

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นสำหรับการทดสอบ
ครอบเอาต์ฟิวส์ในสภาวะเปราะเปื้อน
DESIGN AND CONSTRUCTION OF HUMIDITY CONTROLLED
CHAMBER FOR CONTAMINATED DROP-OUT FUSE TESTING



โดย

นาย เทพาย นิ่มสนอง

นาย วรพงษ์ เฉลิมวัฒนานนท์

นาย วิจิตร เทพรส

นาย อภิชาติ นิ่มเทียน

รพ.
ทพ. 13ก
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 73011
วัน,เดือน,ปี 27 ส.ย. 2550

b. 1127631b
i.....

ปฏิญานิตินี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นสำหรับการทดสอบดรอพเอาต์ฟิวส์
ในสภาวะเปราะเปื้อน

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HUMIDITY CONTROLLED
CHAMBER FOR CONTAMINATED DROP-OUT FUSE TESTING



อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นสำหรับการทดสอบรอบเอ้าท์
พิวส์ในสภาวะเปราะเปื้อน


ผู้จัดทำ

- 
1. นาย เพทาย นิ่มสนอง
 2. นาย วรพงษ์ เฉลิมวัฒนานนท์
 3. นาย วิจิตร เทพรส
 4. นาย อภิชาติ นิ่มเทียน



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นสำหรับการทดสอบครอบเอาต์พิวส์ ในสภาวะเปราะเปื้อน

นาย เพทาย นิมสนอง
 นาย วรพงษ์ เฉลิมวัฒนานนท์
 นาย วิจิตร เทพรส
 นาย อภิชาติ นิมเทียน
 อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
 รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นสำหรับการทดสอบครอบเอาต์พิวส์ในสภาวะเปราะเปื้อน การทดสอบในสภาวะปกติ และออกแบบครอบเอาต์พิวส์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน

การออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นเป็นการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 507:1991 ห้องควบคุมความชื้นที่ออกแบบและสร้าง สามารถจำลองสภาวะเปราะเปื้อนได้ตรงตามมาตรฐาน โดยภายในห้องทดสอบมีอัตราการจ่ายไอน้ำ $0.05 \text{ kg/m}^3\text{hr}$ ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวตามข้อกำหนด ANSI C-37.42-1996 และทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะผิวเปราะเปื้อน ผลการทดสอบพบว่าครอบเอาต์พิวส์ผิวแห้งสะอาดผ่านการทดสอบทั้งการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องและการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ ส่วนในการทดสอบหาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนเล็กน้อยและสูงมาก พบว่าที่ระดับความเปราะเปื้อนเล็กน้อยไม่เกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งาน แต่ที่ระดับความเปราะเปื้อนสูงมากเกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งาน

การออกแบบปีกฉนวนครอบเอาต์พิวส์พิกัดแรงดัน 27 kV ออกแบบตามข้อกำหนด IEC 815:1986 ออกแบบให้มีรูปทรงที่สิ่งเปราะเปื้อนจับเกาะได้ยากขึ้นและทำความสะอาดตัวเองได้ และออกแบบให้มีระยะกระแสรั่วไหลมากขึ้น เพื่อลดขนาดของกระแสรั่วไหล และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์พบว่าการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปีกครอบเอาต์พิวส์ที่ออกแบบมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าครอบเอาต์พิวส์ต้นแบบ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HUMIDITY CONTROLLED CHAMBER FOR CONTAMINATED DROP-OUT FUSE TESTING

Phethai Nimsanong

Woraphong Chalembwattananont

Vijit Thapeparod

Apichart Nimtien

Norrasage Pattanadech Advisor

Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

2005

ABSTRACT

This project is presents the design and the constructing of humidity controlled chamber for contaminated drop-out fuse testing laboratory.

This design and construction of humidity controlled chamber is designed follow IEC 507 :1991 standard by artificial pollution for drop-out fuse testing at voltage 27kV testing is included 2 part is AC withstand testing follow ANSI C-37.42-1996 standard and corona discharge pollution testing. Clean-dry drop out fuse testing passes AC withstand testing and impulse testing. A small pollution condition doesn't have corona discharge but much pollution have corona discharge.

Design of sheds drop-out fuse at rated voltage 27 kV Design follow IEC 815 standard. By design without pollution, self-cleaned and increase creepage distance for decrease leakage current. Analysis electric fields from finite element program shows that shed drop-out fuse have electric field less than the original drop-out fuse.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือสนับสนุนจากหลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะท่าน อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช และท่านรองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาและแนวคิดอย่างใกล้ชิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมีเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์นี้ให้เป็นที่เรียบร้อย และขอขอบคุณภาควิชาเคมีที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดลองทางเคมี ขอขอบคุณบริษัท Data Entry ที่ได้อนุเคราะห์กล้องส่องโคโรนาเพื่อใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด ส.กมลเทรดดิ้ง ที่ให้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้ข้อมูลต่าง ๆ ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตปริญญาโท คุณอภิสิทธิ์ ไชยแสงกุล คุณณัฐพันธ์ บุญเสนอ คุณประวิทย์ เพ็ชรผึ้งและเพื่อนนักศึกษารัษฎาตรีสาขาวิศวกรรม ไฟฟ้า ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลาย ๆ ท่านที่ยังมิได้เอ่ยถึงที่ให้คำแนะนำกับคณะผู้จัดทำ

อนึ่งโครงการชิ้นนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากความตั้งใจและความมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ความสำคัญของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	8
2.1.1 ชนิดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	8
2.1.1.1 ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก.....	8
2.1.1.2 ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอก.....	11
2.1.1.3 ชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม.....	11
2.1.2 ตัวฟิวส์ลิงค์.....	12
2.1.2.1 ตัวฟิวส์ลิงค์ชนิดต้องใส่ในกระบอก.....	12
2.1.2.2 ตัวฟิวส์ลิงค์ชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอก.....	13
2.1.3 กระบอกสำหรับใส่ฟิวส์ลิงค์.....	13
2.1.4 ลักษณะการทำงานของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	14
2.1.5 ความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	14
2.1.6 การเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	17
2.1.6.1 การเลือกพิกัดกระแสต่อเนื่อง.....	17
2.1.6.2 การเลือกแรงดันที่กำหนด.....	17
2.1.6.3 การเลือกขนาดระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน หรือค่า BIL.....	19
2.1.6.4 การเลือกพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์.....	19
2.1.7 การป้องกันบริเวณที่ไฟฟ้า.....	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.7.1 การใช้ฟิวส์ลิ่งค์ป้องกันหม้อแปลง.....	21
2.1.7.2. การใช้ฟิวส์ลิ่งค์ป้องกันคาปาซิเตอร์.....	22
2.2 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	23
2.2.1 แรงดันเกินภายนอก.....	23
2.2.2 แรงดันเกินภายใน.....	24
2.2.3 แรงดันเกินชั่วคราว.....	24
2.2.4 การทดสอบอิมพัลส์.....	25
2.2.5 ข้อกำหนดของรูปคลื่นอิมพัลส์.....	26
2.2.6 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นไฟฟ้า.....	26
2.3 สิ่งเปราะเปื้อน.....	28
2.3.1 ประเภทของสิ่งเปราะเปื้อน.....	28
2.3.2 การวัดและการแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน.....	29
2.3.2.1 การวัดค่าระดับความเปราะเปื้อน.....	29
2.3.2.2 การแบ่งระดับความเปราะเปื้อน.....	31
2.3.3 กลไกการเกิดวาบไฟตามผิวของฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนเมื่ออยู่ภายใต้ สภาวะเปราะเปื้อน.....	32
2.4 การออกแบบปีกของทรอปเอาร์ทฟิวส์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปราะ เปื้อน.....	33
2.4.1 เลือกแบบปีกของทรอปเอาร์ทฟิวส์.....	34
2.4.2 การออกแบบปีกตามมาตรฐาน IEC815.....	35
2.5 สนามไฟฟ้า.....	37
2.5.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า.....	39
2.5.1.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน.....	40
2.5.1.2 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด.....	40
2.5.1.3 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	41
2.6 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
2.6.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
2.6.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า.....	45
2.6.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์.....	46

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.4 สมการเชิงอนุพันธ์.....	48
2.6.5 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง.....	49
บทที่ 3 การออกแบบสร้างห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะเปราะและ การออกแบบ ปีกครอบเอาท์พิวส์	50
3.1.การออกแบบห้องทดสอบ.....	50
3.1.1 การออกแบบโครงสร้าง.....	52
3.1.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	53
3.1.3 การออกแบบท่อจ่ายไอน้ำ.....	56
3.2 การสร้างกระโจม.....	57
3.2.1 โครงสร้างกระโจม.....	57
3.2.2 การสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	59
3.2.3 การสร้างท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B.....	60
3.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำและกระโจมทดสอบ.....	61
3.4 การใช้งานห้องควบคุมความชื้น.....	61
3.5 การออกแบบปีกของครอบเอาท์พิวส์.....	62
3.5.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....	62
3.5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	69
บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของครอบเอาท์พิวส์.....	70
4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของครอบเอาท์พิวส์สภาวะปกติผิวแห้งสะอาด..	71
4.1.1 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง.....	71
4.1.2 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์.....	77
4.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของครอบเอาท์พิวส์ผิวเปียกเปราะ เปื้อน.....	83
4.2.1 การจำลองสิ่งเปราะเปื้อน	83
4.2.2 การเก็บตัวอย่างสิ่งเปราะเปื้อนเพื่อวัดหาค่า ESDD.....	84
4.2.3 คำนวณหาค่า ESDD ตามมาตรฐาน IEC 507.....	85
4.2.4 การทดสอบหาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนเปียกชื้น.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
ภาคผนวก ก กราฟการแปลงค่า.....	99
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์แบบจำลองครอบเอาท์พิวส์ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	102
ภาคผนวก ค การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หามุม α	112

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ฟิวส์แรงสูงชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก.....	9
2.2 ส่วนประกอบหลักของครอบเอาต์ฟิวส์.....	9
2.3 การพุ่งของเปลวไฟและก๊าซของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงชนิดเอ็กซ์แพนชันในขณะที่ฟิวส์ขาดออกจากกัน.....	10
2.4 ฟิวส์แรงสูงชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอก.....	11
2.5 ฟิวส์แรงสูงชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม.....	11
2.6 ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์ที่สำคัญ.....	12
2.7 ส่วนประกอบของตัวฟิวส์ลิงค์ ชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอก.....	13
2.8 ฝาครอบและกระบอกใส่ฟิวส์ลิงค์.....	13
2.9 เมื่อตัวฟิวส์หลอมละลายขาดออกจากกัน กระบอกใส่ฟิวส์จะดกห้อยลง.....	14
2.10 เส้นโค้งของฟิวส์ชนิด K และ T.....	15
2.11 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่หลอมละลายต่ำสุด และเวลาในการกระแสฟอลต์ (fault) ของฟิวส์ 10 K.....	16
2.12 ขนาดแรงดัน 12 kV ระบบเตลดา กระแสโหลด 84 A ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 1370 A และต่ำสุด 1180 A เลือกใช้ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง 100 A 3500 AIC (สมมาตร).....	20
2.13 ขนาดแรงดัน 13.8/24 kV แบบวายต่อลงดิน กระแสโหลด 75 A ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 2400 A และต่ำสุด 990A.....	20
2.14 การใช้ตัดตอนแรงสูงร่วมกับฟิวส์ลิงค์ป้องกันหม้อแปลงในระบบจำหน่าย.....	22
2.15 การใช้ตัดตอนแรงสูงป้องกันคาปาซิเตอร์ในระบบจำหน่าย.....	23
2.16 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก, แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว....	25
2.17 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม.....	26
2.18 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด.....	27
2.19 ขั้นตอนของการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน.....	33
2.20 รูปแบบของปีกประเภทต่างๆ.....	34
2.21 ลักษณะปีกครีบริดตาม IEC 815.....	35
2.22 รูปแบบปีกตามIEC815.....	37
2.23 สนามไฟฟ้าและเส้นตักยกเท่า.....	38
2.24 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ.....	39

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.25 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน.....	41
2.26 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	41
2.27 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย.....	43
2.28 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
2.29 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ.....	46
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ต้องคำนึงถึงเมื่อทำการทดสอบโดยที่ระยะ A, B, C, D มีผลต่อการเกิด วาวไฟตามผิวของอุปกรณ์ทดสอบ.....	50
3.2 แสดงระยะปลอดภัยระหว่างวัสดุทดสอบกับส่วนต่างๆ.....	51
3.3 โครงสร้างกระโจมที่ออกแบบ.....	52
3.4 ภาพสเกทของเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	54
3.5 เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ออกแบบ.....	55
3.6 (ก) ขนาดท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B ที่ได้ทำการออกแบบ (ข) การติดตั้งท่อจ่ายไอน้ำ.....	56
3.7 การจ่ายไอน้ำวิธีการ B เพื่อใช้ทดสอบฉนวน.....	57
3.8 โครงสร้างกระโจมที่ทำจากสแตนเลสสามารถถอดเก็บได้.....	57
3.9 การประกอบโครงสร้างกระโจม.....	58
3.10 โครงสร้างกระโจมคลุมด้วยพลาสติกใส.....	58
3.11 เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ประกอบสร้างขึ้น.....	59
3.12 ท่อจ่ายไอน้ำด้วยวิธีการ B ที่ประกอบสร้างขึ้น.....	61
3.13 รูปแบบของปีกประเภทต่าง ๆ.....	63
3.14 ภาพสเกทของครอบเออร์ทไฟลส์ที่ออกแบบ.....	64
3.15 ภาพสเกทของครอบเออร์ทไฟลส์ต้นแบบที่มีใช้งาน.....	64
3.16 เปรียบเทียบครอบเออร์ทต้นแบบที่มีใช้งานและครอบเออร์ทไฟลส์ที่ออกแบบ.....	65
3.17 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของครอบเออร์ทไฟลส์.....	67
3.18 วิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าของครอบเออร์ทไฟลส์.....	67
3.19 กราฟการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกฉนวนครอบเออร์ทไฟลส์ปีกแรกจาก ด้านบนของครอบเออร์ทไฟลส์ต้นแบบกับครอบเออร์ทไฟลส์ที่ออกแบบ.....	68
3.20 การติดตั้งครอบเออร์ทไฟลส์.....	69
4.1 ครอบเออร์ทไฟลส์ที่ใช้ในการทดสอบพิกัด 22 kV 100 A.....	70
4.2 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง.....	72

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.3 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง.....	73
4.4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงทดสอบ.....	74
4.5 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะปกติ.....	75
4.6 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์.....	77
4.7 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของครอบเอาต์พุต.....	78
4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวที่ใช้ทดสอบที่ระดับแรงดัน 80 kV.....	79
4.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบที่ใช้ทดสอบที่ระดับแรงดัน 80 kV.....	79
4.10 การเตรียมสารเกาลินและเกลือเพื่อจำลองสิ่งเปราะเปื้อน.....	83
4.11 การจำลองสิ่งเปราะเปื้อนของครอบเอาต์พุต.....	84
4.12 การเก็บตัวอย่างสิ่งเปราะเปื้อนเพื่อวัดหาค่า ESDD.....	85
4.13 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนเปียกชื้น.....	88
4.14 กระโจมทดสอบด้วยวิธี Solid layer และวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนเปียกชื้น.....	88
4.15 กระโจมทดสอบด้วยวิธี Solid layer และและวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนเปียกชื้น.....	89
4.16 ก)เครื่องกำเนิดไอน้ำ ข)การวางท่อจ่ายไอ.....	90
4.17 ไอน้ำที่เกิดภายในกระโจมทดสอบ.....	90
4.18 กล้องส่องโคโรนา.....	90
4.19 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันวาบไฟตามผิวนวนในสภาวะเปราะเปื้อน.....	91
4.20 โคโรนาเริ่มเกิดเมื่อระดับความเปราะเปื้อนเล็กน้อย.....	92
4.21 โคโรนาเริ่มเกิดเมื่อระดับความเปราะเปื้อนสูงมาก.....	93

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงความเสียหายเนื่องมาจากครอปเออร์ทีฟิวส์.....	3
1.1(ต่อ) แสดงความเสียหายเนื่องมาจากครอปเออร์ทีฟิวส์.....	4
1.2 แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม.....	6
2.1 ขนาดพิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	17
2.1 (ต่อ) ขนาดพิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง.....	18
2.2 พิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต่ำสุดที่แนะนำให้ใช้ ตามมาตรฐาน ANSI.....	19
2.3 พิกัดแรงดันไฟฟ้าพิกัดตัดกระแสลัดวงจร และพิกัดกระแสต่อเนื่อง.....	21
2.4 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน.....	31
2.5 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือ เลือกใช้วัสดุฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปราะเปื้อน.....	36
3.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	61
3.2 ผลการทดสอบกระโจมทดสอบ.....	61
3.3 ระดับความเปราะเปื้อน.....	62
3.4 เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานและค่าต้นแบบ.....	66
3.5 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ.....	66
4.1 คุณสมบัติของครอปเออร์ทีฟิวส์ที่นำมาทดสอบ.....	70
4.2 Minimum dielectric withstand test voltages.....	71
4.3 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาวไฟตามผิวแห้งสะอาดกระแสสลับ 50 Hz ของ ครอปเออร์ทีฟิวส์ที่ระดับแรงดัน 42.25 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง).....	76
4.4 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วบวก)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอปเออร์ทีฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล.....	81
4.5 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วบวก)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอปเออร์ทีฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กรราวน์.....	81
4.6 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วลบ)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอปเออร์ทีฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล.....	81
4.7 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วลบ)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอปเออร์ทีฟิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กรราวน์.....	82
4.8 ตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ.....	86
4.9 ผลการคำนวณค่า ESDD ตามข้อแนะนำ IEC 507.....	86
4.10 ผลการทดสอบการจำลองความเปราะเปื้อนด้วยวิธีฝุ่นละออง.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

การใช้งานของฉนวนที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งอยู่ภายนอกต้องประสบกับปัญหาผลกระทบ ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน สิ่งประอะเปื้อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากมลภาวะต่างๆ เช่น ไอเกลือ ผุ่นจากโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อมีการสะสมของสิ่งประอะเปื้อนมากขึ้นรวมกับความชื้น ผ่นปรอยๆ จะเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้เกิดการร้าวไฟตามผิว (Flashover) ฉนวนได้ง่าย ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าขัดข้อง ทำให้ความเชื่อถือได้และเสถียรภาพของระบบไฟฟาลดลง การใช้งานฉนวนจึงควรที่จะต้องมีทดสอบเกี่ยวกับผลของสภาวะประอะเปื้อนต่อการเกิดร้าวไฟตามผิวฉนวนอีกด้วย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นเพื่อจำลองสภาวะประอะเปื้อนสำหรับทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยอ้างอิงการออกแบบให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 507 ซึ่งปัจจุบันการทดสอบฉนวนในสภาวะประอะเปื้อนของประเทศไทยยังเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เนื่องมาจากขั้นตอนการทดสอบต้องนำฉนวนไปไว้ในสถานที่ติดตั้งจริงเพื่อให้อยู่ในสภาวะประอะเปื้อนจริงและใช้เวลาติดตั้งให้อยู่ในสภาวะประอะเปื้อน 3 เดือน 6 เดือน หรืออาจจะใช้เวลาถึง 12 เดือน แล้วจึงมาทดสอบในกระโจมไอน้ำ การวัดค่าความประอะเปื้อนหลังจากที่ติดตั้งในสภาวะประอะเปื้อนต้องมีการขนส่งฉนวน ซึ่งอาจจะทำให้สิ่งประอะเปื้อนหลุดออกได้ง่าย ต้องใช้ความระมัดระวัง ขั้นตอนดังกล่าวนี้ ซึ่งเป็นเรื่องที่ยุ่งยากและใช้เวลานานมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบและสร้างห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะประอะเปื้อน เพื่อที่จะสามารถใช้ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงในสภาวะประอะเปื้อน เช่น ลูกถ้วยฉนวน ครอบเอาต์พิวส์ อาเรสเตอร์ ในโครงการนี้เป็นการทดสอบครอบเอาต์พิวส์ในสภาวะประอะเปื้อนที่จำลองจากห้องควบคุมความชื้น และออกแบบครอบเอาต์พิวส์เพื่อใช้งานกับสภาวะประอะเปื้อน เงื่อนไขการออกแบบครอบเอาต์พิวส์ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 815 ทำให้สามารถออกแบบและทดสอบครอบเอาต์พิวส์ที่จะนำไปใช้งานในบริเวณประอะเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบและสร้างห้องจำลองสภาวะประอะเปื้อนสำหรับทดสอบครอบเอาต์พิวส์นี้ จะใช้วัสดุที่ผลิตภายในประเทศเป็นการประหยัดเงินตราของประเทศ ด้วยการลดการพึ่งพาเทคโนโลยี ลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ และจะเป็นประโยชน์อย่างมาก ทาง การทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูงในสภาวะประอะเปื้อนให้ได้ตามมาตรฐาน ส่งผลทำให้ผู้ผลิตฉนวนไฟฟ้าแรงสูงได้พัฒนาฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูงให้ได้มาตรฐานต่อไป และทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

1.2 ที่มาของปัญหา

ดรอปรอเอาร์ท์ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดในระบบจำหน่ายแรงสูง ซึ่งการใช้งานดรอปรอเอาร์ท์ฟิวส์ในบริเวณเปราะเปื้อน เช่น บริเวณที่มีฝุ่น ควัน สารเคมี และไอเกลือเป็นต้น ทำให้เกิดการรวบไฟตามผิวได้ง่าย โดยเฉพาะในช่วงเช้าเมื่อมีหมอกหรือความชื้นจับเกาะที่ผิวฉนวนของดรอปรอเอาร์ท์ฟิวส์ร่วมกับสิ่งเปราะเปื้อนดังกล่าว จะมีกระแสรั่วไหลซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟดับในระบบจำหน่าย ทำให้ความน่าเชื่อถือได้และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง

ด้วยเหตุนี้ทางสมาชิก จึงได้มีความคิดที่จะสร้างห้องควบคุมความชื้นเพื่อจำลองสภาวะความเปราะเปื้อนในการทดสอบดรอปรอเอาร์ท์ฟิวส์ และวิเคราะห์ออกแบบดรอปรอเอาร์ท์ฟิวส์ ให้มีมิติที่เหมาะสมกับระดับความเปราะเปื้อน เพื่อแก้ไขปัญหากล้ากระแสไฟฟ้าขัดข้องในระบบจำหน่ายแรงสูง และเพื่อให้ความน่าเชื่อถือได้ และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดีขึ้น



ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นกับทรอปเอาร์ทไฟวส์

ว/ค/ป	ขนาด	จุดติดตั้ง/จุดเกิดเหตุ	อายุการใช้งาน	ลักษณะการชำรุด
19/2546	33 kV 100A	ภายในเขตพื้นที่ กฟต. 3 ตรงต้นทรอปเอาร์ทฟิวส์คัทเอาร์ท PTA2F-88 บ.กลางนา พิคเคอร์ 4 สถานีตะบ้าย้อย เฟส C ติดตั้งป้องกันไลน์แยก PTA2F-88		ตรงกระบอกฟิวส์ชำรุด
18/2546	100 kV 100A	ภายในพื้นที่ กฟต. 3 ต้นที่ 33 ป้องกันจุดหม้อแปลง พิคเคอร์ 3 ตู้โหวงโก-ลก เฟส A	4 ปี	จุดทรอปเอาร์ทมีรอยอาร์คไหม้
24/1/2546	33 kV 100 A	ภายในพื้นที่ กฟต. 3 ต้นทรอปเอาร์ท PTA2F-58/2 ไลน์แยก PTA2F-58/2 บ.น้อยทอง		สปริงหน้าคอนแทคหลอมละลาย
13/11/ 2546	33 kV	ภายในเขต กฟต. 3 ตรงต้นทรอปเอาร์ทในไลน์แยก	10 ปี	กระบอกฟิวส์เผาไหม้
15/1/2547	100 kV	ในเขต กฟต. 3 ต้นหม้อแปลง บ.ลือโบ๊ะถ้อง	5 ปี	ลักษณะมีรอยอาร์คไหม้

กองวิจัยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค - Research Division Team [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1(ต่อ) ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นกับทรอปเอาร์ทไฟวล์

ว/ค/ป	ขนาด	จุดติดตั้ง/จุดเกิดเหตุ	อายุการใช้งาน	ลักษณะการชำรุด
23/1/47	100 kV	ภายในพื้นที่เขต กฟต. 3 ติดตั้งต้นหม้อแปลง บ.ปาลังขอ	7 ปี	มีรอยอาร์คไหม้
29/1/2547	100 kV 100A	ภายในพื้นที่ กฟต. 3 ต้นหม้อแปลง บ.ตาเต พิคเคอร์ 8 สุโหวงโก-กก เฟส C	5 ปี	ระเบิดแตก
14/2/2547	33 kV 100 A	ภายในเขต กฟต.3 ตรงบริเวณชลประทานบ้านคูนสน รหัส SEA02F-013 พิคเคอร์ 5 สถานี สตูด	15 ปี	กระบอกฟิวส์หักขาด
13/11/ 2546	33 kV	ภายในเขต กฟต. 3 ตรงต้นทรอปเอาร์ทไลน์แยก	10 ปี	กระบอกฟิวส์เผาไหม้

กองวิจัยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค - Research Division Team [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการสร้างห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะเปราะเปื้อนในการทดสอบอุปกรณ์ฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูง
- 2) เพื่อทดสอบดรอเอาร์ทพีวส์ในสภาวะปกติและในสภาวะเปราะเปื้อน
- 3) เพื่อศึกษาโปรแกรมไฟในเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายแรงดันและการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของดรอเอาร์ทพีวส์
- 4) เพื่อออกแบบมิติที่เหมาะสมของดรอเอาร์ทพีวส์ให้เหมาะสมกับระดับความเปราะเปื้อน

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ศึกษามาตรฐานและสร้างห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะเปราะเปื้อน
- 2) ทดสอบดรอเอาร์ทพีวส์ในสภาวะปกติและในสภาวะเปราะเปื้อน
- 3) ใช้โปรแกรมไฟในเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายแรงดันและการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของดรอเอาร์ทพีวส์
- 4) ออกแบบมิติที่เหมาะสมของดรอเอาร์ทพีวส์ให้เหมาะสมกับระดับความเปราะเปื้อน

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม

การทำงาน	พ.ศ.2549					พ.ศ.2550						
	ภาคเรียนที่ 1					X	ภาคเรียนที่ 2					
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1. ศึกษาวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง	วางแผน	วางแผน	วางแผน									
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	วางแผน	วางแผน	วางแผน									
3. ศึกษามาตรฐานการออกแบบและการทดสอบ	วางแผน	วางแผน	วางแผน									
4. ศึกษาการใช้โปรแกรม Finite Element	วางแผน	วางแผน	วางแผน									
5. สร้างกระโจนทดสอบ	วางแผน	วางแผน	วางแผน									
6. จัดทำข้อมูลนำเสนอภาคเรียนที่ 1				วางแผน	วางแผน							
7. สร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำ					วางแผน		วางแผน					
8. ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ในสภาวะปกติและในสภาวะเปราะเปื้อน							วางแผน	วางแผน	วางแผน			
9. ออกแบบและวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้า							วางแผน	วางแผน	วางแผน			
10. สรุปและวิเคราะห์ผล								วางแผน	วางแผน	วางแผน		
11. จัดทำปฏิทินพจนธ์ฉบับสมบูรณ์									วางแผน	วางแผน	วางแผน	



วางแผน



ดำเนินการจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสร้างห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะเปราะเพื่อใช้ทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ตามมาตรฐาน IEC 507 เพื่อใช้ทดสอบครอบเอาต์พิวส์ในสภาวะเปราะเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด
- 2) สามารถออกแบบครอบเอาต์พิวส์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปราะเป็นได้
- 3) สามารถประหยัดเงินตราของประเทศ ด้วยการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีและการนำเข้าเครื่องมือต่างประเทศลง
- 4) สามารถสร้างบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ และความเชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ตรงกับความต้องการภาคอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง (dropout fuse cutout)

ฟิวส์คัทเอาต์เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินพิกัดในระบบจำหน่ายแรงสูงที่มีราคาถูกที่สุด การติดตั้งง่าย และหลักการทำงานไม่ต้องอาศัยกลไกยุ่งยากเหมือนอุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่น มีฟิวส์ลิ่งค์เป็นตัวทำหน้าที่หลอมละลายตัดวงจรออกเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัดตั้งแต่ 2 เท่าของขนาดฟิวส์ลิ่งค์ขึ้นไป ลักษณะการทำงานของฟิวส์ลิ่งค์จะเป็นแบบ Extremely inverse time characteristic คือกระแสเกินพิกัดยิ่งมีค่ามาก เวลาทำงานของฟิวส์ลิ่งค์ยิ่งเร็วขึ้น ความร้อนในการหลอมละลายฟิวส์ลิ่งค์จะเป็นสัดส่วนกับแบบและชนิดของฟิวส์คัทเอาต์ที่ใช้งาน [15]

ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง มีคุณสมบัติดังนี้ [3]

(ก) ต้องมีค่าคงทนต่อค่าแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นฟ้าผ่า ซึ่งหมายถึงค่าสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน (BIL = basic impulse insulation level) ที่ฉนวนสามารถทนอยู่ได้

(ข) ต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรง เหมาะสมที่จะติดตั้งกับเสาไฟฟ้าหรือคอนสายได้

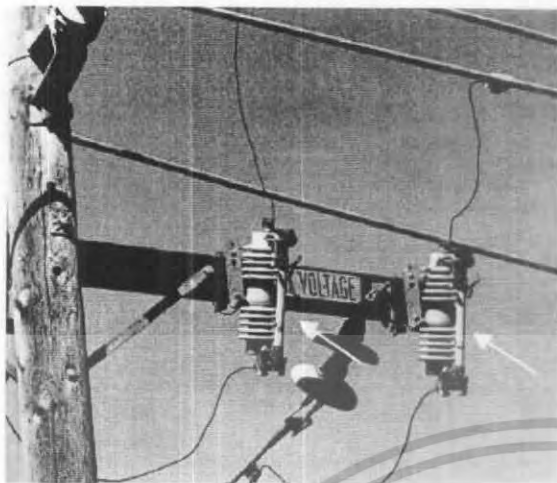
(ค) แรงดันใช้งาน (operating voltage) จะต้องเหมาะสมกับระบบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้อย่างเช่น 12 kV, 22 kV, 24 kV

2.1.1 ชนิดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง [3]

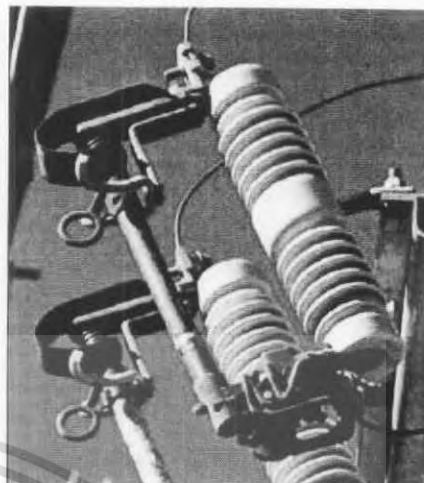
ฟิวส์ตัดตอนแรงสูงแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอกและชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม ส่วนการเลือกใช้งานจะต้องพิจารณาสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก

2.1.1.1 ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก (Open type)

ดังรูป 2.1 ฟิวส์ประเภทนี้เป็นเอ็กซ์แพนชัน (expansion) คือเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีการพุ่งระบายของไฟและก๊าซ ในขณะที่ตัวฟิวส์หลอมขาดออกจากกัน อันเนื่องมาจากการลัดวงจรดังรูปที่ 2.3

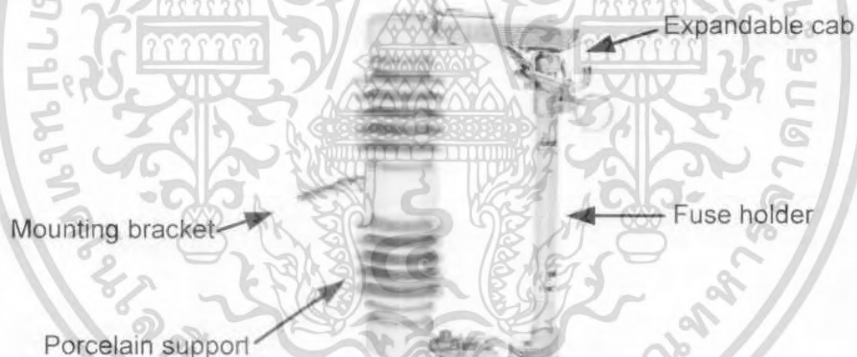


(ก) Arm Mounted Cutout with Universal Fuse



(ข) Fuse link

รูปที่ 2.1 ฟิวส์แรงสูงชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอ

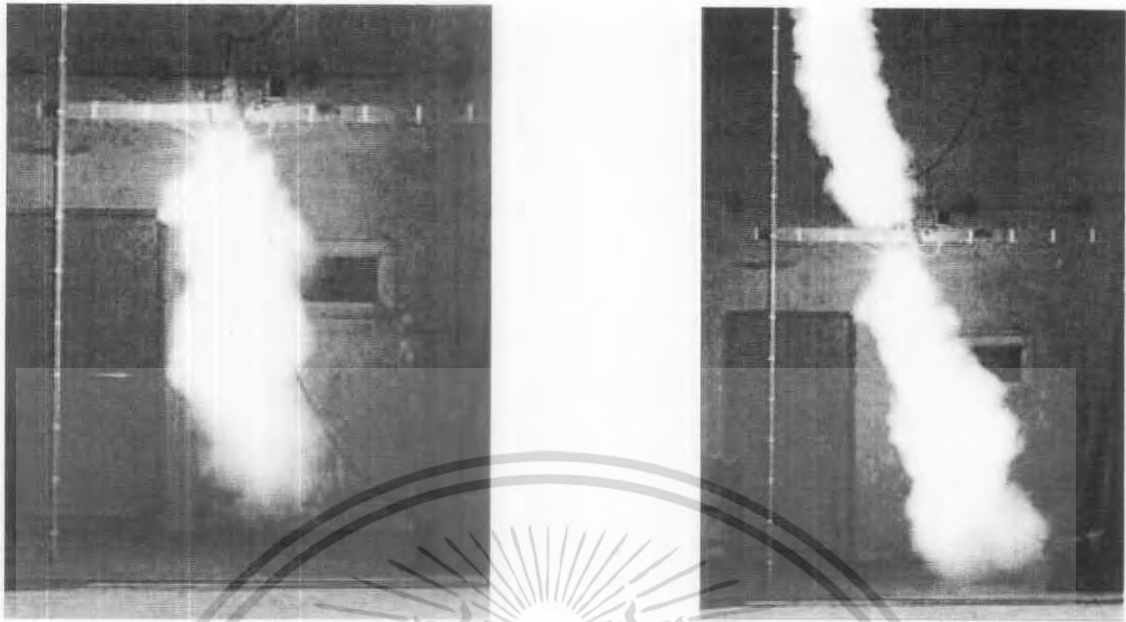


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของครอบเอาต์ฟิวส์

จากรูปที่ 2.2 สามารถอธิบายส่วนประกอบหลัก ๆ ได้ดังนี้

1. Mounting bracket สำหรับยึดครอบเอาต์ฟิวส์เข้ากับคอนสาย
2. Porcelain support เป็นฉนวนสำหรับติดตั้งฟิวส์คัทเอาต์กับ Mounting bracket
3. Fuse holder เป็นกระบอที่ใส่ฟิวส์ลิงค์ บุกภายในด้วยไฟเบอร์
4. Expandable cap เป็นฝาครอบอยู่บนส่วนหัวของกระบอฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Single-vent cutout

(ข) Dual-vent cutout

รูปที่ 2.3 การพุ่งของเปลวไฟและก๊าซของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงชนิดอิเล็กทรอนิกส์แพนชั่นในขณะที่ฟิวส์ขาดออกจากกัน

การทำงานของฟิวส์คัทเอาต์จะเกิดขึ้นเมื่อ มีกระแสเกินพิกัดมากพอที่จะทำให้ส่วนหลอมละลายของฟิวส์ลึงค์เริ่มหลอมละลาย ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ไฟเบอร์ที่บอบอยู่ภายในกระบอกฟิวส์ร้อน และทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซภายในกระบอกฟิวส์ ก่อนที่ส่วนหลอมละลายจะขาดออกจากกัน จะเกิดการขึ้น ซึ่งอาร์คนี้จะถูกยึดและทำให้ดับไปโดยการดันออกของก๊าซทางส่วนล่างหรือส่วนหัวของกระบอกฟิวส์ เกิดแรงดึง ทำให้กระบอกฟิวส์ตกลงมา [15]

2.1.1.2 ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอ (Open-link type)

เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชันเหมือนแบบแรก เพียงแต่ตัวฟิวส์ (fuse link) เป็นชนิดที่ไม่ได้บรรจุในกระบอฟิวส์ [3] ดังรูปที่ 2.4

2.1.1.3 ชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม (Enclosed type)

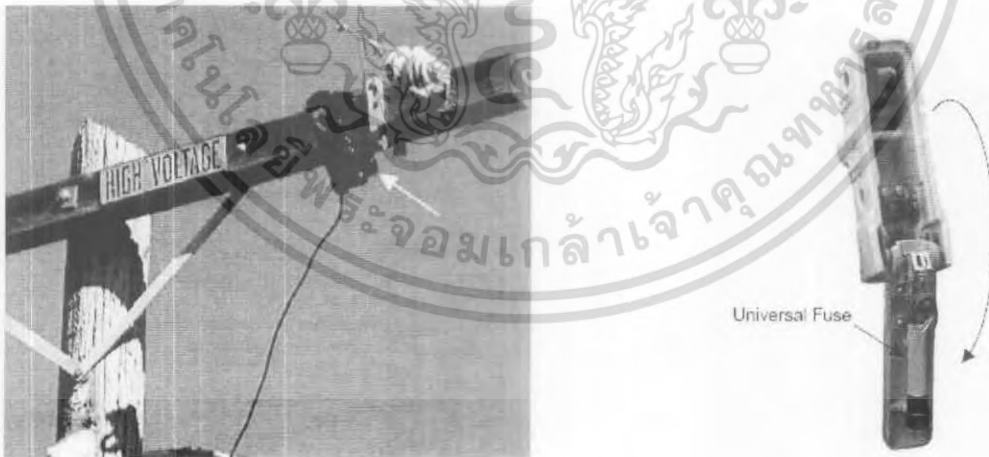
เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชันแตกต่างจากแบบแรก เพียงแต่กระบอฟิวส์ ขั้วต่อสายใส่บรรจุอยู่ในกล่องลอมปิด [3] ดังรูปที่ 2.5



(ก) Arm Mounted Cutout with Open Link Fuse

(ข) Open Link Fuse

รูปที่ 2.4 ฟิวส์แรงสูงชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอ



(ก) Arm Mounted Enclosed Cutout with Universal Fuses

(ข) Enclosed Cutouts

รูปที่ 2.5 ฟิวส์แรงสูงชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ตัวฟิวส์ลิงค์ (fuse link)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือตัวฟิวส์ลิงค์ชนิดต้องใส่ในกระบอกและชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอก แต่ละชนิดมีพิกัดกระแสไม่เกิน 200 A [3]

2.1.2.1 ตัวฟิวส์ลิงค์ชนิดต้องใส่ในกระบอก

ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์ที่สำคัญมีดังนี้[15]

- ส่วนหัวของฟิวส์ (Button head) ลักษณะเป็นปม มีหน้าสัมผัสให้กระแสไหลผ่านได้สะดวก
- ส่วนหลอมละลาย (Fusible element) จะอยู่ตอนกลางของฟิวส์ลิงค์ ทำด้วยวัสดุแตกต่างกันออกไปตามชนิดของฟิวส์ลิงค์ เช่น ทำด้วยเงิน ดีบุก เป็นต้น โดยมีความยาวและพื้นที่หน้าตัดเป็นตัวกำหนดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา (Time-current characteristic curve)
- ส่วนหางฟิวส์ (Leader) เป็นสายทองแดงตีเกลียวสำหรับยึดฟิวส์ลิงค์เข้ากับตัวกระบอกฟิวส์



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์ที่สำคัญ

2.1.2.2 ตัวฟิวส์ลิ่งชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอกละลาย

มีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ ส่วนหัวตั้ง ส่วนท่อจำกัดอาร์ก และส่วนหลอมละลาย [3] ดัง รูป 2.7

2.1.3 กระบอกลำไส้ไฟฟิวส์ลิ่ง (fuse holder)

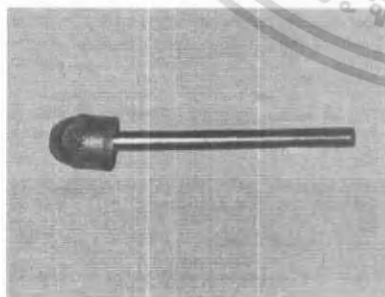
โดยทั่วไปตัวกระบอกลำไส้ไฟฟิวส์ลิ่งจะทำด้วยโลหะเพื่อให้เบาและมีความแข็งแรงพอที่จะทนแรงดันและประกายไฟ [3] ดังรูปที่ 2.8

