

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและการออกแบบโคโรนาชีลด์
Design and Construction of Corona Shield



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62570
วัน,เดือน,ปี 19 ส.ค. 2549

b..... 1187858
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2548

การศึกษาและการออกแบบโคโรนาชิลด์
Design and Construction of Corona Shield



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล
อาจารย์ นรเศรษฐ	พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษา และการออกแบบโคโรนาซีลด์

ผู้จัดทำ

นายขณะ	แก้ววิจิตร	รหัส	45010031
นางสาวสาวิณี	หลดพา	รหัส	45010824
นายอภิวัต	ศรีมีเทียน	รหัส	45010926
นายอัครพล	วิญญูตระกูล	รหัส	45010953

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและการออกแบบโคโรนาซีลด์

นายกษณะ แก้ววิจิตร
นางสาวสาวิณี หลุดพา
นายอภิวัตติ ศรีมีเทียน
นายอัครพล วิญญูตระกูล
รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบสร้างโคโรนาซีลด์เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โคโรนาซีลด์ที่ทำการออกแบบมีอยู่ 11 รูปแบบ มีความสอดคล้องกับโคโรนาซีลด์ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ในการออกแบบ กำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวโคโรนาซีลด์ 30 cm. เท่ากัน และมีความสูงจากฐานรองถึงตัวโคโรนาซีลด์เท่ากับ 40 cm. ลักษณะการกระจายของแรงดันไฟฟ้าและความเข้มของสนามไฟฟ้าของโคโรนาซีลด์ที่ออกแบบจะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ก่อนที่จะนำไปทดสอบจริงซ้ำหลายๆ ครั้ง ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน การทดสอบทำไปเพื่อตรวจสอบค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด และค่าดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันที่กำหนด ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าพบว่ามีความสอดคล้องกัน ทำให้สามารถที่จะเลือกโคโรนาซีลด์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดจากโคโรนาซีลด์ทั้งหมดที่ออกแบบเพื่อใช้งานที่ระดับแรงดัน 50 kV ได้ โดยผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลนำเสนออยู่ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ สามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และข้อมูลในการผลิตโคโรนาซีลด์ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

Design and Construction of Corona Shield

Mr. Kasana	Kaewwijit
Miss. Savinee	Ludpa
Mr. Apiwat	Srimetian
Mr. Akaraphon	Winyutrakul
Assoc. Prof. Siriwat	Potivejkul Advisor
Lecturer Norasage	Pattanadech Advisor

ABSTRACT

This project proposes the design and construction of corona shields to protect Corona Phenomena affecting high voltage equipments. The corona shields designed in this project consist of 11 designs which are conformed with the corona shields using in the real industry. All designs fixed the diameters of corona shields to be 30 cm and fixed the heights from the shields to their bases to be 40 cm. The analysis of these designed corona shields includes voltage distribution characteristics and electric field stresses analyzed by finite element program. The test was done in several experiments under different conditions to test corona inception voltage and partial discharge value under specified voltages. The testing results can be used to find an optimal design of corona shield to be used for 50 kV voltage. The tested results and analysis are included in this project. This data analysis can be used to as a data base for high voltage testing to develop high effective corona shield in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมืออย่างดียิ่งจากหลายๆฝ่าย

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดด้วยดีตลอดมา ให้คำปรึกษาชี้แนะ แนะนำข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้าและได้ตรวจสอบแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนเสร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ทำให้ผู้จัดทำมีความภาคภูมิใจเป็นอย่างมากที่ได้มีโอกาสทำปริญญาานิพนธ์นี้

ผู้จัดทำขอขอบคุณคุณประยัติ ใจวงศ์ ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมบำรุงรักษาสายส่งฝ่ายบำรุงรักษาระบบสายส่งที่คำชี้แนะในการทดสอบและอำนวยความสะดวกในการทดสอบ รวมไปถึงรุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาชี้แนะและให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์

ผู้จัดทำขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทดสอบห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำการทดสอบ รวมทั้งห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมที่อำนวยความสะดวกในการทำโครงการและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน และทุกท่านที่ให้ความสนใจและให้ความช่วยเหลือแนะนำด้านอื่นๆรวมถึงการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ จนทำให้โครงการสำเร็จลงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา บุรพคณาจารย์ทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่ผู้จัดทำ ใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	IX
สารบัญตาราง.....	XX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Theory of Involving).....	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเกิดโคโรนา.....	5
2.1.1 ลักษณะของปรากฏการณ์โคโรนา.....	5
2.1.2 การแสดงให้เห็นถึงการเกิดโคโรนา(Corona).....	6
2.1.3 ชนิดของการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา.....	6
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา.....	7
2.2.1 ชนิดและลักษณะพื้นผิวของตัวนำ.....	7
2.2.2 อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อการเกิดโคโรนา.....	8
2.2.3 สภาพภูมิอากาศ.....	8
2.2.4 ความชื้นที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา.....	8
2.2.5 ความดันบรรยากาศ.....	9
2.3 ผลกระทบจากการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา.....	9
2.4 วิธีแก้ไขและลดการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา.....	9
2.5 การวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge,PD) ในอุปกรณ์ ไฟฟ้าแรงสูง.....	10
2.5.1 โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge).....	10
2.5.2 ดิสชาร์จตามผิว.....	11
2.5.3 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 รูปแบบการเกิดดิซาร์จบางส่วน.....	12
2.6.1 รูปแบบดิซาร์จบางส่วน (PD) แบบโคโรนา.....	12
2.6.2 รูปแบบดิซาร์จแบบดิซาร์จตามผิว.....	13
2.6.3 รูปแบบดิซาร์จแบบดิซาร์จภายใน.....	13
2.6.4 รูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น.....	14
2.7 หลักการตรวจจับ PD.....	14
2.7.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดิซาร์จบางส่วน.....	14
2.7.2 หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานตรวจจับ PD.....	16
2.7.3 การแสดงผลดิซาร์จบางส่วน.....	16
2.8 ความเครียดสนามไฟฟ้า.....	17
2.8.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า(Electric field configuration).....	17
2.9 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์.....	20
2.9.1 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซ.....	20
2.9.2 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง U_0 หรือแรงดันโคโรนา เริ่ม เกิด U_0 [2].....	21
2.9.3 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศ.....	23
2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element).....	26
2.10.1 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
2.10.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FINITE ELEMENT: FEM).....	27
2.10.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
2.10.4 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	28
2.10.5 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
บทที่ 3 การออกแบบโคโรนาชิลด์(Corona Shield).....	33
3.1 การออกแบบอิลีกโทรด.....	33
3.2 การออกแบบโคโรนาชิลด์.....	34
3.2.1 โคโรนาชิลด์แบบ Steering ring.....	34
3.2.2 โคโรนาชิลด์แบบ 6-Circular connected half-spheres.....	34
3.2.3 โคโรนาชิลด์แบบ Topping 2-rings.....	35
3.2.4 โคโรนาชิลด์แบบ 4-Connected spheres.....	35
3.2.5 โคโรนาชิลด์แบบ Barrel shape with 5 rings.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.6 โคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5-rectangles.....	36
3.2.7 โคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings.....	37
3.2.8 โคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings.....	37
3.2.9 โคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	38
3.2.10 โคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls.....	38
3.2.11 โคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts.....	39
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	40
4.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม.....	40
4.1.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์.....	40
4.1.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	40
4.1.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	41
4.1.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	42
4.1.5 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	42
4.1.6 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	43
4.1.7 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	44
4.1.8 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	44
4.1.9 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	45
4.1.10 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	46
4.1.11 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.12 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของ อิเล็กทรอนิกส์.....	47
4.2 การทดสอบการเกิดโคโรนาของโคโรนาซีลด์รูปแบบต่างๆโดยเครื่อง ทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101).....	48
4.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	51
4.2.3 ผลการทดสอบ.....	53
4.2.4 ผลการทดสอบการจับตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน ด้วยกล้อง ตรวจจับโคโรนา.....	89
4.3 การทดสอบการเกิดโคโรนาของโคโรนาซีลด์รูปแบบต่างๆโดยเครื่อง ทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101) ใน รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ ทดสอบที่เวลาต่างๆ.....	91
4.3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ ทดสอบ ที่เวลา 12.30 น.-14.30 น.....	91
4.3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ ทดสอบ ที่เวลา 16.30 น.-18.30 น.....	92
4.3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ ทดสอบ ที่เวลา 21.30 น.-23.30 น.....	92
4.3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสชาร์จบางส่วนเฉี่ยและค่าแรงดัน ที่ใช้ทดสอบ.....	93
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	94
4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดลองการจำลองอิเล็กทรอนิกส์และโคโรนาซีลด์ ทั้ง 11 แบบ.....	94
4.4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการทดสอบการเกิดโคโรนาของโคโรนา ซีลด์ทั้ง 11 แบบ จากเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน.....	95
4.4.3 วิเคราะห์ผลค่าใช้จ่ายของการสร้างโคโรนาซีลด์และการนำไปใช้ ประโยชน์.....	95
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุป.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ.....	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์ อิลิเมนต์ (Finite element).....	101
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศและ ค่าสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	111
ภาคผนวก ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการเปรียบเทียบ.....	117



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การดิซซาร์จบางส่วน.....	10
2.2 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวนและสายตัวนำแรงสูง ตรวจจับด้วย กล้องโคโรนา.....	11
2.3 ลักษณะรูปแบบฉนวนที่ทำให้เกิดดิซซาร์จบางส่วนตามผิวและการเกิดดิซซาร์จบาง ส่วนตามผิว.....	11
2.4 ดิซซาร์จภายในและตัวอย่างการเกิดความเสียหายของการเกิดดิซซาร์จภายในสาย เคเบิล.....	12
2.5 รูปแบบการเกิดโคโรนา.....	13
2.6 รูปแบบการเกิดดิซซาร์จตามผิว.....	13
2.7 รูปแบบการดิซซาร์จภายใน.....	13
2.8 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด.....	14
2.9 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD.....	15
2.10 การแสดงผลของ PD (เครื่องตรวจวัด PD ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.).....	16
2.11 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ.....	17
2.12 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ.....	18
2.13 เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า...	18
2.14 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า.....	19
2.15 ระยะเวลาแลนซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	22
2.16 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ของอากาศในอิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วม...	25
2.17 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_0 ของอากาศในสนามไฟฟ้าของทรงกระบอก.....	26
2.18 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ.....	28
2.19 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่างๆ.....	29
2.20 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม: การวนโหนด ϕ_1 (1) - ϕ_2 (2) - ϕ_3 (3) ในทิศทางทวนเข็ มนาฬิกา.....	30
3.1 ลักษณะมิติของอิเล็กโทรด.....	33
3.2 อิเล็กโทรด.....	33
3.3 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Steering ring.....	34
3.4 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular connected half-spheres.....	34
3.5 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-rings.....	35
3.6 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected spheres.....	35
3.7 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Barrel shape with 5 rings.....	36
3.8 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5rectangles.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings.....	37
3.10	การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings.....	37
3.11	การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	38
3.12	การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls.....	38
3.13	การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts.....	39
4.1	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของอิลีกโทรดที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์	40
4.2	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ Steering ring.....	41
4.3	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular connected half-spheres.....	41
4.4	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-rings.....	42
4.5	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected spheres.....	43
4.6	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ Barrel shape with 5 rings.....	43
4.7	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5-rectangles.....	44
4.8	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings.....	45
4.9	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings.....	45
4.10	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	46
4.11	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls.....	47
4.12	ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts.....	47

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	48
4.14	49
4.15	50
4.16	50
4.17	51
4.18	51
4.19	53
4.20	54
4.21	54
4.22	54
4.23	54
4.24	55
4.25	55
4.26	56
4.27	57
4.28	57
4.29	57
4.30	57
4.31	58
4.32	58
4.33	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน34.59 kVของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	60
4.35 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน40 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	60
4.36 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน45 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	60
4.37 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน50 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	60
4.38 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	61
4.39 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	61
4.40 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-Rings.....	62
4.41 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 34.17 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบที่ 3 Topping 2-Rings.....	63
4.42 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบที่ 3 Topping 2-Rings.....	63
4.43 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบที่ 3 Topping 2-Rings.....	63
4.44 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-Rings.....	63
4.45 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-Rings.....	64
4.46 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-Rings.....	64
4.47 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres	65
4.48 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 31.10 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres	66
4.49 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres	66
4.51 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres	66
4.52 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres	67
4.53 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres	67
4.54 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Barrel Shape With 5-Rings.....	68
4.55 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 32.83 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Barrel Shape With 5-Rings.....	69
4.56 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Barrel Shape With 5-Rings.....	69
4.57 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kV ของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ แบบที่ 5 Barrel Shape With 5-Rings.....	69
4.58 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kV ของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ ที่ 5 Barrel Shape With 5-Rings.....	69
4.59 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kV ของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Barrel Shape With 5-Rings.....	70
4.60 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kV ของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Barrel Shape With 5-Rings.....	70
4.61 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles.....	71
4.62 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 25.82 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบที่ Decagon With 5-rectangles.....	72
4.63 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles.....	72
4.64 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kV ของอิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.65 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles.....	72
4.66 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles.....	73
4.67 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles	73
4.68 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	74
4.69 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน34.53 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	75
4.70 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	75
4.71 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kVของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	75
4.72 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	75
4.73 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	76
4.74 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	76
4.75 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	77
4.76 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 25.82 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	78
4.77 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	78
4.78 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	78
4.79 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	78
4.80 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.82 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	80
4.83 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน33.91 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	81
4.84 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	81
4.85 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kVของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	81
4.86 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	81
4.87 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	82
4.88 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	82
4.89 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของ อีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 3-Connected Bowls.....	83
4.90 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 33.91 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 3-Connected Bowls.....	84
4.91 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์ แบบ 3-Connected Bowls.....	84
4.92 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 3-Connected Bowls.....	84
4.93 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 3-Connected Bowls.....	84
4.94 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 3-Connected Bowls.....	85
4.95 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์ แบบ 3-Connected Bowls.....	85
4.96 การทดสอบการตรวจจับโคโรนาดีสชาร์จของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 5-Connected Donuts.....	86
4.97 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน33.99kVของอีเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 5-Connected Donuts.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.98 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 40 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 5-Connected Donuts.....	87
4.99 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 45 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 5-Connected Donuts.....	87
4.100 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 50 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์ แบบ 5-Connected Donuts.....	87
4.101 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 55 kVของอิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 5-Connected Donuts.....	88
4.102 PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์ที่แรงดัน 60 kVของ อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์แบบ 5-Connected Donuts.....	88
4.103 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีใช้อิลีกโทรดที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์.....	89
4.104 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีใช้อิลีกโทรดที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายไฟหุ้มฉนวนเป็นสายตัวนำ.....	89
4.105 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีใช้อิลีกโทรดสวมต่อโคโรนาซีลด์.....	90
4.106 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีใช้อิลีกโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์.....	90
4.107 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิซชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบที่เวลา 12.30 น.-14.30 น.....	91
4.108 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิซชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบที่เวลา 16.30 น.-18.30 น.....	92
4.109 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิซชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบที่เวลา 21.30 – 23.30 น.....	92
4.110 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิซชาร์จบางส่วนและค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบ.....	93
ผ.ก.1 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างอิลีกโทรดทรงกลมและอิลีกโทรดระนาบ.....	102
ผ.ก.2 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างอิลีกโทรดปลายแหลมและอิลีกโทรดระนาบ....	103
ผ.ก.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยโปรแกรม ANSOFT.....	103
ผ.ก.4 อิลีกโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ.....	104
ผ.ก.5 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิลีกโทรดลักษณะต่าง ๆ.....	105
ผ.ก.6 ความเข้มสนามไฟฟ้าของอิลีกโทรดทรงกลม.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ผ.ก.7	ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทรงกลมกับอิเล็กโทรดระนาบ..... 106
ผ.ก.8	ความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะห่างจากผิวอิเล็กโทรดทรงกลมถึงอิเล็กโทรดระนาบแผ่นกราวด์..... 107
ผ.ก.9	ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับอิเล็กโทรดระนาบ..... 108
ผ.ก.10	ความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะห่างจากอิเล็กโทรดปลายแหลมถึงอิเล็กโทรดระนาบ..... 108
ผ.ก.11	ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดระนาบกับอิเล็กโทรดระนาบ..... 109
ผ.ก.12	ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดระนาบกับอิเล็กโทรดระนาบ..... 110
ผ.ก.13	เปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ..... 110
ผ.ข.1	การกระจายสนามไฟฟ้าที่ระยะแกดต่าง ๆ..... 116
ผ.ค.1	เครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101..... 117
ผ.ค.2	COMPUTER ที่ใช้แสดงผล..... 117
ผ.ค.3	ตัวเก็บประจุ (C) ปรับค่าได้มีค่า 2pF - 2000 pF..... 118
ผ.ค.4	ตัวเก็บประจุ(C) ค่าคงที่มีค่า 100 pF..... 118
ผ.ค.5	ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันทดสอบ..... 119
ผ.ค.6	การจ่ายแรงดันทดสอบ..... 120
ผ.ค.7	อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการเกิดโคโรนา..... 120
ผ.ค.8	กล่องตรวจจับโคโรนา..... 121
ผ.ค.9	กล่องวีดีโอในการบันทึกภาพการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ์ที่เกิดขึ้น..... 121
ผ.ค.10	วงจรการปรับเทียบ..... 122
ผ.ค.11	การต่อวงจรแบบค่า C ค่าคงที่มีค่า 100 pF..... 122
ผ.ค.12	การต่อวงจรแบบค่า C ปรับค่าได้ (C ปรับค่าได้มีค่า 1nF - 1000 nF)..... 123
ผ.ค.13	การต่อวงจรทดสอบจริง..... 123
ผ.ค.14	การจ่ายแรงดันทดสอบ..... 124
ผ.ค.15	การตรวจจับการเกิดโคโรนาเริ่มเกิดของโคโรนาซีลด์ที่ใช้ทดสอบ..... 124
ผ.ค.16	การลัดวงจรกราวด์ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ..... 125
ผ.ค. 17	การเตรียมกล่องตรวจจับโคโรนา..... 125
ผ.ค.18	การตรวจจับการเกิดโคโรนาที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยกล่องตรวจจับโคโรนา..... 126
ผ.ค. 19	การตรวจจับการเกิดโคโรนาที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยกล่องตรวจจับโคโรนา ในขณะที่ทำการทดสอบการเกิดดีสชาร์จ์บางส่วนจากเครื่องตรวจจับการ PD..... 126
ผ.ค.20	การจับภาพการตรวจจับการเกิดโคโรนาที่โคโรนาซีลด์ของกล่องตรวจจับการเกิดโคโรนา..... 127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ผ.ค.21	การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีทีอเล็กโทรด ที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ.....	127
ผ.ค.22	การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีทีอเล็กโทรด ที่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ.....	128
ผ.ค.23	การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีทีอเล็กโทรด ที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายไฟหุ้มฉนวนเป็นสายตัวนำ.....	128
ผ.ค.24	การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีทีอเล็กโทรด ที่ต่อโคโรนาซีลด์ และใช้สายไฟหุ้มฉนวนเป็นสายตัวนำ.....	129



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1.1 ตารางการดำเนินงาน	2
4.1 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ไม่ต่อ โคโรนาซีลด์.....	55
4.2 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Steering Ring.....	58
4.3 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular Connected Half-Spheres.....	61
4.4 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Topping 2-Rings.....	64
4.5 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ 4-Connected Spheres.....	67
4.6 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Barrel Shape With 5-Rings.....	70
4.7 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Decagon With 5-rectangles.....	73
4.8 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ 2-Connected Symmetrical Rings.....	76
4.9 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Drum Shape With 2 Rings.....	79
4.10 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของอิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls.....	82
4.11 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของ อิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบที่ 10 3-Connected Bowls.....	85
4.12 ค่าการดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันต่างๆที่ทดสอบของ อิเล็กโทรดที่ต่อ โคโรนาซีลด์แบบ ที่ 11 5-Connected Donuts.....	88
4.13 ตารางค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max} ; V/m) ที่อิเล็กโทรดและโคโรนาซีลด์ แบบต่างๆ.....	94
4.14 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการสร้างโคโรนาซีลด์และการนำไปใช้ประโยชน์.....	95
ข.1 แสดงค่าแฟกเตอร์ (η') ของทรงกลมจัดวางรูปแบบต่างๆในทอมของค่าเชิง เรขาคณิต p และ q.....	111
ข.2 แสดงค่าแฟกเตอร์ (η'), ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวนและค่าแรงดันเบรกดาวน ของอากาศที่ระยะแกปต่างๆของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข.3 แร่งคัณแบรกดาวนัของช่องว่างทรงกลมจากตารางที่ 1 ของ
IEC-52:1960 อิลีกโทรคที่ต่อโคโรนาซีลด์ และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ..... 115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นการส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงแต่เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมักจะประสบปัญหาการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปของแสง เสียง ความร้อนจากการเกิดโคโรนา (Corona) ทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านไฟฟ้าของระบบ อีกทั้งทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟาลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการลดการเกิดโคโรนากับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

