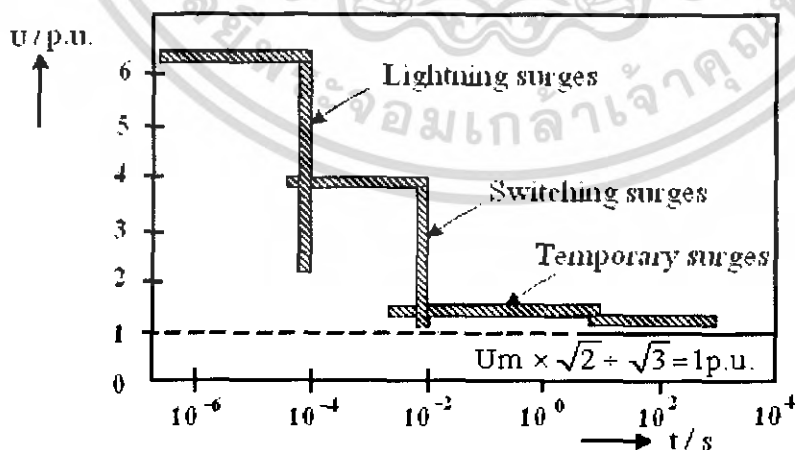
เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบเดินสายอยู่ภายนอกซึ่งอยู่ในอากาศ ดังนั้นระบบสายส่งจึงมีโอกาสสูงมากที่จะฟ้าผ่าได้ ทั้งในกรณีผ่าลงโดยตรง หรือการดีสชาร์จในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave Theory) และทฤษฎีการคำนวณวงจร RCL รูปลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอกหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) นี้จะมีช่วงหน้าคลื่น หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ายอดนั้นสั้นมาก คือ อยู่ในช่วง 1-2 μs และช่วงหางคลื่น คือ แรงดันลดลงครึ่งหนึ่งของค่ายอดในช่วงเวลาประมาณ 40 - 60 μs แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีค่ายอดคลื่นสูงมากประมาณ 10 เปอรียูนิคหรือมากกว่านั้น จะเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายอย่างมาก จำเป็นที่ต้องรีบกำจัดออกจากระบบเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย โดยทั่วไปการบอกขนาดของแรงดันเกินจะบอกด้วยตัวเลข 2 ตัวอยู่ในหน่วยของเวลาซึ่งเขียนอยู่ในรูป T_1 / T_2 (T_1 = ช่วงเวลาหน้าคลื่น, T_2 = ช่วงเวลาหางคลื่น)

2.1.2 แรงดันเกินภายใน

สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายใน อาจเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร ทั้งในกรณีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานและการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้น แรงดันเกินดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสวิตช์ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ (Switching Overvoltage) หรืออิมพัลส์แบบสวิตช์ (Switching Impulse) หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรือเกิดจากแรงดันเกินภายนอก คือ แรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดสปาร์กหรือวาบไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกฝน ขึ้นด้วยหมอก น้ำค้าง หรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรรีโซแนนซ์ เพราะค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ในสายส่งรูปลักษณะของคลื่นแรงดันเกินภายในนี้จะช้ากว่าแรงดันเกินภายนอก คือช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง $100 - 300 \mu s$ และช่วงหางคลื่นอยู่ในช่วง $2,000 - 3,000 \mu s$ แรงดันเกินสวิตช์นี้ไม่มีความหมายต่อการทดสอบระดับการฉนวนที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำกว่า $300 kV$ แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า $300 kV$ การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ซึ่งจะมีความหมายมากขึ้น เมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แรงดันเกินที่เกิดจากการสวิตช์ซึ่งมีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 4 เปอรฺยูนิต

2.1.3 แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage)

จะแตกต่างจากแรงดันเกินเนื่องจากคลื่นเสิร์จ ช่วงความถี่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะมีตั้งแต่ไม่กี่เฮิรตซ์ไปจนถึงหลายร้อยเฮิรตซ์ และมีช่วงระยะเวลาจากไม่กี่วินาทีไปจนถึงเป็นชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดฟอลต์) รูปแบบทั่วไปส่วนใหญ่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะเกิดบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ เมื่อมีฟอลต์ลงดินแบบ 1 เฟส หรือ 2 เฟส เกิดขึ้น แรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน $\sqrt{3}$ เปอรฺยูนิต และไม่อันตรายกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก, แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การศึกษาทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ Dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย

การศึกษานสนามไฟฟ้านั้นสนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
- 3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

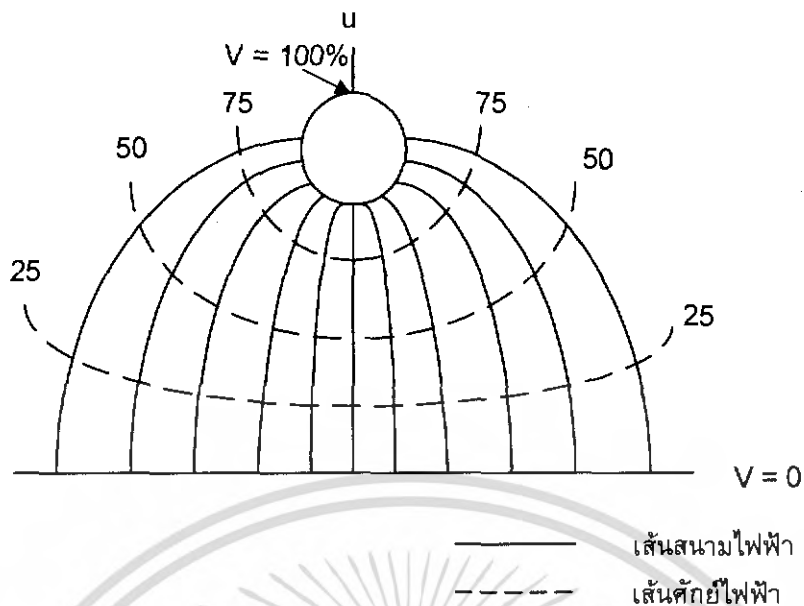
ซึ่งการศึกษานสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือ สปาร์กทันทีที่ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

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

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor), $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1$

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

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



รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่า

จึงอาจกล่าวได้ว่า u' ก็คือ ดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแพกเดออร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกดาว์นของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ดังสมการที่ (2.2)

สมการที่ (2.2) นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือ ปริติสซาร์จ (predischarge) เกิดก่อนเบรกดาว์น (สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาว์นจะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรกดาว์นทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรกดาว์นแต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดติสซาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ติสซาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ เป็นช่วงๆจึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาว์นเรียกว่า กระแสโคโรนา (corona current) หรือ กระแสติสซาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่ง

เรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จาก

สมการที่ (2.1) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ (2.2) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.2) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ

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

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) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

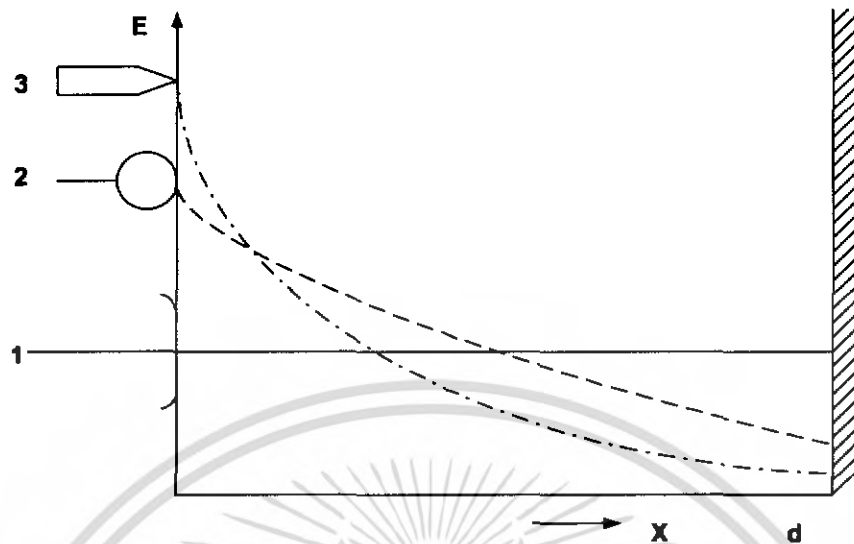
$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.4)$$

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 $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้นหรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างของอิเล็กโทรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแพคเกจอื่น ๆ อีกหลายประการ



รูปที่ 2.3 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 $0.1 < \eta^* \leq 0.3$

2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (electrical field stress)

จากกฎของคูลอมบ์

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad (2.5)$$

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.6 จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ Q_2 เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D/ϵ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E (electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

$$E = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.8)$$

จะเห็นได้ว่า แรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า บางทีเรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทโรปิกเชิงเส้น เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า จึงเขียนได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

เมื่อ \vec{J} คือ ความหนาแน่นของกระแส เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น A/m²

σ คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น S/m = siemens/meter = 1/ρ

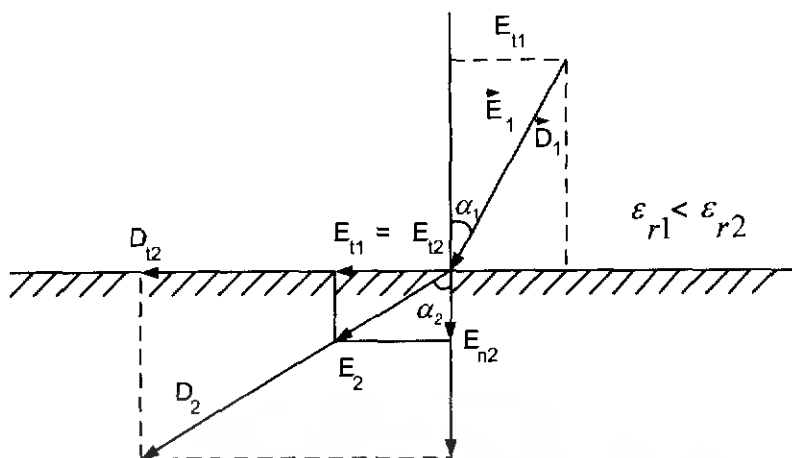
ρ คือ สภาพต้านทาน เป็น Ω-m

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

2.3.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

ฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือรองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือหักเหของเส้นสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่าง ๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

1. การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส E_t ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ $E_{t1} = E_{t2}$ และ $D_{n1} = D_{n2}$



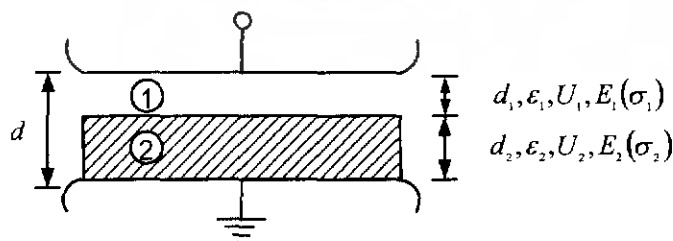
รูปที่ 2.4 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\operatorname{tg} \alpha_1 / \operatorname{tg} \alpha_2 = E_{n2} / E_{n1} = D_{n1} / D_{n2} = \epsilon_1 / \epsilon_2 \quad (2.10)$$

จึงกล่าวสรุปได้ว่า เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า \vec{D} และสนามไฟฟ้า \vec{E} ในเนื้อสารที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างจากแนวตั้งฉาก หรือหักเหเข้าหารอยต่อนั้นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี ϵ , สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

2. ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยทฤษฎีแล้วการวางชั้นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดที่ดีที่สุด คือการวางไม่ให้มีการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้า หรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั่นคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัส ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ $E = U/d$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และใช้ความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้นจะมีค่าคงตัว D และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามี ตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก



$C_1 \propto \frac{\epsilon_1}{d_1}$ และ $C_2 \propto \frac{\epsilon_2}{d_2}$

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2}$$

$$U_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1$$

แต่

$$U = U_1 + U_2$$

$$= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1$$

$$= U_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)$$

ฉะนั้น

$$U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.12)$$

แทนค่า U_1 จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

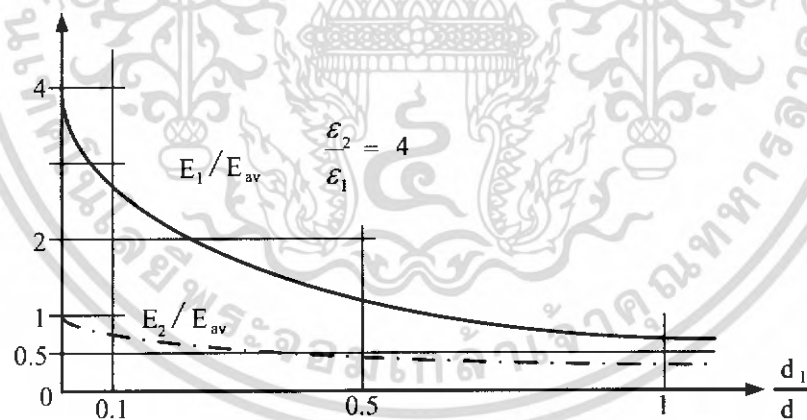
$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.14)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.15)$$

$$E_2 = \frac{U \epsilon_1 / \epsilon_2}{d_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.16)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.17)$$

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน ϵ_2/ϵ_1 เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่มี ϵ ต่ำ สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากขึ้น ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ชนิดแบบลูกถ้วยฉนวนแรงสูง

การฉนวนสายส่งกำลังในระบบส่งจ่ายแรงสูง ในระบบจำหน่ายแรงดันสูงไม่เกิน 50 kV มักใช้ลูกถ้วยก้านตรง (Pin insulators) ส่วนในระบบแรงดันสูงขึ้นไป เช่น ในสายส่งมักยึดสายไฟด้วยลูกถ้วยแขวน (Suspension insulators) ลูกถ้วยคอตัน (Solid core insulators) ลูกถ้วยคอตันยาว (Long rod insulators) ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ยึดตัวนำในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.4.1 ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน (Porcelain)

สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันใช้ลูกถ้วยชนิดนี้มากกว่า 80% มีประวัติการใช้งานนาน อายุการใช้งาน > 50 ปี ตรวจหาจุดบกพร่องยาก เกิดวาทไฟง่ายที่สภาวะแปรอะเปื้อน

2.4.2 ลูกถ้วยแก้วเหนียว (Toughened glass)

ในประเทศไทยมีใช้อยู่ในปัจจุบันน้อยกว่า 20% อายุการใช้งาน > 50 ปี เมื่อผิวดร้งตรวจหาได้ง่าย เกิดวาทไฟง่ายที่สภาวะแปรอะเปื้อน

2.4.3 ลูกถ้วยเนื้อสารสังเคราะห์ (Composite หรือ Nonceramic)

ลูกถ้วยชนิดนี้มีคุณสมบัติผิวไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) ได้แก่ Silicone, Ethylene, Propylene, Rubber (EPR) น้ำหนักเบา ทนต่อสภาวะแปรอะเปื้อน ลูกถ้วยชนิดนี้ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย เพราะยังไม่มั่นใจในเรื่องคุณภาพ และอายุการใช้งาน ที่มีใช้อยู่ในชั้นการศึกษาระดับปริญญาโท และการทดลองใช้งาน

2.5 รูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าลูกถ้วยฉนวนมีรูปลักษณะหลายรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ลักษณะการใช้งาน สภาพแวดล้อม ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสมกับระดับแรงดัน และสถานที่ติดตั้งใช้งาน

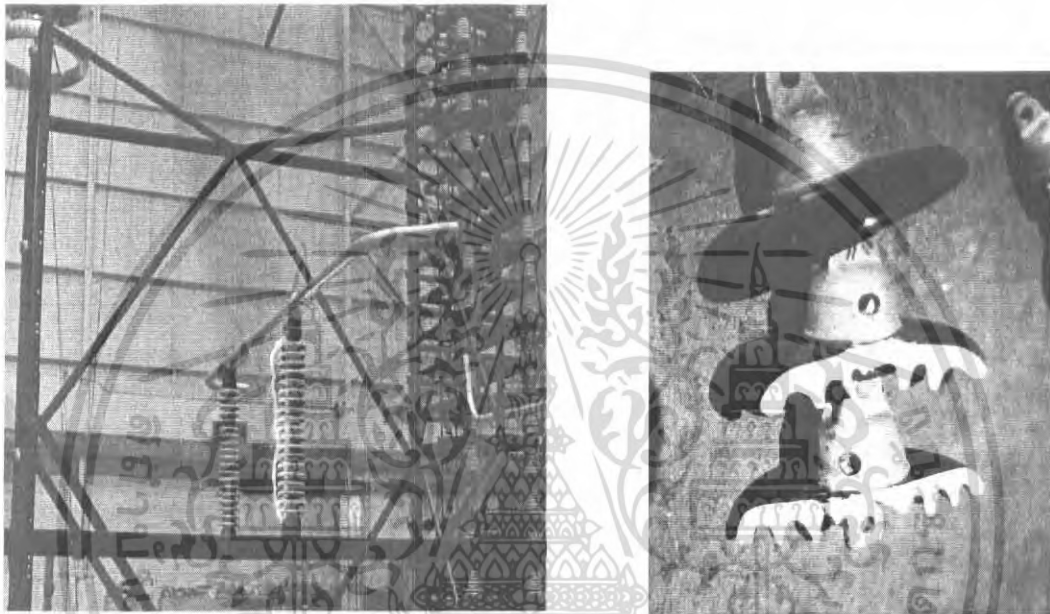
2.5.1 แรงดันวาทไฟตามผิวกับแรงดันเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวน

โดยความเป็นจริงลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ติดตั้งยึดหรือรองรับตัวนำสายไฟฟ้า ที่มีศักย์ไฟฟ้าอยู่ในบรรยากาศ อากาศที่อยู่โดยรอบลูกถ้วยนั้น จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าผิวลูกถ้วยถึงแม้ว่าผิวลูกถ้วยฉนวนจะสะอาดก็ตาม ยิ่งถ้าผิวลูกถ้วยแปรอะเปื้อนเพราะฝุ่นละออง หรือน้ำทะเลหรือสารเคมีด้วยแล้ว ยิ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่าอากาศ และถ้ามีความชื้นผิวลูกถ้วยที่แปรอะเปื้อนนั้นก็จะมีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เกิดกระแสรั่วตามผิวลูกถ้วยได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการเพิ่มระยะรั่วของผิวลูกถ้วย โดยการทำให้เป็นปีกยื่นออกจากแนวแกน และแต่ละปีกก็ยังทำเป็นครีบบนเพิ่มระยะรั่วป้องกันมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการทำปีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มากขึ้นก็มีขีดจำกัด เพราะการออกแบบลักษณะลูกถ้วยจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแก่เนื้อฉนวนด้วย

ในกรณีลูกถ้วยแขวน และลูกถ้วยก้านตรง ซึ่งมีความหนาของเนื้อฉนวนน้อยกว่าระยะอาร์กหลายเท่า จะต้องให้เกิดวาบไฟตามผิววงายกว่าการเกิดเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวน เพราะการเจาะทะลุจะทำให้เสียสภาพการฉนวนอย่างสมบูรณ์ การเกิดวาบไฟตามผิวจะทำให้เสียสภาพการฉนวนชั่วคราว และก็คืนสู่สภาพเดิมได้