ขนาดของกระบอกลำไส้ไฟฟิวส์ลิ่งกำหนดไว้ดังนี้

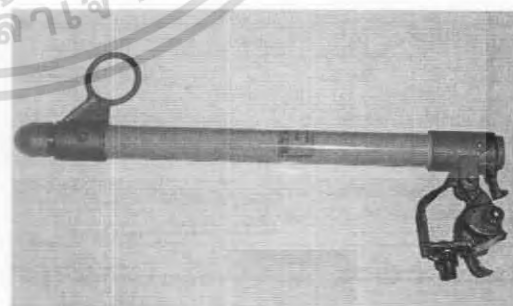
- (ก) รูขนาด 5/16 นิ้ว สำหรับใช้กับฟิวส์ขนาด 1-50 A
- (ข) รูขนาด 7/16 นิ้ว สำหรับใช้กับฟิวส์ขนาด 60-100 A
- (ค) รูขนาด 3/4 นิ้ว สำหรับใช้กับฟิวส์ขนาด 125-200 A



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของตัวฟิวส์ลิ่ง ชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอกละลาย



(ก) ฝาครอบหัวกระบอกลำไส้ไฟฟิวส์



(ข) กระบอกลำไส้ไฟฟิวส์

รูปที่ 2.8 ฝาครอบและกระบอกลำไส้ไฟฟิวส์ลิ่ง

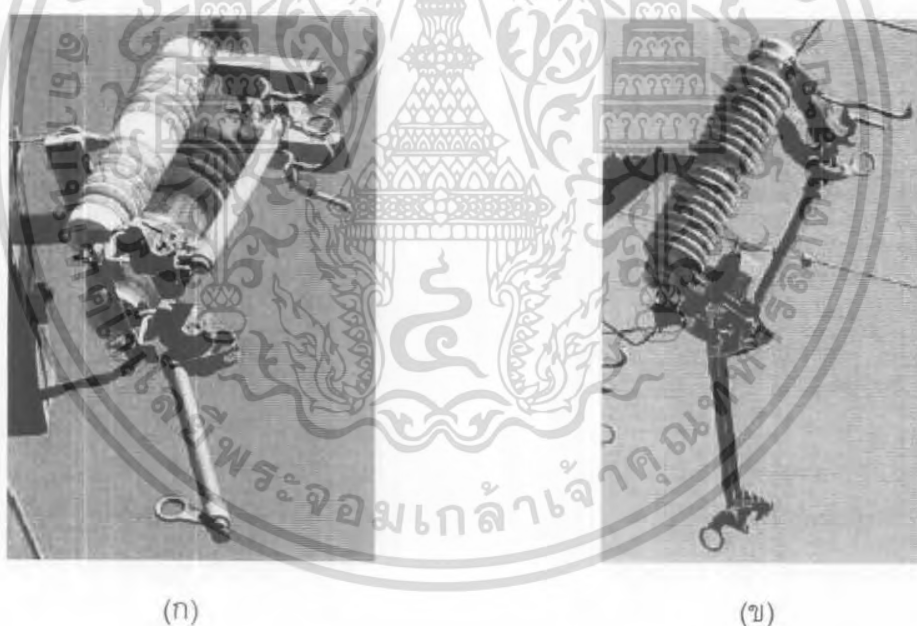
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ลักษณะการทำงานของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง

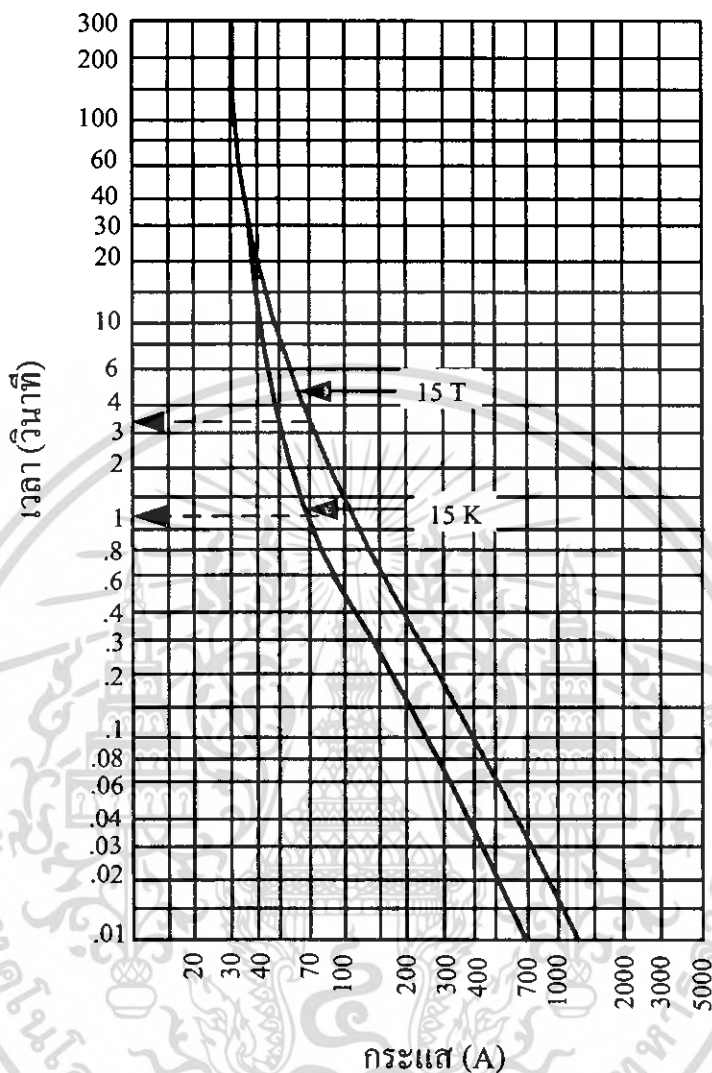
เมื่อเกิดการลัดวงจรตัวฟิวส์จะหลอมละลายและเกิดการอาร์ก ความร้อนในรูปประกายไฟหรือเปลวไฟ ความดันและก๊าซที่เกิดขึ้นภายในกระบอกฟิวส์หรือสิ่งห่อหุ้มตัวฟิวส์ ก็จะถูกขับสู่ภายนอกพร้อมกับขับส่วนของตัวฟิวส์ที่ขาดออกจากกันที่อยู่ส่วนล่าง ให้ห่างออกจากกันมากพอที่จะไม่เกิดการอาร์กต่อไปได้ ส่วนของก๊าซและความร้อนที่ถูกขับออกมานั้น เป็นส่วนที่อาจทำให้อุปกรณ์และสายไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างและบนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการออกแบบติดตั้งฟิวส์ตัดตอนแรงสูงทั้งสามประเภทข้างต้น จะต้องคำนึงถึงภายหลังจากที่ตัวฟิวส์ขาดออกจากกันแล้วด้วย [3]

2.1.5 ความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง [3]

เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกระแสของฟิวส์แรงสูง จำเป็นต้องใช้ในการเลือกขนาดที่เหมาะสมสำหรับป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า คาปาซิเตอร์ และสายใต้ดิน เป็นต้น ตามมาตรฐาน NEMA ตัวฟิวส์แรงสูงได้แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเร็ว (fast) และชนิดช้า (slow) โดยใช้เครื่องหมาย K (kwick) และ T (tardy) ตามลำดับ ดังรูป 2.10 ความแตกต่างของเส้นโค้งเวลาต่อกระแส

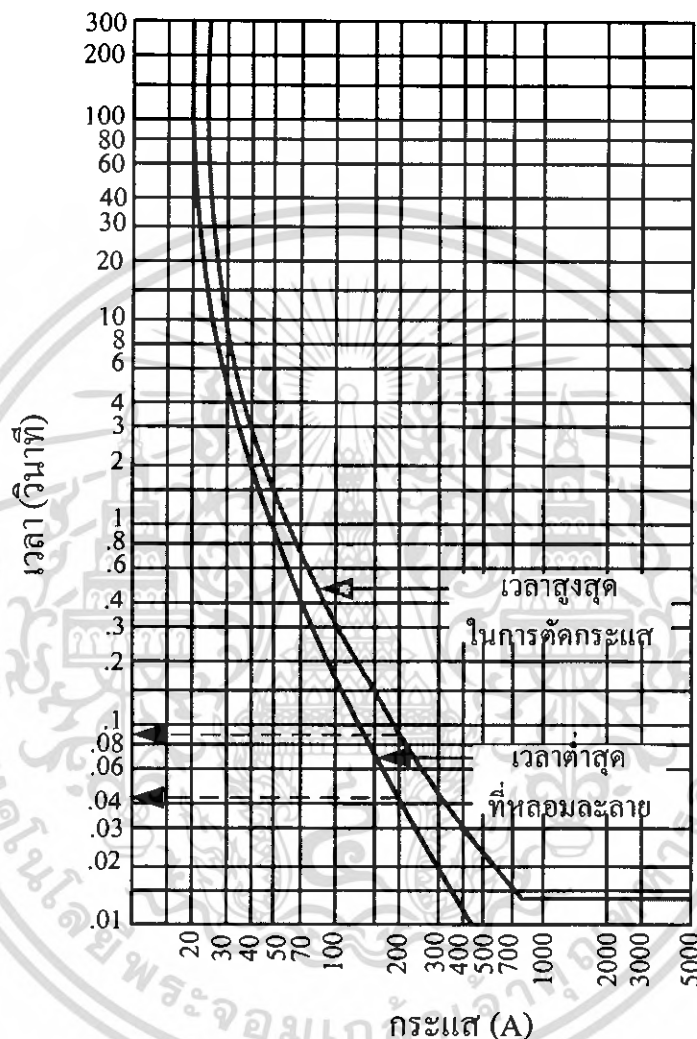


รูปที่ 2.9 เมื่อตัวฟิวส์หลอมละลายขาดออกจากกัน กระบอกใส่ฟิวส์จะตกห้อยลงมา



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งของฟิวส์ชนิด K และ T เวลาหลอมละลายต่ำสุดที่พิกัดกระแสเดียวกัน เช่น พิกัดกระแสเดียวกัน 70 A ฟิวส์ชนิด 15 K จะหลอมละลายในเวลา 1.2 วินาที ส่วนฟิวส์ชนิด 15 T จะหลอมละลายในเวลา 3.4 วินาที

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่หลอมละลายต่ำสุด (Minimum melting time) และ เวลาสูงสุดในการตัดกระแสฟอลต์ (maximum clearing fault time) ดังรูปที่ 2.11[15] ขนาดพิกัด กระแสของตัวฟิวส์แรงสูงจะมีขนาด 1 , 2 , 3 , 5 , 6 , 8 , 10 , 12 , 15, 20 , 25 , 30 , 40 , 50 , 65 , 80 , 100 , 140 , 200 A



รูปที่ 2.11 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่หลอมละลายต่ำสุด และเวลาในการกระแสฟอลต์ (fault) ของฟิวส์ 10 K ถ้ากระแสฟอลต์ 200A ฟิวส์ 10 K จะหลอมละลายในเวลา 0.044 วินาที และเวลาสูงสุดในการตัดกระแสฟอลต์ 0.09 วินาที

2.1.6 การเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง[3]

โดยปกติฟิวส์ตัดตอนแรงสูง จะกำหนดค่าแรงดันพิกัดสูง พิกัดแรงดันอิมพัลส์ (BIL) พิกัดกระแสต่อเนื่อง และพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ตามมาตรฐาน ANSI และ IEC ในตารางที่ 2.1

2.1.6.1 การเลือกพิกัดกระแสต่อเนื่อง

ต้องเลือกให้พิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงมากกว่ากระแสต่อเนื่องของระบบ เช่น กระแสต่อเนื่อง 150 A ต้องเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง 200 A

2.1.6.2 การเลือกแรงดันที่กำหนด

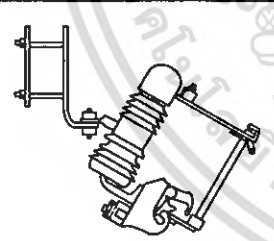
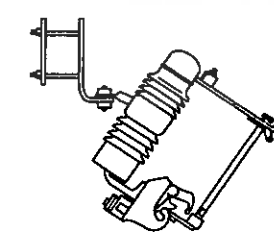
โดยปกติต้องเลือกขนาดของแรงดันที่กำหนดสูงสุดของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงให้มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันของระบบ และมีกฎเกณฑ์ดังนี้

(ก) ระบบไม่ต่อลงดิน (Unground system) แรงดันที่กำหนดสูงสุดของตัดตอนแรงสูงจะต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อเฟสของระบบ

(ข) ระบบต่อลงดิน (ground system)

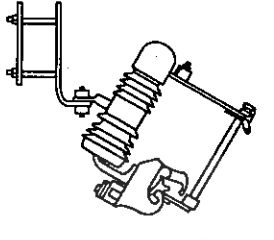
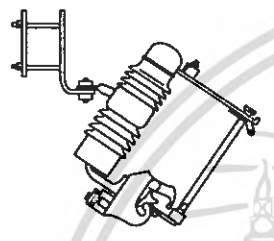
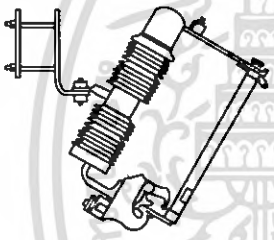
เมื่อต่อสายแยกเฟสเดียว แรงดันที่กำหนดสูงสุดของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อแรงดันกราวด์ของระบบ

ตารางที่ 2.1 ขนาดพิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง

รูปร่าง	ขนาดพิกัดมาตรฐาน ANSI				
	แรงดัน		กระแสต่อเนื่อง A	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (A)	
	สูงสุด kV	BIL kV		ฮสมมาตร	สมมาตร
	15	95	100	5000	3500
	(12)	(75)	100	8000	5600
			100	1200	8000
			200	16000	10600
	15	95			
	(12)	(75)	100	16000	10600
	27	125	100	4000	3000
	(24)	(125)	100	8000	5600
			10000	71000	
			200	12000	8000

() ตัวเลขในวงเล็บคือมาตรฐาน IEC

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง

รูปร่าง	ขนาดฟิวส์มาตรฐาน ANSI				
	แรงดัน		กระแสต่อเนื่อง A	กระแสขณะอินเทอร์รัพต์ (A)	
	สูงสุด kV	BIL kV		อสมมาตร	สมมาตร
	27 (24)	125 (125)	100 200	16000 12000	10600 8000
	38	150	100 200	8000	5000
	38 (36)	200 (170)	100 200	8000	5000

() ตัวเลขในวงเล็บคือมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบ 3 เฟส แรงดันที่กำหนดสูงสุดของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อเฟสของระบบ ซึ่งอาจจะบุพิกัดแรงดันเป็น 7.8/13.5 kV หรือ 15/27 kV ดังตารางที่ 2.2

2.1.6.3 การเลือกขนาดระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน หรือค่า BIL

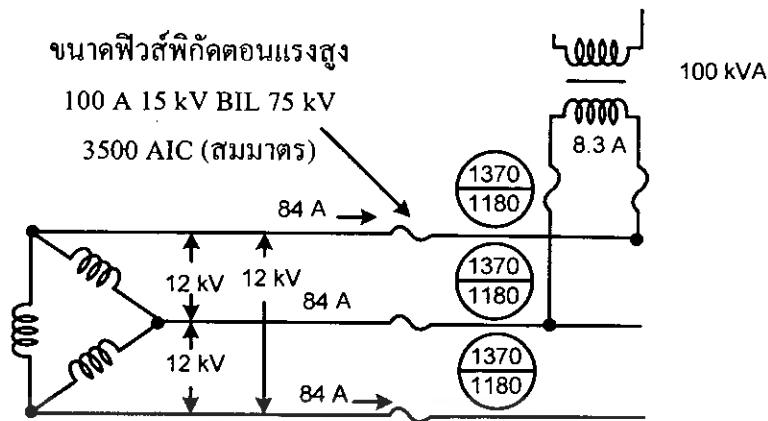
การเลือกขนาดค่า BIL ของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง ให้กำหนดค่าตามมาตรฐาน IEC

2.1.6.4 การเลือกพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์

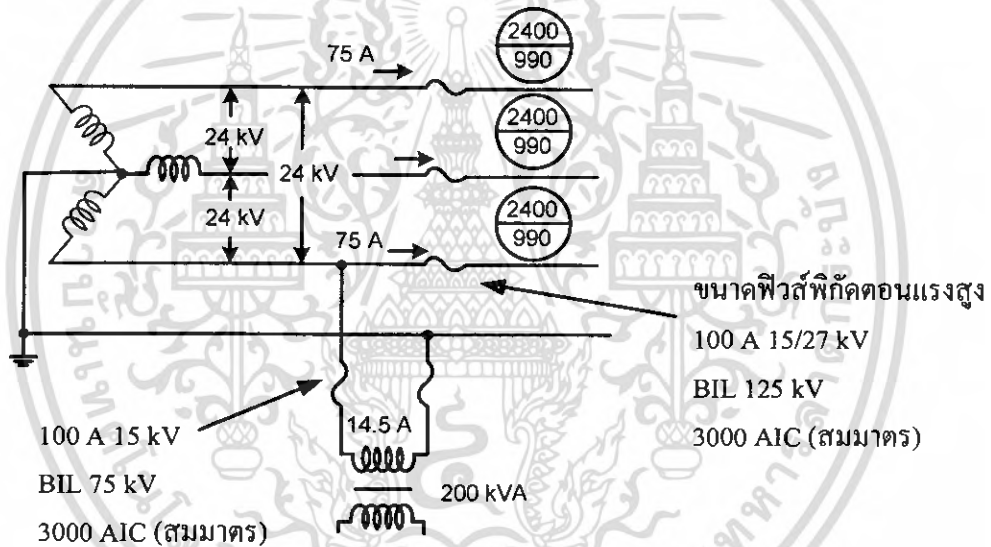
การเลือกพิกัดขนาดพิกัดกระแสตัดตอนของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง ต้องให้มากกว่าหรือเท่ากับกระแสลัดวงจรที่จุดลัดวงจรที่คำนวณได้ ดังรูปที่ 2.12 และในตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูล ในการเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง แรงดันที่กำหนด 12 kV พิกัดกระแสต่อเนื่อง 100 A ค่า BIL สูงสุด 75 kV พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 3500 A สมมาตร ส่วนการเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูงระบบบวายต่อลงดิน ดังรูปที่ 2.13 จากตารางที่ 2.1 และ 2.2 ควรเลือกพิกัดแรงดันตอน 15/ 27 kV พิกัดกระแสต่อเนื่อง 100 A ค่า BIL สูงสุด 125 kV พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 3000 A สมมาตร ส่วนหม้อแปลงเฟสเดียวขนาด 200 kVA กระแสโหลด 14.5 A ($200/13.8=14.5$) เลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง 15 kV พิกัดกระแสต่อเนื่อง 100 A พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 3000 A สมมาตร

ตารางที่ 2.2 พิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต่ำสุดที่แนะนำให้ใช้ ตามมาตรฐาน ANSI

แรงดันระบุของระบบ (kV)	แรงดันที่กำหนดสูงสุด (kV)	
	เฟสต่อกราวด์	เฟสต่อเฟส
12 Δ	-	15
6.9/12 $Y_{\frac{1}{2}}$	7.8	7.8/13.5
6.9/12 $Y_{\frac{1}{2}}$	-	7.8/13.5
13.8/24 $Y_{\frac{1}{2}}$	27	15/27
19/33 $Y_{\frac{1}{2}}$	27	38



รูปที่ 2.12 ขนาดแรงดัน 12 kV ระบบเดลตา กระแสไหลต 84 A ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 1370 A และต่ำสุด 1180 A เลือกใช้พิวส์ตัดตอนแรงสูง 100 A 3500 AIC (สมมาตร)



รูปที่ 2.13 ขนาดแรงดัน 13.8/24 kV แบบวายต่อลงดิน กระแสไหลต 75 A ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 2400 A และต่ำสุด 990 A

2.1.7 การป้องกันบริภัณฑ์ไฟฟ้า

กฟผ. ได้จัดซื้อฟิวส์คัทเอาต์แบบเปิด (Open) มาใช้งาน ติดตั้งเป็นอุปกรณ์ป้องกันระบบจำหน่ายแรงสูง และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น หม้อแปลง และคาปาซิเตอร์ โดยแบ่งตามพิกัดแรงดันไฟฟ้าพิกัดตัดกระแสลัดวงจร และพิกัดกระแสต่อเนื่อง ได้ดังนี้ [15]

2.1.7.1 การใช้ฟิวส์ลิ่งค์ป้องกันหม้อแปลง

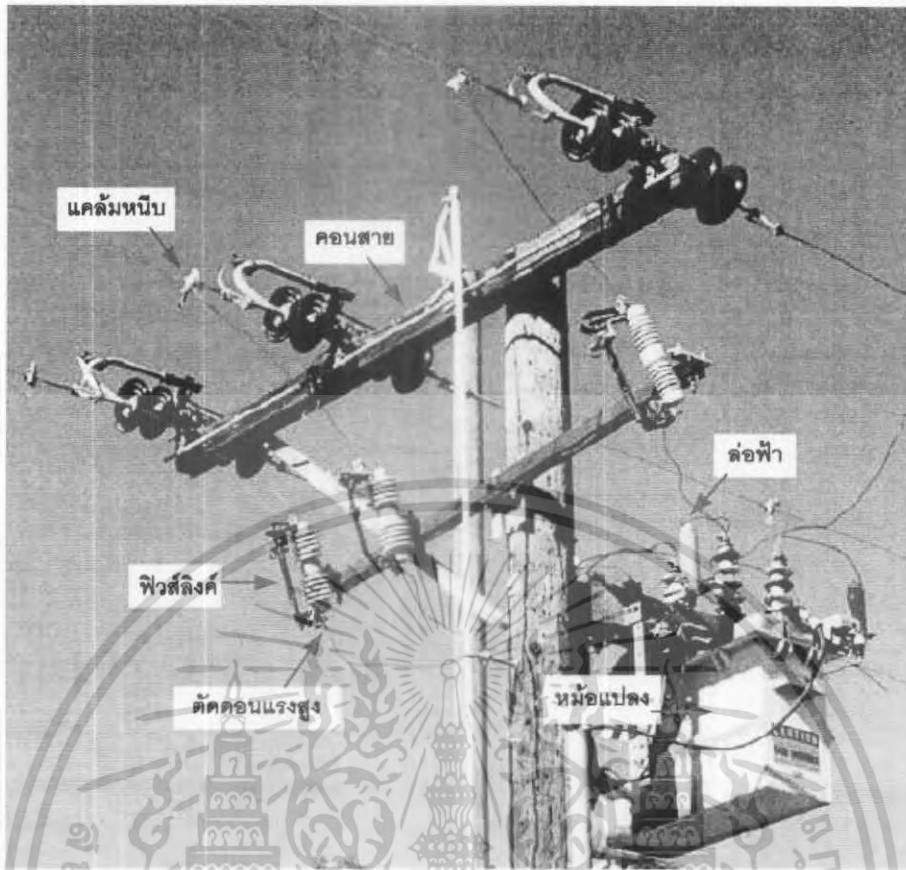
หม้อแปลงแต่ละลูกต้องมีการป้องกันกระแสเกินโดยเฉพาะถ้าใช้ฟิวส์พิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ต้องไม่เกิน 250 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสด้านไฟฟ้าเข้าของหม้อแปลง ทั้งนี้เพื่อป้องกันโหลดเกินและป้องกันระบบในสภาวะลัดวงจร การเลือกขนาดฟิวส์ตามขนาดหม้อแปลงดังในตารางที่ 2.3 ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ฟิวส์ขาดในขณะที่กระแสพุ่งเข้า (inrush current) เมื่อสับต่อวงจรหม้อแปลงเข้ากับระบบไฟฟ้า ตัวอย่างการเลือกขนาดแสดงในตารางที่ 2.3 [3]

ตารางที่ 2.3 พิกัดแรงดันไฟฟ้าพิกัดตัดกระแสลัดวงจร และพิกัดกระแสต่อเนื่อง[15]

ระบบ (กิโลโวลต์)	พิกัดกระแสต่อเนื่อง (แอมแปร์)	พิกัดกระแสลัดวงจร (แบบสมมาตรกิโล แอมแปร์)
11	100	5.6
22	100	5.6
22	200	5.6
22	100	8*
22	200	8**
33	100	5.6

หมายเหตุ

- * - ติดตั้งเป็นอุปกรณ์ป้องกัน พืที.และหม้อแปลง Station service ในโครงสร้างสวิตเกียร์ ที่สถานีควบคุมการจ่ายไฟ
- ติดตั้งเป็นอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง คาปาซิเตอร์ และระบบจำหน่ายแรงสูงในบริเวณที่มีค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical fault current) สูงกว่า 5.6 กิโลแอมแปร์
- ** - ติดตั้งเป็นอุปกรณ์ป้องกันระบบจำหน่ายแรงสูงที่มีโหลดมากกว่า 100 แอมแปร์ แต่ไม่เกิน 200 แอมแปร์ และเป็นบริเวณที่มีค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรสูงกว่า 5.6 กิโลแอมแปร์



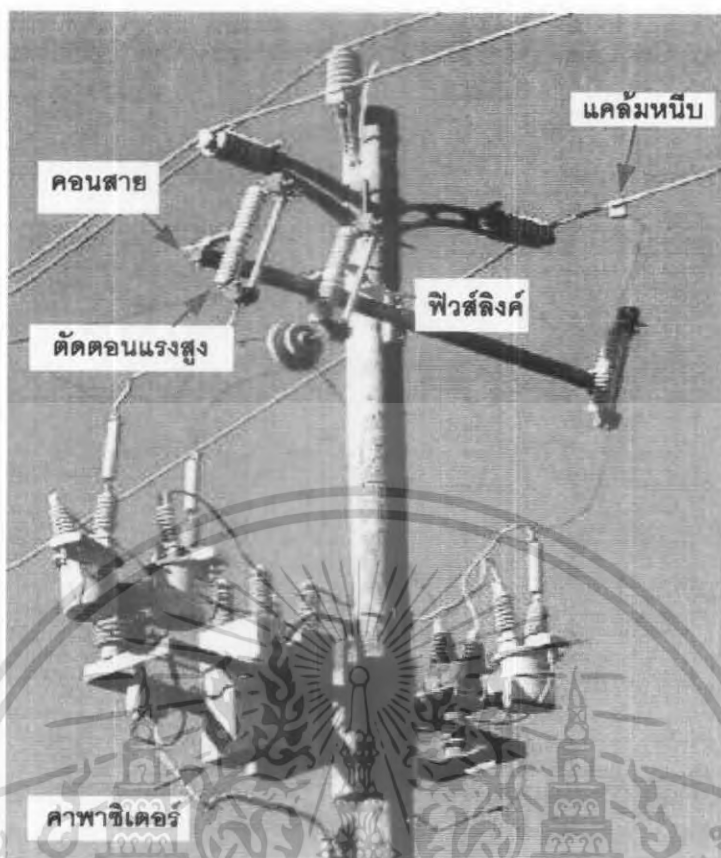
รูปที่ 2.14 การใช้ตัดตอนแรงสูงร่วมกับฟิวส์ลิงค์ป้องกันหม้อแปลงในระบบจำหน่าย

2.1.7.2. การใช้ฟิวส์ลิงค์ป้องกันคาปาซิเตอร์

คาปาซิเตอร์ในระบบแรงสูงจะเป็นชนิดเฟสเดียวแล้วนำมาต่อแบ่งคั่นภายนอกให้เป็นสามเฟส การเลือกใช้ฟิวส์ลิงค์มาป้องกันคาปาซิเตอร์นั้น ต้องเลือกขนาดให้ถูกต้องและเหมาะสม โดยที่ฟิวส์ลิงค์จะต้องตัดวงจรไฟฟ้าออกในขณะที่เกิดฟอลต์ที่คาปาซิเตอร์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันคาปาซิเตอร์เสียหาย ในการเลือกขนาดฟิวส์สำหรับป้องกันคาปาซิเตอร์ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้ [3]

- (ก) ขนาดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ลิงค์ต้องมีค่า 135 เปอร์เซ็นต์ของฟักัดกระแสคาปาซิเตอร์
- (ข) ฟิวส์ลิงค์ต้องมีความคงทนต่อกระแสทรานเซียนต์ในขณะที่คาปาซิเตอร์เก็บประจุและคายประจุ
- (ค) ฟิวส์ลิงค์จะต้องตัดกระแสภายใน 5 นาที ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่ากระแสลัดวงจร
- (ง) ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดไม่ควรเกิน 5000 A สำหรับชุดคาปาซิเตอร์ 150 kvar และค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดไม่ควรเกิน 4000 A สำหรับชุดคาปาซิเตอร์ 100 kvar
- (จ) เวลาสูงสุดในการตัดกระแสของฟิวส์ลิงค์ต้องให้สัมพันธ์กันกับไซนที่มีถึงบรรจุคาปาซิเตอร์มีโอกาสแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การใช้ตัดตอนแรงสูงป้องกันคาปาซิเตอร์ในระบบจำหน่าย

2.2 แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า ส่วนประการที่สองเป็นแรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรในระบบ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น โดยช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกิน มีค่าแตกต่างกัน การเกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2 เท่า ของฟักัดแรงดันซึ่งไปไม่เป็นอันตรายต่อระบบส่งจ่ายมากนัก แต่แรงดันเกินฟ้าผ่าจะทำอันตรายกับระบบส่งจ่าย เนื่องจากขนาดของแรงดันสูงเป็นล้านโวลต์เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายโดยตรง

2.2.1 แรงดันเกินภายนอก

เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบเดินสายอยู่ภายนอกซึ่งอยู่ในอากาศ ดังนั้นระบบสายส่งจึงมีโอกาสสูงมากที่จะฟ้าผ่าได้ ทั้งในกรณีผ่าลงโดยตรง หรือการดีสชาร์จในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่งแรงสูง แรงดันเกินนี้สามารถคำนวณได้ถ้าหากทราบรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยอาศัยหลักการคิดคำนวณตามทฤษฎีของคลื่นจร (Traveling Wave Theory) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

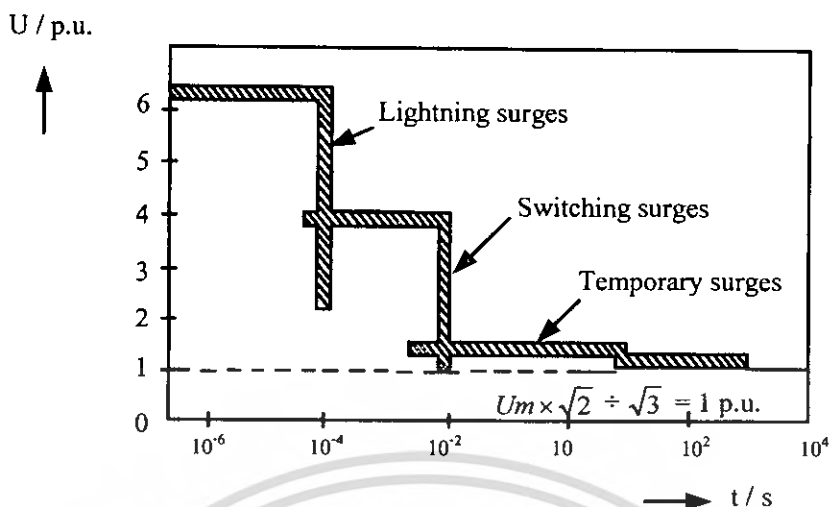
ทฤษฎีการคำนวณวงจร RCL รูปลักษณะรูปคลื่นแรงดันเกินภายนอกหรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) นี้จะมีช่วงหน้าคลื่น หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ายอดนั้นสั้นมาก คือ อยู่ในช่วง 1-2 μs และช่วงหางคลื่น คือแรงดันลดลงครึ่งหนึ่งของค่ายอดในช่วงเวลาประมาณ 40 - 60 μs แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีค่ายอดคลื่นสูงมากประมาณ 10 เพอร์ยูนิตหรือมากกว่านั้น จะเป็นอันตรายกับระบบส่งจ่ายอย่างมาก จำเป็นที่จะต้องรีบกำจัดออกจากระบบเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย โดยทั่วไปการบอกขนาดของแรงดันเกินจะบอกด้วยตัวเลข 2 ตัวอยู่ในหน่วยของเวลาซึ่งเขียนอยู่ในรูป T_1/T_2 (T_1 = ช่วงเวลาหน้าคลื่น, T_2 = ช่วงเวลาหางคลื่น)

2.2.2 แรงดันเกินภายใน

สาเหตุที่เกิดแรงดันเกินภายใน อาจเนื่องจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจรทั้งในกรณีการทำงานของผู้ปฏิบัติงานและการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้นแรงดันเกินดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสวิตช์ เรียกว่าแรงดันเกินสวิตซ์ (Switching Overvoltage) หรืออิมพัลส์แบบสวิตซ์ (Switching Impulse) หรือเกิดจากการลัดวงจรเนื่องจากความบกพร่องของฉนวน หรือเกิดจากแรงดันเกินภายนอก คือ แรงดันฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดสปาร์กหรือวาบไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความสกปรก เปียกฝน ขึ้นด้วยหมอก น้ำค้าง หรือเกิดลัดวงจรเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม หรือเกิดจากวงจรรีโซแนนซ์ เพราะค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ในสายส่งรูปลักษณะของคลื่นแรงดันเกินภายในนี้จะช้ากว่าแรงดันเกินภายนอกคือช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง 100 - 300 μs และช่วงหางคลื่นอยู่ในช่วง 2,000- 3,000 μs แรงดันเกินสวิตซ์นี้ไม่มีความหมายต่อการทดสอบระดับการฉนวนที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำกว่า 300 kV แต่ที่ระบบแรงดันสูงกว่า 300 kV การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ซึ่งจะมีความหมายมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แรงดันเกินที่เกิดจากการสวิตซ์มีค่ายอดคลื่นสูงประมาณ 4 เพอร์ยูนิต

2.2.3 แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Over voltage)

จะแตกต่างจากแรงดันเกินเนื่องจากคลื่นเสิร์จ ช่วงความถี่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะมีตั้งแต่ไม่กี่เฮิรตซ์ไปจนถึงหลายร้อยเฮิรตซ์ และมีช่วงระยะเวลาจากไม่กี่วินาทีไปจนถึงเป็นชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดฟอลต์) รูปแบบทั่วไปส่วนใหญ่ของแรงดันเกินชั่วคราวจะเกิดบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ เมื่อมีฟอลต์ลงดินแบบ 1 เฟส หรือ 2 เฟสเกิดขึ้น แรงดันเกินแบบนี้มีค่าไม่เกิน $\sqrt{3}$ เพอร์ยูนิต และไม่มีอันตรายกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันเกินภายนอก, แรงดันเกินภายในและแรงดันเกินชั่วคราว

2.2.4 การทดสอบอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซียนต์แบบไม่เป็นรายคาบ (Non-periodic Transient Voltage) ซึ่งค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากศูนย์ไปถึงค่ายอดแล้วค่อย ๆ ลดลงไปถึงศูนย์อย่างช้า ๆ ในทางปฏิบัติอาจแบ่งแรงดันอิมพัลส์ตามลักษณะรูปคลื่นหรือสาเหตุที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ชนิด คือ[3]

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse) มีสาเหตุมาจากแหล่งกำเนิดอื่นภายนอกระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติที่ควบคุมไม่ได้
2. แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Switching Impulse) มีต้นเหตุมาจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อภายในระบบเอง ซึ่งรวมทั้งการทำงานในสภาวะการตัดต่อวงจรตามปกติและในขณะเมื่อเกิดผิดปกติ (Fault) ขึ้นในระบบ

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ทดสอบระดับการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นการทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันเกินอิมพัลส์ของการฉนวนก่อนนำอุปกรณ์ไปติดตั้งใช้งานจริง หรือใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเป็นหลัก แรงดันที่สร้างขึ้นในห้องทดลองเป็นแรงดันที่เลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันค่ายอดสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการแปรไปตามเวลาของขนาดแรงดันอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบจึงได้มีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติเป็นเกณฑ์

2.2.5 ข้อกำหนดของรูปคลื่นอิมพัลส์

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ อาจจะกำหนดด้วยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ขนาดแรงดัน (V_p) โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่แรงดันมีลูกกระพอกซ้อนซึ่งอาจเกิดจากการออสซิลเลชันใกล้เคียง ๆ ยอดรูปคลื่นให้ถือเป็นค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอกซ้อนนั้น
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. พารามิเตอร์ทางเวลา ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะของรูปคลื่นแรงดันทดสอบที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ

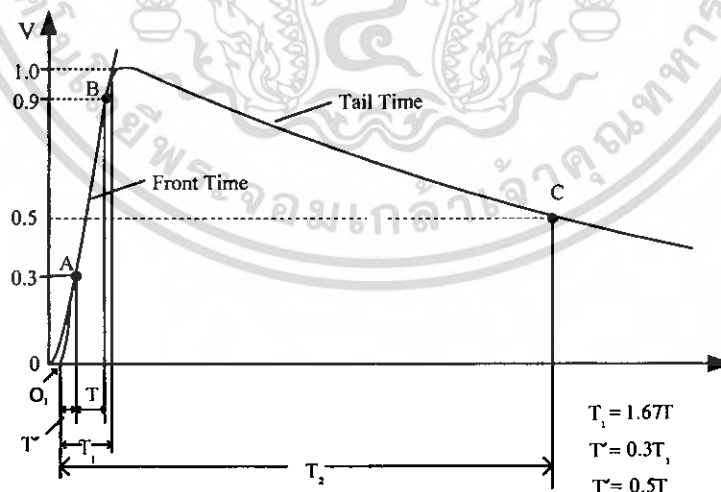
เวลาช่วงหน้าคลื่น (Front time : T_1) คือช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุด

เวลาช่วงหางคลื่น (Tail time : T_2) คือ ช่วงเวลาที่เริ่มนับจากแรงดันเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดสูงสุด จนกระทั่งมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

2.2.6 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้า

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full Wave Lightning Impulse Voltage) จะมีลักษณะรูปคลื่นตามข้อกำหนด ในรูปที่ 2.17 ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดแรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุดแล้วค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งลดลงเป็นศูนย์



รูปที่ 2.17 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ 1.67 เท่าของช่วงเวลา T ระหว่างจุดที่อิมพัลส์มีค่า 30% และ 90% ของค่ายอด คือจุด A และ B ดังรูปที่ 2.18 ถ้ารูปคลื่นมีการแกว่งซ้อนอยู่ด้วยให้ลากเส้นโค้งรูปคลื่นเฉลี่ยสัญญาณแกว่งซ้อนเสียก่อน แล้วจึงค่อยหาจุด A และจุด B

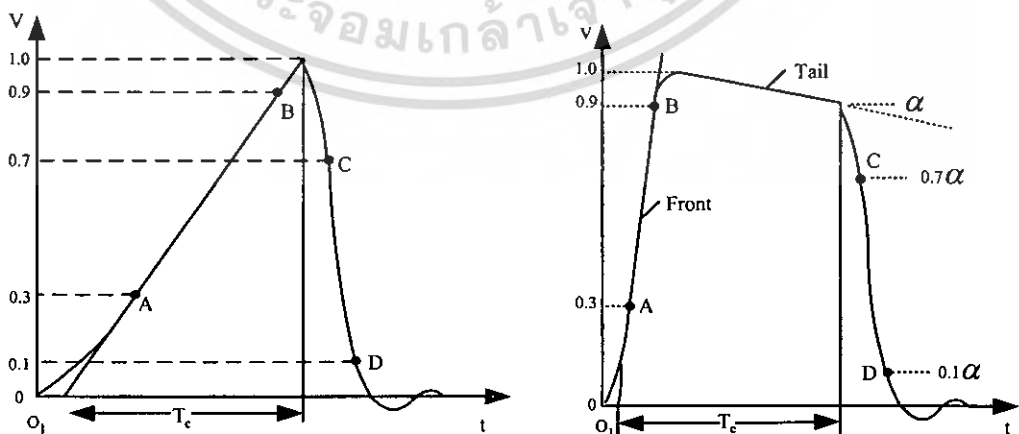
จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 (Virtual Origin) ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือจุดที่คิดเป็นเวลาห่างจากจุด A ในรูปที่ 2.17 ไปข้างหน้า เท่ากับ $0.3 T_1$ หรือ จุดตัดแนวเวลากับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด A และจุด B สำหรับรูปคลื่นแรงดันที่บันทึกโดยแกนเวลาและวาดอย่างเชิงเส้น

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน O_1 กับจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางตอนหางคลื่น ดังรูปที่ 2.17

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน (Standard Lighting Impulse) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-1 (1989) คือแรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลา T_1/T_2 เป็น $1.2 / 50 \mu s$ โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนดังนี้

- เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$
- เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$
- ค่ายอดแรงดัน $V_p \pm 3\%$

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped Wave Lighting Impulse Voltage) คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดการดีสชาร์จแบบทำลายทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของรูปคลื่นแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่นหรือส่วนหางคลื่นก็ได้ ดังรูปที่ 2.18 โดยแรงดันขณะที่คลื่นตัด (Voltage at The Instant of Chopped) คือ แรงดันในขณะที่เกิดความไม่ต่อเนื่องในรูปคลื่นนั้น เวลาช่วงคลื่นตัด T_c (Time to Chopped) คือช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือนกับช่วงเวลาขณะที่เกิดคลื่นตัด



