

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

การศึกษาและออกแบบลวดถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง และเคเบิลสเปซเซอร์  
THE STUDY AND DESIGN OF HVDC INSULATOR AND CABLE SPACER



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....62464  
วัน,เดือน,ปี.....18 ส.ค. 2549

b.....116205+ก  
f.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล  
อ. นรเศรษฐ พัฒนาเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

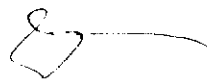
เรื่อง การศึกษาและออกแบบบล็อกด้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง และเคเบิลสเปชเชอร์

ผู้จัดทำ

1. นายโชคชัย เหลืองเรืองทิพย์
2. นายนพรัตน์ หงษ์หิน
3. นายสิทธิศักดิ์ กลิ่นหอม
4. นายคชาวุธ พันธุ์มณี



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล )



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาและออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงและเคเบิลสเปชเชอร์

นายโชคชัย	เหลืองเรืองทิพย์	
นายนพรัตน์	หงษ์หิน	
นายสิทธิศักดิ์	กลิ่นหอม	
นายคชาวุธ	พินธุ์มณี	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548		

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การศึกษาและออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงและเคเบิลสเปชเชอร์ การศึกษาจะเริ่มจากรูปแบบพื้นฐานของลูกถ้วยฉนวน และทำการพัฒนารูปร่างของลูกถ้วยฉนวนให้สอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล โดยออกแบบให้ลูกถ้วยฉนวนสามารถใช้งานได้ในบริเวณมลภาวะอีกด้วย ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ได้แก่ การกระจายของแรงดัน และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบลูกถ้วยฉนวนที่ดีที่สุดจาก 1024 รูปแบบ ได้ถูกเลือกขึ้นมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับลูกถ้วยฉนวนที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ลูกถ้วยฉนวนที่ออกแบบ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหนือกว่าลูกถ้วยที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติทางกลของลูกถ้วยฉนวนที่ออกแบบ ได้วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเช่นกัน ในส่วนของการออกแบบและวิเคราะห์เคเบิลสเปชเชอร์นั้น เคเบิลสเปชเชอร์ที่มีใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลกับเคเบิลสเปชเชอร์ที่ออกแบบ พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แล้วได้ทำการทดลองหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงและเคเบิลสเปชเชอร์ตามมาตรฐาน IEC และ ANSI ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์นำเสนออยู่ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THE STUDY AND DESIGN OF HVDC INSULATOR AND CABLE SPACER

Chokchai Leungreungtip

Nopparat Honghin

Sitthisak Klenhom

Katawoot Punmanee

Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

Norrasage Pattanadech Advisor

2005

### ABSTRACT

This project presents a study and design of HVDC Insulator and Cable Spacer. The project began with a basic design and then developed the shapes of suspension insulators to be used in polluted areas. Finite element program was used to analyze the electrical characteristics of suspension insulators in electric field distribution and electric field stress. The selected suspension insulator shape from 1024 shapes was used to compare its characteristics with the standard industry shape. The result showed that the selected shape performed better in electrical characteristics. In addition, the selected shape also performed better in mechanical characteristics. For cable spacer, this project compared the designed cable spacer with three selected cable spacers used in industry. The result showed that the designed cable spacer performed similar to standard industry cable spacers in electrical and mechanical characteristics. The testing results and analysis of electrical characteristics of DC suspension insulator and cable spacer following IEC and ANSI standards were also included in this project.

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือสนับสนุนจากหลายๆ ท่านโดยเฉพาะท่าน รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และท่านอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาและแนวคิดอย่างใกล้ชิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหามาบางอย่างให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมีเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์นี้ให้เป็นที่เรียบร้อย รวมทั้งคุณประยัติ ใจวงศ์ วิศวกรไฟฟ้า การไฟฟ้าบางพลี ได้ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง คุณอมรชัย คาร์วี่ นิสิตปริญญาโท ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ในขณะที่ทำการศึกษาค้นคว้าตลอดจนแก้ไขปริญญาานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตปริญญาโทและเพื่อนนักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลายๆ ท่านที่ยังมิได้เอ่ยถึงที่ให้คำแนะนำกับคณะผู้จัดทำ

อนึ่งโครงการชิ้นนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากความตั้งใจและความมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญรูป .....	IV
สารบัญตาราง .....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดในการวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 การศึกษาทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า .....	5
2.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า .....	8
2.2.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน .....	9
2.3 ทรงกระบอกยาววางขนานกัน .....	12
2.4 ลูกถ้วยฉนวน .....	14
2.4.1 ส่วนประกอบและการทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน .....	15
2.4.2 กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน .....	16
2.4.3 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน .....	21
2.4.4 ลักษณะสมบัติทางมิติ .....	21
2.4.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า .....	22
2.4.6 การทดสอบ .....	23
2.4.7 การทดสอบรูปร่างทางมิติ .....	23
2.4.8 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า .....	23
2.4.9 การทดสอบทางกล .....	24
2.5 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะ .....	25
2.5.1 สิ่งเปราะ .....	25
2.5.2 การวัดระดับความเปราะ .....	26
2.5.3 การแบ่งระดับความเปราะ .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 การรวบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน .....	28
2.5.5 แนวทางแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งาน ในบริเวณเปรอะเปื้อน .....	30
2.5.5.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย ฉนวน .....	30
2.5.5.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน .....	31
2.5.5.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน .....	33
2.6 เคเบิลสเปชเซอร์ .....	34
2.6.1 การใช้งานเคเบิลสเปชเซอร์ .....	34
2.6.2 ตัวอย่างคุณสมบัติ และพิกัดต่างๆของเคเบิลสเปชเซอร์ .....	38
2.7 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า .....	42
2.7.1 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .....	42
2.7.2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ .....	43
2.8 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	45
2.8.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	45
2.8.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า .....	47
2.8.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	47
2.8.4 สมการเชิงอนุพันธ์ .....	49
2.8.5 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง .....	50
บทที่ 3 การทดสอบ .....	52
3.1 การทดสอบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง .....	52
3.1.1 การเตรียมลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงมาทดสอบ .....	52
3.1.2 วิธีการทดสอบ .....	53
3.1.3 สภาพของห้องทดสอบ .....	53
3.2 การทดสอบเคเบิลสเปชเซอร์ .....	55
3.2.1 การเตรียมเคเบิลสเปชเซอร์ที่นำมาทดสอบ .....	57
3.2.2 วิธีการทดสอบ .....	58
3.2.3 สภาพของห้องทดสอบ .....	58
บทที่ 4 การออกแบบลูกถ้วยฉนวน และเคเบิลสเปชเซอร์ พร้อมกับทำการวิเคราะห์ผล .....	60
4.1 การศึกษาจำลอง และออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบฉนวน .....	60
4.2 พื้นฐานในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง .....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาวิธีการออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน .....	65
4.3.1 ลำดับขั้นในการออกแบบตามมาตรฐาน .....	66
4.4 ขั้นตอนในการออกแบบลูกถ้วยฉนวน .....	68
4.5 การจำลองมิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ออกแบบ .....	77
4.6 การเปรียบเทียบลักษณะของเส้นสมตักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด.....	97
4.6.1 การจำลองเปรียบเทียบลูกถ้วยต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบเทียบทาง ไฟฟ้า .....	97
4.6.2 การจำลองเปรียบเทียบลูกถ้วยที่ออกแบบเทียบทางกล .....	104
4.7 หลักการในการออกแบบเคเบิลสเปซเซอร์ .....	106
4.7.1 เคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้กันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า .....	106
4.7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น .....	108
4.7.3 การวิเคราะห์จากความเครียดสนามไฟฟ้า .....	109
4.7.4 การจำลองแบบในการวิเคราะห์ .....	109
4.7.5 ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของแบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์ .....	112
4.7.6 การจำลองการเปรียบเทียบทางกล .....	124
บทที่ 5 สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	127
5.1 สรุป .....	127
5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข .....	128
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า .....	6
2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ .....	8
2.3 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน .....	10
2.4 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ .....	10
2.5 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย .....	12
2.6 ตัวนำทรงกระบอกยาววางขนานกัน .....	13
2.7 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำฉนวนด้วยพอร์ซเลน .....	16
2.8 ลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตฉนวนด้วยพอร์ซเลนแบบเปียกสำหรับฉนวนด้วยแขวน และฉนวนด้วยก้านตรง .....	17
2.9 ส่วนประกอบต่างๆของฉนวนด้วย .....	18
2.10 ลักษณะและองค์ประกอบส่วนต่างๆ ของฉนวนด้วยกระแสดรแบบแขวน .....	19
2.11 การใช้งานฉนวนด้วยฉนวนกระแสดรในระบบ 300 kV ระหว่าง EGAT กับ TNB .....	20
2.12 การศึกษาวิธีการทำความสะอาดฉนวนด้วยฉนวนกระแสดร ที่ห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าบางพลี .....	20
2.13 ลักษณะทางมิติ .....	21
2.14 (ก) รูปลิสซัจว์ (Lissajour figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิว ฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวาทไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทาง ไดนามิกของอิมพีแดนซ์ที่ผิวฉนวนด้วยฉนวน .....	29
2.15 ขั้นตอนของการเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน .....	30
2.16 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวฉนวนด้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อน ประเภทควีน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน .....	31
2.17 (ก) การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวนด้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งาน 3 ปีในบริเวณเปรอะเปื้อน (ข) หยดน้ำทรงกลมบน ผิวฉนวนด้วยยางซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวของฉนวนด้วย ยางซิลิโคน .....	33
2.18 การใช้งานเคเบิลสเปชเชอร์ในประเทศไทยที่ระดับแรงดัน 12 kV – 33 kV .....	35
2.19 การใช้งานเคเบิลสเปชเชอร์ในต่างประเทศที่ระดับแรงดัน 5 kV – 46 kV .....	35
2.20 การใช้งานเคเบิลสเปชเชอร์ในต่างประเทศที่ระดับแรงดัน 69 kV .....	36
2.21 เคเบิลสเปชเชอร์ที่มีใช้ในประเทศไทย .....	37
2.22 เคเบิลสเปชเชอร์แบบต่างๆที่มีใช้ในต่างประเทศเป็นแบบที่ทำด้วยวัสดุ HDPE .....	37
2.23 รูปร่าง และระยะของเคเบิลสเปชเชอร์แบบ Reliable (S-15) .....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ระยะเวลาที่มีหัวเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Reliable (S-15) .....	39
2.25 รูปร่างและระยะของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix (H - 35D) .....	39
2.26 ระยะเวลาที่มีหัวเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix (H - 35D) .....	40
2.27 รูปร่างและระยะของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite .....	41
2.28 ระยะเวลาที่มีหัวเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite .....	41
2.29 ระบบขั้วเดียว .....	42
2.30 ระบบสองขั้ว .....	43
2.31 ระบบขั้วเดียวร่วมกัน .....	43
2.32 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	46
2.33 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ .....	48
3.1 ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงแบบแขวน .....	52
3.2 วงจรการทดสอบทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง .....	53
3.3 วาบไฟตามผิวแห้งของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระแสดตรง .....	54
3.4 เคเบิลสเปซเซอร์แบบ reliable (S-15) .....	55
3.5 เคเบิลสเปซเซอร์แบบ hendrix (H - 35D) .....	55
3.6 เคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite .....	56
3.7 วงจรการทดสอบเคเบิลสเปซเซอร์ .....	56
3.8 เคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ปกติ 16 ครีบ (ข) 8 ครีบ (ค) ไม่มีครีบ .....	57
3.9 กล้องโคโรนา .....	57
3.10 วงจรการทดสอบ .....	58
3.11 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของเคเบิลสเปซเซอร์ที่ระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (ก) ปกติ 16 ครีบ (ข) 8 ครีบ (ค) ไม่มีครีบ .....	59
4.1 แบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้ในการหาเหตุผลของการออกแบบ .....	61
4.2 ผลของการจำลองของลูกถ้วยเพื่อดูเส้นสมศักย์ และค่าความเครียดสนามไฟฟ้า .....	65
4.3 ระยะของลูกถ้วยแขวนชนิด Ball and Socket .....	66
4.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน .....	67
4.5 ขนาดของ Pin .....	72
4.6 ขนาดของขั้วต่อระหว่าง cap และ pin .....	73
4.7 ลักษณะการมองของการล็อก Pin กับ Cap .....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ประสิทธิผลของการล็อก Pin กับ Cap ..... 76
4.9	มิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งที่ทำการออกแบบ ..... 77
4.10	ระยะรัศมีมิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งที่ทำการออกแบบ ..... 78
4.11	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยกระแสดร่งหมายเลขที่ 709 ..... 80
4.12	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 ..... 80
4.13	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยกระแสดร่งหมายเลขที่ 901 ..... 81
4.14	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 901 ..... 81
4.15	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยกระแสดร่งหมายเลขที่ 913 ..... 82
4.16	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 913 ..... 82
4.17	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งปีกโค้ง ..... 83
4.18	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจาก ปรับแต่งปีกโค้ง ..... 84
4.19	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอน เอียงปีกโค้งที่ 0 องศา ..... 85
4.20	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจาก ปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 0 องศา ..... 85
4.21	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอน เอียงปีกโค้งที่ 6 องศา ..... 86
4.22	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจาก ปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 6 องศา ..... 86
4.23	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอน เอียงปีกโค้งที่ 10 องศา ..... 87
4.24	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจาก ปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 10 องศา ..... 87
4.25	เส้นสมคักข์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งเมื่อมิติของ ลูกถ้วยและระยะรั้ว ..... 89
4.26	ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งหมายเลข 709 หลังจาก ปรับแต่ง มิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว ..... 89
4.27	ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จ ลักษณะ Cap แบบที่ 1 ดูค่าเส้นสมคักข์ หลังจากปรับแต่ง มิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว ..... 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง หลังจากปรับแต้มิติของลูกถ้วย และระยะรั้ว .....	91
4.29 ลักษณะ Cap แบบที่ 2 ดูค่าเส้นสมคักย์ หลังจากปรับแต้มิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว...91	91
4.30 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง หลังจากปรับแต้มิติของลูกถ้วย และระยะรั้ว .....	92
4.31 ลักษณะ Cap แบบที่ 3 ดูค่าเส้นสมคักย์ หลังจากปรับแต้มิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว...92	92
4.32 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง หลังจากปรับแต้มิติของลูกถ้วย และระยะรั้ว .....	93
4.33 เส้นสมคักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงจากแบบจริง .....	94
4.34 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงจากแบบจริง .....	94
4.35 ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ .....	96
4.36 ส่วนประกอบต่างๆของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ .....	96
4.37 เส้นสมคักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ .....	97
4.38 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ .....	98
4.39 ดันแบบของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรงดันแบบที่ใช้งานในประเทศไทย .....	99
4.40 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวด้านบนของลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรงดันแบบ (ก) ออกแบบ (ข) ดันแบบ .....	100
4.41 แรงดันไฟฟ้าตามระยะ Creepage ผิวด้านบนของลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรง (ก) ออกแบบ (ข) ดันแบบ .....	101
4.42 เส้นสมคักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ .....	102
4.43 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ .....	102
4.44 เส้นสมคักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงดันแบบ .....	103
4.45 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงดันแบบ .....	103
4.46 ความเค้นพอนมิสเชสของลูกถ้วยที่ทำการออกแบบ .....	104
4.47 ความเค้นพอนมิสเชสของลูกถ้วยดันแบบ .....	104
4.48 องค์ประกอบต่างๆของเคเบิลสเปชเซอร์ .....	106
4.49 การวัดขนาดของเคเบิลสเปชเซอร์ .....	107
4.50 การเกิดวาวไฟตามผิวของเคเบิลสเปชเซอร์ (ปัญหาทางไฟฟ้า) .....	108
4.51 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในการใช้งาน (ปัญหาทางกล) .....	108
4.52 แบบจำลองเคเบิลสเปชเซอร์แบบ reliable (S-15) .....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์แบบ hendrix (H - 35D) .....	110
4.54 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite .....	111
4.55 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์ที่ได้ทำการออกแบบพื้นฐาน .....	111
4.56 เส้นสมคักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ reliable (S-15) โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส ..	113
4.57 ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Reliable (S-15) .....	114
4.58 เส้นสมคักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส .....	116
4.59 ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix .....	117
4.60 เส้นสมคักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส .....	119
4.61 ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite .....	120
4.62 เส้นสมคักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์ที่ออกแบบในขั้นพื้นฐาน โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส .....	122
4.63 ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์ที่ออกแบบในขั้นพื้นฐาน .....	123
4.64 ความเค้นฟอนมิสเซลของแบบ reliable (S-15) .....	124
4.65 ความเค้นฟอนมิสเซลของแบบ Hendrix .....	125
4.66 ความเค้นฟอนมิสเซลของแบบ dimonite .....	125
4.67 ความเค้นฟอนมิสเซลของแบบพื้นฐาน .....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนงานโครงการ .....	4
2.1 ส่วนผสมวัตถุดิบสำหรับทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน .....	16
2.2 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน .....	27
2.3 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ .....	31
2.4 ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือ เลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน .....	34
2.5 คุณสมบัติ และพิกัดต่างๆของเคเบิลสเปชเซอร์แบบ HDPE .....	38
2.6 คุณสมบัติ และพิกัดต่างๆของเคเบิลสเปชเซอร์แบบ Porcelain .....	40
2.7 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย .....	44
2.8 ข้อดี และข้อเสียของไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	51
3.1 คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่นำมาทดสอบ .....	52
3.2 แรงดันวาทไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสดตรง .....	54
3.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา .....	59
4.1 ระดับความเปราะเปื้อน .....	68
4.2 ขนาด และระยะต่ำสุดของลูกถ้วยแขวนแบบต่างๆ .....	70
4.3 เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน .....	72
4.4 ขนาด และมุมในการออกแบบตามมาตรฐานของ ของ Pin .....	73
4.5 เลือกขนาดและระยะของ Cap .....	74
4.6 คุณสมบัติคุณลักษณะการล๊อคระหว่าง Pin กับ Cap .....	75
4.7 ระยะประสิทธิผลของการล๊อค Pin กับ Cap .....	76
4.8 ขนาดของเคเบิลสเปชเซอร์ .....	107
4.9 ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของเคเบิลสเปชเซอร์แบบต่างๆ .....	124
4.10 ผลการวิเคราะห์ทางกลของเคเบิลสเปชเซอร์แบบต่างๆ .....	126

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงนั้น องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ อุปกรณ์ในการฉนวน เช่น ลูกถ้วยฉนวน และเคเบิลสเปซเซอร์ ฯลฯ ถ้าอุปกรณ์การฉนวนนั้นเกิดการเสียหายก็จะมีผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เช่น การเกิดความสูญเสียในระบบ หรือ การลัดวงจร เป็นผลทำให้ระบบเกิดความเสียหาย ความน่าเชื่อถือของระบบลดน้อยลง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการฉนวนให้มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้น

เมื่อเร็ว ๆ นี้ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้ถูกนำมาใช้งานในประเทศไทยเพื่อทำการเชื่อมโยงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างประเทศไทย ซึ่งรับผิดชอบโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) และการไฟฟ้าประเทศมาเลเซีย (TNB) โดยมีความร่วมมือในการจัดตั้งระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV 300/600 MW (High Voltage Direct Current, HVDC) การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในประเทศไทยยังอยู่ในขั้นตอนการเริ่มต้นใช้งานอยู่ แต่ในอนาคตอันใกล้เมื่อความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศมีเพิ่มมากขึ้น จึงมีผลทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศไม่เพียงพอ ซึ่งอาจจะแก้ไขปัญหาโดยการจัดหาแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติม เช่น การสร้างโรงจักรใหม่ขึ้นมา หรือเชื่อมต่อบริเวณไฟฟ้าของประเทศไทยกับระบบไฟฟ้าของประเทศเพื่อนบ้าน เช่น ลาว พม่า หรือ มาเลเซีย เป็นต้น แต่การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่สามารถที่จะเชื่อมโยงด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยตรง หากความถี่กำลังที่ใช้งานมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นการเชื่อมโยงด้วยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จึงเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาวีหนึ่ง อีกทั้งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนั้นยังมีความเหมาะสมในการส่งกำลังไฟฟ้าระยะทางไกล ๆ อีกด้วย รวมทั้งเพื่อรองรับการขยายตัวของเรื่องระบบ Asian power grid ที่อาจจะมีการขยายตัวต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์ หรือการฉนวนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงนั้นยังไม่เป็นที่คุ้นเคยกับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน โดยที่วิศวกรไฟฟ้าส่วนใหญ่จะคุ้นเคยกับอุปกรณ์ และการฉนวนในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

โครงการนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษา และออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงแบบแขวนรวมทั้งเคเบิลสเปซเซอร์ในระบบแรงดัน 33 kV ให้มีความสอดคล้องตามมาตรฐาน IEC, ANSI และ มอก. โดยได้ทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากเอกสารต่างๆ และจะทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง ส่วนในการออกแบบจะทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม auto cad และวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และความแข็งแรงทางกลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. เพื่อศึกษาทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาทฤษฎี และคุณสมบัติต่างๆของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงแบบแขวน และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method, fem)
4. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และความแข็งแรงทางกลของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวน และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

## 1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดในการวิจัย

1. สามารถออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงแบบแขวน ให้มีความสอดคล้องตามมาตรฐาน IEC และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับในระบบแรงดัน 33 kV ให้มีความสอดคล้องตามมาตรฐาน ANSI
2. ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวน ตามมาตรฐาน IEC ในสภาวะแห้ง พร้อมกับนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบ
3. สามารถทำการจำลองแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวน และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้โปรแกรม auto cad
4. สามารถวิเคราะห์ และออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวน และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

## 1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษามาตรฐานในการออกแบบ และมาตรฐานในการทดสอบ
2. ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติต่างๆของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ศึกษาอุปกรณ์ในห้องทดสอบทุกชิ้นที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ทุกชิ้นได้เป็นอย่างดี
4. ศึกษาทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า
5. ศึกษาทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์
6. ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้า และความแข็งแรงทางกล
7. ศึกษาการใช้โปรแกรม auto cad เพื่อใช้ในการจำลองแบบ
8. ทดสอบลูกถ้วยกระแสตรงแบบแขวน และเคเบิลสเปชเซอร์ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และค่าความแข็งแรงทางกล ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
10. ทำการวิเคราะห์ และออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสดรแบบแขวน และเคเบิลสเปชเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับในระบบแรงดัน 33 kV โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้
11. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถออกแบบเคเบิลสเปชเซอร์กระแสดรแบบ 33 kV และลูกถ้วยฉนวนกระแสดรแบบแขวนที่สามารถใช้กับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยได้
2. สามารถใช้โปรแกรม auto cad ในการจำลองแบบ และใช้โปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการออกแบบ และวิเคราะห์ปัญหาได้เป็นอย่างดี
3. สามารถใช้เครื่องทดสอบที่ใช้ติดตั้งใช้งานอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ โดยไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการ

หัวข้อโครงการแผน	ปี 2548										ปี 2549		
	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์				
1.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
9.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
10.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
11.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ แผนงาน  
□ งานที่แล้วเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การศึกษาทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า [1]

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆกันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ Dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย

การศึกษาสนามไฟฟ้านั้นสนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

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

ซึ่งการศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือ สปาร์กทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

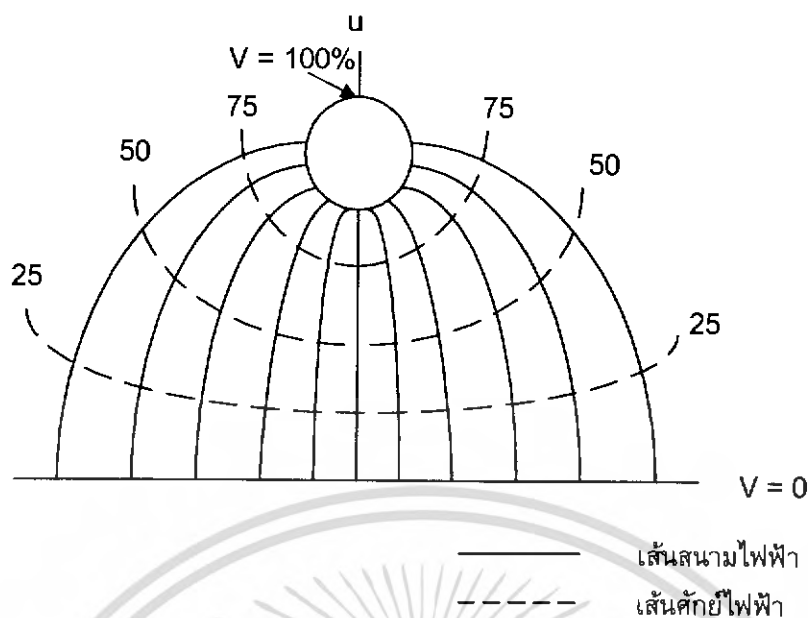
$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.1)$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.1** สนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่า

จึงอาจกล่าวได้ว่า  $\eta'$  ก็คือ ดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกตาว์นของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ดังสมการที่ (2.2)

สมการที่ (2.2) นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือ ปริติสซาร์จ (predischage) เกิดก่อนเบรกตาว์น (สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกตาว์นจะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรกตาว์นทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_b$

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2.2 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรกตาว์นแต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดติสซาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ติสซาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ เป็นช่วงๆจึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกตาว์นเรียกว่ากระแสโคโรนา (corona current) หรือ กระแสติสซาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.1) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาว์นของการฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ (2.2) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.2) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นเอง

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

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด  
 $U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage)

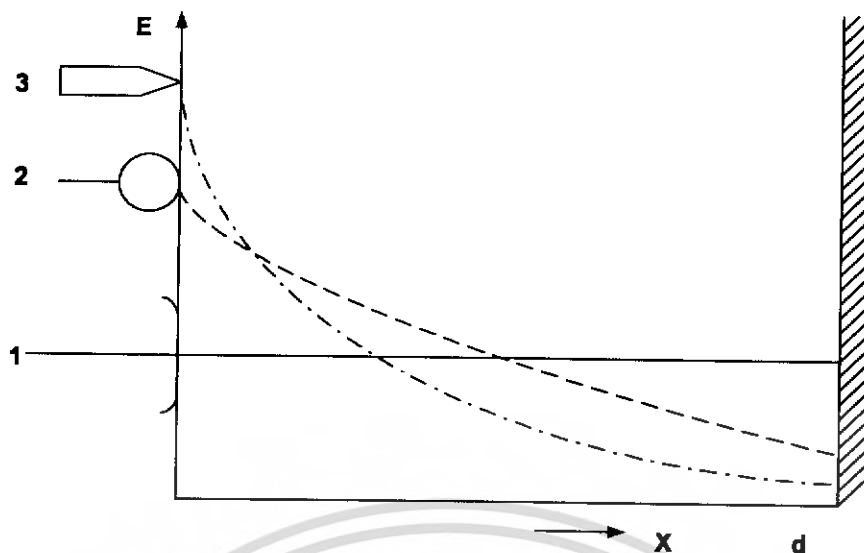
โดยที่  $E_i$  และ  $U_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการที่ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ สมการที่ (2.3) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage, threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างอิเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรกดาว์น (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาว์นจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) 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  $U_b > U_i$  ค่าแรงดันเบรกดาว์นนี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่าย ๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้นหรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่นระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.2** เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ [2]

- 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  $0.1 < \eta^* \leq 0.3$

## 2.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า $E$ (electrical field stress) [1]

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  $D/\epsilon$  ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  (electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

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

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

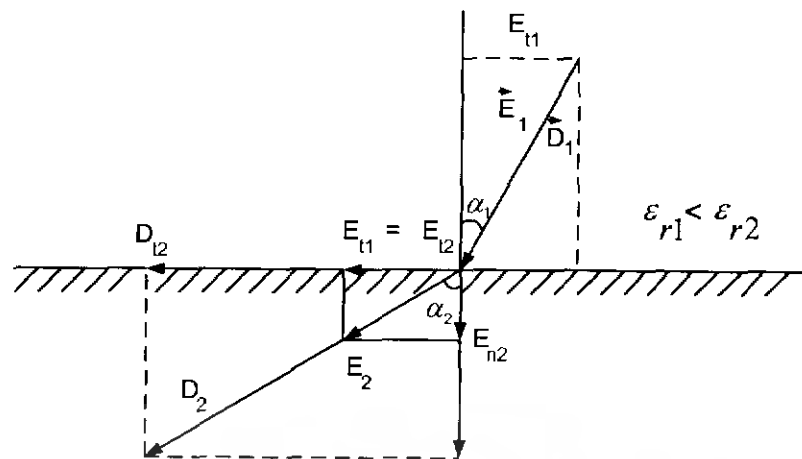
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\vec{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น  $A/m^2$   
 $\sigma$  คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น  $S/m = \text{siemens/meter} = 1/\rho$   
 $\rho$  คือ สภาพต้านทาน เป็น  $\Omega - m$

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

2.2.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน ฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือรองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

2.2.1.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส  $E_t$  ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า  $D_n$  ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ  $E_{n1} = E_{n2}$  และ  $D_{n1} = D_{n2}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3



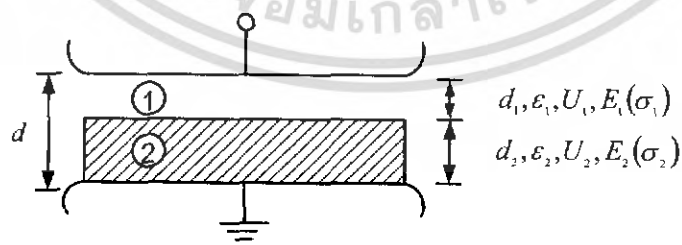
### รูปที่ 2.3 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์  $D = \epsilon E$  ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\operatorname{tg} \alpha_1 / \operatorname{tg} \alpha_2 = E_{n2} / E_{n1} = D_1 / D_2 = \epsilon_1 / \epsilon_2$$

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

2.2.1.2 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยทฤษฎีแล้วการวางชั้นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดที่ดีที่สุด คือการวางไม่ให้มีการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้า หรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั่นคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัส ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.4



### รูปที่ 2.4 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ  $E = U/d$  เพราะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และใช้ความสัมพันธ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D = \epsilon E$  เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้นจะมีค่าคงตัว  $D$  และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามี ตัวเก็บประจุต่อกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.10)$$

เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

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

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2} \\ U_2 &= \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \\ \text{แต่ } U &= U_1 + U_2 \\ &= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \\ &= U_1 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right) \\ \text{ฉะนั้น } U_1 &= \frac{U}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

แทนค่า  $U_1$  จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

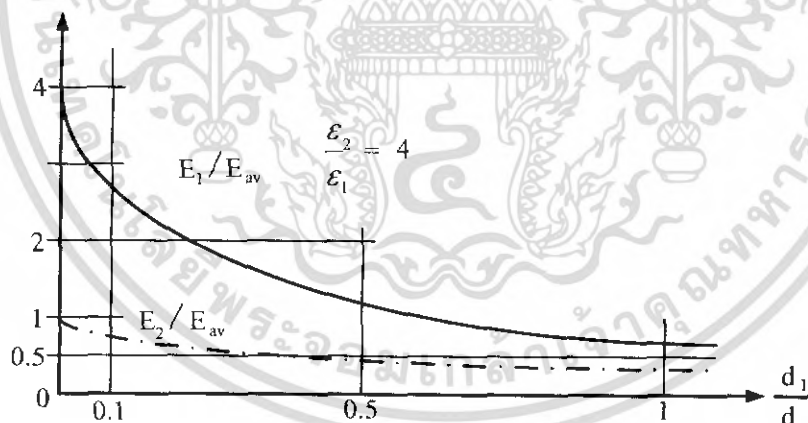
$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.13)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.14)$$

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

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.16)$$

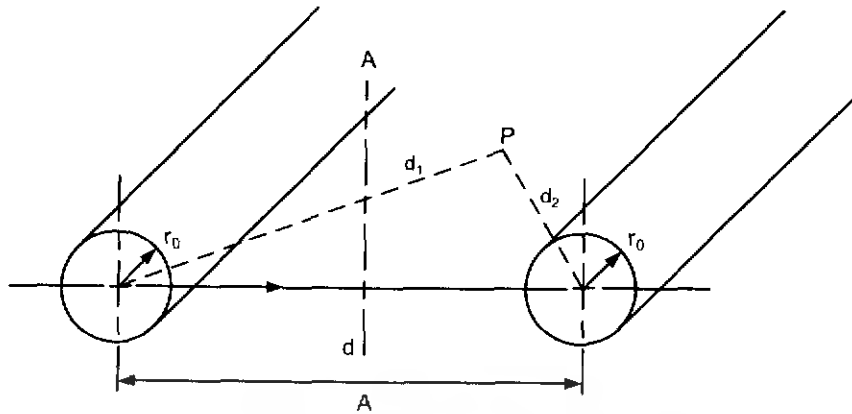
จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  จะมากกว่า  $E_2$  ตามอัตราส่วน  $\epsilon_2/\epsilon_1$  เมื่อ  $\epsilon_2 > \epsilon_1$  ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนที่มี  $\epsilon$  ต่ำ สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากขึ้น ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

### 2.3 ทรงกระบอกยาววางขนานกัน

ตัวนำทรงกระบอกยาววางขนานกัน มีที่ใช้งานในด้านไฟฟ้าแรงสูงหลายที่ เช่น บัสบาร์ ในสถานีจ่ายไฟฟ้ากลางแจ้ง บัสบาร์ในระบบ GIS ตัวนำของสายส่งจ่าย เป็นต้น การออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ไม่เกินค่าจำกัด เพื่อป้องกันมิให้เกิดโคโรนาในรูปที่ 2.6 แสดงถึงตัวนำทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ  $r_0$  วางขนานกัน จุดศูนย์กลางห่างกันเท่ากับ  $d$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.6** ตัวนำทรงกระบอกยาววางขนานกัน

ตัวนำไฟฟ้าทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากัน คือ  $r_0$  มีประจุ  $Q$  และ  $-Q$  วางขนานกัน ศักย์ไฟฟ้าจากประจุบนตัวนำที่วางขนานกัน ที่จุด  $P$  ใดๆ ที่อยู่ห่างจากสายไฟเส้น 1 และ 2 เป็นระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด  $P$  จะมีค่าเป็นผลรวมกันคือ

$$V_P = V_{P1} + V_{P2} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

ในแนวระนาบกึ่งกลางระหว่างตัวนำทรงกระบอกทั้งสอง ( $d_1=d_2$ ) ศักย์ไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ คือ  $U_{P0} = 0$  และโดยเหตุที่ในทางปฏิบัติ ระยะห่างของตัวนำทรงกระบอกจะอยู่ห่างกันมาก เมื่อเทียบกับรัศมีของตัวนำ ฉะนั้น ระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก

ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นลากผ่าน และตั้งฉากกับแกนศูนย์กลางของทรงกระบอกทั้งสองที่ระยะ  $x$  จากผิวตัวนำจะเขียนได้ว่า

$$E_x = -\frac{U}{2} \frac{2r_0 \sqrt{\left(\frac{d}{2r_0}\right)^2}}{\left[(r_0 + x)(d - 2r_0) - x^2\right] \ln \left[ \frac{d}{2r_0} + \sqrt{\left(\frac{d}{2r_0}\right)^2 - 1} \right]} \quad (2.33)$$

โดยที่  $U$  คือ แรงดันที่ป้อนระหว่างตัวนำทรงกระบอกทั้งสอง และ  $E_{\max}$  เกิดที่ผิวตัวนำ คือ  $x = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\max} = \frac{U}{2} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2r_0}\right)^2 - 1}}{r_0 \left(\frac{d}{2r_0} - 1\right) \ln \left[ \frac{d}{2r_0} + \sqrt{\left(\frac{d}{2r_0}\right)^2 - 1} \right]} \quad (2.34)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวนำทรงกระบอกยาว  $l$  จะคำนวณจากความสัมพันธ์

$$C = \frac{\pi \epsilon l}{\ln \left[ \frac{d}{2r_0} + \sqrt{\left(\frac{d}{2r_0}\right)^2 - 1} \right]} \quad (2.35)$$

อิเล็กโตรดทรงกระบอกยาววางขนานกันก็มีมิติที่พอเหมาะเช่นกัน ถ้ากำหนด  $E_{\max}$  และแรงดันที่ป้อน  $U$  ให้จะได้มิติที่พอเหมาะคือ

$$\left(\frac{d}{r_0}\right)_{opt} = 5.85 \quad (2.36)$$

ในทางปฏิบัติค่า  $d/2r_0 \gg 1$  เช่น ตัวนำสายส่งแรงสูง เป็นต้น

จะได้  $E_{\max} = \frac{U}{2r_0 \ln(d/r_0)}$  (2.37)

และ  $C = \frac{\pi \epsilon}{\ln(d/r_0)}$  (2.38)

## 2.4 ลูกถ้วยฉนวน (Insulators) [3]

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึดหรือรองรับตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ดิน ยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ห่างกันอย่างมั่นคงพอที่จะไม่ทำให้แกว่งหรือเคลื่อนไหวเข้าใกล้กันจนทำให้เกิดสปาร์กหรือเบรกดาว์น และเกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน โดยมีตัวกลางอื่นเป็นฉนวนกันคือ อากาศ ก๊าซ หรือฉนวนเหลว ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้านอกจากทำหน้าที่ยึดสายไฟแรงสูง บัสบาร์ หรือสวิตช์ตัดตอนแล้วยังใช้เป็นภาชนะตั้งฉนวนห่อหุ้ม เช่น ปลอกฉนวนนำสาย คือ บุซซิ่ง, เซอร์กิตเบรกเกอร์, กัปดักฟ้าผ่า, หม้อแปลงกระแสและแรงดัน (CT, PT) และตัวเก็บประจุ เป็นต้น

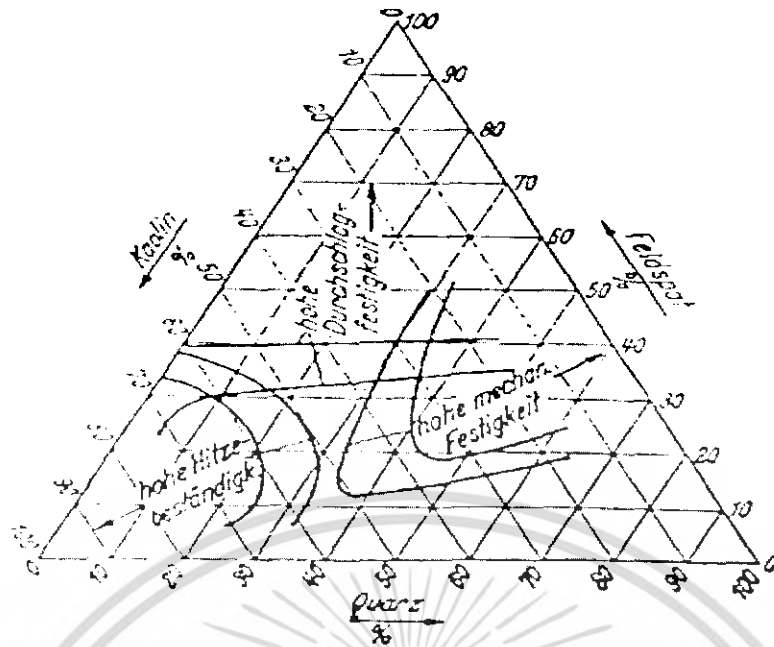
ถ้าพิจารณาจากเนื้อสารที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวนอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ พอร์ซเลน (porcelain) แก้วเหนียว (toughened glass) และสารสังเคราะห์ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาสท์เรซินอีพ็อกซีเสริมใยแก้ว ยาง เป็นต้น ลูกถ้วยฉนวนประเภทสารสังเคราะห์นิยมใช้ภายในอาคารที่ไม่เปียกชื้น ส่วนที่ใช้นอกอาคารมักจะเป็นลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน หรือแก้วเหนียว เพราะมีความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี ในที่นี้จะกล่าวถึง ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถผลิตขึ้นได้เองโดยใช้วัตถุดิบมากกว่า 85% เป็นของภายในประเทศ

2.4.1 ส่วนประกอบและการทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ในส่วนการใช้งานของลูกถ้วยฉนวน ในขณะที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่นั้น คือต้องรับและทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันใช้งาน หรือแรงดันเกินเสริมที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว ลูกถ้วยฉนวนยังต้องทำหน้าที่รับแรงกลจากน้ำหนักของสายไฟ น้ำหนักของลูกถ้วยฉนวนอื่นที่มาต่อซ้อนหรือห้อยต่อให้ยาวขึ้น แรงกลไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสลัดวงจร แรงลมพัดเมื่อเกิดพายุ ซึ่งแรงกลเหล่านี้มีทั้ง แรงดึง แรงกด และแรงบิด ยิ่งกว่านั้นลูกถ้วยก็ยังคงมีความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากแสงแดด หรือความร้อนที่เกิดจากการเกิดวาบไฟตามผิว หรือกระแสอาร์คลัดวงจร หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศอย่างฉับพลัน กล่าวโดยสรุปแล้วคือลูกถ้วยที่ดี จะต้องมีคุณสมบัติดีทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน ลูกถ้วยจะมีคุณสมบัติด้านใดก็ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสารที่นำมาประกอบเป็นลูกถ้วย กรณีของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดินเหนียว, ดินขาว (china stone), หินฟันม้า (felspar), หินแก้ว (quartz) และอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ส่วนผสมอะไร สัดส่วนมากน้อยของสารเหล่านี้อย่างไร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานลูกถ้วยว่าต้องการให้มีคุณสมบัติเน้นในด้านใด ซึ่งอาจพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 2.7

ปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบในการทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และชนิดแบบของลูกถ้วยที่นำไปใช้งานที่ต่าง ๆ กัน ในทางปฏิบัติลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจะมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำลูกถ้วยพอร์ซเลน

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมวัตถุดิบสำหรับทำลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน [3]

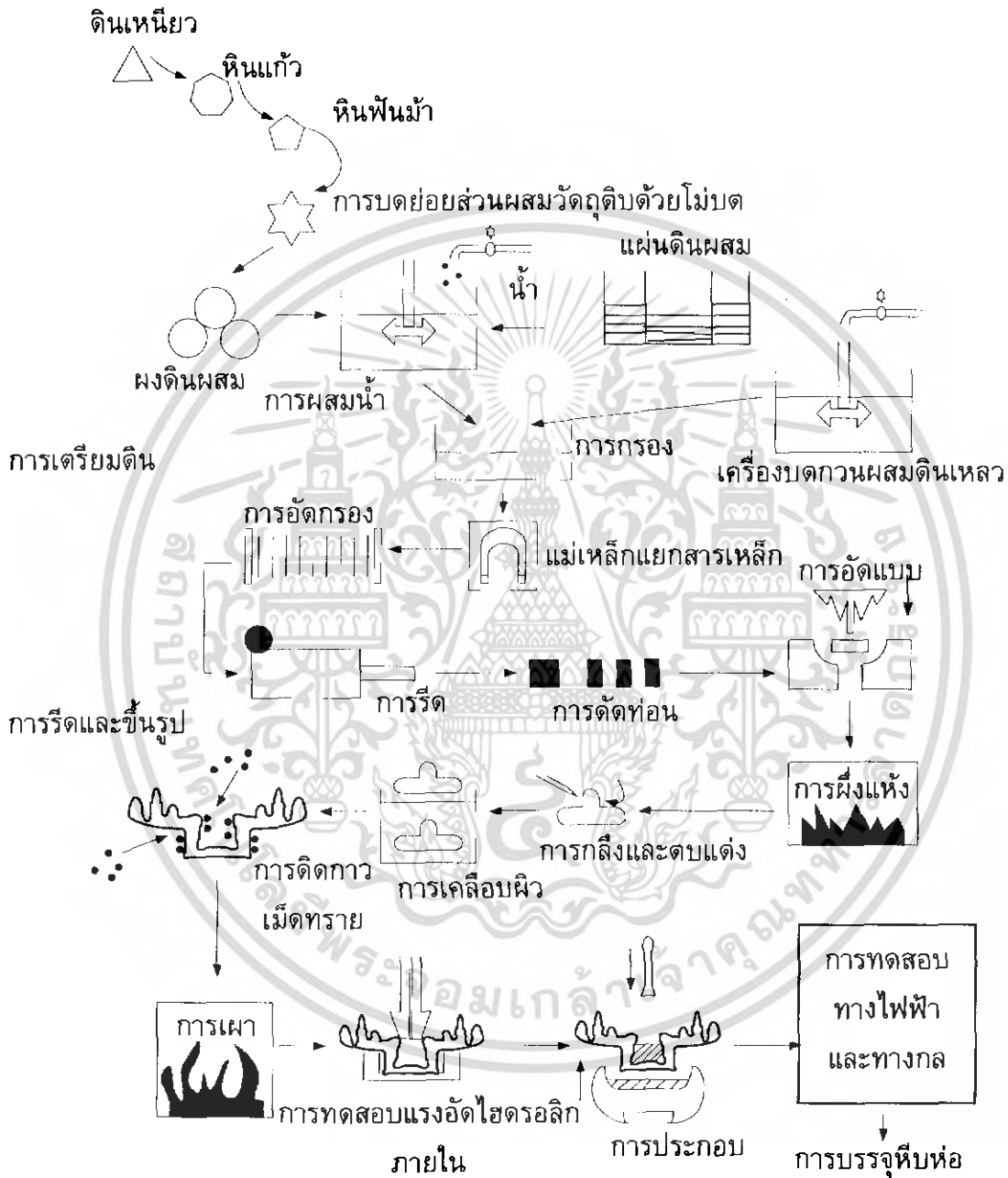
วัตถุดิบ	ขึ้นรูปโดยอาศัย ความเหนียว	ขึ้นรูปโดยการ เทแบบ	อะลูมินาสูง	อะลูมินาต่ำ
ดินขาว	15	25	15	20
ดินเหนียว	30	20	20	25
หินฟันม้า	35	35	25	35
หินแก้ว	20	20	-	-
อะลูมินา	-	-	40	20

- หมายเหตุ**
- อะลูมินาสูงหมายถึงลูกถ้วยฉนวนที่ต้องการให้มีเนื้อพอร์ซเลนเหนียว มีความคงทนต่อแรงดึงได้สูง เช่น ลูกถ้วยแขวน เป็นต้น
  - เนื้อปกตีรับพวกแรงกด น้ำหนักสาย แรงบิด และแรงลม ไม่ต้องใส่อะลูมินา

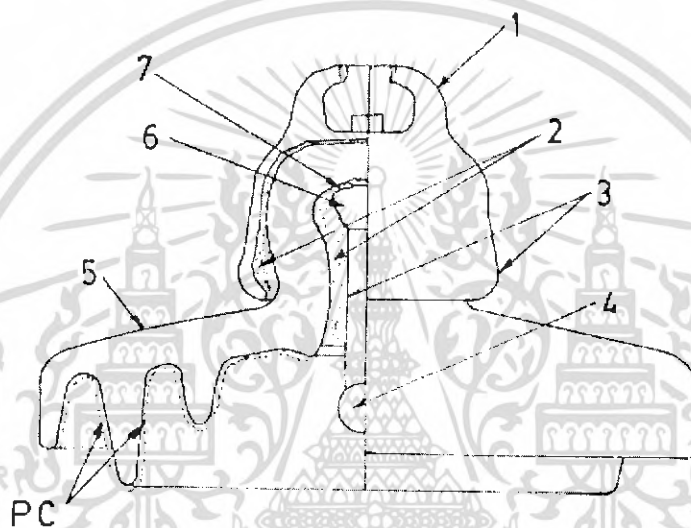
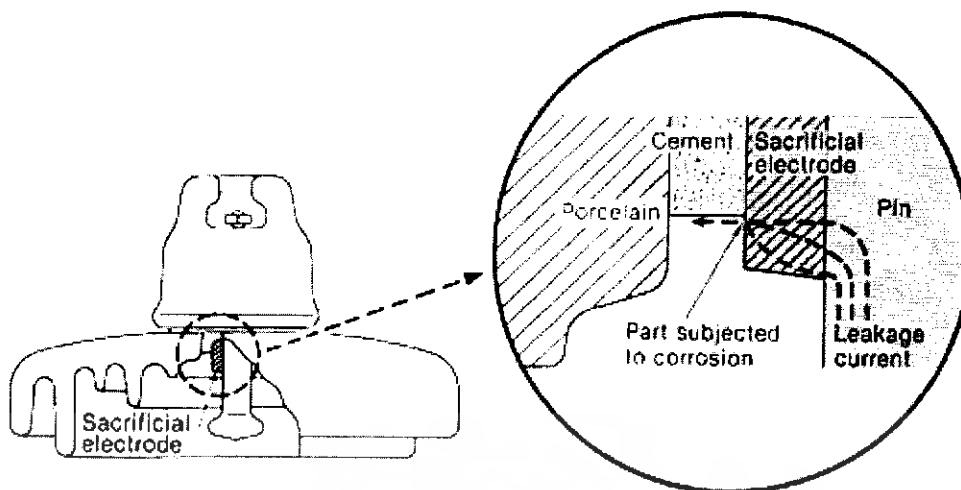
2.4.2 กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน อาจทำได้ 2 วิธี วิธีแรกเรียกว่า กระบวนการเปียก (wet process) คือขึ้นรูปโดยการเทแบบหรือการกดอัดลงในแบบในขณะที่ก้อนดินผสมสุตรยังไม่แห้ง คือยังมีส่วนผสมของน้ำหรือความชื้นเพียงพอที่จะกดอัดได้ ตามกระบวนการผลิตลำดับขั้นตอน ดังรูปที่ 2.8 ส่วนอีกวิธี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งเป็นกระบวนการแห่งใช้ดินเป็นผงแล้วอัดขึ้นรูปแบบตามที่เราต้องการแล้วนำไปเผา เช่น ตัวเก็บประจุ (capacitor) ใช้วิธีการกลึงจากก้อนดินผสมสูตรค่อนข้างแห้ง เป็นการขึ้นรูปจากดินผสมรูปแท่งดินทรงกระบอก โดยวิธีการกลึงที่บังคับด้วยคน หรือกลึงด้วยเครื่องจักรแบบอัตโนมัติ

วัตถุดิบ



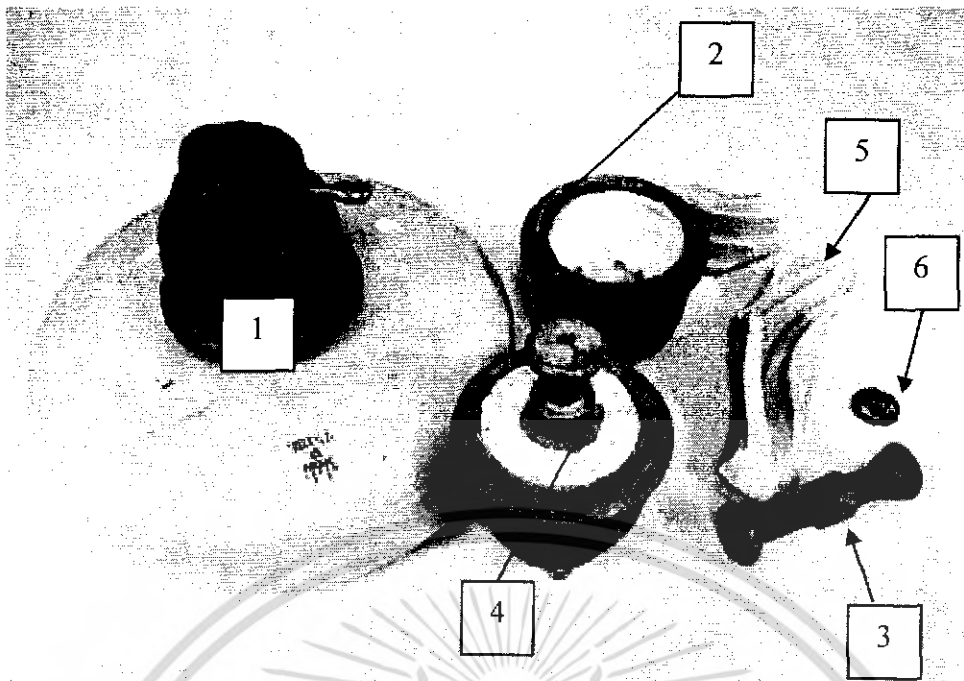
**รูปที่ 2.8** ลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบเปียกสำหรับลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบต่างๆของลูกถ้วย [4]

- เมื่อ PC คือ ระยะรั้วป้องกัน (protective creepage (leakage) per unit)
- 1 คือ ฝาครอบโลหะ (malleable cast iron cap)
  - 2 คือ ซีเมนต์ที่ทำจากหินปูนกับดินเหนียว (portland cement)
  - 3 คือ ผิวเคลือบสังกะสี (galvanized surface)
  - 4 คือ หมุดโลหะเป็นรูปทรงกลม (ball of forged steel pin)
  - 5 คือ ผิวที่เป็นเนื้อพอร์ซเลน (porcelain shell)
  - 6 คือ ปลายหมุดโลหะเป็นรูปทรงกรวย (conical end of forged steel pin)
  - 7 คือ ฉนวนรองรับที่ทำด้วยไม้ก๊อก (cork-pad)

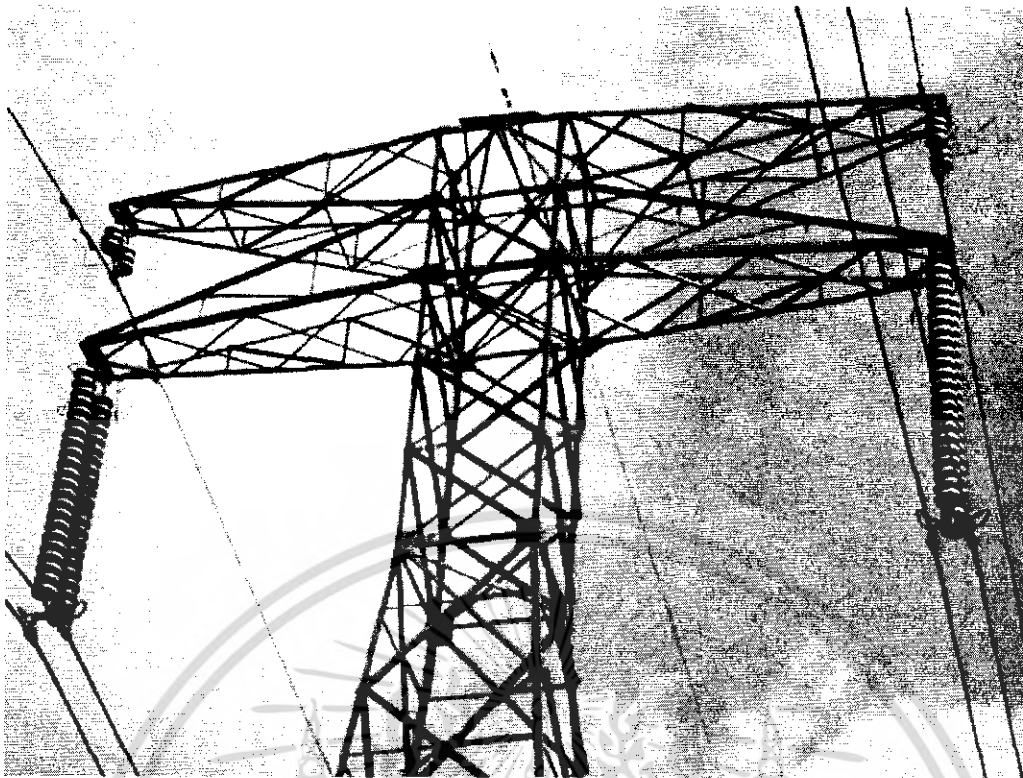
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.10** ลักษณะและองค์ประกอบส่วนต่างๆ ของลูกถ้วยกระแสดรงแบบแขวน

- เมื่อ
- 1 คือ ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบแขวน
  - 2 คือ ฝาครอบโลหะ
  - 3 คือ ก้านหมุดโลหะ
  - 4 คือ ซีเมนต์ยึดก้านหมุดโลหะและฝาครอบโลหะของลูกถ้วยกับเนื้อพอร์ซเลน
  - 5 คือ เนื้อพอร์ซเลน
  - 6 คือ ฉนวนรองรับที่ติดอยู่ระหว่างก้านหมุดโลหะกับเนื้อพอร์ซเลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.11** การใช้งานลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงในระบบ 300 kV ระหว่าง EGAT กับ TNB



**รูปที่ 2.12** การศึกษาวิธีการทำความสะอาดลูกถ้วยกระแสดรง ที่ห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าบางพลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าถือเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ความบกพร่องหรือความล้มเหลวของลูกถ้วยฉนวนย่อมทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหยุดชะงัก และเป็นผลทำให้เกิดความยุ่งยากและเสียหายต่อเศรษฐกิจ ฉะนั้นลูกถ้วยฉนวนที่ดีจะต้องไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดความบกพร่องในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

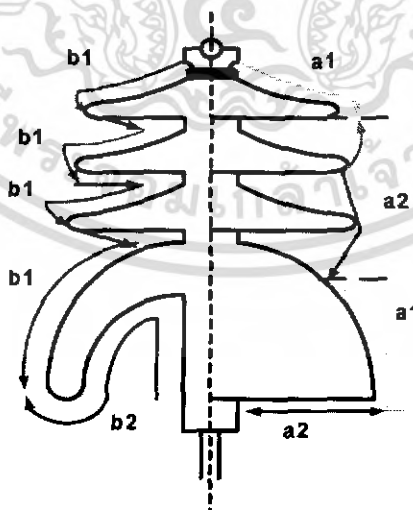
ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะใช้งานจะต้องทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ทุกรูปแบบ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแรงกล ความร้อน และปฏิกิริยาเคมี ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวนที่นำมากล่าวในที่นี้ก็คือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับมิติและคุณสมบัติของเนื้อฉนวน

2.4.4 ลักษณะสมบัติทางมิติ ลักษณะทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ควรทราบความหมายมีดังต่อไปนี้

1) ระยะรั้ว (leakage distance) คือระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั้วจะเป็นส่วนกันมิให้ผิวเปียกง่ายเมื่อในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้ลูกถ้วยมีสภาพคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น ดังระยะ  $b$  คือ  $(b_1+b_2)$  ในรูปที่ 2.13

2) ระยะรั้วป้องกัน (protective leakage distance) คือระยะที่ไม่เปียกฝนซึ่งปกปิดจะหมายถึง ระยะในปีกถ้วยหรือส่วนที่เป็นเงาเกิดจากการฉายแสงตั้งฉากกับแกนของลูกถ้วย ดังรูปที่ 2.13 คือระยะผลรวมของ  $b_2$

3) ระยะอาร์ค (arcing distance) คือระยะสั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์คนั้นเอง ระยะอาร์คแบ่งออกเป็น ระยะอาร์คแห้ง (dry arcing distance) และระยะอาร์คเปียก (wet arcing distance)