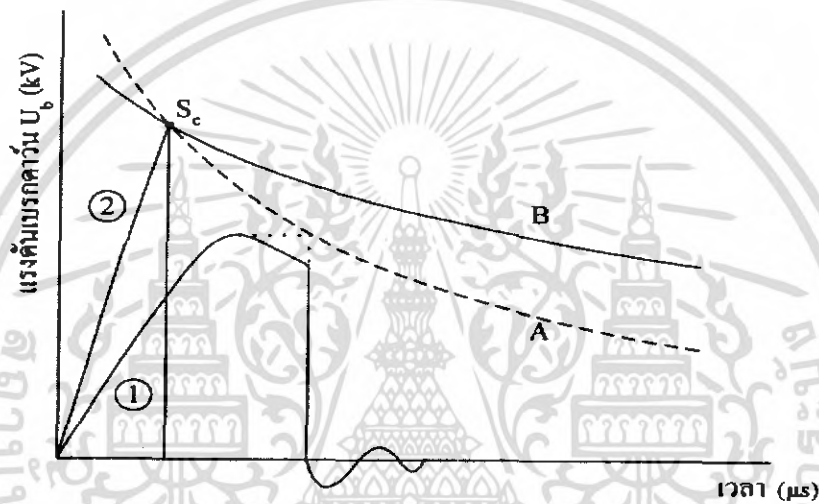
รูปที่ 2.7 การเกิดแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแห้งและการเจาะทะลุของพวงลูกถ้วยแขวนหลังจากได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

2.5.2 ผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวน [2]

โดยปกติเมื่อเกิดแรงดันเกินความถี่ต่ำ หรือเสิร์จสวิตชิง หรือเสิร์จอิมพัลส์ปกติ จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยข้ามไป แต่ในกรณีลูกถ้วยประเภท B ได้แก่ ลูกถ้วยแขวน และลูกถ้วยก้านตรง เมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเกินเสิร์จที่มีความชันมาก ๆ เช่น แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า ก็อาจทำให้เกิดเจาะทะลุเนื้อฉนวน เป็นผลให้เสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร และเป็นต้นเหตุให้เกิดการผิพร่องขึ้นในระบบส่งจ่าย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต้องหยุดชะงัก มีผลกระทบต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย ดังนั้นมาตรฐานยุคปัจจุบันจึงกำหนดให้มีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น

ความคงทนของลูกถ้วยฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงลูกถ้วยฉนวนประเภท B ได้แก่ ลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น ความคงทนของการฉนวนจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปคลื่นของแรงดันที่ป้อน และรูปลักษณะของลูกถ้วย ในกรณีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงดันอิมพัลส์ ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยจะเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดันเวลา ($v - t$ curve) เช่นเดียวกันค่าแรงดันเบรกดาวน์หรือเจาะทะลุเนื้อฉนวนจะเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดัน- เวลาเช่นกัน คือ เส้น B ซึ่งมีลักษณะความชันเส้นกราฟต่างไปจากเส้นวาบไฟตามผิว จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าแรงดันวาบไฟตามผิว หรือค่าแรงดันเบรกดาวน์ทะลุเนื้อฉนวนนั้นขึ้นอยู่กับความชันของลูกคลื่นแรงดันนั่นเอง จุดตัดของเส้นกราฟทั้งสอง คือค่าวิกฤตของการประสานสัมพันธ์ระหว่างการฉนวนภายนอกกับการฉนวนภายใน ฉะนั้นความชันของแรงดันอิมพัลส์จึงเป็นข้อกำหนดประการหนึ่งของแรงดันทดสอบความคงทนของลูกถ้วยฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน



รูปที่ 2.8 เส้นกราฟแรงดัน ($v - t$)

เส้น A : ลักษณะ $v - t$ ของอากาศรอบลูกถ้วย

เส้น B : ลักษณะ $v - t$ ของเนื้อฉนวนลูกถ้วย

ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน เห็นได้ว่าแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิว หรือเจาะทะลุเนื้อฉนวน นอกจากจะขึ้นอยู่กับความชันของแรงดันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ลูกถ้วยได้รับด้วย

1. ความชันของแรงดันอิมพัลส์ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุ เนื้อลูกถ้วยนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของลูกถ้วยแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อฉนวน ค่าความชันของแรงดันอิมพัลส์จะต้องมากกว่าค่าความชันวิกฤต S_c ที่ได้จากจุดตัดของเส้น $v - t$ วาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนกับเส้น $v - t$ แรงดันเบรกดาวน์หรือเจาะทะลุเนื้อฉนวน ในทางปฏิบัติจึงกำหนดให้ความชันของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีค่ามากกว่า $2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

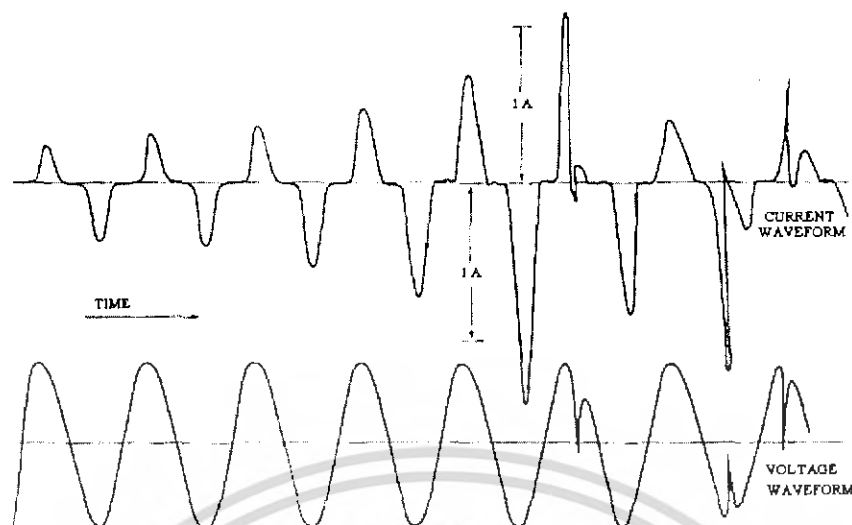
2. ขนาดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นมีผลต่อความคงทนของลูกถ้วยฉนวน การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นจะกำหนดขนาดแรงดันเป็นจำนวนเท่า หรือ per unit (p.u.) ของค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ของแรงดันที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ซ้ำลบ คือ $U_{b50\%}$ ของลูกถ้วยนั้นเช่น 3 p.u.แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นสามารถสร้างได้โดยการดัดรูปคลื่น แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ

2.6 การวัดค่ากระแสรั่วไหล [3]

การวัดค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจจะทำการวัดเป็นค่าเฉลี่ยหรือค่าประสิทธิผลหรือค่ายอดก็ได้ สภาวะปกติเมื่อลูกถ้วยฉนวนรองรับพิกัดแรงดันใช้งาน กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะคลื่นไซน์ จึงทำให้สามารถพิจารณาได้ทั้งค่าเฉลี่ย ค่าประสิทธิผลหรือค่ายอด โดยสามารถที่จะนำค่าต่างๆเหล่านั้นไปคำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการใช้งานลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน โดยที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนมีสภาพเปียกชื้นอันเนื่องมาจากฝนที่ตกเบาๆ หรือ หมอก น้ำค้าง รวมทั้งสภาพอากาศที่ชื้นในตอนเช้าตรู่ ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลจะทำให้เกิดสภาพแถบแห้งบนผิวลูกถ้วยฉนวนขึ้นมา อาจจะนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิวได้ ในกรณีดังกล่าวนี้กระแสรั่วไหลจะประกอบด้วยกระแสที่ความถี่พลังงานและกระแสรั่วไหลฮาโมนิกส์ที่ 3 เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นการวัดค่ากระแสรั่วไหลในเหตุการณ์ดังกล่าวนี้จึงไม่ค่อยจะเหมาะสมที่จะเป็นการวัดค่าประสิทธิผลหรือค่าเฉลี่ย เพราะการเกิดวาบไฟตามผิวจะเกิดจากค่ายอดของแรงดัน รวมทั้งค่ายอดของกระแสยังสามารถบอกถึงระดับของมลภาวะได้ดี การทำ Monitoring โดยการวัดค่ายอดกระแสรั่วไหลมีปรากฏอยู่ในงานวิจัยหลายๆชิ้น รวมทั้งจำนวนครั้งของการเกิดค่ายอดของกระแสจะสัมพันธ์โดยตรงกับการเสื่อมสภาพของการเป็นฉนวนอีกด้วย

73000

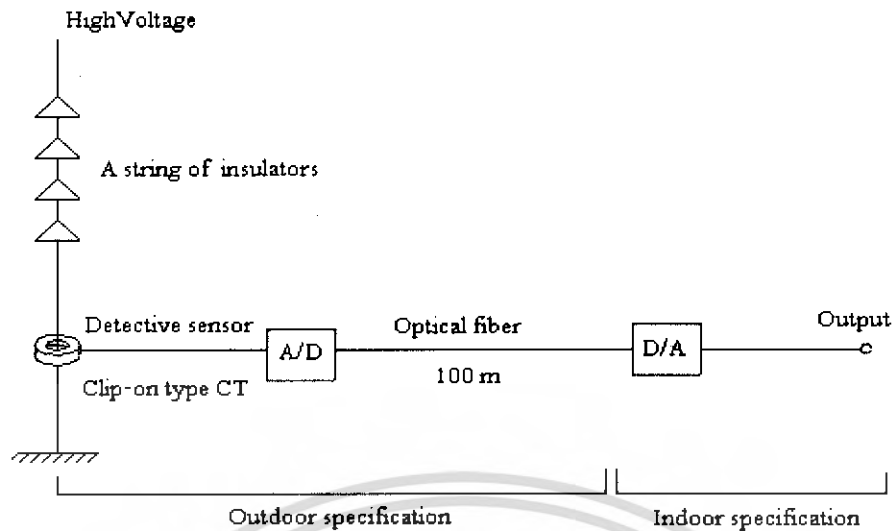
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันของลูกถ้วยฉนวนระบบ 750 kV [3]

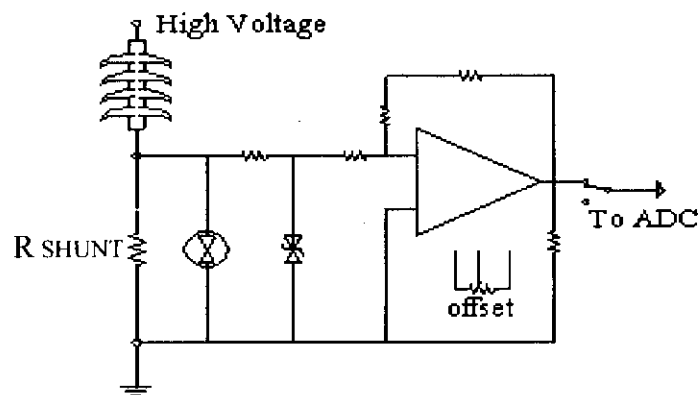
การตรวจจับสัญญาณกระแสรั่วไหลโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธี คือการตรวจจับด้วยหม้อแปลงกระแส (Current transformer ; CT) หรือตัวต้านทานชัณฑ์ (Shunt resistor) แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังนี้

1) การตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT จะใช้ CT เป็นตัวตรวจจับกระแสรั่วไหลจากลูกถ้วยฉนวนไปยังดินโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและเปลี่ยนสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดันโดยผ่านความต้านทานหรือเบอร์เดนของ CT และส่งต่อไปยังส่วนขยายสัญญาณเพื่อทำการวัดหรือบันทึกค่าดังแสดงในรูปที่ 2.10 วิธีนี้อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่อยู่ทางด้านเอาต์พุตของ CT จะไม่เกิดความเสียหายเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นทางด้านอินพุตของ CT การใช้งาน CT จะต้องคำนึงถึงการอิ่มตัวของแกนเหล็กซึ่งจะทำให้สัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของ CT ผิดเพี้ยนไปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกพิกัดกำลัง VA และอัตราส่วนกระแสอินพุตต่อกระแสเอาต์พุตของ CT ให้เหมาะสม สามารถที่จะตอบสนองในช่วงย่านวัดที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งค่าความสามารถในการแยกแยะ CT ซึ่งพิจารณาได้จาก Class ของ CT การตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT มีใช้งานทั่วไปโดยเฉพาะในกรณีที่อยู่พื้นที่ที่จะต้องตรวจจับกระแสรั่วไหลมีโอกาสเกิดวาบไฟตามผิว เช่น การตรวจจับกระแสรั่วไหลตลอดเวลา (Online monitoring) ของลูกถ้วยฉนวน หรือกับดักแรงดันเกิน [3]



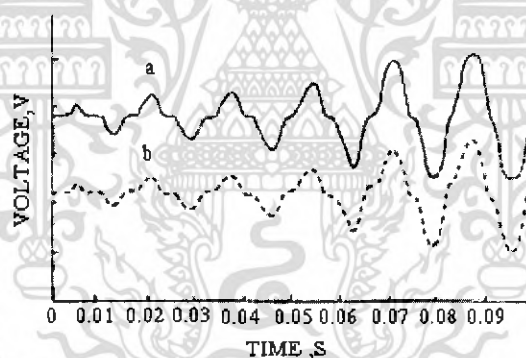
รูปที่ 2.10 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ CT เป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแส [3]

2) การตรวจจับกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทานชั้นที่จะใช้ตัวต้านทานที่มีค่าเหมาะสมต่ออยู่ทางด้านกราวด์ของลูกถ้วยฉนวน แล้วทำการวัดแรงดันคร่อมตัวต้านทานดังรูปที่ 2.11 วงจรตรวจจับแบบนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากการเกิดแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์เครื่องมือวัดในขณะที่เกิดวาบไฟตามผิว [3]



รูปที่ 2.11 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทาน [3]

ค่าความต้านทานของตัวต้านทานชนิดที่ใช้ในการวัดกระแสรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหลายประการเช่น ย่านของกระแสที่ต้องการวัด ตัวอย่างค่าความต้านทานที่ใช้ในงานวิจัยเรื่องการวัดกระแสรั่วไหลลูกถ้วยฉนวน มีอยู่หลายค่าเช่น 10 โอห์ม 30 โอห์ม 130 โอห์ม หรือแม้กระทั่ง 1 โอห์ม เป็นต้น รูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ได้จากตรวจจับด้วย CT และตัวต้านทานเปรียบเทียบกันดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นกระแสรั่วไหล(a) การตรวจจับด้วย CT(b) การตรวจจับด้วยความต้านทาน[3]

ประโยชน์ของการศึกษาเรื่องกระแสรั่วไหลนอกจากจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกายภาพของกระแสรั่วไหลซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นและความเสียหายของฉนวนลูกถ้วยฉนวน และสามารถที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและเลือกวัสดุที่เหมาะสมแล้ว การตรวจจับกระแสรั่วไหลอย่างต่อเนื่องสามารถที่จะนำไปใช้ในการป้องกันการเกิดวาทไฟตามฉนวนลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากสภาวะเปรอะเปื้อนได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างขนาดของกระแสรั่วไหลกับปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อน ทำให้สามารถที่จะรู้ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนหรือเปลี่ยนลูกถ้วยฉนวนเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนมีปริมาณมากพอที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดวาทไฟตามฉนวนได้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน [4]

สิ่งเปรอะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอก หรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของลูกถ้วยฉนวนมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดความไวไฟตามผิวได้ง่าย การเกิดความไวไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดความไวไฟตามผิว

2.7.1 สิ่งเปรอะเปื้อน [4]

1. ประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อน

การแบ่งประเภทของสิ่งเปรอะเปื้อนโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งาน ได้แก่ สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปรอะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ

1) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล ได้แก่ พวงเกลือทะเล (Sea salt หรือ Sodium chloride ; NaCl) การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้บนผิวลูกถ้วยฉนวน เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะด้วยกันคือ การสะสมแบบรวดเร็ว (Rapid pollution) เกิดขึ้นในกรณีที่มีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาเกลือทะเลเข้ามาเช่น พายุไต้ฝุ่น เป็นต้น และการสะสมแบบธรรมดา (Ordinary pollution) เป็นการสะสมที่ใช้เวลาค่อนข้างนานเกิดจากลมทะเลที่พัดเป็นฤดูกาล ตามปกติแล้วระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนจะลดลงไปเมื่อลึกลงไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ตามอาจจะพบเกลือทะเลที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลถึง 100 กิโลเมตรได้

2) สิ่งเปรอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณเขตอุตสาหกรรมจะเปรอะเปื้อนควันและเขม่าที่ปล่อยออกมาจากปล่องท่อไอเสีย ระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนชนิดนี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น สิ่งเปรอะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด มีส่วนผสมและองค์ประกอบทางด้านเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ

3) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย ทะเลทรายเป็นบริเวณที่สิ่งเปรอะเปื้อนสามารถที่จะสะสมบนผิวลูกถ้วยได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากปริมาณของฝนที่ตกเพียงเล็กน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งทะเล จะมีสิ่งเปรอะเปื้อนที่คล้ายๆกับสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทฝุ่น แต่สำหรับทะเลทรายที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั้นนอกจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทฝุ่นแล้วยังจะมีเกลือทะเลผสมอยู่ด้วย

4) สิ่งเปรอะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวไปแล้ว เช่น ฝ้า หรือ ฝุ่น ภูเขาไฟ หรือ ปุ๋ย อาจเกิดขึ้นโดยการฉัดพ่นให้กับต้นไม้ พืช ผัก หรือ การเผาไหม้ของวัสดุพืชต่าง ๆ

นอกจากนี้แล้วจากบทความบางฉบับ ได้กล่าวถึงสิ่งเปื้อนชนิดนี้โดยเน้นไปที่สิ่งเปื้อนจากฝุ่น (Dust contamination) โดยได้อธิบายว่าเกิดจากการพัดพาเอาทรายหรือฝุ่นที่เกิดจากดินไปเกาะติดลูกถ้วยฉนวน ระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อนจากฝุ่นค่อนข้างต่ำ องค์ประกอบของสิ่งเปื้อนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่

2. การวัดและการแบ่งระดับของความเปื้อน

ระดับของความเปื้อนนี้นั้นจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบมิติที่เหมาะสมของลูกถ้วยฉนวนและอาจจะนำไปใช้กำหนดระดับความเปื้อนที่จะใช้ในการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปื้อนจำลอง ก่อนที่จะนำลูกถ้วยฉนวนที่ผ่านการออกแบบไปติดตั้งใช้งานจริง มาตรฐาน IEC 815 ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการหาค่าและการแบ่งระดับของความเปื้อนดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การวัดค่าระดับความเปื้อน

การวัดค่าระดับความเปื้อนที่สถานที่ที่ติดตั้งลูกถ้วยฉนวน มีหลายวิธีดังนี้

- 1) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสิ่งเปื้อนที่รวบรวมโดยวิธี Directional gauges
- 2) การวัดค่าปริมาณการสะสมสิ่งเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนเทียบเท่ากับปริมาณเกลือ (NaCl) ซึ่งจะให้ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำสิ่งเปื้อนมาละลายน้ำที่มีปริมาณเท่ากันซึ่งจะเรียกวิธีนี้เรียกว่าการหาค่า ESDD (Equivalent salt deposit density)
- 3) การนำเอาข้อมูลทางสถิติจำนวนครั้งของการเกิดวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยที่มีความยาวแตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์
- 4) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงผิวของลูกถ้วยฉนวนตัวอย่าง
- 5) การวัดค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนขณะที่ได้รับแรงดันใช้งานปกติ (เป็นการหาค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา)

การวัดระดับความเปื้อนแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันกล่าวคือวิธีที่ 1 และ 2 สามารถทำได้โดยง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่วิธีที่ 1 นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลลักษณะช่วงเวลากการสะสมและระดับของความเปื้อนออกมาโดยตรง วิธีที่ 2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับของความเปื้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ผิวลูกถ้วยฉนวนมีความเปียกชื้น ความถูกต้องของการวัดทั้ง 2 วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่บ่อยในการวัด ถ้าการสะสมของสิ่งเปื้อนเกิดขึ้นไม่เร็วนัก ก็อาจจะทำการวัดเดือนละครั้ง หรือเว้นระยะห่างกว่านี้ แต่ถ้าการสะสมของสิ่งเปื้อนเกิดขึ้นรวดเร็วก็จะต้องทำการวัดถี่ขึ้น สำหรับวิธีที่ 3 นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีราคาแพง ข้อมูลที่ได้จะถูกต้องเฉพาะลูกถ้วยที่มีความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกับลูกถ้วยที่พิจารณา และใช้งานที่ระดับแรงดันใกล้เคียงกัน สองวิธีสุดท้ายต้องการแหล่งพลังงานและอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง วิธีการประเมินค่าระดับของความเปราะเปื้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่การวัดหาค่า ESDO การวัดหาค่าความต้านทานของผิว และการวัดหาค่ากระแสรั่วไหล