รูปที่ 2.18 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สิ่งเปราะเปื้อน

สิ่งเปราะเปื้อนที่ลอยอยู่ในอากาศ เมื่อลอยผ่านฉนวนไฟฟ้า เช่น ฉนวนลูกถ้วย หรือดรอเพอาร์ทพีวส์และฉนวนอุปกรณ์อื่นๆ จะเกาะติดบนผิวฉนวนนั้น และจะสะสมมากขึ้นจนทำให้ฉนวนนั้นเกิดวาบไฟตามผิว (Flashover) ซึ่งจะเป็นอันตรายแก่อุปกรณ์นั้นได้สิ่งที่สามารถลดสิ่งเปราะเปื้อนได้ตามธรรมชาติคือลม และน้ำฝน ในกรณีของลม จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของฉนวนซึ่งการเคลื่อนไหวของอากาศเป็นเหตุการณ์สำคัญในการนำพาสิ่งเปราะเปื้อนจากแหล่งกำเนิดไปยังสถานที่ต่างๆ สำหรับกรณีของน้ำฝน สิ่งเปราะเปื้อนบางชนิดน้ำฝนตามธรรมชาติไม่สามารถอาจล้างออกได้หมด ปัญหาที่พบบ่อยซึ่งเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้ไฟดับในระบบสายจำหน่ายและสายส่งที่อยู่บริเวณชายทะเล คือ การเกิดวาบไฟตามผิว (Flashover) ของฉนวนลูกถ้วยที่มีสิ่งเปราะเปื้อนเกาะตามผิว ซึ่งเป็นสารประกอบของเกลือซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนน้อยลง ในสภาพแห้ง สิ่งเปราะเปื้อนยังเป็นฉนวนอยู่จึงไม่อาจทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนฉนวนลูกถ้วยได้ แต่ในสภาพเปียกน้ำจะรวมตัวกับสิ่งเปราะเปื้อนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีระดับสิ่งเปราะเปื้อนสูงจะเกิดวาบไฟตามผิว (Flashover) ได้ง่ายยิ่งขึ้น ในโครงการนี้ศึกษาถึงคุณลักษณะของความเปราะเปื้อนที่สะสมบนผิวฉนวนดรอเพอาร์ทพีวส์ภายใต้สภาพของเขตอุตสาหกรรมที่มีความเปราะเปื้อนสูง รวมทั้งวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อมีสิ่งเปราะเปื้อนจับเกาะบริเวณ Porcelain support ซึ่งเป็นฉนวนสำหรับติดตั้งพีวส์คัทเอาท์กับ Mounting bracket เพื่อนำมาพิจารณาออกแบบ Porcelain support ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น Porcelain support ที่ดีนั้นสามารถลดการเกิดวาบไฟตามผิว ลดอัตราการชำรุดของดรอเพอาร์ทพีวส์ และลดจำนวนครั้งของไฟดับได้ ทำให้เกิดความเชื่อถือได้ในระบบสูงขึ้น[8] สิ่งเปราะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของวัสดุฉนวน Porcelain support เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอก หรือความชื้นในตอนเช้าหรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุฉนวน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของวัสดุฉนวน มีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ ปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดวาบไฟตามผิว [2]

2.3.1 ประเภทของสิ่งเปราะเปื้อน [2]

การแบ่งประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามสภาพแวดล้อมที่วัสดุฉนวนติดตั้งใช้งาน ได้แก่ สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรม สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลทราย และสิ่งเปราะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ

1) สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล ได้แก่ พวกเกลือทะเล (Sea salt หรือ Sodium chloride ; NaCl) การสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้บนผิววัสดุฉนวน เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะด้วยกันคือ การสะสมแบบรวดเร็ว (Rapid pollution) เกิดขึ้นในกรณีที่มีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาเกลือทะเลเข้ามาเช่น พายุไต้ฝุ่น เป็นต้น และการสะสมแบบธรรมดา (Ordinary pollution)

เป็นการสะสมที่ใช้เวลาค่อนข้างนานเกิดจากลมทะเลที่พัดเป็นฤดูกาล ตามปกติแล้วระดับของสิ่งเประอะเปื้อนจะลดลงไปเมื่อลึกลงเข้าไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ตามอาจจะพบเกลือทะเลที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลถึง 100 กิโลเมตรได้

2) สิ่งเประอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม วัสดุฉนวนที่ใช้ในบริเวณเขตอุตสาหกรรม จะเประอะเปื้อนควันและเขม่าที่ปล่อยออกมาจากปล่องท่อไอเสีย ระดับของสิ่งเประอะเปื้อนชนิดนี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น สิ่งเประอะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด มีส่วนผสมและองค์ประกอบทางด้านเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ

3) สิ่งเประอะเปื้อนจากทะเลทราย ทะเลทรายเป็นบริเวณที่สิ่งเประอะเปื้อนสามารถที่จะสะสมบนผิววัสดุฉนวนได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากปริมาณของฝนที่ตกเพียงเล็กน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งทะเล จะมีสิ่งเประอะเปื้อนที่คล้าย ๆ กับสิ่งเประอะเปื้อนประเภทฝุ่น แต่สำหรับทะเลทรายที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั้นนอกจากสิ่งเประอะเปื้อนประเภทฝุ่นแล้วยังจะมีเกลือทะเลผสมอยู่ด้วย

4) สิ่งเประอะเปื้อนจากบริเวณอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวไปแล้ว เช่น ถ้าหรือ ฝุ่น ภูเขาไฟ หรือ บัญ อาจเกิดขึ้นโดยการฉีดพ่นให้กับต้นไม้ พืช ผัก หรือ การเผาไหม้ของวัสดุต่าง ๆ นอกจากนี้แล้วจากบทความบางฉบับ ได้กล่าวถึงสิ่งเประอะเปื้อนชนิดนี้โดยเน้นไปที่สิ่งเประอะเปื้อนจากฝุ่น (Dust contamination) โดยได้อธิบายว่าเกิดจากการพัดพาเอาทรายหรือฝุ่นที่เกิดจากดินไปเกาะติดผิววัสดุฉนวน ระดับความรุนแรงของสิ่งเประอะเปื้อนจากฝุ่นค่อนข้างต่ำ องค์ประกอบของสิ่งเประอะเปื้อนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่

2.3.2 การวัดและการแบ่งระดับของความเประอะเปื้อน

ระดับของความเประอะเปื้อนนั้นจะเป็นตัวกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบมิติที่เหมาะสมของวัสดุฉนวน และอาจจะนำไปใช้กำหนดระดับความเประอะเปื้อนที่จะใช้ในการทดสอบหาคูณลักษณะสมบัติวัสดุฉนวนในสภาวะเประอะเปื้อนจำลอง ก่อนที่จะนำวัสดุฉนวน ที่ผ่านการออกแบบไปติดตั้งใช้งานจริง มาตรฐาน IEC 815 ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการหาค่าและการแบ่งระดับของความเประอะเปื้อนดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.2.1 การวัดค่าระดับความเประอะเปื้อน

การวัดค่าระดับความเประอะเปื้อนที่สถานที่ที่ติดตั้งวัสดุฉนวน มีหลายวิธีดังนี้

1) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสิ่งเประอะเปื้อนที่รวบรวมโดยวิธี directional gauges

2) การวัดค่าปริมาณการสะสมสิ่งเประอะเปื้อนบนผิวเทียบเท่ากับปริมาณเกลือ (NaCl) ซึ่งจะให้ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำสิ่งเประอะเปื้อนมาละลายน้ำที่มีปริมาณเท่ากันซึ่งจะเรียกวิธีนี้เรียกว่าการหาค่า ESDD (Equivalent salt deposit density)

- 3) การนำเอาข้อมูลทางสถิติจำนวนครั้งของการเกิดวابلไฟตามผิวของวัสดุ
ฉนวน มาทำการวิเคราะห์
- 4) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงผิวของวัสดุฉนวนตัวอย่าง
- 5) การวัดค่ากระแสรั่วไหลของวัสดุฉนวน ขณะที่ได้รับแรงดันใช้งานปกติ (เป็น
การหาค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา)

การวัดระดับความเปราะเปื้อนแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันกล่าวคือ
วิธีที่ 1 และ 2 สามารถทำได้โดยง่ายและไม่จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่วิธีที่ 1
นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลลักษณะช่วงเวลาการสะสมและระดับของความเปราะเปื้อนออกมาโดยตรง วิธี
ที่ 2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับของความเปราะเปื้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีวัสดุฉนวนมีความเปียก
ขึ้น ความถูกต้องของการวัดทั้ง 2 วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่บ่อยในการวัด ถ้าการสะสมของสิ่ง
เปราะเปื้อนเกิดขึ้นไม่เร็วนัก ก็อาจจะทำการวัดเดือนละครั้ง หรือเว้นระยะห่างกว่านี้ แต่ถ้าการ
สะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเกิดขึ้นรวดเร็วก็จะต้องทำการวัดถี่ขึ้น สำหรับวิธีที่ 3 นั้นจำเป็นที่
จะต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่มีราคาแพง ข้อมูลที่ได้จะถูกต้องเฉพาะวัสดุฉนวนที่มีความยาว
ใกล้เคียงกับวัสดุฉนวนที่พิจารณา และใช้งานที่ระดับแรงดันใกล้เคียงกัน สองวิธีสุดท้ายต้องการ
แหล่งพลังงานและอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง วิธีการประเมินค่าระดับของความเปราะ
เปื้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่การวัดค่า ESDD การวัดค่าความต้านทาน
ของผิว และการวัดค่ากระแสรั่วไหล

การหาค่าระดับความเปราะเปื้อนนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ
ยิ่งขึ้น IEC 815 ได้แนะนำให้พิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ ลักษณะของพื้นที่
แต่ละแห่งที่สัมพันธ์กับระดับความเปราะเปื้อน และข้อมูลของเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่
ใช้งานวัสดุฉนวน ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญมาทำการวิเคราะห์

2.3.2.2 การแบ่งระดับความเปราะเปื้อน

ตามมาตรฐาน IEC 815 ได้แบ่งระดับความเปราะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 2.4 การแบ่งระดับของความเปราะเปื้อน

ระดับของความเปราะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณที่ปลอดภัยจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบอุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยน้อยโดยที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่านหรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง
2) ปานกลาง (Medium)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมา และอาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นแต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอย ๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลาย ๆ กิโลเมตร)
3) สูง (Heavy)	<ul style="list-style-type: none"> - เขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง - บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล
4) สูงมาก (Very heavy)	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมาก ๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเปราะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา

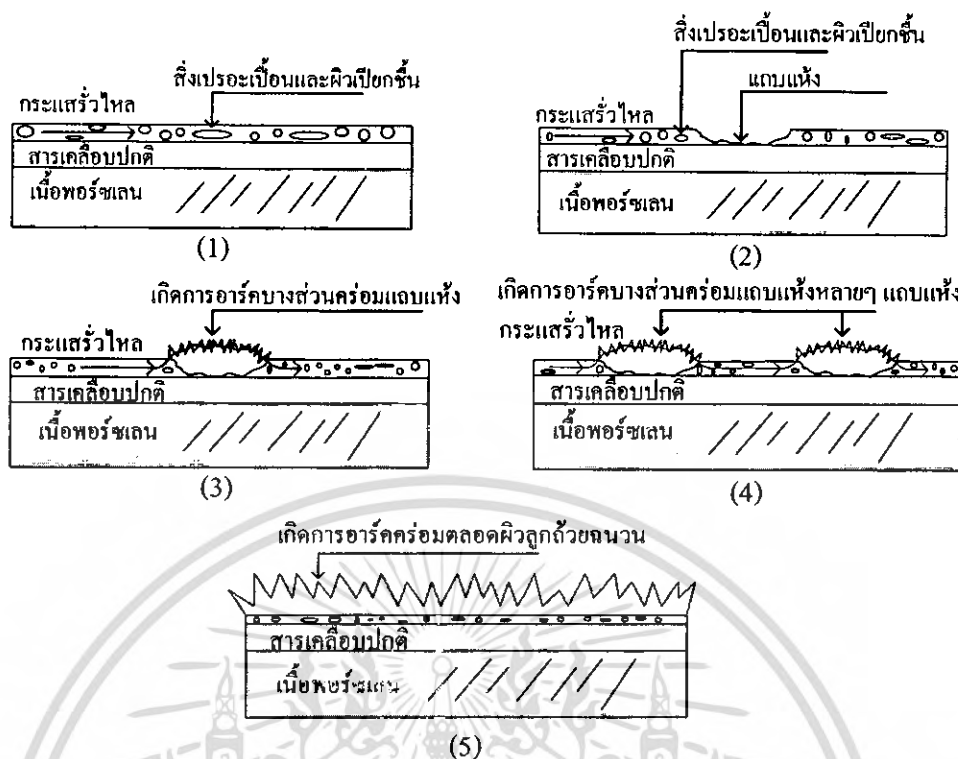
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ 1) บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากวัสดุพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับความเปรอะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง

2) บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

2.3.3 กลไกการเกิดวาวไฟตามผิวของฉนวนไฟฟ้าเทอร์ชเลนเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน

การเกิดวาวไฟตามผิว (flashover) ของฉนวนไฟฟ้าที่มีความสกปรก เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายเป็นบริเวณกว้าง ต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาการวาวไฟตามผิวฉนวนที่สกปรกเปรอะเปื้อนจึงมีความสำคัญ ต่อการออกแบบระบบป้องกันของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง[9] กลไกการเกิดวาวไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเปรอะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวฉนวน และได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบาๆ สภาพนำไฟฟ้าที่ฉนวนของวัสดุฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวของวัสดุฉนวน โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของวัสดุฉนวนบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆ แคบๆ มีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่าแถบแห้ง(Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จต่อไปอีกการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง ถ้ามีแถบแห้งหลายๆส่วนที่อยู่ใกล้กันเกิดพัฒนาการจนเชื่อมต่อกันได้ ก็จะทำให้เกิดวาวไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวของวัสดุฉนวน ขั้นตอนของการเกิดวาวไฟตามผิวของวัสดุฉนวน เนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อนแสดงในรูปที่ 2.19 [2]



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนของการเกิดวามไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน

2.4 การออกแบบปีกของครอบเอาท์พิวส์ให้เหมาะกับการใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน

ในการออกแบบปีกของครอบเอาท์พิวส์เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อนควรจะได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดวามไฟตามผิวได้ง่าย ปัญหาการเกิดวามไฟตามผิวของครอบเอาท์พิวส์ในสภาวะเปราะเปื้อนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ [16]

1) ระดับของความเปราะเปื้อนและชนิดของสิ่งเปราะเปื้อนรวมทั้งสภาพแวดล้อมบริเวณที่ครอบเอาท์พิวส์ติดตั้งใช้งาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือทิศทางารพัดของลม ซึ่งระดับของความเปราะเปื้อนจะสิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ

2) ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดวามไฟตามผิวของ ปีกครอบเอาท์พิวส์ การออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของปีก ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดแรงดันเกิน ค่าแรงดันที่จะใช้ออกแบบเพื่อให้เป็นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของปีกครอบเอาท์พิวส์นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีระดับเผื่อ (margin) สูงกว่าแรงดันเฟสใช้งานคือประมาณ 10-20%

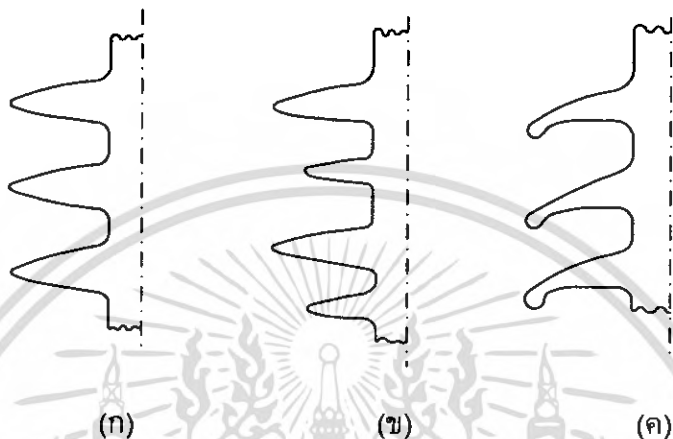
3) รูปร่างของปีกครอบเอาท์พิวส์กำหนดด้วยการขึ้นรูปของวัสดุในกระบวนการผลิต รูปร่างและขนาดของครอบเอาท์พิวส์ จะสัมพันธ์โดยตรงกับการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิว ปีกครอบเอาท์พิวส์ การทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยลมและฝนรวมทั้งการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของปีกครอบเอาท์พิวส์อีกด้วย มาตรฐาน IEC 815 ได้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบปีกของฉนวนไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งานในบริเวณแปรอะเป็อน ดังแสดงในรูปที่ 2.21

2.4.1 เลือกแบบปีกของทรอปเอาร์ทพีวส์

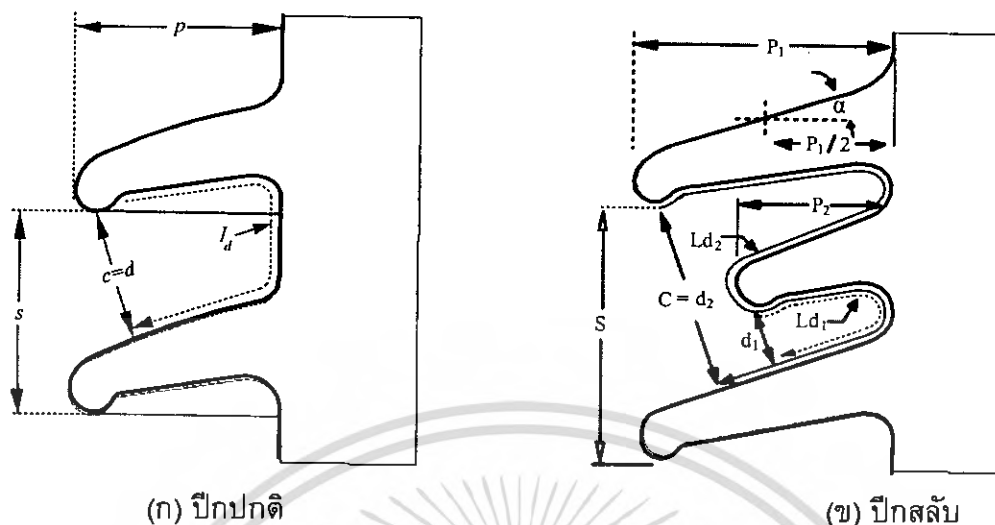
ปีกของทรอปเอาร์ทพีวส์โดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ปีกแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.20 รูปแบบของปีกประเภทต่าง ๆ

พิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบของปีกแต่ละแบบพบว่า ปีกแบบ ก) สิ่งแปรอะเป็อนมีโอกาสที่จับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ลมพัดหรือฝนตกได้เร็วที่สุด ส่วนปีกแบบ ข) การที่มีปีกสั้นมาเสริมสลับกับปีกยาวเพื่อทำหน้าที่ชดเชยระยะรั้วที่หายไป ปีกแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกแบบ ก) สำหรับปีกแบบ ค) สิ่งแปรอะเป็อนมีโอกาสจับเกาะได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกชนิดแบบอื่นๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักมีเพิ่มขึ้น

2.4.2 การออกแบบปีกตามมาตรฐาน IEC 815



รูปที่ 2.21 ลักษณะปีกครีบตาม IEC 815

- โดยที่
- C คือ ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน
 - S คือ ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของปีกคู่ใดๆ
 - P คือ ความกว้างของปีกที่ยื่นออกไปจากคอดันโดยที่ P_1 และ P_2 เป็นความกว้างของปีกยาวและปีกสั้นตามลำดับ
 - d คือ ระยะห่างในอากาศระหว่างผิวของปีก
 - Ld คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดจุดวัดค่า
 - α คือ มุมของปีกที่ทำกับแนวระนาบ
 - l คือ ระยะรั้วที่วัดระหว่างจุดที่กำหนดวัดค่า
 - C.F คือ แฟกเตอร์ระยะรั้ว = ระยะรั้วของฉนวน / ระยะอาร์กของฉนวน
 - P.F. คือ แฟกเตอร์ภาพด้านข้าง = $(2P_1 + 2P_2 + S) / l$

ค่าที่แนะนำให้ใช้ตาม IEC 815

- C > 30 มม. และฉนวนที่มีความยาว ≤ 550 มม. C เริ่มตั้งแต่ 20 มม. ได้
- S/P ≥ 0.8
- Ld/d < 5
- $P_1 - P_2 \geq 15$ มม.
- $\alpha > 5^\circ$
- C.F. ≤ 3.5 ระดับเล็กน้อยและปานกลาง, 4 ระดับสูงและสูงมาก
- P.F. > 0.8 ระดับเล็กน้อยและปานกลาง, 0.7 ระดับสูงและสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้วัสดุฉนวนที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน [16]

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

1) โดยที่บริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การดูแลบำรุงรักษา และบริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรจะพิจารณาใช้วัสดุฉนวน ที่มีค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้นโดยจะขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดวัสดุฉนวน หลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบเคลือบลูกถ้วยฉนวนอีกด้วย

2) การใช้วัสดุฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ ผลของการเคลือบผิววัสดุฉนวน ด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้มีกระแสรั่วไหลตามผิวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุฉนวนจะสม่ำเสมอตลอดผิววัสดุฉนวน จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งอันเป็นสาเหตุการเกิดวาทไฟตามผิวได้โดยง่าย

ค่า Minimum nominal creepage distance สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1[16]

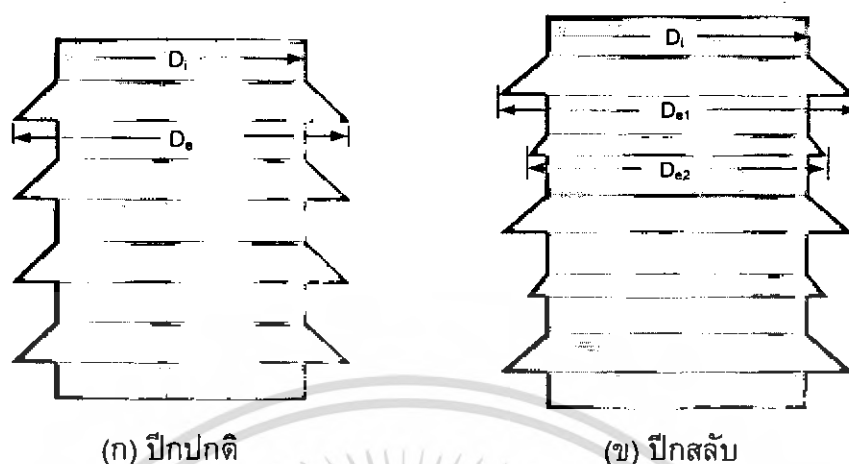
$$(L_{nc})_{\min} = (L_{sc})_{\min} \times U_m \times k_d \quad (2.1)$$

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

$(L_{sc})_{\min}$ คือ minimum specific creepage distance ขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของสิ่งเปรอะเปื้อน ดูจากตารางที่ 2.5

k_d คือ ตัวประกอบแก้ไข (correction factor) ; k_d แปรตามค่า D_m ขึ้นอยู่กับรูปแบบของปีกลูกถ้วย

D_m จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของปีก



รูปที่ 2.22 รูปแบบปีกตาม IEC 815

$$D_m = (D_e + D_i) / 2 \quad \text{ปีกปกติ (regular sheds)}$$

$$D_m = (D_{e1} + D_{e2} + 2D_i) / 4 \quad \text{ปีกสลับ (alternating sheds)}$$

โดยที่ D_{e1} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกใหญ่ ของ Alternating sheds

D_{e2} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกเล็ก ของ Alternating sheds

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนฉนวน

D_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกของ regular sheds

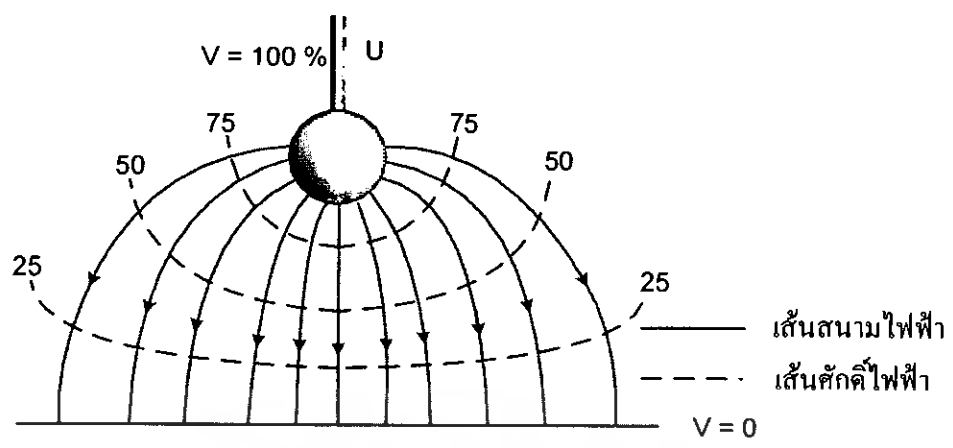
ถ้า $D_m < 300 \text{ mm}$: $k_d = 1$

$300 \leq D_m \leq 500 \text{ mm}$: $k_d = 1.1$

$D_m > 500 \text{ mm}$: $k_d = 1.2$

2.5 สหามไฟฟ้า[2]

กำหนดให้แรงดัน V เป็นแรงดันระหว่างอิเล็กโตรด 2 แผ่นที่มีฉนวนคั่นอยู่ พฤติกรรมของการกระจายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโตรด คุณสมบัติของฉนวนที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด และลักษณะรูปแบบของแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรด ดังตัวอย่างพฤติกรรมของการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลมกับระนาบแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{U}{d\eta^*} \tag{2.2}$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดทรงกลม
 d คือ ระยะระหว่างอิเล็กโตรด
 η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) มีค่านิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \leq 1 \tag{2.3}$$

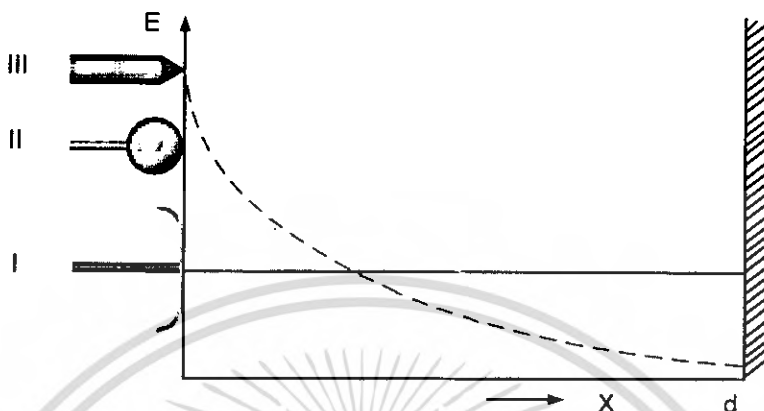
โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

โดยทั่วไปแล้วการศึกษาสนามไฟฟ้านั้นสนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

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

ซึ่งการศึกษาสนามไฟฟ้านั้น เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดจะเท่ากันทุกจุด เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด มีค่ามากกว่าความคงทนได้อต่อสนามไฟฟ้าของฉนวน จะเกิดเบรกดาว์นหรือสปาร์คทันที โดยมีการเพี้ยนของกระแสอย่างมากทันทีทันใด ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non uniform Field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น และลักษณะมิติทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดรูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดรูปทรงแบบระนาบ ทรงกลม และปลายแหลมกับระนาบ โดยมีระยะห่างเท่ากับ d



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

จากสมการที่ 7 เมื่อนำมาพิจารณาอิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอตั้งรูปที่ 2.24 (I) จะพบว่า η' มีค่าเท่ากับ 1 และในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยตั้งรูปที่ 2.24 (II) หรือกรณีที่ไม่มีโคโรนา เกิดก่อนเบรกดาวนส์ กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวนส์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเกิดเบรกดาวนส์จะเกิดขึ้นทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_0 ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field) ตั้งรูปที่ 2.24 (III)

2.5.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (electrical field stress) [1]

จากกฎของคูลอมบ์

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad (2.4)$$

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.5)$$

จากสมการ 2.5 จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ Q_2 เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D/ϵ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E (electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

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

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.7)$$

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

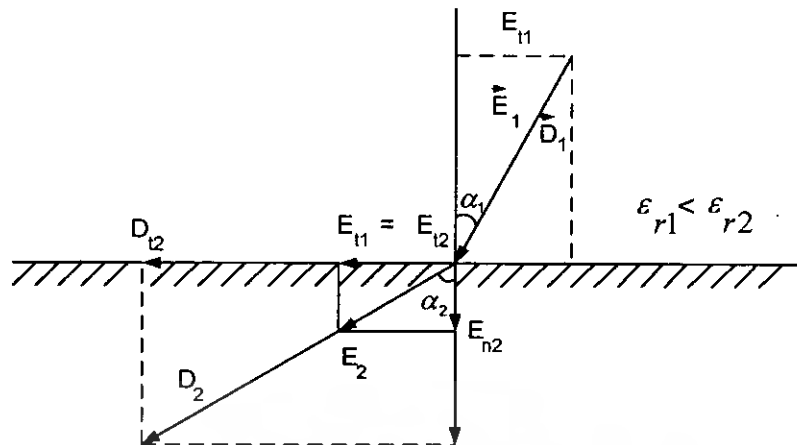
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.8)$$

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

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของ อุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าใน ฉนวนนั่นเอง

2.5.1.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน ฉนวนในทาง ปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือรองรับ น้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ฉะนั้นการ ฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกัน ย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้น ต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและ ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การ กระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

2.5.1.2 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด โดยอาศัย หลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส E_t ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่า คงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ $E_{t1} = E_{t2}$ และ $D_{n1} = D_{n2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



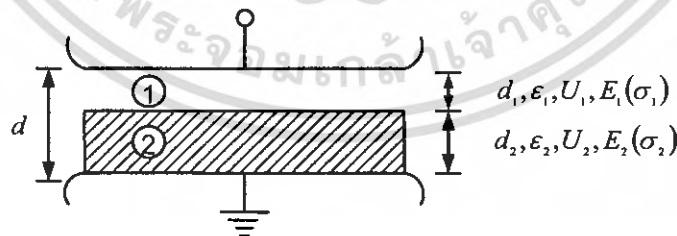
รูปที่ 2.25 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_2 = E_{n2} / E_{n1} = D_{t1} / D_{t2} = \epsilon_1 / \epsilon_2$$

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

2.5.1.3 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยทฤษฎีแล้วการวางชั้นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดที่ดีที่สุด คือการวางไม่ให้เกิดการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้า หรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั่นคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัส ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อกวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

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

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.9)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก



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

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2} \\ U_2 &= \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \\ \text{แต่} \quad U &= U_1 + U_2 \\ &= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \\ &= U_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right) \\ \text{ฉะนั้น} \quad U_1 &= \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

แทนค่า U_1 จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.11)$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

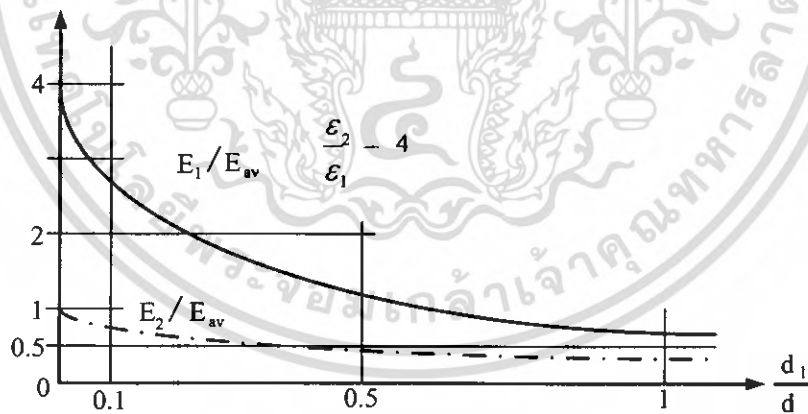
$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.12)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.13)$$

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

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.15)$$

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน ϵ_2/ϵ_1 เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนที่มี ϵ ต่ำ สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากขึ้น ดังในรูปที่ 2.27

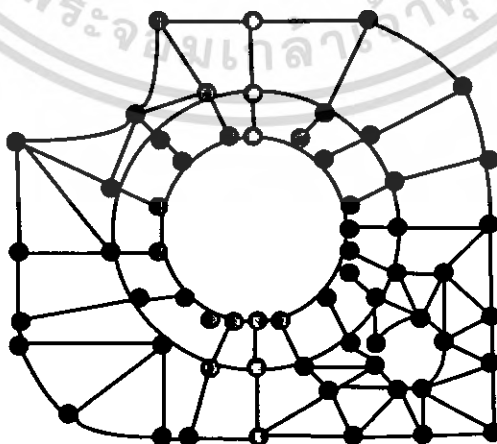


รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

2.6 ความเป็นมาของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศ และการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่างๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก ความสามารถของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักออกแบบทั่วไปอย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวังผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

2.6.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element: fem) ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วย เอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อนให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อนให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่าความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น, ความแม่นยำของผลเฉลย และยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ 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

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

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) ในแบบต่างๆซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์ที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (interpolation functions)” ซึ่งการคำนวณจะต้องทำหลายขั้นตอน และใช้เวลามากเพื่อกระทำหน้าที่เข้าไปซ้ำมาด้วยเหตุนี้ผู้ใช้งานจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพื่อให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

2.6.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์ วิศวกรมีความจำเป็นมากที่จะต้องทำความเข้าใจกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสิ่งหนึ่งที่สำคัญจำเป็นต้องทราบก็คือลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆเพื่อจะนำไปออกแบบตัวอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ดังนั้นการที่จะนำเอาขบวนการวิเคราะห์แบบใดมาใช้ต้องให้มีความเหมาะสมกับลักษณะงาน 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 2.28



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.29 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ

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

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.29 (ก) 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 โมเมนตัม หรือพลังงาน ก็ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการเช่น สมการอนุพันธ์การสมดุล เป็นต้น

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

สำหรับรูปที่ 2.29 (ข) เป็นการแบ่งขอบเขตงานออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า "เอลิเมนต์ (element)" การพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อยจากจุดที่ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน จากนั้นก็หาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูปเมตริกซ์ พิจารณาหาสัมประสิทธิ์เมตริกซ์ (coefficient matrix) ให้อยู่ในลักษณะของพิกัด (x, y, z) หรือเรียกว่า "สัมประสิทธิ์โกลบอล (global coefficient)"

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

สมการและเงื่อนไขที่ต้องการหาจะอยู่ในรูปของโหนด (x, y, z) ก็คือระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาผู้ใช้งานจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดที่ไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง

การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์นั้นจะต้องใช้ประสบการณ์ในการแบ่งให้เกิดความเหมาะสมกับงาน หากแบ่งน้อยเกินไป ค่าที่ได้ออกมาก็จะผิดพลาดมาก หากแบ่งมากเกินไปถึงแม้จะได้ค่าที่ละเอียดจริง แต่ก็ใช้ระยะเวลาในการคำนวณยาวนานทำให้เสียเวลา ฉะนั้นการแบ่ง

จะต้องให้เหมาะสมในการนี้ จึงพัฒนาเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ในการคำนวณเพื่อความรวดเร็ว และผลของคำตอบที่เที่ยงตรงยิ่งขึ้น

2.6.4 สมการเชิงอนุพันธ์

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้า สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยเริ่มจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ดังแสดงดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (2.16)$$

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

$$D = \epsilon E \quad (2.17)$$

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

$$E = -\nabla V \quad (2.18)$$

แทนค่าในสมการก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.19)$$

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

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.20)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาของการหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า โดยปกติจะประกอบด้วย

1) การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า V_0 ที่มีค่าคงที่ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่งโดยที่ V_s แทนค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนั้น

$$V_s = V_0 \quad (2.21)$$

2) การกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง ดังนี้

$$\nabla V_s = 0 \quad (2.22)$$

2.6.5 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง ควรจะนำความรู้ความเข้าใจ วิธีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ตลอดจนขั้นตอนพื้นฐานนำมาประยุกต์เพื่อการคำนวณหาผลลัพธ์ต่างๆที่เกิดขึ้นกับปัญหาทางด้านของแข็ง เช่น การเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆอันเกิดจากการยืด และหดตัว ตลอดจนความเครียดและความเค้นที่เกิดขึ้นตามมาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มพัฒนาจากการแก้ปัญหาทางด้านของแข็งโดยสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากวิธีการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงภายนอกที่มากระทำ ในการใช้วิธีการดังกล่าวผู้ใช้งานได้สมมุติลักษณะการกระจายของการเคลื่อนตัว (displacement) ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งบนเอลิเมนต์ แล้วจึงทำการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัว ณ จุดต่อต่างๆ และจากนั้นจึงทำการคำนวณหาความเครียด และความเค้น วิธีการเช่นนี้บางครั้งเรียกกันว่า วิธีการใช้การเคลื่อนตัว (displacement method) ในขณะเดียวกันในช่วงแรกๆของการพัฒนาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้อีกเช่นกัน ได้มีการใช้หลักการอื่นๆในการสมมุติตัวแปรที่ต่างกันบนเอลิเมนต์เช่นการสมมุติการกระจายของความเค้นโดยเรียกกันว่าวิธีการใช้แรง (force method) และการสมมุติตัวแปรซึ่งประกอบด้วยการกระจายของความเค้นและการเคลื่อนตัวไปพร้อมๆกันบนเอลิเมนต์ซึ่งเรียกว่าวิธีการผสม (mixed method) เป็นต้น

ในปัจจุบันการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย และใช้กันมากในการประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างๆ ไปจะเป็นการใช้วิธีการแรกซึ่งคือการสมมุติลักษณะของการกระจายของการเคลื่อนตัวบนเอลิเมนต์ ดังนั้นผู้ใช้งานจะใช้วิธีการนี้มาประยุกต์ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้กับปัญหาในหลายรูปแบบ เริ่มตั้งแต่การคำนวณการเคลื่อนตัว และความเค้นที่เกิดขึ้นในปัญหาโครงสร้างเหล็กท่อน ปัญหาแผ่นระนาบ ปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกนใดแกนหนึ่ง ปัญหาการโค้งงอของคาน ปัญหาการยืดหยุ่นในสามมิติ รวมไปถึงวิธีการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ ปัญหาต่างๆเหล่านี้มีลำดับขั้นตอนในการแก้ที่แตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ใช้ในปัญหานั้นๆ

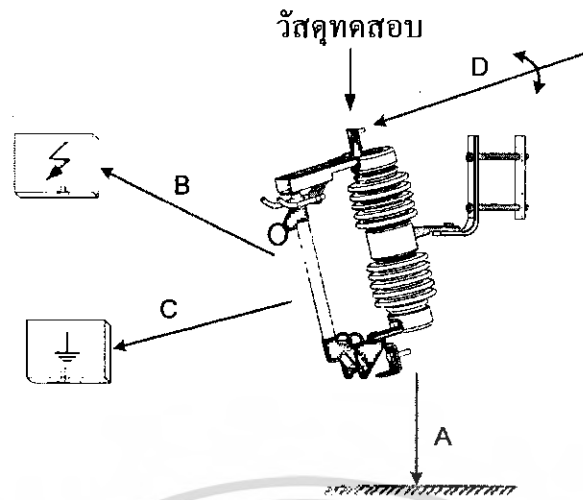
บทที่ 3

การออกแบบสร้างห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะเปราะเปื้อน และการออกแบบปีกครอบเอาท์พิวส์

การออกแบบสร้างห้องควบคุมความชื้นเพื่อจำลองสภาวะเปราะเปื้อนเป็นการออกแบบตามข้อแนะนำมาตรฐาน IEC 507:1991 และ IEEE std 4-1995 เพื่อทดสอบหาค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงต่อแรงดันวาบไฟตามผิว เมื่อใช้งานในสภาวะเปราะเปื้อน เช่น ลุกด้วยฉนวน ครอบเอาท์พิวส์ อาร์เรสเตอร์ และเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและปัญหาของฉนวนไฟฟ้าเมื่อใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อนในระดับมลภาวะต่าง ๆ และนำปัญหาไปปรับปรุงแก้ไข โดยการออกแบบมิติฉนวนที่เหมาะสมกับการใช้งานในบริเวณที่เปราะเปื้อน วิธีที่ใช้จำลองความเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507:1991 มี 2 วิธีคือ การจำลองความเปราะเปื้อนประเภทไอเกลือ และการจำลองความเปราะเปื้อนประเภทฝุ่นละออง ในโครงการนี้จะเป็นการออกแบบสร้างห้องควบคุมความชื้นเพื่อจำลองสภาวะความเปราะเปื้อนประเภทฝุ่นละออง มีส่วนประกอบหลักคือ โครงสร้างกระโจมทดสอบ เครื่องกำเนิดไอน้ำ ท่อจ่ายไอน้ำ และออกแบบมิติที่เหมาะสมของครอบเอาท์พิวส์ ให้เหมาะสมกับการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน

3.1. การออกแบบห้องทดสอบ

ในการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือเรื่องของสนามไฟฟ้า เพราะถ้าสนามไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนจะทำให้การทดสอบได้ผลไม่ถูกต้อง ดังนั้นการออกแบบกระโจมต้องมีระยะที่ไม่ทำให้สนามไฟฟ้าที่อุปกรณ์ทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะที่มีกระโจม และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่ทำให้สนามไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากเดิมจะต้องมีระยะห่างที่เหมาะสม วัสดุที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ วัสดุที่ต่อลงกราวด์เช่นโครงสร้างกระโจม วัสดุที่มีไฟ เช่น หม้อแปลง ดีไวเตอร์เป็นต้น และยังคงคำนึงถึงความสูงของวัสดุทดสอบจากพื้น หรือมุมของสายตัวนำ เพราะสิ่งต่างๆเหล่านี้มีผลต่อการเกิดวาบไฟตามผิวของวัสดุทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบ

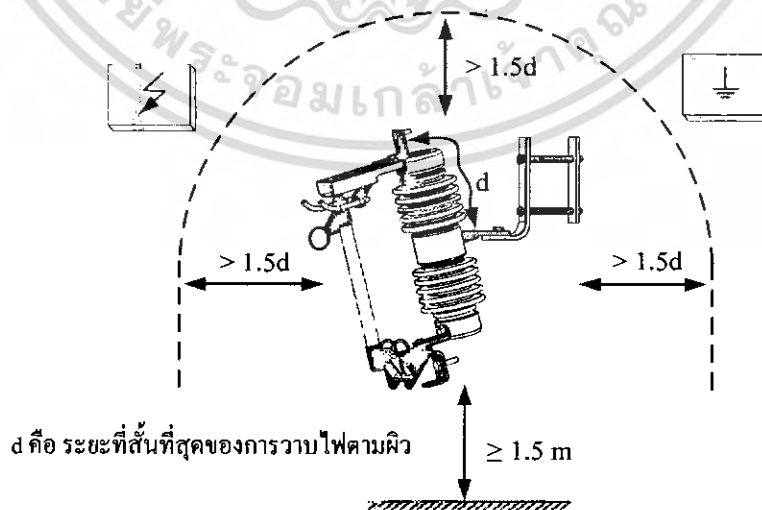


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ต้องคำนึงถึงเมื่อทำการทดสอบโดยที่ระยะ A, B, C, D มีผลต่อการเกิดวาวไฟตามผิวของอุปกรณ์ทดสอบ

จากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- โดยที่ A คือ ระยะจากวัสดุทดสอบกับพื้นหรือความสูงของวัสดุทดสอบ
- B คือ ระยะจากวัสดุทดสอบกับอุปกรณ์ที่มีไฟ
- C คือ ระยะจากวัสดุทดสอบกับกราวด์
- D คือ จุดที่นำไฟฟ้าแรงสูงเข้ามาหาวัสดุทดสอบ

โดยระยะที่ปลอดภัยสำหรับวัสดุทดสอบผิวแห้งที่ไม่ทำให้นามไฟฟ้าผิวด้านตาม IEEE std 4-1995 จะต้องมีความมากกว่า $1.5d$ และ d คือระยะที่สั้นที่สุดของการวาวไฟตามผิวของอุปกรณ์หรือระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ต่ออิเล็กทรอนิกส์ ระยะระหว่างวัสดุทดสอบจากพื้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 เมตรตามมาตรฐาน IEC 507:1991 ระยะต่างๆ เป็นตัวกำหนดโครงสร้างของกระโจมที่จะทำการออกแบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

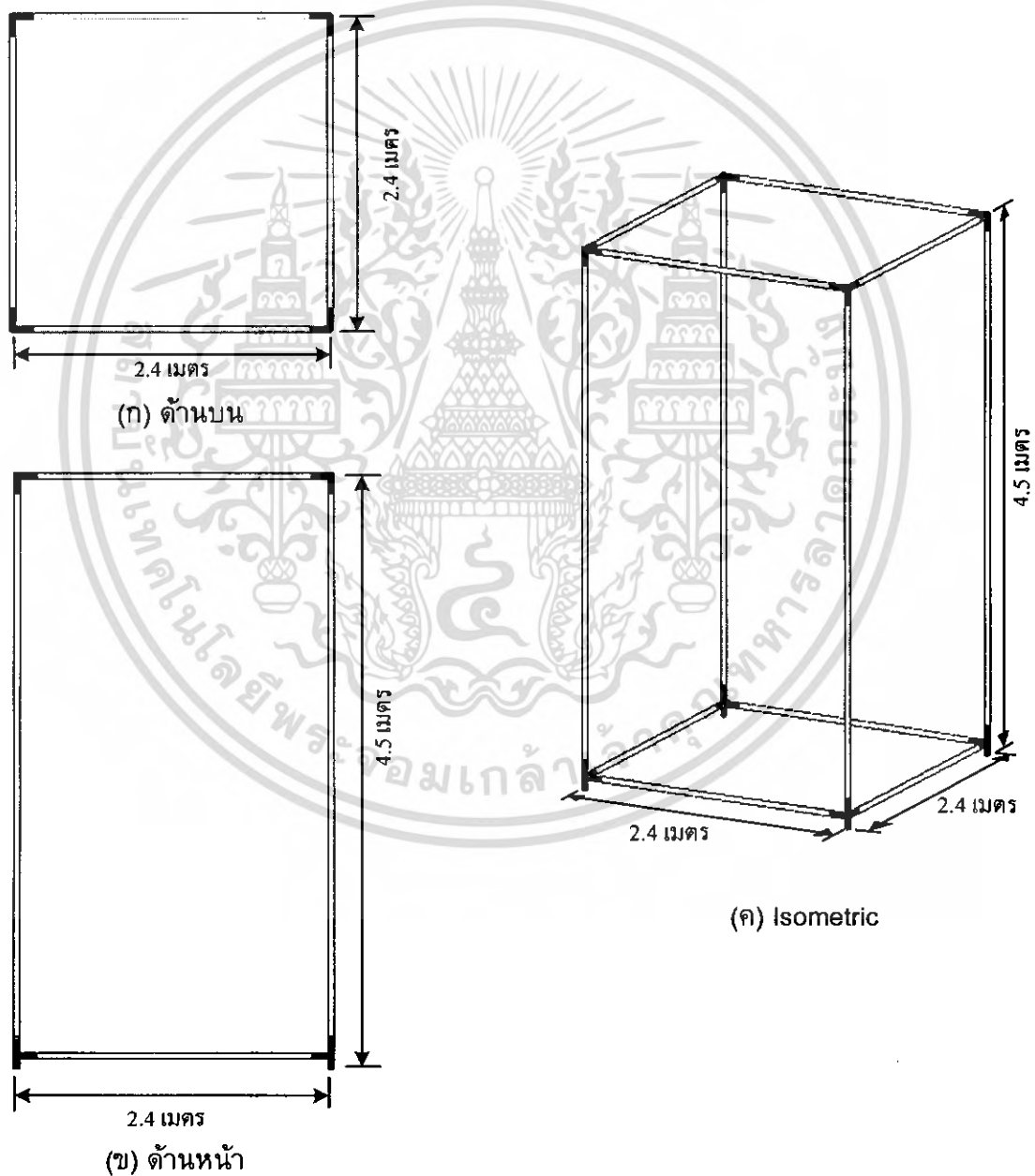


รูปที่ 3.2 ระยะปลอดภัยระหว่างวัสดุทดสอบกับส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การออกแบบโครงสร้างกระโจมทดสอบ

การออกแบบโครงสร้างของกระโจมทดสอบจะคำนึงถึงระยะปลอดภัย และข้อกำหนดของมาตรฐานเป็นหลัก ตัวโครงสร้างจะมีระยะห่างจากวัสดุทดสอบมากกว่า $1.5d$ ซึ่งสามารถออกแบบได้โดยมีความกว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร ความสูง 4.5 เมตร รูปโครงสร้างกระโจมทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โครงสร้างกระโจมทดสอบที่ทำการสร้างจะทำจากวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนจากสนิม จึงเลือกใช้เป็นโครงสร้างสแตนเลส คลุมด้วยพลาสติกใสเพื่อมองเห็นภายในกระโจมระหว่างการทดสอบ และโครงสร้างกระโจมยังออกแบบให้สามารถถอดเก็บได้เมื่อไม่ใช้งาน



รูปที่ 3.3 โครงสร้างกระโจมที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในคืออัตราการจ่ายไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ในการทดสอบด้วยวิธี Solid layer อัตราการจ่ายไอน้ำในระโอมทดสอบตามมาตรฐาน IEC 507:1991 มีอัตราการจ่ายไอน้ำเท่ากับ $0.05 \text{ kg/m}^3/\text{hr}$ ดังนั้นอัตราการจ่ายไอน้ำในระโอมที่ออกแบบ ขนาดขดลวดความร้อนและขนาดของเครื่องกำเนิดไอน้ำมีวิธีการคำนวณดังนี้

การคำนวณอัตราการจ่ายไอน้ำในการโอมทดสอบ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการจ่ายไอน้ำตามมาตรฐาน IEC 507} &= 0.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{hr}} \\ \text{ปริมาตรของการโอมทดสอบที่ออกแบบ} &= 2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \\ &= 25.92 \text{ m}^3 \\ \text{ดังนั้นอัตราการจ่ายไอน้ำในการโอมที่ออกแบบ} &= 0.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{hr}} \times 25.92 \text{ m}^3 \\ &= 1.296 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

การคำนวณขนาดขดลวดความร้อน

$$P = \frac{Q}{t} \quad \frac{\text{J}}{\text{S}} \quad (3.1)$$

$$Q = mc\Delta T \quad \text{J} \quad (3.2)$$

$$\text{แทนค่าสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.1)} \quad P = \frac{mc\Delta T}{t} \quad \frac{\text{J}}{\text{S}} \quad (3.3)$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำ

C คือ ค่าคงที่เท่ากับ $4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

ΔT คือ ความต่างของอุณหภูมิที่ทำให้น้ำเดือดเป็นไอ

t คือ เวลาที่ทำให้น้ำเดือด

ดังนั้นต้องการน้ำเดือด 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง 30°C และน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำมีมีมวล 40 kg

$$\begin{aligned} \text{ขนาดขดลวดความร้อนเท่ากับ} \quad P &= \frac{40 \times 4.186 \times (100 - 30)}{30 \times 60} \frac{\text{kJ}}{\text{S}} \\ &= 6511.55 \frac{\text{J}}{\text{S}} \\ &= 6511.55 \text{ w} \end{aligned}$$

เลือกใช้น้ำขนาดขวดลวด 3 ขวดแต่ละขวดมีขนาด 3000 W และเวลาที่ทำให้น้ำเดือดหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{mc\Delta T}{P} \quad \text{วินาที} & (3.4) \\
 &= \frac{40 \times 4.186 \times (100 - 30)}{9000} \quad \text{วินาที} \\
 &= 1302 \quad \text{วินาที} \\
 &= 22 \quad \text{นาที}
 \end{aligned}$$

การคำนวณขนาดของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

การคำนวณขนาดของเครื่องกำเนิดไอน้ำหาได้จากปริมาณน้ำที่หายไป 1 ชั่วโมง และเนื่องจาก น้ำ 1 cm^3 หนักประมาณ 1 g

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นน้ำที่หายไป 1 ชั่วโมงมีปริมาตร} &= 1296 \quad cm^3 \\
 \text{โดยที่} \quad V &= \pi r^2 h & (3.5)
 \end{aligned}$$

เมื่อ V คือ ปริมาณน้ำที่หายไป

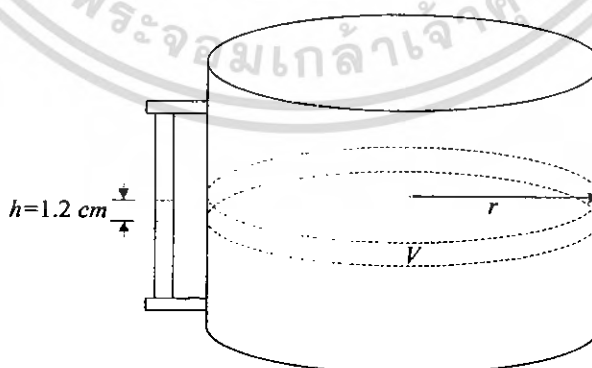
r คือ รัศมีของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

h คือ ระดับน้ำที่ลดลง

กำหนดให้ใน 1 ชั่วโมงน้ำลด 12 mm

ดังนั้นรัศมีของเครื่องกำเนิดไอน้ำหาได้จาก

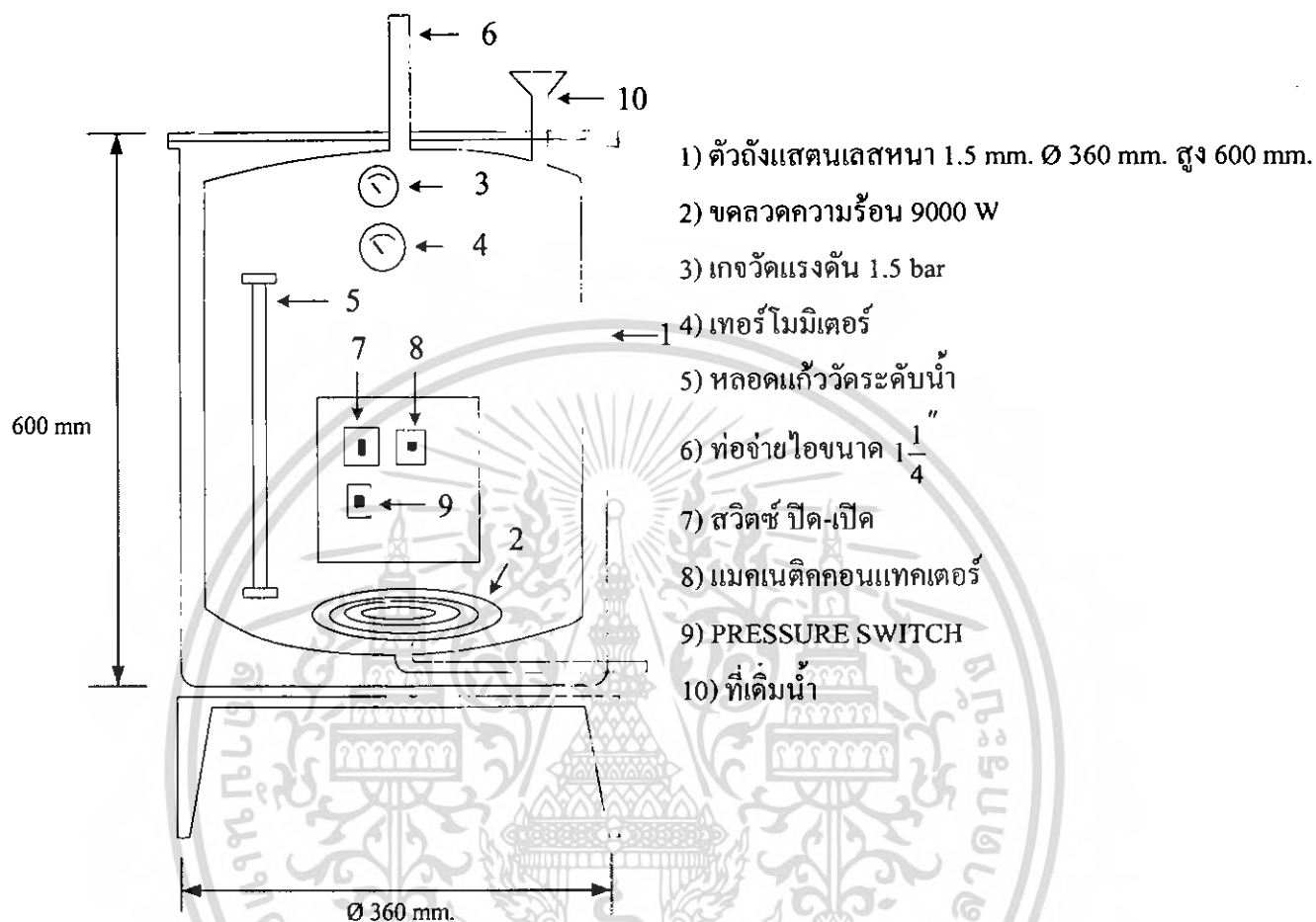
$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{\frac{V}{\pi h}} \quad cm & (3.6) \\
 &= \sqrt{\frac{1296}{\pi \times 1.2}} \quad cm \\
 &= 18.54 \quad cm
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.4 ภาพสเกตของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ออกแบบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 cm สูง 60 cm แสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถบรรจุน้ำได้ 61072 cm³

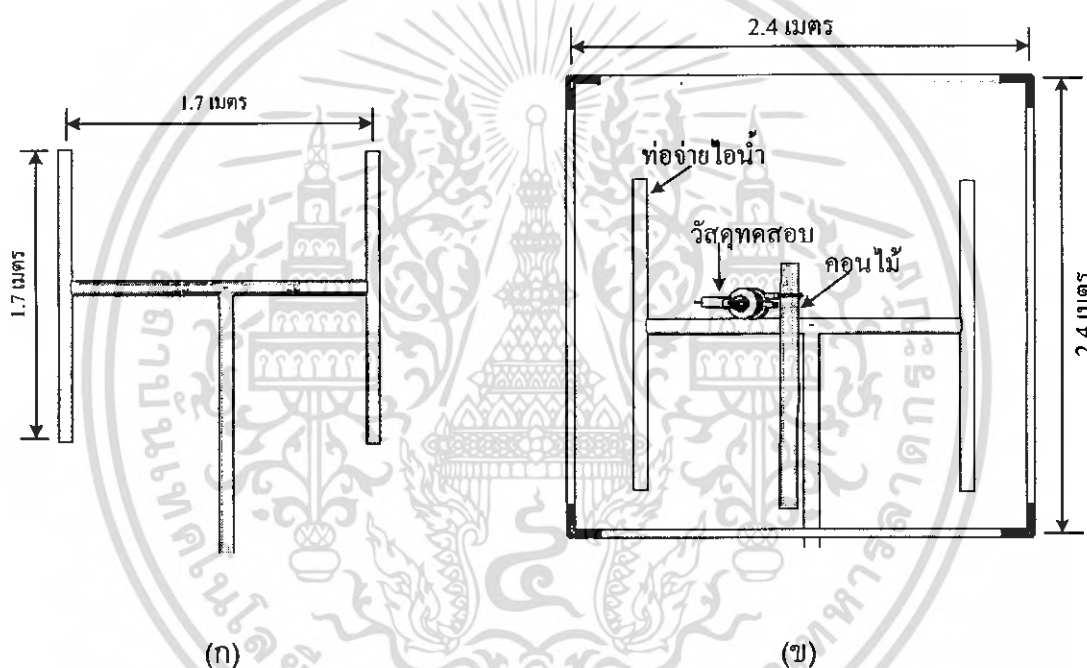


รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ออกแบบ

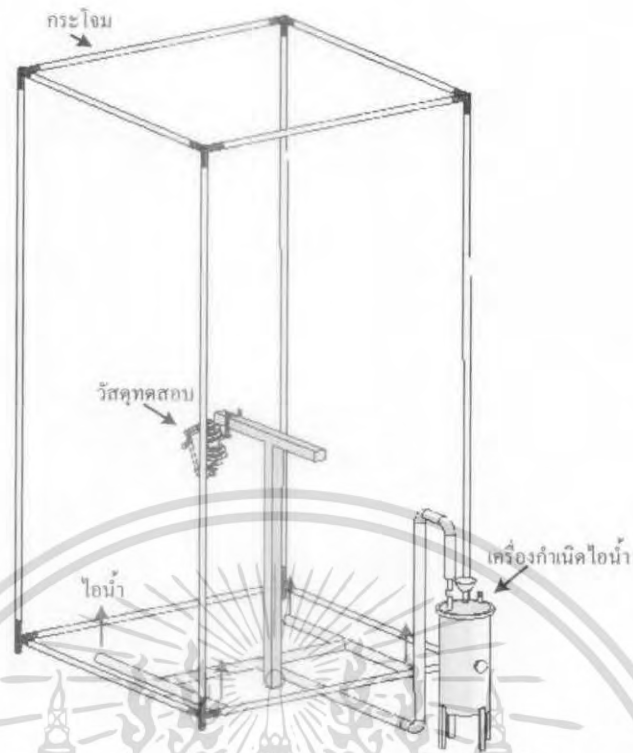
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การออกแบบท่อจ่ายไอน้ำ

ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันตัวบวมไฟตามผิวของฉนวนไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507:1991 ได้แบ่งเป็น 2 วิธีการทดสอบและมาตรฐานได้กำหนดรูปแบบของท่อจ่ายไอน้ำออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ใช้กับวิธีการ A และแบบที่ใช้กับวิธีการ B ซึ่งทั้ง 2 วิธีมีการออกแบบที่แตกต่างกัน ในโครงการนี้ได้เลือกออกแบบและสร้างท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B ท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B มาตรฐานได้กำหนดการจ่ายไอน้ำด้วยวิธีการ B ต้องจ่ายไอน้ำจากระดับพื้น จ่ายไอน้ำห่างจากวัสดุทดสอบเป็นระยะอย่างน้อย 1 เมตร และจะไม่ให้ไอน้ำถูกวัสดุทดสอบโดยตรง ดังนั้นการออกแบบจะทำการออกแบบท่อจ่ายไอน้ำมีลักษณะคล้ายรูปตัว H วางในระดับพื้นและจ่ายไอน้ำขึ้นมาด้านบน



รูปที่ 3.6 (ก) ขนาดท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B ที่ได้ทำการออกแบบ (ข) การติดตั้งท่อจ่ายไอน้ำ



รูปที่ 3.7 การจ่ายไอน้ำวิธีการ B เพื่อใช้ทดสอบจนวน

3.2 การสร้างกระโจมทดสอบ

3.2.1 โครงสร้างกระโจม

โครงสร้างกระโจมทำมาจากสแตนเลส มีความกว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร สูง 4.5 เมตร สามารถถอดเก็บได้ดังรูปที่ 3.8



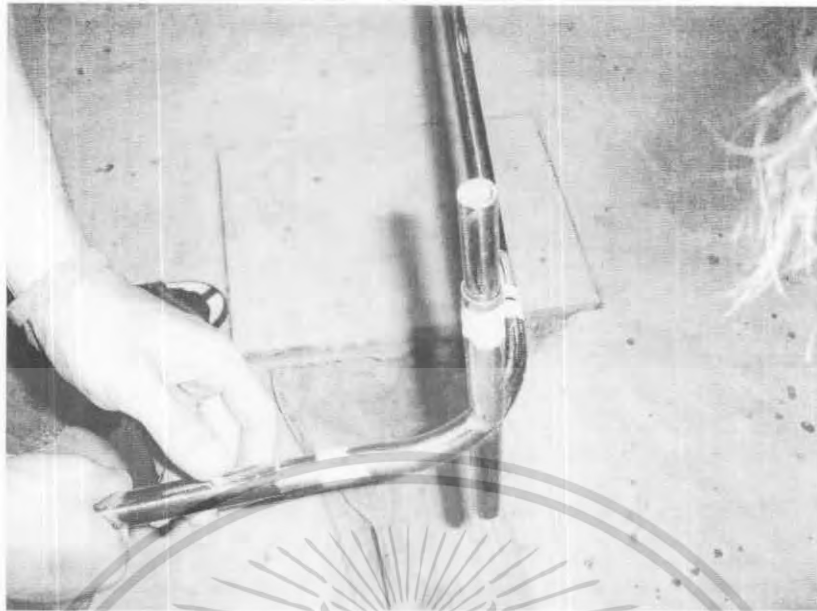
(ก) ชิ้นส่วนต่างๆของกระโจมทดสอบ



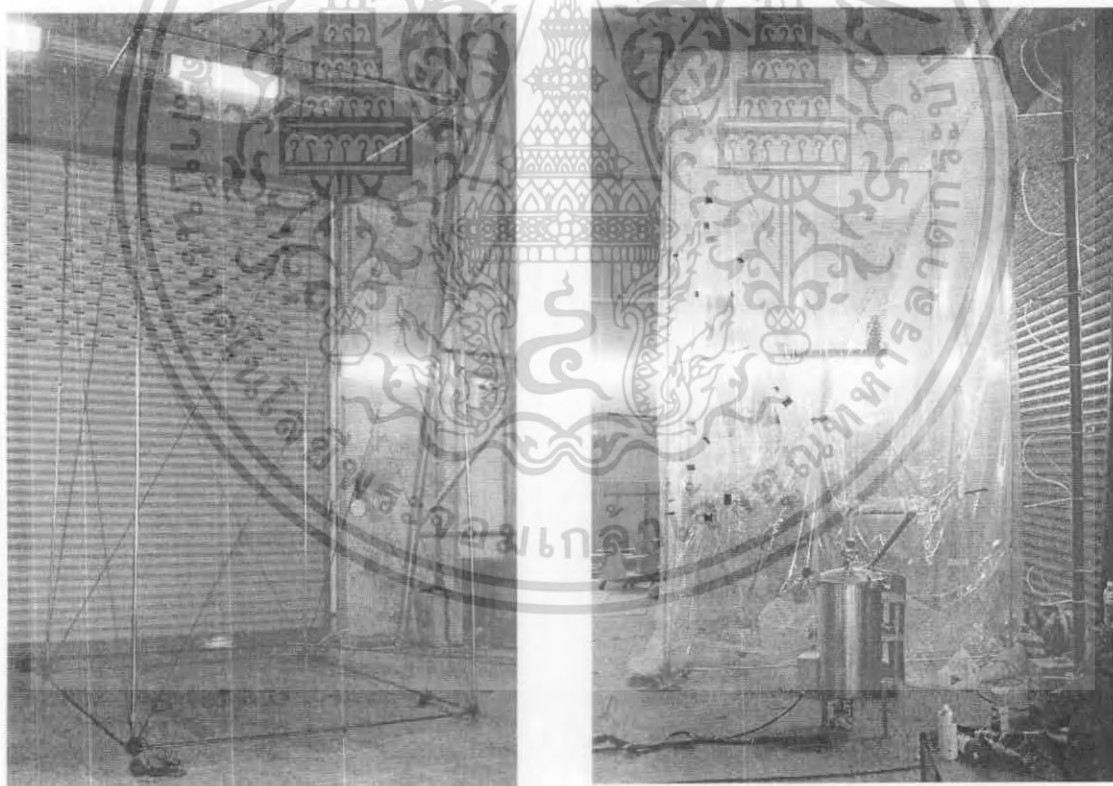
(ข) พลาสติกใส

รูปที่ 3.8 โครงสร้างกระโจมที่ทำจากสแตนเลสสามารถถอดเก็บได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การประกอบโครงสร้างกระโจม



(ก) โครงสร้างกระโจม

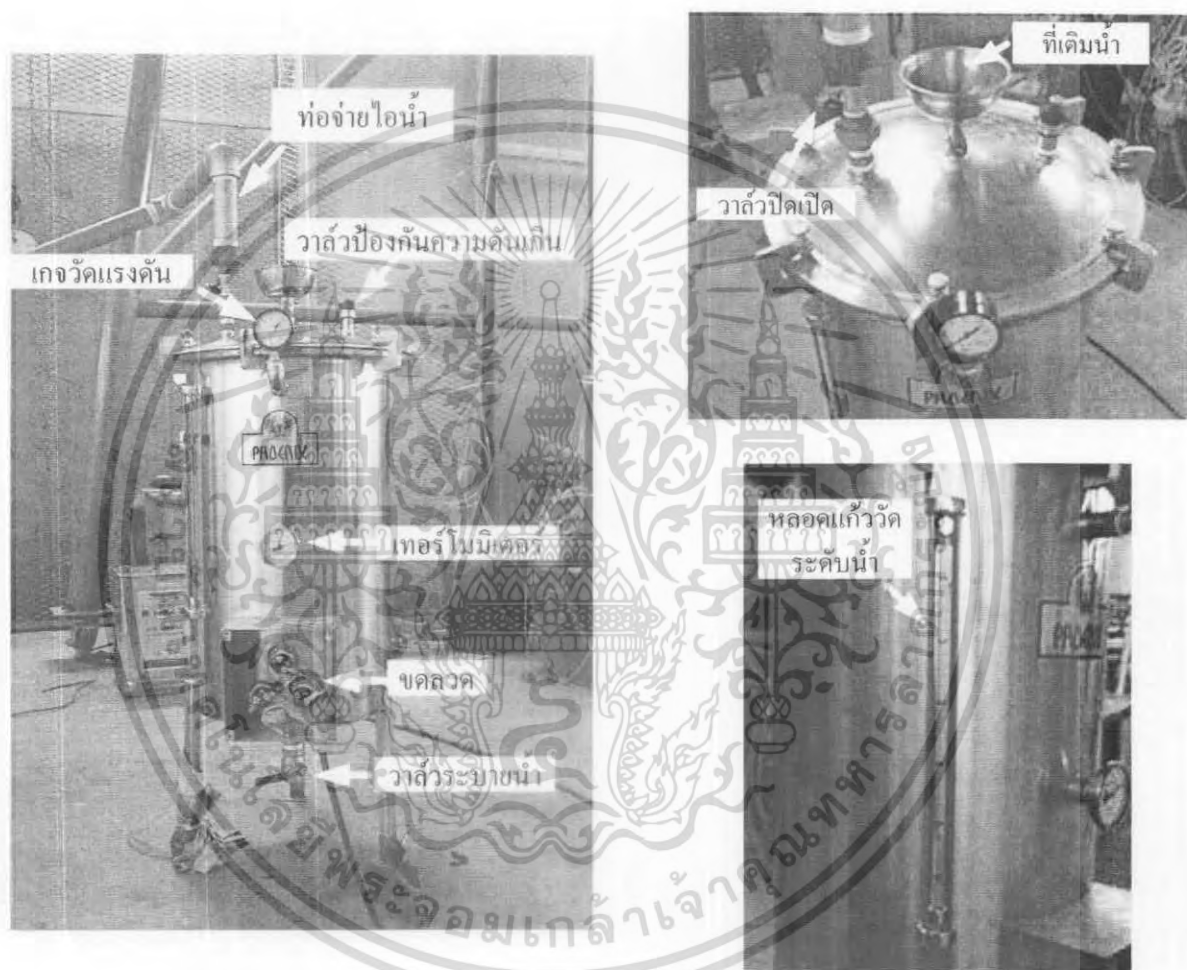
(ข) กระโจมทดสอบคลุมด้วยพลาสติกใส

รูปที่ 3.10 โครงสร้างกระโจมคลุมด้วยพลาสติกใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ทำการสร้าง ตัวถังทำจากสแตนเลสหนา 1.5 mm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 360 mm. สูง 600 mm และจ่ายไอน้ำได้ตามมาตรฐานกำหนด และเพื่อให้ปลอดภัยในขณะที่ใช้งานเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ทำการสร้างจะมีวาล์วป้องกันความดันเกิน วาล์วจะเปิดโดยอัตโนมัติเมื่อความดันภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำเกิน 20 Psi และแสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ประกอบสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การสร้างท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B

การสร้างท่อจ่ายไอน้ำวิธีการ B จะใช้ท่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 70 mm. และหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ลักษณะท่อจ่ายไอน้ำจะเป็นรูปตัว H เพื่อให้ไอที่จ่ายออกมาจะได้ไม่ถูกวัสดุทดสอบโดยตรงแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ท่อจ่ายไอน้ำด้วยวิธีการ B ที่ประกอบสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำและกระโจมทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำ

แรงดัน (V)	กระแส (A)	ก่อนจ่ายไอน้ำ				หลังจ่ายไอน้ำ	
		อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิที่น้ำ เดือด (°C)	ความดัน (Psi)	เวลาที่น้ำ เดือด(นาที)	ระดับน้ำลด ใน 1 ชั่วโมง (mm.)	อัตราการจ่าย ไอน้ำ ($\frac{g}{hr}$)
180	4.7	78.5	103	5	38	13	1323
200	5.4	78	108	5	26	31	3155
250	6.9	82	105	5	19	42	4275
300	8.2	80	103	5	14	62	6310

หมายเหตุ น้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำในขณะทดสอบเท่ากับ 3500 cm^3

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบกระโจมทดสอบ

อัตราการจ่ายไอน้ำ ($\frac{g}{hr}$)	อัตราการจ่ายไอน้ำ ($\frac{kg}{m^3 hr}$)	อุณหภูมิภายในกระโจม (°C) ทุก 10 นาที						ความชื้นสัมพัทธ์ภายในกระโจม (%) ทุก 10 นาที					
		10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
		1323	0.051	22	22	22.3	22.5	23	23	64	68	70	71
3155	0.121	22	22.2	22.5	23	23	23	64	74	75	75	75	75
4275	0.164	22	23.1	24	24	24	24.5	60	78	84	85	87	87
6310	0.243	23	25	25	25	25	25	60	85	91	93	94	95

ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาวไฟตามผิวในสภาวะเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507 มาตรฐานได้กำหนดอัตราการจ่ายไอน้ำ $0.05 \text{ kg} / \text{m}^3 \text{ hr}$ ดังนั้นในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาวไฟตามผิวในสภาวะเปราะเปื้อน ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดของของเครื่องกำเนิดไอน้ำเท่ากับ 180 V เพื่อให้ได้อัตราการจ่ายไอน้ำได้ตามมาตรฐาน

3.4 การใช้งานห้องควบคุมความชื้น

ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาวไฟตามผิวในสภาวะเปราะเปื้อนผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย เนื่องจากความชื้นภายในห้องทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบทุกครั้งจะต้องมีการไล่ความชื้นภายในห้องทดสอบหรือในกระโจมทดสอบก่อนจนความชื้นภายในห้องทดสอบเท่ากับความชื้นภายนอกห้องทดสอบ และในการใช้งานเครื่องกำเนิดไอน้ำ ตอนแรกจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดเท่ากับ 380 V โดยตอนนี้ปิดวาล์วจ่ายไอน้ำโดยทำให้เครื่องกำเนิดไอน้ำเป็นสถานะปิด รอจนกระทั่งน้ำเดือดและความดันในเครื่องกำเนิดไอน้ำเท่ากับ 5 Psi เพื่อให้มีความดันในการจ่ายไอน้ำภายในห้องทดสอบหรือกระโจมทดสอบ เมื่อน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำเดือดและความดันเท่ากับ 5 Psi แล้วลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับขดลวดเท่ากับ 180 V แล้วทำการเปิดวาล์วจ่ายไอน้ำให้กับห้องทดสอบ สิ่งที่ต้องระวังในการใช้งานเครื่องกำเนิดไอน้ำคือไม่ควรเติมน้ำจนเต็มเครื่องกำเนิดไอน้ำ เพราะจะใช้เวลาในการทำให้น้ำเดือดนานและได้ไอน้ำน้อยเนื่องจากปริมาตรในการเก็บไอน้ำน้อย และการใช้งานครั้งแรกที่เริ่มจากการต้มน้ำจากน้ำอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้องจนน้ำเดือด ควรจ่ายไอน้ำทิ้งไม่ควรให้ในการทดสอบจริง เพราะในการต้มน้ำครั้งแรกเมื่อน้ำเดือดและความดันเท่ากับ 5 Psi แล้วไอน้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำมีน้อย ควรใช้ไอน้ำจากการต้มน้ำครั้งที่สองเป็นต้นไป และในการทดสอบทุกครั้งการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ อัตราการจ่ายไอน้ำ และเวลาในการจ่ายไอน้ำต้องเท่ากันทุกครั้ง เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้อง

3.5 การออกแบบปีกของครอบเอาทีฟิวส์

การออกแบบปีกของครอบเอาทีฟิวส์จะต้องคำนึงถึงบริเวณที่ใช้งานเช่น ใช้งานในบริเวณที่มี ผุนควัน ไอเกลือ บริเวณที่มีมลภาวะเปรอะเปื้อน ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันวาวไฟตามผิวต่ำลง และเกิดกระแสรั่วไหลเป็นผลทำให้ครอบเอาทีฟิวส์เกิดวาวไฟตามผิวได้ง่ายเมื่อใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน ฉะนั้นการออกแบบต้องมีลักษณะพิเศษคือต้องคำนึงถึงผลกระทบของสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้ และออกแบบให้ลดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนโดยออกแบบรูปร่างของครอบเอาทีฟิวส์ให้มีการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนได้ยากขึ้น และลดขนาดกระแสรั่วไหลโดยเพิ่มระยะรั้วของรูปร่างครอบเอาทีฟิวส์ ในการออกแบบจะออกแบบโดยอาศัยข้อแนะนำตามมาตรฐาน IEC 815 และใช้โปรแกรมAutoCADออกแบบรูปร่างของครอบเอาทีฟิวส์ ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การกระจายแรงดันและสนามไฟฟ้าของครอบเอาทีฟิวส์ที่ออกแบบ และใช้โปรแกรม SolidWorks สร้างชิ้นงานที่ได้ออกแบบ

3.5.1 ขั้นตอนการออกแบบ

- 1) ครอบเอาทีฟิวส์ที่ออกแบบใช้งานกับระบบจำหน่าย 22 kV ดังนั้นพิกัดแรงดันที่ใช้ในการออกแบบครอบเอาทีฟิวส์เท่ากับ 27 kV
- 2) เลือกระดับความเปรอะเปื้อนจากตารางที่ 3.3 โดยเลือกออกแบบให้ใช้งานกับระดับความเปรอะเปื้อนสูงมาก

ตารางที่ 3.3 ระดับความเปรอะเปื้อน

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

3) หาค่า D_m (ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของดรอพเอาร์ทพีวีส) เพื่อจะนำค่า D_m ที่ได้ไปเลือกค่า K_d ซึ่งเป็นตัวประกอบแก้ไข

$$D_m = (D_{e1} + D_{e2} + 2D_i) / 4 \quad (3.7)$$

โดยที่ D_{e1} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกใหญ่
 D_{e2} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปีกเล็ก
 D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนดรอพเอาร์ทพีวีส
 k_d คือ ตัวประกอบแก้ไข (correction factor); $k_d = 1$ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของดรอพเอาร์ทพีวีส (D_m) < 300 มิลลิเมตร

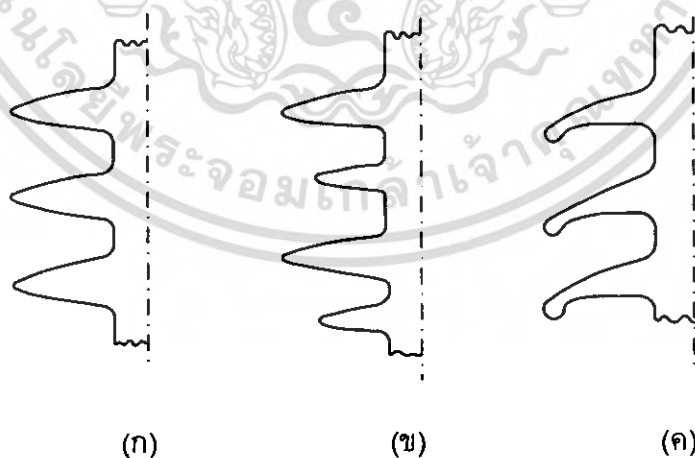
4) หาระยะ Minimum nominal creepage distance ตามสมการที่ 3.8

$$(L_{nc})_{min} = (L_{sc})_{min} \times U_m \times K_d \quad (3.8)$$

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

ดังนั้น $(L_{nc})_{min} = 483.2 \text{ mm}$
 เลือกออกแบบ $(L_{nc})_{min}$ ที่ 500 mm

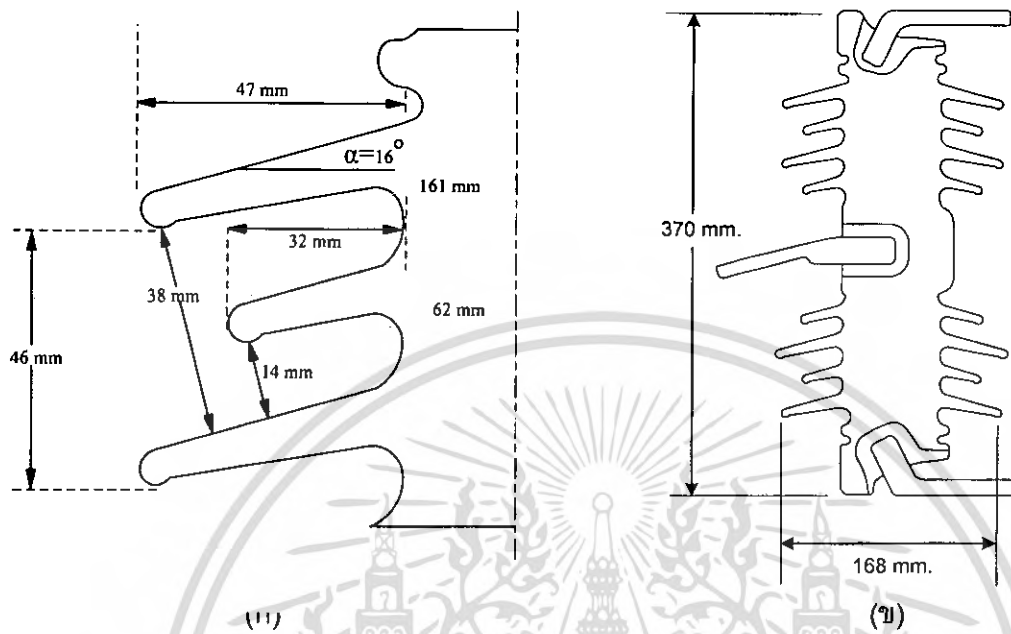
5) เลือกแบบปีกของดรอพเอาร์ทพีวีสและออกแบบ