รูปที่ 2.13 ลักษณะทางมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะอาร์คแห้ง หมายถึงระยะอาร์คที่วัดในสภาวะลูกถ้วยแห้ง ซึ่งจะมีทั้งลักษณะที่วัดตามผิว และส่วนที่เป็นอากาศ คือระยะผลรวมของ  $a_1$  และ  $a_2$  ในรูปที่ 2.13

- ระยะอาร์คเปียก หมายถึง ระยะอาร์คที่วัดในลักษณะลูกถ้วยเปียก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความเปราะเป็อน ระยะอาร์คเปียกก็คือ ระยะผลรวมของ  $a_2$  ในรูปที่ 2.13

2.4.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางไฟฟ้า ที่ใช้เป็นข้อกำหนด และเกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่ควรทราบมีดังต่อไปนี้

1) แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ (low frequency dry flashover voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ทำให้เกิดไฟวาบตามผิวบนลูกถ้วยในสภาพแห้ง

2) แรงดันวาบไฟฟ้าวาบไฟผิวเปียกความถี่ต่ำ (low frequency wet flashover voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ที่ทำให้เกิดไฟวาบตามผิวบนลูกถ้วยในสภาพเปียก

3) แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต (critical flashover voltage) หมายถึง ค่าวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วย 50% เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ s

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

$$U_{w90\%} = U_{50\%} (1 - 1.3\sigma) = 0.96 U_{50\%} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและมีค่าเท่ากับ 0.03 เมื่อกระจายเป็นปกติ

5) แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (radio influence voltage = RIV) ของลูกถ้วย หมายถึงค่าแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาบนลูกถ้วย โดยมากจะเกิดตรงที่บริเวณผิวลูกถ้วย ใกล้กับที่พาดหรือยึดสายไฟ ซึ่งเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง แล้วส่งคลื่นรบกวนวิทยุ ระบบสื่อสาร ระบบควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ การแก้ปัญหาทำได้โดยเคลือบสารกึ่งตัวนำที่บริเวณร่องพาดสายไฟฟ้า เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า เช่น ในกรณีลูกถ้วยก้านตรงซึ่งเป็นลูกถ้วยฉนวนยึดสายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย รูปลักษณะของลูกถ้วยก้านตรงซึ่งมีความหนา เนื้อฉนวนระหว่างก้านโลหะที่ต่อลงดินกับอิล็กโตรดแรงสูงนั้นน้อย จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สายรัดรอบคอลลูกถ้วย (tie wire) ทำให้เกิดโคโรนาขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ลูกถ้วยก้านตรงที่จะใช้ในย่านชุมชนต้องเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำในบริเวณด้านบนของลูกถ้วยเพื่อป้องกันมิให้เกิดโคโรนาขึ้นในขณะที่ใช้งาน การเคลือบสารกึ่งตัวนำจะช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยก้านตรง ทำให้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด  $U_c$  มีค่าสูงขึ้น แต่จะทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์  $U_b$  ลดลง ฉะนั้นการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่ส่วนบนจะมีความกว้างที่พอเหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (puncture voltage) หมายถึงแรงดันที่จะทำให้เกิดการเจาะผ่านเนื้อลูกถ้วย โดยเฉพาะลูกถ้วยที่มีเนื้อฉนวน (พอร์ซเลนหรือแก้ว) มีความหนา ระหว่างอิเล็กโตรดน้อยเมื่อเทียบกับระยะอาร์ค เช่น ลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น นอกจากลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวแล้ว ยังมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งจะดูได้มาตรฐานของลูกถ้วยนั้นๆ

2.4.6 การทดสอบ การทดสอบผลิตภัณฑ์ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าลูกถ้วยที่ผลิตขึ้นในโรงงานนั้นมีคุณสมบัติและคุณภาพได้ตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งเมื่อนำไปใช้งาน แล้วจะทำให้การฉนวนของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ ไม่เกิดบกพร่อง มาตรฐานได้กำหนดให้มีการทดสอบเกี่ยวกับรูปร่าง และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกล และการอบสังกะสีของส่วนที่เป็นโลหะ อย่างไรก็ตาม การทดสอบอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) การทดสอบประจำ (routine test) หมายถึงลูกถ้วยฉนวนทุกลูกต้องผ่านการทดสอบ
- 2) การทดสอบเฉพาะแบบ (type test) เป็นการทดสอบเพื่อขออนุมัติมาตรฐานการรับรอง
- 3) การทดสอบเพื่อตรวจรับ (acceptance test)

2.4.7 การทดสอบรูปร่างและมีติ การทดสอบรูปร่างและมีติเป็นการทดสอบลักษณะทั่วไป ลูกถ้วยแต่ละชนิดแบบมาตรฐานจะกำหนดรูปร่างลักษณะมีติไว้แน่นอน พร้อมกับค่าที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้เพราะการเผาแล้วย่อมทำให้มีติลดลงจากมีติที่ยังดิบอยู่ และตรวจดูสภาพเรียบร้อยทั่วไปของผิวเคลือบมัน อย่างไรก็ตามทั้งมีติและสภาพเรียบร้อยของผิวมักจะควบคุมด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลโดยอัตโนมัติ เพราะขนานเล็กเกินไปย่อมทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือทางกลไม่ได้

2.4.8 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า รายการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าประกอบด้วย

- 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน กระแสสลับ ทดสอบแรงดันกระแสสลับ เพื่อดูว่าลูกถ้วยจะทนแรงดันโดยเฉลี่ยได้เท่าใด
- 2) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำลูกถ้วยฉนวน กระแสสลับ ทดสอบแรงดันกระแสสลับเพื่อตรวจดูว่า เมื่อฝนตกผิวลูกถ้วยเปียกแล้วจะทนแรงดันค่าเฉลี่ยเท่าใด
- 3) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤต ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50  $\mu s$  คือค่า 50%
- 4) การทดสอบแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (radio influence voltage test) ทดสอบเกี่ยวกับแรงดันกระแสสลับ เพื่อตรวจดูว่าลูกถ้วยเมื่อใช้งานจะยึดหรือรองรับตัวนำไฟฟ้าแรงสูงนั้น จะต้องไม่สร้างคลื่นออกไปรบกวนระบบสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (puncture test) ทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ เพื่อตรวจดูว่าเนื้อพอร์ซเลนจะทนต่อแรงดันได้มากน้อยเท่าใด โดยปกติการออกแบบจะให้เกิดความไวตามผิวง่ายกว่าการเจาะผ่าน เพราะเมื่อเกิดการเจาะผ่านเนื้อลูกถ้วยแล้วลูกถ้วยนั้นก็ใช้งานไม่ได้อีก ฉะนั้นเวลาทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน จึงต้องเอาลูกถ้วยจุ่มในน้ำมันฉนวน เช่น น้ำมันหม้อแปลง

2.4.9 การทดสอบทางกล ในการใช้งานของลูกถ้วยนอกจากจะต้องมีคุณสมบัติทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าแล้วลูกถ้วยยังได้รับความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักและแรงดึงกระแทกต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า ในทางปฏิบัติลูกถ้วยฉนวนใช้งานตามสภาพจริงนั้นจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันของตัวนำ และได้รับแรงกลด้วย ฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันตามที่มาตรฐานกำหนดแล้วจึงป้อนแรงดึงให้กับลูกถ้วย ซึ่งลูกถ้วยฉนวนจะได้ทนมากกว่า เมื่อทดสอบแต่เพียงทางไฟฟ้าหรือทดสอบทางกล

2) การทดสอบความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล (impact test) ในการขนส่ง การติดตั้ง ลูกถ้วยมีโอกาสที่จะได้รับแรงกระแทกหรือแรงกระทบ ซึ่งลูกถ้วยจะต้องทนต่อแรงกลเหล่านี้ได้ ทดสอบโดยการใช้ตุ้มมีน้ำหนัก มีแขนยึดหมุนรอบจุดหมุน ยกน้ำหนักให้สูงระดับหนึ่งเพื่อให้ได้แรงเมื่อตกกระทบลูกถ้วยได้ตามมาตรฐานที่กำหนด หลังจากรับแรงกระทบแล้วต้องเอาไปทดสอบความไวตามผิวซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ว่าเกิดรอยร้าวหรือแตกภายในหรือไม่

3) การทดสอบความทนต่อแรงดึง ลูกถ้วยแขวนในสภาพการใช้งานจะได้รับแรงดึงจากน้ำหนักตัวนำสายไฟ จากลูกถ้วยแขวนลูกล่าง ๆ จากแรงลม และอื่น ๆ จึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดึงด้วย โดยการดึงฝาครอบด้านหนึ่งและที่ก้านต่ออีกด้านหนึ่งในแนวแกนเดียวกัน

4) โหลดเวลา การทดสอบโหลดเวลาเป็นการทดสอบดูความมั่นคงของเนื้อพอร์ซเลน และการเกาะแน่นของส่วนที่เป็นโลหะกับซีเมนต์ จึงดึงลูกถ้วยในแนวแกนด้วยแรงดึงและเวลาที่กำหนด เพราะเวลาใช้งานจริง ๆ จะได้รับแรงดึงอยู่ตลอดเวลา หลังการดึงแล้วนำไปทดสอบความมั่นคงทางไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อดูว่ามีรอยร้าวภายในหรือไม่ ลูกถ้วยที่ดีจะไม่เกิดความชำรุดเสียหาย หรือรอยร้าวใดๆ

5) ความแข็งแรงส่วนที่เหลือ มีโอกาสเป็นไปได้ที่พวงลูกถ้วยจะได้รับแรงกระแทกจนปีกแตกหลุดออกไปหมด คงเหลือแต่เนื้อพอร์ซเลนภายในฝาครอบโลหะกับก้านต่อ ส่วนที่เหลือนี้จะต้องรับแรงกลของสายตัวนำต่อไปได้ การทดสอบทำโดยเคาะให้ปีกลูกถ้วยหลุดออกให้หมดก่อนแล้วจึงนำไปทดสอบ

6) การทดสอบความพรุน (porosity test) ลูกถ้วยฉนวนจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีนั้นจะต้องไม่มีความพรุนเลย ทั้งนี้เพื่อมิให้ดูดซึมความชื้น ทดสอบโดยการใช้น้ำพอร์ซเลนที่ได้จากการทุบให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วใส่ลงในถังน้ำยา สารละลายของ

เบสิกฟูกชินตาย อัตราความดันประมาณ 2.76 กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หรืออัตราความดันประมาณ 6.8 กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื้อพอร์ซเลนที่ดีจะไม่ดูดซึมสีนี้เข้าข้างในเนื้อพอร์ซเลน

7) การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน (thermal shock test) การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันเป็นการตรวจดูความสม่ำเสมอของเนื้อพอร์ซเลน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเย็นไปร้อน และจากร้อนไปเย็นโดยทันทีทันใด หากเนื้อไม่สม่ำเสมอก็ทำให้เกิดรอยร้าวภายในได้ ฉะนั้นหลังการทดสอบแล้วต้องนำไปทดสอบวาบไฟตามผิวชั่วคราวอีกครั้งหนึ่งว่ายังคงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีอยู่ การทดสอบจะจุ่มน้ำเย็นประมาณ 2 องศาเซลเซียส จุ่มนาน 10 นาที แล้วนำไปจุ่มน้ำร้อนประมาณ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 นาที ทำซ้ำเต็มจนครบ 10 วัฏจักร (โปรดดูตามมาตรฐานเฉพาะของลูกถ้วยนั้นๆ)

## 2.5 ลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปราะเปื้อน [5]

สิ่งเปราะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอกหรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและ เป็นสาเหตุทำให้เกิดวาบไฟตามผิวง่าย การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดวาบไฟตามผิว

2.5.1 สิ่งเปราะเปื้อน โดยทั่วไปนิยมสิ่งเปราะเปื้อนสามารถแบ่งตามประเภทออกได้เป็น 4 ประเภท ตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานได้แก่ สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปราะเปื้อนอื่น ๆ

1) สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล ได้แก่ พวกละอองเกลือ (Sea salt หรือ Sodium Chloride; NaCl) การสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้บนลูกถ้วยฉนวน เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะด้วยกันคือ การ สะสมแบบรวดเร็ว (Rapid pollution) เกิดขึ้นในกรณีที่มีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาเกลือทะเลเข้ามา เช่น พายุไต้ฝุ่น เป็นต้น และการสะสมแบบธรรมดา (Ordinary pollution) เกิดจากลมทะเลที่พัดเป็นฤดูกาล เป็นการสะสมที่ใช้เวลาค่อนข้างนาน ตามปกติแล้วระดับของสิ่งเปราะเปื้อนจะลดลงไปเมื่อลึกลงไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ตามอาจจะพบเกลือทะเลที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลถึง 100 กิโลเมตร

2) สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรม ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้บริเวณเขตอุตสาหกรรม จะเปราะเปื้อนครึ้มและ เขม่าที่ปลอยออกมาจากปล่องท่อไอเสีย ระดับของสิ่งเปราะเปื้อนชนิดนี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น สิ่งเปราะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด มีส่วนผสมขององค์ประกอบทางด้านเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ

3) สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย ทะเลทรายเป็นบริเวณที่สิ่งเปราะเปื้อนสามารถที่จะสะสมบนผิวลูกถ้วยได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากปริมาณของฝนที่ตกเพียงเล็กน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งทะเล จะมีสิ่งเปราะเปื้อนที่คล้าย ๆ กับสิ่งเปราะเปื้อนประเภทฝุ่นแต่สำหรับทะเลทรายที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั้น นอกจากสิ่งเปราะเปื้อนประเภทฝุ่นแล้วยังมีเกลือทะเลผสมอยู่ด้วย

4) สิ่งเปราะเปื้อนอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว เช่น เถ้า หรือ ฝุ่น ภูเขาไฟ หรือปุ๋ย อาจเกิดขึ้นโดยการฉีดพ่นให้กับต้นไม้ พืช ผักหรือการเผาไหม้ของวัตถุพืชต่าง ๆ นอกจากนี้แล้วจากบทความบางฉบับ ได้กล่าวถึงสิ่งเปราะเปื้อนชนิดนี้โดยเน้นไปที่สิ่งเปราะเปื้อนจากฝุ่น (Dust Contamination) โดยได้อธิบายว่าเกิดจากการพัดเอาทราย หรือฝุ่นที่เกิดจากดินไปเกาะติดลูกถ้วยจนวน ระดับความรุนแรงของสิ่งเปราะเปื้อนค่อนข้างต่ำ องค์ประกอบของสิ่งเปราะเปื้อนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่

2.5.2 การวัดค่าระดับความเปราะเปื้อน การวัดค่าระดับความเปราะเปื้อนที่สถานที่ที่ติดตั้งลูกถ้วยจนวน มีหลายวิธีดังนี้

1) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสิ่งเปราะเปื้อนที่รวบรวมโดยวิธี Directional Gauges

2) การวัดค่าปริมาณการสะสมสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยจนวนเทียบเท่ากับปริมาณเกลือ (NaCl) ซึ่งจะให้ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำสิ่งเปราะเปื้อนมาละลายน้ำที่มีปริมาณเท่ากันซึ่งจะเรียกวิธีนี้เรียกว่าการหาค่า ESDD (Equivalent Salt Deposit Density)

3) การนำเอาข้อมูลทางสถิติจำนวนครั้งของการเกิดวابلตามผิวของพวงลูกถ้วยที่มีความยาวแตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์

4) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงผิวของลูกถ้วยจนวนตัวอย่าง

5) การวัดค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยจนวนขณะที่ได้รับแรงดันใช้งานปกติ (เป็นการหาค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา)

การวัดระดับความเปราะเปื้อนแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันกล่าวคือ วิธีที่ 1 และ 2 สามารถทำได้โดยง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่วิธีที่ 1 นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลลักษณะช่วงเวลาการสะสมและระดับของความเปราะเปื้อนออกมาโดยตรง วิธีที่ 2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับของความเปราะเปื้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ผิวลูกถ้วยจนวนมีความเปียกชื้น ความถูกต้องของการวัดทั้ง 2 วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่บ่อยในการวัด ถ้าการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเกิดขึ้นไม่เร็วนัก ก็อาจจะทำการวัดเดือนละครั้ง หรือเว้นระยะห่างกว่านี้ แต่ถ้าการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเกิดขึ้นรวดเร็ว ก็จะต้องทำการวัดถี่ขึ้น สำหรับวิธีที่ 3 นั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่มีราคาแพง ข้อมูลที่ได้จะถูกต้องเฉพาะลูกถ้วยที่มีความยาวใกล้เคียงกับลูกถ้วยที่พิจารณา และใช้งานที่ระดับแรงดันใกล้เคียงกัน สองวิธีสุดท้ายต้องการแหล่งพลังงานและอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง วิธีการประเมินค่าระดับของความเปราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่การวัดหาค่า ESDD การวัดหาค่าความต้านทานของผิว และการวัดหาค่ากระแสรั่วไหล

การหาค่าระดับความเปรอะเป็อนนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น [5] ได้แนะนำให้พิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ ลักษณะของพื้นที่แต่ละแห่งที่สัมพันธ์กับระดับความเปรอะเป็อน และข้อมูลของเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานลูกถ้วยฉนวน ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญมาทำการวิเคราะห์

2.5.3 การแบ่งระดับความเปรอะเป็อน [5] ได้แบ่งระดับความเปรอะเป็อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** การแบ่งระดับของความเปรอะเป็อน

ระดับของความเปรอะเป็อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บริเวณที่ปลอดจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย</li> <li>- บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบอุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยน้อยโดยที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่านหรือมีฝนตกบ่อย</li> <li>- บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ๆ ภูเขาโดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง</li> </ul>
2) ปานกลาง (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมา และอาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง</li> <li>- บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นแต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอยๆ</li> <li>- บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลาย ๆ กิโลเมตร)</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สูง (Heavy)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง</li> <li>- บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล</li> </ul>
4) สูงมาก(Very heavy)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit</li> <li>- บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมากๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเประอะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง</li> <li>- ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา</li> </ul>

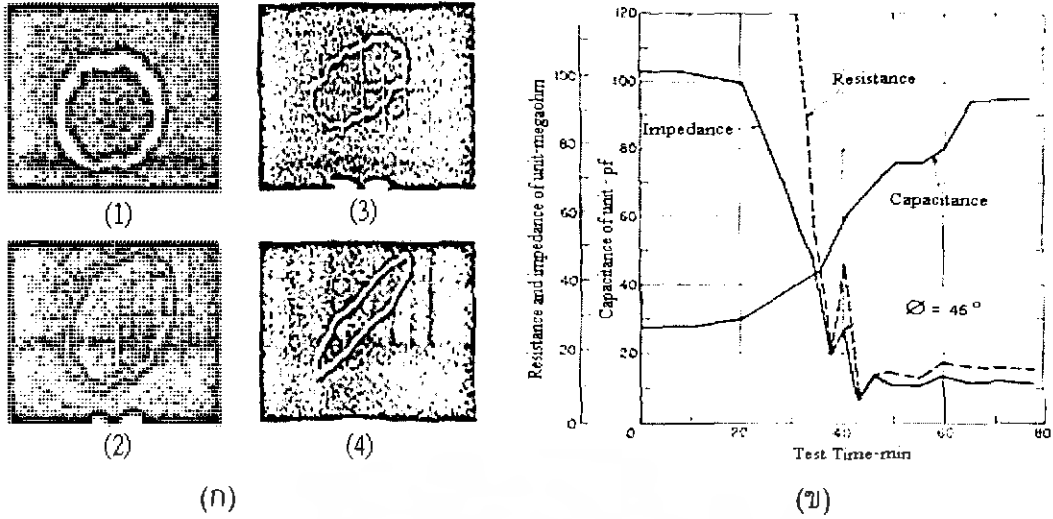
**หมายเหตุ** - บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากธัญพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับความเประอะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง

- บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

2.5.4 การวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเประอะเปื้อน การศึกษากลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากการเประอะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวน ได้มีการศึกษามากกว่า 40 ปี แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะเข้าใจได้อย่างถ่องแท้ ความพยายามที่จะทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวจากอดีตที่ผ่านมา เริ่มต้นจากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกายภาพของการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน และได้มีความพยายามที่จะเสนอรูปแบบของสมการและโมเดลขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว

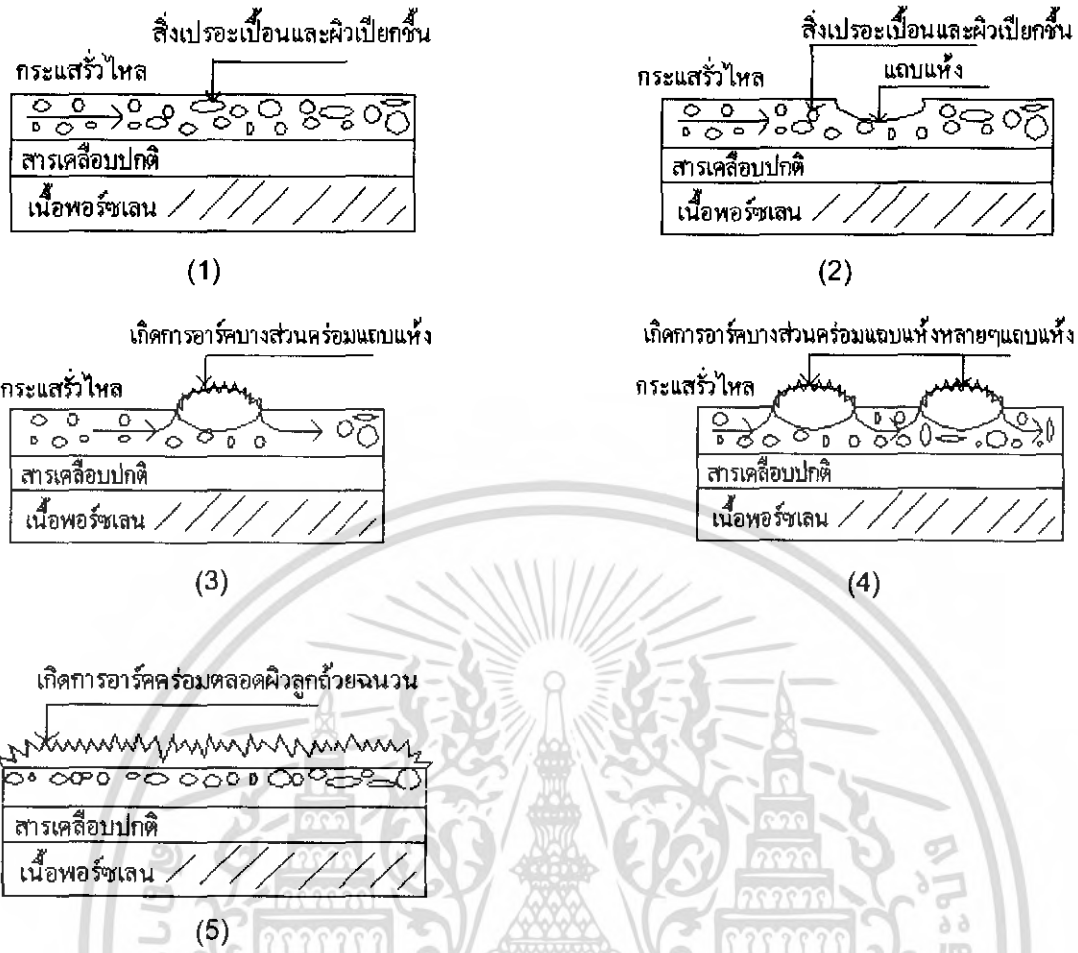
กลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเประอะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบาๆ สภาพนำไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของผิวของลูกถ้วยฉนวน (Surface Impedance) จะเปลี่ยนสภาพจากคาปาซิทีฟในตอนเริ่มต้นไปเป็นแบบรีซิสทีฟเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.14** (ก) รูปลิจาจัว (Lissajour figure) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาพผิวเปียกก่อนเกิดวابلไฟตามผิว (ข) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกของอิมพีแดนซ์ที่ผิวลูกถ้วยฉนวน

กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวลูกถ้วย โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่าแถบแห้ง (Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาว์นของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จต่อไปอีกการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อกันได้ ก็เกิดวابلไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน ขั้นตอนของการเกิดวابلไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากสิ่งเปราะเป็อนแสดงในรูปที่ 2.15



**รูปที่ 2.15** ขั้นตอนของการเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน

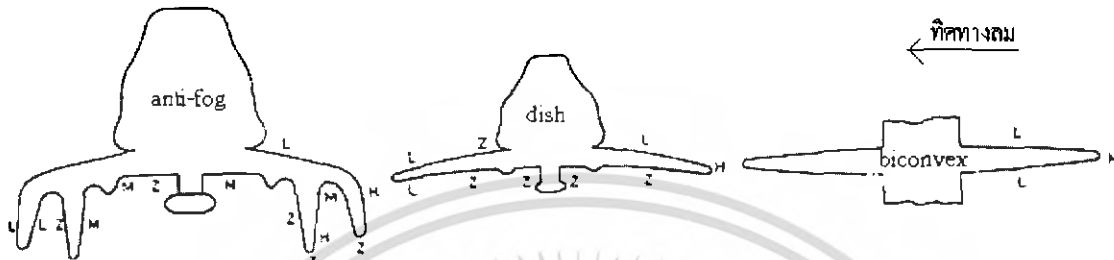
2.5.5 แนวทางแก้ไขการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.5.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวน การป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยโดยวิธีการลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนได้แก่ การทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาที่กำหนด หรือ การใช้ลูกถ้วยฉนวนประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (Aerodynamic Profiles)

1) การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนตามความระยะเวลาที่เหมาะสม การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนนั้นเป็นวิธีดั้งเดิม จะทำเมื่อลูกถ้วยฉนวนเริ่มสกปรก สามารถทำได้ทั้งในขณะที่ดับกระแสไฟฟ้า (De-Energize) และขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า (Hot Line) โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ (Conductivity) ที่ใช้ในการฉีด ระยะห่างและ แรงดันของน้ำ (Minimum Distance and Nozzle Pressure) ทิศทางลม (Wind Direction) ตลอดจนลักษณะการติดตั้งของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การออกแบบลูกถ้วยฉนวนให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น [5] จากผลการศึกษาการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนที่มีรูปร่างต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่าลูกถ้วยฉนวนแบบ biconvex มีสิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะน้อยที่สุด รายละเอียดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.3



**รูปที่ 2.16** การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทควีน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน

โดยที่ H คือ บริเวณที่มีการจับเกาะหนาแน่น

M คือ บริเวณที่มีการจับเกาะปานกลาง

L คือ บริเวณที่มีการจับเกาะเบาบาง

Z คือ บริเวณที่ไม่มีการจับเกาะหรือมีการจับเกาะที่น้อยมาก

**ตารางที่ 2.3** ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยฉนวนแต่ละแบบ

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

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยฉนวน คือการทำความสะอาดตัวเองโดยธรรมชาติ เมื่อมีลมพัดผ่านหรือฝนตก ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti-Fog นั้นออกแบบให้มีระยะรั้วสูงขึ้นแต่จะพบว่าโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีได้สูงสุด ลูกถ้วยแบบ Disk นั้นโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีมากกว่าลูกถ้วยแบบ biconvex แต่ก็มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตนเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ดีกว่า

2.5.5.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน สภาพนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสรั้วไหลตามผิว จะเป็นผลให้ลูกถ้วยฉนวนมีโอกาสที่จะเกิดวามไฟตามผิวได้ง่าย การป้องกันไม่ให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าที่มีลักษณะฟิล์มนำไฟฟ้ากระจายอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน สามารถทำได้โดยการ

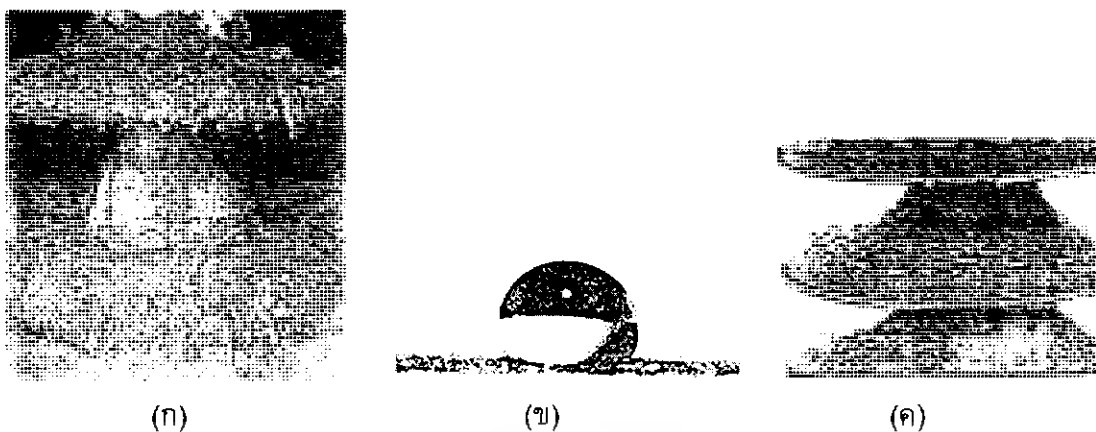
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบผิวของลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติต่อต้านการซึมผ่านของน้ำ (Water Repellent หรือ Hydrophobic Material) เช่น พวก Silicone Pastes หรือ Silicone Elastomer หรือการใช้ลูกถ้วยยางซิลิโคน (Silicone rubber insulator) มีรายละเอียดดังนี้

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

2) Silicone Elastomer หรือ Fluorocabons มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายสีสามารถผสมให้เจือจางเพื่อให้เหมาะสมในการทาหรือพ่นเคลือบ การเคลือบลูกถ้วยฉนวนด้วย Silicone Elastomer ปกติแล้วจะมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร Silicone Elastomer จะมีคุณสมบัติต่อต้านการจับเกาะของน้ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างน้ำกับผิวที่เคลือบไว้มีค่าน้อย ในสภาพฝนที่ตกปรอยๆ หยดน้ำที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนจะรวมตัวกันเป็นรูปทรงกลมกลิ้งตกลงไปจากผิวลูกถ้วยฉนวนเหมือนกับน้ำที่กลิ้งบนใบบอน หรือจะแยกเกาะเป็นเม็ดๆ ไม่เชื่อมต่อกันทำให้ทางเดินของกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนไม่ต่อเนื่องและลดน้อยลงโอกาสที่ลูกถ้วยฉนวนจะเกิดวาทไฟตามผิวจึงมีค่าน้อยลง

3) Silicone Rubber Insulator เป็นลูกถ้วยฉนวนที่ทำด้วยยางซิลิโคน มีคุณสมบัติไม่ยอมให้น้ำจับเกาะสูง แต่เมื่อติดตั้งใช้งานกลางแจ้ง จะต้องรับแสงแดด โอโซน หรือฝนตกโดยตรง หรือในกรณีที่มีการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนประเภทไอเกลือและสารเคมีบนผิวลูกถ้วยฉนวนทำให้คุณสมบัติต่อต้านการซึมผ่านของน้ำลดลง คุณสมบัติและเหมาะสมในการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาวิจัย



**รูปที่ 2.17** (ก) การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่เคลือบด้วย Hydrocarbon Grease หลังจากติดตั้งใช้งาน 3 ปีในบริเวณเปรอะเปื้อน (ข) หยดน้ำทรงกลมบนผิวลูกถ้วยยางซิลิโคน (ค) ลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

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

2.5.5.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเกิดได้ยากขึ้นถ้าลูกถ้วยฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวสูงขึ้น อาจจะทำให้ได้โดยการเพิ่มระยะรั้ว (Leakage Distance) ของลูกถ้วยฉนวนหรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ

1) การเพิ่มระยะรั้วของลูกถ้วยฉนวนทำได้โดยการติดตั้ง Creepage Extender หรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนที่มีระยะรั้วมากขึ้น การเพิ่มระยะรั้วของลูกถ้วยฉนวนให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั้วไหลเกิดขึ้นน้อยลง เช่น ลูกถ้วยฉนวนแบบ Anti Fog มาตรฐาน IEC 815 ได้แนะนำค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance (mm/kV) ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน โดยเป็นฟังก์ชันของระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ค่าต่ำสุดของ Nominal Specific Creepage Distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบ หรือเลือกใช้ฉลูลูกถ้วยฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน [6]

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) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการดูแลบำรุงรักษา และบริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรพิจารณาใช้ฉลูลูกถ้วยฉนวนที่มีค่า Nominal Specific Creepage Distance เพิ่มขึ้นโดยจะขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนหลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบเคลือบลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย

2) การใช้ฉลูลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผลของการเคลือบผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้มีกระแสรั่วไหลตามผิวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนจะสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งอันเป็นสาเหตุการเกิดวาบไฟตามผิวได้โดยง่าย

## 2.6 เคเบิลสเปซเซอร์ [5]

เคเบิลสเปซเซอร์ เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่สำคัญในระบบจำหน่าย ใช้สำหรับการยึดโยงสายตัวนำให้มีระยะห่างระหว่างสายตัวนำด้วยกัน และสายตัวนำกับสายกราวด์เพียงพอ เคเบิลสเปซเซอร์ที่ดีจะต้องไม่เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเกิดวาบไฟระหว่างสายตัวนำกับสายกราวด์ หรือเกิดกระแสรั่วไหลระหว่างสายตัวนำไปหาสายกราวด์ โดยผ่านทางเคเบิลสเปซเซอร์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำหน้าที่เป็นฉนวนของตัวเคเบิลสเปซเซอร์ได้แก่ สภาพบรรยากาศ หรือสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น, คุณสมบัติของน้ำฝน, สภาพความเปรอะเปื้อนอาจจะเป็นเนื่องมาจากสารเคมีและสิ่งเปรอะเปื้อนอื่นๆ รวมไปถึงคุณสมบัติของการฉนวนของสายตัวนำที่วางพาดบนตัวเคเบิลสเปซเซอร์ด้วย

2.6.1 การใช้งานเคเบิลสเปซเซอร์ เคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้งานในระบบจำหน่าย ที่ระดับแรงดัน 15 kV – 35 kV จะใช้สำหรับการยึดโยงสายในแต่ละเฟสให้มีระยะห่างที่เหมาะสมหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจจะใช้รองรับสายตัวนำในระบบจำหน่ายต่อขนานร่วมไปกับเสาไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ระยะห่างของสายตัวนำกับสายกราวด์เกิดเข้าใกล้กันมากเกินไป อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในลักษณะไลน์ทูกราวด์ฟอลด์ได้ซึ่งทำให้เสถียรภาพของระบบจำหน่ายต่ำลง ความผิดพลาดในลักษณะดังกล่าวอาจจะเกิดจาก การที่มีกิ่งไม้มาพาดผ่านสายไลน์มาใกล้ยังสายกราวด์ หรือจากหิมะหรือแรงลมหรือสัตว์เลื้อยคลาน ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดเจนจากการใช้งานเคเบิลสเปซเซอร์ก็คือ การที่สามารถลดระยะความกว้างของเขตสิทธิปลอดภัยสำหรับสายส่ง (right of way) ซึ่งอาจจะเป็นแนวระหว่างต้นไม้กับสายไฟ ซึ่งจะช่วยลดอัตราการเกิดความผิดพลาดดังได้กล่าวมาแล้ว

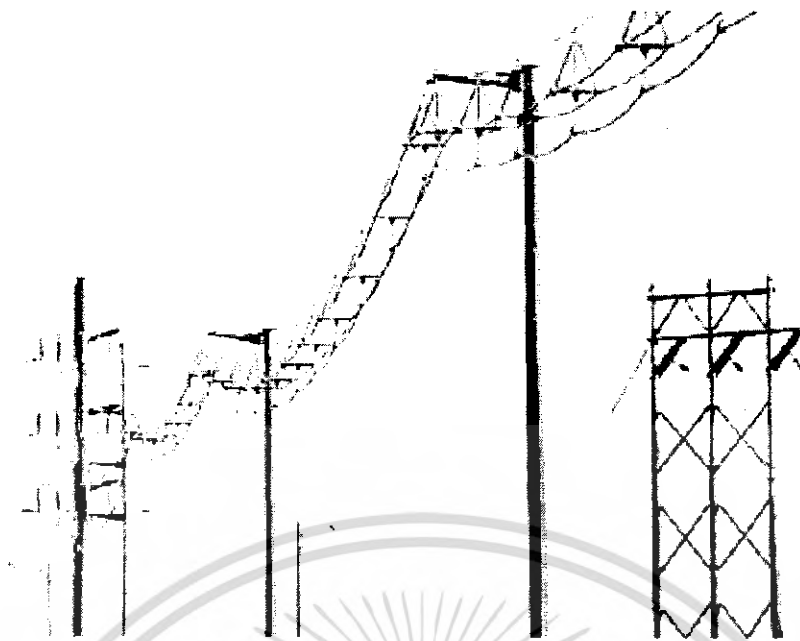


**รูปที่ 2.18** การใช้งานเคเบิลสเปซเซอร์ในประเทศไทยที่ระดับแรงดัน 12 kV – 33 kV



**รูปที่ 2.19** การใช้งานเคเบิลสเปซเซอร์ในต่างประเทศที่ระดับแรงดัน 5 kV – 46 kV [7]

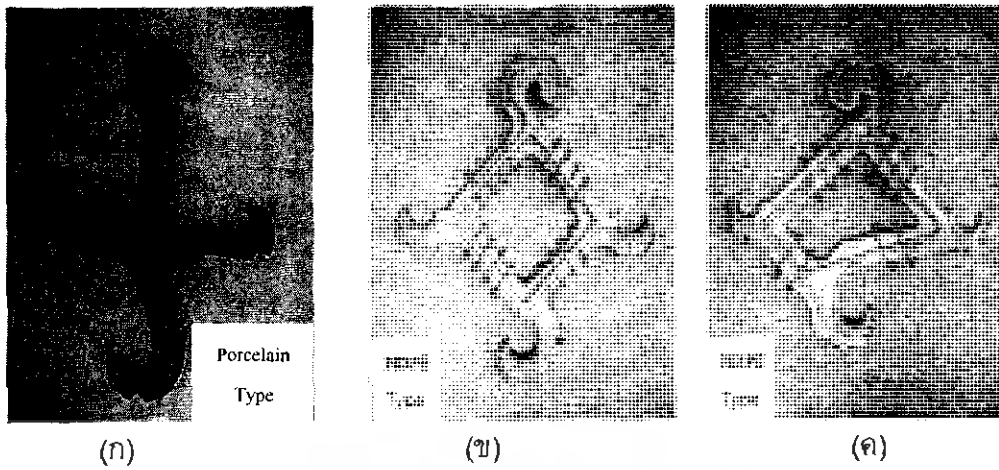
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.20** การใช้งานเคเบิลสเปซเซอร์ในต่างประเทศที่ระดับแรงดัน 69 kV [7]

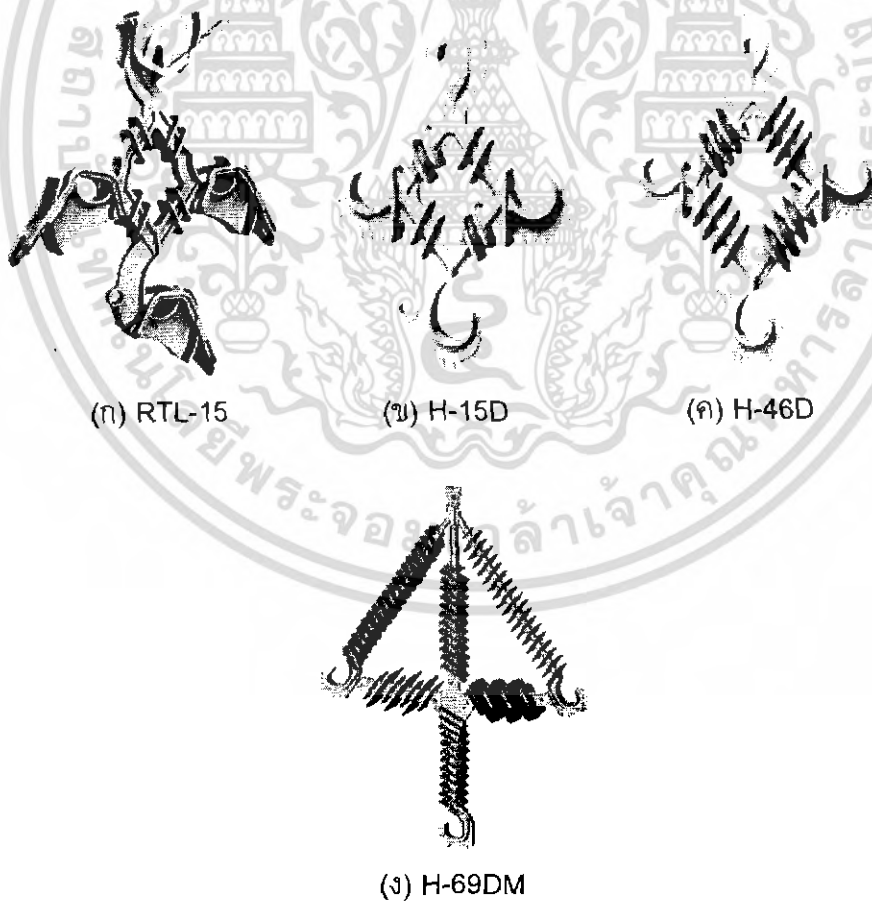
การเลือกใช้งานเคเบิลสเปซเซอร์จะพิจารณาถึง ความกว้างของสิทธิปลอดภัยสำหรับสายส่ง ผลกระทบต่อทัศนวิสัยของการมอง ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของระบบ การใช้งานสเปซเซอร์ที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสม หรือการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดคุณลักษณะของการเป็นฉนวนของเคเบิลสเปซเซอร์ต่ำลง เช่นการใช้งานในบริเวณสภาพแวดล้อมเปรอะเปื้อน เมื่อผิวของเคเบิลสเปซเซอร์มีความเป็นสภาพนำไฟฟ้าในบางส่วนอันเนื่องมาจากความเปรอะเปื้อนรวมตัวกับความชื้นจะทำให้มีกระแสรั่วไหลอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งโอกาสความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดจากสายตัวนำ ไปยังกราวด์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้แล้ว ความสกปรกของสภาวะบรรยากาศแวดล้อมจะทำให้คุณสมบัติของน้ำฝนที่ตกมายังเคเบิลสเปซเซอร์เปลี่ยนไป ถ้าน้ำฝนมีสภาพความนำไฟฟ้าที่มากขึ้นก็อาจจะทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของเคเบิลสเปซเซอร์มีค่าต่ำลง ซึ่งโดยปกติแล้วตัวเคเบิลสเปซเซอร์เองก็ต้องผ่านการทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าทั้งในสภาวะผิวแห้งสะอาด และผิวเปียกมาก่อนแล้ว ก่อนที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งในการทดสอบที่สภาวะผิวเปียกนั้นคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ก็จะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ แต่หากว่าค่าสภาพความต้านทานของน้ำที่ใช้ในการทดสอบเปลี่ยนไปก็จะส่งผลต่อความเป็นฉนวนของเคเบิลสเปซเซอร์ได้

เคเบิลสเปซเซอร์อาจจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามวัสดุที่ใช้ทำได้แก่ แบบ high density polyethylene (hdpe) และ porcelain ซึ่งในการใช้ตามคู่มือวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [7] ได้แบ่งตามประเภทของวัสดุ โดยอาจจะมียูปร่างที่แตกต่างกันออกไปตามบริษัทผู้ผลิตดังแสดงใน รูปที่ 2.21



**รูปที่ 2.21** เคเบิลสเปซเซอร์ที่มีใช้ในประเทศไทย

- เมื่อ (ก) คือ Porcelain cable spacer แบบ dimonite  
 (ข) คือ HDPE Cable spacer แบบ hendrix (H - 35D)  
 (ค) คือ HDPE Cable spacer แบบ reliable (S - 15)



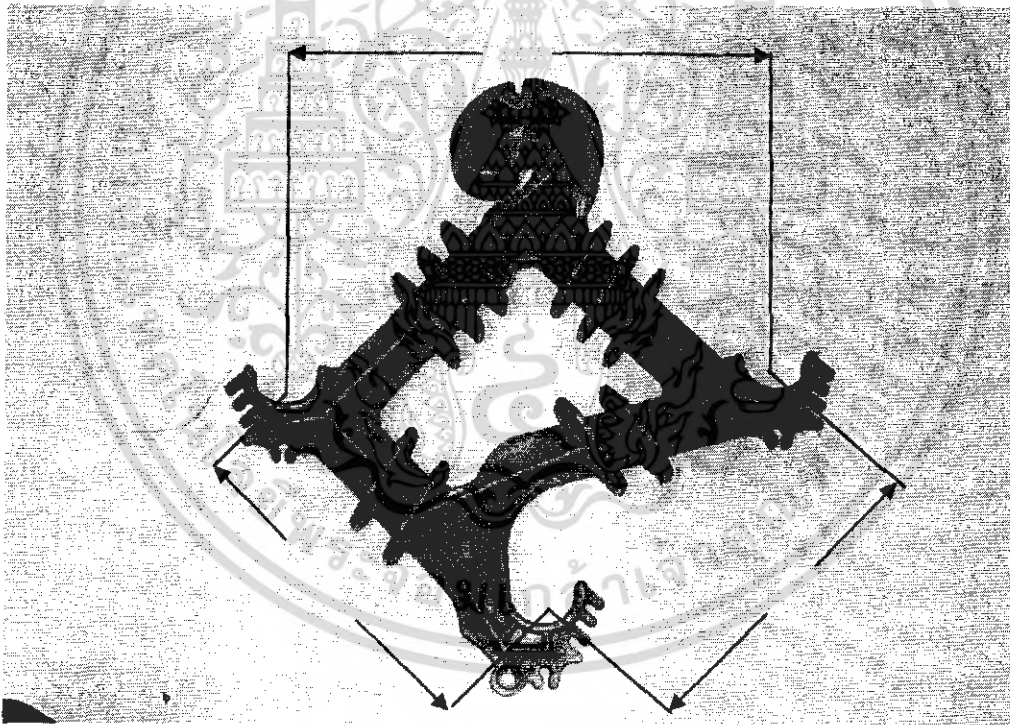
**รูปที่ 2.22** เคเบิลสเปซเซอร์แบบต่างๆที่มีใช้ในต่างประเทศ เป็นแบบที่ทำด้วยวัสดุ HDPE [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ตัวอย่างคุณสมบัติ และพิกัดต่างๆของเคเบิลสเปซเซอร์ [7]

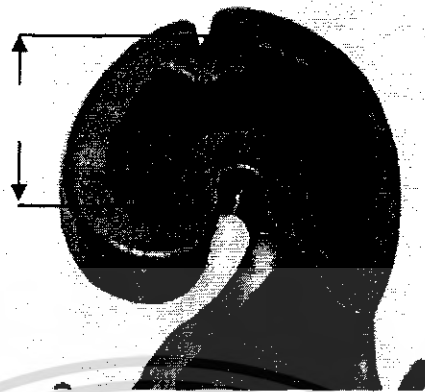
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติ และพิกัดต่างๆของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ HDPE

พิกัดแรงดัน, line to line	kV	33	
การทดสอบความคงทนอยู่ใต้ต่อแรงดันความถี่ต่ำแบบ -ผิวแห้ง	kV/1min	70	
	-ผิวเปียก	kV/10sec	50
แรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ	-ผิวแห้ง	kV	90
	-ผิวเปียก	kV	65
แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	-ทางบวก	kV	130
	-ทางลบ	kV	150
แรงดึงทดสอบทางกลมากที่สุด	N	8,000	
phase to phase spacing "C" ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ	mm.	220	
dimension "H" ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ	mm.	75	

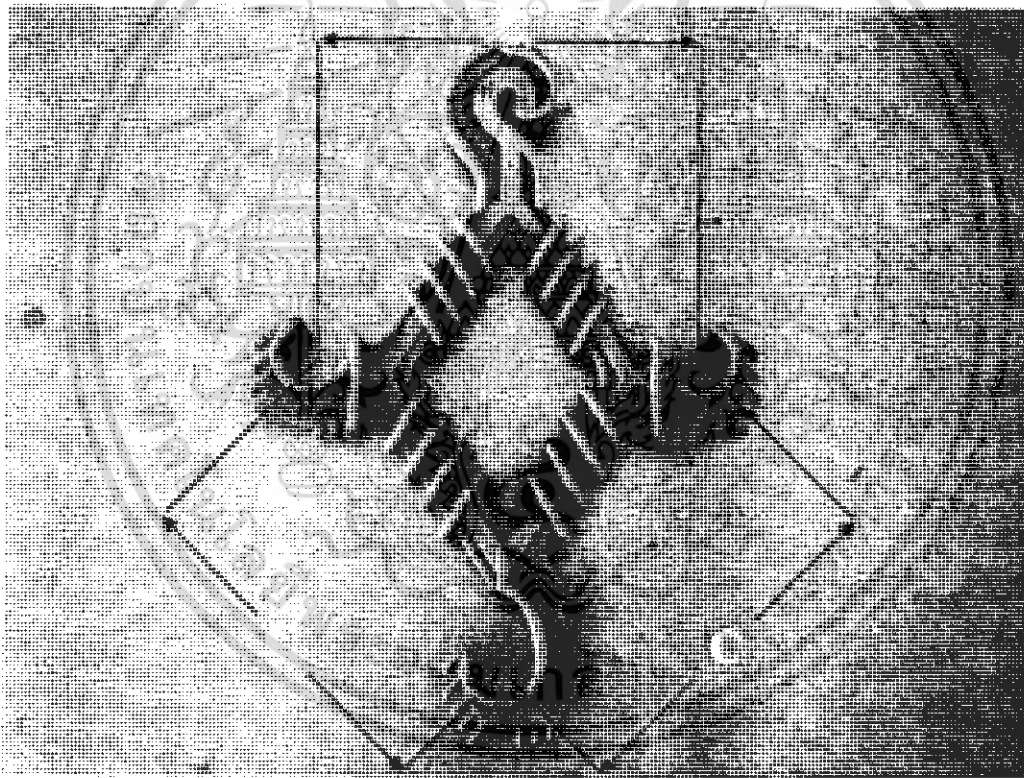


รูปที่ 2.23 รูปร่าง และระยะของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Reliable (S-15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

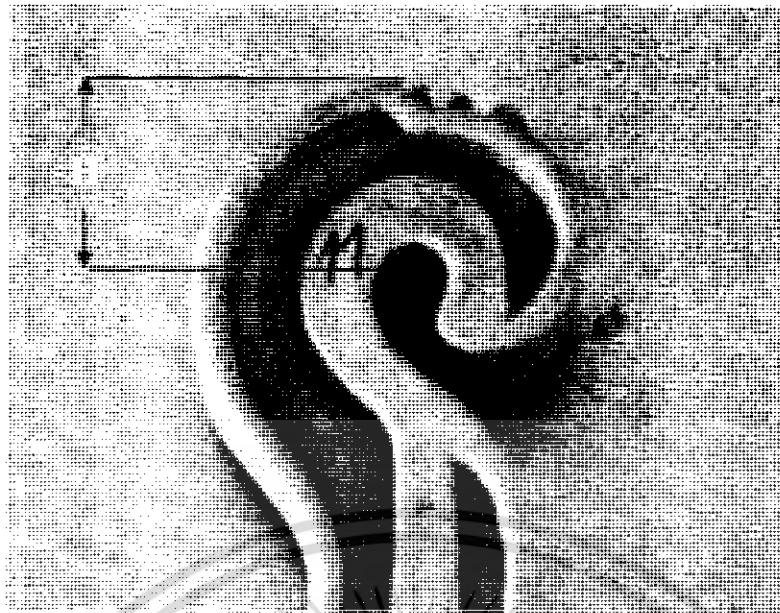


**รูปที่ 2.24** ระยะรัศมีหัวเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Reliable (S-15)



**รูปที่ 2.25** รูปร่างและระยะของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix (H - 35D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

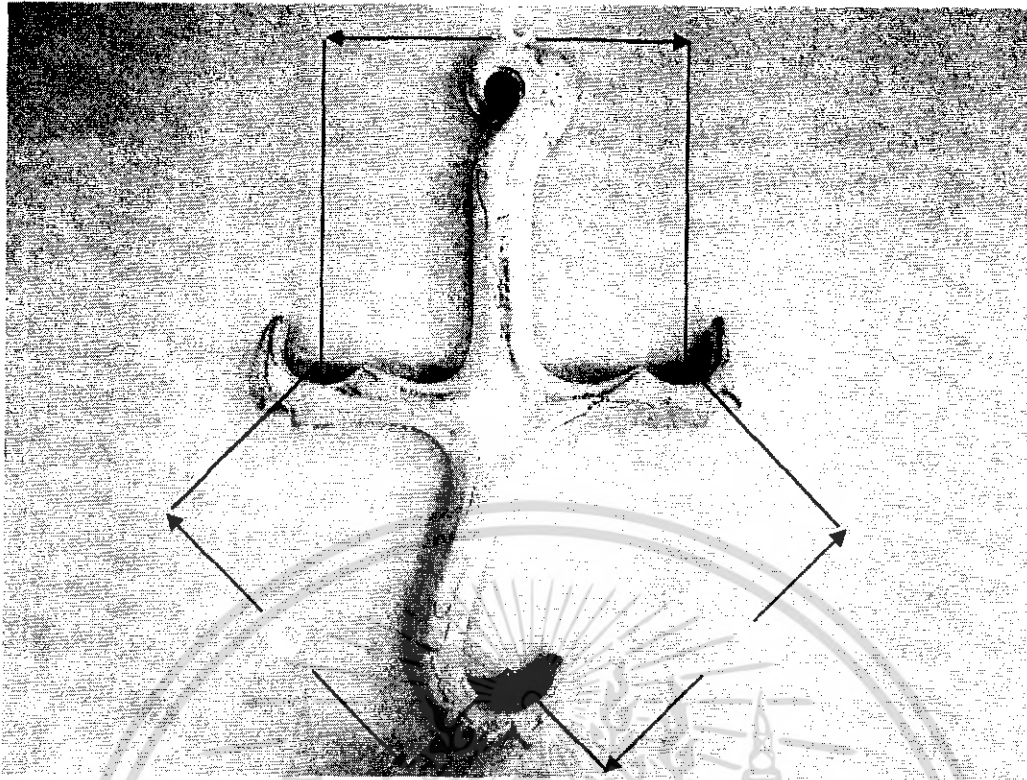


**รูปที่ 2.26** ระยะเวลาที่มีหัวเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix (H - 35D)

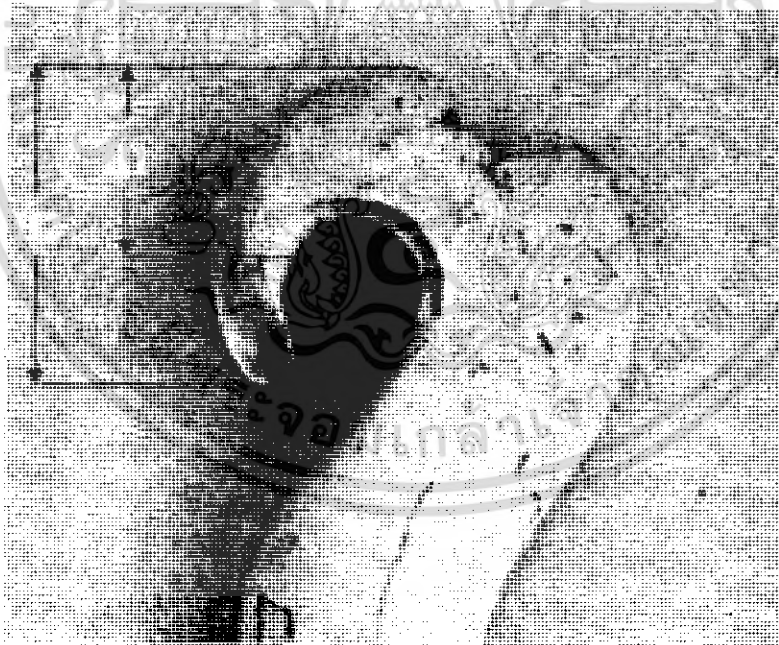
**ตารางที่ 2.6** คุณสมบัติ และพิกัดต่างๆของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Porcelain

พิกัดแรงดัน, line to line		kV	33
การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันความถี่ต่ำแบบ	-ผิวแห้ง	kV/1min	70
	-ผิวเปียก	kV/10sec	50
แรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำ	-ผิวแห้ง	kV	90
	-ผิวเปียก	kV	65
แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	-ทางบวก	kV	130
	-ทางลบ	kV	150
แรงดึงทดสอบทางกลมากที่สุด		N	9,000
phase to phase spacing "C" ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ		mm.	228
dimension ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ	"H1"	mm.	70
	"H2"	mm.	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 รูปร่างและระยะของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite



รูปที่ 2.28 ระยะรัศมีหัวเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า

2.7.1 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (kind of dc link) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบดังนี้ [8]

1) ระบบขั้วเดียว (monopolar link) โดยที่ระบบขั้วเดี่ยวนี้อาจมีสายตัวนำ 1 สายตัวนำ ซึ่งโดยปกติจะเป็นขั้วลบ และเส้นทางเดินการไหลกลับถ้าไม่เป็นพื้นดินก็จะเป็นน้ำ ซึ่งโดยปกติแล้วมักใช้ระบบนี้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการส่งจ่าย โครงสร้างของระบบชนิดนี้จะเป็นตัวที่พัฒนาไปสู่การใช้ระบบแบบระบบ 2 ขั้ว

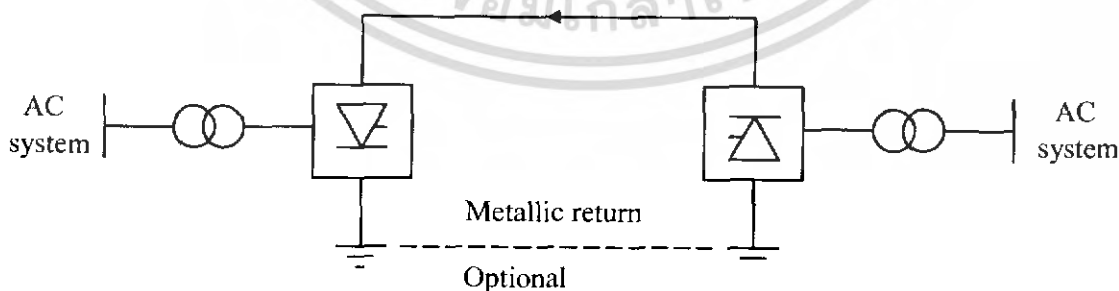
การใช้พื้นดินแทนในการทำให้ครบวงจร (earth return) สถานที่หรือพื้นดินที่ใช้ไม่ควรจะเป็นความต้านทานสูงหรือมีสิ่งรบกวนจากใต้ดินและใต้ฟ้า รูปแบบตัวนำในการทำให้ครบวงจรจะใช้กับแรงดันต่ำ