การใช้โคโรนาชิลด์ (Corona Shield) เป็นวิธีการแก้ปัญหาวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อลดการเกิดโคโรนาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้โดยการทำเป็นจุดต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งจะช่วยกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่เป็นสาเหตุการเกิดโคโรนาของอุปกรณ์ไฟฟ้า ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีการออกแบบสร้างโคโรนาชิลด์นั้นในต่างประเทศมีมากมายหลายรูปแบบ และในประเทศไทยนั้นก็มีการออกแบบโคโรนาชิลด์ออกมาใช้แล้วเช่นกัน แต่ยังไม่มีการวิเคราะห์แสดงให้เห็นชัดเจนถึงข้อดีและข้อเสียของโคโรนาชิลด์แบบต่างๆ โดยทั่วไปนั้นในการออกแบบเพื่อนำไปใช้งาน หากโคโรนาชิลด์ที่ผลิตขึ้นมาไม่ผ่านการทดสอบก็จะทำการผลิตใหม่จนกว่าจะได้ผลที่ยอมรับได้ ซึ่งนับเป็นการสิ้นเปลืองทั้งวัสดุและเวลาในการผลิต

ด้วยเหตุนี้ทางสมาชิกในกลุ่มจึงได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบสร้างโคโรนาชิลด์แบบต่างๆขึ้นมาเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลที่มีคุณค่าทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและช่วยให้กระบวนการผลิตสร้างโคโรนาชิลด์มีประสิทธิภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้
2. เพื่อออกแบบสร้างและวิเคราะห์โคโรนาชิลด์ที่มีรูปแบบมิติแตกต่างกัน สำหรับ ใช้งานที่ระบบแรงดัน 50 kV ได้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดปริญญาณิพนธ์

1. ทำการออกแบบโคโรนาชิลด์เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยศึกษาถึงปรากฏการณ์โคโรนา ปัจจัยของการเกิดโคโรนาที่มีผลทำให้เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้า และแนวทางแก้ไข
 2. นำผลจากการวิเคราะห์ที่ได้มาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างโคโรนาชิลด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดันตามกำหนดได้ โดยรูปแบบของโคโรนาชิลด์เป็นรูปแบบที่ประยุกต์จากที่มีใช้ในปัจจุบันและรูปแบบใหม่ๆที่แตกต่าง
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไป ซึ่งทำการออกแบบโคโรนาชิลด์ทั้งหมด 11 รูปแบบ โดยคำนึงถึงการประหยัดต้นทุนในการผลิตโคโรนาชิลด์, ง่ายต่อการผลิตชิ้นงาน และมีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการได้แบ่งการดำเนินงานและการศึกษา 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาและผลกระทบ
2. ศึกษาโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
3. ใช้โปรแกรมที่ศึกษาวิเคราะห์และออกแบบสร้างโคโรนาชิลด์ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
4. รวบรวมข้อมูลและสรุปผลที่ได้

ตารางการดำเนินงาน

ลำดับ ที่	ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		มิ.ย. 2548	ก.ค. 2548	ส.ค. 2548	ก.ย. 2548	ต.ค. 2548
1.	ศึกษาสาเหตุการเกิดโคโรนาและปัจจัยในการเกิดโคโรนา					
2.	ศึกษาผลกระทบของการเกิดโคโรนาที่มีต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง					
3.	วิเคราะห์และหาวิธีการลดการเกิดโคโรนาต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ทฤษฎีและโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element)					
4.	ออกแบบและศึกษารูปแบบที่เหมาะสมของโคโรนาชิลด์(Corona Shield) กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง					
5.	ใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์และออกแบบโคโรนาชิลด์ที่เหมาะสม					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ ที่	ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน			
		พ.ย. 2548	ธ.ค. 2548	ม.ค. 2549	ก.พ. 2549
6.	วิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลที่ได้พร้อมจัดเตรียมนำเสนอข้อมูลความคืบหน้าโครงการ		■		
7.	รวบรวมข้อมูลนำมาออกแบบสร้างโคโรนาซีลด์และทดสอบรูปแบบที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงว่าได้ผลจริงตามที่ออกแบบหรือไม่	■	■	■	
8.	รวบรวมข้อมูลจัดทำรูปเล่มรายงานและเตรียมนำเสนอผลงาน			■	■

■ การดำเนินงานจริง

■ การวางแผนดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถออกแบบและจำลองโคโรนาซีลด์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน ในระดับแรงดันที่ต้องการได้
2. สามารถนำข้อมูลการออกแบบโคโรนาซีลด์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับแรงดันที่ต้องการไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้างโคโรนาซีลด์ที่ผลิตใช้งานในปัจจุบันได้ โดยจะช่วยประหยัดเวลาและวัสดุในการผลิตโคโรนาซีลด์
3. สามารถใช้ข้อมูลผลการศึกษาทดลองที่ได้เป็นหลักฐานข้อมูลสำหรับออกแบบโคโรนาซีลด์ในอนาคตได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้ดังกล่าวนี้จะเป็นประโยชน์อย่างสูงในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1) ปรินญาณิพนธ์ เรื่อง “การสำรวจและวิเคราะห์ปรากฏการณ์โคโรนาในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2) ปรินญาณิพนธ์ เรื่อง “เครื่องกำเนิดไอโซนจากปรากฏการณ์โคโรนา” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) วิทยานิพนธ์เรื่อง “การคำนวณสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แรงดันสูงด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 4) วิทยานิพนธ์เรื่อง “การเกิดเบรคดาวน์ในสายเคเบิล โพลีเมอร์เนื่องจากประจุค้างและวอร์เตอร์ทรี” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเกิดโคโรนา [1]

โคโรนา หรือ ดิสชาร์จตามผิวเป็นผลที่เกิดจากความเครียดของความต่างศักย์ของตัวนำที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงมีค่าสูงมากจนถึงค่าวิกฤตทำให้อากาศที่อยู่รอบๆตัวนำสูญเสียความเป็นฉนวนเรียกว่า “กระบวนการไอออไนเซชัน” กระบวนการไอออไนเซชันจะถูกจำกัดอยู่ในวงตามส่วนของระยะทางระหว่างอิเล็กโทรดของระบบเท่านั้น จริงๆแล้วปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาโดยทั่วไปมักจะคุ้นเคยกันอยู่แล้ว ซึ่งเป็นผลของการเกิดรอยรอบๆตัวนำที่แขวนอยู่ระหว่างเสาไฟฟ้าแรงสูง การดิสชาร์จนี้ จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในตอนกลางคืน แต่จะเห็นได้ชัดกว่าในตอนที่มีหมอกหนามาก นอกจากนี้ในบริเวณที่ๆหมอกหนามากจะมีเสียงมากกว่าปกติด้วย โดยปกติบริเวณที่เกิดดิสชาร์จภายนอกในอากาศจะเกิดโอโซนขึ้น ซึ่งโอโซนนี้สามารถช่วยตรวจจับโคโรนาได้ด้วย

2.1.1 ลักษณะของปรากฏการณ์โคโรนา โคโรนาดิสชาร์จจะเกิดเมื่อมีการเกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอน (electron avalanches) อันเป็นผลมาจากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าเกินกว่าค่าวิกฤต ในบรรยากาศของโลกทั่วไปจะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่ตัวนำจะได้รับการกระตุ้นโดยไฟฟ้ากระแสสลับในทุกๆครึ่งรอบ(cycle)ความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้าถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของอากาศ (เช่น ก๊าซออกซิเจน หรือ ก๊าซไนโตรเจน) จะเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น ผลจากการชนก็จะทำให้มีอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุดของโมเลกุลมีการหลุดออกมา ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ไอออไนเซชัน ซึ่งโมเลกุลมีการแตกตัวออกมาเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่เป็นตัวเริ่มต้นในการชนและอิเล็กตรอนที่ได้จากการชนจะมีความเร็วลดลง แต่อิเล็กตรอนทั้งคู่จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าอีกครั้ง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณตามปริมาณการชนในแต่ละครั้ง จะเรียกว่า “ อะวาลานซ์ อิเล็กตรอน ”

ความเข้มของสนามไฟฟ้ารอบๆตัวนำจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ และจะมีความเข้มสูงสุดที่ผิว ดังนั้นเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าในตัวนำอยู่ในช่วงครึ่งของรอบ(cycle) ที่เป็นบวก การอะวาลานซ์ (avalanche) ของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นตรงเข้าหาตัวนำจนกระทั่งถึงผิวตัวนำในช่วงแรงดันไฟฟ้าในช่วงครึ่งรอบที่เป็นลบ การอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนจะมีทิศทางออกจากผิวของตัวนำไปสู่บริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำกว่า และจะหยุดการอะวาลานซ์เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยเกินกว่าที่จะสามารถเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วที่สามารถไอออไนซ์ได้สำหรับไอออนบวก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการอะวาลานซ์จะมุ่งหน้าอย่างช้าๆเข้าหาอิเล็กโทรดที่มีขั้วลบ แต่เพราะมวลของมันที่มีค่ามากกว่า 50,000 เท่าของมวลอิเล็กตรอนจึงให้มันเคลื่อนที่ได้ช้า และเมื่อไอออนบวกนี้ไปจับตัวกับอิเล็กตรอนที่อยู่อิสระ (wandering electron) ทั้งคู่ก็จะรวมตัวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลายเป็นโมเลกุลที่มีค่าเป็นกลางอีกครั้งและจะพบว่าระดับพลังงานของโมเลกุลที่มีค่าเป็นกลางนี้จะน้อยกว่าระดับพลังงานของไอออนบวก ดังนั้นเมื่อไอออนบวกมีการจับตัวกับอิเล็กตรอนอิสระ ก็จะมีการปล่อยพลังงานออกมาจากโมเลกุลที่เราเรียกว่า “ควอนตา(quanta)” หรือ “ซังค(chunk)” โดยค่าควอนตาจะเท่ากับขนาดของพลังงานที่ต้องการที่จะนำมาใช้ในการชนแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุล ในตอนแรกควอนตาจะมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการแผ่กระจายออกมาในระดับที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

2.1.2 พฤติกรรมของการเกิดโคโรนา (Corona) การดิสชาร์จเนื่องจากอะวาลานซ์อิเล็กตรอน นั้นจะสามารถสังเกตได้หลายวิธีดังนี้

วิธีที่ 1 โดยการสังเกตจากโคโรนาที่มองเห็น (Visual corona) ซึ่งจะปรากฏเป็นแสงสีม่วงออกจากบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากๆ (overstress) ในขณะที่สังเกตดูชิ้นอุปกรณ์ (specimen) ในสถานะที่มีดิสชาร์จที่เห็นนี้จะเป็นผลมาจากการรวมตัวกันระหว่างไอออนบวก (ของไนโตรเจน) กับอิเล็กตรอนอิสระ

วิธีที่ 2 สามารถทราบได้จากโคโรนาในรูปเสียง ได้ยิน (Audible corona) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเสียง เมื่อตัวอุปกรณ์ได้รับการกระตุ้นจนมีค่าแรงดันเกิน ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (corona threshold voltage) เสียงที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นผลมาจากดิสชาร์จ (discharge) หรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก

วิธีที่ 3 สามารถทราบได้จากคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio influence (RI)) ที่เกิดขึ้นในการอะวาลานซ์ จะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดกระแสขึ้นมา ซึ่งจะสร้างทั้งสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าสถิตขึ้นมาใกล้ๆ กันในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และในทันทีทันใด ซึ่งจะก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุความถี่สูงๆ ที่เรียกว่า “เรดิโอ อินฟลูเินซ์ (radio influence; RI)” ส่วนแรงดันนี้จะถูกเรียกว่า “แรงดันเรดิโออินฟลูเินซ์ (radio influence voltage; RIV)”

2.1.3 ชนิดของการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา ระดับขั้นของการเกิดโคโรนา ทั้ง 3 ระดับในEHV specimen จะมีดังนี้คือ “พลัม ดิสชาร์จ (plume discharge)”, “บรัชดิสชาร์จ (brush discharge)”, “โกลว ดิสชาร์จ (glow discharge)”

1. **พลัม ดิสชาร์จ (plume discharge)** จะเกิดบ่อยที่สุดในบรรดาทั้ง 3 ระดับ เมื่อสังเกตในความมืดจะเห็นว่ามียิม (stem) ซึ่งจะปรากฏเป็นระยะยาวได้ตั้งแต่ 1 นิ้วไปจนถึงหลายนิ้วซึ่งขึ้นอยู่กับระดับค่าแรงดันในสายตัวนำ ที่ปลายสุดของปมจะมีการแตกเป็นกิ่งก้านซึ่งมีสีม่วงโดยกิ่งก้านนี้จะมีระดับความยาวแตกต่างกันตามระดับแรงดัน เสียงที่เกิดจากพลัม ดิสชาร์จจะเป็นเสียง การก่อตัวของพลัม ดิสชาร์จ จะเกิดที่ครึ่งรอบบวก เมื่อเกิดการไอออไนเซชันแล้วจะทำให้เกิดอิเล็กโทรดขั้วบวก(positive space charge) ที่ปลายของโปรเจ็คเตอร์ (project outward) เป็นเหตุให้เกิดพลัม ดิสชาร์จ การเติบโตนี้จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งพลัม (plume) ถึงขนาดความเข้มของสนามที่ปลายของกิ่งของขั้วบวก (positive) มีน้อยเกินไปที่จะเกิดไอออนในเซชัน

2.บรัช ดิสชาร์จ(Brush discharge) จะเป็นตัวนำล่อฟ้า(streamer) ที่แผ่ออกมาจากผิวของตัวนำตามรัศมีของการดิสชาร์จ บรัช ดิสชาร์จ สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วผิวของตัวนำ โดยขนาดความยาวของบรัช ดิสชาร์จ เกิดขึ้นได้ตั้งแต่เล็กๆ(ที่แรงดันต่ำๆ)จนถึง 1-2 นิ้ว (ที่แรงดันสูงๆ)เสียงที่ได้ยินจากบรัช ดิสชาร์จ จะเป็นเสียง การก่อดั้วของ บรัช ดิสชาร์จ จะเกิดที่เครื่องรอบลอบที่มีความเข้มสนาม ที่มากพอในการเกิดบรัช ดิสชาร์จ หรือเมื่อความเข้มถึงจุดวิกฤต อิเล็กตรอนเกิดไอออไนซิ่ง(Ionizing) และจะสะสมพลังงานไปเรื่อยๆจนเกิดบรัช ดิสชาร์จ และจะเกิดไปเรื่อยๆจนกระทั่งความเครียดที่ปลายด้านนอกของ อัดวานซึ่ง ดิสชาร์จ (advancing discharge) ไม่เพียงพอต่อการเกิดการไอออไนซิ่ง และจะเกิดความยาวมากที่สุด (maximum length) ที่ความต่างศักย์สูงสุด

3.โกลว ดิสชาร์จ(Glow discharge) จะมีลักษณะเป็นแสงเรืองๆ จะเกิดรอบๆ ผิวของตัวนำ(ไม่เหมือนบรัช ดิสชาร์จ) โกลว ดิสชาร์จ จะเกิดบริเวณที่เป็นขอบเขตวิกฤต (critical region) (บริเวณที่มีความชื้นสูง) แต่ไม่เกิดเสียง โกลว ดิสชาร์จ จะถูกสังเกตเห็นเพียงบนผิวของตัวนำเท่านั้น และจะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำๆและมองเห็น บรัช ดิสชาร์จ ระดับ RIV สัมพันธ์กับโกลว ดิสชาร์จ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นต่ำกว่า 10 ไมโครโวลต์ ดิสชาร์จ (microvolt discharge) จะปรากฏขึ้นเพราะความบกพร่องของพื้นผิว และสามารถกำจัดได้โดยการล้างทำความสะอาดพื้นผิวบริเวณที่เกิดนั้นได้

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา

โคโรนา คือ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ที่ผิวของตัวนำสายส่งในอากาศ เมื่อมีความเข้มสนามไฟฟ้า หรือเกรเดียนต์แรงดันที่ผิวของตัวนำมีค่าเกินจุดเบรกดาว์ของอากาศ จึงทำให้อากาศรอบๆตัวนำเกิดการแตกตัวขึ้น ในการทดสอบอากาศแห้ง (dry air) ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิปกติ (ความดัน 760 mmHg และ 25 °C) จะได้ผลของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้อากาศเกิดการเบรกดาว์ที่ 29.8 kV/cm (เป็นค่ายอดหรือค่าสูงสุด) หรือที่ 21.1 kV/cm (เป็นค่าประสิทธิผลหรือค่า rms) ในสภาวะปกติปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา มีดังนี้

2.2.1 ชนิดและลักษณะพื้นผิวของตัวนำ พื้นผิวดำนำที่ไม่เรียบในลักษณะของการมีรอยขีด รอยถลอก ผิวของสายตัวนำตีเกลียวและการที่มีฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกมาเกาะที่ผิวของตัวนำ สิ่งเหล่านี้ทำให้มีโอกาสเกิดกำลังการสูญเสียเนื่องจากโคโรนาได้มากขึ้น ในขณะที่ผิวของตัวนำเป็นทรงกระบอกเรียบจะทำให้เกิดโคโรนาได้ยาก

สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำก็มีผลต่อการเกิดโคโรนาได้เช่นเดียวกัน โดยการใช้ตัวนำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดโคโรนาลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงจึงต้องใช้ตัวนำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ หรือใช้ตัวนำแบบบัลเดิล (Bundle) เพื่อเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิภาพให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำลดลง และเป็นการลดผลของการเกิดโคโรนาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อุณหภูมิแวดล้อม จากการศึกษาสำรวจและรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลต่อแสงของโคโรนา โดยอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศทำให้อากาศบริเวณนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ การเกิดไอออไนเซชันที่อุณหภูมิห้องจะเกิดขึ้นได้ยาก ต่อมาเมื่อมีการศึกษาพบว่าเมื่ออากาศอยู่ในสภาวะที่มีแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิแวดล้อมมีผลช่วยทำให้เกิดการไอออไนเซชันในอากาศได้ สามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์โคโรนาตามทฤษฎีอิเล็กตรอนที่เกิดบริเวณรอบตัวนำ โดยเฉพาะจุดที่มีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูง เช่น จุดที่มีความแหลมคม, จุดที่เกิดการหักงอ, ผิวที่ขรุขระเนื่องจากการกัดกร่อน

จากการศึกษาปริญญาโทเรื่องการศึกษาสำรวจและวิเคราะห์ปรากฏการณ์โคโรนาในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมจะมีผลช่วยให้อากาศเกิดไอออไนเซชัน และเกิดเป็นโคโรนาในอากาศ บริเวณแคลมป์ (clamp) และรอบสายตัวนำโดยไม่มีผลต่อการเกิดโคโรนาบนลูกถ้วย และพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้แรงดันวิกฤติที่ทำให้อากาศแตกตัวมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอากาศจึงทนการเกิดไอออไนเซชันได้สูงขึ้นทำให้การเห็นแสงของโคโรนาลดลง จากการวิเคราะห์พบว่าในการหาระยะปลอดภัย ควรจะนำอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดบริเวณนั้นมาใช้ในการพิจารณาด้วย

ดังนั้นอุณหภูมิแวดล้อมทำให้ค่าแรงดันวิกฤติการแตกตัวของอากาศเปลี่ยนไป คือ อุณหภูมิสูงขึ้นค่าแรงดันวิกฤติการแตกตัวของอากาศจะมีค่าต่ำลง ทำให้อากาศเกิดการไอออไนเซชันได้ง่าย ทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายขึ้น

2.2.3 สภาพภูมิอากาศ ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศจะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขของสภาพภูมิอากาศโดยความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของอากาศ (Density of the air) ในกรณีที่มีสภาพอากาศที่ไม่ดี เช่น มีฝนตก หรือหมอกหนา จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าปกติ โดยเฉพาะน้ำฝนสามารถทำให้เกิดการสูญเสียจากโคโรนาได้ง่ายขึ้น

2.2.4 ความชื้น การเกิดไอออไนเซชันทำให้เกิดผลกระทบจากโคโรนา (Corona Effect) กระบวนการดังกล่าวจะเกิดในอากาศที่มีความชื้นของสนามไฟฟ้าสูงมาก ๆ

ถ้าในขณะนั้นมีปริมาณความชื้นสูง นั้นหมายถึงมีปริมาณไฮโดรเจนไดออกไซด์ (H_2O) ต่อลูกบาศก์เมตรมาก ความชื้นดังกล่าวจะมีผลต่อกระบวนการไอออไนเซชันในอากาศ ความชื้นทำให้เกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีคุณสมบัติรวมกับสารอื่นได้ดีในกระบวนการไอออไนเซชันจะทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นบวก และเป็นลบ ไฮดรอกไซด์ไอออนจะไปรวมกับสารประกอบดังกล่าว เกิดเป็นก๊าซชนิดใหม่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการลดผลของการเกิดไอออไนเซชัน ดังนั้นในช่วงเวลาที่มีความชื้นมากๆจะทำให้เกิดการไอออไนเซชันลดลง

ความชื้นในอากาศจะมีผลทำให้เมื่อเกิดการไอออไนเซชันของอากาศและเกิดไอออนขึ้น ความชื้นจะรวมตัวกับไอออน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบชนิดต่างๆและน้ำขึ้น ทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าในอากาศลดลงส่งผลทำให้เกิดโคโรนาน้อยลง (ในกรณีลูกถ้วย) แต่จะมีผลทำให้เกิดโคโรนามากขึ้น ในกรณีที่ลูกถ้วยมีสภาพผิวที่เปราะเป็อนหรือสกปรกเนื่องจากหยดน้ำ

ส่งผลให้มีค่านำไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงดันตกบนลูกถ้วยในส่วนของบริษัทที่แห้งมากขึ้น ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้เกิดโคโรนาง่ายขึ้น

2.2.5 ความดันบรรยากาศ จะมีผลต่อการเกิดของโคโรนาโดยมีผลต่อค่าตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ ถ้าความดันบรรยากาศสูงขึ้น การเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากทำให้ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวสูงขึ้น

2.3 ผลกระทบจากการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา

โคโรนามีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับไฟฟ้าแรงสูงและสามารถทำให้เกิดแสงเสียง และโอโซน ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยการมองเห็น การได้ยิน และการได้กลิ่น นอกจากนี้โคโรนายังทำให้เกิดปรากฏการณ์อย่างอื่น ดังนี้

1. รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)
2. กำเนิดออกซิเจนจากผลของการออกซิไดซ์ เช่น ในกรณีการเกิดโอโซน
3. เกิดกรดออกซาลิก
4. ให้ความร้อนในช่วงดิสชาร์จ (Discharge) และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (power loss) ในแหล่งจ่าย
5. เกิดการผุกร่อนบริเวณพื้นผิวจากการแตกตัวของไอออน สารที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการกัดกร่อนจากการดิสชาร์จ คุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่า "ความต้านทานโคโรนา (Corona resistance)" อุปกรณ์พวกสารอินทรีย์ จะถูกกัดกร่อนมากกว่าพวกไมก้า (Mica), แก้ว (Glass) และเซรามิก
6. กวดไนตริกในรูปของความชื้น
7. การรบกวนคลื่นวิทยุ

2.4 วิธีแก้ไขและลดการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา

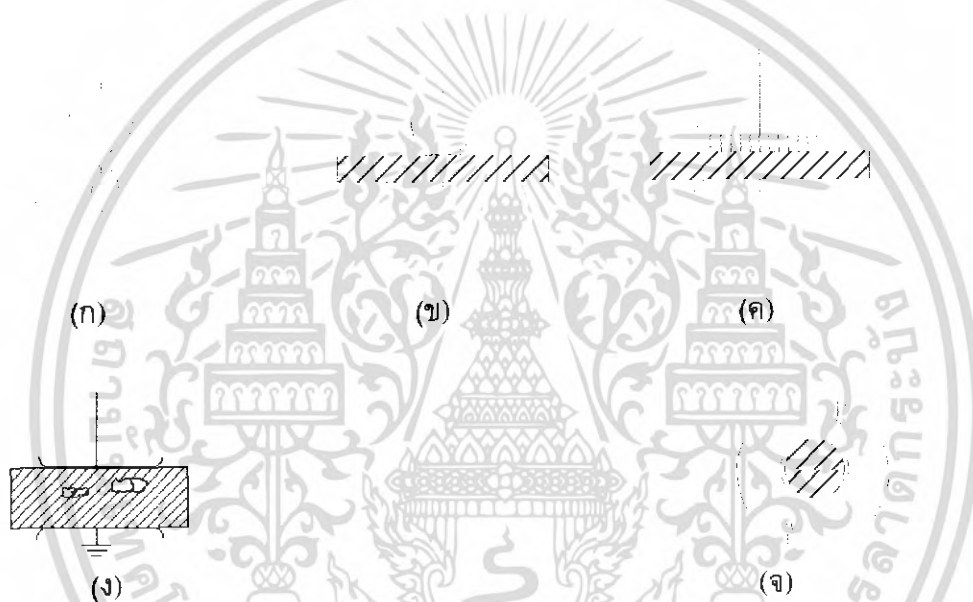
ผลศึกษาปัจจัยการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาในข้างต้นนั้น ได้นำปัจจัยเหล่านั้นมาวิเคราะห์เพื่อหาวิธีลดการเกิดโคโรนา จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่เกิดขึ้นจะมีทั้งปัจจัยที่เราสามารถควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงค่าได้เพื่อลดการเกิดโคโรนาและมีปัจจัยที่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมของแต่ละที่ซึ่งเป็นการยากมากในการควบคุม ดังนั้นวิธีที่จะนำมาใช้ในการแก้ไขและลดปรากฏการณ์โคโรนา จึงต้องแก้จากปัจจัยต่อไปนี้

1. **ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างโคโรนาซิลด์** ต้องศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อหาชนิดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาสร้างโคโรนาซิลด์โดยคุณสมบัติที่ต้องพิจารณา เช่น ค่าความนำไฟฟ้า, ค่าความเป็นฉนวน เป็นต้น
2. **รูปทรงต่างๆของโคโรนาซิลด์** ที่สามารถกระจายความเข้มสนามไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอที่สุด เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้ไปเกิดที่จุดๆเดียว

3. ลักษณะของพื้นที่ผิวของโคโรนาซีลด์ พื้นที่ผิวที่ขรุขระจะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าผิวเรียบ ด้วยเหตุผลนี้โคโรนาซีลด์ ที่จะออกแบบสร้างนั้นต้องมีผิวเรียบ

2.5 การวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge,PD) ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง[2]

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน คือ การเกิดการเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วน ของระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรกดาวนหรือดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด ไม่ได้เป็นการเสียหายการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือ ไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งได้ 3 แบบ คือ โคโรนาดิสชาร์จ , ดิสชาร์จตามผิว และ ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 2.1[2]

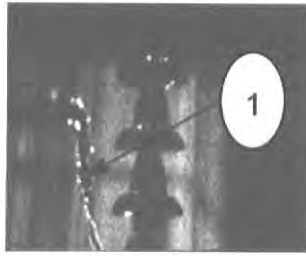


รูปที่ 2.1 การดิสชาร์จบางส่วน

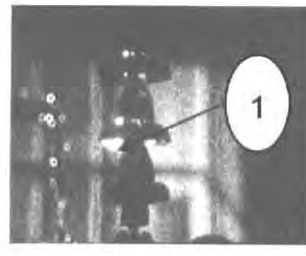
- ก) โคโรนาดิสชาร์จ
- ข) ดิสชาร์จตามผิว
- ค) ดิสชาร์จภายในรอยต่อ
- ง) ดิสชาร์จภายในโพรงอากาศ
- จ) ดิสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

2.5.1 โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) จะเกิดตรงบริเวณรอบ ๆ อิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือ ผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบ ๆ บริเวณนั้นเกิดไอออนในเซชันรูปที่ 2.2 แสดงการเกิดโคโรนาที่พวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก และที่ขอบคมของสายนำไฟฟ้าแรงสูง (ถ่ายด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวนและสายตัวนำแรงสูง ตรวจจับด้วยกล้องโคโรนา

ก) การเกิดโคโรนาที่สายที่ระดับแรงดัน 30 kV

ข) การเกิดโคโรนาที่ลูกถ้วยที่ระดับแรงดัน 70 kV

2.5.2 ดิสชาร์จตามผิว อาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน

เช่น ของแข็งกับก๊าซหรือของแข็งกับของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลอกฉนวนนำสายปลายสายเคเบิล หรือดิสชาร์จภายนอก กระทบเข้ากับฉนวนซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ เจาะทะลุได้ เช่น แผ่นคั่นระหว่างอีเล็กโทรด หรือปลอกฉนวนนำสาย ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปแบบฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว

ก) แท่งรีอดกับระนาบคั่นด้วยแผ่นฉนวนที่เคลือบสาร Active photochemical

ข) อีเล็กโทรดทรงกลมกับระนาบคั่นด้วยแผ่นแก้ว

ค) ปลอกฉนวนนำสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ดิสซาร์จบางส่วนภายใน เป็นการดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่มีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ แสดงได้ดังรูป 2.4



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.4 ดิสซาร์จภายในและตัวอย่างการเกิดความเสียหายของการเกิดดิสซาร์จภายในสายเคเบิล

- ก) การเกิดดิสซาร์จภายในสายเคเบิลแบบ Treeing
 ข) ฉนวนในสายเคเบิลเกิดเบรกดาว์นตามเส้นทางของการเกิด Treeing

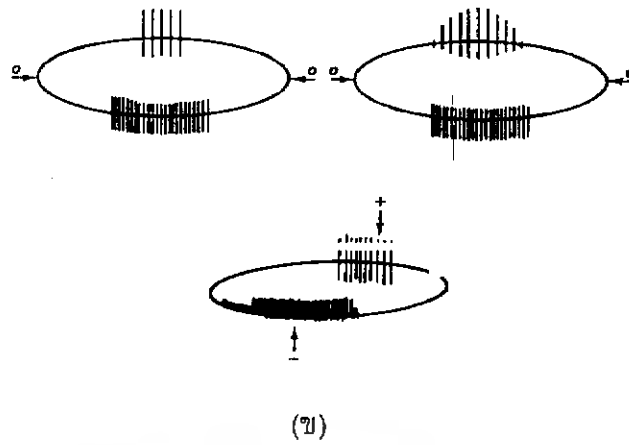
2.6 รูปแบบการเกิดดิสซาร์จบางส่วน

2.6.1 รูปแบบดิสซาร์จบางส่วน (PD) แบบโคโรนา ดังรูปที่ 2.5 [2] ถ้าดิสซาร์จปรากฏทางด้านลบของรูปคลื่นแสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านกราวด์ ลักษณะของโคโรนาทางด้านแรงสูงที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา สำหรับในกรณีแรงดันเริ่มต้น และเมื่อแรงดันสูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง 90 องศาด้วย โดยขนาดของ PD จะมีค่าใกล้เคียงกัน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 รูปแบบการเกิดโคโรนา

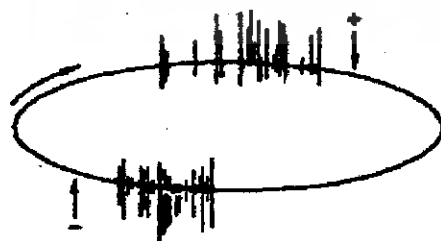
- ก) การเกิดโคโรนาในก๊าซ เช่น อากาศ และก๊าซ SF_6
- ข) การเกิดโคโรนาในน้ำมัน

2.6.2 รูปแบบดิสชาร์จ แบบดิสชาร์จตามผิว ดังรูปที่ 2.6 ลักษณะของดิสชาร์จตามผิวที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศา



รูปที่ 2.6 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิว

2.6.3 รูปแบบดิสชาร์จแบบดิสชาร์จภายใน ดังรูปที่ 2.7 ลักษณะของดิสชาร์จภายในที่แสดงบนฐานเวลา รูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา เช่นเดียวกับดิสชาร์จตามผิวแต่ลักษณะการกระจายของพัลส์ PD จะน้อยกว่า

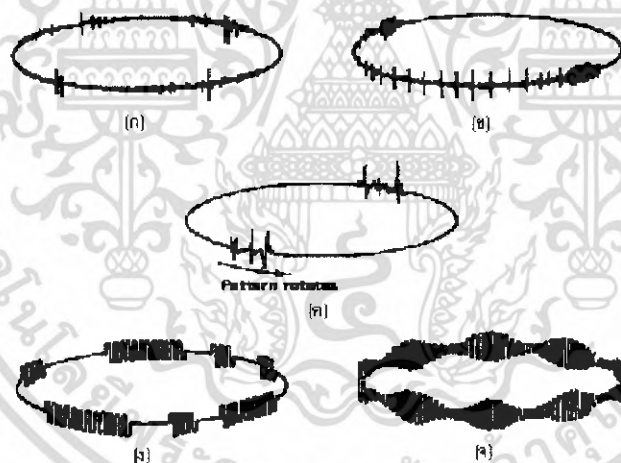


รูปที่ 2.7 รูปแบบการดิสชาร์จภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 รูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.8 [2] ในการตรวจจับ PD บ่อยครั้งที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาจนทำให้การวัดค่า PD ผิดพลาด และได้ผลมากกว่าความเป็นจริง ทำให้เกิดความเข้าใจผิดว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นไม่ได้คุณภาพ กล่าวคือ ค่า PD ที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด PD แบบต่างๆ ดังนี้

- 1) สัญญาณรบกวนเนื่องจากไทรสเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.8 (ก) ลักษณะของสัญญาณรบกวนชนิดนี้จะเกิดเป็นพัลส์คู่
- 2) สัญญาณรบกวนเนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ดังรูป 2.8 (ข)
- 3) สัญญาณรบกวนเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส ดังรูป 2.8 (ค)
- 4) สัญญาณรบกวนเนื่องจากคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร ดังรูป 2.8 (ง) ลักษณะของสัญญาณรบกวน คือ จะมีคลื่นรบกวนความถี่สูงเข้ามาในวงจรวัด
- 5) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนวิทยุ ดังรูป 2.8 (จ) ลักษณะของสัญญาณรบกวน คือ จะมีคลื่นรบกวนความถี่สูงเข้ามาในวงจรวัดเช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร



รูปที่ 2.8 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด

2.7 หลักการตรวจจับ PD

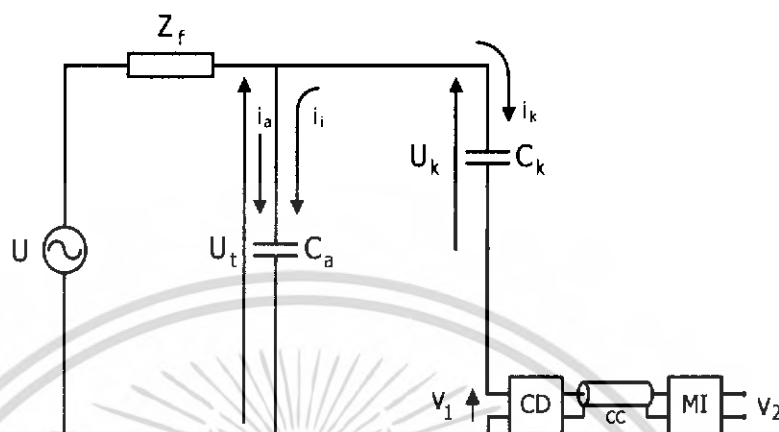
การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

2.7.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 602270:1998 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test object) C_a ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor) C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring instrument) MI ตามลำดับแสดงดังรูป 2.9 [2]



รูปที่ 2.9 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

- 1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้
- 2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย และป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ
- 3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a , C_k และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ
- 4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือ ทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าไปที่เครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการ คือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

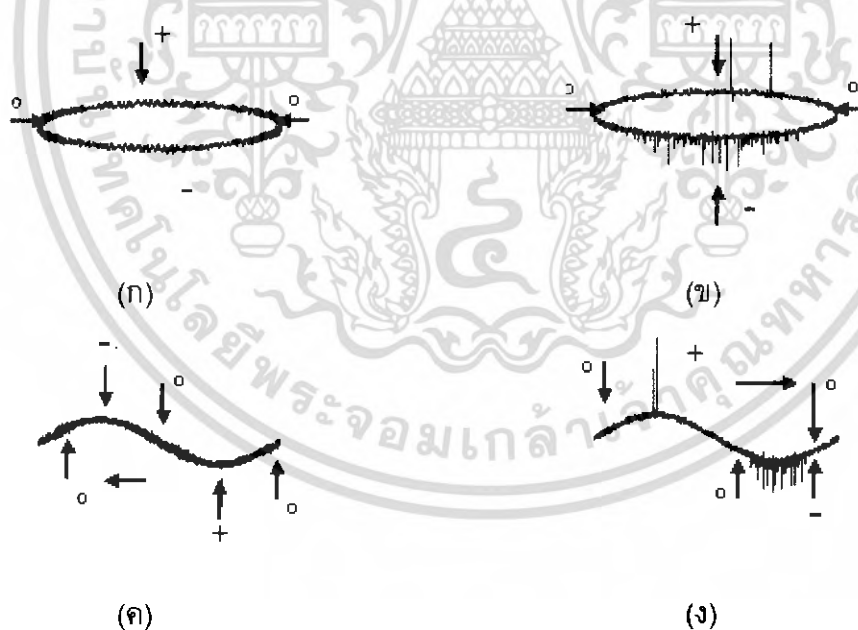
2.7.2 หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานตรวจจับ PD

เริ่มจากค่อยๆป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าจำนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a ทำให้ C_k ดิสชาร์จประจุไปที่ C_a เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ i ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย C_k , C_a และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a กับ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

2.7.3 การแสดงผลดิสชาร์จบางส่วน [2]

การวัด PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro-volt (μV), picocolomb (pC) ได้แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวกยอดลบและตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.10 ก) และ รูปที่ 2.10 ข) หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.10 ค) และ รูปที่ 2.10 ง)

การแสดงผล PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปอิลิปส์ มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุใด



รูปที่ 2.10 การแสดงผลของ PD (เครื่องตรวจวัด PD ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.)

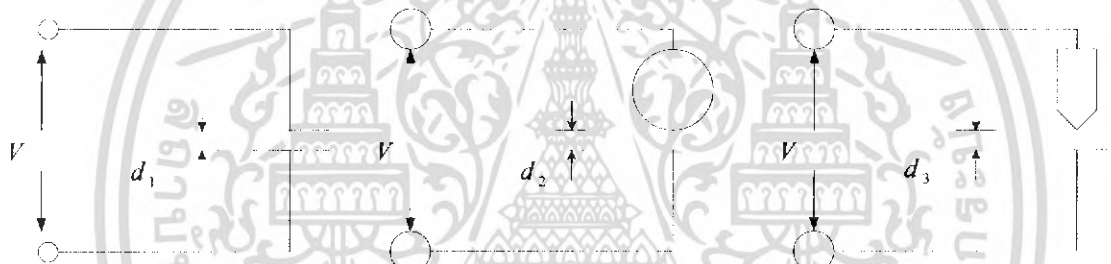
- (ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์
- (ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์
- (ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์
- (ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ความเครียดสนามไฟฟ้า [3]

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญต่อการฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

2.8.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า(Electric field configuration) โดยทั่วไป ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรดและชนิดของอิเล็กโทรด (Electrode type) สนามไฟฟ้าอาจหมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอำนาจของประจุไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบต่างกันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของวัสดุฉนวน (Dielectric material) เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัยในรูป 2.11[3] เป็นลักษณะของอิเล็กโทรด (electrode) แบบต่าง ๆ



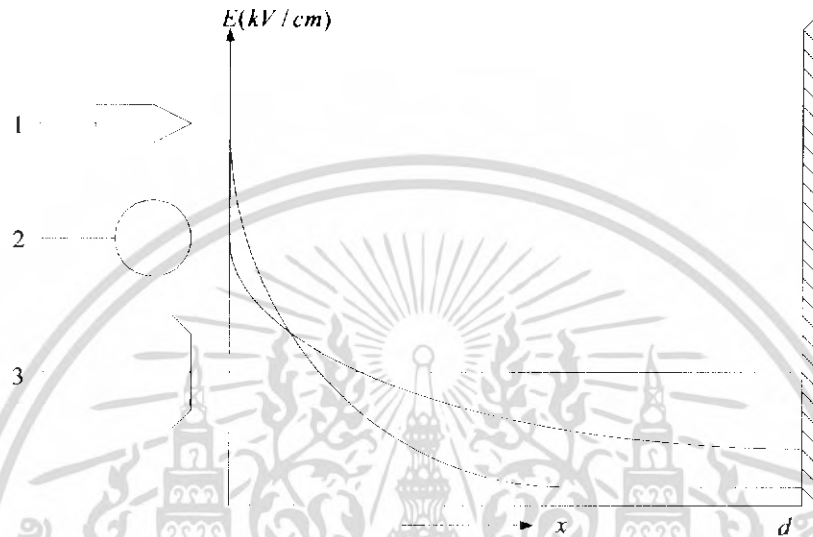
รูปที่ 2.11 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

$$E_{max} = E = \frac{V}{d} \quad kV/cm \quad (2.1)$$

- เมื่อ E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
- E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโทรด
- V คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด
- d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

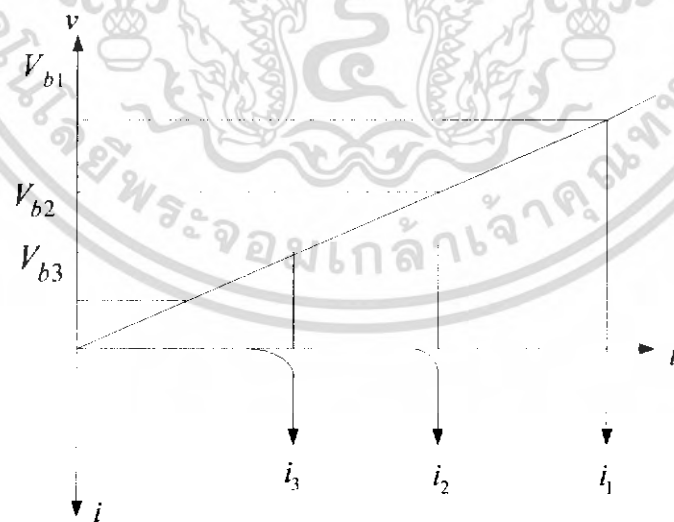
- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-uniform Field)
- 3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-uniform Field)

ในรูปที่ 2.11 แม้ว่าค่าของ d_1, d_2 และ d_3 จะเท่ากันก็ตามแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์(Breakdown)จะไม่เท่ากัน เพราะฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆหลายประการ ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอเล็กโตรดลักษณะต่าง ๆ

1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [3]



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

$$E_b = \frac{V_d}{d} \quad kV/cm \quad (2.2)$$

เมื่อ E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่า ความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

V_d คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) ระหว่างอิเล็กโทรดถึงค่าหนึ่ง กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ค่ากระแสนี้วัดไม่ได้ขึ้นกับวงจรภายนอก [3]

2) สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอ [3]



รูปที่ 2.14 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

พิจารณาอิเล็กโทรดทรงกลมระนาบ ดังรูปที่ 2.14 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะเกิดที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม อาจคำนวณได้จาก

$$E_{\max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ η^* คือ แฟคเตอร์การใช้งานสนามไฟฟ้า (Field utilization factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$E_{av} \cong \frac{V}{d}$$

$$\therefore E_b = \frac{V_d}{d \cdot \eta^*} \quad (2.4)$$

3) สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วในรูปที่ 2.16[3] ลักษณะสนามไฟฟ้าแบบนี้จะทำให้เกิด

- 1) เกิดโคโรนา
- 2) เกิดพรีดีสชาร์จ (Predischarge)
- 3) เกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge)

ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดได้ตั้งสมการที่ 2.5

$$E_i = \frac{V_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด

V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

ฉะนั้นสมการ 2.5 [3] จะใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (free of space charge) หรือสำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage, Threshold Voltage, Inception Voltage)

2.9 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน

2.9.1 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนในก๊าซ การเกิดเบรกดาวนในก๊าซมี

2 แบบคือ เบรกดาวนโดยตรง ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และอีกแบบหนึ่งคือ เบรกดาวนแบบโคโรนา คือ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน เป็นลักษณะเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งค่าแรงดันเบรกดาวนคำนวณไม่ได้ แต่คำนวณค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้

ในแก๊ปที่มีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* = E_{av} / E_{max}$ มากกว่า 20% ขึ้นไป การเกิด

เบรกดาวนในอากาศจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่ถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำกว่านี้ $\eta^* < 20\%$ เรียกว่าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะมีปรากฏการณ์แตกต่างไปจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ โคโรนานี้อาจคงสภาพอยู่ได้ในบางจุดโดยไม่เกิดเบรกดาวน์

ในสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มี η^* ยิ่งต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ยังมีค่าสูงที่อิเล็กโทรดรัศมีเล็ก และความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างออกไปจากจุด E_{max} ฉะนั้นไอออนในเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้นที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไปที่จะเกิดไอออนในเซชัน จึงไม่อาจเกิดเบรกดาวน์ได้ จึงมีโคโรนาเกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีรัศมีเล็กก่อนที่จะเกิดเบรกดาวน์ และจัดเป็นเบรกดาวน์แบบโคโรนา (Corona breakdown)

เมื่อมีโคโรนาเกิดขึ้น สนามไฟฟ้าในแก๊ปจะบิดเบือนไปจากสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบไฟฟ้าสถิตหรือสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากมิติเรขาคณิตของแก๊ป การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์แบบโคโรนาจะยุ่งยาก ประมาณได้เพียงในเชิงสัมพัทธ์เปรียบเทียบทั่วไป อย่างไรก็ตามแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ถ้าทราบรูปลักษณะของสนามไฟฟ้าในแก๊ป

2.9.2 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง U_0 หรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_0 [2]

2.9.2.1 แรงดันเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ คือ E มีค่าเท่ากันตลอดแก๊ป α ก็มีค่าคงตัว การอินทิเกรตจะทำได้ง่าย โดยมีขอบเขตของการอินทิเกรตเท่ากับระยะของแก๊ป d นั่นคือ

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d$$

ตามเงื่อนไขเบรกดาวน์ของทาว์นเซนต์ คือ $\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1$ และเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ของ Rather คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤตเท่ากับ N_c จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right) = \ln N_c = K \quad (2.6)$$

N_c ตามข้อเสนอของ Rather เท่ากับ 10^8 ฉะนั้น K มีค่าเท่ากับ 18 แต่ความเป็นจริงค่า K อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า K ในช่วงนี้ไม่มีผลสำคัญต่อแรงดันเบรกดาวน์ ค่า $K = 18$ จึงเป็นที่ยอมรับและใช้ในการคำนวณกันอยู่ทั่วไป

2.9.2.2 แรงดันเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ที่เกิดเบรกดาวน์แบบโดยตรง สามารถใช้สมการ (2.6) คำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซได้ ถ้าทราบสนามไฟฟ้ากระจาย $E(x)$ ของแก๊ป การอินทิเกรตจะทำได้ตามแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุด และเนื่องจาก α มีค่าขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha = f[E(x)]$ ฉะนั้นขอบเขตการ

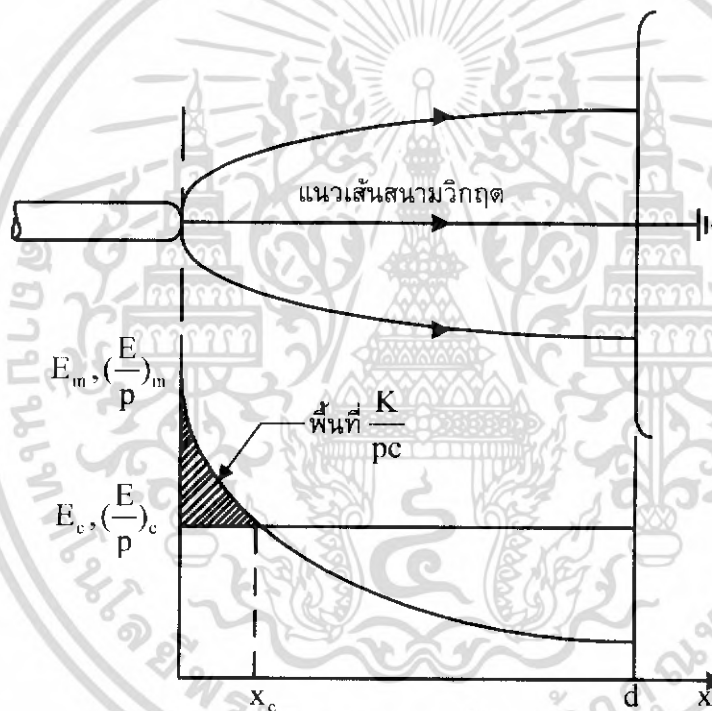
อินทิเกรตจะเท่ากับความยาวของเส้นสนามไฟฟ้าที่สิ้นสุดระหว่างอิเล็กโทรด หรือเท่ากับระยะของอะวาลานซ์วิกฤต X_c ดังนั้นสมการ (2.6) [3] จึงเป็น

$$\int_0^{x_c} \alpha dx = \ln N_c = K \quad (2.7)$$

และแทนค่า α อยู่ในฟังก์ชันของ $E(x)$ และความดันก๊าซ p จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^{x_c} \alpha[E(x), p] dx = K \quad (2.8)$$

จุดเริ่มต้นอินทิเกรตจะเริ่มจากจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} โดยทั่วไปก็คือ ที่ผิวของอิเล็กโทรดนั่นเอง จุดปลายของการอินทิเกรตก็คือที่ $\alpha = 0$ เป็นจุดที่ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ ดังรูป 2.15 [3]



รูปที่ 2.15 ระยะ อะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

2.9.2.3 การคำนวณแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_i ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

สูง โคโรนาเกิดก่อนเบรกดาวน์ การหาค่าตามเงื่อนไขในรูปที่ 2.15 [3] นั้นใช้ได้เฉพาะแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_i (corona inception voltage) เท่านั้น และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ก็คือ E_i ส่วนแรงดันโคโรนาเบรกดาวน์นั้นหาตามวิธีนี้ได้ เพราะประจุค้างจากโคโรนาทำให้สนามไฟฟ้าในแก๊บบิดเบือนไปจากค่าตามมิติเชิงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า α มีความสัมพันธ์กับความดันก๊าซ p และสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha/p = f(E/p)$ ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน เช่น ฟังก์ชันของอากาศและก๊าซ SF_6 อาจเขียนความสัมพันธ์ α/p แบบทั่วไปได้ว่า

$$\frac{\alpha}{p} = C \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^n \quad (2.9)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงตัว

$(E/p)_c$ คือ สนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน (รูป 2.5)

n คือ เลขยกกำลังขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ เช่น อากาศ $n = 2$

และ SF_6 $n = 1$

การหาค่าแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง U_b หาได้จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b โดยใช้สมการ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ (2.10)

กรณีแรงดันโคโรนาเบรกดาวน์ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด $E_{max} = E_i$ จะได้แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด $U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^*$ (2.11)

โดยที่ d คือ ระยะแกป
 η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

2.9.3 การคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศ

อากาศถือว่าเป็นก๊าซที่มีความสำคัญในด้านการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไปจะเป็นฉนวนภายนอก ที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม

2.9.3.1 แรงดันเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\eta^* = 1$ ฉะนั้นจากสมการ (2.5) จะได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = E_b \cdot d$$

ค่า E_b ของอากาศหาได้จากสมการ (2.9) จากเงื่อนไขเบรกดาวน์สมการ (2.6) $\alpha d = K$ และสมการ(2.9) สำหรับอากาศ $n = 2$ จะได้

$$\alpha d = C \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 p d = K$$

$$\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c = \sqrt{\frac{K}{C}} \times \frac{1}{\sqrt{p d}}$$

$$\left(\frac{E}{p} \right) p d = \left(\frac{E}{p} \right)_c p d + \sqrt{\frac{K}{C}} \times \sqrt{p d}$$

ได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_b = \left(\frac{E}{p} \right) p d + \sqrt{\frac{K}{C}} \times \sqrt{p d}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าคงตัว C ของ ชูมันน์ และค่า E_c คือ [2]

$$E_c = 24.4 \text{ kV/cm}$$

$$\frac{K}{C} = 45.1 \text{ kV}^2/\text{cm}$$

d คือ ระยะแกป cm

จะได้
$$U_b = 24.4pd + 6.72\sqrt{pd} \quad \text{kV} \quad (2.12)$$

ที่ความดันบรรยากาศจะได้
$$U_b = 24.4d + 6.72\sqrt{d}$$

นั่นคือค่าความคงทนของอากาศ
$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \quad \text{kV/cm} \quad (2.13)$$

2.9.3.2 แรงดันเบรกดาว์นของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [4]

จากสมการ (2.8) คือ $\int_0^{x_c} \alpha[E(x), p] dx = K$ ถ้าทราบการกระจายของสนามไฟฟ้าคือ $E(x)$ ก็จะสามารถหาค่าแรงดันเบรกดาว์นนี้ได้ หรือหาจากความสัมพันธ์ในสมการ (2.10) $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ เมื่อทราบรูปลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดก็จะหาค่า η^* ได้

ในสนามไฟฟ้าอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกแบบแกนร่วม ซึ่งมีรัศมีกระบอกนอกเท่ากับ r_2 และตัวนำกระบอกในมีรัศมี r_1 สนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่าง r_1 กับ r_2 ($r_1 < r < r_2$) จะได้

$$E_r = E_{\max} \frac{r_1}{r} \quad (2.14)$$

จากเงื่อนไขเบรกดาว์นจะเกิดขึ้นเมื่อ $E_{\max} = E_r = E_b$ และการอินทิเกรตไปตามแนวที่สั้นที่สุด จาก r_1 (ที่มี E_{\max}) ไปหา r_2 เป็นระยะวิกฤตคือ x_c ณ จุดนั้น α เป็นศูนย์ จึงได้

$$\int_{r_1}^{r_2} \alpha(E) dr = K$$

แทนค่าความสัมพันธ์จากสมการ (2.9)
$$\frac{\alpha}{p} = C \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2$$

จะได้

$$pC \int_{r_1}^{r_2} \left[\frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 dr = K \quad (2.15)$$

แทนค่า $E = E_r = \frac{E_1 r_1}{r}$ (จาก $E_r = E_{\max} \frac{r_1}{r}$)

จะได้
$$\int_{r_1}^{r_2} \left[\frac{E_1 r_1}{pr} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 dr = \frac{K}{pC}$$

ผลของการอินทิเกรตสมการนี้และใช้สมการ(2.9) $E_c r_c = E_i r_i$ และใช้ δ แทน p ได้
ความสัมพันธ์

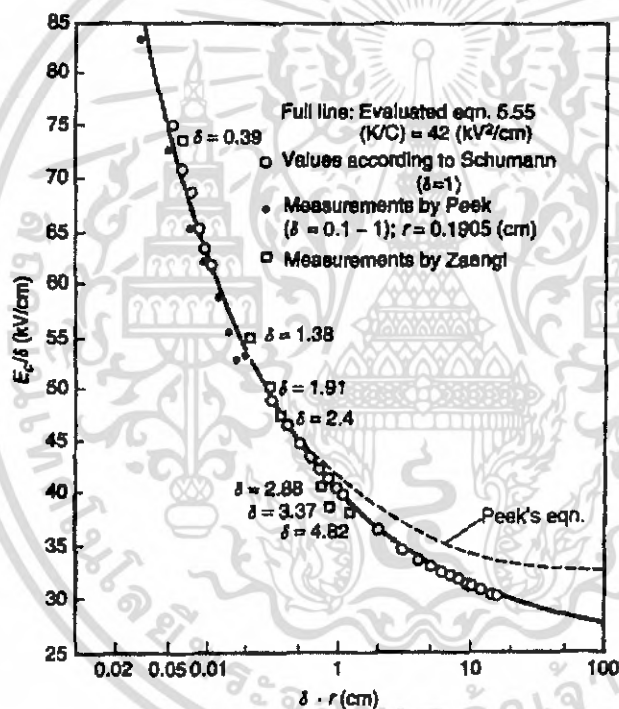
$$\left(\frac{E_i}{\delta}\right)^2 - 2\frac{E_i}{\delta} \cdot E_c \ln \frac{E_i}{\delta E_c} - E_c^2 = \frac{K/C}{\delta r} \quad (2.16)$$

ในสมการ (2.16) แทนค่า (E_i/δ) จากสูตรสำเร็จของ Peek และ $K/\delta C$ จะได้ค่า E_i/δ ของ
แต่ละค่า r ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 [3]

โดยที่สูตรสำเร็จของ Peek คือ

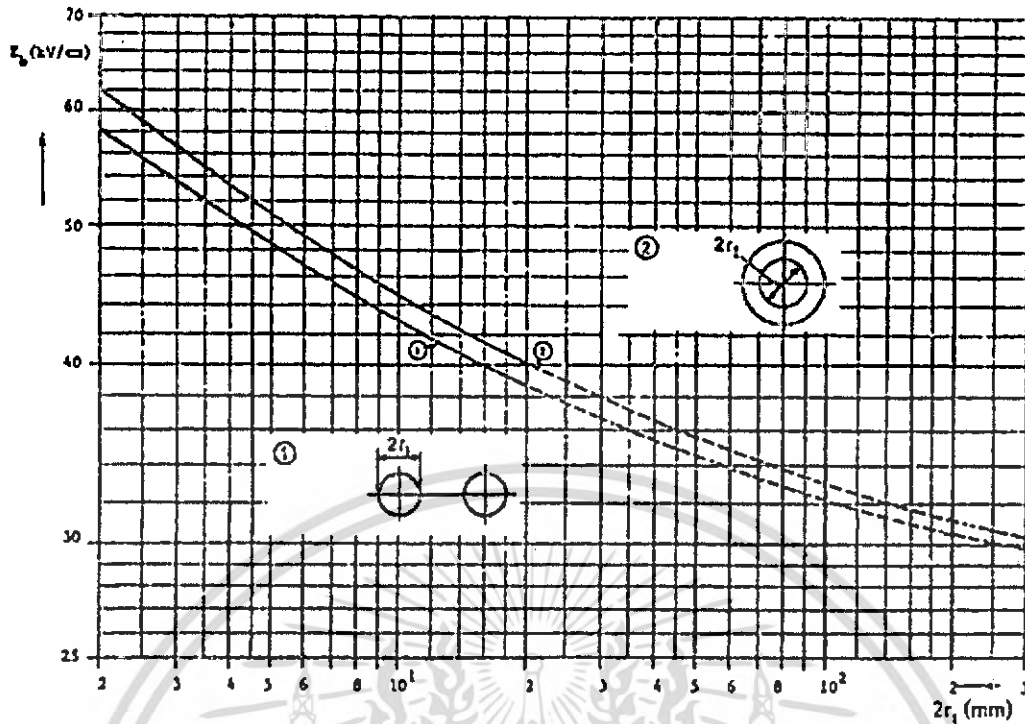
กรณีทรงกระบอกชั้น : $E_i/\delta = 31 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right)$ และ

กรณีทรงกระบอกคู่ขนาน : $E_i/\delta = 30 \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}}\right)$



รูปที่ 2.16 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนซ์ของอากาศในอเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วม[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. 17 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_r ของอากาศในสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกวางคู่ขนาน (1) อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (2) [3]

2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element)

2.10.1 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

ความเป็นมา

เนื่องจากการคำนวณและออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนต้องใช้ความสามารถในการคำนวณและออกแบบสูงและเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก ทำให้เกิดวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้

ในปัจจุบันวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการประยุกต์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสามารถประยุกต์ใช้กับงานหลายๆด้านโดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์ เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น ประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกร นักออกแบบทั่วไป อย่างไรก็ตามผู้ใช้ไฟไนต์ เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

2.10.2 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ (FINITE ELEMENT: FEM) ปัญหาแต่ละปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ เมื่อทำการแก้ปัญหาดังกล่าว ค่าผลเฉลยแม่นยำ (exact solution) ที่ได้ของปัญหานั้นจะประกอบไปด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ ตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นยำจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมาย หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่เป็นจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน จากวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว ทำให้พอทราบว่า ผลเฉลยของแต่ละอิลิเมนต์นั้นจะสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ เพราะฉะนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาอิลิเมนต์ทีละอิลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละอิลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งก็คือปัญหาที่กำลังพิจารณาทั้งหมด จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

2.10.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์อิลิเมนต์

1. รู้จักขอบเขตของงานหรือวัสดุที่จะทำการวิเคราะห์ จากรูปที่ 2.19(ก) [4] คือขอบเขตของงานหรือวัสดุที่จะทำการวิเคราะห์ซึ่งประกอบไปด้วย

1.1 ระบบ คือ ลักษณะทางกายภาพของงานหรือวัสดุที่เราจะนำมาวิเคราะห์ อาจเป็นของแข็ง (SOLIDS), ของเหลว (LIQUIDS), ก๊าซ (GASES), อากาศ (AIR) หรือ ส่วนผสมอันเนื่องมาจากวัสดุสองชนิด

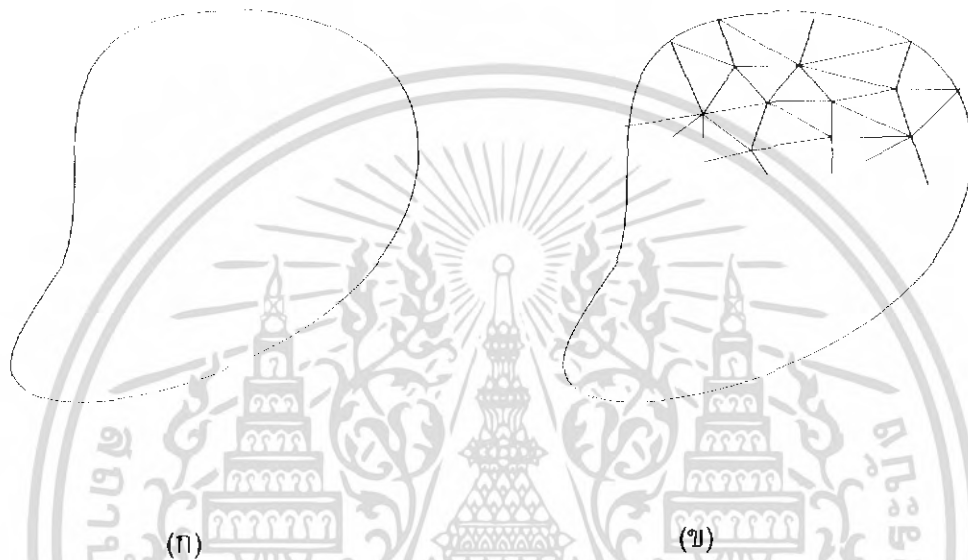
1.2 โดเมน คือตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตของระบบ ส่วนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะของจุดที่ต่างกัน

1.3 สมการบังคับ ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ ในลักษณะต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง อันเกิดจากสมบัติทางกายภาพเช่น มวล โมเมนตัม หรือ พลังงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการด้วย

1.4 เงื่อนไข คือ ข้อกำหนดภายใน จากแรง (force), อุณหภูมิ (temperature), กระแส (current), สนาม (field) และอื่นๆ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนแล้วมีผลกระทบซึ่งกันและกันทั้งสิ้น เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะในระบบ การกระตุ้นจากโหลดภายในขอบเขตที่เกิดขึ้นกับผลกระทบอื่น นั้นเป็นเงื่อนไขที่เราเรียกว่า "boundary condition"

2. ทำการแบ่งขอบเขตงานหรือวัสดุ ออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า "อิลิเมนต์ (element)" ดังรูปที่ 2.19(ข) [3] แล้วทำการพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อย จากจุดที่ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบ Interpolation Function จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูปเมตริกซ์ (Matrix) แล้วพิจารณาหาสัมประสิทธิ์

เมตริกซ์ (Coefficient Matrix) ให้อยู่ในลักษณะของพิกัด (x,y,z) หรือที่เรียกว่า “สัมประสิทธิ์โอบอล (global coefficient)” หลังจากนั้นทำการแทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) หรือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เพราะปัญหาที่สำคัญส่วนมากที่ศึกษาในทางวิศวกรรมจะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆในลักษณะที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เช่น เวลา, ระยะทาง, อุณหภูมิ, ศักย์ไฟฟ้า, สมการและเงื่อนไขที่ต้องการหา จะอยู่ในรูปของ โหนด (x,y) 2 มิติ หากเป็น โหนด (x,y,z) ก็คือ ระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาเราจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง



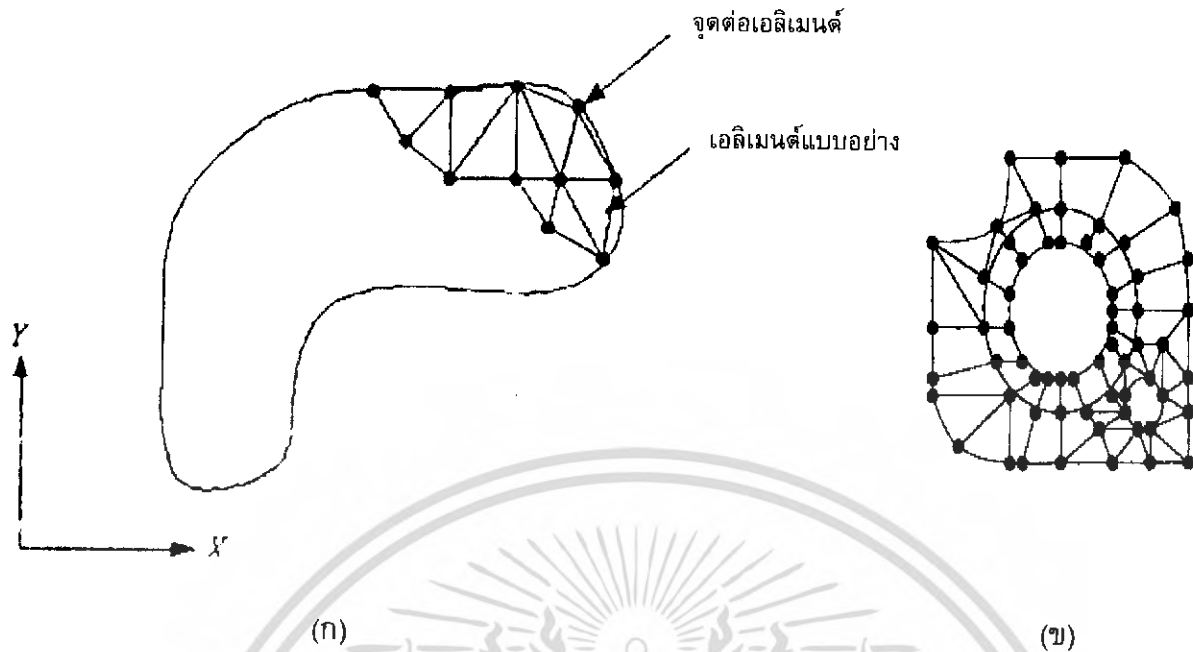
รูปที่ 2.18 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ

(ก) ขอบเขตของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์

(ข) การแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นโครงข่าย (Mesh)

2.10.4 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ประกอบไปด้วยขั้นตอนใหญ่ๆทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ [4]

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นอีลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกัน

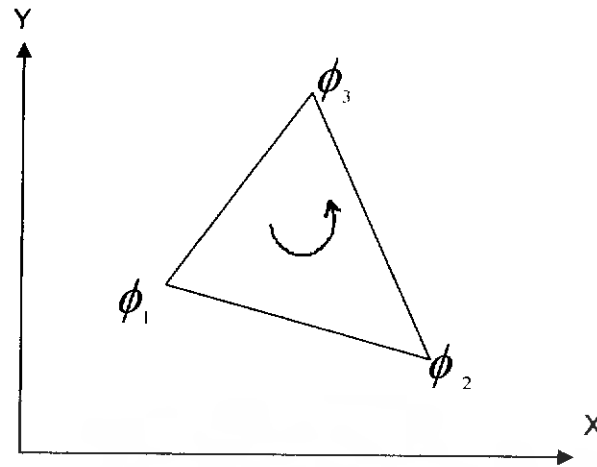


รูปที่ 2.19 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ต่างๆ

(ก) การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย

(ข) การวิเคราะห์หาผลเฉลยด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation function) เนื่องจากในปัจจุบันการประมาณค่าภายในจะนิยมแบบสามเหลี่ยมเป็นเพราะว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจำนวนมากๆสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายและมีข้อดีหลายอย่างเพราะฉะนั้นเวลาวิเคราะห์รูปร่างวัตถุที่ซับซ้อนการเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมจะกระทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.19 [4] เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 โดยจุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของจุดต่อของตัวไม่รู้ค่า (node unknowns) ซึ่งก็คือ ϕ_1, ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้อาจเป็นค่าตัวแปรอะไรก็ได้ที่เราต้องการหา เช่น ต้องการหาคัดดาที่เกิดขึ้น ณ จุดต่อนั้นๆ , หาความหนาแน่นของกระแส , ความเข้มของสนามไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.20 อีลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม: การรอนโหนด ϕ_1 (1) - ϕ_2 (2) - ϕ_3 (3) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนอีลิเมนต์นี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.17)$$

โดยที่ $N_I(x, y)$, $I=1, 2, 3$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ สมการ (2.6) สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}_{(3 \times 1)} \begin{Bmatrix} \phi \end{Bmatrix}_{(3 \times 1)} \quad (2.18)$$

โดยที่ $[N]$ คือ เมตริกซ์ของการประมาณภายในอีลิเมนต์

$\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของอีลิเมนต์นั้น

โดยสัญลักษณ์

$[]$ คือ แสดงถึงเมตริกซ์แถวนอน

$\{ \}$ คือ แสดงถึงเมตริกซ์แถวตั้ง

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการอิลิเมนต์ (Element equation) ดังตัวอย่างเช่น สมการของอิลิเมนต์สามเหลี่ยม อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.19)$$

จากสมการ(2.19) เขียนย่อได้เป็น

$$[k]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.20)$$

ขั้นตอนที่ 3 ถือเป็นหัวใจสำคัญของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ การสร้างสมการของอิลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ (2.20) ปัจจุบันที่นิยม สามารถประมาณได้ 3 วิธีจากสมการ (2.20) [3]

- ก. วิธีการโดยตรง (Direct approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (Variational approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันก่อให้เกิดระบบสมการ (System of simultaneous equation)

$$\Sigma(\text{element equation}) \Rightarrow [k]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.21)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต(Boundary conditions) ลงในสมการที่ (2.21) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่า ซึ่งอาจจะเป็นค่าของศักดา ณ ตำแหน่งบนรูปร่างของปัญหานั้นๆ หรือค่าของสนามไฟฟ้า ณ จุดต่อต่างๆ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าของศักดาไฟฟ้าก็สามารถหาค่าของความเข้มสนามไฟฟ้าได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้งหมด นี้ จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีที่มีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นตอน โดยมีหัวใจสำคัญคือการสร้างสมการของอิลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3

2.10.5 ข้อดีและข้อเสียของไฟไนต์อีลิเมนต์(FEM) [3]

1. สามารถใช้ได้กับรูปทรงได้หลายรูปทรงหรือรูปทรงที่ยุ่งยากโดยใช้การแบ่งเป็นอีลิเมนต์ สามเหลี่ยม 2 มิติ ในการแทนค่าทั้ง ขอบเขต (boundary)
 2. สามารถใช้ได้กับขอบเขตปัญหาทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และแบบไม่เชิงเส้น (Non Linear) ได้
 3. สามารถใช้ได้กับปัญหาที่เป็นสารเนื้อเดียว และสารเนื้อผสม
 4. สามารถใช้กับ Higher-Order Element ได้
 5. สามารถใช้ได้กับปัญหาขอบเขตได้เกือบจะทุกกรณี
- สำหรับข้อเสียนั้นเป็นปัญหาที่ยุ่งยากเกี่ยวกับการแบ่งโครงข่าย (Mesh) ให้มีความถูกต้องและเวลาในการคำนวณจะช้ามากถ้าจำนวนโหนดมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบโคโรนาชิลด์(Corona Shield)

3.1 การออกแบบอิเล็กโทรด

ในการออกแบบอิเล็กโทรดที่จะนำมาทดสอบโคโรนานั้นจำเป็นต้องมีอิเล็กโทรดเพื่อนำมาทดสอบว่าโคโรนาชิลด์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นสามารถลดการเกิดโคโรนาได้หรือไม่ ดังนั้นจึงได้ออกแบบอิเล็กโทรดที่เป็นลักษณะแท่งรีอดปลายตัดวางบนแผ่นตัวนำอลูมิเนียมและรองรับโดยลูกถ้วยที่มีพิกัดแรงดัน 100 kV โดยจะทำการทดลองกับเครื่องตรวจจับ PD DETECTOR DDX9101 พิกัดแรงดันสูงสุด 75 kV



รูปที่ 3.1 ลักษณะมิติของอิเล็กโทรด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

รูปที่ 3.2 อิเล็กโทรด (Electrode with insulation support)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบโคโรนาซีลด์

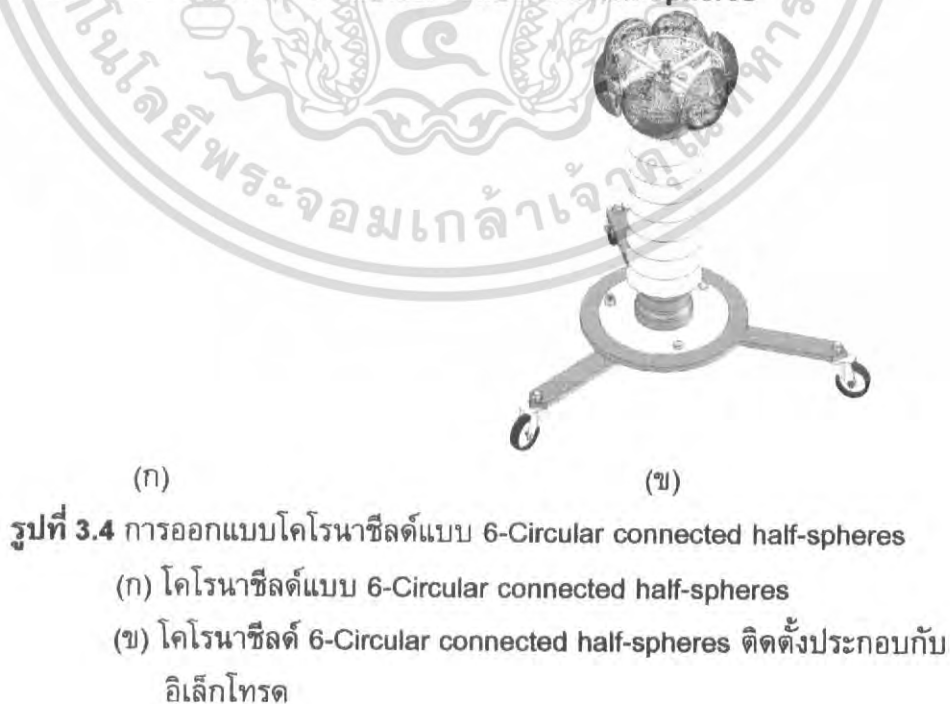
เนื่องจากการออกแบบโคโรนาซีลด์ยังไม่มีสมการรองรับที่แน่นอนดังนั้นจึงรวบรวมรูปแบบโคโรนาซีลด์ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEMLAB จากนั้นก็นำรูปร่างที่ได้ออกแบบไว้มาสร้างโคโรนาซีลด์และทำการทดสอบด้วยเครื่อง PD DETECTORDDX 9101 เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าโคโรนาซีลด์แบบไหนสามารถลดการเกิดโคโรนาได้ดีที่สุด

3.2.1 โคโรนาซีลด์แบบ Steering ring



รูปที่ 3.3 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Steering ring
(ก) โคโรนาซีลด์ Steering ring
(ข) โคโรนาซีลด์ Steering ring ติดตั้งประกอบกับอิเล็กทรอนิกส์

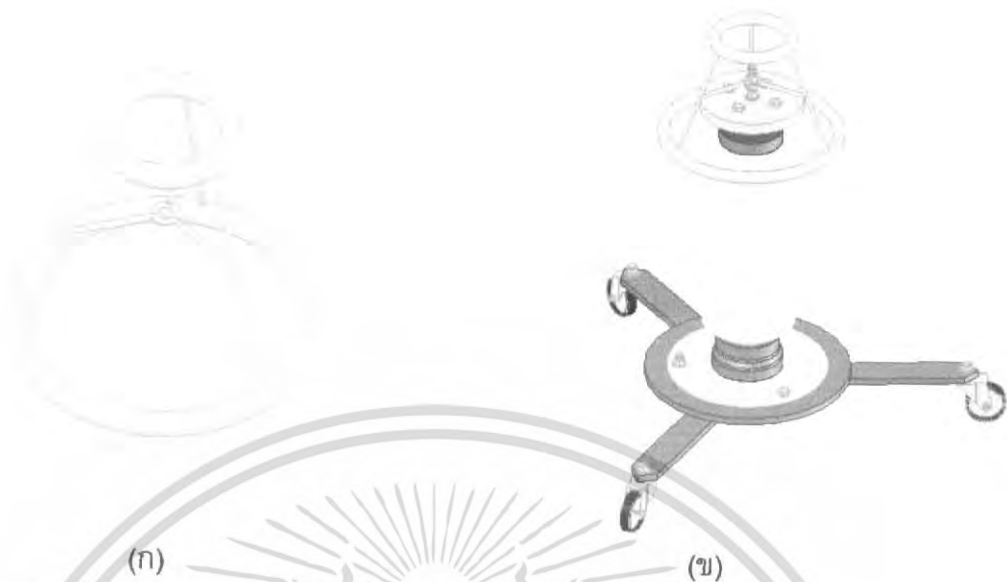
3.2.2 โคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular connected half-spheres



รูปที่ 3.4 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular connected half-spheres
(ก) โคโรนาซีลด์แบบ 6-Circular connected half-spheres
(ข) โคโรนาซีลด์ 6-Circular connected half-spheres ติดตั้งประกอบกับอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 โครนาซีลด์แบบ Topping 2-rings



รูปที่ 3.5 การออกแบบโครนาซีลด์แบบ Topping 2-rings

(ก) โครนาซีลด์แบบ Topping 2-rings

(ข) โครนาซีลด์ Topping 2-rings ติดตั้งประกอบกับอิลเล็กโทรด

3.2.4 โครนาซีลด์แบบ 4-Connected spheres



(ก)

(ข)

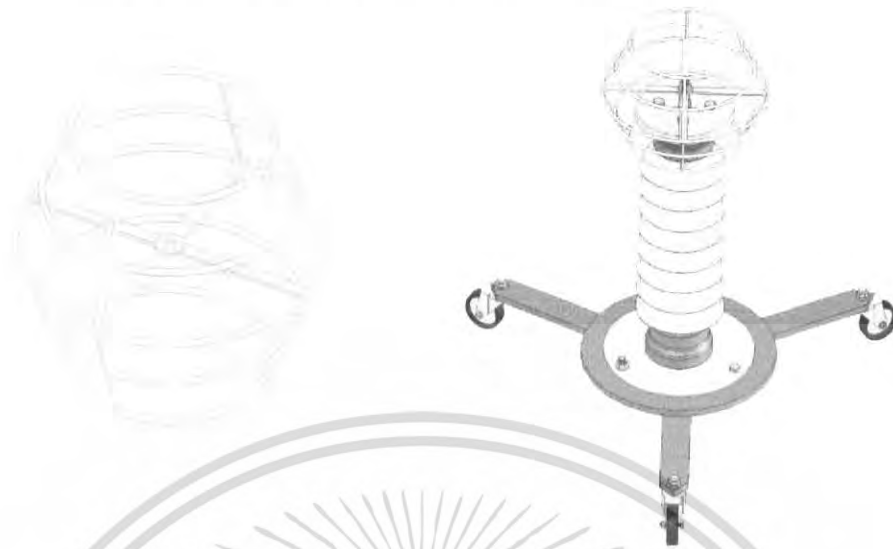
รูปที่ 3.6 การออกแบบโครนาซีลด์แบบ 4-Connected spheres

(ก) โครนาซีลด์แบบ 4-Connected spheres

(ข) โครนาซีลด์แบบ 4-Connected spheres ติดตั้งประกอบกับ
อิลเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 โคโรนาซีลด์แบบ Barrel shape with 5 rings



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.7 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Barrel shape with 5 rings

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ Barrel shape with 5 rings

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ Barrel shape with 5 rings ติดตั้งประกอบกับ อิเล็กโทรด

3.2.6 รูปโคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5-rectangles



(ก)

(ข)

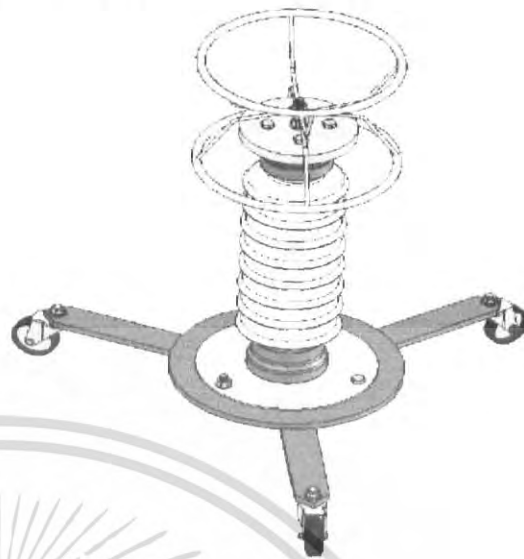
รูปที่ 3.8 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5-rectangles

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5-rectangles

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ Decagon with 5-rectangles ติดตั้งประกอบกับ อิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 รูปโคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ 2-connected symmetrical rings ติดตั้งประกอบกับ
อิเล็กทรอนิกส์

3.2.8 รูปโคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings



(ก)

(ข)

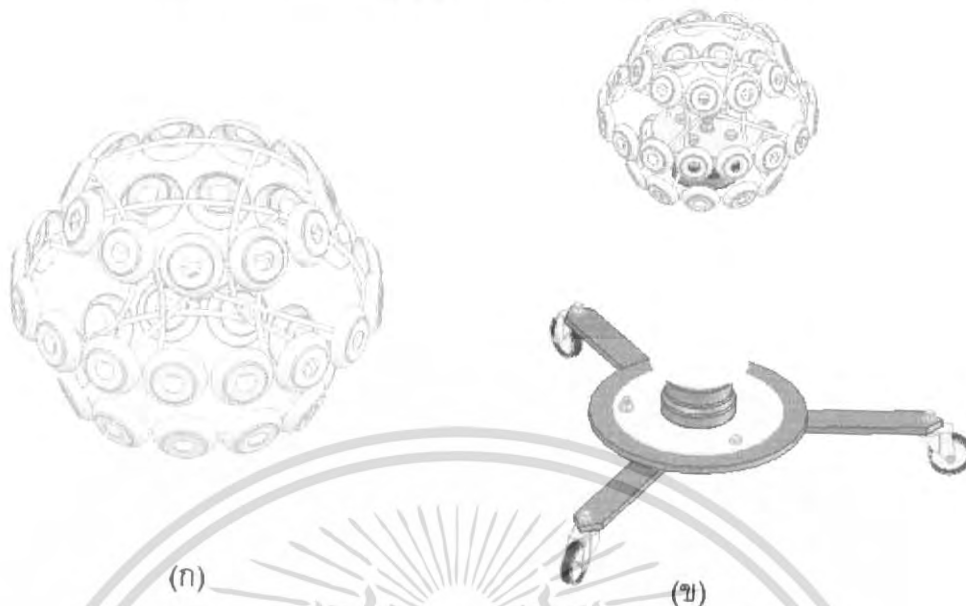
รูปที่ 3.10 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ Drum shape with 2 rings ติดตั้งประกอบกับ
อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.9 รูปโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls

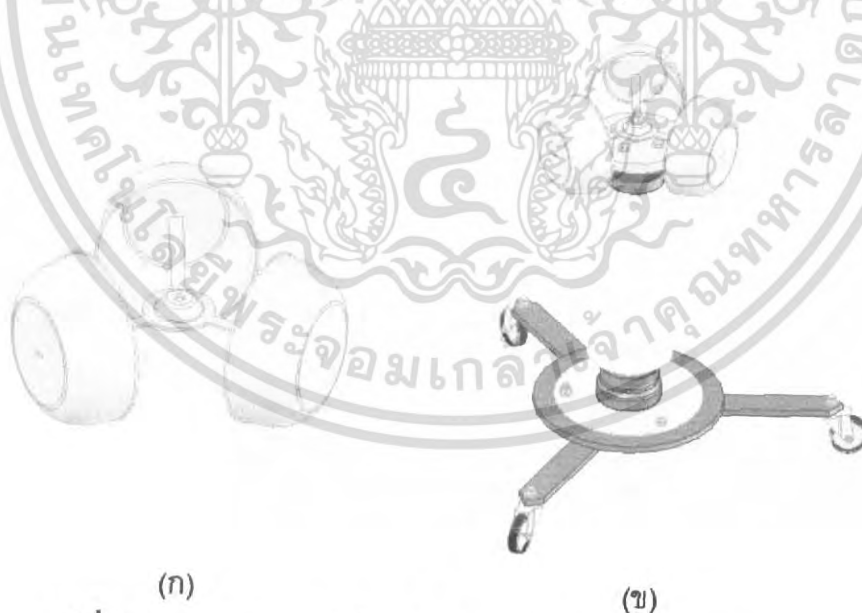


รูปที่ 3.11 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ Spherical connected bowls ติดตั้ง
ประกอบกับอิเล็กทรอนิกส์

3.2.10 รูปโคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls



(ก)

(ข)

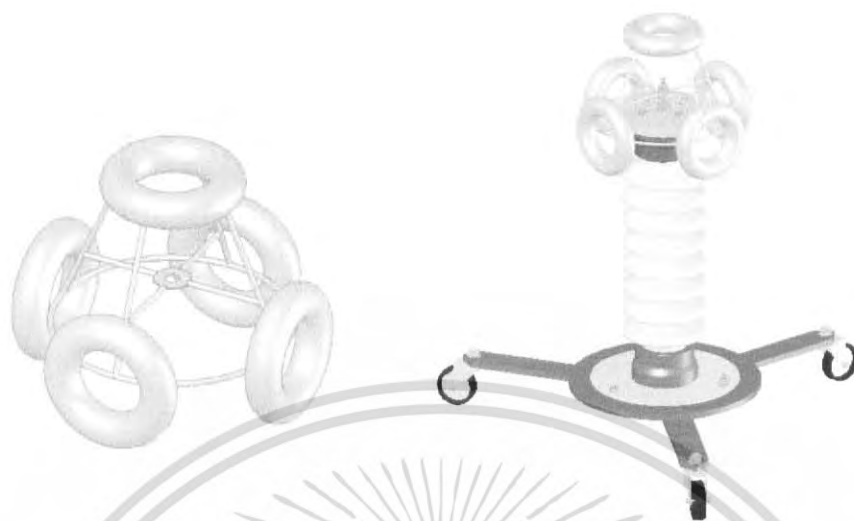
รูปที่ 3.12 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ 3 connected bowls ติดตั้งประกอบกับ
อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.11 รูปโคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 โคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts

(ก) โคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts

(ข) โคโรนาซีลด์แบบ 5 connected donuts ติดตั้งประกอบ
กับอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การออกแบบโคโรนาซิลด์ที่มีรูปแบบมิติแตกต่างกันสำหรับใช้งานที่ระบบแรงดัน 50 kV ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้มีการวิเคราะห์ การออกแบบและทดสอบ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์(Finite element) ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดและโคโรนาซิลด์ แบบต่างๆเพื่อหาโคโรนาซิลด์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามที่ต้องการ การออกแบบจำลองโคโรนาซิลด์ทั้ง 11 รูปแบบ ที่ทดสอบโดยการจำลองการป้อนแรงดันทดสอบที่ 1.1 เท่าของแรงดันใช้งานที่ออกแบบ และจากการทดสอบจริงโดยการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องตรวจจับ PD และกล้องตรวจจับโคโรนา โดยได้ทำการทดสอบซ้ำหลายครั้งในเวลาเดียวกันของแต่ละวันที่ระดับแรงดันทดสอบเดียวกัน พบว่าโคโรนาซิลด์แบบ 5-Connected Donuts สามารถลดการเกิดโคโรนาที่เกิดขึ้นมีขนาดน้อยสุดเมื่อเทียบกับโคโรนาซิลด์แบบอื่นๆ รองลงมา คือ โคโรนาซิลด์แบบ 3-Connected Bowls,แบบ Spherical Connected Bowls,แบบ Drum Shape With 2 Rings,แบบ 2-Connected Symmetrical Rings,แบบ Decagon With 5-rectangles,แบบ Barrel Shape With 5-Rings,แบบ 4-Connected Spheres, แบบ Topping 2-Rings ,แบบ6-Circular Connected Half-Spheres ,แบบ Corona Steering Rings ตามลำดับ ซึ่งทั้งจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมและทดสอบจริงให้ผลสอดคล้องกัน และเมื่อเปรียบเทียบการออกแบบสร้าง, ค่าใช้จ่ายของการสร้างโคโรนาซิลด์เปรียบเทียบกับการนำไปใช้ประโยชน์ พบว่ารูปแบบโคโรนาซิลด์แบบ 3-Connected Bowls สามารถลดการเกิดโคโรนาได้ดีเมื่อเทียบกับแบบอื่นและค่าใช้จ่ายในการสร้างไม่แพงจนเกินไป โดยใช้วัสดุที่หาง่าย ออกแบบสร้างได้ง่ายและเหมาะสมกับการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 50kV จากการทดสอบนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบสร้างโคโรนาซิลด์และการผลิตโคโรนาซิลด์ต่อไปได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ

ในการออกแบบโคโรนาซิลด์ให้เหมาะกับการใช้งานในระดับแรงดันที่ต้องการได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยการทดลองซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้โคโรนาซิลด์ที่เหมาะสมในการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรินทร์ กาญจนานนท์และคณะ,"การสำรวจและวิเคราะห์ปรากฏการณ์โคโรนา ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV", **ปริญญาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 1-85.
- [2] **Electrical Power Engineering Laboratory II**.ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์ - มหาวิทยาลัย,2547
- [4] คมสัน เพ็ชรวิทย์,"เรื่องการคำนวณหาสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแรงสูงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529, หน้า1-128.
- [5] ตราวุฒิ คลีสุวรรณ, **การเกิดเบรคดาวน์ในสายเคเบิล โพลีเมอร์เนื่องจากประจุค้างและวอร์เตอร์ทรี**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] คงศักดิ์ หล่อรุ่งโรจน์," การศึกษาและการจำลองสนามไฟฟ้าเพื่อหามิติของว่างทรงกลมมาตรฐานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544, หน้า 1-76.
- [7] ณรงค์ เหมกรณ์, **แม่เหล็กไฟฟ้า ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์**, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. **เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา High Voltage Engineering** .ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element)

1. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและออกแบบ

โครงการนี้เป็นโครงการเพื่อศึกษาและออกแบบโคโรนาชิลด์ (corona shield) เพื่อนำไปลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณจุดต่อแรงสูง โดยทำการศึกษารูปแบบและออกแบบโคโรนาชิลด์ (corona shield) ที่สามารถทำการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าให้ได้มากที่สุดเพื่อที่จะลดการเกิดโคโรนา (corona) ดังนี้เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและงบประมาณในการคิดรูปแบบและสร้างจริงเพื่อทำการทดสอบว่าได้ผลหรือไม่ จึงมีการนำโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) เพื่อทำการวิเคราะห์ผล จะช่วยให้สามารถประหยัดเวลาและงบประมาณในการศึกษาและออกแบบและยังสามารถออกแบบได้หลากหลายมากด้วย โดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและจุดที่เกิดความเครียดสูงสุดรวมถึงการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้า จึงทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบโดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้านี้มีสองโปรแกรม และมีอีกหนึ่งโปรแกรมที่เป็นที่ยอมรับและเชื่อถือของนักวิชาการทั่วไปเพื่อนำมาเป็นตัวยืนยันว่าโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ทั้งสองโปรแกรมนั้นมีความถูกต้อง โดยจะใช้ตรวจสอบสองทางคือการตรวจสอบด้วยโปรแกรมที่ยอมรับและจากการคำนวณด้วยมือ นอกจากนั้นยังมีโปรแกรมอีกสองตัวที่นำมาช่วยในการศึกษาโดยเนื่องจากที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะมีข้อจำกัดในการออกแบบรูปทรงต่างๆที่ไม่สามารถทำได้จึงต้องมีโปรแกรมเพื่อนำมาช่วยในการวาดรูป ออกแบบโคโรนาชิลด์ (corona shield)

ดังนั้นสรุปว่าโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและออกแบบโคโรนา (corona shield) นั้นมีทั้งหมด 5 โปรแกรมแบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

1. โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) มี 2 โปรแกรมคือ



โปรแกรม FEMLAB version 3.1



โปรแกรม MAXWELL ANSOFT version 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมที่ได้รับการยอมรับนำมาใช้ตรวจสอบและเปรียบเทียบเพื่อยืนยันว่าโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์นั้นถูกต้อง

-  โปรแกรม MATLAB version 7

3. โปรแกรมที่ใช้ช่วยวาดรูปและออกแบบรูปทรงของโคโรนาชิลด์ (corona shield)

-  AutoCAD 2004.Ink โปรแกรม AUTOCAD version 2004

- โปรแกรม SOLIDWORK version 2004

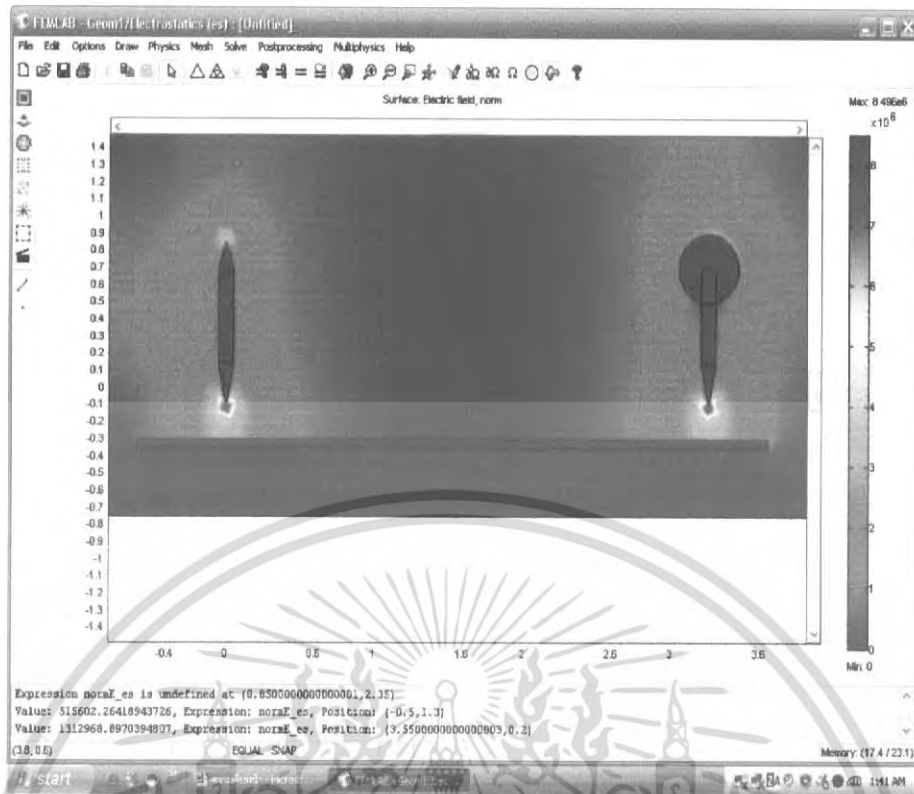
2. ตัวอย่างการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element)

2.1 เป็นการวิเคราะห์โดย FEMLAB



รูปที่ ผ.ภ.1 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทรงกลมและอิเล็กโทรดระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.2 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมและอิเล็กโทรดระนาบ

2.2 วิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSOFT

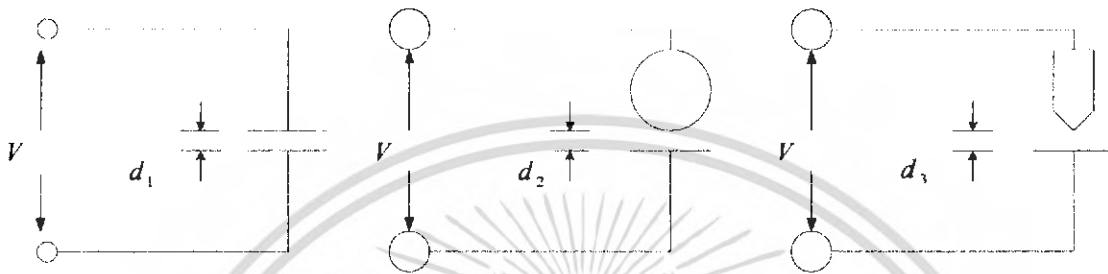


รูปที่ ผ.ก.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยโปรแกรม ANSOFT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำรูปทรงต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม FEMLAB

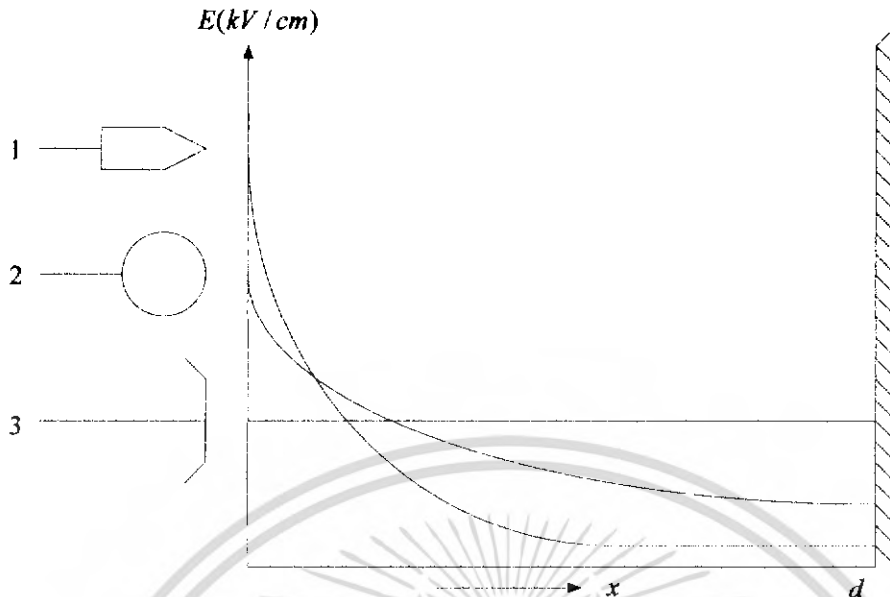
โปรแกรมจะทำการ วิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าชนิดของอิเล็กโทรด (Electrode type) แบบต่าง ๆ ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูป แบบต่างกันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ Dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือ ให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย ในรูปที่ ก.4 เป็นลักษณะของอิเล็กโทรด (electrode) แบบต่าง ๆ



รูปที่ ผ.ก.4 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

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

ในรูปที่ ก.4 แม้ว่าค่าของ d_1 , d_2 และ d_3 จะเท่ากันก็ตามแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน (Breakdown) จะไม่เท่ากัน เพราะฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นกับแฟคเตอร์ต่าง ๆ หลายประการ ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ



รูปที่ ผ.ก.5 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิลเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ

ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ดังรูป โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะแตกต่างกันตามสีที่แสดงไว้ขวามือ

1. อิลเล็กโทรดทรงกลม

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ

1. อิลเล็กโทรดทรงกลมต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

มีค่าแรงดัน(V) = 100 V

$$\epsilon_r = 1$$

$$\sigma = 3.774 \times 10^7$$

2. อิลเล็กโทรดระนาบต่ออยู่ทางด้านกราวด์

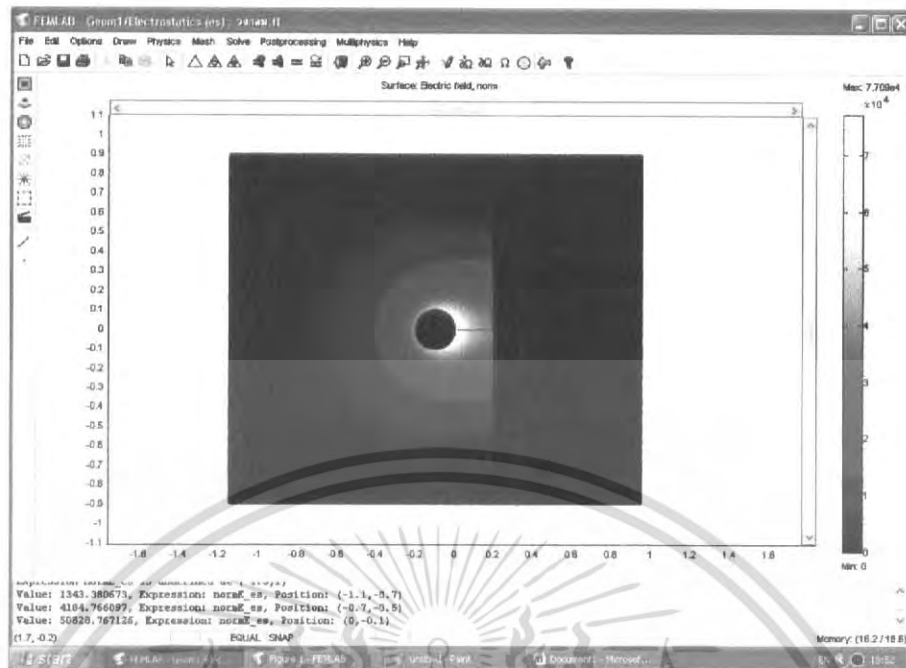
มีค่าศักดาไฟฟ้า = 0 V

$$\epsilon_r = 1$$

$$\sigma = 3.774 \times 10^7$$

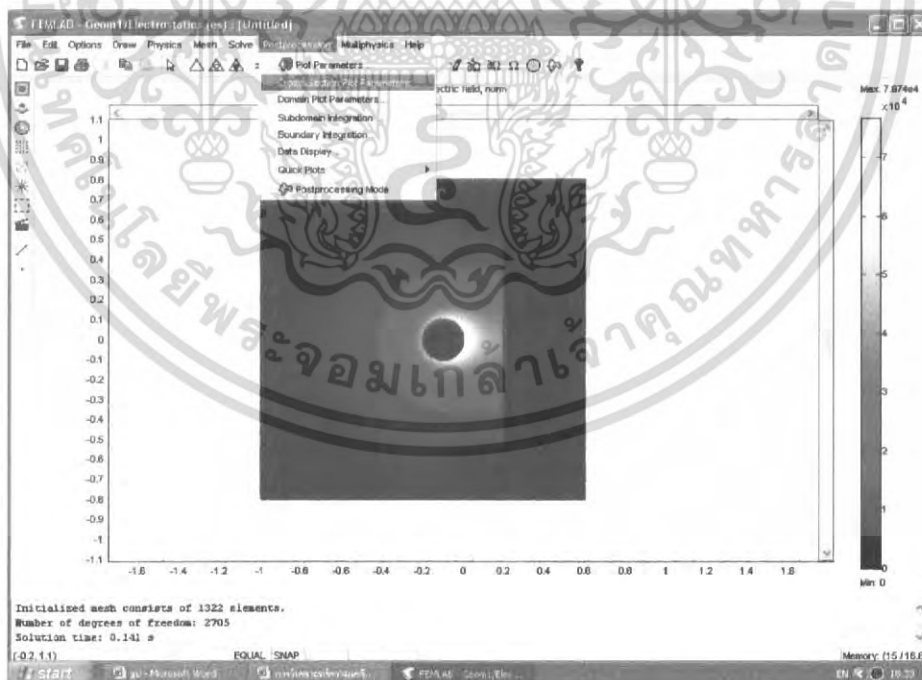
3. ระยะห่างระหว่างอิลเล็กโทรด 0.2 m

ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ ผ.ก.6 ความเข้มสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทรงกลม

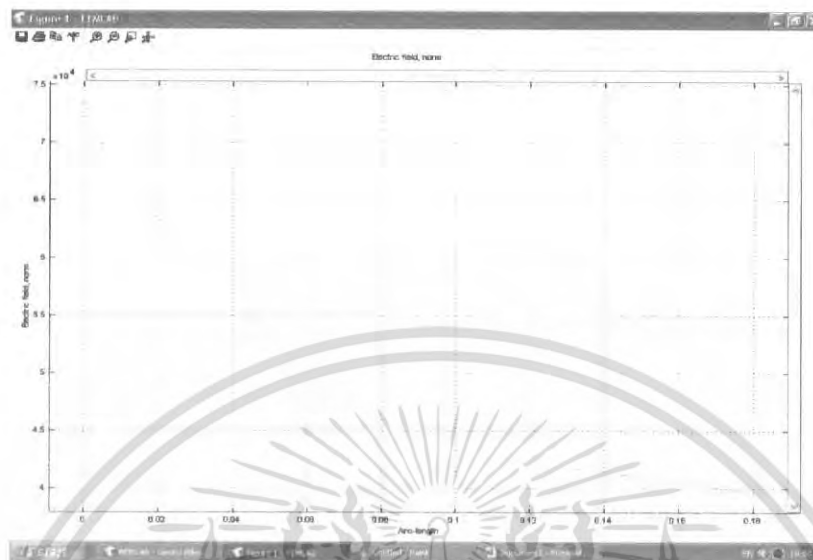
ทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าโดยเราจะวัดจากผิวอิเล็กโทรดทรงกลม



รูปที่ ผ.ก.7 ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทรงกลมกับอิเล็กโทรดระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจะทำการ Plot กราฟออกมาโดยแกน y เป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและแกน x เป็นระยะห่างจากผิวอิเล็กโทรดถึงอิเล็กโทรดระนาบแผ่นกราวด์ดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ผ.ก.8 ความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะห่างจากผิวอิเล็กโทรดทรงกลมถึงอิเล็กโทรดระนาบแผ่นกราวด์

2. อิเล็กโทรดแท่งปลายแหลม

เมื่อเราทำการวิเคราะห์ที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดปลายแหลมและอิเล็กโทรดแผ่นระนาบจะได้ผลดังนี้

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ

1. อิเล็กโทรดปลายแหลมต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

$$\text{มีค่าแรงดัน (V)} = 100 \text{ V}$$

$$\epsilon_r = 1$$

$$\sigma = 3.774 \times 10^7$$

2. อิเล็กโทรดระนาบต่ออยู่ทางด้านกราวด์

$$\text{มีค่าศักดาไฟฟ้า} = 0 \text{ V}$$

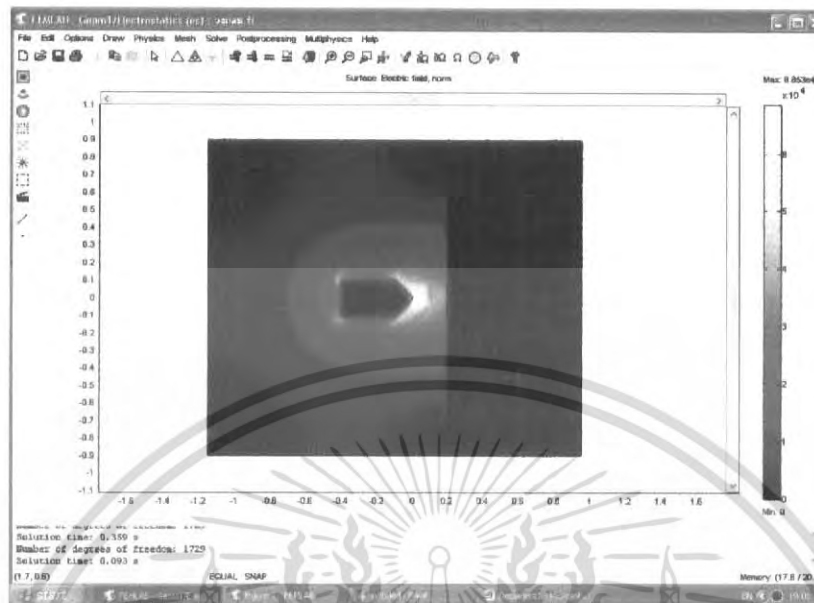
$$\epsilon_r = 1$$

$$\sigma = 3.774 \times 10^7$$

3. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด = 0.2 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

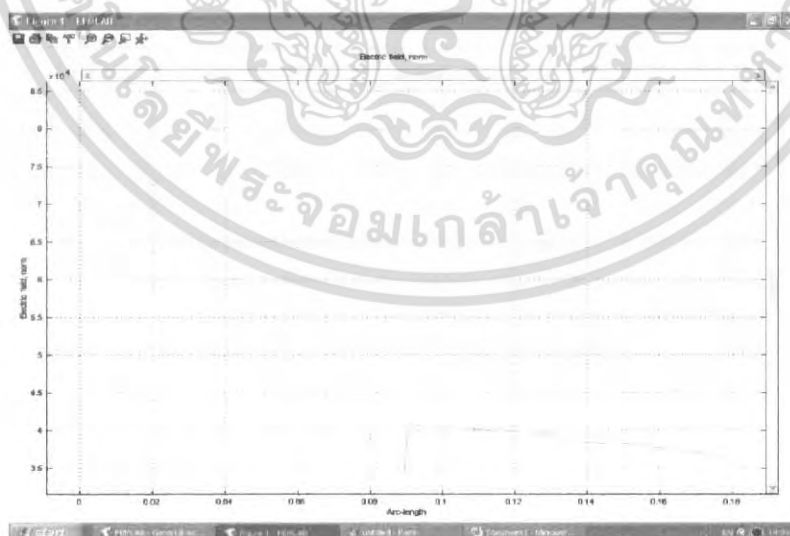


รูปที่ ผ.ก.9 ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับอิเล็กโทรด

ระนาบ

ความเข้มสนามไฟฟ้า

อิเล็กโทรดปลายแหลม-อิเล็กโทรดระนาบ



รูปที่ ผ.ก.10 ความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะห่างจากอิเล็กโทรดปลายแหลมถึงอิเล็กโทรด

ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อิเล็กโทรดระนาบ

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดระนาบและอิเล็กโทรดระนาบจะได้ผลดังนี้

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ

1. อิเล็กโทรดระนาบต่ออยู่ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

$$\text{มีค่าแรงดัน}(V) = 100 \text{ V}$$

$$\epsilon_r = 1$$

$$\sigma = 3.774 \times 10^7$$

2. อิเล็กโทรดระนาบต่ออยู่ทางด้านกราวด์

$$\text{มีค่าศักดาไฟฟ้า} = 0 \text{ V}$$

$$\epsilon_r = 1$$

$$\sigma = 3.774 \times 10^7$$

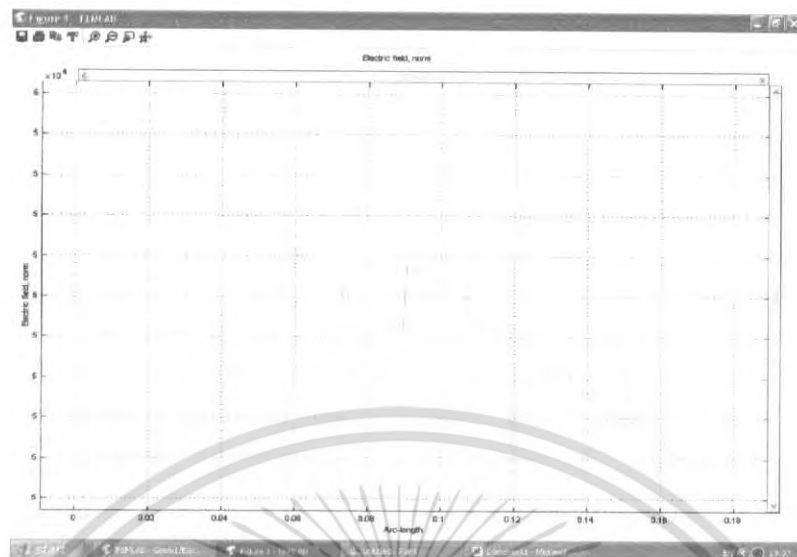
3. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด = 0.2 เมตร



รูปที่ ผ.ก.11 ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดระนาบกับอิเล็กโทรดระนาบ

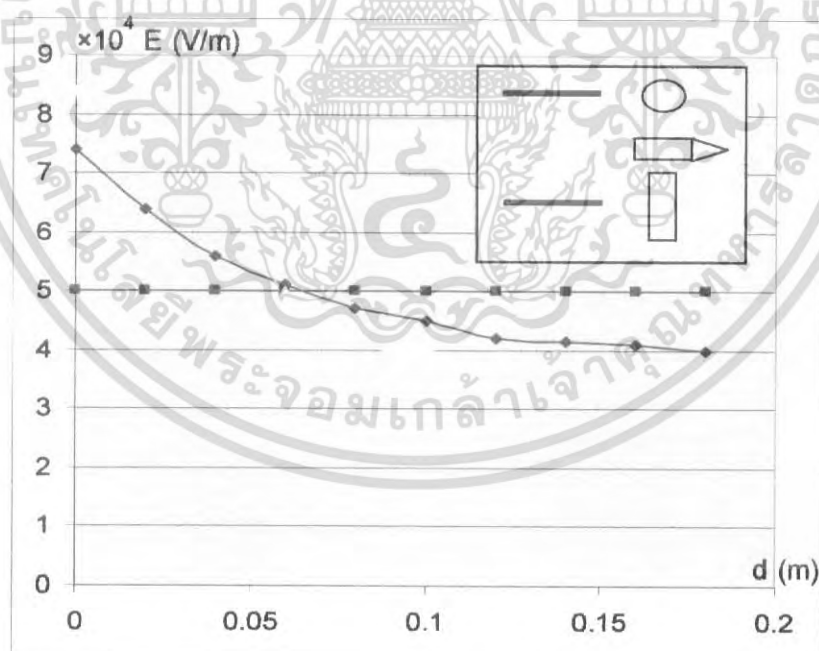
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดระนาบกับอิเล็กโทรดระนาบ



รูปที่ ผ.ก.12 ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดระนาบกับอิเล็กโทรดระนาบ

เปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบปรากฏ
ว่าได้ผลตรงตามทฤษฎีดังกราฟ



รูปที่ ผ.ก.13 เปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ

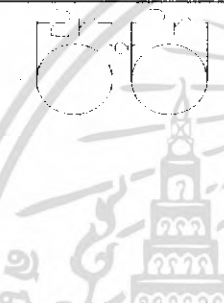
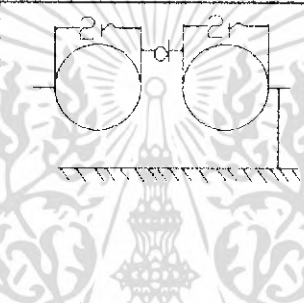


ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของอากาศและค่าสนามไฟฟ้าของ
อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยมีระยะแกป (d) 0.5 เซนติเมตร และมี
เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 12.5 เซนติเมตรทั้งสองลูก

เนื่องจากอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลมจะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกือบ
สม่ำเสมอค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าเกือบเท่ากับ 1 แต่เราสามารถหาค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า
ได้จากตารางที่ ข.1 [2]

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าแฟกเตอร์ (η') ของทรงกลมจัดวางรูปแบบต่างๆในเทอมของค่าเชิง
เรขาคณิต p และ q

				
p	q = 1	q = 1	q = ∞	q = p
1.0	1.000	1.000	1.000	1.000
1.5	0.850	0.834	0.732	0.667
2.0	0.732	0.660	0.563	0.500
3.0	0.563	0.428	0.372	0.333
4.0	0.449	0.308	0.276	0.250
5.0	0.372	0.238	0.218	0.200
6.0	0.318	0.193	0.179	0.167
7.0	0.276	0.163	0.152	0.143
8.0	0.244	0.140	0.133	0.125
9.0	0.228	0.123	0.117	0.111
10.0	0.197	-	0.105	0.100
15.0	0.133	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ตารางแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (η^*)

ทำการหาค่าเชิงเรขาคณิต p และ q จากสมการ (ข.1) และ(ข.2)

$$P = 1 + \frac{d}{r} \quad (\text{ข.1})$$

และ

$$q = \frac{R}{r} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ d คือ ระยะแถบ

r คือ รัศมีของอิเล็กโทรดที่เล็กกว่า

R คือ รัศมีของอิเล็กโทรดที่ใหญ่กว่า

จากค่าที่กำหนด $d = 0.5 \text{ cm}$, $R = r = D/2 = 6.25 \text{ cm}$ แทนในสมการที่ (ข.1) และ (ข.2)

$$P = 1 + \frac{0.5}{6.25} = 1.08$$

$$q = \frac{6.25}{6.25} = 1$$

เนื่องจากรูปแบบที่ทำการหาเป็นอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน โดยประกอบด้วยทรงกลมด้านแรงสูงและทรงกลมด้านแรงต่ำต่อดิน จึงทำการพิจารณาค่าแฟกเตอร์ (η^*) บนคอสม์ที่ 2 โดยที่ $q = 1$ และตำแหน่งแถว $p = 1.08$ เนื่องจากแถว $p = 1.08$ ไม่มีในตารางที่ ข.1 จึงทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์หาค่าแฟกเตอร์ (η^*) ดังนี้

ที่ $p = (1-1.5)$ มีค่าแฟกเตอร์ (η^*) เท่ากับ $(1-0.834)$

ที่ $p = (1-1.08)$ มีค่าแฟกเตอร์ (η^*) เท่ากับ $\frac{(1-0.834) \times (1-1.08)}{(1-1.5)} = 0.02656$

เพราะฉะนั้นค่า แฟกเตอร์ (η^*) ที่ถูกต้อง = $1 - 0.02656 = 0.97344$

$$\eta^* = 0.97344$$

จาก

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}}$$

$$E_{av} = \eta^* \cdot E_{max} \quad (\text{ข.3})$$

เนื่องจาก E_{max} ในที่นี้คือค่า E_c ของอากาศซึ่งค่า E_c ของอากาศ = 24.4 kV/cm แทนค่าลงในสมการที่ (ข.3) จะได้ว่า

$$E_{av} = 0.97344 \times 24.4$$

$$E_{av} = 23.752 \text{ kV/cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม มีลักษณะของสนามไฟฟ้าเกือบสม่ำเสมอจะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าเป็น

$$E = \frac{U}{d}$$

ดังนั้น

$$E_{av} = \frac{U_{rms}}{d}$$

$$U_{rms} = E_{av} \cdot d \quad (ข.4)$$

แทนค่า $E_{av} = 23.752 \text{ kV/cm}$ และ $d = 0.5 \text{ cm}$ ลงในสมการ (ข.4)

$$\begin{aligned} \text{ได้ว่า} \quad U_{rms} &= 23.752 \times 0.5 \\ &= 11.876 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\text{จาก} \quad U_b = U_{peak} = \sqrt{2} U_{rms}$$

$$\begin{aligned} \text{ได้ว่า} \quad U_b &= \sqrt{2} \times (11.876) \\ U_b &= 16.795 \text{ kV} \end{aligned}$$

ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์หาได้จาก

$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \quad (ข.5)$$

แทนค่า $d = 0.5$ ลงในสมการ (ข.5)

$$\begin{aligned} \text{ได้ว่า} \quad E_b &= 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{0.5}} \\ E_b &= 33.904 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

เมื่อ E_{av} คือ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ย

E_c คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต

U_{rms} คือ แรงดัน rms

U_{peak} คือ แรงดันค่ายอด

U_b คือ แรงดันเบรกดาวน์

E_b คือ ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์

ค่าแฟกเตอร์ (η'), ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์และค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศที่ระยะแกปต่างๆของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 12.5 เซนติเมตรที่ได้จากการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าแฟกเตอร์ (η'), ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์และค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศที่ระยะแก๊ปต่างๆของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 12.5 เซนติเมตร ที่ได้จากการคำนวณ

ระยะแก๊ป (d) (cm)	ค่าแฟกเตอร์ (η')	ค่าสนามไฟฟ้า เบรกดาวน์ (E_b) (kV/cm)	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ (U_b) (kV)
0.1	0.995	45.650	3.432
0.2	0.989	39.426	6.828
0.3	0.984	36.669	10.187
0.4	0.979	35.025	13.509
0.5	0.973	33.901	16.795
0.6	0.968	33.075	20.044
0.7	0.963	32.432	23.257
0.8	0.958	31.913	26.432
0.9	0.952	31.484	29.571
1.0	0.947	31.120	32.674
1.2	0.936	30.534	38.769
1.4	0.926	30.079	44.717
1.6	0.915	29.713	50.518
1.8	0.904	29.409	56.173
2.0	0.894	29.152	61.682
2.2	0.883	28.931	67.043
2.4	0.873	28.738	72.258
2.6	0.862	28.568	77.326
2.8	0.851	28.416	82.248
3.0	0.841	28.280	87.023
3.5	0.813	27.992	98.204
4.0	0.785	27.760	108.390
4.5	0.757	27.568	117.616
5.0	0.730	27.405	125.881
5.5	0.702	27.265	133.185
6	0.674	27.143	139.529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม
เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 12.5 เซนติเมตร ที่ได้จากการคำนวณกับค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่าง
ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 12.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน IEC-52 : 1960 ดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 แรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่างทรงกลมจากตารางที่ 1 ของ IEC-52 : 1960

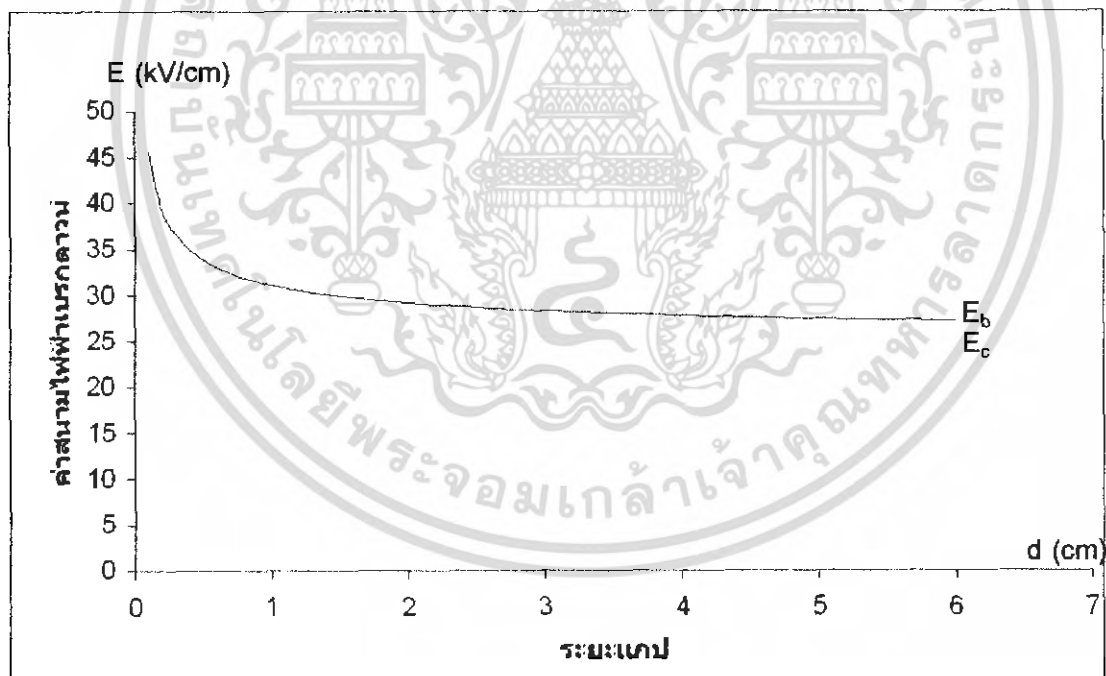
Gap, cm	Sphere diameter, cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.5	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.3	11.2	11.2										
0.4	14.4	14.3	14.2									
0.5	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.6	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.7	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.8	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.9	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2		37.8	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4		42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.5		45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.6		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.8		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.0		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.2		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6			72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8			76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0			79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5				95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0				105	108	110	112	112	112	112		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5				115	119	122	125	125	125	125		
5.0				123	129	133	137	138	138	138	138	
5.5					138	143	149	151	151	151	151	
6.0					146	152	161	164	164	164	164	
6.5						161	173	177	177	177	177	
7.0						169	184	189	190	190	190	
7.5							195	202	203	203	203	
8.0							206	214	215	215	215	
9.0							226	239	240	241	241	

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าแรงดันเบรกดาวน์ของช่องว่างทรงกลมตามมาตรฐาน IEC-52 : 1960 ว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ ข.2 สามารถนำมาพล็อตรูปการกระจายสนามไฟฟ้าได้ดังรูป ข.1



รูปที่ ข.1 การกระจายสนามไฟฟ้าที่ระยะแกปต่างๆ

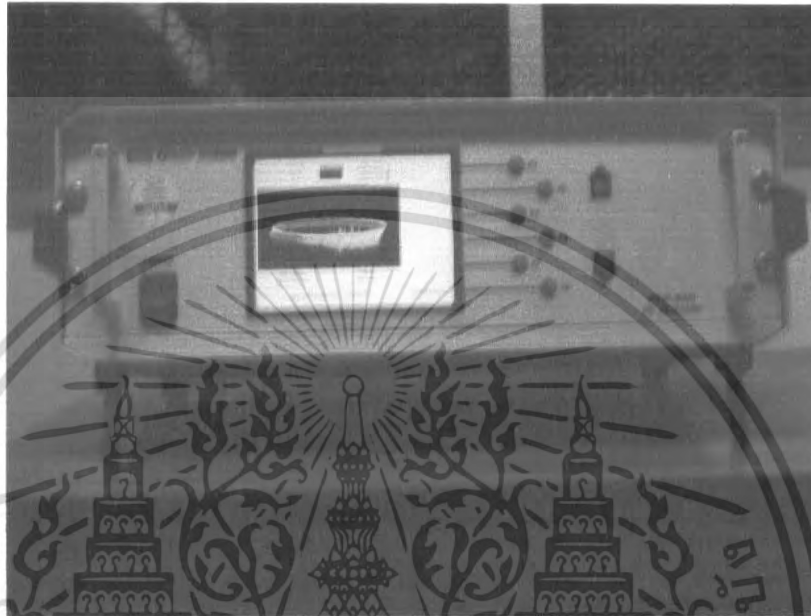
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการเปรียบเทียบ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบ

1.1 เครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101 ใช้สำหรับทดสอบการเกิดดิสชาร์จ
บางส่วน



รูปที่ ผ.ค.1 เครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101

1.2 COMPUTER ที่ใช้แสดงผล



รูปที่ ผ.ค.2 COMPUTER ที่ใช้แสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ตัวเก็บประจุปรับค่าได้มีค่า $1\text{nF} - 1000\text{nF}$ ใช้ในการปรับเทียบแรงดัน



รูปที่ ผ.ค.3 ตัวเก็บประจุ (C) ปรับค่าได้มีค่า $2\text{pF} - 2000\text{pF}$

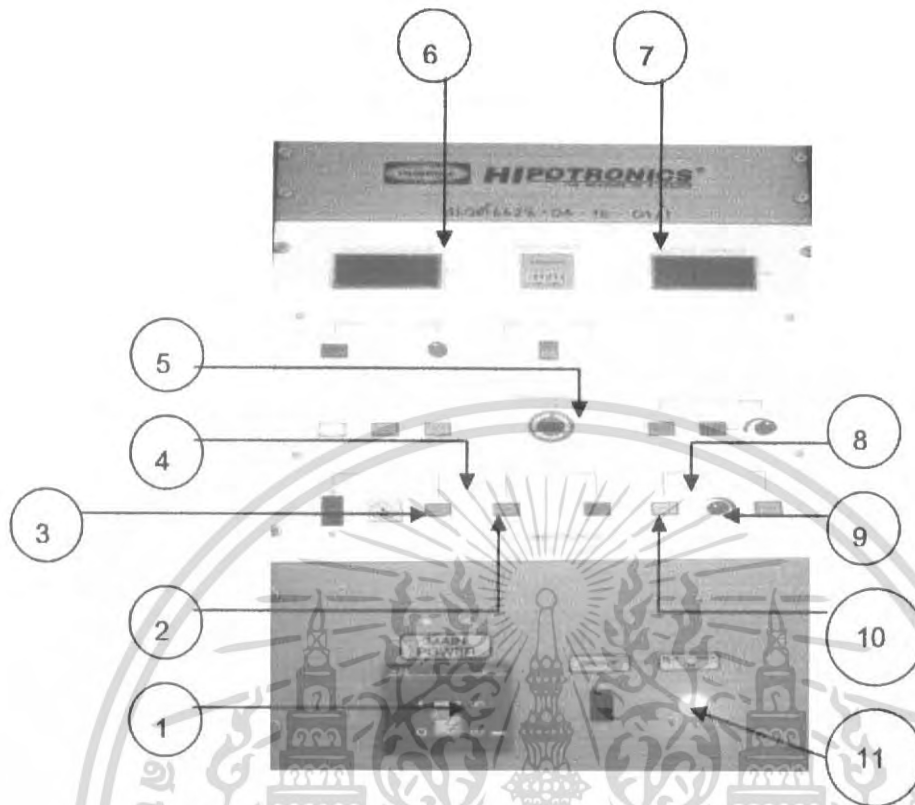
1.4 ตัวเก็บประจุค่าคงที่มีค่า 100pF (ใช้ในการปรับเทียบแรงดัน)



รูปที่ ผ.ค.4 ตัวเก็บประจุ(C) ค่าคงที่มีค่า 100pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันทดสอบ



รูปที่ ผ.ค.5 ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันทดสอบ

หมายเลขแสดงอุปกรณ์ควบคุมตู้จ่ายแรงดันไฟฟ้า

1. MAIN POWER
2. หลอดไฟสีเขียวแสดงว่ามีแรงดันแล้ว
3. สวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์
4. สวิตกัญแจ
5. สวิต EMERGENCY
6. หน้าจอแสดงแรงดัน
7. หน้าจอแสดงกระแสไฟฟ้า
8. สวิต RATE OF RISE
9. สวิตที่ควบคุมการขึ้นของแรงดัน
10. สวิตที่ควบคุมการลงของแรงดัน
11. หลอดไฟสีเขียวแสดงว่ามีแรงดันแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ค.6 การจ่ายแรงดันทดสอบ

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการเกิดโคโรนา



รูปที่ ผ.ค.7 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการเกิดโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.1 กล้องตรวจจับโคโรนา (Ofil Ltd.UV Bandpass Technologies SN 74 ,Ofil DAYCORIITM)



รูปที่ ผ.ค.8 กล้องตรวจจับโคโรนา

1.6.2 กล้องวิดีโอในการบันทึกภาพ (Sony Model No.DCR-IP45E Dijital Video Camera Recorder 1343268 -7.2 V sony corporation 3-076-007-01)

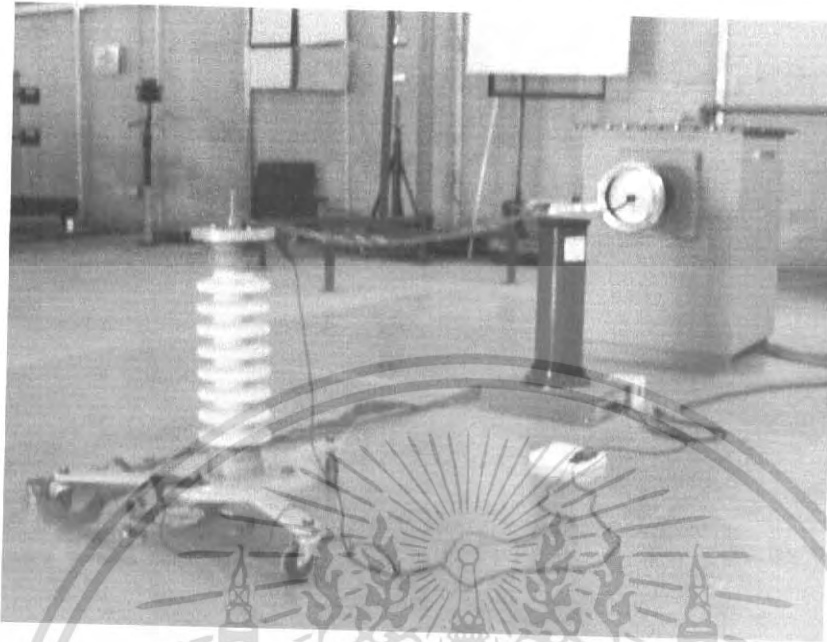


รูปที่ ผ.ค.9 กล้องวิดีโอในการบันทึกภาพการเกิดโคโรนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการปรับเทียบ

2.1 วงจรการปรับเทียบแสดงดังรูปที่ ผ.ค.7



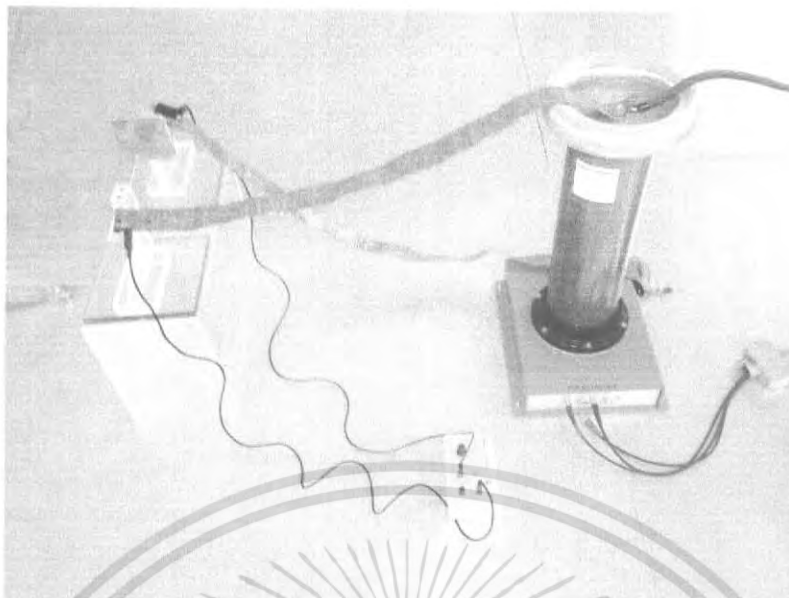
รูปที่ ผ.ค.10 วงจรการปรับเทียบ

2.2 รูปวงจรที่ต่อ C Calibrate ทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ ผ.ค.8 และ รูปที่ ผ.ค.9



รูปที่ ผ.ค.11 การต่อวงจรแบบค่า C ค่าคงที่มีค่า 100 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

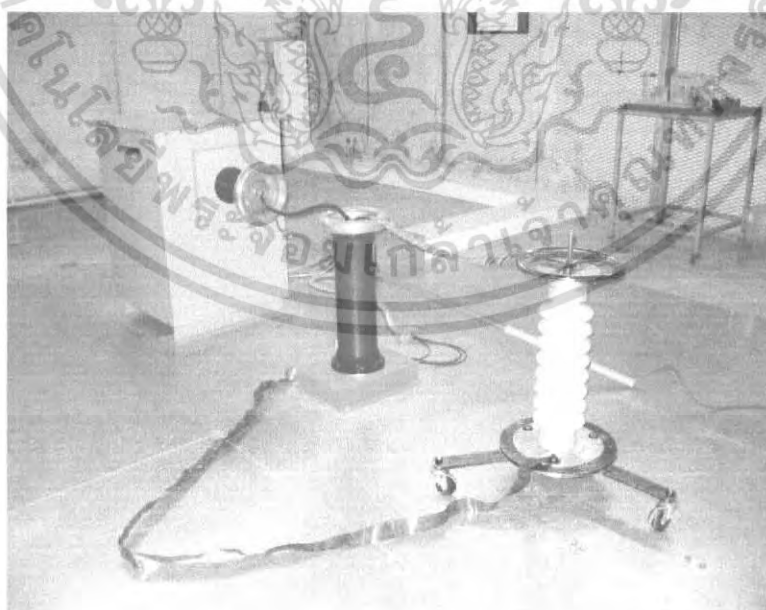


รูปที่ ผ.ค.12 การต่อวงจรแบบค่า C ปรับค่าได้ (C ปรับค่าได้มีค่า $1\text{nF} - 1000\text{ nF}$)

เมื่อทำการปรับเทียบเสร็จแล้วก่อนการทำการทดลองจะต้องนำ C Calibration ออกจากวงจรทดสอบทุกครั้ง

3. การทดสอบการเกิดโครนาดิสชาร์จของโครนาซิลด์ด้วยเครื่องตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD DETECTOR DDX - 9101)

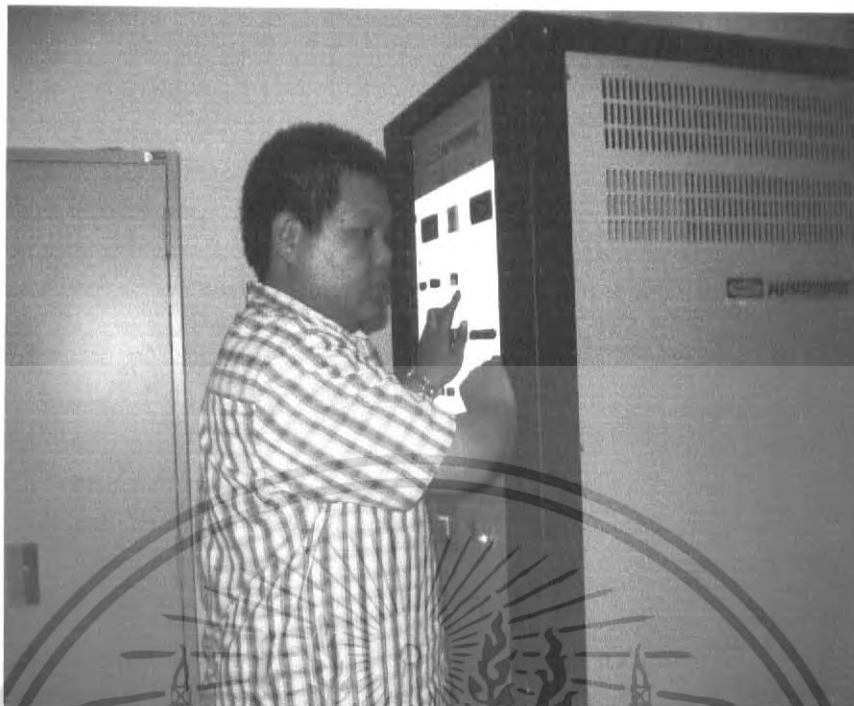
3.1 การต่อวงจรทดสอบที่ใช้ทดสอบจริง



รูปที่ ผ.ค.13 การต่อวงจรทดสอบจริง

3.2 ทำการจ่ายแรงดันทดสอบจากตู้ควบคุมแรงดันในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ค.14 การจ่ายแรงดันทดสอบ
 3.3 การตรวจจับการเกิดโคโรนาเริ่มเกิดของโคโรนาซีลด์ที่ใช้ทดสอบจากเครื่อง
 ตรวจจับการดิซชาร์จบางส่วน DDX 9101



รูปที่ ผ.ค.15 การตรวจจับการเกิดโคโรนาเริ่มเกิดของโคโรนาซีลด์ที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การลัดวงจรกราวด์ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหลังจากทำการทดสอบเสร็จ

เรียบร้อย



รูปที่ ผ.ค.16 การลัดวงจรกราวด์ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

4. ขั้นตอนการตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา

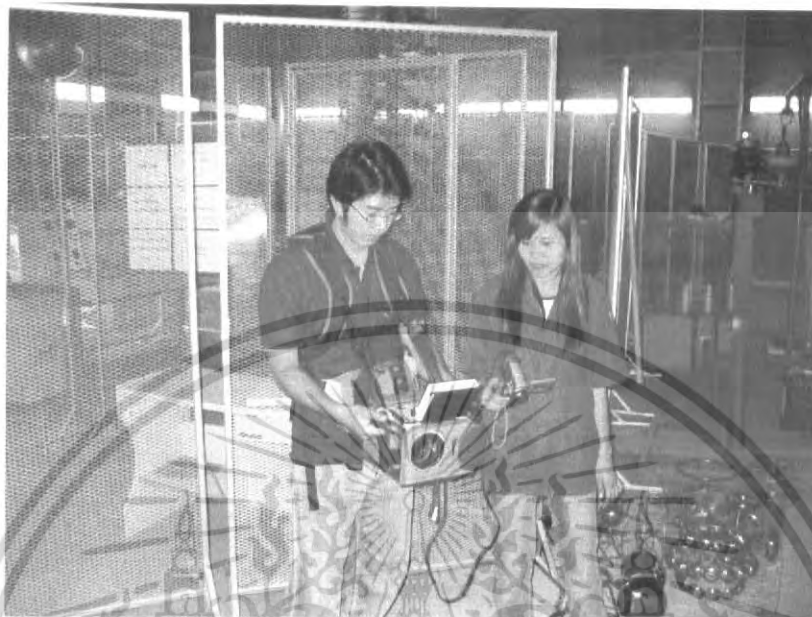
4.1 เตรียมกล้องตรวจจับโคโรนา ดังรูป



รูปที่ ผ.ค. 17 การเตรียมกล้องตรวจจับโคโรนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตรวจจับการเกิดโคโรนาที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา
 ในขณะที่ทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(PD
 DETECTOR DDX-9101) ซึ่งแสดงการตรวจจับดังรูป

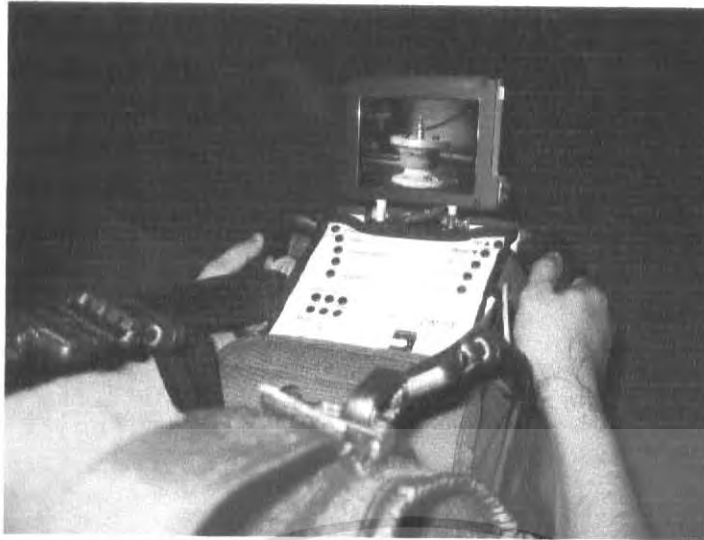


รูปที่ ผ.ค.18 การตรวจจับการเกิดโคโรนาที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา



รูปที่ ผ.ค. 19 การตรวจจับการเกิดโคโรนาที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา
 ในขณะที่ทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องตรวจจับการเกิด
 ดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ค.20 การจับภาพการตรวจจับการเกิดโคโรนาที่โคโรนาซีลด์ของ
กล้องตรวจจับการเกิดโคโรนา

4.3 การทดสอบการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา

ทำการตรวจจับการเกิดโคโรนาที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา
ในขณะที่ทำการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนจากเครื่องตรวจจับการเกิดดีสชาร์จบางส่วน(PD
DETECTOR DDX-9101) และบันทึกผลการทดสอบ

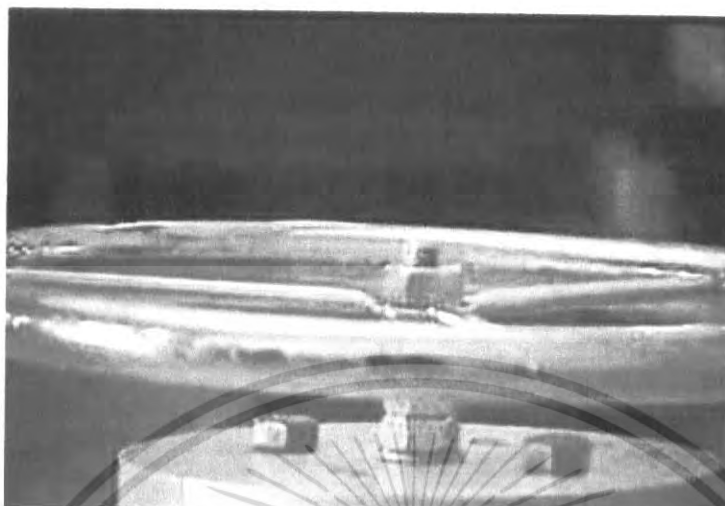
4.3.1 ผลการตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีที่ใช้
อิเล็กโทรดที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ



รูปที่ ผ.ค.21การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีที่ใช้อิเล็กโทรดที่ไม่
ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการตรวจจับการเกิดโคโรนา ด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณี อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์ และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ



รูปที่ ผ.ค.22 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีที่อิเล็กโทรดที่ต่อโคโรนาซีลด์ และใช้สายทองแดงเป็นสายตัวนำ

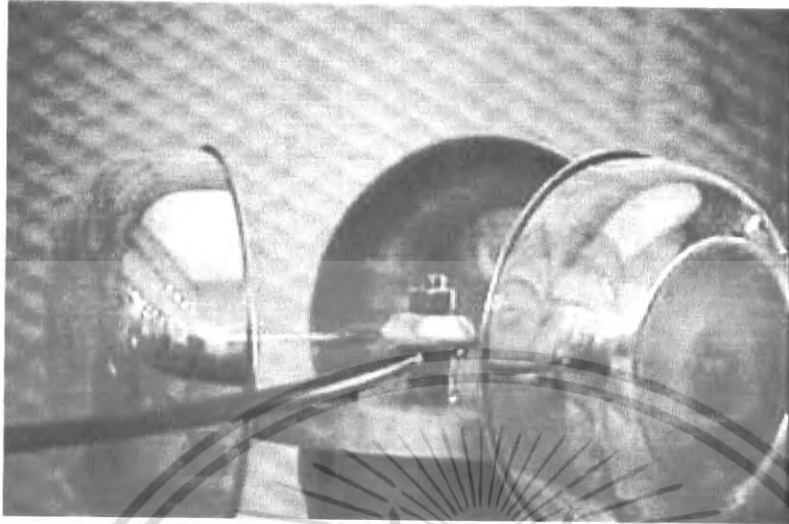
4.3.3 ผลการตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีที่ อิเล็กโทรดที่ไม่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายไฟหุ้มเป็นสายตัวนำ



รูปที่ ผ.ค. 23 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีที่อิเล็กโทรดที่
ไม่ต่อโคโรนาซีลด์และใช้สายไฟหุ้มเป็นสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.43 ผลการตรวจจับการเกิดโคโรนา ด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณี
อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อโคโรนาซีลด์ และใช้สายไฟหุ้มฉนวนเป็นสายตัวนำ



รูปที่ ผ.ค.24 การตรวจจับการเกิดโคโรนาด้วยกล้องตรวจจับโคโรนากรณีใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อโคโรนาซีลด์ และใช้สายไฟหุ้มฉนวนเป็นสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้