การหาค่าระดับความเปราะเปื้อนนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น IEC 815 ได้แนะนำให้พิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ ลักษณะของพื้นที่แต่ละแห่งที่สัมพันธ์กับระดับความเปราะเปื้อน และข้อมูลของเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานลูกถ้วยจนวน ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญมาทำการวิเคราะห์

2.2 การแบ่งระดับความเปราะเปื้อน

ตามมาตรฐาน IEC 815 ได้แบ่งระดับความเปราะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หมายเหตุ 1) บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของ กากธัญพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับความเปราะเปื้อน อาจอยู่ในระดับสูง

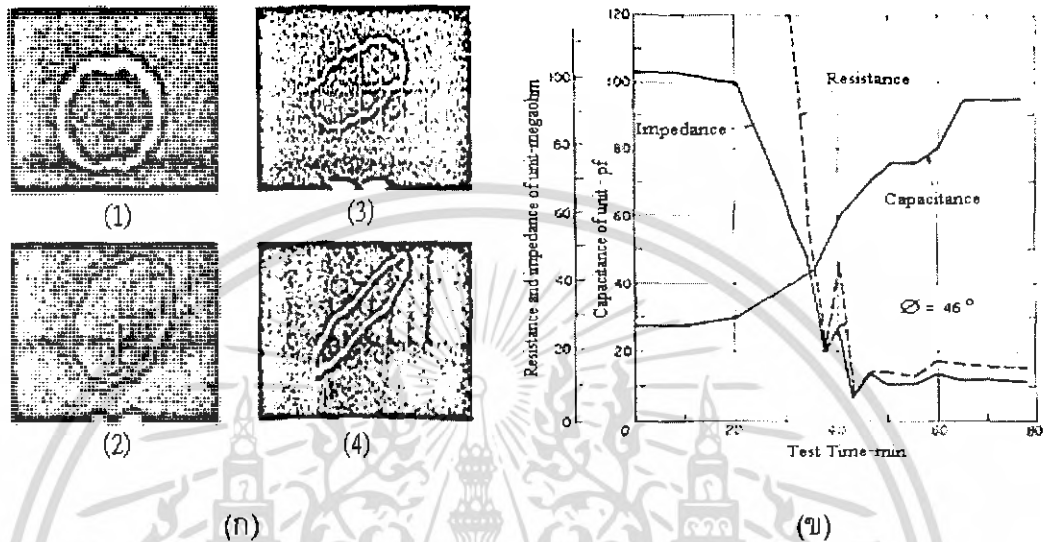
2) บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

2.7.2 การเกิดควาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน

การศึกษากลไกการเกิดควาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนได้มีการศึกษามานานกว่า 40 ปี แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะเข้าใจได้อย่างถ่องแท้ ความพยายามที่จะทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวจากอดีตที่ผ่านมา เริ่มต้นจากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกายภาพของการเกิดควาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน และได้มีความพยายามที่จะเสนอรูปแบบของสมการและโมเดลขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว

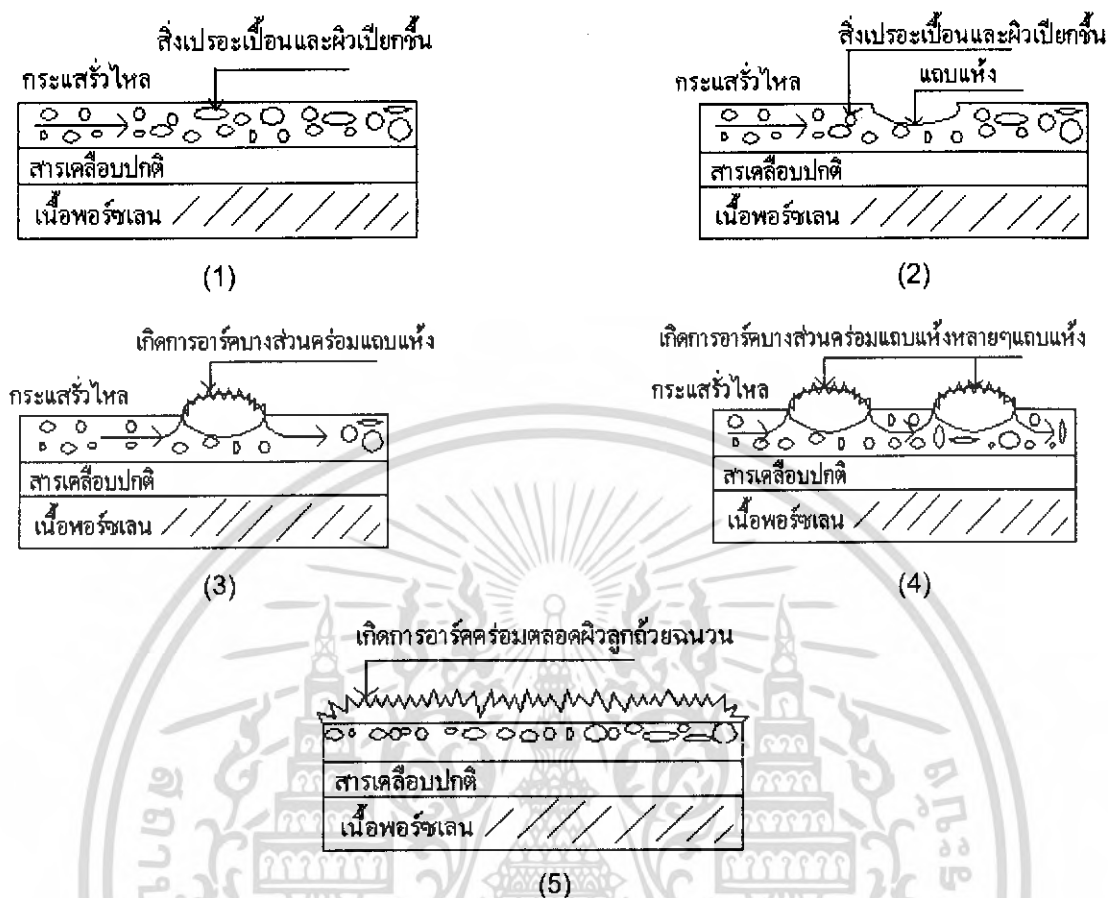
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเกิดวาทไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วย ฉนวนได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบาๆ สภาพนำไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของผิวของลูกถ้วยฉนวน (Surface impedance) จะเปลี่ยนสภาพจากค่าปาสซีฟในตอนเริ่มต้นไปเป็นแบบบริชชีฟเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ลูกถ้วยฉนวน (ก) รูปลิสซาจัว (Lissajou figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวาทไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกของอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวน

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวลูกถ้วยโดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เรียกว่าแถบแห้ง (Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความชื้นของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความชื้นของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาว์นของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความชื้นของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จต่อไปอีก การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อกันได้ ก็จะเกิดวาทไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน ขั้นตอนของการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนของการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน

2.7.3 แนวทางแก้ไขการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน

วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวน

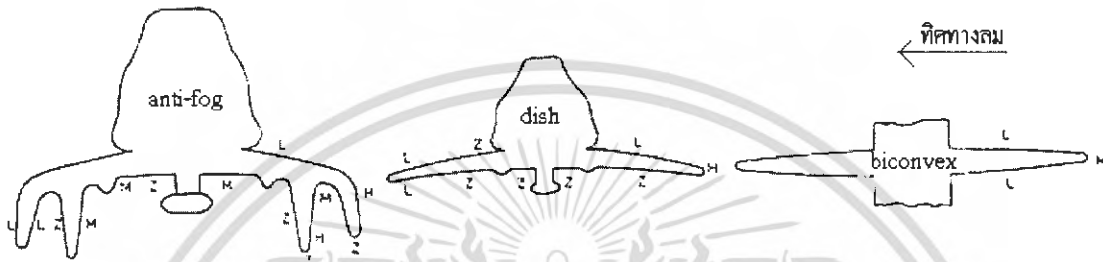
การป้องกันการเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยโดยวิธีการลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนได้แก่การทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาที่กำหนด หรือ การใช้ลูกถ้วยฉนวนประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อน (Aerodynamic profiles)

1) การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามความระยะเวลาที่เหมาะสม การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนนั้นเป็นวิธีดั้งเดิม จะทำเมื่อลูกถ้วยฉนวนเริ่มสกปรก สามารถทำได้ทั้งในขณะที่ดับกระแสไฟฟ้า (De-energize) และขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า (Hot line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ (Conductivity) ที่ใช้ในการฉีด ระยะห่างและแรงดันของน้ำ (Minimum distance and nozzle pressure) ทิศทางลม (Wind direction) ตลอดจนลักษณะการติดตั้งของลูกถ้วย

2) การออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น จากผลการศึกษาการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนที่มีรูปร่างต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่าลูกถ้วยฉนวนแบบ Biconvex มีสิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะน้อยที่สุด รายละเอียดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.15 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆ ของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทควีน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน

โดยที่

- H คือ บริเวณที่มีการจับเกาะหนาแน่น
- M คือ บริเวณที่มีการจับเกาะปานกลาง
- L คือ บริเวณที่มีการจับเกาะเบาบาง
- Z คือ บริเวณที่ไม่มีการจับเกาะหรือมีการจับเกาะที่น้อยมาก

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ [5]

ความเร็วลม	ลูกถ้วยแบบ Anti- fog	ลูกถ้วยแบบ Disk	ลูกถ้วยแบบ Biconvex
9 m/s	630	390	40
1.5 m/s	150	10	น้อยมาก

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยฉนวนคือการทำความสะดวกตัวเองโดยธรรมชาติ เมื่อมีลมพัดผ่านหรือฝนตก ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti-fog นั้นออกแบบให้มีระยะรั้วสูงชันแต่จะพบว่าโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีได้สูงสุด ลูกถ้วยแบบ Disk นั้นโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีมากกว่าลูกถ้วยแบบ Biconvex แต่ก็มีคุณสมบัติในการทำความสะดวกตนเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน [4]

สภาพนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิว จะเป็นผลให้ลูกถ้วยฉนวนมีโอกาสที่จะเกิดวาทไฟตามผิวได้ง่าย การป้องกันไม่ให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าที่มีลักษณะฟิล์มนำไฟฟ้ากระจายอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน สามารถทำได้โดยการเคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Water repellent หรือ hydrophobic material) เช่น พวกร Silicon 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 มีคุณสมบัติดูดซับสิ่งเปราะเปื้อน โดยเฉพาะสิ่งเปราะเปื้อนที่เป็นของแข็ง เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว Silicone paste จะอึดตัวไม่สามารถที่ดูดซับสิ่งเปราะเปื้อนได้อีก จะต้องล้างสิ่งเปราะเปื้อนและสารเคลือบออกและทำการเคลือบใหม่ โดยทั่วไปการเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone pastes ในแต่ละครั้ง ลูกถ้วยฉนวนสามารถใช้งานได้บริเวณเปราะเปื้อนประมาณ 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 มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายสี สามารถผสมให้เจือจางเพื่อให้เหมาะสมในการทาหรือพ่นเคลือบ การเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone elastomer ปกติแล้วจะมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร Silicone elastomer จะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างน้ำกับผิวที่เคลือบไว้มีค่าน้อย ในสภาพฝนที่ตกปรอยๆ หยดน้ำที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนจะรวมตัวกันเป็นรูปทรงกลมกลิ้งตกไปจากผิวลูกถ้วยฉนวนเหมือนกับน้ำที่กลิ้งบนใบบอน หรือจะแยกเกาะเป็นเม็ดๆ ไม่เชื่อมต่อกันทำให้ทางเดินของกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนไม่ต่อเนื่องและลดน้อยลงโอกาสที่ลูกถ้วยฉนวนจะเกิดวาทไฟตามผิวจึงมีค่าน้อยลง

3) Silicone rubber insulator เป็นลูกถ้วยฉนวนที่ทำด้วยยางซิลิโคน มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง แต่เมื่อติดตั้งใช้งานกลางแจ้ง จะต้องรับแสงแดด โอโซน หรือฝนตกโดยตรง หรือในกรณีที่มีการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนประเภทไอเกลือและสารเคมีบนผิวลูกถ้วยฉนวนทำให้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำลดลง คุณสมบัติและความสะดวกในการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาวิจัย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.16 การเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุไม่ชอบน้ำ (ก) การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งาน 3 ปีในบริเวณเปรอะเปื้อน (ข) หยดน้ำทรงกลมบนผิวลูกถ้วยฉนวนอย่างซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวของลูกถ้วยฉนวนอย่างซิลิโคน

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับลักษณะสมบัติการใช้งานลูกถ้วยฉนวนชนิดยางซิลิโคนมีการทำการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 จนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของยางซิลิโคนอันได้แก่ มีน้ำหนักเบา แข็งแรง สามารถที่จะออกแบบเป็นรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้งานลูกถ้วยฉนวนอย่างซิลิโคนมีการเผยแพร่อยู่ในบทความวารสารทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าชั้นนำของโลก เช่น IEE หรือ IEEE อยู่เป็นจำนวนมาก

3.การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน [4]

การเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเกิดได้ยากขึ้นถ้าลูกถ้วยฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวสูงขึ้น อาจจะทำให้ได้โดยการเพิ่มระยะรั้ว(Leakage distance) ของลูกถ้วยฉนวนหรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

1) การเพิ่มระยะรั้ว (Leakage distance) ของลูกถ้วยฉนวนทำได้โดยการติดตั้ง Creepage extender หรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีระยะรั้วมากขึ้น การเพิ่มระยะรั้วของลูกถ้วยฉนวนให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั้วไหลเกิดขึ้นน้อยลงเช่น ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti fog มาตรฐาน IEC 815 ได้แนะนำค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV) ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อนโดยเป็นฟังก์ชันของระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยที่ ระยะรั้วคือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโทรด และอาจจะมีการพิจารณาปัจจัยอย่างอื่นอีกเช่น ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่าน

อากาศหรือระยะที่วัดตามแนวเกิดอาร์ก และ ความยาวปกติ (Nominal length) คือ ระยะที่วัดระหว่างจุดศูนย์กลางของรูหรือช่องของฝาครอบโลหะด้านบนและด้านล่างของลูกถ้วยฉนวน

ตารางที่ 2.3 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน

ระดับของความเปรอะเปื้อน	ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV)
เล็กน้อย	16
ปานกลาง	20
สูง	25
สูงมาก	31

โดยที่บริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การดูแลบำรุงรักษา และบริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรพิจารณาใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้นโดยจะขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนหลังจกติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบเคลือบลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย

2) การใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้มีกระแสรั่วไหลตามผิวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งอันเป็นสาเหตุการเกิดวาบไฟตามผิวได้โดยง่าย

2.7.4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวนเพื่อใช้งานในสภาพเปรอะเปื้อน [4]

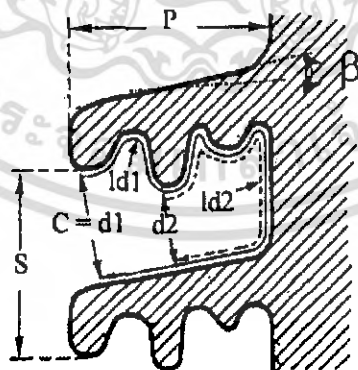
1. เงื่อนไขการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน

เงื่อนไขการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนจะพิจารณาถึงประเภทของลูกถ้วยฉนวน และสภาพแวดล้อมที่จะนำลูกถ้วยฉนวนไปติดตั้งใช้งาน ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำมาใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อนควรจะได้รับ การออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย ปัญหาการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ

1) ระดับของความเปราะเปื้อนและชนิดของสิ่งเปราะเปื้อนรวมทั้งสภาพแวดล้อมบริเวณที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือทิศทางการพัดของลม โดยทั่วไประดับของความเปราะเปื้อนจะพิจารณาเป็นค่า ESDD ค่า ESDD ที่จะนำมาพิจารณานั้นจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดทดสอบมาเป็นระยะเวลาานพอสมควร ค่าที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางด้านสถิติ ค่าสูงสุดของ ESDD จะนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อการออกแบบ เมื่อพิจารณาประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าในกรณีสิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลเกลือทะเลจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิว และในกรณีสิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย พวกวัตถุเฉื่อย (Inert material) จะมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Withstand voltage) ของลูกถ้วยฉนวนโดยตรง

2) ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน การออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดแรงดันเกิน ค่าแรงดันที่จะใช้ออกแบบเพื่อให้เป็นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนนั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีระดับเผื่อ (Margin) สูงกว่าแรงดันเฟสใช้งานคือประมาณ 10-20% กรณีการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ (Transient overvoltage) ความคงทนต่อแรงดันเกินจะมีค่าลดลง ถ้าผิวของลูกถ้วยฉนวนมีความเปราะเปื้อน

3) รูปร่างของลูกถ้วยฉนวน กำหนดด้วยการขึ้นรูปของวัสดุในกระบวนการผลิต รูปร่างและขนาดของลูกถ้วยฉนวนจะสัมพันธ์โดยตรงกับการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย การทำความสะอาดตัวเอง โดยอาศัยลมและฝน รวมทั้งการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย IEC 815 ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบปีกของลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปีกของลูกถ้วยฉนวนจะต้องออกแบบให้มีค่าต่างๆ คือ

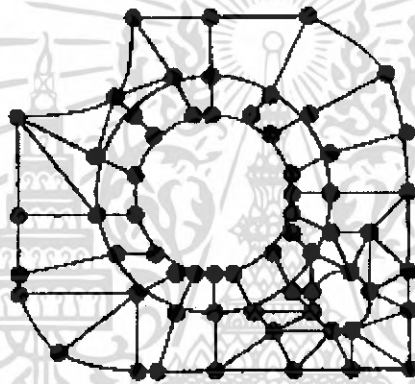
C	\geq	30 mm	เพื่อหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อของสายฝนระหว่างปีก
S/P	\geq	0.8	เพื่อให้สามารถเกิดการทำความสะอาดตัวเองเนื่องจากการสะท้อนของน้ำฝนระหว่างปีก
L_{dx}/d_x	$<$	5	เพื่อป้องกันการรวบไฟจากครีบบนขั้วมายังปีกล่าง
β	$>$	5°	เพื่อการชำระสิ่งสกปรกได้ดีขึ้น
C.F.	\leq	4	สำหรับสภาวะเปราะเปื้อนสูงมาก
P.F.	$>$	0.7	สำหรับสภาวะเปราะเปื้อนสูงมาก
เมื่อ			
C	คือ	ระยะทางที่วัดจากปลายครีบนอกสุดของปีกบนลงมาถึงปีกล่าง	
S	คือ	ระยะทางที่วัดจากปลายครีบนอกสุดของปีกบนลงมายังปลายครีบนอกสุดของปีกล่าง	
P	คือ	ระยะทางที่วัดจากคอดันออกมายังขอบนอกสุดของปีก	
L_{dx}	คือ	ระยะตามผิวที่วัดระหว่างจุดปลายระยะ d_x	
d_x	คือ	ระยะทางที่วัดจากปลายครีบบนขั้วของปีกบนลงมาถึงปีกล่าง	
β	คือ	มุมเอียงของปีกบนที่ทำกับแนวระดับ	
C.F.	คือ	อัตราส่วนระหว่าง ระยะรั้ว ต่อ ระยะอาร์กแห่ง	
I	คือ	ระยะตามผิวที่วัดระหว่างจุดปลายระยะ S	
P.F.	คือ	$(2P + S) / I$	