2) ระบบสองขั้ว (bipolar link) โดยที่ระบบสองขั้วนี้จะมีสายตัวนำ 2 สายตัวนำ ตัวนำใดตัวนำหนึ่งจะเป็นบวกหรือลบ ซึ่งแต่ละสถานีในปลายทางนั้นมีระดับในการแลกเปลี่ยนพลังงานเท่าๆกัน โดยในการต่อจะเชื่อมแบบอนุกรมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะมีจุดต่อของกราวด์ระหว่างตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.30 พบว่าคุณภาพแรงดันในการส่งจ่ายแบบโครงข่าย 2 วงจร (double-circuit) ภายใต้สภาวะที่ปกติ มีสัญญาณรบกวนของฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นน้อยกว่า เมื่อส่งจ่ายในระยะทางที่ไกลๆ ซึ่งจะดีกว่าแบบระบบขั้วเดียว และทิศทางการไหลกลับของกำลังจะได้มาโดยการเปลี่ยนแปลงความแตกต่างของขั้วของการควบคุม (โดยไม่ใช้กลไกทางสวิตช์)

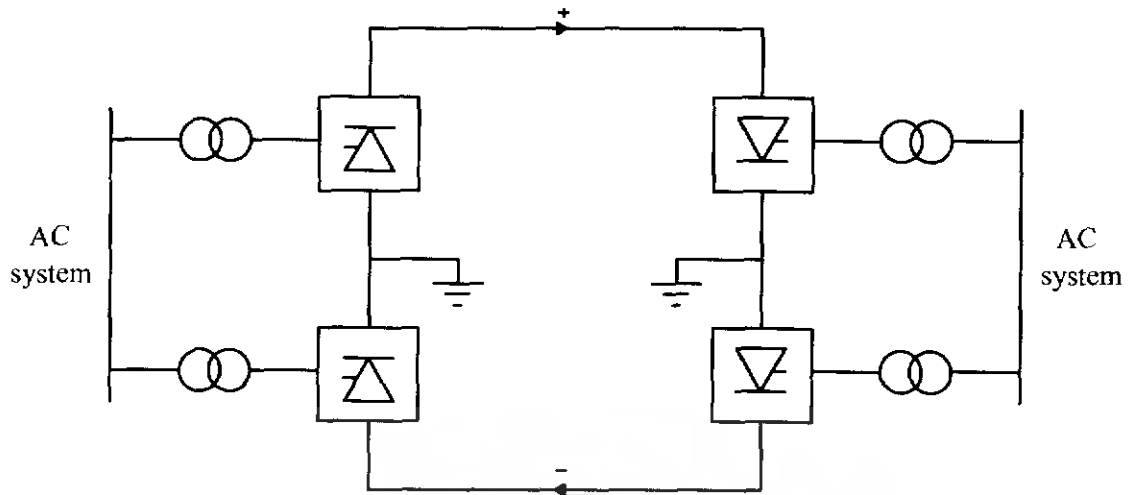
3) ระบบขั้วเดียวร่วมกัน (homopolar link) ระบบขั้วเดียวร่วมกันจะมีสายตัวนำ 2 ตัวนำ หรือมีตัวนำมากกว่า มีขั้วคล้ายระบบ 2 ขั้ว ปกติขั้วมักจะเป็นลบมากกว่าเพราะเนื่องจากว่าการเกิดสัญญาณรบกวนของโคโรนา (corona) เกิดขึ้นน้อยกว่า

จาก 3 ระบบดังกล่าวเป็นการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง ในกรณีที่ต้องการส่งพลังงานระหว่างหลายจุดก็สามารถที่จะทำได้ ซึ่งเรียกระบบนี้ว่าระบบหลายขั้ว (Multiterminal system) ซึ่งการเชื่อมโยงอาจเป็นแบบขนาน หรืออนุกรมก็ได้

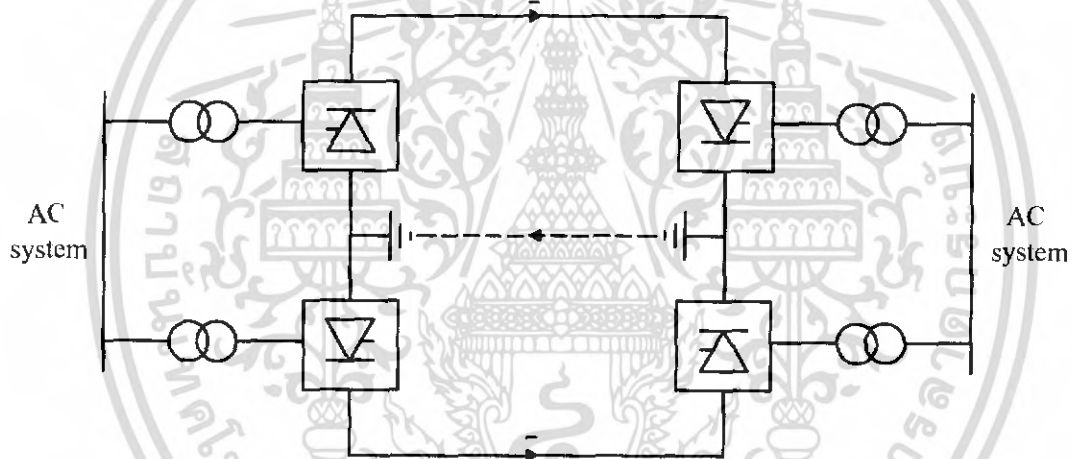


รูปที่ 2.29 ระบบขั้วเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ระบบสองขั้ว



รูปที่ 2.31 ระบบขั้วเดียวร่วมกัน

### 2.7.2 ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ [9]

1. ระบบผลิต (Generation system)
2. ระบบส่งจ่าย (Transmission system) และระบบส่งจ่ายย่อย (sub transmission system)
3. ระบบจำหน่าย (Distribution system)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีหน่วยงานในการทำหน้าที่อยู่ 3 หน่วยงานคือ

- 1) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 2) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 3) การไฟฟ้านครหลวง

โดยจะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 138 ถึง 765 kV เป็นมาตรฐานแรงดันซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน ANSI C-84 (American National Standards Institute) สำหรับแรงดันไฟฟ้าย่อยปกติจะมีแรงดันเท่ากับ 34.5 ถึง 115 kV

**ตารางที่ 2.7** ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย

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

เมื่อเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบ กระแสสลับ และกระแสตรงพบว่า

1. เมื่อใช้สายตัวนำรวมเท่ากัน ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถส่งจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากในระบบกระแสตรงนั้นค่า กำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) จะมีค่าเป็นศูนย์ เพราะค่าความถี่เท่ากับ ศูนย์

2. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จะมีประสิทธิภาพ และค่าแรงดันเรกกูเลชัน (voltage regulation) ดีกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

3. ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะมีความน่าเชื่อถือสูงในด้านความมั่นคงของการส่งกำลังไฟฟ้า

4. ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะสามารถเชื่อมโยงระบบที่มีความถี่ที่มีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากไม่มีระบบการซิงโครนัส (synchronous)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

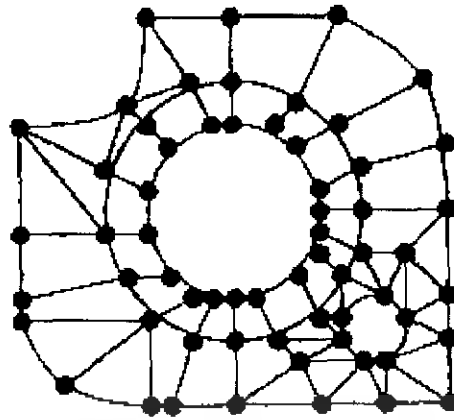
5. ถึงแม้ว่าราคาของอุปกรณ์ชุดคอนเวอร์เตอร์ยังมีราคาแพง แต่เมื่อมีการส่งจ่ายที่ระยะทางไกลๆ ค่าใช้จ่ายโดยรวมของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีราคาถูกกว่า เพราะสายส่งกระแสสลับในหนึ่งวงจรจะต้องใช้สายไฟถึง 3 เส้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสตรงจะใช้เพียงแค่ 2 เส้น และในกรณีที่ระบบกระแสตรงที่ใช้พื้นดินแทนในการทำให้ครบวงจร จะใช้สายส่งเพียงแค่เส้นเดียวเท่านั้น

6. ในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถมาปรับเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันได้เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งปัจจุบันได้พยายามแก้ไขปัญหานี้โดยการพัฒนาเอาสารกึ่งตัวนำมาใช้เป็นสวิตช์

## 2.8 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [10]

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศ และการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่างๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก ความสามารถของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสมภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องบินและสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักออกแบบทั่วไปอย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวังผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

2.8.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element: fem) คืออะไร ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วย เอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 2.32



**รูปที่ 2.32** การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่าความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น, ความแม่นยำของผลเฉลย และยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้นกล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใดลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบการกระจายเชิงเส้นตรง (linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น หากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ และหาเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ให้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้วอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

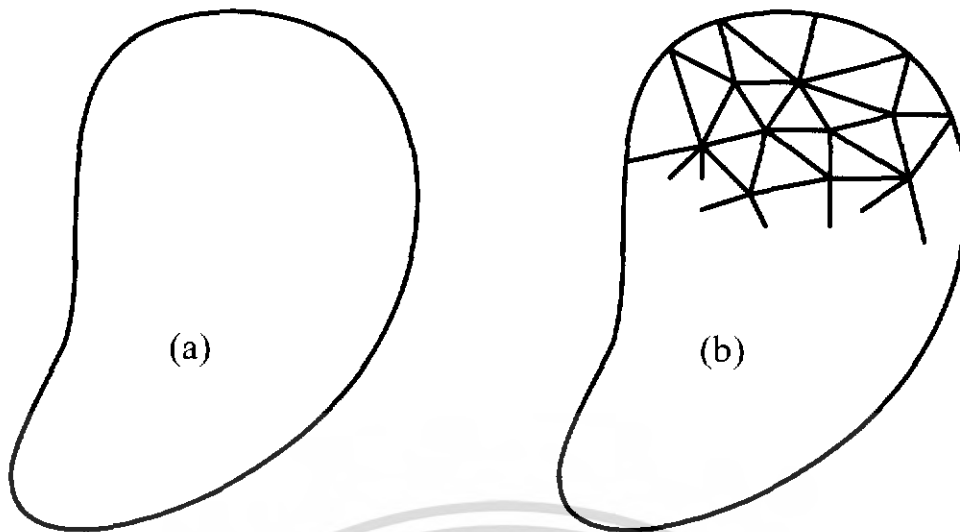
2.8.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า เริ่มแรกในปี 1943 ได้นำเอาทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์งานทางด้านโครงสร้างในวิศวกรรมโยธายังมิได้นำมาใช้งานวิศวกรรมไฟฟ้า ต่อมาได้มีการค้นคว้า และนำมาใช้งานหลายแขนง จนกระทั่งในปี 1986 ได้มีผู้ประยุกต์นำเอาหลักการมาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic, em) เป็นงานพื้นฐานไปสู่งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และอื่นๆ อีกมากมายอย่างการแก้สมการคลื่น (wave equation)

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) ในแบบต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์ที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุดทีเดียว

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (interpolation functions)” ซึ่งการคำนวณจะต้องทำหลายขั้นตอน และใช้เวลามากเพื่อทำการที่เข้าไปเข้ามาด้วยเหตุนี้ผู้ใช้งานจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพื่อให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

2.8.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์ วิศวกรมีความจำเป็นมากที่จะต้องทำความเข้าใจกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสิ่งหนึ่งที่สำคัญจำเป็นต้องทราบก็คือลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆ เพื่อจะนำไปออกแบบตัวอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ดังนั้นการที่จะนำเอาขอบการวิเคราะห์แบบใดมาใช้ต้องให้มีความเหมาะสมกับลักษณะงาน SHARP รุ่น EL - 5020 ในโหมดการอินทิเกรต (integrate) จะพบว่าเมื่อป้อนค่าลิมิตบน และลิมิตล่างแล้ว เครื่องก็จะถาม ค่า  $n=?$  นั้นหมายถึงการแบ่งรูปสี่เหลี่ยมออกเป็น ส่วนเล็กๆ จากนั้นเครื่องก็จะนำผลการคำนวณในแต่ละรูปมารวมกัน หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็จะคล้ายกันคือ ทำการแบ่งรูปทรงโครงสร้างที่ยาก และซับซ้อนออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆที่เรียกว่า “เอลิเมนต์ (element)” ตามชนิดของการวิเคราะห์ภายในขอบเขตของชิ้นงาน โดยทั่วไปนิยมการวิเคราะห์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ ชิ้นส่วนเล็กๆ ในแต่ละรูปนั้นจะต้องไม่ทับซ้อนกันพิจารณาดังรูปที่ 2.33



**รูปที่ 2.33** วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ

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

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.33 (a) เป็นของเขตงานหรือวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งในระบบหนึ่งนั้นประกอบไปด้วย

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

2) โดเมน (domain) ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตของระบบ ลักษณะส่วนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะของจุดที่ต่างกัน

3) สมการบังคับ (governing) ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะบอกให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆในลักษณะที่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพจากมวล โมเมนต์ัม หรือพลังงาน ก็ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการเช่น สมการอนุพันธ์การสมดุล เป็นต้น

4) เงื่อนไข (loading condition) เงื่อนไขจากข้อกำหนดภายในจาก แรง (force), อุณหภูมิ (temperature), กระแส (current), สนาม (field) และอื่นๆ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนแล้วมีผลกระทบซึ่งกันและกันทั้งสิ้น เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะในระบบ การกระตุ้นจากไหลภายในขอบเขตที่เกิดขึ้นกับผลกระทบอื่น นั้นเป็นเงื่อนไขที่เราเรียกว่า "boundary condition"

สำหรับรูปที่ 2.33 (b) เป็นการแบ่งขอบเขตงานออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า "เอลิเมนต์ (element)" การพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อยจากจุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน จากนั้นก็หาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูปเมตริกซ์ พิจารณาหาสัมประสิทธิ์เมตริกซ์ (coefficient matrix) ให้อยู่ในลักษณะของพิกัด  $(x, y, z)$  หรือเรียกว่า “สัมประสิทธิ์โกลบอล (global coefficient)”

จากนั้นก็แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) หรือเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) เพราะปัญหาที่สำคัญส่วนมากที่ศึกษาในทางวิศวกรรม จะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆในลักษณะที่ต่อเนื่อง 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

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (2.40)$$

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

$$D = \epsilon E \quad (2.41)$$

โดย  $\epsilon$  แทนค่าเพอร์มิททิวิตีของกลาง และ  $E$  แทนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field intensity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า  $V$  โดย

$$E = -\nabla V \quad (2.42)$$

แทนค่าในสมการก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.43)$$

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

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.44)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาของการหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า โดยปกติจะประกอบด้วย

1) การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า  $V_0$  ที่มีค่าคงที่ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง โดยที่  $V_s$  แทนค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนั้น

$$V_s = V_0 \quad (2.45)$$

2) การกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง

ดังนี้

$$\nabla V_s = 0 \quad (2.46)$$

2.8.5 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง ควรจะนำความรู้ความเข้าใจวิธีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ตลอดจนขั้นตอนพื้นฐานนำมาประยุกต์เพื่อการคำนวณหาผลลัพธ์ต่างๆที่เกิดขึ้นกับปัญหาทางด้านของแข็ง เช่น การเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ อันเกิดจากการยืด และหดตัว ตลอดจนความเครียด และความเค้นที่เกิดขึ้นตามมา วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มพัฒนาจากการแก้ปัญหาทางด้านของแข็งโดยสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากวิธีการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงภายนอกที่มากระทำ ในการใช้วิธีการดังกล่าวผู้ใช้งานได้สมมุติลักษณะการกระจายของการเคลื่อนตัว (displacement) ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งบนเอลิเมนต์ แล้วจึงทำการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัว ณ จุดต่อต่างๆ และจากนั้นจึงทำการคำนวณหาความเครียด และความเค้น วิธีการเช่นนี้บางครั้งเรียกกันว่า วิธีการใช้การเคลื่อนตัว (displacement method) ในขณะเดียวกันในช่วงแรกๆของการพัฒนาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้อีกเช่นกัน ได้มีการใช้หลักการอื่นๆในการสมมุติตัวแปรที่ต่างกันบนเอลิเมนต์เช่นการสมมุติการกระจายของความเค้นโดยเรียกกันว่าวิธีการใช้แรง

(force method) และการสมมุติตัวแปรซึ่งประกอบด้วยการกระจายของความเค้นและการเคลื่อนตัวไปพร้อมๆกันบนเอลิเมนต์ซึ่งเรียกว่าวิธีการผสม (mixed method) เป็นต้น

ในปัจจุบันการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่ายและใช้กันมากในการประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างๆ ไปจะเป็นการใช้วิธีการแรกซึ่งคือการสมมุติลักษณะของการกระจายของการเคลื่อนตัวของบนเอลิเมนต์ ดังนั้นผู้ใช้งานจะใช้วิธีการนี้มาประยุกต์ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้กับปัญหาในหลายๆรูปแบบ เริ่มตั้งแต่การคำนวณการเคลื่อนตัว และความเค้นที่เกิดขึ้นในปัญหาโครงสร้างเหล็กท่อน ปัญหาแผ่นระนาบ ปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกนใดแกนหนึ่ง ปัญหาการโค้งงอของคาน ปัญหาการยืดหยุ่นในสามมิติ รวมไปถึงวิธีการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ ปัญหาต่างๆเหล่านี้มีลำดับขั้นตอนในการแก้ที่แตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ใช้ในปัญหานั้นๆ

จากที่กล่าวมาแล้วนั้นผู้ใช้งานจะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ประยุกต์ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนโดยขยายวงกว้างไปทุกสาขาแล้วแต่ผู้คิดประยุกต์นำไปใช้นั้นก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย

### ตารางที่ 2.8 ข้อดี และข้อเสียของไฟไนต์เอลิเมนต์

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถใช้ได้กับรูปทรงได้หลายรูปทรงหรือรูปทรงที่ยุงยากโดยใช้การแบ่งเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ ในการแทนค่าทั้ง ขอบเขต (boundary)	1. ในการ simulation รูปทรงที่ยุงยาก สลับซับซ้อนนั้น เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการ simulation ต้องมีหน่วยความจำ (ram) ที่มากพอในการสำรองข้อมูลในการคำนวณ (โดยเฉพาะรูป 3 มิติ)
2. สามารถใช้ได้กับขอบเขตปัญหาทั้งแบบเชิงเส้น (linear) และแบบไม่เชิงเส้น(non linear) ได้	2. ในการวาดรูปทรงของวัตถุที่มีความซับซ้อนนั้นจะมีเส้นโค้งจำนวนมาก จะทำให้การแบ่งขอบเขต (boundary) มีมาก เป็นผลให้การสร้างโครงข่าย (mesh) มากตามไปด้วย จึงอาจเกิดการผิดพลาดในการ simulation ได้
3. สามารถใช้ได้กับปัญหาที่เป็นสารเนื้อเดียว และสารเนื้อผสม	ง่าย และเวลาในการคำนวณจะช้ามากถ้ามีจำนวนโครงข่ายมาก
4. สามารถใช้กับ higher-order element ได้	3. ในการตรวจสอบรูปทรงที่มีความซับซ้อนนั้นสามารถทำได้ยาก
5. สามารถใช้ได้กับปัญหาขอบเขตได้เกือบจะทุกกรณี	

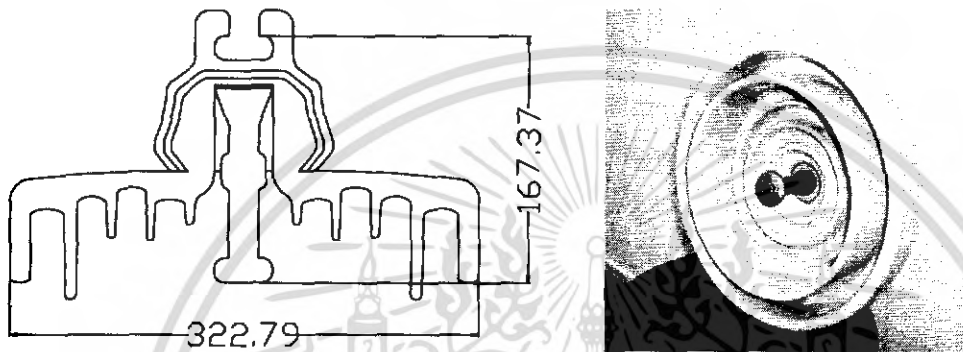
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การทดสอบ

#### 3.1 การทดสอบลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง

3.1.1 การเตรียมลูกถ้วยที่นำมาทดสอบ ลูกถ้วยที่นำมาทดสอบเป็นลูกถ้วยใช้งานจริง ในระบบ 300 kV 300 MW เป็นลูกถ้วยที่ได้รับการออกแบบตามมาตรฐานตาม IEC Pub. 61325-1995



รูปที่ 3.1 ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงแบบแขวน

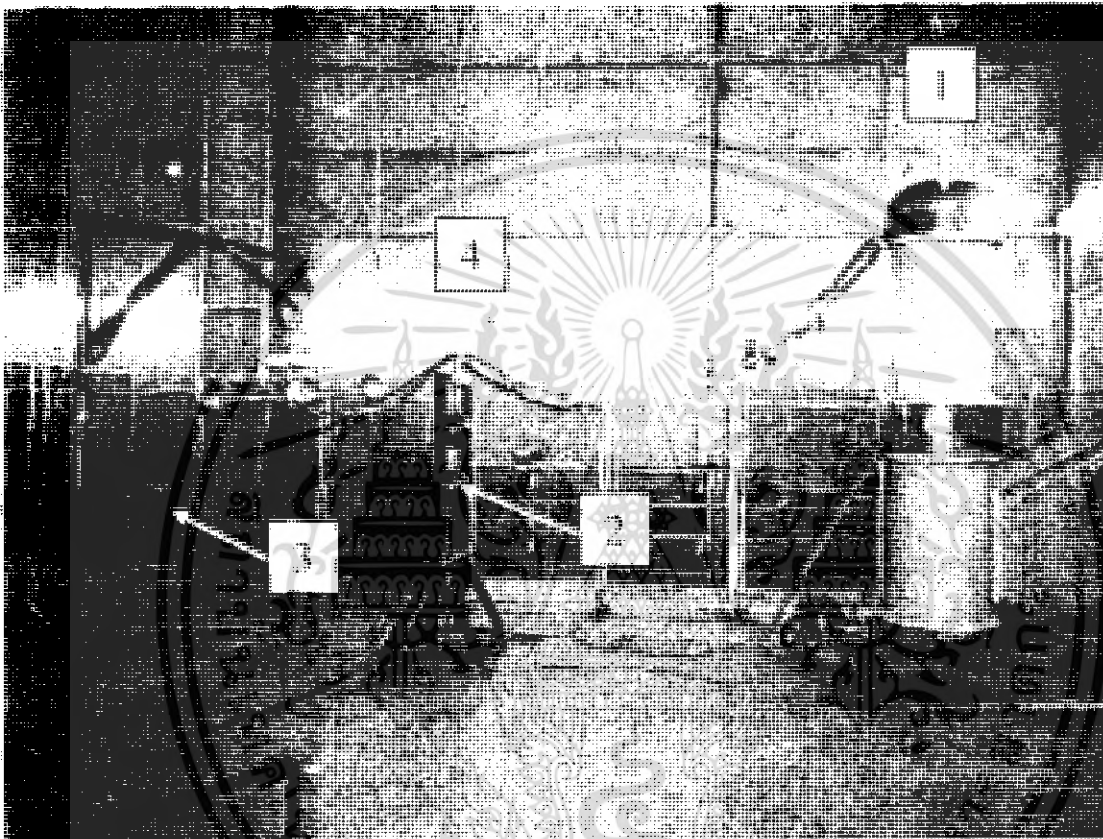
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงที่นำมาทดสอบ [12]

ลักษณะทั่วไป	ผู้ผลิต ชนิดแบบลูกถ้วยแขวน น้ำหนัก/หน่วย สีของวัสดุที่เป็นฉนวน ชนิดของวัสดุที่เป็นฉนวน	NGK, Japan Fog type 10.5 kg Light grey Porcelain
ลักษณะสมบัติทางกล	แรงดึงทดสอบทางกล	160 kN
ลักษณะสมบัติทางมิติ	ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะรั้ว (Leakage distance) ระยะอาร์ค (Arcing distance)	170 mm 320 mm 570 mm 320 mm
ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า	แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งชั่วคราว และชั่วคราว ที่ระดับความคงทนของแรงดัน 110 % แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิวกฤต	140 kV 140 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วิธีการทดสอบ การทดสอบได้ถูกจัดทำขึ้นที่ห้องทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการทดสอบ ดังแสดงรูปที่ 3.2

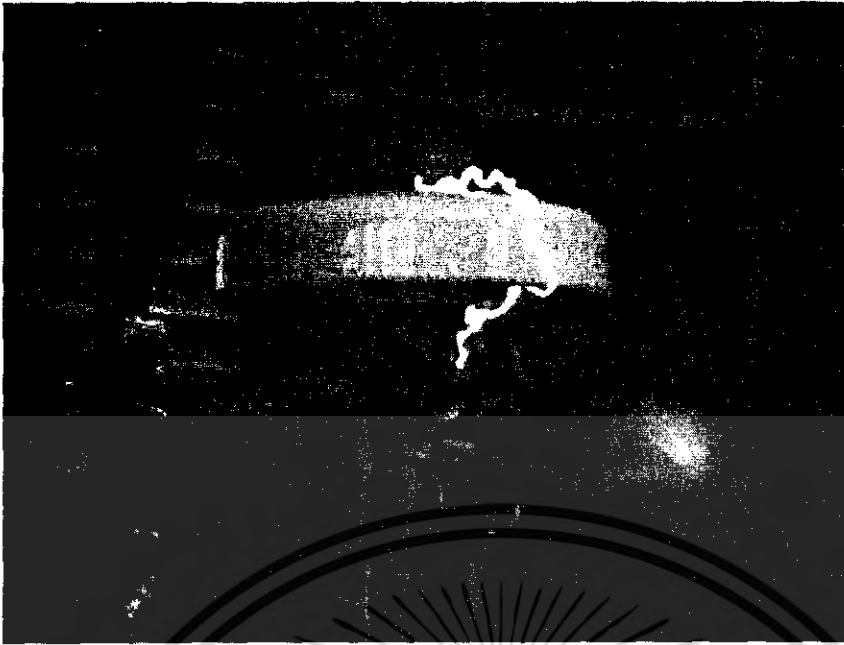
3.1.3 สภาพของห้องทดสอบ อุณหภูมิ 32-33 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 751-752 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 71-72 % ซึ่งวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.1-1992 [12]



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง

- เมื่อ
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง DC 600 kV 10 mA
  - 2 คือ Sphere gap เส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm
  - 3 คือ Voltage divider 100 kV, 200 pF and 380 M $\Omega$
  - 4 คือ ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.3** การเกิดวาบไฟตามผิวแหงของลูกถ้วย

**ตารางที่ 3.2** แรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะการทดสอบกระแสตรง

ลูกถ้วยกระแสตรง (ลูกที่)	แรงดันวาบไฟตามผิว (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	168	169	170	169.66
2	160	162	168	163.33
3	165	167	170	167.33

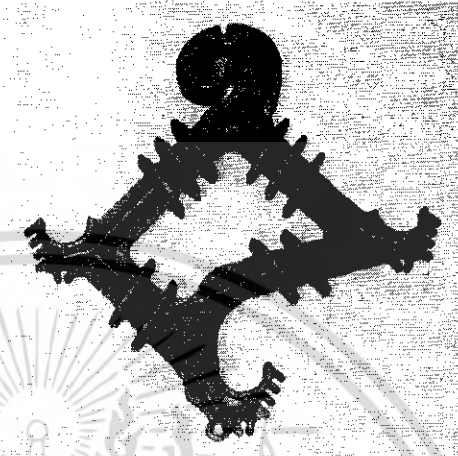
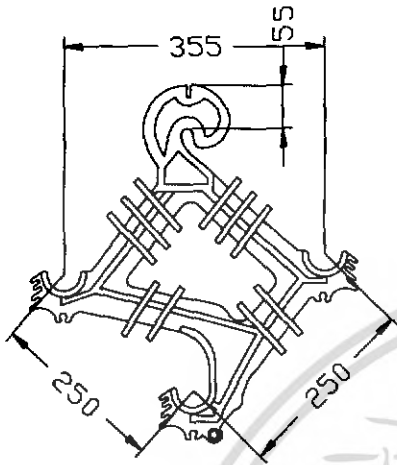
### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่าระดับแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยจำนวนทั้ง 3 ลูก มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาเส้นทางที่เกิดการวาบไฟตามผิว ทำให้ทราบว่าครีบลำดับที่ 2 ของลูกถ้วยกระแสตรงที่ยื่นออกมาจะมีผลกับเส้นทางที่เกิดวาบไฟตามผิว เนื่องจากครีบลำดับที่ 2 เป็นค่าเพิ่มระยะอาร์คของลูกถ้วยกระแสตรง เมื่อเทียบกับระยะทางมิติกับลูกถ้วยจำนวนกระแสลับ

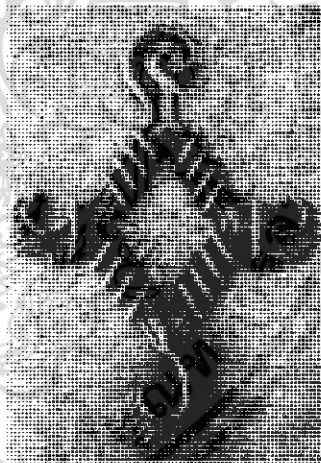
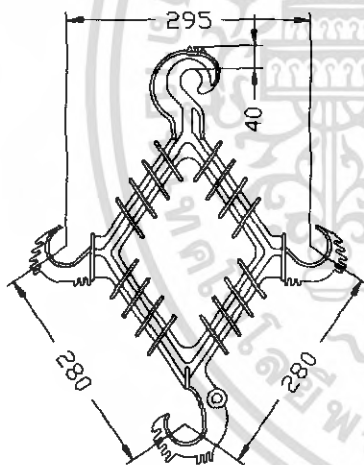
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทดสอบเคเบิลสเปซเซอร์

เคเบิลสเปซเซอร์ที่นำมาทดสอบเป็นเคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้งานจริงที่ระบบ 22 kV และ 33 kV มีอยู่ 3 แบบ คือ แบบ reliable (S-15), แบบ hendrix (H-35D) และแบบ dimonite

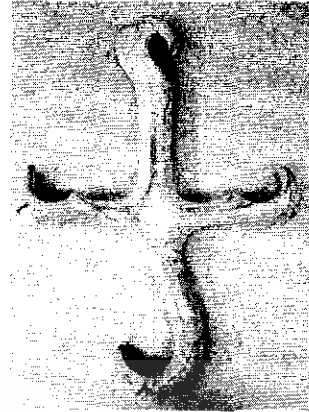
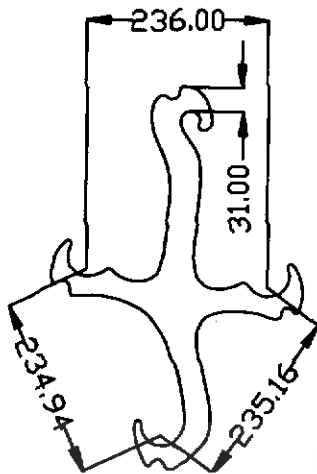


รูปที่ 3.4 เคเบิลสเปซเซอร์แบบ reliable (S-15)

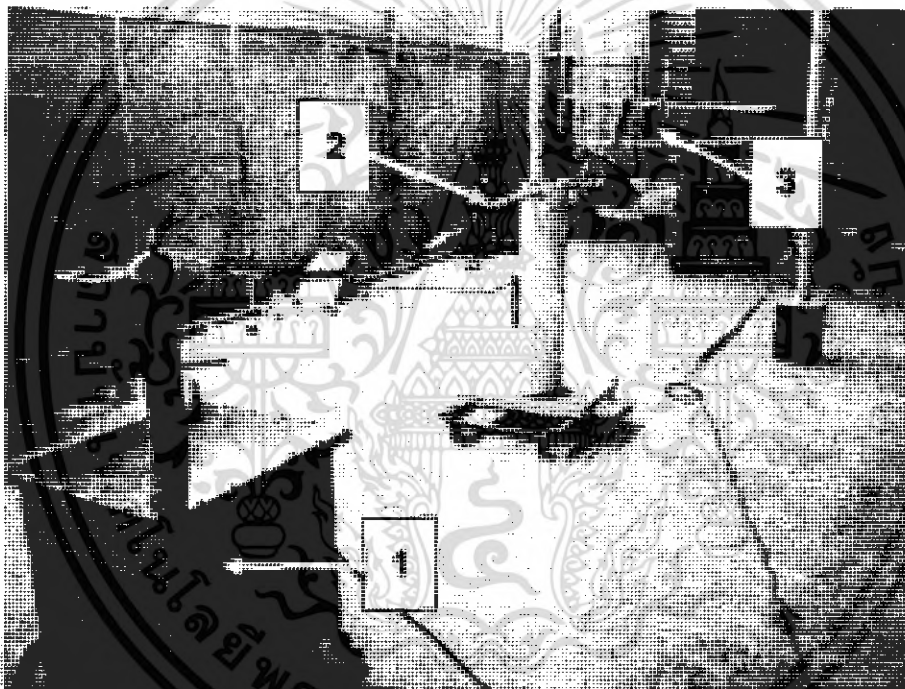


รูปที่ 3.5 เคเบิลสเปซเซอร์แบบ hendrix (H - 35D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เคเบิลสเปชเซอร์แบบ dimonite



รูปที่ 3.7 วงจรการทดสอบเคเบิลสเปชเซอร์

- เมื่อ
- 1 คือหม้อแปลงทดสอบกระแสสลับ 100 kV 10 mA
  - 2 คือความต้านทานน้ำ
  - 3 คือเคเบิลสเปชเซอร์

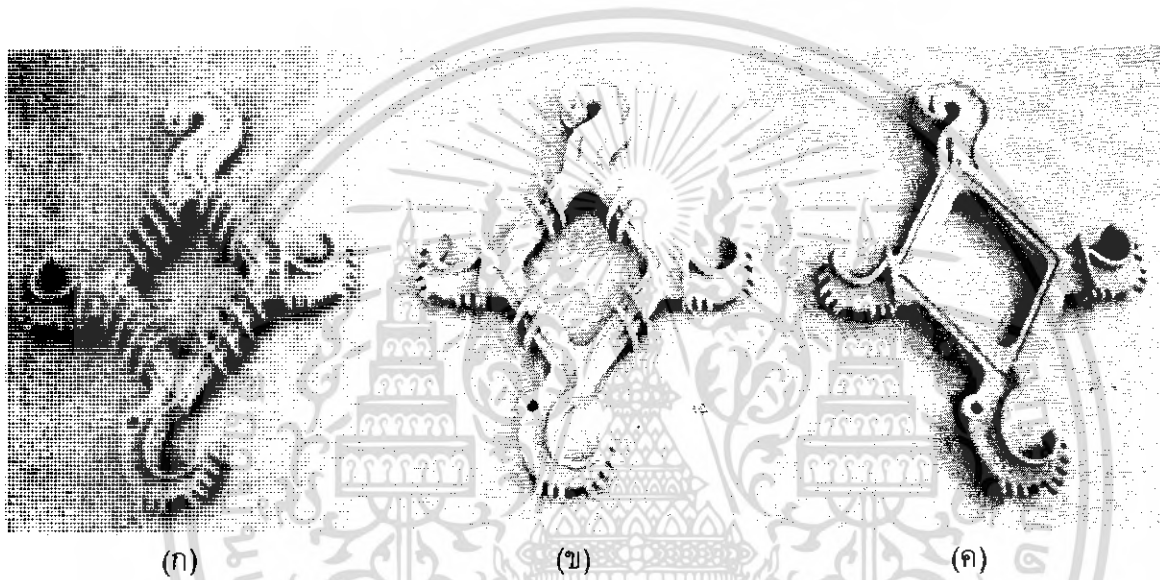
**หมายเหตุ** - ในการทดสอบเคเบิลสเปชเซอร์นั้นไม่สามารถที่จะทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ได้เพราะว่า จากการทดสอบไม่สามารถที่จะจ่ายแรงดันกระแสสลับในระดับที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวแห้งของเคเบิลสเปชเซอร์ได้ จึงได้หยุดการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

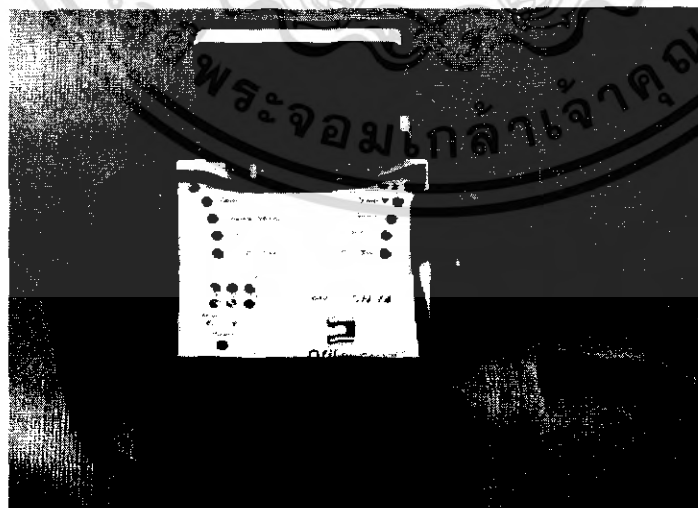
หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบเคเบิลสเปซเซอร์ ทดสอบดูระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา โดยใช้กล้องโคโรนาเป็นตัวตรวจจับการเกิดปรากฏการโคโรนาที่เคเบิลสเปซเซอร์ เพื่อที่จะได้นำผลการทดสอบมาประกอบในการวิเคราะห์

ในการทดสอบจะทดสอบเพื่อดูว่าครีบของเคเบิลสเปซเซอร์นั้นมีผลอย่างไรทางไฟฟ้า โดยจะใช้เคเบิลสเปซเซอร์ที่ทำด้วย HDPE มาทำการตัดครีบแล้วไปทำการทดสอบ

3.2.1 การเตรียมเคเบิลสเปซเซอร์ที่นำมาทดสอบ เคเบิลสเปซเซอร์ที่นำมาทดสอบจะเป็นเคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้ในระบบ 33 kV โดยจะเป็นเคเบิลสเปซเซอร์ที่ออกแบบตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเอามาทำการตัดครีบ และนำมาเปรียบเทียบค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด



**รูปที่ 3.8** เคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ปกติ 16 ครีบ (ข) 8 ครีบ (ค) ไม่มีครีบ

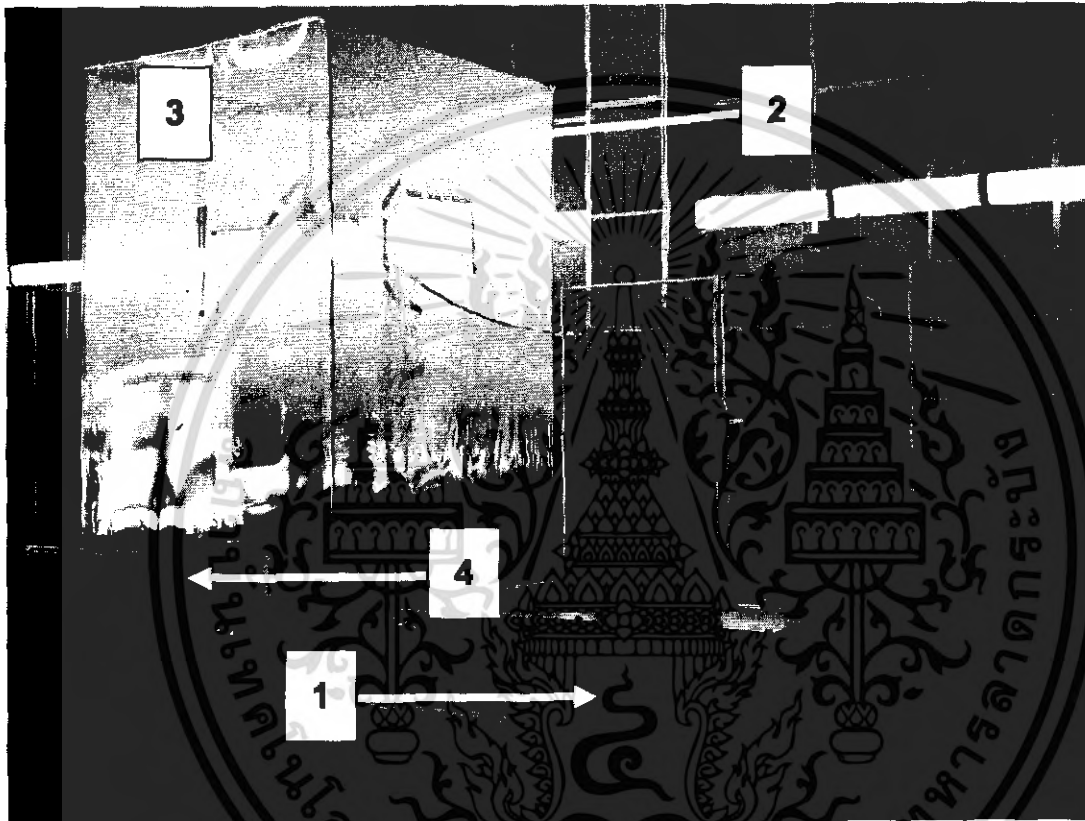


**รูปที่ 3.9** กล้องโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิธีการทดสอบ การทดสอบได้ถูกจัดทำขึ้นที่ห้องทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นการทดสอบในกระโจมไอน้ำ (Fog Chamber) เพื่อเป็นการทำให้เห็นปรากฏการเกิดโคโรนาได้ง่ายขึ้น ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการทดสอบ ดังแสดงรูปที่ 3.10

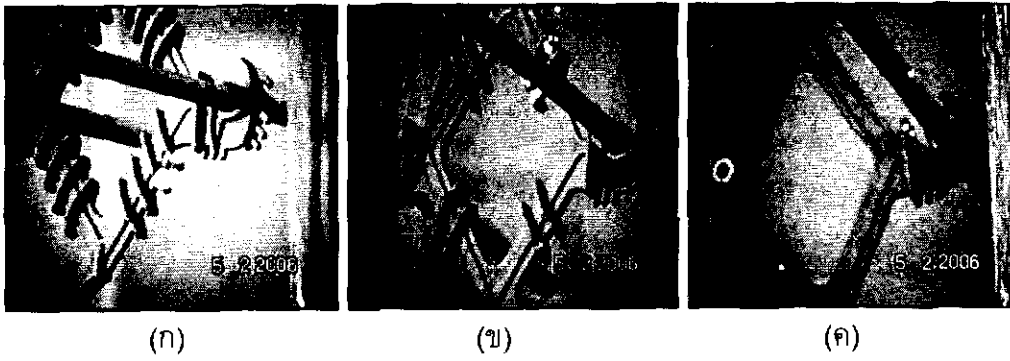
3.2.3 สภาพของห้องทดสอบ อุณหภูมิ 32-33 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 751-752 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 95-98 % (ความชื้นในกระโจม) ซึ่งวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.1-1992



รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบ

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 mA
  - 2 คือ กระโจมไอน้ำ (Fog Chamber) ขนาด  $2.2 \times 2.5 \times 3$  เมตร
  - 3 คือ เคเบิลสเปซเซอร์ที่ทำการทดสอบ
  - 4 คือ หม้อดัมพ์น้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.11** ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาของเคเบิลสเปซเซอร์ที่ระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา  
(ก) 16 ครีบ (ข) 8 ครีบ (ค) ไม่มีครีบ

**ตารางที่ 3.3** ผลการทดสอบค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา

ครั้งที่	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่เคเบิลสเปซเซอร์ (kV)		
	แบบปกติ (16 ครีบ)	แบบมี 8 ครีบ	แบบไม่มีครีบ
1	25	6	5
2	22	7	6
3	23	7	5
เฉลี่ย	23.33	6.67	5.33

#### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่าปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนากับครีบของเคเบิลสเปซเซอร์นั้นมีความสัมพันธ์กันที่ระยะครีบมากก็คือ ระยะทางตามผิวของฉนวนนั้นมีมาก ส่งผลทำให้การเกิดโคโรนาเกิดขึ้นได้ยากก็คือ มีระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่สูง แต่เมื่อระยะครีบลดลงการเกิดโคโรนาก็จะสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น

## บทที่ 4

### การออกแบบลูกถ้วยฉนวน และเคเบิลสเปซเซอร์ และการวิเคราะห์ผล

ในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง และให้ความสำคัญคือระดับความรุนแรงของความเปราะเปื้อน ซึ่งเป็นที่ทราบโดยทั่วๆ ไปแล้วว่าพฤติกรรมการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนจะค่อนข้างสูงกว่าปกติโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบกระแสสลับจากการค้นคว้ายังไม่พบการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงในประเทศไทยเลย ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง และทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (FEMLAB) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือได้ของการออกแบบ ซึ่งอาจจะนำไปสร้างเป็นต้นแบบเพื่อใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในประเทศไทยต่อไป

โดยจะนำเสนอตั้งแต่การจำลองลูกถ้วยฉนวนแบบพื้นฐานว่ารูปร่างของลูกถ้วยฉนวนที่ดีควรมีรูปร่างอย่างไร ที่จะทำให้การกระจายของเส้นสมศักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้ามีการกระจายที่สม่ำเสมอ มาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการออกแบบรวมทั้ง การทดสอบความถูกต้องของการคำนวณของโปรแกรม (FEMLAB) โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยมือ นำเสนออยู่ในภาคผนวก ผลการวิเคราะห์ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบจะนำไปเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสตรงที่มีการใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

#### 4.1 การศึกษา จำลอง และออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน

ลูกถ้วยฉนวนได้รับความเครียดอย่างต่อเนื่องทั้งทางกล และทางไฟฟ้า ซึ่งจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของสายส่งนั้นๆ ความเครียดเหล่านี้อาจจะเพิ่มมากขึ้นตามสภาวะแวดล้อมที่ผลิตปกติได้ ทางเลือกในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนทั่วไปจะต้องพิจารณาถึงสิ่งเหล่านี้ด้วย ได้แก่ ลักษณะของระบบไฟฟ้าที่จะนำลูกถ้วยมาใช้ ระดับความเชื่อมั่นระบบ ข้อจำกัดที่ยอมรับได้ของความสะดวกในการปฏิบัติงาน สภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ และผลของความเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนตามระยะเวลาใช้งาน

#### 4.2 พื้นฐานในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง [13]

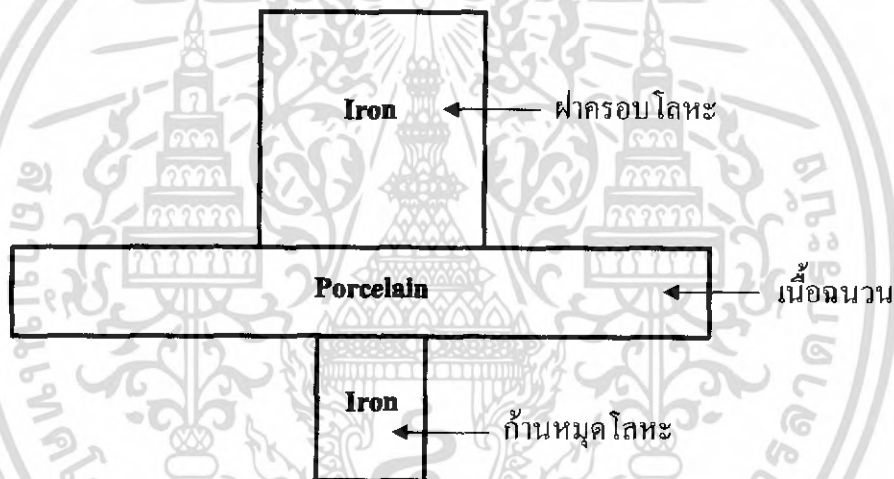
การออกแบบลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยนั้น จะออกแบบให้ครีบริหรือชั้นของลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นสมศักย์เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นสมศักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้าบนลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

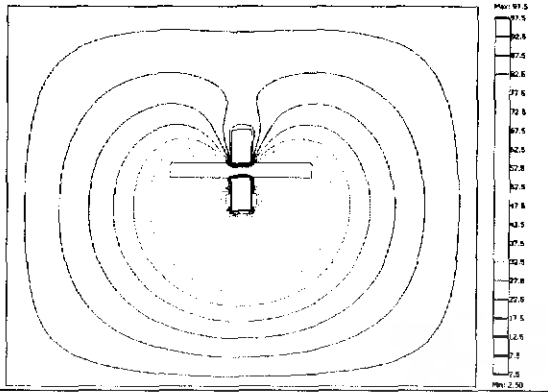
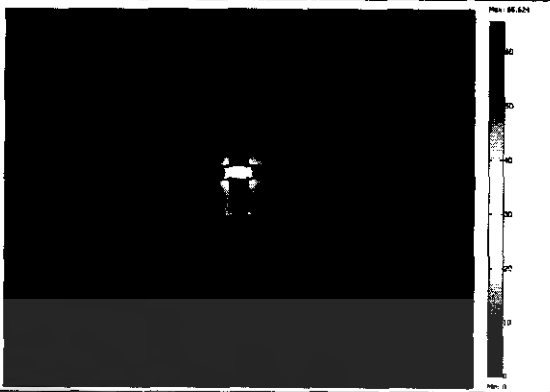
ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนรูปทรงพื้นฐาน จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ

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

ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งฝาครอบโลหะ และก้านหมุดโลหะ จะใช้เหล็ก (Iron) ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r = 1$  และมีค่าความไฟฟ้า  $\sigma = 1.12 \times 10^7$  S/m ส่วนชิ้นส่วนที่เป็นเนื้อฉนวนจะเป็นวัสดุพอร์ซเลน (Porcelain) ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r = 5.7$  และมีค่าความไฟฟ้า  $\sigma = 1 \times 10^{-14}$  S/m โดยที่กำหนดค่าแรงดันที่ป้อนก้านหมุดโลหะมีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ และป้อนแรงดันมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ หรือ กราวด์ ให้กับฝาครอบโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อที่จะจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของฝาครอบโลหะให้มีขนาดเล็ก และใหญ่ รวมไปถึงการเพิ่มจำนวนครีบของเนื้อฉนวน และความยาว เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นสมศักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้ในการหาเหตุผลของการออกแบบ

เส้นสมตักย์	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 75.96 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap เท่ากับ Pin และไม่มีครีบ	ขนาด Cap เท่ากับ Pin และไม่มีครีบ

(ก)

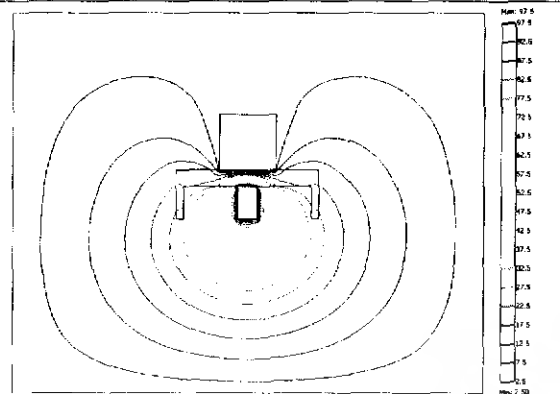
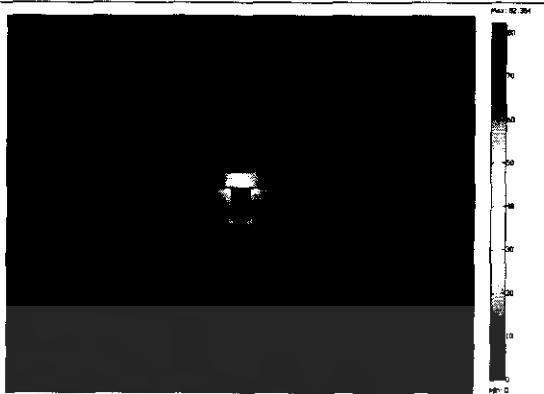
(ข)

เส้นสมตักย์	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 70.515 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และไม่มีครีบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และไม่มีครีบ

(ค)

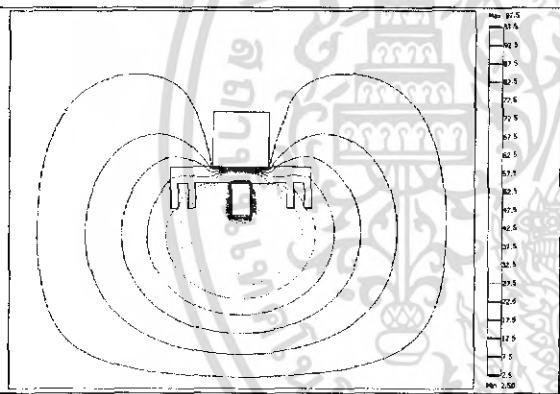

(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมศักย์	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 74.835 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบริบ 1 ครีบริบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบริบ 1 ครีบริบ

(จ)

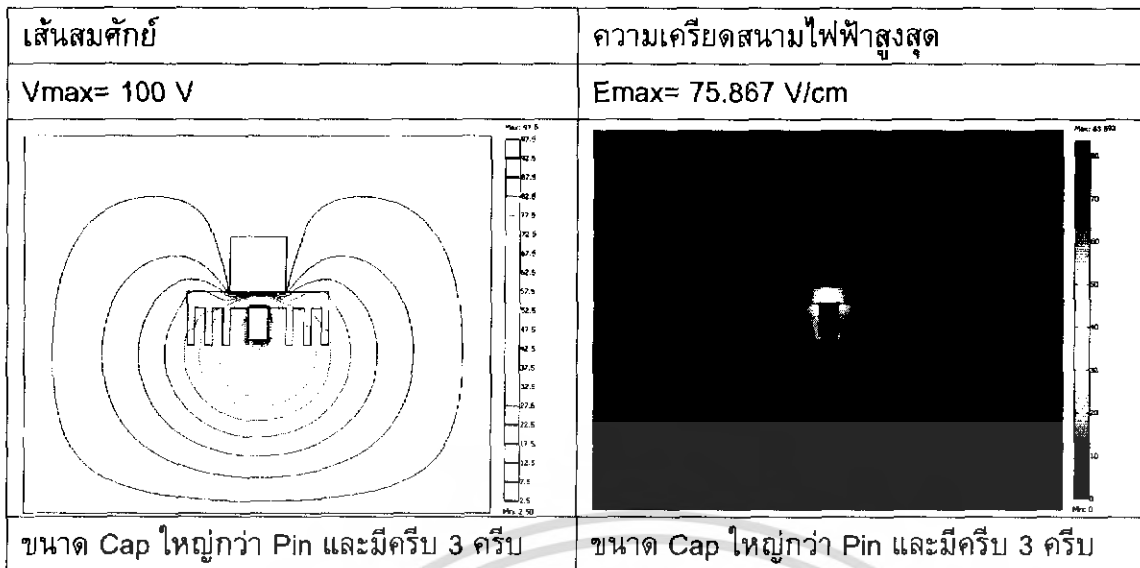
(ฉ)

เส้นสมศักย์	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 76.747 \text{ V/cm}$
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบริบ 2 ครีบริบ	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin และมีครีบริบ 2 ครีบริบ

(ข)

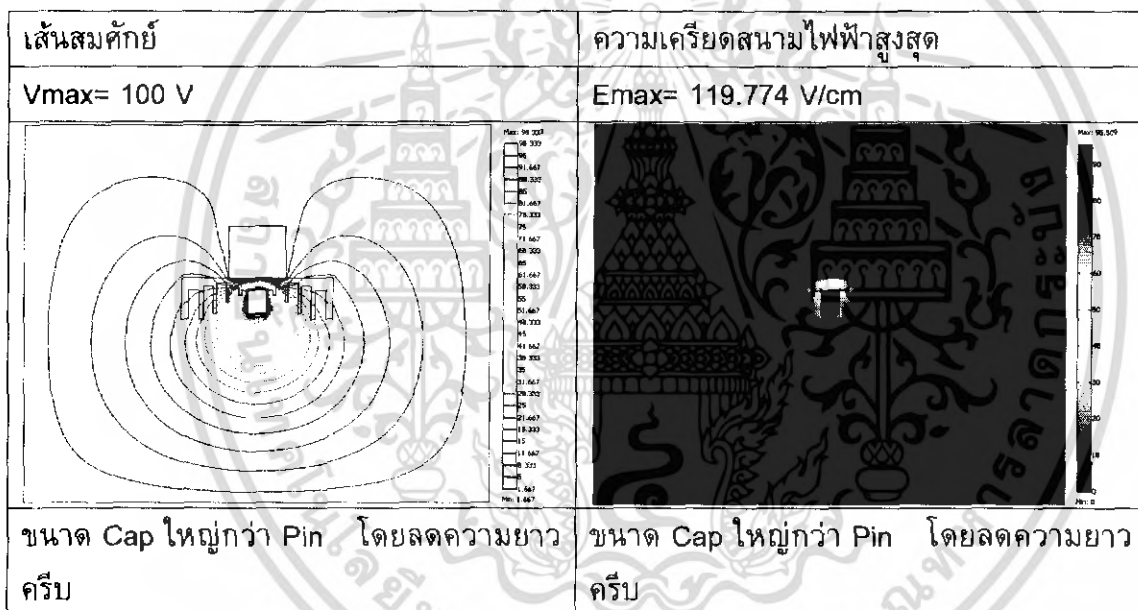
(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ณ)

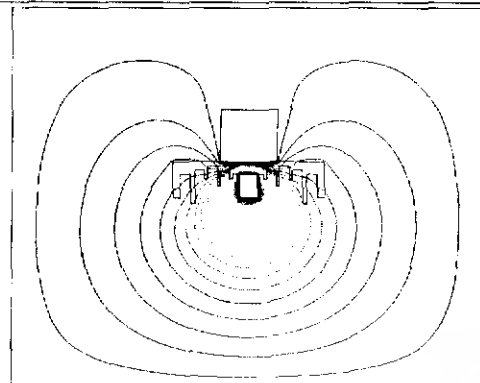
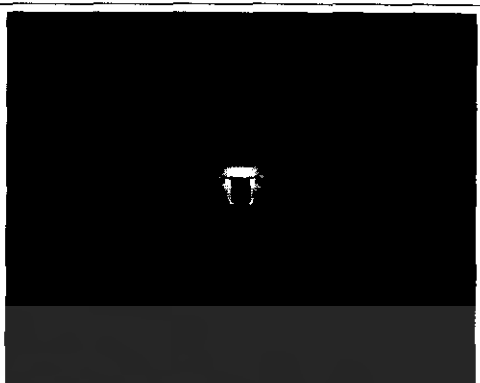
(ณ)



(ณ)

(ณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมศักย์	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
Vmax= 100 V	E <sub>max</sub> = 122.365 V/cm
	
ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยครีบริบสั้น ยาว สลับกัน	ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยครีบริบสั้น ยาว สลับกัน

(ง)

(จ)

**รูปที่ 4.2** ผลของการจำลองของลูกถ้วยเพื่อดูเส้นสมศักย์ และค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

ผลการจำลองรูปแบบพื้นฐานของลูกถ้วย จากการจำลองลูกถ้วยฉนวน และใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นสมศักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะ Creepage ของลูกถ้วยฉนวน โดยการปรับระยะปีกยาวขึ้น การเพิ่มครีบริบซึ่งมีทั้งครีบริบยาว และครีบริบสั้น ตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณา คือค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าเกณฑ์ที่กำหนดให้ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยครีบริบสั้น ยาว สลับกัน ดังรูปที่ (จ) กับการที่กำหนดให้ขนาด Cap ใหญ่กว่า Pin โดยลดความยาวครีบริบดังรูปที่ (ง) ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งสิ่งที่พบอีกประการหนึ่ง คือค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อระหว่าง Pin กับเนื้อฉนวน ดังนั้นการออกแบบจะต้องพยายามออกแบบให้ปีก และครีบริบอยู่ในแนวของเส้นสมศักย์ เพื่อลดการเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด อีกทั้งในการออกแบบ การที่มีครีบริบหรือปีกที่ยาวจะช่วยเพิ่มระยะรั่ว (Leakage distance) ซึ่งทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเป็นไปได้ยากขึ้น การเกิดวาบไฟตามผิว ก็จะได้ยากขึ้นเช่นกัน การศึกษาการจำลองรูปแบบของลูกถ้วยมีจำนวนทั้งสิ้น 1024 แบบ ดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งจะเป็นตัวอย่างทั้งหมด 100 รูปแบบจาก 1024 รูปแบบ

### 4.3 การศึกษาวิธีการออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขน

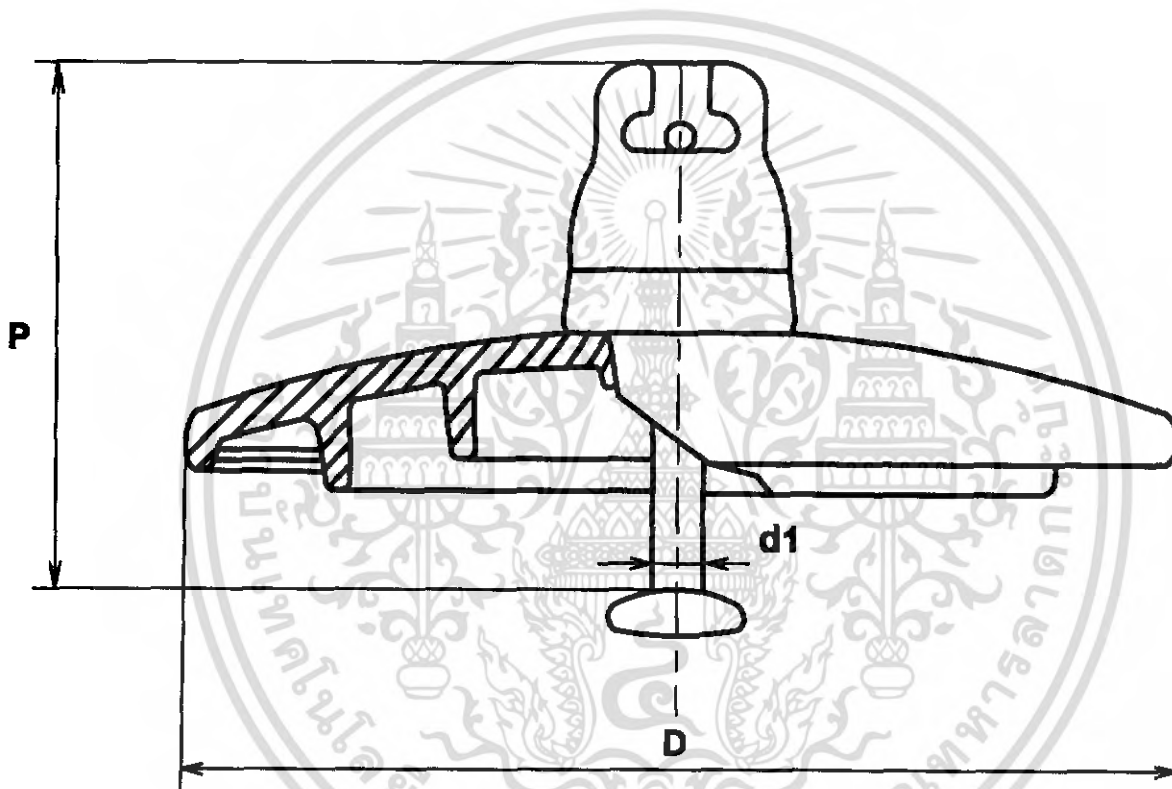
ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนแบบแขน ของสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ได้แก่ ค่า Specific Leakage Distance จะขึ้นอยู่กับระดับมลภาวะหรือความเปรอะเปื้อน และสภาพภูมิอากาศสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนติดตั้งใช้งานอยู่ รวมทั้งลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของวัสดุและขนาด ซึ่งส่งผลที่สำคัญต่อความสามารถต่อการเกาะจับของสิ่งเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนในระบบไฟฟ้ากระแสตรง

4.3.1 ลำดับขั้นในการออกแบบตามมาตรฐาน [14, 15, 16] วัตถุประสงค์หลักในหัวข้อนี้คือจะนำเสนอการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขวนพื้นฐาน เพื่อที่จะเป็นแนวทางต่อไปในอนาคต เพื่อศึกษาเพิ่มเติมเพื่อที่จะออกแบบให้ลูกถ้วยฉนวนมีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้งานในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในประเทศไทย หรือแม้กระทั่งการผลิตลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเองภายในประเทศ

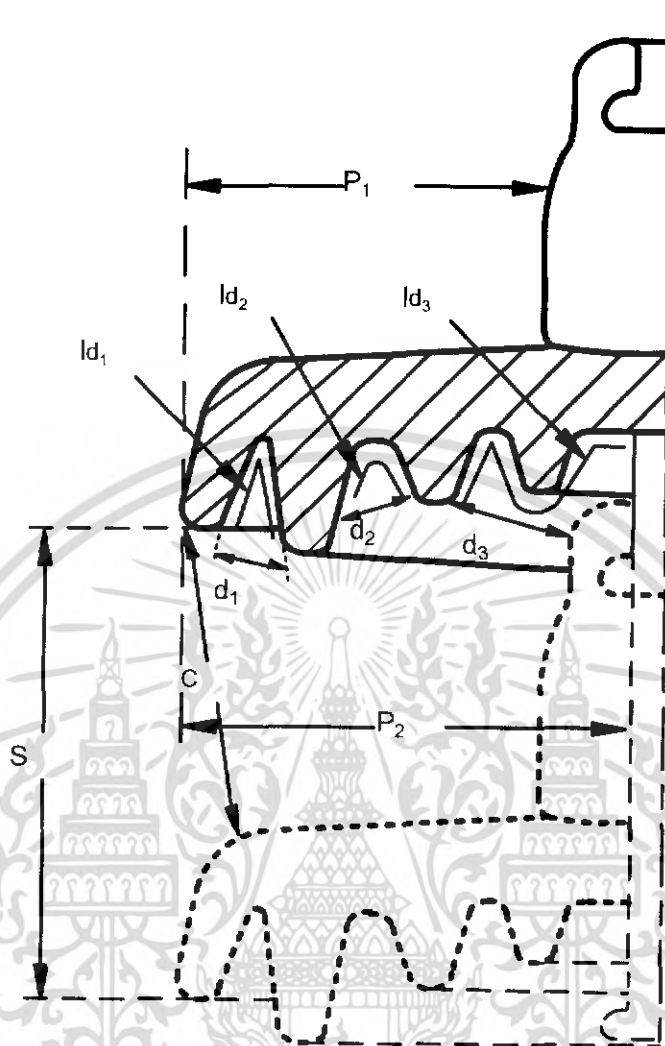
การออกแบบจะทำการออกแบบโดยการอ้างอิงมาตรฐาน IEC 120, IEC 815, IEC 305



รูปที่ 4.3 ระยะของลูกถ้วยแขวนชนิด Ball and Socket

เมื่อ	P	คือ	ความสูงของลูกถ้วยฉนวน
	D	คือ	ความกว้างของลูกถ้วยฉนวน
	d1	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแกน pin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	P1	คือ	ความกว้างของปีกยาวของลูกถ้วยฉนวน
	P2	คือ	ความกว้างของปีกสั้นของลูกถ้วยฉนวน
	C	คือ	ระยะช่องว่างวัดโดยตามแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครึ่งนอกสุดของปีกบน
	d	คือ	ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก
	Ld	คือ	ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า
	$\alpha$	คือ	มุมของปีกที่ทำกับแนวระนาบ
	l	คือ	ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดวัดค่า
	C.F	คือ	แฟกเตอร์ระยะรั้ว = ระยะรั้วของลูกถ้วย / ระยะอาร์กของลูกถ้วย
	P.F.	คือ	แฟกเตอร์ภาพต้านข้าง = $(2P_1+2P_2+S) / l$

#### 4.4 ขั้นตอนในการออกแบบลูกถ้วยฉนวน

- 1) ระดับแรงดันที่ใช้ในการออกแบบของจากการศึกษาระบบส่งจ่ายกระแสตรงของประเทศไทยที่ระดับแรงดัน 300 kV จะใช้ลูกถ้วยฉนวนจำนวน 22 ลูก ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมต่อลูกถ้วยเท่ากับ

$$= \frac{300kV}{22}$$

$$= 13.636 \text{ kV / ลูกถ้วย}$$

- 2) ผู้ใช้เลือกออกแบบให้ลูกถ้วยฉนวนมีสภาวะเปราะเปื้อนสูง (Very heavy) เพื่อต้องการออกแบบให้ลูกถ้วยฉนวนสามารถใช้งานได้ทุกสภาวะความเปราะเปื้อนได้

ตารางที่ 4.1 ระดับความเปราะเปื้อน

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

3) หาค่า  $D_m$  (ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วยฉนวน) เพื่อจะนำค่า  $D_m$  ที่ได้ไปเลือกค่า  $K_d$  ซึ่งเป็นตัวประกอบแก้ไข (Correction factor)

สูตรที่ใช้ในการหา  $D_m$

$$D_m = \frac{D_{e1} + D_{e2} + 2D_i}{4} \quad (4.1)$$

โดยที่  $D_{e1}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกใหญ่  
 $D_{e2}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกเล็ก  
 $D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนลูกถ้วย

$K_d$  คือ ตัวประกอบแก้ไข (Correction factor);  $k_d = 1.1$  เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลูกถ้วย  $300 \leq D_m \leq 500$  มิลลิเมตร [15]

4) การหาระยะ Minimum nominal creepage distance ตามสมการ

$$(L_{nc})_{\min} = (L_{sc})_{\min} \times U_m \times K_d \quad (4.2)$$

โดยที่  $(L_{nc})_{\min}$  คือ minimum nominal creepage distance  
 $(L_{sc})_{\min}$  คือ Minimum specific creepage distance

สำหรับบริเวณที่มีมลภาวะรุนแรง (Very heavy pollution level) กำหนดให้ใช้ค่า 31 mm/kV ในการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 815 [15]

$$\begin{aligned} (L_{nc})_{\min} &= (L_{sc})_{\min} \times U_m \times K_d \\ &= 31 \times 13.636 \times 1.1 \\ &= 464.987 \text{ mm} \end{aligned}$$

จะได้ค่าระยะ creepage ต่ำสุด 464.987 mm

โดยที่  $U_m$  คือ highest system voltage phase-to-phase for the equipment

นำค่า Creepage ต่ำสุดที่ได้ เลือกค่า Designation และจะได้ค่า Standard coupling according to IEC 120 [16] ที่ใช้ในการออกแบบ Cap และ Pin ต่อไป โดยที่ลักษณะรูปแบบของ Cap และ Pin ที่ได้จะต้องผ่านเกณฑ์ตามค่าที่กำหนดของ electromechanical or mechanical เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

failing load ซึ่งจากข้อกำหนดพบว่าจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 160 kN (ข้อกำหนดของลูกถ้วย กระแสตรงจากบริษัท NGK)

**ตารางที่ 4.2** ขนาดและระยะต่ำสุดของลูกถ้วยแขวนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 305 [14]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) จำนวนอัตราส่วนช่องว่างระหว่างชั้นปีกต่อความกว้างส่วนปีกที่ยื่นออกมา  $(\frac{S}{P_1})$  โดยจากมาตรฐาน [15] กำหนดว่า อัตราส่วนค่า  $(\frac{S}{P_1})$  ให้มากกว่า 0.8

6) หาค่าความแตกต่างของปีกสั้นและปีกยาว ซึ่งมาตรฐาน [16] กำหนดให้  $(P_1 - P_2)$  มากกว่าหรือเท่ากับ 15 mm

7) ออกแบบระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน (C) ซึ่งมาตรฐาน [15] กำหนดให้มากกว่า 30 mm

8) ออกแบบอัตราส่วนระหว่างระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดกับระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก ซึ่งมาตรฐาน [15] ได้กำหนดให้ระยะ  $(\frac{ld}{d})$  น้อยกว่า 5

9) ออกแบบการเอนเอียงของปีก กำหนดการเอนเอียงของปีก  $\frac{P_1}{2}$  ซึ่งการออกแบบการเอนเอียงของปีกนั้นจะมีผลต่อการทำความสะอาดด้วยตัวเองของลูกถ้วยด้วย ดังนั้นผู้ออกแบบจำเป็นจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับระยะอื่นๆด้วย

หาค่าการเอนเอียงของปีก ซึ่งมาตรฐาน [15] กำหนดให้มุมเอียง  $\alpha$  มากกว่า 5 องศา

10) หาค่า Profile factor (P.F) ซึ่งมาตรฐาน [15] กำหนดให้ P.F. มากกว่า 0.7

$$P.F = \frac{2P_1 + 2P_2 + S}{ld_1 + ld_2 + ld_3 + ld_4 + d_1 + d_2 + d_3 + d_4} \quad (4.3)$$

11) ค่าแฟกเตอร์ระยะรั้ว = ระยะรั้วของลูกถ้วย / ระยะอาร์กของลูกถ้วย

$$C.F = \frac{lt}{st} \quad (4.4)$$

โดยมาตรฐาน [15] ได้กำหนดให้ในสภาวะเปราะเปื้อนสูงสุด กำหนดให้ค่า C.F น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4

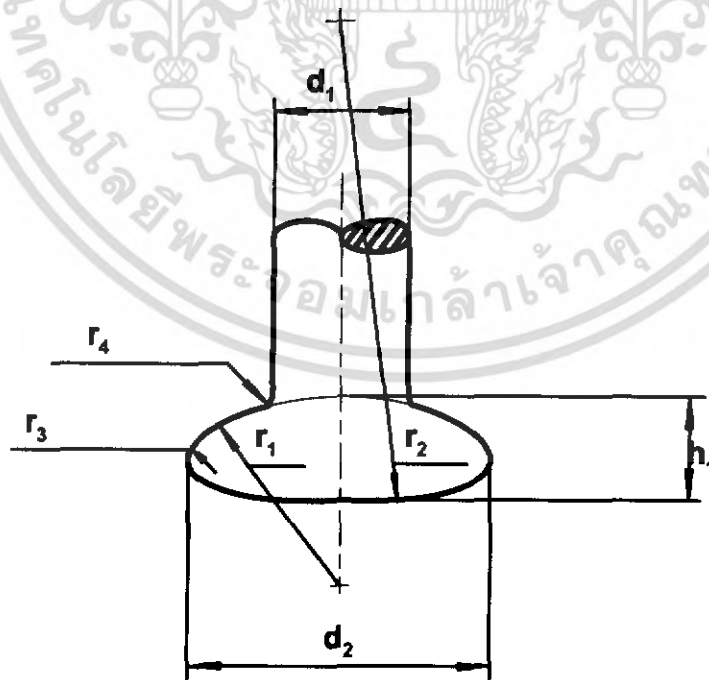
**ตารางที่ 4.3** เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน [15]

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

นำผลที่ได้จากการออกแบบมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน [15] ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ทำการหาขนาดของ Cap และ Pin โดยนำค่า Minimum nominal creepage distance ซึ่งเท่ากับ 464.987 mm มาหาค่ามาตรฐานของ Coupling ตามมาตรฐาน IEC 305 [14] ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยค่าที่เลือกมาออกแบบคือ ค่า U160BLP ซึ่งค่ามาตรฐานของ Coupling มีมิติเป็น 20

12) ทำการเลือกขนาด และระยะของ Pin



**รูปที่ 4.5** ขนาดของ Pin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ขนาดและมุมในการออกแบบตามมาตรฐานของ Pin ตามมาตรฐาน IEC120 [16]

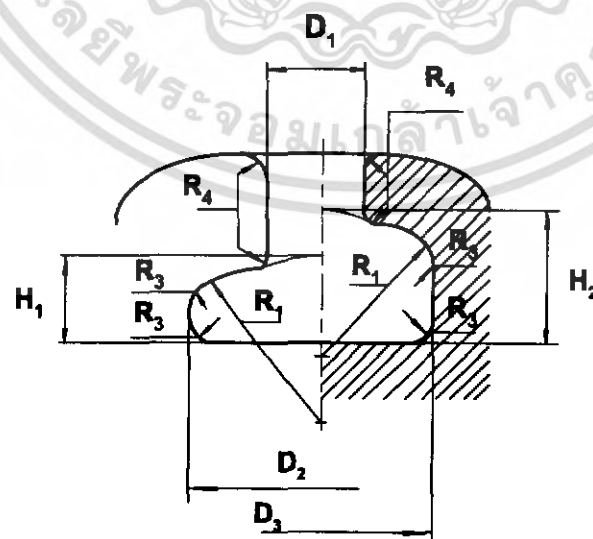
Designated size of coupling	$d_1$	$d_2$	$h_1$	$r_1$	$d_2$	$r_3^*$	$r_4$
11	$11.9_{-1.1}^0$	$22.8_{-1.3}^0$	$9.1_{-1.2}^0$	35	35	3.5	$1.5 \pm 0$
16	$17_{-1.2}^0$	$33.3_{-1.5}^0$	$13.4_{-1.3}^0$	23	50	3	$3 \pm 0.5$
20	$21_{-1.3}^0$	$41_{-1.6}^0$	$19.5_{-1.4}^0$	27	60	5.7	$3.5 \pm 1$
24	$25_{-1.4}^0$	$49_{-1.8}^0$	$21_{-1.7}^0$	40	70	6.6	$4 \pm 1.5$ $1.0$
28	$29_{-1.5}^0$	$57_{-1.9}^0$	$23.5_{-1.8}^0$	55	80	8	$4.5 \pm 1.5$ $1.0$
32	$33_{-1.6}^0$	$65_{-2.1}^0$	$27_{-1.9}^0$	70	90	10	$5 \pm 1.5$ $1.0$

กำหนดการออกแบบจากค่าในตาราง

โดยออกแบบให้ค่า

$d_1$	มีค่าเท่ากับ	21	mm
$d_2$	มีค่าเท่ากับ	41	mm
$r_1$	มีค่าเท่ากับ	27	mm
$r_2$	มีค่าเท่ากับ	60	mm
$r_3$	มีค่าเท่ากับ	5.7	mm
$r_4$	มีค่าเท่ากับ	3.5	mm
$h_1$	มีค่าเท่ากับ	19.14	mm

13) ทำการเลือกค่าขนาดและระยะของ Cap



รูปที่ 4.6 ขนาดของข้อต่อระหว่าง Cap และ Pin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เลือกขนาดและระยะของ Cap

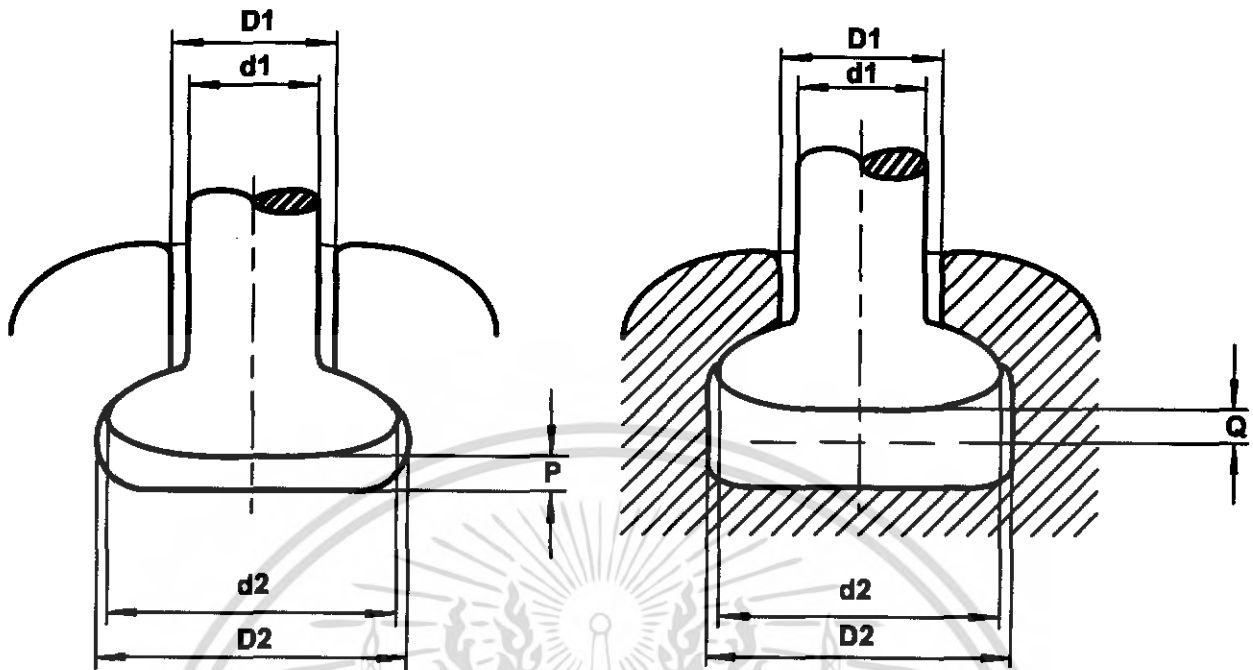
Designated size of coupling	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	H2	H2 <sup>3)</sup>	R <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	T <sup>2)</sup>
					For W- clips and alternative Split-plns	For standard split-plns					
		Min.	Min.		Min.	Min.					Min.
11	12.5 <sup>+1.3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

ทำการออกแบบจากค่าในตารางตามมาตรฐาน

D <sub>1</sub>	ค่าเท่ากับ	25	mm
D <sub>2</sub>	ค่าเท่ากับ	45	mm
D <sub>3</sub>	ค่าเท่ากับ	42.5	mm
H <sub>1</sub>	ค่าเท่ากับ	22	mm
H <sub>2</sub>	ค่าเท่ากับ	29.3	mm
R <sub>1</sub>	ค่าเท่ากับ	27	mm
R <sub>3</sub>	ค่าเท่ากับ	6	mm
R <sub>4</sub>	ค่าเท่ากับ	3.5	mm
R <sub>5</sub>	ค่าเท่ากับ	7	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 14) ทำการออกแบบคุณลักษณะการล็อกระหว่าง Pin กับ Cap



(ก) ระยะที่มองจากภายนอกของการล็อก Pin กับ Cap (ข) ระยะที่มองจากภายในของการล็อก Pin กับ Cap

รูปที่ 4.7 ลักษณะการมองของการล็อก Pin กับ Cap

เมื่อ P คือ ระยะห่างระหว่าง Pin กับ Cap ภายนอก  
Q คือ ระยะห่างระหว่าง Pin กับ Cap ภายใน

ตารางที่ 4.6 ลักษณะการล็อกระหว่าง Pin กับ Cap [16]

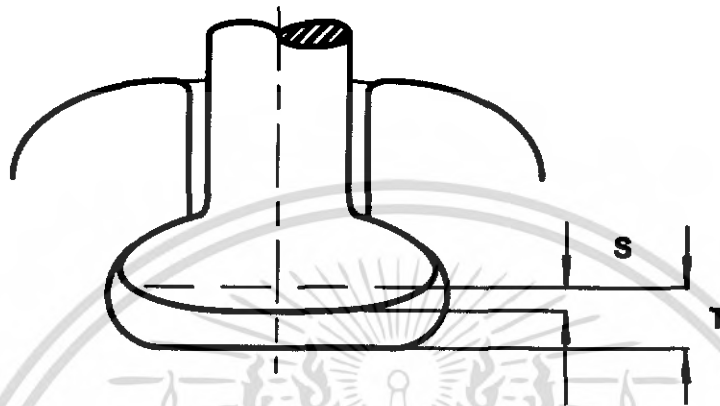
Designated size of coupling	D1-d1		D2-d2	D3-d2	P		Q <sup>1)</sup>
	Min.	Max.	Min.		Min.	Max.	Min.
11	0.6	3.0	1.7	1.7	1.4	3.9	1.6
16A	2.2	5.0	1.2	1.2	1.1	4.0	1.6
16B	2.2	5.0	1.2	1.2	3.6	6.5	3.7
20	2.0	5.4	1.5	1.5	1.0	4.5	2.0
24	2.5	6.4	2.0	2.0	2.5	26.7	2.8
28	3.0	7.4	2.0	2.0	2.5	7.2	3.0
32	3.0	7.9	2.5	2.5	3.0	8.2	3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการออกแบบจากค่าในตารางตามมาตรฐาน

P	ค่าเท่ากับ	2.5	mm
Q	ค่าเท่ากับ	3.5	mm

15) ออกแบบค่าประสิทธิภาพของการล็อก Pin กับ Cap



รูปที่ 4.8 แสดงค่าประสิทธิภาพของการล็อก Pin กับ Cap

เมื่อ S คือ ระยะประสิทธิภาพของการล็อก  
T คือ ระยะต่ำสุดของการล็อก

ตารางที่ 4.7 ระยะประสิทธิภาพของการล็อก Pin กับ Cap [16]

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

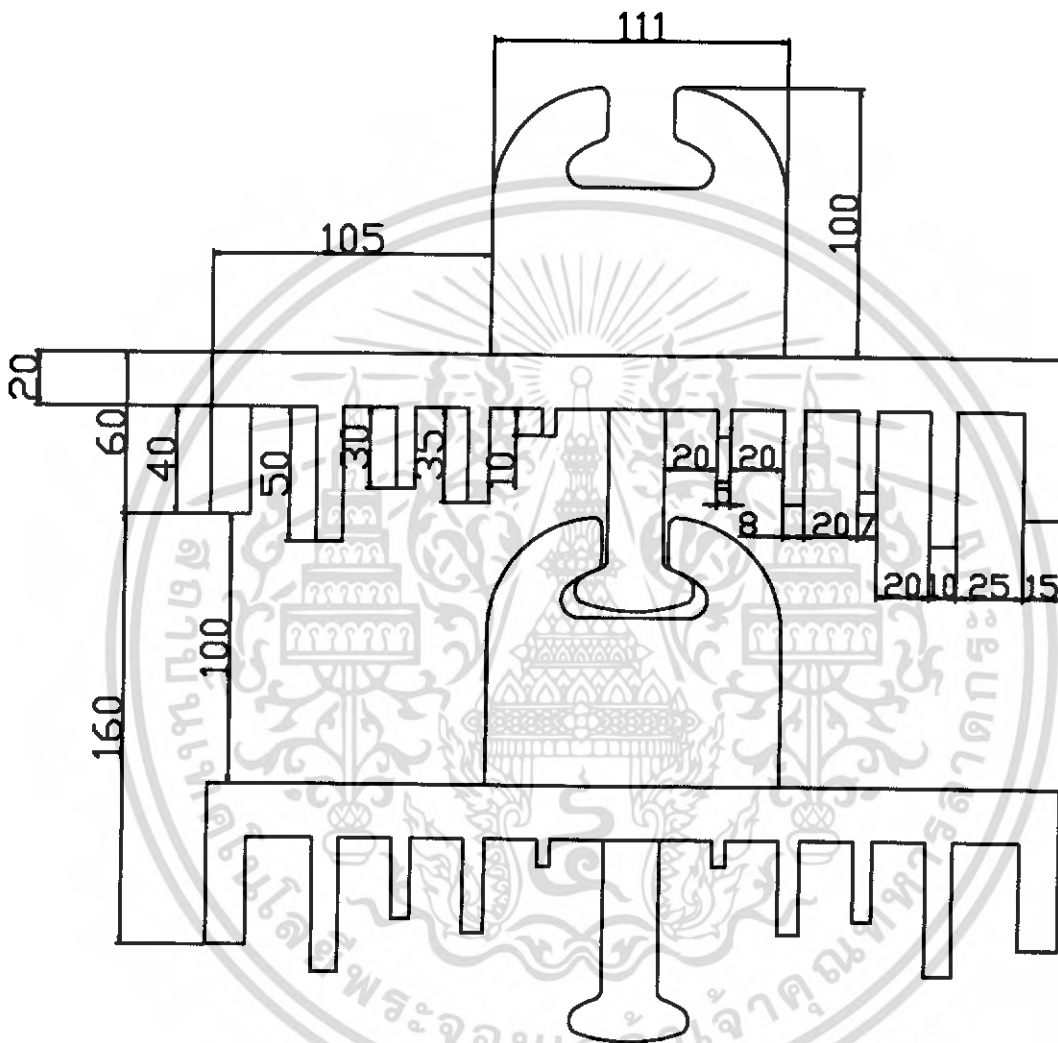
ทำการออกแบบจากค่าในตารางตามมาตรฐาน

S	ค่าเท่ากับ	4.5	mm
T	ค่าเท่ากับ	7	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

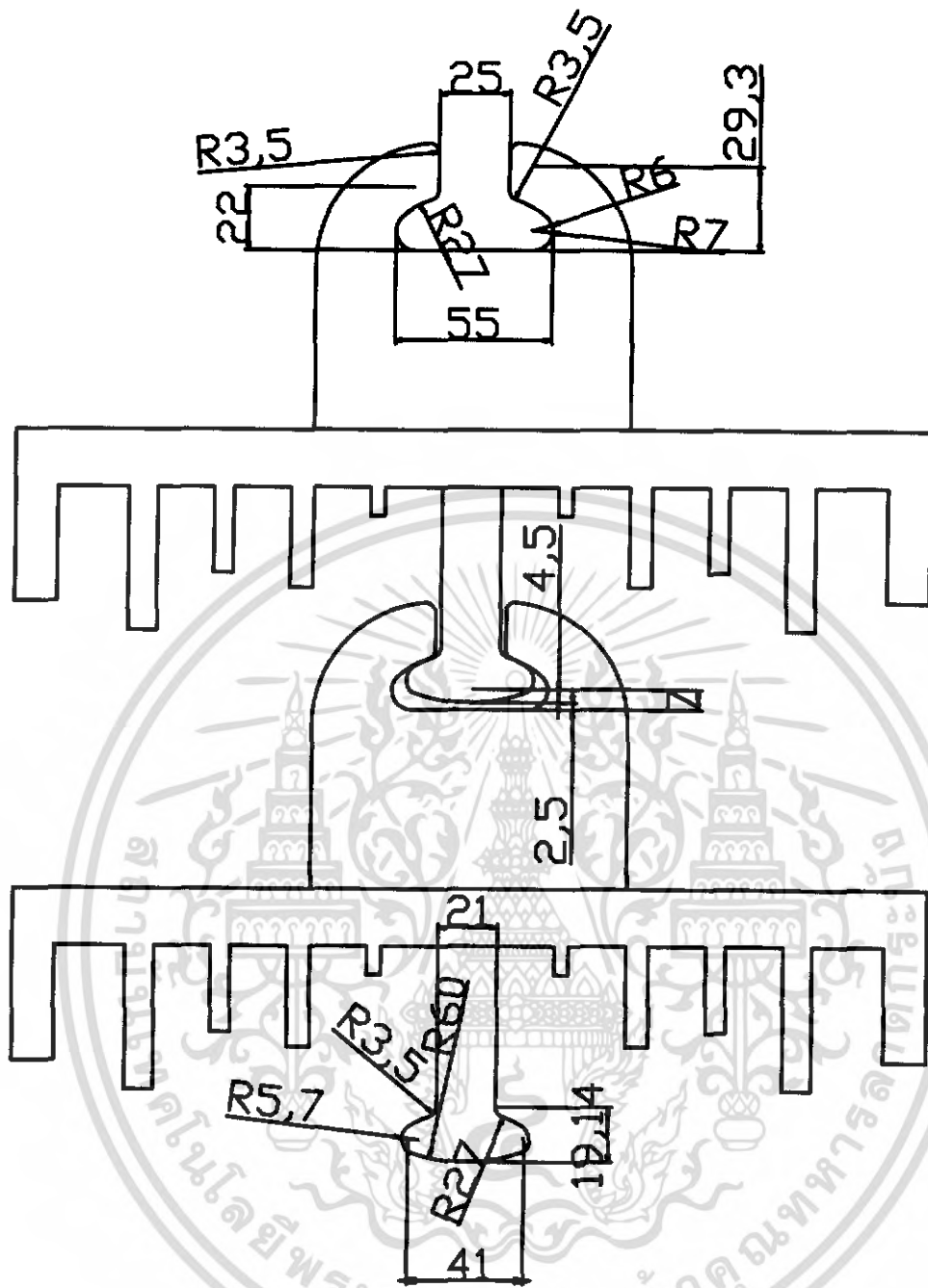
#### 4.5 การจำลองมิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ออกแบบ

ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงแบบแบนที่ทำกรออกแบตามมาตรฐาน [14, 15, 16] ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งจะแสดงขนาดมิติหลังจากที่ทำการทำการปรับค่าต่างๆ ตามข้อแนะนำ เช่น การลบมุม เพื่อที่จะลดความเครียดสนามไฟฟ้า และหลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลของการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 มิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ระยะเวลาที่มีมิติของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมมุติฐานในออกแบบลักษณะของครีบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง โดยผู้ออกแบบได้ทดลองออกแบบ ทั้งหมดโดยวิเคราะห์ลักษณะของการจัดเรียงลำดับของครีบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงเป็นจำนวน 1024 ลูก และได้เลือกลูกถ้วยฉนวนที่มีมิติเหมาะสม ทำการวิเคราะห์ต่อไปเป็นจำนวนคุณสมบัติต่อไปของลูกถ้วยฉนวนที่นำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปจะต้องสอดคล้องกับกฎเกณฑ์ดังนี้

1) การติดตั้งการใช้งานจริงเมื่อ ถ้านำไปต่อแขวนต่อกันเป็นพวงจะเห็นได้ว่า ครีบลูกถ้วยของลูกถ้วยจะต้องมีระยะสั้นพอสมควร เพื่อหลีกเลี่ยงการกระทบหรือกระแทกระหว่าง Cap กับครีบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงลูกบนที่นำมาต่อใช้งานร่วมกันได้

2) การสลับกันของครีบลูกถ้วยฉนวน อันเนื่องมาจากการเพิ่มระยะ Creepage และระยะรั้วไหลของกระแส รวมถึงระยะอาร์คของลูกถ้วยฉนวน

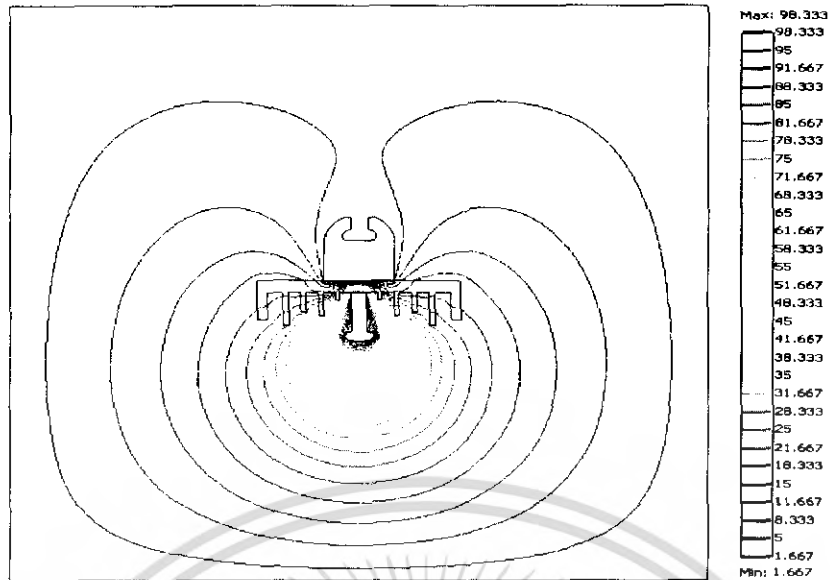
3) การลดปัญหาจากการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนที่พัดมากับลม

4) การทำความสะอาดด้วยตัวเองของลูกถ้วยฉนวน

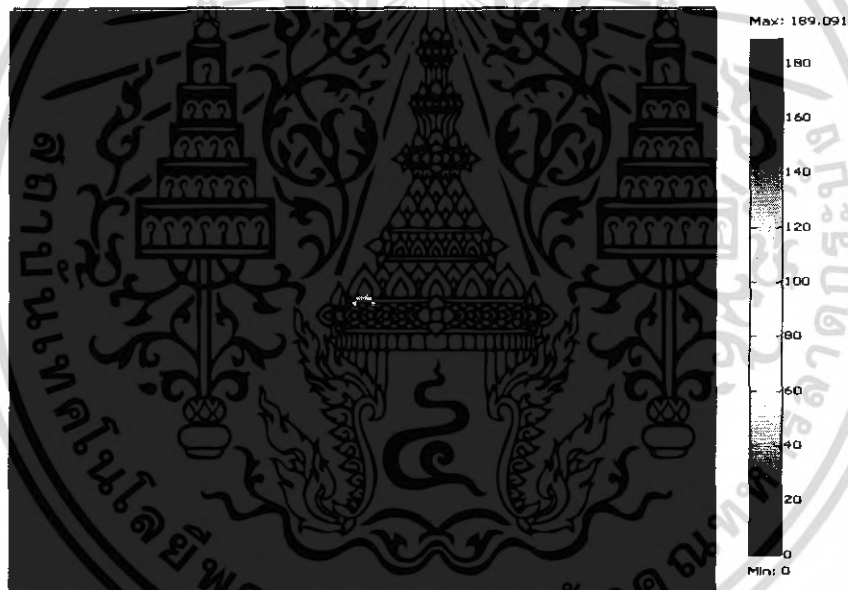
5) คุณสมบัติการกระจายของสนามไฟฟ้าและค่าเส้นสมศักย์ที่สม่ำเสมอที่สุด

6) ระยะของการออกแบบที่เป็น อัตราส่วนระหว่างระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนด กับระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก ซึ่งมาตรฐาน IEC815 [15] ได้กำหนดให้ระยะ  $(\frac{ld}{d}) < 5$

จากการเลือกคุณสมบัติของการจัดเรียงของครีบลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแต่ละแบบทั้งหมด 1024 ลูก จะได้ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงทั้งหมด 3 แบบด้วยกันคือ แบบที่ 709, 901 และ 913 โดยจะนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม FEMLAB เพื่อดูการความเครียดสนามไฟฟ้า และเส้นสมศักย์ดังนี้



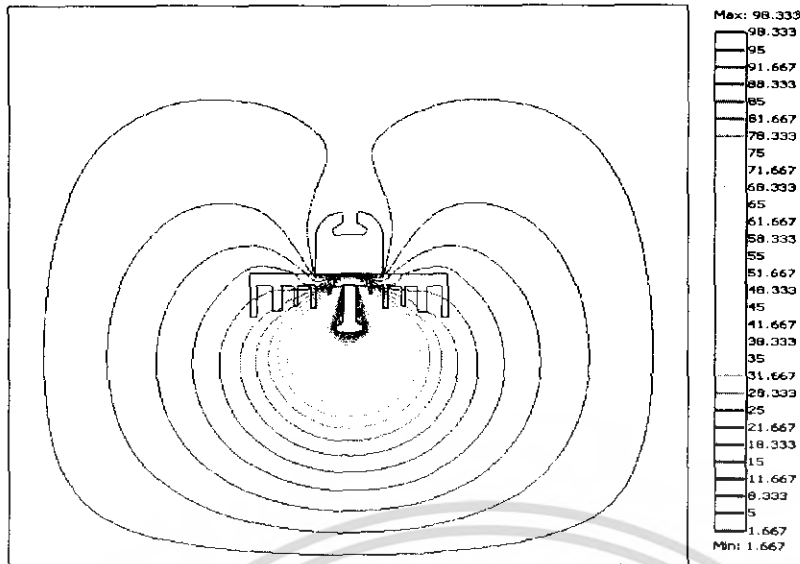
รูปที่ 4.11 เส้นสมมติของลูกถ้วยกระแสดรหหมายเลขที่ 709



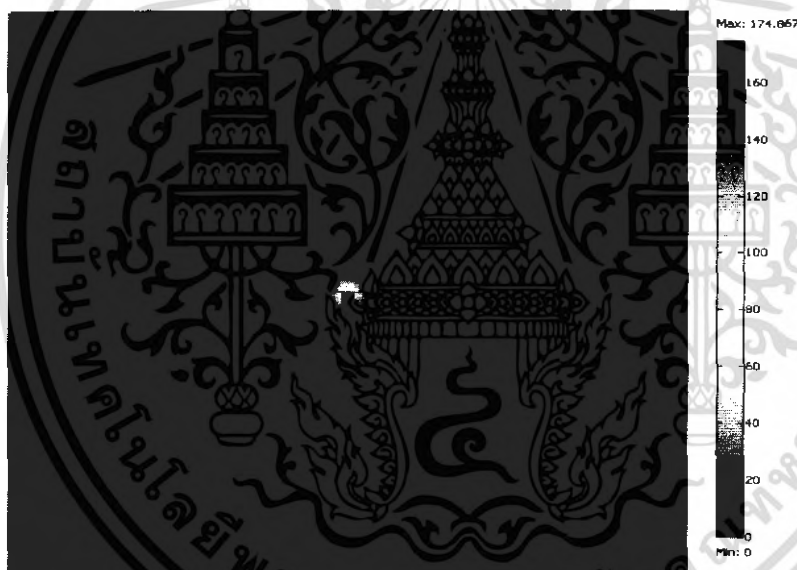
รูปที่ 4.12 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 709

สรุปและวิจารณ์ผลได้ดังนี้คือ ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 709 มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด 189.091 V/cm มีบางครีบของลูกถ้วยฉนวนไม่โค้งตามเส้นสมมติซึ่งอาจจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน เป็นสาเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เส้นสมศักย์ของลูกถ้วยกระแสดรหหมายเลขที่ 901

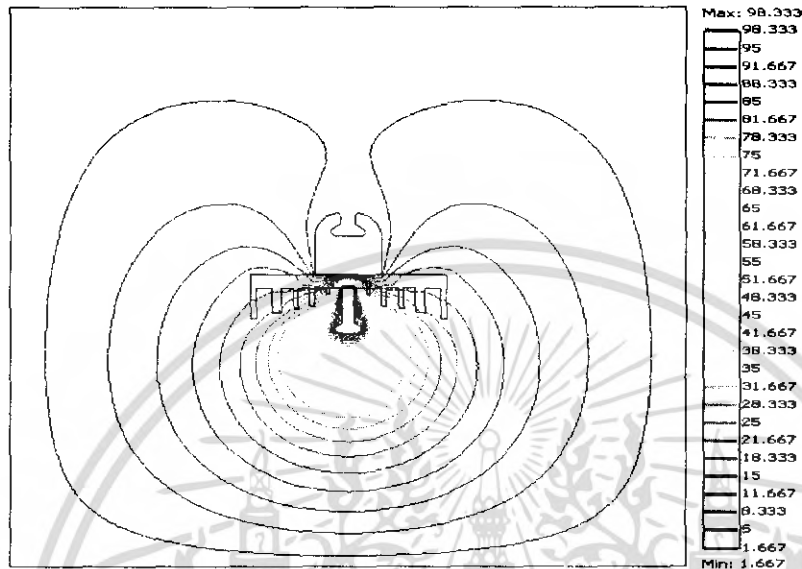


รูปที่ 4.14 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 901

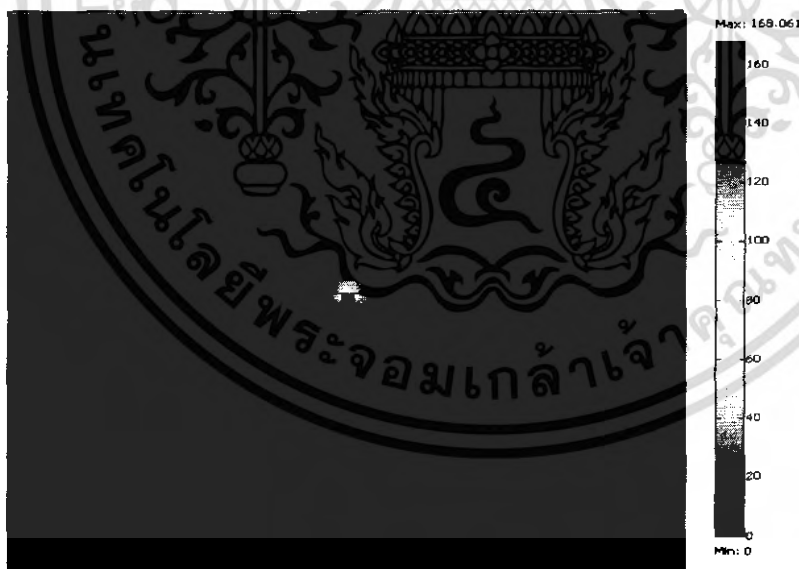
ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 901 มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด 189.091 V/cm มีบางครีบบของลูกถ้วยฉนวนไม่โค้งตามเส้นสมศักย์ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน เป็นสาเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ 901 มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด 174.864 V/cm และเส้นสมตักย์ที่แสดงดังรูป 4.13 มีการกระจายของเส้นสมตักย์ไฟฟ้าที่ยังไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากยังมีบางครีบบของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ 901 ไม่โค้งตามเส้นเส้นสมตักย์ อันจะส่งผลต่อการเกิดความต่าศักย์ขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน และเป็นสาเหตุให้อาจจะเกิดการวาบไฟตามผิวได้



รูปที่ 4.15 เส้นสมตักย์ของลูกถ้วยกระแสดรทรงหมายเลขที่ 913



รูปที่ 4.16 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงหมายเลข 913

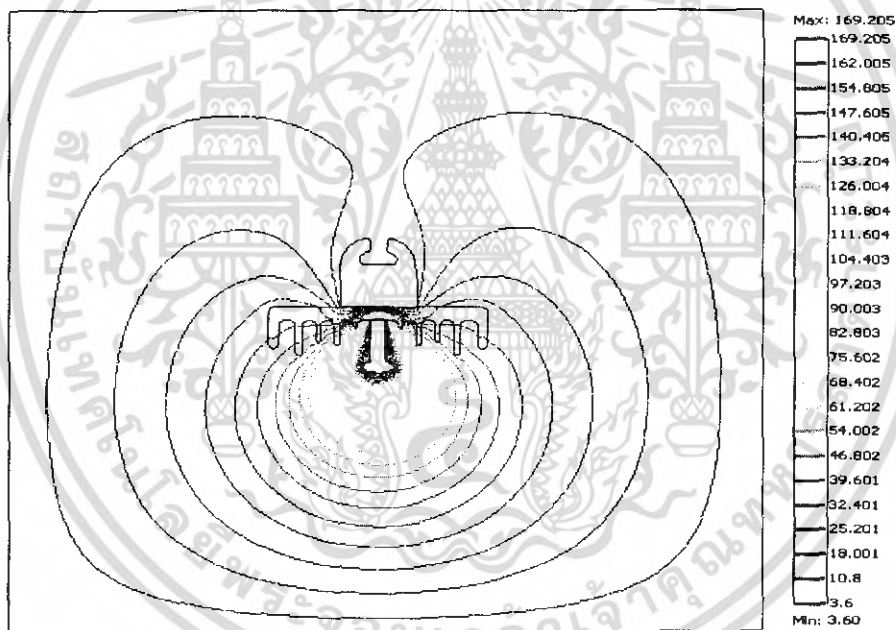
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ 913 มีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 168.061 V/cm และเส้นสมคักย์ที่ได้จากรูปที่ 4.15 ออกมายังมีเส้นสมคักย์ที่ยังไม่สม่่าเสมอกันเท่าไร เนื่องจากยังมีบางคริบของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ 913 ไม่โค้งตามเส้นเส้นสมคักย์ อันจะส่งผลต่อการเกิดควมเครียดของสนามไฟฟ้าณจุดนั้น และเป็นสาเหตุให้อาจจะเกิดการวบไฟตามผิวได้

จากการพิจารณาเส้นสมคักย์และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของลูกถ้วยฉนวนทั้ง 3 ลูกพบว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงหมายเลขที่ 709 มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดรวมทั้ง สามารถนำไปดัดแปลงแก้ไขลักษณะรูปร่างได้ง่าย ผู้ออกแบบจึงเลือกลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงหมายเลข 709 เป็นต้นแบบในการปรับปรุงต่อไป

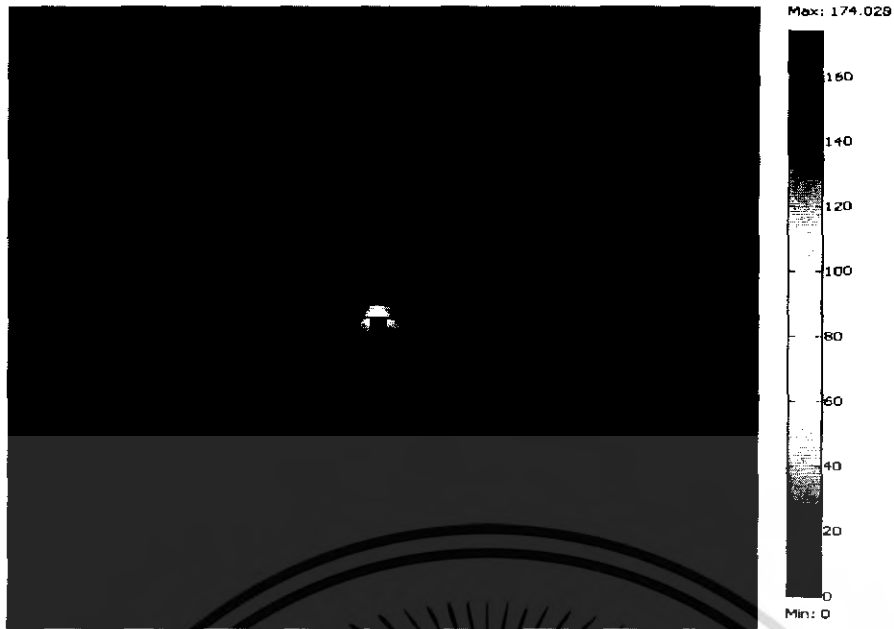
รูปแบบของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงที่ 709 ที่ยังไม่ได้ลบมุมโค้ง สรุปและวิจารณ์ผลได้ดังนี้คือ เมื่อยังไม่ได้ลบมุมโค้งนั้นลักษณะของเส้นเส้นสมคักย์ และสนามไฟฟ้าั้นยังไม่สม่่าเสมอ ดังนั้นจึงได้ปรับความโค้งของคริบลูกถ้วยให้โค้งตามเส้นเส้นสมคักย์ เพื่อที่จะลดควมเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เส้นเส้นสมคักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งปีกโค้ง



รูปที่ 4.17 เส้นสมคักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรทรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งปีกโค้ง

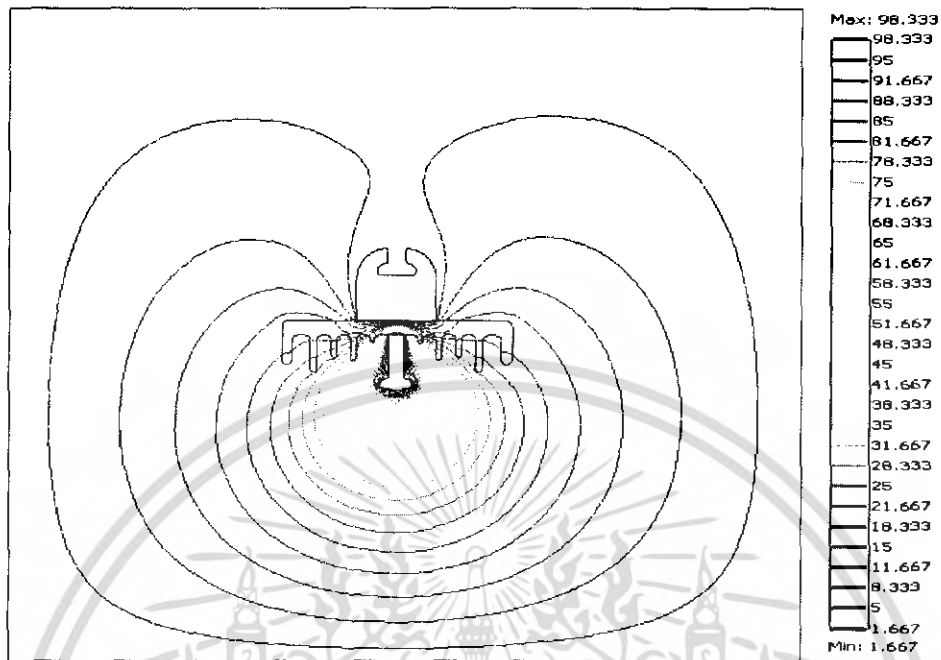
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.18** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งปีกโค้ง

จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ลดลงจากตอนที่ก่อนที่จะปรับแต่งความโค้งของปีกโค้งของที่มีค่าประมาณ  $189.091 \text{ V/cm}$  และหลังจากการปรับแต่งลักษณะความโค้งของปีกโดยที่มีค่าประมาณ  $174.028 \text{ V/cm}$  การกระจายของเส้นสมศักย์ของลูกถ้วยฉนวนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

การศึกษาผลของมุมของปีกที่ทำการปรับเปลี่ยน ตามข้อแนะนำมาตรฐาน IEC 815 [15] ที่มุม 0, 6 และ 10 องศา

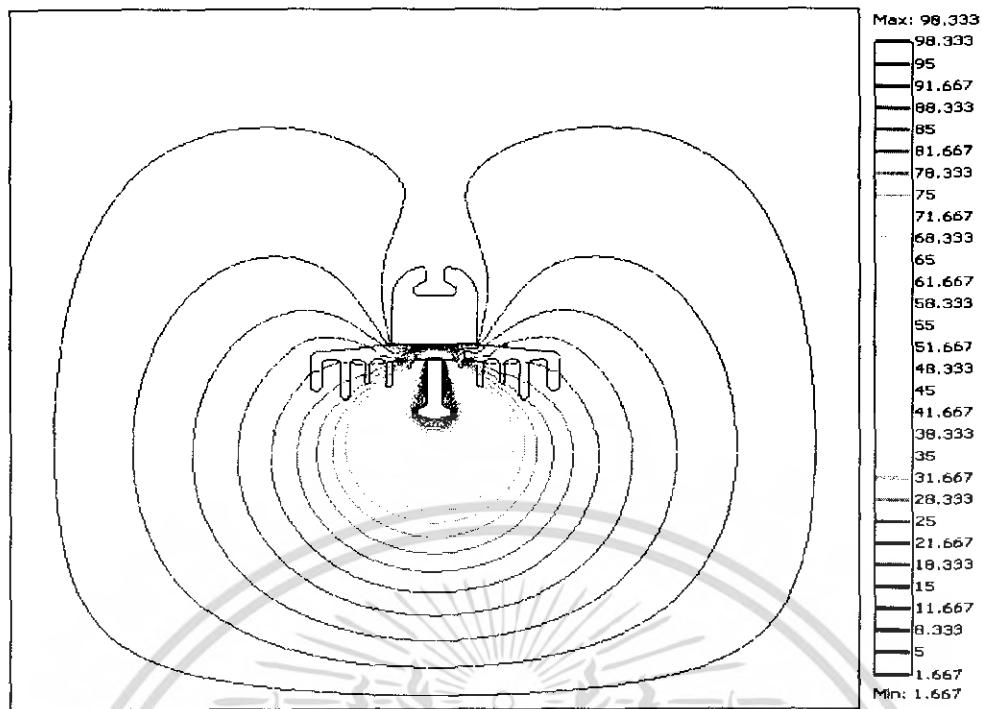


รูปที่ 4.19 เส้นสมตักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 0 องศา