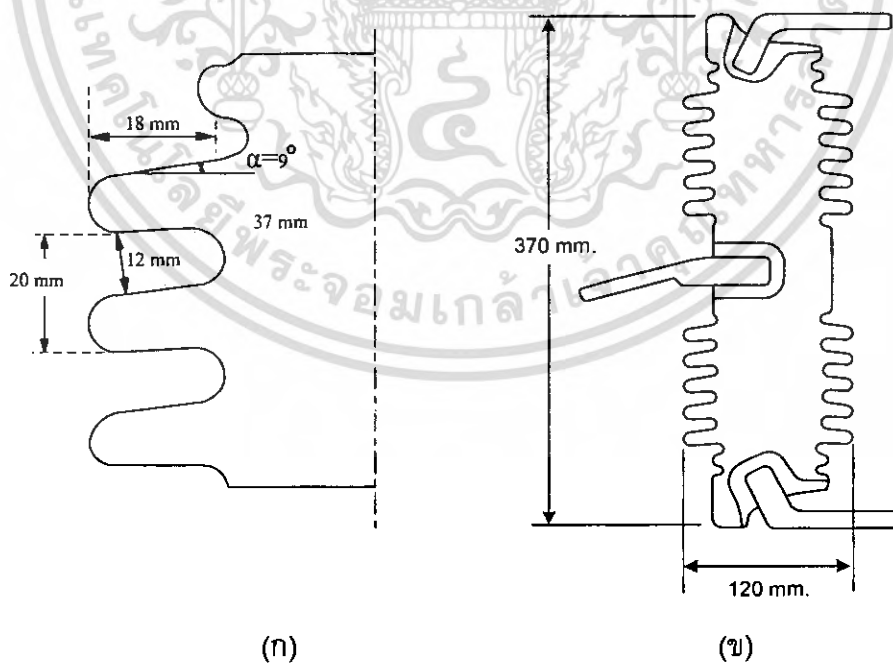
รูปที่ 3.13 รูปแบบของปีกประเภทต่าง ๆ (ก) สิ่งเปราะจะเป็นมีโอกาสที่จับเกาะน้อยที่สุด แต่ทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น ลมพัดหรือฝนตกได้เร็วที่สุด (ข) มีปีกสั้นมาเสริมสลักกับปีกยาวเพื่อทำหน้าที่ขัดเซาะระยะรั้วที่หายไป ปีกแบบนี้จะทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกแบบ(ก) (ค) สิ่งเปราะจะเป็นมีโอกาสจับเกาะได้เพิ่มขึ้น แต่มีคุณสมบัติในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่าปีกชนิดแบบอื่นๆ แต่โอกาสที่หยดน้ำจะเชื่อมต่อระหว่างปีกในสภาวะที่ฝนตกหนักมีเพิ่มขึ้น

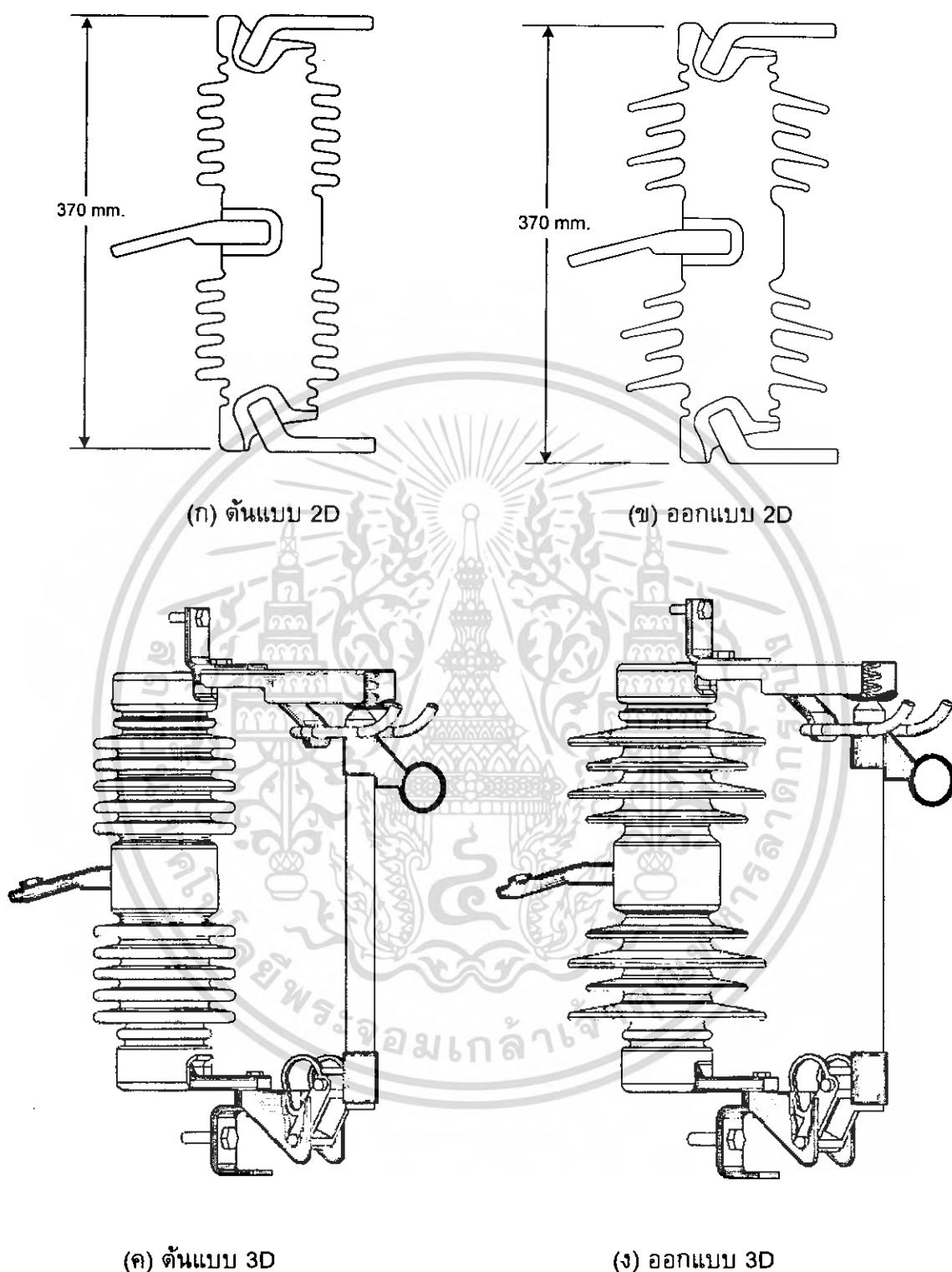


รูปที่ 3.14 ภาพสเกตของดรอเพอาร์ทฟิวส์ที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ดรอเพอาร์ทฟิวส์ปีกสลัดที่ออกแบบ



รูปที่ 3.15 ภาพสเกตของดรอเพอาร์ทฟิวส์ต้นแบบที่มีใช้งาน (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ (ข) ดรอเพอาร์ทฟิวส์ปีกธรรมชาติต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบตรอบเอาท์ดันแบบที่มีใช้งานและตรอบเอาท์ฟิวส์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 815 และค่าต้นแบบ

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานและค่าต้นแบบ

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ	ค่าต้นแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	38.67 mm	12 mm
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	0.97	1.11
Ld/d	น้อยกว่า 5	$Ld_1/d_1 = 4.3$ $Ld_2/d_2 = 4.05$	3.08
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	15 mm	-
α	มากกว่า 5 องศา	16 องศา	9 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	2.02	1.4
P.F.	มากกว่า 0.7	1.137	1.51

หมายเหตุ มุม α เท่ากับ 16 องศาที่ออกแบบได้มาจากผลการจำลองในภาคผนวก ค

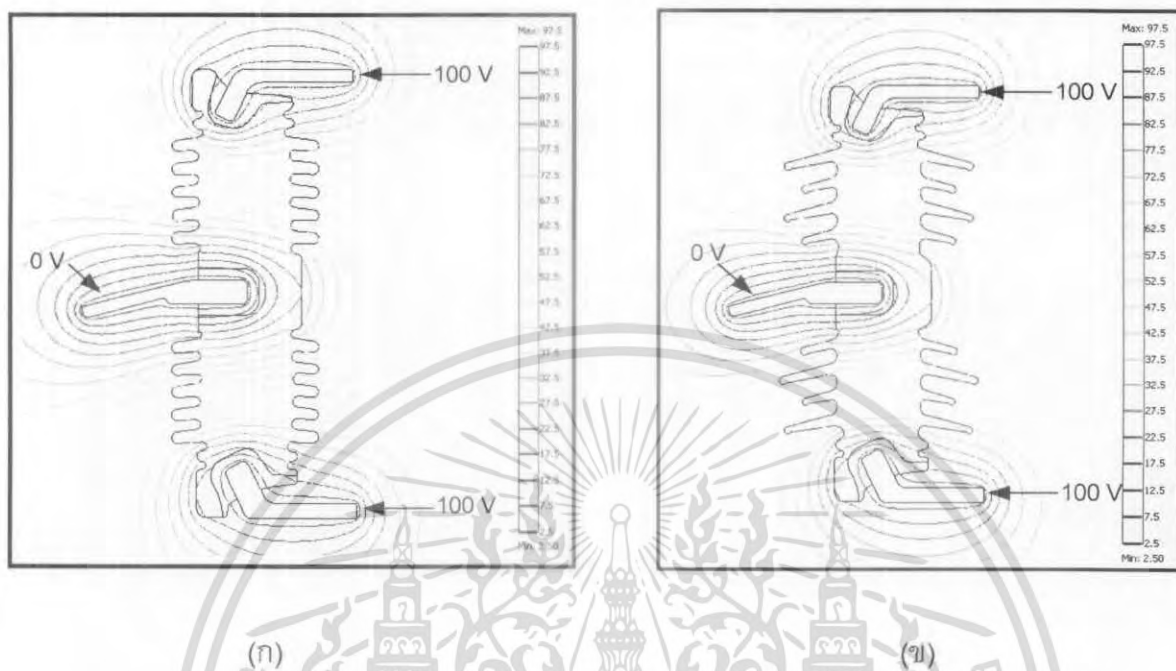
ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ

	ค่าที่ออกแบบ (mm.)	ค่าต้นแบบ (mm.)
ระยะรั้ว	500	320

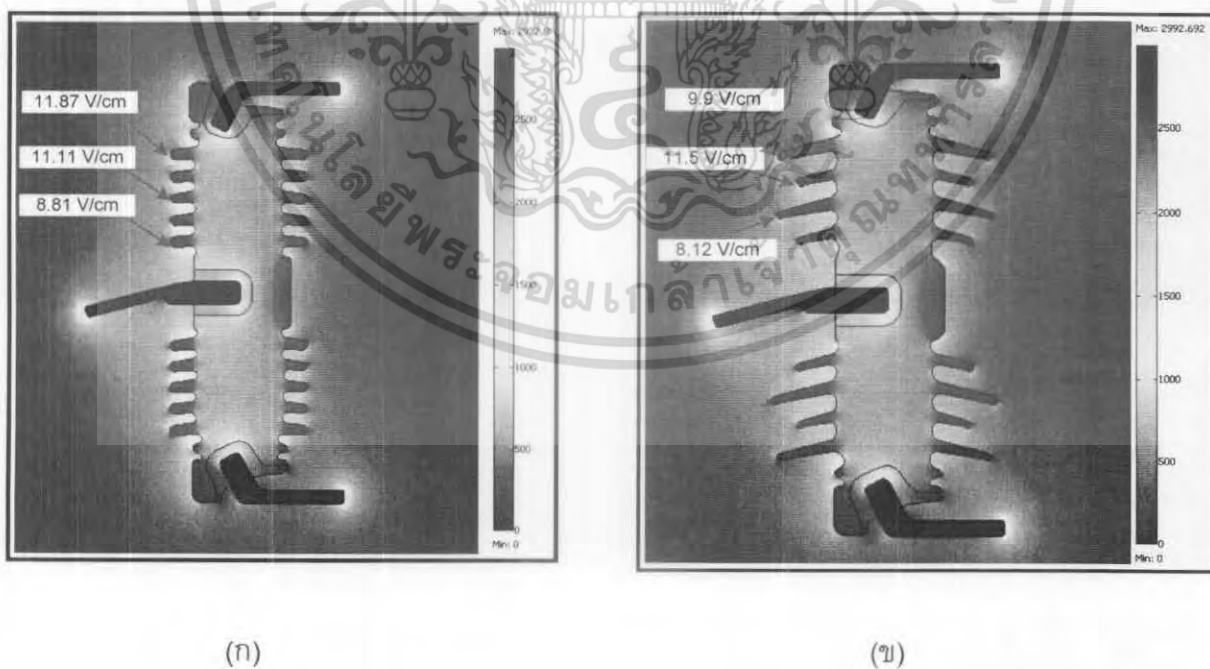
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) วิเคราะห์การกระจายแรงดันและการกระจายสนามไฟฟ้าของดรอเพอาร์ทพีวีเอส

ที่ออกแบบ

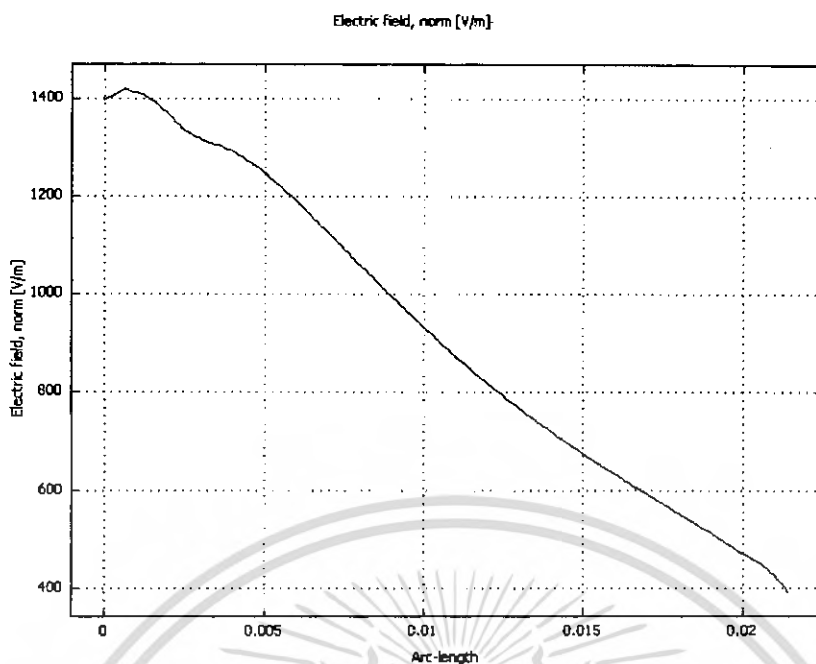


รูปที่ 3.17 วิเคราะห์การกระจายแรงดันของดรอเพอาร์ทพีวีเอส (ก) ดรอเพอาร์ทพีวีเอสต้นแบบ (ข) ดรอเพอาร์ทพีวีเอสที่ออกแบบ

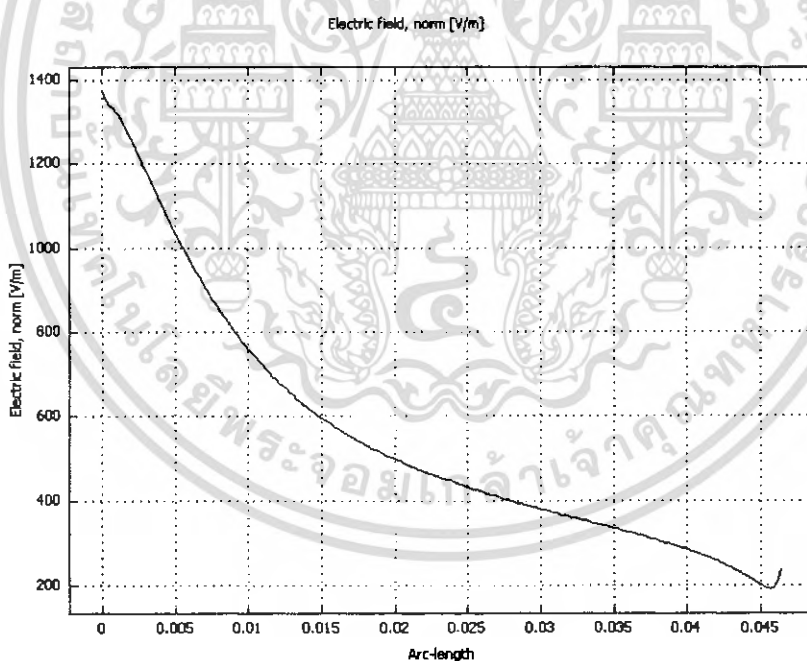


รูปที่ 3.18 วิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าของดรอเพอาร์ทพีวีเอส (ก) ดรอเพอาร์ทพีวีเอสต้นแบบ (ข) ดรอเพอาร์ทพีวีเอสที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



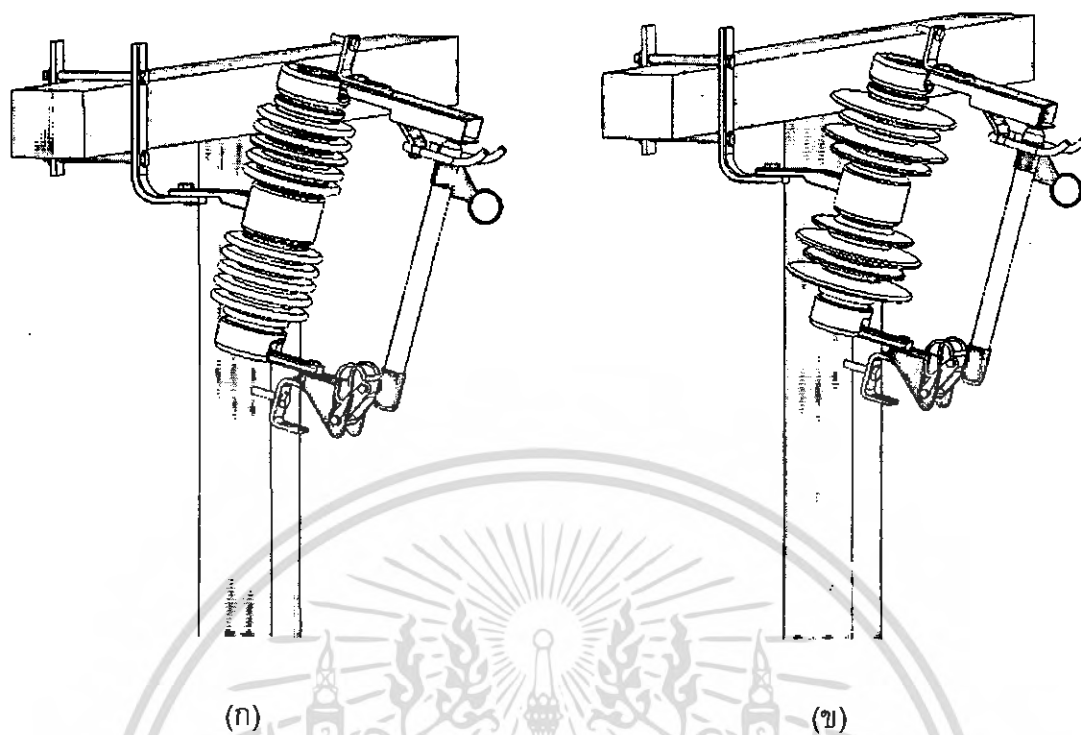
(ก) การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกฉนวนรอบเอาต์พิวส์ปีกแรกจากด้านบนของรอบเอาต์พิวส์ต้นแบบ



(ข) การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกฉนวนรอบเอาต์พิวส์ปีกแรกจากด้านบนของรอบเอาต์พิวส์ที่ออกแบบ

รูปที่ 3.19 กราฟการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวปีกฉนวนรอบเอาต์พิวส์ปีกแรกจากด้านบนของรอบเอาต์พิวส์ต้นแบบกับรอบเอาต์พิวส์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การติดตั้งทรอบเอาต์ฟิวส์ (ก) ดันแบบ (ข) ที่ออกแบบ

3.5.2 การวิเคราะห์ผลการออกแบบ

ในการออกแบบปีกทรอบเอาต์ฟิวส์ได้ทำการออกแบบให้มีรูปทรงเป็นปีกสลับ เพื่อให้ทำความสะอาดตัวเองได้และสิ่งเปราะจะเป็นจับเกาะได้ยากขึ้น และจากตารางผลการเปรียบเทียบทรอบเอาต์ฟิวส์ดันแบบกับทรอบเอาต์ฟิวส์ที่ออกแบบ จะเห็นว่าทรอบเอาต์ฟิวส์ดันแบบค่า C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน) ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน และระยะรั้วมีค่าน้อยไม่เหมาะสมกับการใช้งานในบริเวณเปราะเป็อนสูงมาก แต่ทรอบเอาต์ฟิวส์ที่ออกแบบใหม่ จะปรับระยะต่างๆให้ได้ตามมาตรฐานกำหนดและเพิ่มระยะรั้วให้มากขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งานในบริเวณเปราะเป็อนสูงมาก และจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปีกทรอบเอาต์ฟิวส์ที่ออกแบบมีค่าน้อยกว่าทรอบเอาต์ฟิวส์ดันแบบ

บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรอบเอาท์ฟิวส์

การทดสอบทรอบเอาท์ฟิวส์ในโครงการนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรอบเอาท์ฟิวส์สภาวะปกติผิวแห้งสะอาด และสภาวะเปราะเปื้อนผิวเปียกชื้น ทรอบเอาท์ฟิวส์ที่ใช้ในการศึกษามีพิกัดแรงดัน 22 kV กระแสต่อเนื่อง 100 A ดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 การทดสอบในสภาวะปกติผิวแห้งสะอาดทดสอบตามมาตรฐาน IEEEStd4 :1995, IEEE C37.40-1993 IEEE C37.41-2000, IEEE C37.42-1996 และการทดสอบในสภาวะเปราะเปื้อนผิวเปียกชื้นทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60-1, IEC 507



รูปที่ 4.1 ทรอบเอาท์ฟิวส์ที่ใช้ในการทดสอบพิกัด 27 kV 100 A

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของทรอบเอาท์ฟิวส์ที่นำมาทดสอบ

RATED VOLTAGE (kV)	RATED CURRENT (A)	BREAKING CURRENT (kA)	IMPULSE WITHSTAND VOLTAGE LINE TO GROUND BIL (kV)	WET WITHSTAND VOLTAGE (kV)	CREEPAGE DISTANCE MIN (mm)	WEIGHT (kg)	DIMENSION L X H (cm)
27	100	8	125	50	320	8.5	500X300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของครอบเอาต์พิวส์สภาวะปกติผิวแห้งสะอาด

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของครอบเอาต์พิวส์สภาวะปกติผิวแห้งสะอาด เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวน โดยหัวข้อการทดสอบคือ การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องและการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบดูจากพิกัดแรงดันใช้งานของตัวครอบเอาต์พิวส์ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 Minimum dielectric withstand test voltages

Rated voltage	Terminal-to-ground			Terminal-to-Terminal	
	AC dry 1 min	AC wet 10 s	BIL	AC dry 1 min	BIL
15	35	30	95	35	95
27	42	36	125	42	125
38	70	60	150	70	150

Voltage in kV_{rms} or kV_{peak} as appropriate.

4.1.1 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง อุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV, 50 mA

- พิกัดกำลัง : 5 kVA

- อินพุท แรงดัน : 235 V

กระแส : 22 A

- เอาท์พุท แรงดัน : 100 kV 1 PE

กระแส : 0.05 A

- ความถี่ : 50 Hz

2) โวลต์จติไวเตอร์

- พิกัด C1 : 213 pF

- พิกัด C2 : 213 nF

- พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า: 300 kV

- พิกัดแรงดันที่ความถี่ 50 Hz : 100 kV

- อัตราส่วน(ratio) : 960:1

3) ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์

- พิกัด : 0.49 MΩ

4) ครอบเอาต์พิวส์

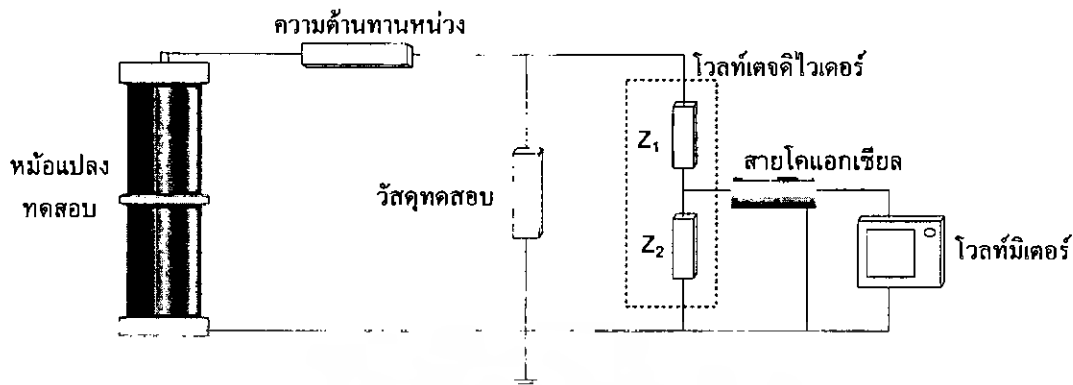
- พิกัดแรงดัน : 22 kV

- พิกัดกระแสต่อเนื่อง : 100 A

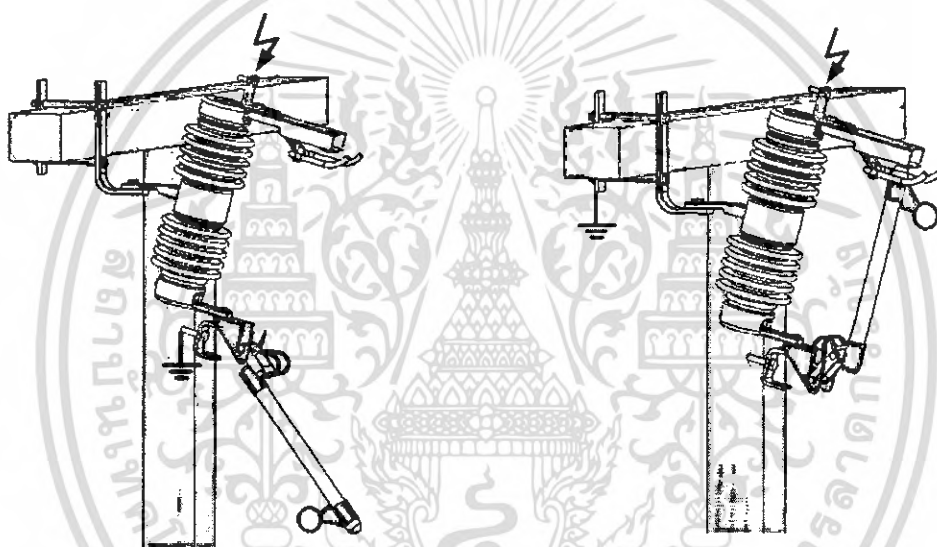
5) โวลท์มิเตอร์, สายโคแอกเชียล 75 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรการทดสอบ



(ก) วงจรการทดสอบ



(ข) ลักษณะการบอแรงดัน
เทอร์มินอล - เทอร์มินอล

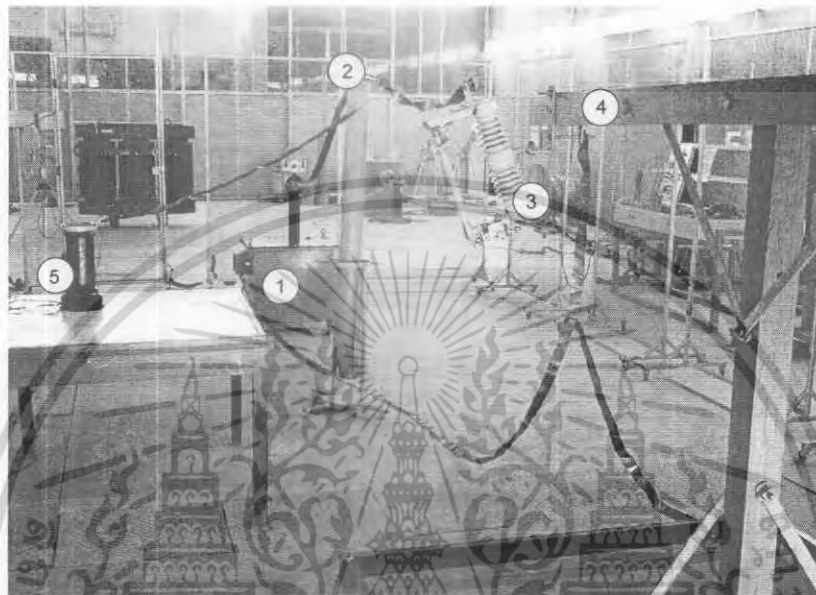
(ค) ลักษณะการป้อนแรงดัน
เทอร์มินอล - กราวด์

รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง

ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อยังรูปที่ 4.2 และทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 โดยใช้ ครอบเอาต์ไฟส์ที่ผ่านการทำความสะอาดครีปของฉนวน ครอบเอาต์ไฟส์ต้องไม่ผ่านการใช้งานไม่มีร่องรอยแตกชำรุดหรือทดสอบมาก่อน ส่วนประกอบของครอบเอาต์ไฟส์ต้องมาจากโรงงานเดียวกัน อุณหภูมิระหว่างการทดสอบอยู่ระหว่าง -30°C ถึง 40°C ต้องมีการบันทึกค่า ความดัน ความชื้น อุณหภูมิ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบเป็นแรงดันรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz อัตราส่วน $V_{\text{peak}}/V_{\text{rms}}$ ต้องมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} \pm 5\%$ กระแส short circuit ของหม้อแปลงทดสอบต้องมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.5 A การติดตั้งครอบเอาต์ไฟส์จะติดตั้งบนไม้คอนตามการใช้งานปกติและสูงจากพื้นมากกว่า 1.5 m ไม้คอนที่ใช้จะมีความกว้าง 9×11 cm เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายตัวนำเป็นสายเปลือยและมีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถใส่ขั้วต่อบนล่าง หรืออาจเป็นสายแบบอื่นที่ไม่มีผลในการทดสอบ สายตัวนำควรวอยู่ในแนวนอนขนานกับไม้ค้อนอย่างน้อย 30 cm จากขั้วต่อบนและล่าง ขั้วต่อล่างอาจโค้งงอได้ถ้าจำเป็น ตำแหน่งในการทดสอบจะทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวด์ โดยในการทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง



(ก) วงจรการทดสอบ



(ข) ชุดควบคุมหม้อแปลงทดสอบและเครื่องมือวัด

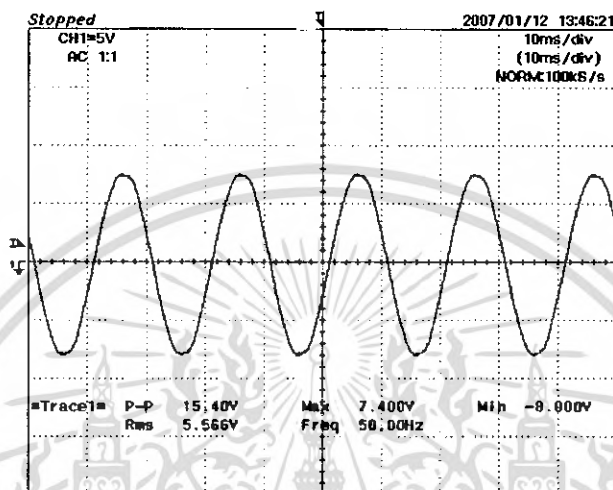
รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบความทนอยู่ใต้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง

- | | | |
|-------|-------------------------------|------------------------------|
| เมื่อ | 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ | 4 คือ ไม้ค้อน |
| | 2 คือ ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์ | 5 คือ โวลต์เดติไวเดอร์ |
| | 3 คือ ดรอพเอาท์ฟิวส์ | 6 คือ ชุดควบคุมหม้อแปลงทดสอบ |
| | 7 คือ เครื่องมือวัดแรงดัน | |

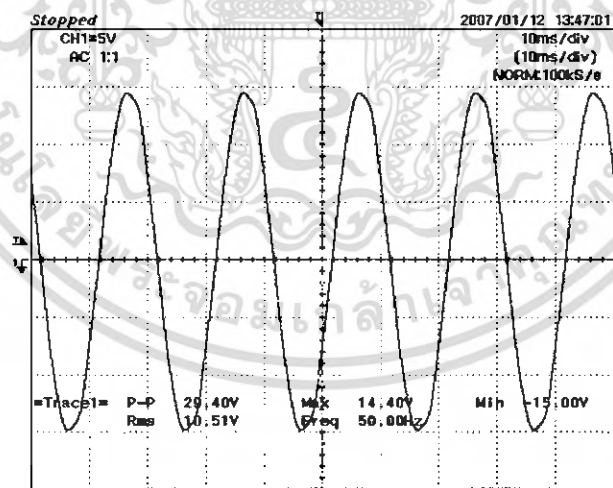
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันบรรยากาศ =.....763..... มม.ปรอท
 อุณหภูมิแวดล้อม =..... 32..... เซลเซียส
 ความชื้นสัมพัทธ์ =..... 70..... %
 ความชื้นสัมบูรณ์ =.....24..... กรัม/ลูกบาศก์เมตร

3) บันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงทดสอบ



(ก) ระดับแรงดัน 5 kV



(ข) ระดับแรงดัน 10 kV

รูปที่ 4.4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

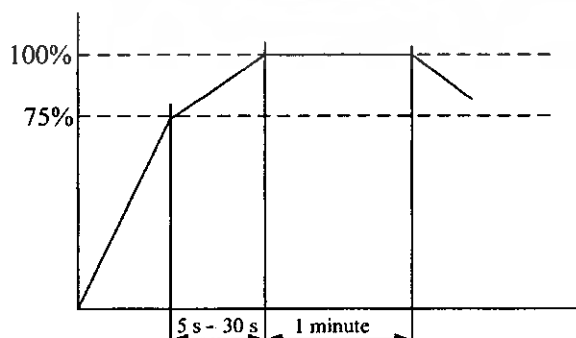
4) แก่ค่าเนื่องจาก อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้น เพื่อพิจารณาปรับแรงดันที่สภาวะมาตรฐานเป็นแรงดันที่สภาวะห้องทดลองตามสมการที่ 2, 3, 4, 5 ในภาคผนวก ก

$$\begin{aligned} g &= \frac{U_b}{500L\delta k} \\ &= \frac{46.2}{500 \times 0.22 \times 0.964 \times 1.17} \\ &= 0.372 \end{aligned}$$

จากกราฟรูปที่ ก.2 $m = w = 0.1$

$$\begin{aligned} K_1 = \delta^m &= \left[\frac{b(273 + t_c)}{b_0(273 + t)} \right]^m \\ &= \left[\frac{763 \times (273 + 20)}{760 \times (273 + 32)} \right]^{0.1} \\ &= 0.964^{0.1} = 0.996 \\ K_2 &= k^w \\ &= 1.17^{0.1} = 1.01 \\ U &= U_n \times K_1 \times K_2 \\ &= 42 \times 0.996 \times 1.01 = 42.25 \text{ kV} \end{aligned}$$

5) ทำการทดสอบในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวนด์ โดยป้อนแรงดันทดสอบกระแสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ขนาด 42.25 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) โดยการขึ้นแรงดันในการทดสอบจะต้องขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันที่ 75% หลังจากนั้นค่อยๆขึ้นถึงค่าแรงดันถึงค่าแรงดัน 100% ภายใน 5 ถึง 30 วินาที และปล่อยค้างไว้ 1 นาทีดังแผนภาพรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6)บันทึกผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งสะอาดกระแสสลับ 50 Hz ของดรอเพอร์ทไฟวส์ที่ระดับแรงดัน 42.25 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง)

ดรอเพอร์ทไฟวส์ ตัวอย่างที่	ผลการทดสอบ	
	เทอร์มินอล-เทอร์มินอล	เทอร์มินอล-กราว์
1	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว
2	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว
3	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว	ไม่เกิดวาทไฟตามผิว

การวิเคราะห์และการประเมินผลการทดสอบ

การทดสอบจะยอมรับได้ถ้าไม่เกิดการวาทไฟตามผิวและไม่เกิดความเสียหายของดรอเพอร์ทไฟวส์ ถือว่าดรอเพอร์ทไฟวส์ผ่านการทดสอบ ถ้าเกิดสปาร์กเล็กๆ ขึ้นที่ผิวของดรอเพอร์ทไฟวส์ ต้องพิจารณาว่ามีผลต่อฉนวนหรือไม่

จากผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาทไฟตามผิวแห้งสะอาดกระแสสลับ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 42.25 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และเทอร์มินอล-กราว์ พบว่าดรอเพอร์ทไฟวส์ทั้งหมดไม่เกิดวาทไฟตามผิว ไม่มีร่องรอยเสียหาย ไม่มีการสปาร์กเล็กๆ ขึ้นที่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าดรอเพอร์ทไฟวส์ผ่านการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่องตามมาตรฐาน ANSI C37.42-1996

4.1.2 การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

- พิกัด 200 kV/2 stage, 5 kJ
- แรงดันที่ใช้ในการชาร์จ : 200 kV (100 kV/stage)
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงสุด: 180 kV
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง : 155 kV
- พลังงานจ่ายสูงสุด : 5 kJ

2) คาปาซิเตอร์โวลต์เดจดีไวเดอร์

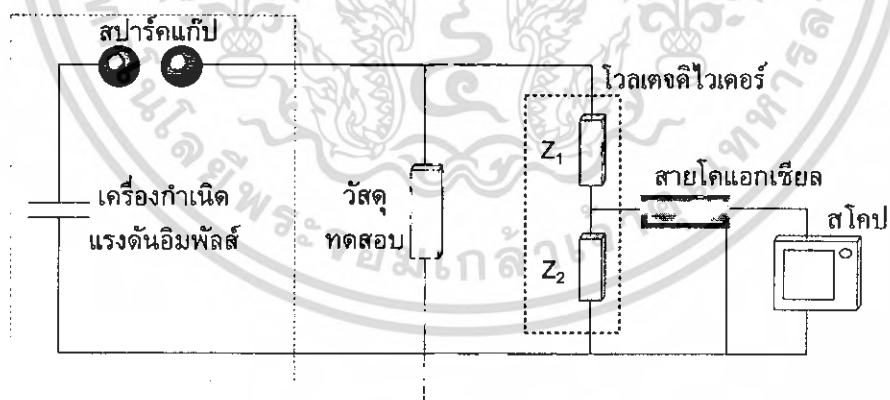
- คาปาซิแตนซ์ : 4200 pF
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า : 200 kV
- พิกัดแรงดันที่ความถี่ 50 Hz : 50 kV
- อัตราส่วน(ratio) : 230.5:1

3) ทรอบเอาท์ฟิวส์

- พิกัดแรงดัน : 22 kV
- พิกัดกระแสต่อเนื่อง : 100 A

4) โวลท์มิเตอร์, สายโคแอกเซียล 75 Ω

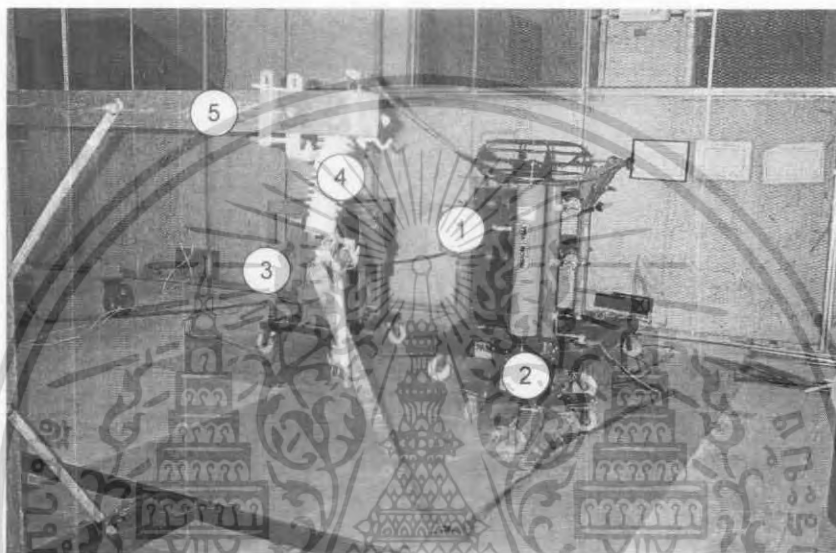
วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.6 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อย่างจรดังรูปที่ 4.6 และทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบเหมือนกับการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง แต่แรงดันที่ใช้ในการทดสอบเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม $1.2/50 \mu\text{s}$ ช่วงเวลาหน้าคลื่น $\leq 1.2 \mu\text{s}$ และช่วงเวลาหางคลื่น $\geq 50 \mu\text{s}$ ตำแหน่งในการทดสอบจะทดสอบทั้งในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวด์ ในการทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง



(ก) วงจรการทดสอบ



(ข) ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

รูปที่ 4.7 วงจรทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ของทรอบเอาท์พิวส์

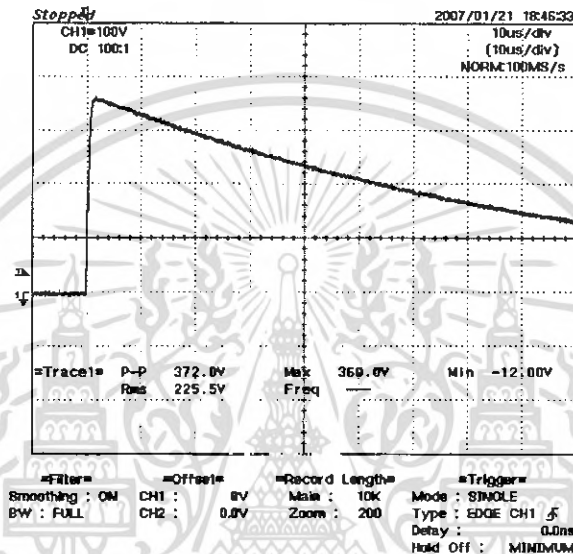
- เมื่อ
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 - 2 คือ โวลเตจดีไวเดอร์
 - 3 คือ ชุดเครื่องอัดประจุ
 - 4 คือ ทรอบเอาท์พิวส์
 - 5 คือ ไม้ค้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

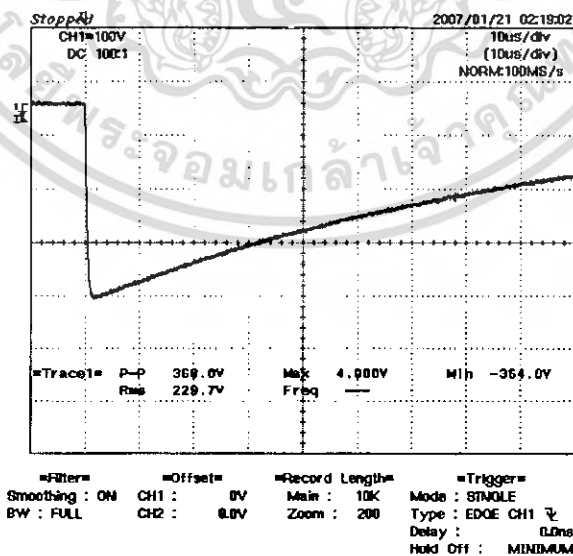
2) บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