2.8 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศ และการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่างๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก ความสามารถของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักออกแบบทั่วไปอย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวังผู้ใช้

ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างเพียงพอ

2.8.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element: fem) คืออะไร ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กัน ตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วย เอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการดังกล่าวบ่งชี้เป็นนัยว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ไหลมาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่าความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น, ความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผลเฉลย และยิ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์รูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบการกระจายเชิงเส้นตรง (linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น หากค่าอนุหภูมิที่จุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ และหาเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ให้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้วอนุหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอนุหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.8.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า เริ่มแรกในปี 1943

ได้นำเอาทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างในวิศวกรรมโยธายังมิได้นำมาใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า ต่อมาได้มีการค้นคว้า และนำมาใช้งานหลายแขนง จนกระทั่งในปี 1986 ได้มีผู้ประยุกต์นำเอาหลักการมาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic, em) เป็นงานพื้นฐานไปสู่ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และอื่นๆ อีกมากมายอย่างการแก้สมการคลื่น (wave equation)

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) ในแบบต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์ที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุดทีเดียว

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (interpolation functions)” ซึ่งการคำนวณจะต้องทำหลายขั้นตอน และใช้เวลามากเพื่อกระทำการที่เข้าไปเข้ามาด้วยเหตุนี้ผู้ใช้งานจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพื่อให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

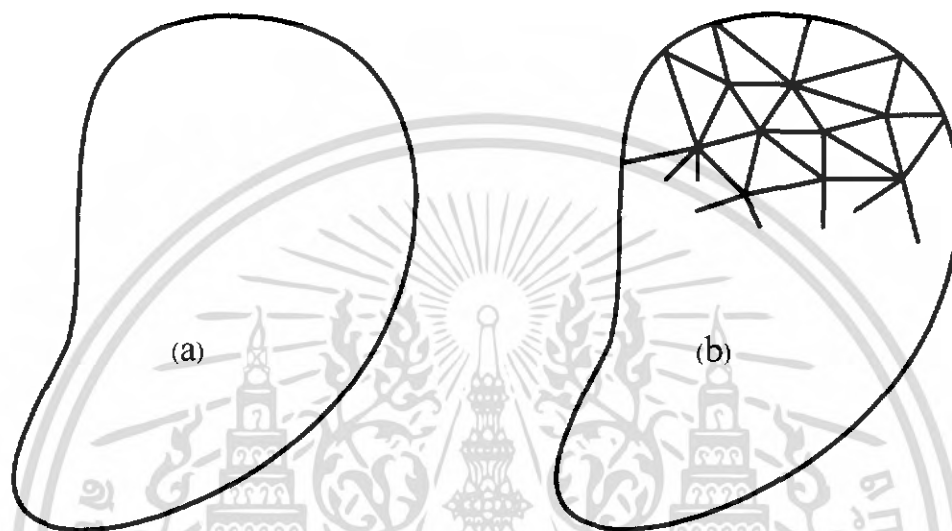
2.8.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์ วิศวกรมีความจำเป็นมากที่จะต้อง

ทำความเข้าใจกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสิ่งหนึ่งที่สำคัญจำเป็นต้องทราบก็คือลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆ เพื่อจะนำไปออกแบบตัวอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ดังนั้นการที่จะนำเอาขอบข่ายการวิเคราะห์แบบใดมาใช้ต้องให้มีความเหมาะสมกับลักษณะงาน SHARP รุ่น EL - 5020 ในโหมดการอินทิเกรต (integrate) จะพบว่าเมื่อป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าลิมิตบน และลิมิตล่างแล้ว เครื่องก็จะถาม ค่า n ? นั่นหมายถึงการแบ่งรูปสี่เหลี่ยมออกเป็น ส่วนเล็กๆ จากนั้นเครื่องก็จะนำผลการคำนวณในแต่ละรูปมารวมกัน หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็จะคล้ายกันคือ ทำการแบ่งรูปทรงโครงสร้างที่ยาก และซับซ้อนออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆที่เรียกว่า “เอลิเมนต์ (element)” ตามชนิดของการวิเคราะห์ภายในขอบเขตของชิ้นงาน โดยทั่วไปนิยมการวิเคราะห์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ ชิ้นส่วนเล็กๆ ในแต่ละรูปนั้นจะต้องไม่ทับซ้อนกันพิจารณาดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ

- เมื่อ (a) คือ ขอบเขตของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์
 (b) คือ การแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นโครงข่าย (mesh)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.19 (a) เป็นขอบเขตงานหรือวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งในระบบหนึ่งนั้นประกอบไปด้วย

1) ระบบ (system) ลักษณะทางกายภาพของงานหรือวัสดุที่ผู้ใช้งานจะนำมาวิเคราะห์อาจเป็นของแข็ง (solids), ของเหลว (liquids), ก๊าซ (gases), อากาศ (air) หรือ ส่วนผสมอันเนื่องมาจากวัสดุสองชนิด

2) โดเมน (domain) ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตของระบบ ลักษณะส่วนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะของจุดที่ต่างกัน

3) สมการบังคับ (governing) ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะบอกให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆในลักษณะที่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพจากมวล โมเมนตัม หรือพลังงาน ก็ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการเช่น สมการอนุพันธ์การสมดุลง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เงื่อนไข (loading condition) เงื่อนไขจากข้อกำหนดภายในจาก แรง (force), อุณหภูมิ (temperature), กระแส (current), สนาม (field) และอื่นๆ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนแล้วมีผลกระทบซึ่งกันและกันทั้งสิ้น เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบ การกระตุ้นจาก โหลดภายในขอบเขตที่เกิดขึ้นกับผลกระทบอื่น นั้นเป็นเงื่อนไขที่เราเรียกว่า “boundary condition”

สำหรับรูปที่ 2.19 (b) เป็นการแบ่งขอบเขตงานออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า “เอลิเมนต์ (element)” การพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อยจากจุดที่ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน จากนั้นก็หาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูปเมตริกซ์ พิจารณาหาสัมประสิทธิ์เมตริกซ์ (coefficient matrix) ให้อยู่ในลักษณะของพิกัด (x, y, z) หรือเรียกว่า “สัมประสิทธิ์โกลบอล (global coefficient)”

จากนั้นก็แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) หรือเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) เพราะปัญหาที่สำคัญส่วนมากที่ศึกษาในทางวิศวกรรม จะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ ในลักษณะที่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง เช่น เวลา, ระยะทาง, อุณหภูมิ, ศักย์ไฟฟ้า สมการ และเงื่อนไขที่ต้องการหาจะอยู่ในรูปของโหนด (x, y) 2 มิติ หากเป็นโหนด (x, y, z) ก็คือ ระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาผู้ใช้งานจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดที่ไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง

สมการ และเงื่อนไขที่ต้องการหาจะอยู่ในรูปของโหนด (x, y, z) ก็คือระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาผู้ใช้งานจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดที่ไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง

การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์นั้นจะต้องใช้ประสบการณ์ในการแบ่งให้เกิดความเหมาะสมกับงาน หากแบ่งน้อยเกินไป ค่าที่ได้ออกมา ก็จะผิดพลาดมาก หากแบ่งมากไปถึงแม้จะได้ค่าที่ละเอียดจริง แต่ก็ใช้ระยะเวลาในการคำนวณยาวนานทำให้เสียเวลา ฉะนั้นการแบ่งจะต้องให้เหมาะสมในการนี้ จึงพัฒนาเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ในการคำนวณเพื่อความรวดเร็ว และผลของคำตอบที่เที่ยงตรงยิ่งขึ้น

2.8.4 สมการเชิงอนุพันธ์

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้า สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยเริ่มจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ดังแสดงดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (2.18)$$

โดย ρ_v แทนความหนาแน่นของประจุ (Volume charge density) และ D แทนความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) ดังนี้

$$D = \epsilon E \quad (2.19)$$

โดย ϵ แทนค่าเพอร์มิตติวิตีของกลาง และ E แทนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field intensity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า V โดย

$$E = -\nabla V \quad (2.20)$$

แทนค่าในสมการก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.21)$$

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

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.22)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาของการหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า โดยปกติจะประกอบด้วย

1) การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า V_0 ที่มีค่าคงที่ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่งโดยที่ V_s แทนค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนั้น

$$V_s = V_0 \quad (2.23)$$

2) การกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง
ดังนี้

$$\nabla V_s = 0 \quad (2.24)$$

ตารางที่ 2.4 ข้อดี และข้อเสียของไฟไนต์เอลิเมนต์

ข้อดี	ข้อเสีย
<p>1. สามารถใช้ได้กับรูปทรงได้หลายรูปทรงหรือรูปทรงที่ยุ่งยากโดยใช้การแบ่งเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ ในการแทนค่าทั้ง ขอบเขต (boundary)</p> <p>2. สามารถใช้ได้กับขอบเขตปัญหาทั้งแบบเชิงเส้น (linear) และแบบไม่เชิงเส้น(non linear) ได้</p> <p>3. สามารถใช้ได้กับปัญหาที่เป็นสารเนื้อเดียวและสารเนื้อผสม</p> <p>4. สามารถใช้กับ higher-order element ได้</p> <p>5. สามารถใช้ได้กับปัญหาขอบเขตได้เกือบจะทุกกรณี</p>	<p>1. ในการ simulation รูปทรงที่ยุ่งยาก สลับซับซ้อนนั้น เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการ simulation ต้องมีหน่วยความจำ (ram) ที่มากพอในการสำรองข้อมูลในการคำนวณ (โดยเฉพาะรูป 3 มิติ)</p> <p>2. ในการวาดรูปทรงของวัตถุที่มีความซับซ้อนนั้นจะมีเส้นโค้งจำนวนมาก จะทำให้การแบ่งขอบเขต (boundary) มีมาก เป็นผลให้การสร้างโครงข่าย (mesh) มากตามไปด้วย จึงอาจเกิดการผิดพลาดในการ simulation ได้ง่าย และเวลาในการคำนวณจะช้ามากถ้ามีจำนวนโครงข่ายมาก</p> <p>3. ในการตรวจสอบรูปทรงที่มีความซับซ้อนนั้นสามารถทำได้ยาก</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน และการออกแบบลูกถ้วยฉนวน

ในการออกแบบห้องทดสอบเพื่อทดสอบลูกถ้วยฉนวนนั้นจะออกแบบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 507 โดยที่การจำลองสภาวะเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507 มีการจำลองอยู่ 2 วิธีคือการจำลองความเปราะเปื้อนแบบไอเกลือ และการจำลองความเปราะเปื้อนแบบฝุ่นละออง โครงการนี้จะเป็นการออกแบบสร้างห้องทดสอบเพื่อจำลองสภาวะความเปราะเปื้อนแบบไอเกลือ ส่วนประกอบหลักคือ ห้องทดสอบและอุปกรณ์จ่ายไอเกลือ ในการออกแบบห้องทดสอบขึ้นมานั้นเพื่อทดสอบและศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของฉนวนลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อนเพื่อประโยชน์ในการออกแบบลูกถ้วยหรือเลือกใช้ลูกถ้วยให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน

3.1 การออกแบบห้องทดสอบ

การออกแบบห้องทดสอบมีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ ห้องทดสอบและอุปกรณ์จ่ายไอเกลือ

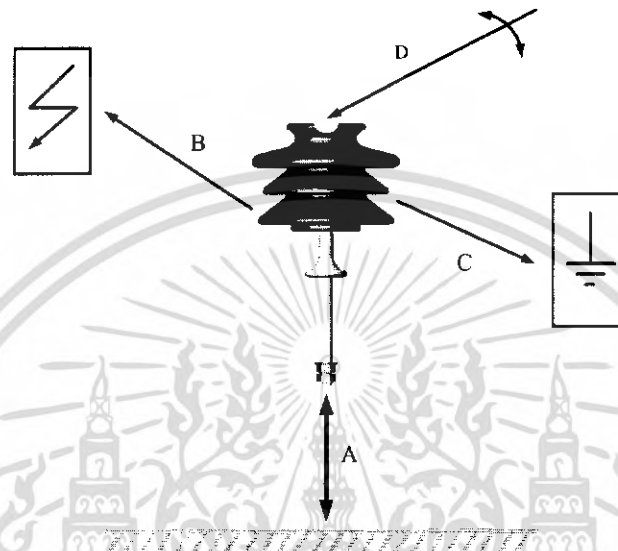
3.1.1 การออกแบบห้องทดสอบ

การออกแบบห้องทดสอบนั้นต้องคำนึงถึงค่าต่างๆซึ่งจะต้องนำมาหาขนาดของห้องทดสอบ มีดังนี้

1. ระยะห่างปลอดภัยในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน
2. ระยะความสูงของเสาหัวฉีดและอุปกรณ์ยึดลูกถ้วยฉนวน

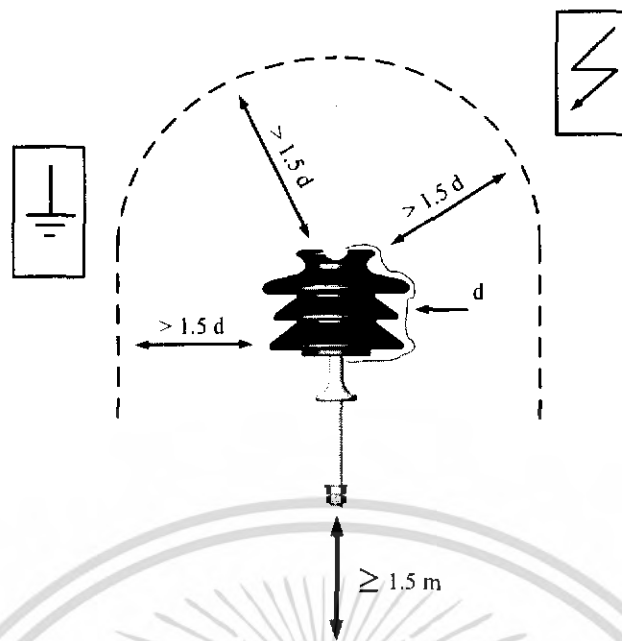
1. ระยะห่างปลอดภัยในการทดสอบลูกถ้วย

การออกแบบห้องทดสอบนั้นต้องคำนึงถึงระยะที่จะทดสอบลูกถ้วยด้วยดังนี้ ระยะดังกล่าวจะช่วยให้การทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากจะไม่มีผลของสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์ใกล้เคียง และช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัย



รูปที่ 3.1 ระยะที่ต้องการในการทดสอบลูกถ้วย

- หมายเหตุ A คือค่าระยะที่ลูกถ้วยห่างจากพื้นไม่ควรเกิน 1.5 m
 B คือค่าระยะห่างระหว่างลูกถ้วยถึงอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลง
 C คือค่าระยะห่างระหว่างลูกถ้วยถึงวัสดุหรืออุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับกราวด์ เช่น รั้วโลหะ หรือ Capacitor
 D คือค่าของมุมที่นำสายไฟฟ้าแรงสูงเข้า



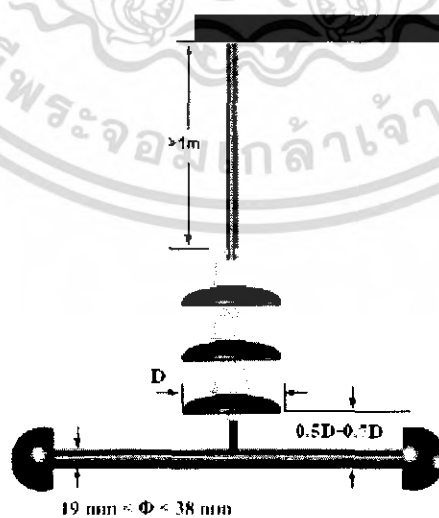
รูปที่ 3.2 ระยะต่างๆที่ต้องการในการทดสอบลูกถ้วย (ระยะ A B C) (การทดสอบในสภาวะผิวแห้ง)

หมายเหตุ ระยะ A ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร

ระยะ B และ C ควรมีระยะมากกว่า $1.5d$ (d คือระยะวางไฟตามผิวเส้นแดงตามรูป)

2. ระยะความสูงของบาร์แขวนลูกถ้วยและเสาหัวฉีด

ความสูงของห้องทดสอบต้องคำนึงถึงความสูงของบาร์แขวนลูกถ้วยและความสูงของเสาหัวฉีดไอเกลือ บาร์แขวนลูกถ้วยแสดงดังรูป



รูปที่ 3.3 ระยะห่างที่ต้องคำนึงในการทดสอบของลูกถ้วยแขวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

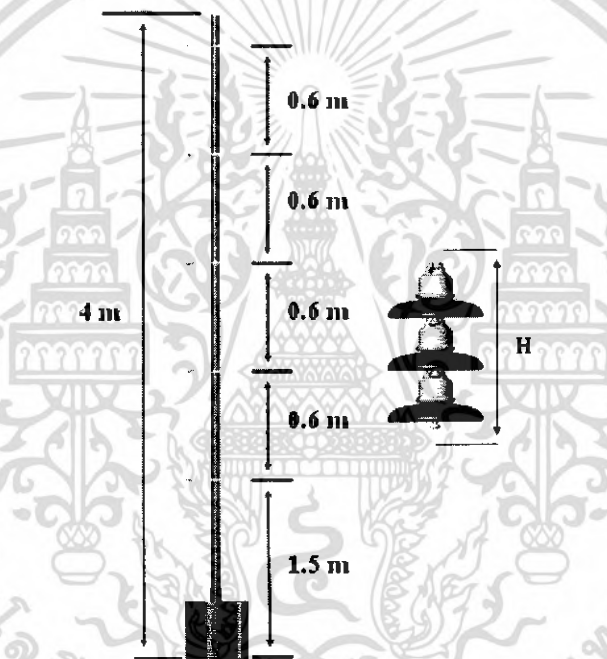
การสร้างเสาและหัวฉีดที่ใช้กับการทดสอบแบบ Salt fog

การสร้างเสานั้นเราต้องรู้จำนวนและระยะห่างของหัวฉีดก่อนจากมาตรฐาน IEC 507 จำนวนหัวฉีด $N = (H / 0.6) + 3$

เมื่อ $N =$ จำนวนหัวฉีด

$H =$ ความสูงของลูกถ้วย

พิจารณาลูกถ้วยมีความสูง 1.2 เมตร เมื่อแทนในสูตรจะได้ $N = (1.2 / 0.6) + 3 = 5$ หัวฉีด จากนั้นคำนวณหาขนาดความสูงของเสาจากมาตรฐานนั้นบอกไว้ว่าความสูงของหัวฉีดหัวที่ต่ำสุดจะต้องสูงจากพื้น 1.5 เมตรและความสูงของหัวฉีดถัดมาห่างกัน 0.6 เมตร ซึ่งจากการคำนวณออกมามีทั้งหมด 5 หัวห่างกัน 0.6 เมตร จะได้ความสูงของเสาทั้งหมด 3.9 เมตร เราจึงออกแบบให้เสาสูง 4 เมตร ดังรูปด้านล่าง

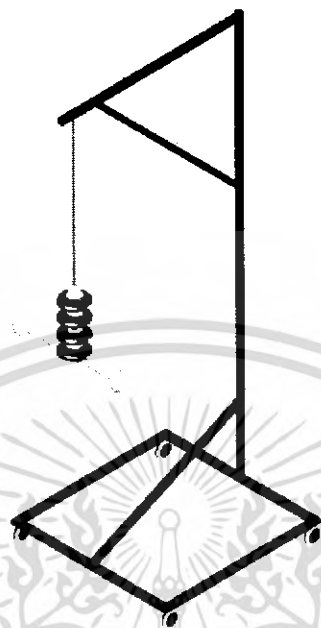


รูปที่ 3.4 ขนาดเสาและความห่างของหัวฉีดที่ติดตั้งที่เสา

ซึ่งจากการออกแบบเสาดังกล่าวจะได้ความสูงของเสา คือ 4 เมตร ต้องเผื่อความสูงของห้องทดสอบให้สูงกว่าเสา เพราะว่าเสาต้องอยู่ในห้องทดสอบ ในการออกแบบความสูงของกระโจมนี้จึงออกแบบให้มีขนาดความสูง 4.5 เมตร