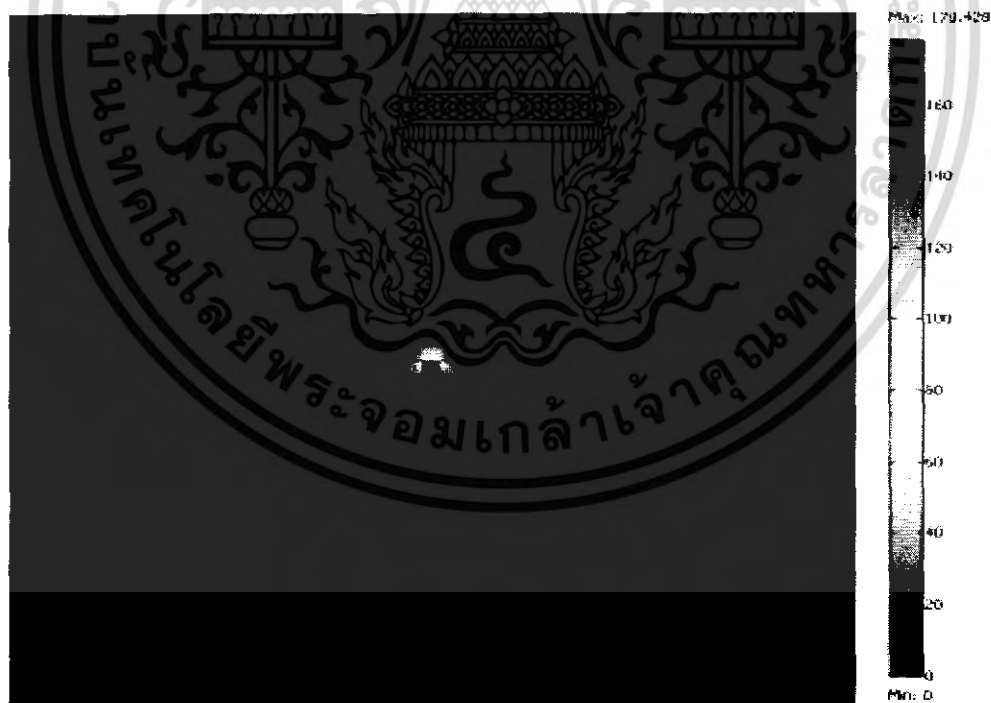


รูปที่ 4.20 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

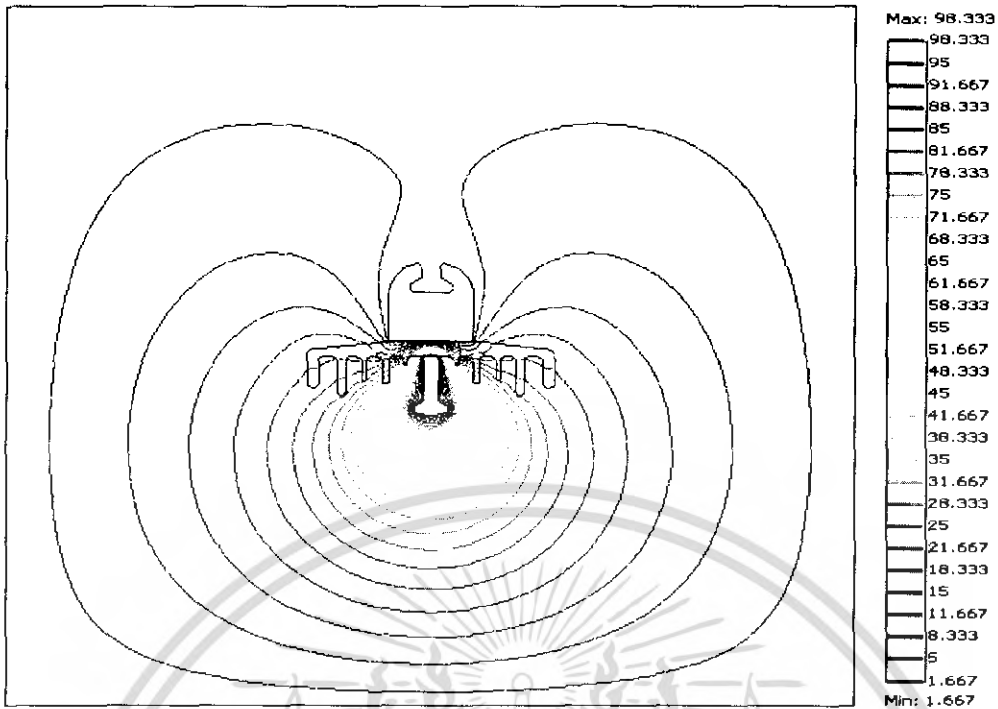


**รูปที่ 4.21** เส้นสมมติของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 6 องศา

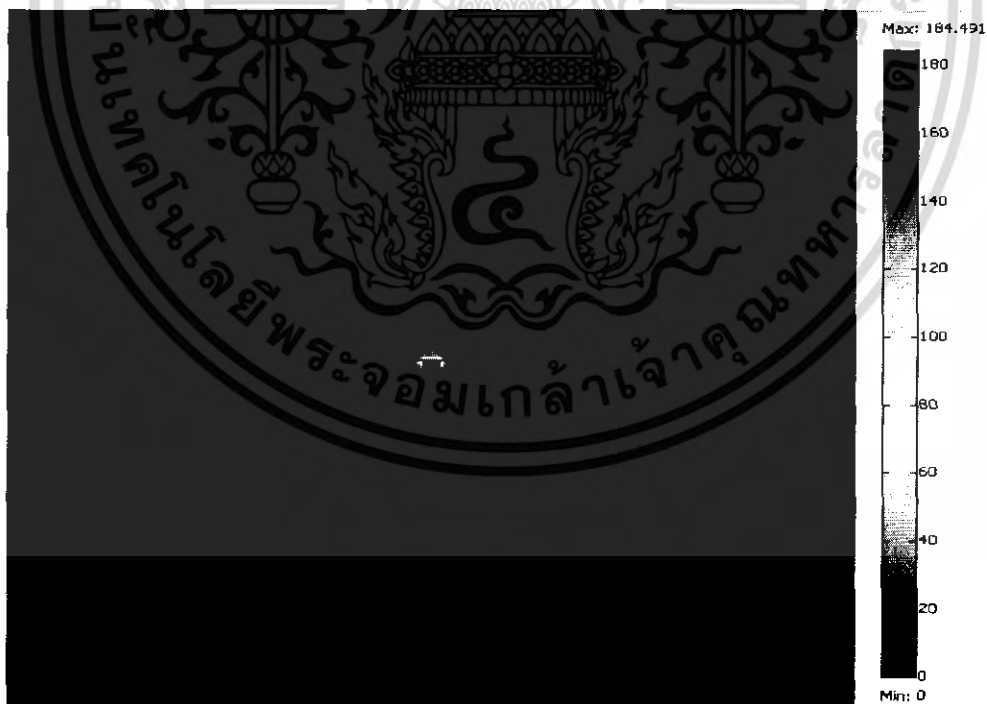


**รูปที่ 4.22** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอนเอียงปีกโค้งที่ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.23** เส้นสมคัณฑ์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งการเอนเอียง  
ปีกโค้งที่ 10 องศา



**รูปที่ 4.24** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่ง  
การเอนเอียงปีกโค้งที่ 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปและวิจารณ์

ที่การเอียงของปีกลูกถ้วยฉนวนกระแสดรตรงที่ 0 องศา จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 174.028 V/cm แต่การเอียงแบบนี้คือจะไม่เป็นไป ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 815 [15] ได้กำหนดเพื่อให้ลูกถ้วยฉนวนสามารถ ทำความสะอาดตัวเองเมื่อมีลมพัดหรือเกิดมีฝนตกลงมา จะช่วยลดผลของความเปรอะเปื้อนต่อการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน

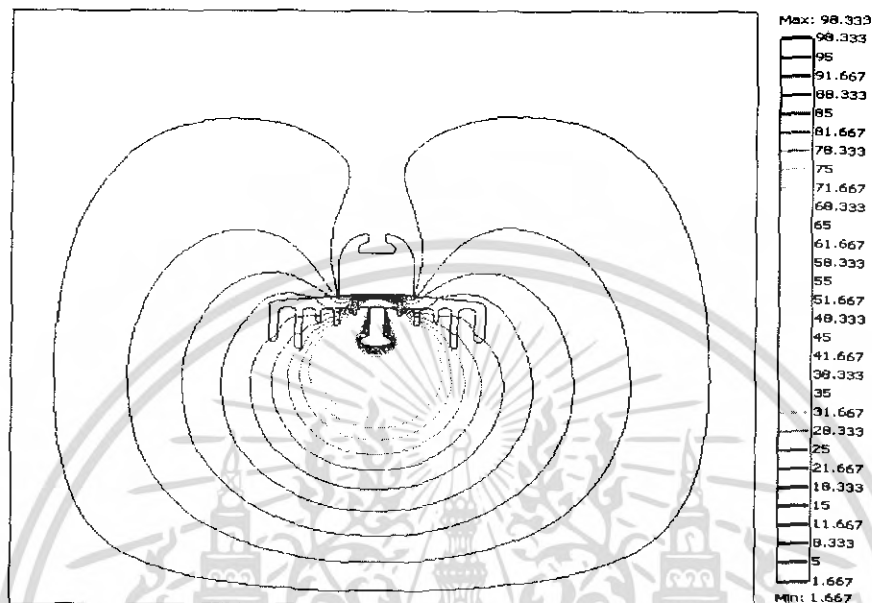
กรณีมุมเอียงของปีกลูกถ้วยฉนวนกระแสดรตรงที่ 6 องศา ค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 178.428 V/cm ค่ามุมเอียงของปีกอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEC 815 [15] กำหนดเพื่อที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ และยังส่งผลต่อการโค้งงอของสมคักย์ไฟฟ้าอีกด้วย

เมื่อกำหนดให้มุมเอียงของปีกลูกถ้วยฉนวนกระแสดรตรงที่ 10 องศา จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น 184.491 V/cm เนื่องจากการเอนเอียงของปีกที่มากเกินไป

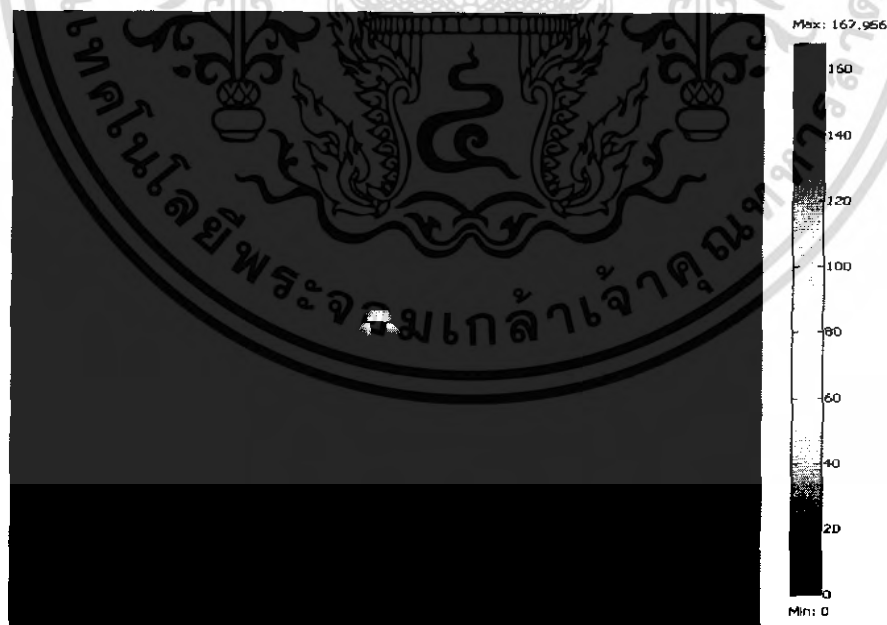
สรุปเมื่อการออกแบบที่ทำมุมเอียง 6 องศาเป็นแบบดีที่ยอมรับได้ ซึ่งมาตรฐานกำหนดให้การเอนเอียงที่มุม  $\alpha \geq 5$  องศา ที่เกี่ยวเนื่องกับการทำความสะอาดตัวเองของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรและลักษณะของเส้นสมคักย์อีกด้วย

การศึกษาหัวข้อนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมเส้นสมศักย์ และความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดเมื่อปรับแต่งมิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

โดยการเพิ่มระยะครีป 2 ครีปที่อยู่นอกสุดของลูกถ้วย ขณะเดียวกันก็ลดระยะครีป 3 ครีปที่อยู่ใกล้ Pin ลง โดยอยู่ในข้อกำหนดที่ระยะรั้วและระยะของช่องว่างระหว่างครีปนั้นมากกว่า 5



**รูปที่ 4.25** เส้นสมศักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งเมื่อมิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว



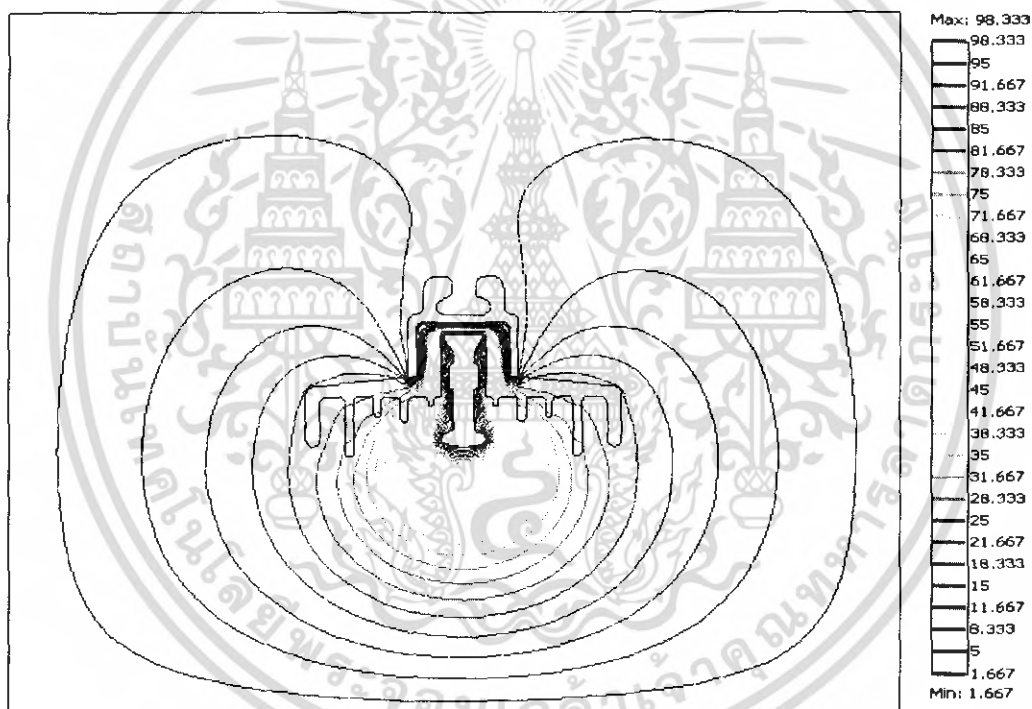
**รูปที่ 4.26** ความเคียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรหหมายเลข 709 หลังจากปรับแต่งมิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การลดระยะของ Pin และการเปลี่ยนระยะ creepage ใหม่ โดยผู้ออกแบบคำนึงถึงการออกแบบรูปร่างทางมิติ ให้เหมาะสมกับลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่นำไปใช้งาน คือจะต้องมีการออกแบบมิติให้มีจับเกาะติดของสิ่งเปราะเปื้อนได้น้อยลง และสามารถที่จะทำความสะอาดตัวเองได้ดี ซึ่งจะเห็นว่าแบบเดิมระยะห่างระหว่างอัตราส่วนระหว่างระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดกับระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก ( $\frac{ld}{d}$ ) < 5 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ Creepage เก่ามีค่าประมาณ 174.028 V/cm และเมื่อปรับปรุง creepage ใหม่จะได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 167.956 V/cm.

### การวิเคราะห์การออกแบบผลของรูปทรงของ Cap เมื่อประกอบเข้ากับ Pin ที่ตัวลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง

เส้นสมศักย์และสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยเมื่อมีการปรับเปลี่ยนลักษณะ Cap แบบที่ 1



**รูปที่ 4.27** ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จ ลักษณะ Cap แบบที่ 1 ดูค่าเส้นสมศักย์ หลังจากปรับแต่งมิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

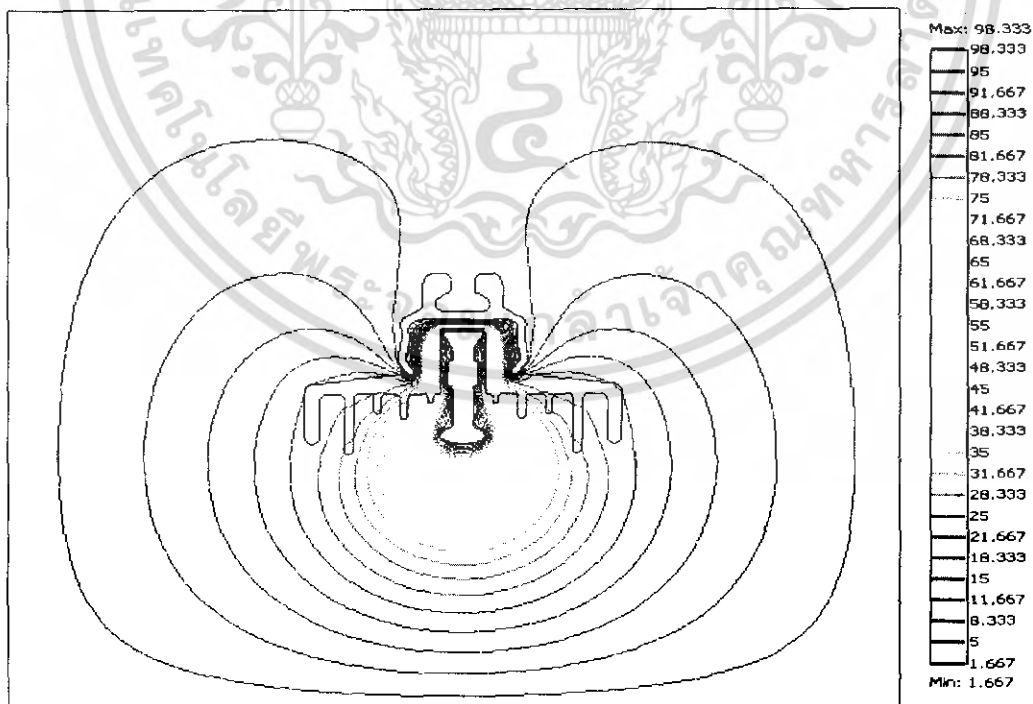
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วโดยใช้ลักษณะ Cap แบบที่ 1 ดูค่าความเครียดสนามไฟฟ้า



**รูปที่ 4.28** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรง หลังจากปรับแต่งมิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วโดยใช้ ลักษณะ Cap แบบที่ 2 ดูเส้นสมตักย์



**รูปที่ 4.29** ลักษณะ Cap แบบที่ 2 ดูค่าเส้นสมตักย์ หลังจากปรับแต่งมิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

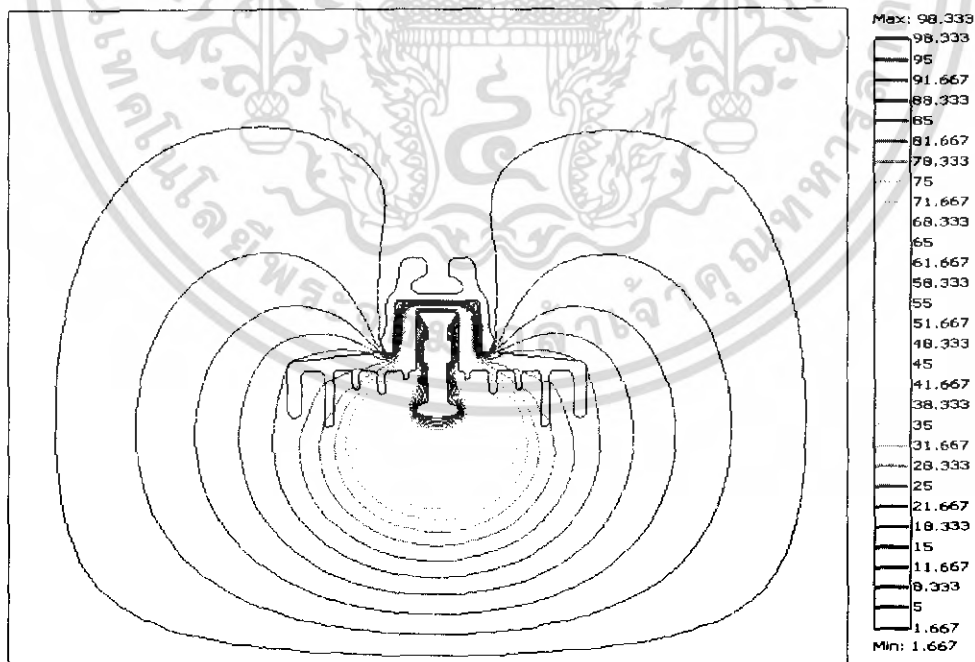
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วโดยใช้ ลักษณะ Cap แบบที่ 2 ดูค่าสนามไฟฟ้า



**รูปที่ 4.30** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรง หลังจากปรับแก้มิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

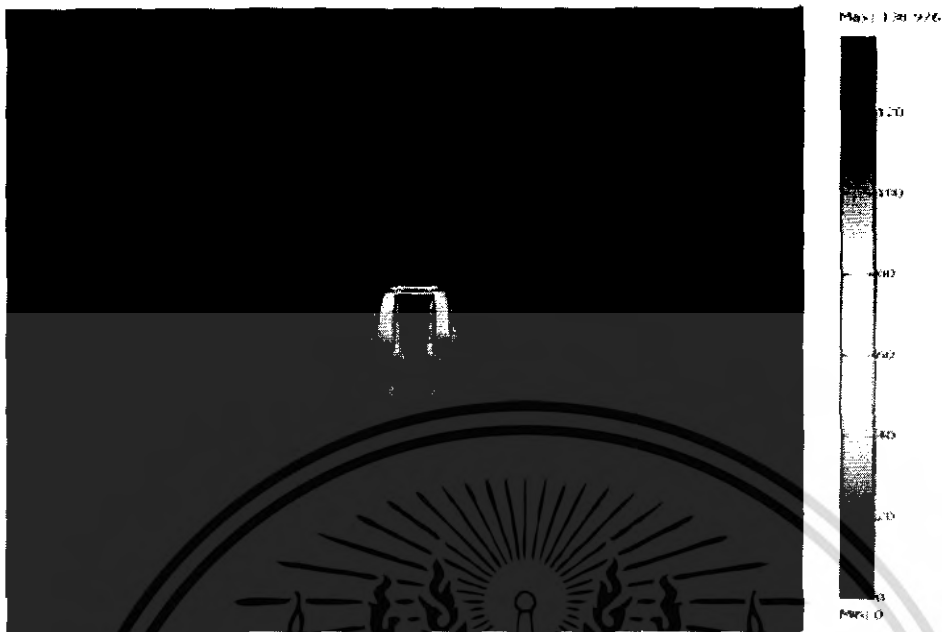
ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วโดยใช้ ลักษณะ Cap แบบที่ 3 ดูเส้นสมศักย์



**รูปที่ 4.31** ลักษณะ Cap แบบที่ 3 ดูเส้นสมศักย์ หลังจากปรับแก้มิติของลูกถ้วยและระยะรั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกถ้วยฉนวนที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วโดยใช้ ลักษณะ Cap แบบที่ 3 ดูค่าสนามไฟฟ้า



**รูปที่ 4.32** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง หลังจากปรับแต่งมิติของลูกถ้วย และระยะรั้ว

วิเคราะห์ผลการออกแบบด้วยลักษณะของ Cap แบบต่างๆ เมื่อประกอบเข้ากับ Pin ของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง

พฤติกรรมของเส้นสมตักย์และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของลูกถ้วยฉนวนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของ Cap ทั้ง 3 แบบดังที่กล่าวมาพบว่า

ลักษณะ Cap แบบที่ 1 มีค่าสนามไฟฟ้าประมาณ 153.09 V/cm และมีลักษณะของเส้นสมตักย์ที่สม่ำเสมอดี

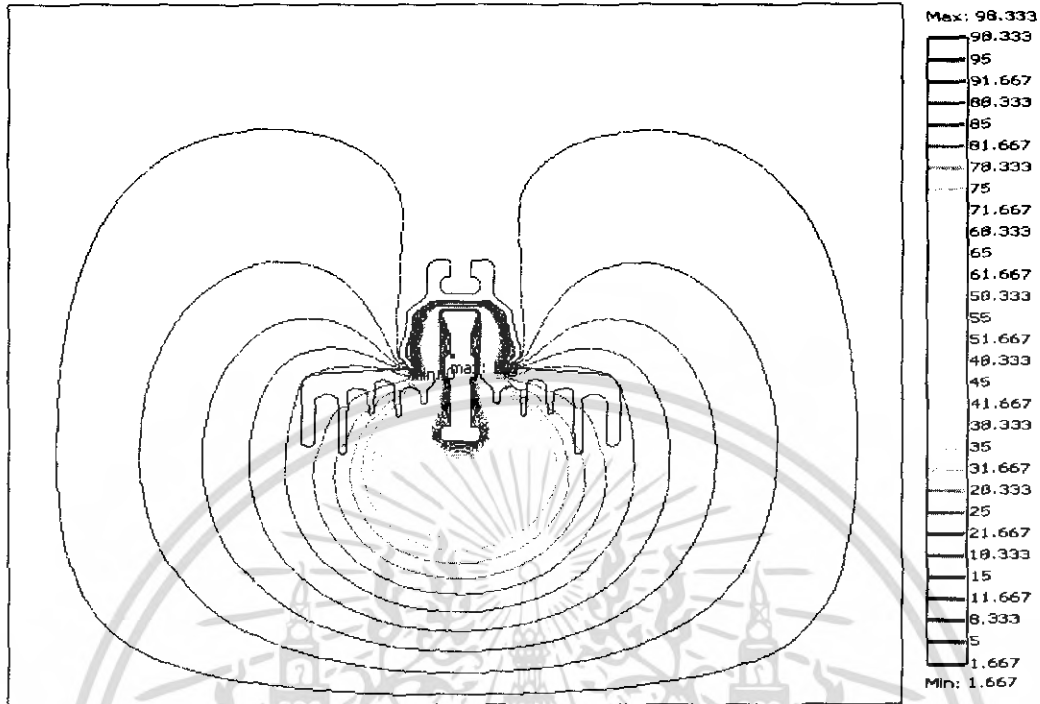
ลักษณะ Cap แบบที่ 2 มีค่าสนามไฟฟ้าประมาณ 138.175 V/cm และมีลักษณะของเส้นสมตักย์ที่สม่ำเสมอดี

ลักษณะ Cap แบบที่ 3 มีค่าสนามไฟฟ้าประมาณ 138.976 V/cm และมีลักษณะของเส้นสมตักย์ที่สม่ำเสมอดี

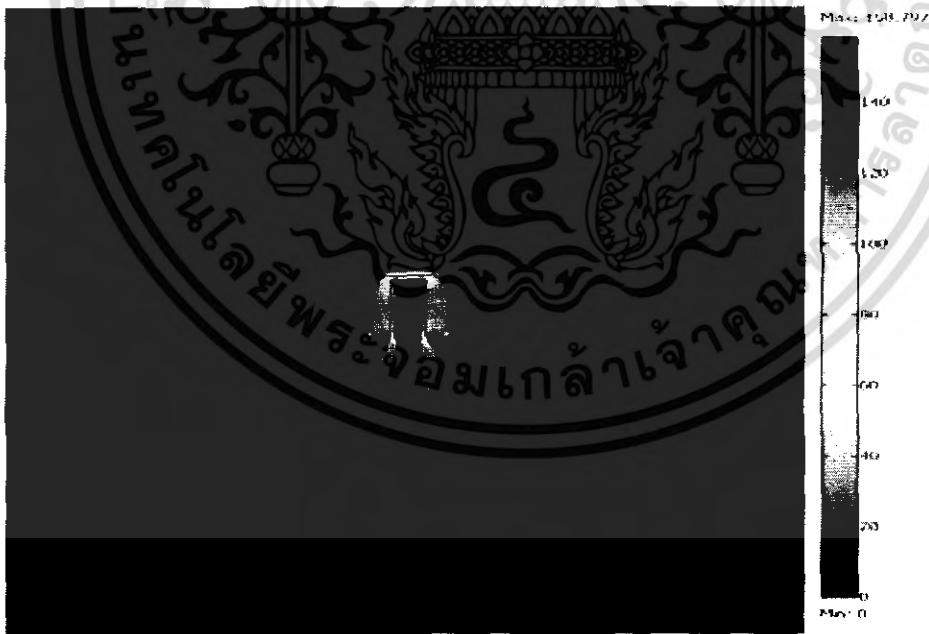
ผลการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงจากแบบจริงที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันดังรูปที่ 4.33 – 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมลักษณะของเส้นสมตักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้  
งานอยู่จริง



รูปที่ 4.33 เส้นสมตักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงจากแบบจริง



รูปที่ 4.34 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงจากแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผู้ออกแบบได้ทำการออกแบบลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงได้ดีกว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ทั้ง 3 แบบด้วยกัน ซึ่งแบบที่ดีที่สุดคือลักษณะ Cap แบบที่ 2 ทั้งลักษณะของเส้นเส้นสมคักย์และค่าสนามไฟฟ้า

### วิเคราะห์ผลการจำลอง

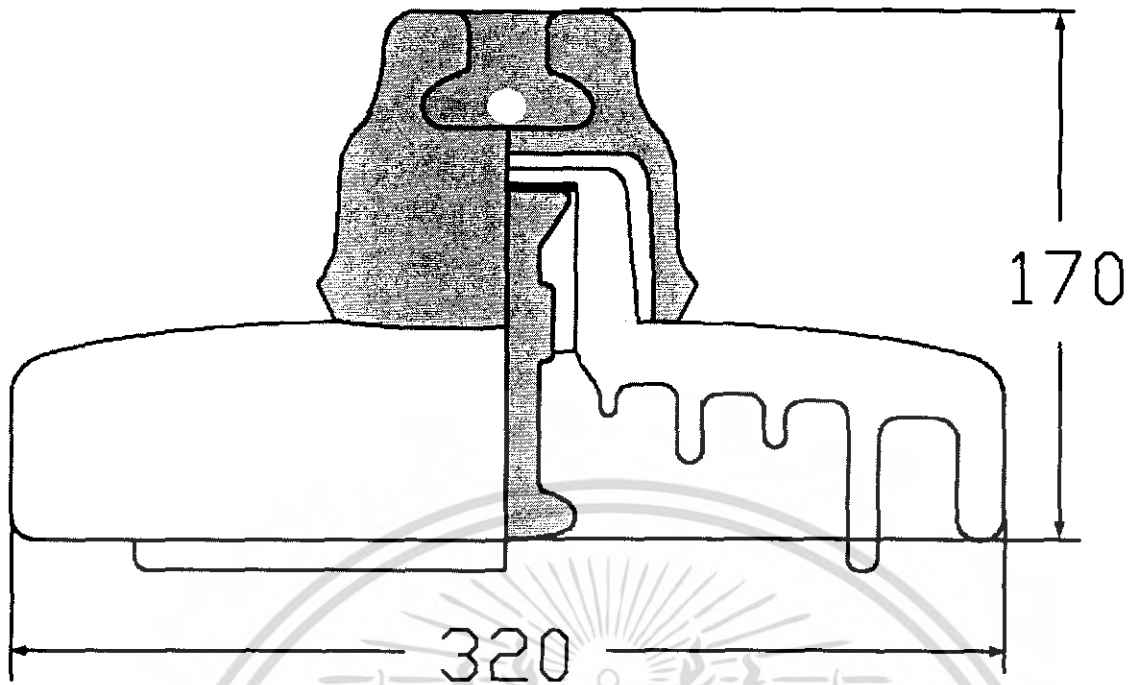
จากการจำลองลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงแบบแขนที่ได้ทำการออกแบบมาพบว่า ลักษณะของเส้นสมคักย์ยังได้ไม่ดีมากนัก ทำให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นยังคงมีค่าสูงอยู่ ซึ่งจากผลการศึกษาข้อมูล และการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2 พบว่าถ้าหากต้องการให้ความเครียดสนามไฟฟ้าดีขึ้นลักษณะครีบ ของลูกถ้วยฉนวนควรจะมีจำนวนครีบมากขึ้น ความหนามากขึ้นจะสามารถทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าดีขึ้น

### สรุปผลการจำลองลูกถ้วยกระแสดตรงพื้นฐาน

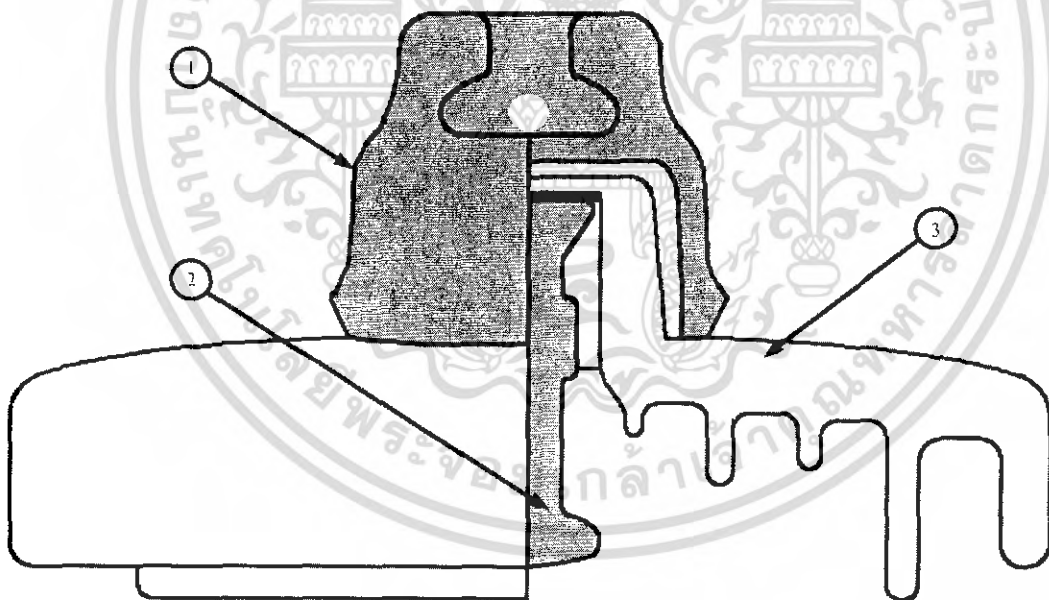
การออกแบบลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยนั้น จะออกแบบให้ครีบบนของลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นสมคักย์ (Equipotential Lines) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นสมคักย์ของลูกถ้วยแขน ที่ผิวลูกถ้วยด้านบนที่ติดอยู่กับฝาครอบโลหะจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จะเป็นสาเหตุให้เกิดโคโรนาขึ้นในบริเวณนี้ได้ง่าย และนำไปสู่การวาบไฟตามผิว (Flashover voltage) ความกว้างของปีกชั้นลูกถ้วย และความหนาของเนื้อลูกถ้วยระหว่างฝาครอบโลหะบน กับก้านยึดส่วนล่าง ต้องออกแบบให้มีความสัมพันธ์กันในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือความคงทนต่อแรงดันวาบไฟจะต้องน้อยกว่าคงทนต่อแรงดันเจาะทะลุ (Puncture Voltage) ส่วนครีบได้ปีกลูกถ้วยนั้นทำไว้เพื่อเพิ่มระยะรั้วจะเป็นส่วนกันไม่ให้ผิวเปียกได้ง่ายในสภาพฝนตก เป็นผลให้ทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้นด้วย

จากการศึกษาพฤติกรรมของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสดตรง การนำลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีการใช้งานจริงในประเทศไทย รวมไปถึงผลการจำลองการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ดังนั้นเพื่อให้ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ออกแบบโดยอาศัยมาตรฐาน [14, 15, 16] เกิดประสิทธิผลสูงสุด และสามารถที่จะนำไปใช้งานจริงได้ จึงจะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ให้มีค่าที่เกิดโอกาสผิดพลาดของระบบน้อยที่สุด ตามที่ได้ทำการศึกษาวิจัยมา เช่น ปีก และครีบบนของเนื้อฉนวนจะต้องอยู่ในแนวเดียวกับเส้นสมคักย์ เพื่อลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิด ความยาวของปีกของเนื้อฉนวนจะต้องยาวพอที่จะป้องกันการพัดพาของสิ่งเปราะเปื้อน ที่จะไปจับเกาะที่อิเล็กโตรด หรือ ก้านหมุดโลหะ ที่ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดการวาบไฟตามผิวได้ง่าย

ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ทำการออกแบบและปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามข้อมูลต่างๆ ที่ได้ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 4.36 ส่วนประกอบต่างๆของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงที่ทำการออกแบบ

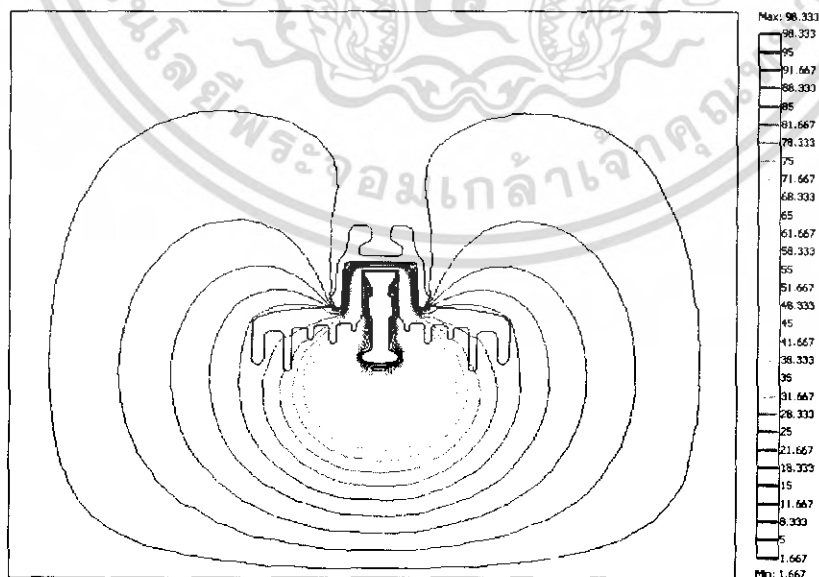
- เมื่อ
- 1 คือ ฝาครอบโลหะ (malleable cast iron cap)
  - 2 คือ หมุดโลหะเป็นรูปทรงกลม (ball of forged steel pin)
  - 3 คือ ลักษณะของปีกลูกถ้วยฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การเปรียบเทียบลักษณะของเส้นสมศักย์ และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

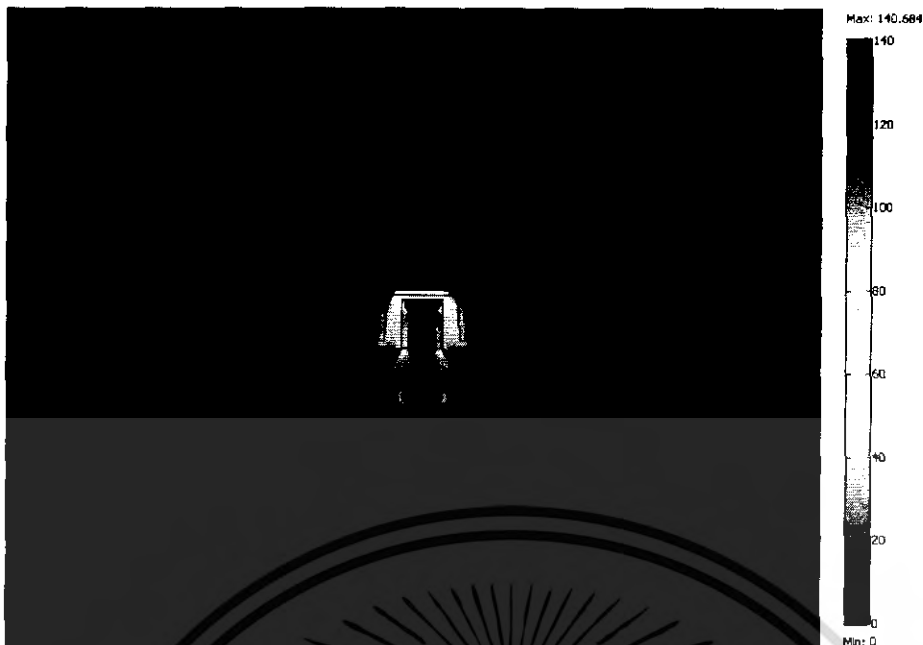
4.6.1 การจำลองเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ เริ่มทำการจำลองแบบของลูกถ้วยจนจนกระทั่งแสดง เพื่อศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลของการออกแบบลูกถ้วยตามมาตรฐาน และทำการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้า ทดสอบ โดยวัสดุที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีคุณสมบัติดังนี้

- Porcelain	
- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	5.7
- Conductivity ( $\sigma$ )	$1 \times 10^{-14}$ siemens/meter
- Cement	
- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	7
- Conductivity ( $\sigma$ )	$1 \times 10^{-7}$ siemens/meter
- Iron	
- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	1
- Conductivity ( $\sigma$ )	$1.12 \times 10^7$ siemens/meter
- cork-pad	
- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	61
- Conductivity ( $\sigma$ )	$2.01 \times 10^{15}$ siemens/meter
- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ	100 V



รูปที่ 4.37 เส้นสมศักย์ของลูกถ้วยจนจนกระทั่งทำการออกแบบ

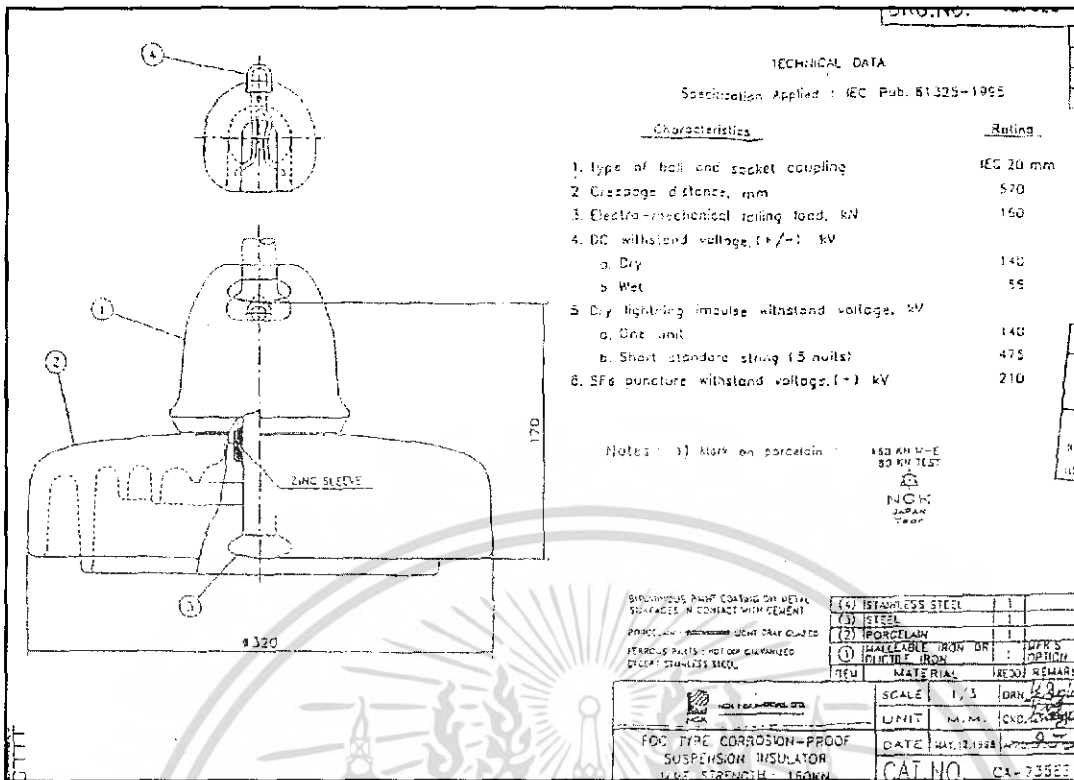
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



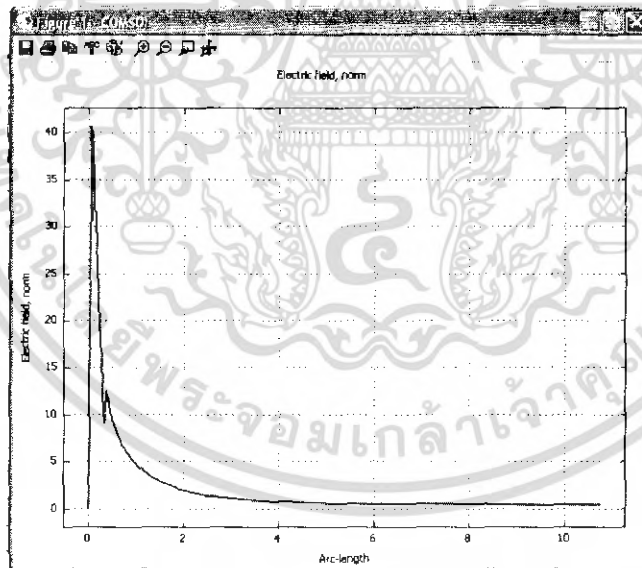
**รูปที่ 4.38** ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบ

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบจะมีค่าการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงต้นแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.34 พบว่า ณ ตำแหน่งของ Pin ลูกถ้วยที่สัมผัสกับฉนวนรองรับที่ทำด้วยไม้ก๊อก (cork-pad) จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $140.684 \text{ V/cm}$  เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ มีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $179.599 \text{ V/cm}$  ซึ่งลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่า  $21.66$  เปอร์เซ็นต์

ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงแบบแขนที่มีการใช้งานจริงในระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 4.39 และจากรูปที่ 4.33 แสดงผลการจำลองลักษณะเส้นสมคัตย์ของลูกถ้วยฉนวน พบว่าลักษณะของเส้นสมคัตย์จะมีการกระจายไปตามรูปร่างของครีป หรือชั้นของผิวลูกถ้วย ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนที่ทำการจำลองจะมีค่าน้อยเป็นผลให้การเกิดวาบไฟตามผิว (flashover) ของลูกถ้วยฉนวนจะเกิดขึ้นได้ยาก

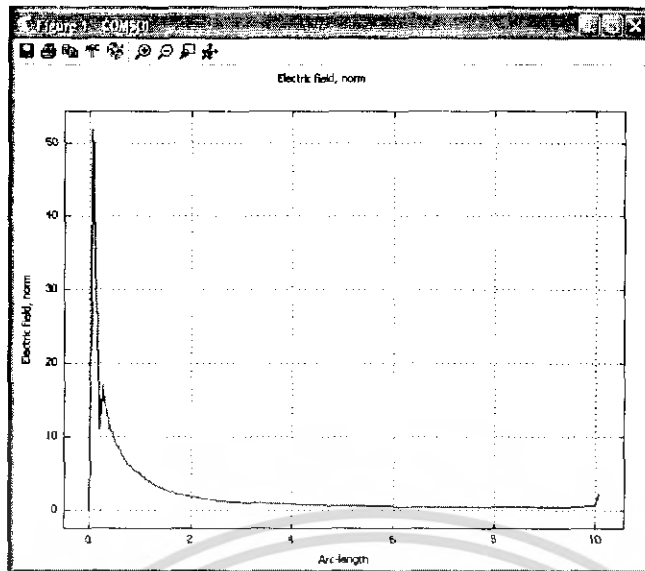


รูปที่ 4.39 ดันแบบของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงดันแบบที่ใช้งานในประเทศไทย



(ก)

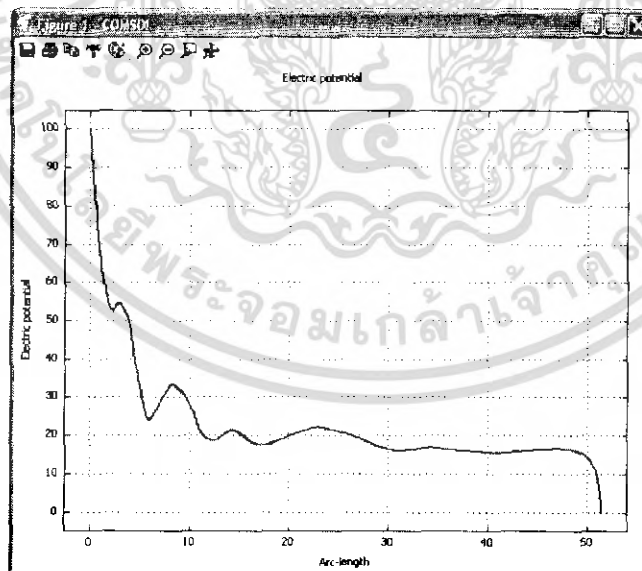
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

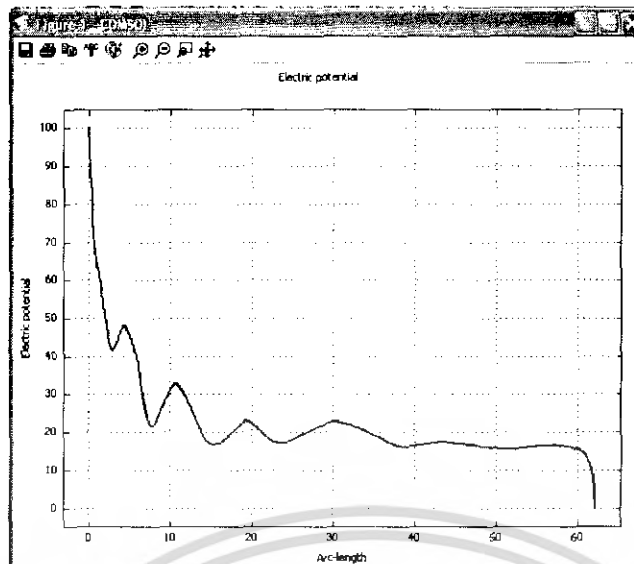
**รูปที่ 4.40** ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวด้านบนของลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง (ก) ออกแบบ (ข) ต้นแบบ

จากกราฟจะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวด้านบนของลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกแบบ จะมีค่าน้อยกว่าลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบผิวโค้งของผิวลูกถ้วย



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



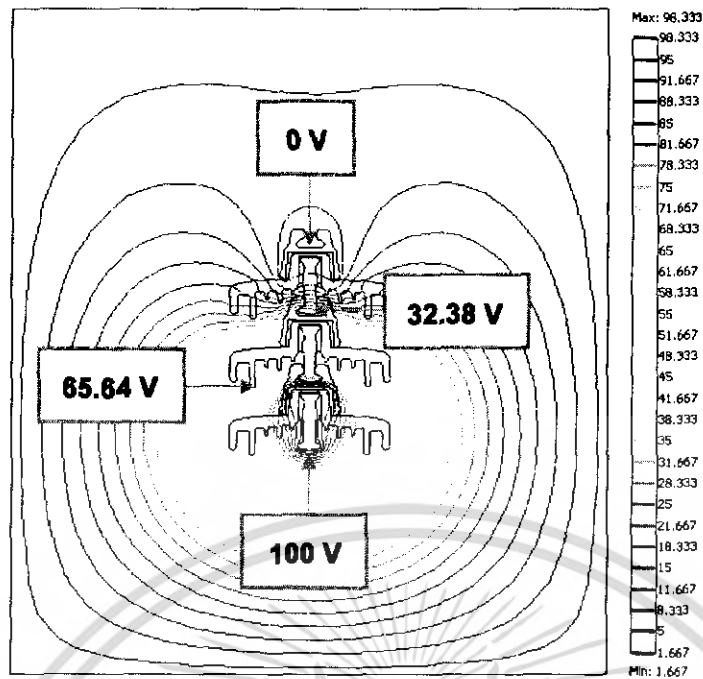
(ข)

**รูปที่ 4.41** แรงดันไฟฟ้าตามระยะ Creepage ผิวด้านบนของลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรง

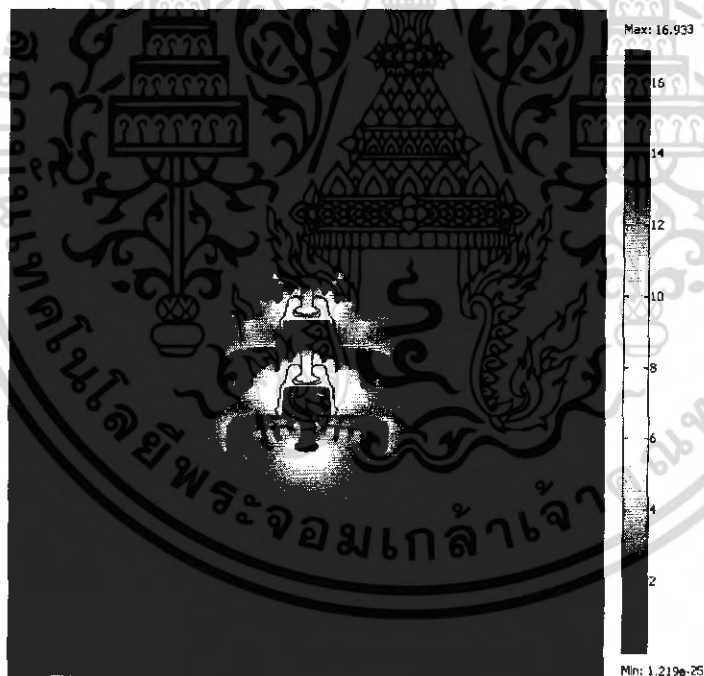
(ก) ออกแบบ (ข) ดันแบบ

จากกราฟลักษณะการกระจายแรงดันไฟฟ้าตามระยะ Creepage ผิวด้านบนของลูกฉนวนไฟฟ้ากระแสดตรงที่ออกแบบจะมีความสม่ำเสมอกว่าลูกถ้วยดันแบบเนื่องจากผลของการออกแบบครีปของลูกถ้วยฉนวนมีการออกแบบให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

หลังจากที่ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (FEMLAB) วิเคราะห์และเปรียบเทียบเส้นสมตักย์ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงดันแบบกับลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ได้ออกแบบโดยใช้ลูกเดี่ยว ต่อมาเราจะนำลูกถ้วยที่ได้ออกแบบไว้มาทำการต่อพ่วงกัน 3 ลูกเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงดันแบบกับ ลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงที่ได้ออกแบบ

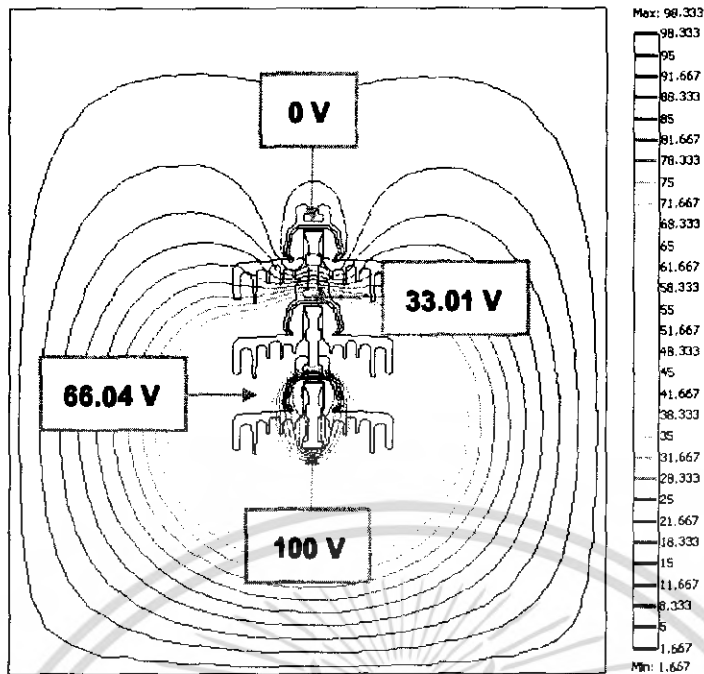


รูปที่ 4.42 เส้นสมศักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งที่ทำการออกแบบ

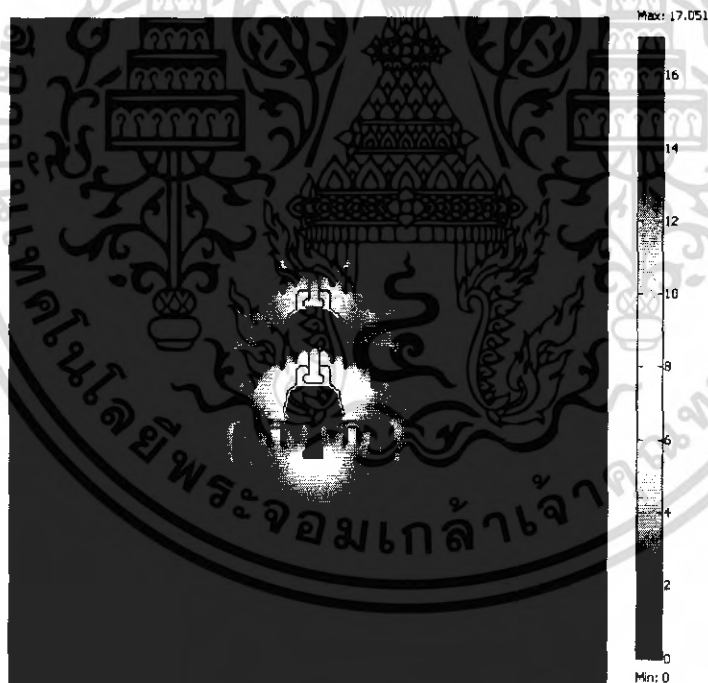


รูปที่ 4.43 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดร่งที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 เส้นสมศักย์ของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงตันแบบ

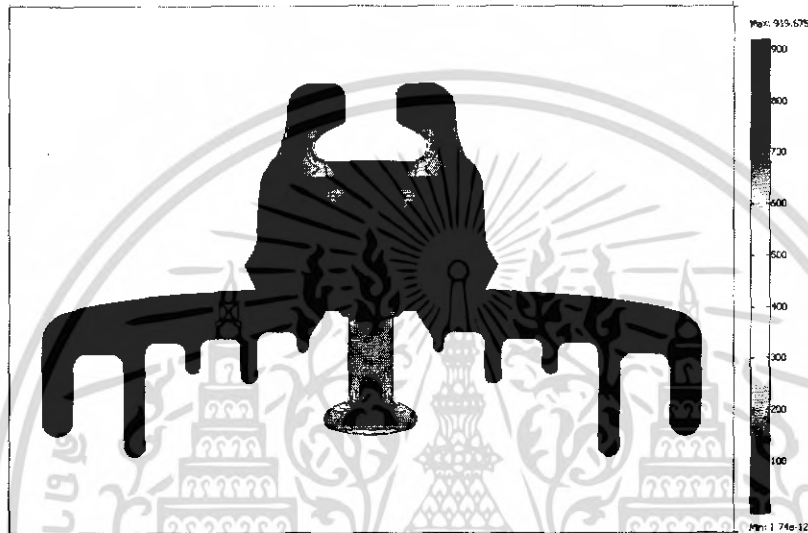


รูปที่ 4.45 ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสดรงตันแบบ

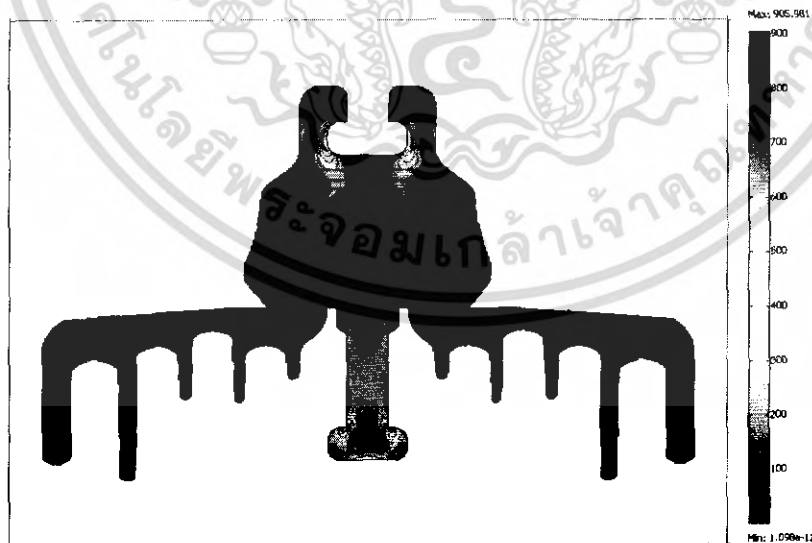
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองโดยการต่อฟลักด้วยฉนวนกระแสตรงจะเห็นว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของ ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ได้ทำการออกแบบนั้นจะมีค่า 16.933 V/cm ซึ่งมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าลูกถ้วยต้นแบบที่มีค่า 17.051 V/cm ซึ่งน้อยกว่า 0.6 เปอร์เซ็นต์ และเป็นผลทำให้เกิดการนำไปสู่การเกิดวาทไฟตามผิวยากขึ้น

4.6.2 การจำลองเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลูกถ้วยต้นแบบกับลูกถ้วยที่ออกแบบ โดยการนำลูกถ้วยที่ได้ทำการออกแบบมาทำการจำลองโดยป้อนแรงดึงที่ Cap และ Pin 100 นิวตันเพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นฟอนมิสเซสกับลูกถ้วยต้นแบบ