ความดันบรรยากาศ =763..... มม.ปรอท
 อุณหภูมิแวดล้อม =32..... เซลเซียส
 ความชื้นสัมพัทธ์ =70..... %
 ความชื้นสัมบูรณ์ =24..... กรัม/ลูกบาศก์เมตร

3) บันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขาขึ้นที่วัดทดสอบที่ระดับแรงดัน 80 kV
 $T_1=1.26 \mu\text{s}$, $T_2 = 59.8 \mu\text{s}$



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ขาลบที่วัดทดสอบที่ระดับแรงดัน 80 kV
 $T_1=1.24 \mu\text{s}$, $T_2 = 59.2 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) แก่ค่าเนื่องจาก อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้น เพื่อพิจารณาปรับแรงดันที่สภาวะมาตรฐานเป็นแรงดันที่สภาวะห้องทดลองตามสมการที่ 2, 3, 4, 5 ในภาคผนวก ก

$$\begin{aligned}
 g &= \frac{U_b}{500L\delta k} \\
 &= \frac{137.5}{500 \times 0.22 \times 0.964 \times 1.13} \\
 &= 1.147
 \end{aligned}$$

จากกราฟรูปที่ ก.2 $m = w = 1$

$$\begin{aligned}
 K_1 = \delta^m &= \left[\frac{b(273 + t_0)}{b_0(273 + t)} \right]^m \\
 &= \left[\frac{763 \times (273 + 20)}{760 \times (273 + 32)} \right]^1 \\
 &= 0.964^1 = 0.964
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_2 = k^w &= 1.13^1 = 1.13
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U &= U_n \times K_1 \times K_2 \\
 &= 125 \times 0.964 \times 1.13 = 136.165 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

5) ทำการทดสอบในกรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล และในกรณีเทอร์มินอล-กราวนด์ โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 136 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ แต่เนื่องมาจากประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ต่ำ ทำให้ไม่สามารถปรับขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นได้ตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จึงทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง)

6)บันทึกผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่ววอก)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอบเอาต์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล

ครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A	ผลการทดสอบ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 3	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่ววอก)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอบเอาต์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวนด์

ครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A	ผลการทดสอบ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 3	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วลบ)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอบเอาต์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-เทอร์มินอล

ครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A	ผลการทดสอบ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 3	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์(ชั่วลบ)ที่ระดับแรงดัน 80 kV (ที่สภาวะห้องทดลอง) ของครอบเอาต์พิวส์ กรณีเทอร์มินอล-กราวนด์

ครอบเอาต์พิวส์ พิกัด 22 kV 100 A	ผลการทดสอบ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ตัวอย่างที่ 1	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 2	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว
ตัวอย่างที่ 3	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว	ไม่เกิดวาบไฟตามผิว

การวิเคราะห์และการประเมินผลการทดสอบ

การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบของครอบเอาต์พิวส์ จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ครอบเอาต์พิวส์ถือว่าผ่านการทดสอบถ้าไม่เกิดการวาบไฟตามผิวและไม่มีร่องรอยความเสียหาย ถ้าเกิดการวาบไฟตามผิว 1 ครั้ง ให้ทำการทดสอบอีก 9 ครั้ง ถ้าไม่เกิดการวาบไฟตามผิวถือว่าผ่านการทดสอบ แต่ถ้าเกิดวาบไฟตามผิวมากกว่า 1 ครั้ง ให้ถือว่าครอบเอาต์พิวส์มีร่องรอยความเสียหาย

ผลการทดสอบไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าครอบผ่านการทดสอบหรือไม่ เนื่องจากระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด จากผลการทดสอบครอบเอาต์พิวส์ตัวอย่างละ 3 ครั้ง ครอบเอาต์พิวส์ไม่เกิดการวาบไฟตามผิว และไม่เกิดร่องรอยความเสียหาย

4.2 การทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของครอบเอาทไฟวส์ผิวเปียกเปราะเปื้อน

ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของครอบเอาทไฟวส์ภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนตาม IEC 507 มีวิธีการทดสอบอยู่ 2 วิธีคือวิธี salt fog และวิธี solid layer ในโครงการนี้ ได้ใช้การทดสอบภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนแบบ solid layer การทดสอบด้วยวิธี Solid layer เป็นการจำลองสิ่งเปราะเปื้อนฝุ่นละออง โดยการเคลือบสารทั่วทั้งผิววัสดุทดสอบ สารที่เคลือบจะผสมกันระหว่างน้ำเกลือกับตัวกลางสำหรับทำให้สารเกาะติดที่ไม่นำไฟฟ้า การทดสอบด้วยวิธีนี้ได้เลือก Kaolin composition เป็นสิ่งเปราะเปื้อนจำลอง

4.2.1 การจำลองสิ่งเปราะเปื้อน

การทำสิ่งเปราะเปื้อนจะทำโดยการเตรียมสิ่งเปราะเปื้อนขึ้นมาสองระดับ ได้แก่

- เกาลิน 40 กรัม เกลือ 26 กรัม น้ำ 1 ลิตร
- เกาลิน 40 กรัม เกลือ 120 กรัม น้ำ 1 ลิตร



(ก) ชั่งเตรียมเกาลิน

(ข) ชั่งเตรียมเกลือ

รูปที่ 4.10 การเตรียมสารเกาลินและเกลือเพื่อจำลองสิ่งเปราะเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผสมส่วนผสมเกล็ดหิน เกลือ และน้ำ

(ข) การฉีดพ่นผิวของครอบเอาท์พิวส์



(ค) การอบครอบเอาท์พิวส์

รูปที่ 4.11 การจำลองสิ่งเปราะเปื้อนของครอบเอาท์พิวส์

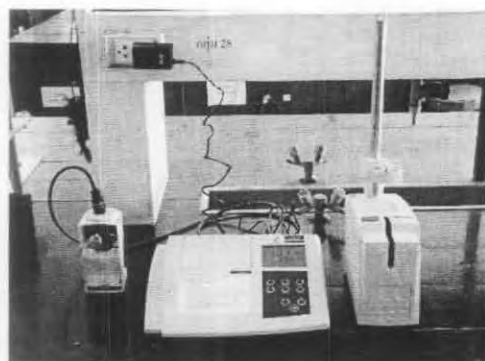
4.2.2 การเก็บตัวอย่างสิ่งเปราะเปื้อนเพื่อวัดค่า ESDD

- 1) ใช้น้ำกลั่นล้างอุปกรณ์ต่างๆ เช่น บีกเกอร์ แปร่ง และอุปกรณ์อื่นๆ
- 2) เติมน้ำสะอาด 300 ml ในบีกเกอร์
- 3) นำแปร่งไปเช็ดผิวของครอบเอาท์พิวส์ แล้วนำแปร่งกลับไปจุ่มในบีกเกอร์ที่มีน้ำสะอาด แกว่งแปร่งเบาเพื่อให้สิ่งเปราะเปื้อนละลายในน้ำ
- 4) ทำซ้ำข้อ 3 อีกหลายๆครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีสิ่งเปราะเปื้อนเหลืออยู่ที่ผิวของครอบเอาท์พิวส์แล้ว
- 5) ทำการวัดค่าความนำไฟฟ้า และ อุณหภูมิของน้ำที่มีสิ่งเปราะเปื้อนผสมอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ



(ข) เครื่องวัดความนำไฟฟ้ารุ่น inolab level 2



(ค) การเก็บสิ่งเปราะเปื้อนที่เกาะอยู่บนผิวของดรอปเอ้าท์พิวส์

รูปที่ 4.12 การเก็บตัวอย่างสิ่งเปราะเปื้อนเพื่อวัดหาค่า ESDD

4.2.3 คำนวณหาค่า ESDD ตามมาตรฐาน IEC 507

1) คำนวณหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20 °C ตามสมการ

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - \sigma(\theta - 20)] \tag{4.1}$$

- เมื่อ θ คือ อุณหภูมิของสารละลาย (°C)
- σ_{θ} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ θ °C (s/m)
- σ_{20} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20 °C (s/m)
- σ คือ ค่าตัวประกอบแก้ไข แปรตามอุณหภูมิของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิต่างๆ

θ ($^{\circ}\text{C}$)	σ
5	0.03156
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

หมายเหตุ ถ้าค่าอุณหภูมิของสารละลายไม่ได้อยู่ในตารางแต่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 5-30 $^{\circ}\text{C}$ ค่า σ สามารถหาได้โดยการประมาณในช่วง (Interpolation)

2) คำนวณค่า ความเป็นเกลือ (Salinity ; S_a) (kg/m^3) ของสารละลายเมื่อ σ_{20} มีค่าอยู่ในช่วง 0.004-0.4 s/m ตามสมการที่ 4.2

$$S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.2)$$

3) คำนวณค่า SDD (salt deposit density) (mg/cm^2) ตามสมการที่ 4.3

$$SDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (\text{mg/cm}^2) \quad (4.3)$$

เมื่อ S_a คือ ค่าความเป็นเกลือของสารละลาย (kg/m^3)

V คือ ปริมาตรสารละลาย (cm^3)

A คือ พื้นที่ผิวของดรอพเอาร์ทพีวีส (cm^2)

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่า ESDD ตามข้อแนะนำ IEC 507

ระดับความ เปรอะเปื้อน	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Conductivity (S/m)	Conductivity at 20 $^{\circ}\text{C}$ (S/m)	Salinity (kg/m^3)	ESDD (mg/cm^2)
1	25	0.0928	0.0919	0.5137	0.0963
2	25	0.3210	0.3180	1.8452	0.3461

หมายเหตุ 1 คือ เกลิติน 40 กรัม เกลือ 26 กรัม น้ำ 1 ลิตร

2 คือ เกลิติน 40 กรัม เกลือ 120 กรัม น้ำ 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การทดสอบหาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเป็อนเป็ยกชั้น อุปกรณ์การทดสอบ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV, 50 mA

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

2) โวลเตจดีไวเดอร์

- พิกัด C1 : 213 pF
- พิกัด C2 : 213 nF
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า : 300 kV
- พิกัดแรงดันที่ความถี่ 50 Hz : 100 kV
- อัตราส่วน(ratio) : 960:1

3) ความต้านทานน้ำบริสุทธิ์

- พิกัด : 0.49 MΩ

4) ครอบเอาท์พิวส์

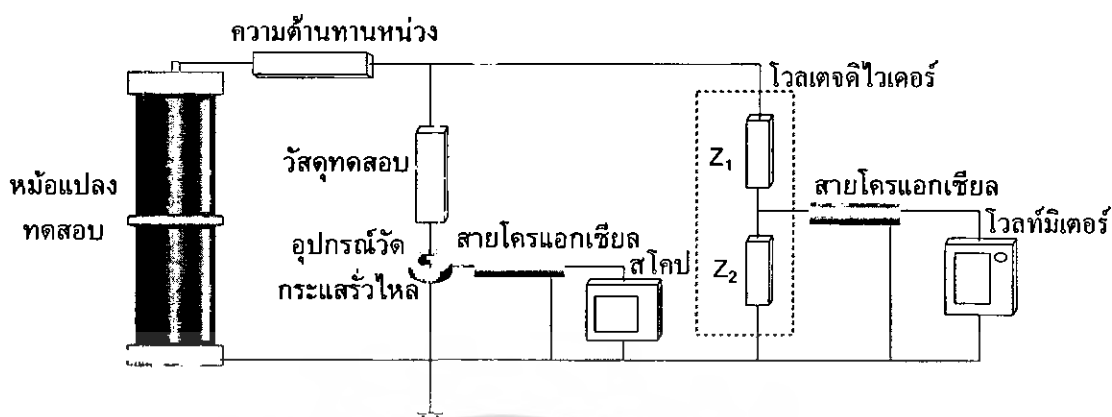
- พิกัดแรงดัน : 22 kV
- พิกัดกระแสต่อเนื่อง : 100 A

5) โวลท์มิเตอร์, สายโคแอกเชียล 75 Ω

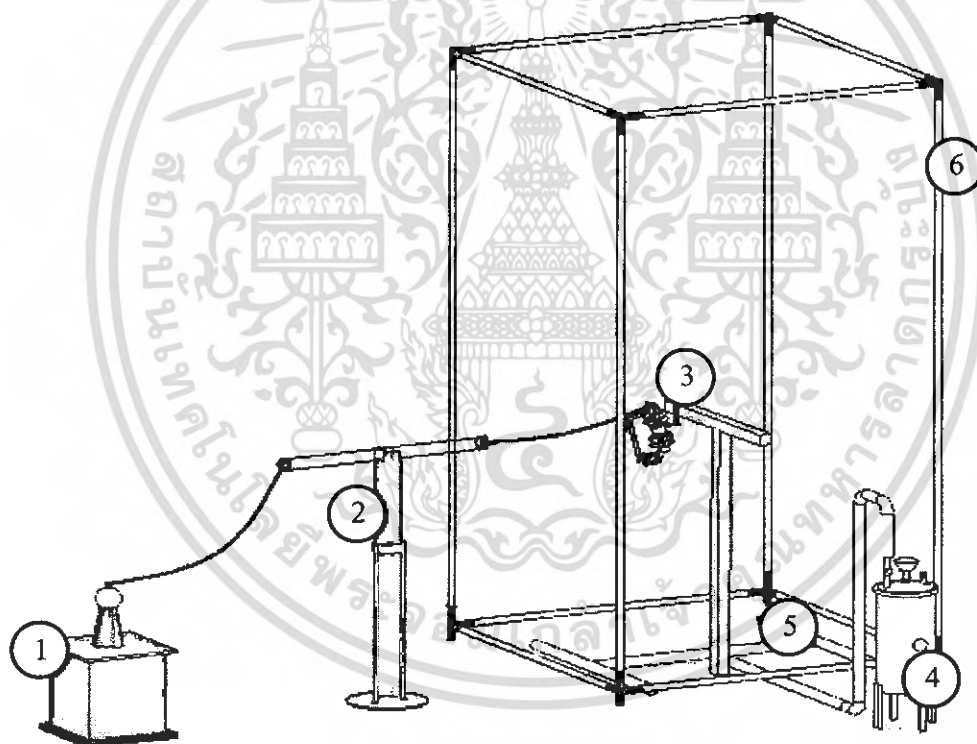
6) กระจังทดสอบ

- ขนาด : กว้าง 2.4 m ยาว 2.4 m สูง 4.5 m

วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.13 วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเป็อนเป็ยกชั้น

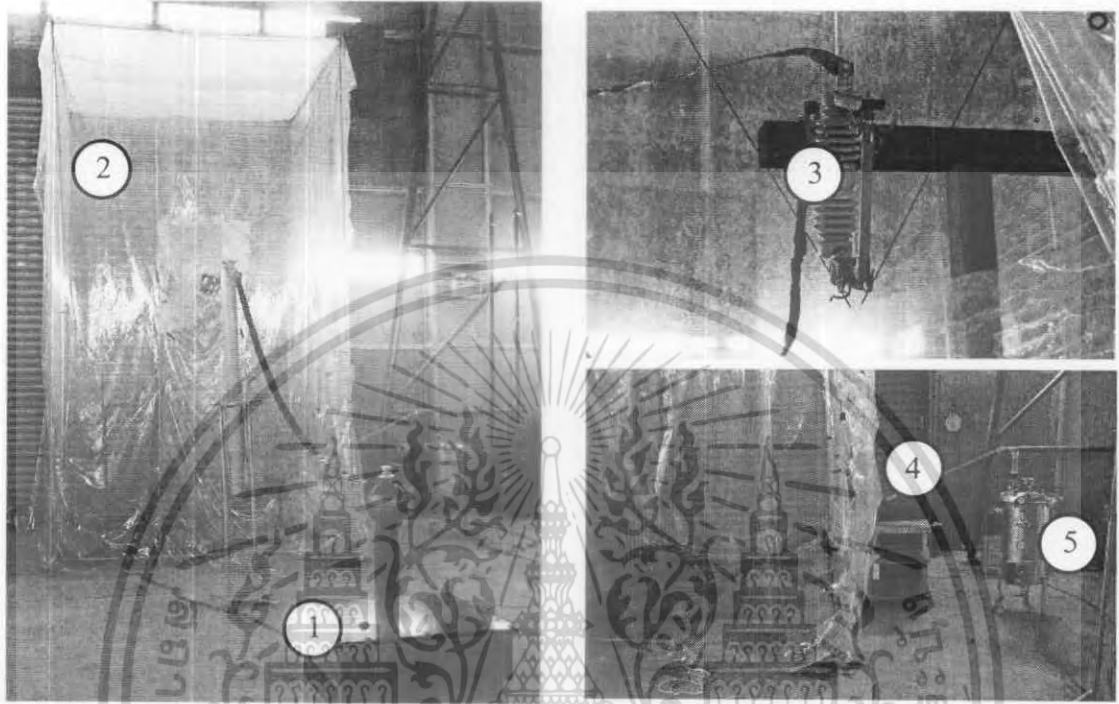


รูปที่ 4.14 ภาพจำลองกระโຈມทดสอบด้วยวิธี Solid layer และวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเป็อนเป็ยกชั้น 1)หม้อแปลงทดสอบ 2) ความต้านทานน้ำบริสุทธี 3)ดรอบเอาท์-ฟิวส์ 4) เครื่องกำเนิดไอน้ำ 5) ท่อจ่ายไอน้ำ 6) กระโຈมพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

1) ต่อดวงจรมัดรูปที่ 4.14 และทำตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI C37.42-1996 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบเหมือนกับการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่ความถี่กำลังต่อเนื่อง และตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 507



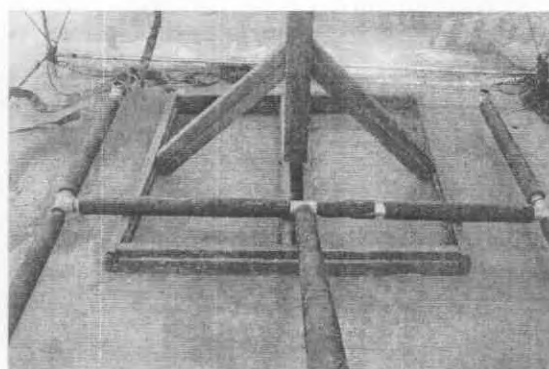
รูปที่ 4.15 กระโจมทดสอบด้วยวิธี Solid layer และแผงวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสถานะเปราะอ่อนเปียกชื้น

- โดยที่
- 1) หม้อแปลงทดสอบ
 - 2) กระโจมพลาสติก
 - 3) ครอบเอาต์ไฟลส์
 - 4) ท่อไอน้ำ
 - 5) เครื่องกำเนิดไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

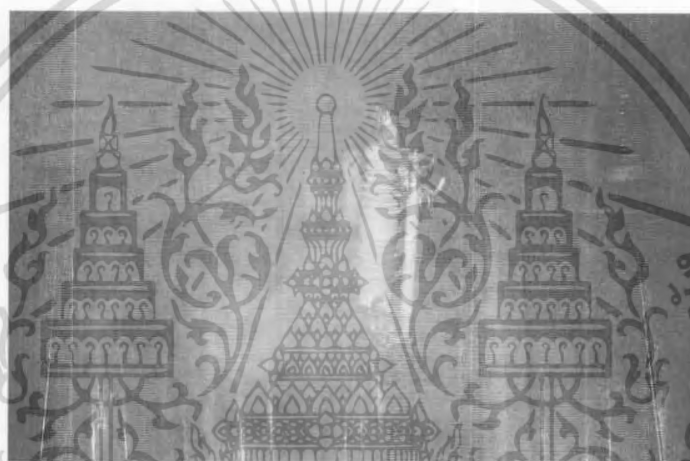


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 ก) เครื่องกำเนิดไอน้ำ ข) การวางท่อจ่ายไอน้ำ



รูปที่ 4.17 ไอน้ำที่เกิดภายในกระโจมทดสอบ



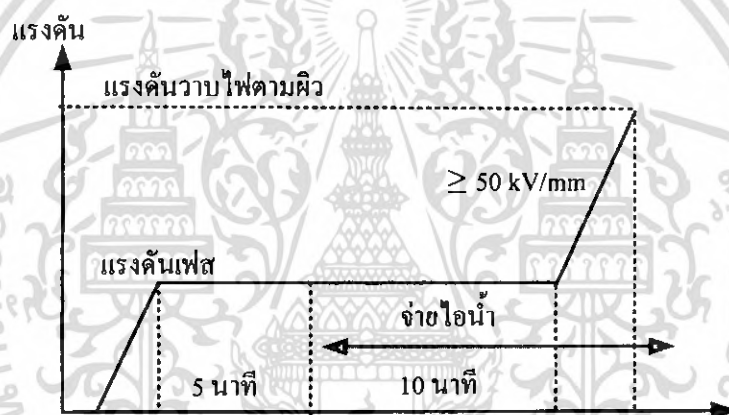
รูปที่ 4.18 กล้องส่องโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) บันทึกสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบดังนี้

ความดันบรรยากาศ	=.....762.....	มม.ปรอท
อุณหภูมิแวดล้อม	=.....29.....	เซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	=.....81.....	%
ความชื้นสัมบูรณ์	=.....24.....	กรัม/ลูกบาศก์เมตร

3) ป้อนแรงดันให้กับครอบเอาต์พิวส์เท่ากับแรงดันระหว่างเฟสกับนิวตรอนเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจ่ายไอน้ำด้วยอัตราการจ่ายไอน้ำประมาณ 50-200 g/m³/hr โดยยังรักษาแรงดันให้เท่าเดิมเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาทำการเพิ่มแรงดันไปจนกว่าจะเกิดวาบไฟตามผิวด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันอย่างน้อย 50 kV/min ดังกราฟรูปที่ 4.19 โดยการทดลองจะแบ่งระดับความเปราะเปื้อนออกเป็น 2 ระดับดังตารางที่ 4.10 และมีช่วงเว้นระยะเวลาระหว่างการทดสอบจนกระทั่งความชื้นภายในกระโجمเท่ากับความชื้นภายนอกกระโجم



รูปที่ 4.19 แผนภาพที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันวาบไฟตามผิวนวนในสภาวะเปราะเปื้อน

4) ทำการบันทึกค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา แรงดันวาบไฟตามผิวและกระแสรั่วไหล แต่ละระดับความเปราะเป็น

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการจำลองความเปราะเป็นด้วยวิธีฝุ่นละออง

	ผลการทดสอบ		
	ครอบเอาทีฟิวส์	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	หมายเหตุ
ระดับเล็กน้อย	ตัวอย่างที่ 1	45 kV	เกิดโคโรนาที่ครีป 7 และ 8
	ตัวอย่างที่ 2	49 kV	เกิดโคโรนาที่ครีป 6
	ตัวอย่างที่ 3	48 kV	เกิดโคโรนาที่ครีป 4 และ 5
ระดับสูงมาก	ตัวอย่างที่ 1	12.7 kV	เกิดโคโรนาที่ครีป 7,8 และ 9
	ตัวอย่างที่ 2	12.7 kV	เกิดโคโรนาที่ครีป 6,7,8 และ 9
	ตัวอย่างที่ 3	12.7 kV	เกิดโคโรนาที่ครีป 7 และ 8



(ก) ตัวอย่างที่ 1 (45 kV)

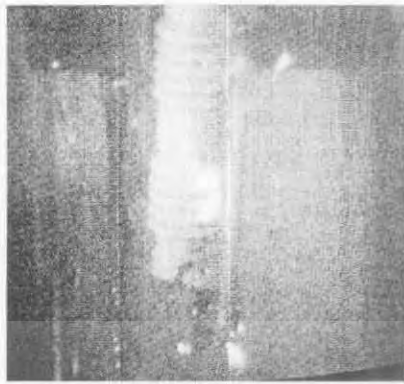
(ข) ตัวอย่างที่ 2 (49 kV)



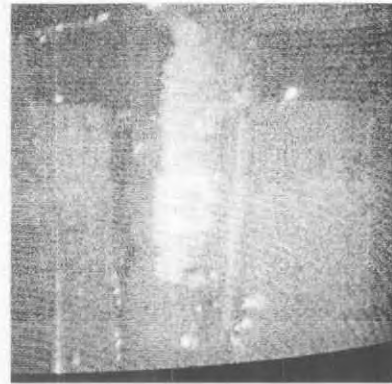
(ค) ตัวอย่างที่ 3 (48 kV)

รูปที่ 4.20 โคโรนาเริ่มเกิดเมื่อระดับความเปราะเล็กน้อย

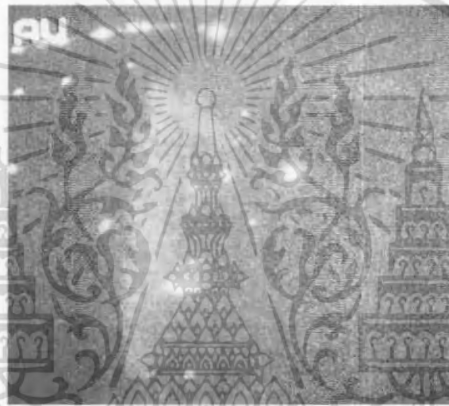
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตัวอย่างที่ 1 (12.7 kV)



(ข) ตัวอย่างที่ 2 (12.7 kV)



(ค) ตัวอย่างที่ 3 (12.7 kV)

รูปที่ 4.21 โคโรนาเริ่มเกิดเมื่อระดับความเปรอะเปื้อนสูงมาก

การวิเคราะห์และการประเมินผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของดรอพเอาท์ฟิวส์ในสภาวะเปรอะเปื้อนเปียกขึ้น พบว่าในระดับความเปรอะเปื้อนเล็กน้อยไม่เกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งานและเริ่มเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันใช้งาน แต่ที่ระดับความเปรอะเปื้อนสูงมากเกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบครอบครัวเฝ้าระวังในสภาวะปกติ ทั้งการทดสอบความคงทน อยู่ได้ที่มีความถี่กำลังต่อเนื่องและการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์พบว่าครอบครัวเฝ้าระวังผ่านการทดสอบ และการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนพบว่าปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนามีความสัมพันธ์กับระดับความเปราะเปื้อน ที่ระดับความเปราะเปื้อนน้อย โคโรนาเกิดขึ้นได้ยากทำให้มีแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่สูง และที่ระดับความเปราะเปื้อนมาก โคโรนาเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. ห้องควบคุมความชื้นจำลองสภาวะเปราะเปื้อนที่ออกแบบและสร้างสามารถทดสอบอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงในสภาวะเปราะเปื้อนได้ตามมาตรฐาน IEC 507 โดยมีอัตราการจ่ายไอน้ำ $0.05 \text{ kg/m}^3\text{hr}$ และจากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำและกระโจมทดสอบ ดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ดังนั้นในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของเครื่องกำเนิดไอน้ำเท่ากับ 180 V และความดันภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำเท่ากับ 5 Psi เพื่อให้ได้อัตราการจ่ายไอน้ำตามมาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำ

แรงดัน (V)	กระแส (A)	ก่อนจ่ายไอน้ำ				หลังจ่ายไอน้ำ	
		อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่น้ำเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (Psi)	เวลาที่น้ำเดือด(นาที)	ระดับน้ำลด ใน 1 ชั่วโมง (mm.)	อัตราการจ่ายไอน้ำ ($\frac{g}{hr}$)
180	4.7	78.5	103	5	38	13	1323
200	5.4	78	108	5	26	31	3155
250	6.9	82	105	5	19	42	4275
300	8.2	80	103	5	14	62	6310

หมายเหตุ น้ำในเครื่องกำเนิดไอน้ำในขณะทดสอบเท่ากับ 3500 cm^3

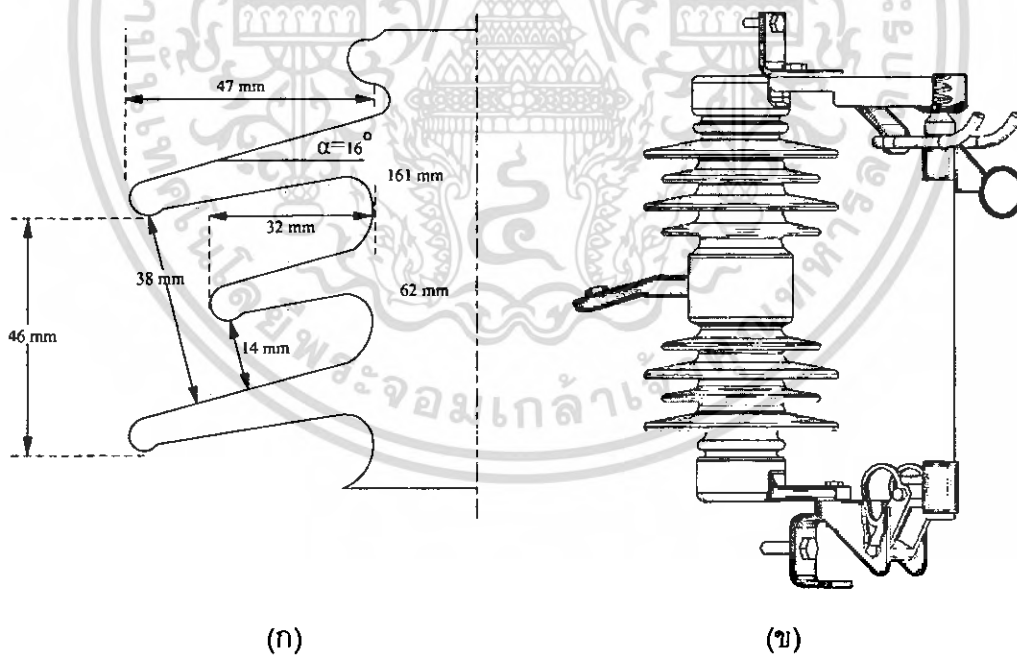
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบกระโจมทดสอบ

อัตราการจ่ายไอน้ำ ($\frac{g}{hr}$)	อัตราการจ่ายไอน้ำ ($\frac{kg}{m^3\text{hr}}$)	อุณหภูมิภายในกระโจม ($^{\circ}\text{C}$)						ความชื้นสัมพัทธ์ภายในกระโจม (%)					
		ทุก 10 นาที						ทุก 10 นาที					
		10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
1323	0.051	22	22	22.3	22.5	23	23	64	68	70	71	73	73
3155	0.121	22	22.2	22.5	23	23	23	64	74	75	75	75	75
4275	0.164	22	23.1	24	24	24	24.5	60	78	84	85	87	87
6310	0.243	23	25	25	25	25	25	60	85	91	93	94	95

2. การทดสอบครอบเอาท์พิวส์ในสภาวะปกติ ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ที่ความถี่กำลังต่อเนื่องผลการทดสอบพบว่าครอบเอาท์พิวส์ผ่านการทดสอบ และการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในสภาวะเปราะเปื้อนพบว่าพบที่ระดับความเปราะเปื้อนเล็กน้อยไม่เกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งาน แต่ที่ระดับความเปราะเปื้อนสูงมากเกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งาน จึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าปรากฏการณ์เริ่มเกิดโคโรนามีความสัมพันธ์กับระดับความเปรอะเปื้อน ที่ระดับความเปรอะเปื้อนน้อย โครนาเกิดขึ้นได้ยากทำให้มีแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่สูง และที่ระดับความเปรอะเปื้อนมาก โครนาเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้แรงดันเริ่มเกิดโคโรนาลดลง ในกรณีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไม่สามารถสรุปได้ว่าครอบเอาท์พิวส์ผ่านการทดสอบหรือไม่เพราะระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด

3. ครอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะเปรอะเปื้อนโดยออกแบบตามข้อแนะนำ IEC 815 ออกแบบให้มีรูปทรงที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะได้ยากขึ้นและทำความสะอาดตัวเองได้ โดยออกแบบให้มีรูปทรงเป็นปีกสลับ และออกแบบให้มีระยะกระแสร่วมมากขึ้น เพื่อลดขนาดของกระแสร่วมไหล ดังรูปที่ 5.1 ตารางที่ 5.3 ตารางที่ 5.4 และจากตารางผลการเปรียบเทียบครอบเอาท์พิวส์ต้นแบบกับครอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบ จะเห็นว่าครอบเอาท์พิวส์ต้นแบบค่า C (ระยะช่องว่างแนวตั้งฉากกับผิวปีกไปยังครีบนอกสุดของปีกบน) ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน และระยะร่วมีค่าน้อยไม่เหมาะสมกับการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อนสูงมาก แต่ครอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบใหม่ จะปรับระยะต่างๆ ให้ได้ตามมาตรฐานกำหนดและเพิ่มระยะร่วให้มากขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อนสูงมากและจากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปีกครอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบมีค่าน้อยกว่าครอบเอาท์พิวส์ต้นแบบ ดังรูปที่ 5.2



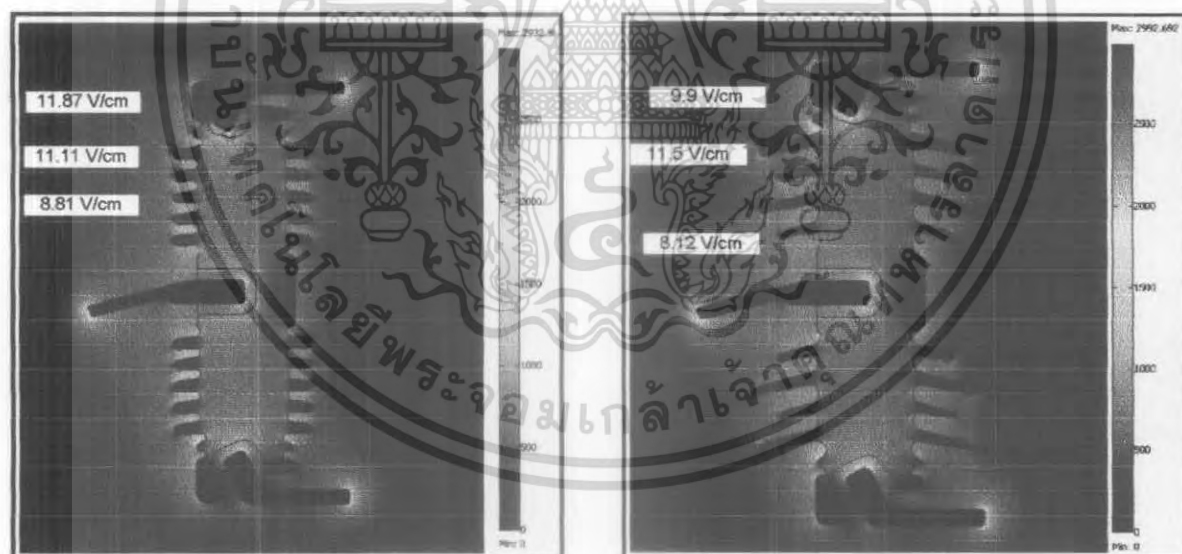
รูปที่ 5.1 ครอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบ (ก) ระยะระหว่างปีกและค่ากำหนดต่างๆ
(ข) ภาพ 3D ของครอบเอาท์พิวส์ปีกสลับที่ออกแบบ

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่ามิติที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานและค่าต้นแบบ

สัญลักษณ์	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ออกแบบ	ค่าต้นแบบ
C	มากกว่า 30 ม.ม.	38.67 mm	12 mm
S/P	มากกว่าหรือเท่ากับ 0.8	0.97	1.11
Ld/d	น้อยกว่า 5	$Ld_1/d_1 = 4.3$ $Ld_2/d_2 = 4.05$	3.08
P1-P2	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 ม.ม.	15 mm	-
α	มากกว่า 5 องศา	16 องศา	9 องศา
C.F.	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4	2.02	1.4
P.F.	มากกว่า 0.7	1.137	1.51

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบระยะรั้วของค่าที่ออกแบบกับค่าต้นแบบ

ระยะรั้ว	ค่าที่ออกแบบ (mm.)	ค่าต้นแบบ (mm.)
	500	320



(ก) ครอบเอาต์พิวส์ต้นแบบ

(ข) ครอบเอาต์พิวส์ที่ออกแบบ

รูปที่ 5.2 วิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าของครอบเอาต์พิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

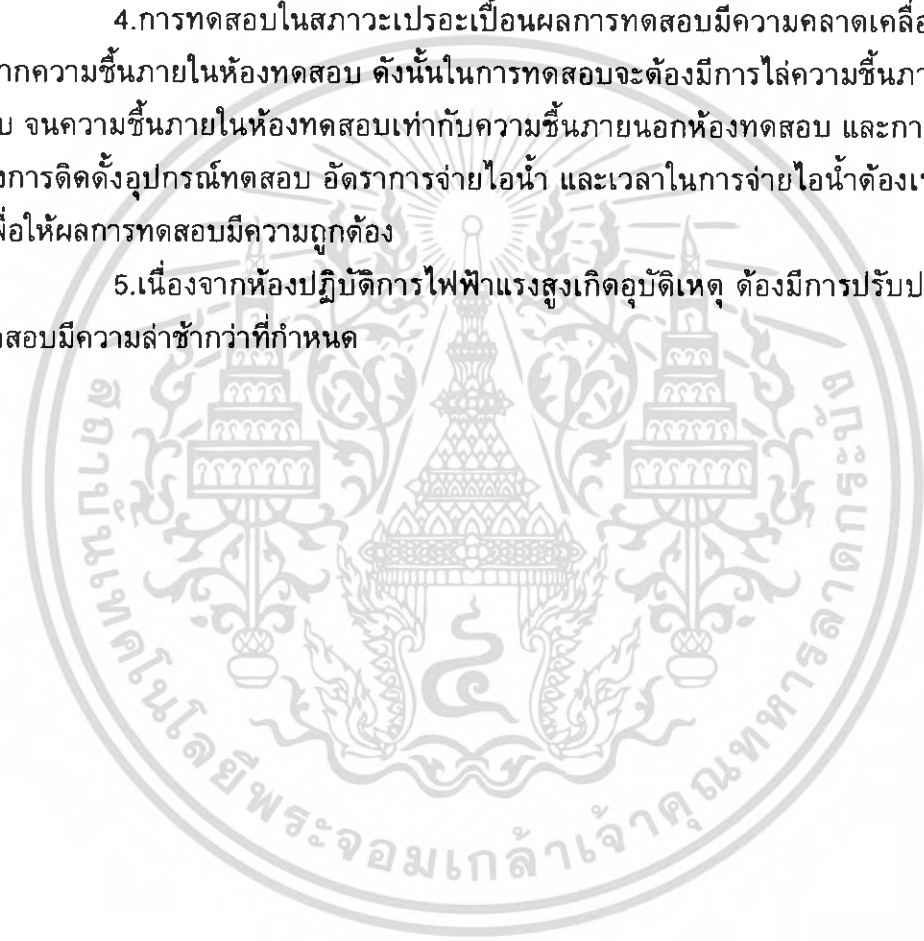
5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

1. การจำลองสภาวะเปราะเปื้อนโดยใช้เกาลินเป็นสิ่งเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507 ซึ่งในประเทศไทยไม่ได้มีความเปราะเปื้อนประเภทเกาลิน ดังนั้นในการทดสอบสภาวะเปราะเปื้อนในประเทศไทยควรจะใช้สิ่งเปราะเปื้อนที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย เพื่อจะได้ทดสอบสภาวะเปราะเปื้อนจริงในประเทศไทย

3. การทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไม่สามารถสร้างระดับแรงดันได้ตามมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องกำเนิดมีประสิทธิภาพลดลง ควรจะมีการปรับปรุงเครื่องกำเนิดให้ดีขึ้น เพื่อจะได้ทดสอบได้ตรงตามมาตรฐาน

4. การทดสอบในสภาวะเปราะเปื้อนผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย เนื่องจากความชื้นภายในห้องทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบจะต้องมีการไล่ความชื้นภายในห้องทดสอบ จนความชื้นภายในห้องทดสอบเท่ากับความชื้นภายนอกห้องทดสอบ และการทดสอบทุกครั้งการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ อัตราการจ่ายไอน้ำ และเวลาในการจ่ายไอน้ำต้องเท่ากันทุกครั้ง เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้อง

5. เนื่องจากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเกิดอุบัติเหตุ ต้องมีการปรับปรุง ทำให้การทดสอบมีความล่าช้ากว่าที่กำหนด



เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, เมษายน 2547.
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **เอกสารประกอบการสอน วิชา วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Material)**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช, **การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง**. กรุงเทพฯ...., ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2538
- [4] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **โครงการวิจัยเพื่อป้องกันแรงดันเกินสำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า**, รายงานการวิจัย, 2546
- [5] Website:<http://osfm.fire.ca.gov> **"Power Line Fire Prevention Field Guide"**
- [6] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **เทคโนโลยีการใช้งานลูกถ้วยฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลัง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547, พิมพ์ครั้งที่ 3.
- [8] ปฐมาภรณ์ สถาพรจนา และ การุณ โมราศิริลป, **วิธีการทดสอบสิ่งเปราะอ่อนที่ถูกต้องซึ่งนำมาภายใต้สภาพการสะสมของสิ่งเปราะอ่อน**, กองวิศวกรรมไฟฟ้าและทดสอบ ฝ่ายออกแบบสถานีและสายส่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2 กองวิศวกรรมและบริการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 2 ภาคใต้
- [9] จงรักษ์ บุญเส็ง สมเจตต์ เทียมเมือง และ ปราบกฤต เหลียงประดิษฐ์, **การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าวิกฤตในลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่มีมลภาวะ**, การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16
- [10] IEC 815, **Guide for the section of Insulator of Polluted conditions**, First Edition 1986.
- [11] IEC 507, **Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems**, Second edition, 1991-04.
- [12] Website:<http://www.hubbellpowersystems.com> **"This article is reprinted from Chance Tips Volume 50 No. 3"** September 1989
- [13] Website:<http://fuerte.en.alibaba.com> **"China supplier of electrical products"**
- [14] Website:<http://insulators.pock.com> **"Insulators and More On-line Museum"**
- [15] กองวิจัยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, **อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายของ กฟผ**, เอกสารประกอบการบรรยาย, 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

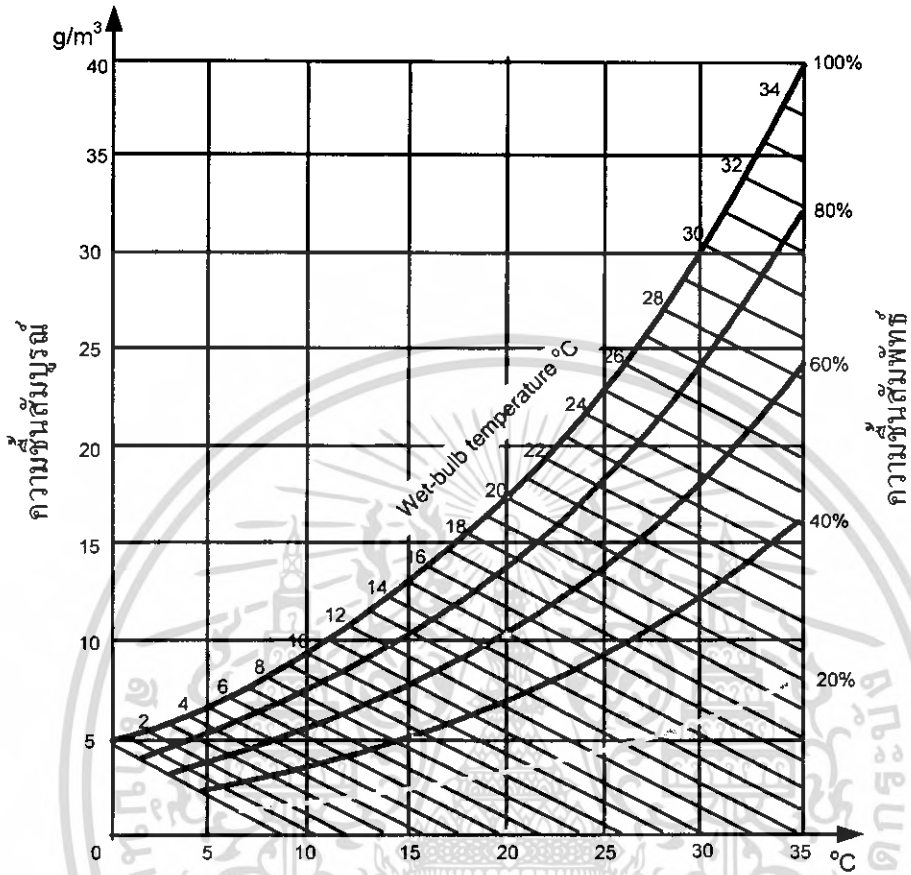
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **ลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอดันยาวปีกสลับในระบบ 33 กิโลโวลต์**, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [17] IEEE std4 : 1995, IEEE Standard Techniques for High – Voltage Testing .
- [18] IEEE C37.40-1993: Service conditions and definitions for High-VoltageExpulsion Type Distribution Class Fuses,fuse disconnectingswitches,and accessories.
- [19] IEEE C37.41-2000: Design tests for High-Voltage Expulsion Type Distribution Class Fuses,fuse disconnecting switches,and accessories.
- [20] IEEE C37.42-1996: Specifications for High-Voltage Expulsion Type Distribution Class Fuses,fuse disconnecting switches,and fuse links.



