

การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้า

THE STUDY AND ANALYSIS OF ELECTRICAL CHARACTERISTIC
OF AIR TERMINALS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-020-062

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้า

THE STUDY AND ANALYSIS OF ELECTRICAL CHARACTERISTIC
OF AIR TERMINALS



T105143



ศรัณย์ ชิวทวีทรัพย์

SARAN CHEVATAVEESUB

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105143
วัน,เดือน,ปี.....16 พ.ย. 2552

b. 121 b b A 2 x
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-020-062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY AND ANALYSIS OF ELECTRICAL CHARACTERISTIC
OF AIR TERMINALS**

SARAN CHEVATAVEESUB



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

2009

KMITL-2009-EN-M-020-062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้า
Thesis Title The Study and Analysis of Electrical Characteristic of Air Terminals
นักศึกษา นายศรัณย์ ชีวทวีทรัพย์
รหัสประจำตัว 50060204
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ภพ จันท์เจริญสุข
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-062

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิสระชัย	งามทร	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
ดร.เอกรินทร์	วาสนาส่ง	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.ภพ	จันท์เจริญสุข	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เตชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้า
นักศึกษา	นายศรัณย์ ชิวทวิทรัพย์
รหัสนักศึกษา	50060204
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าซึ่งทำจากวัสดุและมีรูปทรงซึ่งแตกต่างกัน ใช้สำหรับการติดตั้งป้องกันทั่วไป และศึกษาผลทางความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเสาต่อฟ้า ภายใต้สภาวะการทดสอบแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองบนคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า จากผลการทดลองค่าแรงดันเบรกดาวน์และจำนวนครั้งของการเบรกดาวน์ และค่าอุณหภูมิความร้อนของเสาต่อฟ้าแต่ละชนิด พบว่าเสาต่อฟ้าที่เป็นปลายแหลมวัสดุเป็นทองแดงล้วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. มีแนวโน้มที่จะเกิดเบรกดาวน์ได้ง่าย และเสาต่อฟ้าที่มีลักษณะเป็นปลายมนวัสดุเป็นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. มีแนวโน้มที่จะเกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายที่สุด นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเสาต่อฟ้าชุบด้วยทองแดง ที่ค่าความหนาต่ำกว่า 250 ไมครอน (μm) จะมีอุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้น จนส่งผลให้ผิวของเสาต่อฟ้าเสียหายได้ และอาจทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันลดลง

Thesis Title	The Study and Analysis of Electrical Characteristic of Air Terminals
Student	Mr.Saran Chevataveesub
Student ID.	50060204
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Dr. Phop Chanchaoensook

ABSTRACT

This thesis presents the study and analysis of electrical characteristics of various kinds and shapes of air terminals used in conventional lightning protection systems. Thermal effects of the copper-plated air terminals which conduct currents are also investigated. Experiments are conducted in a high-voltage laboratory using both direct-current and impulse voltage tests. Computer simulation using a finite element analysis package is carried out in order to determine electric fields and potential distribution. Measurement results including breakdown voltages, numbers of breakdowns and temperature rises of the air terminals are recorded for comparative purposes. It has been found that the sharp air terminal made of solid copper with the diameter size of 16-mm has more frequent breakdowns than other sharp ones. Furthermore, the results suggest that the blunt aluminum air terminal with the diameter size of 16-mm have the most frequent numbers of breakdowns. Lastly, the thermal test results show that for the plated air terminals with the copper thickness of less than 250 μm , there exist significant temperature rises which can seriously damage the skin of the air terminals and eventually decrease their lightning protection performance.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ดร. ภพ จันทร์เจริญสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์, ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช, Prof. Dr. Masaaki Kando และ รศ.ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสี่ท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัท ที.โอ.ที จำกัด(มหาชน) หน่วยงานวิจัยการระบบการป้องกันฟ้าผ่า ที่ได้สนับสนุนข้อมูล คำแนะนำและผลงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในการสนับสนุนอนุเคราะห์เครื่องมือวัดความต้านทาน และกล้องเทอร์โมสแกน เพื่อใช้ในการตรวจเช็คพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเสาหล่อฟ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศรัณย์ ชิวทวิทรัพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	6
2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า.....	6
2.2 คุณลักษณะสมบัติฟ้าผ่า.....	8
2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น.....	8
2.2.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่น.....	9
2.2.3 ขนาดกระแสฟ้าผ่า.....	10
2.3 ผลกระทบเนื่องจากฟ้าผ่า.....	12
2.3.1 ความเสียหายเนื่องจากผลความร้อน.....	12
2.3.1.1 ความร้อนเชิงความต้านทาน.....	12
2.3.1.2 ความร้อนที่จุดที่อาร์กเกาะอยู่เชื่อมต่อ.....	14
2.3.2 ผลทางกล.....	14
2.3.3 ผลทางไฟฟ้า.....	15
2.3.3.1 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า EMI(Electromagnetic Interference).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.3 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย.....	15
2.3.3.4 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ.....	16
2.3.3.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง.....	16
2.3.3.6 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส.....	16
2.4 ทฤษฎีและหลักการของสนามไฟฟ้า.....	17
2.4.1 สนามไฟฟ้า.....	17
2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์(Breakdown Mechanisms).....	20
2.5.1 กลไกเบรกดาวน์ของทาวนด์เซนด(Townsend Breakdown).....	21
2.5.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์(Streamer Breakdown).....	22
2.5.3 การเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	24
2.5.4 การเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	25
2.5.5 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ.....	26
2.5.6 การเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์.....	26
2.6 แฟกเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์.....	26
2.6.1 ผลของขั้วแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น.....	26
2.6.2 ผลของประจุค้าง.....	27
2.6.3 ผลอุณหภูมิ.....	29
2.6.4 ผลของลักษณะอิเล็กโตรด.....	29
2.6.5 ผลของความชื้นในอากาศ.....	29
2.6.6 ผลของรูปคลื่นแรงดัน.....	29
2.7 มาตรการป้องกันฟ้าผ่า.....	31
2.7.1 ชนิดของความเสียหายที่เกิดจากฟ้าผ่า.....	31
2.7.2 ความจำเป็นของระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	32
2.7.3 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	32
2.7.4 การเลือกระดับการป้องกันสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	33
2.7.4.1 ความถี่ของการเกิดวาบฟ้าผ่าที่ยอมรับได้(Nc)กับสิ่งปลูกสร้าง.....	33
2.7.4.2 ความหนาแน่นวาบฟ้าผ่าลงดิน (Ng).....	34
2.7.4.3 ความถี่ที่คาดหมายการเกิดวาบฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้าง(Nd).....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า.....	36
2.8.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก.....	36
2.8.1.1 ระบบตัวนำล่อฟ้า.....	36
2.8.1.2 ระบบตัวนำลงดิน.....	39
2.8.1.3 ระบบรอกสายดิน.....	39
2.8.2 ขนาดและวัสดุที่ใช้ในระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	40
2.8.3 ระยะที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก.....	42
2.9 ความเป็นมาของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43
2.9.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43
2.9.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า.....	46
2.9.3 สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขทางด้านสนามไฟฟ้า.....	47
2.9.4 สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขทางด้านความร้อน.....	48
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดสอบและการจำลองเสาต่อฟ้า.....	50
3.1 บทนำ.....	50
3.2 การศึกษาจำลองและออกแบบชุดทดสอบเสาต่อฟ้า.....	50
3.2.1 การจำลองชุดทดสอบ.....	51
3.2.2 ผลวิเคราะห์แบบจำลองชุดทดสอบโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	55
3.2.3 การสร้างชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า.....	58
3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองตัวนำล่อฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	59
3.3.1 การจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
3.3.1.1 ผลการทดลองจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า.....	66
3.3.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	68
3.3.2 การจำลองผลทางด้านความร้อนโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	68
3.3.2.1 การทดลองเพื่อดูการกระจายความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ.....	68
3.3.2.2 การทดลองเพื่อดูการกระจายความร้อนของวัสดุที่หุ้มด้วยทองแดง....	72
3.3.2.3 ผลการทดลองกรณีจำลองผลทางความร้อนให้กับตัวนำล่อฟ้า.....	74
3.3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวนำล่อฟ้า.....	77
4.1 บทนำ.....	77
4.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบที่ใช้กันทั่วไป.....	77
4.2.1 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวน์.....	78
4.2.2 การเตรียมการทดสอบ.....	78
4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	79
4.2.4 ผลการทดสอบ.....	81
4.2.4.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพล.....	81
4.2.4.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลและชั่วววก....	83
4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	85
4.2.6 สรุปผลการทดลอง.....	87
4.3 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุชนิดต่างๆ.....	87
4.3.1 การเตรียมการทดสอบ.....	87
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	88
4.3.3 ผลการทดสอบ.....	88
4.3.3.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพล.....	89
4.3.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลและชั่วววก....	91
4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	92
4.3.5 สรุปผลการทดลอง.....	94
4.4 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน ที่ขนาดต่างๆ.....	94
4.4.1 การเตรียมการทดสอบ.....	94
4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	95
4.4.3 ผลการทดสอบ.....	95
4.4.3.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพล.....	96
4.4.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลและชั่วววก....	98
4.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	99
4.4.5 สรุปผลการทดลอง.....	100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ.....	100
4.5.1 การเตรียมการทดสอบ.....	101
4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	101
4.5.3 ผลการทดสอบ.....	101
4.5.3.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ.....	102
4.5.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบและชั่วบวก...103	
4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	104
4.5.5 สรุปผลการทดลอง.....	106
4.6 การทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน กับปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ.....	106
4.6.1 การเตรียมการทดสอบ.....	106
4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	107
4.6.3 ผลการทดสอบ.....	107
4.6.3.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ.....	107
4.6.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบและชั่วบวก...109	
4.6.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	110
4.6.5 สรุปผลการทดลอง.....	112
4.7 การทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของแท่งตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพในการล่อฟ้าที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดสอบที่ผ่านมา.....	113
4.7.1 การเตรียมการทดสอบ.....	113
4.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	114
4.7.3 ผลการทดสอบ.....	114
4.7.3.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ.....	114
4.7.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบและชั่วบวก...115	
4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	116
4.7.5 สรุปผลการทดลอง.....	118

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 การทดสอบผลทางด้านความร้อนของแท่งตัวนำล่อฟ้าเนื่องจากกระแสไฟฟ้า.....	118
4.8.1 การเตรียมการทดสอบ.....	118
4.8.2 อุปกรณ์การทดสอบ.....	120
4.8.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	120
4.8.4 ผลการทดสอบ.....	122
4.8.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	125
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	127
5.1 สรุป.....	127
5.2 อุปสรรคและการแก้ไข.....	130
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	131
บรรณานุกรม.....	132
ภาคผนวก.....	134
ภาคผนวก ก. รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	135
ภาคผนวก ข. มาตรฐานการปรับค่าแรงดันสูง คู่สถานะมาตรฐาน.....	140
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	163

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่า.....	11
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทั่วไปที่ใช้ในองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	13
2.3 ประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าตามระดับการป้องกัน.....	36
2.4 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน.....	37
2.5 วัสดุและขนาดต่ำสุดของตัวนำล่อฟ้าและตัวนำลงดิน.....	38
2.6 ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างตัวนำลงดินตามระดับการป้องกัน.....	39
2.7 วัสดุและเงื่อนไขที่ใช้ในระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	41
2.8 ค่าสัมประสิทธิ์ k_r ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก.....	42
2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ k_c ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก.....	42
2.10 ค่าสัมประสิทธิ์ k_m ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก.....	42
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่มีผลทางด้านความร้อน.....	70
4.1 ค่าแรงดันเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้ทดสอบ.....	81
4.2 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้ทดสอบภายใต้ เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ขั้วลบ.....	82
4.3 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้ทดสอบภายใต้ เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	84
4.4 ค่าแรงดันเบรคความถี่ของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดัน กระแสตรง ขั้วลบ.....	89
4.5 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆภายใต้ เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ขั้วลบ.....	90
4.6 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆภายใต้ เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	92
4.7 ค่าแรงดันเบรคความถี่ของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนอลูมิเนียม ขนาดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไข แรงดันกระแสตรง ขั้วลบ.....	96
4.8 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนอลูมิเนียม ขนาดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ขั้วลบ.....	97
4.9 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนอลูมิเนียม ขนาดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ค่าแรงดันเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ชั่วลบ.....	102
4.11 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ชั่วลบ.....	103
4.12 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	104
4.13 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลมที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ชั่วลบ.....	107
4.14 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลมที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ ชั่วลบ.....	109
4.15 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลมที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ ชั่วบวก.....	110
4.16 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ชั่วลบ.....	114
4.17 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	116
4.18 ค่าความต้านทานและอุณหภูมิของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ.....	122

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ฟ้ายแลบและฟ้าผ่าร่วมกัน.....	6
2.2 ช่วงเวลาของการเกิดวาบฟ้าผ่าที่ถูกบันทึกโดย Streak Camera.....	8
2.3 ฟ้าผ่าลง.....	8
2.4 ฟ้าผ่าขึ้น.....	9
2.5 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า.....	10
2.6 เส้นสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเท่าที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโตรดทรงกลม.....	18
2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	20
2.8 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระตามกระบวนการเกิดสตรีมเมอร์.....	23
2.9 ระยะวิกฤตของอะวลานซ์อิเล็กตรอน.....	24
2.10 ระยะวิกฤตของอะวลานซ์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	25
2.11 ผลประจุค้างของปลายแหลม ขั้วบวก.....	28
2.12 ผลประจุค้างของปลายแหลม ขั้วลบ.....	29
2.13 แรงดันเบรกความ U_b ของอิเล็กโตรดแท่งกับระนาบในอากาศที่ระยะแกบต่างๆ.....	30
2.14 ชนิดความสูญเสีย และความเสียหายที่เกิดจากความเสียหายชนิดต่างๆ.....	31
2.15 แผนที่โลกบอกจำนวนวันเฉลี่ยพายุฝนฟ้าคะนองต่อปี.....	34
2.16 แผนที่โลกบอกจำนวนความหนาแน่นวาบฟ้าผ่าลงดิน.....	34
2.17 มุมป้องกันที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวตัวนำล่อฟ้ากับระดับการป้องกัน.....	37
2.18 ความต้านทานดินที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากสายดินกับความต้านทานกับ ความต้านทานจำเพาะของดิน.....	40
2.19 การแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ กัน.....	43
2.20 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วย 3 จุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่า.....	44
3.1 การเลือกรูปแบบขอบเขตปัญหาโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์(Comsol Version 3.3).....	51
3.2 การนำแบบจำลองเข้ามาใน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
3.3 การป้อนค่าBoundaryและSubdomain Setting ให้กับ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	53
3.4 การสร้างเอลิเมนต์ย่อย(Mesh)และการประมวลผลโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	54
3.5 การกำหนดรูปแบบการประมวลผลที่ต้องการทราบโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	54
3.6 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่ไม่มีการทำขอบโค้ง โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	55

สารบัญรูปรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มิชอบโค้งรัศมี $R=12.5$ มม. โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	56
3.8 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มิชอบโค้งรัศมี $R=25$ มม. โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	56
3.9 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มิชอบโค้งรัศมี $R=40$ มม. โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	57
3.10 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มิชอบโค้งรัศมี $R=50$ มม. โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	57
3.11 โครงสร้างของชุดทดสอบตัวนำล่อฟ้าที่ได้ออกแบบ.....	59
3.12 ลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่ทำการทดลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	60
3.13 ขนาดปลายแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำการทดลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	60
3.14 การกำหนดรูปแบบจำลองและขอบเขตปัญหาที่เกี่ยวกับสนามไฟฟ้า โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
3.15 การอิมพอร์ตและการตั้งค่าแบบจำลองที่ต้องการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	62
3.16 การสเกลขนาดแบบจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	63
3.17 การกำหนดค่า Boundary Setting ให้กับแบบจำลองกรณีวิเคราะห์สนามไฟฟ้า.....	63
3.18 การกำหนดค่า Subdomain Setting ให้กับแบบจำลองกรณีวิเคราะห์สนามไฟฟ้า.....	64
3.19 การสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลองกรณีวิเคราะห์สนามไฟฟ้า.....	64
3.20 การประมวลผลขอบเขตปัญหาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	65
3.21 การกำหนดค่าต่างๆที่ต้องการแสดงผลโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	65
3.22 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่รูปทรงแตกต่างกัน จำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	66
3.23 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่วัสดุแตกต่างกัน จำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	67
3.24 การเลือกรูปแบบของการจำลองและขอบเขตปัญหาทางด้านความร้อนโดยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	69
3.25 การกำหนดค่า Boundary Setting ให้กับแบบจำลองกรณีวิเคราะห์ทางด้านความร้อน.....	69
3.26 การกำหนดค่า Subdomain Setting ให้กับแบบจำลองกรณีวิเคราะห์ทางด้านความร้อน.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 การสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลอง กรณีขอบเขตปัญหาทางด้านความร้อน.....	71
3.28 การกำหนดเวลาในการจำลอง กรณีขอบเขตปัญหาทางด้านความร้อนเป็น แบบ Transient Analysis.....	72
3.29 การประมวลผลขอบเขตปัญหาและกำหนดค่าแสดงผลทางด้านความร้อน โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	72
3.30 การกำหนดค่า Boundary Setting ให้กับแบบจำลอง กรณีวัสดุที่มีการชุบด้วย ทองแดงเพื่อวิเคราะห์ผลทางด้านความร้อน.....	72
3.31 การกำหนดค่า Subdomain Setting ให้กับแบบจำลอง กรณีวัสดุที่มีการชุบด้วย ทองแดงเพื่อวิเคราะห์ผลทางด้านความร้อน.....	73
3.32 ผลอุณหภูมิของหน้าตัดแท่งตัวนำล่อฟ้า วัสดุแต่ละชนิด วิเคราะห์โดย โปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	74
3.33 ผลอุณหภูมิของแท่งตัวนำล่อฟ้า วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดงที่ความหนาต่างๆ วิเคราะห์ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	76
4.1 ตัวนำล่อฟ้าแบบพาราเคย์ที่ใช้ทดสอบ.....	78
4.2 วงจรการทดสอบ.....	80
4.3 การเบรคความถี่ตัวนำล่อฟ้าแบบพาราเคย์ที่ใช้ทดสอบภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	82
4.4 การสร้างสกรีมเมอร์และการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าแบบพาราเคย์ผ่านอากาศ กรณีทดสอบเปรียบเทียบกัน ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	83
4.5 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดทางคลื่น กรณีทดสอบตัวนำล่อฟ้าแบบพาราเคย์ชนิดต่างๆ	85
4.6 ค่าแรงดันเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าแบบพาราเคย์ที่ทดสอบ ในระยะแถบต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	86
4.7 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าแบบพาราเคย์ที่ทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	86
4.8 ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆที่ทำการทดสอบ.....	88
4.9 การเกิดสกรีมเมอร์และเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ กรณี ทดสอบเปรียบเทียบกัน.....	91
4.10 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	93

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	93
4.12 ขนาดต่างๆของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่ใช้ทดสอบ.....	94
4.13 ตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่มีขนาดต่างๆ ที่ใช้ทดสอบ.....	95
4.14 การเกิดเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุอลูมิเนียมที่ขนาดต่างๆ กรณีทดสอบเปรียบเทียบกัน.....	98
4.15 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่ระยะแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	99
4.16 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่ระยะแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	100
4.17 ตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุต่างชนิดกัน ที่ใช้ทดสอบ.....	101
4.18 การเกิดสตริมเมอร์และเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ กรณี ทดสอบเปรียบเทียบกัน.....	103
4.19 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	105
4.20 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	105
4.21 ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมและปลายมน วัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ทดสอบ.....	106
4.22 การเกิดเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่าง ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมกับปลายมน ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	108
4.23 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลม ที่ระยะแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	111
4.24 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลม ที่ระยะแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	112
4.25 ตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดสอบที่ผ่านมา.....	113
4.26 การเกิดเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบระหว่างตัวนำล่อฟ้า ที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา.....	115
4.27 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานซ์ของตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์.....	117
4.29 ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ทดสอบผลทางด้านความร้อน.....	118
4.30 ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดงที่ขนาดความหนาต่างๆ.....	119
4.31 เครื่องวัดความต้านทาน ความละเอียดสูง.....	120
4.32 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermo Scan).....	120
4.33 วงจรการวัดค่าความต้านทานของตัวนำล่อฟ้า.....	121
4.34 วงจรการทดสอบอุณหภูมิของแท่งตัวนำล่อฟ้า.....	121
4.35 การวัดอุณหภูมิตัวนำล่อฟ้า วัสดุชนิดต่างๆขณะป้อนกระแสไฟฟ้า 500A เวลา 10 นาที.....	123
4.36 ผลกระทบต่อตัวนำล่อฟ้าวัสดุชนิดต่างๆ เนื่องจากผลของความร้อน ขณะป้อนกระแสไฟฟ้า 500A เวลา 10 นาที.....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสภาวะอากาศบนโลกนี้มีความแปรปรวนและรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากอัตราการใช้พลังงานมีมากขึ้น และได้ปล่อยก๊าซออกสู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนและเกิดภัยธรรมชาติที่ไม่อาจคาดคิดมาก่อนได้ รวมถึงการเกิดฝนฟ้าคะนองและฟ้าผ่าที่รุนแรง และเป็นทราบกันดีว่าฟ้าผ่าไม่สามารถยับยั้งไม่ให้เกิดขึ้นได้แต่สามารถที่จะป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินที่ต้องการป้องกันอันตรายที่เกิดจากฟ้าผ่าได้ ในต่างประเทศมีหลายองค์กรที่จัดตั้งขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเกิดฟ้าผ่า การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ตลอดจนการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าอย่างเช่น เสาล่อฟ้า ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่ามีมูลค่ามากมายมหาศาล โดยกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย ได้การจัดทำสถิติความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในประเทศไทย [1] ซึ่งยังไม่รวมถึงสิ่งมีชีวิตและโบราณสถานที่ไม่สามารถประเมินมูลค่าได้ ฉะนั้นจึงต้องมีการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่มีประสิทธิภาพดีพอ ซึ่งการออกแบบก็จะเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบป้องกันฟ้าผ่าก็มีความสำคัญในการป้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเสาล่อฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ลำดับแรกในการรับล่อฟ้าผ่าที่จะเกิดขึ้น ซึ่งถ้าเสาล่อฟ้ามีประสิทธิภาพที่ดีพอก็สามารถสร้างสตรีมเมอร์ได้เร็วและไกลกว่าเพื่อที่จะรับกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย ฉะนั้นจึงต้องมีการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของเสาล่อฟ้าแต่ละชนิดที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป รวมถึงวัสดุต่างๆที่ใช้ทำเสาล่อฟ้า ซึ่งต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการสร้างสตรีมเมอร์ ขนาดเสาล่อฟ้าที่เหมาะสม ความคงทนของวัสดุในสภาวะอากาศภายนอก ตลอดจนราคาต้นทุนของอุปกรณ์และการติดตั้งว่าคุ้มค่าหรือไม่ กับมูลค่าของส่วนที่ต้องการที่จะป้องกัน [2]

จากการศึกษาและทบทวนข้อมูลต่างๆ ในอดีตถึงความเป็นมาของการการออกแบบ และการป้องกันฟ้าผ่า แต่ไม่ได้กล่าวถึงการออกแบบเสาล่อฟ้าโดยตรง ส่วนใหญ่จะมีการออกแบบตามลักษณะของการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายของแท่งตัวนำเสาล่อฟ้า เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายใต้ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพฝนฟ้าคะนอง และนำมาทดสอบเพื่อคุณลักษณะการเกิดสตรีมเมอร์ ตลอดจนนำมาทดสอบเพื่อใช้งานจริง จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมต้องมีการทดสอบเสาล่อฟ้าที่หลากหลายชนิด เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเสาล่อฟ้า

การศึกษาวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การนำเสาล่อฟ้าที่มีรูปลักษณะต่างๆ ที่มีใช้กันอย่าง

แพร่หลาย เช่น เสาล่อฟ้าปลายแหลม เสาล่อฟ้าปลายแฉก เสาล่อฟ้าแบบทรงกลม เสาล่อฟ้าแบบ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกลมปลายแหลม เป็นต้น และได้นำเสาต่อฟ้าที่มีวัสดุต่างชนิดกันมาทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางฟิสิกส์ เพื่อเก็บข้อมูลและเปรียบเทียบคุณลักษณะดังกล่าว รวมไปถึงการนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะความเครียดสนามไฟฟ้า ผลทางความร้อนที่มีผลต่อเสาต่อฟ้าแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้หรือพัฒนาเสาต่อฟ้าต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาคุณลักษณะสมบัติของเสาต่อฟ้าชนิดต่างๆที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยนำเสาต่อฟ้าดังกล่าวมาทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบและแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ตลอดจนทดสอบหาผลของความร้อนที่มีต่อวัสดุที่ใช้ทำเสาต่อฟ้าโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าสลับให้กับเสาต่อฟ้าแต่ละชนิด รวมไปถึงมีการนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ผลทางความร้อนของเสาต่อฟ้าแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้เสาต่อฟ้าหรือปรับปรุงเสาต่อฟ้าให้มีประสิทธิภาพให้ดีขึ้น ตลอดจนนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาและศึกษาในลำดับต่อไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในองค์กรต่างๆที่มีศึกษาเกี่ยวกับระบบป้องกันฟ้าผ่าเช่น NFPA (The National Fire Protection Association) LPI (The Lightning Protection Institute) UL (Underwriter Laboratories) ANSI (The American National Standards Institute) IEC (International Electrotechnical Commission) ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปทางด้านมาตรฐานการออกแบบระบบป้องกัน แต่ในการออกแบบเสาต่อฟ้ามิได้มีมาตรฐานเป็นที่แน่นอน เพียงแต่ต้องมีการออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่าและนำมาทดสอบเองภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นเฉพาะเสาต่อฟ้าที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทำการทดสอบเพื่อดูค่าแรงดันเบรกคาวน์และจำนวนครั้งของการเบรกคาวน์ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ และแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วบวกและลบ โดยมีการทดสอบซ้ำเพื่อให้ค่ามีความถูกต้องมากขึ้น รวมไปถึงการทดสอบผลของความร้อนของเสาต่อฟ้าแต่ละชนิด นำวิธีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าและจำลองการทดสอบจริง ซึ่งการทดสอบเสาต่อฟ้าก็มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของแรงดันที่ใช้ทดสอบ ทำให้ระยะแกปของการทดสอบมีระยะที่ไม่ห่างมากนัก

การแก้ปัญหาข้างต้นนี้ก็จะมีการทดสอบหลายๆครั้งในระยะแกปเดียวกัน เพื่อให้ค่ามีความถูกต้องมากขึ้นและทดสอบที่ระยะแกปหลายๆช่วง ตามสมรรถนะของเครื่องกำเนิดแรงดันและนำค่าที่ได้เพื่อดูแนวโน้มในระยะที่ห่างออกไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิธีการประเมินประสิทธิภาพของเสาหล่อฟ้าแต่ละชนิด โดยคุณลักษณะการเกิดสตริมเมอร์ และความคงทนแข็งแรงของเสาหล่อฟ้า โดยแนวความคิดที่ว่าถ้าเสาหล่อฟ้าชนิดใดมีการสร้างสตริมเมอร์ได้เร็วกว่าและสร้างได้ระยะไกลกว่าจะทำให้มีโอกาสที่จะรับน้ำหนักฟ้าผ่าได้ก่อน ซึ่งจะนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย ซึ่งถือว่าเสาหล่อฟ้าชนิดนั้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันได้ดี [3] ตลอดจนต้องมีความคงทนแข็งแรงทนต่อความร้อนและแรงทางกลที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า ฉะนั้นในการทำวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นในการศึกษาค่าแรงดันเบรกคาวน์และจำนวนครั้งของการเบรกคาวน์ของเสาหล่อฟ้าผ่านอากาศ ซึ่งถ้าเสาหล่อฟ้าชนิดใดมีค่าแรงดันเบรกคาวน์ต่ำกว่า หรือมีจำนวนครั้งการเบรกคาวน์มากกว่า ก็แสดงว่าบริเวณปลายของเสาหล่อฟ้าชนิดนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ทำให้เกิดการสร้างสตริมเมอร์ได้เร็วและไกลกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการทดสอบเสาหล่อฟ้าส่วนใหญ่ในต่างประเทศ จะทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ แต่แรงดันอิมพัลส์มีช่วงเวลาอันสั้น ที่จะทำให้เกิดการเบรกคาวน์ของเสาหล่อฟ้าผ่านอากาศ ทำให้การศึกษาพฤติกรรมเริ่มต้นการเกิดสตริมเมอร์ของเสาหล่อฟ้ามีความลำบาก ฉะนั้นจึงมีการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดสตริมเมอร์ดังกล่าวได้ง่ายกว่า ซึ่งการเกิดสตริมเมอร์ขึ้นอยู่กับแรงดันขณะที่ย้อนและช่วงเวลาขณะที่ทำการย้อน ตลอดจนระยะแยกที่ใช้ในการทดสอบ

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของเสาหล่อฟ้าชนิดต่างๆ โดยการนำเสาหล่อฟ้าที่ใช้กันอยู่แพร่หลายมาทำการศึกษา พฤติกรรมและคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้และพัฒนาเสาหล่อฟ้าให้มีประสิทธิภาพในราคาที่ไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเสาหล่อฟ้าชนิดอื่นๆ และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบเสาหล่อฟ้าเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันฟ้าผ่าได้ ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาวิจัยดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของพฤติกรรมกรเกิดฟ้าผ่า
- 2) ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟ้าผ่า
- 3) ศึกษาผลกระทบและความเสียหายต่างๆที่มีผลเนื่องมาจากฟ้าผ่า
- 4) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้าและไฟไนต์เอลิเมนต์
- 5) ติดต่อประสานงานกับการสื่อสารแห่งประเทศไทย เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการเยี่ยมชมระบบป้องกันฟ้าผ่าของอาคาร
- 6) ติดต่อประสานงานกับองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการเยี่ยมชมและศึกษาระบบป้องกันชุมสายโทรศัพท์
- 7) ติดต่อประสานงานกับการทำอากาศยานสุวรรณภูมิ เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการเยี่ยมชมระบบป้องกันฟ้าผ่าในอาคารสนามบิน
- 8) ติดต่อประสานงานกับบริษัทห้างร้าน เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการจัดทำเสาหล่อฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบ
- 9) ติดต่อประสานงานกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อขอความอนุเคราะห์ในเรื่องเครื่องมือวัด
- 10) ศึกษาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและความร้อน
- 11) ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับการทดสอบ
- 12) ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในต่างประเทศและภายในประเทศ
- 13) จัดเตรียมห้องทดสอบ เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ
- 14) ทำการทดสอบ
- 15) นำผลต่างๆที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ และสรุปผล
- 16) สรุปผล และข้อเสนอแนะ
- 17) นำข้อมูลทั้งหมดมาจัดทำวิทยานิพนธ์

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการเกิดฟ้าผ่า คุณลักษณะสมบัติฟ้าผ่า ผลกระทบเนื่องจากฟ้าผ่า สนามไฟฟ้า(Electric Field) กลไกการเกิดเบรกดาวน์ แฟลคเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ มาตรการป้องกันฟ้าผ่า มาตรฐานข้อกำหนดในการป้องกันฟ้าผ่า และวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method, FEM)

บทที่ 3 กล่าวถึงการศึกษา จำลองแผ่นอิเล็กโทรดและเสาต่อฟ้าที่ใช้ทดสอบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ผลค่าสนามไฟฟ้า การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าชนิดต่างๆ รวมถึงการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางความร้อนที่มีต่อแท่งตัวนำเสาต่อฟ้า เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการเตรียมการและวิธีการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าโดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดจำลองป้อนแรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ให้กับเสาต่อฟ้า คุพฤติกรรมการเกิดสไตรเมอร์พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันเบรกดาวน์ จำนวนครั้งในการเบรกดาวน์ และทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะสมบัติความคงทนของเสาต่อฟ้าโดยผลทางความร้อน

บทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุป ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบเสาต่อฟ้าแต่ละขั้นตอน โดยจะสรุปเป็นข้อๆ เนื่องจากประเด็นในการวิจัยเพื่อคุณลักษณะสมบัติของเสาต่อฟ้าได้แบ่งออกเป็น 3 ข้อหลักคือ การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติของเสาต่อฟ้าที่มีรูปลักษณะต่างกัน การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติของเสาต่อฟ้าที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกัน และการเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติของเสาต่อฟ้าที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวนำต่างกัน รวมไปถึงผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบ อุปกรณ์ต่างๆ และการแก้ไข รวมไปถึงข้อเสนอแนะที่จะเป็นประโยชน์ที่จะนำไปใช้งาน หรือศึกษาต่อไป

บทที่ 2

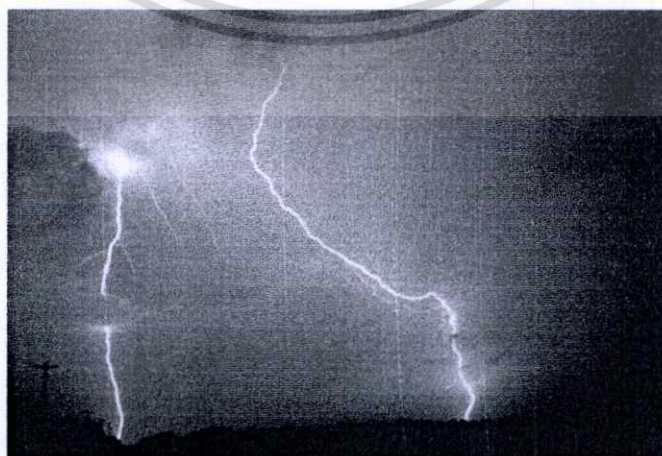
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และมาตรฐานต่างๆ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงซึ่งประกอบด้วยกระบวนการเกิดฟ้าผ่า ผลกระทบเนื่องจากฟ้าผ่า สนามไฟฟ้า(Electric Field) กลไกการเกิดเบรกดาวน์ แฟลคเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ มาตรการป้องกันอันตรายจากฟ้า มาตรฐานข้อกำหนดในการป้องกันฟ้าผ่า และวิธีการไฟในทออีลิเมนต์(Finite Element Method, FEM)

2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า [3]

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติโดยมีการศึกษาค้นคว้าตั้งแต่อดีต โดยเริ่มจากปีค.ศ. 1746-1753 โดย เบนจามิน แฟรงคลิน(Benjamin Franklin) และทีมงาน ที่เมืองฟิลาเดลเฟีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับประจุและได้ค้นพบฟ้าผ่าก็มีประจุไฟฟ้าเหมือนกับที่เขาทดลอง และนับตั้งแต่นั้นมาก็มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับฟ้าผ่า และการค้นคว้าก็ได้พัฒนาหลักการป้องกันฟ้าผ่าด้วยเสากล่อฟ้า(Franklin rod) ในปีค.ศ. 1753

การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดดิซชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เป็นวาบฟ้าผ่า (Ground flash)หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็น ฟ้าแลบ(air discharge) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยธรรมชาติปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบ การศึกษาและวิจัยของมนุษย์ส่วนมากจะให้ความสนใจเกี่ยวกับฟ้าผ่ามากกว่า



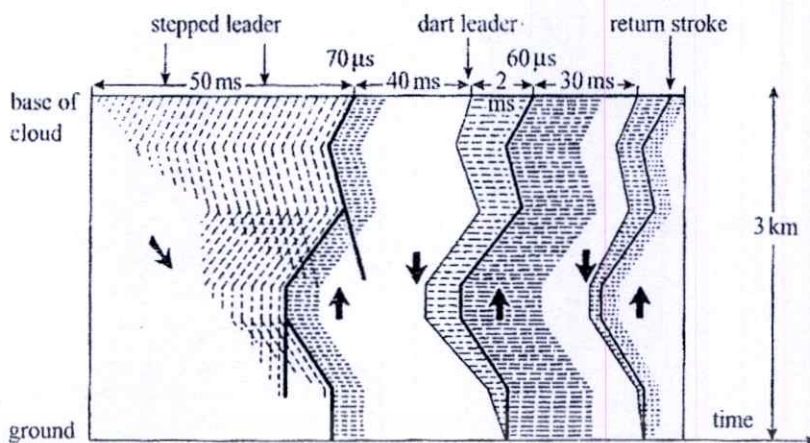
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา **รูปที่ 2.1 ฟ้าแลบและฟ้าผ่าร่วมกัน** กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสม ระดับสูง 1.5-10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ซึ่งมีการกระจายของประจุ ที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อนเมฆเป็นประจุบวก ดังรูปที่ 2.2 จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ กลุ่มประจุลบ คือ ที่ฐานของก้อนเมฆเพราะอยู่ใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤติ E_c ในก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm (ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก E_c มีค่าประมาณ 10 -30 kV/cm) [5] ก็จะเกิดไอออไนเซชันตามหลักการเกิดคิซาร์จในก๊าซ

การเกิด ไอออไนเซชันของอากาศจะเป็นลีดเดอร์ (leader) หรือหัวนำร่อง มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจิ้งหะกั้ว (stepped leader) แบบสุ่มๆ โดยงานวิจัยมีความเห็นตรงกันว่าหัวนำร่องที่เป็นจิ้งหะกั้วมีความร้อนสูงประมาณ 30,000 °K รัศมีของหัวนำร่องแต่ละจิ้งหะกั้วประมาณ 0.1-0.5 เมตร ความยาวแต่ละช่วงกั้วประมาณ 10-100 เมตร โดยช่วงกั้วของส่วนบนประมาณ 50 เมตร จนใกล้กับพื้นโลกช่วงกั้วจะลดลงเหลือประมาณ 10 เมตร และเวลาระหว่างช่วงกั้วประมาณ 10-50 μ s ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าความยาวแต่ละช่วงกั้วที่เพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของแต่ละช่วงกั้ว [5]

เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลกที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออไนซ์เป็นสตรีมเมอร์ มีความยาว 1-100 m (เฉลี่ย 50 m) วิ่งเข้าหาหัวนำร่อง จนมาพบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) มีแสงจ้า จากพื้นโลกวิ่งไปหาก้อนเมฆ ด้วยความเร็วสูงกว่าประมาณ 50×10^3 km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรุยทางมา การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่า ก็คือ กระแสฟ้าผ่านั่นเอง ซึ่งการถ่ายเทประจุระหว่างพื้นโลกกับก้อนเมฆนี้เอง เรียกว่า return stroke

ระยะสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์ เรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร กระบวนการทั้งหมดนี้เป็นการอธิบายถึงการเกิดวาบฟ้าผ่า (lightning flash) แต่ขณะที่เกิดฟ้าผ่า มักจะพบว่า มีลำฟ้าผ่าซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าครั้งแรกๆ ซึ่งบางทีก็มีการผ่าซ้ำหลายครั้ง โดยลำฟ้าผ่านี้เรียกว่า dart leader [6] ปรากฏการณ์เช่นนี้ อาจอธิบายได้ว่าในก้อนเมฆอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง เมื่อกลุ่มประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤติ ก่อน ก็จะคิซาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าแรก ดังที่กล่าวมาแล้ว หลังจากกลุ่มประจุแรกคิซาร์จไปหมดแล้ว ก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิดคิซาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวลำฟ้าผ่าแรก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าอากาศในแนวลำฟ้าผ่าวิ่งลงมา ก่อนนั้นยังคืนตัวสภาพจนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากมีไอออนอยู่ จึงทำให้ประจุในก้อนเมฆจากกลุ่มอื่นคิซาร์จได้ง่ายตามแนวนี้ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ช่วงเวลาของการเกิดวาบฟ้าผ่าซึ่งถูกบันทึกโดย streak camera [4]

2.2 คุณลักษณะสมบัติฟ้าผ่า [3]

2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น

ปรากฏการณ์ที่ประจวบในก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก ที่กล่าวมาเรียกว่า ฟ้าผ่าลง ซึ่งฟ้าผ่าลงจะสังเกตเห็นจากลำแสงฟ้าผ่าว่าจะมีการแขนงจากลำฟ้าผ่ากระจายสู่พื้นโลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ เนื่องจากว่า หัวนำร่องที่ทรูยทางมานั้น อาจคืบหน้ามาหลายทางตามทางที่ขยายตัวได้ง่ายกว่า

ฟ้าผ่าขึ้นมีกระบวนการฟ้าผ่า เช่นเดียวกับ ฟ้าผ่าลง แต่หัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจาก ยอดโครงสร้างที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 เมตร ขึ้นไป เช่นต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น สังเกตจากลำแสง จะคล้ายรากต้นไม้ เช่นเดียวกัน แต่จะแตกจากพื้นดินขึ้นฟ้า จากการสังเกตพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักเป็นผลอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2.3 ฟ้าผ่าลง เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



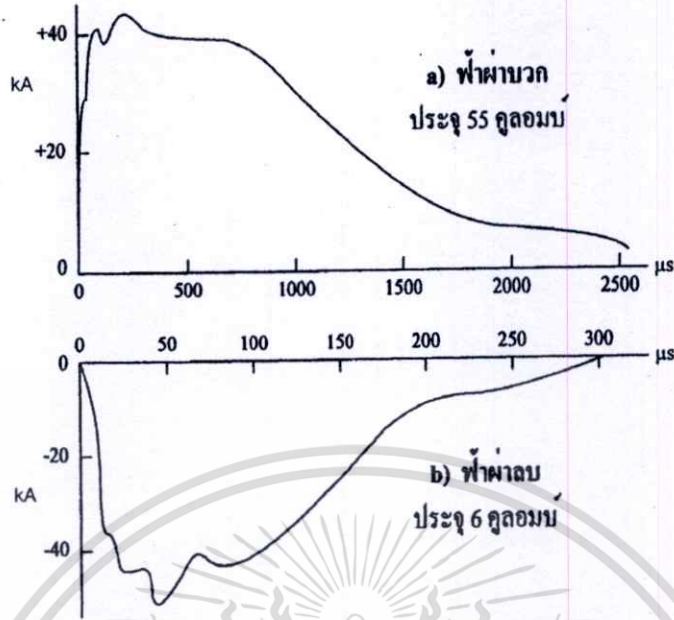
รูปที่ 2.4 ฟผ่าขึ้น

2.2.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่น [3]

ฟ้าผ่าที่นำประจุลบจากก้อนเมฆสู่พื้นโลกเรียกว่า ฟ้าผ่าลบ ฟ้าผ่าที่นำประจุบวกลงมาเรียกว่า ฟ้าผ่าบวก จากข้อมูลพบว่า 80-85% มักเป็น ฟ้าผ่าลบ และฟ้าผ่าลบ มักเป็นการผ่าซ้ำหลายครั้ง ส่วนฟ้าผ่าบวกมักเป็นฟ้าผ่าเดี่ยว

จากข้อมูลพบว่าประจุฟ้าผ่าบวกจะมีมากกว่า ประจุฟ้าผ่าลบถึง 9 เท่า และเวลาของรูปคลื่นก็ยาวมากกว่าถึง 9 เท่าเช่นกัน อธิบายได้ว่า ประจุบวกจะอยู่ด้านบนของก้อนเมฆ ประจุลบจะอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆ ซึ่งประจุลบใกล้กว่าประจุบวก ประจุบวกจึงต้องสะสมประจุให้มากพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์มายังพื้นโลกได้

ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า อาจกำหนดด้วยช่วงหน้าคลื่น (เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด) และหางคลื่น (เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนกระแสตกลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด) ลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่น คืออัตราเพิ่มของกระแส di/dt หน่วยเป็น $kA/\mu S$ ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ $\Delta v = L di/dt$ ซึ่งต้องคำนึงถึงเมื่อออกแบบสายล่อฟ้า



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

2.2.3 ขนาดกระแสฟ้าผ่า [3]

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าหมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่ามากหรือน้อย ขึ้นกับปริมาณของประจุที่คัสซาร์จ ขึ้นกับข้อของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นกับฟ้าผ่าขึ้นหรือลง จากการบันทึกของ Berger พบว่ากระแสฟ้าผ่าชั่วพลมมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมป์ และฟ้าผ่าบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมป์

พารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่าคือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า ประจุในลำฟ้าผ่า ช่วงเวลาน้ำคลื่นและความชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่มีความน่าจะเป็นเกิดขึ้นร้อยละ 95,50 และ 5 ซึ่งเป็นผลงานบันทึกของ Berger ในปีค.ศ.1975 โดยได้จากการบันทึกที่สถานีวิจัยฟ้าผ่ายอดเขา Mount San Salvatore ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ [7] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟ้าผ่า

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	หน่วย	ความน่าจะเป็นร้อยละ		
			95	50	5
	ถ่ายถอดกระแสไฟฟ้า				
101	กระแสฟ้าผ่าลบค่าแรก	kA	14	30	80
135	กระแสฟ้าผ่าลบค่าตาม	kA	4.6	12	30
26	กระแสฟ้าผ่าบวก	kA	4.6	35	250
	ประจุไฟฟ้า				
93	ประจุไฟฟ้าลบค่าแรก	C	1.1	5.2	24
122	ประจุไฟฟ้าลบค่าตาม	C	0.2	1.4	11
94	ประจุไฟฟ้าลบทั้งหมด	C	1.3	7.5	40
26	ประจุไฟฟ้าบวก	C	20	80	350
	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์				
90	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ค่าแรก	C	1.1	4.5	20
117	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ค่าตาม	C	0.22	0.95	4.0
25	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์บวก	C	2.0	16	150
	เวลาช่วงหน้าคลื่น				
89	ฟ้าผ่าลบค่าแรก	μ S	1.8	5.5	18
118	ฟ้าผ่าลบค่าตาม	μ S	0.22	1.1	4.5
19	ฟ้าผ่าบวก	μ S	3.5	22	200
	เวลาช่วงหลังคลื่น				
90	ฟ้าผ่าลบค่าแรก	μ S	30	75	200
115	ฟ้าผ่าลบค่าตาม	μ S	6.5	32	140
16	ฟ้าผ่าบวก	μ S	25	230	2,000

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	หน่วย	ความน่าจะเป็นร้อยละ		
			95	50	5
90	ความชัน (di / dt) ฟ้าผ่าลบค่าแรก	kA/μS	5.5	12	32
122	ฟ้าผ่าลบค่าต่อมา	kA/μS	12	40	120
21	ฟ้าผ่าบวก	kA/μS	0.20	2.4	32
133	ช่วงเวลาระหว่างค่าฟ้าผ่าลบ	mS	7	35	150

2.3 ผลกระทบเนื่องจากฟ้าผ่า [8]

ผลจากฟ้าผ่าก่อให้เกิดความเสียหายหรืออันตรายเป็นผลเนื่องมาจากกระแสฟ้าผ่าโดยแยกออกเป็น 3 ประเภทคือ

2.3.1 ความเสียหายเนื่องจากผลของความร้อน

2.3.1.1 ความร้อนเชิงต้านทาน

ผลทางความร้อนเกี่ยวข้องกับกระแสฟ้าผ่า เกิดจากความร้อนเชิงความต้านทาน ที่เกิดจากการไหลวนของกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานของตัวนำ หรือเข้าไปในระบบป้องกันฟ้าผ่า ผลทางความร้อนยังเกี่ยวข้องกับความร้อนที่เกิดจากจุดกำเนิดอาร์ก บริเวณจุดที่อาร์กเกาะอยู่ เชื่อมต่อและส่วนกันแยกอื่นๆ ความร้อนเชิงความต้านทานเกิดขึ้น ในองค์ประกอบใดๆของระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งเป็นทางเดินหลักของกระแสฟ้าผ่า พื้นที่หน้าตัดขั้นต่ำของตัวนำมีขนาดเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความร้อนเกินกับตัวนำ จนเป็นเหตุให้เพลิงลุกไหม้สิ่งแวดล้อม นอกจากผลทางความร้อนแล้วยังต้องคำนึงถึงเกณฑ์ความทนทางกล และทนทาน โดยเฉพาะส่วนที่เปิดโล่งต่อสภาพบรรยากาศ หรือการกัดกร่อน การประเมินค่าความร้อนเนื่องจากการไหลของกระแสเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของบุคคล และความเสียหายจากเพลิงไหม้หรือการเกิดระเบิด โดยกำลังงานขณะหนึ่ง ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความร้อนในตัวนำ เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.1)

$$P(t) = i^2 R \quad (2.1)$$

พลังงานความร้อนที่เกิดจากอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งหมด สามารถหาได้จากผลคูณของความต้านทานของทางเดินของฟ้าผ่า ในองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่พิจารณา กับพลังงาน

เฉพาะของอิมพัลส์ฟ้าผ่า พลังงานจะมีหน่วยเป็นจูลล์ (J) หรือ วัตต์-วินาที (W.s) ดังสมการที่(2.2) ราคา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = R \int i^2 dt \quad (2.2)$$

อุณหภูมิเพิ่มของตัวนำ ของระบบป้องกันฟ้าผ่าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\frac{W}{R} \cdot \alpha \cdot \rho_0}{q^2 \cdot \gamma \cdot C_w} - 1 \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ $\theta - \theta_0$ คือ อุณหภูมิเพิ่มของตัวนำ (เคลวิน)

α คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ของตัวต้านทาน (1/เคลวิน)

W/R คือ พลังงานจำเพาะของ อิมพัลส์กระแส (จูล/โอห์ม)

ρ_0 คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิแวดล้อม (โอห์ม เมตร)

q คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (ตารางเมตร)

γ คือ ความหนาแน่นวัสดุ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

C_w คือ ความจุความร้อน (จูล/กิโลกรัม.เคลวิน)

θ_s คือ อุณหภูมิหลอมละลาย (องศาเซลเซียส)

ค่าคุณลักษณะของพารามิเตอร์ทางกายภาพในสมการที่ (2.3) แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ถ้า ฟ้าผ่าโดยทั่วไปมีคุณลักษณะเป็น ถ้าฟ้าผ่าช่วงสั้น และมีกระแสค่ายอดสูง ในกรณีนี้ควรคำนึงถึง ปรากฏการณ์ทางผิว

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพของวัสดุทั่วไปที่ใช้ในองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า

Quantity	Material			
	Aluminium	Mild steel	Copper	Stainless steel*
$\rho_0 (\Omega m)$	29×10^{-9}	120×10^{-9}	17.8×10^{-9}	0.7×10^{-6}
$\alpha (1/K)$	4.0×10^{-3}	6.5×10^{-3}	3.92×10^{-3}	0.8×10^{-3}
$\gamma (kg/m^3)$	2700	7700	8920	8×10^3
$\theta_s (^\circ C)$	658	1530	1080	1500
$C_s (J/kg)$	397×10^3	272×10^3	209×10^3	-
$C_w (J/kgK)$	908	469	385	500

*Austenitic non magnetic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 ความร้อนที่จุดที่อาร์กเกาะอยู่เชื่อมต่อ

ความเสียหายทางความร้อน ที่จุด ที่อาร์กเกาะอยู่เชื่อมต่อ สามารถพบได้ทุกองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งเป็นจุดที่อาร์ก เช่น ตัวนำล่อฟ้า ช่องประกาย เป็นต้น

การหลอมเหลวและสึกกร่อนของวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้ที่จุดที่อาร์กเกาะอยู่เชื่อมต่อ ในบริเวณจุดกำเนิดอาร์กจะมีความร้อนของวัสดุสามารถเกิดจากจุดกำเนิดอาร์ก เช่นเดียวกับความร้อนเชิงความต้านทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสที่มีความหนาแน่นสูง พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ผิวของโลหะหรือบริเวณใกล้เคียง ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณจุดกำเนิดอาร์ก จะมีปริมาณมากเกินกว่าที่จะดูดซับไว้ภายในโลหะด้วยการนำความร้อนและพลังงานส่วนเกินจะถูกแผ่รังสีออกไป หรือสูญเสียไปในการหลอมเหลว หรือระเหยเป็นไอของโลหะ ความรุนแรงของกระบวนการขึ้นอยู่กับขนาดกระแส และระยะเวลา การพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีหลายแบบเพื่อใช้ในการคำนวณผลทางความร้อนต่อผิวโลหะ ณ จุดที่ช่องล่อฟ้าผ่าเกาะอยู่ เพื่อความง่ายในการคำนวณ มาตรฐานนี้จะใช้แบบจำลองแรงดันตกคร่อม อะโนด หรือคะโถด ดังสมการที่ (2.4) แบบจำลองดังกล่าวใช้ได้ผลดีโดยเฉพาะกับผิวของโลหะบาง ในทุกกรณีผลที่ได้จะค่อนข้างมากกว่าความเป็นจริง เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าว สมมติว่าพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จุด ที่ช่องล่อฟ้าผ่าเกาะอยู่ ใช้ไปในการหลอมเหลว หรือทำให้วัสดุตัวนำระเหยกลายเป็นไอ โดยไม่คำนึงถึงความร้อนที่แพร่เข้าไปในโลหะ แบบจำลองอื่นๆ มีการคำนึงถึงผลของความเสียหายที่จุดที่ช่องล่อฟ้าผ่าเกาะอยู่ ที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของเวลาของอิมพัลส์กระแสด้วย พลังงานที่จุดกำเนิดอาร์ก ให้มีค่าเท่ากับ ผลคูณของแรงดันตกคร่อมอะโนดกับคะโถด $u_{a,c}$ กับประจุ Q ของกระแสฟ้าผ่า

$$W = \int u_{a,c} idt = u_{a,c} \int idt = u_{a,c} \cdot Q \quad (2.4)$$

2.3.2 ผลทางกล

เมื่อมีกระแสไหลในวงจรขนาดของแรงทางไฟฟ้าพลวัต ณ จุดต่างๆในวงจร ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่า และรูปแบบเรขาคณิตของวงจร ผลทางกลที่เกิดจากแรงดังกล่าวนอกจากขึ้นอยู่กับขนาด แล้วยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของกระแส ช่วงเวลาของกระแส และรูปแบบทางเรขาคณิตของการติดตั้ง แรงทางไฟฟ้าพลวัตที่เกิดจากกระแสไหลในตัวนำซึ่งมีส่วนที่ขนานกันยาว l และมีระยะห่างกัน d สามารถคำนวณค่าโดยประมาณโดยใช้สมการที่ (2.5)

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} = 2 \times 10^{-7} i^2(t) \frac{l}{d} \quad (2.5)$$

เมื่อ $F(t)$ = แรงทางไฟฟ้าพลวัตมีหน่วยเป็น N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_0 = ความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของอากาศ $4\pi \times 10^{-7} H/m$

l = ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น m

d = ระยะห่างระหว่างส่วนตัวนำช่วงตรงที่ขนานกัน มีหน่วยเป็น m

2.3.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า สามารถสร้างความเสียหายและอันตรายให้แก่มนุษย์ไม่ว่าโดยตรงหรือทางอ้อม ดังนี้

2.3.3.1 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า EMI (Electromagnetic Interference) [3]

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่า ก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดสปาร์กได้

2.3.3.2 แรงดันสปาร์กด้านข้าง

ถ้ากระแสไฟฟ้า i ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_c จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$\Delta U = R_c i + L \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

2.3.3.3 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือถ้าฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า I วิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ฟ้าผ่าลง เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

สายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลัง ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังโดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าหากตัวนำลงดิน หรือเสาไฟฟ้ามีค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกิน และอาจมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดควาบไฟตามผิวบนพวงลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายสายไฟได้ เรียกว่าเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ (backflashover) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดิน เกิดผิพว่องขึ้นในระบบ อันเป็นผลกระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.4 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้ แรงดันดังกล่าวนี้ อาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนที่เกิดในระบบสายส่งกำลังแรงสูง แต่ก็มีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงงานเพราะอุปกรณ์แรงต่ำ การฉนวนมีค่าต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบลูกกิโลโวลต์ได้ และถ้ายังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ ยิ่งมีความไวต่อแรงดันเกินเป็นอย่างยิ่ง ย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ง่าย

2.3.3.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงสิ่งที่อยู่เด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่น หรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือคนที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ถ้าหากไปยืนเด่นในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรือในเส้นทางผ่านของกระแสฟ้าผ่าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่โคนต้นไม้สูงเด่น หรือต้นไม้เดี่ยวกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงมาตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์กผ่านอากาศเข้าหาคนได้

2.3.3.6 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ นอกเหนือจากถูกฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังอาจได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์

เมื่อมีกระแสไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดนั้นมีระยะห่างเท่ากับช่วงก้าวของคน เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่า แรงดันช่วงก้าว ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.7) [10] ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือ โครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่บรากสายดิน ที่คนมีโอกาสสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{S}{d(d+s)} \right] \quad (2.7)$$

- เมื่อ $V =$ แรงดันช่วงก้ำว (V)
 $I =$ กระแสไฟฟ้า (A)
 $\rho =$ ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ωm)
 $S =$ ระยะก้ำว (m)
 $d =$ ระยะใกล้ที่สุดจากเท้าไปจุดที่ไฟฟ้าลงดิน (m)

2.4 ทฤษฎี และหลักการของสนามไฟฟ้า [3]

2.4.1 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆกันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน สนามไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าเป็นประโยชน์มาก เพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ หรือเครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย

การศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

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

ซึ่งการศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือ สปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ.จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือ น้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่ (2.8)

$$E_{\max} = \frac{U}{d \cdot \eta^*} \quad (2.8)$$

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

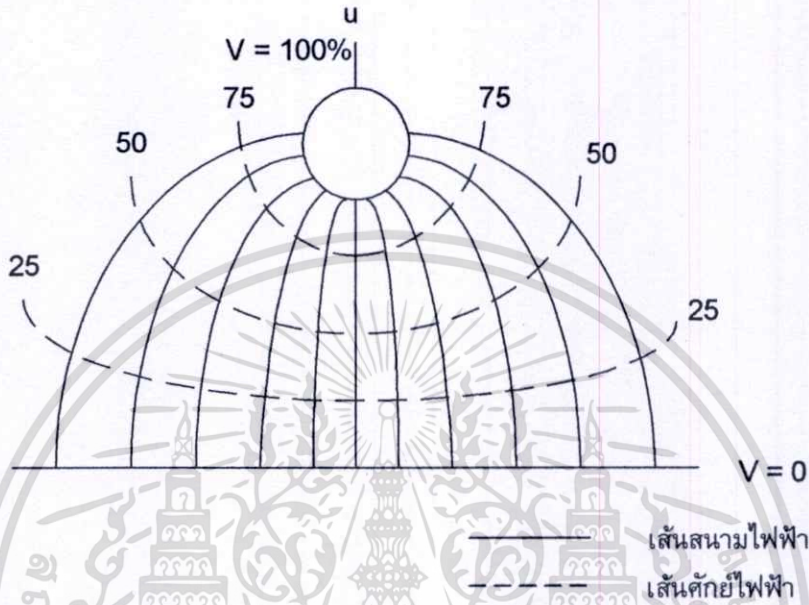
โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ครรชนบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และ โดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ดังสมการที่ (2.9)

สมการที่ (2.9) นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือ ปริติสซาร์จ (Pre-discharge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ (สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะมีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรด และลักษณะสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2.7 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดคิซซาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า คิซซาร์จบางส่วน (Partial discharge)

ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ เป็นช่วงๆจึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเลคโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์เรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) หรือ กระแสดีสชาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (Space Charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ (2.9) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.9) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นเอง

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.10)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage)

โดยที่ E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการที่ (2.10) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเลคโตรด (Free of Space Charge) หรือกล่าวง่ายก็คือ สมการที่ (2.10) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage *, Threshold voltage, Inception Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเลคโตรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่มีอิเลคโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเลคโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.11)$$

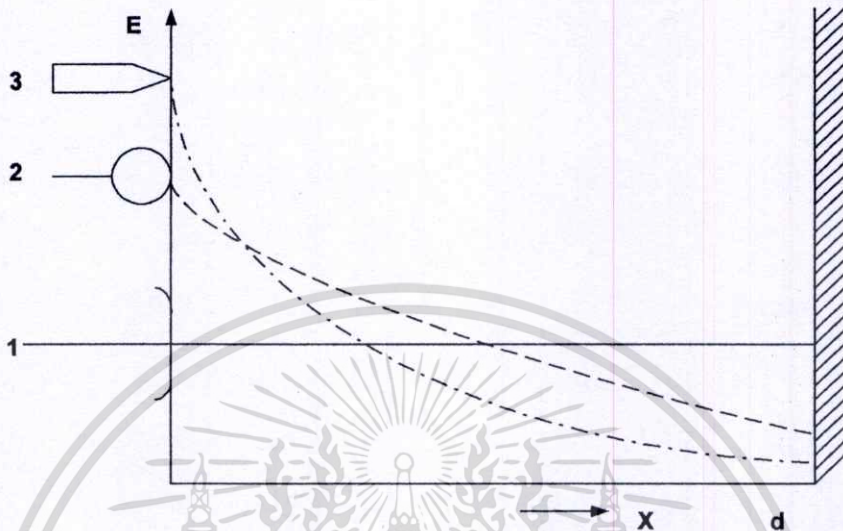
เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเลคโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_0 และ E_i คือ E_0 ถ้าเป็นอิเลคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_0 > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเลคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้นหรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึง

เอกสารค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่นระยะห่างของอิเล็กโทรด, รัศมี ความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลาย ประการ



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

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

2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown mechanisms) [3]

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ คือ การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า เป็นช่วงต่อระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ ช่วงต่อดังกล่าว เกิดขึ้นได้เมื่อแก๊รมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอวาลานซ์มากพอจนทำให้แก๊รมีสภาพนำไฟฟ้าสูง จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทังตัวเองอยู่ได้ กระแสที่เพิ่มขึ้น หมายถึงจำนวนอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออนมีจำนวนมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งในปัจจุบันมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาคประจุถึงค่าวิกฤต หรือกลไกการเบรกดาวน์มีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ

- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์
- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 กลไกเบรกคาวน์ของทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown mechanism)

กลไกเบรกคาวน์ของทาวน์เซนด์ เบรกคาวน์ในก๊าซเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรด กระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดจากไอออนในเซชันกระบวนการขั้นต้น (Primary or α process) และไอออนในเซชันกระบวนการขั้นสอง (Secondary process) ประกอบด้วยไอออนในเซชันโดยไอออนบวกชนโมเลกุลของก๊าซ (β -process) แต่กระบวนการนี้ไม่มีความหมายในการทำให้เกิดเบรกคาวน์ กระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อกลไกเบรกคาวน์ คือ กระบวนการ γ (γ -process) เป็นกระบวนการที่เพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากคะ โดด ซึ่งกระบวนการทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กระบวนการขั้นต้น (α process)

จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์ในแก๊สที่ระยะ X จากคะ โดดตามสมการที่ (2.12)

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (2.12)$$

เมื่อ $N_0 =$ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคะ โดดต่อวินาที

$N_x =$ จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ X จากคะ โดด

จำนวนอิเล็กตรอนวิ่งไปถึงอะ โนด ($x=d$) ต่อวินาที เป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (2.13)$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคะ โดดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha x} - 1$ มีจำนวนเท่ากับจำนวน ไอออนบวกที่เกิดขึ้นและวิ่งมาถึงคะ โดด จะเห็นได้ว่าอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอกซโปเนนเชียล จะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกจากคะ โดดจำนวน N_0 ต่อวินาที ที่ได้จากการส่องรังสีเข้าไปที่คะ โดด เรียกว่าการคิซซาร์จประทังตัวเองไม่ได้ เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกเสีย กระบวนการไอออนในเซชันก็จะหยุด จึงต้องมีกระบวนการขั้นที่สองเสริม ซึ่งสืบเนื่องมาจากกระบวนการขั้นต้น โดยไอออนบวกที่เกิดจากอิเล็กตรอนแยกตัวออกมาจากโมเลกุลที่เป็นกลาง ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิดไอออนในเซชันในก๊าซ เรียกว่า กระบวนการ β ถ้าไอออนบวกชนคะ โดด แล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากคะ โดดได้ เรียกว่ากระบวนการ γ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นสองจึงอธิบายด้วยสัมประสิทธิ์ที่สองของทาวน์เซนด์ คือ β หรือ γ

2) กระบวนการขั้นสองแบบ β

กระบวนการ β เป็นกระบวนการขั้นสอง ที่อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นจากไอออนบวก มีพลังงานสูงวิ่งมาชนโมเลกุล ทำให้เกิดไอออนในเซชันในก๊าซ แต่โดยเหตุที่กระบวนการ β มีโอกาสเกิดอิเล็กตรอนอิสระยาก กระบวนการนี้ จึงไม่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดเบรกคาวน์ในก๊าซได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในก๊าซที่มีความดัน ฉะนั้นกระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อการสร้างอิเล็กตรอน เพื่อทำให้เกิดเบรกคาวน์จึงเป็นแบบ ไอออนบวกวิ่งชนคะ โดด (γ)

3) กระบวนการขึ้นสองแบบ γ (γ -process)

กระบวนการนี้เป็นการทำให้เกิดการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนอิสระ ที่เกิดจากไอออนบวกวิ่งชนคะ โดด

ถ้าให้ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคะ โดดต่อวินาที

N'_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากกระบวนการขึ้นที่สองต่อวินาทีที่คะ โดด

N''_0 = จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากคะ โดดต่อวินาที

ฉะนั้น

$$N''_0 = N'_0 + N_0 \quad (2.14)$$

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคะ โดดจะชนไอออนในเซชันเท่ากับ $e^{ad} - 1$ ครั้ง จำนวนครั้งของการชนไอออนในเซชันในแถบทั้งหมดจะเป็น

$$N'_0 = N''_0(e^{ad} - 1) \quad (2.15)$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นสองออกจากคะ โดดเป็น

$$N'_0 = \gamma N''_0(e^{ad} - 1) \quad (2.16)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออนในเซชันที่สองของทาวน์เซนต์

ดังนั้น

$$N''_0 = N_0 + \gamma N''_0(e^{ad} - 1)$$

$$N''_0 = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (2.17)$$

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะ โนดจึงเป็น

$$N_d = N''_0 e^{ad}$$

$$N_d = \frac{N_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (2.18)$$

ได้สมการของกระแสไฟฟ้าเป็น

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

2.5.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

กลไกการเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (Formative time) ที่ทำให้เกิดคิสซาร์จประทังตัวเองอยู่ได้ในก๊าซที่มีความดัน เช่น ในบรรยากาศ

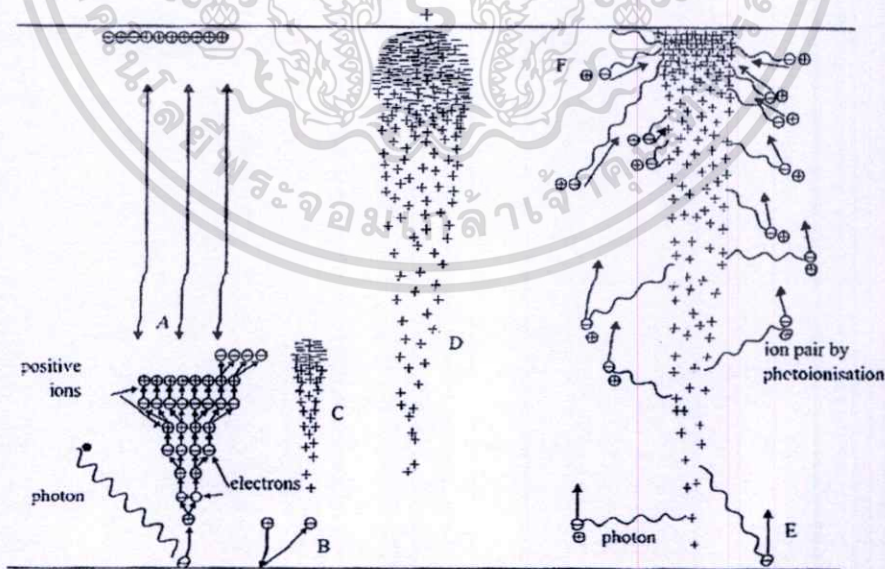
หรือมากกว่า การเกิดเบรกดาวน์ในช่องแคบกว้างๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ

ฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped Time, T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงคะ โดคเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาวน์เซนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนโดยการชนแตกตัว(กระบวนการ α) แล้วปล่อยให้อิเล็กตรอนออกจากคะ โดค(กระบวนการ γ) จะพบว่าเวลามากกว่าเวลาเคลื่อนที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากคะ โดคข้ามช่องแคบไปยังอะ โนคโดยไม่ชนกับ โมเลกุลเลย ก็ใช้เวลานานกว่าช่วงเวลาที่เคลื่อนที่ที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้างที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเคมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้นและอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออไนเซชันขึ้นได้

จากรูปที่ 2.8 [4] เป็นกลไกการเกิดสตรีมเมอร์ เป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการวิ่งชนไอออไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์ เกิดอะวาลานซ์ขึ้น อะวาลานซ์เริ่มต้นจะมีการไอออไนเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังโฟตอน ที่เรียกว่าโฟโตไอออไนเซชันของก๊าซโมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานซ์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้า เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอกประจุค้าง การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น หมอกประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพหน้าไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอะ โนคกับคะ โดค และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้ เรียกว่า เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์



รูปที่ 2.8 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระตามกระบวนการเกิดสตรีมเมอร์

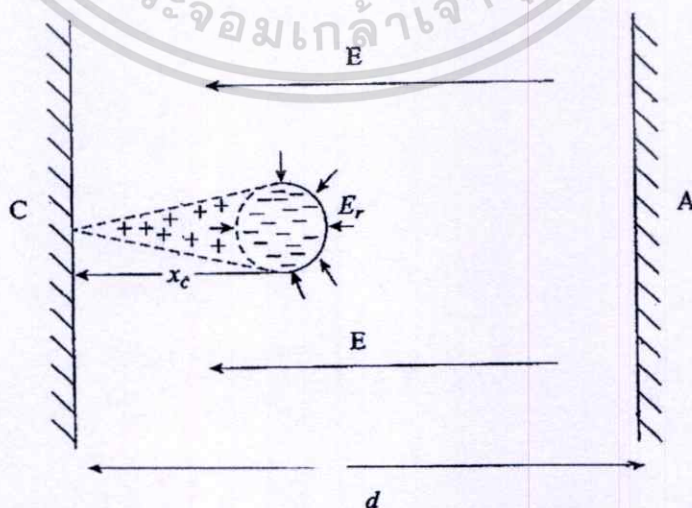
เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกควาน์กำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนแปลงสถานภาพ จากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ โดย Meek และ Loeb ได้เสนอเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุค้างไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณ เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าป้อนจากภายนอก ส่วน Rather เสนอเงื่อนไขการเบรกควาน์ กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน และกำหนดว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มี จำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนไนเซชัน $e^{\alpha x}$ ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

2.5.3 การเบรกควาน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การพิจารณาในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ระยะแยก d สตรีมเมอร์เริ่มเกิด เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่หัวอะวาลานซ์มีค่าใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าที่ป้อนจาก เงื่อนไขจึงสามารถหาจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤตเท่ากับ x_c ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 [4] ดังนั้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอการเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ เมื่อ $x_c = d$ ตาม เงื่อนไขเบรกควาน์ของทาวน์เซนด์ คือ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ และเงื่อนไขของ Rather และ Meek สำหรับสตรีมเมอร์เบรกควาน์ คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤตเท่ากับ N_c ดังสมการที่ (2.19)

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = \ln N_c = K \quad (2.19)$$

โดยค่าของ N_c จะต้องเท่ากับ 10^8 ฉะนั้น K มีค่าเท่ากับ 18 และความเครียดสนามไฟฟ้า ต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดสตรีมเมอร์



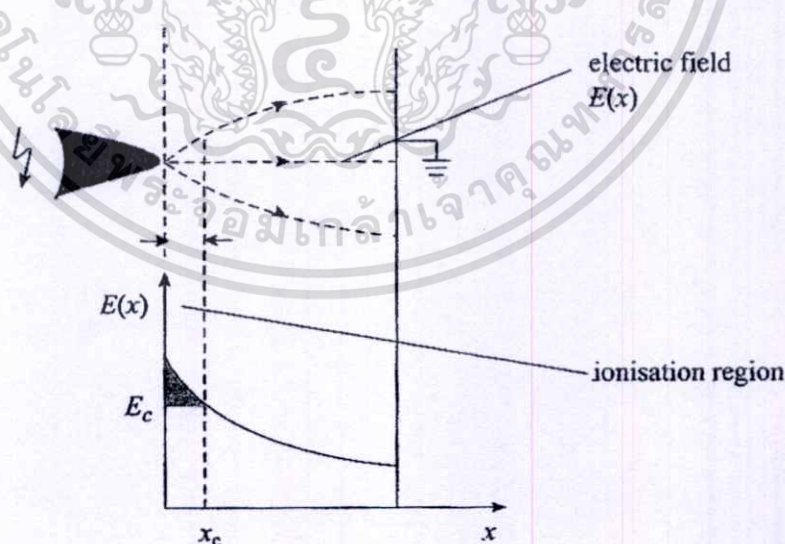
ส่วนการเบรกดาวนของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ซึ่งจากสมการ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ โดยที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเท่ากับหนึ่ง ($\eta^* = 1$) ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนหาได้จาก $U_b = E_b \cdot d$

2.5.4 การเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [3]

การเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20) คำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนของก๊าซได้ ถ้าทราบสนามไฟฟ้ากระจาย $E(x)$ ของแก๊ป การอินทิเกรตจะทำไปตามแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุด เนื่องจาก α มีค่าขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha = f[E(x)]$ ดังนั้นขอบเขตการอินทิเกรตจะเท่ากับความยาวของเส้นสนามไฟฟ้าที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโตรด หรือเท่ากับระยะของอะวาลานซ์วิกฤต X_c และแทนค่า α อยู่ในฟังก์ชันของ $E(x)$ และความดันก๊าซ p ดังสมการที่ (2.20)

$$\int_0^{x_c} \alpha[E(x), p] dx = K \quad (2.20)$$

โดยจุดเริ่มต้นการอินทิเกรตจะเริ่มจากจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} ซึ่งเป็นบริเวณที่ผิวของอิเล็กโตรด จุดปลายการอินทิเกรตคือ $\alpha = 0$ ซึ่งเป็นจุดที่ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ดังรูปที่ 2.10 [4]



รูปที่ 2.10 ระยะอะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ส่วนการเบรกดาวนในอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ สามารถหาได้จากสมการที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (2.20) เมื่อทราบการกระจายของสนามไฟฟ้า คือ $E(x)$ หรือหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการคือ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ เมื่อทราบรูปลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ก็จะทราบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (η^*) ได้

2.5.5 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ [3]

การเกิดไอออไนเซชัน โดยอิเล็กตรอนวิงชนโมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุล ซึ่งเป็นกระบวนการ α หรือกระบวนการเบื้องต้นนับเป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณ แต่กระบวนการเบื้องต้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ ต้องมีกระบวนการอื่นเสริมจำนวนอิเล็กตรอนรวมอยู่ด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ นำไปสู่การเบรกดาวน์ กลไกการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสนามไฟฟ้าที่ผิวของโลหะ

2.5.6 การเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ [3]

ในกรณีของการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ แตกต่างกับแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับความถี่พลังงาน คือค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว ฉะนั้นแรงดันเบรกดาวน์จะเป็นไปตามเงื่อนไขการเบรกดาวน์ และช่องแคบ d ในกรณีป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาดแรงดันจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น ทำให้สนามไฟฟ้าจะคงมีอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัว ควรจะเกิดเบรกดาวน์ได้ แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรกดาวน์จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะหนึ่ง เบรกดาวน์จึงเกิดขึ้น ช่วงเวลานับตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวแล้ว ไปจนถึงเวลาเบรกดาวน์เกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ เวลาที่ช้ากว่านี้เรียกว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์

2.6 แฟกเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ [3]

2.6.1 ผลของชั่วแรงแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูง ที่ความดันก๊าซมากกว่าความดันวิกฤต แรงดันเริ่มต้นชั่วลบบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) จะมีค่าต่ำกว่าชั่วบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเกิดเบรกดาวน์ได้นั้น จะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ ตามกระบวนการของการเกิดเบรกดาวน์ เช่น แก๊สของอิเล็กโตรดแท่งกับแผ่นระนาบ ถ้ากรณีแท่งเป็นชั่วลบ อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายแท่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ดังรูปที่ 2.10 มีโอกาสเกิดไอออไนเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวาลานซ์วิกฤตของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้าแท่งเป็นชั่วบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้น จะต้องเริ่มในแก๊สที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดแท่งไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต X_c เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต $N_c = 10^8$ ได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ X_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎี

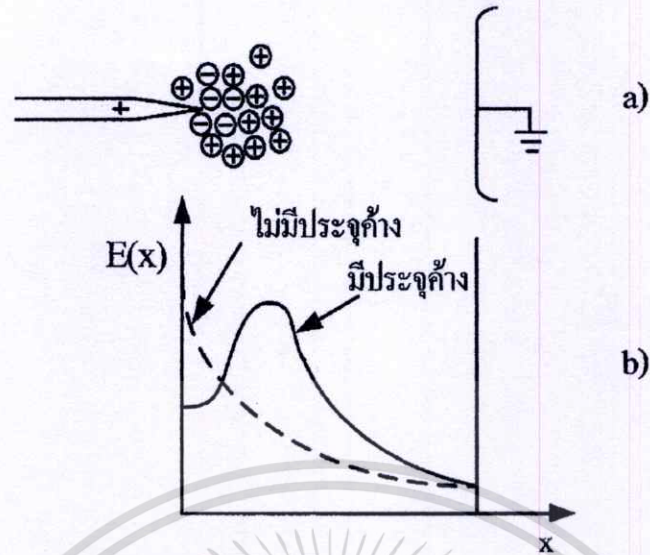
สตริมเมอร์ แต่ที่ระยะ X_c จากปลายแท่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออนในเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยาก หรือเป็นไปได้ ถ้าจะให้เกิดไอออนในเซชันที่ระยะ X_c ได้ บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ก็หมายความว่าถ้าจะให้เกิดการเบรกคาวน์ได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น จึงทำให้แรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของขั้วลบ จึงต่ำกว่าของขั้วบวก แต่ถ้าเบรกคาวน์เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรกคาวน์แบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต ผลของโคโรนาทำให้เกิดประจุค้าง ค่าแรงดันเบรกคาวน์ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก

2.6.2 ผลของประจุค้าง

ประจุค้างเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง เป็นผลให้แรงดันเบรกคาวน์ มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ผลประจุค้างทำให้แรงดันเบรกคาวน์ขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน แต่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย จะเกิดเบรกคาวน์โดยตรงแรงดันเบรกคาวน์ของขั้วลบจะต่ำกว่าของขั้วบวกเสมอ แต่ผลประจุค้างทำให้แรงดันเบรกคาวน์ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC AC และอิมพัลส์) ซึ่งสามารถอธิบายผลของประจุค้างโดยแรงดันขั้วบวกและขั้วลบดังนี้

1) ปลายแหลมขั้วบวก

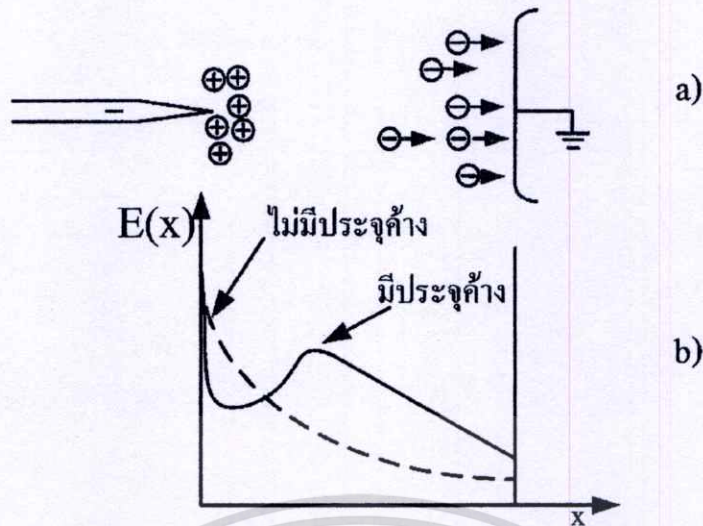
ที่ปลายแหลมขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบ ดังรูปที่ 2.11 a) และ b) เมื่อป้อนแรงดันสูงถึงค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ก๊าซในปริมาตรของแก๊สจะเกิดไอออนในเซชันรอบๆปลายแหลม อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาอะโนด คือปลายแหลม และรวมตัวเป็นกลาง ปลดปล่อยไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าค้างอวกอยู่หน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดน้อยลง แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าทิศทางเข้าหาอะโนด คือแผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.11 b) ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนหนึ่งว่าทำให้อิเล็กโตรดยาวขึ้น เมื่อระยะแก๊สสั้นลงและเวลาเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าแก๊สเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดเบรกคาวน์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ประจุค้างทำให้แรงดันเบรกคาวน์ขั้วบวกต่ำลง



รูปที่ 2.11 ผลประจุค้ำของปลายแหลมขั้วบวก

2) ปลายแหลมขั้วลบ

อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนไนเซชันเคลื่อนที่ไปหาระนาบอะโนด ดังรูปที่ 2.12 a) และ b) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจเกาะตัวบนโมเลกุลได้และรวมตัวเป็นกลางที่อะโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาคะโถบปลายแหลม จะค้ำอยู่บริเวณหน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.12 (b) แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค้ำกับอะโนด กลับสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากประจุค้ำ จึงทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ยากขึ้น ฉะนั้นผลของประจุค้ำจะทำให้แรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบมีค่าสูงขึ้น ผลประจุค้ำขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ย้อนแรงดันคงอยู่ ฉะนั้นแรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบกระแสตรง (DC) และอิมพัลส์ จะสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วบวก ส่วนในกรณีของแรงดันกระแสสลับ ความถี่ต่ำนั้น ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะสูงกว่าแบบสวิตซ์ขั้วบวกเล็กน้อย เพราะว่าขั้วของสนามไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดแห่งจะกลับไปกลับมาอยู่ตลอดเวลา คือผลของประจุค้ำมีทั้งขั้วลบและขั้วบวก ซึ่งผลประจุค้ำ อิเล็กโทรดขั้วบวก ทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ง่าย ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลาสั้นมาก จะไม่มีผลของประจุค้ำ หรือมีแต่น้อย



รูปที่ 2.12 ผลประจุค้างของปลายแหลมข้าวตลบ

2.6.3 ผลของอุณหภูมิ [11]

เมื่อค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันเบรกควานต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงๆจะทำให้ไออิเล็กตรอนแตกตัวเร็วขึ้น ทำให้เกิดไอออไนเซชันได้เร็วตามทำให้ใช้แรงดันในการเกิดเบรกควานต่ำ และเมื่ออุณหภูมิต่ำๆ จะทำให้การแตกตัวอิเล็กตรอนช้าลง จึงทำให้แรงดันเบรกควานมากขึ้น

2.6.4 ผลของลักษณะอิเล็กโตรด

ลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปลักษณะอิเล็กโตรดนั้นมีผลต่อแรงดันเบรกควาน ซึ่งกำหนดด้วยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่าแรงดันเริ่มต้น ก็คือ ค่าแรงดันเบรกควานนั่นเอง เมื่ออะวาลานซ์วิกฤตได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรกควานทันที โดยไม่มีไลโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกควาน ส่วนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกควานอย่างเห็นได้ชัดเจน

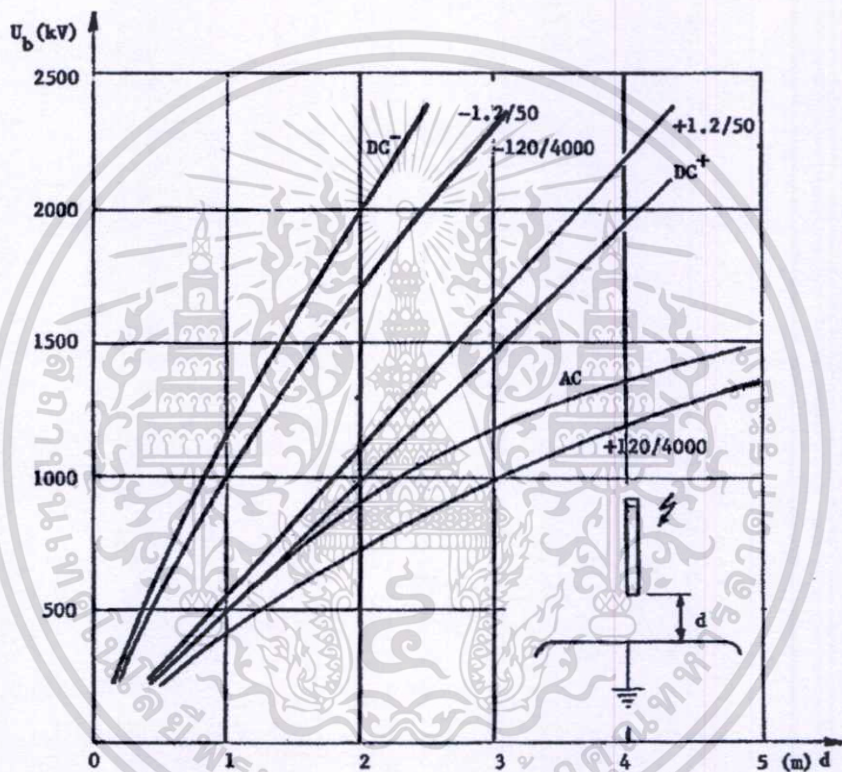
2.6.5 ผลของความชื้นในอากาศ

ในอากาศมีโมเลกุล H_2O มีลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆ เนื่องจากมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศที่มีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้น ทรายเท่าที่ความชื้นยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดดีสชาร์จก่อน ความชื้นมีผลต่อค่าแรงดันเบรกควาน และมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสดรง ถ้าแรงดันมีช่วงเวลาน้อย อย่างเช่นแรงดันอิมพัลส์ความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกควานน้อย

2.6.6 ผลของรูปคลื่นแรงดัน

รูปแบบหรือรูปคลื่นแรงดัน เป็นแฟกเตอร์สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อแรงดันเบรกควานในก๊าซหรืออากาศ ดังรูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกควานในอากาศ กับไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

ระยะแกปในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ด้วยรูปแบบแรงดันที่แตกต่างกัน ผลที่ได้คือ แรงดันแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งชั่ววอกมีค่าเบรกดาวน์ต่ำสุด แรงดันกระแสตรงชั่ววอก มีค่าเบรกดาวน์สูงสุด และสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ทั้งแบบฟ้าผ่าและสวิตชิ่งชั่ววอกเล็กน้อย ดังนั้นความคงทนของอากาศต่อแรงดันชั่ววอกทุกรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แรงดันชั่ววอกอิมพัลส์ฟ้าผ่าและกระแสตรง จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นโดยตรงกับระยะแกป แบบอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกสูงกว่าแบบแรงดันกระแสตรงชั่ววอกเล็กน้อย แต่ชั่ววอกทั้งแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 และแรงดันกระแสตรงชั่ววอกมีค่าเบรกดาวน์ต่ำกว่าชั่ววอก และสูงกว่าแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งชั่ววอก



รูปที่ 2.13 แรงดันเบรกดาวน์ U_b ของอิเล็กโตรดแท่งกับระนาบในอากาศในเทอมของระยะแกป d เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน IEC (760 Torr, 20 °C , 11 gmH₂O/m³) [3]

2.7 มาตรการป้องกันฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าสามารถสร้างความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง ผู้อยู่อาศัยและสิ่งของทีู่่ภายในรวมทั้งระบบภายในล้มเหลว ซึ่งมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า IEC 62305-1 [8] ได้กำหนดจุดฟ้าผ่าไว้ 2 ลักษณะ คือ ฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างหรือใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง และฟ้าผ่าลงระบบสาธารณูปโภคหรือใกล้กับระบบสาธารณูปโภค ซึ่งสามารถสรุปความเสียหายได้ดังนี้

1) ความเสียหายพื้นฐานต่อสิ่งปลูกสร้าง มี 3 ชนิด

- ทำให้สิ่งมีชีวิตได้รับบาดเจ็บหรือเสียชีวิตเนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว
- ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพ เช่น ความเสียหายทางกล เกิดไฟไหม้ ระเบิด เนื่องจาก

ผลของกระแสฟ้าผ่า

- ความล้มเหลวของระบบภายในเนื่องจากแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า (LEMP)

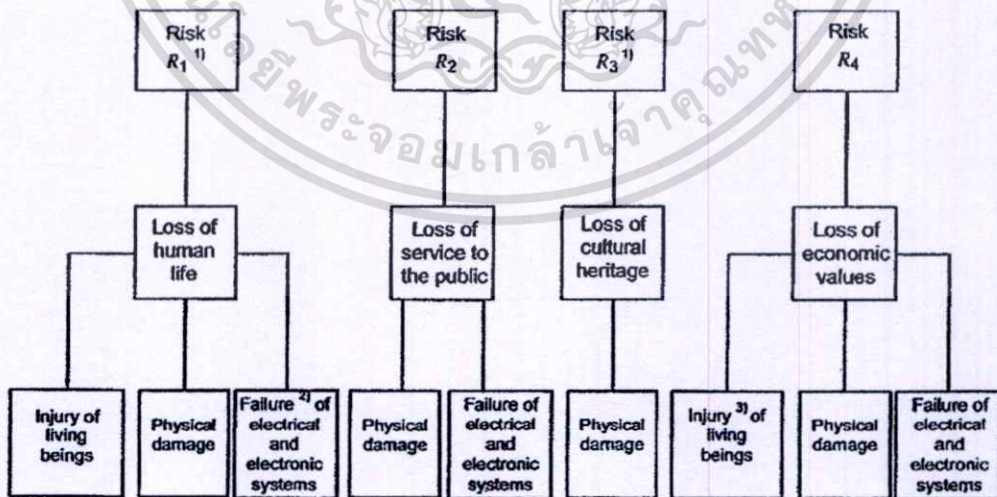
2) ความเสียหายพื้นฐานต่อระบบสาธารณูปโภค

- ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพ เช่น ความเสียหายทางกล เกิดไฟไหม้ ระเบิด เนื่องจากผลของกระแสฟ้าผ่า

- ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากแรงดันเกิน

2.7.1 ชนิดของความเสี่ยงที่เกิดจากฟ้าผ่า

เนื่องจากมาตรฐานได้กำหนดความเสี่ยง ซึ่งสามารถทำให้เกิดความสูญเสียและเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14



IEC 2061/05

รูปที่ 2.14 ชนิดความสูญเสีย และความเสียหายที่เกิดจากความเสี่ยงชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) สำหรับสิ่งปลูกสร้างเท่านั้น
- 2) สำหรับโรงพยาบาลหรือสิ่งปลูกสร้างอื่น เท่านั้น ซึ่งความล้มเหลวของระบบภายในที่ทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ทันที
- 3) สำหรับสิ่งปลูกสร้างที่อาจเกิดอันตรายต่อชีวิตสัตว์เท่านั้น

2.7.2 ความจำเป็นของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ความจำเป็นในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งที่จะป้องกัน เพื่อลดมูลค่าของความสูญเสีย ซึ่งต้องพิจารณาถึงความสูญเสียดังนี้

L1 = ความสูญเสียของชีวิตมนุษย์

L2 = ความสูญเสียการบริการต่อสาธารณะ

L3 = ความสูญเสียมรดกทางวัฒนธรรม

L4 = ความสูญเสียมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินความจำเป็นต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่า นั้น ต้องทำการประเมินความเสี่ยงตามมาตรฐาน IEC 62305-2 [12] หากความเสี่ยงโดยพิจารณาให้สอดคล้องกับความสูญเสียข้างต้น ซึ่งความเสี่ยงที่ต้องพิจารณามีด้วยกัน 4 แบบ ดังนี้

R1 = ความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตมนุษย์

R2 = ความเสี่ยงต่อการสูญเสียบริการต่อสาธารณะ

R3 = ความเสี่ยงต่อการสูญเสียมรดกทางวัฒนธรรม

R4 = ความเสี่ยงทางด้านเศรษฐศาสตร์

ถ้าความเสี่ยง R(R1 ถึง R3) มีค่าสูงกว่าระดับที่ผ่อนปรนได้ R_T ต้องมีการป้องกันฟ้าผ่า

$$R > R_T$$

ในกรณีนี้ต้องนำมาตรการต่างๆ ในการป้องกันฟ้าผ่ามาใช้เพื่อลดความเสี่ยง R(R1 ถึง R3) ให้ลดลงมาต่ำกว่าหรือเท่ากับระดับที่ผ่อนปรนได้ R_T

$$R \leq R_T$$

2.7.3 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบป้องกันฟ้าผ่า [13]

นอกจากความจำเป็นในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า อาจจะต้องประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ติดตั้งมีความคุ้มค่าหรือไม่ ในการลดความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ L4 ดังนั้นความเสี่ยงของความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ควรจะถูกประเมิน ในกรณีต้องมีการประเมินความเสี่ยง R4 ของความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ การประเมินความเสี่ยงดังกล่าว ทำให้ทราบมูลค่าความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ทั้งกรณีติดตั้งระบบป้องกันและไม่ติดตั้งระบบป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกันฟ้าผ่ามีความคุ้มค่าถ้าผลรวมของมูลค่า C_{RL} ของความสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ตั้งระบบป้องกัน กับมูลค่า C_{PM} ในการติดตั้งระบบป้องกันมีค่าต่ำกว่ามูลค่า C_L ของความสูญเสียทั้งหมดเมื่อ ไม่มีการติดตั้งระบบป้องกัน

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

2.7.4 การเลือกระดับการป้องกันสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า [13]

การเลือกระดับการป้องกัน เพื่อลดความเสี่ยงต่อความเสียหายเนื่องจากวาทฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้างกับบริเวณที่ป้องกัน

ความเสี่ยงต่อความเสียหายของแต่ละสิ่งปลูกสร้างสามารถประมาณได้จาก

- ความถี่ของการเกิดวาทฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้างต่อปี (N_d)
- ความน่าจะเป็นที่ฟ้าผ่าทำความเสียหาย
- ปริมาณความเสียหายเฉลี่ยที่เป็นไปได้

ความเสียหายขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น การใช้ประโยชน์และสิ่งที่อยู่ภายใน (มนุษย์และทรัพย์สิน) ของบริเวณป้องกัน วัสดุก่อสร้างและมาตรการที่ใช้ในการลดผลที่ตามมาของฟ้าผ่าโดยขึ้นอยู่กับสิ่งปลูกสร้างว่าเป็นประเภทไหน เมื่อได้เลือกระดับความเสี่ยงต่อความเสียหายสูงสุดที่ทนได้ ก็สามารถคำนวณหาความถี่ของการเกิดวาทฟ้าผ่าต่อปีที่ยอมรับได้ (N_c) ดังนั้นการเลือกระดับการป้องกันที่เพียงพอสำหรับการป้องกันฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับความถี่ของการเกิดวาทฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกัน (N_d) และความถี่ของการเกิดวาทฟ้าผ่าต่อปีที่ยอมรับได้

2.7.4.1 ความถี่ของการเกิดวาทฟ้าผ่าที่ยอมรับได้ (N_c) กับสิ่งปลูกสร้าง [14]

ค่าของ N_c ถูกประเมินโดยการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อความเสียหาย โดยขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์หลายประการเช่น

- ชนิดของโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้าง
- ส่วนประกอบของ โครงสร้างของสิ่งปลูกสร้าง
- ผู้อาศัยในบริเวณสิ่งปลูกสร้าง
- ผลที่ตามมาหลังจากเกิดฟ้าผ่า

โดยแฟกเตอร์ที่กล่าวมานั้นสามารถใช้แทนเป็นสัมประสิทธิ์ $C_2 - C_5$ และสามารถประเมินได้ตามตาราง ของมาตรฐาน NFC 17-102 โดยนำค่าต่างๆมาคำนวณ ดังสมการที่ (2.21)

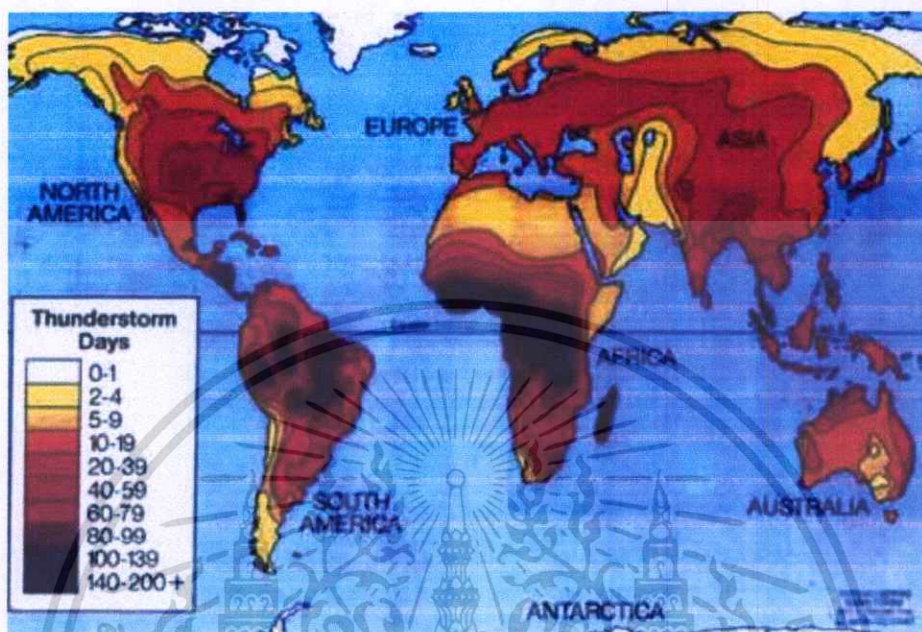
$$N_c = 5.5 \times 10^{-3} / C \quad (2.21)$$

$$\text{เมื่อ } C = C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

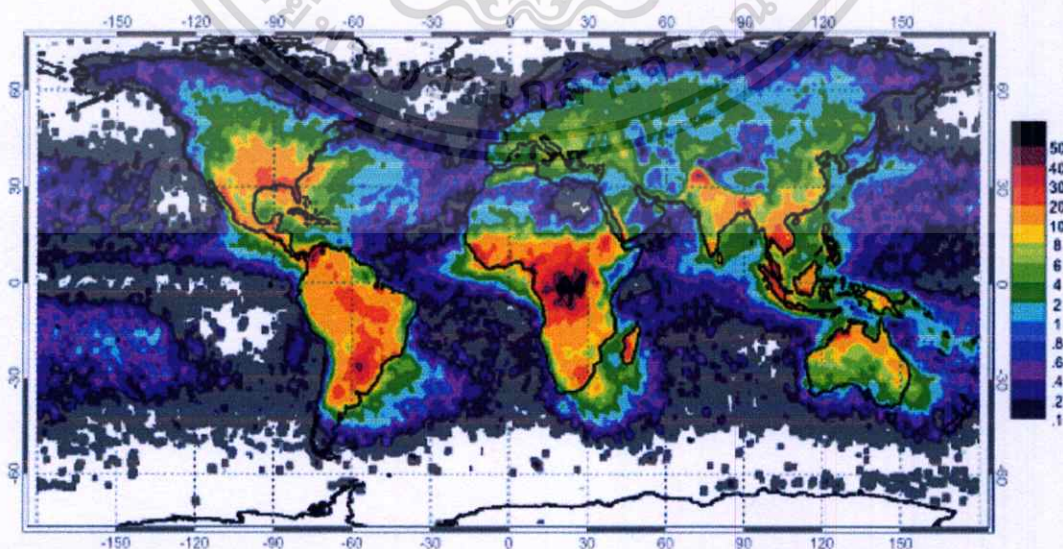
2.7.4.2 ความหนาแน่นวบบฟ้าผ่าลงดิน (N_g) [15]

ความหนาแน่นของวบบฟ้าผ่าลงดินเฉลี่ย N_g ขึ้นอยู่กับจำนวนของวันพายุฝนฟ้าคะนองต่อปี (T_d) ซึ่งอาจหาได้จากแผนที่ที่แสดงจำนวนวันพายุฝนฟ้าคะนอง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนที่โลกบอกจำนวนวันเฉลี่ยพายุฝนฟ้าคะนองต่อปี [15]

โดยค่าของความหนาแน่นฟ้าผ่าลงดิน N_g สามารถพิจารณาได้ 2 วิธี คือ พิจารณาจากแผนที่ซึ่งถูกกำหนดมาโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 และอีกวิธีหนึ่งโดยการใช้สมการที่ (2.22) [14] ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของจำนวนวันพายุฝนฟ้าคะนองต่อปี (T_d)



เอกสารรูปที่ 2.16 แผนที่โลกบอกจำนวนความหนาแน่นวบบฟ้าผ่าลงดิน (ครั้ง/ตารางกิโลเมตร/ปี) [16] การคำนวณว่ากรณีใดข้างต้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหนาแน่นวาบฟ้าผ่าลงดิน (N_g)

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25} \quad (2.22)$$

2.7.4.3 ความถี่ที่คาดหมายของการเกิดวาบฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้าง (N_d) [15]

ความถี่เฉลี่ยต่อปีของวาบฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.23)

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6} \quad (2.23)$$

เมื่อ N_g = ความหนาแน่นวาบฟ้าผ่าลงดินเฉลี่ยต่อปี (ครั้ง/ตารางกิโลเมตร/ปี)

A_e = พื้นที่รับฟ้าผ่าสมมูลของสิ่งปลูกสร้าง (ตารางเมตร)

C_1 = สัมประสิทธิ์ตั้งแควค้อม

การคำนวณค่าของพื้นที่รับฟ้าผ่าสมมูลของสิ่งปลูกสร้างขึ้นอยู่กับความยาว(L) ความกว้าง (W) และความสูง(H) ของสิ่งปลูกสร้าง ถ้าเป็นโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างเป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ไม่ซับซ้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24)

$$A_e = L \cdot W + 6 \cdot H \cdot (L + W) + 9 \cdot \pi \cdot H^2 \quad (2.24)$$

แต่ถ้าโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างมีรูปทรงที่ซับซ้อนคือมีส่วนยื่นออกมาจากโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.25)

$$A_e = 9 \cdot \pi \cdot (H_p)^2 \quad (2.25)$$

เมื่อ H_p = ความสูงของสิ่งปลูกสร้างรวมกับความสูงส่วนที่อื่นออกมา (เมตร)

วิธีการเลือกระดับการป้องกันฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับ การนำข้อมูลที่ได้ จากการความถี่ของการเกิดวาบฟ้าผ่าที่ยอมรับได้ (N_c) เปรียบเทียบกับความถี่ที่คาดหมายของการเกิดวาบฟ้าผ่าโดยตรงกับสิ่งปลูกสร้าง (N_d) ผลของการเปรียบเทียบจะถูกใช้ในการตัดสินใจว่าจะติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าหรือไม่ และถ้าจำเป็น ควรเป็นประเภทใด

ถ้า $N_d \leq N_c$ ไม่จำเป็นต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่า

ถ้า $N_d > N_c$ ควรมีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่มีประสิทธิภาพ

และประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าสามารถหาได้จาก $E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d}$ เมื่อได้

ประสิทธิภาพก็นำไปเลือกระดับการป้องกันได้ จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าตามระดับการป้องกัน

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า	ประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่า
1	$E > 0.98$
2	$0.95 < E \leq 0.98$
3	$0.80 < E \leq 0.95$
4	$0 < E \leq 0.80$

แต่ถ้าประสิทธิภาพที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 2.3 ให้เลือกระดับการป้องกันที่ระดับที่มีอยู่ แต่ต้องมีการป้องกันอย่างอื่นเพิ่มเติม เช่น

- มาตรการเพื่อจำกัดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว
- มาตรการจำกัดการรุกรานของไฟไหม้
- มาตรการลดผลกระทบของแรงดันเกินเนื่องจากไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่า

ต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อแรงดันเกิน

2.8 มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า

การออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ ระบบการป้องกันฟ้าผ่าภายนอก และระบบป้องกันฟ้าผ่าภายใน ซึ่งระบบป้องกันภายในนี้จะเป็นการป้องกันอันตรายและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์และทรัพย์สินภายในอาคาร โดยจะมีอุปกรณ์ในการจำกัดแรงดันเสิร์จเกิน (SPD) เป็นอุปกรณ์ป้องกันหลัก

2.8.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

2.8.1.1 ระบบตัวนำล่อฟ้า (Air termination systems)

เป็นอุปกรณ์ที่มีวัตถุประสงค์ในการรับล่อฟ้าผ่าเพื่อยับยั้งมิให้ล่อฟ้าผ่า ฝ่าลงในบริเวณหรืออุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน [17] ระบบล่อฟ้าอาจประกอบด้วยร่วมกันของสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) แท่งตัวนำล่อฟ้า (ROD)
- 2) สายตัวนำจึง (Catenary wires)
- 3) ตัวนำแบบตาข่าย (Meshed conductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้า [17]

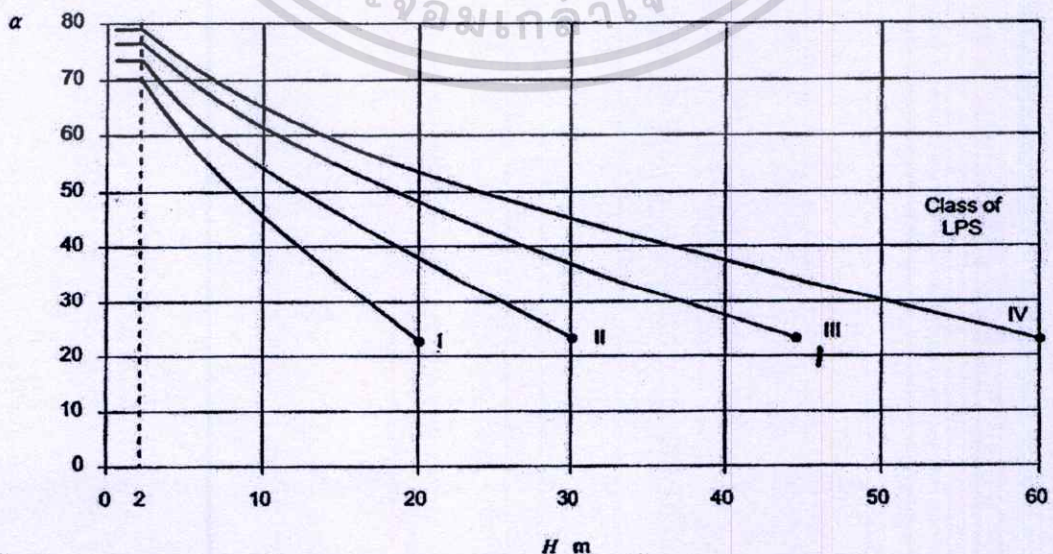
ส่วนประกอบของตัวนำล่อฟ้าที่ได้ติดตั้งบนโครงสร้างควรจะวางใกล้กับมุม ขอบ หรือ บริเวณที่เปิดโล่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่อยู่บนสุดของโครงสร้าง อาจประกอบด้วยหนึ่งวิธีหรือมากกว่า วิธีที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของระบบตัวนำล่อฟ้าประกอบด้วย

- 1) วิธีมุมป้องกัน
- 2) วิธีทรงกลมกลิ้ง
- 3) วิธีค้ำขาย

วิธีทรงกลมกลิ้งเหมาะสำหรับทุกกรณี[9] ส่วนวิธีมุมป้องกันเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่เป็นแบบง่ายไม่ซับซ้อน และวิธีค้ำขายเหมาะสมกับการป้องกันสถานที่ พื้นผิวเป็นระนาบ ส่วนตำแหน่งในการจัดวางตัวนำล่อฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 62305-3 ได้กำหนดตำแหน่งตามระดับการป้องกัน ดังตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.17

ตารางที่ 2.4 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน

ระดับการป้องกัน	วิธีป้องกัน		
	รัศมีทรงกลมกลิ้ง(m)	ขนาดค้ำขาย (m)	มุมป้องกัน α°
I	20	5X5	ดูกราฟรูปที่ 2.16
II	30	10X10	
III	45	15X15	
IV	60	20X20	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.17 มุมป้องกันที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวนำล่อฟ้ากับระดับการป้องกัน [18]
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุและขนาดของตัวนำล่อฟ้า [18]

วัสดุและขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบป้องกันฟ้าผ่าควรเลือกใช้ให้ถูกต้อง เพื่อมิให้เกิดการกัดกร่อน และเกิดความเสียหายกับระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งวัสดุที่เกิดการผุกร่อนอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าลดลง มาตรฐาน IEC 62305-3 ได้กำหนดวัสดุและขนาดของตัวนำล่อฟ้าและตัวนำลงดิน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 วัสดุและขนาดต่ำสุดของตัวนำล่อฟ้า และตัวนำลงดิน

Material	Configuration	Minimum cross-sectional area mm ²	Comments ¹⁾
Copper	Solid tape	50	2mm.Thickness
	Stranded	50	1.7mm. diameter of each strand
	Solid round	200	16 mm.diameter
Tin plated copper ²⁾	Solid tape	50	2mm.Thickness
	Stranded	50	1.7mm. diameter of each strand
	Solid round	50	8 mm.diameter
Aluminium	Solid tape	70	3mm.Thickness
	Stranded	50	1.7mm. diameter of each strand
	Solid round	50	8 mm.diameter
Aluminium alloy	Solid tape	50	2.5mm.Thickness
	Stranded	50	1.7mm. diameter of each strand
	Solid round	200	16 mm.diameter
Hot-dipped galvanized steel ³⁾	Solid tape	50	2.5mm.Thickness
	Stranded	50	1.7mm. diameter of each strand
	Solid round	200	16 mm.diameter
Stainless steel	Solid tape	50	2mm.Thickness
	Stranded	70	1.7mm. diameter of each strand
	Solid round	200	16 mm.diameter

1) Thickness, width and diameter are defined at $\pm 10\%$

2) The coating should be smooth, continuous and free from flux stains with a minimum thickness coating of 50 μm

3) Hot dipped or electroplated minimum thickness coating of 1 μm

2.8.1.2 ระบบตัวนำลงดิน [18]

เพื่อเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากกระแสที่ไหลในระบบป้องกันฟ้าผ่า ตัวนำลงดินควรจะถูกจัดเตรียมจากจุดที่ฟ้าผ่าลงถึงดิน ดังนี้

- 1) มีทางที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลขนานกันหลายชุด
- 2) ความยาวของระบบตัวนำลงดินที่มีกระแสไฟฟ้าไหลควรติดตั้งให้สั้นที่สุด
- 3) ควรทำการประสานให้สัณฐานเท่ากันในทุกๆจุดที่จำเป็น

ถ้าระบบตัวนำล่อฟ้าประกอบด้วยแท่งตัวนำล่อฟ้า 1 ชุด ต้องมีตัวนำลงดินอย่างน้อย 1 ชุด ถ้าระบบตัวนำล่อฟ้าประกอบด้วยแท่งตัวนำหลายชุดแยกอิสระ ต้องมีตัวนำลงดินอย่างน้อย 1 ชุด ต่อแท่งตัวนำล่อฟ้า 1 ชุด ถ้าระบบตัวนำล่อฟ้าประกอบเป็นโครงข่ายตัวนำ ต้องมีตัวนำลงดินอย่างน้อย 2 ชุด กระจายรอบเส้นรอบวงสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการป้องกัน ระยะระหว่างตัวนำลงดินแต่ละชุด ต้องมีระยะเท่ากันตามเส้นรอบวงสิ่งปลูกสร้าง และตัวนำลงดินควรอยู่ใกล้มุมสิ่งปลูกสร้างให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งระยะระหว่างตัวนำลงดินที่กล่าวมานี้ขึ้นอยู่กับระดับการป้องกัน ดังตารางที่ 2.6

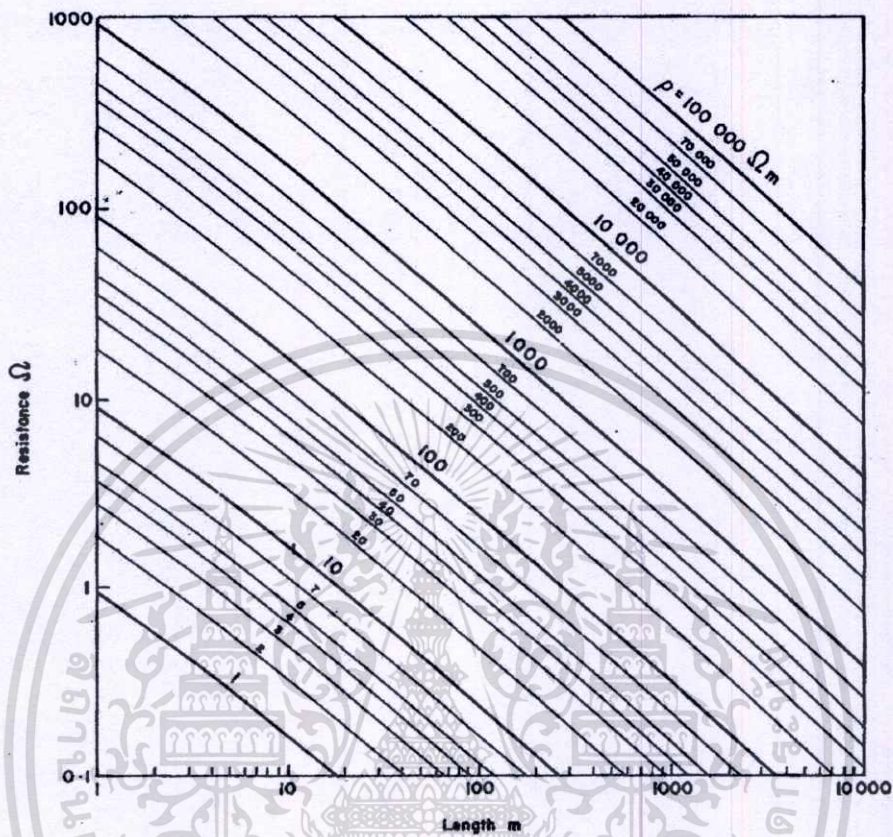
ตารางที่ 2.6 ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างตัวนำลงดินตามระดับการป้องกัน

ระดับการป้องกัน	ระยะเฉลี่ย (เมตร)
I	10
II	10
III	15
IV	20

2.8.1.3 ระบบรากสายดิน

[18] ระบบรากสายดินเกี่ยวเนื่องกับการแพร่กระจายของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งมีความถี่สูง ลงสู่พื้นดินเพื่อมิให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินอันตราย รูปร่างและขนาดของระบบรากสายดินมีความสำคัญ โดยปกติค่าความต้านทานของระบบรากสายดินควรมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรใช้ระบบโครงสร้างรากสายดินแบบร่วมชุดเดียวและเหมาะสมสำหรับทุกวัตถุประสงค์ (เช่น ระบบป้องกันฟ้าผ่า ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ หรือระบบสื่อสาร) [3]ค่าความต้านทานของรากสายดินขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ลักษณะการจัดวาง ขนาดรากสายดิน ความลึกและระยะห่างของรากสายดิน ส่วนความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความชื้นในดิน รากสายดินสำหรับอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่เหมาะสมอาจใช้รากสายดินแบบแท่งกลมฝังแนวค้ำ หรือใช้แบบแท่งแบนหรือเส้นกลมฝังแนวนอน

สำหรับรูปที่ 2.18 เป็นการแสดงถึงค่าความต้านทาน ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของรากสายดินกับความต้านทานจำเพาะของดิน [18]



รูปที่ 2.18 ความต้านทานดิน ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากสายดินกับความต้านทานจำเพาะของดิน [19]

2.8.2 ขนาดและวัสดุที่ใช้ในระบบป้องกันฟ้าผ่า

ส่วนประกอบต่างๆในระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกวัสดุที่ใช้ต้องทนต่อผลทางไฟฟ้า และแม่เหล็กไฟฟ้าจากกระแสฟ้าผ่า และความเครียดอื่นๆที่คาดการณ์โดยไม่เกิดความเสียหาย ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าควรผลิตภายใต้วัสดุที่ได้แนะนำตามมาตรฐาน IEC 62305-3 ดังตารางที่ 2.7 หรือวัสดุอื่นที่สามารถนำมาใช้ได้หากมีคุณสมบัติเท่าเทียมกัน คือมีความทนทานทั้งทางกล ทางไฟฟ้า และทางเคมีที่เกี่ยวกับการผุกร่อน

ตารางที่ 2.7 วัสดุและเงื่อนไขที่ใช้ในระบบป้องกันฟ้าผ่า

วัสดุ	สภาพใช้งาน			การผูกרון		
	ในอากาศ	ในดิน	ในคอนกรีต	ความทนทาน	เพิ่มขึ้นโดย	อาจเสียหายเมื่อเชื่อมกับ
ทองแดง	ต้น ดีเยี่ยม	ต้น ดีเยี่ยม เคลือบ	ต้น ดีเยี่ยม เคลือบ	ดีในหลาย สภาพแวดล้อม	สาร กำมะถัน	-
เหล็กชุบ ด้วยกัลวา ไนท์	ต้น ดีเยี่ยม	ต้น	ต้น ดีเยี่ยม	ยอมรับได้ ถ้าใช้ใน อากาศ คอนกรีต และสภาพ ดินที่ดื่	ความ เข้มข้นของ คลอไรด์ สูง	ทองแดง
เหล็กกล้าไร้ สนิม	ต้น ดีเยี่ยม	ต้น ดีเยี่ยม	ต้น ดีเยี่ยม	ดีในหลาย สภาพแวดล้อม	ความ เข้มข้นของ คลอไรด์ สูง	-
อลูมิเนียม	ต้น ดีเยี่ยม	ไม่ เหมาะสม	ไม่ เหมาะสม	ดีในสภาพ ที่มีสาร กำมะถัน และคลอ ไรด์ต่ำ	ลักษณะที่ เป็นด่างสูง	ทองแดง
ตะกั่ว	ต้น เคลือบ	ต้น เคลือบ	ไม่ เหมาะสม	ดีในสภาพ ที่มีซัลเฟ ตเข้มข้น	ลักษณะดีที่ มีกรด	ทองแดง เหล็กกล้า ไร้สนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 ระยะที่ปลอดภัยทางไฟฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก [18]

การแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำล่อฟ้าหรือสายตัวนำลงดินกับโครงสร้างที่เป็นโลหะ, การติดตั้งโลหะ และระบบภายใน ต้องมีการแยกกับระบบป้องกันภายนอกตามระยะที่กำหนดให้ จากสมการที่ (2.26) ซึ่งต้องมีระยะมากกว่าที่คำนวณ

$$s = k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot l \quad (2.26)$$

เมื่อ k_i = ค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกระดับป้องกัน (ดังตารางที่ 2.8)

k_c = ค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวนำลงดิน (ดังตารางที่ 2.9)

k_m = ค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับวัสดุที่คั่นกันทางไฟฟ้า (ดังตารางที่ 2.10)

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์ k_i ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

ระดับการป้องกัน	k_i
I	0.08
II	0.06
III และ IV	0.04

ตารางที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ k_c ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

จำนวนตัวนำลงดิน	k_c (ขึ้นอยู่กับระบบการต่อลงดิน)
1	1
2	1....0.5
4 และมากกว่า	1....1/n

ตารางที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์ k_m ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

วัสดุ	k_m
อากาศ	1
ของแข็ง	0.5

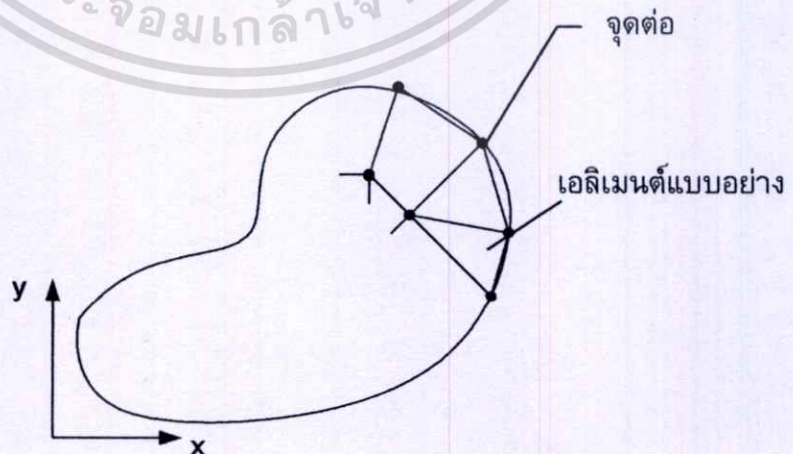
2.9 ความเป็นมาของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [19]

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศ และการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่างๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก ความสามารถของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและ โครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักออกแบบทั่วไปอย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวังผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

2.9.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

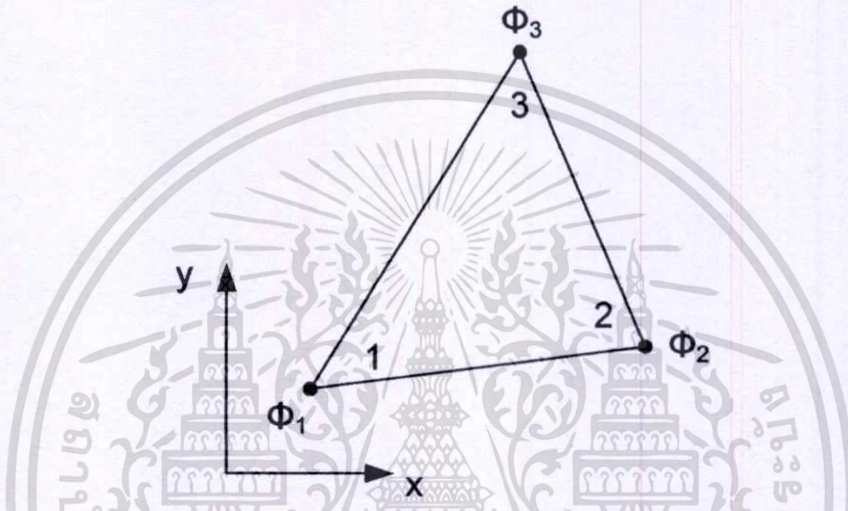
ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังรูปที่ 2.19 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาคณิตศาสตร์ต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน ปัญหากระจายตัวของสนามไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.19 การแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในรูป 2.19) เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยจุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าปัญหาเกี่ยวกับสิ่งที่กำลังพิจารณาอยู่ ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนสมการฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังสมการที่ (2.27)



รูปที่ 2.20 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

ปัญหาส่วนใหญ่ในสองมิติมักใช้เอลิเมนต์ ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (triangular element) ทั้งนี้ก็เพราะว่าลักษณะขอบเขตของปัญหาแบบสองมิติทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยๆ ได้ง่าย อีกทั้งสมการเอลิเมนต์ของรูปสามเหลี่ยมสามารถสร้างขึ้นได้โดยสะดวกและนำไปใช้ในการประดิษฐ์โปรแกรมได้โดยตรง

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.27)$$

โดย $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

สมการ (2.27) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.28)

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= [N]_{(1 \times 3)} \{\phi\}_{(3 \times 1)} \quad (2.28)$$

โดย $[N]$ แทนเมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์
 $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.20 จะอยู่ในรูปแบบดังสมการที่ (2.29)

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.29)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการที่ (2.29) สามารถทำได้โดย

1. วิธีการโดยตรง (direct method) เป็นวิธีที่ง่ายในการเข้าใจระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดี แต่ขณะเดียวกันก็ใช้ได้แต่เฉพาะปัญหาพื้นฐาน เช่น ปัญหาในหนึ่งมิติเท่านั้น หากปัญหาเป็นปัญหาในสองหรือสามมิติ เราจำเป็นต้องนำพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการสร้างสมการของเอลิเมนต์
2. วิธีการแปรผัน (variational method) วิธีนี้ใช้กันมากในยุคแรกของการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ระเบียบวิธีแปรผันมีรากฐานมาจากความรู้ความเข้าใจในปัญหาด้านโครงสร้างเป็นหลัก ก่อนที่จะนำระเบียบวิธีแปรผันมาใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ประโยชน์ของระเบียบวิธีนี้ทำให้สามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาได้โดยง่าย แต่จุดอ่อนก็คือต้องรู้ฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ
3. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) วิธีนี้สามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากการใช้สมการเชิงอนุพันธ์โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกัน สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สร้างขึ้นมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาสองมิติในหลายๆแบบ

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังสมการที่ (2.30)

$$\sum (\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.30)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในสมการ (2.30) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจเป็นค่าของปัญหาที่กำลังพิจารณาอยู่

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียดรูป ตามจุดต่อต่างๆของ โครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่า ความเครียด และความเค้นได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณ การถ่ายเทความร้อนได้

2.9.2 การประยุกต์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า

เริ่มแรกในปี 1943 ได้นำเอาทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์งานทางด้าน โครงสร้างใน วิศวกรรมโยชายังมิได้นำมาใช้งานวิศวกรรมไฟฟ้า ต่อมาได้มีการค้นคว้า และนำมาใช้งานหลาย แขนง จนกระทั่งในปี 1986 ได้มีผู้ประยุกต์นำเอาหลักการมาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านสนาม แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic, EM) เป็นงานพื้นฐาน ไปสู่งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และอื่นๆ อีกมากมายอย่างการแก้สมการคลื่น (Wave Equation)

สำหรับในโครงงานนี้จะได้นำเอาหลัก และวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ มาวิเคราะห์ แก้ไขปัญหาสนามไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อฉนวนในลักษณะ รูปทรงแบบต่างๆ โดยการประยุกต์การประมวลผลหาค่าตอบจากเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) ลักษณะงานเป็นแบบการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ

ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้นเรามีความสนใจลักษณะการกระจายของ สนามไฟฟ้าโครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) ในแบบต่างๆซึ่งเป็นปัญหาในการ ออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์ที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการ นำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ เรียกว่า “ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (Interpolation Functions)” ซึ่งการคำนวณจะต้องทำหลาย ขั้นตอน และใช้เวลามากเพื่อกระทำการที่เข้าไปเข้ามาด้วยเหตุนี้เราจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยใน การคำนวณเพื่อให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขปัญหาทางด้านสนามไฟฟ้า

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้า สามารถประคิษฐ์ขึ้นได้โดยเริ่มจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ดังแสดงดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (2.31)$$

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

$$D = \epsilon E \quad (2.32)$$

โดย ϵ แทนค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของกลาง และ E แทนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field intensity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า V โดย

$$E = -\nabla V \quad (2.33)$$

แทนค่าในสมการก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.34)$$

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

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.35)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาของการหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า โดยปกติจะประกอบด้วย

1.) การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า V ที่มีค่าคงที่ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านอื่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่ V แทนค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนั้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_s = V_o$$

2.) การกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง ดังนี้

$$\nabla V_s = 0$$

2.9.4 สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขปัญหาทางด้านความร้อน

สมการทางด้านคณิตศาสตร์ ของการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) โดยลักษณะการนำความร้อน (Conduction) แสดงดังสมการที่ (2.36)

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2.36)$$

เมื่อ

T	=	ค่าอุณหภูมิ (Temperature)
ρ	=	ความหนาแน่น (Density)
C	=	ความจุความร้อน (Heat capacity)
C_p	=	Heat capacity at a constant pressure
C_v	=	Heat capacity for a constant volume
k	=	ค่าความนำความร้อน (Thermal conductivity)
Q	=	Heat source or Heat sink

กรณีพิจารณาเป็นแบบ Steady-state model ค่า ρ และ C จะนั้นในเทอมแรกของสมการเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2.37)$$

1) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) มี 2 ชนิด คือ

- Dirichlet type เป็นการกำหนดอุณหภูมิบน Boundary

$$T = T_0$$

- Neumann type เป็นการกำหนดการกระจายอุณหภูมิ (Heat flux) บน Boundary

$$-n \cdot q = q_0$$

เมื่อ

q = Heat flux vector

n = Normal vector of the boundary

q_0 = inward heat flux, normal to the boundary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปแบบของ Heat Transfer จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$-n \cdot q = q_0 + h(T_{\text{inf}} - T) \quad (2.38)$$

เมื่อ q_0 = Heat flux

h = Heat transfer coefficient

T_{inf} = Relative to a reference temperature

ถ้าวัสดุเป็นฉนวนความร้อน ค่า $q_0 = 0$

2) การกำหนด (Subdomain Setting)

ในกรณีการส่งผ่านความร้อนซึ่งเกี่ยวกับการนำความร้อน (Conductive Heat Transfer)

และพิจารณาถึงเวลาการส่งผ่าน (Transient case) ได้ดังสมการที่ (2.39)

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2.39)$$

เมื่อ δ_{ts} = Time-scaling coefficient

ρ = Density (kg/m³)

C_p = Heat capacity

k = Thermal conductivity

Q = Heat source (w/m³)

บทที่ 3

การออกแบบชุดทดสอบ และการจำลองเสาหล่อฟ้า

3.1 บทนำ

ในการทดสอบเสาหล่อฟ้าสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือชนิดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเพื่อที่จะจำลองสนามไฟฟ้าให้เสมือนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบนก้อนเมฆ ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบเสาหล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ ซึ่งนำเสาหล่อฟ้าดังกล่าวที่มีรูปลักษณะปลายแท่งตัวนำ ขนาดและวัสดุที่แตกต่างกันมาทำการทดสอบ เพื่อดูคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเสาหล่อฟ้าแต่ละชนิด และทางความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุต่างๆที่ใช้ผลิตเสาหล่อฟ้า โดยทำการทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ และภายใต้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ซึ่งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะเรียก ตามค่าเวลาหน่วงคลื่นและหางคลื่นตามมาตรฐานเป็น T_1/T_2 นั่นคือ $1.2/50 \mu s$ [3] ตลอดจนทำการทดสอบเสาหล่อฟ้าที่มีวัสดุที่แตกต่างกัน เพื่อดูผลกระทบทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านแท่งตัวนำหล่อฟ้า[20] โดยทำการทดสอบด้วยหม้อแปลงกระแส 2000 แอมป์ ดังนั้นก่อนที่จะทำการศึกษาเสาหล่อฟ้าชนิดต่างๆ ต้องทำการออกแบบชุดทดสอบโดยคำนึงถึงขนาดเพื่อให้มีสนามไฟฟ้าที่ครอบคลุมกับเสาหล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใต้ชุดทดสอบมีความสม่ำเสมอกันทุกจุด เพื่อมิให้เกิดข้อบกพร่องขณะทำการทดสอบ และยังคำนึงถึงระยะเวลาความปลอดภัยในขณะที่ทำการทดสอบ ดังนั้นจึงมีการจำลองการออกแบบชุดทดสอบและตัวนำเสาหล่อฟ้า โดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ไฟไนต์เอลิเมนต์(Comsol version 3.3) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการกระจายศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดลองเพื่อลดโอกาสผิดพลาด

โดยจะนำเสนอตั้งแต่การจำลองชุดทดสอบ ว่ารูปร่างของแผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบควรมีลักษณะอย่างไร ที่จะทำให้การกระจายของศักย์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้ามีการกระจายที่สม่ำเสมอ โดยการจำลองจะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์(Comsol version 3.3) ก่อนที่จะทำการสร้างชุดทดสอบจริง โดยชุดทดสอบที่ออกแบบต้องมีความปลอดภัยและมีความสะดวกในการทดสอบซึ่งส่วนประกอบโครงสร้าง ส่วนใหญ่จะทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า


3.2 การศึกษา จำลอง และออกแบบชุดทดสอบเสาหล่อฟ้า

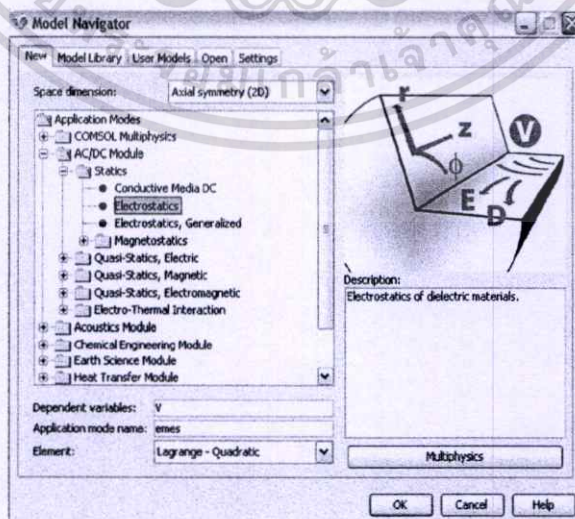
ในการทดสอบแท่งตัวนำเสาหล่อฟ้า นั้น จะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นชุดป้อนแรงดัน ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมออย่างแท้จริง นั่นคือสนามไฟฟ้าในปริมาตรระหว่างอิเล็กโทรดนั้น จะต้องเท่ากันทุกจุด มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำหล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบขึ้น ในบริเวณความเครียดสนามไฟฟ้าสูง [3] ดังนั้นจะใช้อิเล็กโทรดแผ่นระนาบธรรมดา โดยมีได้ทำขอบพิเศษมาวาง

ระหว่างอิเล็กโตรด จึงต้องทำอิเล็กโตรดระนาบที่มีขอบโค้งแบบโรกอฟสกี (Rogowski profile) ซึ่งขอบของอิเล็กโตรดจะโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้า และต้องออกแบบฐานรองรับแท่งตัวนำล่อไฟฟ้าให้มีรูปแบบที่เหมาะสม และสามารถรองรับตัวนำล่อไฟฟ้าได้หลายชนิด และหลากหลายขนาด ตลอดจนต้องมีความแข็งแรงสามารถรองรับแรงทางกลได้

3.2.1 การจำลองชุดทดสอบ

การจำลองชุดทดสอบต้องมีการคำนึงถึงความแข็งแรงของโครงสร้าง และวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างต้องมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพื่อมิให้เกิดอันตราย และข้อผิดพลาดระหว่างการทดสอบ ฉะนั้น แผ่นอิเล็กโตรดที่ใช้สำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงต้องทำกับวัสดุที่มีน้ำหนักไม่มากนัก เนื่องจากโครงสร้างที่ใช้รองรับแผ่นอิเล็กโตรดเป็นวัสดุที่ทำมาจาก Polyvinyl chloride (PVC) และ Superlenc ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่มีความแข็งแรง ความแข็งแรง ทนความล้า มีความเหนียว ทนทานต่อการขีดสี และการกัดกร่อน จึงมีการจำลองแผ่นอิเล็กโตรดให้มีวัสดุเป็นอลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบา และมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (FEMLAB) การกระจายของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มีผลต่อการทดสอบ โดยมีขั้นตอนการจำลองแบบดังนี้

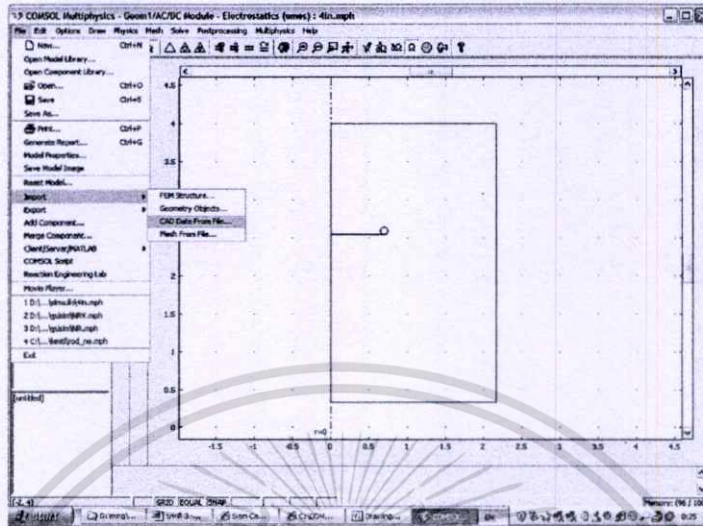
1. เขียนแบบแผ่นอิเล็กโตรดวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1400 มิลลิเมตร และมีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยโปรแกรมที่ใช้เขียนแบบเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในตระกูลCAD และทำการบันทึกให้เป็นนามสกุล (.dxf) ที่สามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้
2. ทำการเปิดโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Comsol version 3.3 ) จะมีรูปแบบให้เลือกในการใช้งานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเลือกรูปแบบขอบเขตปัญหาโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Comsol version 3.3)

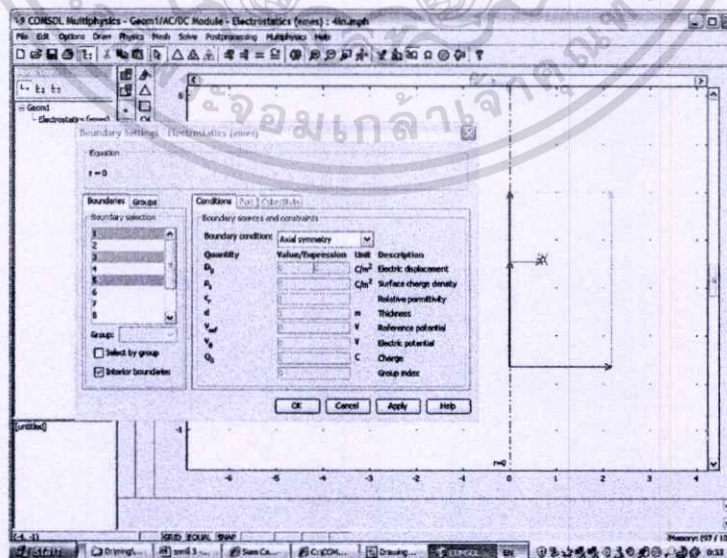
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อเลือกรูปแบบขอบเขตปัญหาแล้ว ก็ดำเนินการในขั้นตอนต่อไปโดยการนำแบบจำลองที่ได้วาดไว้ในโปรแกรมตระกูล CAD เข้ามายังโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.2



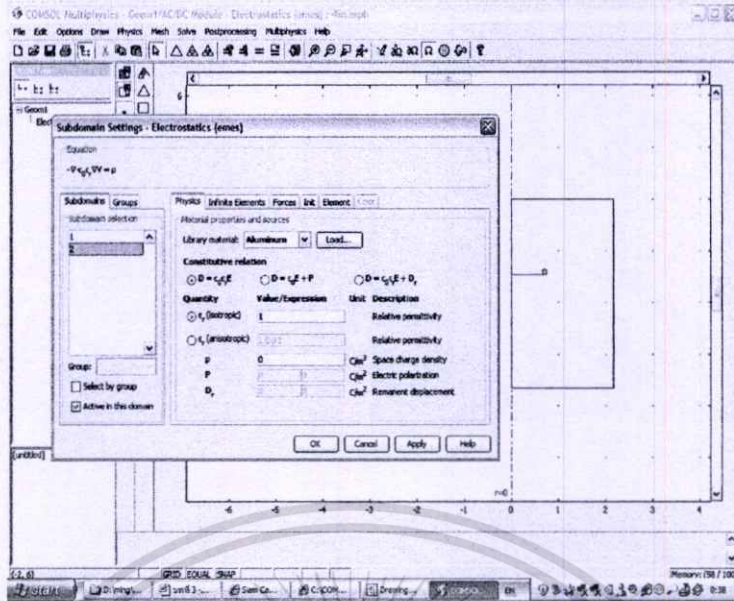
รูปที่ 3.2 การนำแบบจำลองเข้ามาใน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

4. ทำการป้อนค่าต่างๆ โดยเริ่มจากการกำหนดค่าขอบเขตให้กับแบบจำลอง (Boundary settings) เช่น ป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นอิเล็กโทรดในงานวิจัยนี้ได้ทำการป้อน 300kV เพื่อจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานสูงสุด กำหนดตำแหน่งกราวด์ กำหนดขอบเขตในการจำลอง และกำหนดวัสดุให้กับแบบจำลอง (Subdomain settings) ดังรูปที่ 3.3 ก และข



(ก)

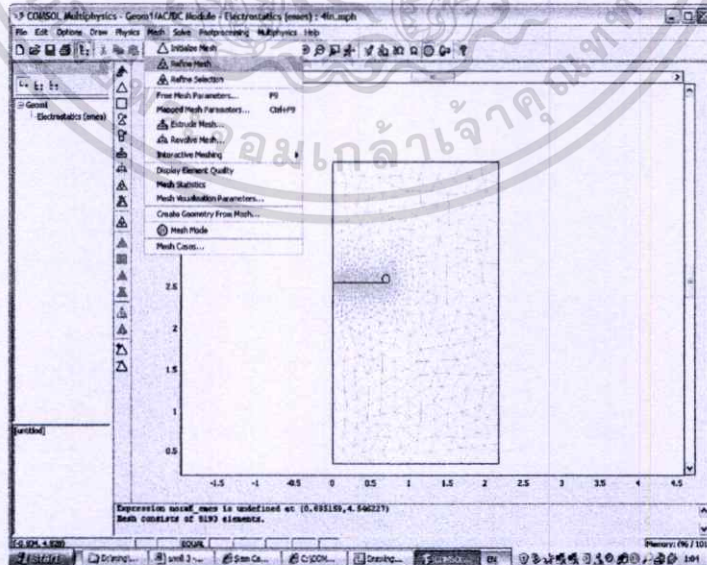
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

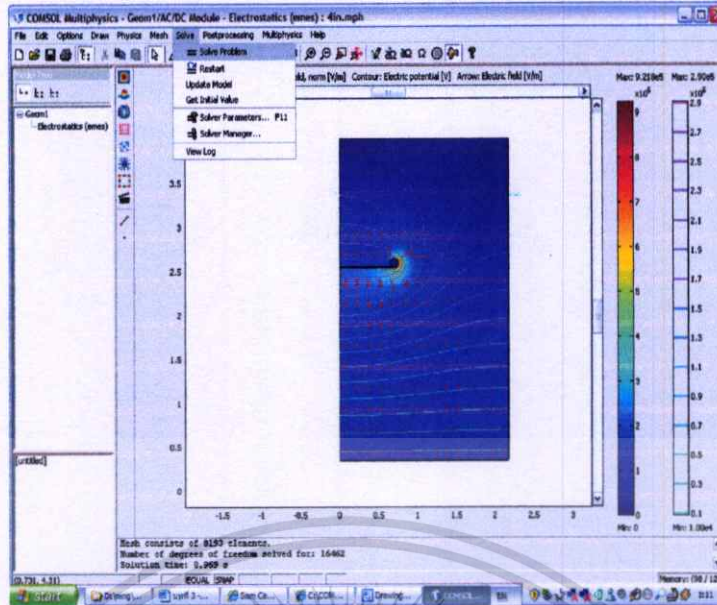
รูปที่ 3.3 การป้อนค่าให้กับ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในฟังก์ชัน Boundary และ Subdomain settings

5.เมื่อทำการป้อนค่าต่างๆแล้ว ก็ตั้งให้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Comsol version 3.3) ทำการประมวลผล โดยเริ่มจากการใช้คำสั่ง Mesh เพื่อสร้างเอลิเมนต์ย่อยๆให้กับแบบ และทำการประมวลผล อยู่ในฟังก์ชัน Solve problem ดังรูปที่ 3.4 ก และข



(ก)

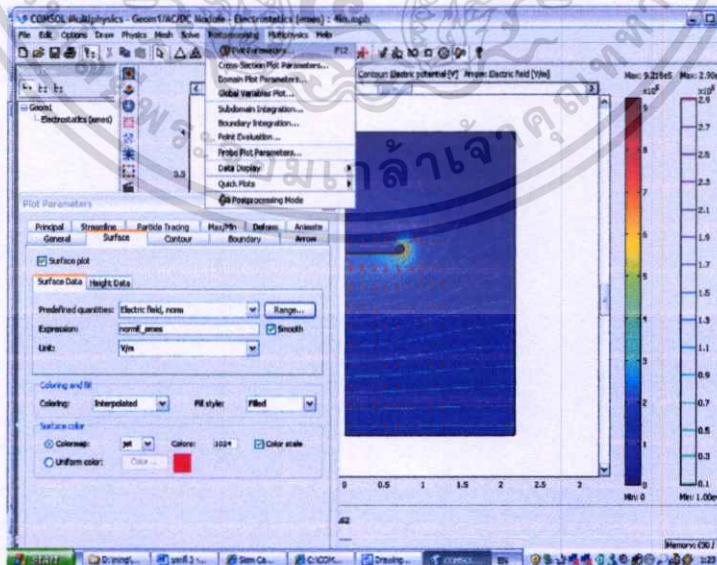
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.4 การสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการประมวลผลที่ต้องการทราบโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

6. กำหนดรูปแบบการประมวลผลที่ต้องการในฟังก์ชัน Postprocessing และเลือก Post Parameter ดังรูปที่ 3.5 สามารถเลือกรูปแบบการประมวลผลตามที่ต้องการได้ เช่น ให้แสดงการกระจายเส้นศักย์ไฟฟ้า การกระจายเส้นสนามไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดสูงสุด ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดสูงสุด

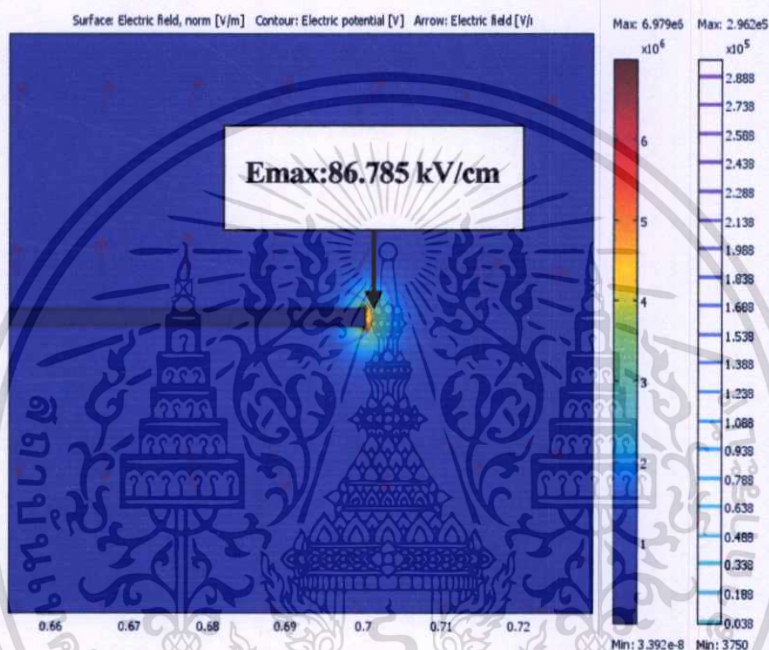


รูปที่ 3.5 การกำหนดรูปแบบการประมวลผลที่ต้องการ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

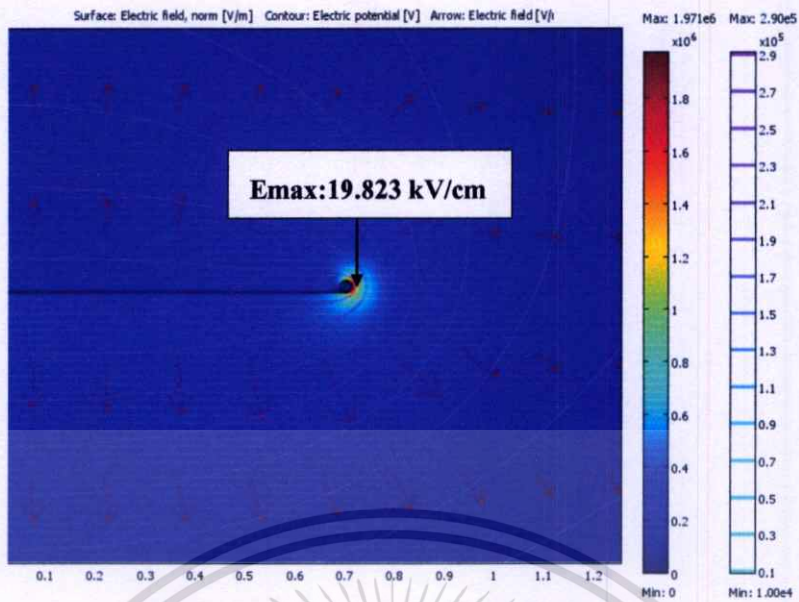
3.2.2 ผลวิเคราะห์แบบจำลองชุดทดสอบเสาหล่อฟ้า โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Comsol version 3.3)

จากการออกแบบชุดทดสอบแท่งตัวนำเสาหล่อฟ้า สิ่งที่ต้องวิเคราะห์และออกแบบที่สำคัญ คือ การออกแบบแผ่นอิเล็กโทรดที่สำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพราะถ้าออกแบบแผ่นอิเล็กโทรดโดยไม่มีการทำขอบโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้า ก็จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า บริเวณขอบของแผ่นอิเล็กโทรดมีค่าสูง ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งทำให้เกิดการโคโรนาขึ้นบริเวณที่ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

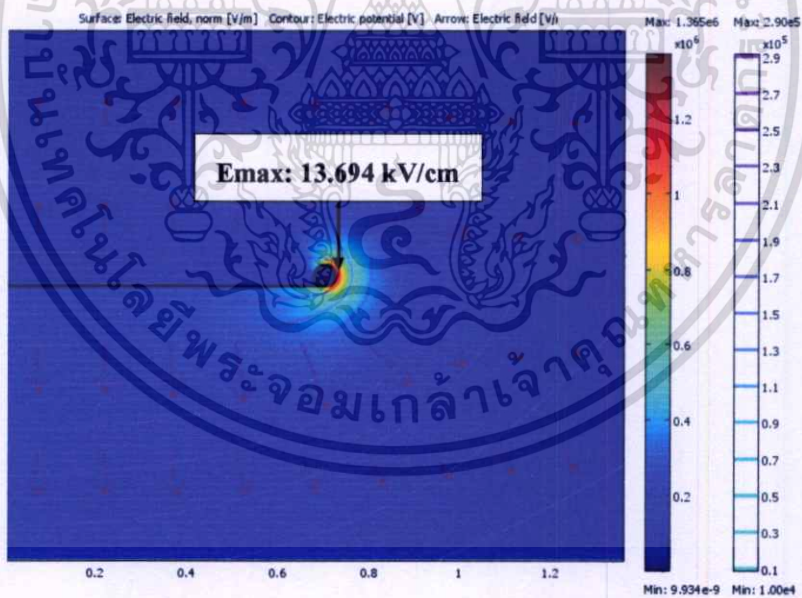


รูปที่ 3.6 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้า ของแผ่นอิเล็กโทรด ที่ไม่มีขอบโค้ง โดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Comsol version 3.3)

และเมื่อมีการออกแบบให้ขอบแผ่นอิเล็กโทรดโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้า โดยการ ออกแบบสมมุติให้ขอบแผ่นอิเล็กโทรดมีการทำโค้งขึ้น ด้วยการนำวงกลมมาวางบริเวณปลายขอบ แผ่นอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดขอบโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้า การออกแบบจะเริ่มจากเส้นโค้งที่มี รัศมี(R) 12.5, 25, 40, 50 mm และจำลองเพื่อดูค่าความเครียดสนามไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.7-3.10

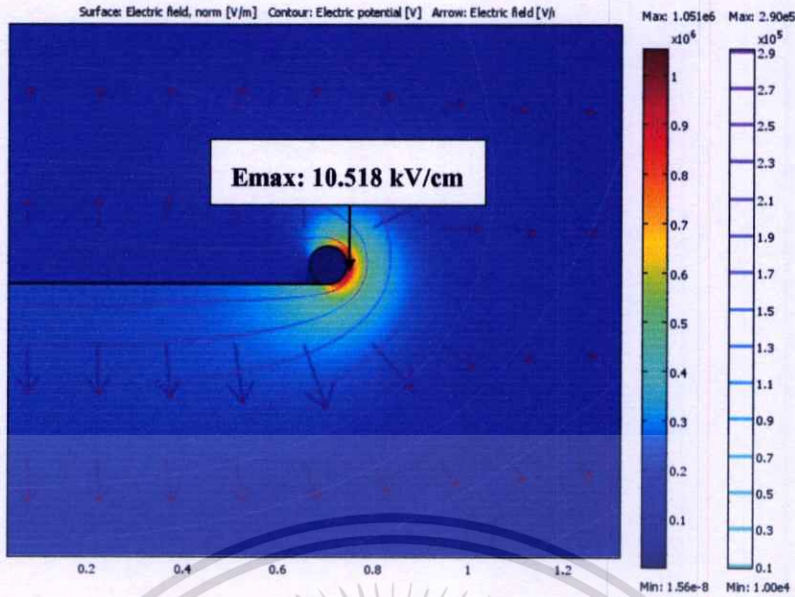


รูปที่ 3.7 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มีขอบโค้ง R=12.5mm โดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

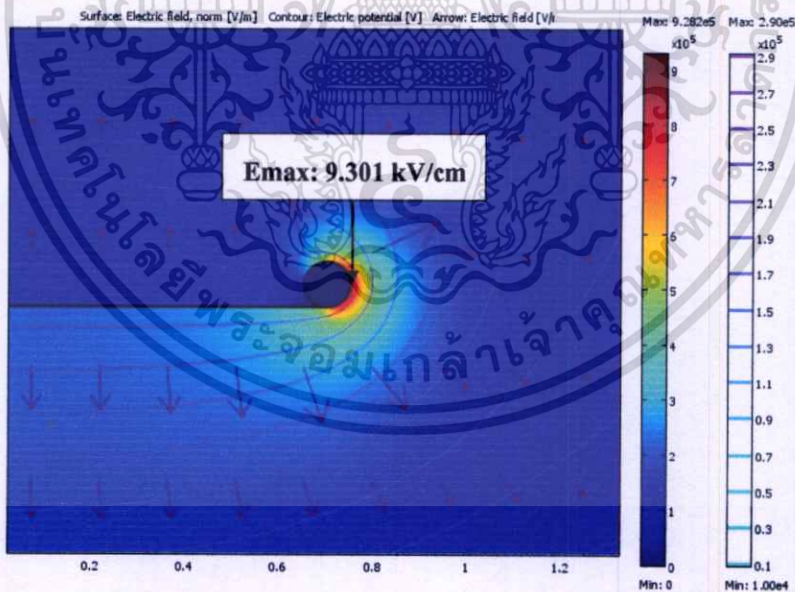


รูปที่ 3.8 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มีขอบโค้ง R=25mm โดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มีขอบโค้ง R=40mm โดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.10 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดที่มีขอบโค้ง R=50mm โดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

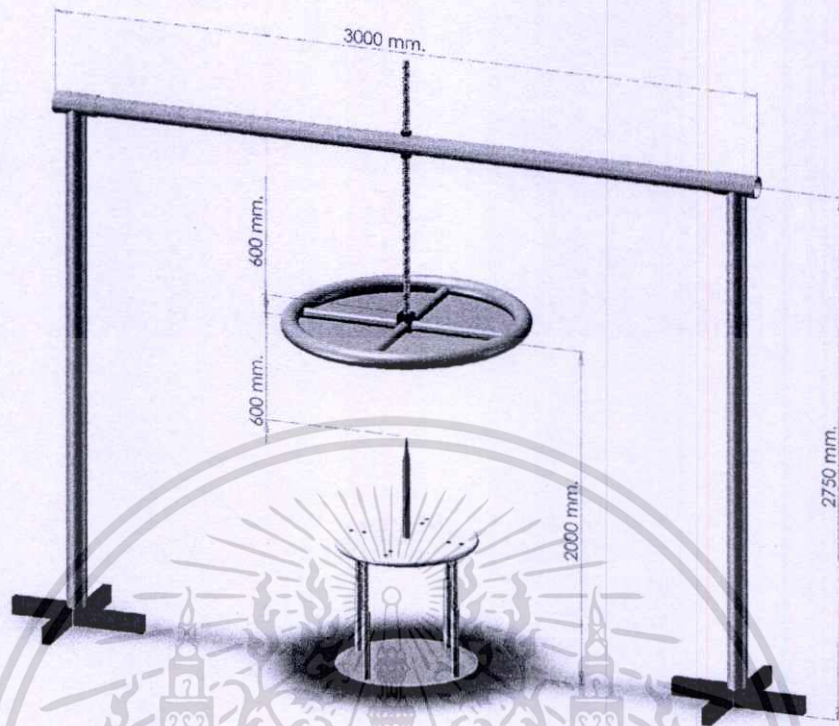
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6-3.10 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าถ้าไม่มีการทำขอบแผ่นอิเล็กโทรดก็จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตรงขอบมีค่าสูง อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นในบริเวณดังกล่าว ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าในปริมาตรระหว่างอิเล็กโทรดนั้นไม่สม่ำเสมอ ทำให้ในขณะทำการทดสอบแท่งตัวนำเสาต่อฟ้า อาจเกิดเบรกดาวน์ที่ขอบของแผ่นอิเล็กโทรดผ่านอากาศมายังแท่งตัวนำเสาต่อฟ้า และทำให้เกิดความผิดพลาดระหว่างการทดสอบได้ และเมื่อทำการทำขอบโค้งให้กับแผ่นอิเล็กโทรด สังเกตได้ว่าขนาดรัศมีของขอบโค้งยิ่งมากก็จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบแผ่นอิเล็กโทรดน้อยลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกขนาดขอบโค้งที่รัศมี 50 mm แต่เนื่องจากการทำขอบโค้งนั้นในทางปฏิบัติทำได้โดยการนำท่ออลูมิเนียมที่มีรัศมีดังกล่าว มาทำให้เกิดรัศมีขึ้นบริเวณขอบแผ่นอิเล็กโทรด แต่ถ้ามีการใช้ท่ออลูมิเนียมที่มีรัศมีขนาดมากกว่า 50 mm มาทำขอบโค้งนั้น เมื่อมีการตัดท่อให้มีลักษณะเป็นวงกลมรอบแผ่นอิเล็กโทรดจะกระทำได้อ่างยากจึงต้องเลือกจุดที่เหมาะสมที่สามารถปฏิบัติงานได้ด้วย

3.2.3 การสร้างชุดทดสอบ แท่งตัวนำเสาต่อฟ้า

ชุดทดสอบได้มีการออกแบบ ให้มีความปลอดภัยระหว่างการทดสอบ รวมถึงระยะห่างของชุดทดสอบแท่งตัวนำเสาต่อฟ้าต้องไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน และมีความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งสามารถปรับระยะแคบระหว่างชุดทดสอบได้ โครงสร้างโดยทั่วไปทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อมิให้เกิดการเบรกดาวน์ระหว่างขอบแผ่นอิเล็กโทรดอลูมิเนียมกับเสาโครงสร้างขณะทำการทดสอบ ซึ่งชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.11 และมีรายละเอียดดังนี้

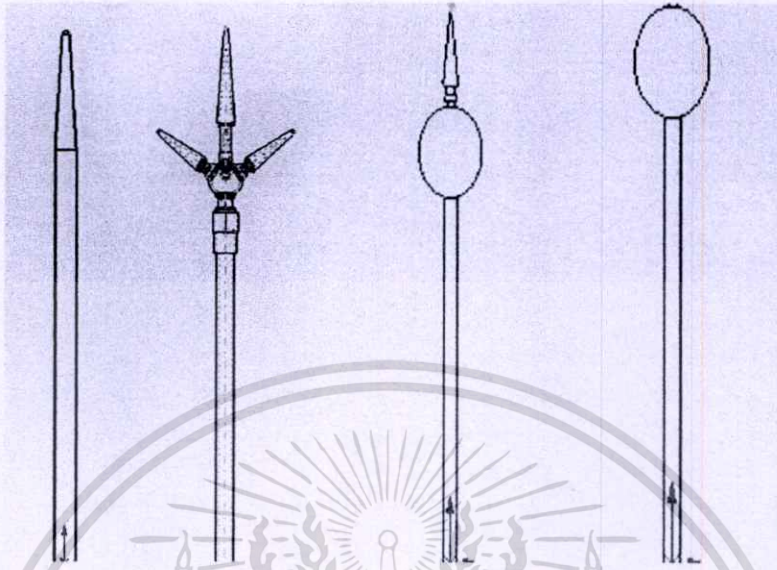
1. แผ่นอิเล็กโทรดอลูมิเนียมลักษณะวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1400 มม. ความหนาของแผ่นอิเล็กโทรดขนาด 2 มม. ขนาดท่อที่ใช้ทำขอบโค้งรัศมี 50 มม. วัสดุเป็นอลูมิเนียมเพื่ออำนวยความสะดวกกับแผ่นอิเล็กโทรด และง่ายต่อการตัดโค้ง และทำการเชื่อมจุดที่ใช้สำหรับยึดระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกับคานาโครงสร้าง
2. เสาโครงสร้างและคานาเป็นวัสดุ Polyvinyl chloride (PVC) ส่วนฐานเป็นเหล็กยึดแข็งแรง
3. แท่งยึดแผ่นอิเล็กโทรดและขาฐานรองรับแท่งตัวนำเสาต่อฟ้าสามารถปรับระยะขึ้นลงได้ทำมาจาก Superlene ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความทนทาน ทนต่อการกัดกร่อน และมีความเหนียว
4. ฐานรองรับแท่งตัวนำเสาต่อฟ้าเป็นวัสดุอะคริลิก มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความแข็งแรง



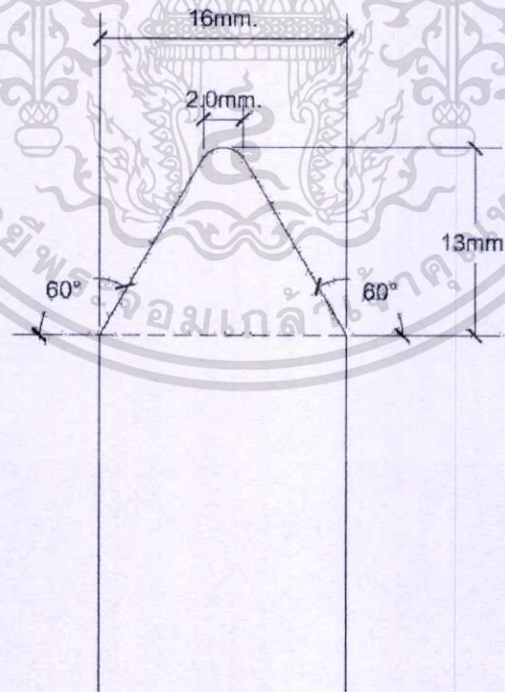
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของชุดทดสอบตัวนำล่อฟ้าที่ได้ออกแบบ

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองตัวนำล่อฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์จะทำการจำลองขอบเขตปัญหาในทางไฟฟ้า และทางความร้อนเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้า ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันเพื่อทำการตรวจสอบว่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่าไร และผลทางความร้อนของแต่ละแท่งตัวนำล่อฟ้า เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง โดยเสาต่อฟ้าที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีรูปร่างแตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.12 และมีการวิเคราะห์ตัวนำล่อฟ้าที่มีการออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.13 โดยมีวัสดุที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ทองแดง, สแตนเลส, อลูมิเนียม และควมมีความยาวของแท่งตัวนำล่อฟ้าไม่น้อยกว่า 254 มม.[21] เพื่อดูค่าสนามไฟฟ้ามีความแตกต่างกันหรือไม่ และทำการวิเคราะห์แท่งตัวนำล่อฟ้าดังกล่าว



รูปที่ 3.12 ลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอเลเมนต์



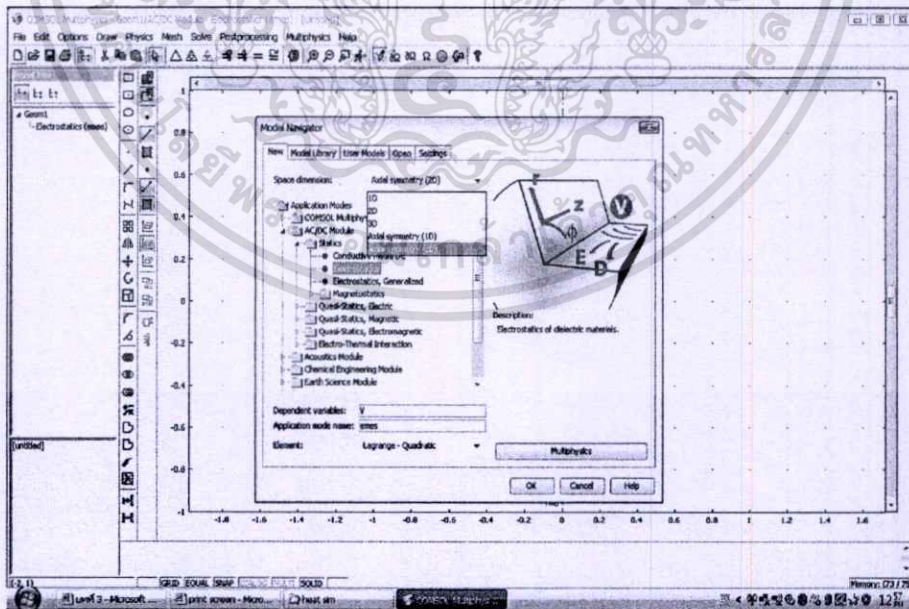
รูปที่ 3.13 ขนาดของปลายแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำการทดลองเพื่อผลของค่าสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ของตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุต่างชนิดกัน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

การจำลองแท่งตัวนำล่อฟ้า เพื่อดูผลของค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแต่ละแท่งตัวนำและนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับกรทดลองจริง และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยจะมีการจำลองลักษณะของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่รูปร่างแตกต่างกันแต่ละชนิด และมีการจำลองแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่มีวัสดุแตกต่างกัน เพื่อดูผลว่าวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้ามีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าอย่างไร จำลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (Comsol Multiphysics 3.3) มีวิธีการดังนี้

- 1) วาดโครงสร้างของแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแบบดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 โดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ ตระกูล CAD
- 2) ทำการบันทึกแบบ โดยถ้าใช้โปรแกรม Auto Cad ให้บันทึกนามสกุลเป็น (.dxf) และถ้าใช้โปรแกรม Solid work ให้บันทึกนามสกุลเป็น (.x_t) เพราะเป็นสนามสกุลที่รองรับในโปรแกรมจำลอง Comsol Multiphysics
- 3) เปิดโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (Comsol Multiphysics 3.3)
- 4) เมื่อทำการเปิดโปรแกรมแล้ว ให้ทำการใส่ Space dimension เพื่อเลือกประเภทของแบบที่ทำการจำลอง และเลือก Application modes เพื่อเลือกปัญหาที่เราต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3.14 โดยเลือกเป็น 2D Axial Symmetry และ AC/DC Module/Statics/Electrostatics

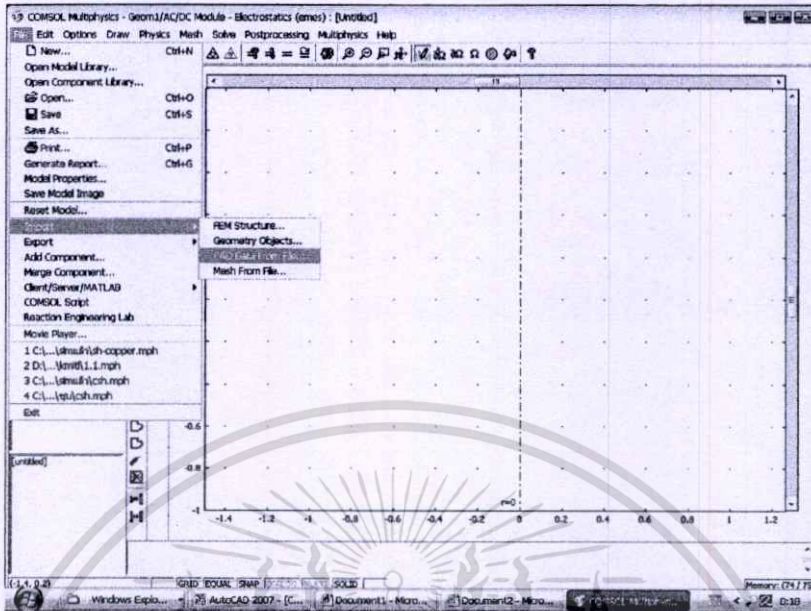


รูปที่ 3.14 การตั้งค่าแบบจำลองและขอบเขตปัญหาที่เกี่ยวกับสนามไฟฟ้า โดยโปรแกรม

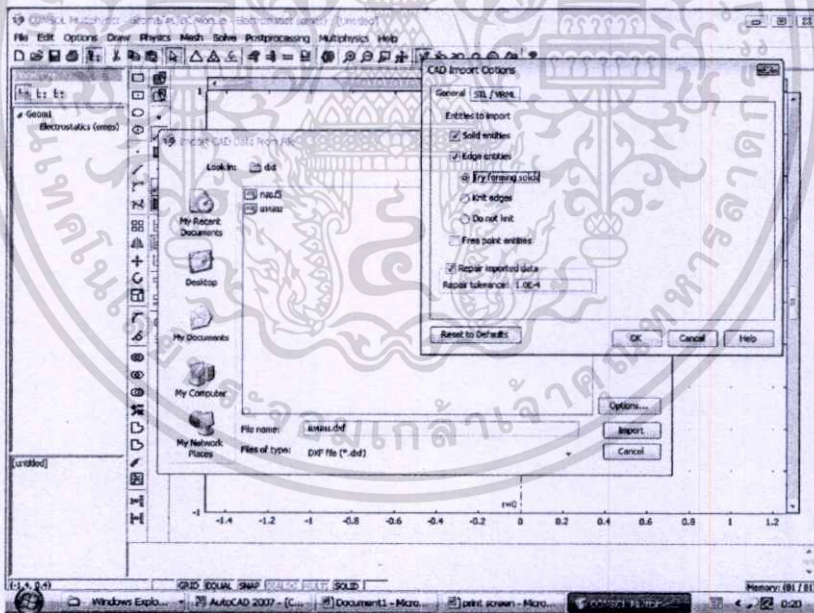
ไฟไนท์เอลิเมนต์(Comsol Multiphysics 3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ทำการอิมพอร์ตและตั้งค่าแบบจำลอง ที่ต้องการวิเคราะห์ คังรูปที่ 3.15 ก และข



(ก)

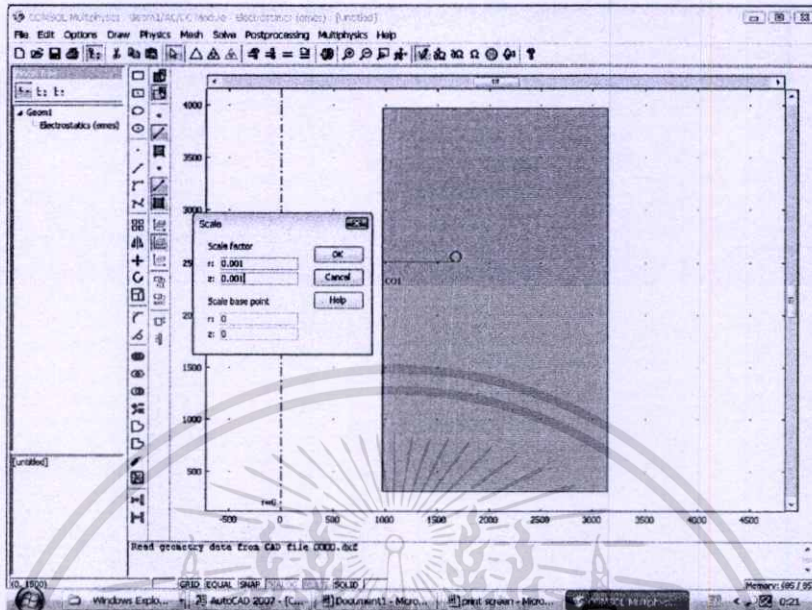


(ข)

รูปที่ 3.15 การอิมพอร์ตและการตั้งค่าแบบจำลองที่ต้องการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์

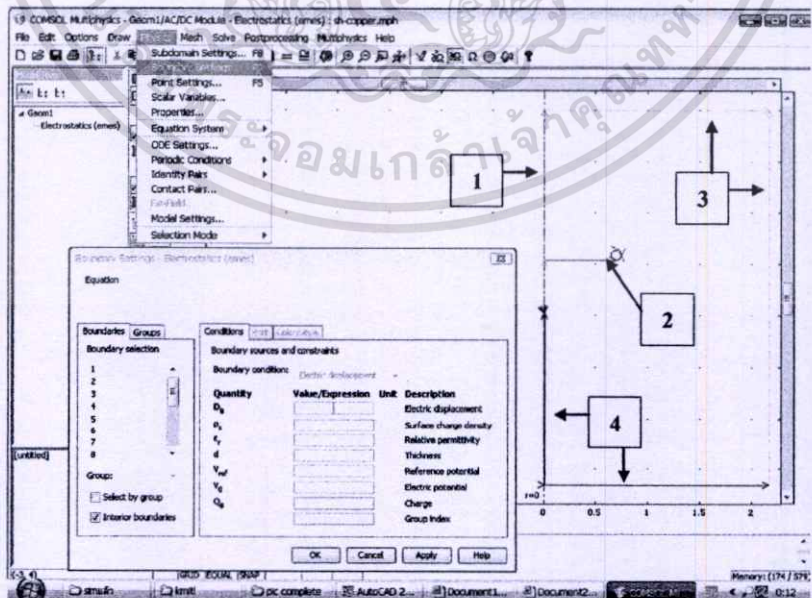
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) ทำการสเกลขนาดของแบบจำลองซึ่งแบบจำลองมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร แต่ในโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 หน่วยเป็นเมตร ดังรูปที่ 3.16



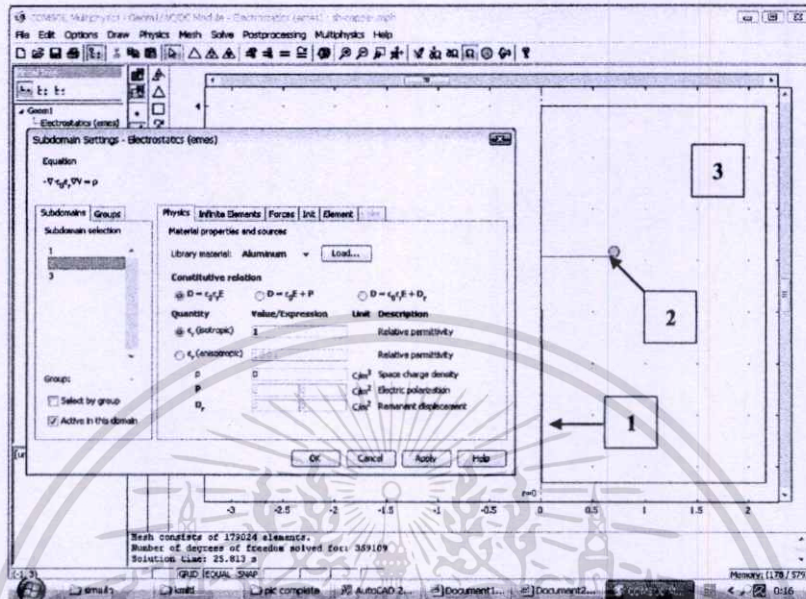
รูปที่ 3.16 การสเกลขนาดแบบจำลอง โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

- 7) ทำการกำหนดค่า Boundary Conditions ดังรูปที่ 3.17 โดย หมายเลข 1 คือ Axial Symmetry หมายเลข 2 คือ Electric potential หมายเลข 3 คือ Zero charge หมายเลข 4 คือ Ground



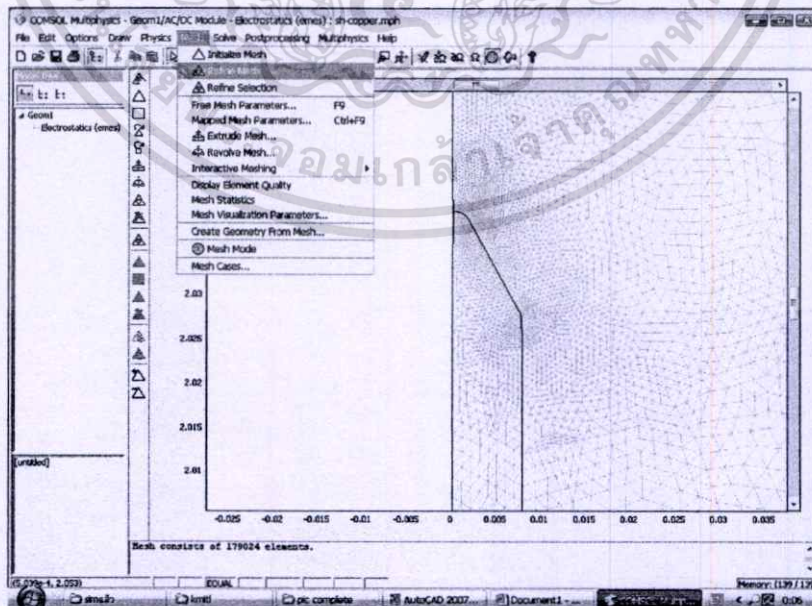
รูปที่ 3.17 การกำหนดค่า Boundary Setting ให้กับแบบจำลอง กรณีวิเคราะห์สนามไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) ทำการกำหนดค่า Subdomain Setting ดังรูปที่ 3.18 โดย หมายเลข 1 คือ วัสดุของแท่งตัวนำเป็นทองแดง หมายเลข 2 คือวัสดุของแผ่นอิเล็กโตรดเป็นอลูมิเนียม หมายเลข 3 คือ อากาศ



รูปที่ 3.18 การกำหนดค่า Subdomain Setting ให้กับแบบจำลอง กรณีวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

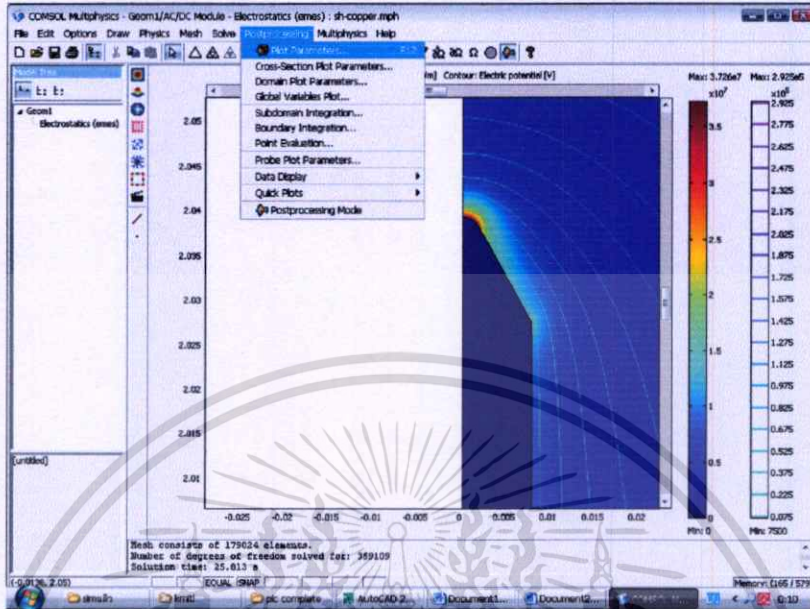
- 9) ทำการสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลองเพื่อที่โปรแกรมจะทำการประมวลผล ดังรูปที่ 3.19



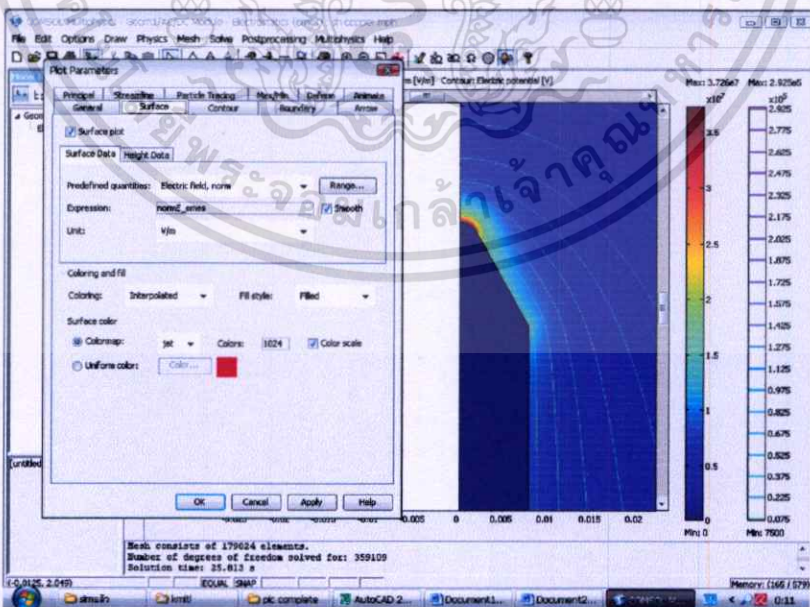
รูปที่ 3.19 การสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลอง โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 10) ทำการ Solve โปรแกรม เพื่อให้คำนวณหรือประมวลผลขอบเขตปัญหาที่ต้องการทราบ ดังรูปที่ 3.20 และกำหนดค่าต่างๆที่ต้องการแสดงผล ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 การประมวลผลขอบเขตปัญหาที่ต้องการทราบโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



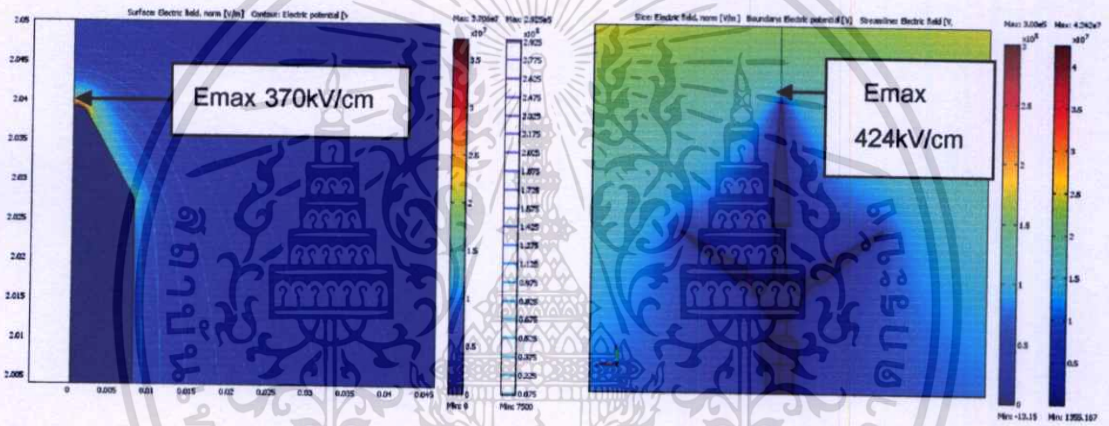
รูปที่ 3.21 การกำหนดค่าต่างๆ ที่ต้องการให้แสดงผลโดยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไฟไนต์เอลิเมนต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.1 ผลการทดลองจำลองสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ

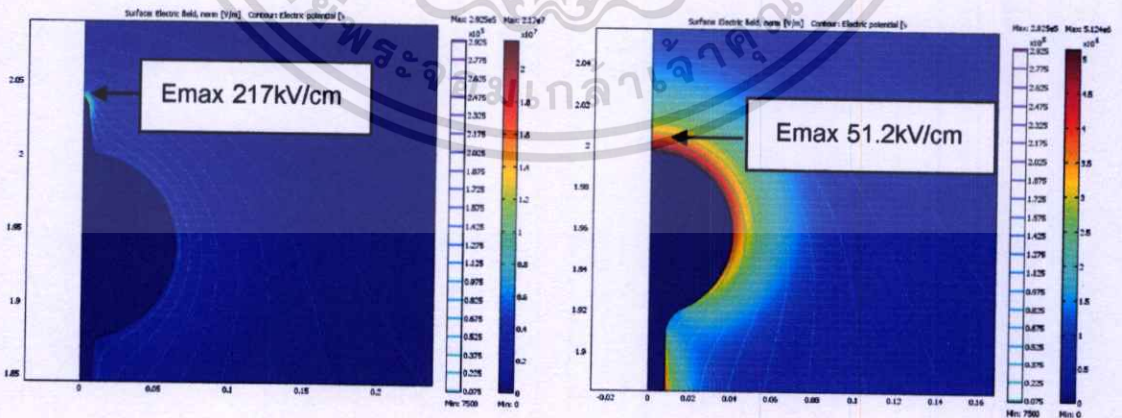
จากผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกัน 2 ลักษณะคือ ทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและดูการกระจายเส้นศักย์ไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้า ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน และทำการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่มีวัสดุต่างชนิดกัน โดยการทดลองจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า (Electric Potential) ให้กับโปรแกรม 300 กิโลโวลต์ ที่ระยะแกน 500 มม.

- 1) ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้า ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน โดยมีด้วยกัน 4 แบบ คือ 1.แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม 2.แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแฉก 3.แท่งตัวนำล่อฟ้าทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 125 มม.ปลายแหลม 4.แท่งตัวนำล่อฟ้าทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 80 มม. ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.22



(ก) ปลายแหลม

(ข) ปลายแฉก



(ค) ทรงกลมปลายแหลม

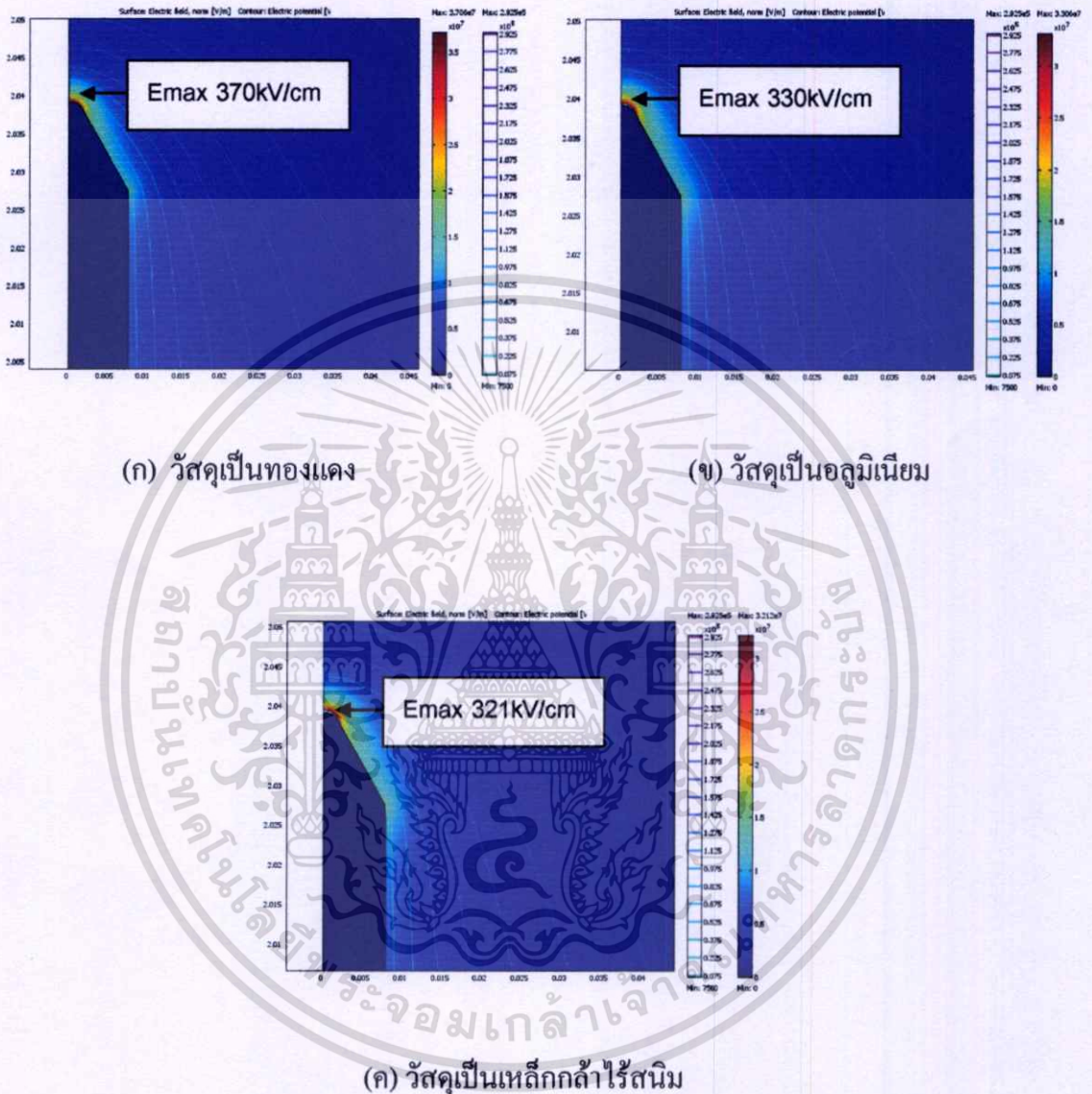
(ง) ทรงกลมขนาด ϕ 80 มม.

รูปที่ 3.22 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่รูปทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

แตกต่างกันจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้า ของแท่งตัวนำล่อฟ้า ปลายแหลม ที่มีวัสดุต่างกันนำมาเปรียบเทียบกับ โดยวัสดุ 3 ชนิด คือ 1.ทองแดง 2. อลูมิเนียม 3.เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ผลการทดลองดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุแตกต่างกัน จำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละชนิด ผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พบว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด รองลงมาเป็นแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแหลม, แบบทรงกลม ปลายแหลม และแบบทรงกลม ตามลำดับ แสดงว่าบริเวณปลายแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะสามารถสร้างสตริมเมอร์ได้เร็วกว่าแบบอื่นที่ทดลองด้วยกัน แต่ตัวนำล่อฟ้าที่เป็นแบบทรงกลมค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยจึงไม่มีการเกิดโคโรนาก่อนการเบรคความวุ้นหรือเกิดการเบรคความวุ้นโดยตรง และการทดลองจำลองแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแหลมวัสดุต่างชนิดกัน จะเห็นได้ว่าวัสดุที่เป็นทองแดง จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม แต่อย่างไรก็ตามค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดก็มีค่าไม่ต่างกันมากนัก จึงต้องมีการทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองดังกล่าว

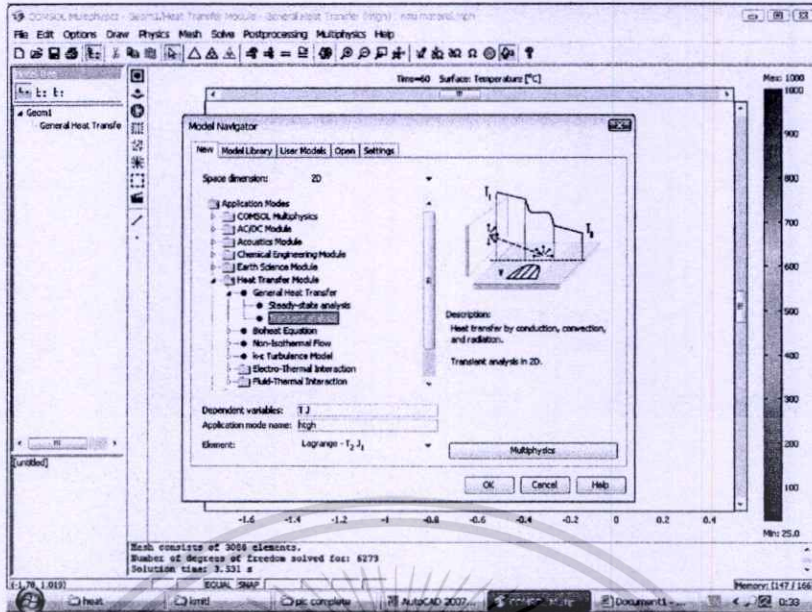
3.3.2 การจำลองผลทางด้านความร้อนของแท่งตัวนำล่อฟ้า โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองจะทำการเปรียบเทียบกัน 2 ลักษณะคือ ทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายความร้อนของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำมาจากวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งจากการทดลองเป็นการจำลองวัสดุด้วยกัน 4 ชนิด คือ 1. วัสดุที่เป็นเหล็ก (Iron) 2. วัสดุที่เป็นทองแดง 3. วัสดุที่เป็นอลูมิเนียม 4. วัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม และทำการเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นเหล็กชุบด้วยทองแดงที่ขนาดความหนาต่างๆกัน โดยเริ่มตั้งแต่ความหนาขนาด 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 ไมครอน โดยการทดลองจะทำการป้อนอุณหภูมิ (Temperature) ให้กับโปรแกรม 1000 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่ 1 และ 2000 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่ 2 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.3.2.1 การทดลองขั้นตอนที่ 1 เพื่อดูการกระจายความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

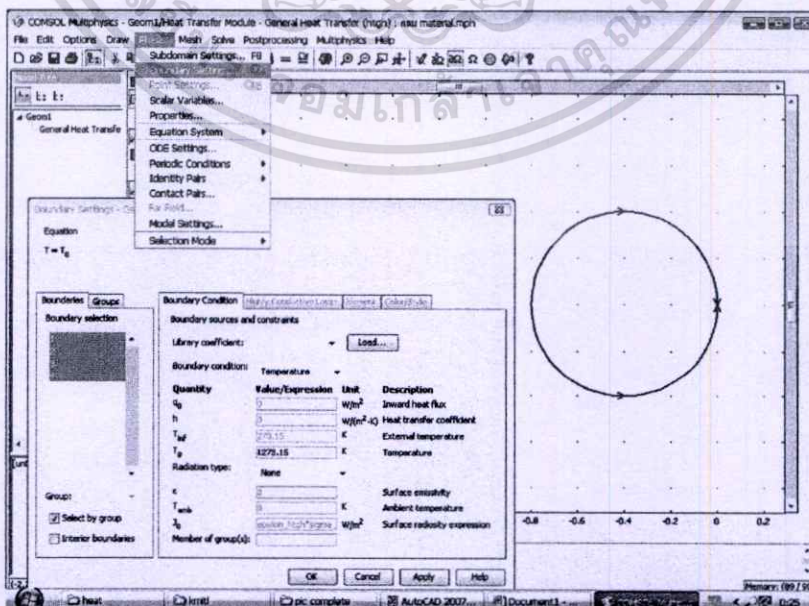
- 1) วาดโครงสร้างของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ ตรีศูณ CAD โดยเขียนแบบเป็นรูปตัดแท่งตัวนำล่อฟ้า เพื่อดูการกระจายของความร้อนที่แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ
- 2) ทำการเปิดโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 
- 3) เมื่อทำการเปิดโปรแกรมแล้ว ให้ทำการใส่ Space dimension เพื่อเลือกประเภทของแบบที่ทำการจำลอง และเลือก Application modes เพื่อเลือกปัญหาที่เราต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3.24 โดยเลือกเป็นแบบ 2D และ Heat Transfer Module/General Heat Transfer/Transient analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การเลือกรูปแบบของการจำลองและขอบเขตปัญหาทางด้านความร้อน โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

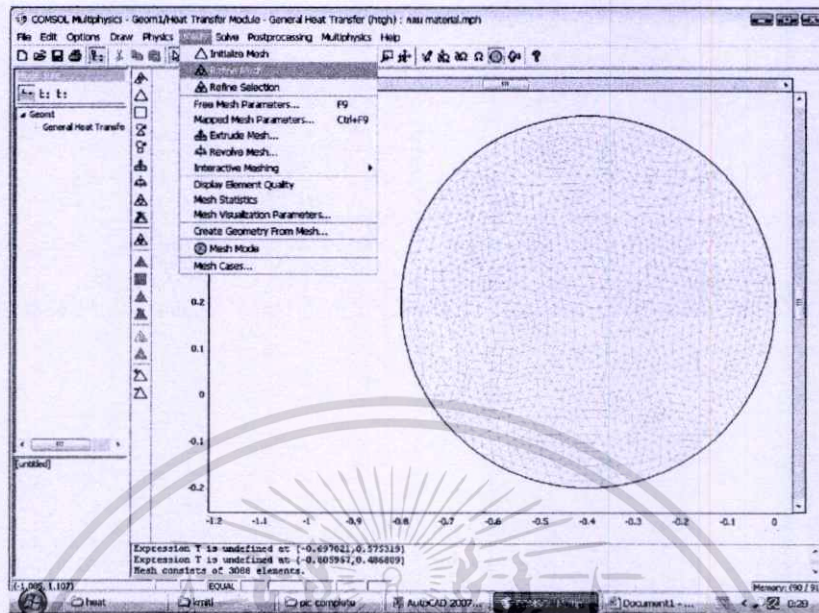
- 4) ทำการอิมพอร์ตแบบที่ได้วาดไว้เข้าไปในโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3 หลังจากนั้นทำการสเกลแบบให้มีหน่วยเป็นเมตร
- 5) ทำการกำหนดค่า Boundary Setting ดังรูปที่ 3.25 โดยให้เส้นขอบของแบบที่ทำการจำลองเป็น Temperature และป้อนค่าอุณหภูมิที่ต้องการจำลองที่ $T_0 = 1273.15 \text{ } ^\circ\text{K}$ หรือเท่ากับ $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

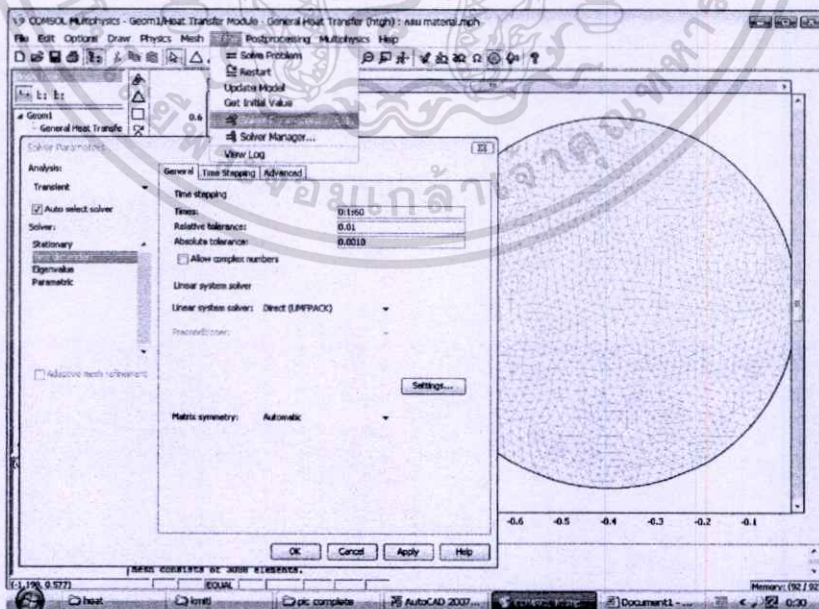
รูปที่ 3.25 การกำหนดค่า Boundary Setting ให้กับแบบจำลองกรณีวิเคราะห์ทางด้านความร้อน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ทำการสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลอง ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลอง กรณีขอบเขตปัญหาทางด้านความร้อน

8) ทำการกำหนดค่าเวลา ใน Solve Parameter กรณีที่พิจารณาการจำลองผลทางด้านความร้อนเป็นแบบ Transient Analysis ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 การกำหนดเวลาในการจำลอง กรณีขอบเขตปัญหาทางด้านความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์หรือสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

เป็นแบบ Transient analysis

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกำหนดค่า Boundary Setting ต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่ต้องการทราบ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. Temperature $T_0 = 2273.15 \text{ }^\circ\text{K}$ อุณหภูมิที่ป้อนให้กับแบบจำลอง
2. Heat flux $298.15 \text{ }^\circ\text{K}$
3. Heat flux $298.15 \text{ }^\circ\text{K}$
4. Highly conductive copper

Library material : Copper

K : 400 W/(m.K) Layer thermal conductivity

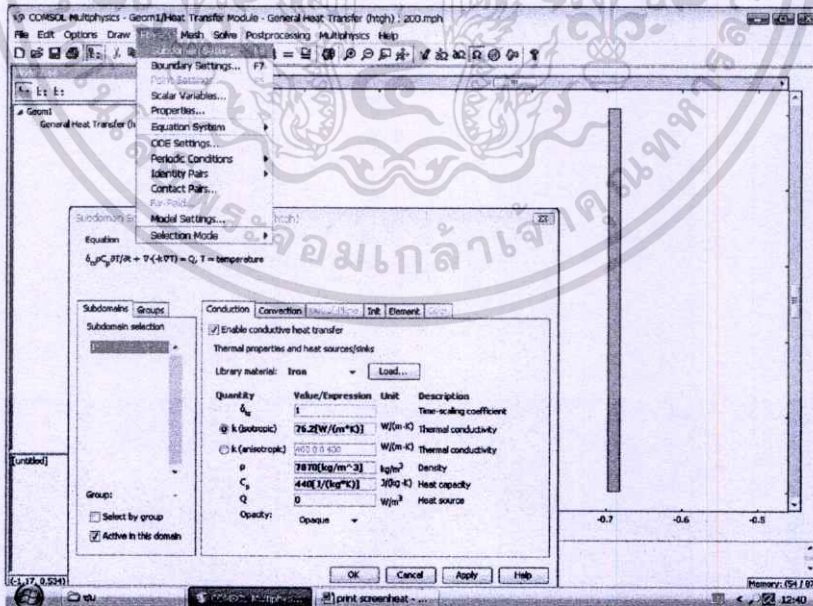
ρ_s : 8700 kg/m³ Layer density

$C_{p,s}$: 385 J/(kg.K) Layer heat capacity

d_s : 200e-6 Layer thickness

โดยค่าของ d_s เป็นการกำหนดความหนาของสารเคลือบในที่นี้คือ ทองแดง โดยจะทำการทดลองที่ความหนาดังแต่ 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 ไมครอน

- 10) ทำการกำหนดค่า Subdomain Setting ให้กับแบบจำลอง ดังรูปที่ 3.31 ทำการกำหนดค่าให้วัสดุเป็น Iron



รูปที่ 3.31 การกำหนดค่า Subdomain setting ขอบเขตทางด้านความร้อนให้กับแบบกรณี

การจำลองวัสดุที่มีการชุบด้วยทองแดง โดย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

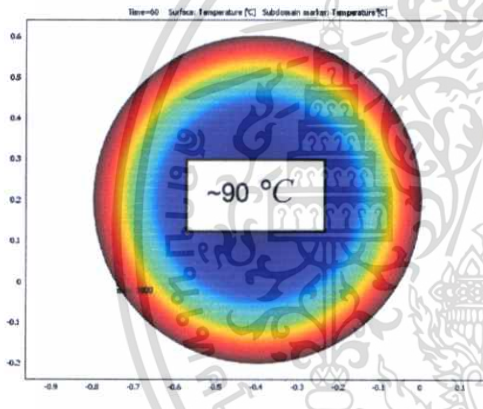
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 11) ทำการสร้าง Mesh ให้กับแบบจำลองโดยคำสั่งในโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.3
- 12) การกำหนดค่าเวลาที่ทำการจำลอง กรณีเลือกเป็นแบบ Transient analysis โดยกำหนดค่าที่ Solve parameter/General/Time dependent
- 13) ทำการ Solve ขอบเขตปัญหาที่ต้องการทราบ และสามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการในการแสดงผล ที่คำสั่ง Plot Parameter ในโปรแกรม

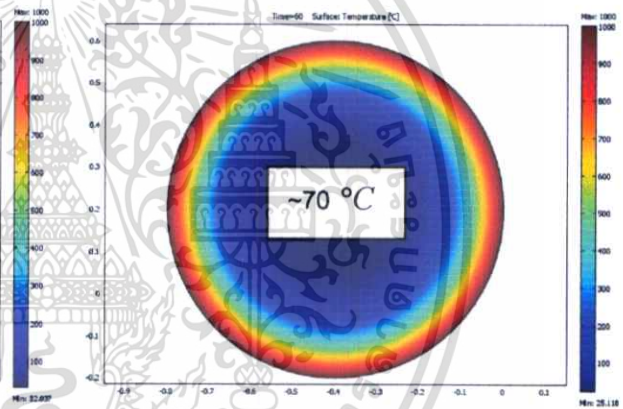
3.3.2.3 ผลการทดลอง กรณีศึกษาผลทางด้านความร้อนโดยโปรแกรม Comsol multiphysic 3.3

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. ทำการจำลองผลทางด้านความร้อนให้กับแท่งตัวนำล่อฟ้าเพื่อดูการกระจายของความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด 2. ทำการจำลองผลทางด้านความร้อนให้กับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีการเคลือบด้วยทองแดง ที่ขนาดความหนาต่างๆกัน ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

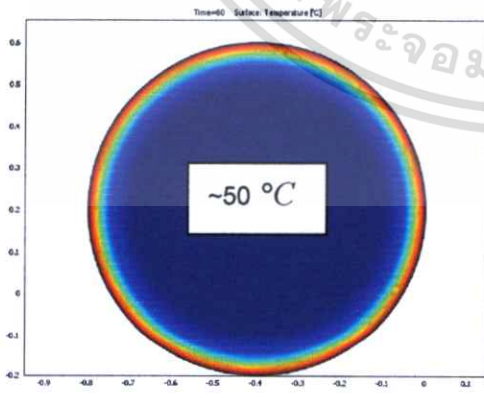
- 1) ผลจากการจำลองเพื่อดูการกระจายความร้อน ของวัสดุตัวนำล่อฟ้าแต่ละชนิด โดยป้อนอุณหภูมิที่ 1000°C และให้วัสดุมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25°C ดังรูปที่ 3.32



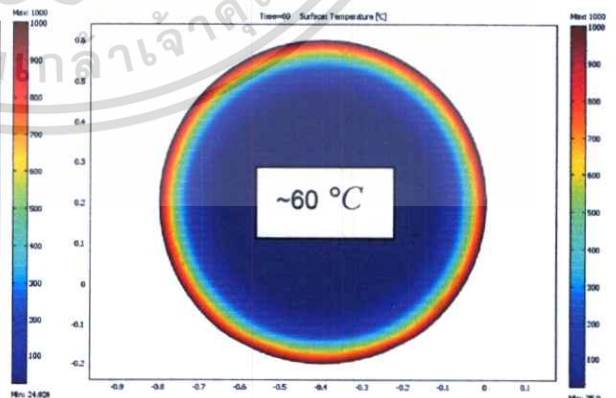
(ก) วัสดุเป็นทองแดง(Copper)



(ข) วัสดุเป็นอลูมิเนียม(Aluminum)



(ค) วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless)

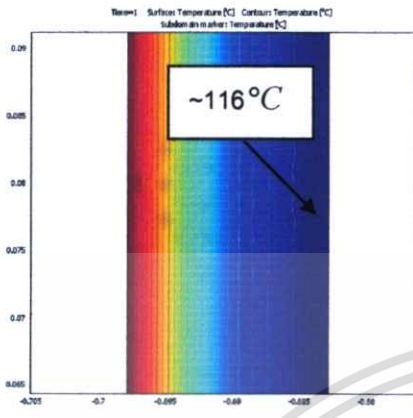


(ง) วัสดุเป็นเหล็ก (Iron)

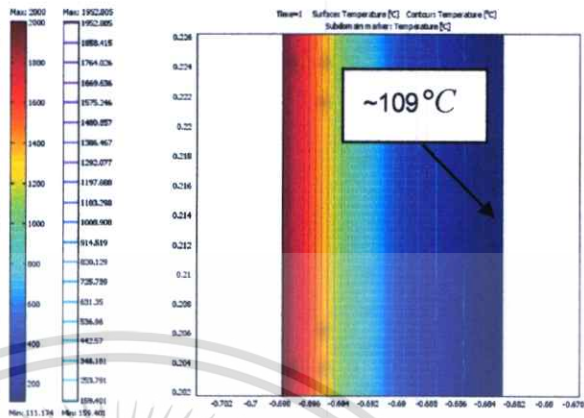
รูปที่ 3.32 ผลอุณหภูมิของหน้าตัดแท่งตัวนำล่อฟ้าวัสดุแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารสารวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

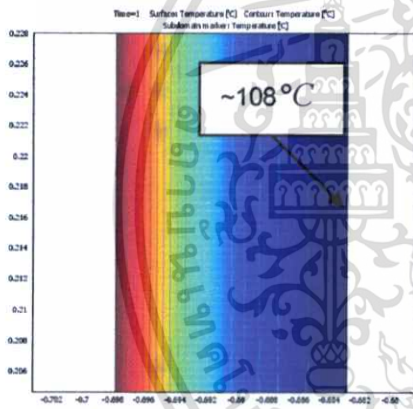
- 2) ผลจากการจำลองเพื่อดูการกระจายความร้อน ของตัวนำล่อฟ้าวัสดุเป็นเหล็กชุบด้วยทองแดงที่มีความหนาขนาดต่างๆกัน โดยป้อนอุณหภูมิที่ 2000°C และให้วัสดุมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25°C ดังรูปที่ 3.34



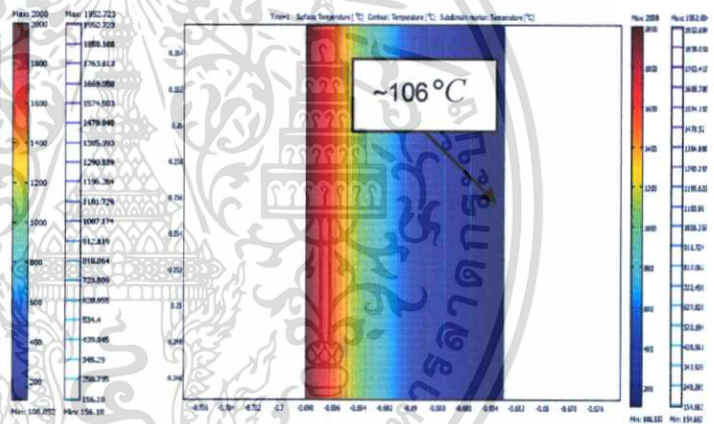
(ก) ความหนา 50 ไมครอน



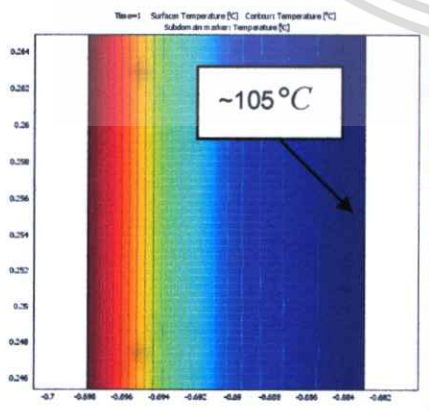
(ข) ความหนา 100 ไมครอน



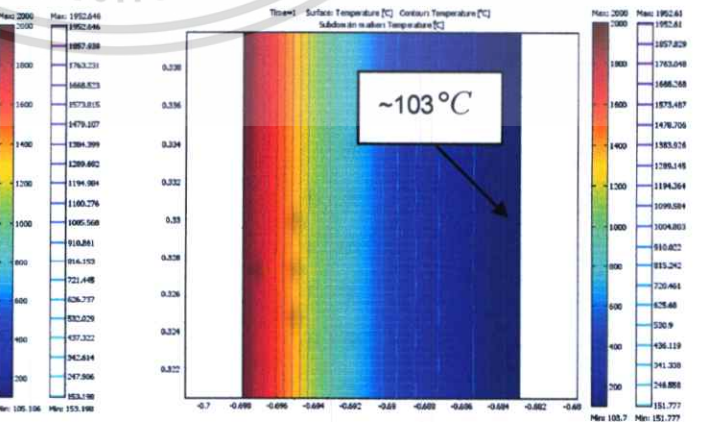
(ค) ความหนา 150 ไมครอน



(ง) ความหนา 200 ไมครอน

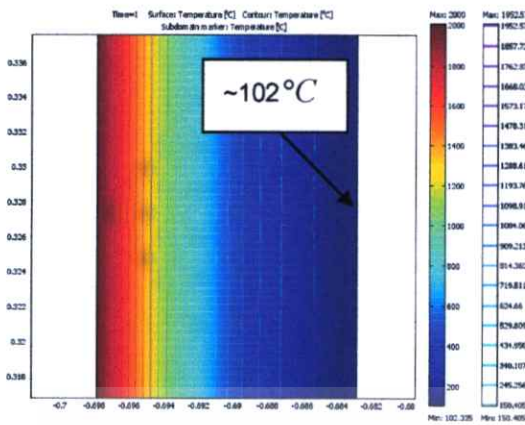


(จ) ความหนา 250 ไมครอน

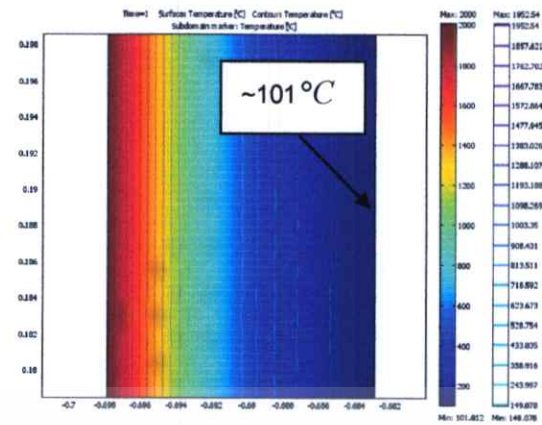


(ฉ) ความหนา 300 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ความหนา 250 ไมครอน



(ค) ความหนา 300 ไมครอน

รูปที่ 3.33 ผลของอุณหภูมิตัวนำล่อไฟฟ้าวัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดงที่ความหนาต่างๆ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองจำลองผลทางความร้อนให้กับแท่งตัวนำล่อไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุแต่ละชนิด โดยป้อนอุณหภูมิที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วินาที จะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำที่เป็นทองแดงมีการนำความร้อนได้รวดเร็วกว่าวัสดุอื่นที่ทดลอง รองลงมาจะเป็นวัสดุอลูมิเนียมซึ่งมีการกระจายความร้อนใกล้เคียงกับทองแดง ฉะนั้นเมื่อมีอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ไฟฟ้าทำให้วัสดุที่เป็นทองแดงหรืออลูมิเนียมมีการนำความร้อนสูง และเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมละลายของวัสดุดังกล่าวก็อาจทำให้เกิดความเสียหายได้ แต่วัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กมีการกระจายความร้อนในตัววัสดุได้ช้ากว่า จึงทำให้อุณหภูมิกระจายถึงจุดแกนกลางแท่งอาจไม่สูงเท่าไร แต่ที่ผิวของวัสดุมีอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจทำให้มีผลกับผิวโลหะได้ และจากการทดลองจำลองความร้อนให้กับแท่งตัวนำล่อไฟฟ้าวัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง โดยป้อนอุณหภูมิที่ 2000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วินาที จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการชุบทองแดงที่หนามากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ผิวโลหะลดลง ซึ่งที่ความหนา 50 ไมครอน มีอุณหภูมิที่ผิวสูงถึง 116 องศาเซลเซียส แต่เมื่อชุบทองแดงความหนามากกว่า 100 ไมครอน อุณหภูมิจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ฉะนั้นในการชุบทองแดงถ้าความหนายังมากอุณหภูมิที่ผิวก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ก็ควรคำนึงถึงผลทางด้านคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในการล่อฟ้าด้วย

บทที่ 4

การทดสอบ และวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวนำล่อฟ้า

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบแท่งตัวนำเสาต่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของตัวนำล่อฟ้าเพื่อว่าคุณลักษณะของตัวนำล่อฟ้าแบบไหนที่มีประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่า และนำผลวิเคราะห์ที่ได้ไปศึกษาทดสอบเสาต่อฟ้าในลักษณะต่างๆ เช่น การทดสอบวัสดุที่ต่างชนิดกันของตัวนำล่อฟ้าเพื่อดูผลว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร การทดสอบตัวนำล่อฟ้าที่มีขนาดต่างกัน และการทดสอบผลทางด้านความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า ตลอดจนนำผลทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวนำล่อฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเสาต่อฟ้าหรือใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

จากจุดมุ่งหมายของการศึกษาวิจัยเพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ของตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ สิ่งสำคัญที่ต้องศึกษา คือ การทดสอบตัวนำล่อฟ้าที่ใช้กันทั่วไปเพื่อดูลักษณะสมบัติของตัวนำล่อฟ้าแบบต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วพลบ และแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วพลบ และบวก รวมถึงการทดสอบผลทางความร้อนภายใต้กระแสไฟฟ้า AC ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1) ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้กันทั่วไป และที่ทำการออกแบบขึ้นมาเอง 1-2 แบบเพื่อใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบ และศึกษาคุณลักษณะของตัวนำล่อฟ้าแต่ละแบบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
- 2) ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแหลม ที่มีวัสดุแตกต่างกัน แต่ละชนิด เพื่อศึกษาผลของวัสดุที่ใช้ทดสอบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
- 3) ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่มีขนาดตัวนำต่างกัน เพื่อศึกษาผลของขนาดตัวนำล่อฟ้า แต่ละขนาดว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
- 4) ทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้า แต่ละแบบที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดลองในข้อ 1-3 เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าว่าแบบไหนมีการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่า
- 5) ทดสอบตัวนำล่อฟ้า เพื่อศึกษาผลทางความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า AC เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อวัสดุที่ใช้ทำตัวนำล่อฟ้า

4.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบที่ใช้กันทั่วไป

คุณลักษณะทางไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนด และเกณฑ์พิจารณาถึงประสิทธิภาพในการล่อฟ้าของแท่งตัวนำ ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแต่ละแบบอาจมีความแตกต่างกันนั้นก็เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หมายความว่าประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ก็แตกต่างกันด้วย ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

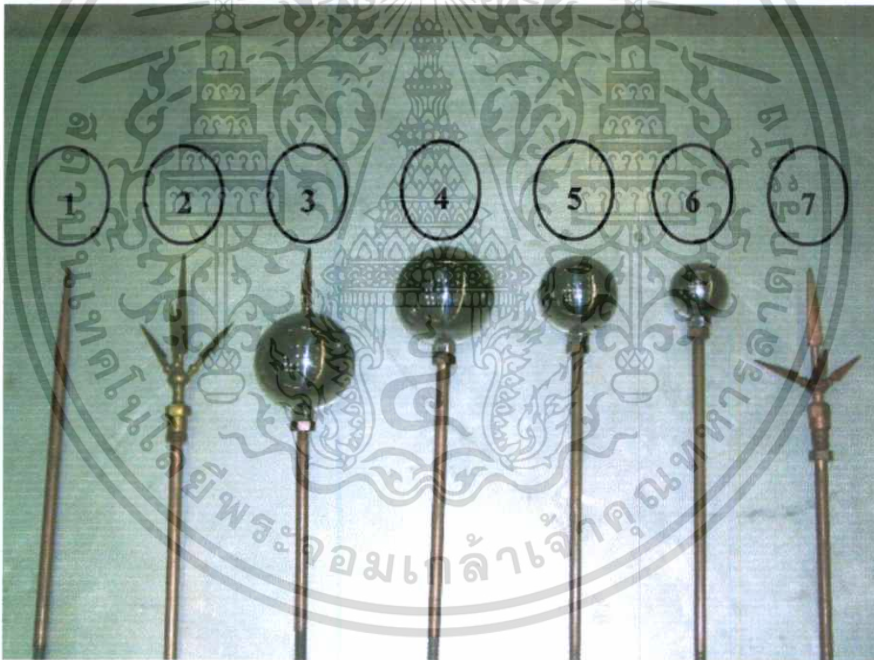
4.2.1 การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ (Breakdown Voltage) หมายถึง แรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดแล้วทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด ถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งโดยประมาณ และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า คือเป็นช่วงต่อระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทั้งตัวเองไม่ได้ ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทั้งตัวเองได้ ช่วงต่อดังกล่าว เกิดขึ้นได้เมื่อแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอวาลานซ์มากพอทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง

4.2.2 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบได้ถูกจัดทำขึ้นที่ห้องทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีลำดับขั้นตอนในการเตรียมการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้กันทั่วไป และที่ออกแบบขึ้นมาเองเพื่อที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แท่งตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้ทดสอบ

จากรูปที่ 4.1 มีแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ 7 แบบด้วยกัน คือ

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมเหล็กชุบทองแดง
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแฉกวัสดุทำมาจากทองสัมฤทธิ์ (Bronze)
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าทรงกลมปลายแหลม (ทรงกลมเป็นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนปลายแหลมเป็นเหล็กชุบทองแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.แท่งตัวนำล่อฟ้าทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) 125 มม. วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

5.แท่งตัวนำล่อฟ้าทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) 100 มม. วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

6.แท่งตัวนำล่อฟ้าทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) 80 มม. วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

7.แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแฉกวัสดุทำมาจากเหล็กชุบทองแดง

แท่งตัวล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งตัวนำ (ϕ) 16 มม. ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานตาม IEC 62305-3

- 2) จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าจะทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 4.2(ก) และแรงดันอิมพัลส์ ดังรูปที่ 4.2(ข) โดยอุปกรณ์มีดังนี้

- (ก) 1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ 600 kV 10mA
 2. ความต้านทานจำกัดกระแสขนาด 6 M Ω
 3. แผ่นอิเล็กโตรดรูมิเนียมนีเยมเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) 1400 มม.หนา 2 มม.
 4. แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ
 5. ฐานรองรับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ
- (ข) 1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s 200 kV
 2. แผ่นอิเล็กโตรดรูมิเนียมนีเยมเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) 1400 มม.หนา 2 มม.
 3. แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ
 4. ฐานรองรับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ

4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

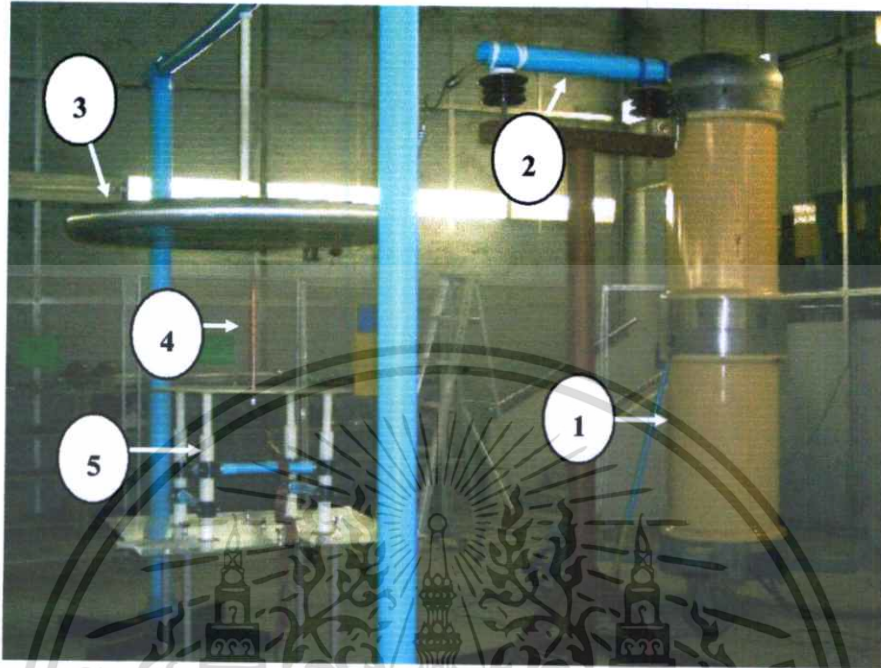
การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวนซ์ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้าและบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกคาวนซ์โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. จัดเตรียมแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ ดังรูปที่ 4.1
2. ต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 4.2 (ก) เป็นการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ และรูปที่ 4.2 (ข) เป็นการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์

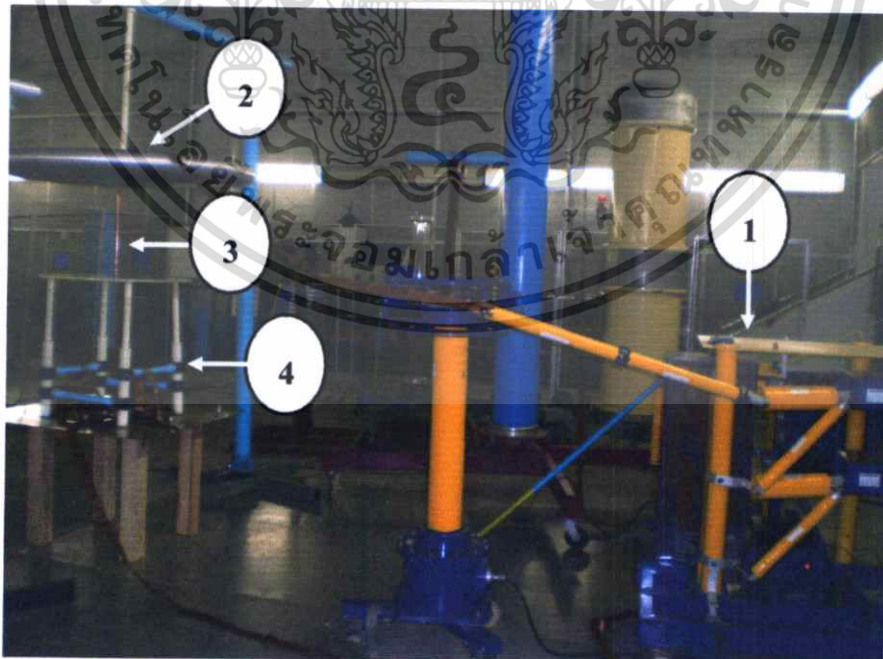
สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-31 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-764 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 73-76 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าแรงดันเบรกควานที่เกิดขึ้นตรวจจับ โดย Voltage divider สามารถอ่านค่าแรงดันทางด้านต่ำได้แล้วเปรียบเทียบกับทางด้านแรงสูง



(ก) สภาวะการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



(ก) สภาวะการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการทดสอบ

4.2.4.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพล

ผลที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าทีละแท่ง และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพลจนกระทั่งเกิดการเบรกดาว์นของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้า พร้อมบันทึกค่าแรงดันเบรกดาว์น โดยมีระยะแกปรหว่างตัวนำล่อฟ้ากับแผ่นอิเล็กโตรโคลูมิเนียม ที่ระยะ 50, 100, 150, 200, 250, 300 มม.ทำการป้อนแรงดันจำนวน 3 ครั้งต่อหนึ่งระยะ และหาค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันเบรกดาว์นของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้ทดสอบ

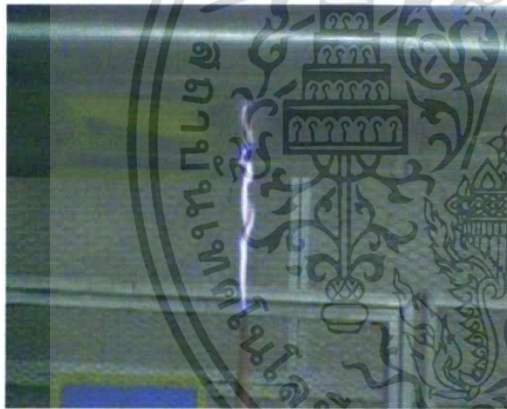
รูปแบบตัวนำล่อฟ้า	แรงดัน ไฟฟ้าเบรกดาว์นเฉลี่ยที่ระยะแกปร่างต่างๆ (kV)					
	50 มม.	100 มม.	150 มม.	200 มม.	250 มม.	300 มม.
ปลายแหลมรูปทองแดง	29.20	41.20	65.40	90.10	116.00	134.00
ปลายแหลมรูปทองแดง	29.40	43.80	67.10	91.50	118.00	136.00
ทรงกลมปลายแหลม	32.10	47.70	69.80	94.30	120.00	138.00
ปลายแฉก (Bronze)	32.90	51.30	72.70	96.50	123.00	146.00
ทรงกลม ϕ 80 มม.	78.90	104.00	117.00	135.00	146.00	159.00
ทรงกลม ϕ 100 มม.	83.40	114.00	139.00	161.00	173.00	190.00
ทรงกลม ϕ 125 มม.	84.70	128.00	158.00	180.00	191.00	214.00

2) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าทีละคู่ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพลจนกระทั่งเกิดการเบรกดาว์นของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ พร้อมบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาว์นที่เกิดขึ้นกับตัวนำล่อฟ้า การทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาว์นจะทดสอบ 10 ครั้งต่อหนึ่งคู่ แท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแท่งจะมีการเปรียบเทียบซึ่งกันและกันจนครบ โดยมีการทดสอบที่ระยะแกปร่าง 200, 300 มม. ซึ่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบจะมีอยู่ 5 แบบ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพิจารณาจากค่าแรงดันเบรกดาว์น ผลการทดสอบจำนวนครั้งของการเบรกดาว์นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาว์นของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ใช้ทดสอบ

รูปแบบตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งการเบรกคาว์น	
	ระยะแก๊ป 200 มม.	ระยะแก๊ป 300 มม.
ปลายแหลมชุบทองแดง	37	35
ปลายแหลมชุบทองแดง	25	30
ทรงกลมปลายแหลม	25	23
ปลายแหลม (Bronze)	13	12
ทรงกลม ϕ 80 มม.	0	0

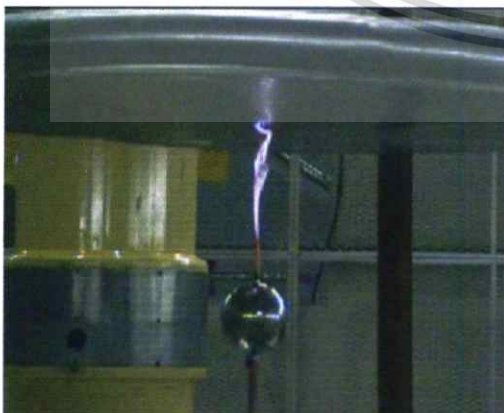
ลักษณะของการเกิดเบรกคาว์นของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาว์น ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพล



(ก)



(ข)



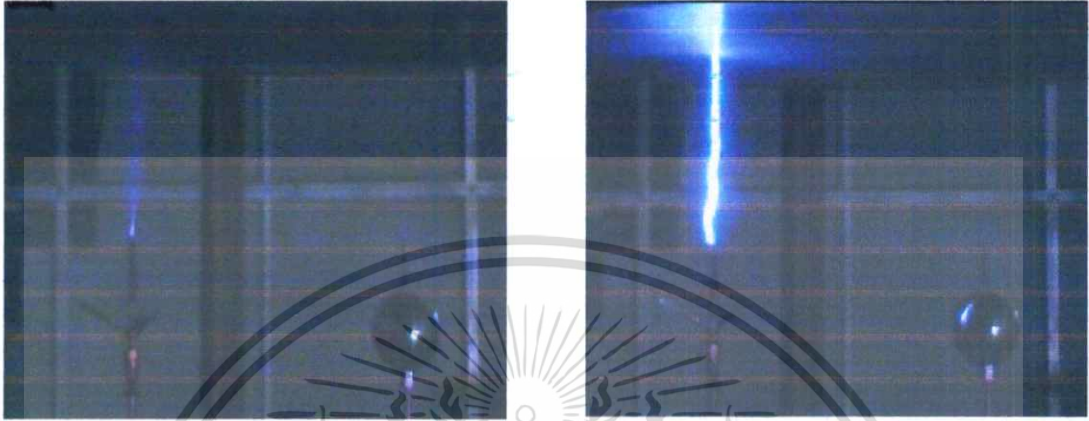
(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 การเบรกคาว์นของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการสร้างสตรีมเมอร์และการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วถลน



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 การสร้างสตรีมเมอร์ของตัวนำล่อฟ้าและการเบรกดาวน์ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ กรณีทดสอบเปรียบเทียบกัน ภายใต้เงื่อนไขทดสอบกระแสตรง

4.2.4.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วถลน และชั่วววก

ผลที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ละหนึ่งแท่ง และทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์โดยค่าที่ทำการป้อนได้มาจากการประมาณ ในตารางการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแถบทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 และทำการป้อนแรงดัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่ป้อนต้องทำให้เกิดการเบรกดาวน์ เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการเปรียบเทียบกันและดูจำนวนครั้งการเบรกดาวน์

2) เมื่อได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์แต่ละแท่งตัวนำแล้ว ก็ทำการป้อนแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ เนื่องจากในกรณีที่ทำการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ จำเป็นต้องป้อนแรงดันให้สูงพอที่จะทำให้แต่ละแท่งตัวนำมีโอกาสเกิดการเบรกดาวน์ได้ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบจะมีการทดลองจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่งระยะแถบ โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-32 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-764 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 72-76 % แรงดันทดสอบ 32-98 kV

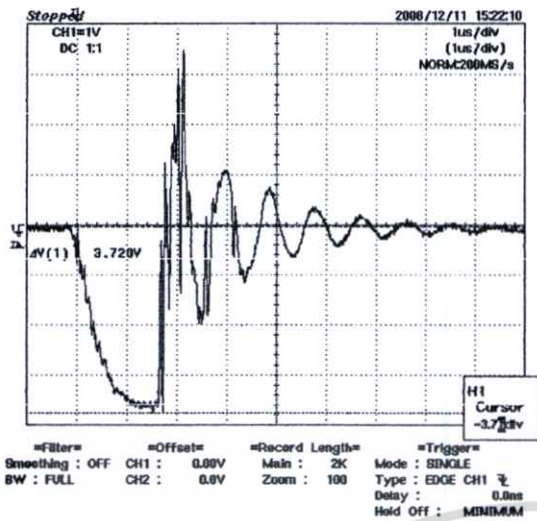
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาวน์ของอากาศผ่านตัวนำท่อฟ้าแบบฟาราเดย์ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ

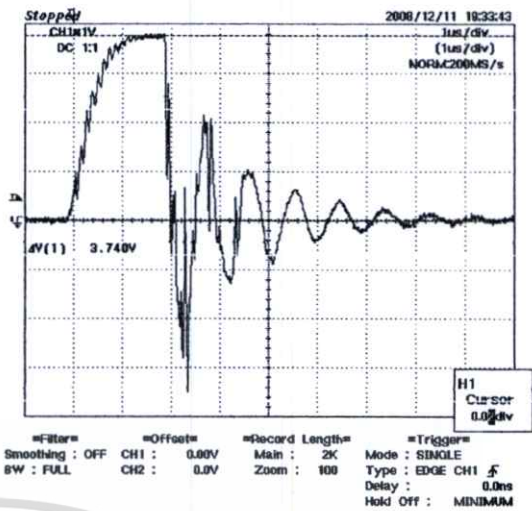
ระยะแก๊ป	รูปแบบแท่งตัวนำท่อฟ้า	จำนวนครั้งการเบรกคาวน์	
		อิมพัลส์ขั้วบวก	อิมพัลส์ขั้วลบ
10 มม.	ปลายแฉกชุบทองแดง	2	3
	ปลายแหลมชุบทองแดง	-	-
	ทรงกลมปลายแหลม	3	2
	ปลายแฉกทองสัมฤทธิ์ (Bonze)	15	15
	ทรงกลมขนาด ϕ 80 มม.	-	-
30 มม.	ปลายแฉกชุบทองแดง	10	7
	ปลายแหลมชุบทองแดง	1	3
	ทรงกลมปลายแหลม	3	4
	ปลายแฉกทองสัมฤทธิ์ (Bonze)	4	6
	ทรงกลมขนาด ϕ 80 มม.	2	-
50 มม.	ปลายแฉกชุบทองแดง	7	7
	ปลายแหลมชุบทองแดง	5	6
	ทรงกลมปลายแหลม	3	5
	ปลายแฉกทองสัมฤทธิ์ (Bonze)	4	2
	ทรงกลมขนาด ϕ 80 มม.	1	-

จากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทั้งขั้วบวก และขั้วลบ จะเห็นว่ารูปคลื่นเบรกคาวน์จะเป็นรูปคลื่นตัดหางคลื่น ดังรูปที่ 4.5

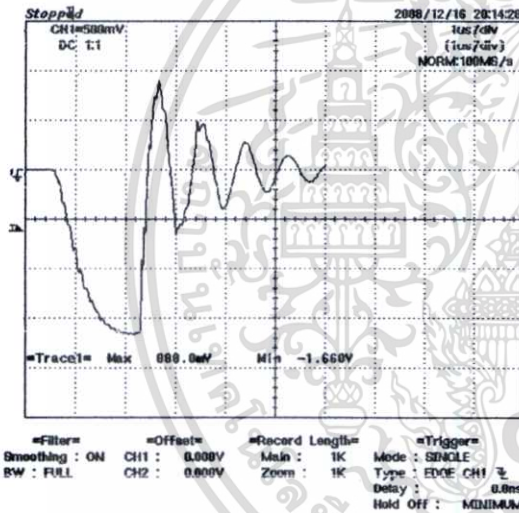
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



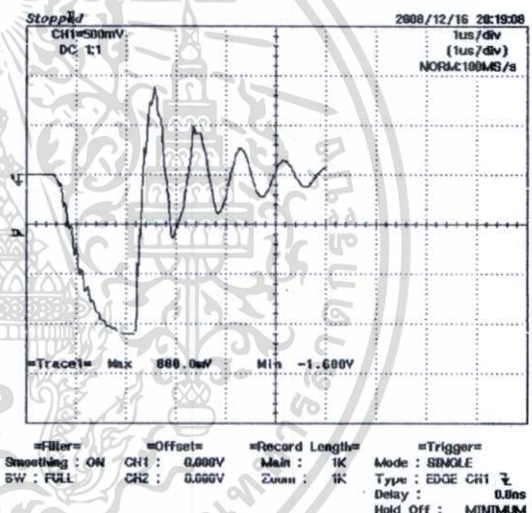
(ก) รูปคลื่นตัดชั่วพล



(ข) รูปคลื่นตัดชั่วววก



(ก) รูปคลื่นตัดหางคลื่นชั่วพล



(ข) รูปคลื่นตัดหางคลื่นชั่วพลที่เวลาผ่านไป

5 นาทีหลังจากทำการทดสอบครั้งแรก

รูปที่ 4.5 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหางคลื่นทั้งชั่วววกและลบ กรณีทดสอบ

ตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์

4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

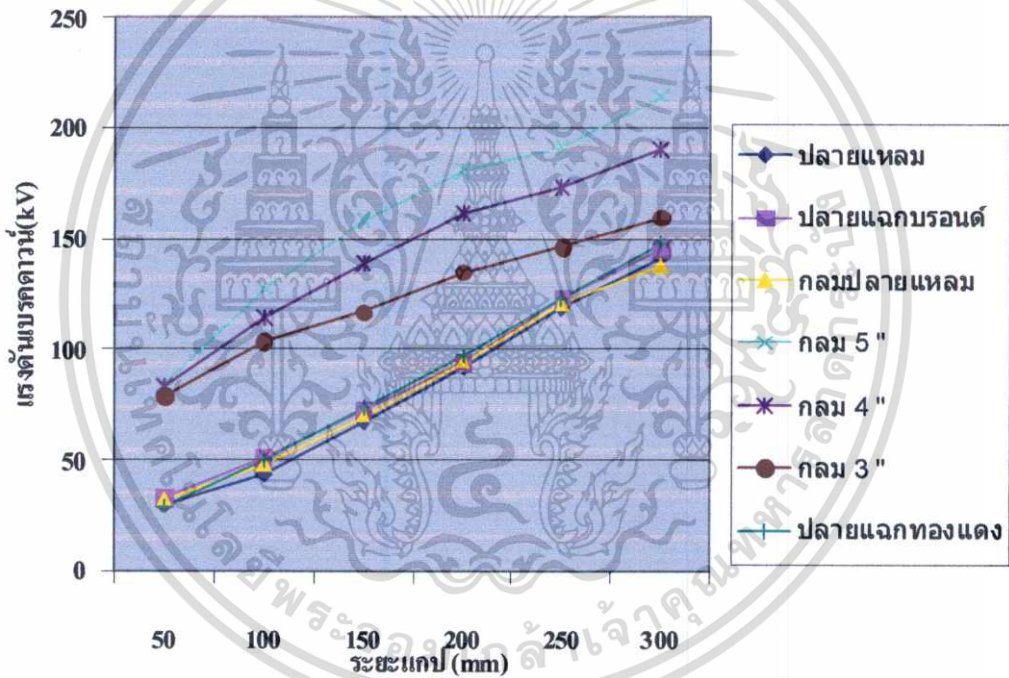
จากการทดสอบ ค่าแรงดันที่เกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ภายได้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วพล ผลปรากฏว่าแท่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมมีค่า

แรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าแบบที่เป็นทรงกลม เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายตัวนำ

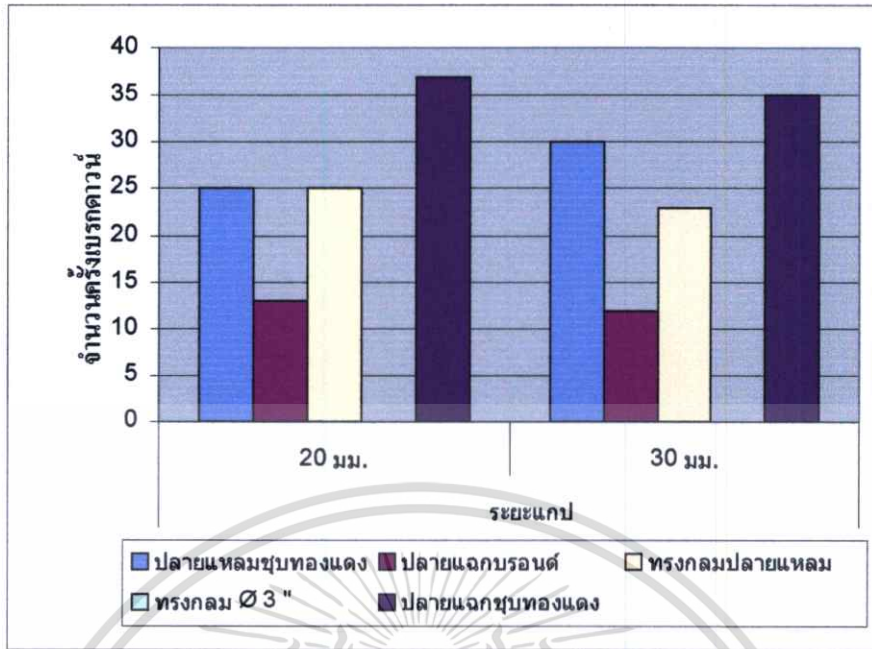
ล่อฟ้าที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าแบบทรงกลม ทำให้เวลาที่ป้อน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเข้าไปเกิดเบรกควานได้ง่ายที่ระดับแรงดันต่ำกว่า ดังรูปที่ 4.6 และจากการทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างแท่งตัวนำเพื่อดูจำนวนครั้งในการเบรกควาน ดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ชัดเจนว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแฉกชุกทองแดงมีจำนวนครั้งการเบรกควานมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ข้อสังเกตที่ได้จากการทดสอบครั้งนี้ จะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแฉก ที่ทำจากวัสดุเป็นทองสัมฤทธิ์มีปลายของแท่งตัวนำแหลมกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน แต่กลับไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการสร้างสตรีมเมอร์ดีกว่าแบบปลายแฉกชุกทองแดง, แบบปลายแหลมชุกทองแดง และแบบทรงกลมปลายแหลม การทดสอบเปรียบเทียบกันของแท่งตัวนำล่อฟ้า ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์มีความสอดคล้องกับแรงดันกระแสตรงที่ระยะแกปทดสอบมีระยะห่างมากขึ้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันเบรกควานของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ทำการทดสอบในระยแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง ขั้วลบ



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความของแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ที่ทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วพล

4.2.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันของเสาหล่อฟ้าแบบแฉกขุบทองแดง และปลายแหลมขุบทองแดงมีค่าแรงดันเบรกความต่ำกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน เนื่องจากแท่งตัวนำล่อฟ้าดังกล่าวมีความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่าแบบอื่น และจากการทดสอบดูจำนวนครั้งการเบรกความทั้งแรงดันกระแสตรงชั่วพล และแรงดันอิมพัลส์ จะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบแฉกขุบทองแดงมีแนวโน้มที่จะการเบรกความได้ง่าย สิ่งที่ได้จากการทดลองดังกล่าวทำให้เกิดข้อสังเกตว่า ถึงแม้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบแฉกวัสดุเป็นทองสัมฤทธิ์ (Bonze) มีปลายที่แหลมคมกว่าแบบอื่นซึ่งน่าจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายที่สูงกว่าแบบอื่น และเบรกความได้ง่ายกว่าแบบอื่น แต่กลับมีแนวโน้มของการเบรกความน้อยกว่าแบบอื่น ฉะนั้นแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ ไม่เพียงแต่รูปลักษณะของเสาหล่อฟ้า แต่ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าอีกด้วย

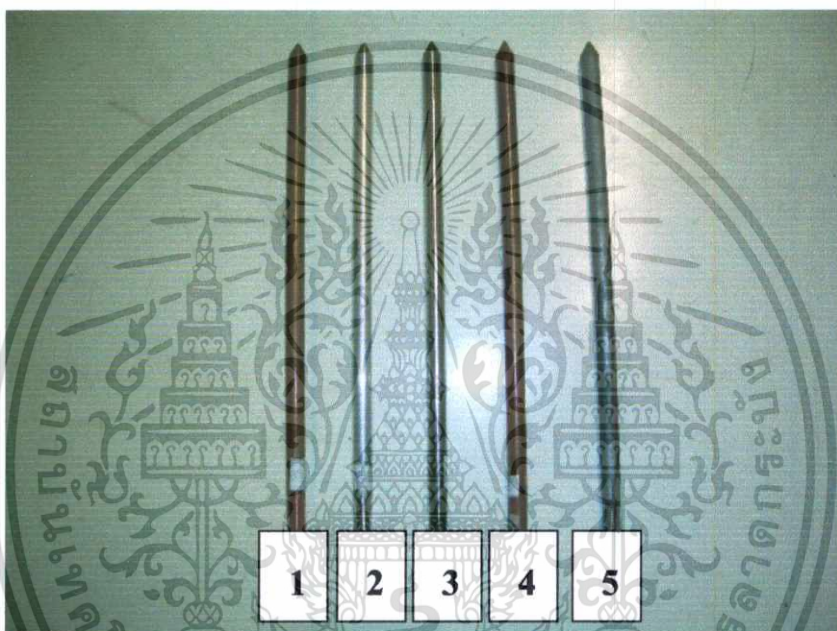
4.3 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่มีวัสดุต่างชนิดกัน

การทดลองมีลักษณะคล้ายกับ การทดลองในหัวข้อที่ 4.2 เพียงแต่จะมีการทดสอบของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่ทำมาจากวัสดุที่แตกต่างกัน เพื่อดูคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งเสาเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตัวนำล่อฟ้าแต่ละแท่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การเตรียมการทดสอบ

นำแท่งตัวนำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ความยาว 500 มม. และทำจากวัสดุต่างชนิดกัน ตามมาตรฐาน IEC 62305-3 ระบุวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าได้คือ ทองแดง, เหล็กชุบทองแดงหนาไม่น้อยกว่า 50 ไมครอน (μm), อลูมิเนียม, เหล็กชุบกัลวาไนท์ (Hot dipped galvanized steel) ความหนาไม่น้อยกว่า 50 μm , เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และนำมาเกลึงทำปลายที่มีลักษณะเป็นปลายแหลม และเตรียมความพร้อมของแท่งตัวนำล่อฟ้าในการทดสอบ ดังกล่าวดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ ที่ทำการทดสอบ
แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดงความหนา 250 μm
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเป็นอลูมิเนียม
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)
4. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเป็นทองแดง
5. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเป็นเหล็กชุบกัลวาไนท์ 100 μm

4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้าและบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกความถี่โดยการทดสอบจะทำในลักษณะเดียวกันกับ หัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งมีการทดสอบภายใต้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เองแรงดันกระแสตรงชั่วขณะและแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วขณะ และลบ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทดสอบภายใต้แรงดันกระแสตรงชั่วลบ และการทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก และชั่วลบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.3.1 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ

1) การทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ เพื่อดูลักษณะการเกิดสตริมเมอร์ และค่าแรงดันเบรกคาวนเพื่อดูประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์โดยพิจารณาถึงวัสดุว่ามีผลต่อการเกิดเบรกคาวนอย่างไร และการทดสอบเหมือนกับหัวข้อที่ 4.2.4.1 โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.4

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 28-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-764 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 77-79 %

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันเบรกคาวนของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ

วัสดุ ตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกคาวนที่ระยะแก๊ปต่างๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
ทองแดงล้วน	1	38.50	49.81	68.71	91.61	117.99	139.59
	2	37.96	49.57	69.17	91.20	116.64	139.05
	3	38.63	49.65	68.95	90.74	116.91	139.32
	เฉลี่ย	38.36	49.68	68.94	91.18	117.18	139.32
อลูมิเนียม	1	41.36	54.24	70.49	94.17	120.42	142.56
	2	40.98	52.92	71.68	93.60	120.15	142.56
	3	40.52	53.46	72.63	93.85	120.15	142.29
	เฉลี่ย	40.95	53.54	71.60	93.87	120.24	142.47
เหล็กกล้า ไร้สนิม (Stainless)	1	42.17	56.13	72.33	92.98	117.72	141.75
	2	41.22	55.70	71.98	92.20	117.18	140.94
	3	42.44	55.45	72.36	93.15	118.26	141.48
	เฉลี่ย	41.94	55.76	72.22	92.78	117.72	141.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ค่าแรงดันเบรกคาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

วัสดุ ตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่ระยะแก๊ปต่างๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
เหล็กชุบ กัลวาไนท์ (100 μ m)	1	30.42	50.70	72.52	96.33	117.72	139.86
	2	31.72	50.76	72.98	95.85	116.91	140.13
	3	30.83	49.59	73.35	97.68	118.26	140.67
	เฉลี่ย	30.99	50.35	72.95	96.60	117.90	140.21
เหล็กชุบ ทองแดง (250 μ m)	1	31.91	52.21	75.60	99.44	121.23	144.18
	2	32.45	52.38	77.32	97.74	120.69	142.83
	3	29.94	44.92	77.40	98.68	120.15	143.91
	เฉลี่ย	31.43	49.84	76.77	98.62	120.69	143.64

2) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละชนิดพร้อมกันทั้งหมดบนฐานทดสอบ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบจนกระทั่งเกิดการเบรกคาวน์ พร้อมบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกคาวน์ การทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเกิดเบรกคาวน์จะทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้า 20 ครั้งต่อระยะแก๊ป โดยมีการทดสอบที่ระยะแก๊ป 300, 400, 500 มม. ซึ่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบจะมีอยู่ 5 ชนิด ดังรูปที่ 4.9 ผลการทดสอบจำนวนครั้งของการเบรกคาวน์ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

วัสดุของแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งการเบรกคาวน์		
	300 มม.	400 มม.	500 มม.
ทองแดงล้วน(copper)	8	8	11
อลูมิเนียม (aluminium)	6	4	3
เหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless steel)	2	4	4
เหล็กชุบกัลวาไนท์ (Hot dipped Galvanized)	2	2	1
เหล็กชุบทองแดง	2	2	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการสร้างสตริมเมอร์และการเกิดเบรกดาวนของแท่งตัวนำล่อฟ้ากรณีทดสอบเปรียบเทียบ
ดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 การเกิดสตริมเมอร์ของตัวนำล่อฟ้าและเบรกดาวนของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า
ปลายแหลมวัสดุชนิดต่างๆ กรณีทดสอบเปรียบเทียบกัน

4.3.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ และชั่วบวก ผลที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ละหนึ่งแท่ง และทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์โดย
ค่าที่ทำการป้อนได้มาจากการประมาณ ในตารางการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของแถบทรง
กลมตามมาตรฐาน IEC 60052 และทำการป้อนแรงดัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่ป้อนต้องทำให้เกิด
การเบรกดาวน เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการเปรียบเทียบกันและดูจำนวนครั้งการเบรกดาวน

2) เมื่อได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนแต่ละแท่งตัวนำแล้ว ก็ทำการป้อนแรงดันให้
มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน เนื่องจากในกรณีทำการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าดู
จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน จำเป็นต้องป้อนแรงดันให้สูงพอที่จะทำให้แต่ละแท่งตัวนำมีโอกาส
การเกิดเบรกดาวนได้ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบจะมีการทดลองจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่ง
ระยะแถบ โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-763 mmHg
และความชื้นสัมพัทธ์ 72-75 % แรงดันทดสอบ 25-70 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

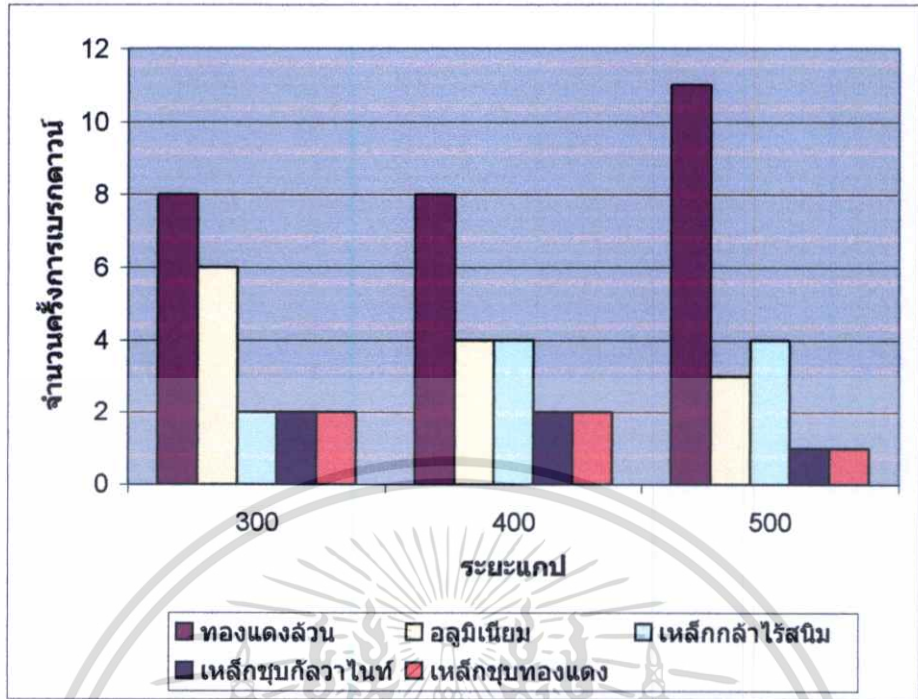
ตารางที่ 4.6 จำนวนครั้งการเบรคความของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วลบ

ระยะแก๊ป	รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งการเบรคความ	
		อิมพัลส์ชั่วคราว	อิมพัลส์ชั่วลบ
10 มม.	ทองแดงล้วน(copper)	11	9
	อลูมิเนียม (aluminium)	2	2
	เหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless steel)	2	2
	เหล็กชุบกัลวาไนท์ (Hot dipped Galvanized)	4	7
	เหล็กชุบทองแดง	1	0
30 มม.	ทองแดงล้วน(copper)	8	8
	อลูมิเนียม (aluminium)	4	2
	เหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless steel)	6	5
	เหล็กชุบกัลวาไนท์ (Hot dipped Galvanized)	2	5
	เหล็กชุบทองแดง	0	0
50 มม.	ทองแดงล้วน(copper)	12	11
	อลูมิเนียม (aluminium)	2	3
	เหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless steel)	4	2
	เหล็กชุบกัลวาไนท์ (Hot dipped Galvanized)	2	4
	เหล็กชุบทองแดง	0	0

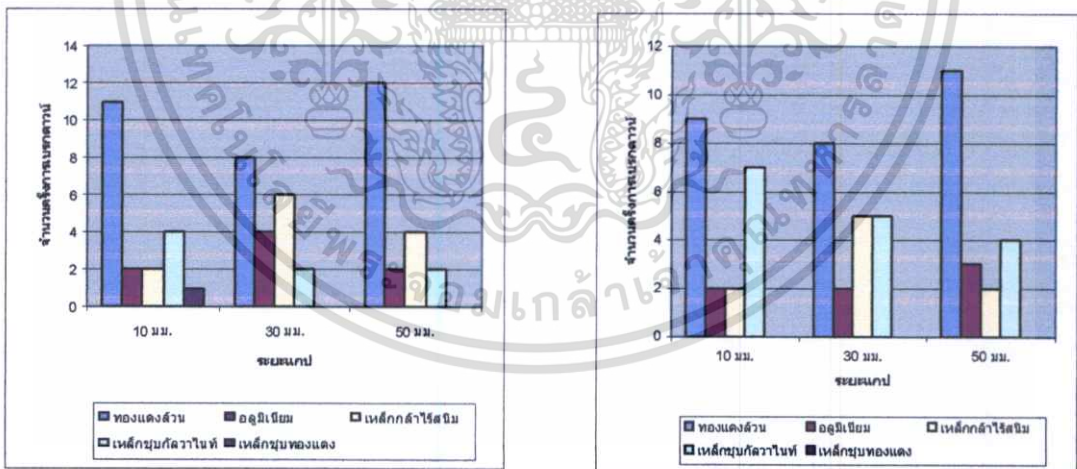
4.3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองด้วยแรงดันกระแสดตรง จะเห็นว่าที่ระยะ 50 มม. ค่าแรงดันเบรคความของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุที่เป็นทองแดงล้วน จะมีค่าสูงกว่าวัสดุที่เป็นเหล็กชุบกัลวาไนท์และเหล็กชุบทองแดง แต่ในระยะแก๊ป 100 ถึง 300 มม. วัสดุที่เป็นทองแดงล้วนจะมีค่าต่ำกว่าวัสดุที่เป็นเหล็กชุบกัลวาไนท์และเหล็กชุบทองแดง อาจเป็นเพราะว่าที่ระยะสั้นๆ วัสดุดังกล่าวจะมีการเบรคความได้ง่ายกว่าวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุที่เป็นทองแดงจะมีประสิทธิภาพการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่าวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน และการทดสอบเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งการเบรคความก็เป็นที่ยืนยันผลดังกล่าว ดังรูปที่ 4.10 ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ผลการทดสอบก็สอดคล้องกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสดตรง โดยตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุที่เป็นทองแดงล้วนจะมีจำนวนครั้งการเบรคความมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมเจ้าคุณฯ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า วัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วพล



(ก) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก

(ข) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล

รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 สรุปผลการทดลอง

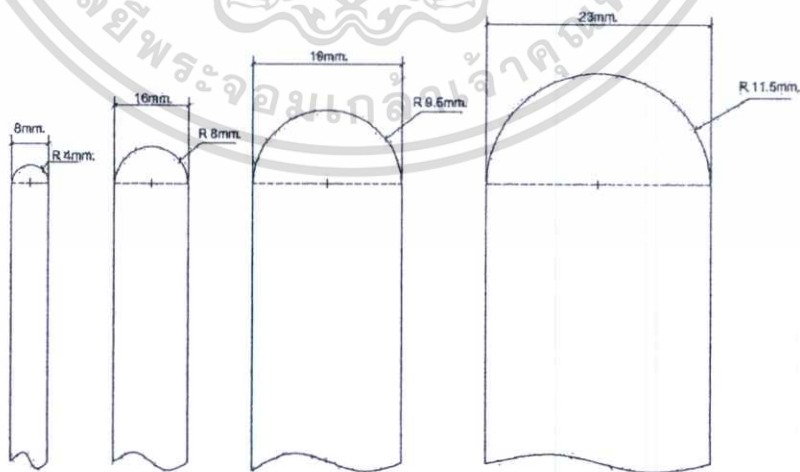
จากการทดสอบพบว่า วัสดุที่ใช้ทำตัวนำล่อฟ้ามีผลต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ที่แตกต่างกัน โดยระยะแก๊ปสั้นๆ วัสดุที่เป็นเหล็กชุบกัลวาไนท์ และเหล็กชุบทองแดงจะมีค่าแรงดันเบรคความต่ำกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน แต่ที่ระยะแก๊ปห่างออกไปมากกว่า 100 มม. แท่งตัวนำล่อฟ้าที่เป็นทองแดงล้วนมีค่าแรงดันเบรคความต่ำกว่า นั่นก็เพราะว่าที่ระยะแก๊ปห่างออกไป ทองแดงล้วนมีประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ที่ดีกว่า และการทดสอบโดยดูจำนวนครั้งการเบรคความก็เป็นสิ่งที่ยืนยันถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่มีผลต่อการเบรคความ

4.4 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน ที่ขนาดต่างๆ

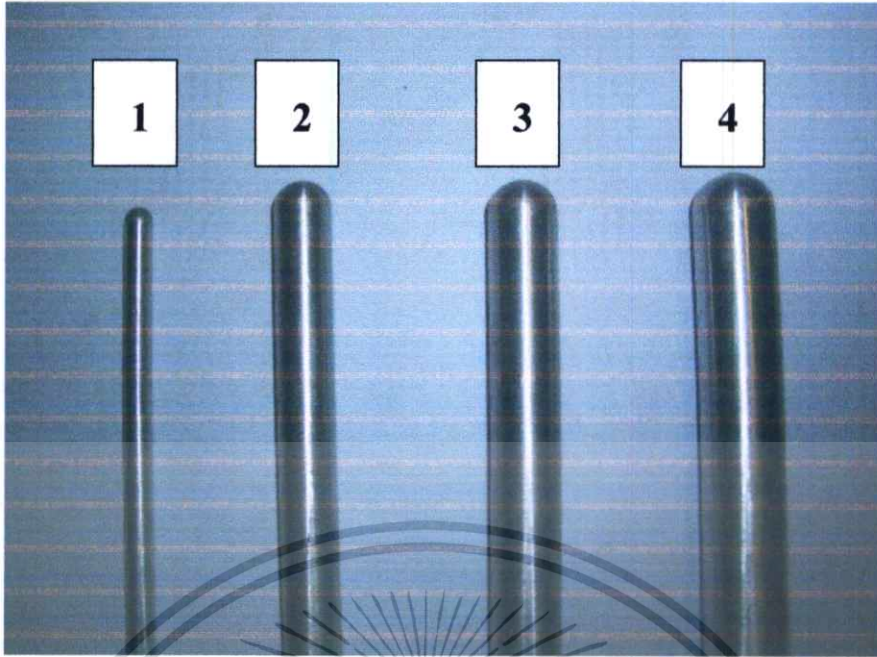
การทดลองมีลักษณะคล้ายกับ การทดลองในหัวข้อที่ 4.2 เพียงแต่จะเป็นการทดสอบของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) ของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่แตกต่างกัน เพื่อดูคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแท่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การเตรียมการทดสอบ

นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ตั้งแต่ 8-23 มม. ความยาว 500 มม. และทำจากวัสดุอลูมิเนียม โดยมีการทำให้ปลายแท่งตัวนำ มีลักษณะเป็นปลายมนรัศมีครึ่งวงกลมของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวนำล่อฟ้า ดังรูปที่ 4.12 และเตรียมความพร้อมของแท่งตัวนำล่อฟ้าในการทดสอบดังกล่าว ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ขนาดต่างๆ ของปลายแท่งตัวนำล่อฟ้าวัสดุอลูมิเนียม ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4.13 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายม่น ที่มีขนาดต่างๆ ที่ใช้ทดสอบ

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายม่น วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 8 มม.
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายม่น วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายม่น วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 19 มม.
4. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายม่น วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 23 มม.

4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้าและบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกความถี่โดยการทดสอบจะทำในลักษณะเดียวกันกับ หัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งมีการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วลบ และแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วบวก และลบ

4.4.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทดสอบภายใต้แรงดันกระแสตรงชั่วลบ และการทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก และชั่วลบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.1 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

1) การทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีขนาดต่างกัน เพื่อคุณลักษณะการเกิดสไตรเมอร์ และค่าแรงดันเบรกควาน์เพื่อคุณประสิทธิภาพในการสร้างสไตรเมอร์โดยพิจารณาถึงขนาดของแท่งตัวนำว่ามีผลต่อการเกิดเบรกควาน์อย่างไร และมีการทดสอบเหมือนกับหัวข้อที่ 4.2.4.1 โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.7

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 27-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 760-764 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 69-77 %

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันเบรกควาน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนอลูมิเนียม ที่ขนาดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ

ขนาด ตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกควาน์ที่ระยะแยกต่างๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
φ 8 มม.	1	27.00	65.25	92.50	122.58	142.56	172.09
	2	27.18	65.69	90.66	122.04	137.16	169.93
	3	27.27	65.69	90.07	117.72	137.97	169.99
	เฉลี่ย	27.15	65.54	91.07	120.78	139.23	170.67
φ 16 มม.	1	34.93	49.38	67.95	92.52	111.51	135.81
	2	35.37	49.30	67.68	93.36	112.32	134.73
	3	34.99	48.62	67.79	93.66	112.05	135.54
	เฉลี่ย	35.10	49.10	67.81	93.18	111.96	135.36
φ 19 มม.	1	39.04	51.19	68.25	94.71	112.05	135.46
	2	39.31	51.32	67.82	94.52	111.78	134.19
	3	39.82	50.27	69.39	93.15	112.05	135.27
	เฉลี่ย	39.39	50.93	68.49	94.13	111.96	134.64
φ 23 มม.	1	42.12	51.40	69.71	94.36	112.59	136.35
	2	42.82	52.19	77.97	93.55	113.67	135.81
	3	43.71	53.10	70.71	92.55	113.13	135.27
	เฉลี่ย	42.88	52.23	72.80	93.49	113.13	135.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทดสอบ โดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละชนิดพร้อมกันทั้งหมดบนฐานทดสอบ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบจนกระทั่งเกิดการเบรกควานน์ พร้อมบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกควานน์ การทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเกิดเบรกควานน์จะทดสอบ 20 ครั้งต่อหนึ่งระยะ โดยมีการทดสอบที่ระยะแก๊ป 300, 400, 500 มม. ซึ่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบจะมีอยู่ 4 ชนิด ดังรูปที่ 4.14 ผลการทดสอบจำนวนครั้งของการเบรกควานน์ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควานน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นอลูมิเนียม ที่ขนาดต่างๆ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϕ) ของ แท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งการเบรกควานน์ที่ระยะแก๊ปต่างๆ		
	300 มม.	400 มม.	500 มม.
ϕ 8 มม.	1	1	1
ϕ 16 มม.	10	11	11
ϕ 19 มม.	7	7	7
ϕ 23 มม.	2	1	1

ลักษณะการสร้างสตริมเมอร์และการเกิดเบรกควานน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกควานน์ เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 การเกิดเบรกควานน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่ขนาดต่างๆ กรณีทดสอบเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ และชั่วบวก

ผลการที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ละหนึ่งแท่ง และทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์โดยค่าที่ทำการป้อนได้มาจากการประมาณ ในตารางการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความถี่ของแถบทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 และทำการป้อนแรงดัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่ป้อนต้องทำให้เกิดการเบรกความถี่ เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการเปรียบเทียบกันและดูจำนวนครั้งการเบรกความถี่

2) เมื่อได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกความถี่แต่ละแท่งตัวนำแล้ว ก็ทำการป้อนแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกความถี่ เนื่องจากในกรณีที่ทำกรเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกความถี่ จำเป็นต้องป้อนแรงดันให้สูงพอที่จะทำให้แต่ละแท่งตัวนำมีโอกาสการเกิดเบรกความถี่ได้ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบจะมีการทดลองจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่งระยะแถบ โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-763 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 72-75 % แรงดันทดสอบ 35-60 kV

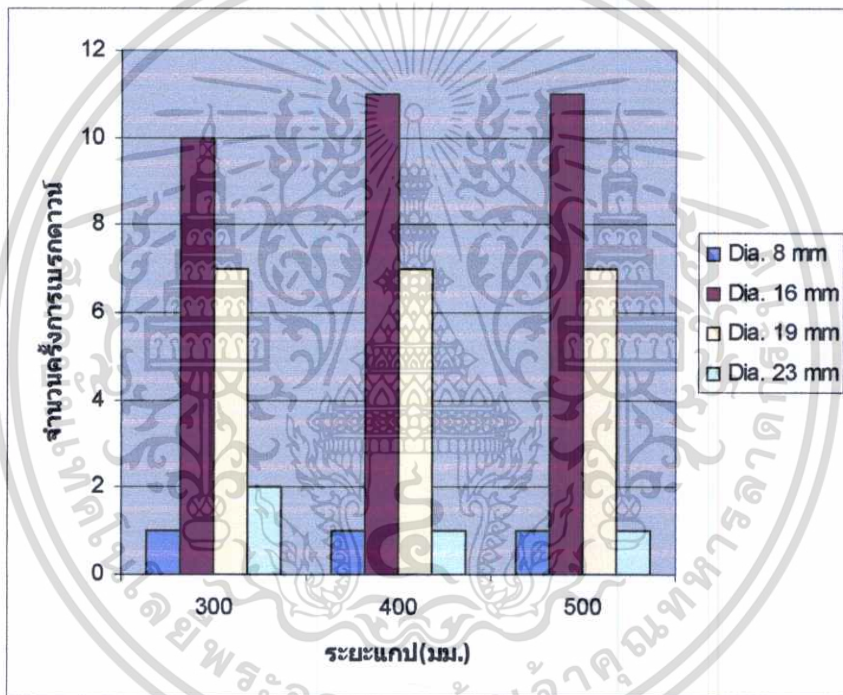
ตารางที่ 4.9 จำนวนครั้งการเบรกความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นอลูมิเนียม ที่ขนาดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวกและชั่วลบ

ระยะแถบ	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϕ) ของแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งการเบรกความถี่	
		อิมพัลส์ชั่วบวก	อิมพัลส์ชั่วลบ
10 มม.	ϕ 8 มม.	6	5
	ϕ 16 มม.	9	10
	ϕ 19 มม.	4	3
	ϕ 23 มม.	1	2
30 มม.	ϕ 8 มม.	8	7
	ϕ 16 มม.	11	9
	ϕ 19 มม.	1	3
	ϕ 23 มม.	0	1
50 มม.	ϕ 8 มม.	6	5
	ϕ 16 มม.	11	10
	ϕ 19 มม.	2	3
	ϕ 23 มม.	1	2

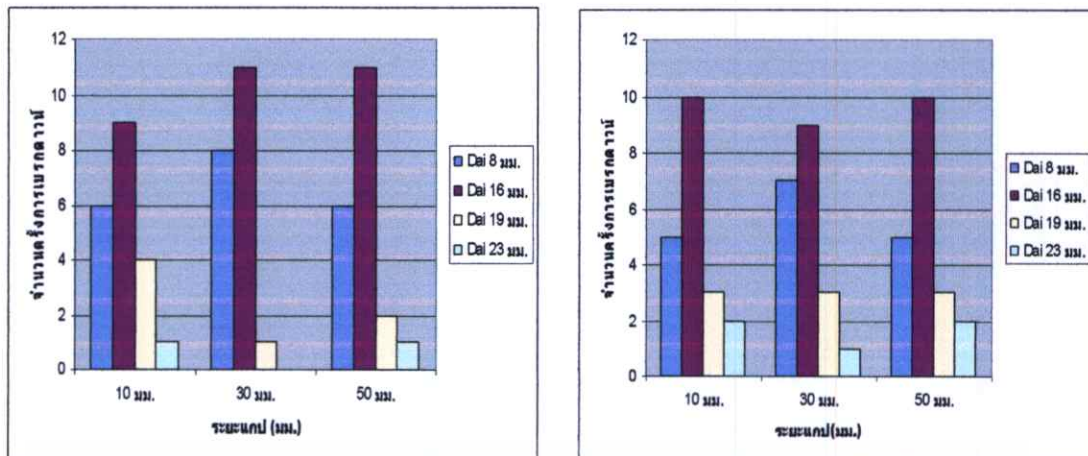
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองด้วยแรงดันกระแสดตรง จะเห็นว่าค่าแรงดันเบรกคาวนของอากาศผ่านแท่งตัวนำท่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่ขนาดต่างๆมีค่าแรงดันเบรกคาวนที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะแกปสั้น ตัวนำท่อฟ้าขนาด ϕ 8 มม. จะมีค่าแรงดันเบรกคาวนต่ำกว่าขนาดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน และที่ระยะแกปห่างออกไป ตัวนำท่อฟ้าขนาด ϕ 16 มม. และ ϕ 19 มม. มีค่าแรงดันเบรกคาวนต่ำกว่าแบบอื่นและมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาวนภายใต้แรงดันกระแสดตรง แท่งตัวนำท่อฟ้าขนาด ϕ 16 มม. มีจำนวนครั้งการเบรกคาวนสูงสุดดังรูปที่ 4.15 โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองภายใต้แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก และชั่วลบ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาวนของอากาศผ่านแท่งตัวนำท่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ที่ระยะแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสดตรง ชั่วลบ



(ก) ทดสอบโดยแรงดันอิมพัลส์ชั่วแวบ

(ข) ทดสอบโดยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกด่านของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นอลูมิเนียม ที่ขนาดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์

4.4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นอลูมิเนียม ขนาด ϕ 16 มม. และขนาด ϕ 19 มม. มีค่าแรงดันเบรกด่านต่ำกว่าขนาดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน แต่เมื่อแท่งตัวนำล่อฟ้ามาทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกด่านภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง จะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีขนาด ϕ 16 มม. และ 19 มม. มีจำนวนครั้งการเบรกด่านมากกว่าขนาดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน และเมื่อทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์จำนวนครั้งการเบรกด่านของแท่งตัวนำล่อฟ้าขนาด ϕ 8 มม. และ 16 มม. มีจำนวนครั้งมากกว่าขนาดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน เนื่องจากตัวนำล่อฟ้าขนาด ϕ 8 มม. มีขนาดเล็กซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีสูงกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน และการทดสอบมีระยะเกปต์ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่เป็นแท่งเล็กยังคงลดลงไม่มากจึงทำให้เกิดการเบรกด่านได้ง่าย แต่ก็สามารถสรุปได้ว่า แท่งตัวนำที่เหมาะสมในการออกแบบควรมีขนาด 16 มม.[22] ซึ่งสรุปได้จากข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบ

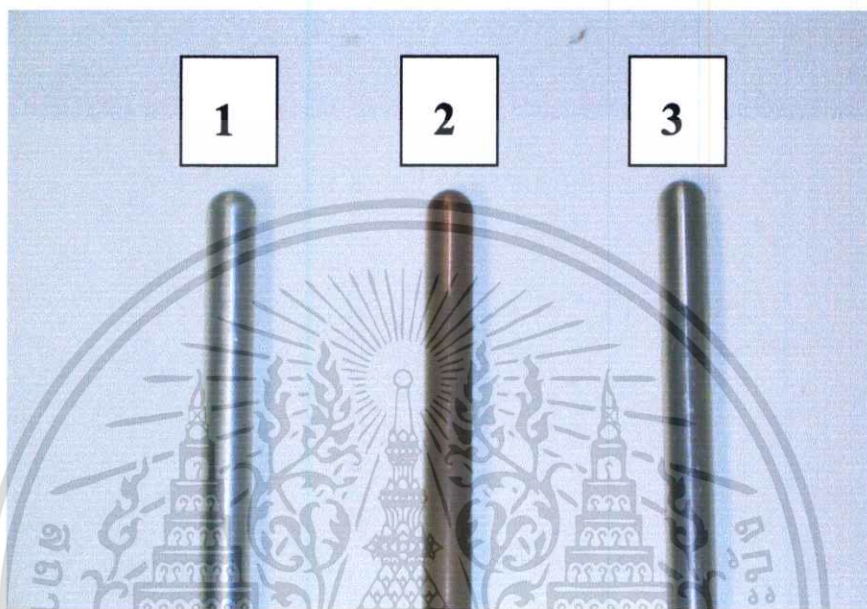
4.5 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน ของวัสดุต่างชนิดต่างๆ

การทดลองมีลักษณะคล้ายกับ การทดลองในหัวข้อที่ 4.2 เพียงแต่จะมีการทดสอบของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน ที่มีวัสดุต่างชนิดกันเช่น อลูมิเนียม, ทองแดงล้วน, เหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϕ) ขนาด 16 มม. ตามที่ได้ทดลองมาจากในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งเป็นแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม แต่ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองของแท่งล่อฟ้าปลายมน เพื่อดูคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแท่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 การเตรียมการทดสอบ

นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ความยาว 500 มม. โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีการทำให้ปลายแท่งตัวนำ มีลักษณะเป็นปลายมนครึ่งวงกลมของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวนำล่อฟ้า ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุต่างชนิดกัน ที่ใช้ทดสอบ

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุทองแดงล้วน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.

4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกควาน์ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้าและบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกควาน์โดยการทดสอบจะทำในลักษณะเดียวกันกับ หัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งมีการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วลบและแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วบวก และลบ

4.5.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทดสอบภายใต้แรงดันกระแสตรงชั่วลบ และ การทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก และชั่วลบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในภาควิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.1 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

1) การทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน ที่มีวัสดุต่างชนิดกันนำมาทดสอบ เพื่อคุณลักษณะการเกิดสทริมเมอร์ และค่าแรงดันเบรกดาวนเพื่อ ดูประสิทธิภาพในการสร้างสทริมเมอร์ โดยพิจารณาถึงตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างกันว่า มีผล ต่อการเกิดเบรกดาวนอย่างไรและการทดสอบเหมือนกับหัวข้อที่ 4.2.4.1 โดยผลการทดลองมี รายละเอียดดังตารางที่ 4.10

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-764 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 72-77 %

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันเบรกดาวนของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

วัสดุ ตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกดาวนที่ระยะแก๊ปต่างๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
อลูมิเนียม φ 16 มม.	1	34.93	49.38	67.95	92.52	111.51	135.81
	2	35.37	49.30	67.68	93.36	112.32	134.73
	3	34.99	48.62	67.79	93.66	112.05	135.54
	เฉลี่ย	35.10	49.10	67.81	93.18	111.96	135.36
ทองแดงล้วน φ 16 มม.	1	36.28	50.43	71.87	94.58	117.18	141.48
	2	36.31	50.67	73.92	96.47	119.07	142.29
	3	36.45	52.11	72.92	96.68	117.72	142.56
	เฉลี่ย	36.34	51.07	72.90	95.91	117.99	142.11
เหล็กกล้า ไร้สนิม φ 16 มม.	1	35.55	48.38	71.25	93.39	117.99	142.29
	2	35.12	50.22	71.84	92.96	117.45	142.29
	3	35.12	50.03	72.25	93.74	119.34	142.02
	เฉลี่ย	35.26	49.54	71.78	93.36	118.26	142.20

2) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละชนิดพร้อมกันทั้งหมดบนฐานทดสอบ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน พร้อมบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน การทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวนจะทดสอบ 20 ครั้งต่อหนึ่งระยะแก๊ป โดยมีการทดสอบที่ระยะแก๊ป 300, 400, 500 มม. ซึ่งแท่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบกันจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ดังรูปที่ 4.19 ผลการทดสอบจำนวนครั้งของการเบรกดาวน ไม่ว่าจะทดสอบที่ระยะแก๊ปใดก็ตาม ผลการทดสอบจะใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.11 ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วพล

วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน ϕ 16 มม.	จำนวนครั้งการเบรกความถี่		
	300 มม.	400 มม.	500 มม.
อลูมิเนียม	16	17	19
ทองแดงล้วน	4	3	1
เหล็กกล้าไร้สนิม	0	0	0

ลักษณะการสร้างสตริมเมอร์และการเกิดเบรกความถี่ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกความถี่ เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพล



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.18 การเกิดสตริมเมอร์ของตัวนำล่อฟ้าและเบรกความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าปลายมน กรณีทดสอบเปรียบเทียบกันของวัสดุแต่ละชนิด

4.5.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล และชั่วววก

ผลที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

- 1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าทีละหนึ่งแท่ง และทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์โดยค่าที่ทำการป้อนได้มาจากการประมาณ ในตารางการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความถี่ของแถบทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 และทำการป้อนแรงดัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่ป้อนต้องทำให้เกิดการเบรกความถี่ เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการเปรียบเทียบกันและดูจำนวนครั้งการเบรกความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นชอบที่จะใช้เอกสารนี้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เมื่อได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรคความถี่แต่ละแห่งตัวนำแล้ว ก็ทำการป้อนแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคความถี่ เนื่องจากในกรณีที่ทำการเปรียบเทียบแห่งตัวนำล่อฟ้าดู จำนวนครั้งการเกิดเบรคความถี่ จำเป็นต้องป้อนแรงดันให้สูงพอที่จะทำให้แต่ละแห่งตัวนำมีโอกาส การเกิดเบรคความถี่ได้ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบจะมีการทดลองจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่ง ระยะเวลาแปด โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-763 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 72-75 % แรงดันทดสอบ 35-70 kV

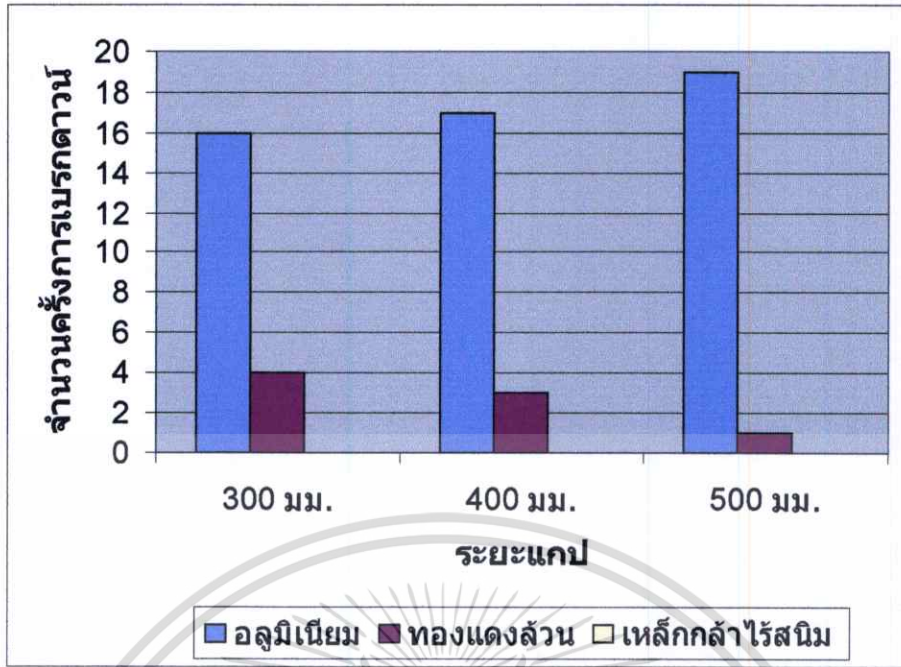
ตารางที่ 4.12 จำนวนครั้งการเบรคความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าปลายมน ของวัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ

ระยะแกป	วัสดุแห่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน ϕ 16 มม.	จำนวนครั้งการเบรคความถี่	
		อิมพัลส์ชั่ววอก	อิมพัลส์ชั่วลบ
10 มม.	อลูมิเนียม	15	16
	ทองแดงล้วน	3	2
	เหล็กกล้าไร้สนิม	2	2
30 มม.	อลูมิเนียม	17	18
	ทองแดงล้วน	2	2
	เหล็กกล้าไร้สนิม	1	0
50 มม.	อลูมิเนียม	18	19
	ทองแดงล้วน	2	1
	เหล็กกล้าไร้สนิม	0	0

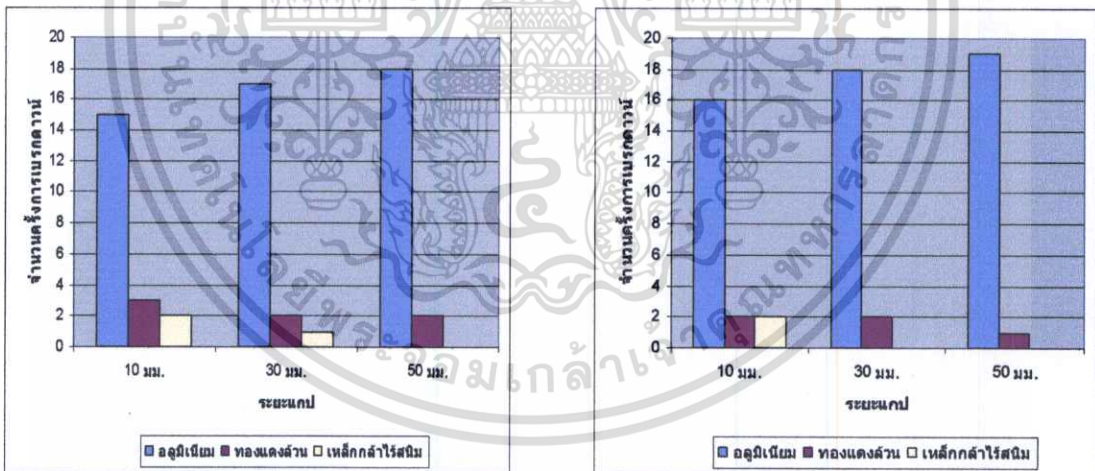
4.5.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองด้วยแรงดันกระแสดตรง จะเห็นว่าค่าแรงดันเบรคความถี่ของแห่งตัวนำ ล่อฟ้าปลายมนวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมจะมีค่าแรงดันเบรคความถี่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ในระยะทุกระยะแกปที่ทดสอบ เพราะวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมอาจมีการสร้างสตริมเมอร์ได้เร็วกว่า และไกลกว่าวัสดุชนิดอื่นจึงทำให้เกิดเบรคความถี่ได้ง่ายกว่า การทดสอบเปรียบเทียบดูจำนวนครั้ง การเบรคความถี่ก็เป็นการยืนยันผลดังกล่าว ดังรูปที่ 4.19 ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ผล การทดสอบก็สอดคล้องกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสดตรง โดยตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุที่ เป็นอลูมิเนียมจะมีจำนวนครั้งการเบรคความถี่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่ทดสอบ

เอกสารด้วยกัน ดังรูปที่ 4.20 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวนของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วคราว



(ก) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

(ข) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวนของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.5 สรุปผลการทดลอง

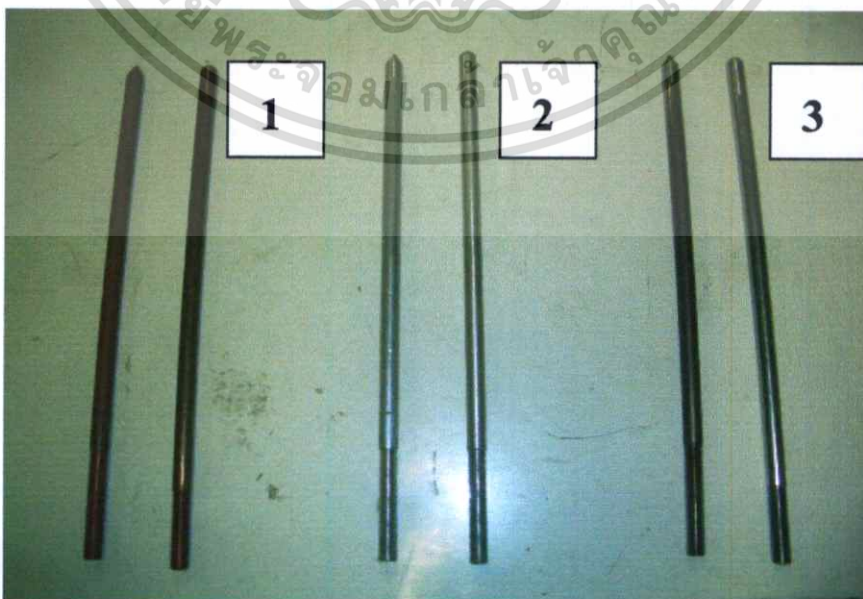
จากการทดสอบพบว่า แท่งตัวนำล่อฟ้าวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมมีค่าแรงดันต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่เป็น ทองแดงล้วนและเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากบริเวณปลายของแท่งตัวนำที่เป็นอลูมิเนียมมีค่าความเครียดสูงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ซึ่งอาจมีการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะได้ง่ายกว่าและมีการสะสมของอิเล็กตรอนมากทำให้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไป ก็จะทำให้เกิดเบรกคาวได้ง่ายกว่า และมีจำนวนการเบรกคาวมากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงกับแรงดันอิมพัลส์มีความสอดคล้องกัน จากการทดสอบดังกล่าวทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ในการออกแบบแท่งตัวนำล่อฟ้าต่อไป

4.6 การทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน กับปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ

การทดลองมีลักษณะเดียวกับ การทดลองในหัวข้อที่ 4.2.4 เพียงแต่จะมีการทดสอบของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน และปลายแหลม โดยวัสดุที่ทำการเปรียบเทียบจะมี 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม, ทองแดงล้วน, เหล็กกล้าไร้สนิม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ) ขนาด 16 มม. เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 การเตรียมการทดสอบ

นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีลักษณะปลายมน เปรียบเทียบกับแท่งตัวนำปลายแหลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ความยาว 500 มม. โดยมีวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 4.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.21 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมและปลายมน วัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ทดสอบ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่ทรงพิมพ์การนำไปใช้

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมและปลายมน วัสดุทองแดงล้วน
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมและปลายมน วัสดุอลูมิเนียม
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมและปลายมน วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.

4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. ทดสอบ โดยเปรียบเทียบจำนวนครั้ง
การเบรคความนำภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ขั้วลบ 2. ทดสอบ โดยเปรียบเทียบจำนวนครั้ง
การเบรคความนำภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ ขั้วบวกและลบ ซึ่งการทดสอบจะศึกษาว่าแท่งตัวนำ
ปลายแหลมกับปลายมนลักษณะแบบใดจะมีประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่า

4.6.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความนำ มีดังนี้

4.6.3.1 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

1) การทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน
และปลายแหลม ที่มีวัสดุชนิดเดียวกันนำมาทดสอบ เพื่อดูลักษณะการเกิดสตริมเมอร์ เพื่อดู
ประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ โดยพิจารณาถึงตัวนำล่อฟ้าปลายมนและปลายแหลมที่มี
วัสดุเดียวกันว่ามีผลต่อการเกิดเบรคความนำอย่างไร โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.13

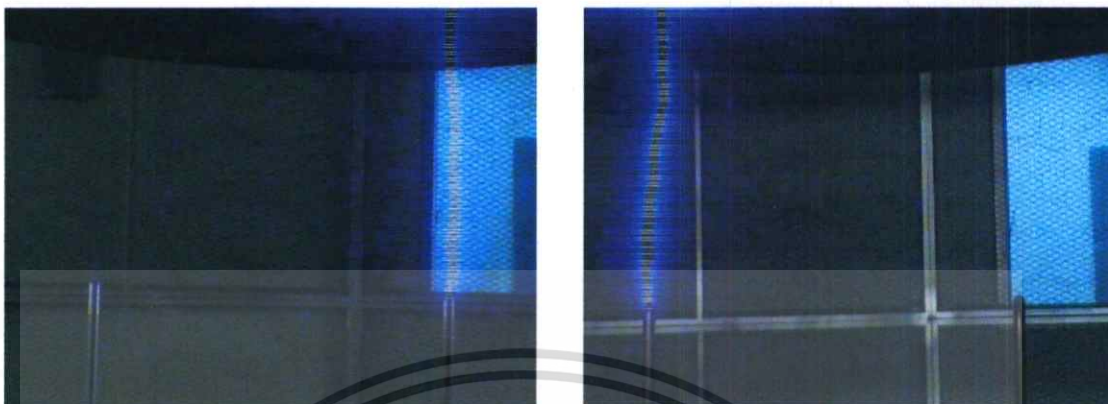
สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-764 mmHg
และความชื้นสัมพัทธ์ 72-77 %

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรคความนำของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน
กับปลายแหลม ที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ขั้วลบ

รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า ϕ 15 มม.	จำนวนครั้งการเบรคความนำ		
	300 มม.	400 มม.	500 มม.
ปลายมนวัสดุอลูมิเนียม	15	14	14
ปลายแหลม วัสดุอลูมิเนียม	5	6	6
ปลายมน วัสดุทองแดงล้วน	3	4	5
ปลายแหลม วัสดุทองแดงล้วน	17	16	15
ปลายมน วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม			
ปลายแหลม วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม			

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ปลายแหลม เหล็กกล้าไร้สนิม และต้องอ้างอิง 18 เจ้าของเอกสาร 17 ทุกครั้งที่มีการ 18 ไปใช้

ลักษณะการเกิดเบรกดาวนซ์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบดูจำนวนครั้ง
การเกิดเบรกดาวนซ์ เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่ววับ



(ก) วัสดุเป็นอลูมิเนียม

(ข) วัสดุเป็นทองแดง



(ค) วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม

รูปที่ 4.22 การเกิดเบรกดาวนซ์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง
แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมกับปลายมน ภายใต้เงื่อนไขกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว และชั่วคราว

ผลการที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ละหนึ่งแท่ง และทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์โดยค่าที่ทำการป้อนได้มาจากการประมาณ ในตารางการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความของแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 และทำการป้อนแรงดัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่ป้อนต้องทำให้เกิดการเบรกความ เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการเปรียบเทียบกันและดูจำนวนครั้งการเบรกความ

2) เมื่อได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกความแต่ละแท่งตัวนำแล้ว ก็ทำการป้อนแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกความ เนื่องจากในกรณีที่ทำการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกความ จำเป็นต้องป้อนแรงดันให้สูงพอที่จะทำให้แต่ละแท่งตัวนำมีโอกาสเกิดการเบรกความได้ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบจะมีการทดลองจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่งระยะแกป โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14-4.15

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-763 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 72-75 % แรงดันทดสอบ 25-70 kV

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลม ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

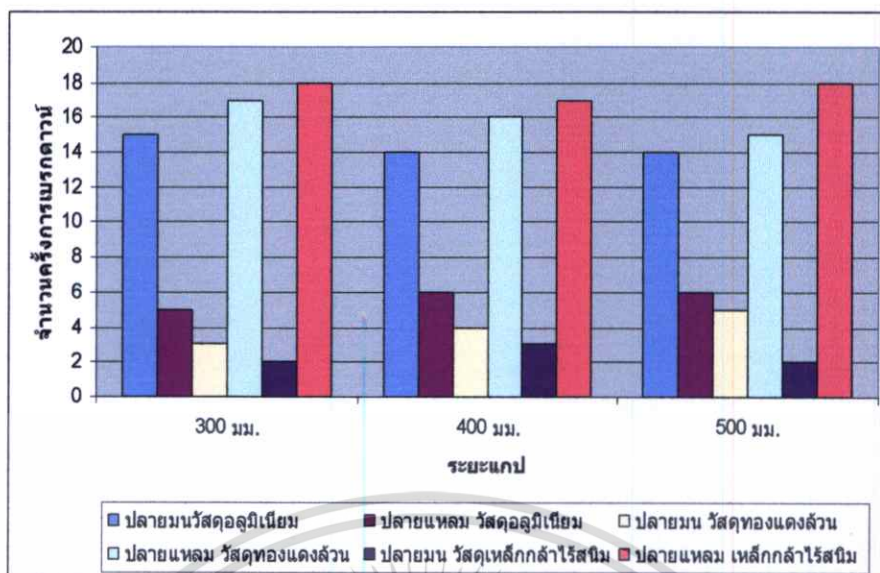
รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า ϕ 15 มม.	จำนวนครั้งการเบรกความ		
	10 มม.	30 มม.	50 มม.
ปลายมนวัสดุอลูมิเนียม	8	9	12
ปลายแหลม วัสดุอลูมิเนียม	12	11	8
ปลายมน วัสดุทองแดงล้วน	6	4	5
ปลายแหลม วัสดุทองแดงล้วน	14	16	15
ปลายมน วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	3	5	2
ปลายแหลม เหล็กกล้าไร้สนิม	17	15	18

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน กับปลายแหลม ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ ขั้วลบ

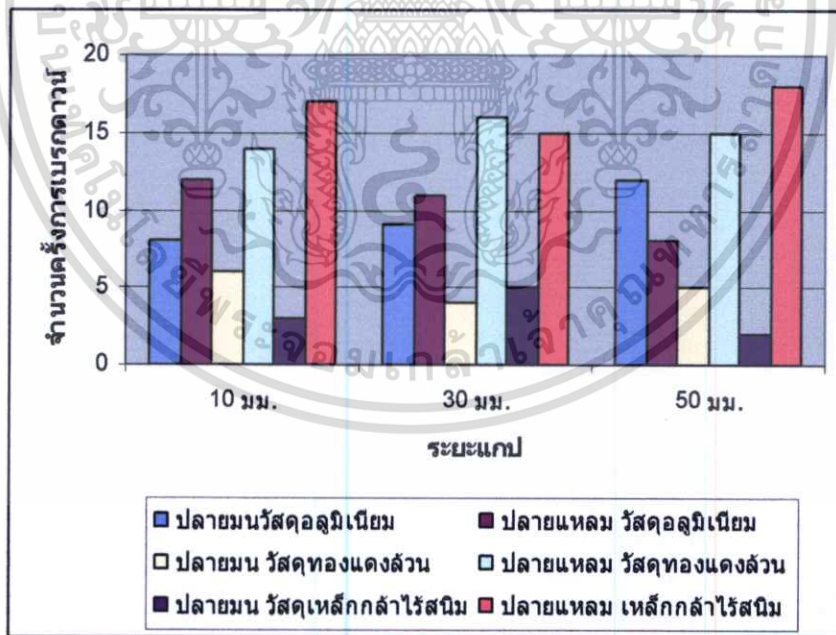
รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า ϕ 15 มม.	จำนวนครั้งการเบรกคาวน์		
	10 มม.	30 มม.	50 มม.
ปลายมน วัสดุอลูมิเนียม	7	8	11
ปลายแหลม วัสดุอลูมิเนียม	13	12	9
ปลายมน วัสดุทองแดงล้วน	5	3	5
ปลายแหลม วัสดุทองแดงล้วน	15	17	15
ปลายมน วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	3	2	4
ปลายแหลม เหล็กกล้าไร้สนิม	17	18	16

4.6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองด้วยแรงดันกระแสตรง จะเห็นว่าการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกคาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับวัสดุของแท่งตัวนำ ซึ่งถ้าวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมตัวนำล่อฟ้าปลายมนจะมีจำนวนครั้งการเบรกคาวน์มากกว่าปลายแหลม แต่ถ้าวัสดุเป็นทองแดงล้วนและเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมจะมีจำนวนครั้งการเบรกคาวน์มากกว่าปลายมน ดังรูปที่ 4.23 ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และขั้วลบ แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมกับปลายมน วัสดุเป็นอลูมิเนียมมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์มีระยะแกปสั้น และลักษณะการเกิดเบรกคาวน์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การเกิดความเครียดสนามไฟฟ้า และสตรีมเมอร์ที่ปลายแท่งตัวนำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายแหลมมีค่าสูงกว่าปลายมน แต่ที่ระยะห่างจากปลายตัวนำล่อฟ้าความเครียดบริเวณปลายแหลมจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ที่ระยะแกป ห่างออกไปแท่งตัวนำปลายมนมีการเกิดเบรกคาวน์ได้ง่ายกว่า

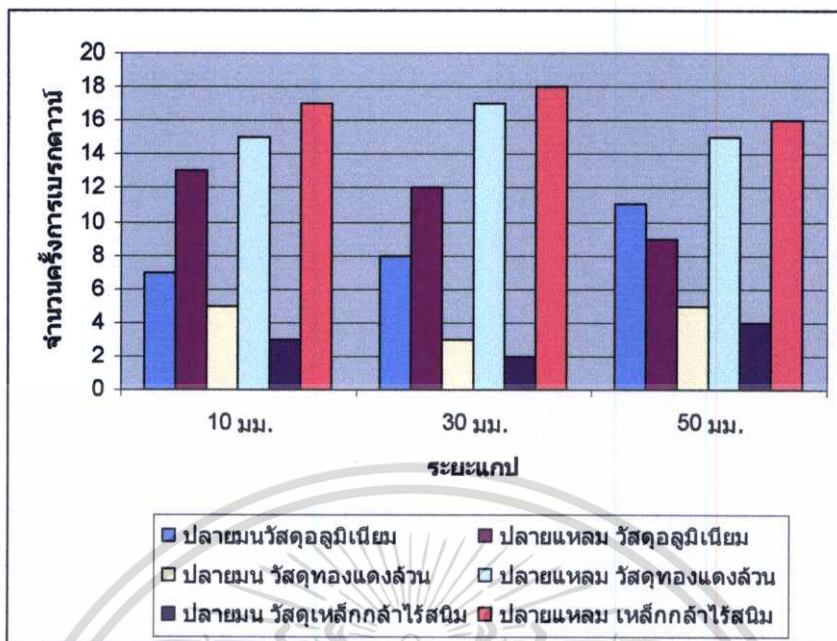


รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความถี่ของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลม ที่ระยะแกปต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรงชั่วพล



(ก) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ

รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกความของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนกับปลายแหลม ที่ระยะแถบต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์

4.6.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่า เมื่อทำการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมมีจำนวนครั้งการเบรกความมากกว่าแบบปลายแหลม ที่เป็นวัสดุเดียวกัน แต่วัสดุที่เป็นทองแดงล้วนและเหล็กกล้าไร้สนิม แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีจำนวนครั้งการเบรกความมากกว่าแบบปลายมนอย่างเห็นได้ชัดเจน ที่เป็นเช่นนั้นเพราะวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมมีค่าเวอรัคฟิงชันน้อยกว่าวัสดุอื่นที่ทดสอบ[3] ซึ่งทำให้ไอออนบวกใช้พลังงานน้อยกว่าในการปล่อยอิเล็กตรอน ถึงแม้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงแต่ระยะแถบที่ทดสอบมีระยะห่าง ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจากผิวโลหะปลายแหลมลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับปลายมน ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากผิวโลหะอลูมิเนียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณที่เป็นปลายมนมีอิเล็กตรอนสะสมมากกว่า จึงทำให้เกิดการเบรกความได้ง่ายกว่า ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ที่ระยะแถบ 50 มม. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนจะมีจำนวนครั้งการเบรกความมากกว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม เมื่อวัสดุเป็นอลูมิเนียม แต่ที่ระยะแถบ 10 มม. และ 30 มม. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมอลูมิเนียมจะมีจำนวนครั้งการเบรกความ

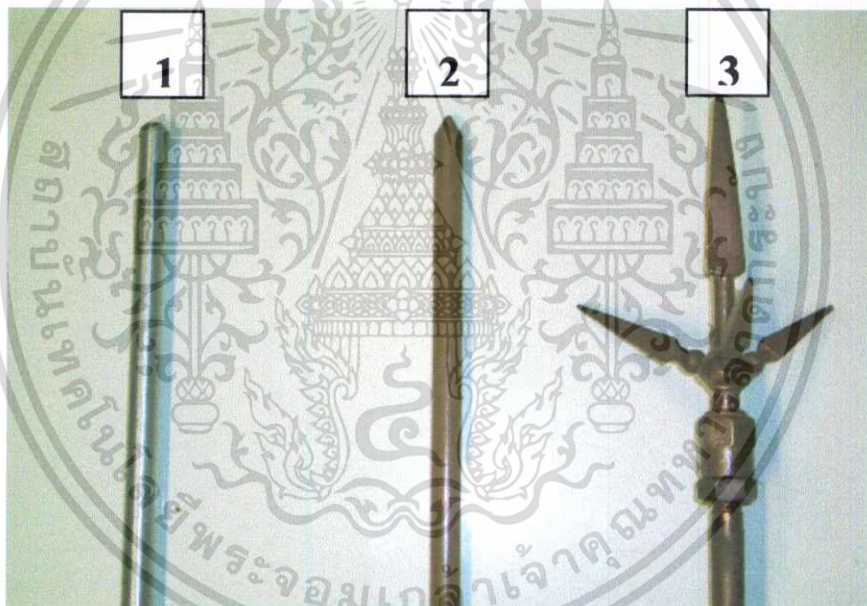
มากกว่าแบบปลายมน [23] เนื่องจากระยะแถบที่ทดสอบมีระยะสั้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการดำเนินงานบริเวณแท่งปลายแหลมยังคงลดลงไม่มาก จึงเกิดการเบรกความได้ง่ายกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆก็ตาม หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

4.7 การทดสอบเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่ได้ผ่านการทดสอบมา เพื่อหาคุณลักษณะในการสร้างสตริมเมอร์ที่ดีที่สุดของแท่งตัวนำล่อฟ้า

การทดลองมีลักษณะเดียวกับ การทดลองในหัวข้อที่ 4.2.4 เพียงแต่จะมีการทดสอบของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยนำแท่งตัวล่อฟ้าที่ดีที่สุดในการทดสอบ ในหัวข้อที่ 4.2-4.6 ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ คือ 1.แบบปลายแหลมทองแดงชุบ 2.แบบปลายแหลมทองแดงล้วน 3.แบบอลูมิเนียมปลายมน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง(ϕ)ของแท่งตัวนำ ขนาด 16 มม. เพื่อเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแท่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.7.1 การเตรียมการทดสอบ

นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดสอบและวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2-4.6 ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ และนำมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แท่งตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดสอบที่ผ่านมา

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุทองแดงล้วน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเหล็กชุบทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.

4.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. ทดสอบโดยเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควาน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันกระแสตรง ขั้วลบ 2. ทดสอบโดยเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควาน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์ ขั้วบวกและลบ ซึ่งการทดสอบจะศึกษาว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบไหนจะมีประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่า

4.7.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควาน์ มีดังนี้

4.7.3.1 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ

การทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้า แต่ละชนิดที่ดีที่สุด ที่ได้มีการทดสอบมาแล้วนำมาเปรียบเทียบกันอีกครั้งเพื่อดูลักษณะการเกิดสตริมเมอร์เพื่อดูประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ และเพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าว โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.16

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-31 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-765 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 75-78 %

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกควาน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้า ชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุดที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ

รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า φ 16 มม.	จำนวนครั้งการเบรกควาน์		
	300 มม.	400 มม.	500 มม.
ปลายมน วัสดุอลูมิเนียม	14	13	13
ปลายแหลม วัสดุทองแดงล้วน	4	6	5
ปลายแฉก วัสดุเหล็กชุบทองแดง	2	1	2

ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วพลบ



รูปที่ 4.26 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า กรณีทดสอบเปรียบเทียบระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา

4.7.3.2 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ และชั่ววอก ผลการที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1) ทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ละหนึ่งแท่ง และทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์โดยค่าที่ทำการป้อนได้มาจากการประมาณ ในตารางการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแถบทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 และทำการป้อนแรงดัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่ป้อนต้องทำให้เกิดการเบรกดาวน์ เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการเปรียบเทียบกันและดูจำนวนครั้งการเบรกดาวน์

2) เมื่อได้ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์แต่ละแท่งตัวนำแล้ว ก็ทำการป้อนแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ เนื่องจากในกรณีที่ทำการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ จำเป็นต้องป้อนแรงดันให้สูงพอที่จะทำให้แต่ละแท่งตัวนำมีโอกาสการเกิดเบรกดาวน์ได้ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบจะมีการทดลองจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่งระยะแถบ โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.17

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ 761-763 mmHg และความชื้นสัมพัทธ์ 72-75 % แรงดันทดสอบ 35-80 kV

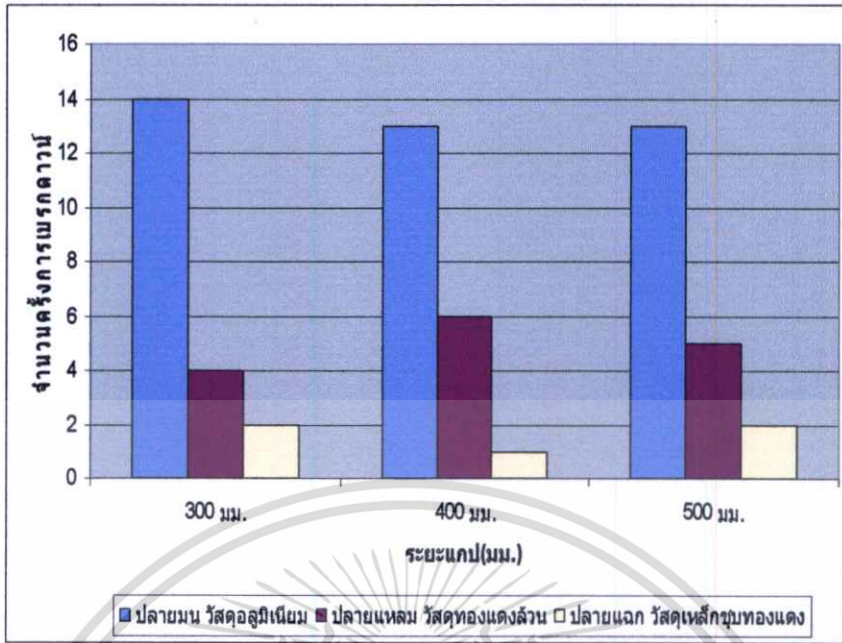
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์

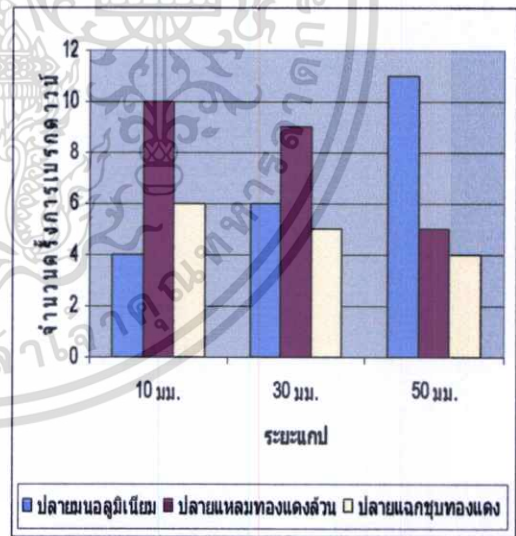
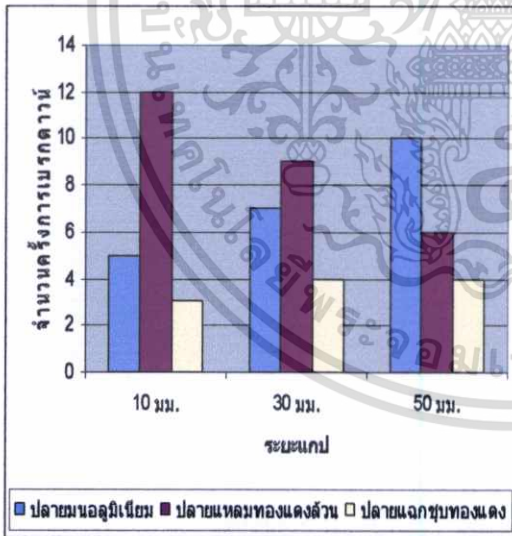
ระยะแก๊ป	รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า ϕ 16 มม.	จำนวนครั้งการเบรกดาวน์	
		อิมพัลส์ชั่วคราว	อิมพัลส์ชั่วลบ
10 มม.	ปลายมนอลูมิเนียม	5	4
	ปลายแหลมทองแดงล้วน	12	10
	ปลายแฉกชุบทองแดง	3	6
30 มม.	ปลายมนอลูมิเนียม	7	6
	ปลายแหลมทองแดงล้วน	9	9
	ปลายแฉกชุบทองแดง	4	5
50 มม.	ปลายมนอลูมิเนียม	10	11
	ปลายแหลมทองแดงล้วน	6	5
	ปลายแฉกชุบทองแดง	4	4

4.7.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองด้วยแรงดันกระแสตรง จะเห็นว่าการเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าทั้ง 3 แท่ง ตัวนำล่อฟ้าปลายมนมีความสามารถในการสร้างสตรีมเมอร์ได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบด้วยกัน ซึ่งสังเกตได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแหลม และปลายแฉก มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณผิวปลายแท่งตัวนำ แต่ที่ระยะห่างออกไปจากผิว ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นทำให้แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนมีการสร้างสตรีมเมอร์ที่ดีกว่า เนื่องจากวัสดุอลูมิเนียม อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากผิวอิเล็กโตรดได้ง่ายกว่า เพราะใช้มีพลังงาน(เวอร์กฟังก์ชัน)ค่าที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น [3] จึงมีจำนวนครั้งการเบรกดาวน์มากกว่าชนิดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ดังรูปที่ 4.27 ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว และชั่วลบ ที่ระยะแก๊ป 10-30 mm ตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแหลม วัสดุเป็นทองแดงล้วนจะมีจำนวนการเบรกดาวน์มากกว่าแบบปลายมน และแบบปลายแฉก เนื่องจากปลายแหลมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และระยะแก๊ปสั้น การเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ปลายแหลมเกิดการเบรกดาวน์ได้ง่ายกว่า แต่ที่ระยะแก๊ป 50 มม. ปลายมนมีจำนวนครั้งการเบรกดาวน์มากกว่า แบบปลายแหลม และปลายแฉก ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวนของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ



(ก) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

(ข) ทดสอบ โดยแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเบรกดาวนของอากาศผ่านตัวนำล่อฟ้าชนิดต่างๆ ที่ดีที่สุด ที่ได้ผ่านการทดสอบมา ภายใต้เงื่อนไขแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.5 สรุปผลการทดลอง

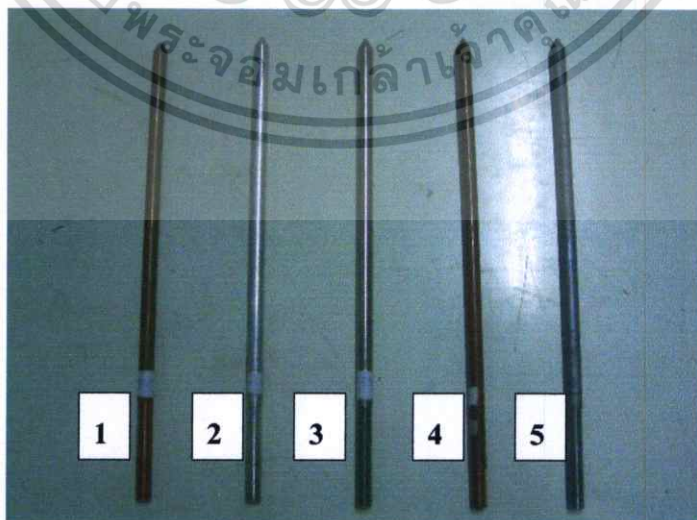
จากการทดสอบพบว่า แท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีจำนวนครั้งของการเบรกควานมากที่สุด คือ ปลายมนวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม รองลงมาจะเป็นแบบปลายแหลมทองแดงล้วน และปลายแฉกซุบทองแดง ตามลำดับ แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวปลายแท่งตัวนำทำให้เกิดเบรกควานได้ง่ายที่ระยะแกปสั้นๆ แต่ที่ระยะแกปห่างออกไปจากผิวแท่งตัวนำปลายแหลมค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากวัสดุอลูมิเนียมมีค่าเวอริกฟิงชันน้อยกว่าวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกันทำให้เกิดการเบรกควานได้ง่ายกว่า [24]

4.8 การทดสอบผลทางด้านความร้อนของแท่งตัวนำล่อฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้า

การทดลองผลทางด้านความร้อนของแท่งตัวนำล่อฟ้า ซึ่งปัจจุบันวัสดุที่ใช้ทำเสาล่อฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ทั้งที่วัสดุเป็นธาตุโลหะ และที่มีการชุบด้วยธาตุโลหะเพื่อประโยชน์ในการลดต้นทุน ซึ่งแต่ละชนิดก็มีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาผลของกระแสที่ไหลผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า และทดสอบวัสดุตัวนำว่าชนิดไหนมีผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวนำล่อฟ้าที่มีการชุบโลหะ เช่น ทองแดง หรือกัลวาไนท์ อันเป็นผลทำให้แท่งตัวนำล่อฟ้าเกิดความเสียหายและประสิทธิภาพในการล่อฟ้าลดลง โดยการทดลองได้นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุต่างกันนำมาทดสอบ เช่น ทองแดงล้วน, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กชุบกัลวาไนท์ และได้นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีการชุบทองแดงที่มีความหนาต่างๆ นำมาทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.8.1 การเตรียมการทดสอบ

นำแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่ทำมาจากวัสดุต่างๆ ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งอยู่ด้วยกัน 5 ชนิด คือ ทองแดงล้วน, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กชุบทองแดง, เหล็กชุบกัลวาไนท์



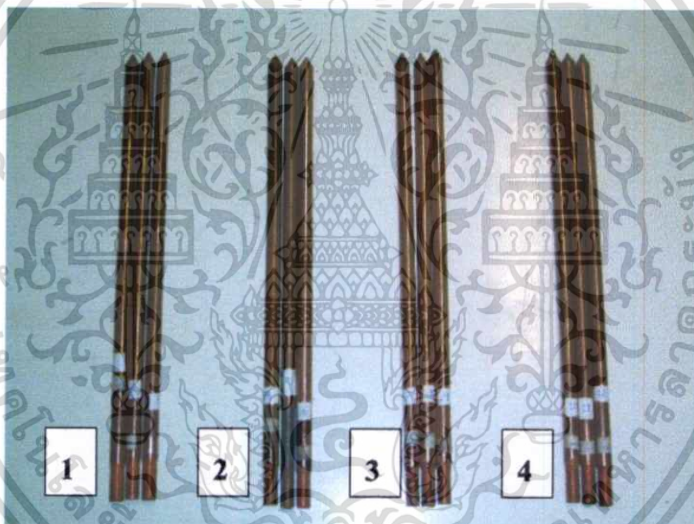
รูปที่ 4.29 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ทดสอบผลทางด้านความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุทองแดงล้วน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
4. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเหล็กชุบทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.
5. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุเหล็กชุบกัลป์วาไนท์ ความหนา $100 \mu\text{m}$ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ϕ 16 มม.

โดยวัสดุที่ชุบทองแดงจะมีความหนาต่างๆ กัน 4 ค่า คือ $85 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$ และ $350 \mu\text{m}$ โดยแต่ละขนาดความหนา มีจำนวน 3 แท่ง ค่าความผิดพลาด $\pm 5\%$ เพื่อความถูกต้องในการทดสอบ ดังนั้นมีจำนวนแท่งตัวนำทั้งหมด 12 แท่ง ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดงที่ความหนาต่างๆ

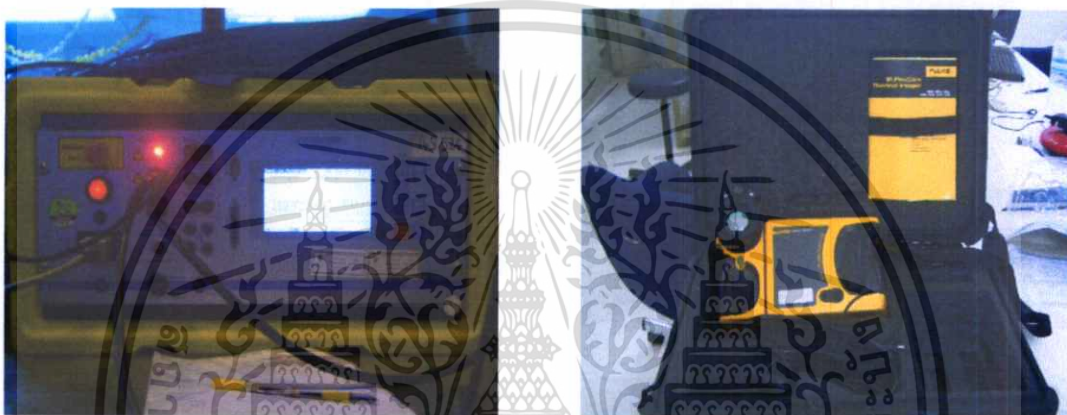
โดยแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีการชุบทองแดง จะมีความหน่างกัน 4 ค่า คือ

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าชุบทองแดง ขนาดความหนา $85 \mu\text{m}$
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าชุบทองแดง ขนาดความหนา $200 \mu\text{m}$
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าชุบทองแดง ขนาดความหนา $250 \mu\text{m}$
4. แท่งตัวนำล่อฟ้าชุบทองแดง ขนาดความหนา $350 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.2 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องวัดความต้านทาน ความละเอียดสูง
2. หม้อแปลงกระแส 2000 แอมป์ 10 kVA, Primary : แรงดัน 0-260 V, กระแส 38.46 A
Secondary : แรงดัน 1.3,2.6,5.2 V, กระแสประมาณ 0-2000A
3. สายตัวนำทองแดงเปลือยขนาด 150 มม²
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ Thermo scan
5. มิเตอร์วัดค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.31 เครื่องวัดความต้านทาน

รูปที่ 4.32 เครื่องวัดอุณหภูมิ(Thermo scan)

4.8.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าทั้งหมด วัดหาค่าความต้านทานของแต่ละแท่งตัวนำ โดยใช้เครื่องมือวัดหาค่าความต้านทาน โดยป้อนกระแสทดสอบ 30 แอมป์ เป็นเวลา 30 วินาที และบันทึกค่าความต้านทาน โดยต่อวงจรดังรูปที่ 4.33

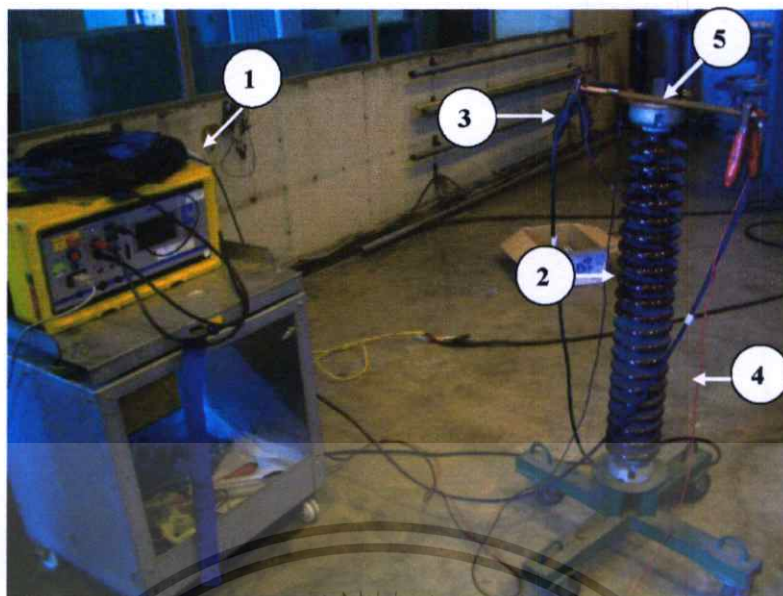
2. เมื่อวัดความต้านทานแต่ละแท่งตัวนำแล้ว นำแท่งตัวล่อฟ้าต่อวงจรตามรูปที่ 4.33 เพื่อวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับ

3. ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับแท่งตัวนำล่อฟ้า โดยทดสอบที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 1.ป้อนที่ระดับกระแสไฟฟ้า 100 แอมป์ เป็นเวลา 10 นาที และบันทึกอุณหภูมิผลการทดลอง

2. ป้อนกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์ เป็นเวลา 10 นาที และบันทึกอุณหภูมิผลการทดลอง 3. ป้อนกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์ เป็นเวลา 10 นาที และบันทึกอุณหภูมิผลการทดลอง

4. การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแท่งโดยการป้อนกระแสไฟฟ้า จะทำการบันทึกอุณหภูมิก่อนและหลังการทดสอบเสมอ

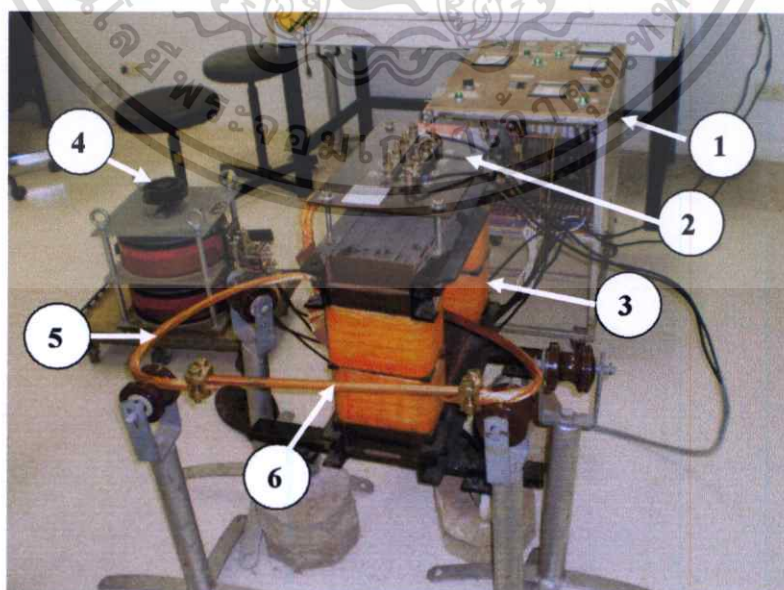
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 วงจรการวัดค่าความต้านทานของแท่งตัวนำล่อฟ้า

จากรูปที่ 4.34 เป็นวงจรการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งประกอบด้วย

1. เครื่องวัดความต้านทาน ความละเอียดสูง
2. ฐานรองรับแท่งตัวนำทดสอบ
3. ขั้วต่อสาย สำหรับป้อนกระแสไฟฟ้า กระแสตรง
4. ขั้วต่อสาย สำหรับวัดแรงดันกระแสตรงที่ตกคร่อม ตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ
5. แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ



รูปที่ 4.34 วงจรการทดสอบคุณสมบัติของแท่งตัวนำล่อฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.36 เป็นวงจรการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งประกอบด้วย

1. ชุดควบคุมหม้อแปลงกระแส
2. ขั้วต่อวงจร เลือกระดับของแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ
3. หม้อแปลงกระแส
4. ชุดปรับกระแสไฟฟ้า
5. สายตัวนำ
6. แท่งตัวนำล่อฟ้า ที่ทดสอบ

4.8.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทาน และวัดค่าอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละแท่งตัวนำ แสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าความต้านทานและค่าอุณหภูมิของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้า	ค่าความต้านทาน ($\mu\Omega$)	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งตัวนำล่อฟ้า ($^{\circ}C$)					
		100 A		300A		500A	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
ทองแดงล้วน	42.80	24.90	28.60	24.20	42.30	24.30	110
ชุบทองแดง 85 μm No.1	355.30	25.30	27.30	24.80	74.90	25.30	167
ชุบทองแดง 85 μm No.2	371.90	25.40	28.40	24.50	76.80	26.30	163
ชุบทองแดง 85 μm No.3	354.70	24.80	28.40	25.20	74.60	25.60	161
ชุบทองแดง 200 μm No.4	322.50	25.30	29.40	24.20	55.40	24.30	138
ชุบทองแดง 200 μm No.5	358.70	24.90	28.30	25.10	58.60	24.90	142
ชุบทองแดง 200 μm No.6	331.20	25.60	28.10	25.70	56.50	25.20	145
ชุบทองแดง 250 μm No.7	299.30	24.70	28.60	25.20	44.50	25.40	124
ชุบทองแดง 250 μm No.8	302.10	25.20	28.90	25.70	46.90	25.30	127
ชุบทองแดง 250 μm No.9	293.20	24.90	28.40	25.10	45.30	25.30	125
ชุบทองแดง 350 μm No.10	280.20	25.60	28.90	24.90	46.30	25.10	122
ชุบทองแดง 350 μm No.11	283.10	25.30	30.80	25.60	44.50	25.80	121
ชุบทองแดง 350 μm No.12	284.50	24.80	29.90	25.10	47.40	25.30	124
อลูมิเนียม	81.00	25.10	29.60	25.50	43.10	25.30	114
เหล็กกล้าไร้สนิม	2483.20	25.40	34.90	24.90	112	25.10	>230
ชุบกัลวาไนท์ 100 μm	398.50	26.60	32.00	26.10	108	25.50	189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

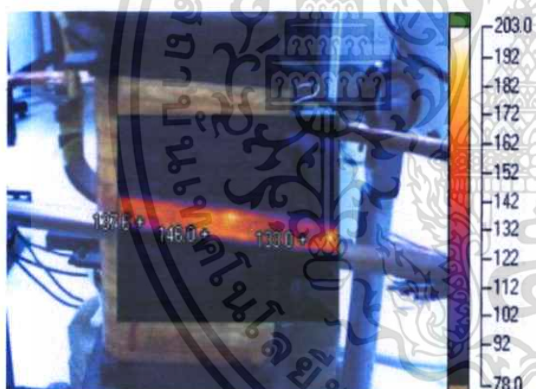
จากตารางที่ 4.18 จะเห็นว่าช่วงระดับกระแสไฟฟ้าที่ 500 แอมป์ ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อแท่งตัวนำล่อฟ้า ในด้านอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ชัดเจน ซึ่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้เป็นการป้อนกระแส 500 แอมป์ เป็นเวลา 10 นาที สามารถวัดได้โดยเครื่อง Thermo scan ดังรูปที่ 4.35 และผลกระทบเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดความเสียหายกับแท่งตัวนำล่อฟ้า ดังรูปที่ 4.36



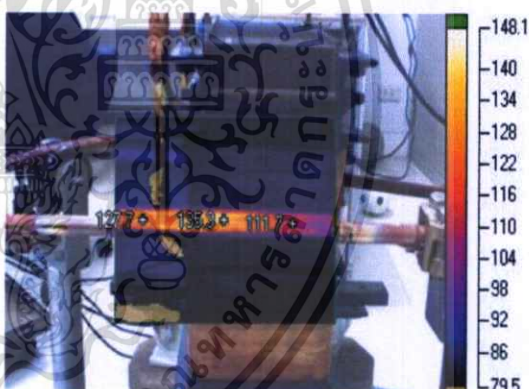
(ก) วัสดุเป็นทองแดงล้วน



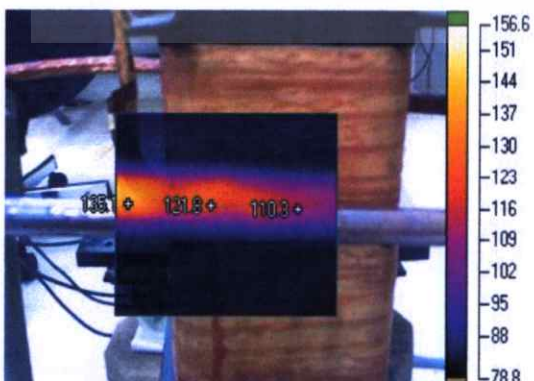
(ข) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 85 μm No.1



(ค) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 200 μm No.4



(ง) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 250 μm No.7

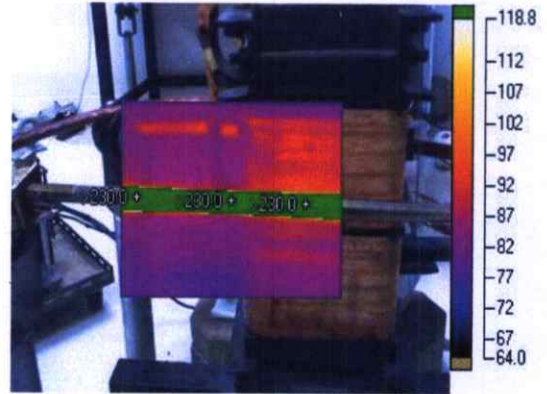
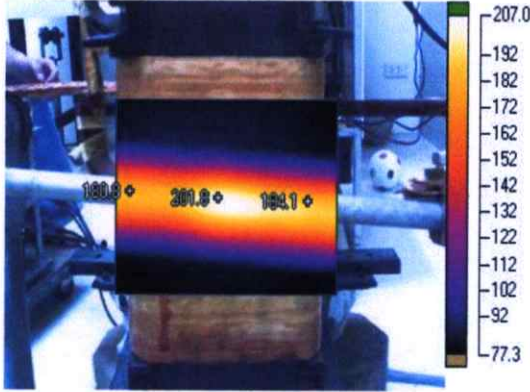


(จ) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 350 μm No.10



(ฉ) วัสดุเป็นอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ออกอณูให้วงนใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

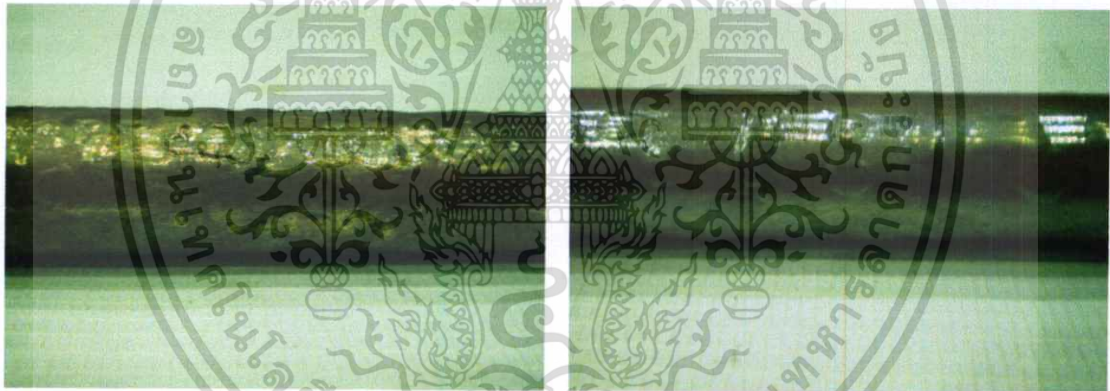


(ข) วัสดุเป็นเหล็กชุบกลวไนท์ 100 μm

(ช) วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม

รูปที่ 4.35 การวัดอุณหภูมิแท่งตัวนำล่อฟ้า วัสดุชนิดต่างๆ ขณะ
ป้อนกระแสไฟฟ้า 500 แอมป์ เป็นเวลา 10 นาที

จากผลการทดสอบ ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับแท่งตัวนำล่อฟ้าทำให้แท่งตัวนำเกิดความเสียหายในลักษณะที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.36



(ก) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 85 μm No.1

(ง) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 200 μm No.4



(ค) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 250 μm No.7

(ง) วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 350 μm No.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้พิมพ์หรือเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) วัสดุเป็นทองแดงล้วน



(ฉ) วัสดุเป็นอลูมิเนียม



(ช) วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม



(ซ) วัสดุเป็นเหล็กชุบกัลวาไนท์

รูปที่ 4.36 ผลของความร้อนที่มีต่อแท่งตัวนำล่อฟ้า วัสดุชนิดต่างๆ ขณะ
ป้อนกระแสไฟฟ้า 500 แอมป์ เป็นเวลา 10 นาที

4.8.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบป้อนกระแสไฟฟ้าสลับ(AC) ให้กับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ โดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับเริ่มจาก 100 แอมป์, 300 แอมป์, และ 500 แอมป์ โดยแต่ละค่าทำการป้อนเป็นเวลา 10 นาที ผลทางด้านความร้อนที่มีต่อวัสดุ จะเห็นได้ว่าวัสดุที่เป็นธาตุโลหะล้วน เช่น ทองแดง, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย คือมีการเปลี่ยนสีของผิวโลหะทำให้ผิวมีสีคล้ำขึ้น แต่ไม่ทำให้ผิวเกิดเป็นรอยผุผอง ส่วนวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีสีคล้ำอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงว่าวัสดุที่เป็นธาตุโลหะจะมีการทนต่ออุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ส่วนวัสดุที่เป็นเหล็กชุบทองแดงเมื่อทำการป้อนกระแสเข้าไปที่ระดับ 100 แอมป์ และ 300 แอมป์ ยังไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงมากเท่าไร แต่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 500 แอมป์ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน โดยเริ่มตั้งแต่ที่ความหนา 85 ไมครอน ผิวของวัสดุจะมีการผุผองอย่างรุนแรง เช่นเดียวกับความหนาที่ 200 ไมครอน แต่เมื่อความหนามากขึ้นที่ขนาด

250 ไมครอน ผิวของวัสดุจะเสียหายเพียงเล็กน้อย และที่ขนาด 350 ไมครอน ผิวของโลหะจะไม่เกิดความเสียหาย ส่วนวัสดุที่เป็นเหล็กชุบกล้าไนท์ผิวของวัสดุจะมีสีคล้ำแต่ไม่เกิดผุผอง

4.8.6 สรุปผลการทดลอง

จากทดลองผลทางด้านความร้อนที่มีต่อวัสดุที่ใช้ทำตัวนำล่อฟ้า จะเห็นได้ว่าวัสดุก็มีความสำคัญในการพิจารณาการออกแบบ ซึ่งถ้าวัสดุที่ทำแท่งตัวนำล่อฟ้ามีผลต่อความร้อนที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าก็อาจทำให้เกิดความเสียหายกับแท่งตัวนำล่อฟ้าได้ และอาจทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันฟ้าผ่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบแท่งตัวนำล่อฟ้าที่วัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง ควรคำนึงถึงความหนาของสารเคลือบไม่ควรมีน้อยเกินไป เพราะไม่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอกได้ และไม่ควรมากเกินไปเพราะอาจมีผลทางด้านต้นทุนการผลิต และประสิทธิภาพในการล่อฟ้า ฉะนั้นควรมีการพิจารณาถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อตัวนำล่อฟ้าที่ทำการออกแบบ



สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าซึ่งมีรูปแบบที่ใช้กันทั่วไป หรือที่เรียกว่าแบบฟาราเดย์ ถึงแม้ว่าตัวนำล่อฟ้าได้มีการคิดค้นและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในแง่ของมุมป้องกันฟ้าผ่าที่กว้างขึ้น แต่ผลการวิจัยการดังกล่าวก็ยังไม่มีการยืนยัน จากสถาบันที่เกี่ยวกับมาตรฐานการป้องกันว่าระบบที่คิดค้นดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบฟาราเดย์ที่ใช้กันทั่วไป[25] ฉะนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ต้องมีการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวนำล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ และนำข้อสังเกตที่ได้มาศึกษาวิจัยเพิ่มเติม โดยเน้นถึงลักษณะ โครงสร้างของแท่งตัวนำล่อฟ้า และวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้า โดยผลที่ได้จากการทดสอบอาจเป็นข้อมูลในการออกแบบและเลือกวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้า อีกทั้งสามารถนำผลจากการทดสอบมาเป็นข้อมูลในการศึกษาวิจัยต่อไป

ดังนั้นจากการศึกษา ค้นหาข้อมูลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นบทความทางวิชาการของต่างประเทศ และภายในประเทศ ตลอดจนแลกเปลี่ยนข้อมูลทางด้านงานวิจัยทั้งภาครัฐและเอกชน โดยมีการศึกษาดูงานระบบป้องกันฟ้าผ่าขององค์กร โทรศัทพ์แห่งประเทศไทย ทำอากาศยานนานาชาติสุวรรณภูมิ และตามสถานที่ต่างๆที่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า เพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้เกิดความถูกต้องสมบูรณ์ ตลอดจนนำข้อมูลมาประกอบในการทำวิจัย และจากการทดลองภายใต้สภาพเงื่อนไขที่กำหนด โดยทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง ชั่วลบ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทั้งชั่วบวกและลบ ซึ่งพอที่จะสรุปแนวทางที่จะทำการศึกษา ดังนี้

1. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปและที่ออกแบบขึ้นมาเอง 2-3 แบบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบดูคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาต่อฟ้า

โดยสมมติฐานเริ่มต้นของการศึกษาวิจัย คือ คุณลักษณะโครงสร้างของแท่งตัวนำล่อฟ้าว่ารูปทรงและวัสดุของแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบไหนจะมีการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่ากัน โดยเริ่มจากการนำแท่งตัวนำล่อฟ้า ซึ่งมีอยู่ 7 แบบ คือ ปลายแหลมชุบทองแดง, ปลายแฉกชุบทองแดง, ปลายแฉกวัสดุเป็นทองสัมฤทธิ์, ทรงกลมปลายแหลม, ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 มม., ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม., ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มม., ซึ่งในส่วนที่เป็นทรงกลมจะทำมาจากวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชั่วลบ เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณใต้แผ่นอิเล็กโทรดที่ทำการจำลองขึ้นมา จนทำให้แท่งตัวนำล่อฟ้าเกิดการเบรกดาวน์ผ่านอากาศและบันทึกผลการทดลอง ตลอดจนมีการทดสอบเปรียบเทียบแท่งตัวนำ

ดังกล่าว เพื่อดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ซึ่งมีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ทั้งชั่วบวกและลบ ด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองก็จะเห็นได้ว่ารูปทรงที่มีลักษณะเป็นปลายแหลม

และเป็นวัสดุที่มีการชุบด้วยทองแดง จะมีค่าแรงดันเบรกคาวาน์ต่ำกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน และลักษณะ โครงสร้างของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่เป็นปลายแหลมแหลม จะมีค่าแรงดันต่ำสุดที่ทุกระยะ แกบที่ทดสอบ อาจเป็นเพราะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณปลายแหลม ทำให้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปไม่สูงมากนักก็ทำให้เกิดการเบรกคาวาน์ขึ้น แต่ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นทองสัมฤทธิ์ซึ่งมีปลายที่แหลมคมกว่าแบบปลายแหลมที่ชุบด้วยทองแดง กลับมีค่าแรงดันเบรกคาวาน์ที่สูงกว่าแบบวัสดุที่ชุบด้วยทองแดง และการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกคาวาน์กรณีนำแท่งตัวนำล่อฟ้ามาทดสอบด้วยกัน ก็จะได้เห็นว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมชุบทองแดงมีจำนวนครั้งการเบรกคาวาน์มากที่สุด รองลงมาจะเป็นปลายแหลมชุบทองแดง และทรงกลมปลายแหลม ตามลำดับ ส่วนแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีลักษณะเป็นทรงกลมมีค่าแรงดันเบรกคาวาน์สูงกว่าแบบอื่น และมีการเกิดเบรกคาวาน์โดยตรงจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาออกแบบตัวนำล่อฟ้า

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบก็สรุปได้ว่า ตัวนำล่อฟ้าควรมีลักษณะเป็นแท่งปลายแหลมเพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และมีความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่า และการเกิดเบรกคาวาน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้าไม่เพียงขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของเสาต่อฟ้า แต่ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าอีกด้วย

2. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายแหลมที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ มาทดสอบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าว่าแตกต่างกันอย่างไร

โดยนำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุชนิดต่างๆ ที่กำหนดไว้ ตามมาตรฐาน IEC 62305-3 ซึ่งมีวัสดุที่ทดสอบ คือ วัสดุที่เป็นทองแดงล้วน, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กชุบทองแดง, เหล็กชุบกลวไนท์ ซึ่งดูผลการทดลองค่าแรงดันเบรกคาวาน์ วัสดุที่เป็นทองแดงล้วนมีค่าแรงดันเบรกคาวาน์ต่ำสุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงดันเบรกคาวาน์ของวัสดุอื่นก็มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าเพื่อยืนยันผลการทดลอง ก็จะได้เห็นว่า แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่มีวัสดุเป็นทองแดงล้วนมีจำนวนครั้งการเบรกคาวาน์มากที่สุด รองลงมาคือ วัสดุที่เป็นอลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ตามลำดับ ส่วนวัสดุที่เป็นเหล็กชุบทองแดงหรือกลวไนท์ ยังมีจำนวนครั้งการเบรกคาวาน์น้อยกว่าวัสดุอื่นซึ่งประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์ยังไม่เทียบเท่ากับวัสดุที่เป็นธาตุโลหะล้วน

3. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายมนที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวนำขนาดต่างๆ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มม., 16 มม., 19 มม., 23 มม. ตามลำดับ เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าว่าแตกต่างกันอย่างไร

โดยนำแท่งตัวนำล่อฟ้าดังกล่าวมาทดสอบ จากผลการทดลองค่าแรงดันเบรกคาวาน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้าขนาด 8 มม. ที่ระยะแกบสั้นๆ จะมีค่าแรงดันเบรกคาวาน์ต่ำกว่าขนาดอื่นๆ แต่ที่ช่วงระยะแกบห่างออกไปแท่งตัวนำล่อฟ้าขนาด 16 มม. และ 19 มม. มีค่าแรงดันเบรกคาวาน์ใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าขนาดอื่น ซึ่งจากการเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งการเบรกคาวาน์ก็เห็นได้

ชัดเจนว่า แท่งตัวนำล่อฟ้า ขนาด 16 มม. มีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากกว่าแบบอื่น ซึ่งแสดงว่ามีความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่าแบบอื่น

4. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบปลายมนและปลายแหลม ที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน นำมาเปรียบเทียบกัน โดยศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

จากการนำแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุต่างชนิดกัน 3 ชนิด คือ ทองแดง, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม เปรียบเทียบกัน จากผลการทดลองแท่งตัวนำปลายมนอลูมิเนียมมีค่าแรงดันเบรกคาวนต่ำสุด และมีจำนวนครั้งของการเบรกคาวนมากกว่าวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ในขณะเดียวกันได้นำแท่งตัวนำปลายแหลมมาเปรียบเทียบกับปลายมนที่วัสดุเดียวกัน เพื่อศึกษาว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่เป็นแบบปลายแหลมและปลายมน จะมีผลประสิทธิภาพในการสร้างสตริมเมอร์เป็นอย่างไร จากผลการทดลองที่ทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง โดยเริ่มจากวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมจะเห็นได้ว่า แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนจะมีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากกว่าปลายแหลม ส่วนวัสดุที่เป็นทองแดงแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากกว่าปลายมน และวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากกว่าปลายมน เช่นกัน แต่กรณีที่ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะเห็นได้ว่าวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม ๑) แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากกว่าแบบปลายมนที่ระยะแกป 10 และ 30 มม. แต่ที่ระยะ 50 มม. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนมีแนวโน้มมากกว่า เนื่องจากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ระยะแกปในการทดสอบมีระยะสั้นการเบรกคาวนจึงเกิดขึ้นกับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่เป็นแบบปลายแหลม เพราะบริเวณที่ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จึงเกิดการเบรกคาวนที่ระยะแกปสั้นๆ แต่เมื่อระยะแกปห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายแหลมจะลดลงอย่างรวดเร็ว

5. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีแนวโน้มของการเบรกคาวนมากที่สุด ในแต่ละการทดลองที่ผ่านมา โดยมีดังนี้ คือ 1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง 2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นทองแดงล้วน 3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุเป็นอลูมิเนียม

ในการทดลองขั้นตอนนี้เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ที่ดีที่สุดในแต่ละการทดลอง โดยพิจารณาจากค่าแรงดันเบรกคาวนและจำนวนครั้งของการเบรกคาวนของแท่งตัวนำ และนำแท่งตัวนำล่อฟ้าดังกล่าวมาทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ที่ได้ทดสอบมาแล้ว จากผลการทดลองด้วยแรงดันกระแสตรงปรากฏว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุอลูมิเนียมมีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากที่สุด รองลงมาเป็นแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นทองแดงล้วน และแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นเหล็กชุบทองแดง ตามลำดับ แต่เมื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุเป็นทองแดงล้วนมีจำนวนครั้งการเบรกคาวนมากกว่าแบบอื่นที่ระยะแกปแคบกว่า 30 มม. แต่ที่ระยะแกป 50 มม. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุเป็นอลูมิเนียมมีแนวโน้มที่มีจำนวนครั้งการเกิดเบรกคาวนมากกว่าแบบอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ทั้งนี้ระยะแกปที่ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์มีระยะ

สั้น ทำให้เกิดการเบรคความถี่ในแท่งตัวนำปลายแหลมที่มีวัสดุเป็นทองแดงล้วน แต่ที่ระยะแกปห่างออกไปแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนวัสดุเป็นอลูมิเนียม จะมีความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่าแบบอื่นที่นำมาทดสอบทั้งหมด

6. นำแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลมที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ มาทดสอบดูผลของอุณหภูมิเนื่องจากกระแสไฟฟ้า(กระแสสลับ)

โดยวัสดุที่นำมาทดสอบมีทั้งแบบเหล็กชุบทองแดง, เหล็กชุบกัลวาไนท์, และวัสดุที่เป็นธาตุโลหะ เช่น ทองแดงล้วน, อลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าที่ 500 แอมป์ สังเกตบริเวณผิวของโลหะที่นำมาทดสอบ โดยวัสดุที่มีการชุบด้วยทองแดงผิวของโลหะเคลือบจะเกิดการผุผอง และหลุดร่อนเป็นบางจุด จากการทดลองปรากฏว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุชุบด้วยทองแดงความหนาอย่างน้อยกว่า 250 ไมครอน ก็จะมีการผุผอง และหลุดร่อนได้ง่ายกว่าวัสดุที่ชุบทองแดงที่ความหนามาก ส่วนวัสดุที่เป็นเหล็กชุบกัลวาไนท์เมื่อนำมาทดสอบวัสดุมีการทนต่ออุณหภูมิได้ดี แต่สีผิวโลหะจะหมองไปบ้าง และการนำวัสดุที่เป็นธาตุโลหะล้วนมาทดสอบ ผลปรากฏว่าวัสดุมีการทนต่ออุณหภูมิได้ดี แต่สีผิวโลหะจะมีลักษณะคล้ำ

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ IEC ซึ่งสามารถนำไปเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งในการป้องกันระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ ซึ่งในมาตรฐานมิได้กำหนดรูปลักษณะและวัสดุที่ดีที่สุดในการล่อฟ้าไว้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอถึงความสามารถในการสร้างสตริมเมอร์ของแท่งตัวนำล่อฟ้าในรูปลักษณะและวัสดุต่างๆ โดยดูจากค่าแรงดันเบรคความถี่และจำนวนครั้งในการเบรคความถี่ของตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

จากการสรุปผลการทดลองที่ได้ทดสอบมาทั้งหมด เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้า และคุณลักษณะทางกายภาพของแท่งตัวนำล่อฟ้า จะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีลักษณะเป็นปลายมนวัสดุอลูมิเนียมจะมีแนวโน้มในการเกิดเบรคความถี่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นที่ทำการทดสอบด้วยกัน ส่วนแท่งตัวนำล่อฟ้ารูปแบบและวัสดุอื่นๆก็สามารถนำมาใช้ในระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ เพียงแต่ให้มีการออกแบบระบบป้องกันที่ถูกต้อง แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ เรื่องของประสิทธิภาพในการล่อฟ้า และวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าต้องมีความคงทนต่อสภาพอากาศและอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากกระแสฟ้าผ่าได้ รวมถึงต้นทุนในการติดตั้งระบบป้องกัน ฉะนั้นแท่งตัวนำล่อฟ้าที่วัสดุเป็นอลูมิเนียมและที่มีการชุบด้วยทองแดงก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่ถ้ามีการชุบด้วยทองแดงควรให้ความหนามากกว่า 250 ไมครอน เพื่อที่จะทนต่ออุณหภูมิที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าได้ แต่ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับความรุนแรงของกระแสฟ้าผ่าในแต่ละพื้นที่

5.2 อุปสรรคและการแก้ไข

1. เนื่องจากข้อมูลในเรื่องมาตรฐานของตัวนำล่อฟ้ายังไม่มีให้ศึกษา มีแต่มาตรฐานระบบป้องกันฟ้าผ่า และบทความทางวิชาการของต่างประเทศที่ได้นำเสาต่อฟ้าแบบต่างๆมาทดสอบ ฉะนั้นการออกแบบและทดสอบตัวนำล่อฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้มาจากแนวความคิดจากการศึกษางานวิจัยและบทความทางวิชาการในประเทศและต่างประเทศ

2. การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าควรทดสอบที่ระยะแก๊ปสูงๆ จึงจะได้ผลการทดสอบที่ค่อนข้างถูกต้องมากขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้า ทั้งแรงดันกระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์ ไม่สามารถสร้างแรงดันที่สูงมากได้

3. เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการทดสอบ เช่น กล้องโคโรนา, เครื่องวัดความต้านทาน และกล้องเทอร์โมสแกน มีราคาค่อนข้างสูงจึงจำเป็นต้องยืมมาจากหน่วยงานข้างนอก ซึ่งแผนการใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าว เพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงระบบการส่งจ่ายของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่มีความถี่ค่อนข้างสูง ซึ่งต้องใช้เวลาในการติดต่อประสานงานค่อนข้างนานมาก และมีความยากลำบากในการขออนุเคราะห์

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดสอบตัวนำล่อฟ้าในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ถ้าต้องการศึกษาเกี่ยวกับตัวนำล่อฟ้าในแง่ประสิทธิภาพของการใช้งานจริง ควรทดสอบในสภาวะการเกิดฟ้าผ่าจริง และต้องมีเครื่องมืออุปกรณ์ที่ทันสมัย ตลอดจนระยะเวลาในการเก็บข้อมูลเป็นเวลานาน

2. ในอนาคต ประเทศไทยควรมีสถาบันที่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่ได้มาตรฐาน เพื่อประโยชน์ในงานวิจัยและผู้ผลิตตัวนำล่อฟ้า ซึ่งปัจจุบันในต่างประเทศได้มีสถาบันวิจัยทางด้านตัวนำล่อฟ้ากันอย่างจริงจัง

3. เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยนี้มีการทดสอบค่อนข้างมาก ควรต้องมีการหยุดพักเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้า และตรวจสอบความพร้อมของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสม่ำเสมอ ก่อนใช้งานทุกครั้ง

บรรณานุกรม

- [1] กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย, “สถิติอุบัติภัยธรรมชาติปี 2546-2551”, www.diaster.go.th .
- [2] Harger, “**Lightning&Grounding**”; **Lightning Protection Systems**”, 2005.
- [3] ตำราวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, มีนาคม 2549.
- [4] Vernon Cooray, “**The Lightning Flash**”, The Institution of Electrical Engineering, London , UK 2003.
- [5] John J.Lowke : “**On the Physics of Lighting**”, IEEE Transations on plasma science, Vol.32, No.1, Feburuary 2004
- [6] Marvin M.Frydenlund, “**Lightning Protection for People and Property**”, copyright 1993, New York.
- [7] R.H. Golde, “**Physics of Lighting Volume1**”, copyright 1997, Academic Press, London, New York, San Francisco.
- [8] IEC 62305-1, “**Protection against lightning-General principles**”, First edition, 2006-01.
- [9] วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์, ”การออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง”, สมาคมวิศวกร ออกแบบและปรึกษาเครื่องกลและไฟฟ้าไทย, กรกฎาคม 2547.
- [10] ชำนาญ ห่อเกียรติ, “ระบบป้องกันฟ้าผ่า, โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [11] วิทยา อินทร์แก้ว, วิวัฒน์ สังข์คิดไพเราะ และ สิวราช วัฒนปานิ, “การเตรียมการทดสอบหัว ล่อฟ้า”, ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี 2544
- [12] IEC 62305-2, “**Protection against lightning-Risk management**”, First edition, 2006-01.
- [13] มาตรฐาน ว.ส.ท. , “มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง”. วิศวกรรมสถานแห่ง ประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [14] NFC 17-102, “**Lightning Protection-French Standard**”, July 1995.
- [15] National Lightning Safety Institute, “**World Lightning Map-Average World Thunderstorm day/year**”. www.lightningsafety.com.
- [16] National Space Science and Technology Center, “**Lightning even during the daytime reveal on Earth,**” www.science.nasa.gov.
- [17] IEC 62305-3, “**Protection against lightning-Physical damage to structures and life hazard**”, First edition 2006-01.

- [18] R.H. Golde, **“Lightning Protection Volume 2,”** , copyright 1997, Academic Press, London, New York, San Francisco. .
- [19] ปราโมทย์ เศษอำไพ, **“ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม,”** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550, พิมพ์ครั้งที่ 4.
- [20] ชูกร ปรีมญาติ, กฤษณ์ กรรขำ และเจนวิทย์ พิมพ์พา **“การศึกษากระบวนการทดสอบ Connector และ Clamp แบบต่างๆ ทางไฟฟ้าแรงสูง,”**ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี 2548.
- [21] UL 96 Standard for Safety, **“Lightning Protection Components,”** Fifth Edition, Dated May 12, 2005.
- [22] William Rison, Charles B.Moore, and Graydon D.Aulich **“Lightning Air Terminals-Is Shape Important?,”** New Mexico Institute of Mining and Technology, USA.
- [23] C.B. Moore, William Rison, James Mathis, and Graydon Aulich, **“Lightning Rod Improvement Studies”**, Journal of Applied Meteorology, 10 April 1999.
- [24] H.Ahmad, Senior Member, IEEE, and L.M. Ong, **“An Account of A Modified Lightning Protection System For Power Stations,”** Power Engineering Conference, 29Nov-2Dec , IPEC2005 The 7th International.
- [25] Donald W.Zipse P.E. Senior Member, **“Lighting Protection System : Advantages and Disadvantages”** , FMC Corporation , Paper No.PCIC-93-06.
- [26] IEC 60052, **“Voltage measurement by means of standard air gaps ”**, IEC INTERNATIONAL STANDARD, Third Edition , 2002-10.
- [27] IEC Publ. No.60060-1, **“High Voltage Test Techniques Part1: General Definations and Test Requirement Geneva”** , 1989 , Second Edition.

ภาคผนวก ก

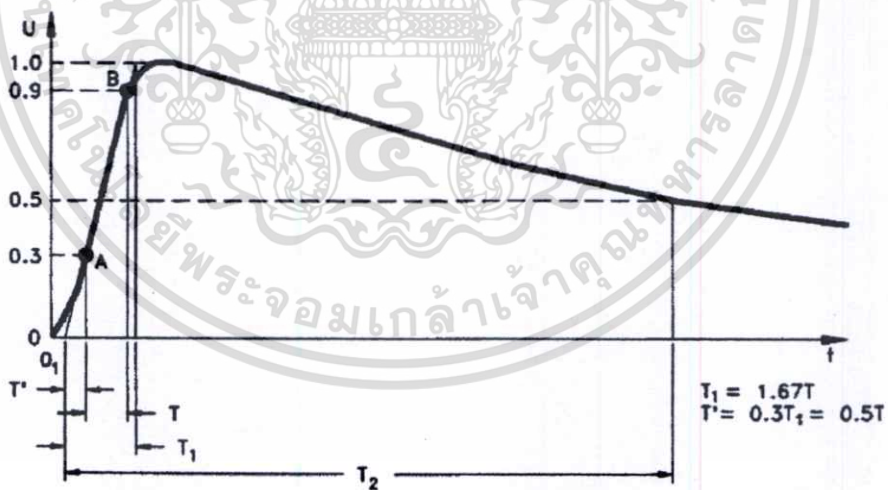
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระแสฟ้าผ่า

การกำหนดลักษณะรูปร่างของแรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

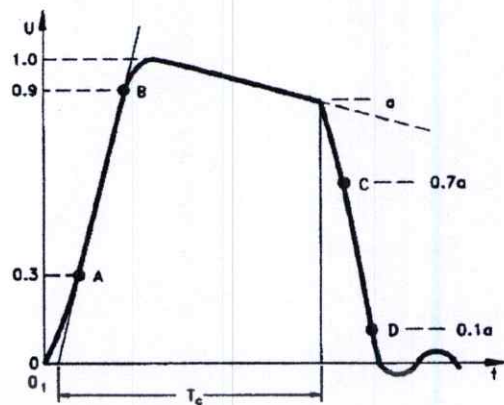
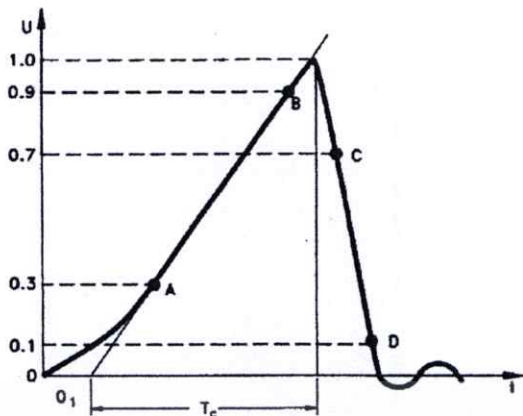
- 1) ขนาดแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน
- 2) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- 3) เวลาช่วงหางคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาดังแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

ก.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งออกเป็น

1. รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึงรูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ ดังรูปที่ ก.1
2. รูปคลื่นตัด (Chopped wave) ซึ่งเกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และเกิดควาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกควาน ทำให้เกิดลัดวงจร ซึ่งรูปคลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเต็มคลื่น [3]



1) รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

2) รูปคลื่นตัดหางคลื่น

รูปที่ ก.2 รูปคลื่นตัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

ก.2 ลักษณะของวาทฟ้าผ่า

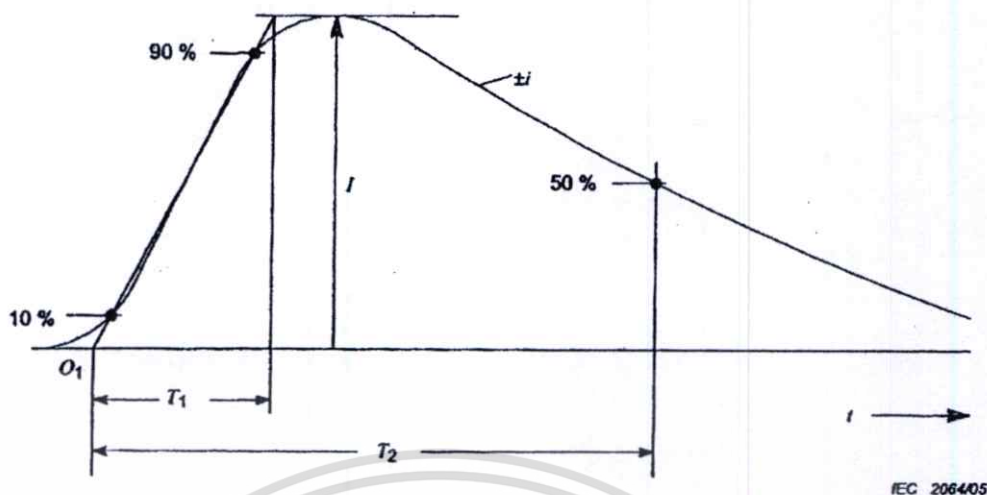
ก.2.1 วาทฟ้าผ่ามี 2 ชนิด คือ

- 1) วาทฟ้าผ่าลง เริ่มต้นจากหัวน้ำร่องจากก้อนเมฆสู่พื้นดิน
- 2) วาทฟ้าผ่าขึ้น เริ่มต้นจากหัวน้ำร่องขึ้นจากสิ่งปลูกสร้างที่ต่อลงดิน ไปยังก้อน

เมฆ โดยส่วนใหญ่วาทฟ้าผ่าลงจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ราบ และเกิดกับสิ่งปลูกสร้างที่เตี้ย ในขณะที่สิ่งปลูกสร้างที่สูง และ/หรือ เปิด โลง จะเกิดวาทฟ้าผ่าขึ้นมากกว่า กรณีที่สิ่งปลูกสร้างมีความสูงยังผลความน่าจะเป็นในการเกิดฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างจะมีค่ามากขึ้น

ก.2.2 กระแสฟ้าผ่าประกอบด้วยลำฟ้าผ่า 1 ลำ หรือลำฟ้าผ่าต่างชนิดกันมากกว่า 1 ลำ

- 1) ลำฟ้าผ่าช่วงสั้น มีระยเวลาน้อยกว่า 2 มิลลิวินาที ดังรูปที่ ก.3
- 2) ลำฟ้าผ่าช่วงยาว มีระยเวลามากกว่า 2 มิลลิวินาที ดังรูปที่ ก.4



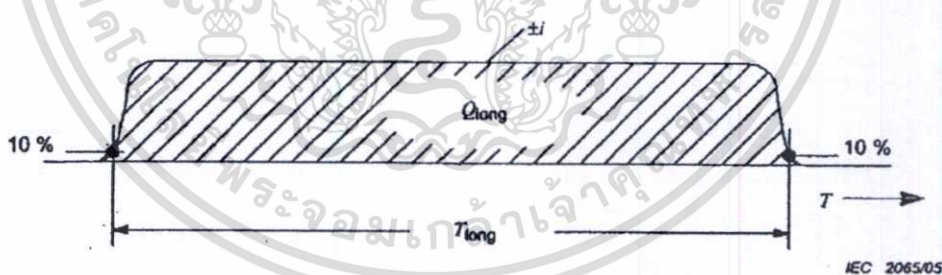
O_1 คือ จุดเริ่มต้นเสมือน (Virtual origin)

I คือ กระแสค่ายอด

T_1 คือ เวลาค้นขึ้น

T_2 คือ เวลาถึงครึ่งค่ายอด

รูปที่ ก.3 นิยามของค่าพารามิเตอร์ของลำฟ้าผ่าช่วงสั้น ($T_2 < 2$ ms)



T_{long} คือ ระยะเวลา

Q_{long} คือ ประจุของลำฟ้าผ่า ช่วงยาว

รูปที่ ก.4 นิยามของค่าพารามิเตอร์ของลำฟ้าผ่าช่วงยาว ($2\text{ms} < T_{long} < 1\text{s}$)

รูปแบบลำฟ้าผ่าอาจแบ่งได้เพิ่มเติมอีก โดยจำแนกตามหัว (บวกหรือลบ) และตำแหน่งที่เกิดระหว่างเกิดวาบฟ้าผ่า (เกิดลำแรก, ลำต่อมา, หรือเกิดซ้อนทับกัน)

ก.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระแสฟ้าผ่า

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระแสฟ้าผ่า ได้มาจากผลการศึกษาของ CIGRE ซึ่งได้แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่แจ้งชื่อผู้จัดทำเอกสาร
 ข้อมูลไว้ในตารางที่ ก.1
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

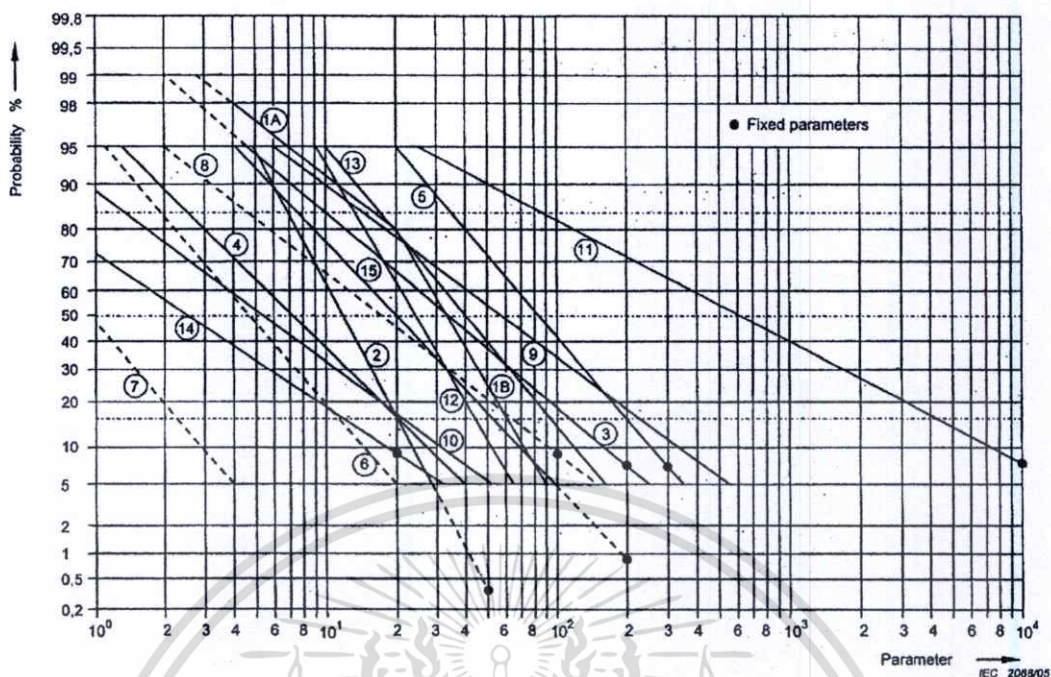
ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ต่างๆของกระแสฟ้าผ่า ที่นำมาจาก CIGRE

พารามิเตอร์	ค่าคงที่ สำหรับ LPL 1	ค่า			ชนิดล้าฟ้าผ่า	หมายเลข รูปที่ก.5
		95%	50%	5%		
I (kA)	50 200	4	20	90	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	1A+1B
		4.9	11.8	28.6	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	2
		4.6	35	250	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	3
Q_{flash} (C)	300	1.3	7.5	40	วาบฟ้าผ่าลบ	4
		20	80	350	วาบฟ้าผ่าบวก	5
Q_{short} (C)	100	1.1	4.5	20	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	6
		0.22	0.95	4	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	7
		2	16	150	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	8
W/R (kJ/ Ω)	10000	6	55	550	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	9
		0.55	6	52	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	10
		25	650	15000	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	11
di/dt_{max} (kA/ μ s)	20	9.1	24.3	65	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	12
		9.9	39.9	161.5	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	13
		0.2	2.4	32	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	14
$di/dt_{30/90\%}$ (kA/ μ s)	200	4.1	20.1	98.5	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	15
Q_{long} (C)	200				ช่วงยาว	
t_{long} (s)	0.5				ช่วงยาว	
Front duration (μ s)		1.8	5.5	18	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	
		0.22	1.1	4.5	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	
		3.5	22	200	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	
Stroke duration (μ s)		30	75	200	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	
		6.5	32	140	ช่วงสั้นชั่วพลล้าต่อมา	
		25	230	2000	ช่วงสั้นชั่วพลล้าแรก	
Time interval (ms)		7	33	150	ล้าฟ้าผ่าลบหลายล้า	
Total flash duration (ms)		0.15	13	1100	วาบฟ้าผ่าลบ (ทั้งหมด)	
		31	180	900	วาบฟ้าผ่าลบ(ไม่รวม ล้าฟ้าผ่าเดี่ยว)	
		14	85	500	วาบฟ้าผ่าบวก	

หมายเหตุ ค่ากระแส I = 4 kA และ I = 20 kA สอดคล้องกับความน่าจะเป็นในการเกิด 98%

และ 80% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 กราฟการแจกแจงความถี่สะสมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานการวัดแรงดันสูงกระแสตรงระหว่างช่องอากาศรีด-รีด
(สำหรับการคำนวณค่าแรงดัน)

ข.1 ค่ามาตรฐานในการอ้างอิง

การคิสซาร์จผ่านอากาศจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างช่องอากาศรีด-รีด ซึ่งมีค่ามาตรฐานของความดันบรรยากาศและอุณหภูมิดังนี้

$$\text{อุณหภูมิ} \quad t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ความดันบรรยากาศ} \quad b_0 = 101.3 \text{ kPa}$$

ภายใต้ค่าความชื้นสัมบูรณ์ระหว่าง 5 gm^{-3} และ 12 gm^{-3} โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.5 gm^{-3} [26]

โดยแรงดันคิสซาร์จสำหรับกระแสตรงขั้วบวกและกระแสตรงขั้วลบทั้งการติดตั้งในแนวดิ่งและแนวราบสามารถหาได้โดย

$$U_0 = 2 + 0.534 \times d \tag{ข.1}$$

โดย

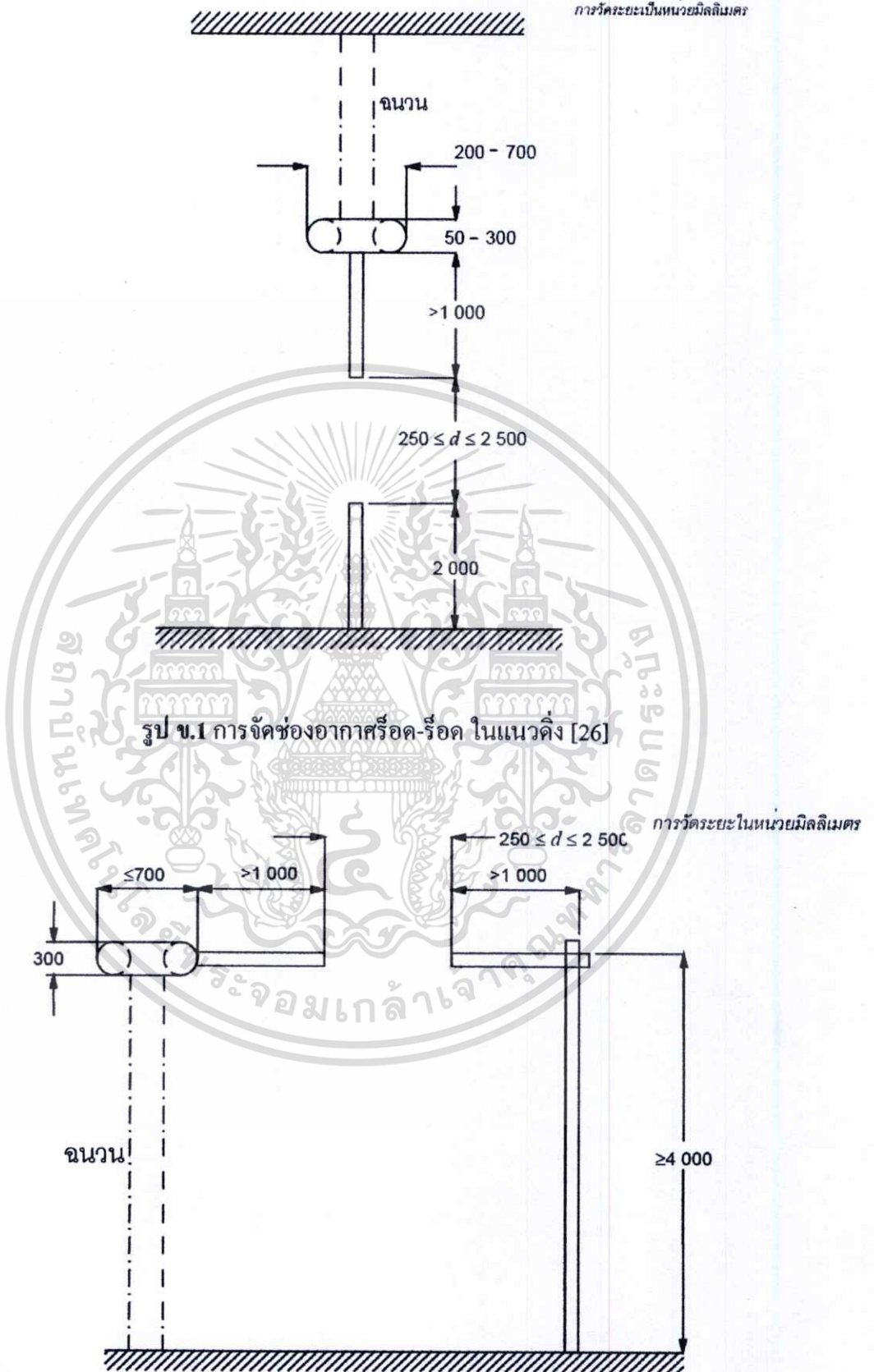
U_0 คือ แรงดันคิสซาร์จในหน่วยกิโลโวลต์

d คือ ระยะห่างช่องว่างอากาศในหน่วยมิลลิเมตร

ซึ่งค่าระยะห่าง d มีค่าระหว่าง 250 และ 2500 มิลลิเมตร และมีค่าความชื้นในย่าน 1 gm^{-3} ถึง 13 gm^{-3} ภายใต้สภาวะนี้แรงดันคิสซาร์จจะมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 % ซึ่งสภาวะที่มีความน่าเชื่อถือจะมีความผิดพลาดไม่เกิน 95 % [26]

ข.2 ตัวประกอบค่าแก้เนื่องจากสภาพบรรยากาศ [27]

$$K_t = k_1 k_2 \tag{ข.2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ตัวประกอบค่าแก้ไขเนื่องจากความหนาแน่นอากาศ

ค่าตัวประกอบค่าแก้ไขเนื่องจากความหนาแน่นอากาศ k_1 มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นอากาศ δ ซึ่งสามารถหาได้โดย

$$k_1 = \delta^m \quad (ข.3)$$

โดย m คือ เลขชี้กำลังซึ่งหาได้จากหัวข้อ ก.5

ค่าความหนาแน่นอากาศสามารถหาได้โดย

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (ข.4)$$

โดย

b คือ ความดันบรรยากาศในหน่วยกิโลปาสกาล

b_0 คือ ความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐานในหน่วยกิโลปาสกาล

t คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

t_0 คือ อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐานในหน่วยองศาเซลเซียส

ข.4 ตัวประกอบค่าแก้ไขเนื่องจากความชื้น

ตัวประกอบค่าแก้ไขเนื่องจากความชื้นสามารถหาได้โดย[3]

$$k_2 = k^w \quad (ข.5)$$

ซึ่งค่า k สามารถหาได้จากกราฟในรูปที่ ก.3 ดังนี้

$$k = 1 + (0.014 \times (h/\delta - 11)) \quad (ข.6)$$

โดยค่าความชื้น h/δ มีค่าระหว่าง 1 gm^{-3} - 13 gm^{-3}

ค่าแรงดันมาตรฐาน [27]

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (ข.7)$$

โดย

U คือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่วัดได้ภายใต้อุณหภูมิ t ความดันบรรยากาศ b และความชื้นสัมบูรณ์ h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.5 ค่าเลขชี้กำลัง m และ w

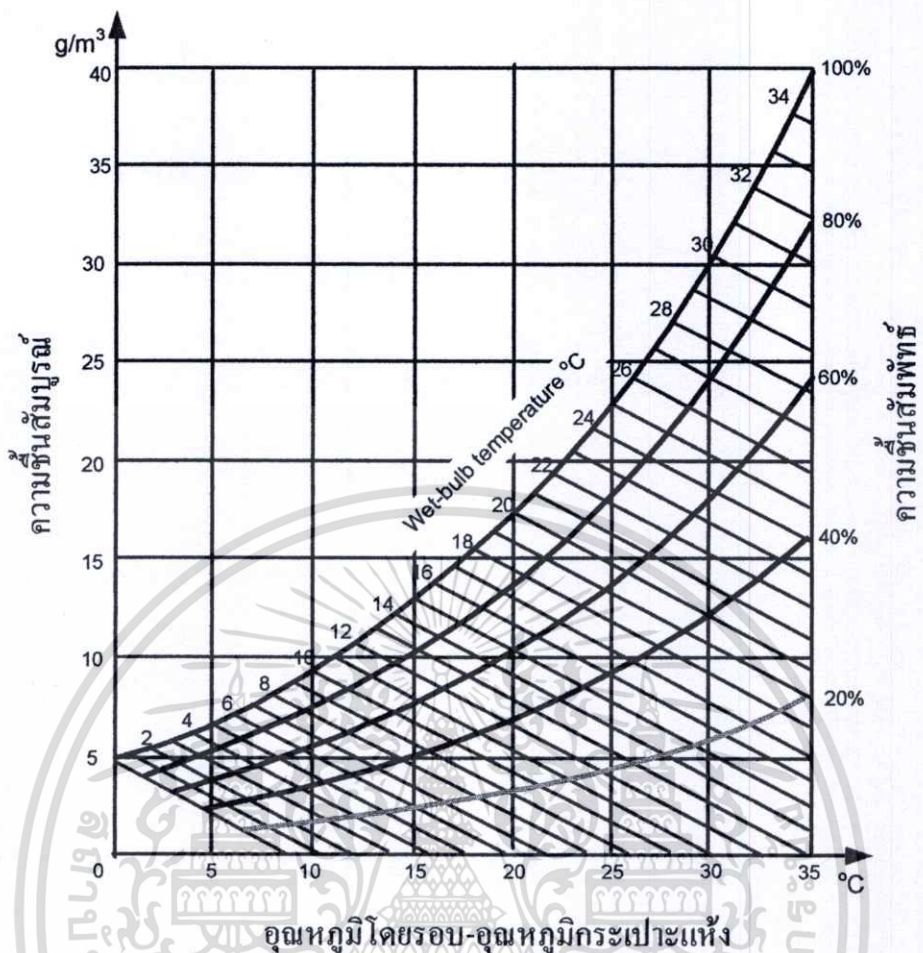
ค่าตัวประกอบค่าแก้มี่ค่าขึ้นกับชนิดของพรีดิศหาร์จ
ตัวแปรได้ดังนี้

ซึ่งสามารถหาจากการพิจารณา

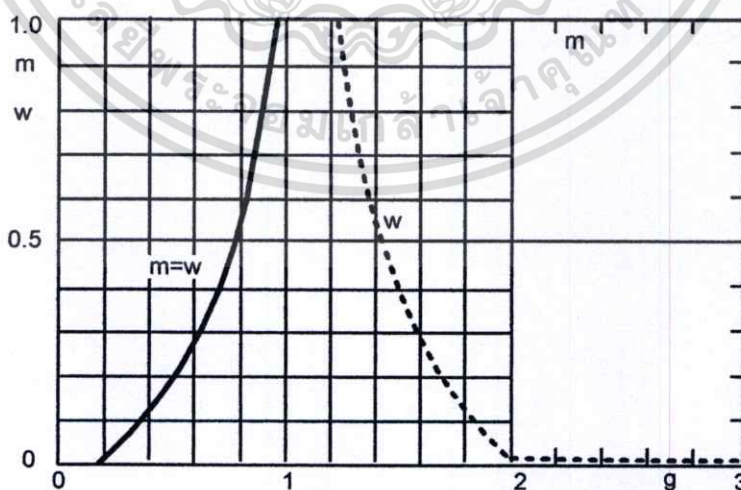
$$g = \frac{U_B}{500L\delta \times k} \quad (ข.8)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

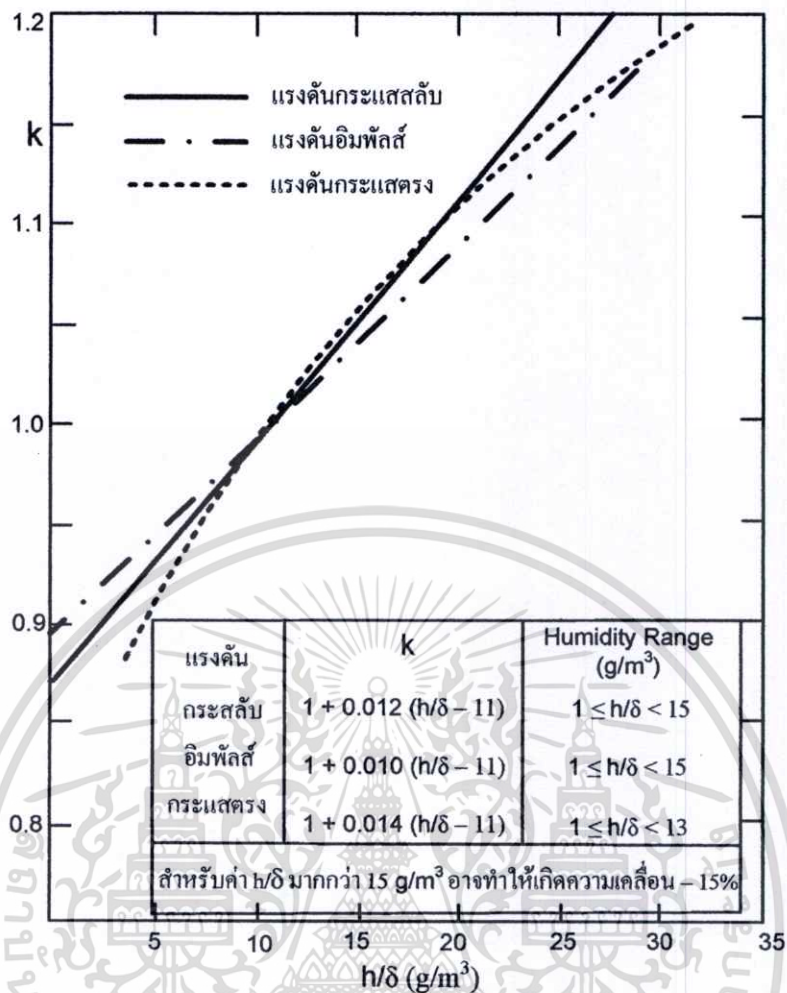


รูปที่ ข.3 กราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ ข.4 กราฟการหาค่า m และ w สำหรับแก้ค่าความหนาแน่นอากาศและแก้ค่าความชื้นเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



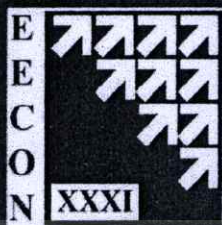
รูปที่ ข.5 กราฟการหาค่าพารามิเตอร์ k เป็นฟังก์ชันของ h/δ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

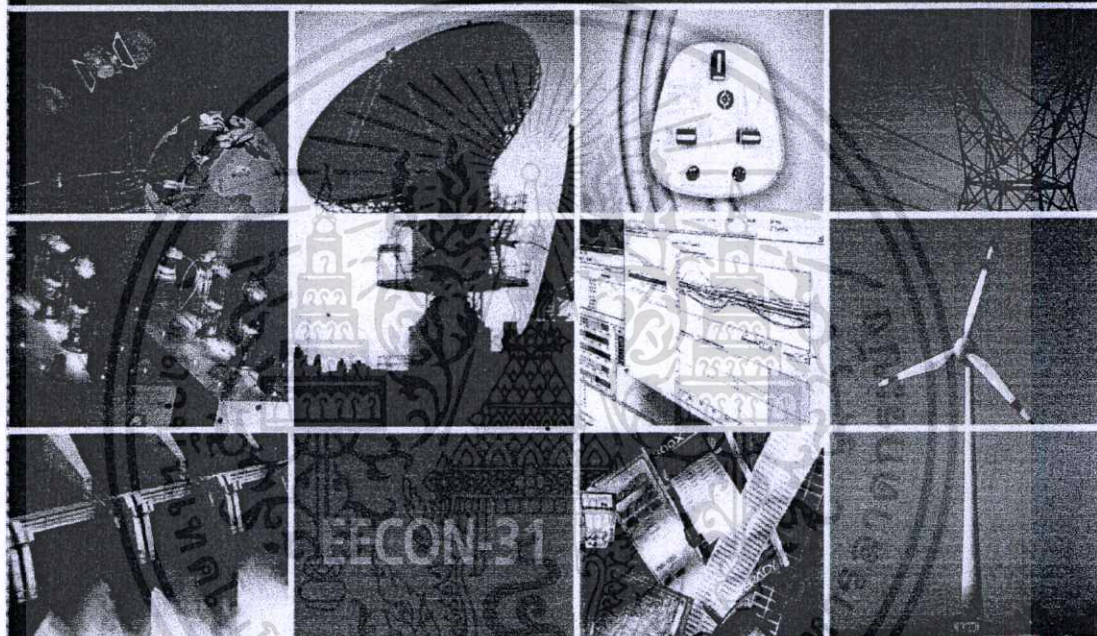
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ศรีณย์ ชีวทวีทรัพย์, นรเศรษฐ พัฒนเดช, ภพ จันทร์เจริญสุข, “คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาหล่อฟ้าชนิดต่างๆ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่31, หน้า 251-254, ประเทศไทย, วันที่ 29-31 ตุลาคม 2008.
2. ศรีณย์ ชีวทวีทรัพย์, นรเศรษฐ พัฒนเดช, ภพ จันทร์เจริญสุข, “การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ทำเสาหล่อฟ้า”, การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่47, หน้า 251-254,ประเทศไทย, วันที่ 17-20 มีนาคม 2009.



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)



- Volume I**
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
 - อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
 - คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ โรงแรมฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

ร่วมจัดโดย



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย



Western
Digital



ABB

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าชนิดต่างๆ

Electrical Characteristic of Various Design of Air Terminals

ศรัณย์ ชิววิทวิทย์ นรเศรษฐ พัฒนเศรษฐ จันทร์เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ : 0-2326-9902 E-mail: samira074@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัตินิยามของเสาต่อฟ้าแบบต่างๆภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยมีการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์หาความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างกึ่งเมฆจำลองกับเสาต่อฟ้าซึ่งพบว่าโครงสร้างแบบปลายแฉกมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด มีแนวโน้มที่จะเกิดการสร้างสตรีมเมอร์เร็วที่สุด การทดสอบด้วยชุดทดลองที่ออกแบบสร้างขึ้นที่อินชันทดลองด้วยเสาต่อฟ้าปลายแฉกของแฉงเกิดการเบรกความถี่ที่แรงดันต่ำที่สุด นอกจากนี้ผลการทดลองนับจำนวนครั้งการเกิดเบรกความถี่ที่เกิดกับเสาต่อฟ้าแบบต่างๆยังพบว่าเสาต่อฟ้าปลายแฉกของแฉงมีจำนวนครั้งการเกิดเบรกความถี่สูงสุดด้วย

คำสำคัญ: เสาต่อฟ้า, ไฟไนต์เอลิเมนต์, สตรีมเมอร์, ความเครียดสนามไฟฟ้า, แรงดันเบรกความถี่

Abstract

This paper presents study of electrical characteristic of various design of air terminal under determined condition. A finite element analyses package was used to determine electric field stress between air terminal and an electrode plate. It was found that the multi-point air terminal generated the largest electric field strength and earliest streamer. This was confirmed with several experimental results. Breakdown voltage of the multi-point copper air terminal was the lowest. Furthermore, such air terminal had the most frequent breakdown counts when compared with other design.

Keywords: Air terminal, finite element, steamer, electric field stress, breakdown voltage

1. คำนำ

ในแต่ละปีฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่สร้างความเสียหายให้กับมนุษย์และทรัพย์สินต่างๆทั่วโลก ซึ่งความเสียหาย

ที่เกิดขึ้นมีสามทศวรรษ และปัจจุบันมีการเกิดสภาวะโลกร้อนเนื่องจากอัตราการใช้พลังงานในโลกรวมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากสภาวะโลกร้อนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้เกิดภัยธรรมชาติที่ไม่คาดคิด รวมถึงเกิดพายุฝนฟ้าคะนองและปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่รุนแรงขึ้น จากสถิติได้มีการบันทึกความเสียหายเนื่องจากฟ้าผ่าในประเทศไทย [1] ซึ่งในแต่ละปีมีผู้เสียชีวิตเนื่องจากฟ้าผ่าหลายสิบคน มูลค่าความเสียหายนับล้านบาท และมีผลทางด้านเศรษฐกิจอีกด้วย ฟ้าผ่าในระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชน ฉะนั้นต้องมีการศึกษาวิจัยระบบป้องกันฟ้าผ่าให้เกิดประสิทธิภาพในการป้องกันที่พอ รวมถึงการออกแบบและทดสอบเสาต่อฟ้าซึ่งมีความสำคัญในการรับล้าฟ้าผ่าเป็นลำดับแรก เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์ในการพัฒนาระบบป้องกันฟ้าผ่าในอนาคต

บทความนี้เสนอผลการศึกษาคคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าในรูปแบบต่างๆ นอกจากการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว บทความนี้ยังได้มีการนำเสนอการออกแบบสร้างชุดทดลองเพิ่มเติมเพื่อจำลองการเกิดฟ้าผ่าเพื่อทดสอบเสาต่อฟ้าด้วย ผลการทดลองช่วยให้สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัตินิยามของเสาต่อฟ้าแบบต่างๆได้อย่างชัดเจน

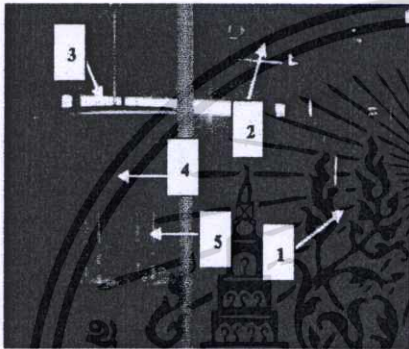
2. ทฤษฎีเกี่ยวกับฟ้าผ่า

โดยทั่วไปฟ้าผ่าเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสม ระดับความสูง 15,000-25,000 ฟิตเหนือระดับน้ำทะเล ด้านล่างของก้อนเมฆจะมีอิเล็กตรอนไปออกกันอยู่มาก ส่วนโปรตอนจะขึ้นไปออกกันอยู่ด้านบน จึงทำให้ด้านบนมีแค่ประจุบวก ที่ฐานจึงมีศักย์เป็นลบ [2] เมื่อความต่างศักย์ระหว่างฐานก้อนเมฆ และพื้นดินได้เมฆ มีสูงมากจนตัวกลางคืออากาศด้านไม่ไหว ก็จะเกิดไอออนเซชันจนหลักการเกิดดีสชาร์จในก๊าซ การเกิดไอออนเซชันของอากาศจะเกิดเป็นลีดเดอร์ (leader) หรือหัวนำร่อง มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (stepped leader) แบบสุ่ม เฉลี่ยช่วงก้าวประมาณ 50-100 เมตร ในทิศทางที่แตกตัวงายที่สุด ด้วยเวลาอันรวดเร็ว และจะเกิดประจุหนึ่งขั้วที่พื้นโลกเกิดไอออนเซชันเป็นสตรีมเมอร์วิ่งเข้าหาหัวนำร่อง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบการทดลอง

การทดลองต้องออกแบบให้ชุดทดสอบเสมือนการเกิดฟ้าผ่าขึ้นในธรรมชาติ โดยจำลองแผ่นอิเล็กโทรดขนาดใหญ่เป็นก้อนเมฆเพื่อให้บริเวณพื้นที่ได้แผ่นอิเล็กโทรดมีความเครียดสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกันทุกจุด การใช้อิเล็กโทรดแผ่นธรรมดาโดยไม่ทำขอบโค้ง โรกอฟสกีนั้นจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบระนาบ จะมีค่าสูงกว่าบริเวณภายในระหว่างอิเล็กโทรด ทางผู้วิจัยจึงออกแบบให้อิเล็กโทรดมีการทำขอบโค้งแบบโรกอฟสกี [4] และเพื่อความสะดวกในการทดลองเสาต่อฟ้าแต่ละแท่ง ก็มีการออกแบบให้ฐานวางเสาต่อฟ้าสามารถปรับระดับขึ้นลงได้ ดังรูปที่ 1

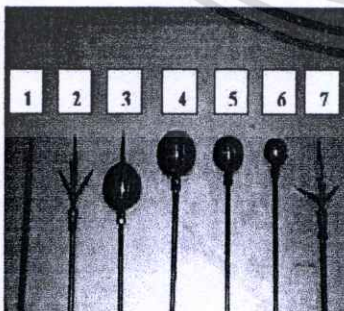


รูปที่ 1 ชุดทดสอบเสาต่อฟ้า

จากรูปที่ 1 ชุดทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) ตัวค้ำทานทานจำกัดกระแส
- 3) แผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้แทนก้อนเมฆ
- 4) เสาต่อฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
- 5) ฐานติดตั้งเสาต่อฟ้าสำหรับทดลอง

เสาต่อฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ 7 แบบ ดังรูปที่ 2



- 1.แบบปลายแหลม 2.แบบปลายเดกบรอนซ์ 3.แบบทรงกลมปลายแหลม
- 4.แบบทรงกลม ϕ 5 นิ้ว 5.แบบทรงกลม ϕ 4 นิ้ว 6.แบบทรงกลม ϕ 3 นิ้ว
- 7.แบบปลายเดกทองแดง (ϕ หมายถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม)

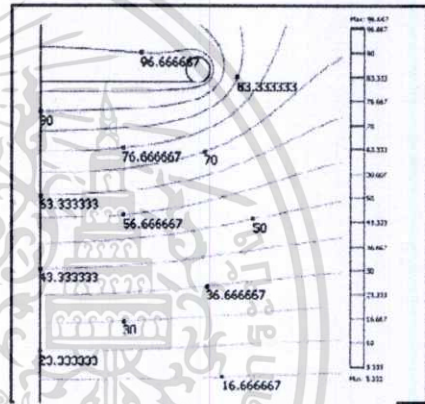
รูปที่ 2 เสาต่อฟ้าแบบต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

4. ผลการทดลอง

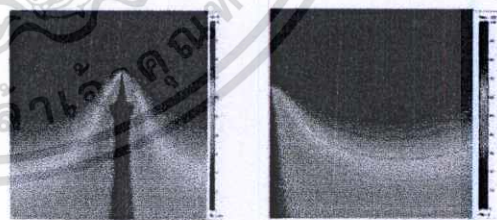
การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การวิเคราะห์รูปแบบของสนามไฟฟ้าของชุดก้อนเมฆเทียมและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เสาต่อฟ้าเมื่อทำการติดตั้งเสาต่อฟ้าภายใต้ก้อนเมฆเทียม กรณีที่สองเป็นการทดลองคุณสมบัติของเสาต่อฟ้าแต่ละแท่งและทดลองเปรียบเทียบกันทีละคู่เพื่อดูประสิทธิภาพของเสาต่อฟ้า

4.1 ผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง

การจำลองเพื่อวิเคราะห์รูปแบบสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ ป้อนให้กับก้อนเมฆเทียม ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3, 4 และตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดของเสาต่อฟ้าที่ระยะแกบต่างๆ

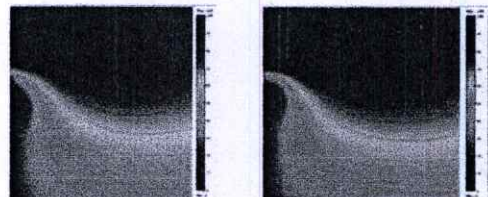


รูปที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและเส้นสมศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นก้อนเมฆเทียมเมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์



(ก) แบบปลายเดก

(ข) แบบปลายแหลม



(ค) แบบทรงกลมปลายแหลม

(ง) แบบทรงกลม 3 นิ้ว

รูปที่ 4 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าแบบต่างๆ โดยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าความเค้นคานนาม ไฟฟ้าสูงสุดของเสาหล่อฟ้าแต่ละแบบที่ ระยะระหว่างคานแนวนอนกับเสาหล่อฟ้าต่างๆ โดยไฟในพอลิเมอร์

รูปแบบเสาหล่อฟ้า ที่วัดระยะที่	ค่าความเค้นคานนาม ไฟฟ้าสูงสุด ที่ระยะ เคา่ต่าง ๆ (กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร)			
	100 มม.	200 มม.	300 มม.	400 มม.
	ปลายแฉก	0.2235	0.2104	0.1876
ปลายแหลม	0.2167	0.1952	0.1784	0.1701
ทรงกลมปลาย แหลม	0.1816	0.1744	0.1608	0.1529
ทรงกลม 3 นิ้ว	0.1564	0.1474	0.1405	0.1346
ทรงกลม 4 นิ้ว	0.1461	0.1461	0.1295	0.1215
ทรงกลม 5 นิ้ว	0.1426	0.1271	0.1210	0.1148

ตารางที่ 2 ค่าแรงคั้นเบรคความของเสาหล่อฟ้าที่ระยะต่าง ๆ

รูปแบบเสาหล่อ ฟ้าที่ทดสอบ	ค่าแรงคั้นเบรคความที่ระยะแตกต่างกัน (กิโลโวลต์)					
	50	100	150	200	250	300
	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.
ปลายแฉก ทองแดง	29.2	41.2	65.4	90.1	116	134
ปลายแหลม	29.4	43.8	67.1	91.5	118	136
ทรงกลม ปลาย แหลม	32.1	47.7	69.8	94.3	120	138
ปลายแฉก บรอนซ์	32.9	51.3	72.7	96.5	123	146
ทรงกลม 3 นิ้ว	78.9	104	117	135	146	159
ทรงกลม 4 นิ้ว	83.4	114	139	161	173	190
ทรงกลม 5 นิ้ว	84.7	128	158	180	191	214

4.2 การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อได้จัดเตรียมการทดลองดังรูปที่ 1 แล้วทำการป้อนแรงคั้นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งรวมให้กับสมมุติของกระแส ที่เกิดกาเบรคความ ไปยังเสาหล่อฟ้า โดยที่สภาพแวดล้อมในการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 73-76 % ความคั้นเบรคความ 261-764 มิลิแอมป์ปรอท อุณหภูมิที่ 29-32 องศาเซลเซียส การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกทำการทดลองป้อนแรงคั้นไฟฟ้าให้กับเสาหล่อฟ้าแต่ละแห่งจนเกิดเบรคความ ดังรูปที่ 5 โดยจะทำการทดลองที่ระยะแตกต่างกัน บันทึกราคาแรงคั้นเบรคความ แสดงในตารางที่ 2 ขั้นตอนที่สองจะฉีดคั้นเสาหล่อฟ้า 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ภายใต้อุณหภูมิของป้อนแรงคั้นให้กับสมมุติของกระแส ที่เกิดเบรคความไปหาเสาหล่อฟ้าแห่งใดแห่งหนึ่ง บันทึกราคาแรงคั้นเบรคความ โดยทดสอบคู่ละ 10 ครั้ง จนครบกันทุกชนิด โดยเสาหล่อฟ้าแต่ละชนิดมีการเปรียบเทียบกับกันและกันจนครบ โดยจะทดลองที่ระยะ 2 ระยะคือ 200 มม. และ 300 มม. ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3

ผลการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติของเสาหล่อฟ้า 2 แห่งภายใต้สมมุติเพิ่มที่ระยะ 200 มม. แสดงดังรูปที่ 6-7 และตารางที่ 3



รูปที่ 6 การเกิดเบรคความในการทดลองเปรียบเทียบกัน

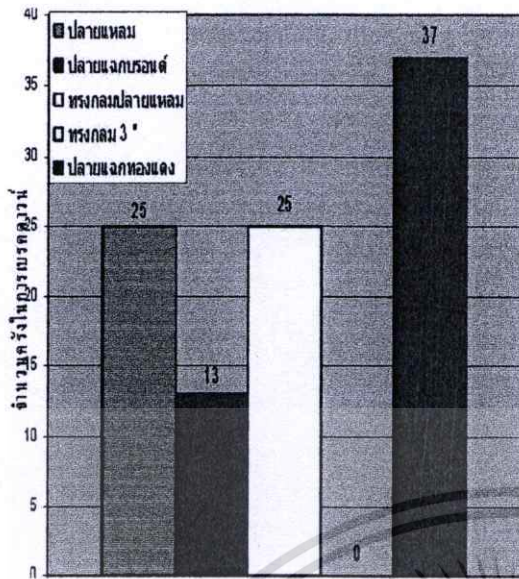


รูปที่ 5 การเบรคความของเสาหล่อฟ้าแบบปลายแหลม แรงคั้นเบรคความที่ 915 กิโลโวลต์ ที่ระยะ 200 มม.

ตารางที่ 3 จำนวนครั้งที่เบรคความของเสาหล่อฟ้าแต่ละแบบ

รูปแบบเสาหล่อฟ้า	จำนวนครั้งที่เบรคความ	
	ระยะ 200 มม.	ระยะ 300 มม.
ปลายแฉกทองแดง	37	35
ปลายแหลม	25	30
ทรงกลมปลายแหลม	25	23
ปลายแฉกบรอนซ์	13	12
ทรงกลม 3 นิ้ว	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 จำนวนครั้งในการเบรคความของสายล่อฟ้าที่ระยะ 200 มม.

ประวัติผู้เขียน



ศรัณย์ ชิวทธีรทรัพย์ ปัจจุบันศึกษาระดับปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



นเรศนทร พัฒนเดช ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภท อินทร์เจริญสุข ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

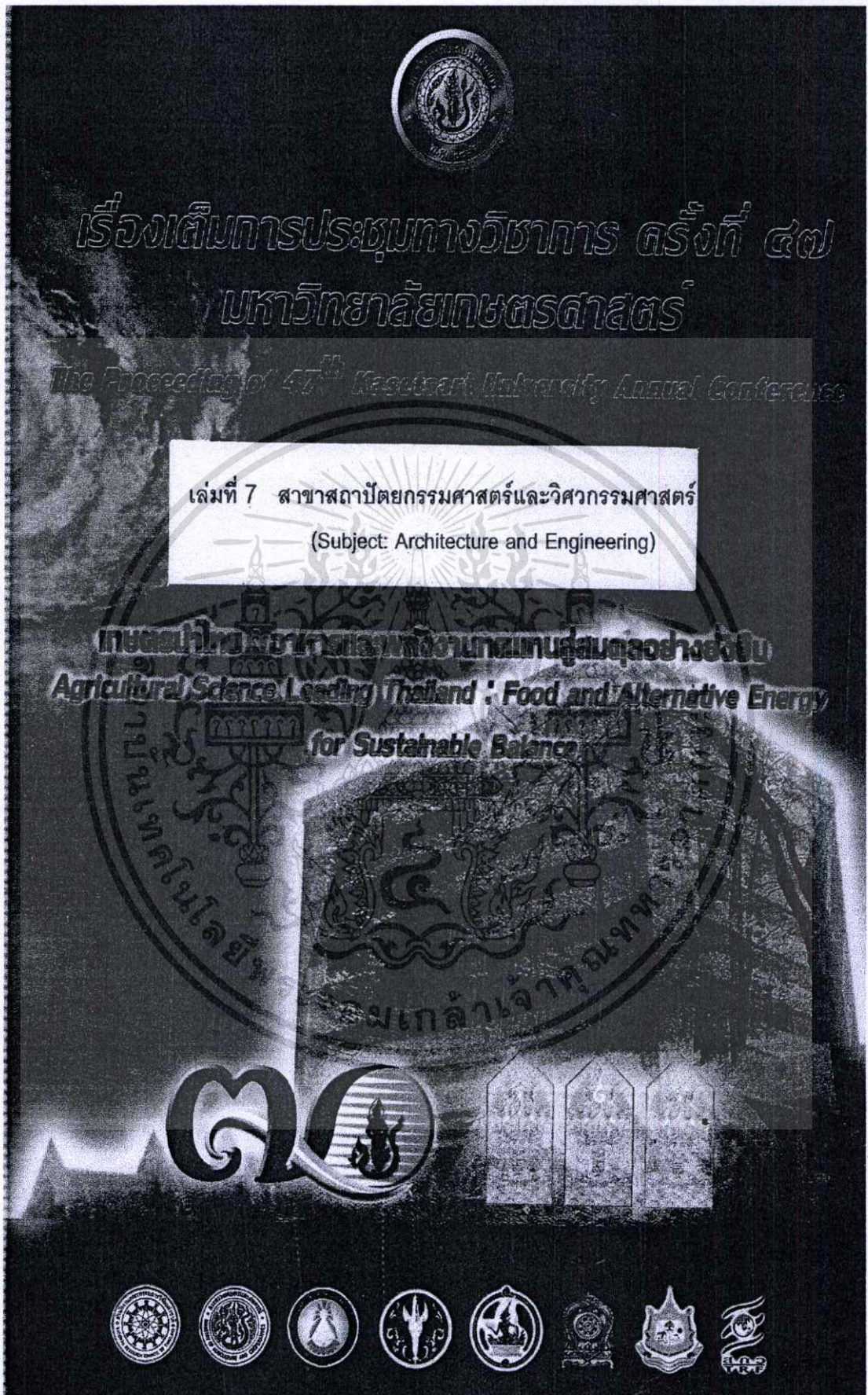
5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าเมื่อมีการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าของเสาต่อฟ้าแต่ละแบบ เห็นได้ว่าเสาต่อฟ้าปลายแฉกมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นก็จะเกิดสตริมเมอร์เร็วกว่าแบบอื่น และในกรณีที่สอง ขั้นตอนการทดลองแรก มีการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคความของเสาต่อฟ้าแต่ละแบบ ในระยะแกปต่างๆ ค่าแรงดันเบรคความของเสาต่อฟ้าปลายแฉกทองแดงมีค่าที่สุด นั่นก็หมายความว่าบริเวณปลายของเสาต่อฟ้าแบบแฉกทองแดงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ทำให้เมื่อป้อนแรงดันเข้าไปก็จะเกิดการเบรคความได้ง่ายกว่าแบบอื่น ส่วนขั้นตอนการทดลองที่สองเมื่อมีเสาต่อฟ้าแต่ละแบบเปรียบเทียบกันและบันทึกจำนวนครั้งการเบรคความ ผลปรากฏว่าเสาต่อฟ้าแบบปลายแฉกทองแดงมีจำนวนครั้งในการเบรคความมากที่สุด จึงสรุปได้ว่าเสาต่อฟ้าปลายแฉกทองแดง มีคุณลักษณะสมบัติในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่าแบบอื่นที่ทดลองด้วยกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย "สถิติอุบัติเหตุธรรมชาติปี 2546-2551" www.diaster.go.th
- [2] คุณพวงร้อย, "พีสิคส์ของฟ้าผ่า ประวัติศาสตร์การศึกษาเรื่องฟ้าผ่า", www.henry.igetweb.com
- [3] Professor A.T. Johns D.F. Warne, "Lightning", IEE Power and energy series34
- [4] ตำราวย ตั้งษ์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้า
ของวัสดุที่ใช้ทำเสาหล่อฟ้า

โดย

ศรัณย์ ชิวทวิทรัพย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
และภพ จันท์เจริญสุข

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47

ระหว่างวันที่ 17-20 มีนาคม 2552

(รองศาสตราจารย์ ดร.พนิต เข้มทอง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study and Analysis of Electrical Characteristics of Air Terminal Materials

ศรัณย์ ชิวทวีทรัพย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ภพ จันทร์เจริญสุข

Saran Chevataveesub, Norasage Patthanadech, Phop Chancharoensook

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาคูณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ทำเสาหล่อฟ้าตามมาตรฐาน IEC 62305-3 เสาหล่อฟ้าเป็นแบบปลายแหลม ใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ทองแดงล้วน, สแตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็กชุบทองแดง, เหล็กชุบกับลวไนท์ โดยมีลักษณะโครงสร้างเดียวกัน ส่วนเหล็กชุบทองแดงมีการชุบที่มีความหนาต่างกันเพื่อศึกษาคูณสมบัติในการหล่อฟ้าที่ความหนาต่างๆกัน จากการทดลองเปรียบเทียบเสาหล่อฟ้าที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ ผลปรากฏว่าเสาหล่อฟ้าแบบทองแดงล้วนมีประสิทธิภาพในการสร้างสตรีมเมอร์ได้ดีกว่าเสาหล่อฟ้าแบบอื่น โดยพิจารณาจากค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเสาหล่อฟ้าแบบทองแดงล้วนมีค่าน้อยกว่าวัสดุอื่นดังที่กล่าวมาเมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และเมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเบรกดาวน์ เสาหล่อฟ้าแบบทองแดงล้วนก็ยังมีจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์สูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน สรุปได้ว่าเสาหล่อฟ้าแบบทองแดงล้วนมีประสิทธิภาพในการสร้างสตรีมเมอร์ได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่นที่ใช้ในการทดสอบ ภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ชั่วลบ และตามสภาพแวดล้อมที่กำหนด

ABSTRACT

This paper presents the study results of electrical characteristics of various air terminals made from difference materials according to IEC 62305-3. Five material of air terminals namely pure copper, stainless steel, aluminium, coated steel with copper, coated steel with hot dipped galvanized were investigated. All air terminals are in the same configuration but different thickness of coated air terminal. The experimental results show that pure copper air terminal generated earlier streamer higher than other air terminals which cause the lowest breakdown voltage. Moreover, the number of breakdown of the pure copper air terminal is higher compared with that of other materials. This experimental results can be concluded that the pure copper air terminal had more effective for creating streamer length than other materials under DC electric field stress with negative polarity and determined condition.

Key Words: air terminal, earlier streamer, breakdown voltage, electric field

Ch. Saran: samira074@yahoo.com

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

Ladkrabang, Bangkok, 10520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ระบบป้องกันฟ้าผ่าที่สมบูรณ์ต้องประกอบด้วยระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก และระบบป้องกันฟ้าผ่าภายใน [1] ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกประกอบด้วย ตัวนำล่อฟ้า ตัวนำลงดิน และรากสายดิน ซึ่งเป็นการป้องกันอันตรายและความเสียหายเนื่องจากฟ้าผ่าที่จะเกิดบนโลก ถ้าระบบป้องกันภายนอกไม่มีการออกแบบที่ถูกต้อง และเลือกใช้อุปกรณ์และวัสดุที่ไม่เหมาะสมในการป้องกันก็จะทำให้ประสิทธิภาพการป้องกันลดลง ส่วนระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในเป็นการป้องกันแรงดันแลร์จเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียง เป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซียนต์ได้รับความเสียหาย[2] ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกให้มีประสิทธิภาพ เพื่อที่จะนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย และลดแรงดันเกินแลร์จที่จะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าว ตัวนำล่อฟ้าก็มีอยู่หลายแบบซึ่งมีการวิจัยถึงประสิทธิภาพตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีการทดสอบเสาล่อฟ้าในลักษณะต่างๆกัน เช่น มีการทดสอบเสาล่อฟ้าที่มีลักษณะปลายที่แตกต่างกัน [3] หรือการทดสอบขนาดของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันอันตรายที่เกิดจากฟ้าผ่า [4] รวมถึงการศึกษาคุณสมบัติของเสาล่อฟ้าแบบ Franklin rod เปรียบเทียบกับเสาล่อฟ้าที่เป็นแบบ Early Streamer Emission; ESE แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีความรู้ที่กำหนดถึงการออกแบบเสาล่อฟ้าที่ชัดเจน [5] บทความนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาคณะลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเสาล่อฟ้าแบบปลายแหลม (Franklin rod) ที่มีวัสดุต่างชนิดกัน ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 62305-3 [6] มีการจำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ และศึกษาพฤติกรรมการเกิดสตรีมเมอร์ของเสาล่อฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าต่างๆ ซึ่งผลการทดลองช่วยให้สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะดังกล่าวได้อย่างชัดเจน

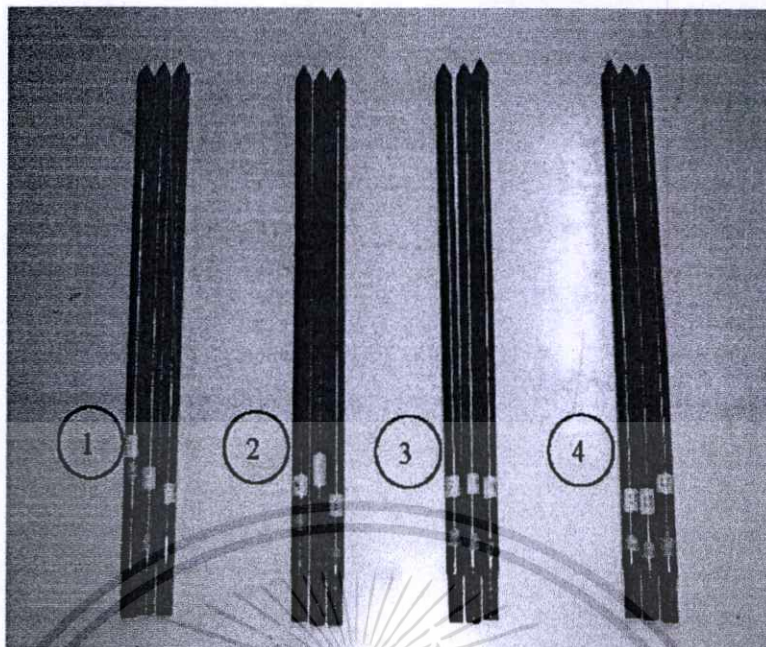
อุปกรณ์และวิธีการ

จากทดลองมีการสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อดูการเกิดสตรีมเมอร์ของเสาล่อฟ้าที่มีวัสดุต่างชนิดกัน โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ ขนาด 600 kV 10 mA และมีการบันทึกค่าแรงดันแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นกับเสาล่อฟ้าวัสดุแต่ละชนิด นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเบรกดาวน์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ ซึ่งเสาล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันอยู่ 5 แบบ คือ เสาล่อฟ้าวัสดุที่เป็นทองแดงล้วน, อลูมิเนียม, สแตนเลส, เหล็กชุบด้วยทองแดง, เหล็กชุบด้วยกัลวานไนท์ ส่วนเสาล่อฟ้าที่ชุบด้วยทองแดงจะมีความหนาด้วยกัน 4 ขนาด แต่ละขนาดจะมีการเตรียมชิ้นงานไว้ 3 แท่งเพื่อความถูกต้องในการทดสอบ

อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

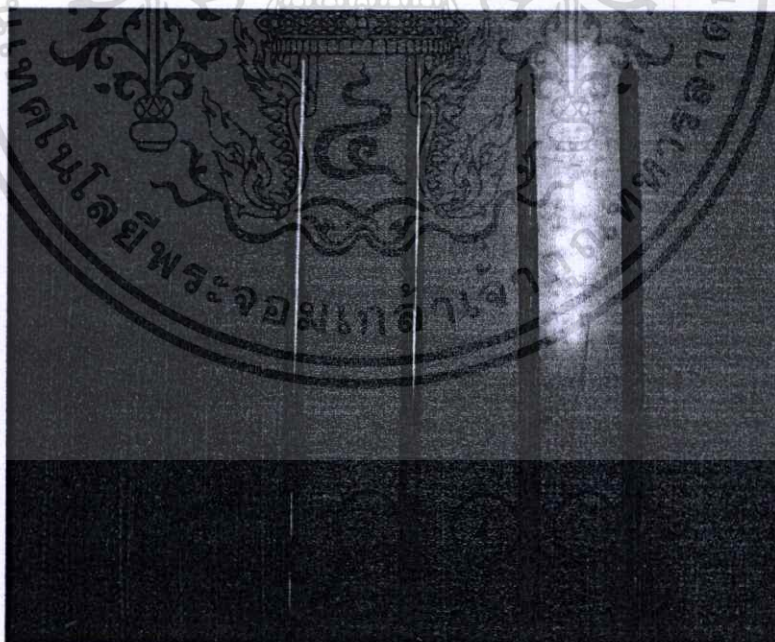
เสาล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาวแท่งตัวนำ 500 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นแบบปลายแหลม โดยมีการนำเหล็กชุบด้วยทองแดงมีความหนาต่างๆกัน ดังรูปที่ 1 และเสาล่อฟ้าที่มีวัสดุที่ต่างชนิดกัน ดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 เสาล่อฟ้าแบบปลายแหลมทองแดงรูปความหนาต่างกัน

จากรูปที่ 1 เป็นเสาล่อฟ้าที่ปลายแหลมที่มีการชุบทองแดงมีความหนาต่างๆกัน ดังนี้ 1.ความหนา 85 ไมครอน
2.ความหนา 200 ไมครอน 3.ความหนา 250 ไมครอน 4.ความหนา 350 ไมครอน



รูปที่ 2 เสาล่อฟ้าแบบปลายแหลมวัสดุต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 2 เป็นเสาล่อฟ้าปลายแหลมที่มีวัสดุต่างชนิดกัน คือ 1.ทองแดงล้วน 2.อลูมิเนียม 3.สแตนเลส

4.เหล็กชุบทองแดง 5.เหล็กชุบกล้าไนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการ

เมื่อจัดเตรียมวัสดุ ดังรูปที่ 1 แล้วทำการวัดความหนาของทองแดง ที่ชุบบนเสาหล่อฟ้าแต่ละแห่งจำนวน 10 จุด และหาค่าเฉลี่ย โดยความหนามีค่าความผิดพลาด $\pm 5\%$ หลังจากนั้นนำเสาหล่อฟ้าดังรูปที่ 1 และ 2 มาติดตั้งเพื่อรองรับการทดสอบ โดยการทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 ขั้นตอน คือ การทดสอบเสาหล่อฟ้าพร้อมบันทึกค่าแรงดันเบรกดาวาน์(เป็นแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤต ทำให้อากาศเปลี่ยนจากสภาพการจนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า) ของเสาหล่อฟ้าแต่ละชนิดที่ระยะแกปต่างๆ(ระยะระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดอลูมิเนียมกับปลายแหลมของเสาหล่อฟ้า) บันทึกผลการทดลอง และการทดสอบเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวาน์ที่ระยะแกปต่างๆ โดยแต่ละระยะมีการทดสอบ 20 ครั้งพร้อมบันทึกผลการทดลอง โดยมีการเปรียบเทียบดังนี้ 1.เปรียบเทียบระหว่างเสาหล่อฟ้าชุบทองแดงความหนาต่างกัน 2.เปรียบเทียบระหว่างเสาหล่อฟ้าที่เป็นทองแดงล้วนกับชุบด้วยทองแดง 3.เปรียบเทียบระหว่างเสาหล่อฟ้าที่เป็นวัสดุต่างชนิดกัน วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 โดยการทดสอบใช้เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วคราว



รูปที่ 3 วงจรการทดสอบเสาหล่อฟ้าประกอบด้วย 1.เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ชั่วพลู ขนาด 600 kV 10 mA 2.ความต้านทานจำกัดกระแส 3.แผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 ม. 4.เสาหล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบ และ 5.ฐานวางเสาหล่อฟ้าสำหรับปรับระยะแกปต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดสอบอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 69-79 % ความดันบรรยากาศ 760-762 mmHg และที่อุณหภูมิ 27-32 องศาเซลเซียส และได้มีการปรับผลการทดสอบตามเงื่อนไขสภาวะมาตรฐาน IEC 60052 [7] จากการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 1-2

ค่าความหนา (μm) $\pm 5\%$	ค่าแรงดันเบรกดาวนระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดกับปลายของเสาสล่อฟ้า (กิโลโวลต์)					
	50 มม.	100 มม.	150 มม.	200 มม.	250 มม.	300 มม.
85	33.01	53.96	77.33	101.73	123.03	144.36
200	33.13	53.29	75.60	100.26	121.95	143.90
250	31.43	49.84	76.77	98.62	120.69	143.64
350	34.00	56.94	79.68	103.24	125.73	148.95

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันเบรกดาวนของเสาสล่อฟ้าแบบชูปทองแดงที่ระยะแกปต่างๆ

จากตารางที่ 1 เป็นการชั่งตัวอย่างของเสาสล่อฟ้าจากรูปที่ 1 โดยเลือกมาทดสอบค่าละหนึ่งตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของเสาสล่อฟ้าที่ความหนาต่างๆ จะมีผลใกล้เคียงกัน แต่ที่ความหนา 250 ไมครอน(μm) จะมีแนวโน้มของค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำกว่าความหนาอื่นๆ

ชนิดวัสดุ	ค่าแรงดันเบรกดาวนระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดกับปลายของเสาสล่อฟ้า (กิโลโวลต์)					
	50 มม.	100 มม.	150 มม.	200 มม.	250 มม.	300 มม.
ทองแดงล้วน	38.36	49.08	68.94	91.18	117.18	139.32
อลูมิเนียม	40.95	53.54	71.60	93.87	120.24	142.47
สแตนเลส	41.94	55.76	72.22	92.78	117.72	141.39
ชูปกัลวาไนท์	30.64	49.43	74.61	97.74	118.07	141.12

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันเบรกดาวนของเสาสล่อฟ้าของวัสดุที่ต่างชนิดกันในระยะแกปต่างๆ

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของเสาสล่อฟ้าทองแดงล้วนมีค่าสูงในระยะแกป 50 มม. แต่ที่ระยะแกป 100-300 มม. มีแนวโน้มค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นที่ทดสอบด้วยกัน ส่วนวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมและสแตนเลสมีค่าแรงดันเบรกดาวนที่ใกล้เคียงกัน และวัสดุที่ชูปกัลวาไนท์มีค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำในระยะแกปใกล้ๆ แต่ระยะแกปไกลออกไปค่าแรงดันเบรกดาวนค่อนข้างสูงขึ้น

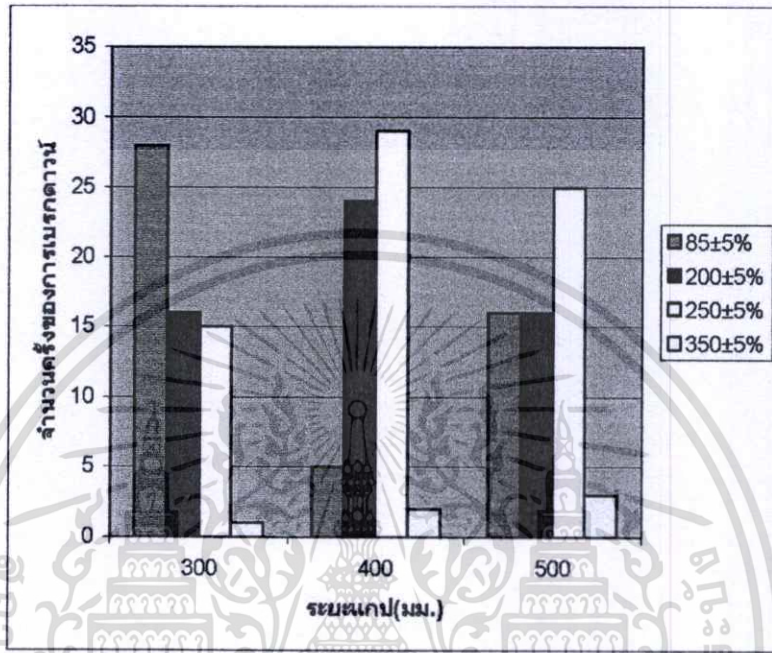
เพื่อเป็นการยืนยันของผลการทดลองดังกล่าว มีการเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเบรกดาวนในระยะแกปต่างๆ

เพื่อดูแนวโน้มว่าวัสดุชนิดไหนมีแนวโน้มในการสร้างสตริมเมอร์ได้ดีกว่ากัน ภายใต้สนามไฟฟ้าที่สร้างโดยเครื่อง

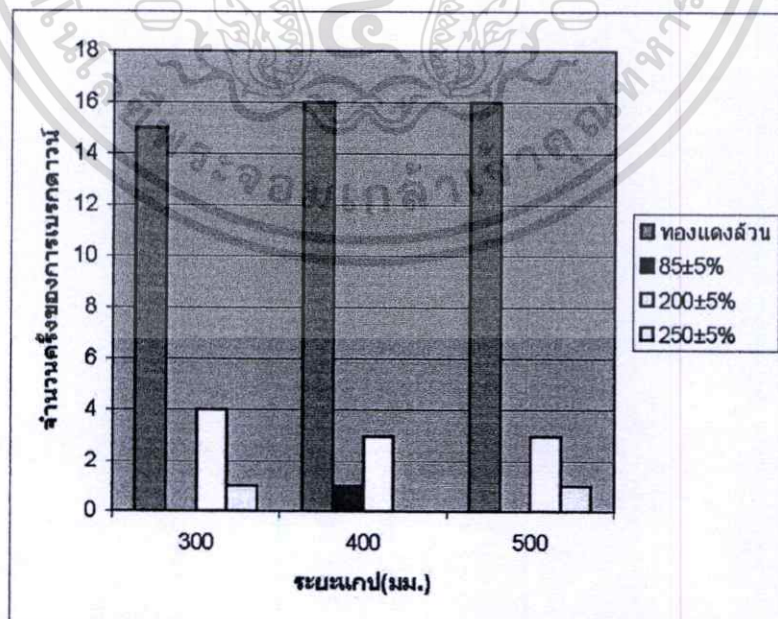
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

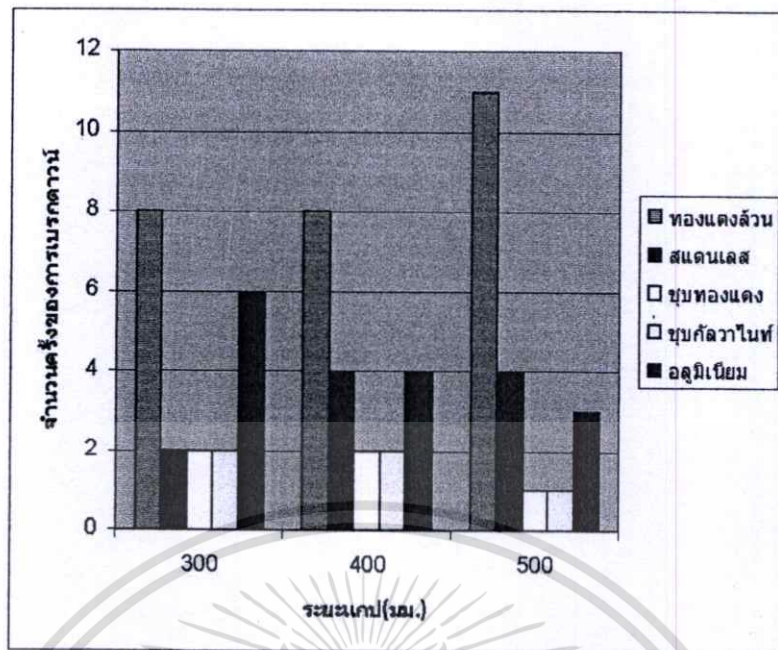
กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชั่วฉับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-7 โดยที่รูปที่ 4 เป็นผลการทดสอบเสาล่อฟ้าทั้งหมด ดังรูปที่ 1 และทำการเปรียบเทียบเสาล่อฟ้า โดยนำตัวอย่างขนาด $85 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $350 \mu\text{m}$ อย่างละหนึ่งแท่ง มาวางบนฐานเพื่อทดสอบ และทำการทดสอบจำนวน 20 ครั้งในแต่ละระยะแก๊ป ซึ่งตัวอย่างแต่ละขนาดความหนา มีจำนวนแท่งตัวนำล่อฟ้า 3 แท่ง ทำให้ผลรวมของการทดสอบทั้งหมดในแต่ละระยะแก๊ปมีจำนวน 60 ครั้ง ส่วนรูปที่ 5 เป็นการชั่งตัวอย่างของเสาล่อฟ้าที่ชุบทองแดงเปรียบเทียบกับเสาล่อฟ้าทองแดงล้วน



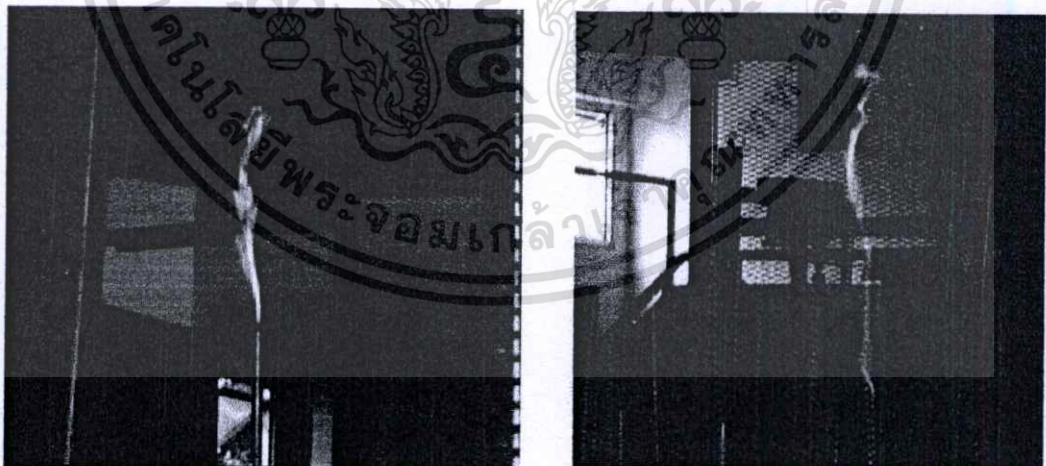
รูปที่ 4 เปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวนั้ระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าชุบทองแดงที่ระยะแก๊ปต่างๆ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เบรกดาวนั้ระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าชุบทองแดงกับทองแดงล้วน ที่ระยะแก๊ปต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 เปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวนระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าวัสดุต่างชนิดกัน ที่ระยะแปดต่างๆ จากรูปที่ 5,6 จะเห็นว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบทองแดงล้วน มีค่าจำนวนครั้งการเบรกดาวนไม่เท่ากัน เนื่องจากมีการทดสอบ 2 กรณี คือ รูปที่ 5 เป็นผลการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบทองแดงล้วนกับแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบชุบทองแดง แต่ในรูปที่ 6 เป็นผลการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบทองแดงล้วนกับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุต่างชนิดกัน



(ก) เสาล่อฟ้าปลายแหลมแบบทองแดงล้วนระยะ 30 cm (ข) เสาล่อฟ้าปลายแหลมวัสดุต่างชนิดระยะ 50 cm

รูปที่ 7 การเกิดเบรกดาวนของเสาล่อฟ้าปลายแหลมผ่านอากาศขณะทำการทดสอบ

จากรูปที่ 7 เป็นลักษณะการเกิดเบรกดาวนของเสาล่อฟ้าผ่านอากาศ ซึ่งจะมีการสร้างสตรีมเมอร์ที่บริเวณปลายของเสาล่อฟ้าก่อนที่เกิดการเบรกดาวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

จากผลการศึกษาค้นคว้าพบว่ามีค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเสาหล่อฟ้าแบบทงแดงจะเห็นว่า ที่ความหนาในการชุบขนาด 200 และ 250 ไมครอน มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าค่าความหนาอื่นที่ทดสอบด้วยกัน นั่นก็หมายความว่าความหนาขนาด 200 และ 250 ไมครอน มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจึงสร้างสตรึมเมอร์ได้เร็วกว่า แต่เมื่อมีการนำเสาหล่อฟ้าดังกล่าวมาเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งการเบรกดาวน์กับเสาหล่อฟ้าแบบทงแดงล้วน ปรากฏว่าเสาหล่อฟ้าแบบทงแดงล้วนมีประสิทธิภาพในการสร้างสตรึมเมอร์ได้ดีกว่าเสาหล่อฟ้าแบบชุบทงแดงในการทดสอบทุกระยะแก่ และการทดลองเปรียบเทียบเสาหล่อฟ้าที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเสาหล่อฟ้าแบบทงแดงล้วนมีค่าต่ำที่ระยะแก่ 50 มิลลิเมตรขึ้นไปเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน และเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองก็มีการเปรียบเทียบดูจำนวนครั้งของการเบรกดาวน์ดังรูปที่ 6 เสาหล่อฟ้าแบบทงแดงล้วนก็ยังมีจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์สูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่ทดสอบด้วยกัน สรุปได้ว่าเสาหล่อฟ้าแบบทงแดงล้วนมีประสิทธิภาพในการสร้างสตรึมเมอร์ได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่นที่ใช้ในการทดสอบ ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ และตามสภาพแวดล้อมที่กำหนด

เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐาน ว.ส.ท, มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] H.Ahmad and L.M. Ong "An Account of A Modified Lightning Protection System For Power Stations.", Power Engineering Conference, 2005, IPEC 2005, Nov.29 2005-Dec.2 2005
- [4] William Rison, Charles B. Moore, and Graydon D.Aulich "Lighting Air Terminals-Is Shape Important ?", Electromagnetic Compatibility, EMC2004, InternationalSymposium on
- [5] C. B. Moore, William Rison , James Mathis, and Graydon Aulich "Lightning Rod Improvement Studies", Journal of applied meteorology volume 39, 10 April 1999
- [6] IEC 62305-3, Physical damage to structures and life hazard Part 3, First edition 2006-01
- [7] IEC 60052, Voltage measurement by means of standard air gaps, Third edition 2002-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสรณ์ย์ ชิวทวิทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จ การศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.) สาขา ไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้