รูปที่ 4.46 ความเค้นฟอนมิสเซสของลูกถ้วยที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 4.47 ความเค้นฟอนมิสเซสของลูกถ้วยต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองจะเห็นว่าลูกถ้วยที่ทำการออกแบบมีค่าความเค้นฟอนมิสเซล 919.675 N/m<sup>2</sup> และลูกถ้วยต้นแบบมีค่าความเค้นฟอนมิสเซล 905.981 N/m<sup>2</sup> ซึ่งจะเห็นว่าลูกถ้วยต้นแบบมีค่าความเค้นฟอนมิสเซลน้อยกว่าซึ่งสามารถรับแรงทางกลได้ดีกว่าลูกถ้วยที่ได้ทำการออกแบบ

### สรุปผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะเห็นว่าถ้าทำการเปรียบเทียบทางไฟฟ้าแล้วลูกถ้วยที่ทำการออกแบบจะมีค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าตรงเนื้อฉนวนและความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวน้อยกว่าลูกถ้วยต้นแบบซึ่งนำไปสู่การรวบไฟตามผิวได้ยากกว่าลูกถ้วยต้นแบบ แต่ถ้าเปรียบเทียบแรงทางกลแล้วลูกถ้วยต้นแบบสามารถรับแรงทางกลได้ดีกว่า ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการออกแบบ ว่าควรมีการปรับเปลี่ยนใช้วัสดุที่มีความแกร่งกว่าลูกถ้วยที่ได้ทำการออกแบบ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ต้องเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 หลักการในการออกแบบเคเบิลสเปซเซอร์

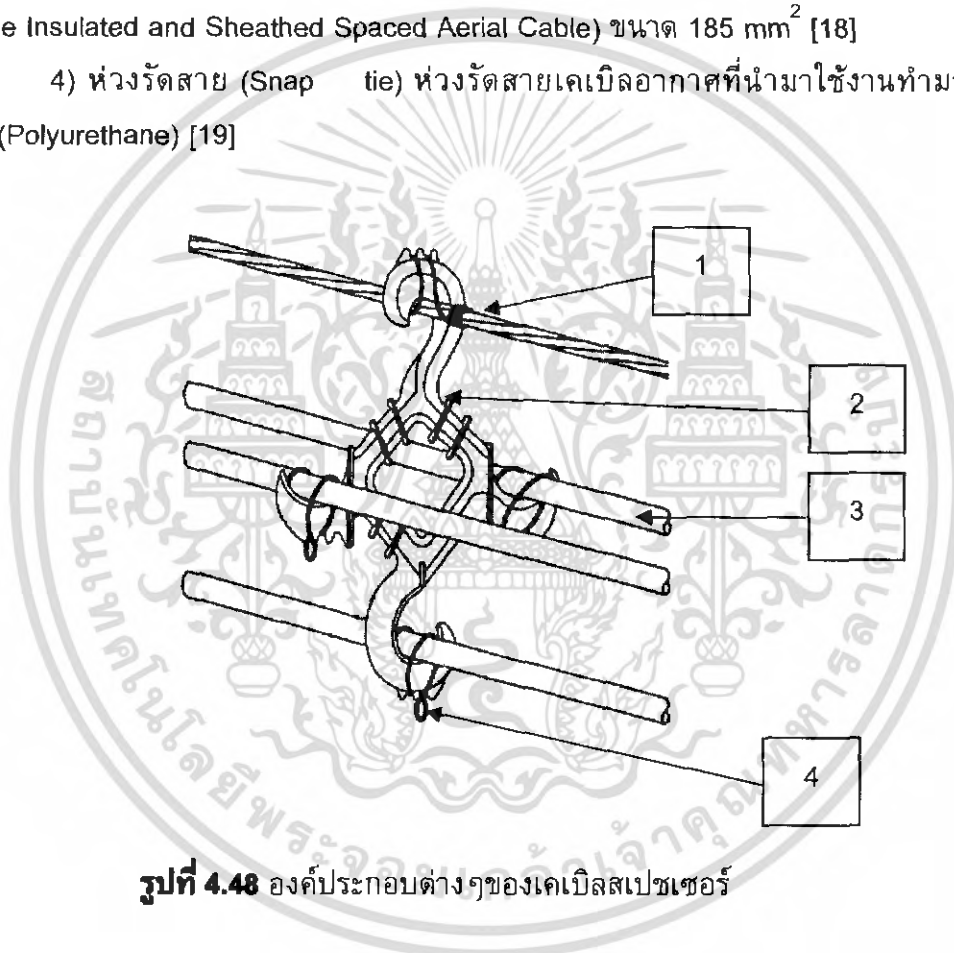
4.7.1 เคเบิลสเปซเซอร์ที่ใช้กันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั่วไปจะมีองค์ประกอบโดยทั่วไปดังนี้

1) สายสำหรับแขวนเคเบิลสเปซเซอร์ (Messenger wire) เป็นสายตัวนำลุ่มิเนียม มีขนาด 3/8 นิ้ว ลักษณะเป็นสายซึ่งพาดยาวตลอดแนวที่แขวนเคเบิลสเปซเซอร์ มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ [17]

2) เคเบิลสเปซเซอร์แบ่งตามวัสดุแบบ HDPE หรือ Porcelain

3) สายเคเบิลแรงสูงซึ่งอากาศ (Spaced Aerial Cable) เป็นสายเคเบิลแรงสูงในระบบส่งจ่าย 22/33 kV เป็นสายเคเบิลชนิด SAC (Aluminum Stranded Conductor Cross-Linked Polyethylene Insulated and Sheathed Spaced Aerial Cable) ขนาด  $185 \text{ mm}^2$  [18]

4) ห่วงรัดสาย (Snap tie) ห่วงรัดสายเคเบิลอากาศที่นำมาใช้งานทำมาจาก โพลียูรีเทน (Polyurethane) [19]

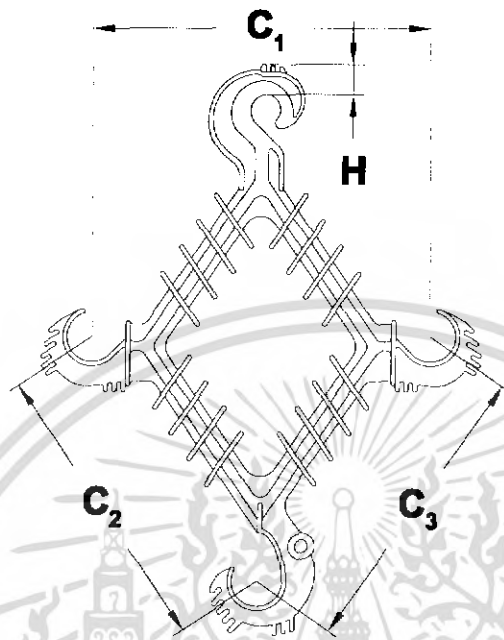


รูปที่ 4.48 องค์ประกอบต่างๆของเคเบิลสเปซเซอร์

- |       |   |  |
|-------|---|--|
| เมื่อ | 1 | คือ สายสำหรับแขวนเคเบิลสเปซเซอร์ (Messenger wire)  |
|       | 2 | คือ HDPE/Porcelain เคเบิลสเปซเซอร์                 |
|       | 3 | คือ สายเคเบิลแรงสูงซึ่งอากาศ (Spaced Aerial Cable) |
|       | 4 | คือ ห่วงรัดสาย (Snap tie)                          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ และขนาด (Dimension) ของเคเบิลสเปซเซอร์จะถูกกำหนดโดยคู่มือวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากการศึกษาข้อมูลของผู้ผลิต [20] ได้มีการทดสอบ และวัดขนาดของ HDPE เคเบิลสเปซเซอร์ดังรูปที่ 4.49 ตามมาตรฐานของ กฟภ. ดังตารางที่ 4.8



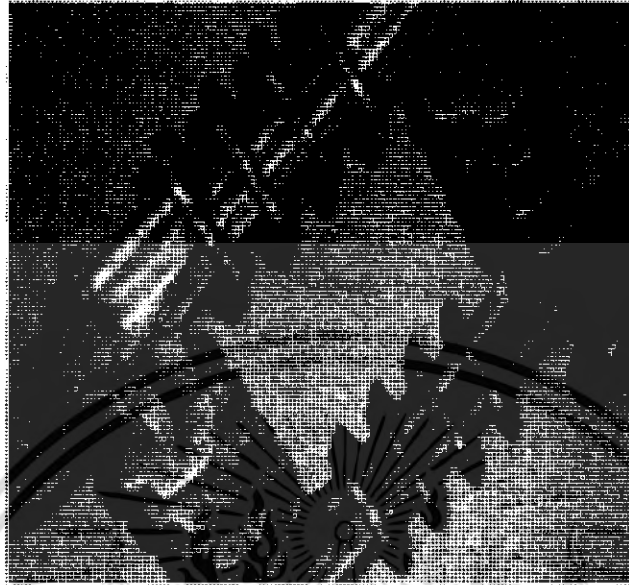
รูปที่ 4.49 การวัดขนาดของเคเบิลสเปซเซอร์

ตารางที่ 4.8 ขนาดของเคเบิลสเปซเซอร์

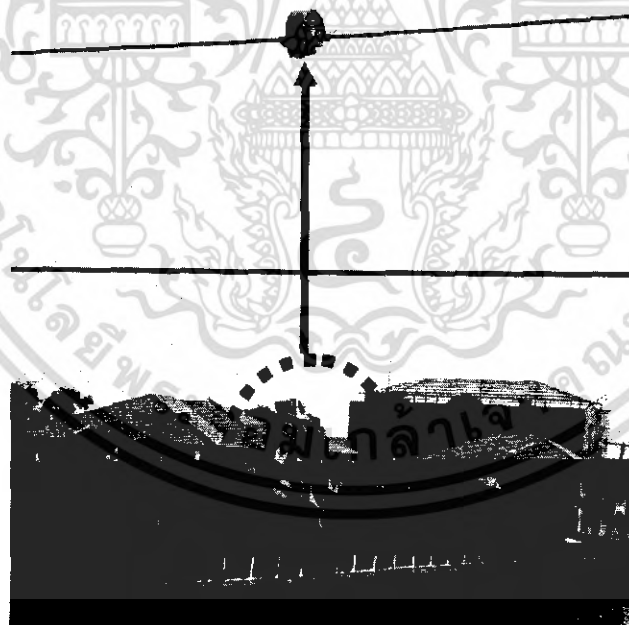
Sample No.	Dimensional (mm)			
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	H
1	310	280	280	55
2	310	280	280	55
3	310	280	280	55
Average	310	280	280	55
PEA Cable spacer Specification	≥220	≥220	≥220	≥75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น ปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันของเคเบิลสเปซเซอร์นั้นจะประกอบด้วย ปัญหาทางไฟฟ้า และปัญหาทางกลดังแสดงในรูปที่ 4.50 และ รูปที่ 4.51



รูปที่ 4.50 การเกิดวาบไฟตามผิวของเคเบิลสเปซเซอร์ (ปัญหาทางไฟฟ้า)



รูปที่ 4.51 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในการใช้งาน (ปัญหาทางกล)

จากที่เราทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้เราสามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้น และสามารถนำไปแก้ไขปัญหานั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.3 วิเคราะห์จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

1) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ( $E_b$ ) ของอากาศ ในทางปฏิบัติจะใช้  $E_b$  ของอากาศ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ = 25 kV<sub>peak</sub>/cm [1] และสามารถนำไปหาค่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ( $d$ ) เพื่อนำไปหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ได้ตามสมการ

$$E_b = 24.2 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \quad (4.5)$$

$$d = 70.56 \text{ cm}$$

2) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ของทรงกระบอกวางขนานกัน สายตัวนำในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกวางขนานกัน สามารถหาค่า  $E_{max}$  ได้จากสมการที่ (2.34) ที่  $d = 70.56 \text{ cm}$  และ  $r_0 = 1.561 \text{ cm}$  [19] จะได้ค่า  $E_{max} = 1.67 \text{ kV/cm}$

จากข้อมูลวัสดุ และอุปกรณ์การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค  $C \geq 220 \text{ mm}$  กำหนดค่า  $d$  ในการคำนวณค่าที่ต่ำที่สุด (Minimum range) คือที่  $d = 220 \text{ mm}$  จะได้ค่า  $E_{max} = 2.66 \text{ kV/cm}$

จากข้อมูลในตารางที่ 4.8 สามารถหา  $E_{max}$  ของระยะต่างๆได้ดังนี้

- ที่  $C_1 = 310 \text{ mm}$  จะได้ค่า  $E_{max} = 2.25 \text{ kV/cm}$

- ที่  $C_2 = C_3 = 280 \text{ mm}$  จะได้ค่า  $E_{max} = 2.36 \text{ kV/cm}$

จะเห็นได้ว่าค่า  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้นนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศได้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.2 อิเล็กโทรดแบบที่ 3 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

#### 4.7.4 การจำลองแบบในการวิเคราะห์

การจำลองแบบเคเบิลสเปซเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ได้ทำการจำลองแบบ เคเบิลสเปซเซอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจากของจริงที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงแบ่งตามวัสดุได้ 2 แบบ คือ 1. วัสดุที่เป็นเนื้อ HDPE มี 2 ชนิด คือแบบ reliable (S-15), แบบ hendrix (H-35D), แบบ dimonite และแบบที่ทำการจำลองขึ้นเพื่อการศึกษาในขั้นพื้นฐาน โดยใช้โปรแกรม auto cad ในการจำลองแบบตามขนาดของจริง แล้วนำแบบที่จำลองมาวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ และออกแบบ

ตามข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าทดสอบ โดยวัสดุที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีคุณสมบัติดังนี้

- Porcelain

- Relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) 5.7

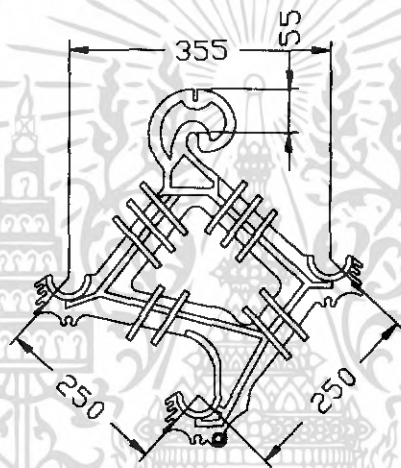
- Conductivity ( $\sigma$ )  $1 \times 10^{-14}$  siemens/meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

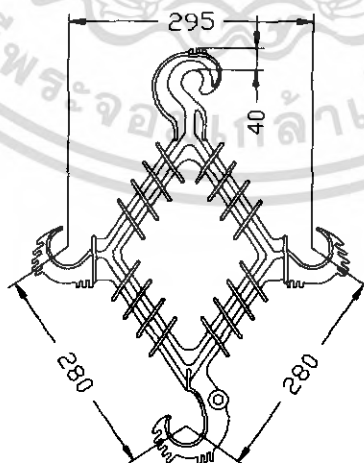
- HDPE
  - Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )      3
  - Conductivity ( $\sigma$ )                      0 siemens/meter
- Aluminum
  - Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )      1
  - Conductivity ( $\sigma$ )                       $3.774 \times 10^7$  siemens/meter
- XLPE
  - Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )      2.5
- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ              19 kV

โดยจะป้อนแรงดันทดสอบที่ละเฟส ส่วนเฟสที่เหลือป้อนแรงดันที่ 0 V รวมทั้ง

Messenger wire ด้วย

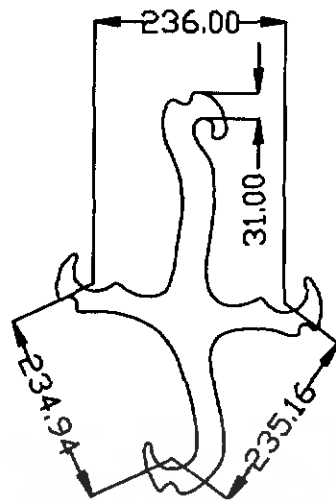


รูปที่ 4.52 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์แบบ reliable (S-15)

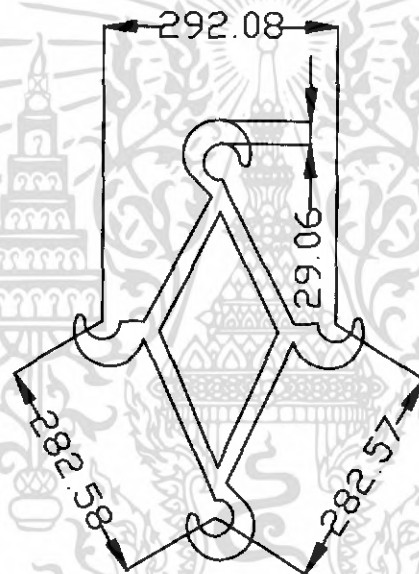


รูปที่ 4.53 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์แบบ hendrix (H - 35D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite

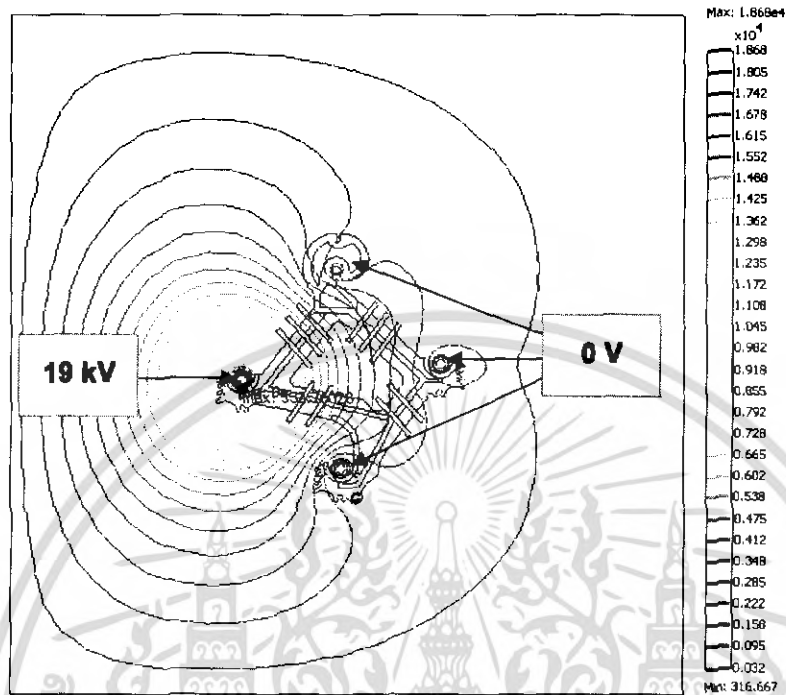


รูปที่ 4.55 แบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์ที่ได้ทำการออกแบบพื้นฐาน

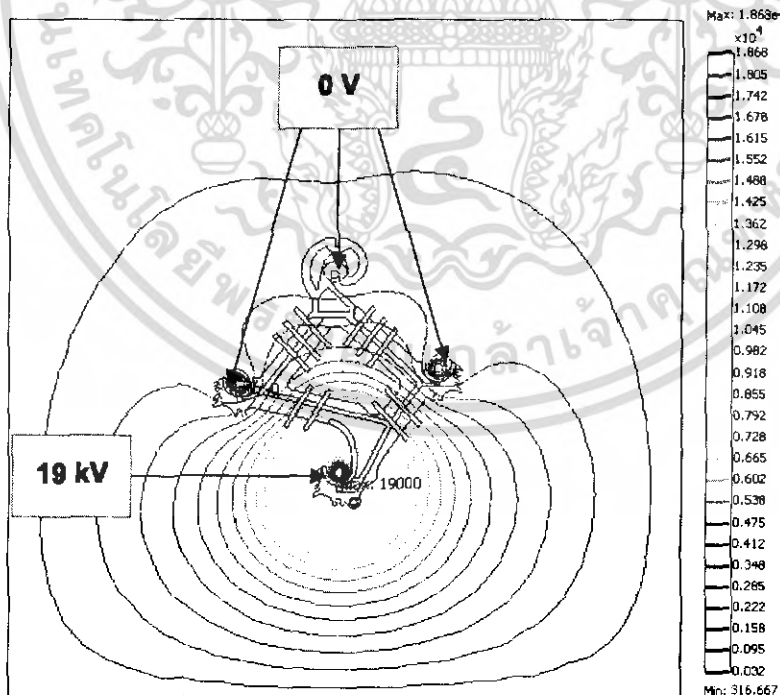
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.5 ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของแบบจำลองเคเบิลสเปซเซอร์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมในการวิเคราะห์

##### 1) แบบ reliable (S-15)

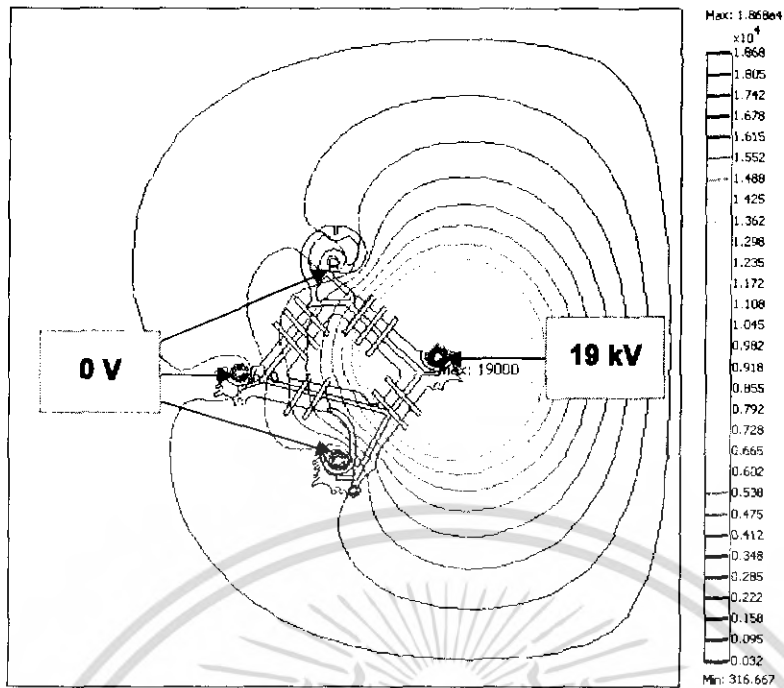


(ก) เฟส A



(ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



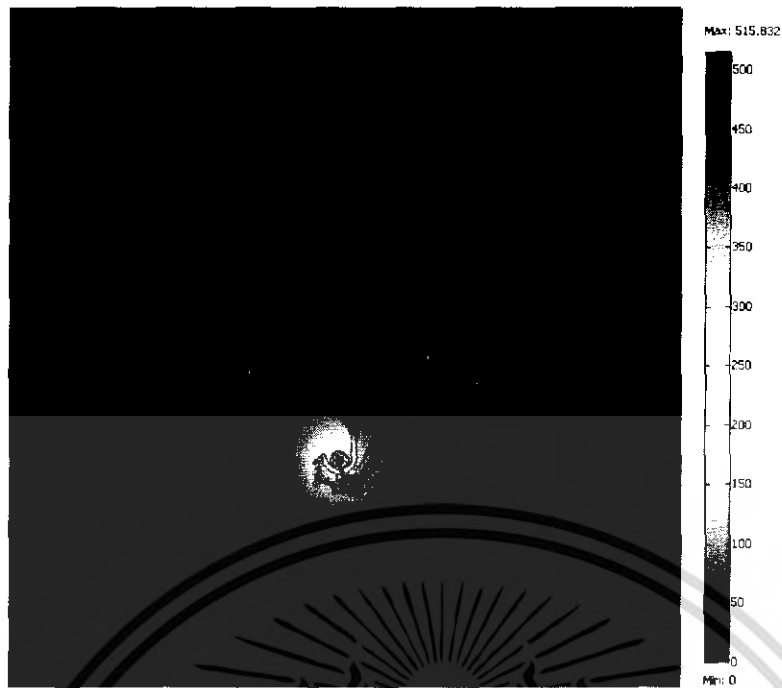
(ค) เฟส C

รูปที่ 4.56 เส้นสมศักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ reliable (S-15) โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส

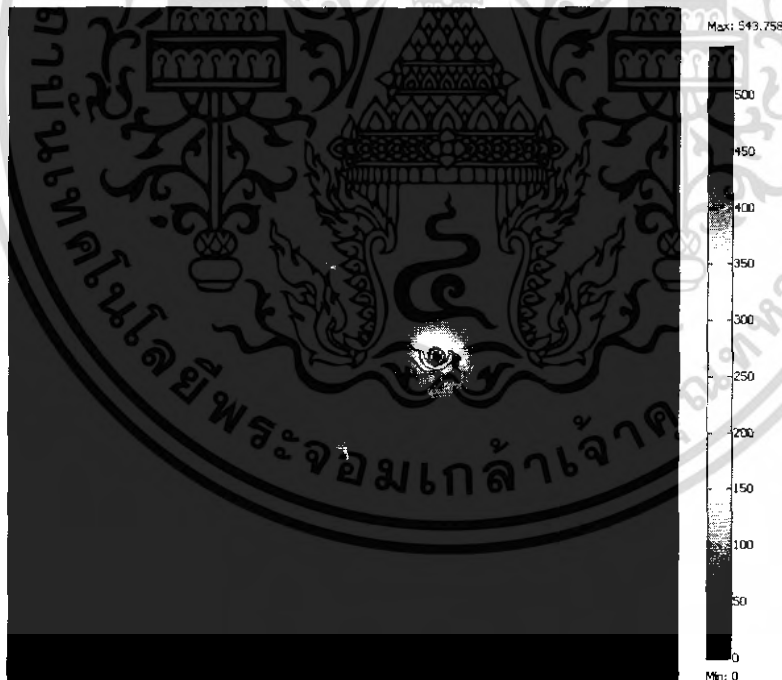


(ก) เฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เฟส B

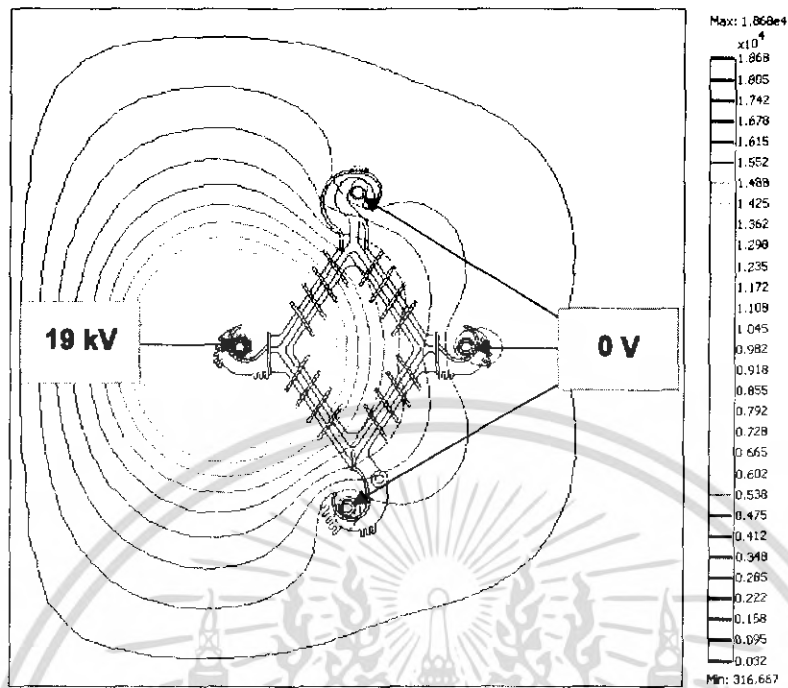


(ค) เฟส C

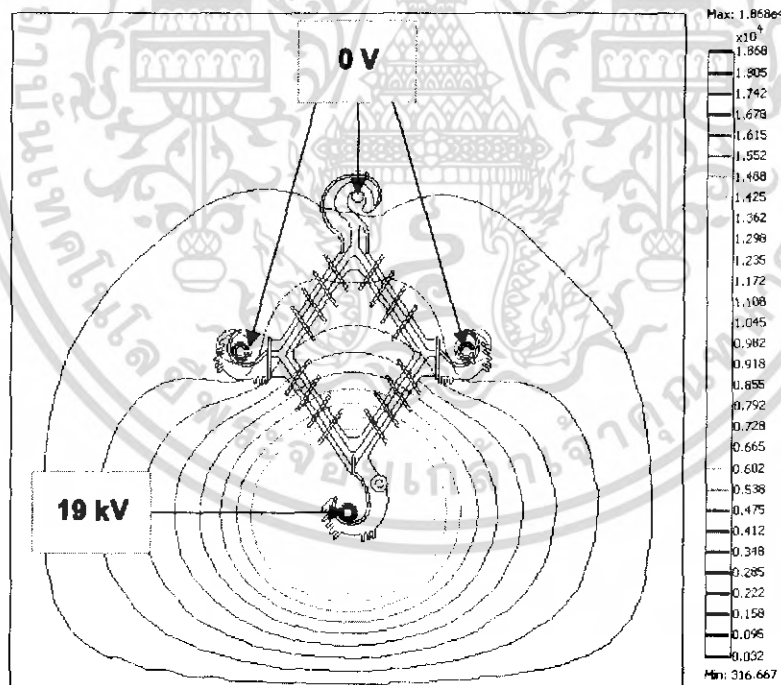
**รูปที่ 4.57** ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Reliable (S-15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) แบบ Hendrix (H - 35D)

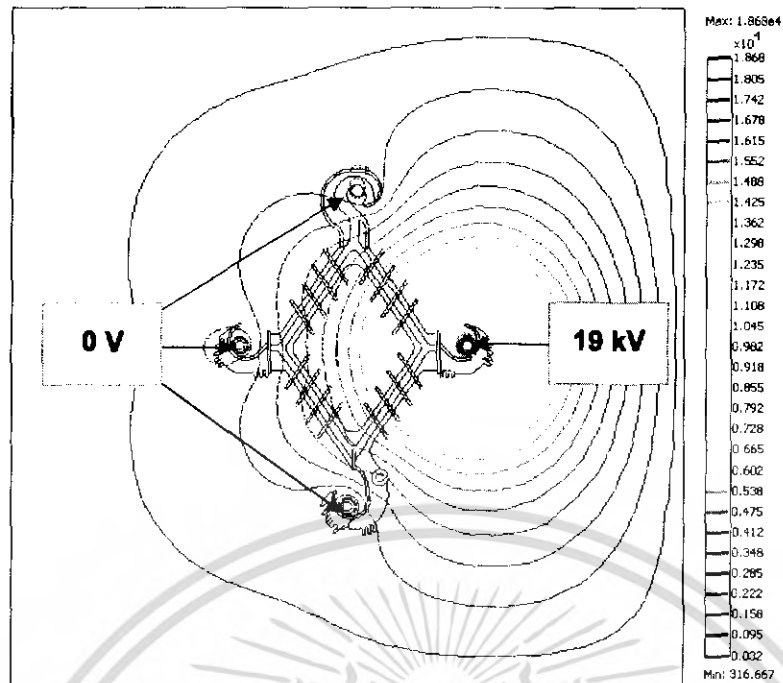


(ก) เฟส A



(ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



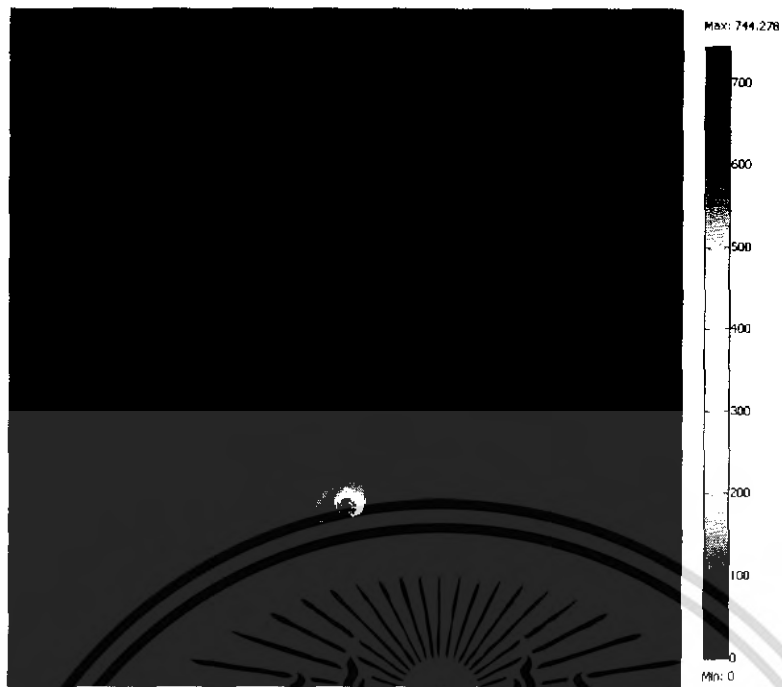
(ค) เฟส C

รูปที่ 4.58 เส้นสมตักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส



(ก) เฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เฟส B

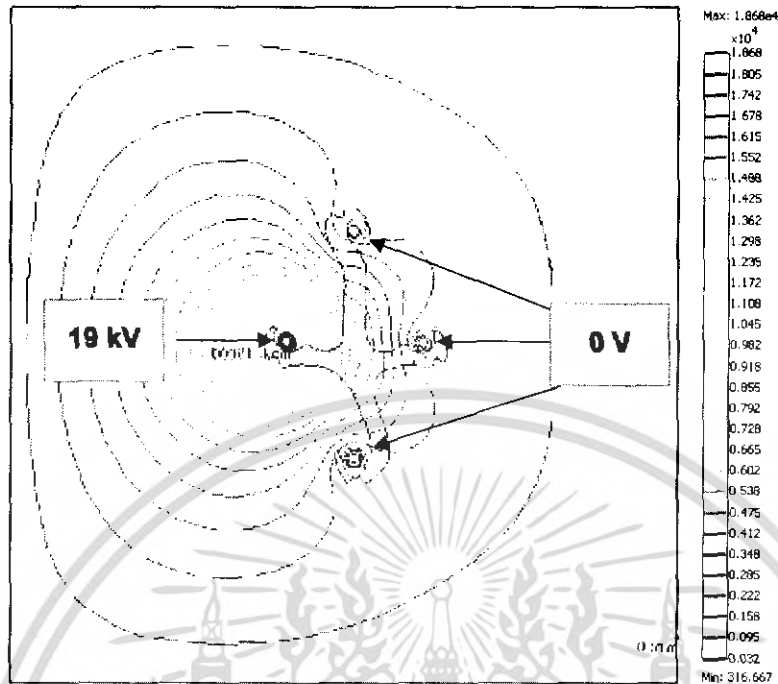


(ค) เฟส C

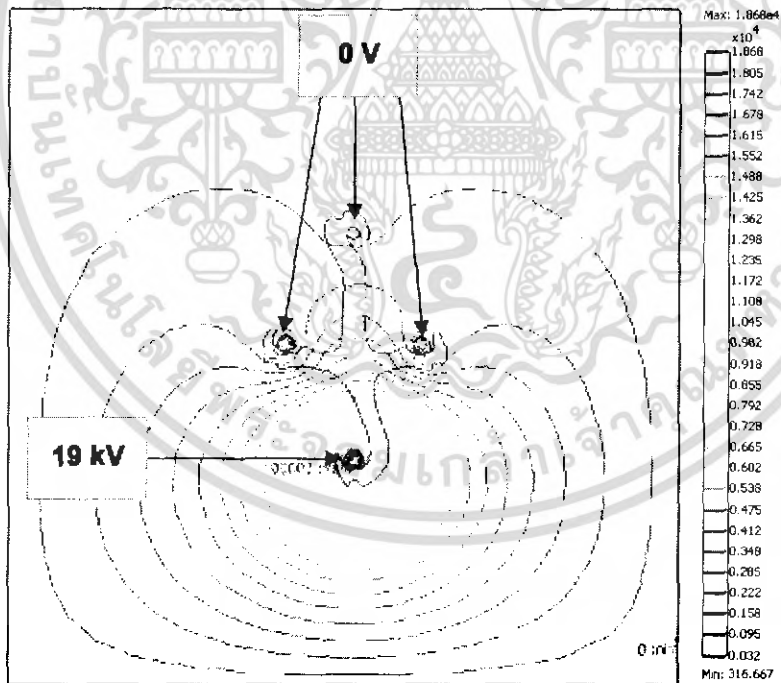
**รูปที่ 4.59** ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ Hendrix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3) แบบ dimonite

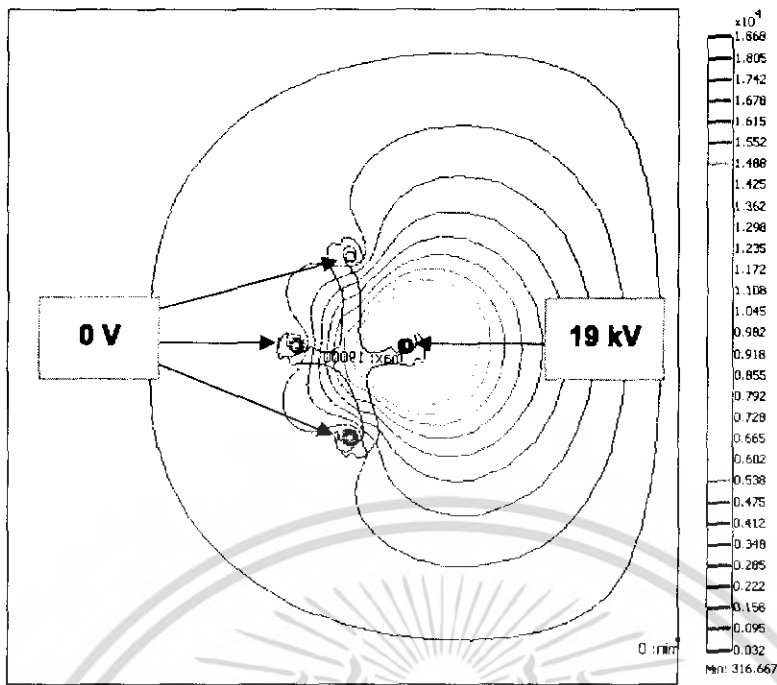


(ก) เฟส A



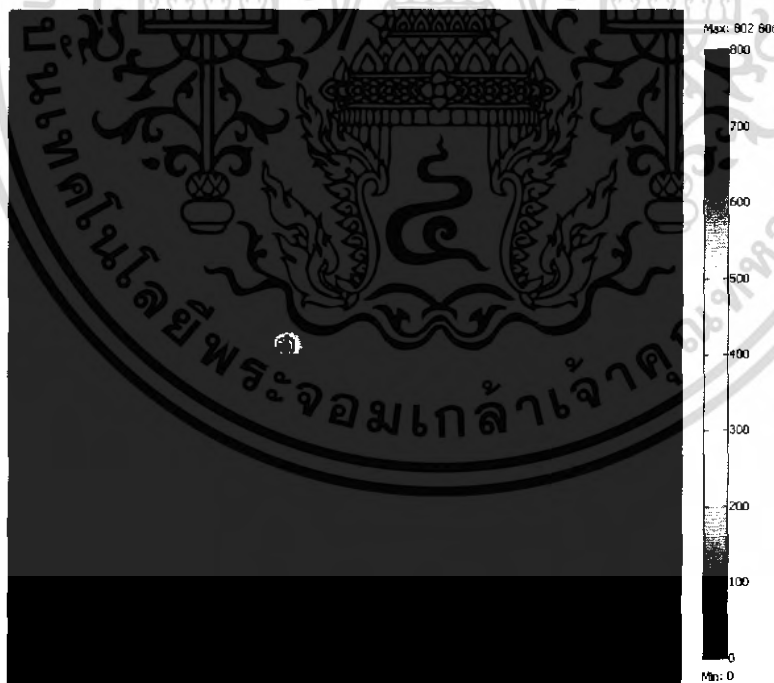
(ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



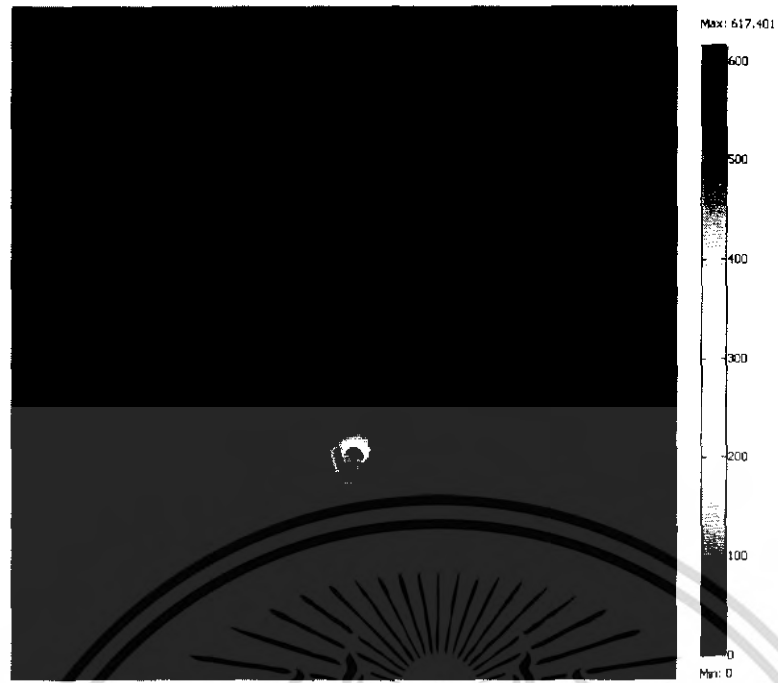
(ค) เฟส C

รูปที่ 4.60 เส้นสมตักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite โดยการป้อนแรงดันที่ละเฟส

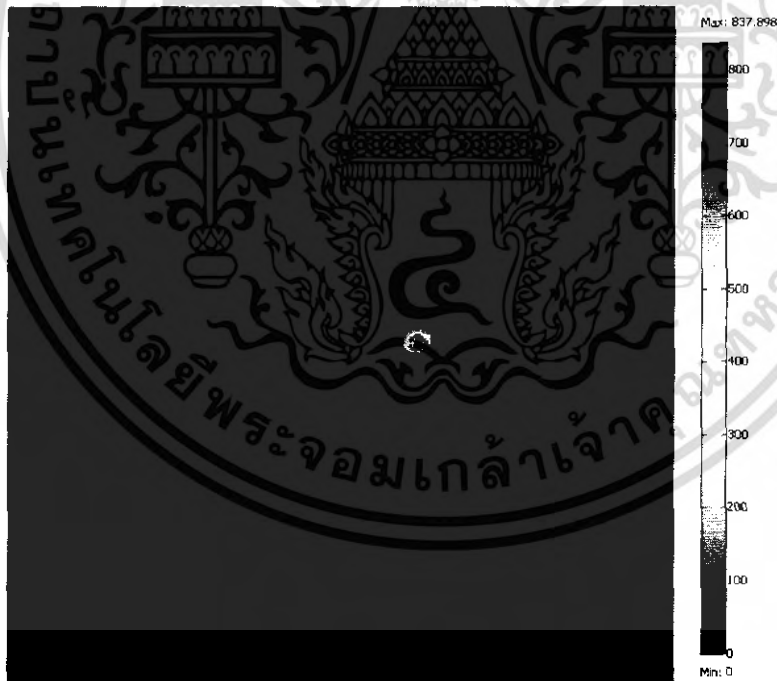


(ก) เฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



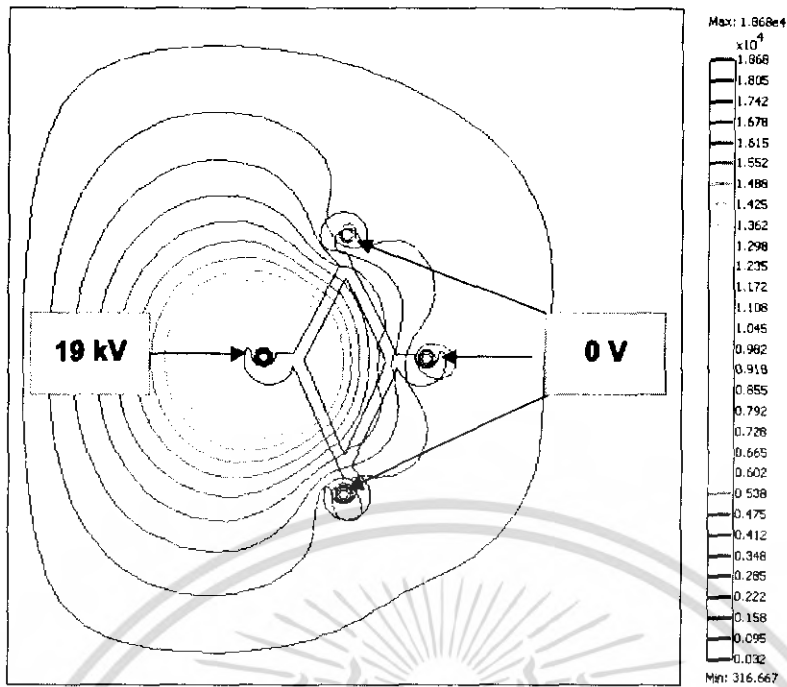
(ข) เฟส B



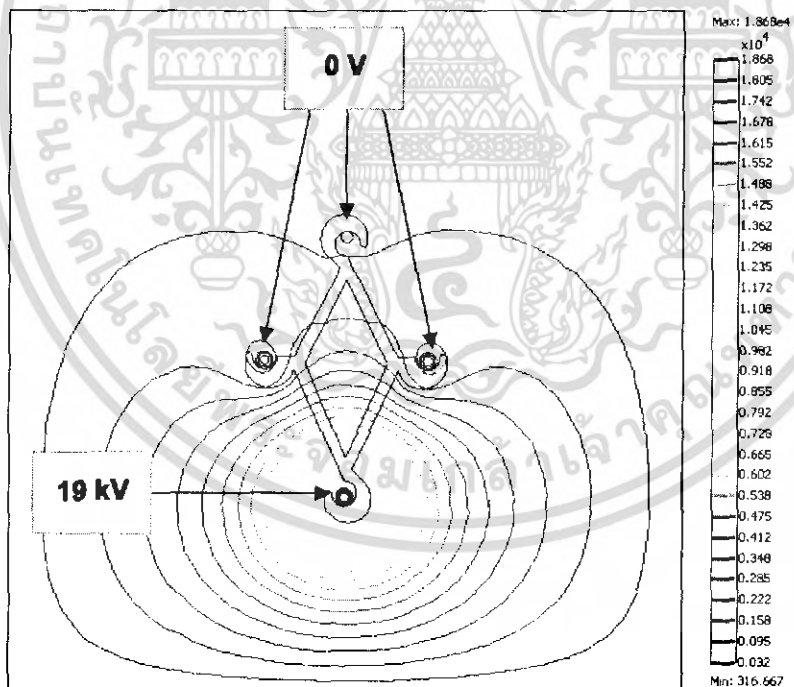
(ค) เฟส C

**รูปที่ 4.61** ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบ dimonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

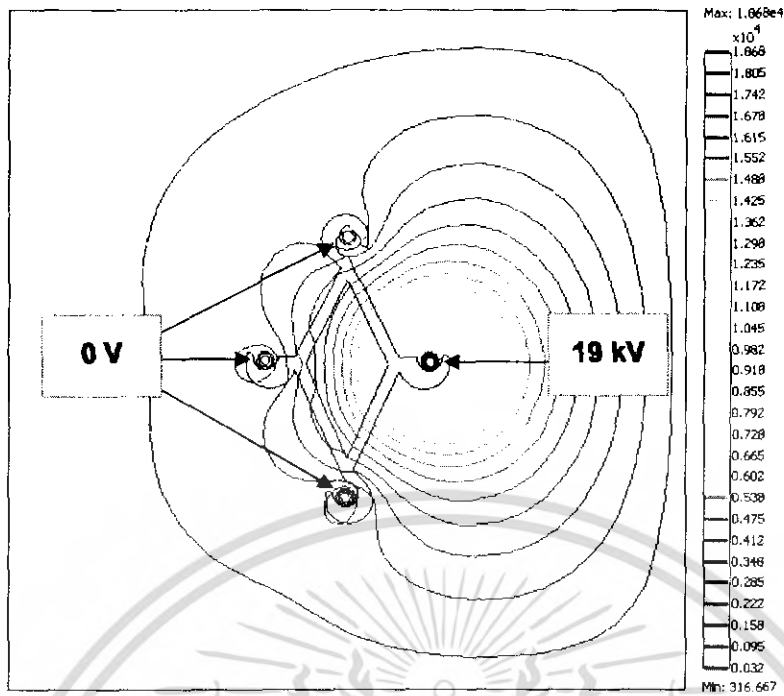


(ก) เฟส A



(ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



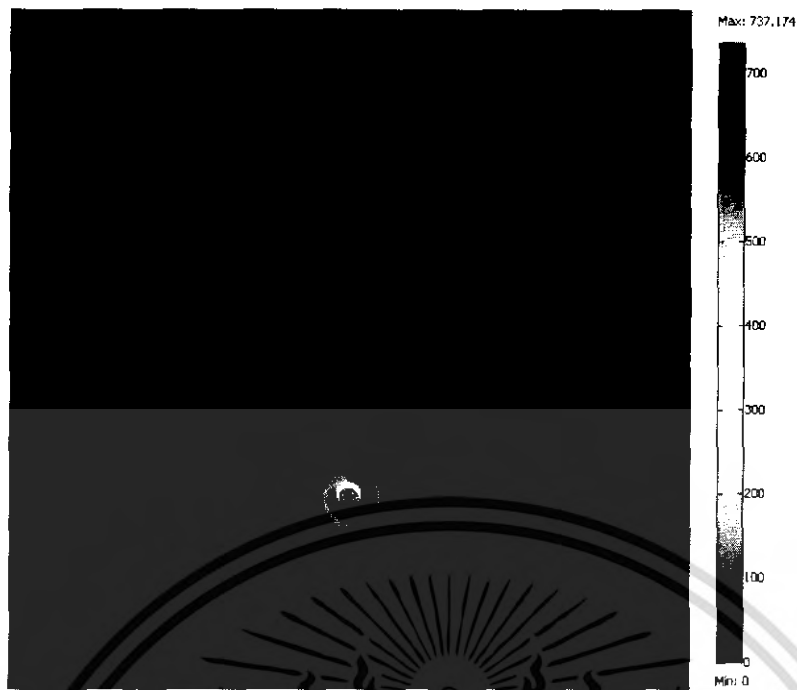
(ค) เฟส C

รูปที่ 4.62 เส้นสมศักย์ของเคเบิลสเปซเซอร์ที่ออกแบบในชั้นพื้นฐาน โดยการป้อนที่ละเฟส

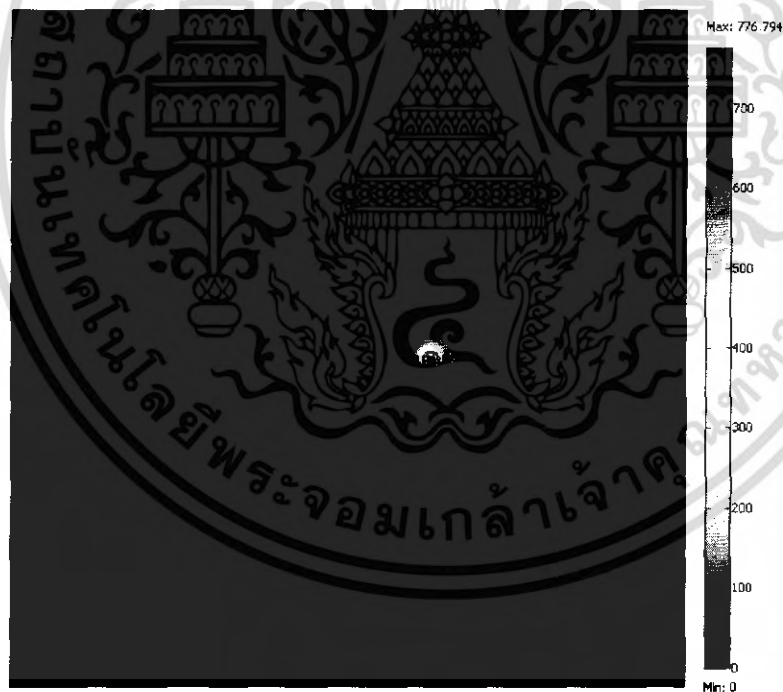


(ก) เฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เฟส B



(ค) เฟส C

**รูปที่ 4.63** ความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์ที่ออกแบบในชั้นพื้นฐาน

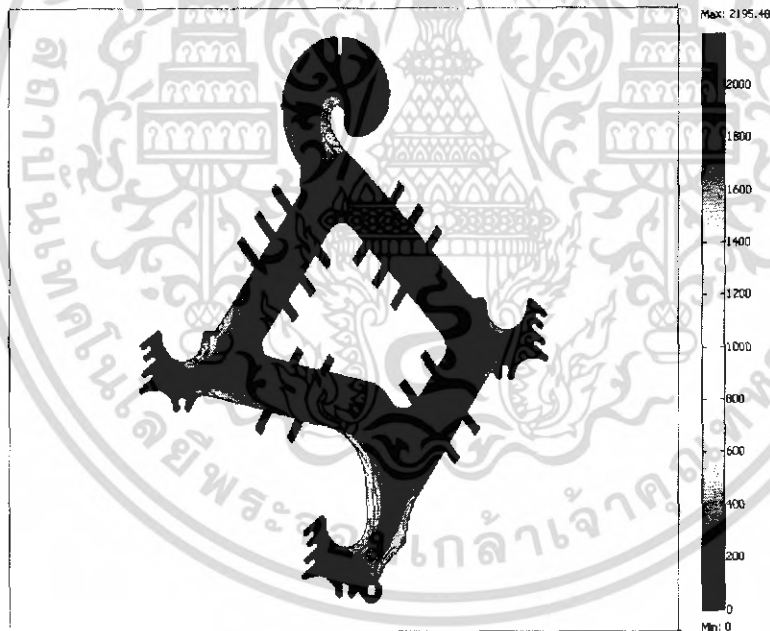
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังในตารางที่ 4.9

**ตารางที่ 4.9** ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของเคเบิลสเปซเซอร์แบบต่างๆ

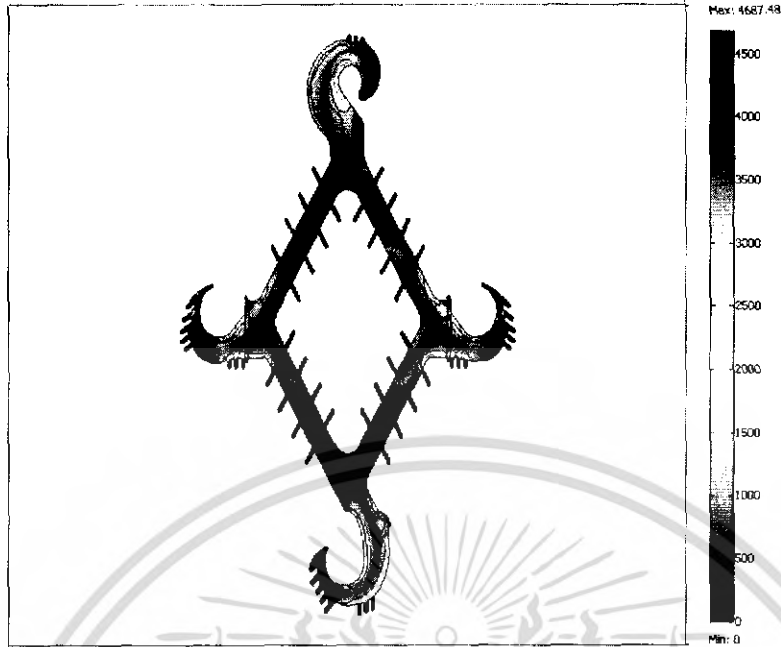
ชนิดของเคเบิลสเปซเซอร์	E <sub>max</sub> (V/mm)	จุดที่เกิด E <sub>max</sub>
reliable	543	บริเวณสายตัวนำที่ป้อนแรงดันกับตัวสเปซเซอร์
Hendrix	587	บริเวณสายตัวนำที่ป้อนแรงดันกับตัวสเปซเซอร์
dimonite	802	บริเวณสายตัวนำที่ป้อนแรงดันกับตัวสเปซเซอร์
ออกแบบ	776	บริเวณสายตัวนำที่ป้อนแรงดันกับตัวสเปซเซอร์

4.7.6 การจำลองเปรียบเทียบคุณลักษณะทางกล โดยการนำเคเบิลสเปซเซอร์ที่ได้ทำการจำลอง และออกแบบ มาทำการจำลองโดยป้อนแรงดึงที่หัวของเคเบิลสเปซเซอร์ บริเวณ Messenger wire 300 นิวตัน และตรงส่วนที่รองรับสายเคเบิลข้างละ 100 นิวตัน เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นฟอนมิสระหว่างเคเบิลสเปซเซอร์แบบต่างๆ



**รูปที่ 4.64** ความเค้นฟอนมิสของแบบ reliable (S-15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

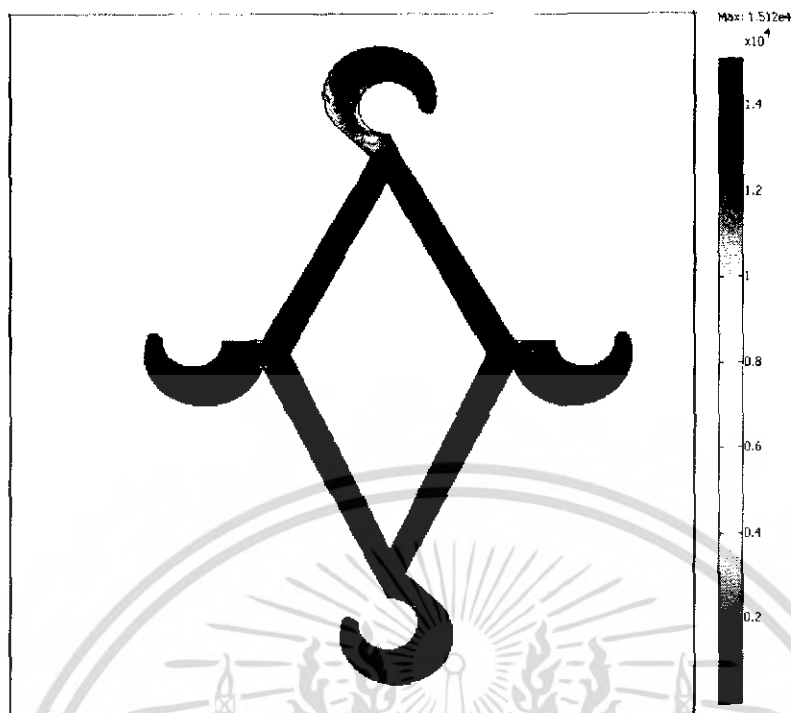


รูปที่ 4.65 ความเค้นฟอนมิสเซสของแบบ hendrix



รูปที่ 4.66 ความเค้นฟอนมิสเซสของแบบ dimonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.67** ความเค้นฟอนมิสเสสของแบบพื้นฐาน

โดยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ที่ตั้งในตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ผลการวิเคราะห์ทางกลของเคเบิลสเปซเซอร์แบบต่างๆ

ชนิดของเคเบิลสเปซเซอร์	Vonmises Stress (N/mm <sup>2</sup> )	จุดที่เกิด Vonmises Stress สูงสุด
reliable	2195	บริเวณคอที่แขวน Messenger wire
Hendrix	4687	บริเวณคอที่แขวน Messenger wire
dimonite	4667	บริเวณคอที่แขวน Messenger wire
ออกแบบ	15210	บริเวณคอที่แขวน Messenger wire

### สรุปผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการจำลอง และวิเคราะห์โดยโปรแกรมทำให้เราสามารถเปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และค่าความเค้นฟอนมิสเสสของสเปซเซอร์แต่ละแบบได้ โดยจะพบว่าการที่เคเบิลสเปซเซอร์มีครีปเพิ่มเข้ามาจะช่วยให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า (แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด) ดีขึ้น และคุณสมบัติทางกลจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและมิติของเคเบิลสเปซเซอร์เป็นหลัก ผลวิเคราะห์สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบในต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากระแสตรงและเคเบิลสเปชเซอร์ที่ได้ทำการออกแบบและทำการทดสอบหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในสภาวะแห้งสะอาด และผิวเปียกสะอาด พบว่า

1. จากการศึกษาพฤติกรรมของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง การนำลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีการใช้งานจริงในประเทศไทย รวมไปถึงผลการจำลองการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าต่าง ๆ เพื่อให้ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ออกแบบโดยอาศัยมาตรฐาน [15, 16, 17] เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถที่จะนำไปใช้งานจริงได้ จึงจะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ตามที่ได้ทำการศึกษามา เช่น ปีก และครีบบนของฉนวนจะต้องอยู่ในแนวเดียวกับเส้นสมตักย์ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดความยาวปีกของฉนวนจะต้องยาวพอที่จะป้องกันการพัฒนาของสิ่งเปราะเปื้อนที่จะไปจับเกาะที่อิลเลคโตรดหรือก้านหมุดโลหะที่จะนำไปสู่การเกิดการวาบไฟตามผิวได้ง่าย

โดยจะเห็นว่าลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ทำการออกแบบจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดน้อยกว่า ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงต้นแบบ 21.78 เปอร์เซ็นต์

ลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ได้ทำการออกแบบนั้นเมื่อนำมาต่อพ่วงเป็นพวงลูกถ้วยฉนวนกระแสตรง จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนกระแสตรงที่ได้ทำการออกแบบนั้น มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 0.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะทำการนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิวยากขึ้น

2. จากการศึกษาระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเหนือหัวในระบบ 22/33 kV ทำให้ทราบถึงการใช้งาน และหน้าที่ของเคเบิลสเปชเซอร์

ในส่วนของการออกแบบจะเป็นการศึกษาพร้อมกับแนะนำแนวทางในการออกแบบโดยวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า และแรงทางกล และนำตัวอย่างของเคเบิลสเปชเซอร์ที่มีนั้นมาทำการจำลอง และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม พร้อมกับวิเคราะห์ผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการปรับปรุงและออกแบบให้ดีขึ้น

จากการทดสอบพบว่าปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนากับครีบบนของเคเบิลสเปชเซอร์นั้นมีความสัมพันธ์กันที่ระยะครีบบนมากที่สุดคือ ระยะทางตามผิวของฉนวนนั้นมีมาก ส่งผลทำให้การเกิดโคโรนาเกิดขึ้นได้ยากก็คือ มีระดับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่สูง แต่เมื่อระยะครีบลดลงการเกิดปรากฏโคโรนาก็จะสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น

## 5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

1. เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนที่นำมาใช้ในการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนกระแสดตรงซึ่งมีการใช้งานเพียงที่เดียวในประเทศไทย อีกทั้งราคายังสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนปกติที่ใช้งานในระบบกระแสดลับ ซึ่งค่อนข้างเกิดความยุ่งยากในการขอความอนุเคราะห์ และจัดส่งลูกถ้วยฉนวนกระแสดตรงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทางเขตภาคใต้ได้

2. เนื่องจากอุปกรณ์ที่เข้าร่วมในการทดสอบ คือ กล้องโคโรนามีราคาค่อนข้างสูงมาก และมีแผนการใช้งานเพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงระบบการส่งจ่ายของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และการไฟฟ้าภูมิภาคที่มีการใช้งานบ่อยครั้ง ทำให้ไม่สามารถที่จะขอความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือได้บ่อย

3. เนื่องจากความไม่พร้อมของห้องปฏิบัติการ ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบอุปกรณ์ฉนวนที่ต้องการได้ เช่น แรงดันวาทไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำของเคเบิลสเปซเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



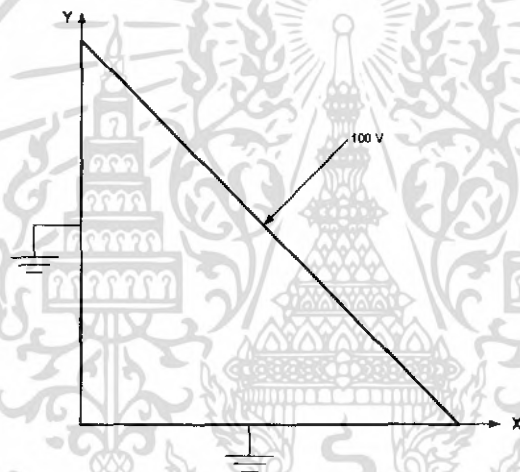
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

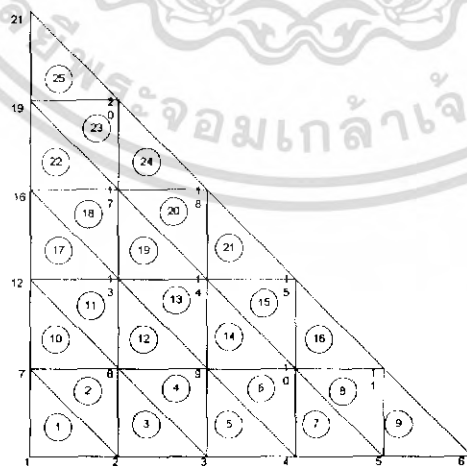
### การจำลองวิเคราะห์ค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า

การเปรียบเทียบผลการคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้าระหว่างการคำนวณด้วยมือ กับโปรแกรม FEMLAB

เพื่อเป็นการตรวจสอบ และยืนยันว่าโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือ ก่อนที่จะนำไปจำลองเพื่อวิเคราะห์ออกแบบ ลุกถ้วยฉนวนกระแสดลัสมแบบแขนเพื่อที่จะนำมาใช้งานในระบบกระแสตรงนั้น จึงได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ กับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมว่ามีค่าตรงกัน หรือต่างกันอย่างไร ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งรูปที่ 1 จะเป็นผลที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ ส่วนรูปที่ 2 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม (FEMLAB Version 3.2)



เงื่อนไขของปัญหา

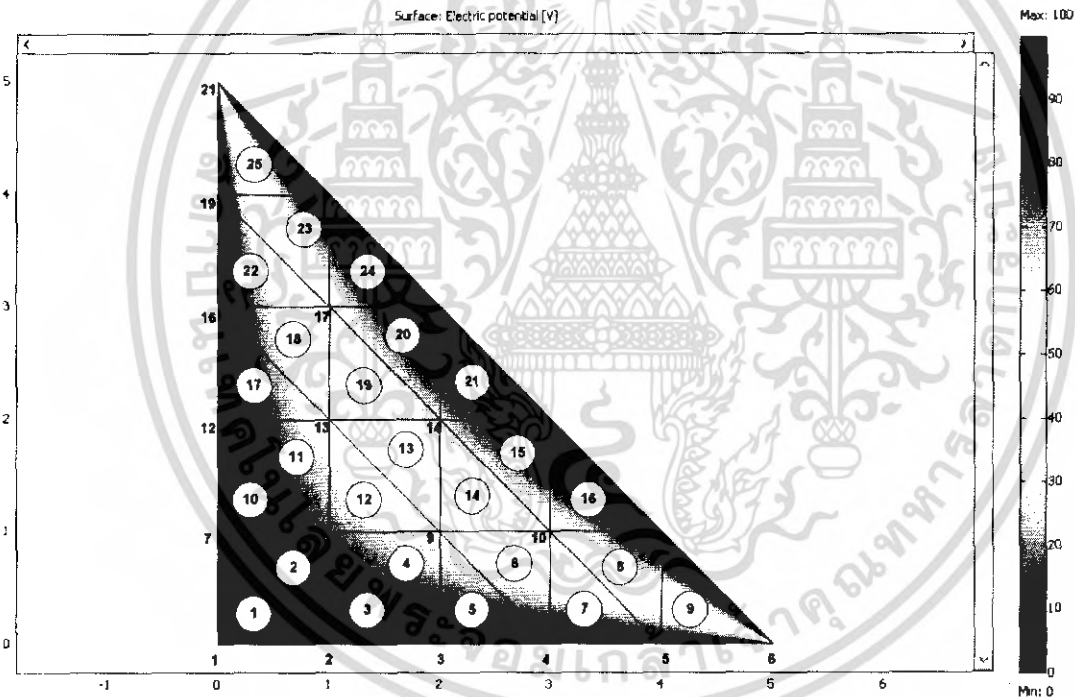


การแบ่งเมชและโนดของปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ [21]



รูปผลของการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEMLAB

วิเคราะห์ผลการจำลอง จากการจำลองเพื่อพิสูจน์ว่าโปรแกรม FEMLAB มีความสามารถที่จะคำนวณผลได้ถูกต้องเมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยมือ พบว่าระดับแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละโหนดจะมีค่าเท่ากันซึ่งผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม สามารถดูระดับแรงดันที่เกิดขึ้นที่แต่ละโหนดได้โดยแถบสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

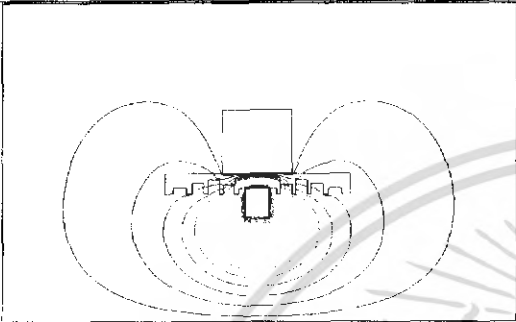
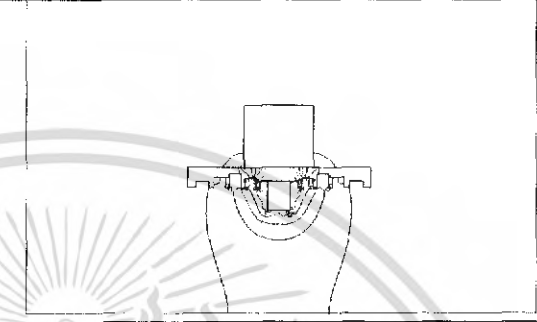


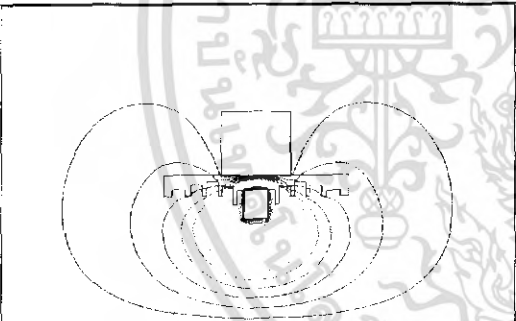
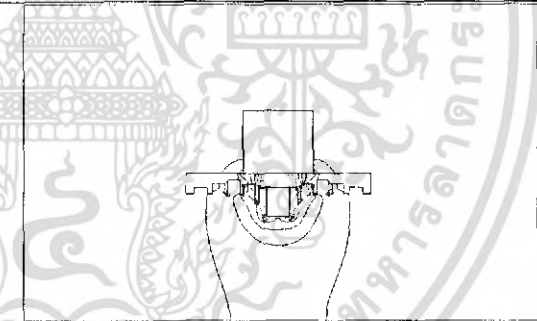
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

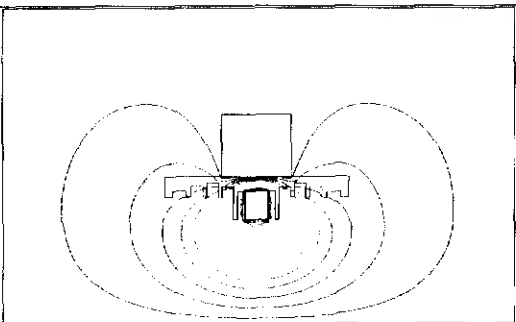
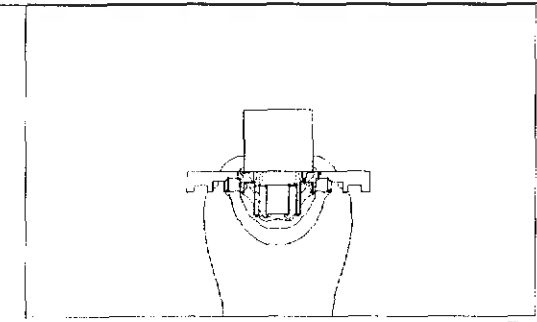
ภาคผนวก ข

ลักษณะของเส้นสมศักย์และความเครียดสนามไฟฟ้า

ตัวอย่างการออกแบบ 100 รูปแบบ จากจำนวนทั้งหมด 1024 รูปแบบ

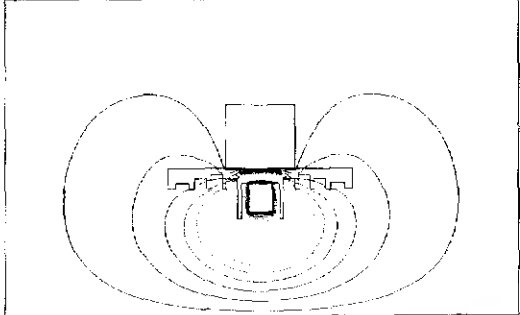
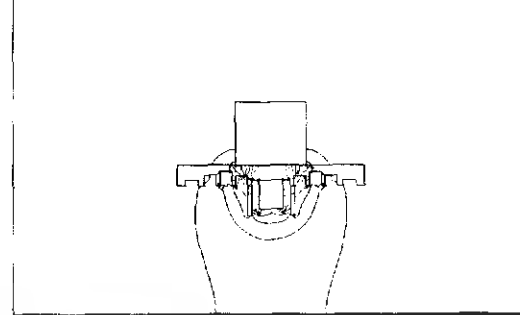
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.334 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เส้น เส้น mm.	เส้น เส้น เส้น เส้น เส้น mm.

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 126.3270 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เส้น ค้าง mm.	เส้น เส้น เส้น เส้น ค้าง mm.

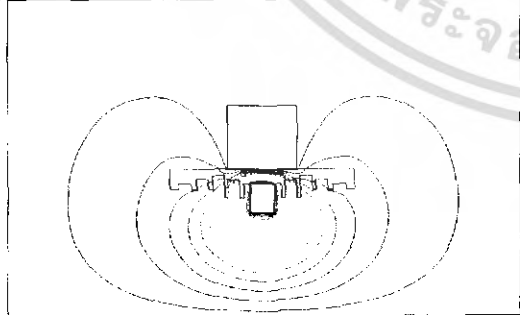
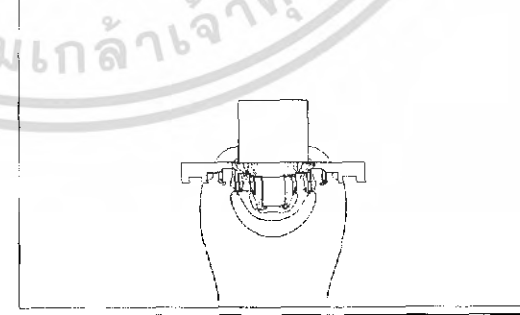
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.959 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เส้น เท่า mm.	เส้น เส้น เส้น เส้น เท่า mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

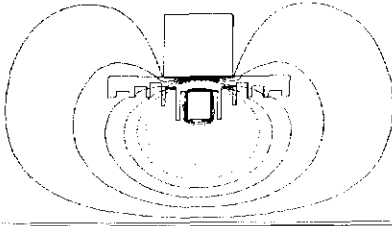
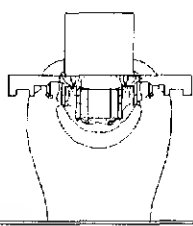
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

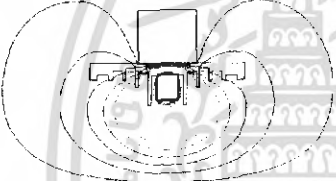
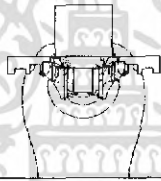
เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.178 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เส้น ยาว mm.	เส้น เส้น เส้น เส้น ยาว mm.

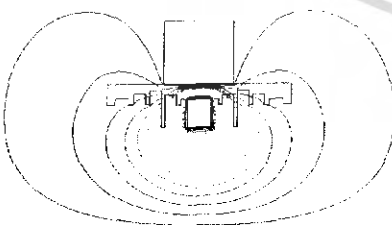
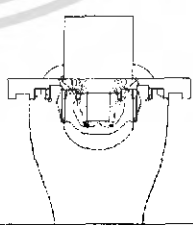
เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.436 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ครึ่ง เส้น mm.	เส้น เส้น เส้น ครึ่ง เส้น mm.

เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.075 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง mm.

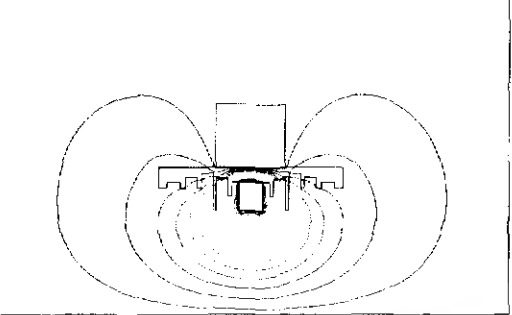
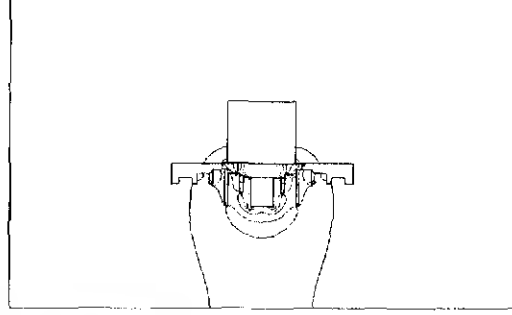
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

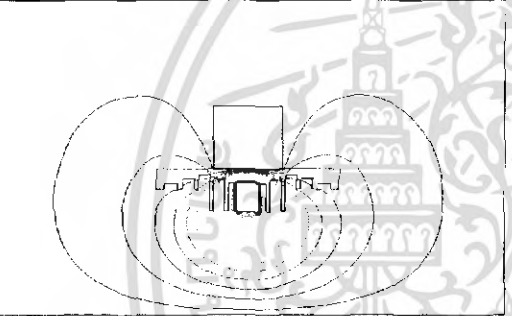
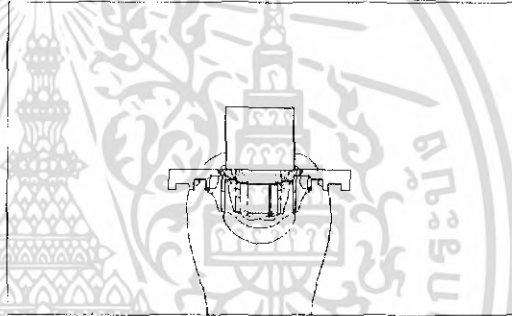
เส้นสมคักยั	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.784 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ครึ่ง เท่า mm.	เส้น เส้น เส้น ครึ่ง เท่า mm.

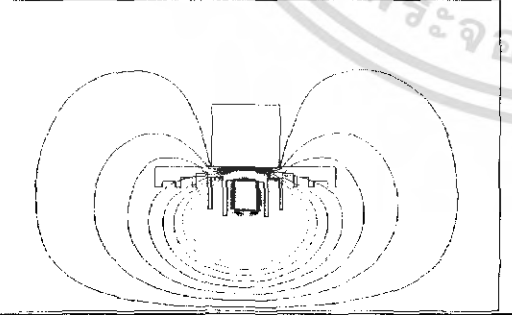
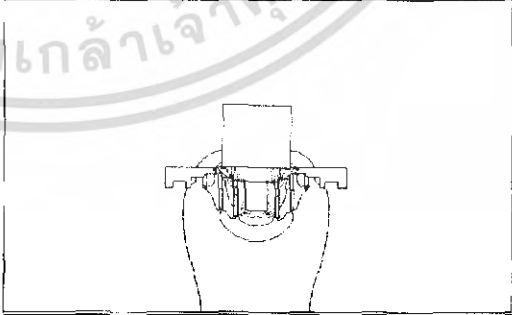
เส้นสมคักยั	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 197.899 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ครึ่ง ยาว mm.	เส้น เส้น เส้น ครึ่ง ยาว mm.

เส้นสมคักยั	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.643 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เท่า เส้น mm.	เส้น เส้น เส้น เท่า เส้น mm.

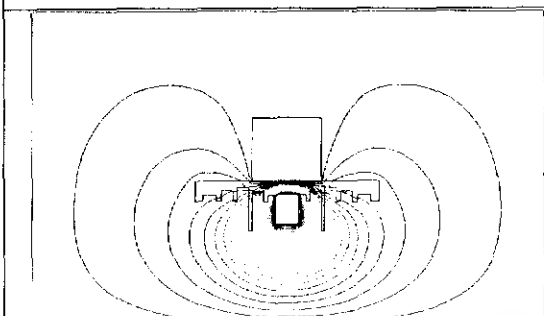
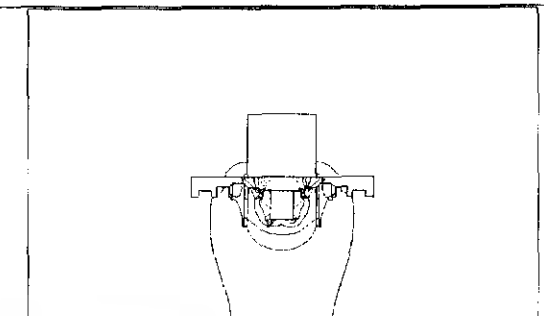
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

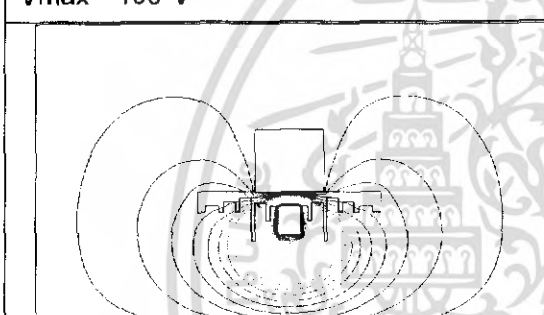
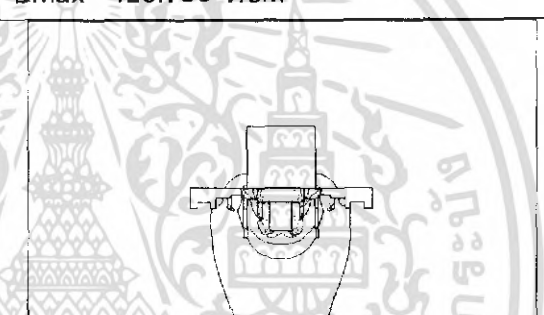
เส้นสมตักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.031 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เท่า ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เส้น เท่า ครึ่ง mm.

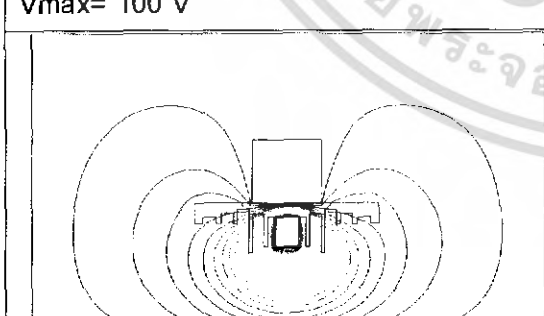
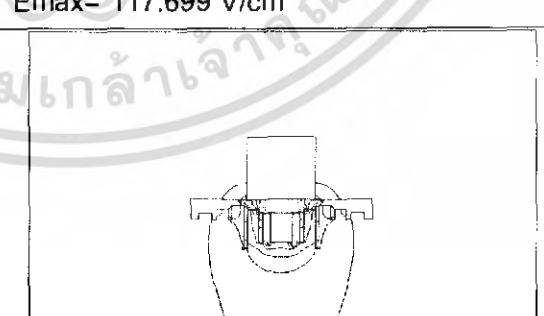
เส้นสมตักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = \text{V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เท่า เท่า mm.	เส้น เส้น เส้น เท่า เท่า mm.

เส้นสมตักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.850 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เท่า ยาว mm.	เส้น เส้น เส้น เท่า ยาว mm.

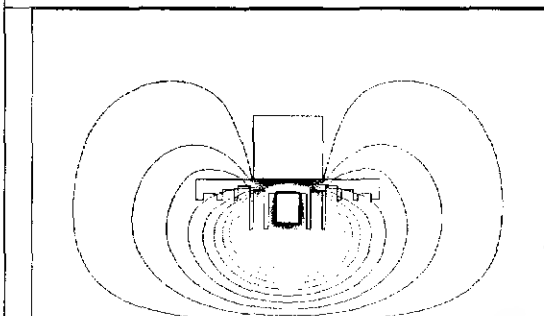
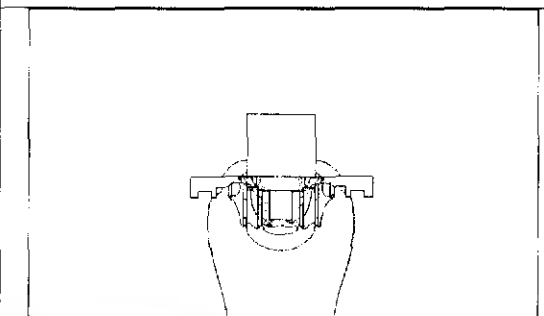
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.486 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ยาว เส้น mm.	เส้น เส้น เส้น ยาว เส้น mm.

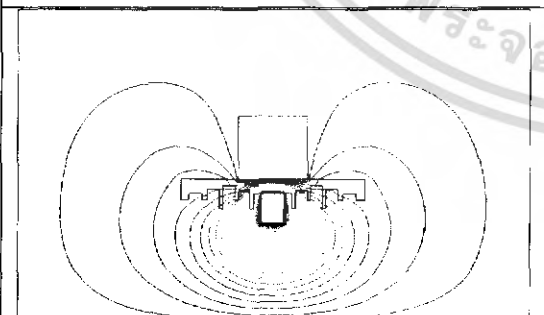
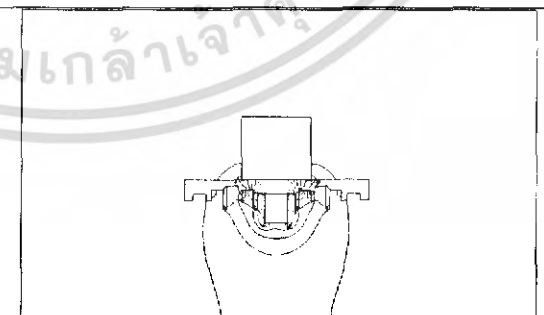
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 125.796 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ยาว ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เส้น ยาว ครึ่ง mm.

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.699 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ยาว เท่า mm.	เส้น เส้น เส้น ยาว เท่า mm.

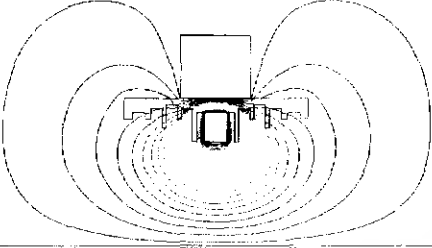
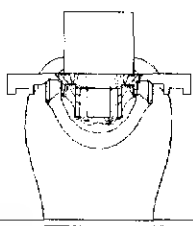
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

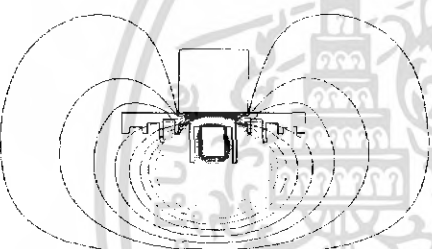
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.700 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น ยาว ยาว mm.	เส้น เส้น เส้น ยาว ยาว mm.

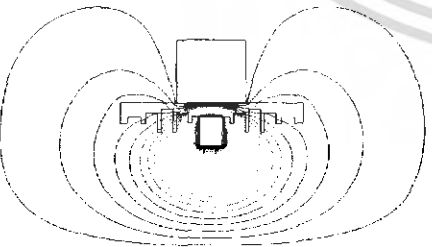
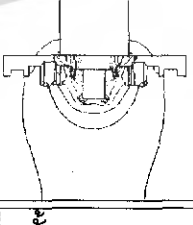
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.642 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เส้น เส้น mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เส้น เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.024 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง mm.

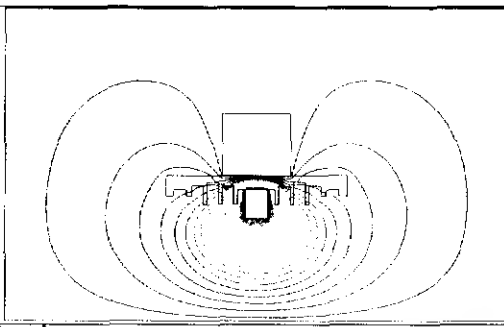
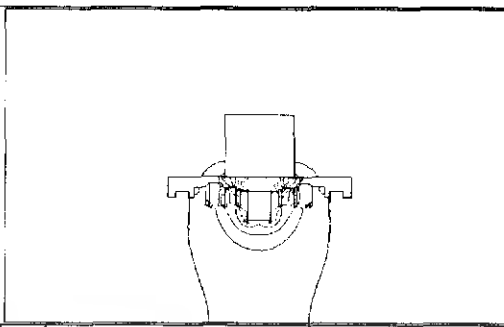
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

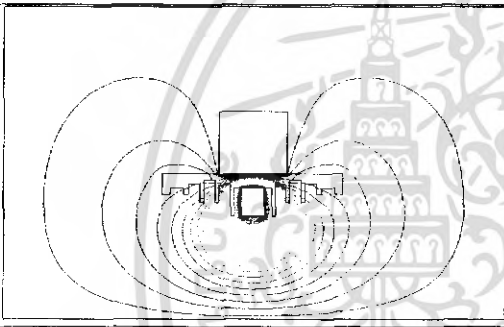
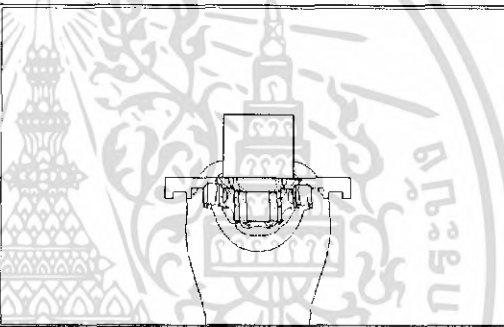
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.688 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เส้น เท่า mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เส้น เท่า mm.

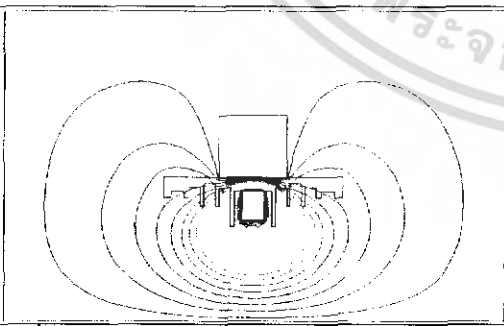
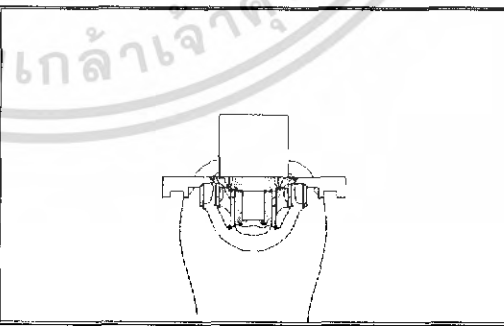
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.650 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เส้น ยาว mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เส้น ยาว mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.667 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง เส้น mm.	เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง เส้น mm.

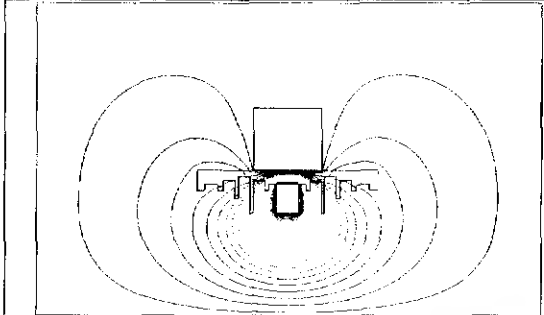
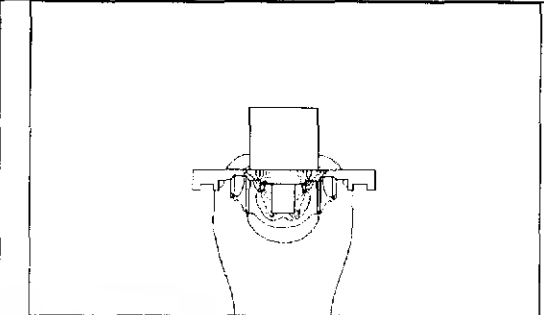
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.109 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง ครึ่ง mm.	เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง ครึ่ง mm.

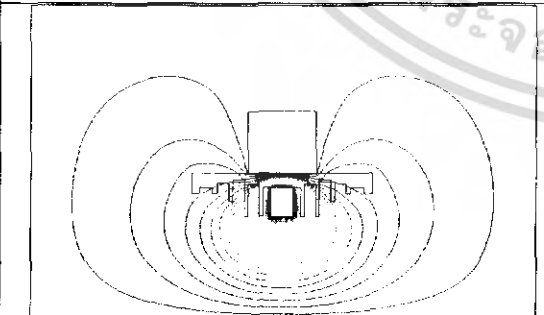
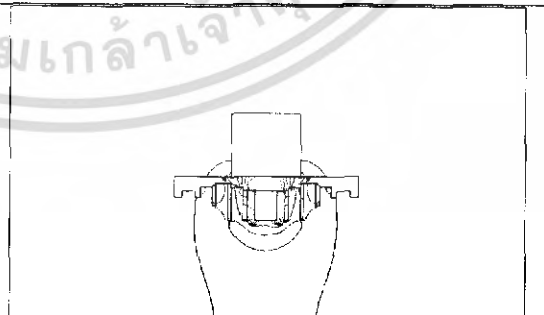
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.793 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า mm.	เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.679 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว mm.	เส้น เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว mm.

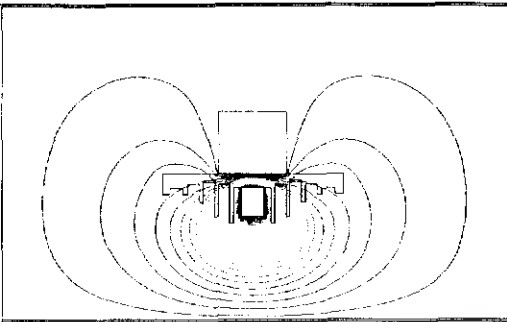
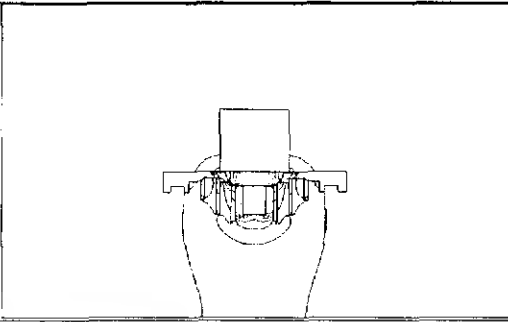
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

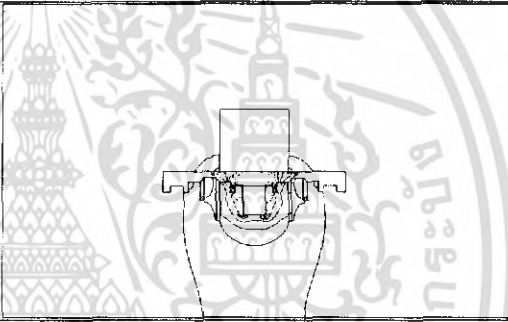
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.849 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เท่า เส้น mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เท่า เส้น mm.

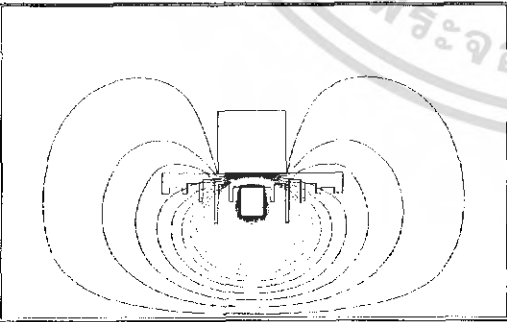
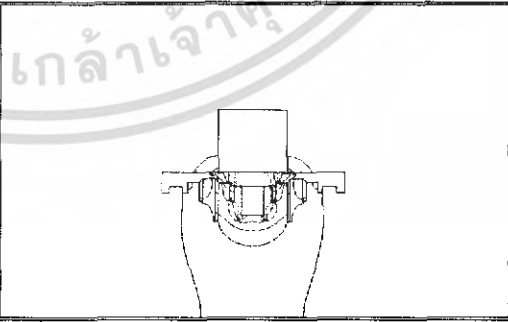
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.599 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เท่า ครึ่ง mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เท่า ครึ่ง mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.286 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เท่า เท่า mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เท่า เท่า mm.

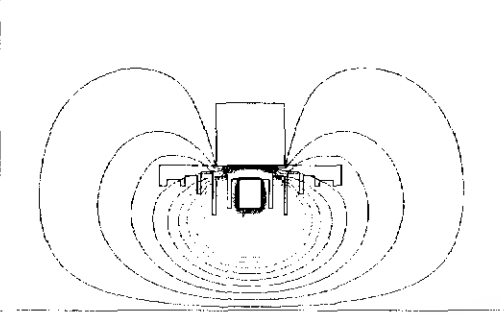
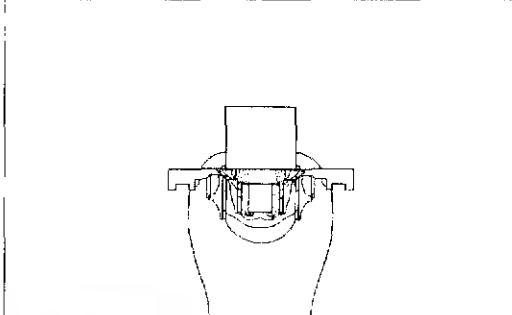
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

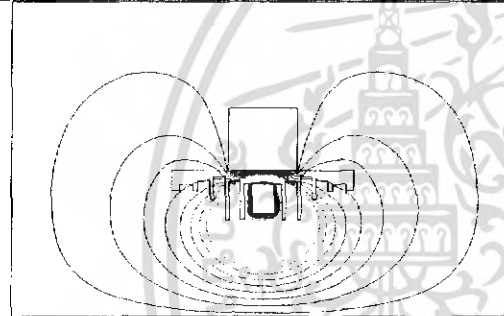
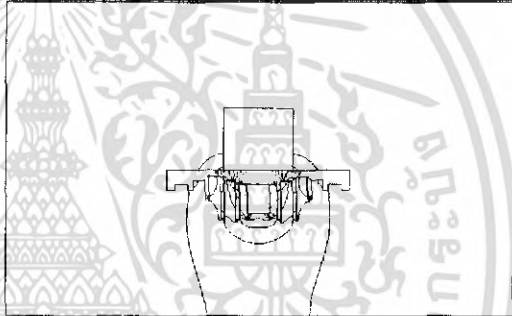
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.234 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เท่า ยาว mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เท่า ยาว mm.

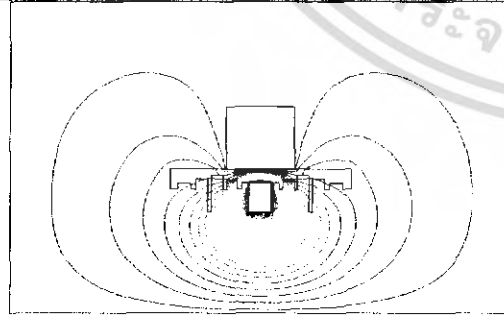
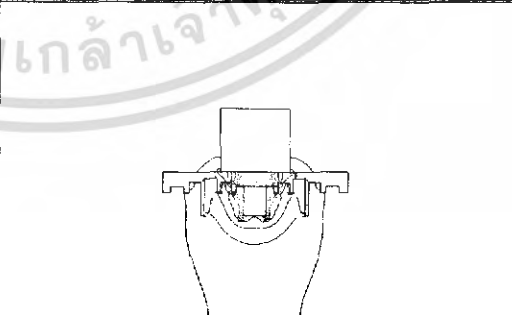
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.110 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ยาว เส้น mm.	เส้น เส้น เท่า ยาว เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.078 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง ยาว ครึ่ง mm.	เส้น เส้น ครึ่ง ยาว ครึ่ง mm.

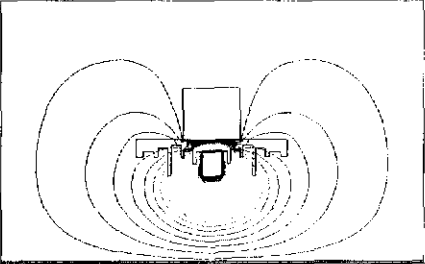
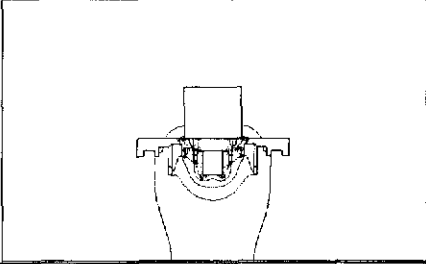
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

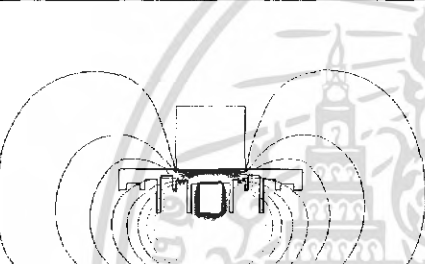
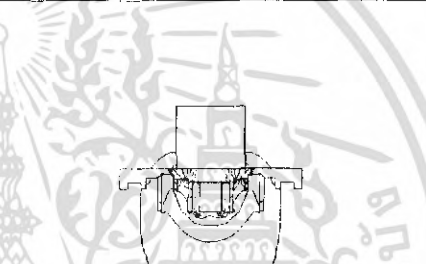
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.281 \text{ V/cm}$
	
สั้น สั้น ครึ่ง ยาว เท่า mm.	สั้น สั้น ครึ่ง ยาว เท่า mm.

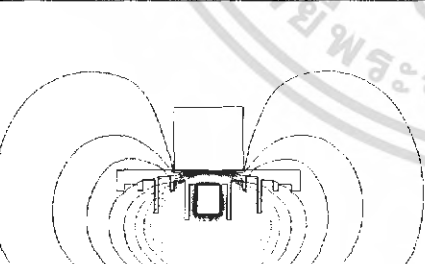
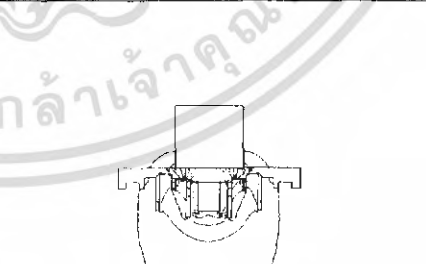
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.231 \text{ V/cm}$
	
สั้น สั้น ครึ่ง ยาว ยาว mm.	สั้น สั้น ครึ่ง ยาว ยาว mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.646 \text{ V/cm}$
	
สั้น สั้น เท่า สั้น สั้น mm.	สั้น สั้น เท่า สั้น สั้น mm.

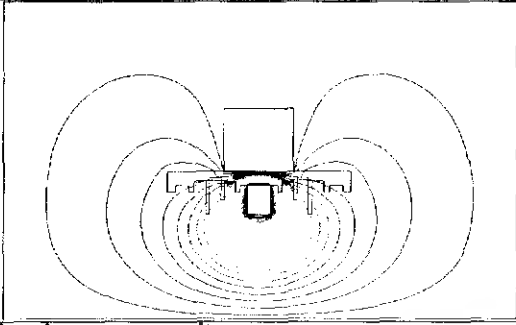
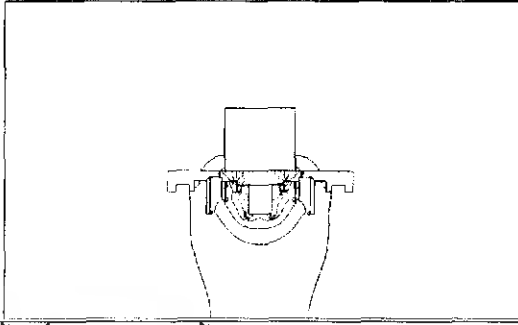
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

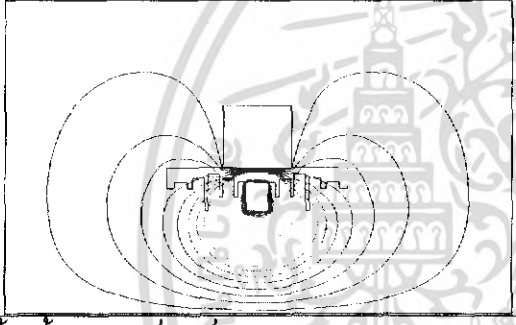
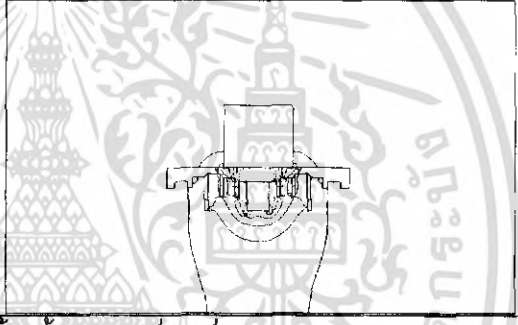
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.067 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เส้น ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เท่า เส้น ครึ่ง mm.

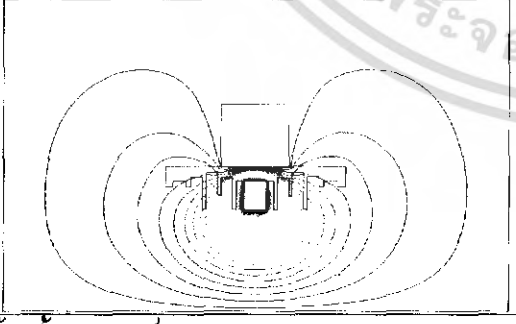
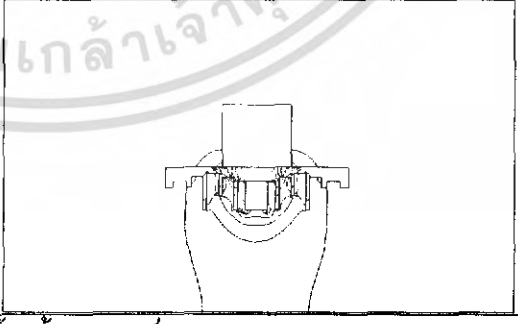
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.753 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เส้น เท่า mm.	เส้น เส้น เท่า เส้น เท่า mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.716 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เส้น ยาว mm.	เส้น เส้น เท่า เส้น ยาว mm.

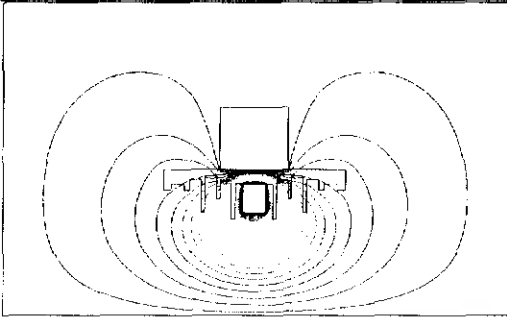
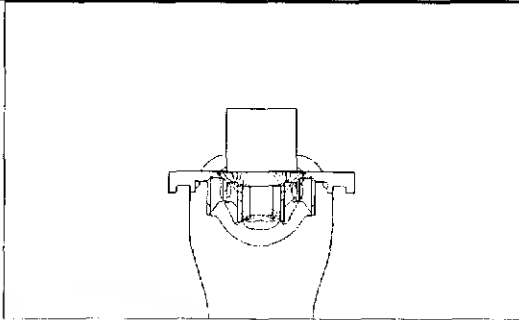
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

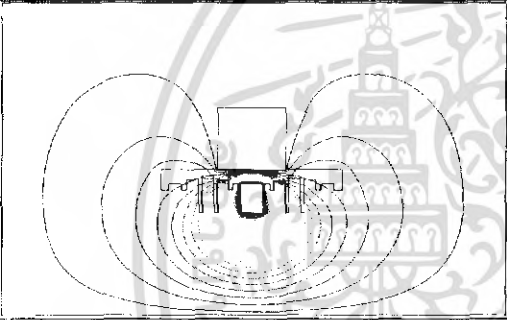
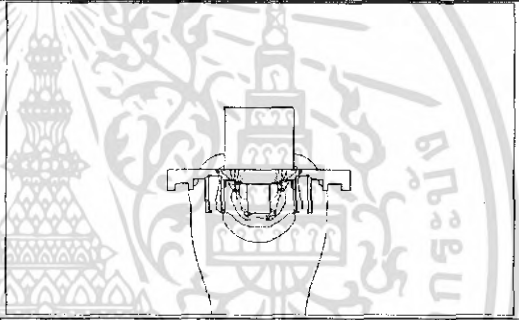
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.380 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ครึ่ง เส้น mm.	เส้น เส้น เท่า ครึ่ง เส้น mm.

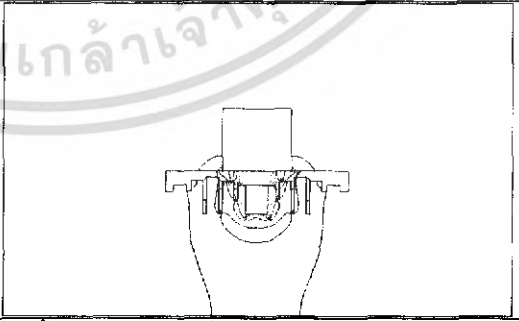
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.321 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ครึ่ง ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เท่า ครึ่ง ครึ่ง mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.730 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ครึ่ง เท่า mm.	เส้น เส้น เท่า ครึ่ง เท่า mm.

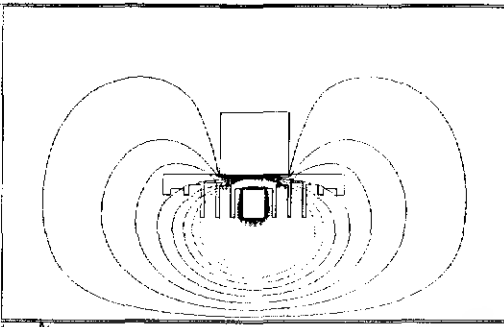
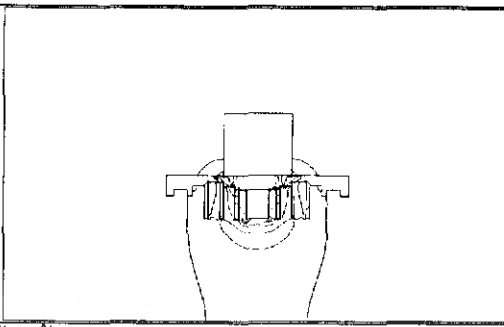
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

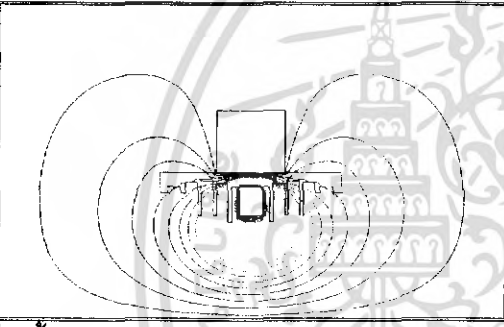
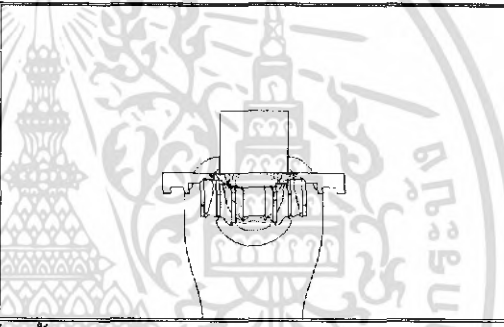
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.763 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ครึ่ง ยาว mm.	เส้น เส้น เท่า ครึ่ง ยาว mm.

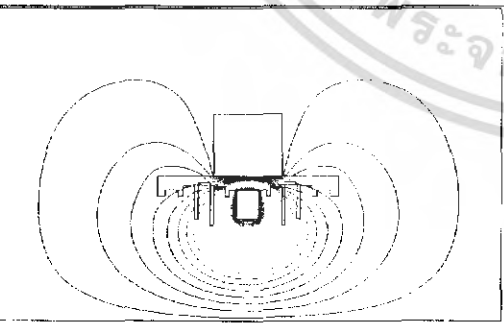
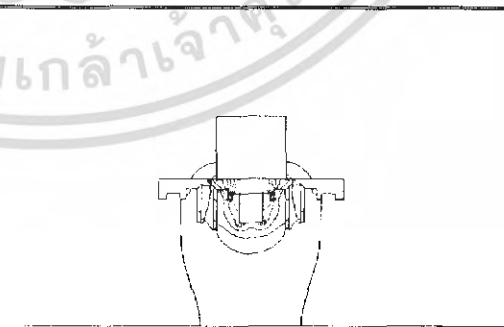
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.344 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เท่า เส้น mm.	เส้น เส้น เท่า เท่า เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 126.384 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เท่า ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เท่า เท่า ครึ่ง mm.

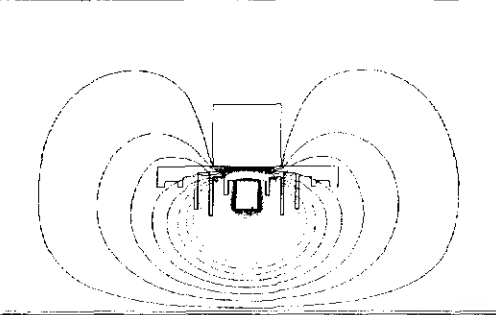
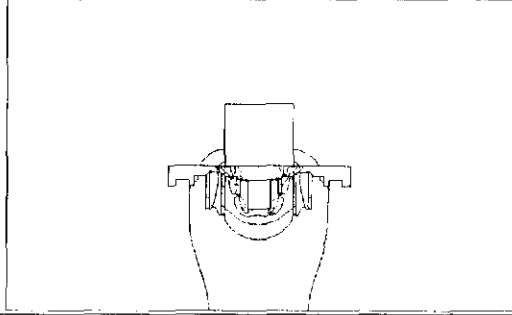
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

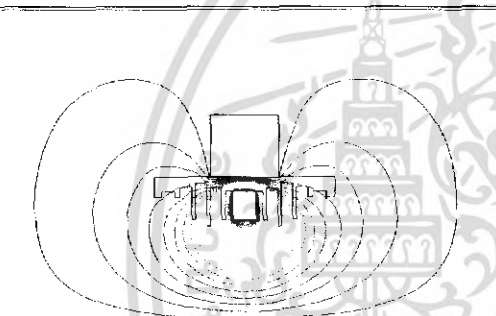
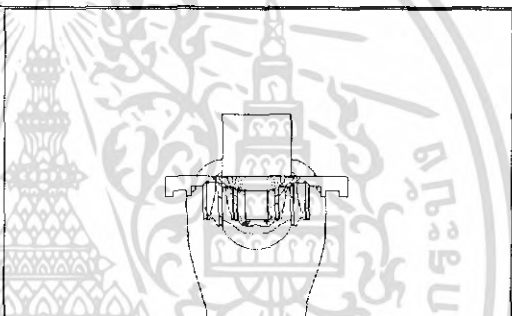
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.955 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เท่า เท่า mm.	เส้น เส้น เท่า เท่า เท่า mm.

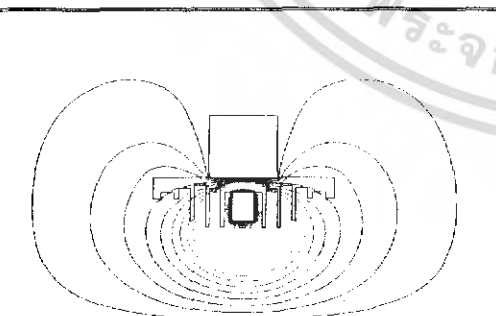
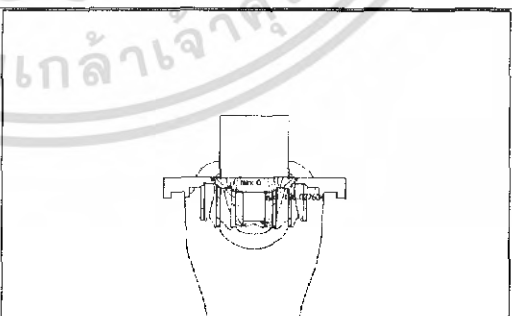
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.745 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า เท่า ยาว mm.	เส้น เส้น เท่า เท่า ยาว mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.420 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ยาว เส้น mm.	เส้น เส้น เท่า ยาว เส้น mm.

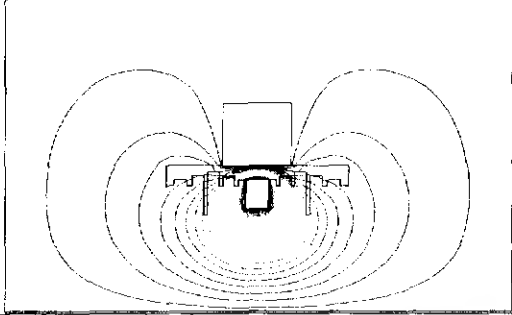
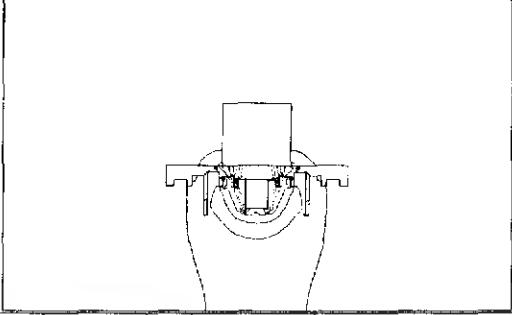
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

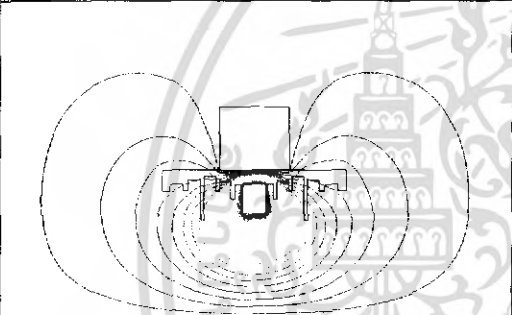
เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.229 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ยาว ครึ่ง mm.	เส้น เส้น เท่า ยาว ครึ่ง mm.

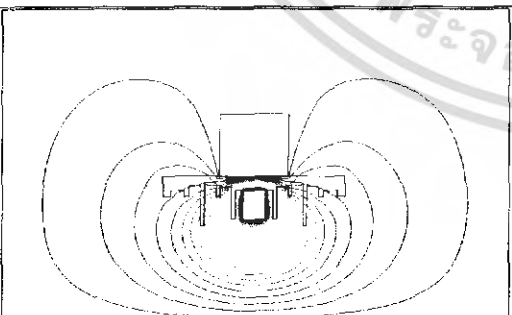
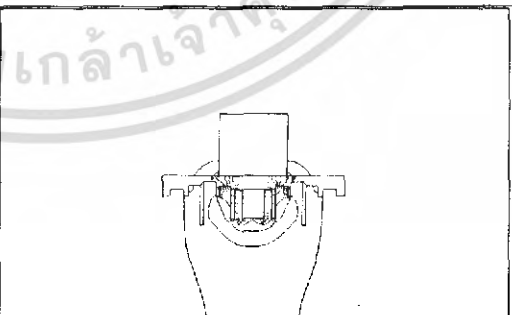
เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.801 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ยาว เท่า mm.	เส้น เส้น เท่า ยาว เท่า mm.

เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 126.028 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เท่า ยาว ยาว mm.	เส้น เส้น เท่า ยาว ยาว mm.

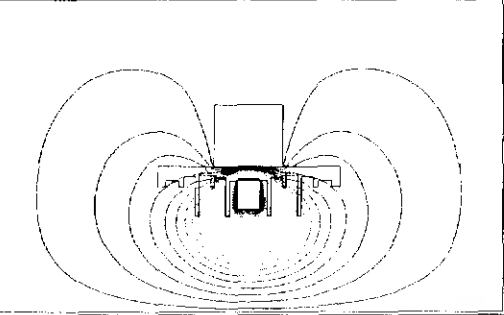
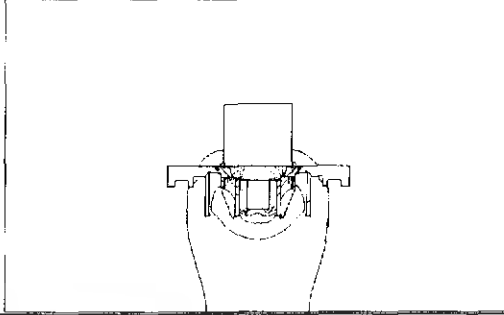
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

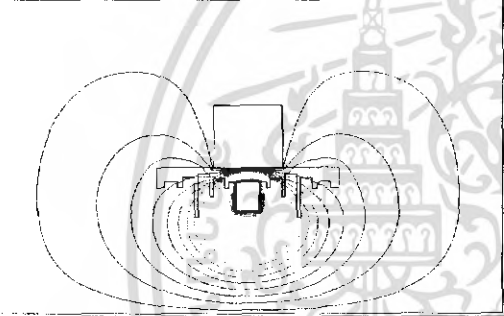
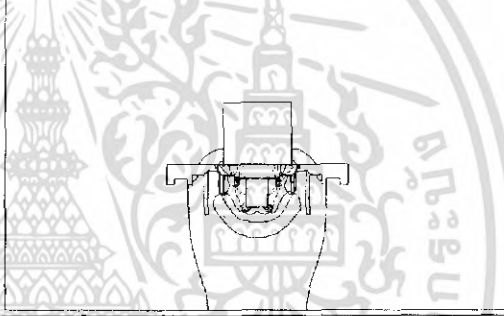
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.677 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เส้น เส้น mm.	เส้น เส้น ยาว เส้น เส้น mm.

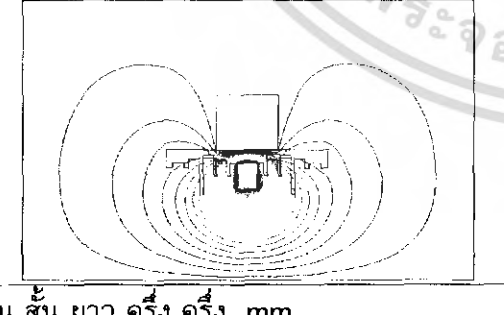
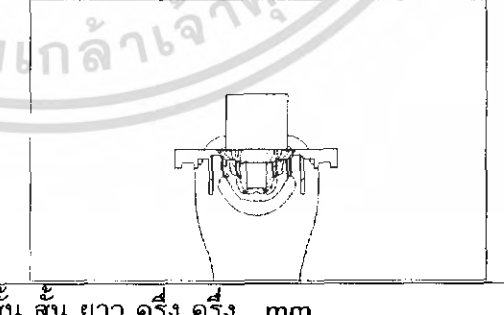
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.293 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เส้น คริง mm.	เส้น เส้น ยาว เส้น คริง mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 126.036 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เส้น เท้า mm.	เส้น เส้น ยาว เส้น เท้า mm.

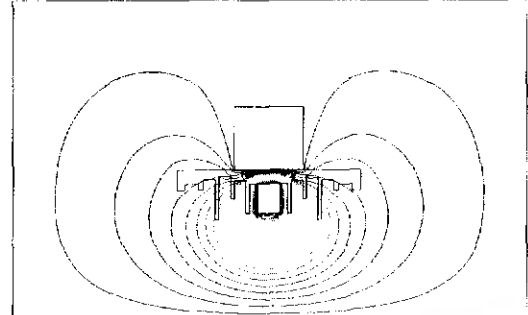
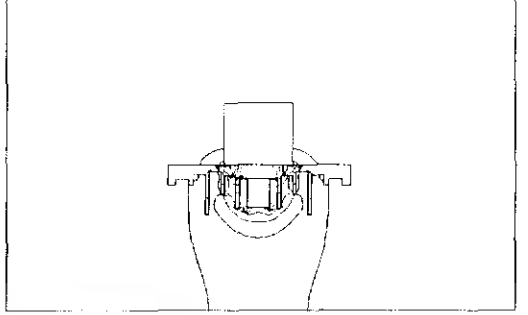
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

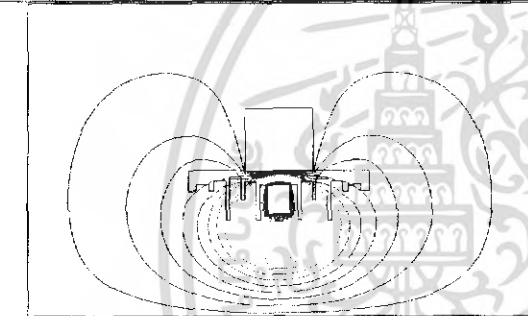
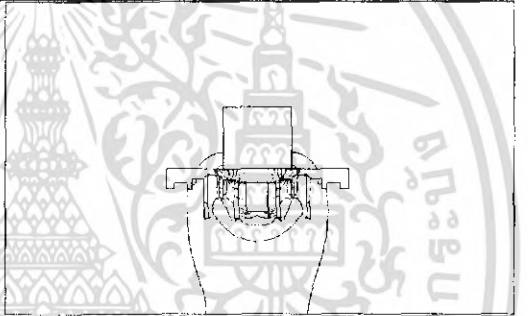
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.708 \text{ V/cm}$
	
สั้น สั้น ยาว สั้น ยาว mm.	สั้น สั้น ยาว สั้น ยาว mm.

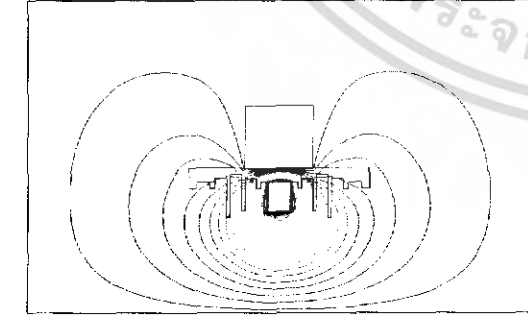
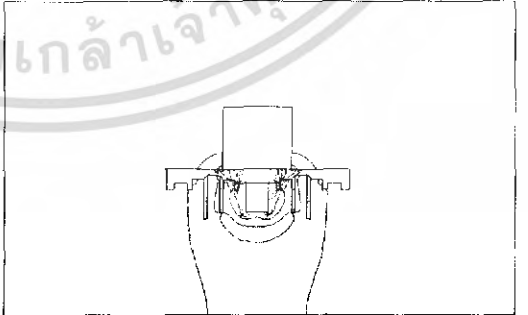
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.698 \text{ V/cm}$
	
สั้น สั้น ยาว ครึ่ง สั้น mm.	สั้น สั้น ยาว ครึ่ง สั้น mm.

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.103 \text{ V/cm}$
	
สั้น สั้น ยาว ครึ่ง ครึ่ง mm.	สั้น สั้น ยาว ครึ่ง ครึ่ง mm.

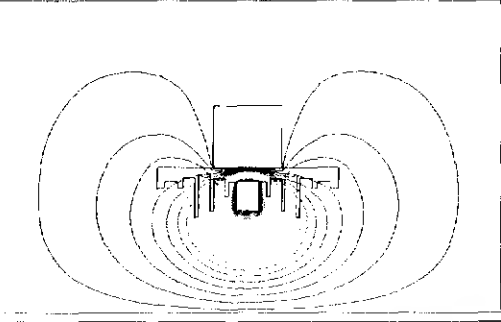
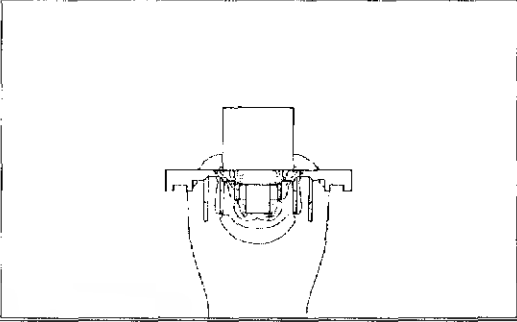
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

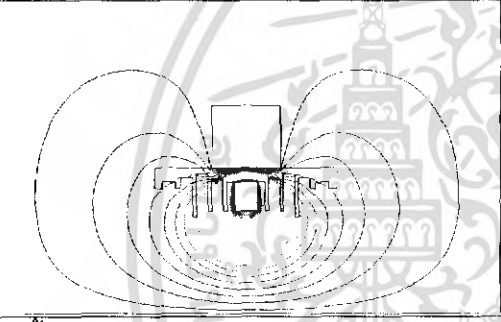
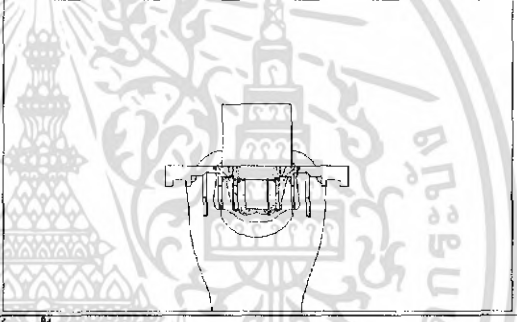
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.015 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว ครึ่ง เท่า mm.	เส้น เส้น ยาว ครึ่ง เท่า mm.

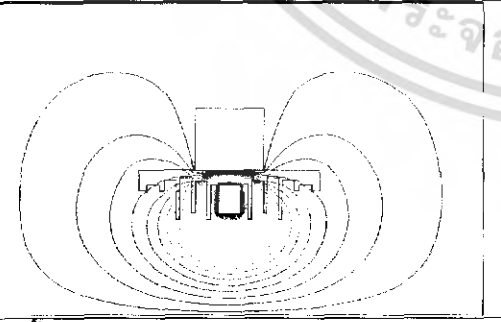
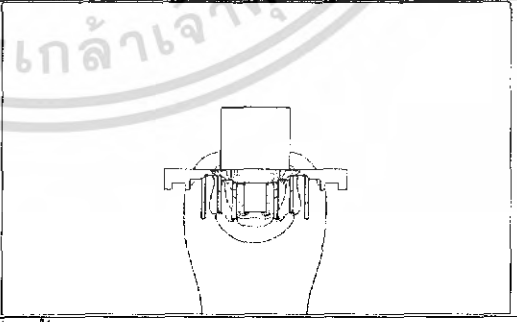
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.755 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว ครึ่ง เส้น mm.	เส้น เส้น ยาว ครึ่ง เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.663 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เท่า เส้น mm.	เส้น เส้น ยาว เท่า เส้น mm.

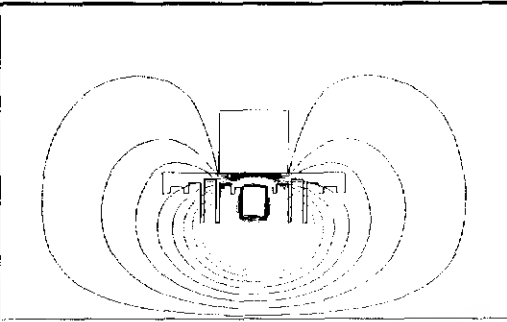
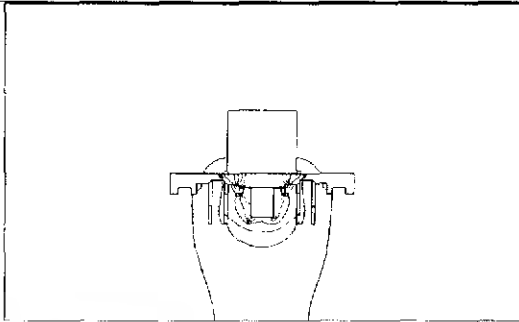
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

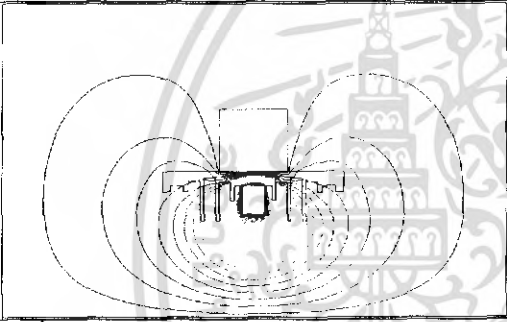
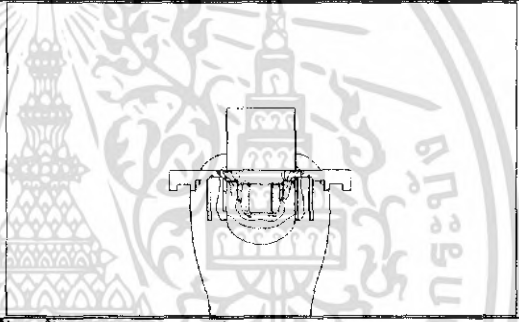
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.084 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เท่า ครึ่ง mm.	เส้น เส้น ยาว เท่า ครึ่ง mm.

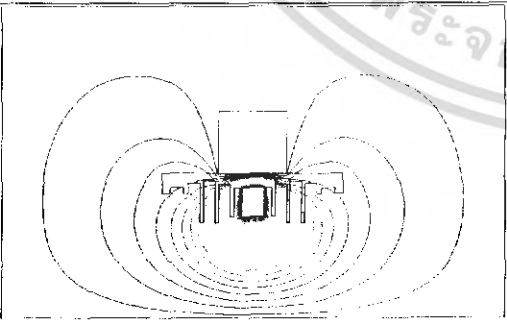
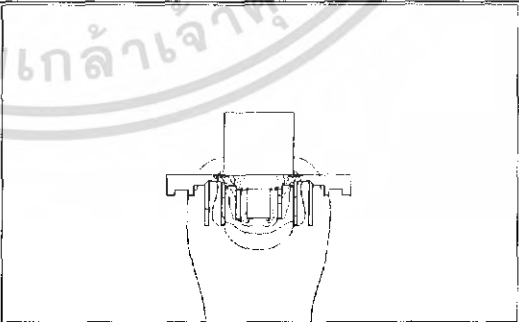
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 126.078 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เท่า เท่า mm.	เส้น เส้น ยาว เท่า เท่า mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.396 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว เท่า ยาว mm.	เส้น เส้น ยาว เท่า ยาว mm.

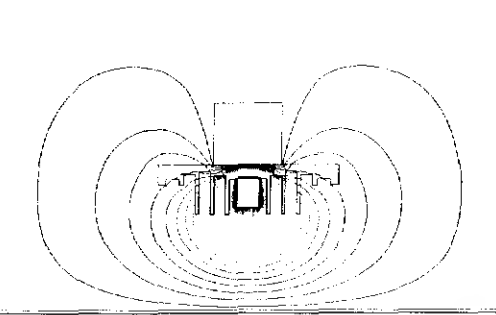
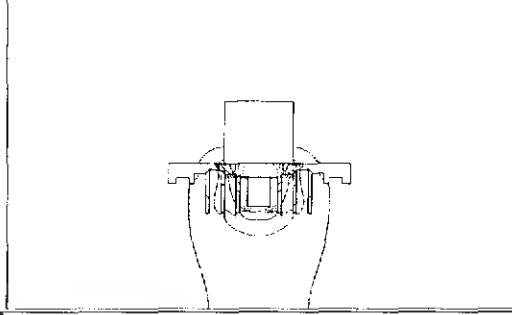
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

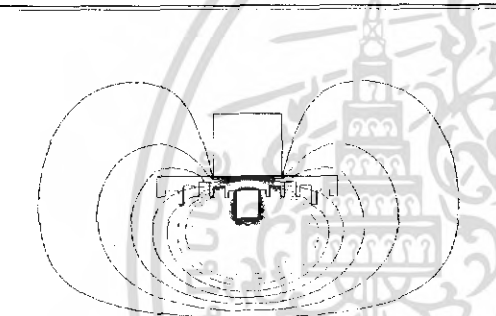
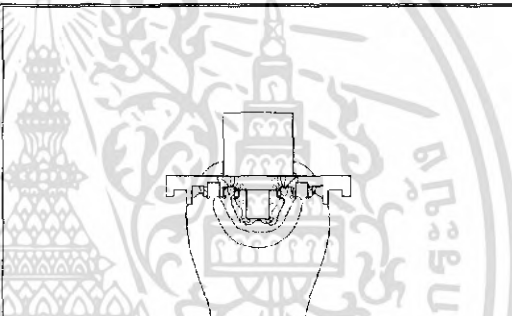
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.330 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว ยาว เส้น mm.	เส้น เส้น ยาว ยาว เส้น mm.

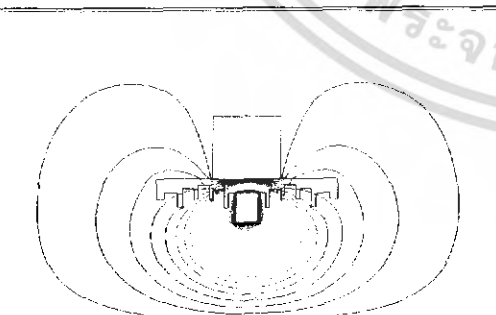
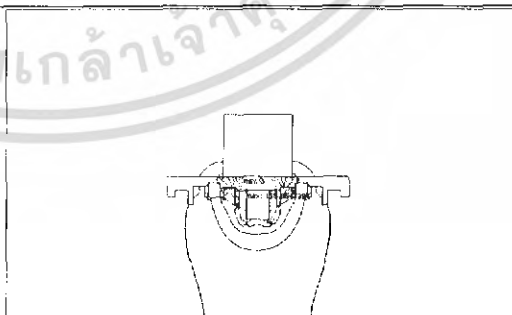
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.070 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว ยาว ครึ่ง mm.	เส้น เส้น ยาว ยาว ครึ่ง mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.461 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ยาว ยาว ยาว mm.	เส้น เส้น ยาว ยาว ยาว mm.

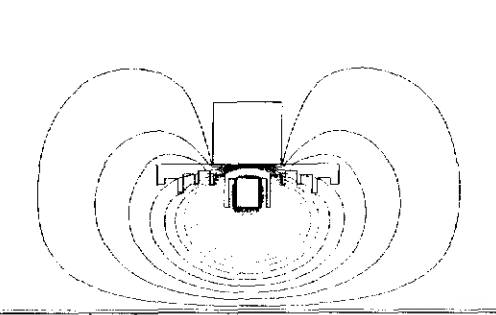
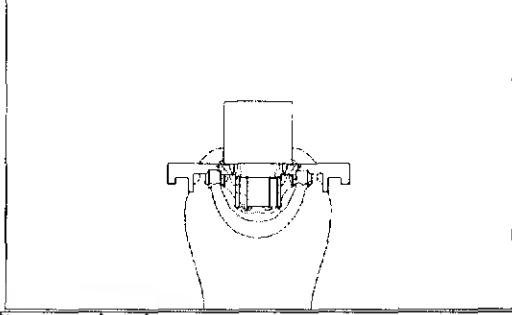
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

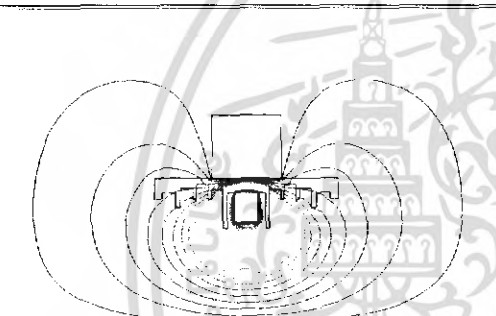
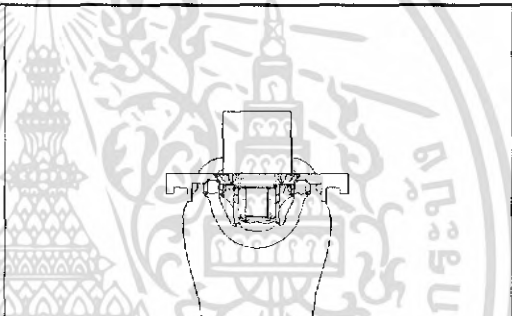
เส้นสมคักยั	การกระจายของสนามไฟฟา
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.755 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง ยาว ยาว ยาว mm.	สั้น ครึ่ง ยาว ยาว ยาว mm.

เส้นสมคักยั	การกระจายของสนามไฟฟา
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.106 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง สั้น สั้น ครึ่ง mm.	สั้น ครึ่ง สั้น สั้น ครึ่ง mm.

เส้นสมคักยั	การกระจายของสนามไฟฟา
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.055 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง สั้น สั้น ครึ่ง mm.	สั้น ครึ่ง สั้น สั้น ครึ่ง mm.

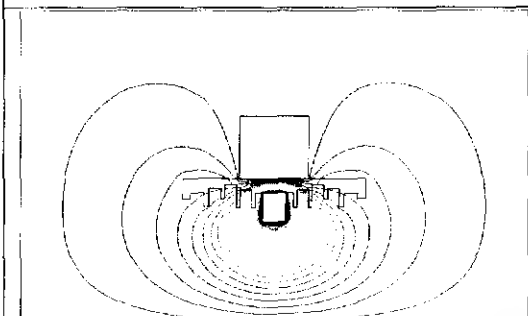
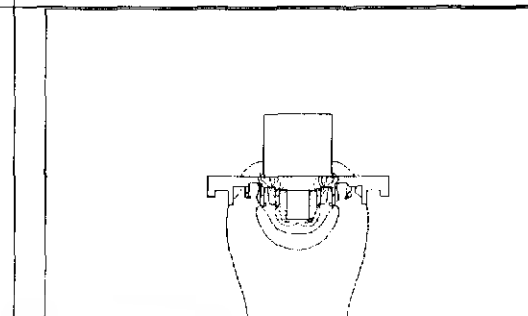
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.691 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เส้น เท่า mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เส้น เท่า mm.

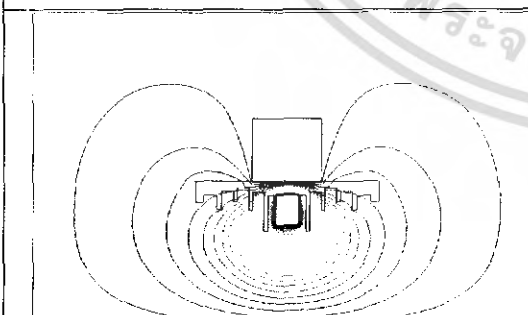
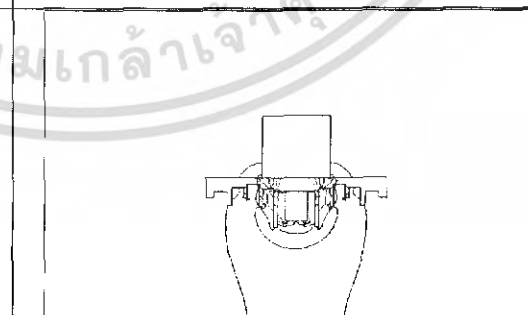
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.441 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เส้น ยาว mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เส้น ยาว mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.997 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง เส้น mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง เส้น mm.

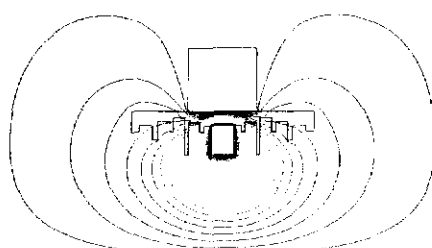
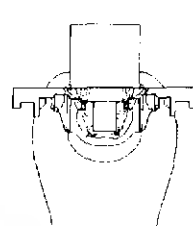
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.602 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง ครึ่ง mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง ครึ่ง mm.

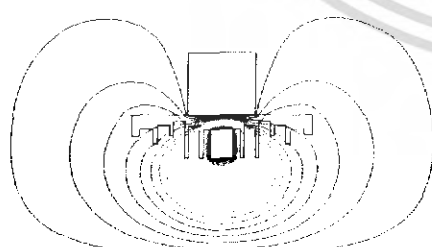
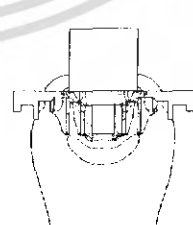
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 110.106 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง เท่า mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง เท่า mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 125.402 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง ยาว mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ครึ่ง ยาว mm.

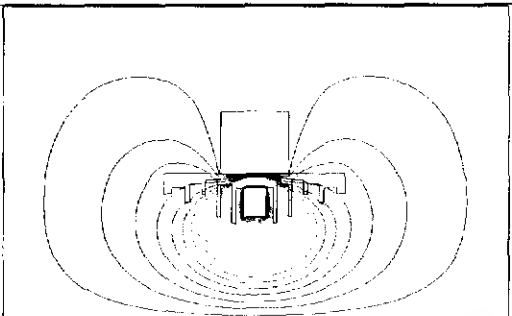
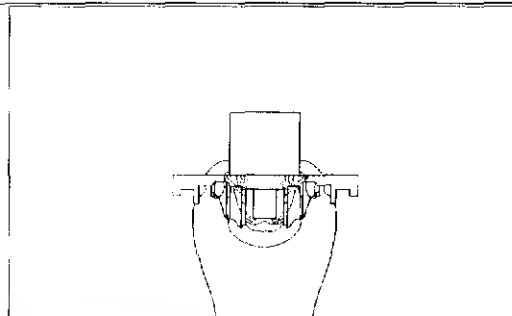
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.273 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เท่า เส้น mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เท่า เส้น mm.

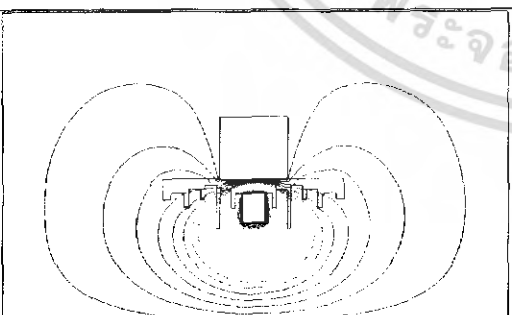
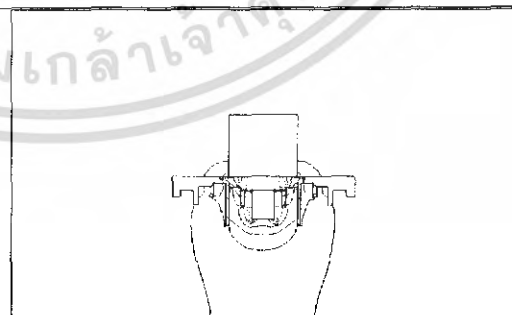
เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.575 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เท่า เส้น mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เท่า เส้น mm.

เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.747 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เท่า เท่า mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เท่า เท่า mm.

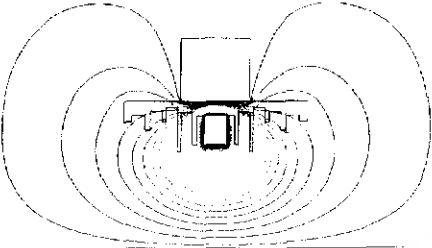
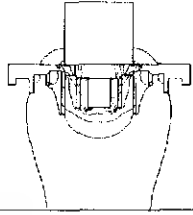
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

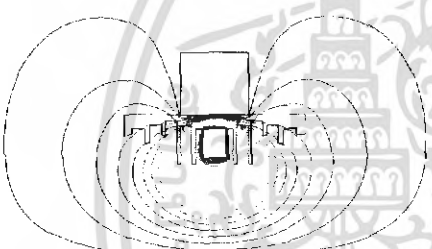
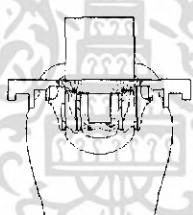
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 125.438 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เท่า ยาว mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เท่า ยาว mm.

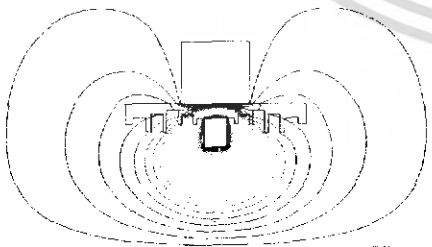
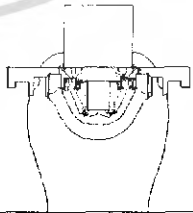
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.842 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ยาว เส้น mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ยาว เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.869 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ยาว ครึ่ง mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ยาว ครึ่ง mm.

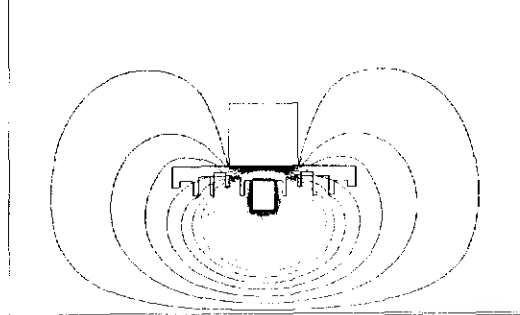
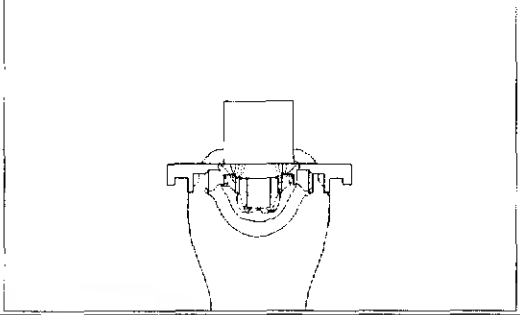
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

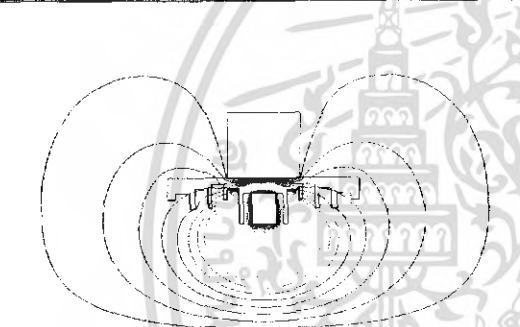
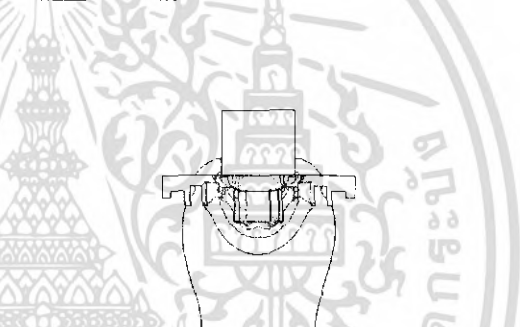
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.666 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ยาว เท่า mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ยาว เท่า mm.

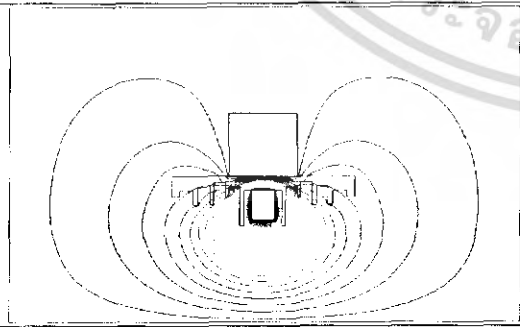
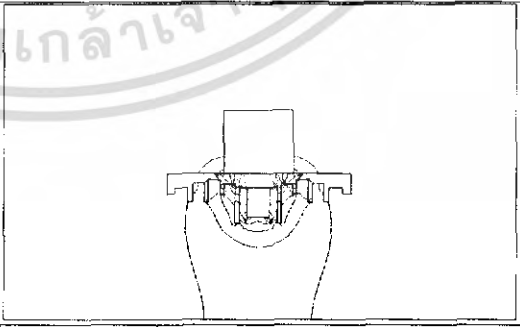
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.491 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น ยาว ยาว mm.	เส้น ครึ่ง เส้น ยาว ยาว mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.873 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง เส้น เส้น mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง เส้น เส้น mm.

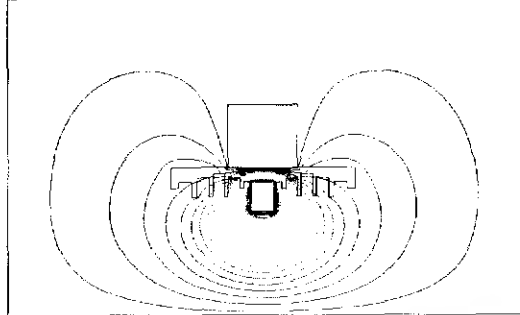
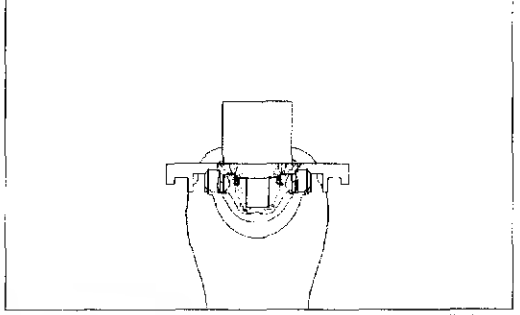
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 125.802 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง ครึ่ง สั้น ครึ่ง mm.	สั้น ครึ่ง ครึ่ง สั้น ครึ่ง mm.

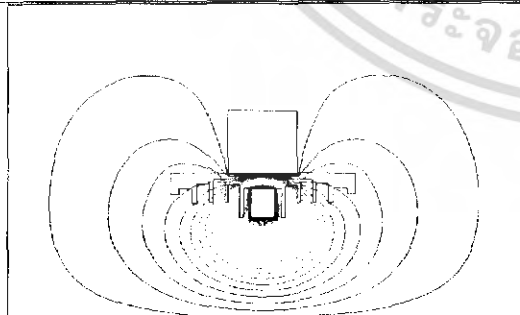
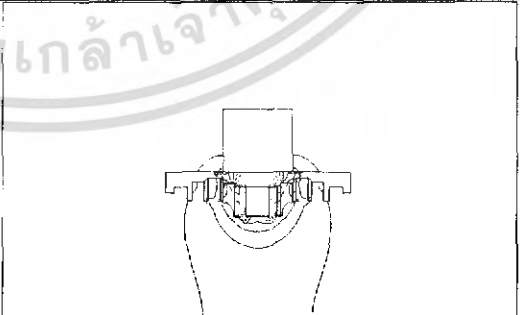
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 117.735 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง ครึ่ง สั้น เท่า mm.	สั้น ครึ่ง ครึ่ง สั้น เท่า mm.

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.199 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง ครึ่ง สั้น ยาว mm.	สั้น ครึ่ง ครึ่ง สั้น ยาว mm.

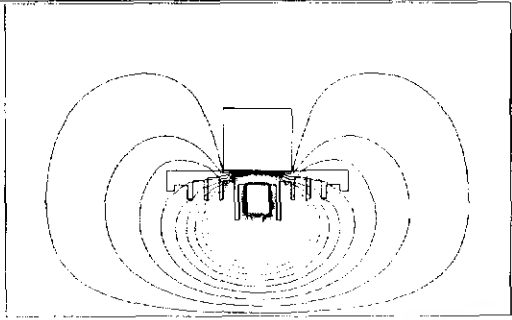
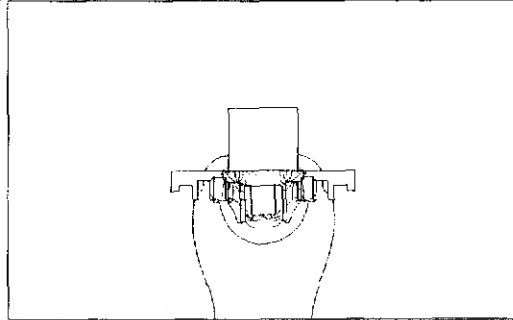
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

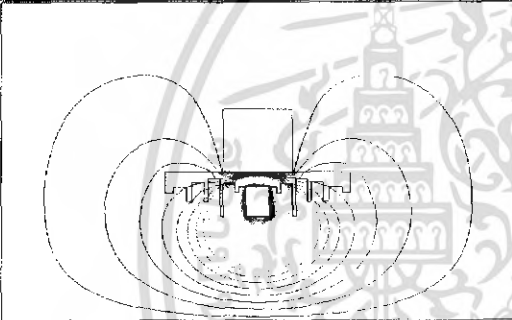
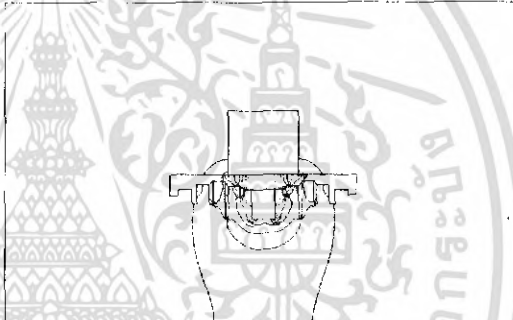
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.458 \text{ V/cm}$
	
สี่น คริง คริง คริง คริง สี่น mm.	สี่น คริง คริง คริง คริง สี่น mm.

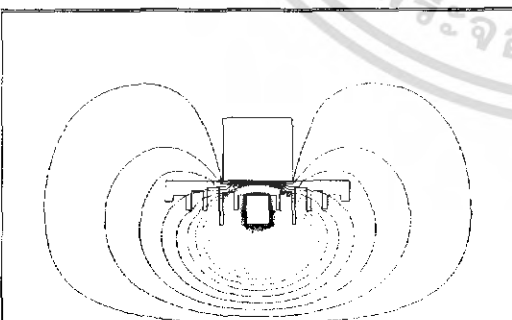
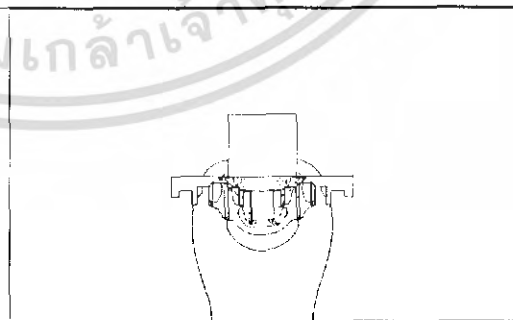
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.235 \text{ V/cm}$
	
สี่น คริง คริง คริง คริง คริง mm.	สี่น คริง คริง คริง คริง คริง mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.611 \text{ V/cm}$
	
สี่น คริง คริง คริง คริง เท้า mm.	สี่น คริง คริง คริง คริง เท้า mm.

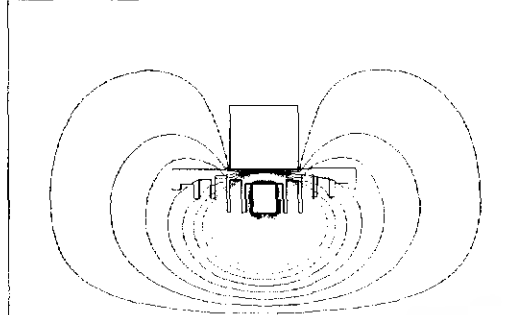
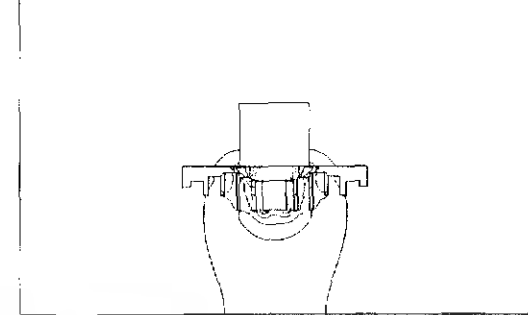
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 125.411 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง ครึ่ง ยาว mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง ครึ่ง ยาว mm.

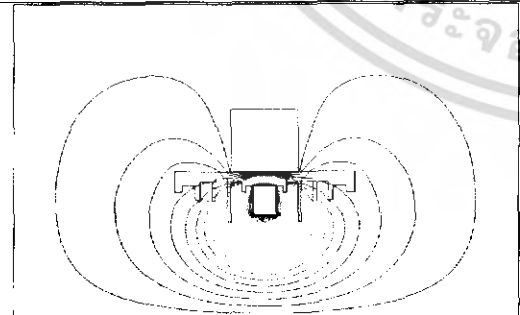
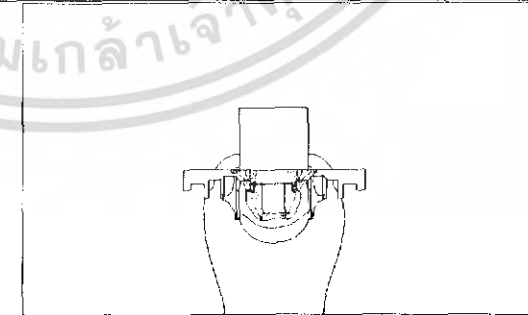
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.589 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า เส้น mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า เส้น มม.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.245 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า ครึ่ง mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า ครึ่ง mm.

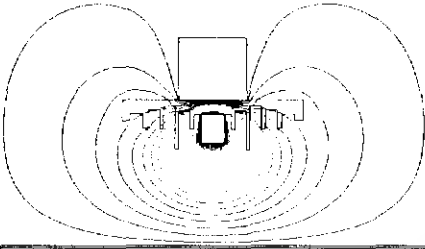
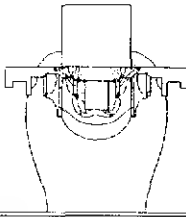
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

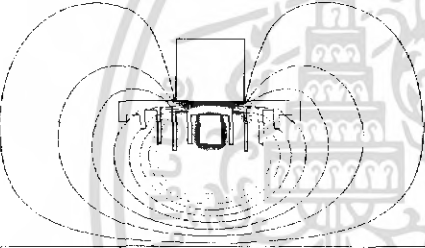
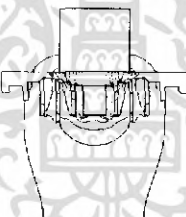
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.292 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า เท่า mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า เท่า mm.

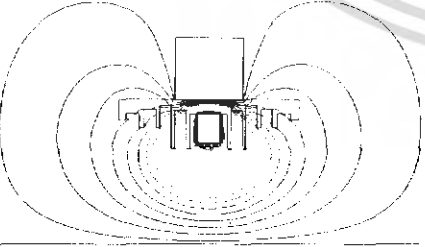
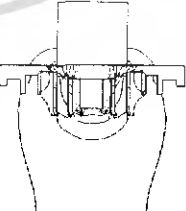
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.246 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า ยาว mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง เท่า ยาว mm.

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 119.606 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว เส้น mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว เส้น mm.

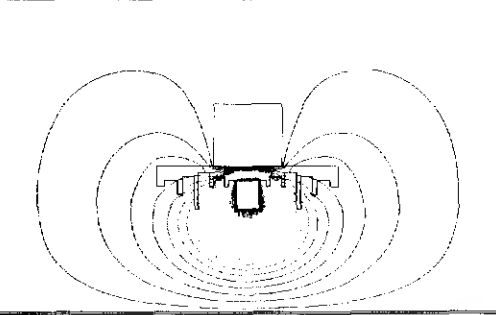
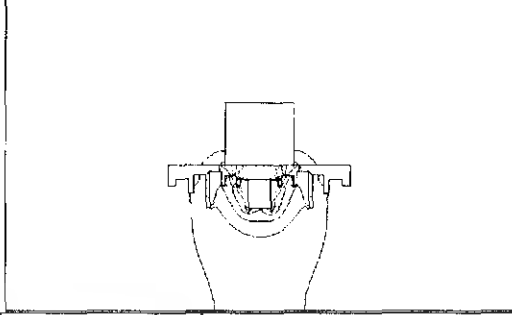
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.545 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว เท่า mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว เท่า mm.

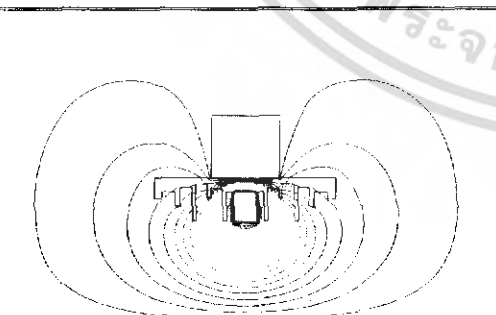
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.191 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว เท่า mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว เท่า mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 116.421 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว ยาว mm.	เส้น ครึ่ง ครึ่ง ยาว ยาว mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

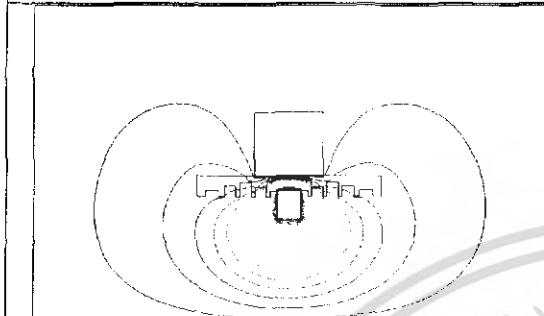
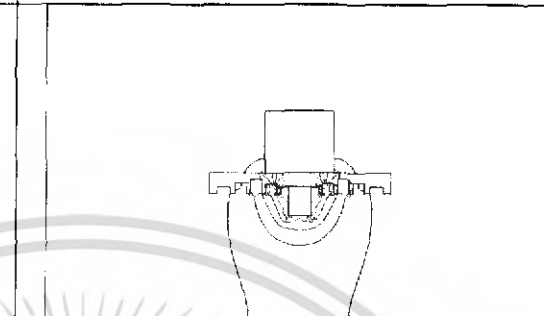
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.124 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เท่า เส้น เส้น mm.	เส้น ครึ่ง เท่า เส้น เส้น mm.

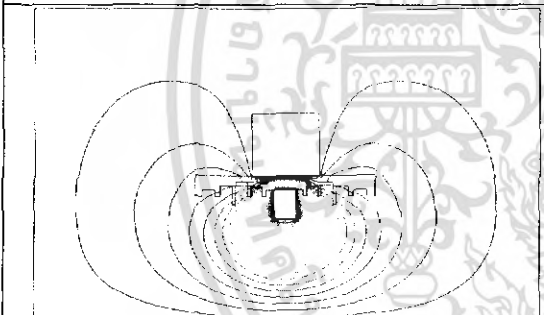
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.212 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เท่า เส้น ครึ่ง mm.	เส้น ครึ่ง เท่า เส้น ครึ่ง mm.

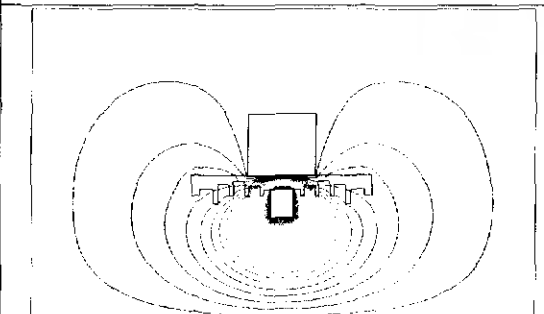
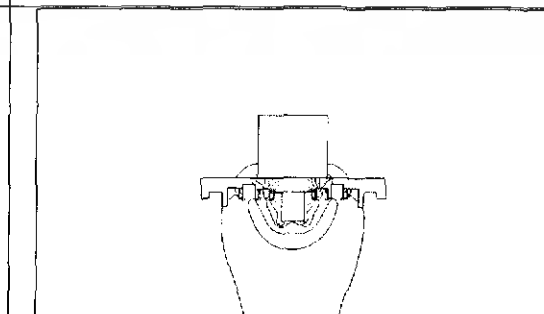
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 120.254 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เท่า เส้น เท่า mm.	เส้น ครึ่ง เท่า เส้น เท่า mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

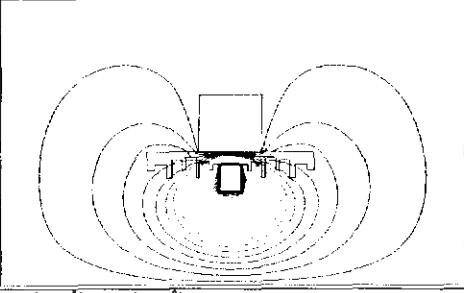
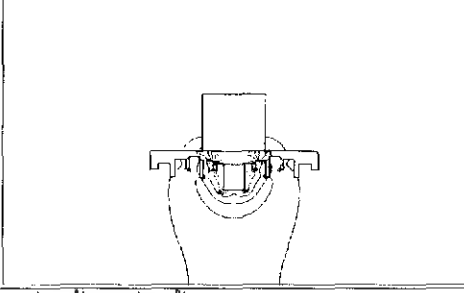
ยกตัวอย่างของลูกถ้วยที่เหลือ ที่ทำการตัดลักษณะครึ่งของลูกถ้วยจนวน 2 ครึ่งที่อยู่ด้านในสุด  
ที่มีความยาวเกิน จากจำนวน 1024 รูปแบบ

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.334 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น เส้น เส้น เส้น mm.	เส้น เส้น เส้น เส้น เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.642 \text{ V/cm}$
	
เส้น เส้น ครึ่ง เส้น เส้น mm.	เส้น เส้น ครึ่ง เส้น เส้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 127.106 \text{ V/cm}$
	
เส้น ครึ่ง เส้น เส้น เส้น mm.	เส้น ครึ่ง เส้น เส้น เส้น mm.

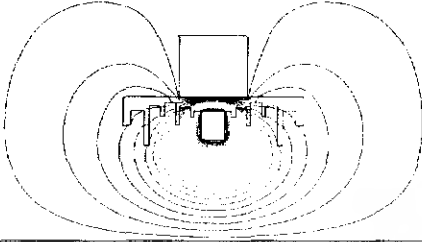
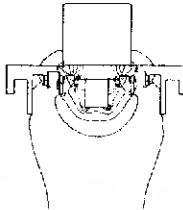
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

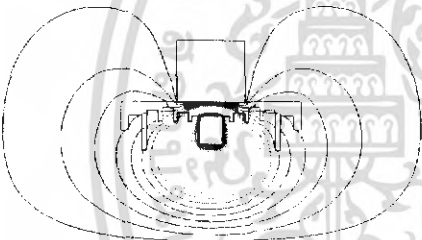
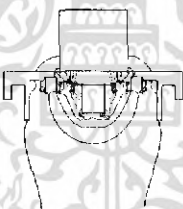
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 121.997 \text{ V/cm}$
	
สั้น ครึ่ง สั้น ครึ่ง สั้น mm.	สั้น ครึ่ง สั้น ครึ่ง สั้น mm.

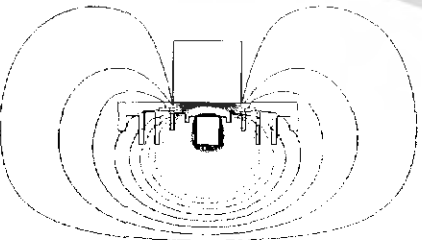
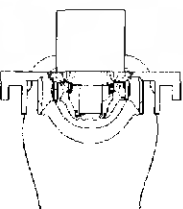
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.517 \text{ V/cm}$
	
ครึ่ง ยาว ครึ่ง ครึ่ง สั้น mm.	ครึ่ง ยาว ครึ่ง ครึ่ง สั้น mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.304 \text{ V/cm}$
	
ครึ่ง ยาว ครึ่ง สั้น สั้น mm.	ครึ่ง ยาว ครึ่ง สั้น สั้น mm.

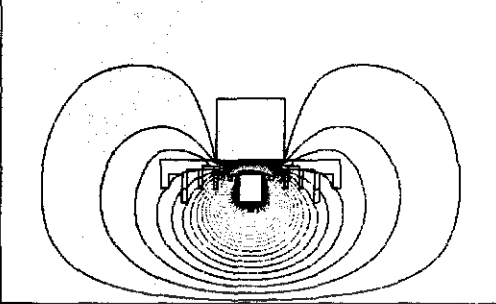
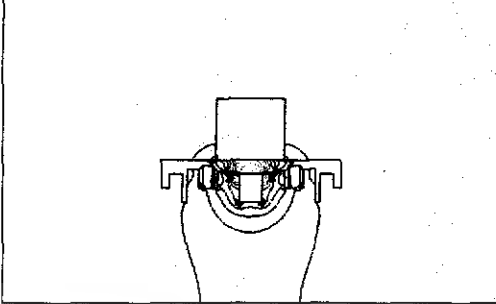
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.332 \text{ V/cm}$
	
ครึ่ง ยาว สั้น ครึ่ง สั้น mm.	ครึ่ง ยาว สั้น ครึ่ง สั้น mm.

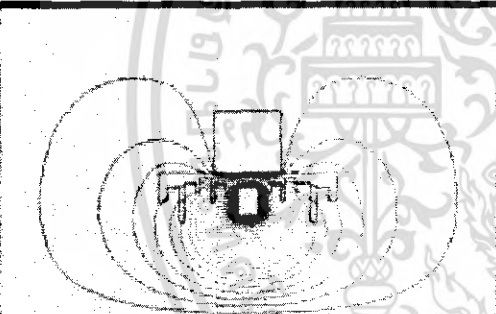
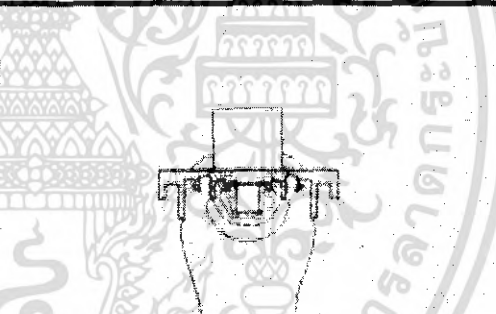
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.498 \text{ V/cm}$
	
ครึ่ง ยาว สั้น สั้น สั้น mm.	ครึ่ง ยาว สั้น สั้น สั้น mm.

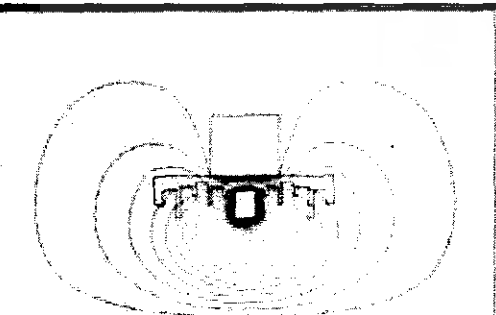
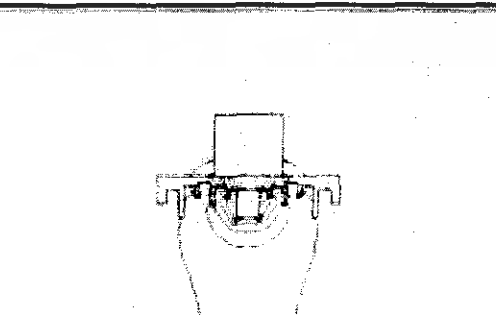
เส้นสมศักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.534 \text{ V/cm}$
	
ครึ่ง เท่า เท่า ครึ่ง สั้น mm.	ครึ่ง เท่า เท่า ครึ่ง สั้น mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

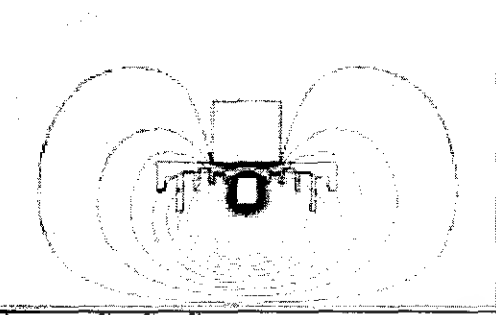
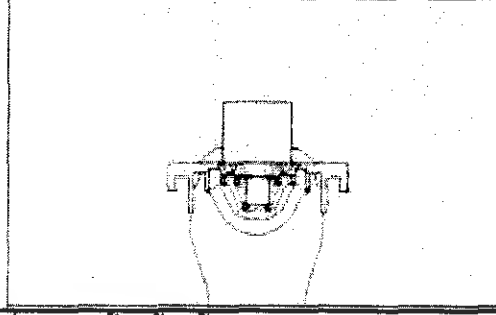
เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 118.517 \text{ V/cm}$
	
คริ่ง เท่า คริ่ง คริ่ง สัน mm.	คริ่ง เท่า คริ่ง คริ่ง สัน mm.

ตัวอย่างของลูกถ้วยที่เหลือ ที่ทำการตัดลักษณะความยาวของปีกโดยจะต้องสั้นยาว สลับกันไป โดยเลือกรูปแบบจาก 61 รูปแบบ

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.332 \text{ V/cm}$
	
คริ่ง ยาว สัน คริ่ง สัน mm.	คริ่ง ยาว สัน คริ่ง สัน mm.

เส้นสมคักย์	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.333 \text{ V/cm}$
	
คริ่ง เท่า สัน คริ่ง สัน mm.	คริ่ง เท่า สัน คริ่ง สัน mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นสมคักย	การกระจายของสนามไฟฟ้า
$V_{max} = 100 \text{ V}$	$E_{max} = 122.304 \text{ V/cm}$
	
คริ่ง ยาว $\text{mm}$	คริ่ง ยาว $\text{mm}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้