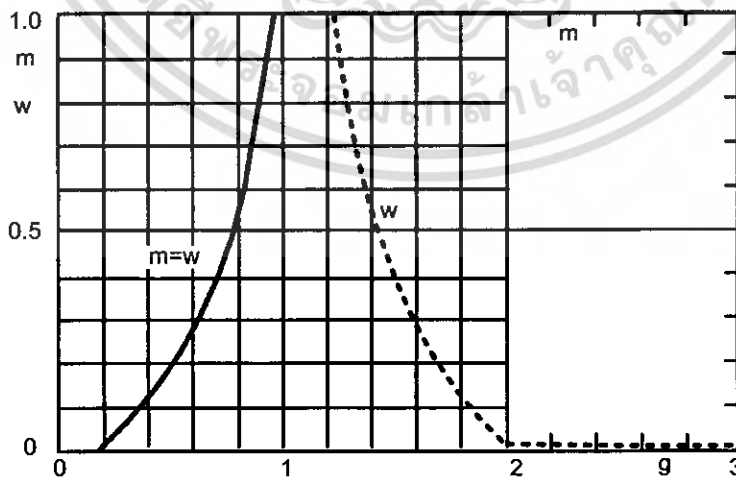
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
กราฟการแปลงค่า



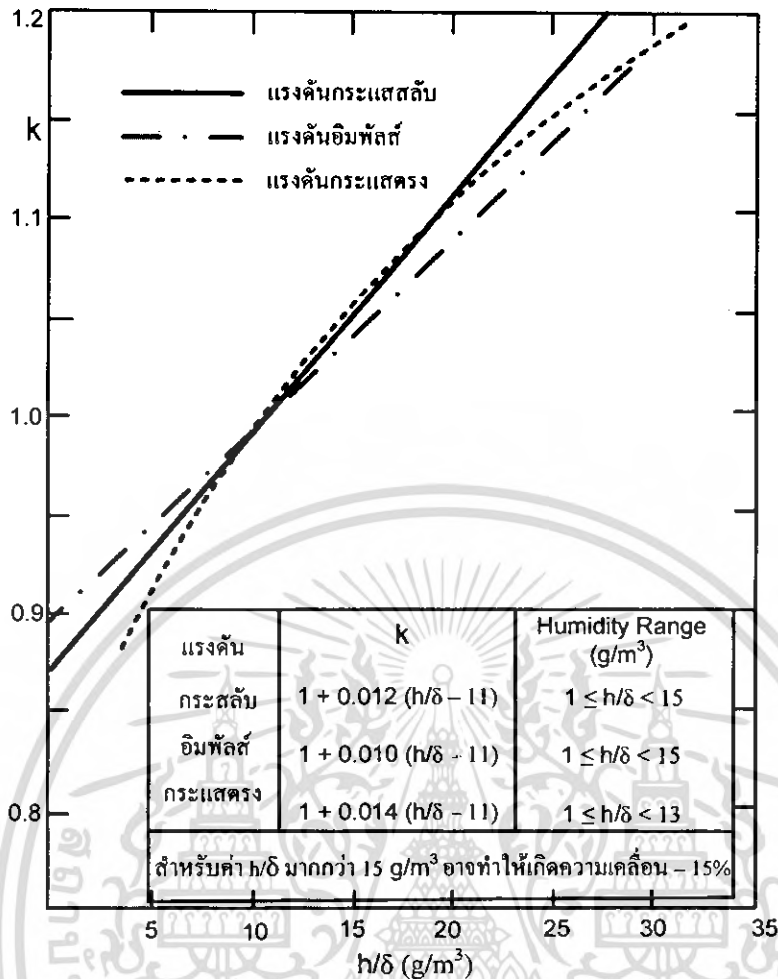
อุณหภูมิโดยรอบ-อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

รูปที่ ก.1 กราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกระแห้งที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ ก.2 กราฟการหาค่า m และ w สำหรับแก้ค่าความหนาแน่นอากาศและแก้ค่าความชื้นเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 กราฟการหาค่าพารามิเตอร์ k เป็นฟังก์ชันของ h/δ

IEEE sdt 4:1995 กำหนดที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (t_0) 20°C และความดันบรรยากาศ (b_0) 101.3 kPa หรือ 1013 mbar หรือ 760 mmHg ที่ 0°C โดยความชื้นสัมบูรณ์ 11 gm⁻³ ถ้า b เป็นความดันบรรยากาศ (kPa) และ H เป็นความสูงของบารอมิเตอร์ (mmHg) จะได้

$$b = 0.1333H \quad (1)$$

ค่าที่สภาวะห้องทดลอง
$$U = U_0 K_1 K_2 \quad (2)$$

- เมื่อ U คือ แรงดันที่สภาวะห้องทดลอง
 U_0 คือ แรงดันที่สภาวะมาตรฐาน
 K_1 คือ ค่าแก้เนื่องจากความหนาแน่นอากาศ
 K_2 คือ ค่าแก้เนื่องจากความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่
$$K_1 = \delta^m = \left[\frac{b(273+t_0)}{b_0(273+t)} \right]^m \quad (3)$$

$$K_2 = k^w \quad (4)$$

- เมื่อ δ คือ ความหนาแน่นอากาศ
 t คือ อุณหภูมิที่สภาวะห้องทดลอง
 b คือ ความดันบรรยากาศที่สภาวะห้องทดลอง
 m คือ เลขยกกำลังกำหนดจากพารามิเตอร์ g
 w คือ เลขยกกำลังกำหนดจากพารามิเตอร์ g
 k คือ พารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทของแรงดันและอัตราส่วน $\frac{h}{\delta}$

$$g = \frac{U_b}{500L\delta k} \quad (5)$$

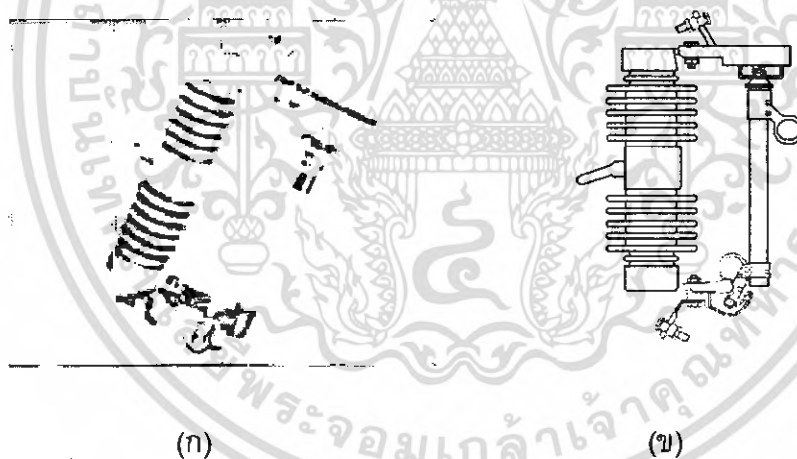
- เมื่อ U_b คือ 1.1 เท่าของแรงดันทดสอบ
 L คือ ระยะวาปไฟตามผิวที่สั้นที่สุดของวัสดุทดสอบ

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์แบบจำลองครอบเอาต์ฟิวส์ โดยโปรแกรมไฟโนเอลิเมนท์

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) หรือการกระจายสนามไฟฟ้าโครงสร้างฉนวนไฟฟ้าในแบบต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำให้ได้คำตอบที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุดทีเดียว ในโครงการนี้จะเป็นการออกแบบปึกฉนวนไฟฟ้าของครอบเอาต์ฟิวส์ เพื่อแก้ปัญหาการใช้งานในสภาวะที่มีความเปรอะเปื้อน การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและการกระจายสนามไฟฟ้า ของครอบเอาต์ฟิวส์ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันเพื่อทำการตรวจสอบว่าลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่าไรก่อนที่จะไปปรับปรุงคุณลักษณะต่างๆ ของครอบเอาต์ฟิวส์ เพื่อให้สามารถใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงได้ รวมไปถึงการออกแบบครอบเอาต์ฟิวส์แบบพื้นฐานใหม่เพื่อเปรียบเทียบผลต่างๆ ได้เช่นกัน

ครอบเอาต์ฟิวส์มีการใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงดังแสดงในรูปที่ ข.1(ก) และลักษณะรูปร่างของครอบเอาต์ฟิวส์ ที่จำลองมาจากแบบจริงดังแสดงในรูป ข.1(ข)



รูปที่ ข.1 ลักษณะรูปร่างของครอบเอาต์ฟิวส์

ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติของครอบเอาต์ฟิวส์

RATED VOLTAGE (KV)	RATED CURRENT (A)	BREAKING CURRENT (KA)	IMPULSE WITHSTAND VOLTAGE LINE TO GROUND BIL (KV)	WET WITHSTAND VOLTAGE (KV)	CREEPAGE DISTANCE MIN (mm)	WEIGHT (kg)	DIMENSION L X H (cm)
27	100	8	125	50	320	8.5	500X300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของรูปร่างที่ใช้ในการจำลอง

- ครอบเอาต์ไฟวส์

คุณสมบัติขององค์ประกอบแบบย่อยๆ

- Porcelain

- Relative permittivity (ϵ_r) 5.7
- Conductivity (σ) 1×10^{-14} siemens/meter

- Cement

- Relative permittivity (ϵ_r) 7
- Conductivity (σ) 1×10^{-7} siemens/meter

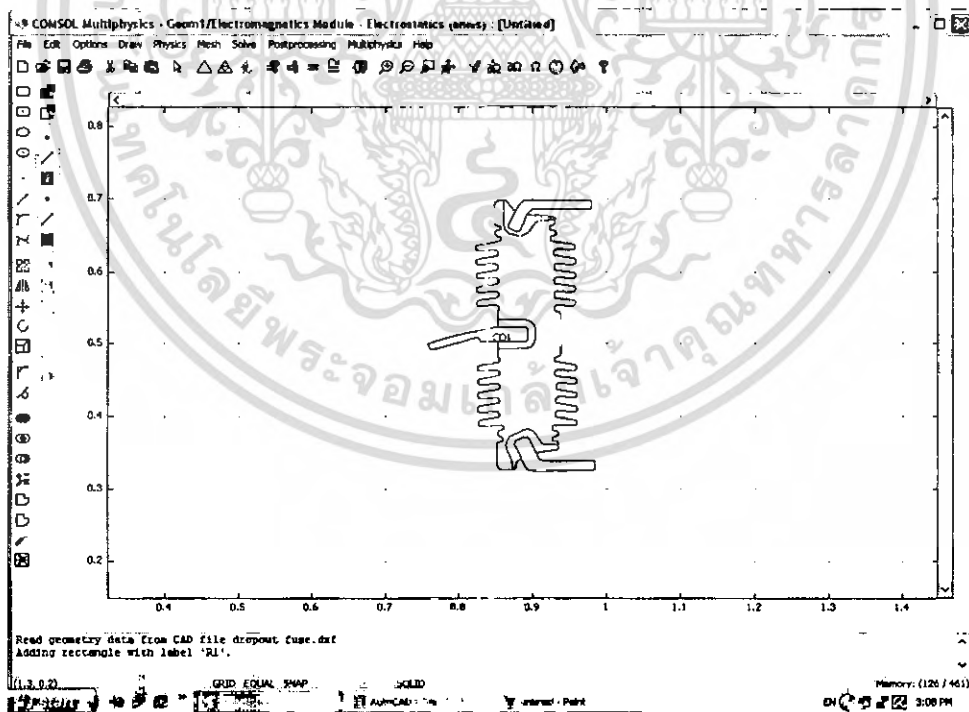
- Iron

- Relative permittivity (ϵ_r) 1
- Conductivity (σ) 1.12×10^7 siemens/meter

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 100 V

ตัวอย่างการเตรียมข้อมูล และการป้อนค่าสำหรับการจำลองครอบเอาต์ไฟวส์ เพื่อคำนวณหาค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

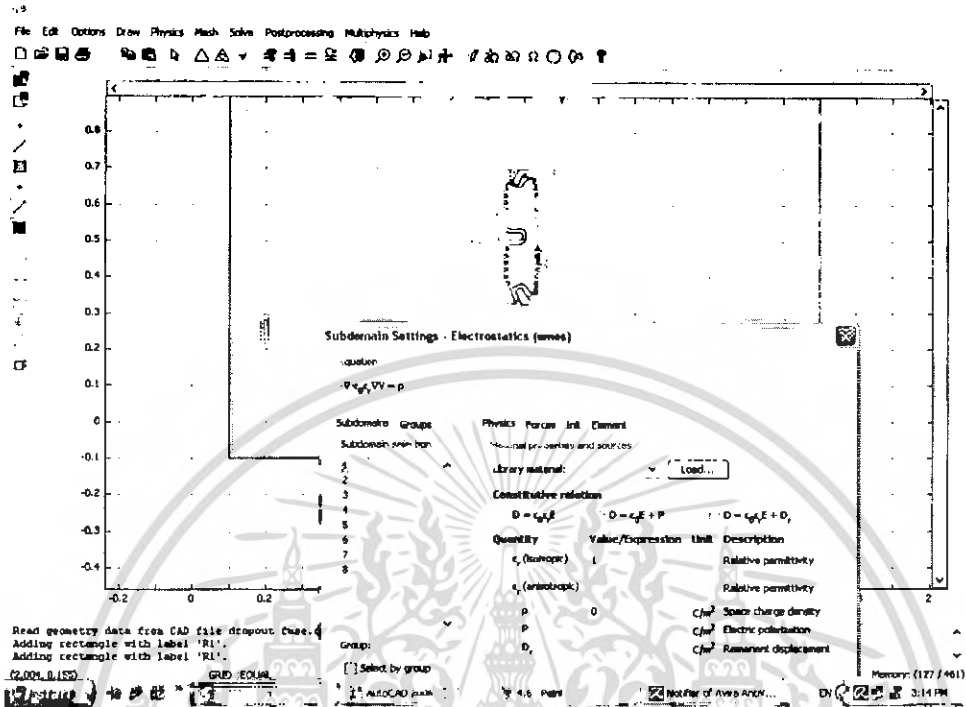
1.) ทำการวาดแบบของครอบเอาต์ไฟวส์และสร้างเอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ ข.2



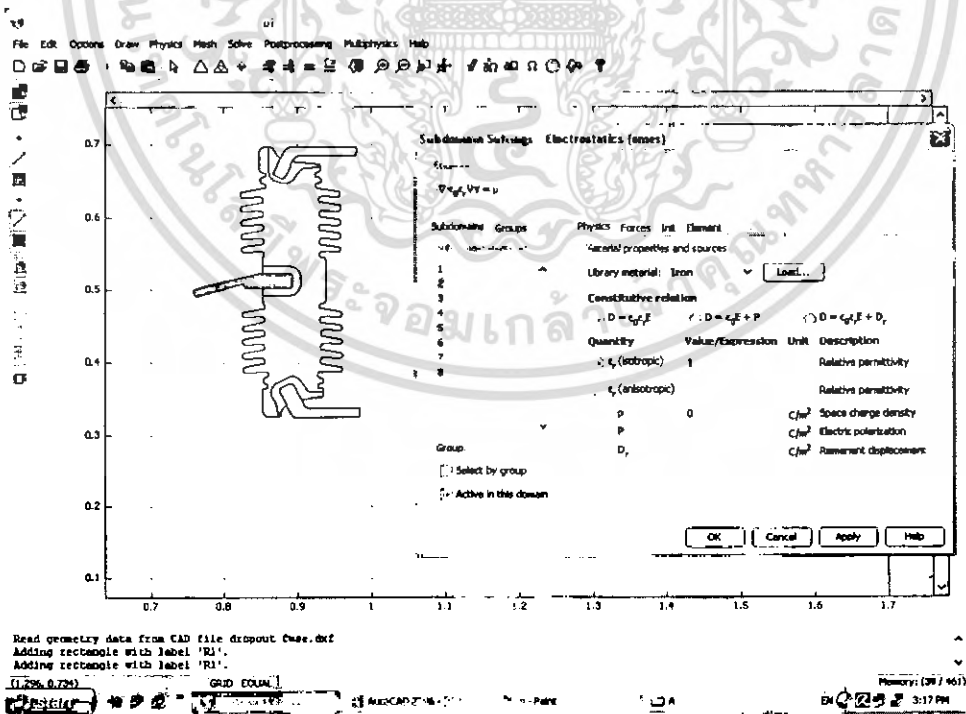
รูปที่ ข.2 การวาดตัวครอบเอาต์ไฟวส์ขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ทำการป้อนค่าคุณสมบัติขององค์ประกอบต่างๆ โดยใช้ฟังก์ชัน Subdomain setting ดังแสดงในรูป ซึ่งค่าที่จะป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 8 ค่า เริ่มจากรูป (5.5) ถึง (5.12) ตามลำดับ

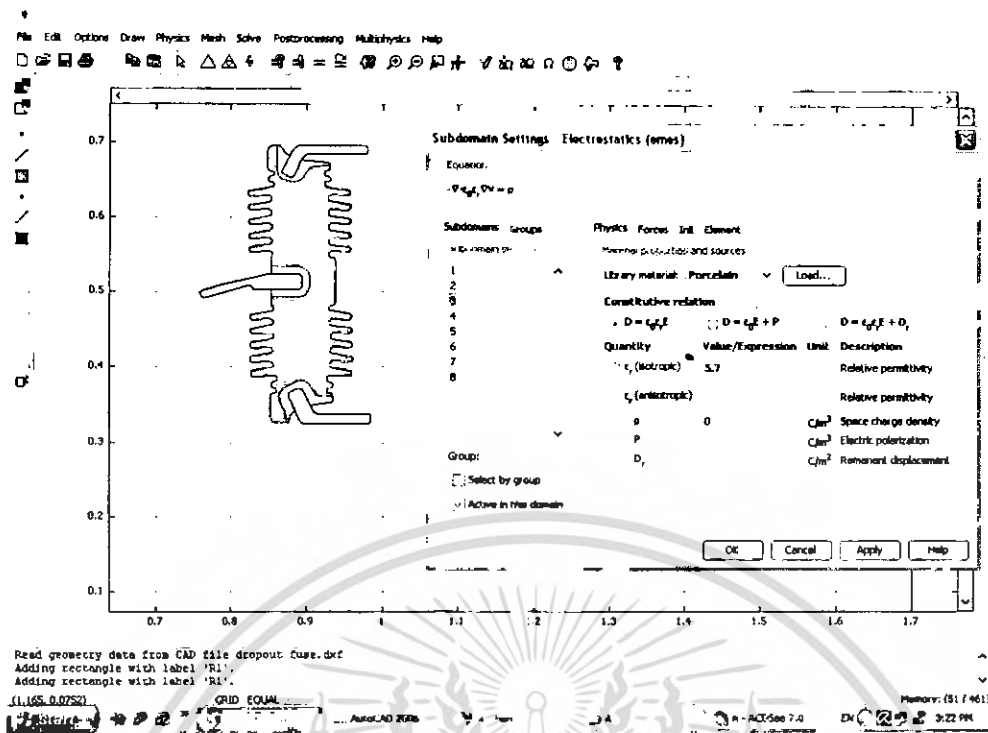


รูปที่ ๕.๒ การสร้างขอบเขตให้กับดรอมาเอทไฟลส์

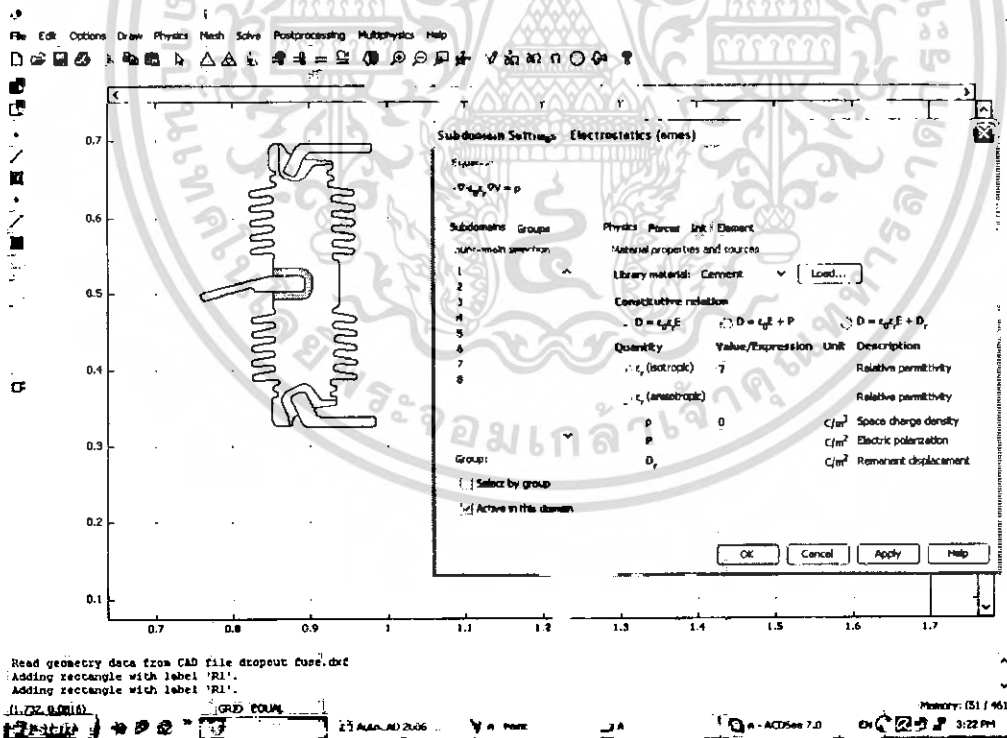


รูปที่ ๕.๓ กำหนดให้ตัว bracket ให้มีคุณสมบัติเป็นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

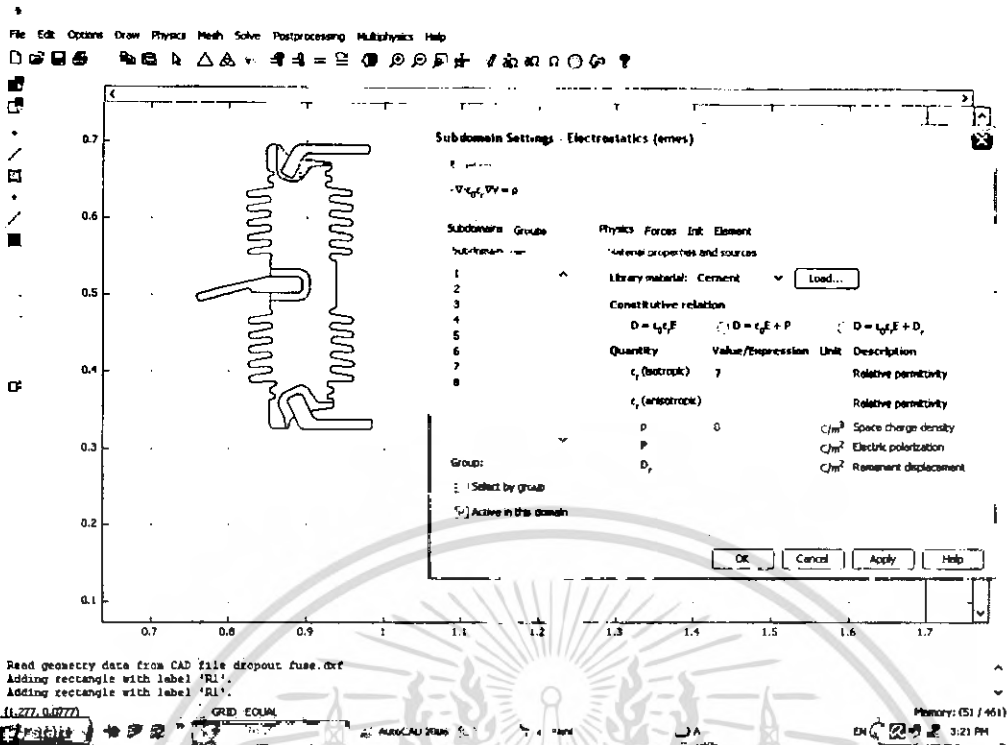


รูปที่ ๓.4 กำหนดให้ porcelain support มีคุณสมบัติเป็น porcelain

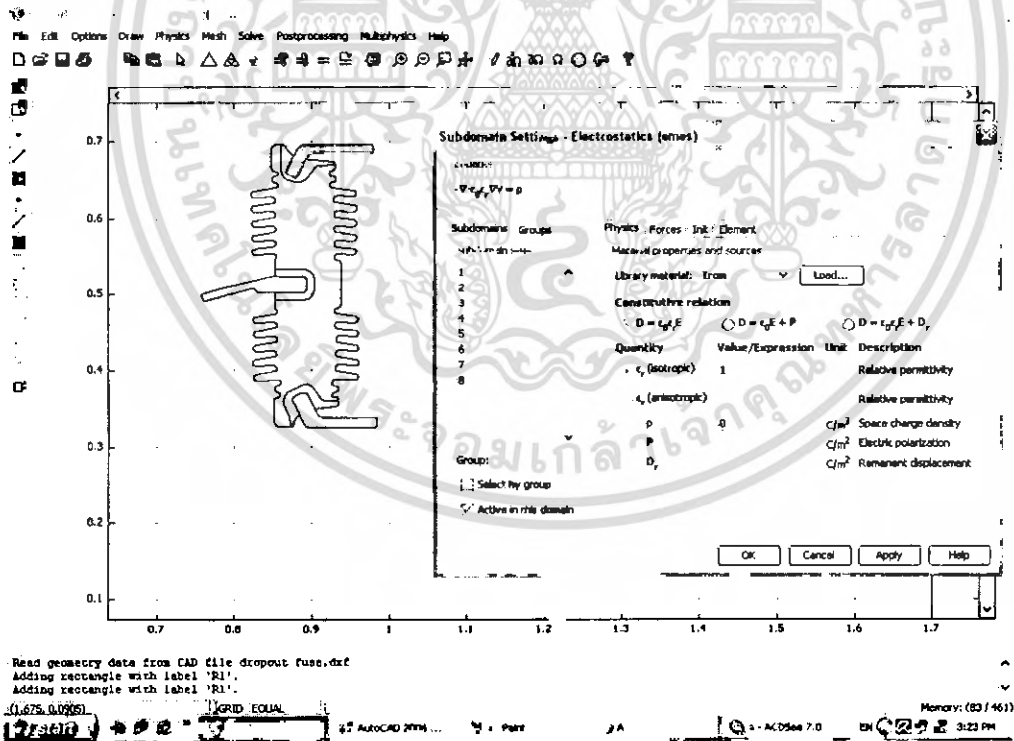


รูปที่ ๓.5 กำหนดให้ส่วนที่ยึด bracket ให้มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

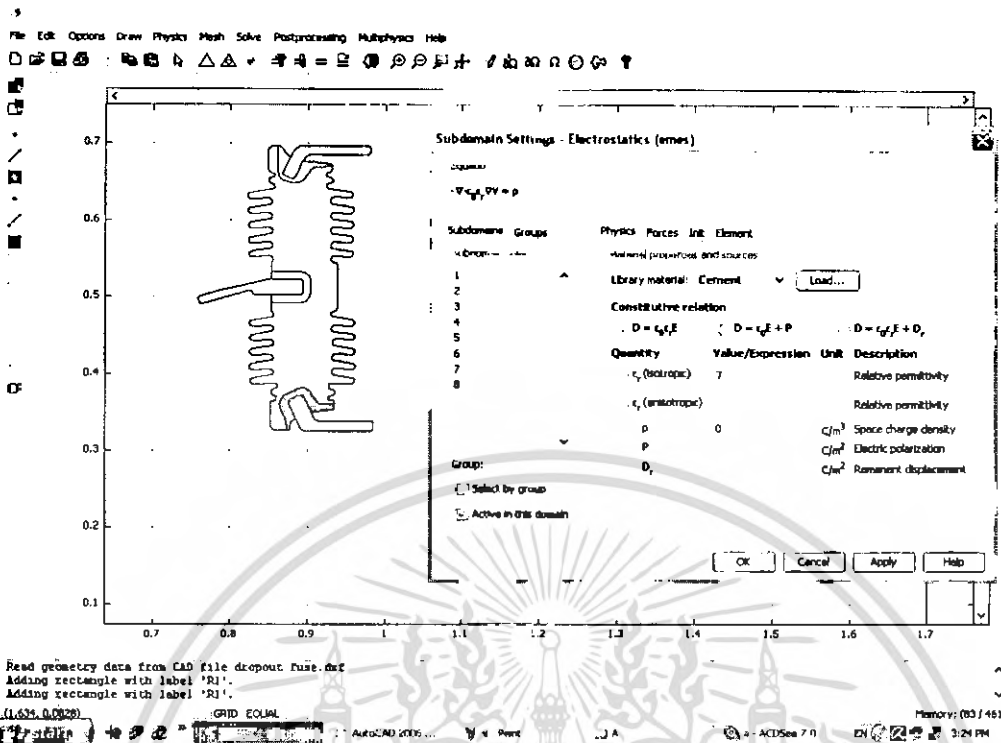


รูปที่ ๖.6 กำหนดให้ส่วนที่ยึดขั้วด้านบนใหม่คุณสมบัติเป็นซีเมนต์

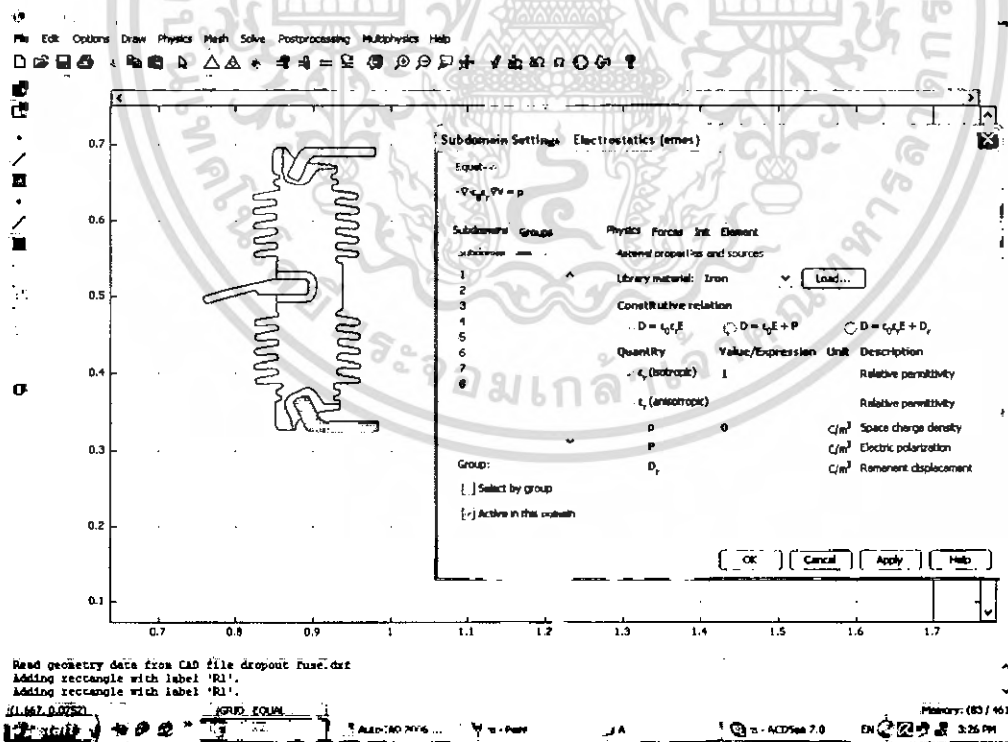


รูปที่ ๖.7 เป็นการกำหนดให้ส่วนขั้วด้านบนใหม่คุณสมบัติเป็นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



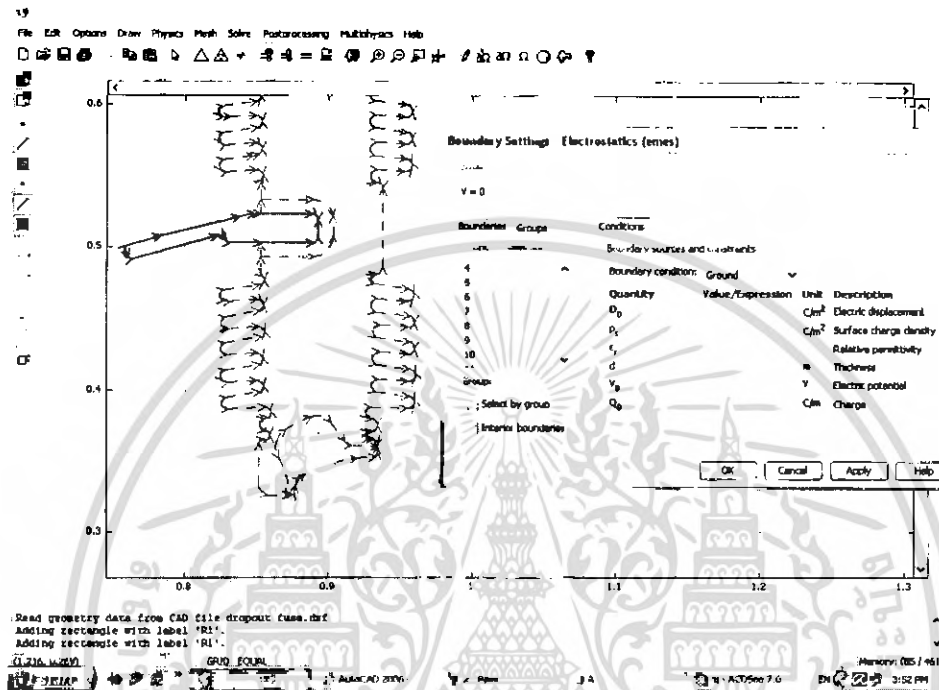
รูปที่ ข.8 กำหนดให้ส่วนที่ยึดขั้วด้านล่างให้มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์



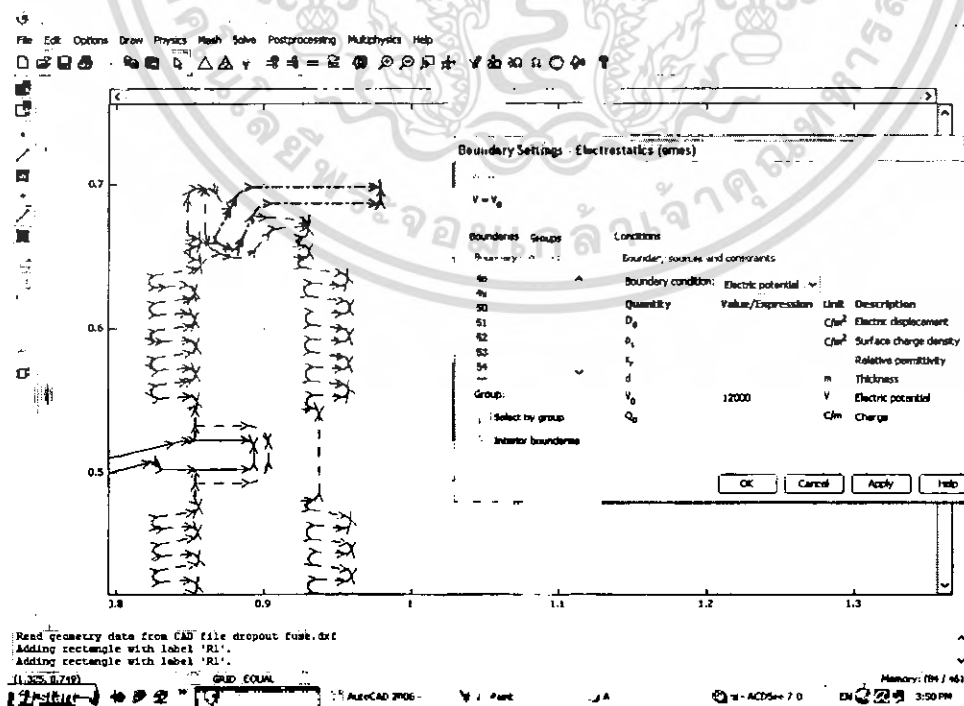
รูปที่ ข.9 กำหนดให้ส่วนขั้วด้านบนให้มีคุณสมบัติเป็นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

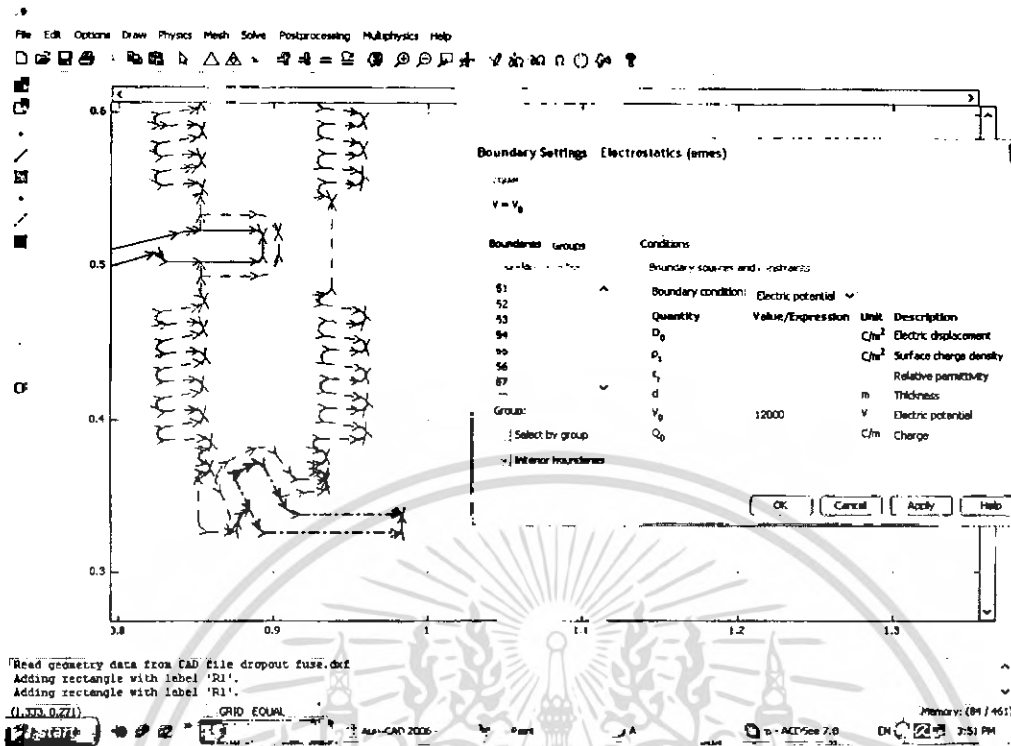
3.) ป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าให้รอบเอวที่ฟิวส์โดยใช้ฟังก์ชัน Boundary setting กำหนดให้แรงดัน 100 โวลต์ ให้กับขั้วโลหะด้านบนและขั้วโลหะด้านล่าง มีค่า 100 โวลต์ และ 0 โวลต์ ที่กราวด์ หรือ bracket ค่าที่จะต้องป้อนให้โปรแกรมมีทั้งหมด 3 ค่า เริ่มจากรูป (5.15) ถึง (5.14) ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 กำหนดค่าของ bracket ให้เป็นกราวด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