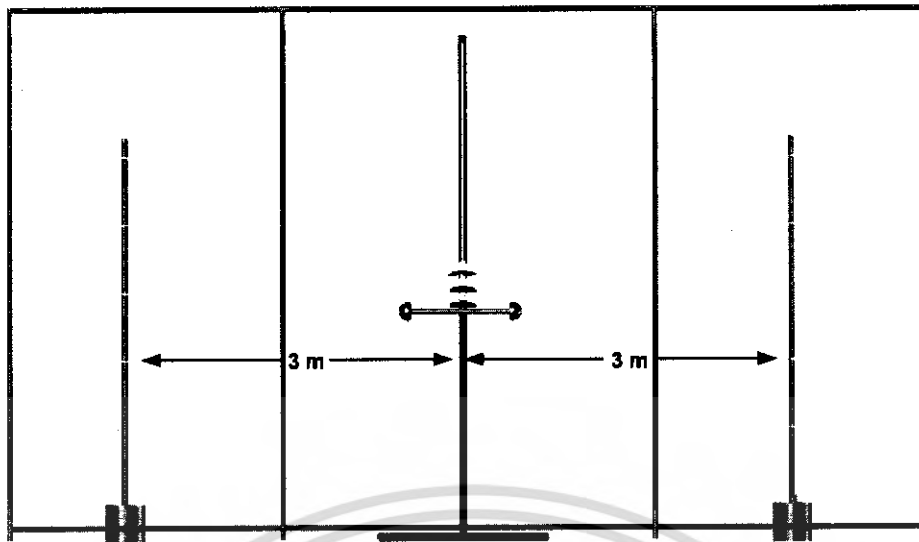
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบความกว้างของห้องทดสอบต้องคำนึงลักษณะของวงจรและอุปกรณ์ของวงจรที่ประกอบสร้างในห้องทดสอบ ได้แก่ เสาหัวฉีดและชุดแขวนลูกถ้วยแสดงตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.5 ชุดแขวนลูกถ้วย

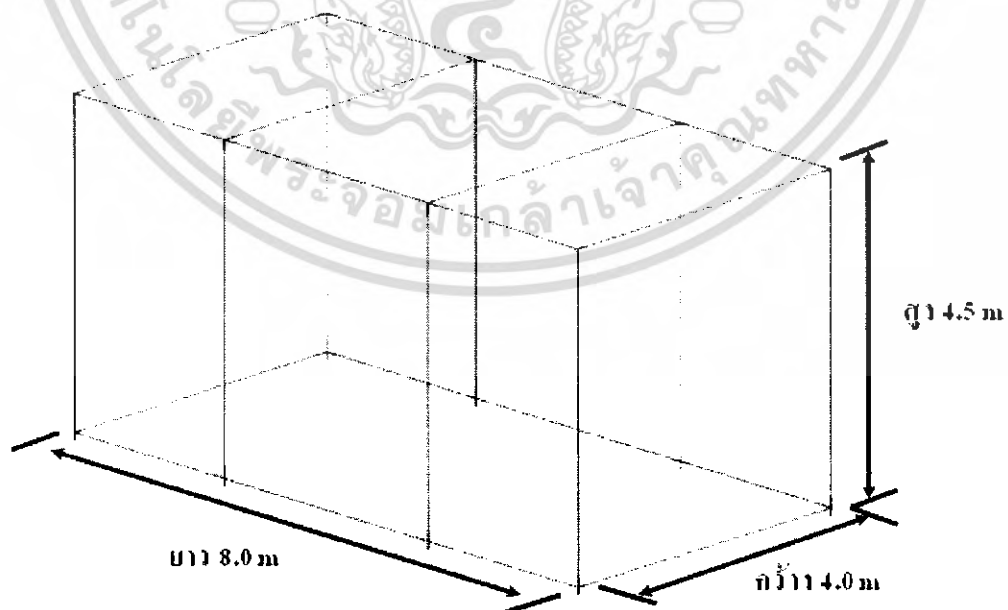
การคำนวณความกว้างของห้องทดสอบ ซึ่งจะพิจารณาจากชุดติดตั้งชุดแขวนลูกถ้วยขณะทำการจัดเตรียมวงจรมีขนาดความกว้าง 2.7 เมตร แต่ต้องเผื่อเนื้อที่ความกว้างภายในเพื่อสะดวกต่อพื้นที่ทางเดินจึงเผื่อขนาดความกว้างในการออกแบบเป็น 4 เมตร สำหรับระยะความยาวของห้องทดสอบต้องคำนึงถึงความห่างของเสากับวัตถุทดสอบซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 507 จากมาตรฐานกำหนดไว้ว่าระยะห่างระหว่างวัตถุทดสอบกับเสาต้องห่างกัน 3 เมตร และวัสดุทดสอบอยู่กึ่งกลางของห้องทดสอบ ซึ่งในการทดสอบใช้เสาหัวฉีด 2 ต้นเสาทั้งสองเสห่างจากวัสดุทดสอบด้านซ้ายและขวาด้านละ 3 เมตรซึ่งมีระยะทั้งหมดห่าง 6 เมตรและมี ความกว้างของดินเสาจึ่งเผื่อระยะความกว้างเป็น 8 เมตร



รูปที่ 3.6 การวางวัสดุทดสอบในห้องทดสอบและระยะห่างระหว่างวัสดุทดสอบและหัวฉีด

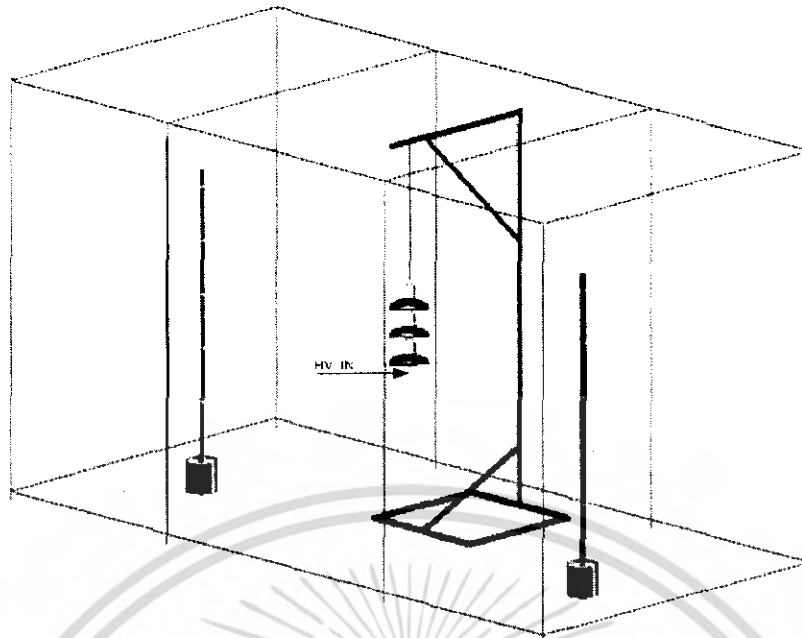
ขนาดและโครงสร้างของห้องทดสอบ

จากการออกแบบที่ได้กล่าวมานั้นจะได้ขนาด ความกว้าง ความยาวและความสูงมา คือ กว้าง 4 เมตร ความยาว 8 เมตร สูง 4.5 เมตร โดยการออกแบบนี้จะทำการออกแบบให้ห้องทดสอบมีความสามารถถอดประกอบได้เพื่อสะดวกในการเก็บเพื่อไม่ให้เปลืองเนื้อที่เมื่อไม่ใช้งานและเพื่อสะดวกเมื่อนำไปทดสอบที่ต่างสถานที่และวัสดุที่นำมาทำเป็นห้องทดสอบนั้นจะใช้เป็น สเตนเลส เพื่อให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนของน้ำและเกลือเพื่อไม่ให้เกิดสนิม



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของห้องทดสอบ

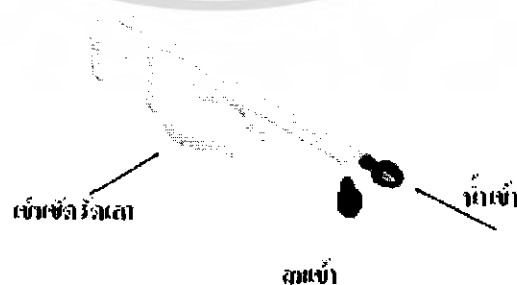
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การวางวัสดุและอุปกรณ์ทดสอบในห้องทดสอบ

3.1.2 การออกแบบหัวฉีดในการทดสอบแบบ Salt fog

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างห้องทดสอบเสร็จแล้วนั้นขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบการสร้างหัวฉีดแบบ Salt fog จะมีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ ท่อน้ำ และ ท่อลมจากมาตรฐาน IEC 507 ซึ่งกล่าวไว้ว่าท่อน้ำนั้นจะติดตั้งด้านล่างและท่อลมเป่าจะติดตั้งด้านบนเพื่อให้สามารถฟ่นละอองไอเกลือได้ตามต้องการ ขนาดของท่อน้ำที่ปลายหัวฉีดต้องมีขนาด 2 ± 0.02 มิลลิเมตร และท่อลมที่ปลายหัวฉีดต้องมีขนาด 1.2 ± 0.02 มิลลิเมตรตั้งรูปด้านล่าง



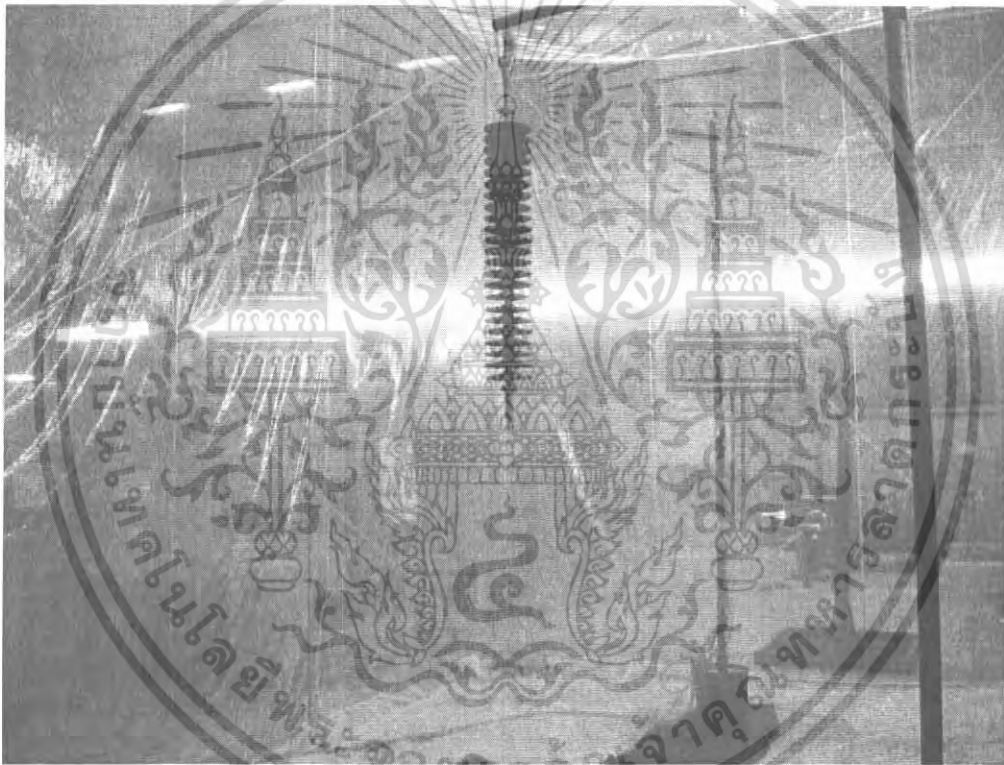
รูปที่ 3.9 ขนาดของท่อหัวฉีดและหัวฉีดที่ได้ทำการออกแบบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างห้องทดสอบ

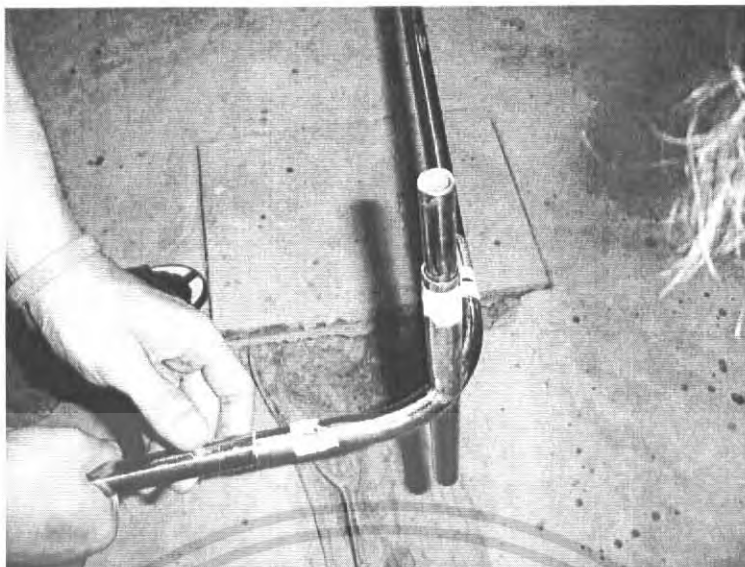
3.2.1 การสร้างห้องทดสอบ

จากที่ได้ทำการออกแบบมานั้น จะนำมาสร้างห้องทดสอบโดยจะสร้างห้องทดสอบให้มี ความกว้าง 4 เมตร ความยาว 8 เมตร ความสูง 4.5 เมตร โดยการออกแบบนี้จะทำการออกแบบให้ห้องทดสอบมีความสามารถถอดประกอบได้เพื่อสะดวกในการเก็บเพื่อไม่ให้เปลืองเนื้อที่เมื่อไม่ใช้และเพื่อสะดวกเมื่อนำไปทดสอบที่ต่างสถานที่และวัสดุที่นำมาทำเป็นห้องทดสอบนั้นจะใช้เป็น สแตนเลส เพื่อให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนของน้ำและเกลือเพื่อไม่ให้เกิดสนิมและมีผ้าใบพลาสติกคลุมเพื่อให้ไอน้ำไม่กระจายออกไปซึ่งได้ทำการสร้างออกมาดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.10 ห้องทดสอบที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา

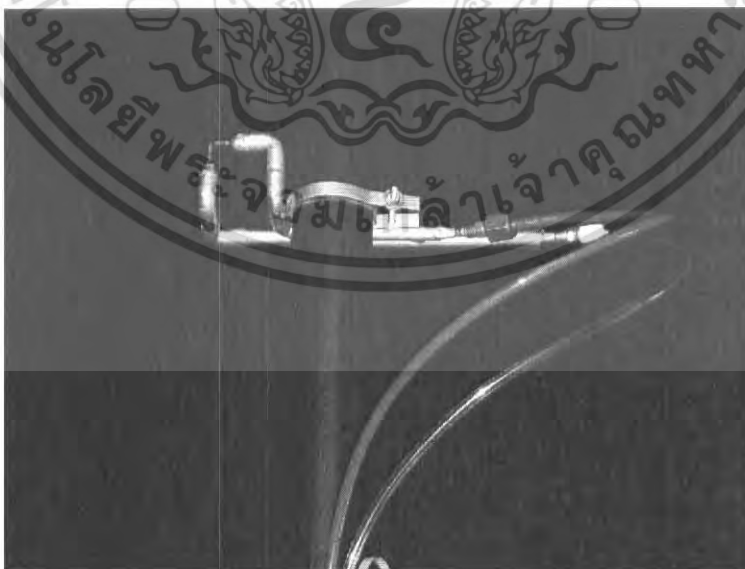
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ข้อต่อของห้องทดสอบซึ่งสามารถถอดประกอบได้

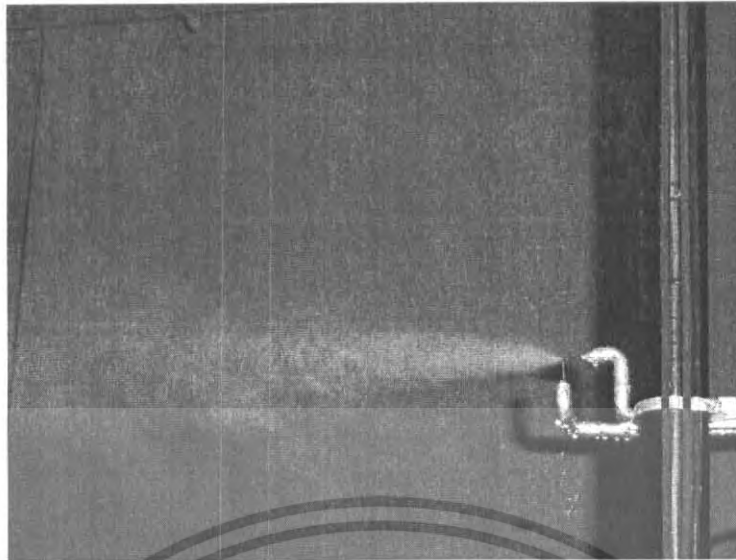
3.2.2 การสร้างหัวฉีด Salt fog

จากที่ได้ทำการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 507 นั้นได้ทำการสร้างหัวฉีดออกมาให้ได้ตามมาตรฐานโดยจะใช้วัสดุที่เป็นท่อทองแดงมาทำเป็นหัวฉีดโดยมีการตัดแปลงมาจากท่อทองแดงที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศโดยมาทำการเชื่อมและตัดให้ได้หัวฉีดออกมา มีการเชื่อมต่อให้สามารถต่อเข้ากับสายยางที่บอสนลมและน้ำเข้ามาในห้องทดสอบโดยมีการทำเป็นจุดเชื่อมต่อให้สามารถถอดประกอบได้และออกแบบให้เชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงเส้นเพื่อให้สามารถยึดกับเสาทดสอบได้



รูปที่ 3.12 หัวฉีดที่ได้ทำการสร้างตามแบบมาตรฐาน IEC 507

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 การทดสอบหัวฉีด

3.2.3 การสร้างโครงสร้างรองรับหัวฉีด

โครงสร้างรองรับเสาดัดน้ำ สูง 4 เมตร และที่โคนเสานั้นจะยึดอยู่กับถังหล่อปูนไว้ทำให้สามารถถอดประกอบได้ซึ่งทั้งตัวถังและเสาเหล็กนั้นจะทำการทาสีกันสนิมไว้



รูปที่ 3.14 ฐานของโครงสร้างหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบลูกถ้วยแขวนที่ใช้ในสภาวะเปรอะเปื้อน

การออกแบบลูกถ้วยแขวนที่ใช้ในสภาวะเปรอะเปื้อนนั้นจะต้องคำนึงถึงผลของสภาวะเปรอะเปื้อนจะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวต่ำลง และเกิดกระแสรั่วไหลเป็นผลทำให้ลูกถ้วยเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่ายเมื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน ฉะนั้นการออกแบบต้องมีลักษณะพิเศษคือต้องคำนึงถึงผลกระทบของสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้ และออกแบบให้ลดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนโดยออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยแขวนให้มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนได้ยากขึ้น และลดขนาดกระแสรั่วไหลโดยเพิ่มระยะรั้วของรูปร่างลูกถ้วยแขวน ในการออกแบบจะออกแบบโดยอาศัยข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 และใช้โปรแกรม SolidWorks ออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยแขวนและโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การกระจายแรงดันและสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบ

- 1) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบใช้งานกับระบบ 33 kV ที่สภาวะเปรอะเปื้อน (ใช้ลูกถ้วยแขวน 4-5 ลูก) ดังนั้นพิกัดแรงดันที่ออกแบบให้มีความยาวเท่ากับลูกถ้วยต้นแบบ 2 ลูกต่อกัน แรงดันต่อลูกถ้วยที่ออกแบบจึงเท่ากับ $33\text{kV}/\sqrt{3} = 20\text{kV}$
- 2) เลือกค่าระยะรั้วจากตารางที่ 3.1 โดยเลือกออกแบบให้ใช้งานกับระดับความเปรอะเปื้อนสูงมาก

ตารางที่ 3.1 ระดับความเปรอะเปื้อน

ระดับความเปรอะเปื้อน	ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV)
เล็กน้อย	16
ปานกลาง	20
สูง	25
สูงมาก	31

- 3) หาค่า D_m (ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวน) เพื่อจะนำค่า D_m ที่ได้ไปเลือกค่า K_d ซึ่งเป็นตัวประกอบแก้ไข

$$D_m = (D_{e1} + D_{e2} + 2D_i) / 4 \quad (3.1)$$

โดยที่

- D_{e1} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกใหญ่
- D_{e2} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกเล็ก
- D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k_d คือ ตัวประกอบแก้ไข (correction factor) ; $k_d = 1$ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวน (D_m) < 300 มิลลิเมตร

4) ทหาระยะ Minimum nominal creepage distance ตามสมการที่ 3.2

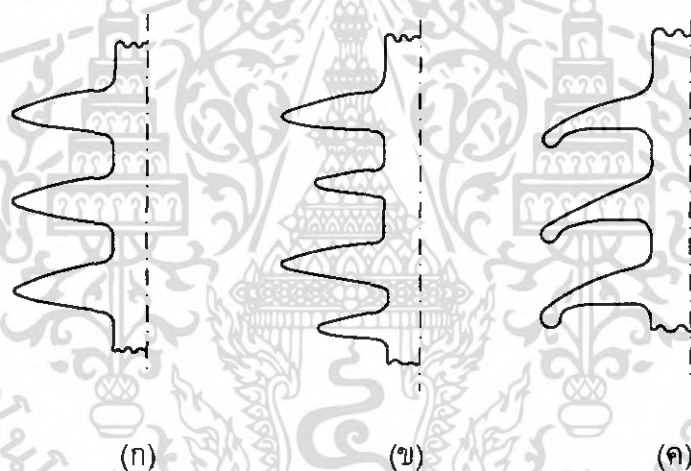
$$(L_{nc})_{min} = (L_{sc})_{min} \times U_m \times K_d \quad (3.2)$$

โดยที่	$(L_{nc})_{min}$	คือ	minimum nominal creepage distance
	$(L_{sc})_{min}$	คือ	Minimum specific creepage distance
	U_m	คือ	highest system voltage phase-to-phase for the equipment

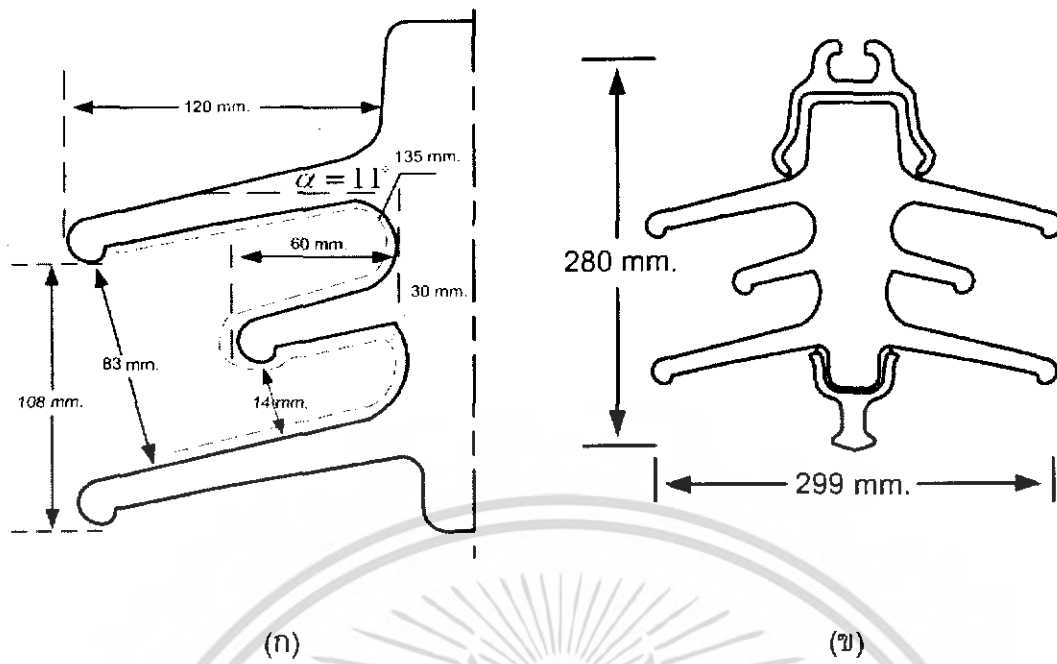
ดังนั้น $(L_{nc})_{min} = 680 \text{ mm}$

เลือกออกแบบ $(L_{nc})_{min}$ ที่ 709 mm

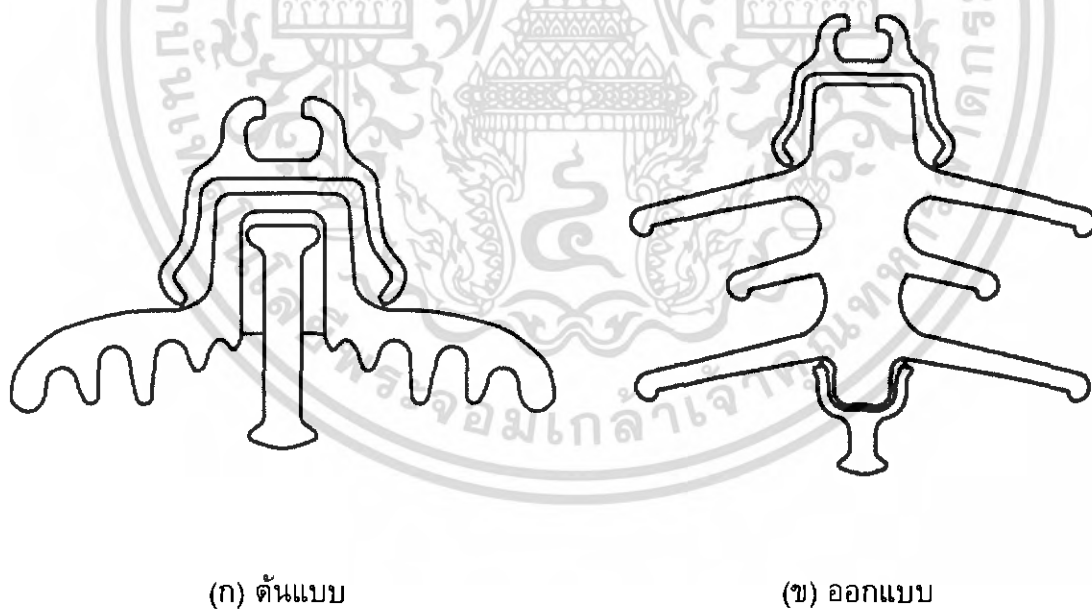
5) เลือกแบบปีกของลูกถ้วยแขวน และออกแบบ



รูปที่ 3.15 รูปแบบของปีกประเภทต่าง ๆ โดยที่ (ก) สิ่งเปราะเป็อนมีโอกาสที่จับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ (ข) มีปีกสั้นมาเสริมสลับกับปีกยาว เพื่อทำหน้าที่ชดเชยระยะรั้วที่หายไป ปีกแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกแบบ ก (ค) สิ่งเปราะเป็อนมีโอกาสจับเกาะได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกชนิดแบบอื่น ๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักมีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.16 ภาพสเกตของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ลูกถ้วยแขวนปีกสลับ ความยาวที่แสดงในแบบเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบลูกถ้วยแขวนดันแบบที่มีใช้งานและลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบ

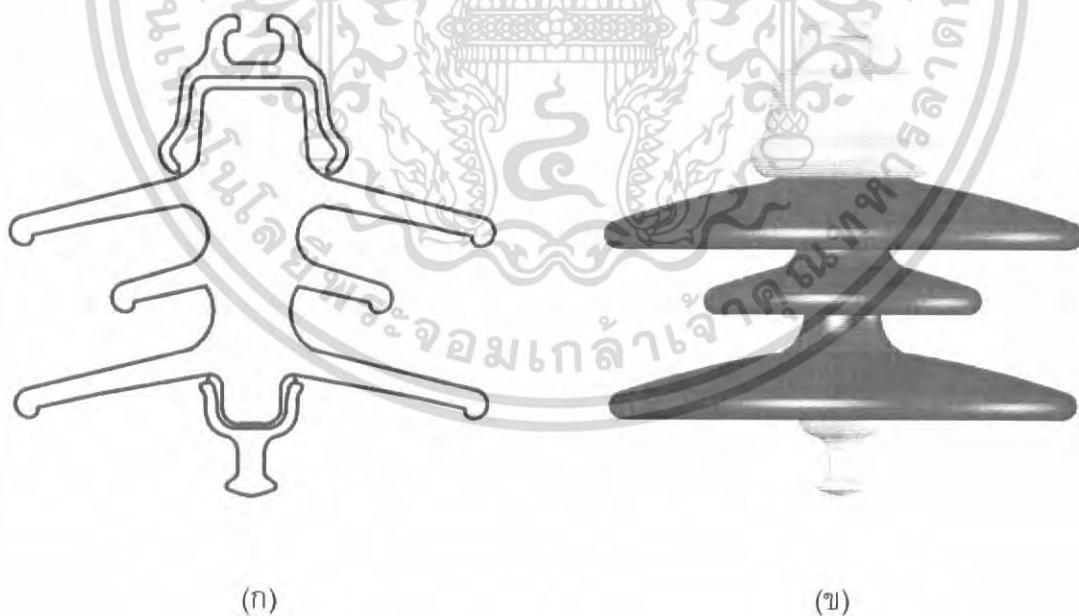
ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 [6]

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	108 mm
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	0.87
Ld/d	น้อยกว่า 5	$Ld_1/d_1 = 4.5, Ld_2/d_2 = 4.87$
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	60 mm
α	มากกว่า 5 องศา	11 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	2.05
P.F.	มากกว่า 0.7	0.73

หมายเหตุ มุม α เท่ากับ 16 องศาได้มาจากผลการจำลองในภาคผนวก ก

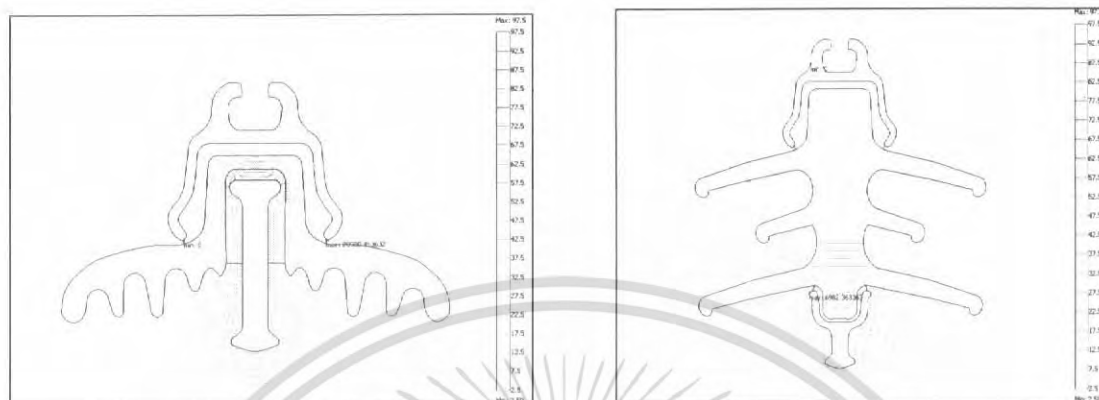
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ

	ค่าต้นแบบ (mm)	ค่าที่ออกแบบ (mm)
ระยะรั้ว	680	709

**รูปที่ 3.18** ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ 2D, 3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) วิเคราะห์การกระจายแรงดันและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน
ที่ออกแบบ



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.19 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ
(ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

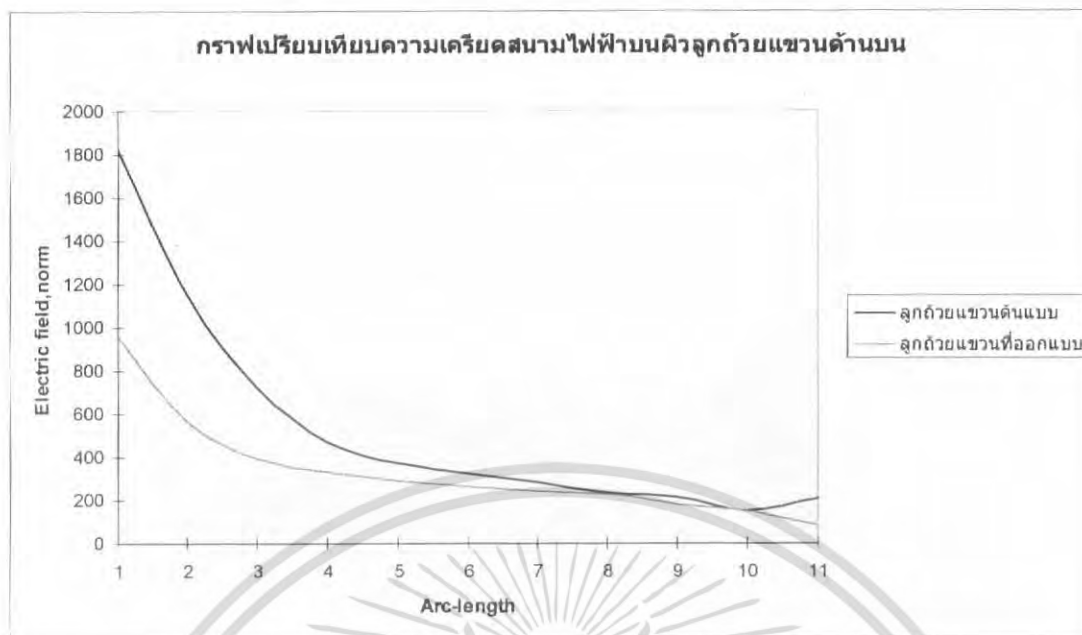


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.20 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ
(ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขวนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขวนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ

3.3.2 การวิเคราะห์ผลการออกแบบ

ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ ออกแบบให้มีรูปทรงที่สิ่งเปราะอะเป็อนจับเกาะได้ยากขึ้นและทำความสะอาดตัวเองได้ และออกแบบให้มีระยะรั้วมากขึ้น เพื่อลดขนาดของกระแสรั้วไหล และออกแบบให้เนื้อฉนวนมีความยาวมากขึ้นเพื่อให้เกิดการเฉาะทะลุได้ยากขึ้นและจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปีกรอบลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบมีค่าน้อยกว่าลูกถ้วยแขวนต้นแบบ

บทที่ 4

การทดสอบลูกถ้วยฉนวน

เมื่อทำการออกแบบและสร้างห้องทดสอบสภาวะเปราะเป็นแบบแบบ salt fog เสร็จสิ้นแล้วจึงได้ทำการตรวจสอบและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในสภาวะผิวลูกถ้วยสะอาด สภาวะผิวลูกถ้วยเปราะเป็น อ้างอิงมาตรฐาน IEC 507, ANSI C 29.1-1976 [8,9]

4.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) สารละลายเกลือ

มาตรฐาน IEC 507 กำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือและความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือและความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร และความหนาแน่นของสารละลายตามมาตรฐาน IEC 507 [8]

ส่วนผสมระหว่าง เกลือ/น้ำ กรัม/ลิตร	ค่าความนำไฟฟ้า S/m
2.5	0.43
3.5	0.60
5	0.83
7	1.15
10	1.6
14	2.2
20	3.0
28	4.1
40	5.6
56	7.6
80	10
112	13
160	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางเลือกค่าที่ใช้ในการทดสอบ 4 ระดับในการทดสอบอ้างอิงตรง ส่วนผสมของเกลือตามค่าที่มาตรฐาน IEC 507 กำหนดค่า แล้วนำส่วนผสมที่ได้ไปวัดค่าความนำมีค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความนำที่ใช้ในการทดสอบ

เกลือ(กรัม)	น้ำ(ลิตร)	ค่าความนำไฟฟ้า(s/m)
7	1	1.17
28	1	3.97
80	1	9.88
160	1	17.8

จากผลการวัดค่าที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างซึ่งอาจเกิดจากชนิดของเกลือที่ใช้หรือน้ำที่ใช้ในการผสมสารละลายแตกต่างจากมาตรฐาน



รูปที่ 4.1 ชนิดของเกลือที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนของการผสมสารละลายกับน้ำ

2) ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการทดสอบ

ลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยแขวน 52-3 จำนวน 4 ลูก ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้งานที่ระดับแรงดันที่ใช้งานในสภาวะเปราะเป็นนในระบบ 33kV และมีค่าเหมาะสมกับหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4.3 ลักษณะของลูกถ้วย 52-3 ที่ใช้ในการทดสอบ

3) หม้อแปลงทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV, 50 mA

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

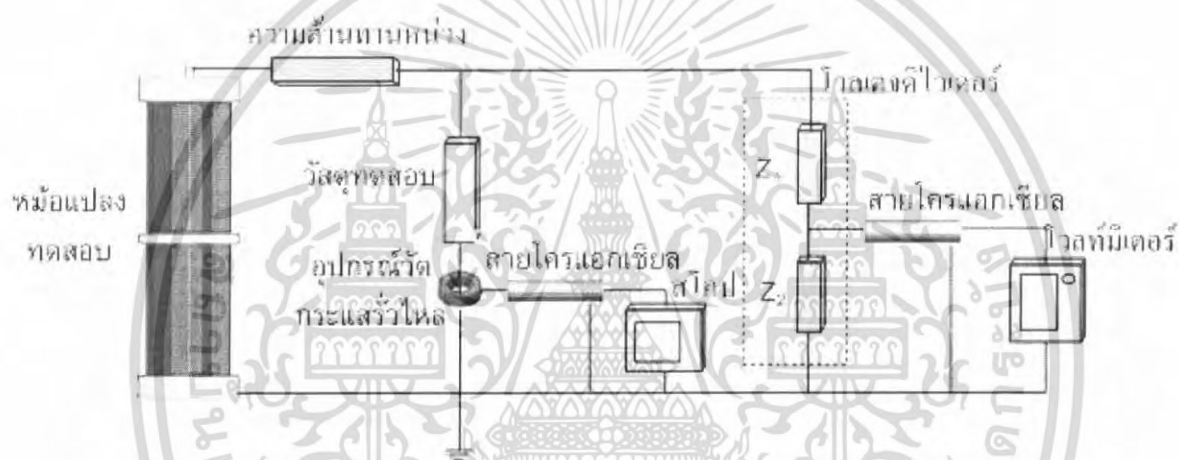
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เครื่องมือตรวจวัดสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

สิ่งที่ต้องการวัดจากการทดสอบนี้คือกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนขณะเริ่มเกิดโคโรนาและพฤติกรรมการเกิดโคโรนาซึ่งจะใช้เครื่องมือวัดดังต่อไปนี้

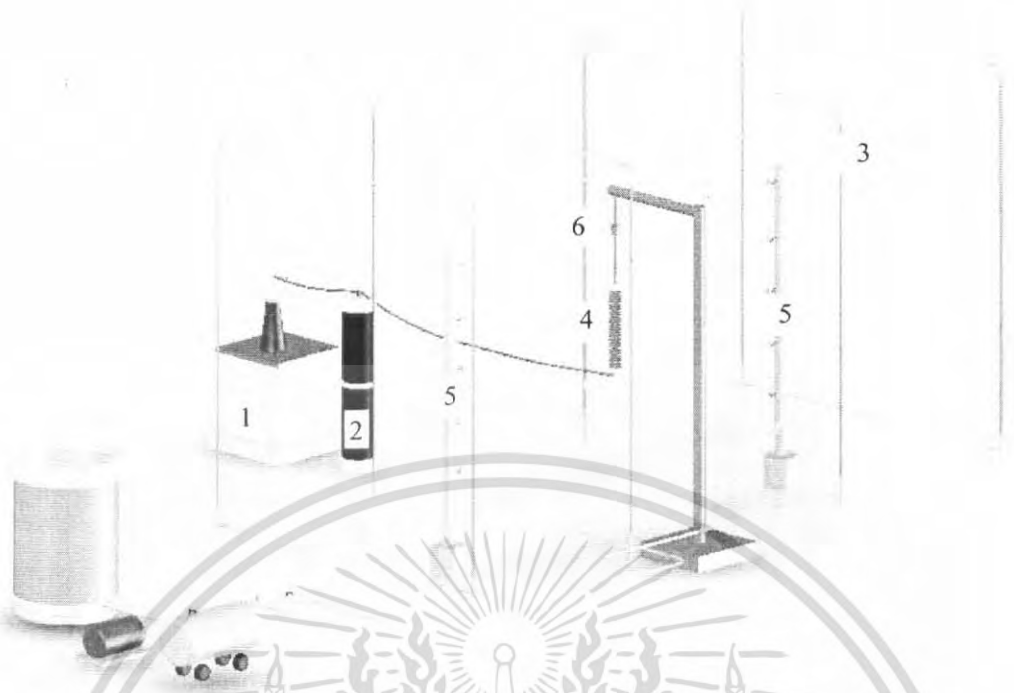
1. กล้องโคโรนา
2. หม้อแปลงกระแส (CT)
3. Oscilloscope
4. Volt meter

4.2 วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

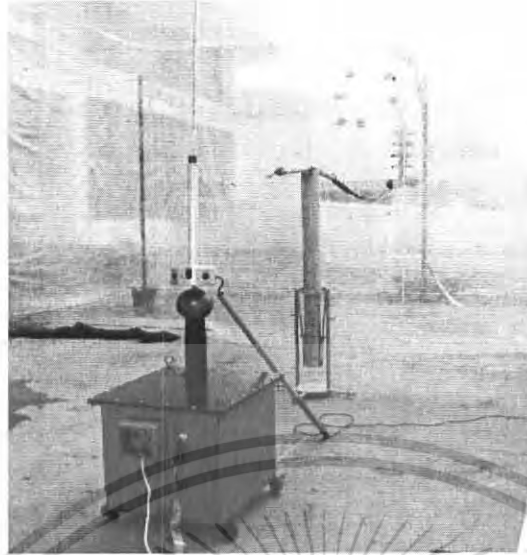


รูปที่ 4.5 ภาพจำลองของห้องทดสอบด้วยวิธี salt fog และวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อน

โดยมีอุปกรณ์ดังนี้

- 1) หม้อแปลงทดสอบ
- 2) โวลต์จดีไวเดอร์
- 3) ห้องทดสอบ
- 4) วัสดุทดสอบ
- 5) หัวฉีดแหล่งจ่ายไอเกลือ
- 6) หม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบจริง

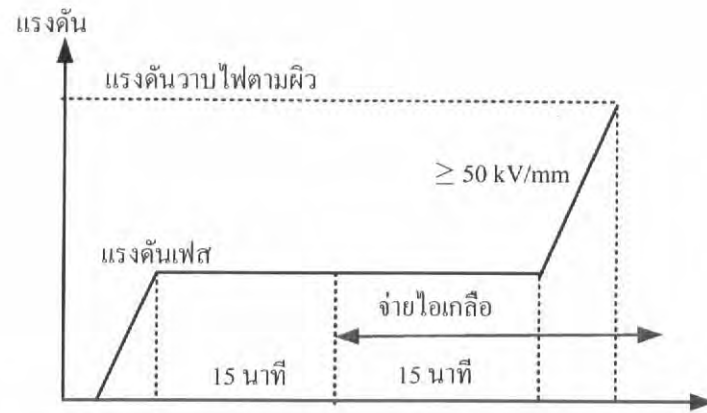
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อวงจรดังรูปที่ 4.5 และทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI [9] เหมือนกับการทดสอบความทนอยู่ใต้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง และตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 507

2) บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

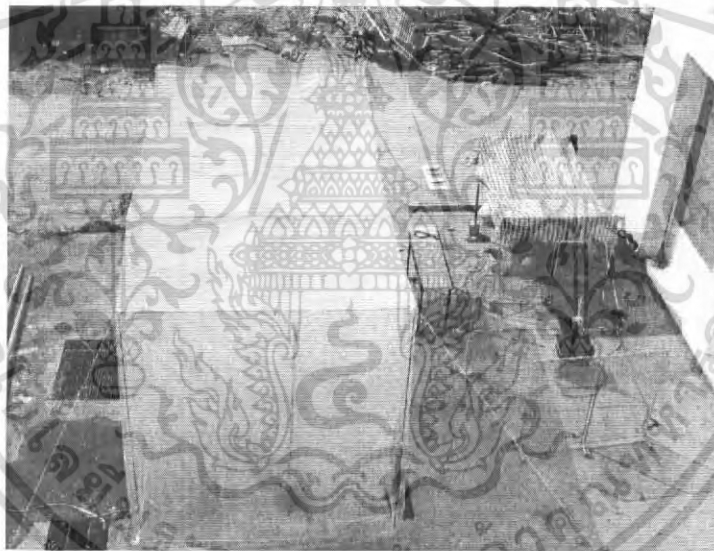
ความดันบรรยากาศ	=	960	มม.ปรอท
อุณหภูมิแวดล้อม	=	18	เซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	=	72	%

3) ป้อนแรงดันให้กับลูกถ้วยเท่ากับแรงดันระหว่างเฟสกับนิวตรอน เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจ่ายไอเกลือด้วยอัตราการจ่ายไอแต่ละหัวฉีดประมาณ $0.5 \text{ dm}^3/\text{min}$ โดยยังรักษาแรงดันให้เท่าเดิมเป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาทำการเพิ่มแรงดันไปจนกว่าจะเกิดโคโรนาด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันอย่างน้อย $50 \text{ kV}/\text{min}$ ดังกราฟรูปที่ 4.7 โดยการทดลองจะแบ่งความเข้มข้นเกลือออกเป็น 5 ระดับ มีช่วงเว้นระยะเวลาระหว่างการทดสอบประมาณ 15 นาที



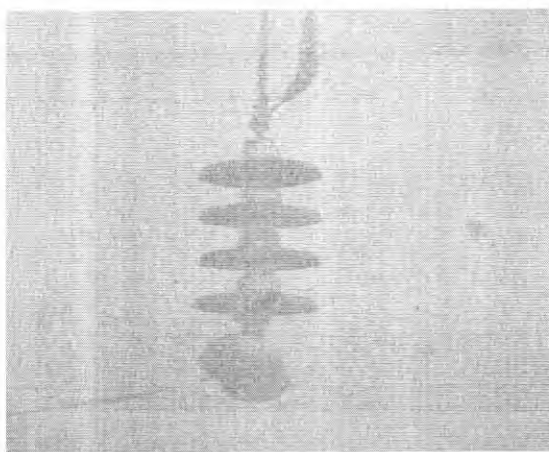
รูปที่ 4.7 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันวาบไฟตามผิวจนวนในสภาวะเปราะเปื้อน

4) ทำการบันทึกค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา แรงดันวาบไฟตามผิวและกระแสรั่วไหล แต่ละระดับความเข้มข้นเกลือ



รูปที่ 4.8 ห้องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

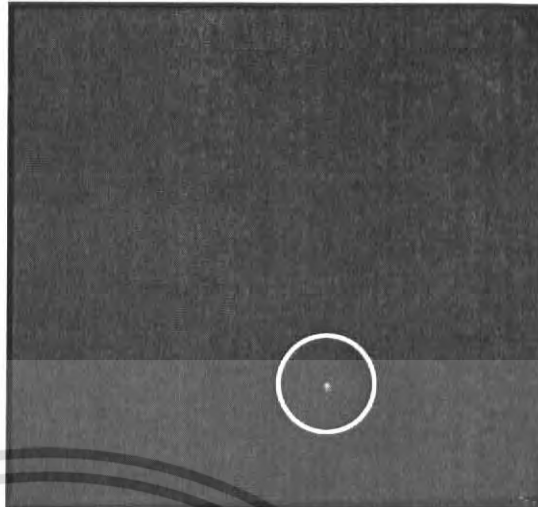
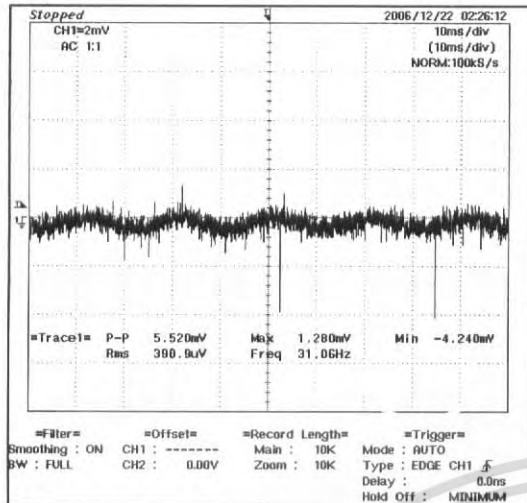
รูปที่ 4.9 (ก)ไอเกลือที่เกิดขณะทำการทดสอบ(ข)ตรวจสอบแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาด้วยกล้องโคโรนา

ผลการทดสอบ

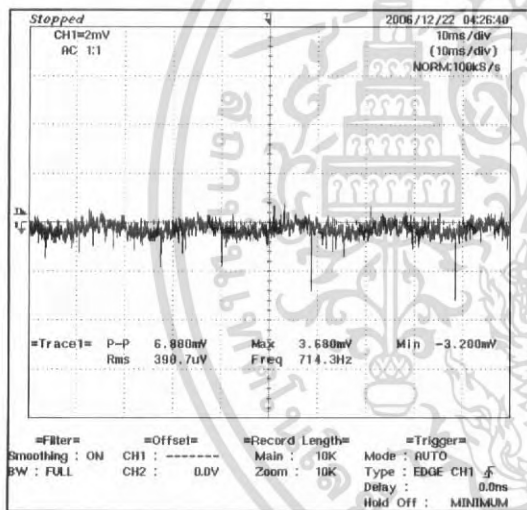
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบ

เปอร์เซ็นต์	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (kV) (ที่สภาวะห้องทดลอง)	แรงดันวาบไฟตามผิว (kV) (ที่สภาวะห้องทดลอง)	กระแสรั่วไหล (mA) (ที่สภาวะห้องทดลอง)
ไม่มีความเข้มข้นเกลือ (S0)	67.46	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	0.762
ความเข้มข้นเกลือ น้อย(S1)	65.83	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	0.7818
ความเข้มข้นเกลือ ปานกลาง(S2)	63.35	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	0.7814
ความเข้มข้นเกลือสูง (S3)	61.78	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	0.9156
ความเข้มข้นเกลือสูง มาก(S4)	59.19	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	0.7722

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

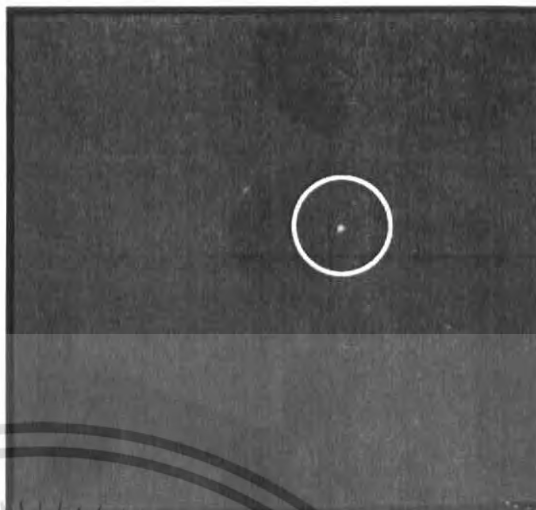
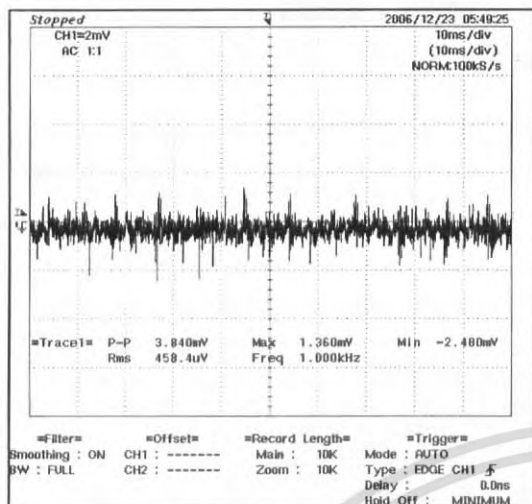


(ก) ความเข้มข้นเกลือน้อยและโคโรนาที่เกิด

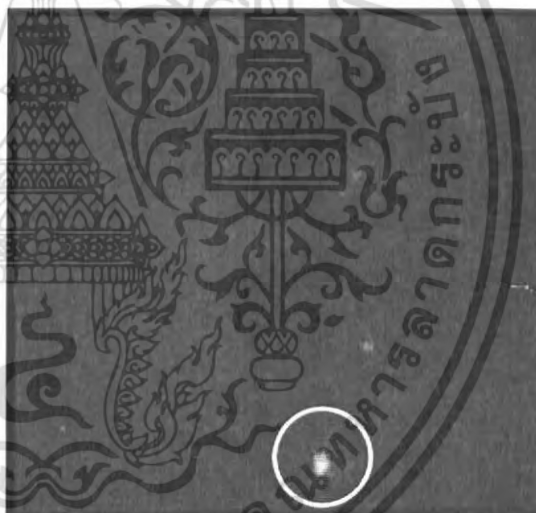
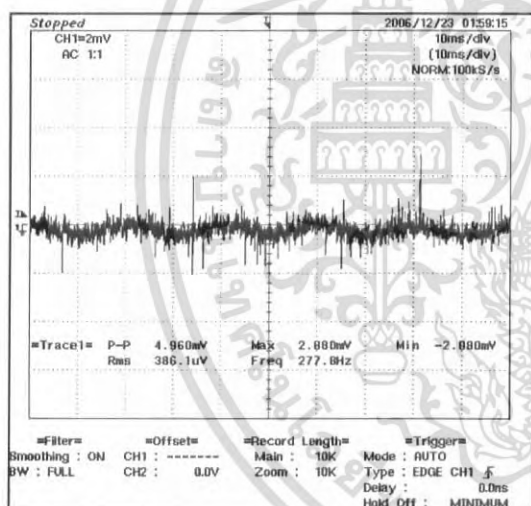


(ข) ความเข้มข้นเกลือปานกลางและโคโรนาที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



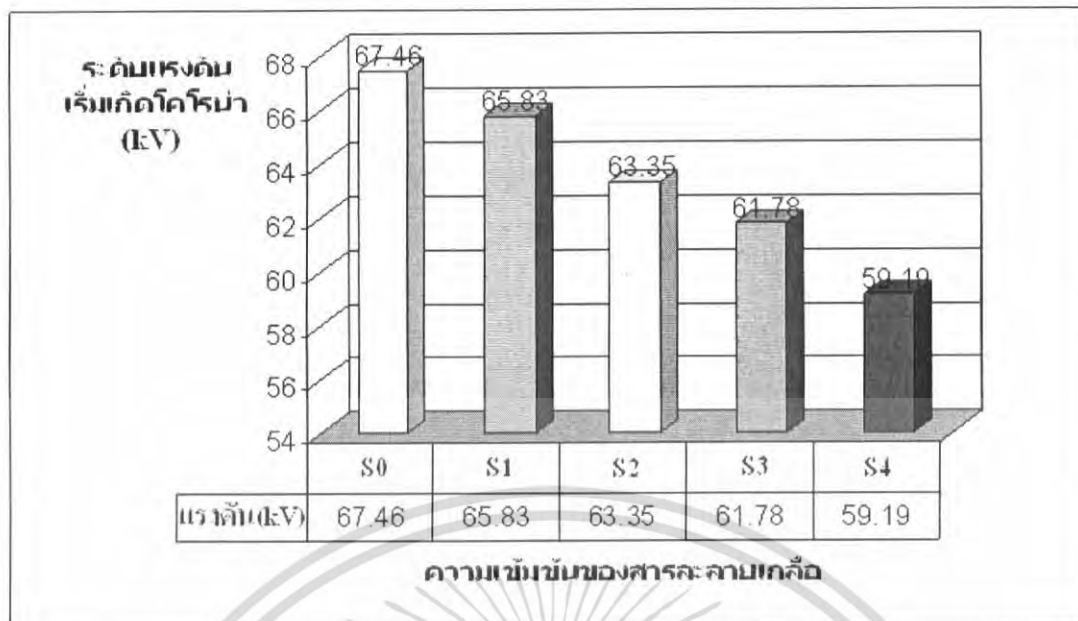
(ค) ความเข้มข้นแก๊สสูงและโคโรนาที่เกิด



(ง) ความเข้มข้นแก๊สสูงมากและโคโรนาที่เกิด

รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่เกิดจากการทดสอบและการเกิดโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเกลือที่ระดับต่างๆ กับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของลูกถ้วยฉนวน

สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนจากไอเกลือพบว่าปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนามีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของไอเกลือที่จับเกาะลูกถ้วยฉนวนที่ ระดับความเข้มข้นของไอเกลือน้อยโคโรนาเกิดขึ้นได้ยากทำให้มีแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่สูง และที่ระดับความเข้มข้นของไอเกลือมาก โคโรนาเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. กลุ่มนักศึกษาได้ทำการออกแบบและสร้างห้องทดสอบขึ้นได้ตามมาตรฐาน IEC 507 ซึ่งจากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในห้องทดสอบ ค่าที่ได้ออกมาั้นพิสูจน์ได้ว่าห้องทดสอบนั้นสามารถทดสอบได้จริงตามมาตรฐาน IEC 507 โดยที่การจ่ายโอเกลีของหัวฉนวนจะมีอัตราการจ่ายน้ำ 0.5 ลิตร/นาที และอัตราการจ่ายลม 7 บาร์ และมีอัตราการผสมความเข้มข้นของเกลี 4 ระดับด้วยกัน ซึ่งความเข้มข้นของเกลี 4 ระดับนั้นเทียบเท่าได้กับระดับความเปรอะเปื้อน 4 ระดับคือ ระดับความเปรอะเปื้อนน้อย ระดับความเปรอะเปื้อนปานกลาง ระดับความเปรอะเปื้อนสูง และระดับความเปรอะเปื้อนสูงมาก

2. จากผลการทดสอบพบว่า ในสภาวะที่มีระดับความเข้มข้นของเกลีน้อย (เปรอะเปื้อนน้อย) จะทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนามีค่าสูง ซึ่งจะมีผลทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวได้ยาก และในสภาวะที่มีระดับความเข้มข้นของเกลีมาก (เปรอะเปื้อนสูง) จะทำให้แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมีค่าต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อนนั้นได้ทำการจับเกาะตามผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อได้รับความชื้นจะทำให้สภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของสิ่งเปรอะเปื้อนสูงขึ้นจะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายขึ้น

3. ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบใหม่นั้น เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อน โดยออกแบบตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 ออกแบบให้มีรูปทรงที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะได้ยาก และทำความสะอาดตัวเองได้ดี และออกแบบให้มีระยะรั้วมากขึ้น เพื่อลดขนาดของกระแสรั้วไหล เมื่อนำลูกถ้วยที่ทำการออกแบบใหม่มาเปรียบเทียบกับลูกถ้วยต้นแบบ พบว่าลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบใหม่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนต้นแบบ ดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขวนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขวนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

1. เนื่องจากเกิดอุบัติเหตุฟ้าผ่าเพดานของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงถล่มลงมา จึงทำให้การปฏิบัติงานเกิดความล่าช้า
2. กล้องโคโรนาที่ขอยืมจากการไฟฟ้า และถังลมของภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม มีระยะเวลาใช้งานที่จำกัด จึงทำให้ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ต่อเนื่อง
3. ในการวัดค่าความนำไฟฟ้าต้องไปขอยืมใช้เครื่องมือจากคณะวิทยาศาสตร์ จึงทำให้เกิดความลำบากในการปฏิบัติงาน
4. ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงควรมีถังลม และเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าเพื่อสะดวกในการปฏิบัติงาน
5. การทำโครงการนี้ต้องใช้เงินทุนสูงมาก ทางภาควิชาควรจัดสรรเงินให้ตามความเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, เมษายน 2547.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, **เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, **ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอตันยาวปีกกลับในระบบ 33 กิโลโวลต์**, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, **เอกสารประกอบการสอน วิชา วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Material)**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] J.S.T Loom, **Insulator for High Voltage**, IEE Power Engineering Series 7, 1990.
- [6] IEC 815, **Guide for the selection of Insulator of Polluted conditions**, First Edition, 1986.
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547, พิมพ์ครั้งที่ 3.
- [8] IEC 507, **Artificial pollution test on High-Voltage Insulators to be used on ac. System**, second Edition, 1991-04.
- [9] ANSI C 29.1-1976 **Test methods for electrical power insulator**.
- [10] IEEE Std 4-1995, **IEEE Standard Techniques for High – Voltage Testing**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



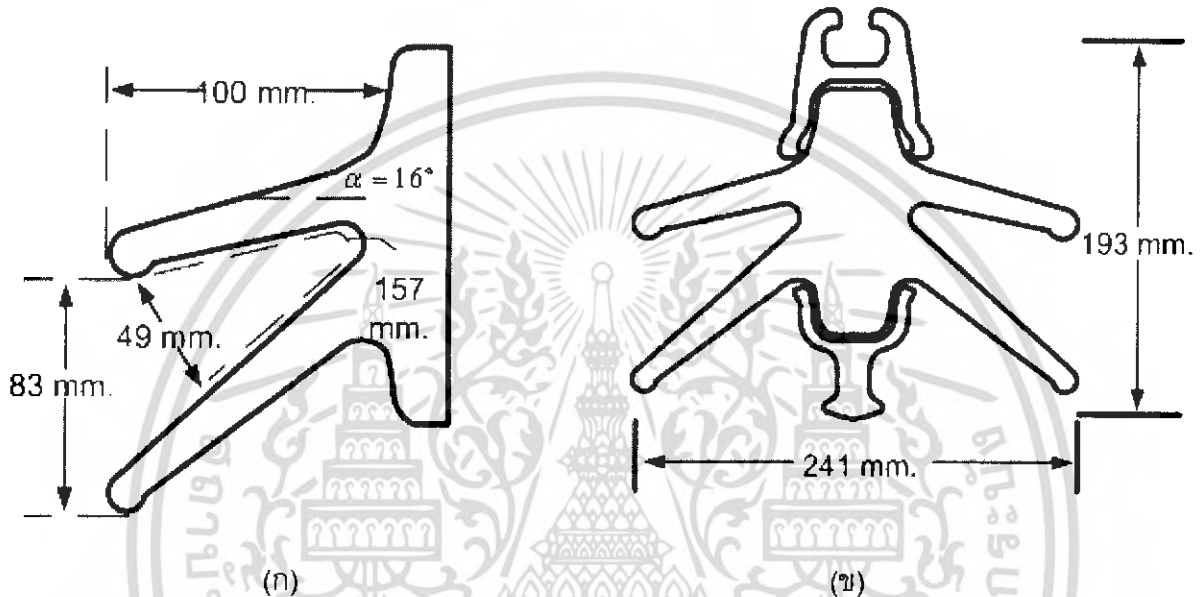
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

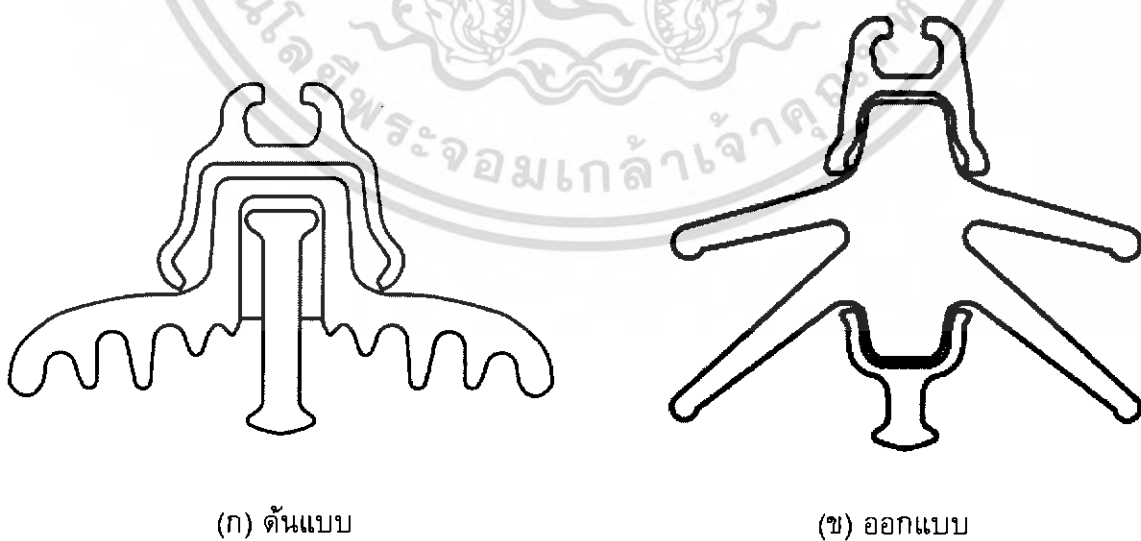
ลูกถ้วยที่ทำการออกแบบ

ผลการออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบที่ 2 และ 3 โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายแรงดันและค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

แบบที่ 2



รูปที่ ก.1 ภาพสเกตของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ลูกถ้วยแขวนปีกสลับ ความยาวที่แสดงในแบบเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ ก.2 เปรียบเทียบลูกถ้วยแขวนดันแบบที่มีใช้งานและลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 [6]

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	49 mm
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	0.83
Ld/d	น้อยกว่า 5	Ld/d = 3.2
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	100 mm
α	มากกว่า 5 องศา	16 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	1.5
P.F.	มากกว่า 0.7	1.4

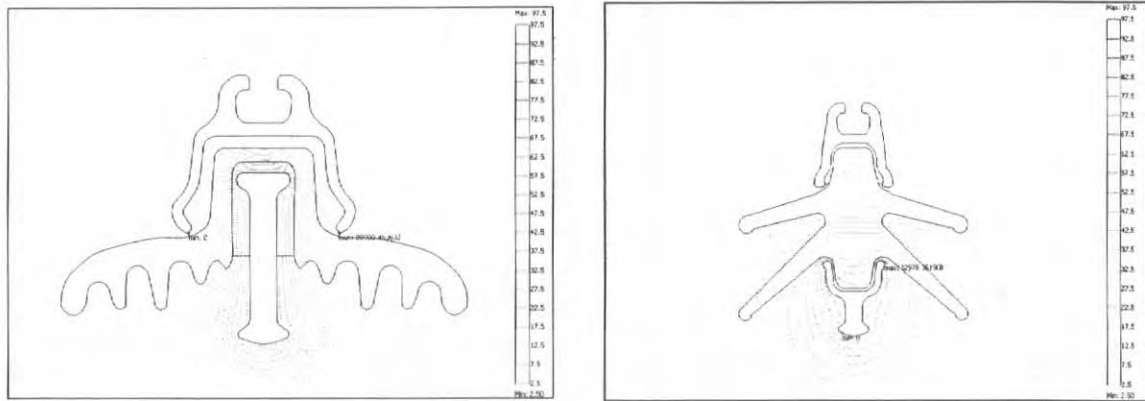
ตารางที่ ก.2 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ

ระยะรั้ว	ค่าต้นแบบ (mm)	ค่าที่ออกแบบ (mm)
	680	482



รูปที่ ก.3 ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ 2D, 3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ ก.4 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

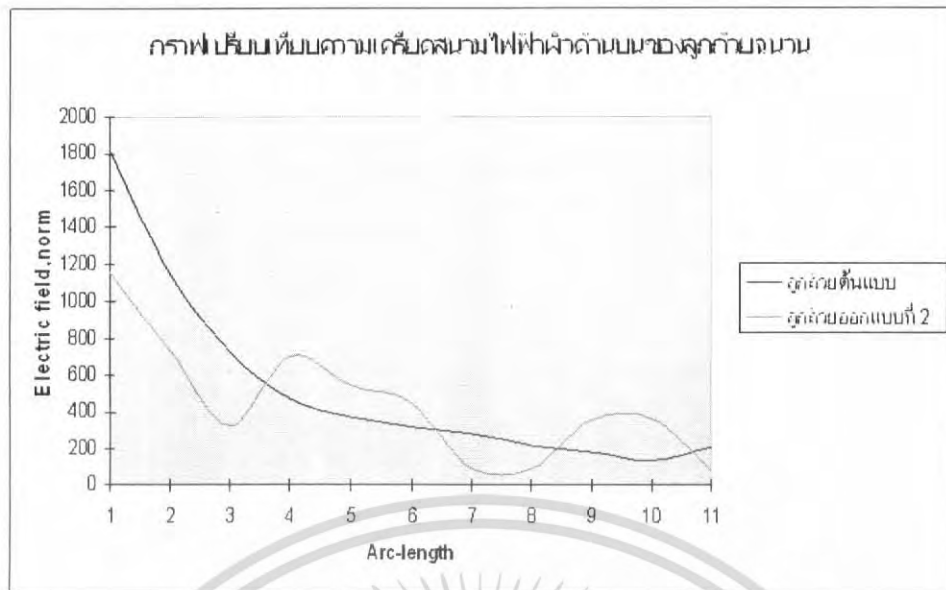


(ก)

(ข)

รูปที่ ก.5 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

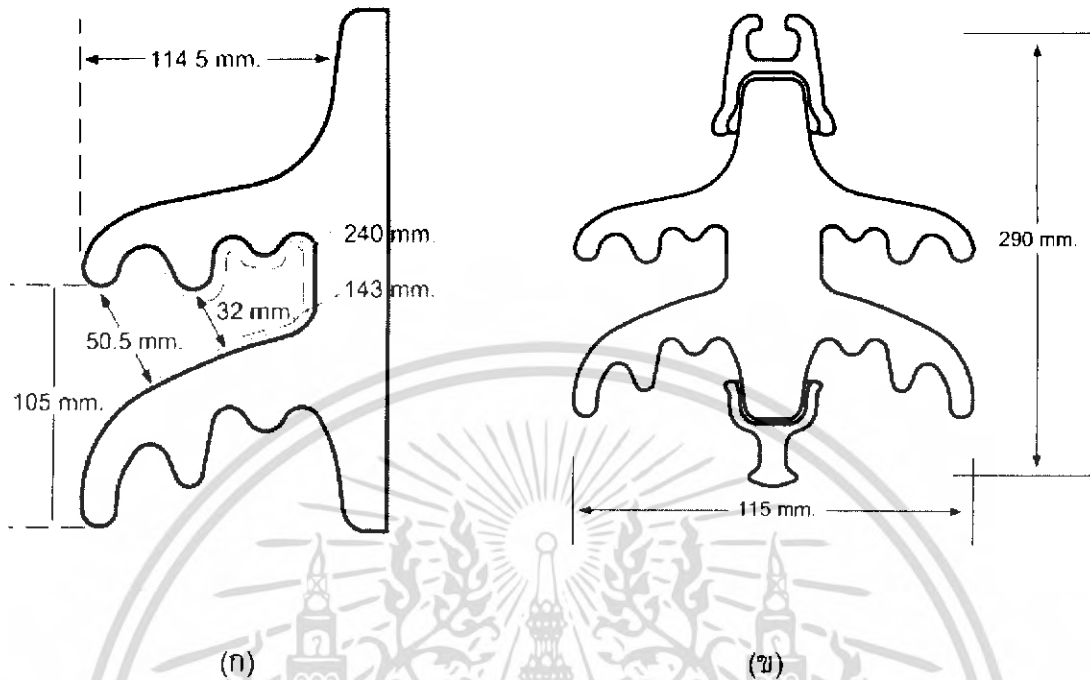


รูปที่ ก.6 กราฟเปรียบเทียบความเค้นคสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ

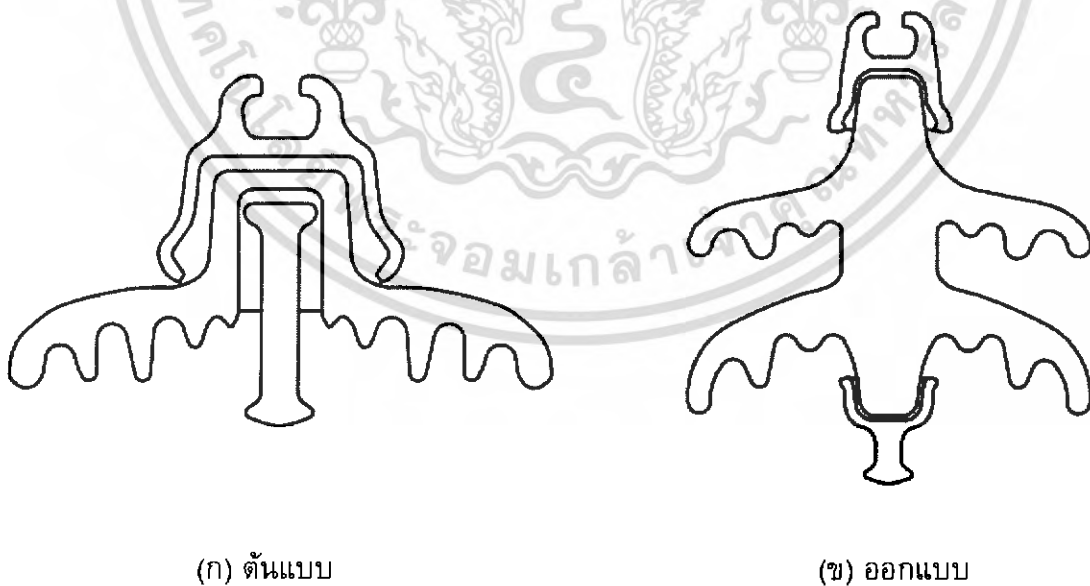


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 3



รูปที่ ก.7 ภาพสเกตของลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ลูกถ้วยแขวนปีกสลับ ความยาวที่แสดงในแบบเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ ก.8 เปรียบเทียบลูกถ้วยแขวนดันแบบที่มีใช้งานและลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

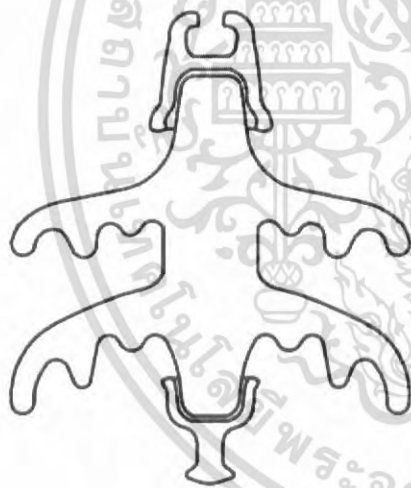
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบค่ามิติ ที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	50.5 mm
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	0.92
Ld/d	น้อยกว่า 5	$Ld1/d1 = 4.45, Ld2/d2 = 4.76$
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	114.5 mm
α	มากกว่า 5 องศา	11 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	1.95
P.F.	มากกว่า 0.7	0.72

ตารางที่ ก.4 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ

	ค่าต้นแบบ (mm)	ค่าที่ออกแบบ (mm)
ระยะรั้ว	680	811.5



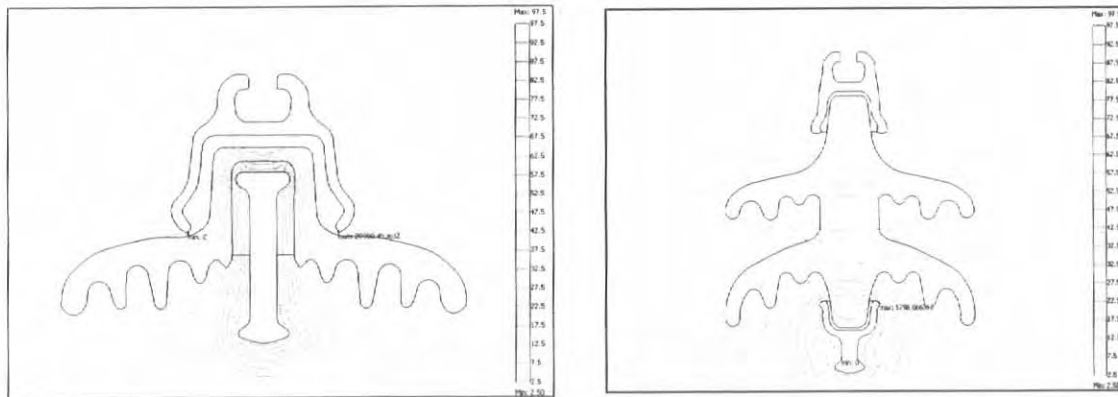
(ก)



(ข)

รูปที่ ก.9 ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ 2D, 3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ ก.10 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

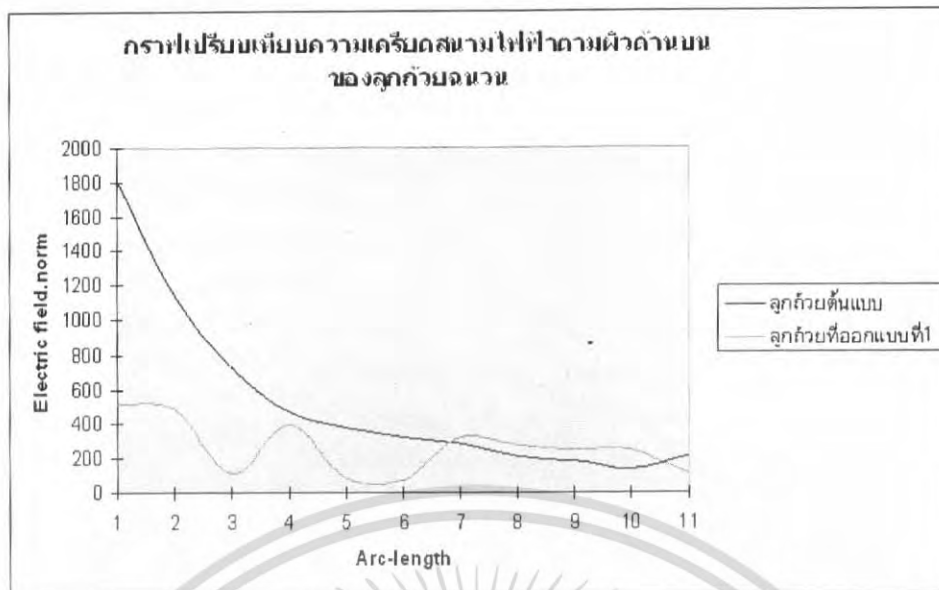


(ก)

(ข)

รูปที่ ก.11 วิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน (ก) ลูกถ้วยแขวนต้นแบบ (ข) ลูกถ้วยแขวนที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.12 กราฟเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกลูกถ้วยแขนปีกแรกจากด้านบนของลูกถ้วยแขนเปรียบเทียบระหว่างต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้