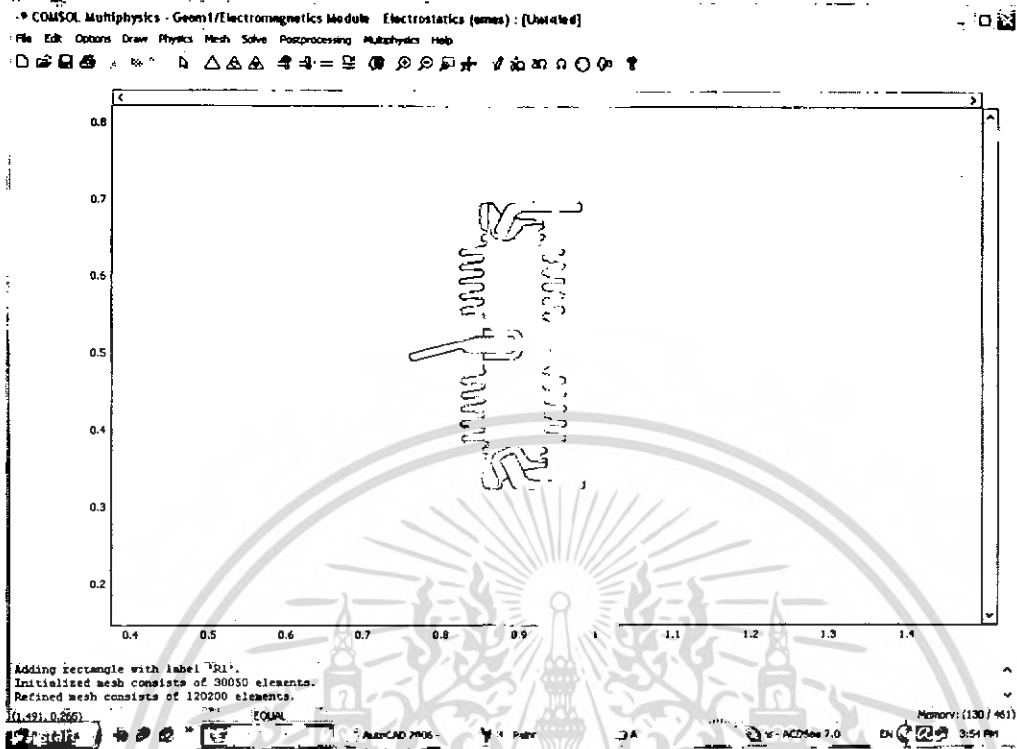


รูปที่ ข.11 การป้อนแรงดันไฟฟ้า 100 V ให้ส่วนหัวด้านบน

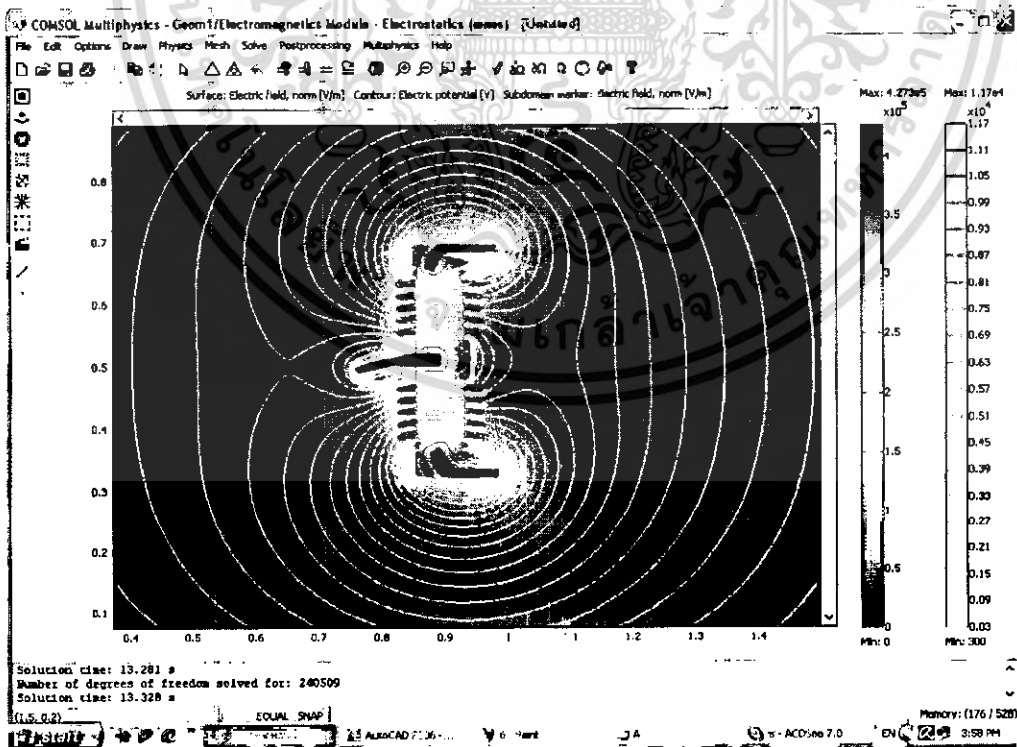
รูปที่ ข.12 การป้อนแรงดันไฟฟ้า 100 V ให้ส่วนหัวด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) ทำการประมวลผล โดยใช้ฟังก์ชัน Solve problem ดังแสดงในรูป

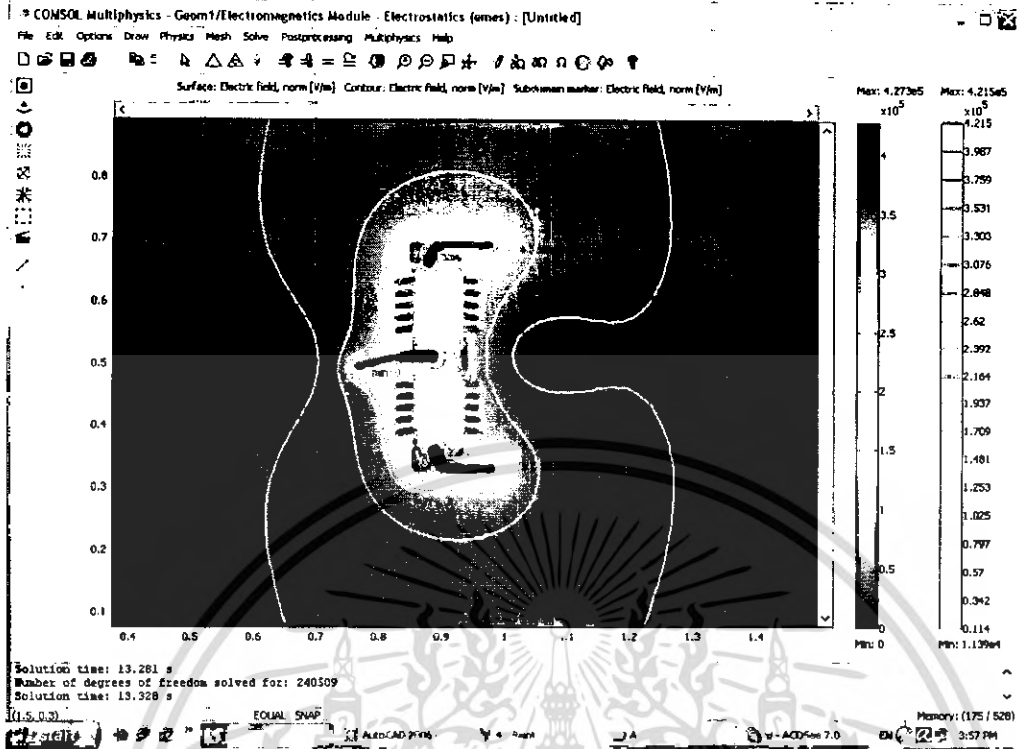


รูปที่ ข.13 การสร้างเมตริกเพื่อใช้ในการคำนวณ

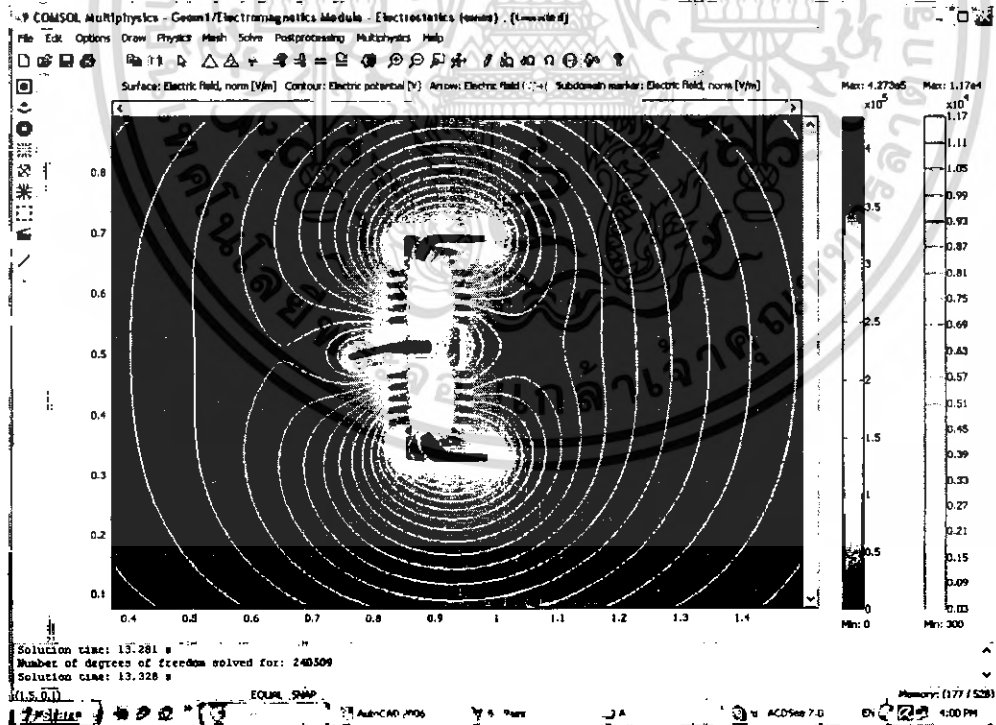


รูปที่ ข.14 การแสดงผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



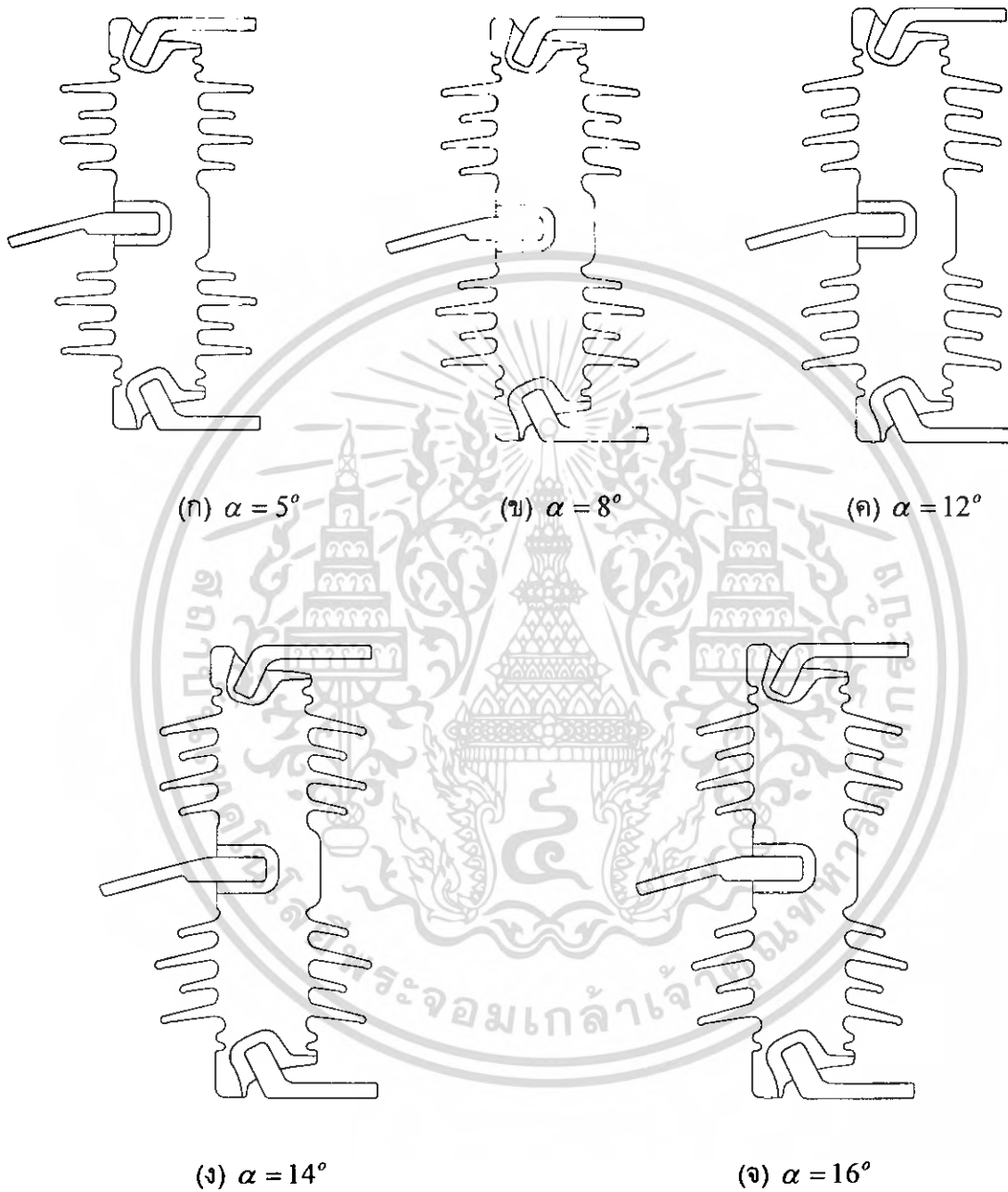
รูปที่ ข.15 การแสดงผลการกระจายของสนามไฟฟ้า



รูปที่ ข.16 การแสดงผลการกระจายของศักย์ไฟฟ้า การกระจายของสนามไฟฟ้าและทิศทางของสนามไฟฟ้า

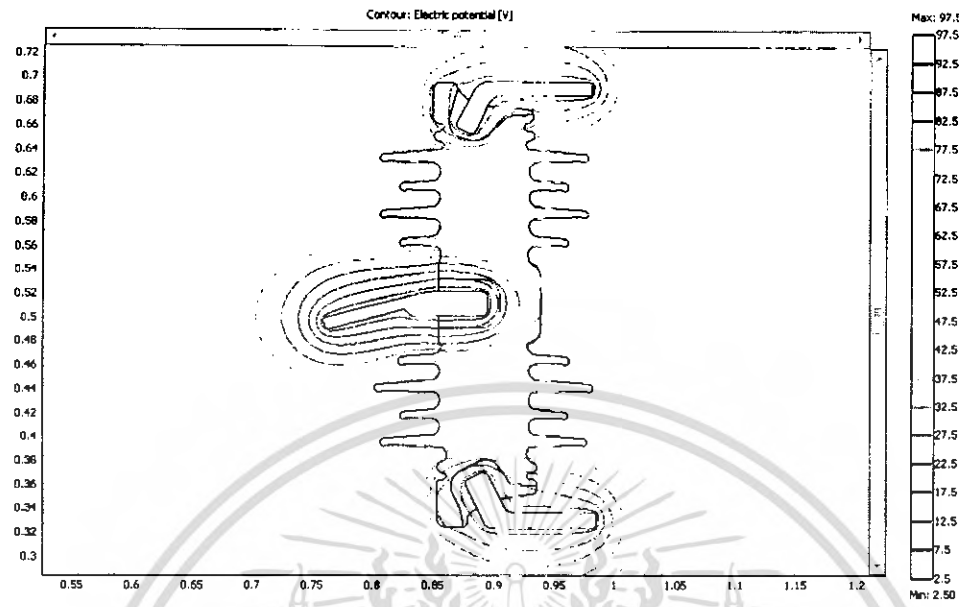
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

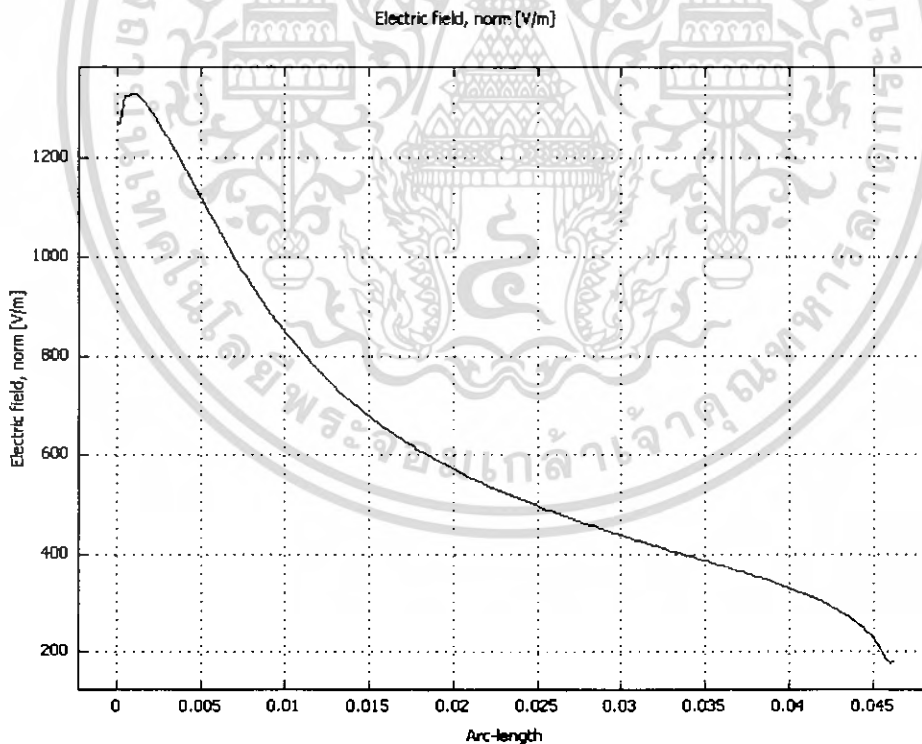
การใช้โปรแกรมไฟโนเอลิเมนต์วิเคราะห์หามุม α ของครอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบรูปที่ ค.1 มุม α ต่างๆของครอบเอาท์พิวส์เพื่อใช้ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองรอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบที่มุม $\alpha = 5^\circ$



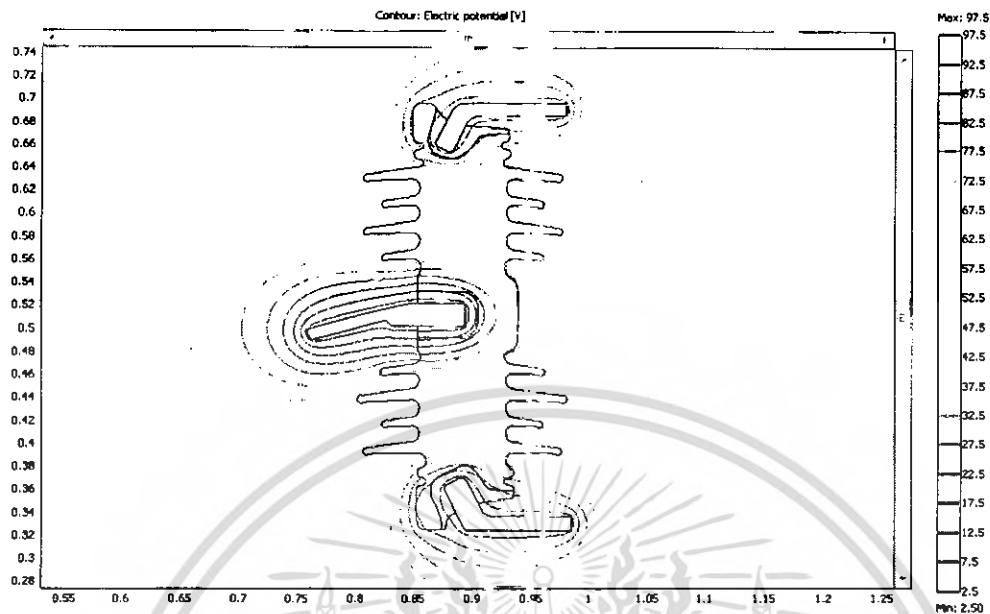
รูปที่ ค.2 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของรอบเอาท์พิวส์เมื่อ $\alpha = 5^\circ$



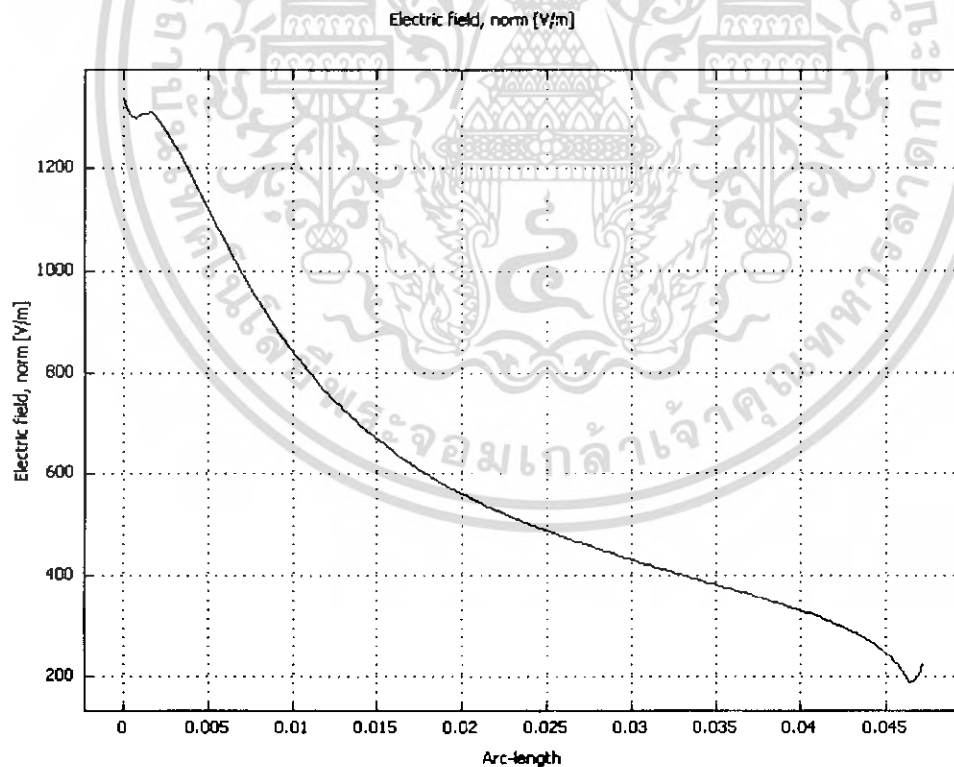
รูปที่ ค.3 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกครอบเอาท์พิวส์ปีกแรกจากด้านบนเมื่อ $\alpha = 5^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองรอบเอาทไฟวส์ที่ออกแบบที่มุม $\alpha = 8^\circ$



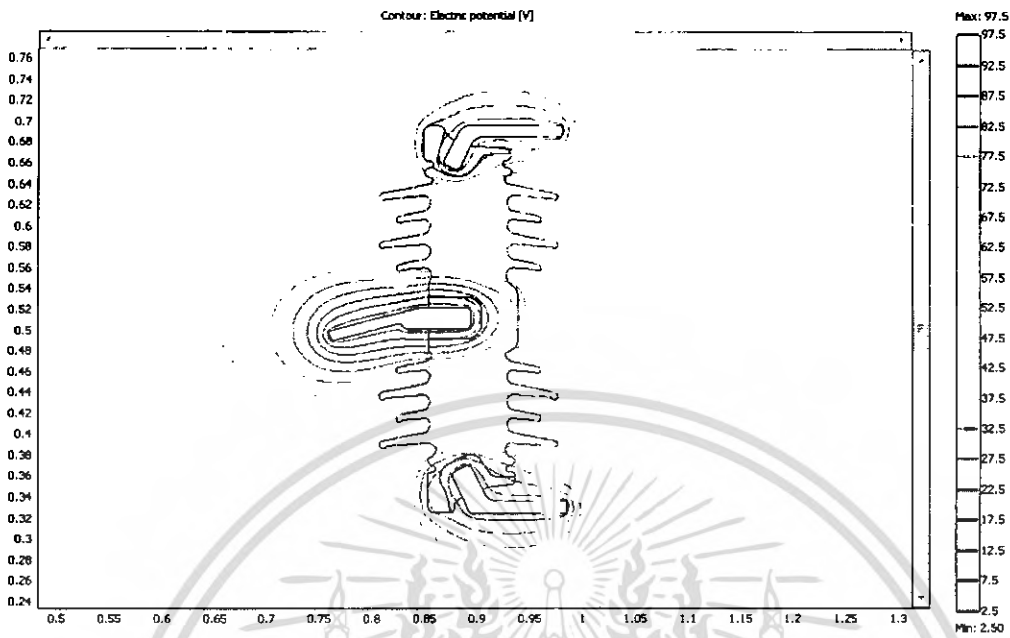
รูปที่ ค.4 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของรอบเอาทไฟวส์เมื่อ $\alpha = 8^\circ$



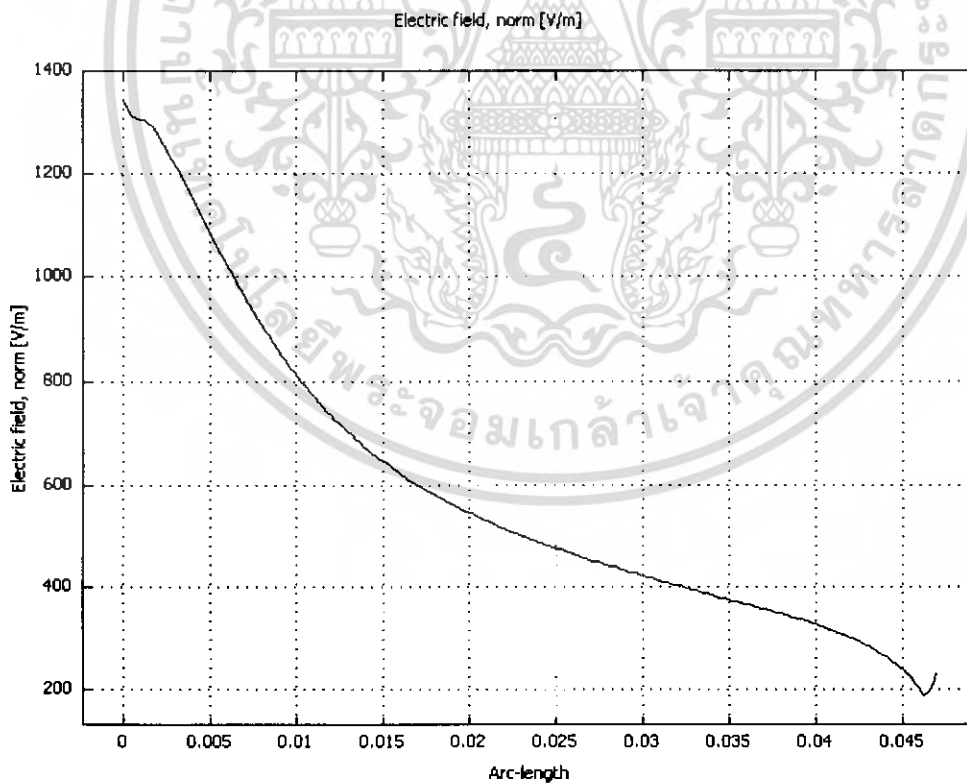
รูปที่ ค.5 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกครอบเอาทไฟวส์ปีกแรกจากด้านบนเมื่อ $\alpha = 8^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองรอบเอาท์พิวส์ที่ออกแบบที่มุม $\alpha = 12^\circ$



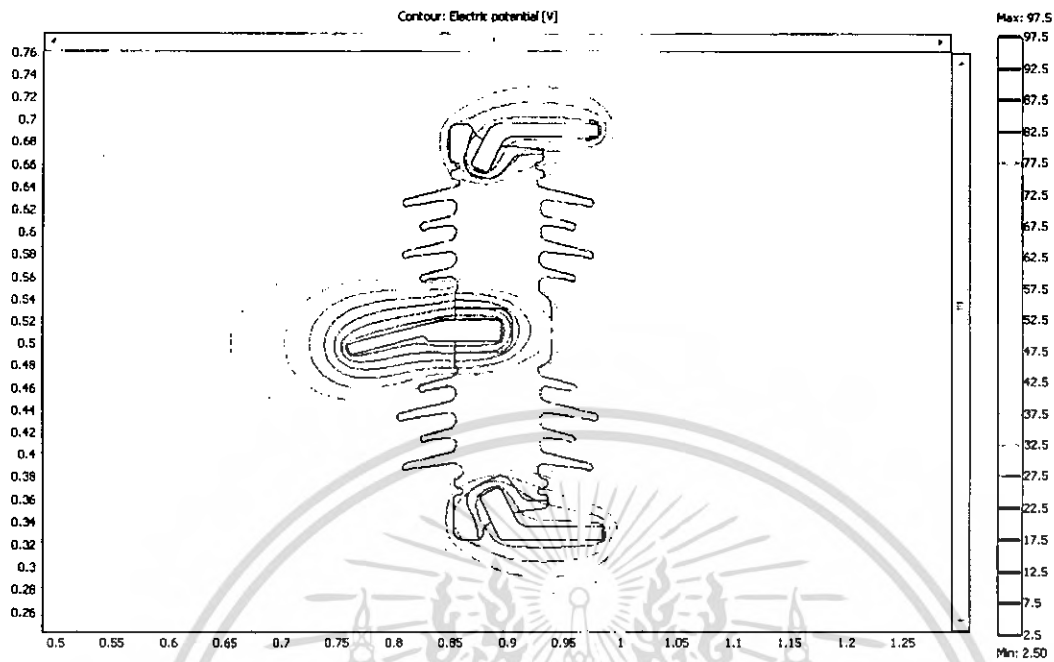
รูปที่ ค.6 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของรอบเอาท์พิวส์เมื่อ $\alpha = 12^\circ$



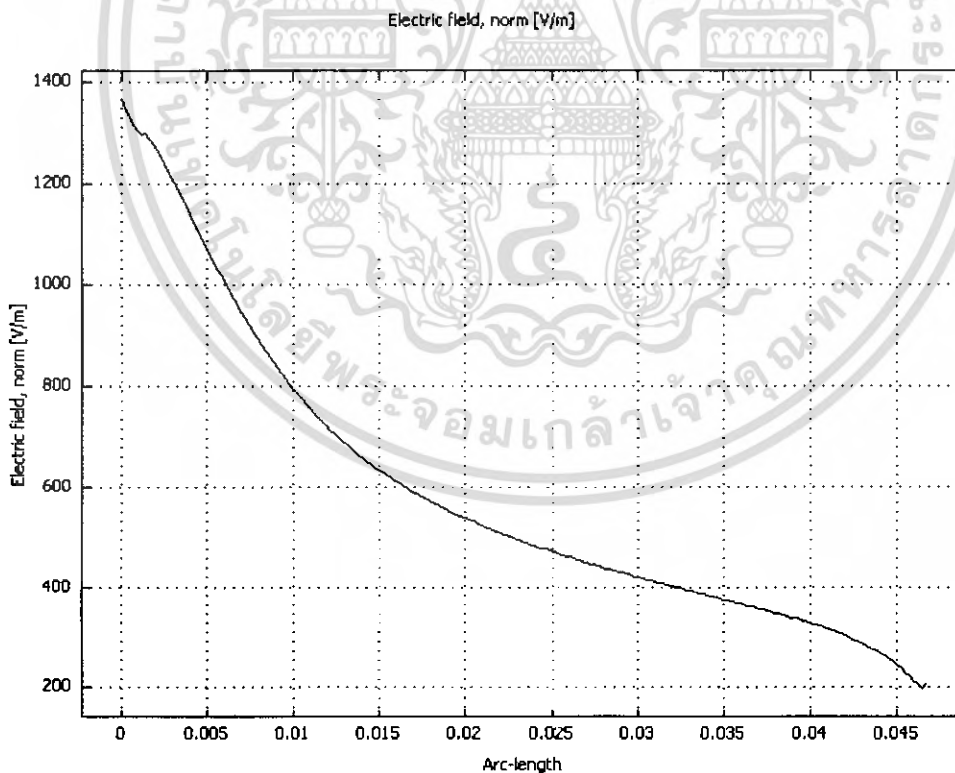
รูปที่ ค.7 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกครอบเอาท์พิวส์ปีกแรกจากด้านบนเมื่อ $\alpha = 12^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองรอบเอาทไฟวส์ที่ออกแบบที่มุม $\alpha = 14^\circ$

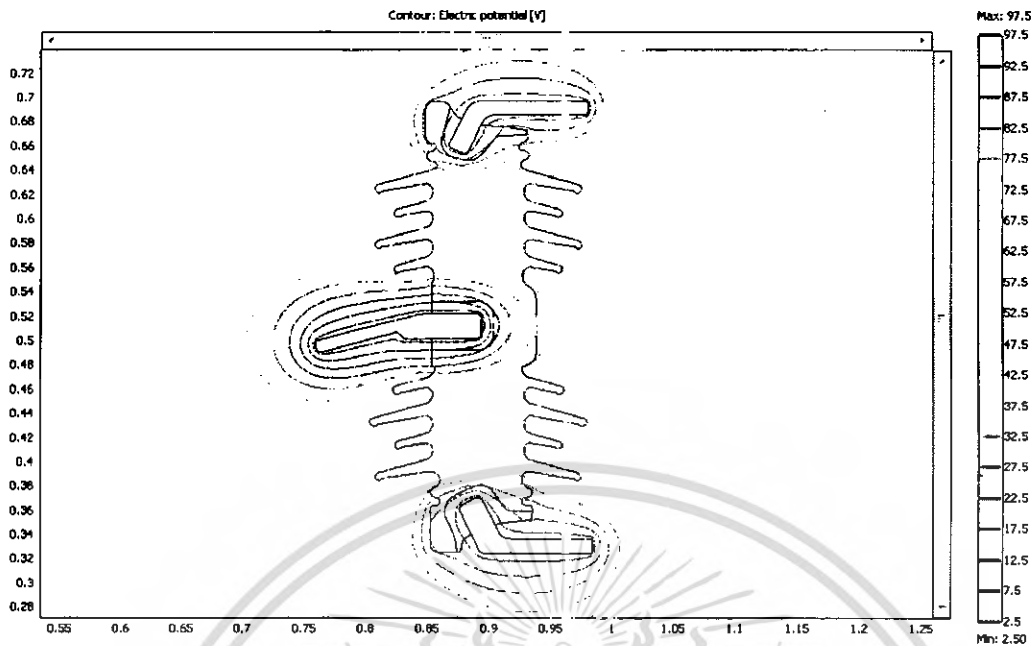


รูปที่ ค.8 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของรอบเอาทไฟวส์เมื่อ $\alpha = 14^\circ$

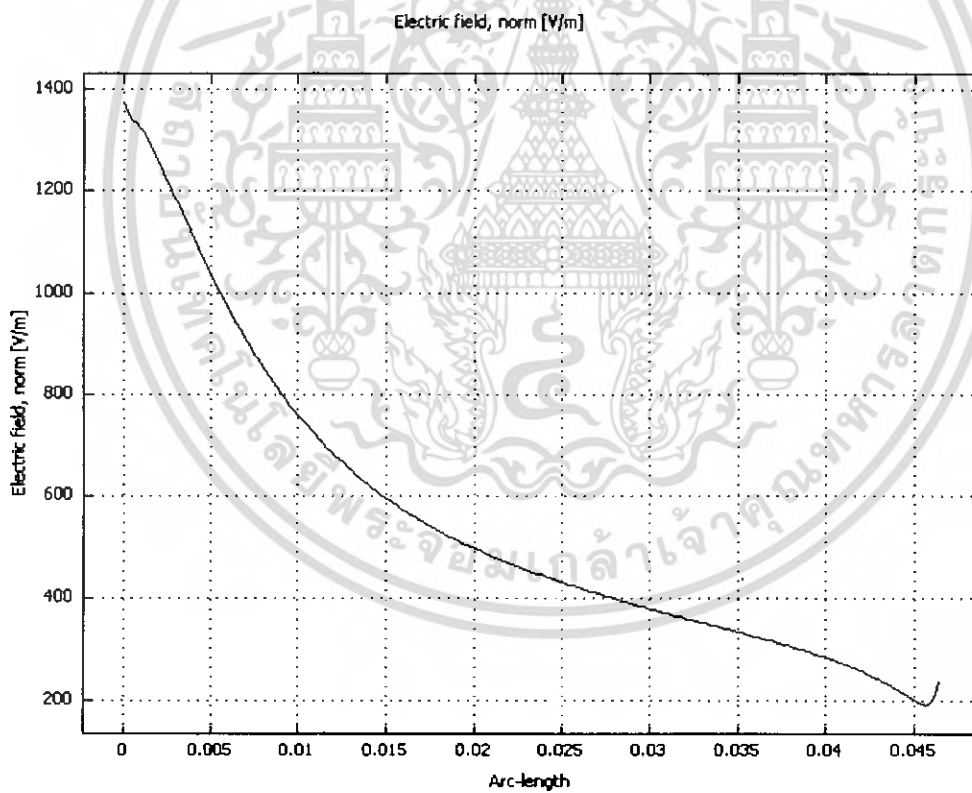


รูปที่ ค.9 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกครอบเอาทไฟวส์ปีกแรกจากด้านบนเมื่อ $\alpha = 14^\circ$

ผลการจำลองรอบเอาทไฟวส์ที่ออกแบบที่มุม $\alpha = 16^\circ$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

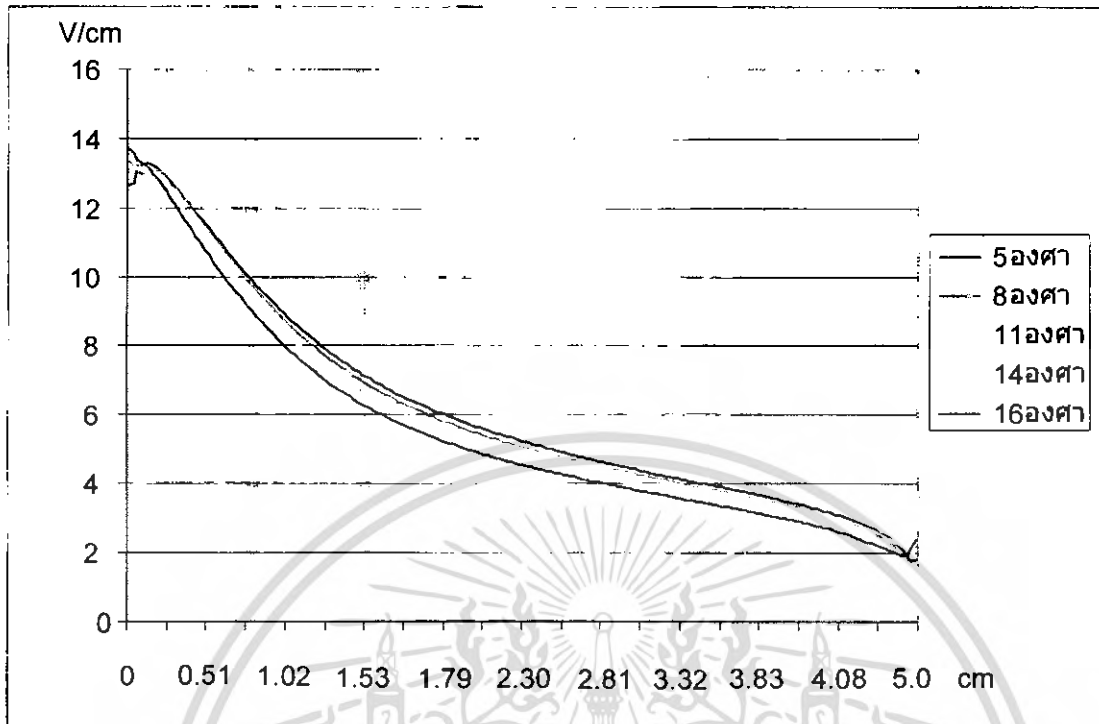


รูปที่ ค.10 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของดรอเอทพีวีสเมื่อ $\alpha = 16^\circ$



รูปที่ ค.11 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกดรอเอทพีวีสปีกแรกจากด้านบนเมื่อ $\alpha = 16^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.12 กราฟการเปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกครอบเอวท์ฟิวส์ปีกแรกจากด้านบนเมื่อ $\alpha = 5, 8, 12, 14, 16$ องศา

จากกราฟการเปรียบเทียบการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวปีกครอบเอวท์ฟิวส์จะเห็นได้ว่าที่มุม $\alpha = 16$ องศา มีค่าการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด