

การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน



นายสุภวัตร น้าประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5121-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY ON INSULATION DEFECT MODELS IN ROTATING MACHINE
USING PARTIAL DISCHARGE TEST

Mr.Supawat Naprasert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5121-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน
	โดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน
โดย	นายศุภวัตร น้ำประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ
(นายสุรพล พุทธิวัฒน์)

ศุภวัตร น้ําประเสริฐ: การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน โดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน.(STUDY ON INSULATION DEFECT MODELS IN ROTATING MACHINE USING PARTIAL DISCHARGE TEST) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ.ดร.สมบุญ งามชัยกิจ, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ , 114 หน้า. ISBN 974-17-5121-4

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน โดยการทำให้แบบจำลองเพื่อจำลองจุดบกพร่องในขดลวดสเตเตอร์ แบบจำลองที่ทำขึ้นเพื่อการทดสอบมี 3 ประเภท คือแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต และแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง การวิเคราะห์ผลเพื่อจำแนกประเภทจุดบกพร่องของแบบจำลองแต่ละประเภทนั้น สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสามมิติ $H_n(\phi, q)$ การกระจายข้อมูลแบบสองมิติ $H_{qmax}(\phi)$ $H_{qn}(\phi)$ $H_n(\phi)$ $H(q)$ และ $H(p)$ และการวิเคราะห์ผลการแสดงสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เมื่อทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น

ผลการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆด้วยตา และการวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติสามารถใช้จำแนกแบบจำลองแต่ละประเภทได้เป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370529621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : PARTIAL DISCHARGE / ROTATING MACHINE/ INSULATION DEFECT MODELS

SUPAWAT NAPRASERT : STUDY ON INSULATION DEFECT MODELS IN ROTATING MACHINE USING PARTIAL DISCHARGE TEST. THESIS ADVISOR : SOMBOON CHONGCHAIKIT, D.Ing., THESIS CO-ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS ,D.Ing.114 pp. ISBN 974-17-5121-4

This thesis is a study of insulation defect models in rotating machine using partial discharge test. Three kinds of stator bar defect models which are perfect stator bars model , slot defect stator bars model and endwinding defect stator bars model were made for testing. Each kind of defect model was classified by the difference of three dimensions distribution of $H_n(\phi, q)$,two dimensions distribution of $H_{qmax}(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$, $H_n(\phi)$, $H(q)$ and $H(p)$ and visual inspection of the difference between signal displays in linear time scale. Statistical values were also calculated in order to compare the trend of those parameters after each defect stator bars model were simulated.

The test result showed that the statistical parameters can be used as a tool to classify each defect bar model and also each defect bar model can be distinguished by its pattern distribution.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...Electrical Engineering... Student's Signature.....

Field of study...Electrical Engineering... Advisor's Signature.....

Academic year...2003..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อ.ดร.สมบุญ ใจชัยกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้แนะนำและวางกรอบงานวิจัย และ อ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมซึ่งได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ พร้อมทั้งแนะนำเทคนิคและวิธีการทดสอบที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณสุรพล พุฒวัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกลุ่มผู้ปฏิบัติงานฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้าซึ่งให้คำแนะนำในการจัดทำแบบจำลองพร้อมทั้งความรู้ที่เอื้อประโยชน์ต่อการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณ อ.ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบและเป็นอีกท่านที่ช่วยแนะนำเทคนิคและความรู้ในการทดสอบมาโดยตลอด

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่ให้การสนับสนุนเรื่องเงินทุนสำหรับงานวิจัยนี้ และขอบคุณเพื่อนพี่น้องนิสิตห้องปฏิบัติการวิจัยวัดคุมทางอุตสาหกรรมทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษาอย่างดียิ่ง

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ของข้าพเจ้าที่ได้เลี้ยงดูและสนับสนุนด้านการศึกษาด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ประวัติการศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน โดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน	2
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่	
2. ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์และการเกิดจุดบกพร่องในเครื่องจักรกลหมุน.....	4
2.1 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน.....	4
2.1.1 ระดับชั้นฉนวน (Insulation Class)	4
2.1.2 โครงสร้างระบบฉนวน	5
2.1.3 โครงสร้างขดลวดสเตเตอร์	6
2.2 ตำแหน่งจุดบกพร่องของฉนวนที่พบในเครื่องจักรกลหมุน	7
2.2.1 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลีต	11
2.2.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง	13
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน	18
บทที่	
3. การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนและการวิเคราะห์ข้อมูล	20
3.1 ปραกฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วน	20

สารบัญ (ต่อ)

๗

บทที่	หน้า
3.1.1	20
3.1.2	21
3.2	23
3.3	27
3.4	28
3.5	32
3.5.1	32
3.5.1.1	33
3.5.1.2	33
3.5.1.3	33
3.5.2	33
3.5.2.1	34
3.5.2.2	34
3.6	35
3.7	38
3.7.1	39
3.7.2	39
3.8	41
บทที่	
4.	45
4.1	45
4.1.1	45
4.1.2	46
4.1.3	47
4.2	48
4.2.1	48
4.2.2	
ชั้นเคลือบลดความเครียด	50
4.3	51

สารบัญ (ต่อ)

ณ

บทที่	หน้า
4.4 การออกแบบการทดลอง	57
4.4.1 การทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง	57
4.4.2 การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อต	57
4.3.3 การทดสอบจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง	58
บทที่	
5. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	59
5.1 การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลด้วยตา	59
5.1.1 ผลการทดสอบแบบจำลองแบบต่างๆโดยดูจากการกระจายข้อมูล แบบสามมิติและสองมิติ	59
5.1.1.1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง	59
5.1.1.2 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อต	62
5.1.1.2.1 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่อง บริเวณสล็อตที่มีขนาดต่างๆ	62
5.1.1.2.2 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่อง บริเวณสล็อตที่ความชื้นต่างๆ	69
5.1.1.2.3 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่อง บริเวณสล็อตที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์ ...	71
5.1.1.3 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง	74
5.1.2 ผลการทดสอบแบบจำลองต่างๆโดยดูจากการแสดงผลสัญญาณ บนฐานเวลาแบบเชิงเส้น(Linear Time Scale)	80
5.2 ผลการทดสอบแบบจำลองแบบต่างๆด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ	82
5.2.1 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อต	82
5.2.1.1 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อตที่มีขนาดต่างๆกัน	83
5.2.1.2 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อตที่ความชื้นต่างๆ	86
5.2.1.3 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อตที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์	87
5.2.2 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง	89
5.3 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล	90

สารบัญ (ต่อ)

ญ

บทที่	หน้า
6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	92
6.1 สรุป	92
6.2 ข้อเสนอแนะ	93
รายการอ้างอิง	94
ภาคผนวก	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	114



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

๗

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตำแหน่งการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน..... 9

ตารางที่ 2.2 แบบจำลองความบกพร่องแบบต่างๆ..... 10



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ฎ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบโครงสร้างฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน.....	5
รูปที่ 2.2 ขดลวดสเตเตอร์.....	7
รูปที่ 2.3 การเกิดโคโรนาในสลิตและการป้องกัน.....	11
รูปที่ 2.4 ชั้นฉนวนซ้อนกับโพรงอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์และสลิต	13
รูปที่ 2.6 แรงดันและสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	14
รูปที่ 2.7 การลดความเครียดบนผิวฉนวนโดยใช้ชั้นเคลือบลดความเครียด.....	14
รูปที่ 2.8 อธิบายการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	15
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลชั้นเคลือบลดความเครียด.....	15
รูปที่ 2.10 แสดงคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสในชั้นเคลือบลดความเครียด	16
รูปที่ 2.11 สนามไฟฟ้าและแรงดันของฉนวนที่พันด้วยเทปเคลือบลดความเครียด.....	18
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลการปล่อยประจุบางส่วน	20
รูปที่ 3.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน	21
รูปที่ 3.3 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในจุดภาคที่หนึ่งและสาม.....	22
รูปที่ 3.4 แสดงพัลส์ชั่ววอก และ พัลส์ชั่วลบ.....	23
รูปที่ 3.5 แบบจำลองการปล่อยประจุบางส่วนของระบบฉนวน.....	24
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ชั่ววอก พัลส์ชั่วลบ และฉนวนที่ทำหน้าที่เป็นแคโทด.....	25
รูปที่ 3.7 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่วลบเด่นกว่า	26
รูปที่ 3.8 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่ววอก และ พัลส์ชั่วลบใกล้เคียงกัน.....	26
รูปที่ 3.9 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่ววอกเด่นกว่า.....	27
รูปที่ 3.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วน.....	29
รูปที่ 3.11 วงจรทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ.....	31
รูปที่ 3.12 การกระจายขนาดพัลส์.....	36
รูปที่ 3.13 การกระจาย Phase Resolved Pattern	37
รูปที่ 3.14 รูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ.....	38
รูปที่ 3.15 สัญญาณรบกวนจากแหล่งต่างๆ.....	39
รูปที่ 3.16 รูปแบบการกระจายข้อมูลที่มีค่า Sk แบบต่างๆ.....	41
รูปที่ 3.17 รูปแบบการกระจายข้อมูลที่มีค่า Ku แบบต่างๆ.....	42

สารบัญภาพ

ฐ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง.....	46
รูปที่ 4.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลีต.....	47
รูปที่ 4.3 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	48
รูปที่ 4.4 ลวดทองแดงหุ้มด้วยฉนวนไม่ก้ำ.....	49
รูปที่ 4.5 ฉนวน Samicatherm.....	49
รูปที่ 4.6 วัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนา.....	50
รูปที่ 4.7 วัสดุความต้านทานสูงต้านการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	50
รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการชุบขดลวด.....	52
รูปที่ 4.9 ขดลวดที่ผ่านการชุบพร้อมที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป.....	52
รูปที่ 4.10 เครื่องขึ้นรูปขดลวด.....	53
รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการขึ้นรูปขดลวด.....	53
รูปที่ 4.12 ขดลวดที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้ว.....	54
รูปที่ 4.13 การบีบอัดฉนวนด้วยความร้อน ครั้งที่ 1.....	54
รูปที่ 4.14 ขดลวดหลังการทำการบีบอัดด้วยความร้อน ครั้งที่ 1.....	55
รูปที่ 4.15 แท่งสเตเตอร์ที่พันฉนวนเรียบร้อยแล้วพร้อมเข้าเครื่องบีบอัดด้วยความร้อน.....	55
รูปที่ 4.16 ขั้นตอนการบีบอัดด้วยความร้อนครั้งที่ 2.....	56
รูปที่ 4.17 อุปกรณ์และการต่อวงจรสำหรับการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน.....	56
รูปที่ 4.18 ภาพแสดงการจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ.....	58
รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P1.....	60
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P2.....	60
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P3.....	61
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสลีต.....	62
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 แบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x5 ตารางเซนติเมตร.....	62
รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร....	63
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x15 ตารางเซนติเมตร....	63
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสลีต.....	64
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 แบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร... 64	
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x20 ตารางเซนติเมตร. 65	

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x30 ตารางเซนติเมตร..	65
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสลีต.....	66
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x5 ตารางเซนติเมตร...	66
รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x7.5 ตารางเซนติเมตร.	67
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร..	67
รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 4 ขนาดจุดบกพร่อง 2x15 ตารางเซนติเมตร..	68
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 %.....	69
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 %.....	70
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %.....	70
รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 kV.....	71
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 ที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 kV.....	72
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 kV.....	72
รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 ที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 kV.....	73
รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 kV.....	73
รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 kV.....	74
รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบแบบจำลอง E1 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	75
รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบแบบจำลอง E1 (ชุดรอยต่อออกไม่รอบด้าน).....	75
รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบแบบจำลอง E1 (ชุดรอยต่อออกกรอบด้าน).....	76
รูปที่ 5.29 ผลการทดสอบแบบจำลอง E2 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	76
รูปที่ 5.30 ผลการทดสอบแบบจำลอง E2 (ชุดรอยต่อออกไม่รอบด้าน).....	77
รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบแบบจำลอง E2 (ชุดรอยต่อออกกรอบด้าน).....	77
รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบแบบจำลอง E3 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง.....	78
รูปที่ 5.33 ผลการทดสอบแบบจำลอง E3 (ชุดรอยต่อออกไม่รอบด้าน).....	78
รูปที่ 5.34 ผลการทดสอบแบบจำลอง E3 (ชุดรอยต่อออกกรอบด้าน).....	79
รูปที่ 5.35 แสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง.....	80
รูปที่ 5.36 แสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองจุดบกพร่อง บริเวณสลีต.....	81
รูปที่ 5.37 แสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองจุดบกพร่อง	

สารบัญภาพ

ผ

ภาพประกอบ	หน้า
บริเวณส่วนพื้นร่อง.....	82
รูปที่ 5.38 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต.....	83
รูปที่ 5.39 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต.....	84
รูปที่ 5.40 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_n(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต.....	84
รูปที่ 5.41 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต.....	85
รูปที่ 5.42 การวิเคราะห์ค่าแฟรกทัลของกับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต.....	85
รูปที่ 5.43 การวิเคราะห์ค่า Skewness และ Kurtosis กับจุดบกพร่องในสล๊อต ที่ความชื้นต่างๆ.....	86
รูปที่ 5.44 การวิเคราะห์ค่าแฟรกทัล ของแบบจำลอง S1,S2 และS3ที่ความชื้นต่างๆ.....	87
รูปที่ 5.45 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$ ที่แรงดัน6.6 และ 8.0 kV.....	88
รูปที่ 5.46 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ ที่แรงดัน6.6 และ 8.0 kV.....	88
รูปที่ 5.47 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ ที่แรงดัน6.6 และ 8.0 kV.....	89
รูปที่ 5.48 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของแบบจำลองจุดบกพร่อง บริเวณส่วนพื้นร่องแบบต่างๆ.....	90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำทั่วไป

1.1 บทนำ

เครื่องจักรกลหมุน (Rotating Machine) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญและมีใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป หากเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้เป็นอุปกรณ์หลักซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตเช่นมอเตอร์สูบน้ำขนาดใหญ่หรือเครื่องผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า เกิดชำรุดเสียหายในระหว่างกระบวนการผลิต ย่อมจะส่งผลกระทบต่อทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงักและเกิดความเสียหายมูลค่ามหาศาล จากการรวบรวมข้อมูลทางสถิติความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนส่วนใหญ่เกิดจากความเสียหายของระบบฉนวนซึ่งเสื่อมสภาพเนื่องจากผลกระทบทางไฟฟ้า ทางกล ความร้อนและสิ่งแวดล้อม[1] จึงได้มีความพยายามที่จะศึกษาและหาวิธีการประเมินสภาพฉนวนเพื่อลดความเสี่ยงจากการเสียหายขณะใช้งาน วิธีการประเมินสภาพฉนวนมีอยู่หลายวิธี เช่น การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test) การทดสอบค่าดัชนี การเกิดขั้ว (Polarization Index Test) การทดสอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss Test) การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Current Test) การทดสอบเพื่อประเมินสภาพฉนวนด้วยวิธีการเหล่านี้เป็นที่ยอมรับและใช้งานโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังมีวิธีการประเมินสภาพฉนวนอีกวิธีหนึ่งก็คือ การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge Test) ซึ่งเป็นการประเมินสภาพฉนวนที่ดีอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนของฉนวนเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยตรง

การประเมินสภาพฉนวนควรจะต้องประเมินและเก็บข้อมูลเพื่อดูการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องและการประเมินจะน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นหากทราบตำแหน่งและสาเหตุของจุดบกพร่องของฉนวนเนื่องจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแต่ละตำแหน่งมีความรุนแรงและมีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนแตกต่างกัน ดังนั้นถ้ามีการพัฒนาเทคนิคเพื่อการวิเคราะห์หาสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่องในฉนวนก็จะทำให้การประเมินสภาพฉนวนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 ที่มาของปัญหา

ปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนเป็นการปล่อยประจุทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่อกันระหว่างขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยการเกิดประกายไฟ (Spark) ในเนื้อฉนวนเพียงบางส่วนหรือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ[2] โดยทั่วไปความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศที่ภาวะปกติจะมีค่าประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร[3] เมื่อเกิด

การปล่อยประจุบางส่วนจะทำให้บริเวณนั้นเกิดความร้อนสูงและทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ตำแหน่งที่จะเกิดการปล่อยประจุมีอยู่หลายตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งจะมีความรุนแรงของการเกิดแตกต่างกัน และส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนต่างกันด้วย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งของการปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลหมุน เพื่อประโยชน์ในการประเมินสภาพฉนวนได้อย่างน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อการบำรุงรักษาอีกทางหนึ่งด้วย

1.2 ประวัติการศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

การประเมินสภาพฉนวนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นวิธีการที่ได้ผลดี และได้รับความนิยมมานานวิธีการหนึ่ง การประเมินสภาพฉนวนเพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำเชื่อถือได้ต้องอาศัยปัจจัยอื่น ๆ มาร่วมในการวิเคราะห์ การทดสอบฉนวนนอกจากจะดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสภาพฉนวนแล้ว การทราบถึงตำแหน่งและสาเหตุที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในฉนวนได้ ก็จะเป็นส่วนช่วยเสริมให้การประเมินสภาพฉนวนมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ราวปี ค.ศ. 1950 Kreuger และ Mole[4] ได้ศึกษาเพื่อหาวิธีวิเคราะห์หาตำแหน่งของจุดบกพร่องโดยใช้การสังเกตรูปแบบของสัญญาณบนรูปลิสซาชูส์ (Lissajous Traces) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยผู้วิเคราะห์ที่มีประสบการณ์สูง ในเวลาต่อมาการวิเคราะห์หาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการเปรียบเทียบระหว่างการเกิดพัลส์ขั้วบวก (Positive Polarity Pulses) และพัลส์ขั้วลบ (Negative Polarity Pulses) ในช่วงไซเคิลลบและไซเคิลบวกของแรงดันตามลำดับ[5,6,7,8] การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคดังกล่าวเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและมีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งของจุดบกพร่อง แต่ผู้วิเคราะห์จะต้องมีประสบการณ์สูงเช่นเดียวกัน และข้อมูลที่ได้ในบางครั้งมีลักษณะก้ำกึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์มีเพียงรูปแบบเดียวคือรูปแบบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดพัลส์และขนาดของพัลส์ เปรียบเทียบกันระหว่างไซเคิลบวกและไซเคิลลบเท่านั้น แต่หลังจากที่มีการนำเอาไมโครโปรเซสเซอร์ทำให้เครื่องมือตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนมีศักยภาพมากขึ้น การเก็บข้อมูลมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และสามารถวัดมุมเฟสทางไฟฟ้าที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ จึงทำให้ได้ข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อการนำมาวิเคราะห์มากขึ้น ข้อมูลรูปแบบใหม่จะบันทึกค่าประจุที่ปรากฏ (q) ที่เกิดขึ้นตามมุมเฟส (ϕ) และค่าแรงดันทดสอบ (U) ด้วยการพัฒนาทางเทคโนโลยีของเครื่องตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนนี้เองทำให้ได้รูปแบบการกระจายข้อมูลหลากหลายรูปแบบ เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น[9] จึงทำให้ในปัจจุบันมีนักวิจัยทำการศึกษาวิจัยเพื่อหารูปแบบเฉพาะของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในฉนวนแต่ละตำแหน่งโดยใช้เทคนิคต่างๆมากมาย[9,10,11,12]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนในเมืองไทยเมื่อปี พ.ศ. 2542 ได้มีงานวิจัยพัฒนา และออกแบบสร้างเครื่องวิเคราะห์การปล่อยประจุบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานได้สำเร็จ ซึ่งสามารถคำนวณเมตริกซ์การกระจายของค่าประจุที่ปรากฏ แล้วนำรูปแบบเหล่านี้มาทำการวิเคราะห์และจำแนกประเภทของความบกพร่องที่เกิดในอุปกรณ์แรงสูงได้ [13] และในปี พ.ศ. 2544 ได้มีการศึกษาการรู้จำรูปแบบของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาโดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ค [14] ซึ่งให้ผลการจำแนกเป็นที่น่าพอใจ แต่สำหรับการศึกษาและจำแนกจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยรูปแบบการเก็บข้อมูลซึ่งใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ในเมืองไทยนั้นยังไม่ได้มีการศึกษา

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์สองประการคือ ประการแรกเพื่อศึกษาความแตกต่างของจุดบกพร่องของฉนวนในแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน ประการที่สองเพื่อศึกษาหารูปแบบเฉพาะสำหรับจุดบกพร่องของฉนวนแต่ละประเภท เพื่อประโยชน์ในการนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งของจุดบกพร่อง ซึ่งจุดบกพร่องที่จะทำการศึกษาเป็นจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและมีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนอย่างมาก การศึกษาจะทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองจุดบกพร่องขึ้นในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน แบบจำลองมีสามประเภทคือ แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง สำหรับไว้เปรียบเทียบ แบบจำลองแท่งสเตเตอร์เกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิต และแบบจำลองแท่งสเตเตอร์เกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพันร่อง การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้การวิเคราะห์ด้วยตาเพื่อหารูปแบบการกระจายข้อมูลซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของแบบจำลองแต่ละประเภทและการวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อเสริมการวิเคราะห์ในกรณีที่มองไม่เห็นผลได้ชัดเจน โดยการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลด้วยตา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุการชำรุดเสียหายของฉนวนได้เนื่องจากรู้ตำแหน่งของจุดบกพร่องในฉนวน
- 2) มีประโยชน์ในการวางแผนการบำรุงรักษาและการตัดสินใจนำอุปกรณ์เข้าใช้งาน
- 3) ลดความเสี่ยงต่อความเสียหายขณะนำอุปกรณ์เข้าใช้งานทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์และการเกิดจุดบกพร่องในเครื่องจักรกลหมุน

2.1 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน

ฉนวนที่นำมาใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนมีอยู่หลายประเภท แต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปซึ่งจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดงาน เมื่อใช้งานอุปกรณ์นั้นเป็นเวลานานจะทำให้ระบบฉนวนเสื่อมสภาพลง ซึ่งสภาพของฉนวนก็จะไปจำกัดอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ ระบบฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน ในระยะเริ่มแรกนั้นจะเป็นระบบฉนวนแบบเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งจะใช้แอสฟัลต์ (Asphalt) และเซลแล็ค (Shellac) เป็นตัวประสานไมก้า (Mica) ทำให้ระบบฉนวนประเภทนี้ถูกจำกัดการใช้ที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบันระบบฉนวนเปลี่ยนเป็นแบบเทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting) ซึ่งจะใช้โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) เป็นตัวประสานไมก้าทำให้ฉนวนมีความแข็งและทนอุณหภูมิแวดล้อมได้สูงกว่าถึง 155 องศาเซลเซียส[15]

2.1.1 ระดับชั้นฉนวน (Insulation Class)

การแบ่งระดับชั้นฉนวนนั้น จะใช้อุณหภูมิแวดล้อมที่ฉนวนสามารถทนได้เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ฉนวนแต่ละชนิดจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิแวดล้อมเท่าไรนั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนนั่นเอง การแบ่งระดับชั้นฉนวนแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1) ฉนวน ระดับชั้น A

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ได้แก่ ฝ้าย ไหม กระดาษเซลลูโลส (Cellulose Based Paper) และ ลินิน

2) ฉนวน ระดับชั้น B

ฉนวนระดับชั้นนี้ใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาทำฉนวนได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาส ยะหิน (Asbestos) โดยจะใช้เซลแล็ค แอสฟัลต์ และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน

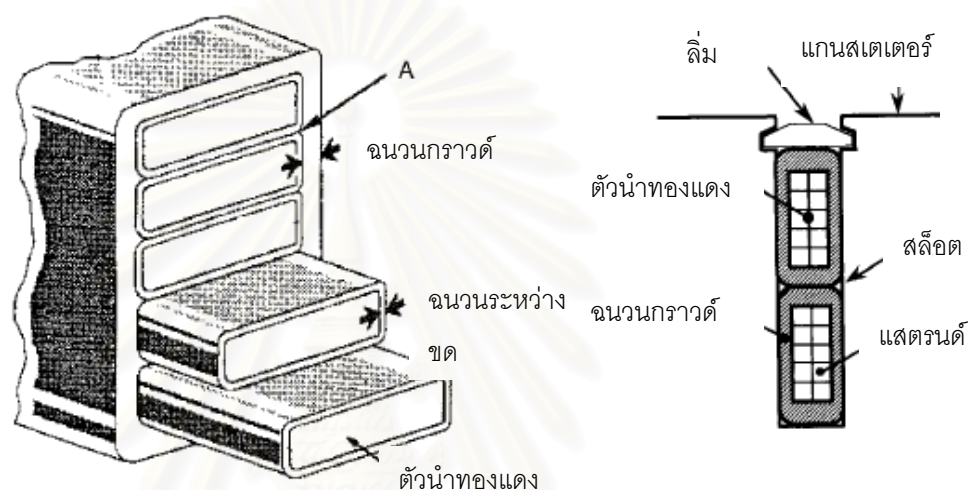
3) ฉนวน ระดับชั้น F

ฉนวนระดับชั้นนี้ใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาทำฉนวนได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาสและใยหินเช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานจะใช้ อีพ็อกซีเรซิน

4) ฉนวน ระดับชั้น H

ฉนวนระดับนี้ใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาทำฉนวนได้แก่ ซิลิกาโตเมอร์ซิลิโคน (Silicone Elastomer) ไมก้า ไฟเบอร์กลาส และใยหิน วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานคือ เรซินซิลิโคน (Silicone Resins)

2.1.2 โครงสร้างระบบฉนวน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน

ในเครื่องจักรกลหมุนฉนวนนับเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมาก อายุการใช้งานจะนานหรือไม่ยอมขึ้นอยู่กับสภาพของฉนวน ระบบฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนจากรูปที่ 2.1 ขดลวดสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดโลหะทองแดงหลายๆขด ซึ่งระหว่างขดลวดทองแดงแต่ละขดจะหุ้มด้วยฉนวนที่เรียกว่า ฉนวนแสตรันด (Strand Insulation) ในขดลวดสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดทองแดงหลายๆขดมารวมกันและหุ้มด้วยฉนวนที่เรียกว่า ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation) ประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนแต่ละชั้นมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งานดังนี้

1) ฉนวนแสตรันด คือชั้นของฉนวนที่หุ้มขดลวดโลหะทองแดง แต่เดิมนั้นฉนวนชั้นนี้จะทำจากวัสดุใยหิน แต่เนื่องจากต้องการเพิ่มเนื้อที่สำหรับขดลวดโลหะทองแดงเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุประเภท แก้วโพลีเอสเตอร์ (Polyester Glass) แทน และจะนำไปอบก่อนที่จะพันด้วยฉนวนกราวด์

2) ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation) จะเป็นชั้นฉนวนหลักซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างแท่งโลหะตัวนำกับแกนเหล็กสเตเตอร์ วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน วัสดุที่ใช้ทำเป็นฉนวนกราวด์มีหลายประเภทดังนี้

ผ้าลินินขาวชุบน้ำมัน (Varnished Cambric)

ฉนวนชนิดนี้จัดเป็นฉนวน ระดับชั้น A มีข้อจำกัดคือ จะใช้กับแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 2300 โวลต์ เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของไม้ก้ำและการถ่ายเทความร้อนไม่ดี

ไม้ก้ำประสานด้วยเซลแล็ค (Shellac Micafolium)

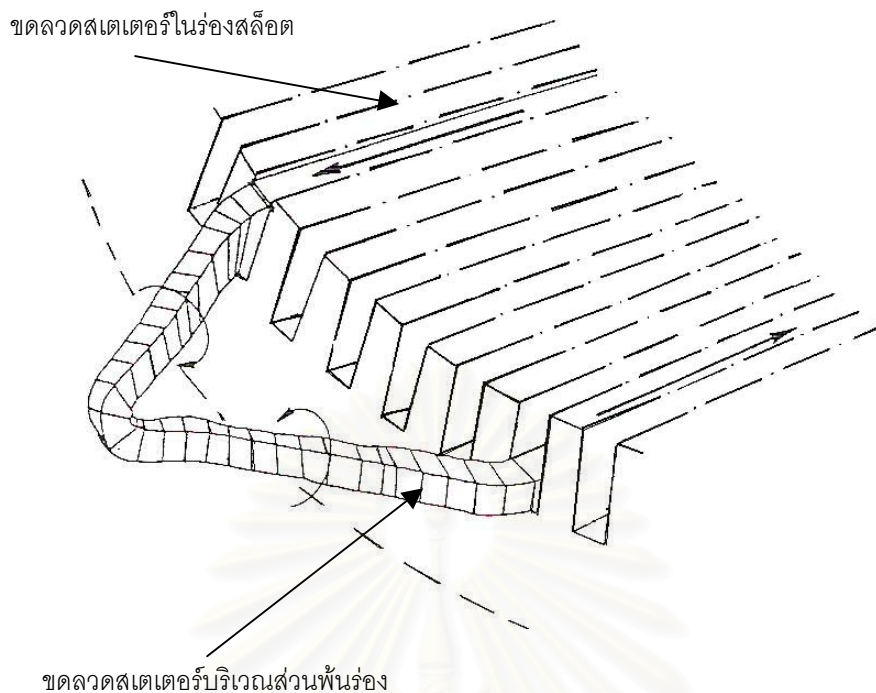
ฉนวนชนิดนี้เป็นฉนวน ระดับชั้น B และเป็นชนิดเทอร์โมพลาสติก ฉนวนชนิดนี้จะใช้เซลแล็คเป็นตัวยึดประสานแผ่นไม้ก้ำโดยอาศัยความร้อน แต่เนื่องจากเซลแล็คเป็นสารที่ระเหยได้ง่าย ดังนั้นในระหว่างกรรมวิธีประสานแผ่นไม้ก้ำโดยอาศัยความร้อนนั้น จะทำให้เกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวนได้มาก กลายเป็นจุดอ่อนทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ง่าย

เทปไม้ก้ำประสานด้วยแอสฟัลต์ (Asphalt-Bonded Mica Tape)

ฉนวนชนิดนี้เป็นฉนวนแบบเทอร์โมพลาสติกระดับชั้น B เหมือนกับเซลแล็คไม้ก้ำโฟเลียม แต่เปลี่ยนตัวยึดประสานแผ่นไม้ก้ำจากเดิมที่ใช้เซลแล็คให้มาเป็นแอสฟัลต์แทน กรรมวิธีในการผลิตนั้นจะใช้ถังที่เป็นสุญญากาศซึ่งบรรจุขดลวดสเตเตอร์ที่พันด้วยเทปไม้ก้ำ แล้วปล่อยแอสฟัลต์ร้อนให้แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างอากาศเพื่อลดโพรงอากาศให้เหลือน้อยที่สุด และจะใช้แรงดันอัดเข้าไปด้วยเพื่อให้แอสฟัลต์สามารถแทรกซึมเข้าไปในระหว่างเทปไม้ก้ำได้มากขึ้น ฉนวนประเภทนี้จะมีคุณภาพดีแต่จะเสื่อมสภาพได้ง่าย หากนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูง และมีการสั่นสะเทือน [16] ฉนวนประเภทนี้ทนความร้อนได้ไม่ดึ้นกจึงถูกจำกัดให้ใช้เป็นฉนวน ระดับชั้น B

2.1.3 โครงสร้างขดลวดสเตเตอร์

โครงสร้างขดลวดสเตเตอร์จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในสล็อต (Slot Portion) และส่วนที่สองเป็นส่วนขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) ซึ่งเป็นส่วนที่พันออกมาจากสล็อต ดังรูปที่ 2.2 ฉนวนทั้งสองบริเวณจะใช้วัสดุค่อนข้างจะแตกต่างกัน ฉนวนที่อยู่ในร่องสล็อตจะมีโพรงอากาศน้อยและมีความแข็งแรงมากกว่าฉนวนบริเวณส่วนพันร่อง เนื่องจากฉนวนในบริเวณสล็อตซึ่งเป็นส่วนตรงในกรรมวิธีการผลิตจะใช้เครื่องอัดความร้อน (Heat Press) บีบอัดด้วยแรงดันและอบด้วยความร้อน ทำให้เรซินแทรกซึมในช่องว่างอากาศได้มากกว่าฉนวนบริเวณส่วนพันร่องซึ่งมีลักษณะโค้ง ทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องอัดความร้อนบีบอัดได้ ฉนวนบริเวณนี้จึงเป็นส่วนที่บอบบางและมีจุดบกพร่องมากกว่า



รูปที่ 2.2 ขดลวดสเตเตอร์

1) ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ในร่องสลิต (Slot Portion) ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในร่องสลิตจะประกอบด้วยชั้นฉนวนกราวด์ และชั้นวัสดุกึ่งตัวนำต้านการเกิดโคโรนา ชั้นฉนวนกราวด์จะทนความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงแต่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าฉนวนที่ใช้พื้นบริเวณส่วนพื้นร่อง

2) ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพื้นร่อง (Endwinding Portion) ฉนวนของขดลวดบริเวณส่วนพื้นร่องควรใช้ฉนวนซึ่งมีความยืดหยุ่นเป็นพิเศษเนื่องจากบริเวณส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และการที่ฉนวนมีความยืดหยุ่นจะทำให้สะดวกในการติดตั้งขดลวดด้วย นอกจากนี้ฉนวนบริเวณนี้จะพันหุ้มด้วยชั้นเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนตามผิวฉนวน

2.2 ตำแหน่งจุดบกพร่องของฉนวนที่พบในเครื่องจักรกลหมุน

ตำแหน่งจุดบกพร่องที่อาจเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่พบในเครื่องจักรชนิดหมุน มีอยู่ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง [17,18] แต่ละตำแหน่งจุดบกพร่องที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพและความรุนแรงต่อฉนวนต่างกันไป ดังนั้นการรู้ตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่คาดว่าจะจะเป็นจุดบกพร่องจะทำให้การประเมินสภาพฉนวนน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และยังทำให้สามารถวางแผนการนำอุปกรณ์เข้าใช้งานและบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตำแหน่งจุด

บกพร่องที่อาจเกิดการปล่อยประจุบางส่วนมี 3 ตำแหน่งคือ ในเนื้อฉนวนของขดลวด สเตเตอร์ บริเวณสล๊อต (Slot) และบริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 ปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาระบบฉนวนทั้งในเรื่องของชนิดวัสดุที่ใช้และกรรมวิธีในการผลิตมีความเจริญก้าวหน้าไปมาก การเกิดจุดบกพร่องภายในเนื้อฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ระหว่างกระบวนการผลิตมีน้อยมาก จุดบกพร่องที่พบและทำให้เกิดความเสียหายมากที่สุดจะพบบริเวณสล๊อต รองลงมาคือบริเวณส่วนพันร่อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงความบกพร่องของฉนวนในบริเวณสองตำแหน่งนี้เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 แสดงแบบจำลองความบกพร่องแบบต่างๆ การวิจัยครั้งนี้จะใช้แบบจำลองที่ 5 และที่ 6 มาเป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่ง	ภาพแสดงตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วน	สาเหตุ
1. ในขดลวดสเตเตอร์	<p>Diagram 1: Corona discharge (ฉนวนหลุดล่อน) at the end of a coil (ฉนวน) on a stator core (แท่งโลหะตัวนำ).</p> <p>Diagram 2: Discharge between turns (รอยแยกในชั้นฉนวน) between two coils.</p> <p>Diagram 3: Discharge in the air gap (โพรงอากาศ) between a coil and the core.</p> <p>Diagram 4: Discharge at the coil end (รอยแตก) where the coil is not fully supported by the core.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ความร้อนทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประสานฉนวนกับขดลวดลดลง และเมื่อได้รับความร้อนสูงอัตราการขยายตัวที่แตกต่างกันของฉนวนและขดลวดตัวนำทำให้ฉนวนหลุดล่อนออกจากผิวตัวนำ • ความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่นการสลายตัวของโมเลกุล ทำให้ความแข็งแรงระหว่างชั้นไมก้าและอีพ็อกซีลดลงจนเกิดรอยแยก • โพรงอากาศเป็นความบกพร่องในฉนวนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต • ความร้อนทำให้ อีพ็อกซีเปราะ และเมื่อได้รับความเครียดทางกลทำให้เกิดรอยแตกในเนื้อฉนวน
2. ระหว่างผิวฉนวนและสลีต	<p>ช่องว่างระหว่างฉนวนกับสลีต</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ชั้นวัสดุกึ่งตัวนำหลุดล่อนหรือชำรุดเนื่องจากการขัดสีระหว่างผิวฉนวนกับสลีต
3. บริเวณส่วนพื้นร่อง	<p>ส่วนพื้นร่อง</p> <p>สลีตของสเตเตอร์</p>	<ul style="list-style-type: none"> • เกิดจากความสกปรกที่ผิวฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่อง ฉนวนที่สกปรกและชื้นจะนำกระแสไฟฟ้าได้ทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมแต่แรงดันที่เหลือจะไปตกคร่อมบริเวณที่แห้งทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นสูงจนเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

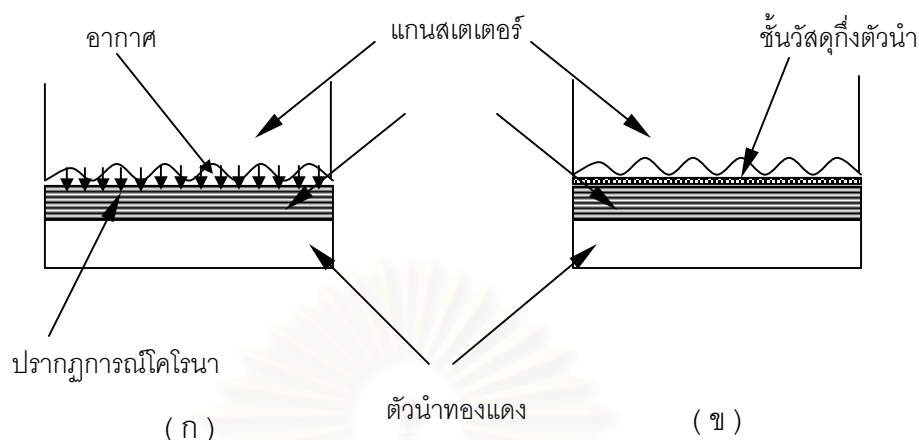
ตารางที่ 2.1 ตำแหน่งการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน

ชนิดแบบจำลอง	รูปแสดงแบบจำลอง	คำอธิบายแบบจำลอง
1. โฟรงอากาศ		แบบจำลองการทดสอบสำหรับตรวจสอบจุดบกพร่องภายในสเตเตอร์จะเป็นแบบจำลองแบบเดียวกันแต่จะต่างกันที่ การจำลองจุดบกพร่องภายในซึ่งแยกเป็น 4 ชนิด คือ โฟรงอากาศ รอยแยกในฉนวน รอยแยกที่ผิวตัวนำ และรอยแตก
2. รอยแยกในฉนวน		
3. รอยแยกที่ผิวตัวนำ		
4. รอยแตก		
5. การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิต		แบบจำลองสำหรับการทดสอบ การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิตจะไม่มีชั้นอะลูมิเนียมฟอยล์ นำแท่งสเตเตอร์มาวางคั่นด้วยฉนวนบนแผ่นโลหะให้ได้ระยะห่างตามต้องการ
6. การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง		แบบจำลองของการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่องจะไม่มีชั้นวัสดุสารกึ่งตัวนำป้องกันการเกิดโคโรนา จะหุ้มด้วยชั้น อะลูมิเนียมฟอยล์เลย

1. อะลูมิเนียมฟอยล์
2. ชั้นเคลือบวัสดุกึ่งตัวนำป้องกันการเกิดโคโรนาที่สลิต
3. ชั้นเทปเคลือบลดความเครียดบริเวณส่วนพื้นร่อง
4. ฉนวน
5. แท่งตัวนำ

ตารางที่ 2.2 แบบจำลองความบกพร่องแบบต่างๆ

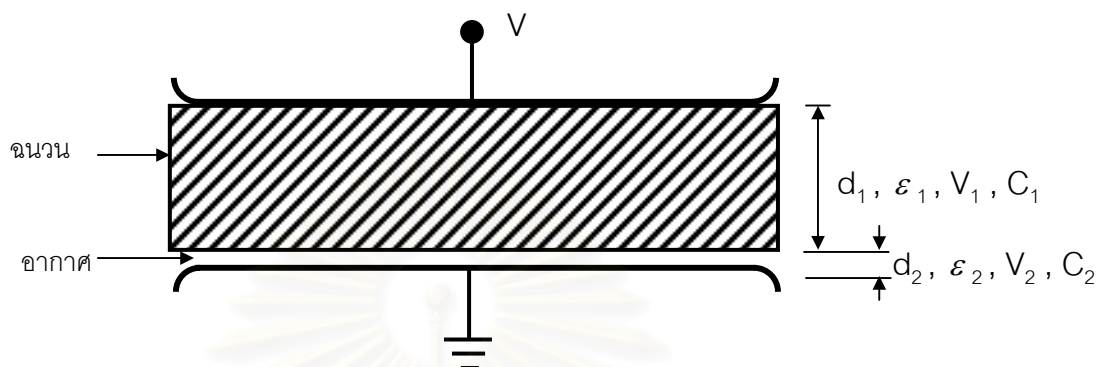
2.2.1 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลีต



รูปที่ 2.3 การเกิดโคโรนาในสลีตและการป้องกัน

ตำแหน่งจุดบกพร่องที่พบมากในเครื่องจักรกลชนิดหมุนคือ บริเวณสลีต ผิวของร่องสลีตซึ่งไม่เรียบทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศระหว่างผิวของฉนวนและผิวของสเตเตอร์ ในกรณีที่แรงดันที่ตกคร่อมโพรงอากาศเกินค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ของอากาศก็จะเกิดโคโรนาขึ้นดังรูปที่ 2.3 ก) เมื่อเกิดอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพในที่สุด ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการป้องกันการเกิดโคโรนาในโพรงอากาศระหว่างผิวฉนวนและสลีต โดยการใช้ชั้นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductive Layer) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่ำกว่าฉนวนมากเพื่อทำหน้าที่กราวด์ผิวฉนวนกับสลีต ซึ่งจะช่วยลดแรงดันที่ตกคร่อมโพรงอากาศให้เหลือน้อยจนไม่สามารถเกิดโคโรนาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ข) ถึงแม้ว่าจะมีชั้นวัสดุสำหรับป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลีตแล้วก็ตาม โอกาสที่จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณนี้ก็ยังมีสูง สาเหตุที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเนื่องจากชั้นวัสดุกึ่งตัวนำหลุดล่อนหรือชำรุดจากการขัดสีระหว่างผิวฉนวนกับสลีต [16] ทำให้บริเวณนั้นมีแรงดันคร่อมโพรงอากาศสูงพอที่จะเกิดโคโรนาขึ้นได้ วัสดุที่นำมาใช้ป้องกันการเกิดโคโรนาในร่องสลีตจะต้องมีคุณสมบัติพิเศษคือ จะต้องมีความต้านทานต่ำพอที่จะไม่ทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างผิวฉนวนและช่องว่างอากาศ (เนื่องจากผิวของร่องสลีตไม่เรียบทำให้ผิวฉนวนบางจุดสัมผัสกับสลีต) สูงพอที่จะเกิดโคโรนาขึ้นได้ และการที่มีค่าความต้านทานต่ำมากเกินไปก็จะทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน เมื่อเกิดความร้อนสะสมเป็นเวลานานความร้อนเหล่านี้ก็จะไปทำให้วัสดุนี้เสื่อมสภาพ ทำให้เกิดโคโรนาได้ แต่ในขณะเดียวกันก็จะต้องมีความต้านทานสูงมากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างแผ่นเหล็กบางที่นำมาเรียงเป็นสลีต

ในการพิจารณาการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในร่องสลิต เมื่อชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาถูกขัดสีจนถลอก ผิวฉนวนบริเวณนั้นจะไม่ถูกต่อลงกราวด์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมฉนวน V_1 และแรงดันอีกส่วนจะตกคร่อมโพรงอากาศ V_2 ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ชั้นฉนวนซ้อนกับโพรงอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ประจุที่เกิดขึ้นในชั้นฉนวนและโพรงอากาศจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$C_1 \sim \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad , \quad C_2 \sim \frac{\epsilon_2}{d_2}$$

อัตราส่วนแรงดัน

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2}$$

$$V_1 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot V_2$$

เนื่องจาก

$$V = V_1 + V_2$$

$$= \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot V_2 + V_2$$

$$= V_2 \cdot \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + 1 \right)$$

จะได้

$$V_2 = \frac{V}{\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + 1 \right)}$$

และเมื่อแทนค่าจะได้

$$V_1 = \frac{V \cdot \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \right)}{\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + 1 \right)}$$

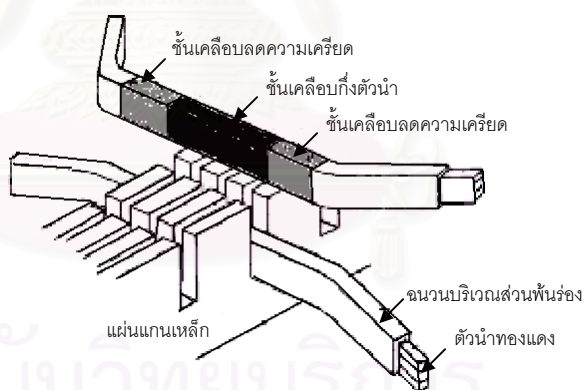
$$E_1 = \frac{V_1}{d_1} = \frac{V \cdot \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \right)}{d_1 \cdot \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + 1 \right)} = \frac{V \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}{d_1 \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + d_2} \quad (2.1)$$

$$E_2 = \frac{V_2}{d_2} = \frac{V}{d_2 \cdot \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + 1 \right)} = \frac{V}{d_1 \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + d_2} \quad (2.2)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.3)$$

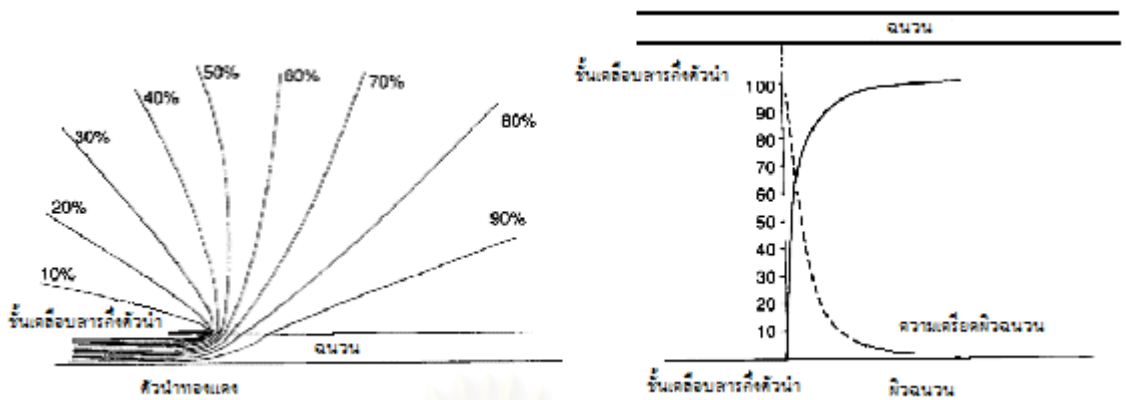
จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงอากาศจะเป็นสัดส่วนระหว่างค่า เปรอริมิตติวิตี้ของฉนวนต่อค่า เปรอริมิตติวิตี้ของอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 3-4 เท่า และเมื่อโพรงอากาศยิ่งแคบความเข้มสนามไฟฟ้าจะยิ่งสูง เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงอากาศนั้นมีค่าเกิน 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้

2.2.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง



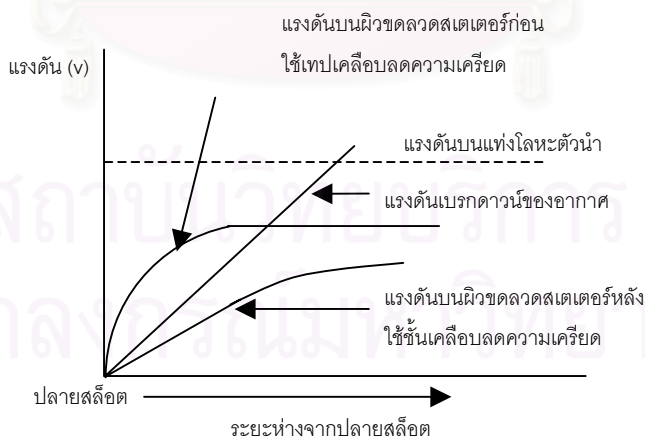
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์และสล๊อต

บริเวณส่วนพื้นร่องดูตามรูปที่ 2.5 จะเป็นอีกบริเวณหนึ่งที่มีโอกาสเกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ ฉนวนส่วนที่อยู่ในร่องสล๊อตจะถูกต่อลงกราวด์ไว้ แต่ฉนวนส่วนที่พื้นร่องออกมาจะมีแรงดันไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าบริเวณที่ติดกับสล๊อตจะมีความเข้มสูง และเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุพิเศษเพื่อลดความเข้มสนามไฟฟ้าให้ต่ำกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของอากาศ วัสดุที่ใช้ที่นี่คือเทปเคลือบลดความเครียด (Stress Grading Tape)

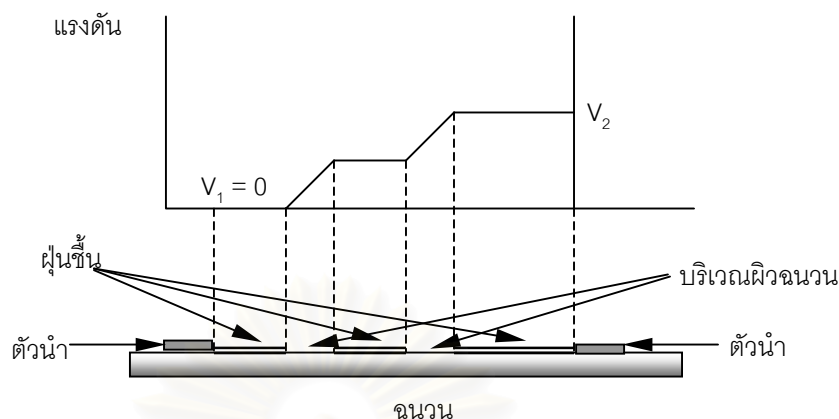


รูปที่ 2.6 แรงดันและสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่อง

การใช้เทปเคลือบลดความเครียดเพื่อค่อยๆลดระดับแรงดันไฟฟ้า ทำให้สนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่องมีค่าไม่เกินค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของอากาศดังรูปที่ 2.7 จึงทำให้ไม่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนขึ้นที่ผิวฉนวนบริเวณนี้ แต่เนื่องจากฉนวนส่วนนี้เป็นส่วนที่มักจะได้รับผลของแรงสั่นสะเทือนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะใช้งาน ทำให้มีโอกาสเกิดรอยแตกในเนื้อฉนวนได้เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน ประกอบกับฉนวนบริเวณนี้มักจะมีโอกาสสกปรกเนื่องจากฝุ่นละออง จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนบ่อยครั้งเช่นกัน ลักษณะการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณนี้สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8

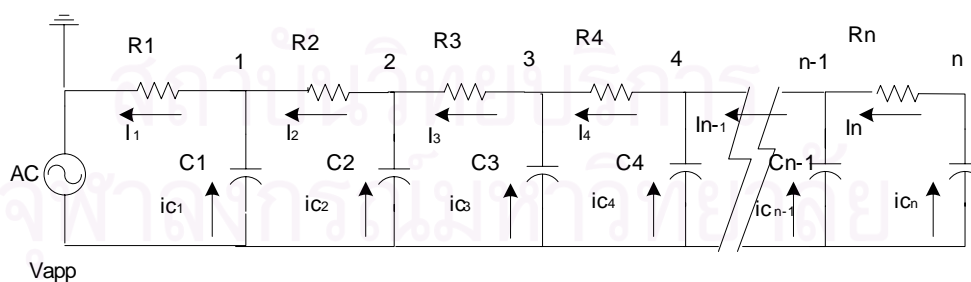


รูปที่ 2.7 การลดความเครียดบนผิวฉนวนโดยใช้ชั้นเคลือบลดความเครียด



รูปที่ 2.8 อธิบายการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง

การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่องซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ 2.8 เนื่องจากบริเวณส่วนพื้นร่องเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากแรงสนามสะท้อนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกในฉนวนได้ง่าย และฉนวนในบริเวณนี้ยังสกปรกด้วยฝุ่นละออง [19] เมื่อเกิดรอยแตกในฉนวนก็จะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลขึ้น ส่วนบริเวณผิวฉนวนที่สกปรกเต็มไปด้วยฝุ่นละอองเมื่อมีความชื้นเกิดขึ้น ผิวฉนวนส่วนนี้ก็จะนำกระแสได้ จึงไม่มีความต่างศักย์แรงดันคร่อมพื้นผิวบริเวณนี้ แต่ส่วนของผิวฉนวนที่แห้งและไม่มีฝุ่นละอองอยู่ไม่สามารถนำกระแสรั่วไหลจากฉนวนได้ จึงทำให้เกิดความต่างศักย์ของแรงดันคร่อมพื้นผิวส่วนนี้ และถ้าแรงดันที่ตกคร่อมพื้นผิวส่วนนี้มีค่ามากกว่าความคงทนไดอิเล็กทริกของอากาศก็จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วน



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลชั้นเคลือบลดความเครียด

การใช้เทปเคลือบลดความเครียดเพื่อดำเนินการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่องสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.9 โดยพิจารณาวัสดุเป็นชนิดองค์ประกอบแบบลัมปี ค่าความเก็บประจุ

ของฉนวนมีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวเทปเคลือบลดความเครียด (L) เมื่อแบ่งความยาวของเทปออกเป็น n ส่วนโดยแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากันจะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันที่ผิวฉนวนแต่ละส่วนเทียบกับกราวด์ได้ดังนี้

$$C = [\epsilon \epsilon_0 P l_{seg}] / t_{ins} \quad (2.4)$$

C = ค่าความเก็บแต่ละส่วน (pF)

L_{seg} = ความยาวของเทปชั้นเคลือบลดความเครียดแต่ละส่วน

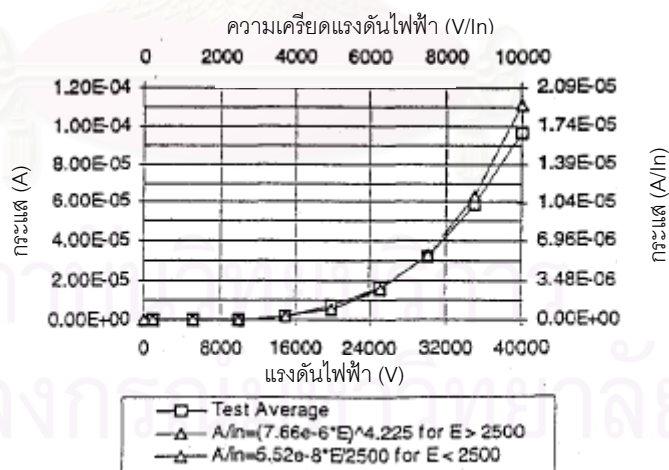
P = ความยาวเส้นรอบผิวขดลวดสเตเตอร์

ϵ = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวน

ϵ_0 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของอากาศ

t_{ins} = ความหนาของฉนวน

เนื่องจากความต้านทานของเทปเคลือบลดความเครียดมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ความต้านทานจะเป็นฟังก์ชันของกระแสซึ่งสามารถหาได้จากคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแส ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลโดยการทำให้แบบจำลองขึ้นมามีดังที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสในชั้นเคลือบลดความเครียด

เนื่องคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานของวัสดุนี้เอง การแก้สมการหาแรงดันที่แต่ละตำแหน่งจึงค่อนข้างมีความยุ่งยาก การแก้สมการเพื่อหาแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆโดยใช้

สมการของออยเลอร์ซึ่งเริ่มพิจารณาที่เวลา $t = 0$ ซึ่งค่าแรงดันและกระแสทุกโหนดเป็นศูนย์และแรงดันในช่วงเวลาถัดไปก็สามารถหาได้จากสมการของออยเลอร์ดังสมการที่ 2.5

$$V_{t+1} = V_t + \Delta t \cdot dv / dt \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 เมื่อใช้กฎกระแสที่แต่ละโหนดจะได้สมการดังสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$I_{cn} = I_n - I_{n+1} \quad (2.6)$$

$$C_n (dV_{cn} / dt) = I_n (V_n, V_{n-1}) - I_n (V_{n+1}, V_n) \quad (2.7)$$

I_{cn} คือกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุ C_n

I_n คือกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของชั้นเคลือบลดความเครียด

V_{cn} คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_n

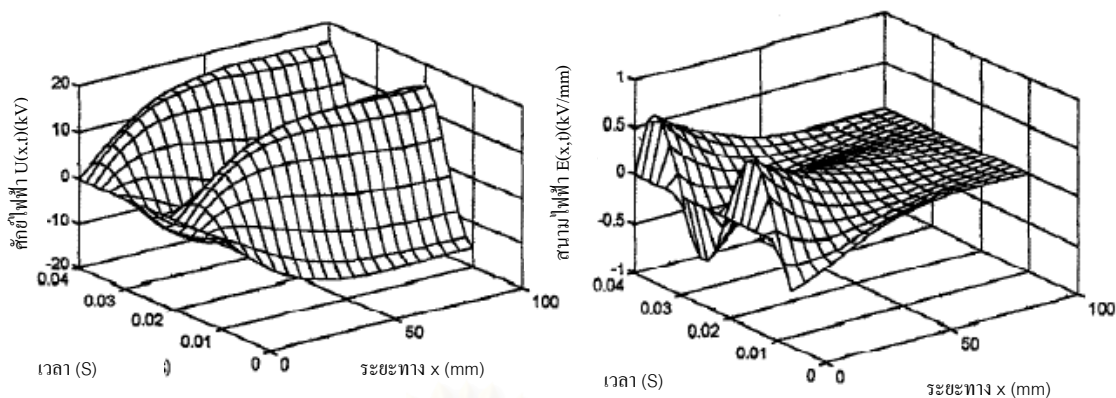
เนื่องจาก C_n มีค่าเท่ากันดังนั้นสมการที่ 2.7 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.8

$$C[d(V_{app} - V_n) / dt] = I(V_n, V_{n-1}) - I(V_{n+1}, V_n) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 จะใช้ในการแก้สมการเพื่อหาค่าแรงดัน V_n ทุกโหนดยกเว้นโหนดที่ 0 เนื่องจากแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ และในโหนดสุดท้าย $I(V_{n+1}, V_n)$ มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อได้ V_n ทุกโหนดแล้วจะทำการหาค่า V_n ที่ช่วงเวลา Δt ถัดไปโดยสมการของออยเลอร์ข้างต้นซึ่งจะได้

$$V_n(t + \Delta t) = V_{app}(t + \Delta t) - [V_{app}(t) - V_n(t)] - \Delta t * [d(V_{app}(t) - V_n(t)) / dt] \quad (2.9)$$

การแก้สมการทำได้โดยการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งผลจากการคำนวณจะแสดงค่าแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างต่างๆจากแกนเหล็กสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สนามไฟฟ้าและแรงดันของฉนวนที่พันด้วยเทปเคลือบลดความเครียด

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของฉนวน

เอกสาร IEC Pub. 505[19] แบ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของฉนวนไว้ 4 ประเภทคือ การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ไฟฟ้า สภาวะแวดล้อมและทางกล

1) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ในฉนวนสารส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งความร้อนจะมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของฉนวนมาก จากสมการของอาร์เรเนียสสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของฉนวนและอุณหภูมิได้ตามสมการที่ 2.10

$$L = A \exp(B/T) \quad (2.10)$$

เมื่อ L คืออายุของฉนวน

A และ B คือค่าคงที่

จากสมการที่ 2.10 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของฉนวนสูงขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนต่ำลง จากการนำสมการของอาร์เรเนียสไปใช้ประมาณค่าอายุการใช้งานของฉนวนระดับชั้น B ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจะมีอายุการใช้งานประมาณครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส [15]

2) การเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้ามักจะอยู่ในรูปแบบของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งการปล่อยประจุบางส่วนในบริเวณโพรงอากาศแคบๆ แต่เกิดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานก็จะทำให้

เกิดความร้อนสะสมที่บริเวณนั้น ผลของความร้อนจะทำให้ฉนวนเกิดการลุกไหม้ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและเสื่อมสภาพในที่สุด

3) การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อม

การเสื่อมสภาพจากสาเหตุนี้สืบเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมที่ใช้งานของอุปกรณ์ ฉนวนที่ใช้งานในที่ชื้นและมีฝุ่นละอองสกปรกเปื้อนคราบน้ำมัน ความชื้นจะเป็นอันตรายกับฉนวนประเภทเทอร์โมพลาสติกหรือโพลีเอสเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกบริเวณปลายร่องสลีต ส่วนน้ำมันนั้นจะไปละลายพันธะที่ใช้ยึดฉนวนทำให้ฉนวนเกิดรอยแตกได้เช่นเดียวกัน ผลของคราบน้ำมันรวมกับฝุ่นละอองมักจะส่งผลทางอ้อมคือ คราบน้ำมันและฝุ่นละอองจะไปอุดตันท่อระบายอากาศทำให้การระบายอากาศไม่ดีพอ เกิดความร้อนสะสมและทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่สะสมนั้น

4) การเสื่อมสภาพเนื่องจากผลทางกล

ในระหว่างการใช้งานอุปกรณ์ตามปกตินั้น ขดลวดสเตเตอร์จะได้รับแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) ในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์หลวมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้ขดลวดสเตเตอร์สั่นและทำให้ฉนวนบริเวณปลายร่องสลีตถูกขีดสีและเกิดรอยแตกได้

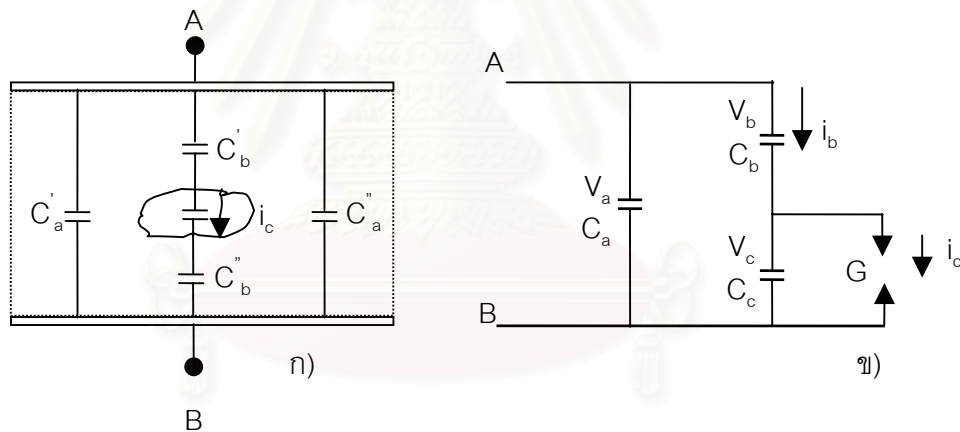
บทที่ 3

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วน

การปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) คือการปล่อยประจุทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่อถึงกันระหว่างขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยการเกิดประกายไฟ(Spark) ในเนื้อฉนวนเพียงบางส่วนหรือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ[2] โดยทั่วไปความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศมีค่าประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในเนื้อฉนวนเป็นระยะเวลานานๆอย่างต่อเนื่องจะส่งผลทำให้ฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพและสูญเสียความเป็นฉนวนในที่สุด

3.1.1 วงจรสมมูลการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

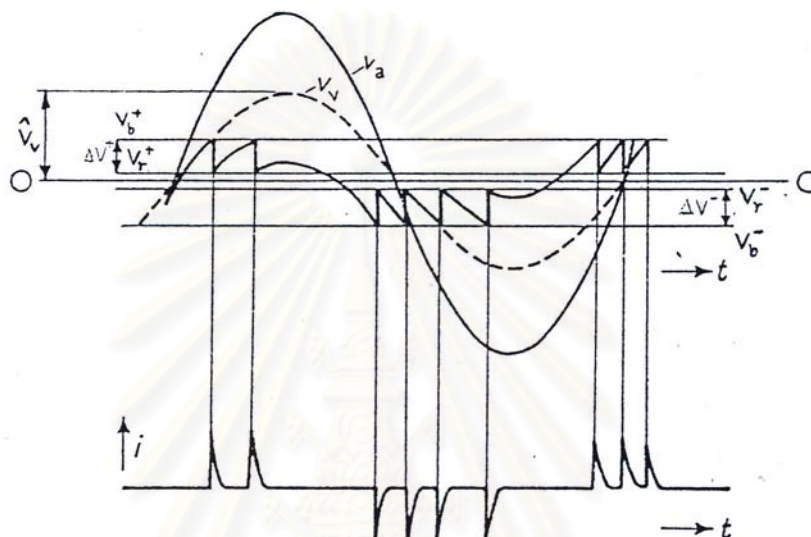


รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลการปล่อยประจุบางส่วน

วงจรสมมูลของฉนวนในขณะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนอาจแทนด้วย ตัวเก็บประจุ C_a , C_b , C_c และแกป G โดยแกป G แทนการลัดวงจรขณะที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วน[20] จากวงจรสมมูลในรูป 3.1 ก) สามารถยุบรวมเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้โดยการแทน $C_a = C'_a + C''_a$ และ $C_b = C'_b C''_b / (C'_b + C''_b)$ จะได้วงจรสมมูลของการปล่อยประจุบางส่วนดังรูป 3.1 ข) ซึ่งเมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศ V_c เกินค่าแรงดันวิกฤติของโพรงอากาศก็จะเกิดพัลส์กระแส i_c ลัดวงจรซึ่งแทนโดยแกป G

3.1.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

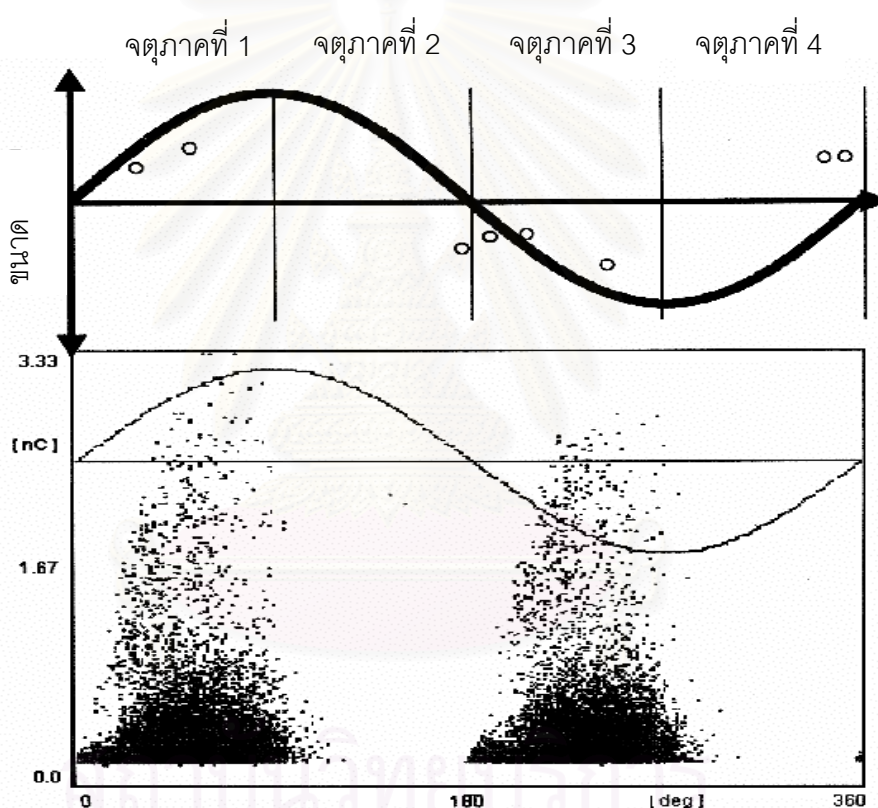
เนื่องจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดขึ้น เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ การเกิดปล่อยประจุบางส่วนนั้นอาจเกิดได้ซ้ำๆ หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา เมื่อแรงดันในช่วงไซเคิลบวกค่อยๆ เพิ่มขึ้นแรงดันที่ตกคร่อมโพรงอากาศก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามด้วย เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศเกินค่าวิกฤติก็จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนข้ามโพรงอากาศ



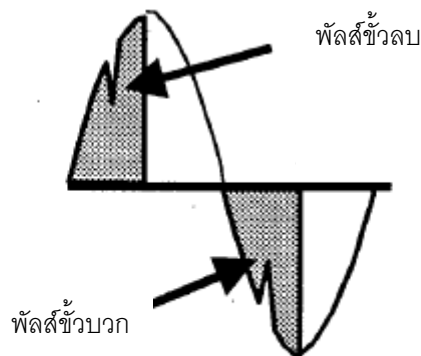
รูปที่ 3.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

ตามรูปที่ 3.2 V_a คือแรงดันคร่อมฉนวน V_b คือแรงดันวิกฤติคร่อมโพรงอากาศที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน V_r คือแรงดันหลังจากที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนของโพรงอากาศ V_v คือแรงดันคร่อมโพรงอากาศกรณีที่ไม่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเลย ส่วน i คือกระแสพัลส์เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วน การเกิดปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนอธิบายได้ดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนค่อยๆ เพิ่มขึ้นแรงดันคร่อมโพรงอากาศก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามด้วย เมื่อถึงค่าแรงดันวิกฤติของโพรงอากาศก็จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโพรงอากาศลดลงเหลือ V_r และเกิดพัลส์ของกระแสขึ้น ในขณะที่แรงดันคร่อมฉนวนยังเพิ่มขึ้น แรงดันคร่อมโพรงอากาศก็จะถูกชาร์จเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่าวิกฤติ และก็จะเกิดการปล่อยประจุขึ้นอีก อีกทั้งยังจะเกิดซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศจะอยู่ในช่วงขาลง จนทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันวิกฤติของอากาศ แต่เมื่อแรงดันลดลงเรื่อยๆ จนอยู่ในช่วงไซเคิลลบ โพรงอากาศก็จะถูกชาร์จจนแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ทิศทางของแรงดันในโพรงอากาศจะตรงกันข้ามกับเมื่อแรงดันอยู่ในไซเคิลบวก เมื่อแรงดันในโพรงอากาศถูกชาร์จจนเกินค่าแรงดันวิกฤติของ

โพรงอากาศก็จะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน และเกิดกระแสพัลส์ในทิศทางตรงข้ามกับแรงดันในช่วงไซเคิลบวกเช่นกัน และการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ เหมือนกับในช่วงไซเคิลบวก จากทฤษฎีจะเห็นว่า การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 0 ถึง 90 องศาของแรงดันในไซเคิลบวก และเกิดในช่วงมุมเฟส 180 ถึง 270 องศาของแรงดันในไซเคิลลบ ดังรูปที่ 3.3 การปล่อยประจุบางส่วนในช่วงแรงดันไฟฟ้าไซเคิลบวกจะเรียกว่า พัลส์ขั้วลบ (Negative Polarity Pulses) เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดพัลส์ในทิศทางขาลง และการปล่อยประจุบางส่วนในช่วงแรงดันไฟฟ้าไซเคิลลบเรียกว่า พัลส์ขั้วบวก (Positive Polarity Pulses) ซึ่งเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดพัลส์ในทิศทางขาขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



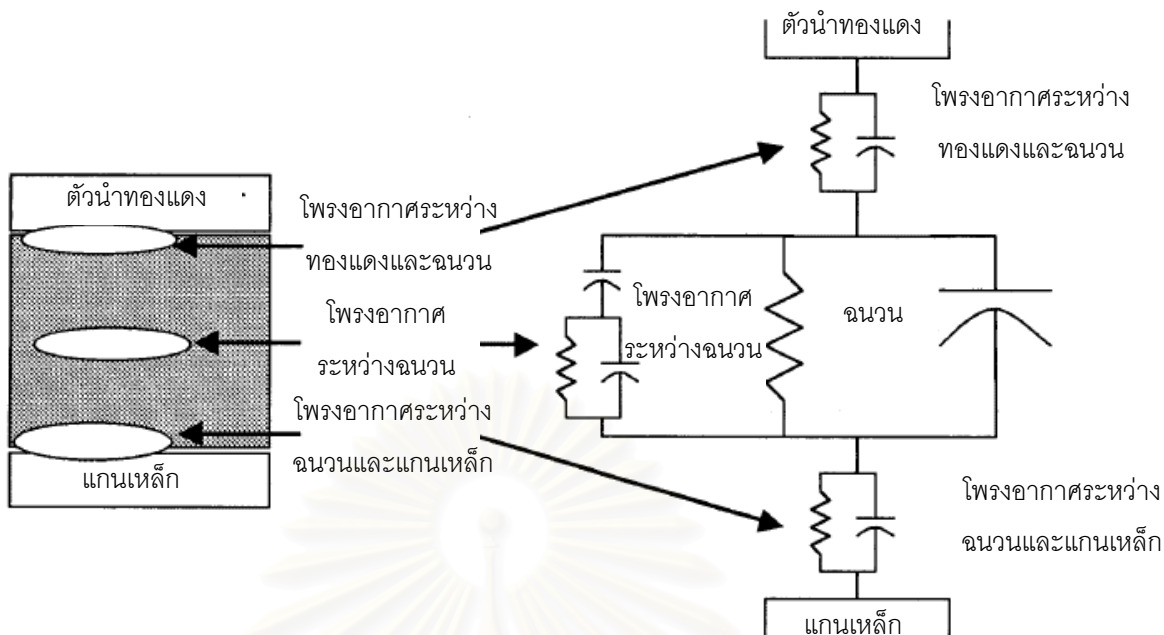
รูปที่ 3.3 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในจตุภาคที่หนึ่งและสาม



รูปที่ 3.4 แสดงพัลส์ซั้วบวก และ พัลส์ซั้วลบ

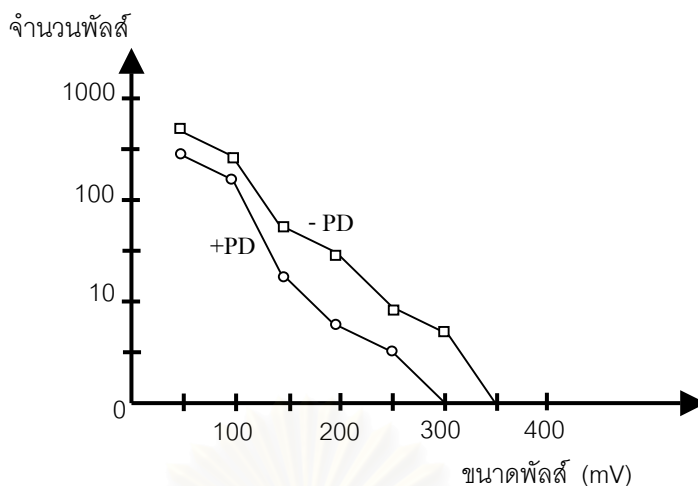
3.2 พฤติกรรมของการปล่อยประจุบางส่วน

การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบอาจจะมีค่าเท่ากัน หรืออาจมีค่าแตกต่างกันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน โดยแบบจำลองจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโพรงอากาศในฉนวน รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆของฉนวน ตำแหน่งของโพรงอากาศจะมีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งของโพรงอากาศสามตำแหน่ง ตำแหน่งแรกคือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะตัวนำและฉนวน ตำแหน่งที่สองคือโพรงอากาศเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน และตำแหน่งที่สามคือโพรงอากาศเกิดขึ้นระหว่างผิวฉนวนและแกนเหล็ก วงจรสมมูลของฉนวนและโพรงอากาศสามารถแทนได้ด้วยตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นแบบจำลองทั้งสามกรณีสามารถเขียนแทนด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุได้



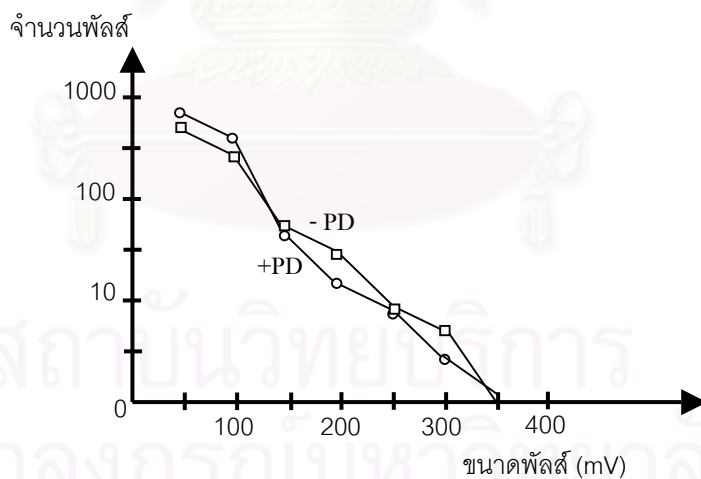
รูปที่ 3.5 แบบจำลองการปล่อยประจุบางส่วนจากระบบฉนวน

การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดที่สำคัญอีกประการก็คือ ตำแหน่งของโพรงอากาศ เนื่องจากโพรงอากาศที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆกัน วัสดุที่ทำหน้าที่เป็น แคโทด (ขั้วลบ) และ แอโนด (ขั้วบวก) ก็จะแตกต่างกันด้วย กระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนขึ้น วัสดุต่างชนิดกันก็จะมีความสามารถในการจ่ายอิเล็กตรอนแตกต่างกันไป วัสดุที่ทำหน้าที่ในการจ่ายอิเล็กตรอนในเครื่องจักรชนิดหมุนนั้นจะมีอยู่สองชนิดคือ ฉนวนและแท่งโลหะตัวนำหรือแกนสเตเตอร์ ซึ่งฉนวนจะมีความสามารถในการจ่ายอิเล็กตรอนได้ดีกว่าแท่งโลหะตัวนำหรือแกนสเตเตอร์ รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ขั้วบวก พัลส์ขั้วลบ และฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดหรือแอโนด ฉนวนจะทำหน้าที่แบบไหนขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโพรงอากาศและแรงดันตกคร่อมขณะนั้นว่าอยู่ในช่วงไซเคิลบวกหรือลบ



รูปที่ 3.7 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่วลบเด่นกว่า

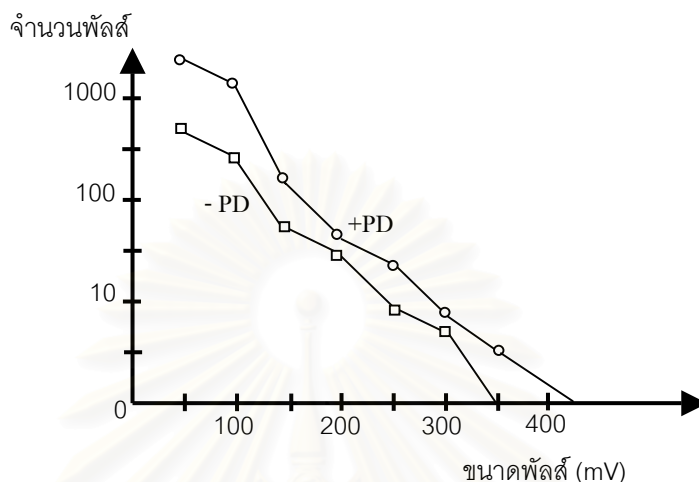
โพรงอากาศที่เกิดระหว่างฉนวน โพรงอากาศที่เกิดในตำแหน่งนี้เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบจะมีผลเหมือนกันคือ ฉนวนจะทำหน้าที่เป็นทั้งแคโทดและแอโนดเนื่องจากโพรงอากาศแทรกอยู่กลางเนื้อฉนวนนั่นเอง วัสดุที่ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนจึงมีเพียงแต่ฉนวนเท่านั้น ดังนั้นพัลส์ชั่วบวกและพัลส์ชั่วลบจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่วบวก และ พัลส์ชั่วลบใกล้เคียงกัน

โพรงอากาศที่เกิดบริเวณผิวฉนวนและแกนโลหะ เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลบวก ฉนวนจะทำหน้าที่เป็นแอโนดและแกนโลหะจะทำหน้าที่เป็นแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนในระหว่างการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน แต่เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลลบฉนวนและแกนโลหะจะทำหน้าที่ตรงกันข้ามคือ ฉนวนจะทำหน้าที่เป็นแคโทดซึ่ง

จะจ่ายอิเล็กตรอนเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนและแกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังนั้น การปล่อยประจุบางส่วนในช่วงไซเคิลลบนี้จะเกิดมากกว่าการปล่อยประจุในช่วงไซเคิลบวกส่งผลให้พัลส์ชั่ววอกเด่นกว่าพัลส์ชั่วลบดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่ววอกเด่นกว่า

การวิเคราะห์ตำแหน่งการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยใช้การเปรียบเทียบ พัลส์ชั่ววอก และพัลส์ชั่วลบนี้ จะใช้ข้อมูลจากการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนโดยใช้ข้อมูลสองส่วนคือ ค่าขนาดของพัลส์ซึ่งอาจจะวัดในหน่วยมิลลิโวลต์ หรือพิโคคูลอมป์และความถี่ของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ขนาดพัลส์นั้นๆ โดยการนำข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพัลส์และความถี่ เพื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างพัลส์ชั่ววอก และพัลส์ชั่ววอก

3.3 การวัดการปล่อยประจุบางส่วน

การวัดการปล่อยประจุบางส่วน ทำโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่มีการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ในรูปของพัลส์ของกระแสไฟฟ้า การสูญเสียไดอิเล็กตริก การเปล่งแสง เสียง ความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น หรือปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น[20] ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้วัดวัดสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนจึงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นที่จะนำมาใช้ตรวจสอบสัญญาณ และวิธีในการตรวจสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนก็มีหลายวิธีซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้ [20]

1) วิธีที่ใช้สังเกตพฤติกรรมของการปล่อยประจุบางส่วนเบื้องต้นโดยการฟังเสียงที่เกิดขึ้น การตรวจสอบการปล่อยประจุบางส่วนโดยวิธีการตรวจวัดเสียงที่เกิดขึ้น (Hissing Test) วิธีนี้เน้น

เป็นวิธีที่ง่าย แต่ก็มีคามแม่นยำน้อยและยากที่จะแยกแยะระหว่างเสียงที่เกิดจากปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนและสัญญาณเสียงรบกวนภายนอก

2) การวัดพลังงานการสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) คือการวัดอัตราส่วนของกระแสที่ผ่านค่าองค์ประกอบความต้านทานต่อกระแสที่ผ่านองค์ประกอบตัวเก็บประจุในเนื้อฉนวน หรือที่เรียกว่าการวัดค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสีย (Dissipation Factor) เป็นวิธีการทดสอบหนึ่งที่ใช้สังเกตการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ โดยทั่วไป $\tan \delta$ จะมีค่าน้อยและไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแต่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนถึงระดับหนึ่งจะพบการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในฉนวนทดสอบ ทำให้กระแสไหลผ่านองค์ประกอบความต้านทานเพิ่มขึ้น

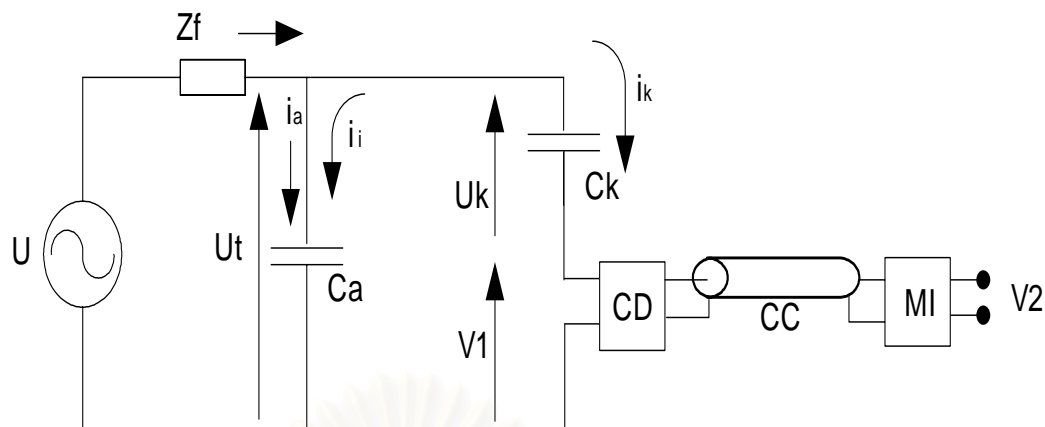
3) การตรวจสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยการตรวจวัดแสง วิธีการนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ตรวจวัดได้แต่จะมีข้อจำกัดคือ วัสดุที่ทดสอบต้องโปร่งแสงจึงจะสังเกตเห็นการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงใช้ในกรณีทั่วไปไม่ได้

4) การตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของความดันก๊าซและปฏิกิริยาเคมี มีข้อจำกัดคือ การเปลี่ยนแปลงจะต้องใช้ระยะเวลานาน จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ตรวจสอบการปล่อยประจุบางส่วน

5) การตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมตามมาตรฐานของ IEC โดยการใช้การตรวจวัดสัญญาณอิมพัลส์ของกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน เป็นวิธีที่มีความไวสูง สามารถติดตามการเกิดและการเปลี่ยนแปลงการปล่อยประจุบางส่วนได้อย่างรวดเร็ว และค่าที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน

3.4 หลักการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนโดยวิธีทางไฟฟ้า

การตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60270[21] วงจรวัดจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test Object) C_a ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting Cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring Instrument) MI ดังรูปที่ 3.10 [2]



รูปที่ 3.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วน

อุปกรณ์ในรูปที่ 3.10 แต่ละส่วนจะมีหน้าที่การทำงานในวงจรดังต่อไปนี้

1) แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ U จะทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับวงจรทดสอบซึ่งมักจะใช้หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือเป็นหม้อแปลงปลอดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge Free)

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f จะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ เช่น ฮาร์โมนิกส์ และสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเนื่องจากตัวกรองสัญญาณ Z_f มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ จะยอมให้สัญญาณจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบความถี่ต่ำผ่านไปได้นั้น แต่สัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนซึ่งมีความถี่สูงไม่สามารถผ่านไปได้อันจะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนจากด้านวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบผ่านทางตัวกรองสัญญาณนี้ ในกรณีที่ใช้หม้อแปลงปลอดการปล่อยประจุบางส่วนอาจไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองสัญญาณเนื่องจากตัวหม้อแปลงเองก็มีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำภายในตัวเองอยู่แล้ว

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ทำหน้าที่เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a , C_k และ CD เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ ตัวเก็บประจุคัปปลิงจะต้องมีคุณสมบัติปลอดการปล่อยประจุในช่วงแรงดันที่ทำการทดสอบ และมีความเหนียวภายในต่ำ

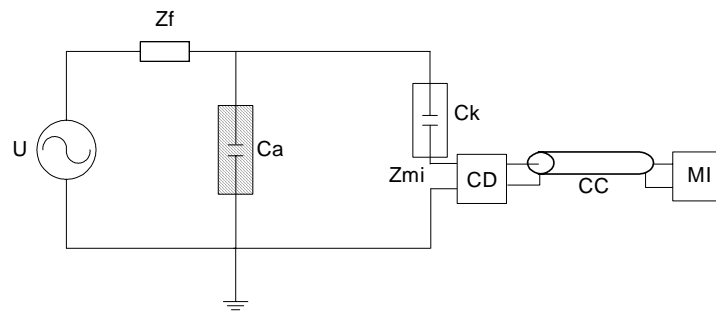
4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่ร่วมกันในการคำนวณค่าที่เกิดจากการปล่อยประจุในวัสดุทดสอบโดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i ที่เกิดขึ้นในวงจร สายนำสัญญาณ CC จะทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณจาก CD ไป MI นอกจากนี้อุปกรณ์รับสัญญาณ

จะทำหน้าที่พิเศษอีกอย่างหนึ่งคือจะกรองกระแสความถี่ต่ำ 50 – 400 เฮิร์ตซ์ และฮาร์โมนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเข้าไปที่เครื่องมือวัด ส่วน MI จะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ ทำหน้าที่เป็นภาคขยายสัญญาณ เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ (Band Pass Filter) เพื่อกรองสัญญาณความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และกรองสัญญาณความถี่สูงจากสัญญาณคลื่นวิทยุ หน้าที่ประการสุดท้ายคือเป็นอุปกรณ์สำหรับแสดงผลการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

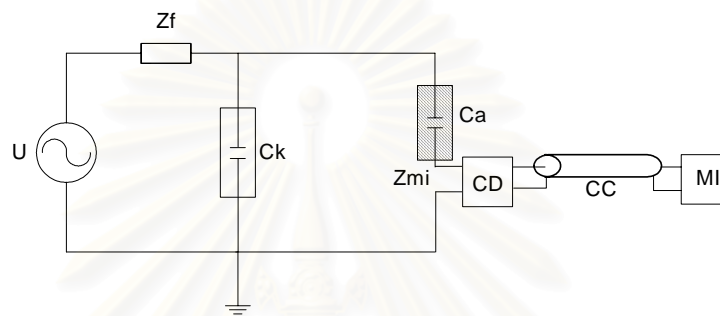
การตรวจจับสัญญาณที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนในวัสดุทดสอบนั้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรทดสอบผ่านตัวกรอง Z_f ค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในวัสดุที่ทดสอบ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบ C_a ตกลงเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k จะทำหน้าที่ชดเชยแรงดันโดยการปล่อยประจุไปที่ C_a ทำให้ครบวงจรและเกิดกระแสพัลส์ไหลวนในวงจรซึ่งประกอบด้วย C_a , C_k และ CD ส่วนทางด้านตัวกรอง Z_f และแหล่งจ่ายแรงดันจะถูกรวมว่าเป็นวงจรเปิด เนื่องจากขณะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนอิมพีแดนซ์ของวงจรกรอง Z_f จะมีค่าสูงมาก ส่วน CD และ MI จะทำการวัดขนาดประจุที่ถ่ายเทจาก C_k ไป C_a โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ที่เกิดขึ้น

การแสดงผลหรือวัดผลการปล่อยประจุบางส่วนสามารถทำได้ทั้งทางมิเตอร์ จอภาพของออสซิลโลสโคป และทางเครื่องบันทึก[2] ค่าที่แสดงจะแสดงในเทอมของประจุที่ปรากฏ หรือขนาดของการปล่อยประจุ ซึ่งมีหน่วยเป็นพิโคคูลอมป์ (pC) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับการปล่อยประจุ V_2 จะมีขนาดเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดประจุที่ปล่อยออกมา ดังนั้นค่ายอดของ V_2 คือ $V_{2(\text{peak})}$ จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดประจุที่ปล่อยออกมาด้วย ดังนั้นการอ่านค่าประจุที่ปล่อยออกมาจึงนิยมอ่านจากค่ายอดของ V_2 ซึ่งอ่านได้จากจอภาพออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์อ่านค่ายอดก็ได้ ในรูปที่ 3.11 แสดงวงจรทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ

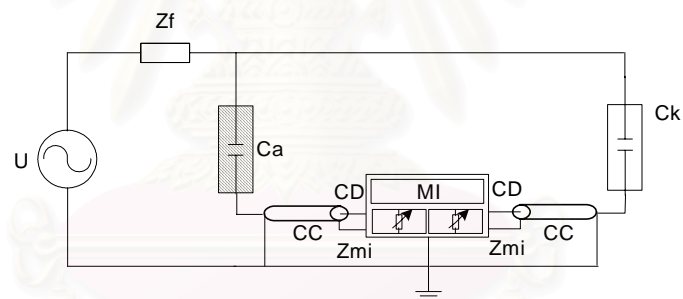
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



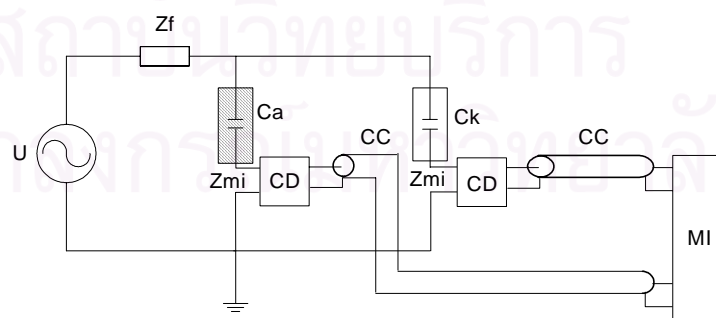
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 3.11 วงจรทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ

3.5 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นวิธีการที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ว่าเป็นวิธีการเหมาะสมสำหรับการนำไปประเมินสภาพฉนวน และพิสูจน์จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากการทดสอบสามารถนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพของฉนวนได้ดีวิธีการหนึ่ง เนื่องมาจากสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนส่วนหนึ่งเป็นผลโดยตรงที่เกิดจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในบริเวณของฉนวนที่มีจุดบกพร่องอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน สามารถทดสอบได้ทั้งขณะที่อุปกรณ์ใช้งานอยู่ (On-line Partial Discharge) หรือทดสอบขณะอุปกรณ์ไม่ได้นำเข้าไปใช้งาน (Off-line Partial Discharge) ก็ได้ การทดสอบทั้งสองวิธีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการจะเลือกทดสอบอุปกรณ์ด้วยวิธีไหนก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดสอบ และเวลาที่เอื้ออำนวยต่อการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดสอบทั้งสองวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป [22] ดังนั้นถ้าสามารถทำการทดสอบได้ทั้งสองวิธีควบคู่กันไปก็จะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น

3.5.1 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์ (Online Partial Discharge)

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์นั้นคือการทดสอบขณะนำอุปกรณ์เข้าไปใช้งานเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาทดสอบและติดตามการเสื่อมสภาพของฉนวนในเครื่องจักรชนิดหมุน เพราะข้อดีของวิธีการนี้ก็คือสามารถเก็บข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนได้โดยไม่ต้องรอจังหวะให้อุปกรณ์หยุดเดินเครื่อง ดังนั้นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนจะทำการติดตั้งไว้ตั้งแต่เริ่มติดตั้งเครื่องจักรกลหมุน ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทุกเวลาที่ต้องการ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือในการตรวจวัดการปล่อยประจุบางส่วนมากมายหลายแบบให้สามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ สามารถที่จะเก็บข้อมูลการทดสอบได้อย่างต่อเนื่องหรือเก็บข้อมูลเป็นช่วงเวลา ทำให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการนำมาวิเคราะห์ดูแนวโน้มการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งประโยชน์ข้อนี้นับเป็นประโยชน์หลักของการทดสอบโดยวิธีนี้เลยทีเดียว เนื่องจากการวิเคราะห์ดูแนวโน้มการเสื่อมสภาพของฉนวนอย่างต่อเนื่องจะเป็นเครื่องเตือนปัญหาที่จะเกิดขึ้น และเมื่อทราบปัญหาแต่เนิ่นๆก็จะสามารถทำให้วางแผนในการซ่อมบำรุงได้อย่างถูกต้อง ลดความเสี่ยง และความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์

แม้ว่าการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์จะมีประโยชน์อย่างมาก ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแต่การทดสอบโดยวิธีนี้ก็ยังมีปัญหาอยู่มากมาย เช่น ปัญหาสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า การลดทอนของสัญญาณ และแบนวิดท์

3.5.1.1 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า

การทดสอบแบบออนไลน์เป็นการทดสอบที่มีประโยชน์มากวิธีหนึ่ง แต่ผลเสียของการทดสอบด้วยวิธีนี้ก็คือปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า เนื่องจากการทดสอบแบบนี้จะทำการทดสอบขณะอุปกรณ์ใช้งานอยู่ ดังนั้นสัญญาณรบกวนจึงอาจมาได้จากหลายๆแหล่งโดยเฉพาะเกิดจากตัวอุปกรณ์เองซึ่งเกิดการปล่อยประจุจากเฟสข้างเคียง แต่อุปกรณ์ตรวจจับของอีกเฟสก็ตรวจจับได้ด้วยทั้งที่อาจจะไม่มีการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ของเฟสนั้นเลย ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบแบบออนไลน์จึงมีความซับซ้อนมาก ต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์สูงในการวิเคราะห์

3.5.1.2 แบนวิดธ์

ความถี่ของพัลส์การปล่อยประจุบางส่วนขึ้นอยู่กับ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) และความกว้างของพัลส์ (Pulse Width) แหล่งกำเนิดการปล่อยประจุบางส่วนแต่ละตำแหน่งจะกำเนิดพัลส์ที่มีลักษณะเฉพาะกับตำแหน่งนั้นๆ ความถี่ของสัญญาณก็จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและขนาดของโพรงอากาศด้วย ดังนั้นเมื่อฉนวนมีการเสื่อมสภาพมากขึ้นขนาดของโพรงอากาศในฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้สัญญาณที่วัดได้มีความถี่เปลี่ยนแปลงออกไป ดังนั้นในการวัดสัญญาณของการปล่อยประจุที่เกิดขึ้นต้องคำนึงถึงแบนวิดธ์ของตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) และตัวเครื่องมือวัดด้วย เนื่องจากสัญญาณพัลส์ที่เกิดนอกแบนวิดธ์จะถูกลดทอนและละลายไป การทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์นั้นโดยส่วนมากมักจะถูกจำกัดโดยแบนวิดธ์ของระบบตรวจวัด ดังนั้นข้อมูลการทดสอบที่ได้ก็จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

3.5.1.3 การลดทอนและการสะท้อนของสัญญาณ

ในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนเมื่อเกิดพัลส์การปล่อยประจุบางส่วนที่มีความถี่สูงจะมีการลดทอนสัญญาณเนื่องจากขดลวดแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำ เมื่อสัญญาณพัลส์ที่เกิดมีความถี่สูงอิมพีแดนซ์ก็จะมีค่าสูงตาม ทำให้สัญญาณที่เคลื่อนสู่วงจรวัดถูกลดทอนลงไปมาก และในกรณีของสัญญาณที่เคลื่อนผ่านอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อที่ไม่สอดคล้องกันก็จะทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ และในขณะเดียวกันก็จะเกิดการสะท้อนบริเวณรอยต่อนั้นๆด้วย ทำให้สัญญาณที่วัดได้มีความผิดพลาดเพิ่มยิ่งขึ้น

3.5.2 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออฟไลน์ (Offline Partial Discharge)

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออฟไลน์คือ การทดสอบขณะอุปกรณ์ไม่ได้ใช้งาน แตกต่างกับการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์คือ ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันไฟ

ฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกขณะทำการทดสอบ และข้อมูลที่ได้อีกก็จะมีแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบแรกด้วยเนื่องจากผลการทดสอบที่ได้จะให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ที่แตกต่างไปด้วย วิธีการทดสอบวิธีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งสรุปได้ดังนี้

3.5.2.1 ข้อเสียของการทดสอบแบบออฟไลน์

1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบแบบนี้ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งต่างจากการทดสอบแบบแรกทำให้การทดสอบการเก็บข้อมูลค่อนข้างยุ่งยากใช้เวลานาน และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากกว่า

2) สภาวะแวดล้อมในการทดสอบ

เนื่องจากการการทดสอบทำขณะอุปกรณ์หยุดเดินเครื่อง ดังนั้นสภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และความชื้น จึงแตกต่างจากสภาวะการใช้งานจริง สภาวะแวดล้อมเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุทั้งสิ้น และในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์หลวม ผลเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้สเตเตอร์สั่นสะเทือน ระยะช่องว่างระหว่างแกนเหล็กสเตเตอร์และผิวฉนวนของสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในร่องสลิตชัดเจน แต่ในกรณีการทดสอบอุปกรณ์แบบออฟไลน์จะไม่มีผลเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอาจจะไม่เห็นผลของการปล่อยประจุบางส่วนในร่องสลิตได้ชัดเจน

3) การเสี่ยงต่อความเสียหาย

ในการทดสอบแบบออฟไลน์ทุกส่วนของขดลวดสเตเตอร์จะได้รับแรงดันเท่าแรงดันที่จ่ายจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก แต่ในภาวะความเป็นจริงขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนใกล้นิวทรัล (Neutral) จะมีระดับแรงดันต่ำและจะไล่ระดับแรงดันสูงขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงระดับแรงดันพิกัด ดังนั้นการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับขดลวดที่มีอายุการใช้งานมานานจะเสี่ยงต่อความเสียหายได้ เนื่องจากขดลวดบริเวณใกล้นิวทรัลต้องมารับแรงดันเท่าแรงดันพิกัด

3.5.2.2 ข้อดีของการทดสอบแบบออฟไลน์

1) สัญญาณรบกวนน้อย

เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆจะถูกแยกออกจากอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ และสัญญาณรบกวนภายในเช่น การเกิดประกายไฟบริเวณแปรงถ่านก็จะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นสัญญาณรบกวนจะน้อยกว่าการทดสอบแบบออนไลน์

2) ไม่มีผลของสัญญาณรบกวนระหว่างเฟส

ในขณะที่ทำการทดสอบจะจ่ายแรงดันครั้งละเฟสเท่านั้น อีกสองเฟสที่เหลือจะถูกต่อลงกราวด์ไว้ดังนั้นก็ไม่มีผลจากสัญญาณรบกวนระหว่างเฟส ทำให้ง่ายต่อการนำข้อมูลมาวิเคราะห์

3.6 วิธีการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่ได้รับความนิยม

วิธีการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge Test) ทำได้หลายวิธีแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเก็บข้อมูลโดยวิธีการทางไฟฟ้าเท่านั้นซึ่งก็มีหลายวิธีด้วยกัน การทดสอบและการวิเคราะห์การปล่อยประจุบางส่วนทางไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมมีดังนี้

1) Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) คือการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันที่ทำให้เริ่มปล่อยประจุบางส่วน ในการทดสอบเมื่อเพิ่มระดับแรงดันถึงค่าหนึ่งจะเกิดการปล่อยประจุขึ้นในขดลวดสเตเตอร์จนวนที่อยู่ในสภาพดีจะมีค่า PDIV สูงแต่เมื่อจนวนเสื่อมสภาพลงค่า PDIV จะมีค่าต่ำลง

2) Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV) คือการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันที่ทำให้การปล่อยประจุบางส่วนหายไปวิธีการทดสอบนี้จะทำลักษณะเดียวกับการทดสอบแบบแรก แต่จะค่อยๆลดระดับแรงดันจนกระทั่งสังเกตว่าการปล่อยประจุบางส่วนหายไปซึ่งค่า PDEV จะมีค่าต่ำลงเมื่อจนวนเสื่อมสภาพลง

3) Maximum Discharge (Q_{max}) การทดสอบหาค่าการปล่อยประจุสูงสุดวิธีนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากแต่ก็มีข้อเสียเช่นกัน เนื่องจากการทดสอบโดยวิธีนี้จะตรวจจับและแสดงผลพัลส์การปล่อยประจุบางส่วนที่สูงที่สุดเพียงพัลส์เดียวโดยไม่สนใจพัลส์อื่นๆที่เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าสัญญาณรบกวนมีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณที่เกิดจากวัสดุทดสอบก็จะได้ค่าผิดพลาดได้ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจนวนเสื่อมสภาพลง

4) Normalized Quantity Number (NQN) คือการวัดค่าการปล่อยประจุบางส่วนโดยกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่นิยามตามสมการดังนี้

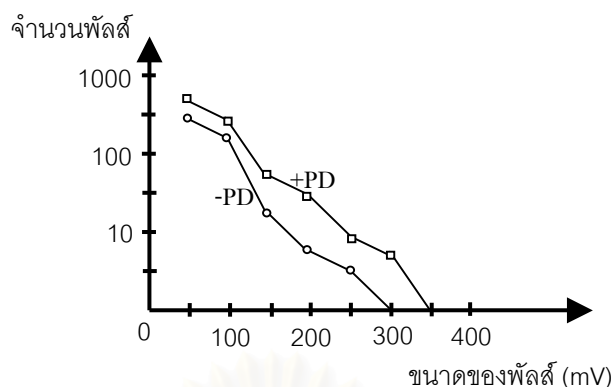
$$NQN = \frac{FS}{GN} \cdot \left[\log_{10} P_1 + \sum_{i=1}^{N-1} \log_{10} P_i + \frac{\log_{10} P_N}{2} \right] \quad (3.1)$$

P_i คือจำนวนพัลส์ต่อ 1 วินาทีในช่วงขนาดพัลส์ ลำดับที่ i

N คือจำนวนช่วงขนาดพัลส์ทั้งหมด

G คือค่าอัตราขยายที่ใช้ในการวัด

FS คือค่าขนาดของพัลส์สูงสุดในหน่วยมิลลิโวลต์เมื่ออัตราขยายเท่ากับหนึ่ง

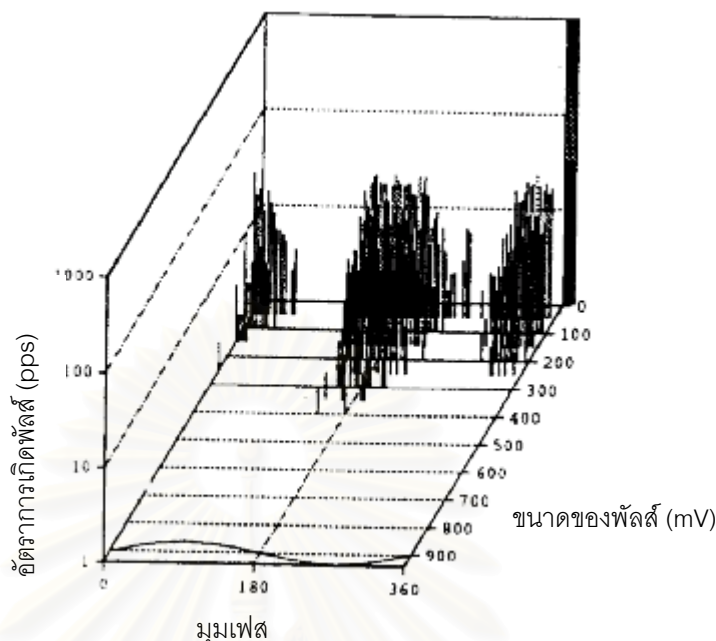


รูปที่ 3.12 การกระจายขนาดพัลส์

ค่า NQN เมื่อพิจารณาจากสมการข้างต้นก็จะพบว่าคือพื้นที่ใต้กราฟจากรูปที่ 3.12 นั่นเอง โดยกำหนดสเกลของจำนวนพัลส์เป็นสเกลแบบล็อก

จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการแปลความหมายของการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่นิยมใช้มานาน แต่ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์และไมโครโปรเซสเซอร์ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือสำหรับใช้เก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนของปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งสามารถเก็บค่าเฟสของพัลส์ที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบเดิมๆ 4 แบบดังที่กล่าวมาข้างต้น จะมีการเก็บทั้งค่าขนาดของพัลส์ (q) เฟส (ϕ) และจำนวนพัลส์ (n) ที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาแสดงในรูปแบบของ Phase Resolved Pattern ซึ่งจะแสดงแบบแผนต่างๆของความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดพัลส์ที่มุมเฟสและขนาดของพัลส์ต่างๆกัน (q, ϕ, n) ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าสนใจและมีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 การกระจาย Phase Resolved Pattern

จากรูปแบบการเก็บข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบ และมีความน่าสนใจดังนี้

1) การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์และขนาดของพัลส์

n - q Characteristic คือการดูรูปแบบการกระจายข้อมูลของพัลส์ที่มีขนาดประจุต่างๆ โดย n และ q คือค่า จำนวนพัลส์และขนาดของพัลส์ที่เกิดขึ้น ตามลำดับ

2) การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยจำนวนพัลส์และมุมเฟส

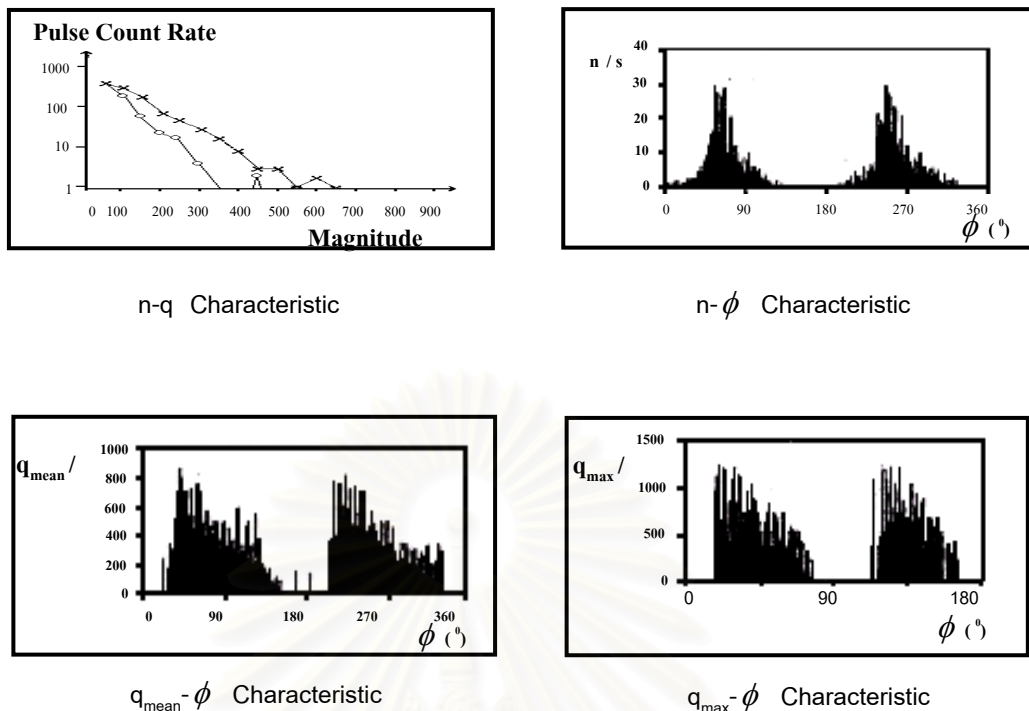
n - ϕ Characteristic คือการดูรูปแบบการกระจายข้อมูลที่มุมเฟสต่างๆ โดย n คือค่าเฉลี่ยของจำนวนพัลส์ทั้งหมดในแต่ละช่วงเฟสต่อจำนวนไซเคิลทั้งหมดของแรงดันไฟฟ้า ภายในระยะเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล และ ϕ คือมุมเฟสทางไฟฟ้าซึ่งแบ่งเป็นช่วงเท่าๆกัน

3) การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุเฉลี่ยและมุมเฟส

q_{mean} - ϕ Characteristic คือการดูลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุเฉลี่ย (q_{mean}) ในแต่ละช่วงเฟสกับค่ามุมเฟสทางไฟฟ้า (ϕ)

4) การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุสูงสุดและค่ามุมเฟส

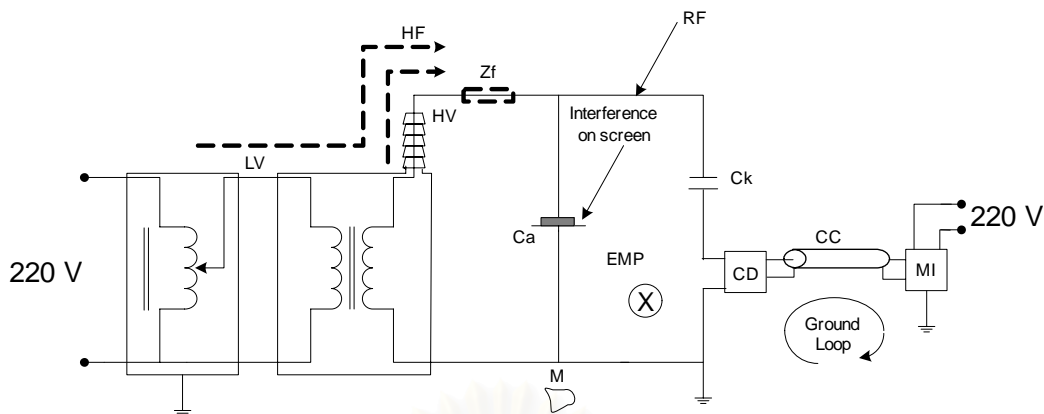
q_{max} - ϕ Characteristic คือการดูลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุสูงสุด (q_{max}) ในช่วงเฟสต่างๆกับค่ามุมเฟสทางไฟฟ้า (ϕ)



รูปที่ 3.14 รูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ

3.7 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า

การลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเป็นเรื่องที่จำเป็นมากในการทดสอบแบบออนไลน์ เนื่องจากการทดสอบโดยวิธีนี้จะมีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนอย่างมาก สัญญาณรบกวนนี้อาจมาจากแหล่งภายนอกเช่นการสวิตชิงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นรอบข้าง สัญญาณคลื่นวิทยุ เครื่องใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า สัญญาณรบกวนที่เกิดจากโลหะที่อยู่ใกล้วงจรทดสอบไม่ได้ต่อกราวด์ การเกิดกราวด์ลูปและเกิดสัญญาณฮอสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม หรือแม้กระทั่งสัญญาณรบกวนในตัวอุปกรณ์เครื่องมือวัดเอง เป็นต้น ซึ่งสัญญาณรบกวนประเภทนี้จะสังเกตได้จากสัญญาณที่ตรวจจับได้ ขณะที่ยังไม่ได้จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบ ส่วนสัญญาณรบกวนอีกประเภทรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบแล้ว แต่ไม่ใช่สัญญาณซึ่งเกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนในอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ สัญญาณรบกวนประเภทนี้ เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดในหม้อแปลงไฟฟ้า สัญญาณรบกวนที่เกิดในบูชชิง หรือตัวนำไฟฟ้าแรงสูง สัญญาณรบกวนต่างๆเหล่านี้จะมีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมาก ดังนั้นการทดสอบจึงต้องมีเทคนิคพิเศษเพื่อการลดสัญญาณรบกวนดังกล่าว



รูปที่ 3.15 สัญญาณรบกวนจากแหล่งต่างๆ

3.7.1 การตรวจสอบสัญญาณรบกวน

การตรวจสอบสัญญาณรบกวน สำหรับสัญญาณรบกวนที่ไม่ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรทดสอบ ทำได้โดยอ่านจากเครื่องมือวัดขณะที่ไม่ได้จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบสัญญาณที่อ่านได้คือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ส่วนสัญญาณไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามารถตรวจสอบได้โดยการเปลี่ยนเอาอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ หรือแทนที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยตัวเก็บประจุที่ไม่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน ดังนั้นสัญญาณที่อ่านได้ก็จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

3.7.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณรบกวนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า การต่อวงจรแบบสมดุล (Balanced Circuit) ซึ่งจะใช้ในการหักล้างการปล่อยประจุบางส่วนที่มาจากแหล่งอื่น ทำให้สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบเพียงแหล่งเดียว แต่โดยทั่วๆ ไปการลดสัญญาณรบกวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบในห้องซีลด์ แต่วิธีนี้เหมาะสมจะใช้กับการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นอุปกรณ์หรือวัสดุทดสอบขนาดเล็กเท่านั้น การลดสัญญาณรบกวนอีกวิธีที่ได้รับความนิยมและได้ผลดีอีกวิธีหนึ่งคือการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแบ่งแยกย่อยอีกหลายวิธีดังนี้[20,26]

1) วิธีหน้าต่างเวลา (Time Window Method)

เนื่องจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดขึ้นในมุมเฟสทางไฟฟ้าบางช่วงเท่านั้น ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นว่า การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 0 ถึง 90 องศาของแรงดันในไซเคิลบวก และเกิดในช่วงมุมเฟส 180 ถึง 270 องศาของแรงดันในไซเคิลลบ ดังนั้นพัลส์ที่เกิดในช่วงมุมเฟสอื่นจึงเป็นพัลส์ของสัญญาณรบกวน การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธีนี้จึง

เลือกที่จะกรองสัญญาณในช่วงมูฟเฟสที่ไม่ได้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนทิ้งไป และปล่อยให้สัญญาณผ่านออกไปสู่วงจรวัดในช่วงมูฟเฟสที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเท่านั้น

2) วิธีแยกขั้ว (Polarity Discrimination Method)

การลดสัญญาณรบกวนที่อาจทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการใช้วิธีแยกขั้ว (Polarity) ของพัลส์ที่เกิดขึ้นในอิมพีแดนซ์วัด (Measured Impedance, Z_m) วงจรทดสอบจะใช้วงจรตามรูป 3.11 ง) ซึ่งจะใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ CD สองตัวเพื่อทำการรับสัญญาณแล้วใช้การเปรียบเทียบขั้วของพัลส์ที่เกิดขึ้น ถ้าพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากภายนอกขั้วของพัลส์ที่เกิดขึ้นจะเหมือนกัน และจะไม่นับพัลส์นั้น แต่ถ้าขั้วของพัลส์ต่างกันแสดงว่าเป็นพัลส์ของสัญญาณที่เกิดจากวัสดุทดสอบ

3) วิธีเฉลี่ยพัลส์ (Pulse Averaging)

การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธีนี้ทำโดยอาศัยหลักการคือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจัดเป็นสัญญาณแบบสุ่ม (Random Signal) และสัญญาณที่เกิดจากการปล่อยประจุจริงก็ประมาณได้ว่าจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาเดิมในแต่ละไซเคิลของแรงดัน ดังนั้นจึงใช้เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนโดยการนำค่าสัญญาณในแต่ละช่วงมูฟเฟสมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนให้น้อยลง

4) วิธีเลือกความถี่ (Frequency Selection)

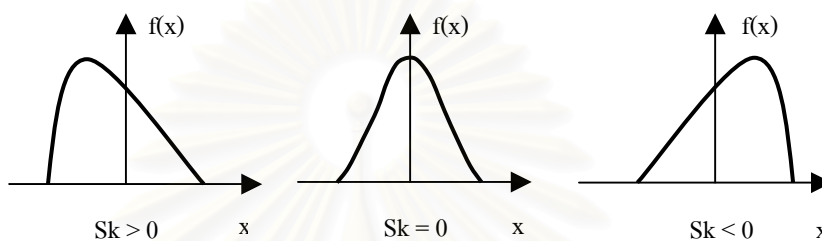
แหล่งสัญญาณรบกวนที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งคือสัญญาณคลื่นวิทยุ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเครื่องมือตรวจวัดการปล่อยประจุบางส่วนแบบแถบกว้าง เนื่องจากแบนด์วิดท์ของเครื่องมือวัดจะครอบคลุมแบนด์วิดท์ของสัญญาณคลื่นวิทยุด้วย แต่สำหรับเครื่องมือตรวจวัดการปล่อยประจุบางส่วนแบบแถบแคบ จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ โดยการเลือกใช้ช่วงความถี่ที่ไม่ไปซ้อนทับกับความถี่ของสัญญาณคลื่นวิทยุ แต่การเลือกใช้เครื่องมือวัดแบบแถบแคบก็จะให้ผลการทดสอบผิดเพี้ยนจากสัญญาณจริงไปบ้าง

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนด้วยวิธีการทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนด้วยวิธีการทางสถิติ มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ด้วยวิธีการแปลความหมายข้อมูลโดยวิธีการทางสถิติทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่มีนัยสำคัญ สามารถนำไปใช้ในการประเมินสภาพของฉนวนได้เป็นอย่างดี วิธีการทางสถิติที่สำคัญมีดังนี้

1) ค่า Skewness (Sk)

ค่า Sk เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้พิจารณาความไม่สมมาตรของรูปแบบการกระจายข้อมูล เมื่อเทียบกับการกระจายข้อมูลแบบ Normal ซึ่งเป็นรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบหนึ่งที่มีความสมมาตรซึ่งจะมีค่า Sk เท่ากับศูนย์ ในกรณีที่ข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายอยู่ทางด้านซ้าย ค่า Sk จะมีค่ามากกว่าศูนย์ และในทางตรงข้ามถ้าข้อมูลส่วนใหญ่กระจายอยู่ทางด้านขวา ค่า Sk จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์



(การกระจายข้อมูลแบบ Normal)

รูปที่ 3.16 รูปแบบการกระจายข้อมูลที่มีค่า Sk แบบต่างๆ

ค่า Sk นิยามโดยสมการต่อไปนี้

$$Sk = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\sigma^3 \cdot \sum_{i=1}^N p_i} \quad (3.2)$$

โดย q_i คือค่าพารามิเตอร์ของการปล่อยประจุบางส่วนในลำดับที่ i ซึ่งอาจเป็นค่าเฉลี่ยของขนาดประจุที่ปล่อย ($q_{\text{mean},i}$) ค่าขนาดประจุสูงสุด ($q_{\text{max},i}$) หรือจำนวนประจุที่ปล่อยออกมา (n) ส่วนค่า p_i คือค่า ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิด q_i ในช่วงเฟส ลำดับที่ i และ μ คือค่าเฉลี่ยของ q_i ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ 3.3

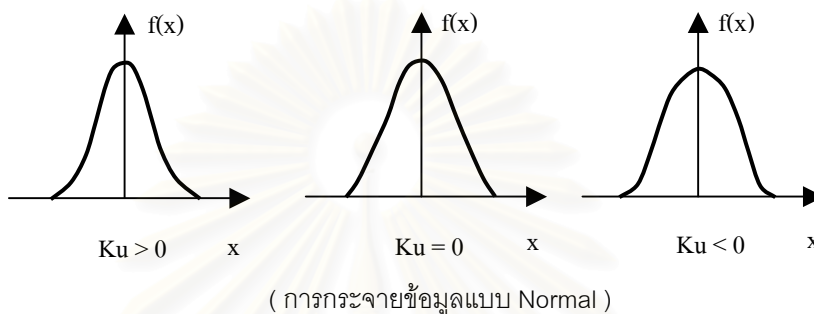
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N q_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (3.3)$$

σ คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ 3.4

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \mu)^2 \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (3.4)$$

2) ค่า Kurtosis (Ku)

ค่า Ku เป็นค่าที่ใช้พิจารณา Sharpness ของการกระจายข้อมูล การกระจายข้อมูลแบบ Normal ซึ่งจะมีค่า Ku เท่ากับศูนย์ กรณีการกระจายของข้อมูลมี Sharpness มากกว่าการกระจายแบบ Normal ค่า Ku จะมีค่ามากกว่าศูนย์ และในกรณีที่การกระจายของข้อมูลมีค่า Sharpness น้อยกว่าการกระจายข้อมูลแบบ Normal ค่า Ku จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.17 รูปแบบการกระจายข้อมูลที่มีค่า Ku แบบต่างๆ

ค่า Ku นิยามโดยสมการที่ 3.5 [23]

$$Ku = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\sigma^4 \cdot \sum_{i=1}^N p_i} \quad (3.5)$$

โดย q_i คือค่าพารามิเตอร์ของการปล่อยประจุบางส่วนในช่วงเฟสลำดับที่ i μ คือค่าเฉลี่ยของ q_i σ คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ q_i และ P_i คือค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่จะเกิด q_i

3) ค่า Cross Correlation (cc)

ค่า cc คือค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างรูปร่างของการกระจายข้อมูลในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ถ้า cc มีค่าเท่ากับหนึ่งแสดงว่า รูปแบบการกระจายข้อมูลของการปล่อยประจุบางส่วนในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบมีความสัมพันธ์กันแบบสมมาตร ร้อยเปอร์เซ็นต์ และถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่ารูปแบบการกระจายข้อมูลในไซเคิลบวกและลบไม่สัมพันธ์กันเลย

ค่า cc นิยามโดยสมการที่ 3.6 [23]

$$cc = \frac{\sum_{i=1}^N q_i^+ q_i^- - \sum_{i=1}^N q_i^+ \sum_{i=1}^N q_i^-}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (q_i^+)^2 - \left(\sum_{i=1}^N q_i^+ \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (q_i^-)^2 - \left(\sum_{i=1}^N q_i^- \right)^2 \right]}} \quad (3.6)$$

โดยที่ q_i^+ และ q_i^- เป็นพารามิเตอร์ของการปล่อยประจุบางส่วนในช่วงเฟสลำดับที่ i ในไซเคิลบวกและลบตามลำดับ

4) ค่าความไม่สมมาตรของการปล่อยประจุ (Discharge Asymmetry)

ค่าความไม่สมมาตรของการปล่อยประจุ (Q) คืออัตราส่วนค่าเฉลี่ยการปล่อยประจุในช่วงไซเคิลลบ ต่อค่าเฉลี่ยการปล่อยประจุช่วงไซเคิลบวก เมื่อ Q_s^- และ Q_s^+ คือผลบวกของค่าประจุของ $q_{\text{mean}} - \varphi$ Characteristic ในช่วงไซเคิลบวกและลบ ส่วน N^+ และ N^- คือจำนวนช่วงมุมเฟสในช่วงแรงดันไซเคิลบวกและลบตามลำดับ ค่าความไม่สมมาตรของการปล่อยประจุนิยามตามสมการที่ 3.7 [24]

$$Q = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+} \quad (3.7)$$

$$\text{โดยที่ } Q_s^- = \sum_{i=1}^{N^-} q_i^-$$

$$Q_s^+ = \sum_{i=1}^{N^+} q_i^+$$

5) ค่าแฟร็กทัล (Fractal)

การวิเคราะห์โดยค่าแฟร็กทัลเป็นการคำนวณคุณลักษณะของการกระจายข้อมูล ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะทางกายภาพ เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณวิธีนี้จะทำการคำนวณค่ามิติแฟร็กทัล (Fractal Dimension) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความขรุขระ (Roughness) และค่า ลาคิววาริตี (Lacunarity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น (Denseness) ของพื้นผิวการกระจายข้อมูลแบบสามมิติที่พิจารณา ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์โดยวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงวิธีการหนึ่ง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความสัมพันธ์กับทางกายภาพโดยตรง ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้กับการวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยตาได้ วิธีการ

คำนวณคุณลักษณะแฟร็กทัลทำโดยการกำหนดความยาวด้านของกล่องซึ่งมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ขนาด L^3 ที่ใช้หา $p(m,L)$ ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นของการมีจำนวนจุดของข้อมูลบนพื้นผิวการกระจาย m จุด โดยการจัดวางตำแหน่งกล่องให้จุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดข้อมูลต่างๆ แล้วทำการนับจำนวนจุดข้อมูลที่อยู่ภายในกล่องจากนั้นย้ายกล่องไปอยู่ที่จุดข้อมูลอื่น ทำซ้ำจนทั่วทุกจุดบนพื้นผิว จะได้การกระจายของจำนวนจุดข้อมูล m จุดที่กล่องความยาว L ต่างๆกัน และเมื่อทำการนอร์มัลไลซ์การกระจายนี้จะได้ $p(m,L)$ โดยที่

$$\sum_{m=1}^N p(m,L) = 1 \quad (3.8)$$

เมื่อ N คือจำนวนข้อมูลมากที่สุดที่สามารถบรรจุอยู่ในกล่องความยาว L

จากนั้นจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของจำนวนกล่องต่อข้อมูลหนึ่งจุด $N(L)$ ตามสมการที่ 3.9

$$N(L) = \sum_{m=1}^N \frac{1}{m} p(m,L) \quad (3.9)$$

และเนื่องจากค่าเฉลี่ยของจำนวนกล่องต่อข้อมูลหนึ่งจุดแปรผันกับความยาวด้านของกล่องแบบเอกซ์โพเนนเชียล คือ

$$N(L) = K.L^{-D} \quad (3.10)$$

เมื่อ D คือค่า มิติแฟร็กทัล และ K คือค่าคงที่

จากสมการที่ 3.9 และ 3.10 และการพิสูจน์แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง[24] การคำนวณค่ามิติแฟร็กทัลจะทำโดยการหาค่าความชันของกราฟ โดยแกนนอนคือ $\log(L)$ และแกนตั้งคือ $\log[N(L)]$ ส่วนการหาค่า คิววารีตี จะทำโดยการคำนวณหาค่าโมเมนต์อันดับที่ 1 และ 2 ของมวลแฟร็กทัล[26] ตามสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$M(L) = \sum_{m=1}^N m.p(m,L) \quad (3.11)$$

$$M^2(L) = \sum_{m=1}^N m^2 \cdot p(m, L) \quad (3.12)$$

จากนั้นจึงคำนวณค่า ลาคิวนาเรียตีจากสมการที่ 3.13

$$\Lambda = \frac{M^2(L) - [M(L)]^2}{[M(L)]^2} \quad (3.13)$$

การคำนวณคุณลักษณะแฟรกทัลจากรูปแบบการกระจายข้อมูลการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแบบสามมิติ นั้น รูปแบบการกระจายข้อมูลที่แตกต่างกันจะให้คุณลักษณะแฟรกทัลที่แตกต่างกัน และรูปแบบการกระจายข้อมูลที่คล้ายกันจะให้คุณลักษณะแฟรกทัลที่เกาะกลุ่มกัน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแบบสามมิติด้วยวิธีนี้จึงมีความน่าสนใจมากทีเดียว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

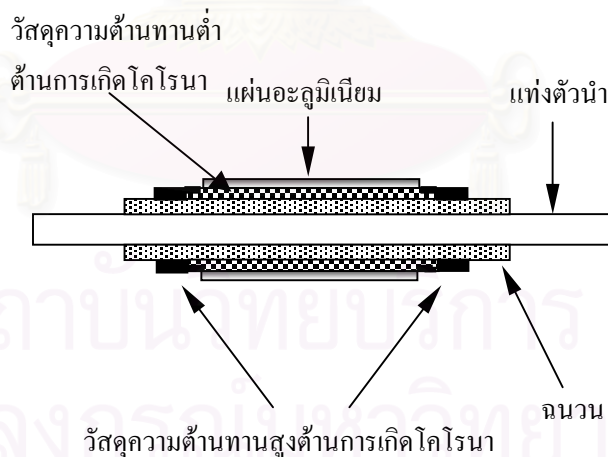
การจัดทำแบบจำลองและการออกแบบการทดลอง

4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์

ในการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิตินั้น จะทำการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลจากแบบจำลองของแท่งสเตเตอร์ซึ่งจะจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ แบบจำลองจะจัดทำ 3 แบบคือ แบบที่หนึ่งเป็นแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง แบบที่สองเป็นแบบจำลองการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิต และแบบที่สามเป็นแบบจำลองการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง

4.1.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องจะสร้างเพื่อนำมาทดสอบเก็บข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการอ้างอิงว่าในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนที่มีสภาพดีนั้นจะมีรูปแบบการปล่อยประจุบางส่วนอย่างไร แม้ว่าในกระบวนการผลิตนั้นจะมีเทคโนโลยีในการผลิตดีอย่างไรก็ตามยังคงมีโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ในเนื้อฉนวนแต่จะมีน้อยมาก และโพรงอากาศเหล่านี้จะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนขึ้นแต่อยู่ในค่าที่ยอมรับได้



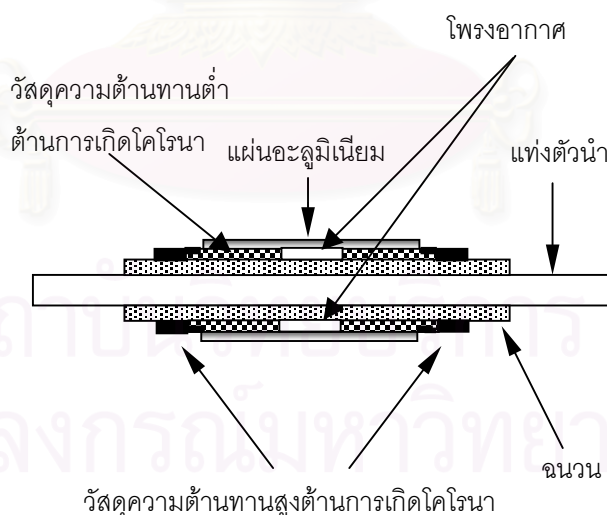
รูปที่ 4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องจะประกอบด้วย แท่งโลหะตัวนำซึ่งทำจากทองแดง ชั้นฉนวน วัสดุความต้านทานต่ำด้านการเกิดโคโรนา และวัสดุความต้านทานสูงด้านการเกิดโคโรนา(เทปเคลือบลดความเครียด) ดังรูปที่ 4.1 แท่งโลหะทองแดงจะนำมาพันด้วยชั้นฉนวน

ให้มีความหนาตามต้องการ เพื่อป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่บริเวณผิวฉนวนและร่องสลิต ที่ผิวฉนวนจะหุ้มด้วยวัสดุความต้านทานต่ำเพื่อทำหน้าที่กราวด์ผิวฉนวนกับร่องสลิต ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศระหว่างผิวฉนวนและร่องสลิตไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ ส่วนฉนวนบริเวณส่วนปลายซึ่งเป็นส่วนที่พื้นร่องสลิตออกมาจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ผิวฉนวนส่วนนี้ลงกราวด์ที่สลิต ดังนั้นผิวฉนวนบริเวณนี้จะพันด้วยเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อจะช่วยลดความเข้มสนามไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ โดยการพันจะพันให้ซ้อนกับชั้นฉนวนความต้านทานต่ำเล็กน้อยดังรูปที่ 4.1

4.1.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิต

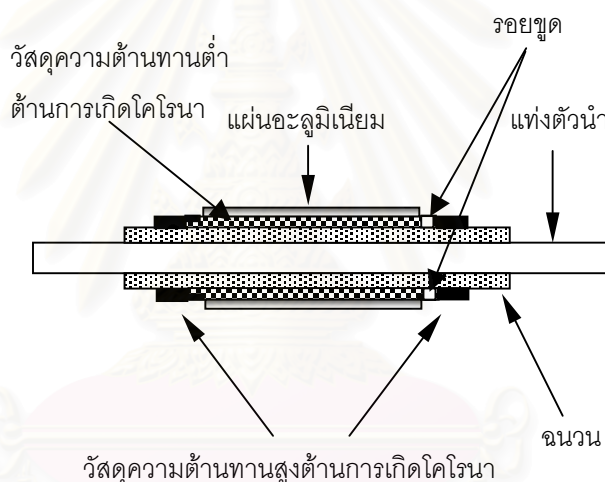
การทำแบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิต จะทำแบบเดียวกับแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง แต่เพื่อจะจำลองให้มีการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนระหว่างบริเวณผิวฉนวนและร่องสลิตดังนั้นแบบจำลองจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแท่งสเตเตอร์และร่องสลิต โดยทำการขูดผิววัสดุความต้านทานต่ำที่ทำหน้าที่กราวด์ผิวฉนวนออกบางส่วนและใช้แผ่นโลหะอลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เสมือนผิวร่องสลิตวางประกบ ซึ่งจะทำให้เกิดแผ่นฟิล์มอากาศบางๆระหว่างแท่งสเตเตอร์กับแผ่นอะลูมิเนียมจำลองเป็นโพรงอากาศขึ้นตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิต

4.1.3 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง

การสร้างแบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่องนั้น จะทำโดยอาศัยหลักการดังนี้คือ ฉนวนบริเวณส่วนที่ติดกับแกนสเตเตอร์จะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงจึงต้องพันด้วยเทปเคลือบลดความเครียด เพื่อช่วยลดความเข้มสนามไฟฟ้าให้ต่ำกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ แต่เนื่องจากแท่งสเตเตอร์ส่วนนี้มักจะได้รับแรงสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากแรงทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ผิวฉนวนบริเวณปากร่องสลีตขัดสีกับปากสลีตจนผิวชั้นเคลือบลดความเครียดบริเวณรอยต่อซึ่งอยู่ติดปากร่องสลีตตกลงจนถึงชั้นฉนวน ทำให้ฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่องไม่ถูกกราวด์ และทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากที่บริเวณปากร่องสลีต โดยอาศัยหลักการนี้ การออกแบบจะออกแบบให้แบบจำลองมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่ฉนวนบริเวณส่วนที่ติดกับแกนสเตเตอร์ โดยจะนำแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องมาชุดบริเวณรอยต่อของชั้นความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาและเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อให้แยกออกจากกันดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์การปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง

4.2 การจัดทำแบบจำลอง

4.2.1 การเตรียมวัสดุ

ขั้นตอนการทำแบบจำลองขดลวดสเตเตอร์นั้น ขั้นตอนแรกคือการเลือกและเตรียมพร้อมวัสดุที่จะใช้ทำแบบจำลองขดลวดสเตเตอร์ซึ่งประกอบด้วยวัสดุดังต่อไปนี้

1) ขดลวดทองแดง

ขดลวดทองแดงที่ใช้จะเป็นขดลวดที่หุ้มด้วยฉนวนซึ่งอาจจะเป็นไมก้าเคลือบอีนาเมล หรือใยไหมเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างขด ขดลวดที่ใช้จะมีพื้นที่หน้าตัดเท่าไรขึ้นอยู่กับขนาด

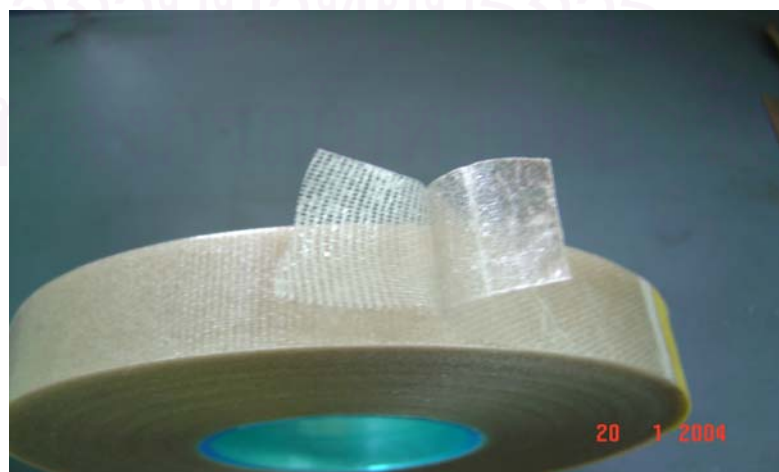
กระแสของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้งานเพื่อให้สามารถรองรับขนาดกระแสใช้งานที่โหลดพิกัดได้โดยไม่ทำให้ขดลวดหลอมละลาย ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ลวดทองแดงขนาด 6 x 1 มิลลิเมตร เป็นลวดทองแดงหุ้มด้วยฉนวนไมก้าดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลวดทองแดงหุ้มด้วยฉนวนไมก้า

2) ฉนวน

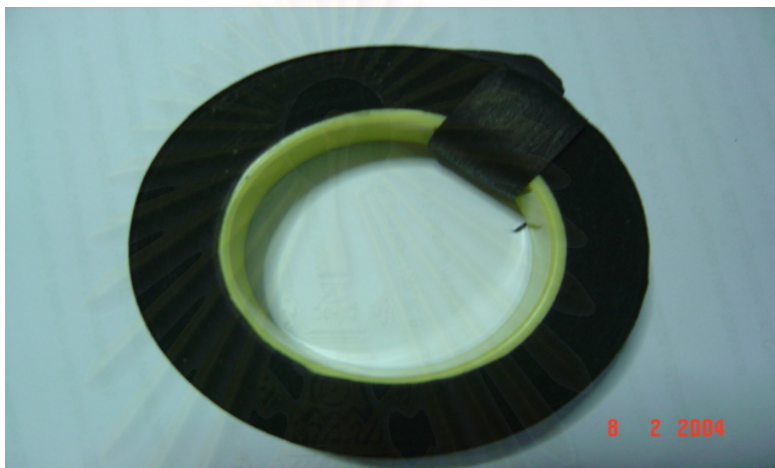
ฉนวนที่ใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation) เพื่อกันขดลวดลงกราวด์ ฉนวนที่ใช้จะต้องทนแรงดันไฟฟ้าและความร้อนได้สูง การจะเลือกใช้ชั้นฉนวน (Insulation Class) ระดับใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ฉนวน Samicatherm ของบริษัท Voll Roll Isola เป็นฉนวนระดับชั้น F ซึ่งทนอุณหภูมิขณะใช้งานได้สูงถึง 155 องศาเซลเซียส เนื้อฉนวนประกอบด้วยแผ่นไมก้าและใยแก้วถักดังรูปที่ 4.5 และมีเรซินเป็นตัวประสานระหว่างฉนวนแต่ละชั้นเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างขั้นตอนบีบอัดด้วยความร้อน



รูปที่ 4.5 ฉนวน Samicatherm

3) วัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนา

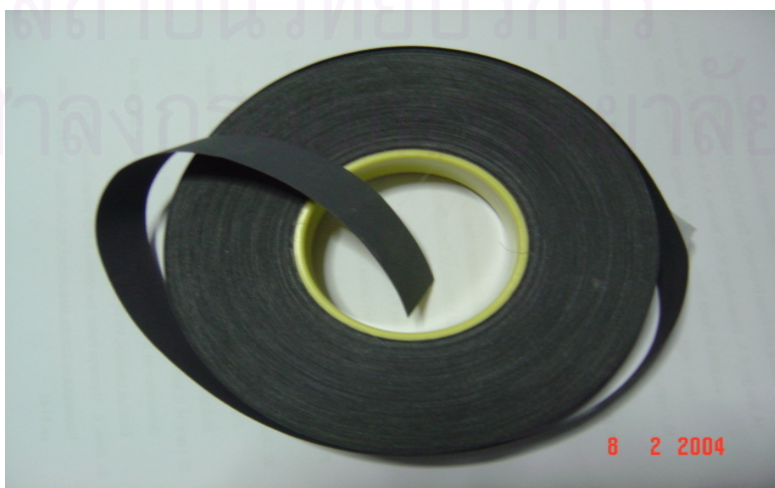
วัสดุนี้ใช้ทำหน้าที่กราวด์ผิวฉนวนที่อยู่ในร่องสลิตไม่ให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศระหว่างผิวฉนวนและแกนสเตเตอร์มาก วัสดุนี้อาจจะเป็นเทปสำหรับใช้พันหรือเป็นสีเพื่อใช้ทาที่ผิวฉนวนซึ่งจะมีสีดำ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบที่เป็นเทปซึ่งจะดีกว่าสีสำหรับทา เพราะจะสามารถกำหนดความหนาให้มีความสม่ำเสมอได้ง่ายกว่าสีสำหรับทา วัสดุที่ใช้เป็นของบริษัท Isovolta รุ่น CONTAFEL H 2014 ความหนา 0.1 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนา

4) วัสดุความต้านทานสูงต้านการเกิดโคโรนา

วัสดุนี้จะใช้ทำเป็นชั้นเคลือบลดความเครียดเพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่อง วัสดุนี้อาจเป็นเทปสำหรับใช้พันหรือเป็นสีสำหรับใช้ทาซึ่งจะมีสีเทา วัสดุที่เลือกใช้เป็นของบริษัท Isovolta รุ่น EGSB 0483 เป็นแบบเทปขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร มีความหนา 0.28 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 วัสดุความต้านทานสูงต้านการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่อง

4.2.2 การคำนวณจำนวนครั้งการพันฉนวนและระยะการพันชั้นเคลือบลดความเครียด

การออกแบบแบบจำลองแท่งสเตเตอร์นั้น จะทำการคำนวณจำนวนครั้งในการพันฉนวน เพื่อให้ได้ความหนาของชั้นฉนวนตามที่ต้องการ และต้องคำนวณค่าระยะการพันชั้นเคลือบลดความเครียดให้เหมาะสมตลอดช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งรายละเอียดการคำนวณค่าต่างๆมีดังต่อไปนี้

1) การคำนวณจำนวนครั้งการพันฉนวน

การคำนวณจำนวนชั้นของฉนวนที่จะต้องพันเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นฉนวนในชั้นตอนสุดท้ายตามที่ต้องการสามารถคำนวณตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{จำนวนชั้นฉนวน} = \frac{\text{ความหนาฉนวนที่ต้องการในชั้นตอนสุดท้าย}}{\text{ความหนาฉนวน} \times \text{ความสามารถในการอัดตัว}} \quad (4.1)$$

แท่งสเตเตอร์ออกแบบให้มีความหนาของฉนวน 2 มิลลิเมตร ฉนวนที่เลือกใช้มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร และค่าความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) เท่ากับ 0.6 เมื่อนำมาคำนวณตามสมการที่ 4.1 จะได้จำนวนชั้นฉนวนที่ต้องพันดังนี้

$$\text{จำนวนชั้นฉนวน} = \frac{2}{0.25 \times 0.6} = 13.33 \text{ ชั้น}$$

ดังนั้นในการพันฉนวนต้องพันทั้งหมด 14 ชั้น

2) ระยะการพันวัสดุความต้านทานสูงด้านการเกิดโคโรนา

การคำนวณระยะการพันวัสดุความต้านทานสูงด้านการเกิดโคโรนา หรือชั้นเคลือบลดความเครียดเพื่อป้องกันไม่ให้แบบจำลองเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่บริเวณส่วนพันร่องในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ การคำนวณระยะการพันสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.2

$$\text{ระยะการพันเทป(เซนติเมตร)} = \frac{\text{แรงดันไฟฟ้าทดสอบสูงสุด (กิโลโวลต์)}}{2} \quad (4.2)$$

2

การออกแบบแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดระยะการพันเทปชั้นเคลือบลดความเครียดไว้ 7 เซนติเมตร ซึ่งสามารถใช้แรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุดถึง 14 กิโลโวลต์

4.3 ขั้นตอนการทำแบบจำลอง

ในขั้นตอนการทำแบบจำลองจะทำเป็นแท่งสเตเตอร์เฉพาะส่วนตรง ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ที่ใช้งานจริงแต่ขั้นตอนในการทำนั้นจะใช้กรรมวิธีเดียวกัน ซึ่งขั้นตอนต่างๆจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การลูปขดลวด

ในขั้นตอนการลูปขดลวดจะนำขดลวดทองแดงมาเข้าเครื่องลูปขดลวดดังรูปที่ 4.8 เพื่อทำการลูปขดลวดตามจำนวนรอบ (Turn) ขดลวดที่ต้องการ ในการออกแบบแบบจำลองแท่งสเตเตอร์นี้กำหนดจำนวนรอบเท่ากับ 6 รอบ ขดลวดทองแดงที่ผ่านการลูปจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.9 พร้อมทั้งจะนำไปผ่านกระบวนการต่อไป



รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการลูปขดลวด



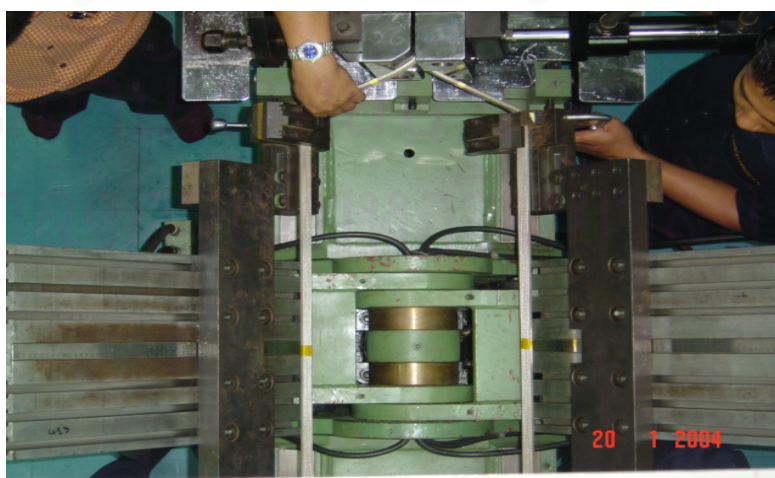
รูปที่ 4.9 ขดลวดที่ผ่านการลูปพร้อมที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

2) การขึ้นรูปขดลวด

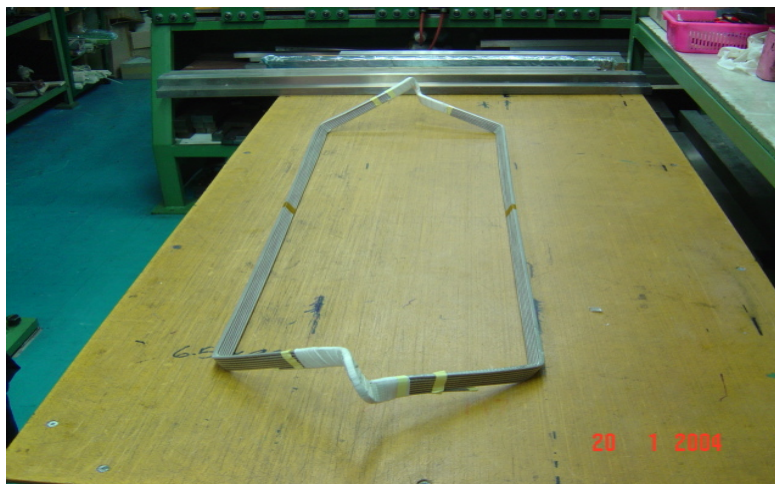
ในขั้นตอนการขึ้นรูปขดลวดจะนำขดลวดที่ผ่านการชุบแล้วมาเข้าเครื่องขึ้นรูปขดลวด เพื่อขึ้นรูปขดลวดให้มีขนาดตามต้องการ ซึ่งจะต้องทราบค่า ขนาดสลิต (Slot Dimension) ขนาดสเตเตอร์ (Stator Dimension) ระยะพิทช์ของขดลวด (Coil Pitch) มุมของขดลวด (Coil Angle) ขนาดของขดลวด (Coil Dimension) รัศมีของขดลวดบน (Upper Coil Side Radius) และรัศมีของขดลวดล่าง (Lower Coil Side Radius) แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ต้องการสร้างเป็นเพียงส่วนตรงของขดลวดที่นำมาขึ้นรูปเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่คำนึงถึงค่าดังกล่าวข้างต้นเพียงแต่ให้ส่วนตรงของขดลวดที่ขึ้นรูปมีขนาดเท่าความยาวของแท่งแบบจำลองที่ต้องการเท่านั้น เมื่อนำขดลวดที่ชุบมาขึ้นรูปขดลวดด้วยเครื่องขึ้นรูปขดลวดดังรูปที่ 4.10 จะได้ขดลวดมีลักษณะดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 เครื่องขึ้นรูปขดลวด



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการขึ้นรูปขดลวด



รูปที่ 4.12 ขดลวดที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้ว

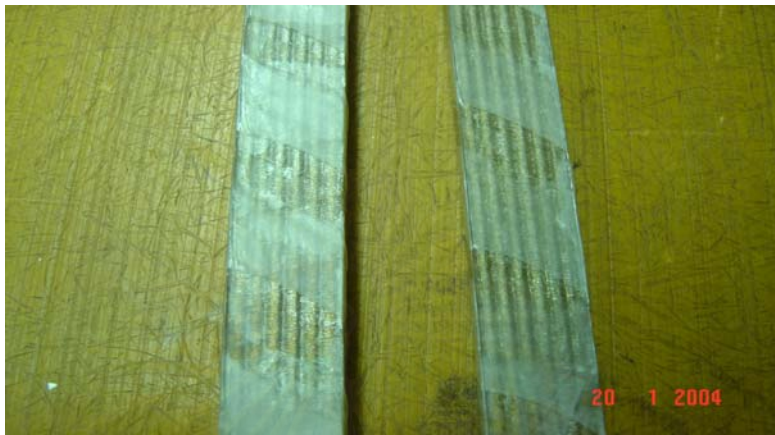
3) การพันฉนวนครั้งที่ 1

ขั้นตอนการพันฉนวนจะแบ่งเป็นสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะนำขดลวดที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วมาพันด้วยฉนวนเฉพาะส่วนตรงของขดลวดเท่านั้น โดยการพันจะพันแบบซ้อนครึ่ง (Half Lap) สองครั้งซึ่งเท่ากับพันด้วยฉนวนสี่ชั้น จากนั้นจึงนำขดลวดที่พันไปเข้าเครื่องบีบอัดด้วยความร้อน (Heat Press) ด้วยความดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 30 นาที ดังรูปที่ 4.13 เพื่อให้สีฟอกซีเรซินจากเนื้อฉนวนไหลซึมเข้าระหว่างชั้นของลวดทองแดง ทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างขดลวดแต่ละรอบป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดแต่ละรอบ



รูปที่ 4.13 การบีบอัดฉนวนด้วยความร้อน ครั้งที่ 1

หลังจากการบีบอัดด้วยความร้อนครั้งที่ 1 จะได้ขดลวดดังรูปที่ 4.14 เนื้อฉนวนจะใสจนเห็นลวดทองแดงด้านใน ทำให้สามารถตรวจสอบด้วยตาเปล่าได้ว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำการบีบอัดด้วยความร้อนหรือไม่



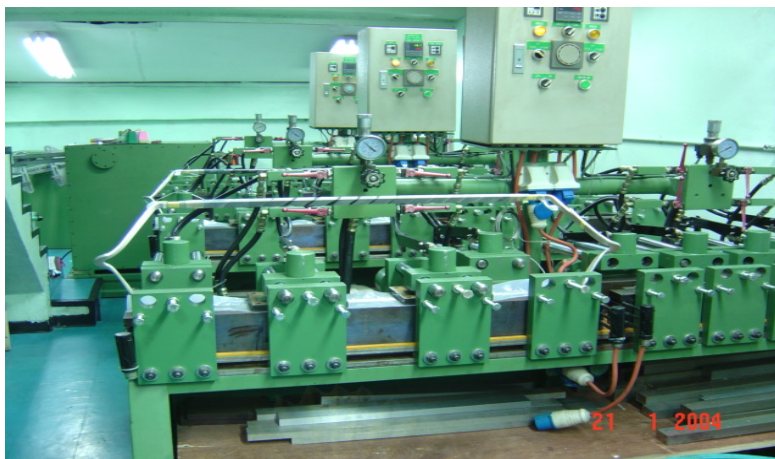
รูปที่ 4.14 ขดลวดหลังการทำการบีบอัดด้วยความร้อน ครั้งที่ 1

4) การพันฉนวนครั้งที่ 2

หลังจากการพันฉนวนและทำการบีบอัดด้วยความร้อนครั้งที่ 1 แล้ว จะนำขดลวดไปพันด้วยฉนวนแบบซ้อนครึ่งอีก 5 รอบ ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนชั้นฉนวนที่พันรวมกับฉนวนที่พันครั้งแรกด้วยเท่ากับ 14 ชั้น จากนั้นจึงพันด้วยวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนา 1 รอบ เสร็จแล้วจึงพันด้วยเทปเคลือบลดความเครียดที่ปลายแท่งสเตเตอร์ทั้งสองด้าน โดยให้เกยชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาเป็นระยะ 2 เซนติเมตร ชั้นสุดท้ายจึงพันด้วยเทปหัดเพื่อช่วยบีบรัดให้อีพ็อกซีเรซินไหลซึมระหว่างชั้น ป้องกันไม่ให้เกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวนดังรูปที่ 4.15 แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องบีบอัดด้วยความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลาประมาณ 30 นาที



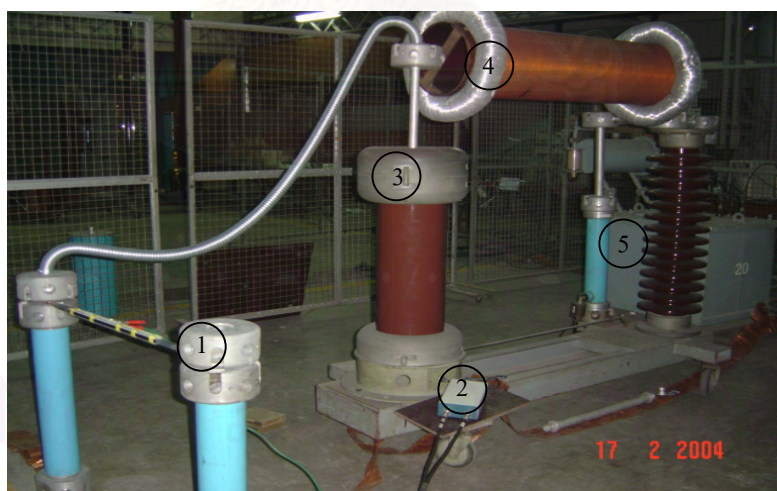
รูปที่ 4.15 แท่งสเตเตอร์ที่พันฉนวนเรียบร้อยแล้วพร้อมเข้าเครื่องบีบอัดด้วยความร้อน



รูปที่ 4.16 ขั้นตอนการบีบอัดด้วยความร้อนครั้งที่ 2

4.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะเลือกแบบจำลองแท่งสเตอร์จำนวน 9 แท่ง โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มๆละ 3 แท่ง เพื่อนำไปทำแบบจำลองแต่ละประเภทคือ แบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องดังรูปที่ 4.1 จำนวน 3 แท่ง แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต ดังรูปที่ 4.2 จำนวน 3 แท่ง และแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตดังรูปที่ 4.3 จำนวน 3 แท่ง แล้วนำไปทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลการทดสอบใช้วงจรทดสอบตามรูปที่ 3.11 ก) โดยแสดงภาพการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 4.16



อุปกรณ์ประกอบวงจรทดสอบ : 1) วัสดุทดสอบ (C_a) 2) อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD)
3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง 1 nF (C_p) 4) ฟิลเตอร์ (Z_f) 5) หม้อแปลงทดสอบ (U)

รูปที่ 4.17 อุปกรณ์และการต่อวงจรสำหรับการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

4.4.1 การทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง

การทดสอบจะนำแท่งสเตเตอร์มาทำเป็นแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องจำนวน 3 แท่ง แต่ละแท่งชื่อว่า P1 P2 และ P3 นำแต่ละแท่งมาทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ แท่งละ 20 ข้อมูล โดยการทดสอบจะบันทึกค่าอุณหภูมิขณะทดสอบและความชื้นสัมพัทธ์ไว้ด้วย

4.4.2 การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต

การทดสอบแบบจำลองนี้จะเริ่มโดยการนำแท่งสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละแท่งชื่อ S1 ,S2 และ S3 มาทดสอบก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องเพื่อเป็นข้อมูลไว้เปรียบเทียบกับตัวเองหลังจากทำการจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ การทดสอบจะแบ่งเป็นการทดสอบย่อยต่างๆดังนี้

1) การทดสอบแบบจำลองก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง โดยจะนำแท่งทดสอบแต่ละแท่งมาทดสอบก่อนที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่องเพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบกับตัวเอง แต่ละแท่งจะเก็บข้อมูล 20 ครั้ง ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์

2) การทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลีตเมื่อจุดบกพร่องมีขนาดต่างๆ การทดสอบนี้ทำเพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดจุดบกพร่องที่มีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร จุดบกพร่องจะมี 3 ขนาด แต่ละขนาดจะเก็บข้อมูล 20 ครั้ง ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์

3) การทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลีตที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศกับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน โดยการทดสอบจะเลือกทดสอบจากแท่งทดสอบแต่ละแท่งที่ขนาดจุดบกพร่องเพียงขนาดเดียวเท่านั้น และแท่งอื่นก็จะทดสอบที่ขนาดจุดบกพร่องต่างกันไป จะทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าสองระดับคือ 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์ และเก็บครั้งละ 20 ข้อมูล

4) การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน เนื่องจากบริเวณที่ทดสอบไม่สามารถควบคุมความชื้นได้เพราะอยู่ในระบบเปิด และความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาของวัน การทดสอบจึงรอกทำที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการ และแต่ละค่าความชื้นสัมพัทธ์จะเก็บข้อมูล 20 ครั้ง

4.4.3 การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง

การทดสอบแบบจำลองนี้ จะนำแท่งสเตเตอร์ซึ่งแต่ละแท่งชื่อ E1 E2 และ E3 มาทดสอบก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบกับตัวเองหลังทำการจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆเช่นเดียวกับการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต การทดสอบจะแบ่งเป็นการทดสอบย่อยต่างๆดังนี้

1) การทดสอบแบบจำลองก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง โดยจะนำแท่งทดสอบแต่ละแท่ง มาทดสอบก่อนที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่อง เพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบกับตัวเอง แต่ละแท่งจะเก็บข้อมูล 20 ครั้ง ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์

2) การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องแบบที่ 1 โดยทำการชูดรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาและเทปเคลือบลดความเครียดออกบางส่วน ทำการเก็บข้อมูลแต่ละ 20 ครั้ง ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์

3) การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องแบบที่ 2 โดยทำการชูดรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาและเทปเคลือบลดความเครียดออกโดยรอบ ทำการเก็บข้อมูลแต่ละ 20 ครั้ง ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.18 ภาพแสดงการจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ

เพื่อประกอบความเข้าใจในการทำแบบจำลองรูปที่ 4.17 แสดงภาพการจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ รูปที่ 4.17 ก) แสดงแท่งสเตเตอร์ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง รูปที่ 4.17 ข) แสดงแท่งสเตเตอร์ที่ชูดผิวชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนา จำลองให้เกิดจุดบกพร่องในสล๊อต รูปที่ 4.17 ค) และ ง) แสดงแท่งสเตเตอร์ที่จำลองให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง โดยการชูดบริเวณรอยต่อออกเพียงบางส่วนและ ชูดออกโดยรอบตามลำดับ

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องแบบต่างๆ จะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ซึ่งแบ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยตาโดยดูความแตกต่างของรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆ เพื่อที่จะหารูปแบบซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของแบบจำลองจุดบกพร่องแต่ละแบบ ส่วนการวิเคราะห์อีกรูปแบบหนึ่งคือ การวิเคราะห์โดยการคำนวณพารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อนำมาเปรียบเทียบดูการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแต่ละประเภทบนแบบจำลองที่ทำการศึกษา

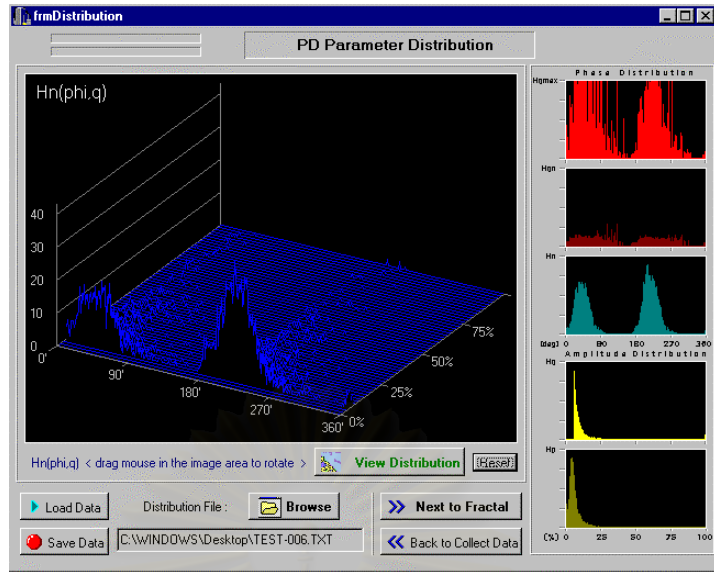
5.1 การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลด้วยตา

การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลของการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆด้วยตาจะประกอบด้วย การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสามมิติ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของพัลส์ของการปล่อยประจุบางส่วน (q) เฟส (ϕ) และจำนวนพัลส์ (n) ที่เกิดขึ้น $H_n(\phi, q)$ และการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายแบบสองมิติซึ่งประกอบด้วย การกระจายขนาดพัลส์สูงสุดตามมุมเฟส $H_{q_{max}}(\phi)$ การกระจายขนาดพัลส์เฉลี่ยตามมุมเฟส $H_{qn}(\phi)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิดพัลส์ซ้ำตามมุมเฟส $H_n(\phi)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิดพัลส์ซ้ำตามขนาด $H(q)$ และการกระจายจำนวนครั้งที่เกิดพัลส์ซ้ำตามพลังงานของการปล่อยประจุบางส่วน $H(p)$ โดยรูปแบบการกระจายข้อมูลเหล่านี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ตามสาเหตุของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในแต่ละตำแหน่งของขดลวดสเตเตอร์

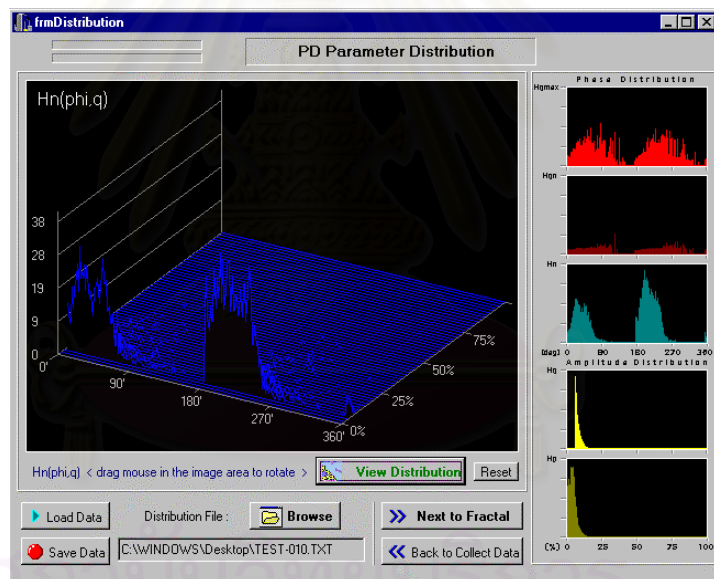
5.1.1 ผลการทดสอบแบบจำลองแบบต่างๆโดยดูจากการกระจายข้อมูลแบบสามมิติและสองมิติ

5.1.1.1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง

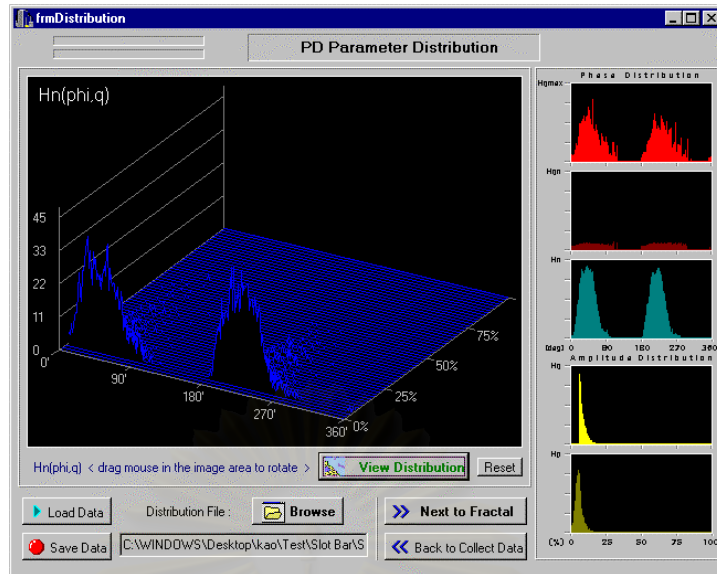
การทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P1, P2 และ P3 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิขณะทำการทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40 % ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P1



รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P2



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง P3

จากผลการทดสอบแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง สามารถสรุปรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆที่แสดงถึงเอกลักษณ์เฉพาะของแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องได้ดังนี้

1) รูปแบบการกระจายแบบสามมิติ $H_n(\phi, q)$ การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน พัลส์ส่วนใหญ่จะมีขนาดประจุต่ำและจำนวนครั้งการเกิดจะสูงกว่าพัลส์ที่มีขนาดประจุสูงๆ การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะอยู่ที่มุมเฟสประมาณ 0 ถึง 90 องศา และ 180 ถึง 270 องศาเป็นส่วนใหญ่ มีเพียงส่วนน้อยที่เกิดนอกเหนือมุมเฟสดังกล่าว

2) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H_{qn}(\phi)$ ค่าประจุเฉลี่ยค่อนข้างจะสม่ำเสมอมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักตลอดช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และ 180-270 องศา และมีค่าไม่สูง

3) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H_n(\phi)$ มีลักษณะการกระจายข้อมูลคล้ายการกระจายข้อมูลแบบปกติ (Normal Distribution) ที่มียอดค่อนข้างแหลม ค่ายอด (Peak) จะอยู่ที่มุมเฟสประมาณ 45 องศา และ 225 องศา

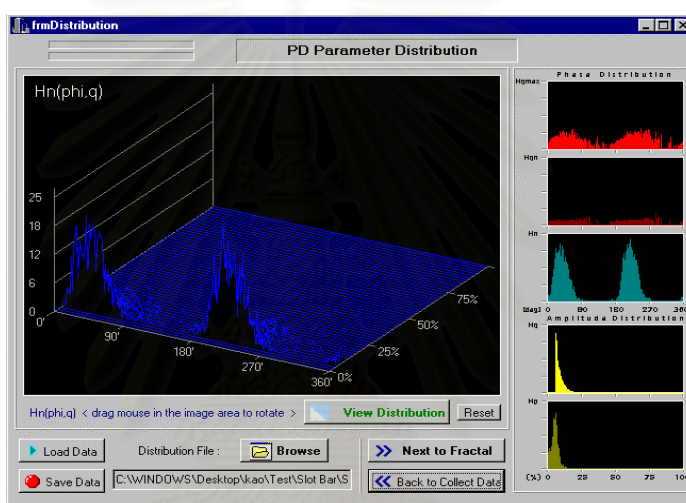
4) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H(q)$ ที่ขนาดประจุต่ำๆจำนวนครั้งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะมีค่าสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดประจุมีค่าสูงขึ้น

5) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H(p)$ จำนวนครั้งการปล่อยประจุบางส่วนสูงสุดจะเกิดที่ค่าพลังงานการปล่อยประจุบางส่วนต่ำ และจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ค่าพลังงานการปล่อยประจุบางส่วนสูงขึ้น รูปแบบการกระจายข้อมูลจะเป็นการกระจายข้อมูลที่มีลักษณะเป็นยอดเดียว

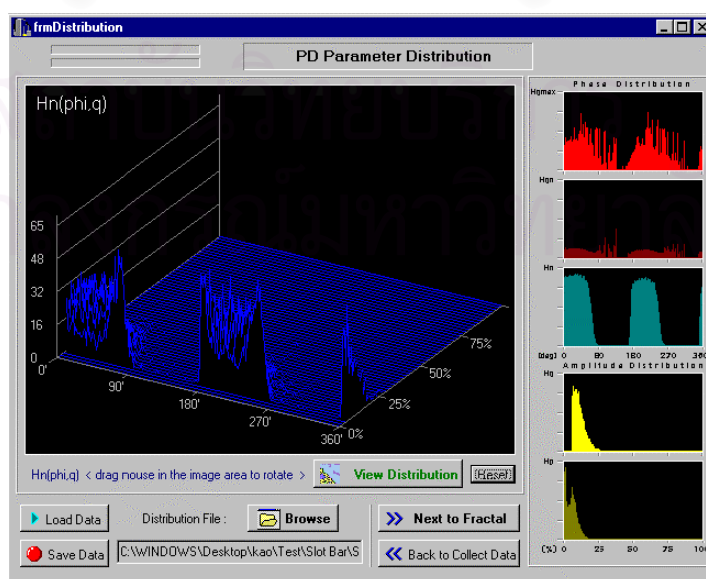
5.1.1.2 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต

5.1.1.2.1 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตที่มีขนาดต่างๆ

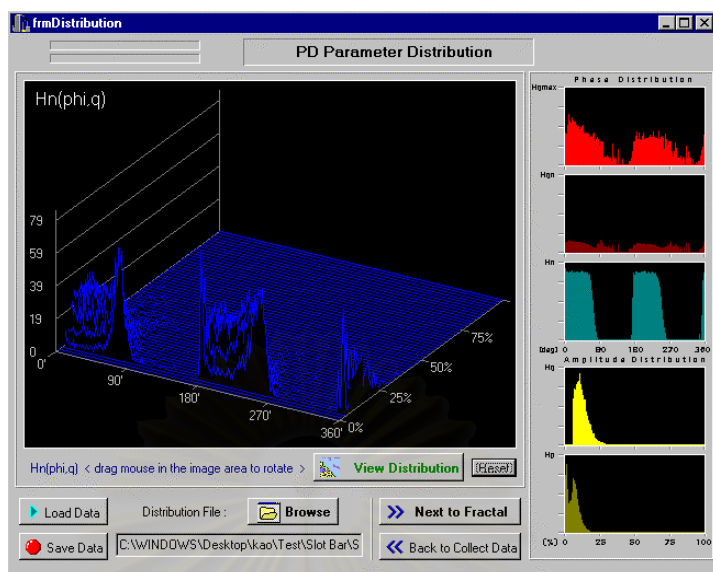
1) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต S1 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60 % โดยแบบจำลอง S1 จะทำการทดสอบก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องเพื่อไว้เปรียบเทียบ จากนั้นจึงทำให้เกิดจุดบกพร่องแบบที่ 1 โดยทำให้เกิดจุดบกพร่องขนาด 2x5 ตารางเซนติเมตร จุดบกพร่องแบบที่ 2 ขนาด 2x10 ตารางเซนติเมตรและจุดบกพร่องแบบที่ 3 ขนาด 2x15 ตารางเซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.4 ถึง 5.7 ตามลำดับ



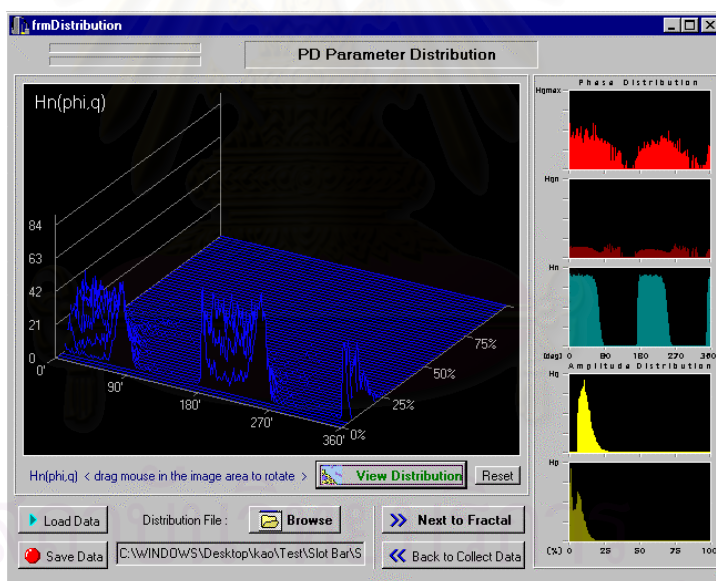
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสลีต



รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 แบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x5 ตารางเซนติเมตร



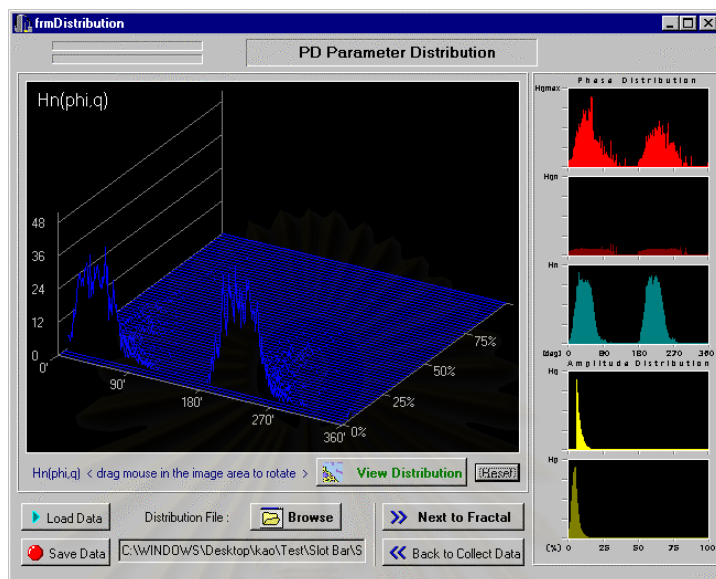
รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร



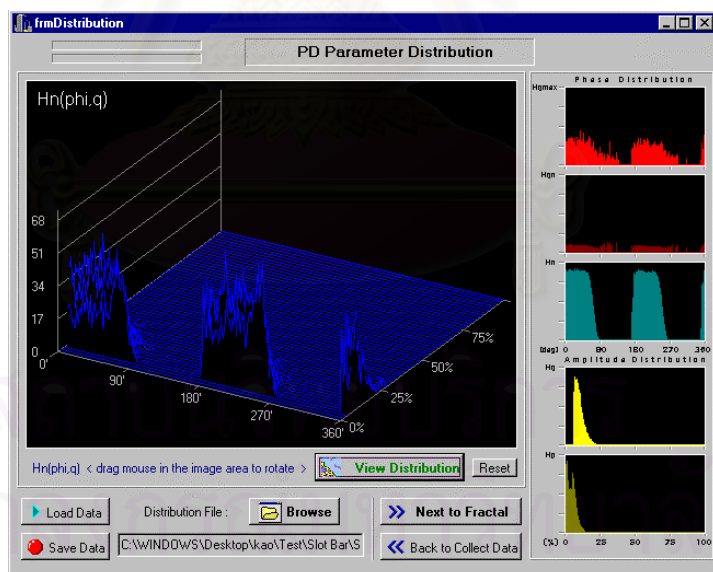
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x15 ตารางเซนติเมตร

2) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต S2 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60 % โดยจะทดสอบแบบจำลอง S2ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง จากนั้นจึงทำให้เกิดจุดบกพร่องแบบที่ 1 โดยทำให้เกิดจุดบกพร่องขนาด 2x10 ตารางเซนติเมตร จุดบกพร่องแบบที่ 2 ขนาด 2x20 ตารางเซนติเมตร และ

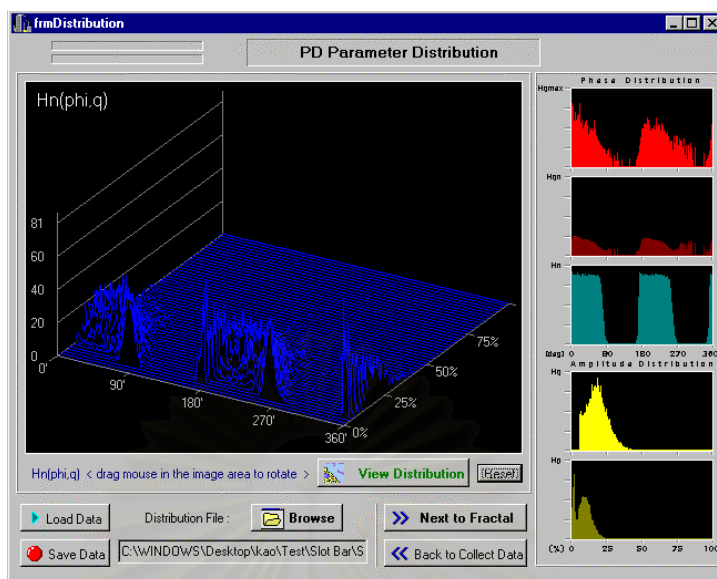
จุดบกพร่องแบบที่ 3 ขนาด 2x30 ตารางเซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.8 ถึง 5.11 ตามลำดับ



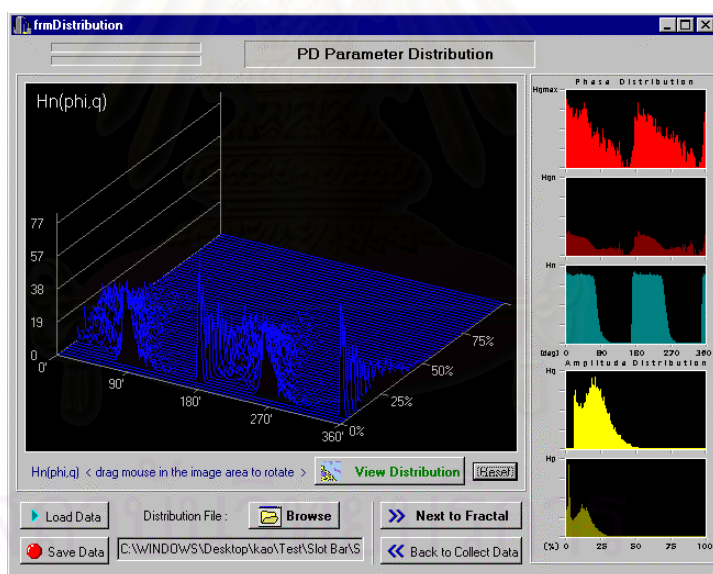
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสล๊อต



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 แบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร



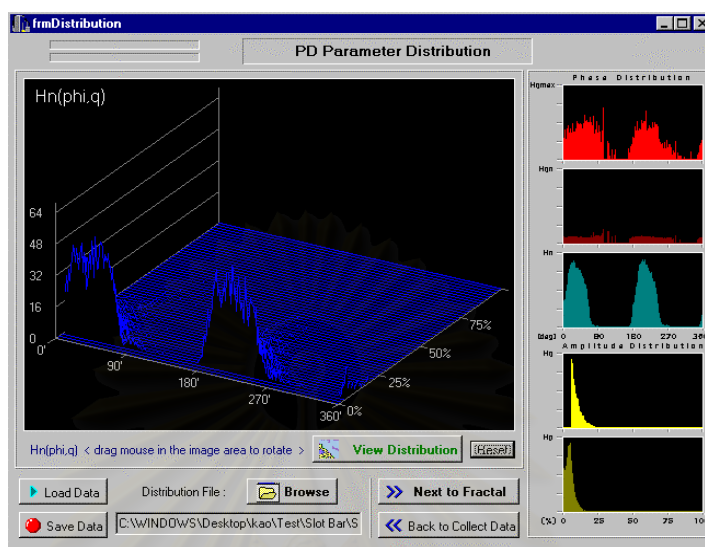
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x20 ตารางเซนติเมตร



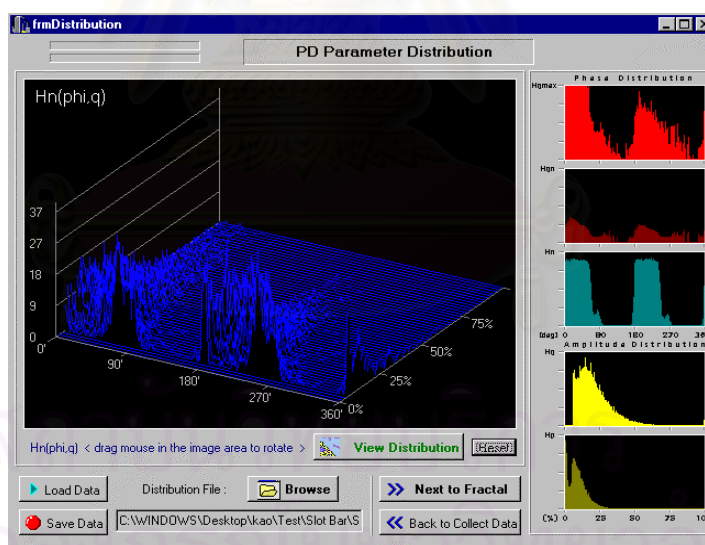
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x30 ตารางเซนติเมตร

3) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อต S3 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40 % การทดสอบจะทำการทดสอบแบบจำลอง S3 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง จากนั้นจึงทำให้เกิดจุดบกพร่อง 4 ระดับ คือจุดบกพร่องแบบที่ 1 ขนาด 2x5 ตารางเซนติเมตร จุดบกพร่องแบบที่ 2 ขนาด 2x7.5 ตาราง

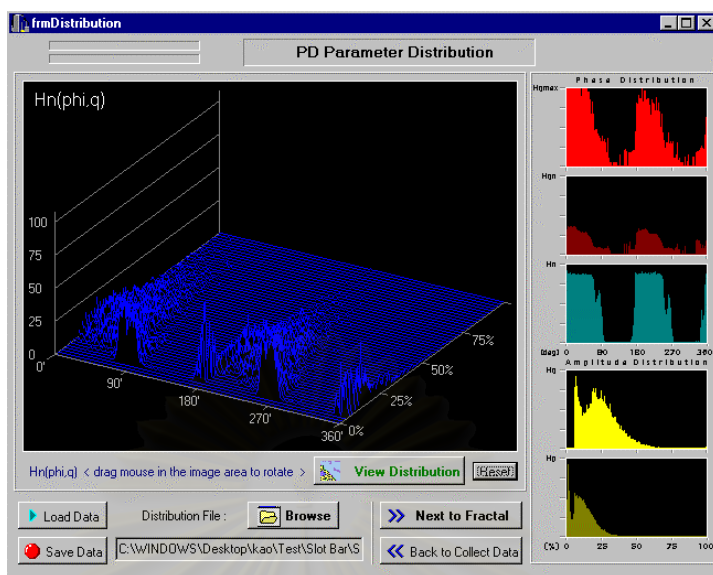
เซนติเมตร จุดบกพร่องแบบที่ 3 ขนาด 2x10 ตารางเซนติเมตร และจุดบกพร่องแบบที่ 4 ขนาด 2x15 ตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.12 ถึง 5.16 ตามลำดับ



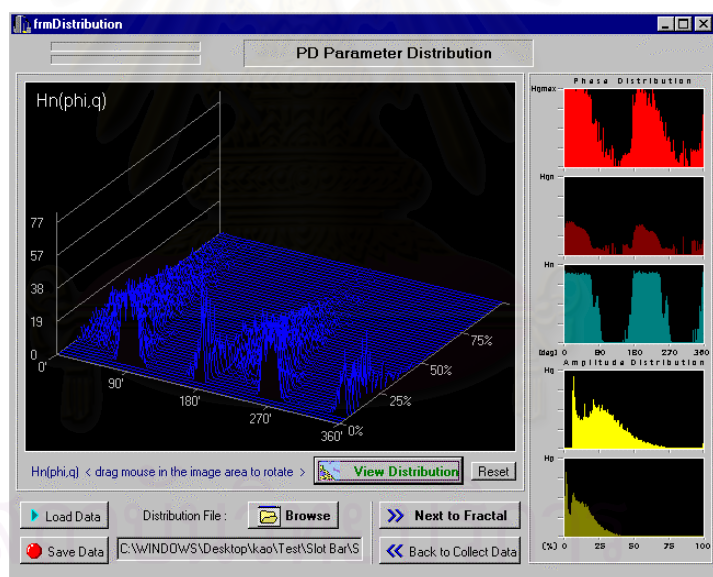
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสล๊อต



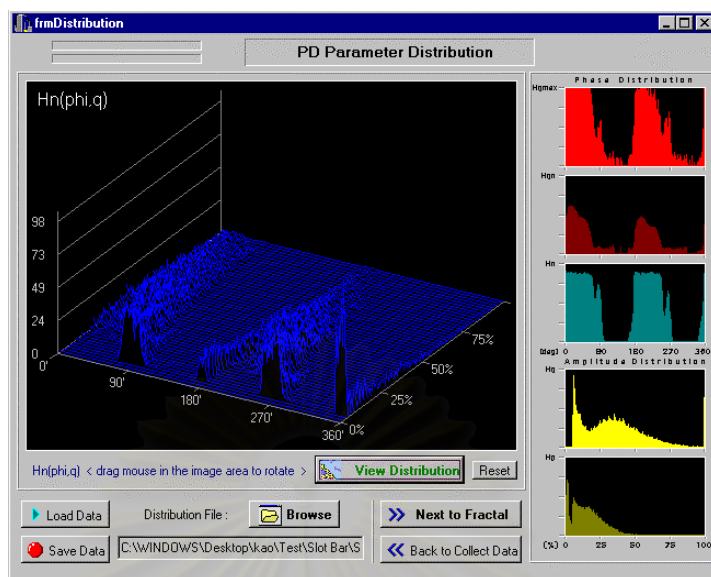
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x5 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x7.5 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 แบบที่ 4 ขนาดจุดบกพร่อง 2x15 ตารางเซนติเมตร

จากผลการทดสอบสามารถสรุปรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆที่แสดงถึงเอกลักษณ์เฉพาะของแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล๊อตได้ดังนี้

1) รูปแบบการกระจายแบบสามมิติ $H_n(\phi, q)$ การปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดขึ้นที่ขนาดประจุต่ำ ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องจะมีค่ายอดที่มุมเฟสประมาณ 45 องศา และ 225 องศา แต่เมื่อทำให้เกิดจุดบกพร่องจะเริ่มแยกออกเป็นสองยอด และจะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ขนาดประจุสูงขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับแบบจำลองก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่อง เมื่อขนาดจุดบกพร่องใหญ่ขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าการกระจายข้อมูลจะแตกออกเป็นสองยอด โดยค่ายอดอยู่ที่มุมเฟสใกล้ 360 องศา และ 90 องศาในแรงดันไฟฟ้าช่วงไซเคิลบวก ที่มุมเฟสใกล้ 180 องศา และ 270 องศา ในแรงดันไฟฟ้าช่วงไซเคิลลบ ส่วนค่ายอดที่มุมเฟสเดิม คือที่ 45 องศา และ 225 องศา ที่ขนาดประจุต่ำจะไม่มีพัลส์เกิดขึ้นทำให้มีลักษณะเข้าไปได้ดังรูป 5.16

2) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H_{qn}(\phi)$ ค่าขนาดประจุเฉลี่ยของการปล่อยประจุบางส่วนสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ขนาดประจุสูงขึ้น และค่าขนาดประจุเฉลี่ยจะสูงขึ้นจนเห็นได้ชัดเจนเมื่อขนาดจุดบกพร่องใหญ่ขึ้น

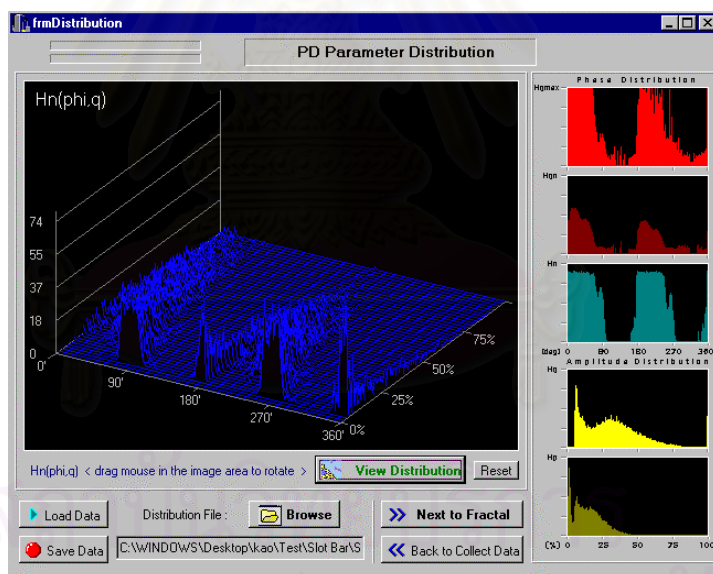
3) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H_n(\phi)$ จากเดิมก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องจะมียอดค่อนข้างแหลม เมื่อเกิดจุดบกพร่องยอดจะมนขึ้น และจะมนมากยิ่งขึ้นตามขนาดจุดบกพร่องที่ใหญ่ขึ้น

4) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H(q)$ จากเดิมก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องจะมีค่ายอดที่ค่าประจุนต่ำสุด แต่เมื่อเกิดจุดบกพร่องค่ายอดจะเลื่อนไปที่ค่าประจุนสูงขึ้นไป มองเห็นลักษณะเป็นเนินดังรูปที่ 5.7 ในชั้นทดสอบ S1 และในชั้นทดสอบ S3 ซึ่งการปล่อยประจุบางส่วนมีค่าสูงจะมองเห็นเป็นสองยอด โดยมียอดแหลมที่ค่าประจุนต่ำสุด และอีกยอดซึ่งมีลักษณะเป็นเนินที่ค่าประจุนสูงขึ้นไป และจุดยอดของเนินมีแนวโน้มจะเลื่อนไปที่ขนาดค่าประจุนสูงขึ้นไปเมื่อจุดบกพร่องมีขนาดใหญ่ขึ้น

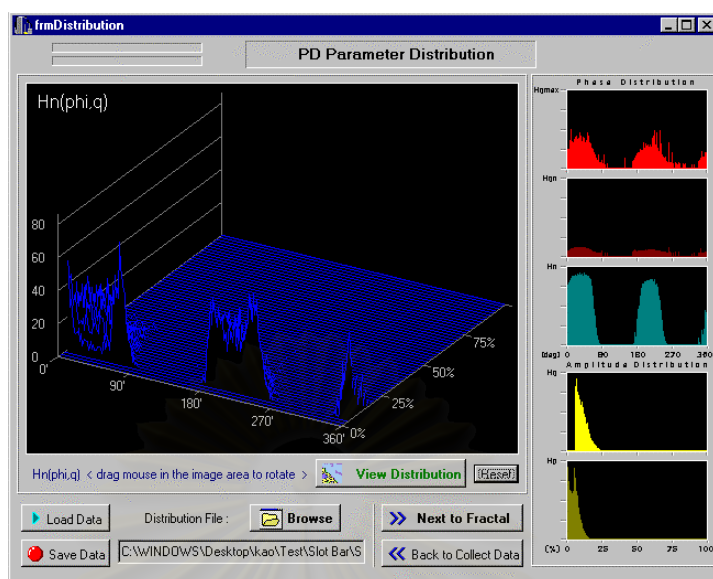
5) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H(p)$ พลังงานการปล่อยประจุจะมีลักษณะแตกเป็นสองยอดซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในชั้นทดสอบ S3

5.1.1.2.2 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อตที่ความชื้นต่างๆ

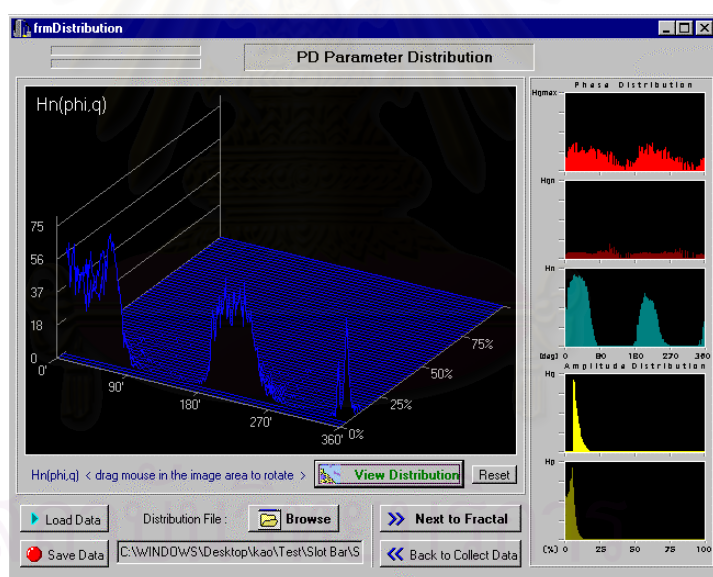
การทดสอบทำการเปรียบเทียบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อต S3 แบบที่ 4 ขนาดจุดบกพร่อง 2×15 ตารางเซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับคือ 40 %, 60% และ 70% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.17 ถึง 5.19



รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 %



รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่ความขึ้นล้มพัทธ์ 60 %



รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่ความขึ้นล้มพัทธ์ 70 %

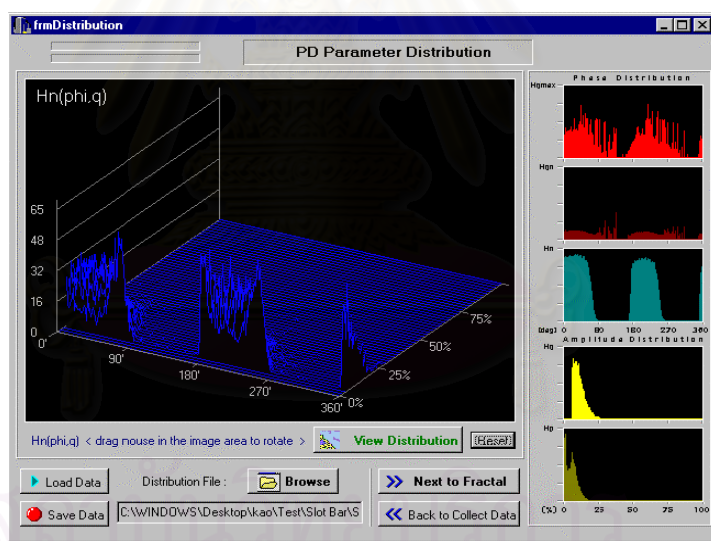
ผลการทดสอบพบว่า ที่ความขึ้นล้มพัทธ์ต่ำการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดมากกว่าที่ความขึ้นล้มพัทธ์สูงดังรูปที่ 5.17 ถึง 5.19 เมื่อความขึ้นล้มพัทธ์สูงมาก (70%) แทบจะมองไม่เห็นรูปแบบการกระจายที่เป็นเอกลักษณ์บ่งบอกถึงการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสลิตเลย แต่จะมีลักษณะคล้ายรูปแบบการกระจายข้อมูลของแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องมากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากอากาศที่มีความขึ้นล้มพัทธ์ต่ำจะเกิดประจุไฟฟ้าสถิตย์ และประจุไฟฟ้าสถิตย์นี้เองที่

เป็นประจําเริ่มต้นในปรากฏการณ์ของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ดังนั้นการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจึงทำให้พัลส์ที่เกิดขึ้นมีขนาดประจุสูงกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ

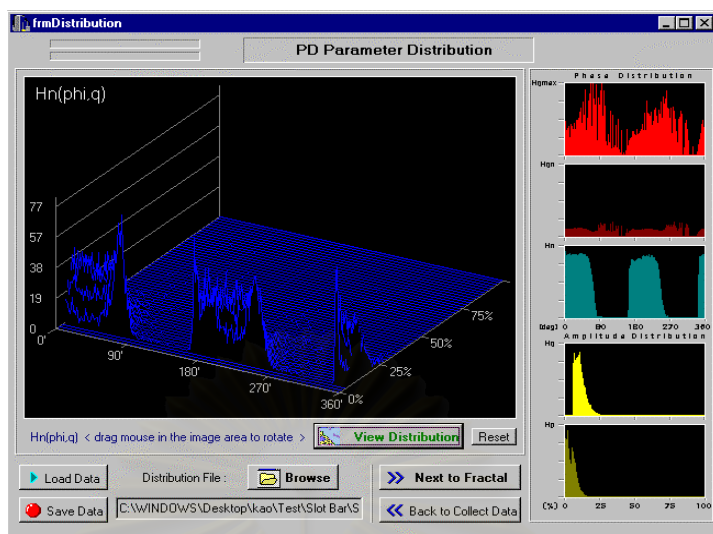
5.1.1.2.3 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล๊อตที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณสล๊อตเมื่อความชื้นสนามไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศต่างกัน การทดสอบทำที่แรงดันไฟฟ้า 2 ระดับคือ 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์ อุณหภูมิทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียส และจะทดสอบที่ขนาดของจุดบกพร่องของแบบจำลองแต่ละชิ้นแตกต่างกันไปดังนี้

- 1) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล๊อต S1 เลือกทดสอบโดยใช้แบบจำลองแบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2 x 5 ตารางเซนติเมตร ความชื้นสัมพัทธ์ 60% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.20 และ 5.21

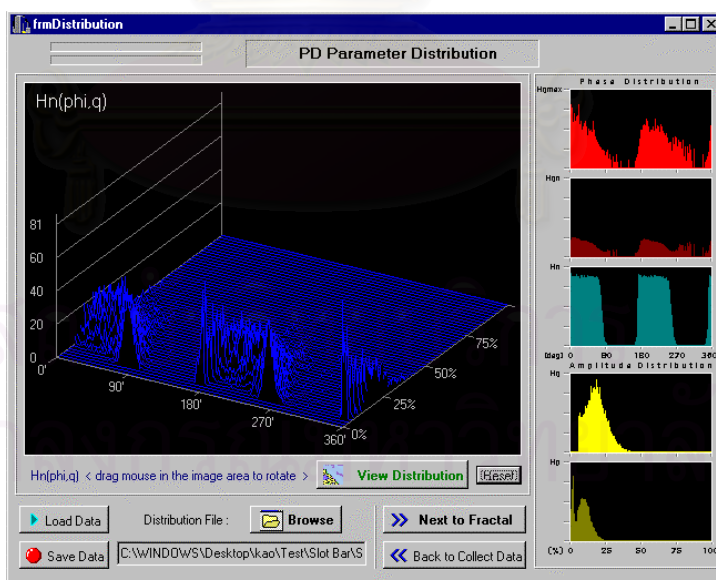


รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 kV

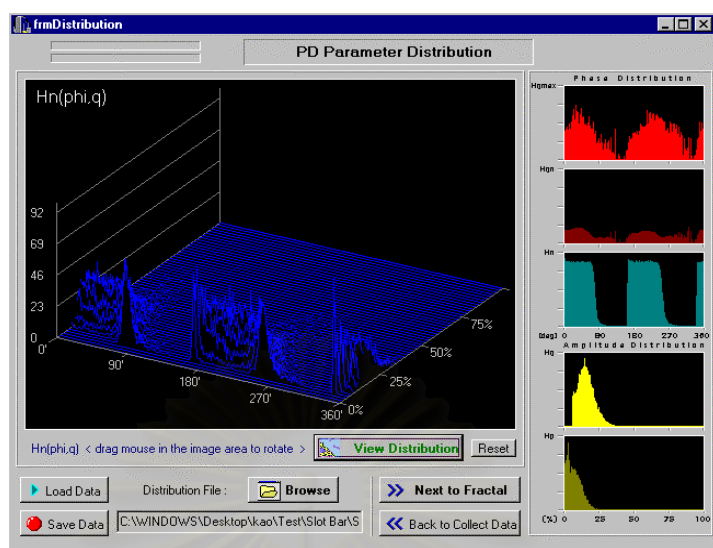


รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบแบบจำลอง S1 ที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 kV

2) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล๊อต S2 เลือกทดสอบโดยใช้แบบจำลองแบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2 x 20 ตารางเซนติเมตร ความชื้นสัมพัทธ์ 60% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.22 และ 5.23

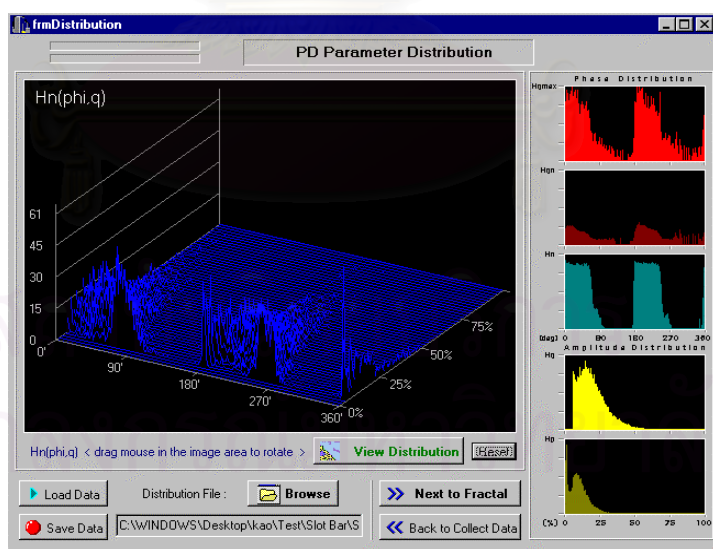


รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 kV

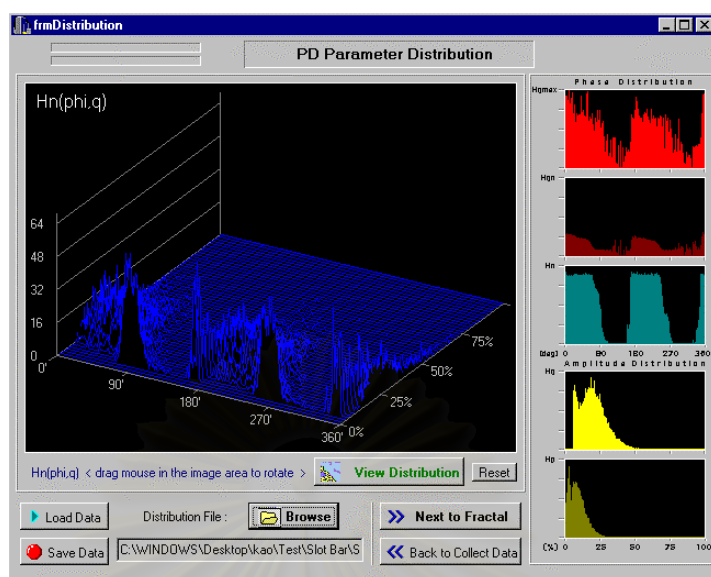


รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบแบบจำลอง S2 ที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 kV

3) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลิต S3 เลือกทดสอบโดยใช้แบบจำลองแบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2 x 10 ตารางเซนติเมตร ความชื้นสัมพัทธ์ 40% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.24 และ 5.25



รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 kV



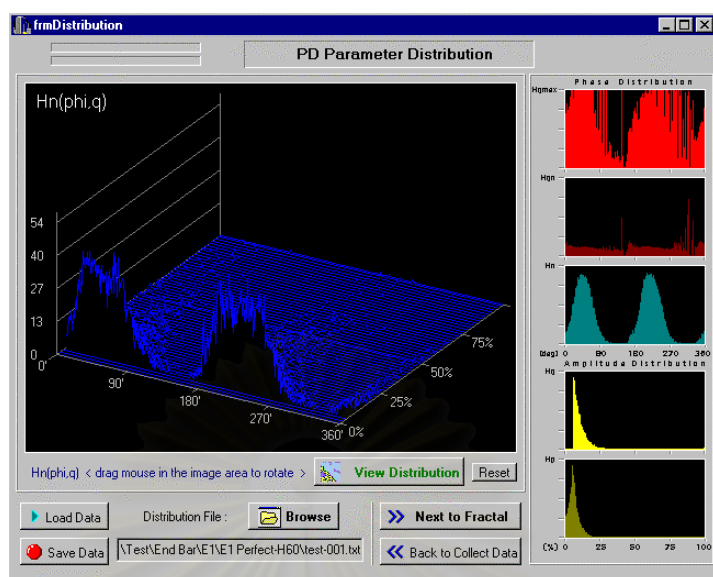
รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบแบบจำลอง S3 ที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 kV

การวิเคราะห์ความแตกต่างของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณที่ระดับแรงดันต่างกัน ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ระดับแรงดันต่างกันมากพอสมควร แต่การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลด้วยตาไม่สามารถเห็นผลความแตกต่างได้อย่างชัดเจน

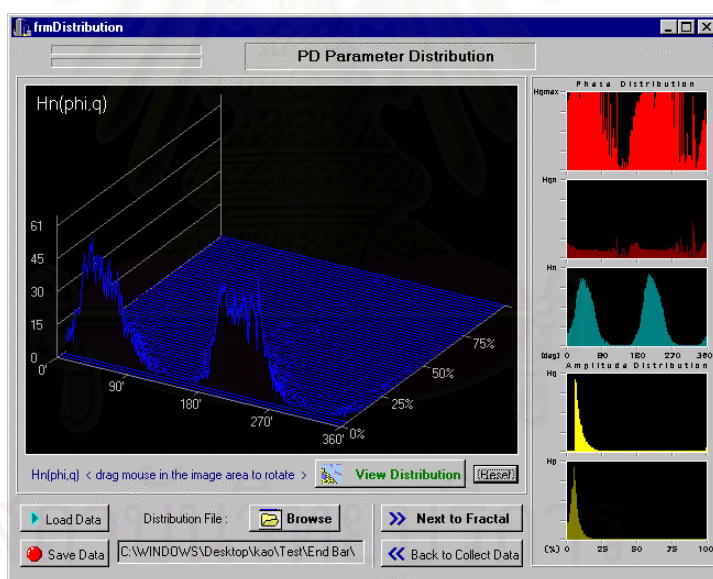
5.1.1.3 ผลการทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง

การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง E1, E2 และ E3 จะศึกษาการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนบริเวณส่วนพื้นร่อง โดยการทำให้แบบจำลองสองกรณีคือกรณีแรกจะทำการขูดผิวฉนวนระหว่างรอยต่อของชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาในสล๊อต และชั้นเคลือบลดความเครียดต้านการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่องออกเฉพาะบริเวณด้านข้างทั้งสองด้านที่ติดกับแท่งอะลูมิเนียมซึ่งใช้จำลองเป็นแกนสเตเตอร์ กรณีที่สองจะทำการขูดบริเวณรอยต่อให้แยกออกจากกันโดยรอบ ซึ่งในกรณีนี้ชั้นเคลือบลดความเครียดต้านการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่องจะไม่ต่อลงกราวด์ และทำการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของแบบจำลองดังกล่าวทั้งสองประเภทเทียบกับแบบจำลองในตอนแรกที่ยังไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น แบบจำลองแต่ละชั้นมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

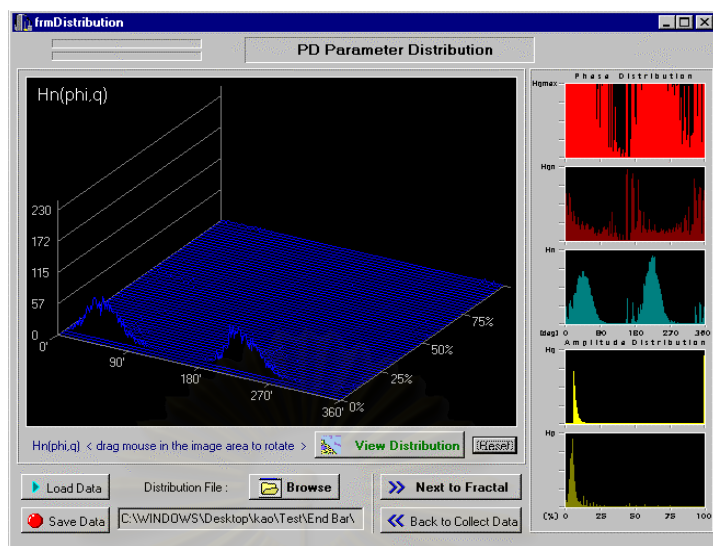
1) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง E1 การทดสอบที่แรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.26 ถึง 5.28



รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบแบบจำลอง E1 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง

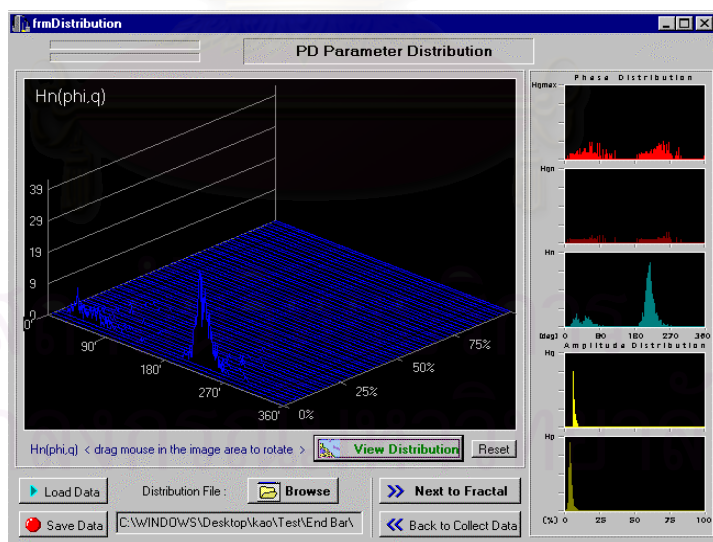


รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบแบบจำลอง E1 (จุดรอยต่อออกไม่รอบด้าน)

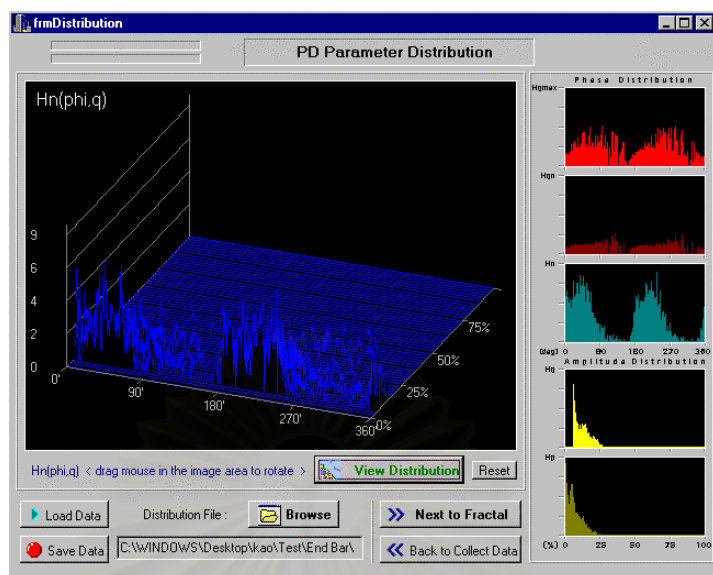


รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบแบบจำลอง E1 (ชุดรอยต่อออกกรอบด้าน)

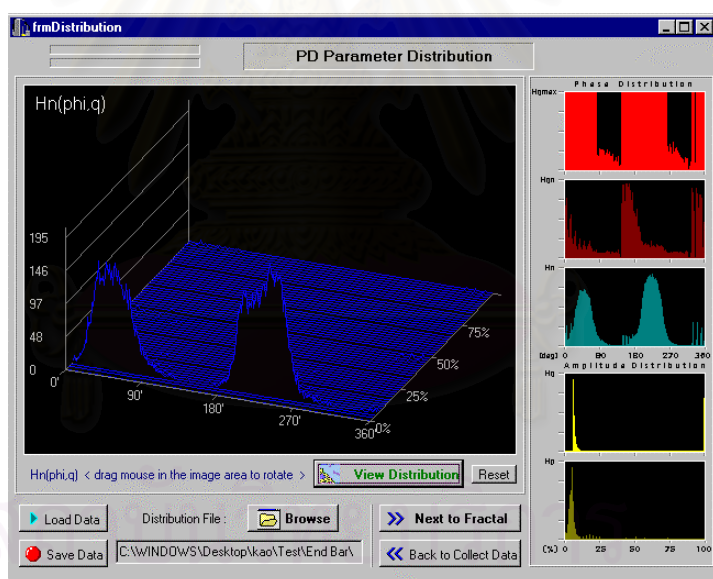
2) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง E2 ทำการทดสอบที่แรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ คุณหมิตทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 60% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.29 ถึง 5.31



รูปที่ 5.29 ผลการทดสอบแบบจำลอง E2 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง

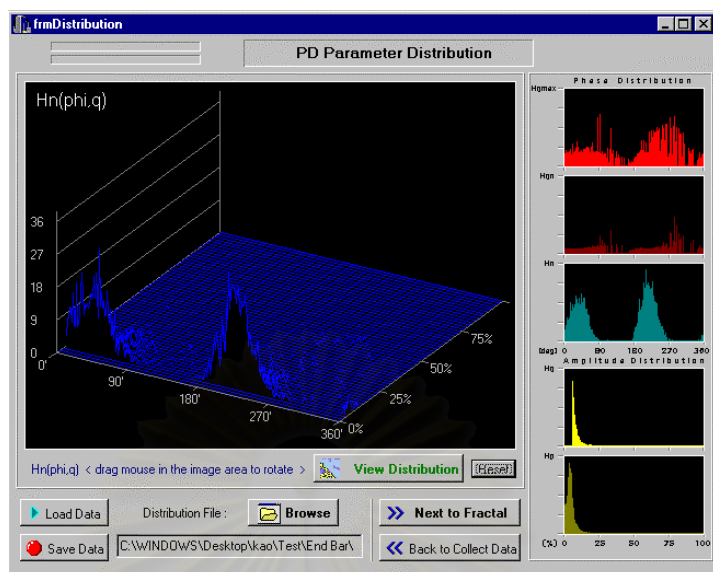


รูปที่ 5.30 ผลการทดสอบแบบจำลอง E2 (ชุดรอยต่อออกไม่รอบด้าน)

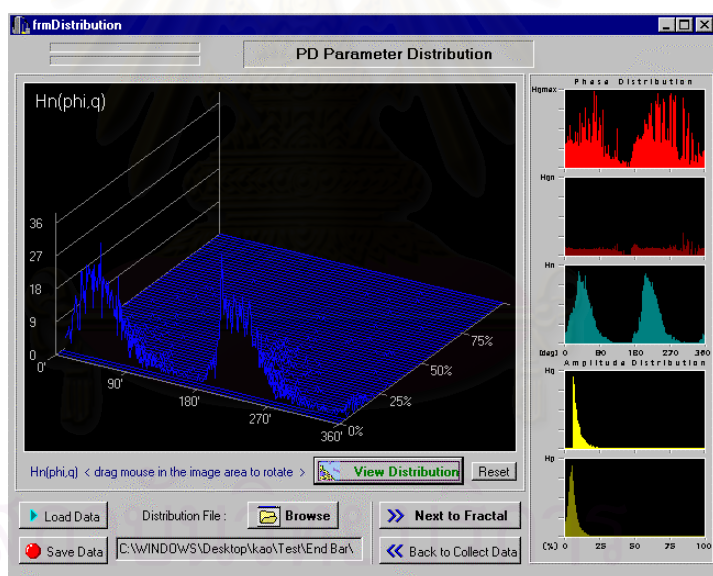


รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบแบบจำลอง E2 (ชุดรอยต่อออกรอบด้าน)

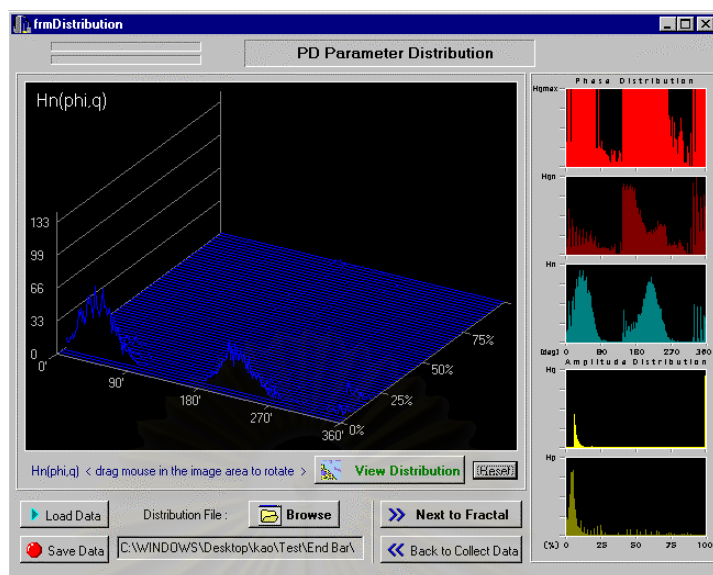
3) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง E3 ทำการทดสอบที่แรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ คุณหมุมิทดสอบประมาณ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.32 ถึง 5.34



รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบแบบจำลอง E3 ก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง



รูปที่ 5.33 ผลการทดสอบแบบจำลอง E3 (ชุดรอยต่อออกไม่รอบด้าน)



รูปที่ 5.34 ผลการทดสอบแบบจำลอง E3 (ชุดรอยต่อออกกรอบด้าน)

การทดสอบแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องจะพบว่า แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องแบบที่ 1 การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆด้วยตาไม่พบความแตกต่างกับรูปแบบการกระจายข้อมูลของแบบจำลองก่อนทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง และแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องแบบที่ 2 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

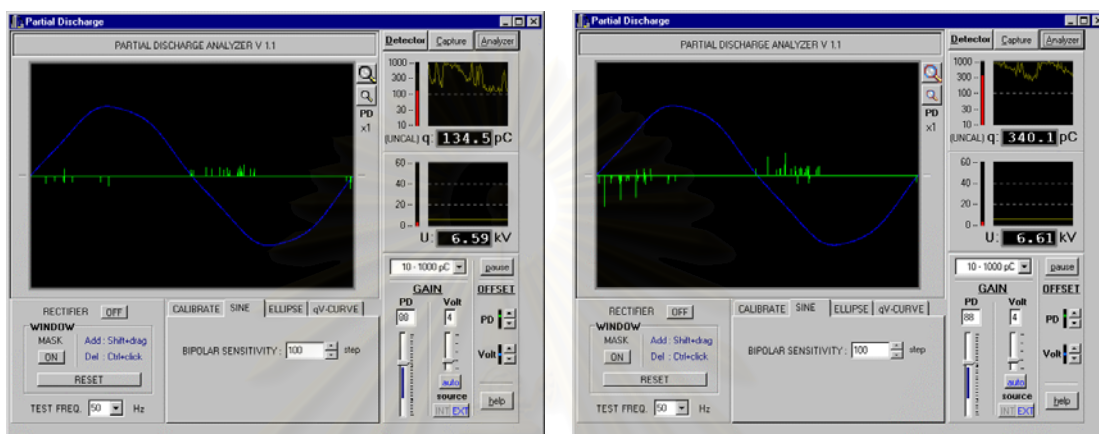
1) รูปแบบการกระจายแบบสามมิติ $H_n(\phi, q)$ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องแต่จะมีข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนอย่างหนึ่งคือจำนวนพัลส์ที่เกิดจะสูงขึ้นในกรณีที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในบริเวณนี้อย่างรุนแรง จำนวนพัลส์เมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่เกิดจุดบกพร่องจะสูงขึ้นหลายเท่าดังรูปที่ 5.31

2) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H_{qn}(\phi)$ ค่าเฉลี่ยขนาดประจุของการปล่อยประจุบางส่วนจะมีค่าสูงมากแถมๆมุมเฟส 180 องศา และ 360 องศา

3) รูปแบบการกระจายแบบสองมิติ $H(p)$ พลังงานการปล่อยประจุจะคล้ายแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องแต่จะแตกต่างกันคือ จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ค่าพลังงานการปล่อยประจุสูงขึ้นด้วยแต่จำนวนครั้งที่เกิดจะไม่สูงนักเมื่อเทียบจำนวนครั้งการปล่อยประจุบางส่วนสูงสุด แต่ก็พอจะสังเกตเห็นได้

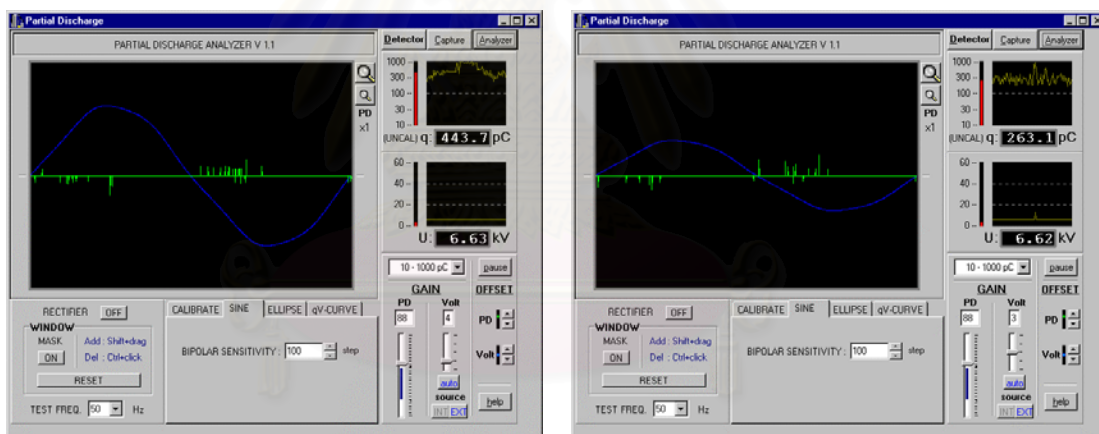
5.1.2 ผลการทดสอบแบบจำลองต่างๆ โดยดูจากการแสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time Scale)

การทดสอบแบบจำลองแต่ละประเภทจะทำการบันทึกการแสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้น เพื่อดูความแตกต่างเฉพาะของแบบจำลองแต่ละประเภทผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.35 ถึง 5.37



ก)

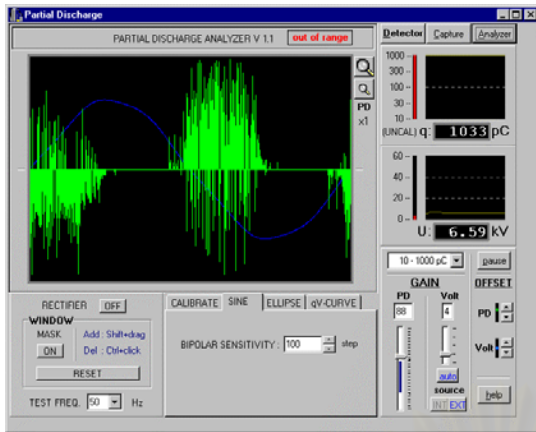
ข)



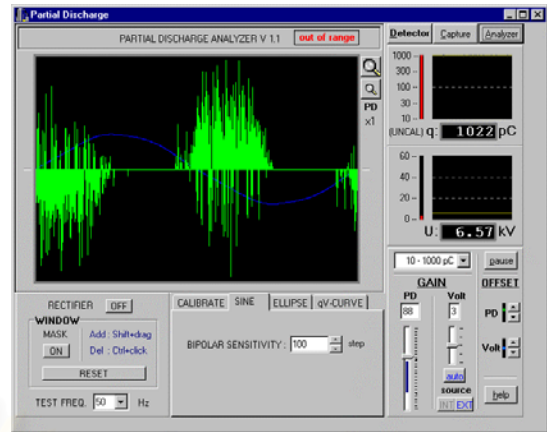
ค)

ง)

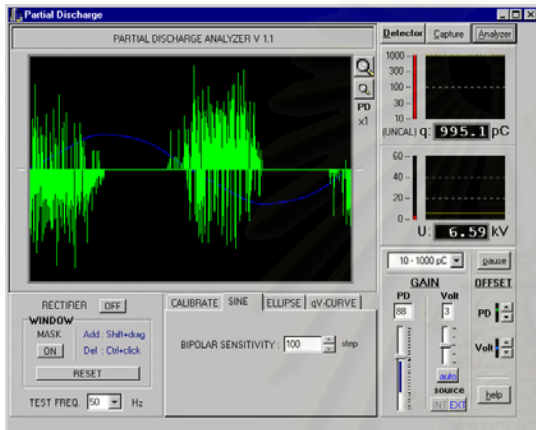
รูปที่ 5.35 แสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง



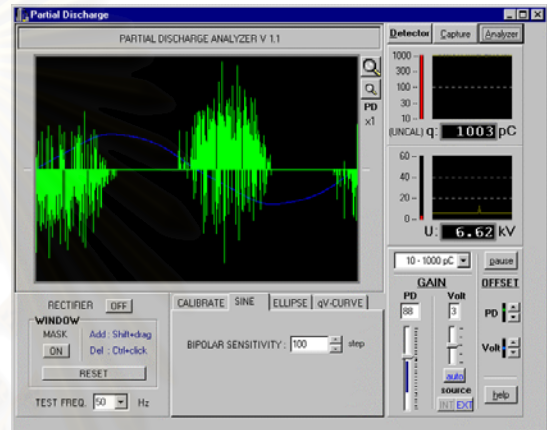
ก)



ข)

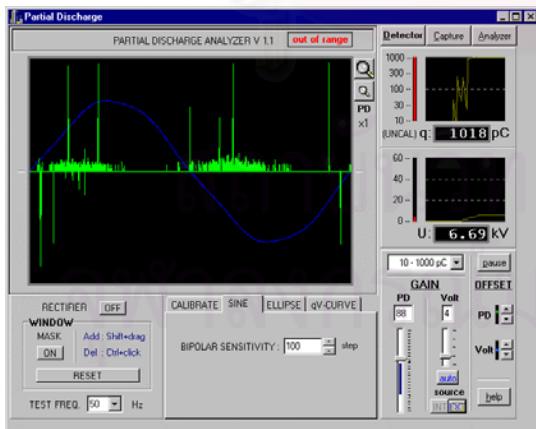


ค)

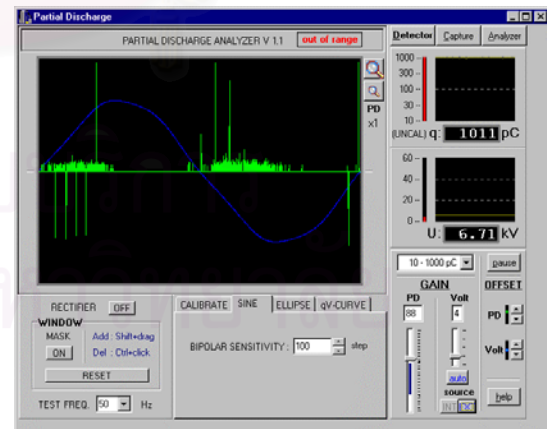


ง)

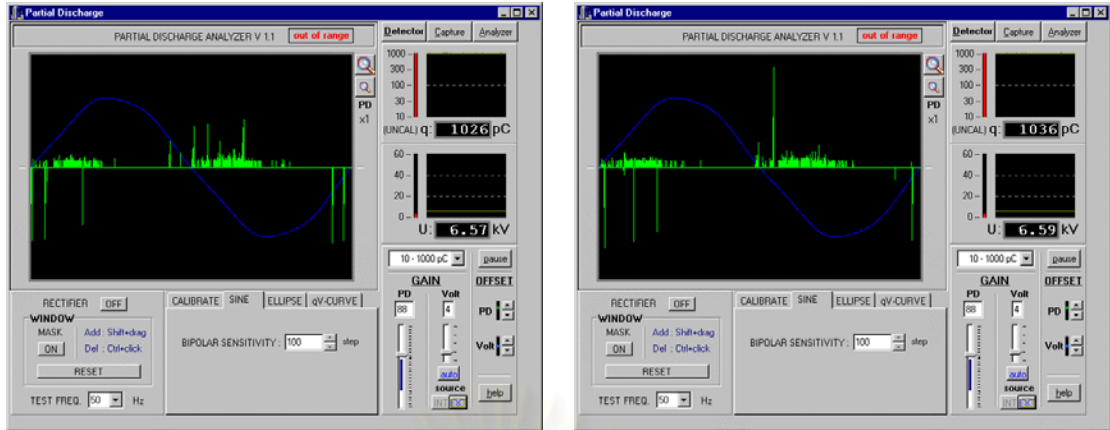
รูปที่ 5.36 แสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต



ก)



ข)



ค)

ง)

รูปที่ 5.37 แสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองจุดบกพร่อง
บริเวณส่วนพื้นร่อง

การแสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นของแบบจำลองทั้ง 3 ประเภท จะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้5

1) แบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง ขนาดพัลส์จะมีค่าค่อนข้างต่ำและเกิดน้อย พัลส์ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าแตกต่างกันไม่มาก พัลส์ส่วนใหญ่เกิดในช่วงมุมเฟส 0 ถึง 90 องศาและ 180 ถึง 270 องศา

2) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต ขนาดพัลส์จะมีค่าแตกต่างกันหลายระดับและเกิดมากพัลส์ส่วนใหญ่เกิดในช่วงมุมเฟส 0 ถึง 90 องศาและ 180 ถึง 270 องศา และจะสังเกตเห็นพัลส์บางส่วนเกิดขึ้นที่ก่อนมุมเฟส 180 และ 360 องศา

3) แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง พบว่าพัลส์ที่มีขนาดต่ำจะเกิดมากและขนาดพัลส์จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนักเหมือนกรณีแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่อง แต่จำนวนพัลส์จะสูงกว่า และจะมีพัลส์อีกจำนวนหนึ่งซึ่งไม่มากนักแต่จะมีขนาดประจูสูงมาก เกิดอยู่แถวรอบๆมุมเฟส 180 และ 360 องศา

5.2 ผลการทดสอบแบบจำลองแบบต่างๆด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

5.2.1 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต

ผลการทดสอบทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองบริเวณสลีตแต่ละชั้น โดยเทียบกับตัวเองก่อนที่จะทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น เนื่องจากขึ้นทดสอบแต่ละชั้นจะมีมาตรฐานในการผลิตที่แตกต่างกันไป

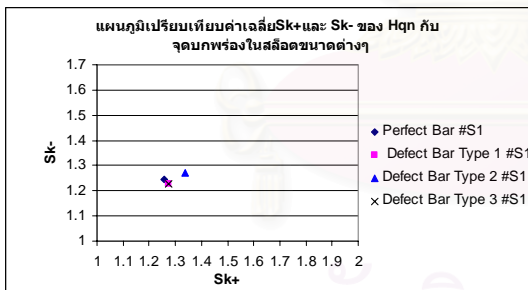
5.2.1.1แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตที่มีขนาดต่างๆกัน

แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต S1 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60 % จำลองให้เกิดจุดบกพร่อง 3 ระดับโดยการขูดผิวชั้นวัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาออกแบบที่ 1 ขนาดจุดบกพร่อง 2x5 ตารางเซนติเมตร แบบที่ 2 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x10 ตารางเซนติเมตร

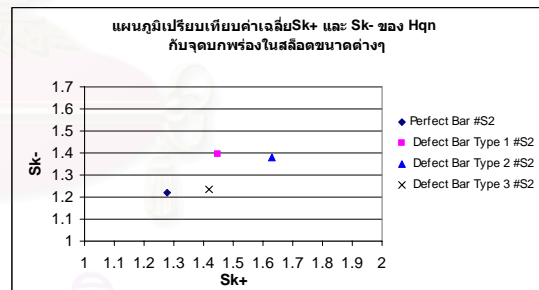
แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต S2 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60 % จำลองให้เกิดจุดบกพร่อง 3 ระดับคือ แบบที่ 1 จุดบกพร่องขนาด 2x10 ตารางเซนติเมตร แบบที่ 2 จุดบกพร่องขนาด 2x20 ตารางเซนติเมตร แบบที่ 3 ขนาดจุดบกพร่อง 2x30 ตารางเซนติเมตร

แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต S3 ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 6.6 กิโลโวลต์ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40 % จำลองให้เกิดจุดบกพร่อง 4 ระดับคือ แบบที่ 1 จุดบกพร่องขนาด 2x5 ตารางเซนติเมตร แบบที่ 2 จุดบกพร่องขนาด 2x7.5 ตารางเซนติเมตร แบบที่ 3 จุดบกพร่องขนาด 2x10 ตารางเซนติเมตร และแบบที่ 4 จุดบกพร่องขนาด 2x15 ตารางเซนติเมตร

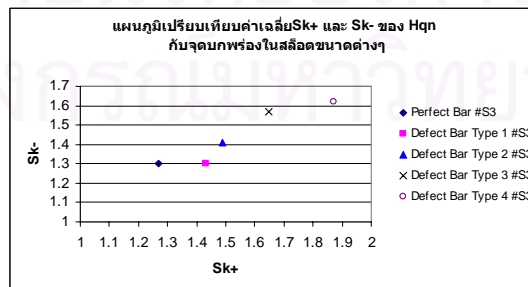
1) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$



ก)



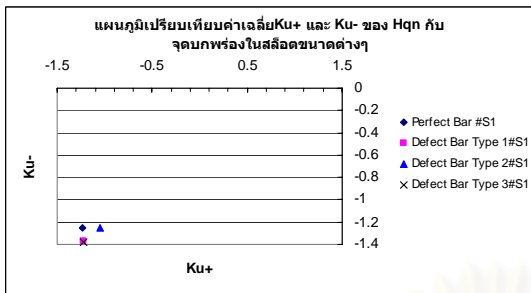
ข)



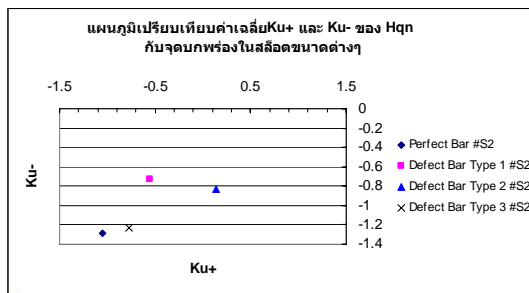
ค)

รูปที่ 5.38 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสลีต

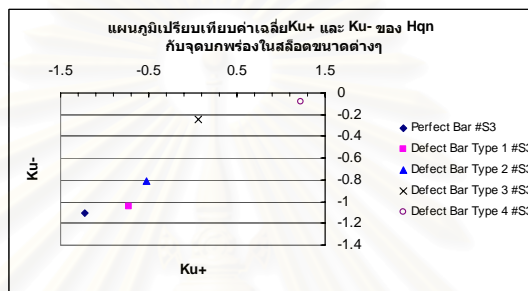
2) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$



ก)



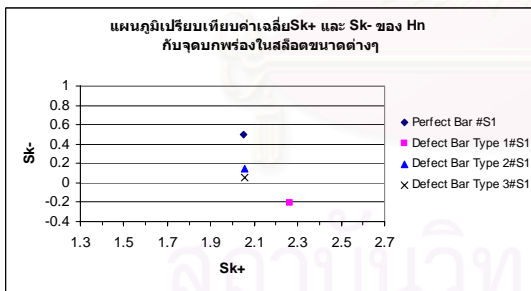
ข)



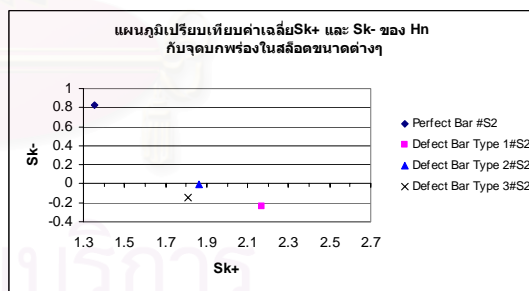
ค)

รูปที่ 5.39 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต

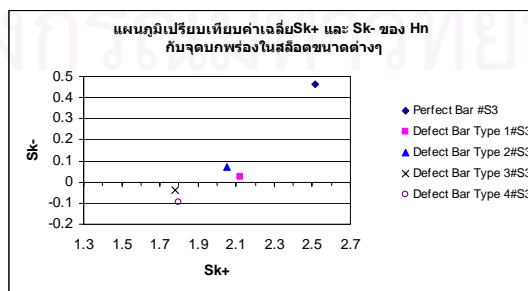
3) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_n(\phi)$



ก)

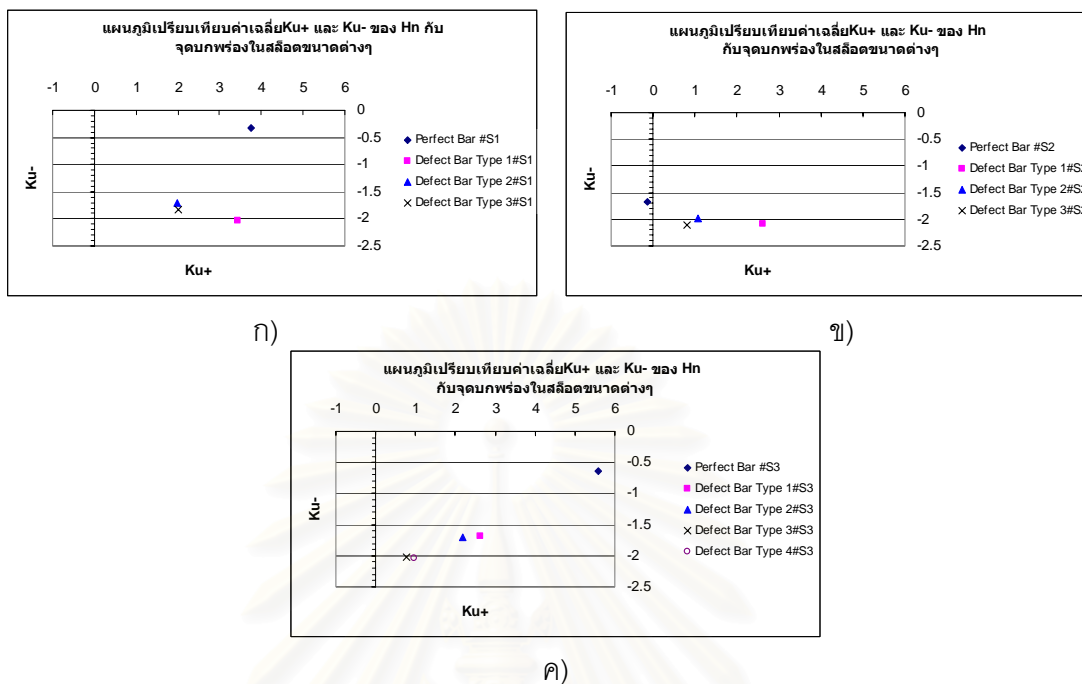


ข)

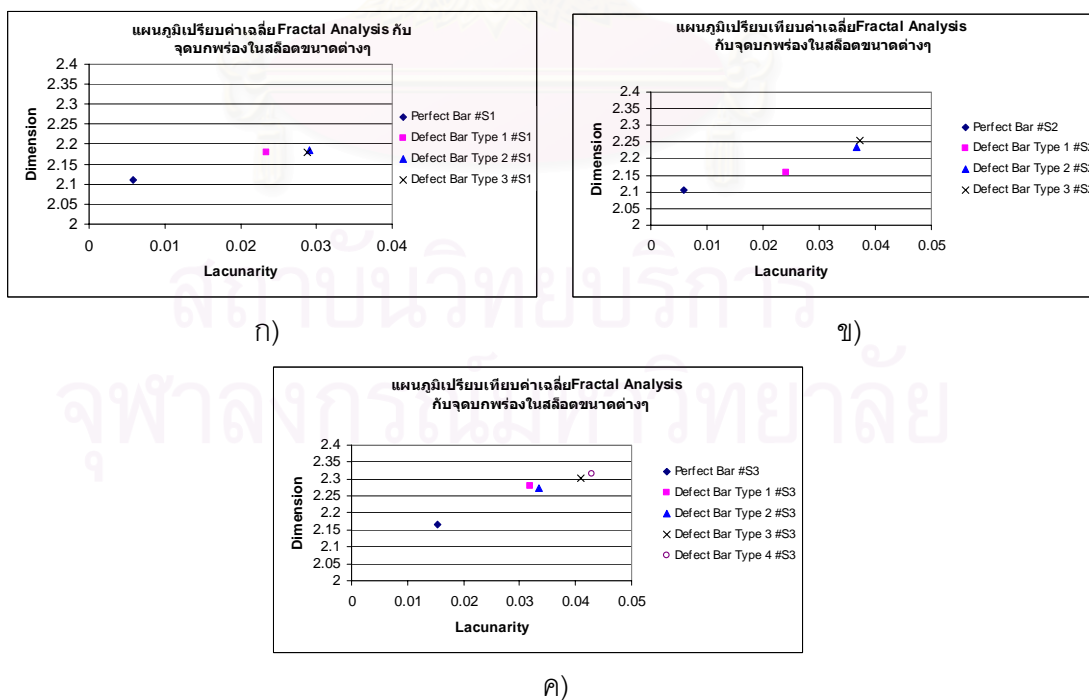


ค)

รูปที่ 5.40 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_n(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆในสล๊อต

4) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ รูปที่ 5.41 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ กับจุดบกพร่องขนาดต่างๆ ในสล๊อต

5) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ค่าแฟรกทัล (Lacunarity และ Dimension)



รูปที่ 5.42 การวิเคราะห์ค่าแฟรกทัล ของกับจุดบกพร่องขนาดต่างๆ ในสล๊อต

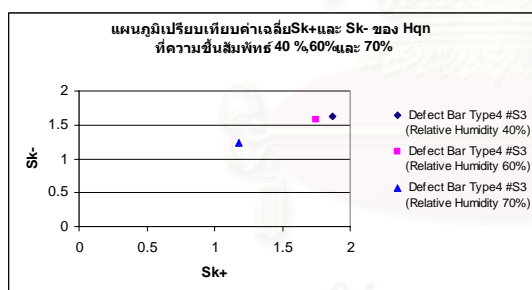
การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงขนาดจุดบกพร่องได้ผลดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ห้ด้วยค่า Skewness และ Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ และ Skewness และ Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ จากแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตจะพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สถิติของขึ้นทดสอบ S1 และ S2 ซึ่งทำการทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงขนาดจุดบกพร่องของแบบจำลองนี้ ไม่มีแนวโน้มในทิศทางที่สอดคล้องกัน แต่ขึ้นทดสอบ S3 ซึ่งทำการทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % จะพบว่า ค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของจุดบกพร่องของแบบจำลองดังรูป 5.38 ถึง 5.41

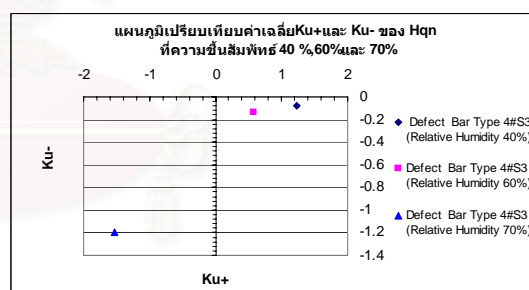
2) การวิเคราะห์ห้ด้วยค่าแฟรคทัล พบว่าค่าพารามิเตอร์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดจุดบกพร่องใหญ่ขึ้นสอดคล้องกันทุกขึ้นทดสอบ ดังรูป 5.42

5.2.1.2 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตที่ความชื้นต่างๆ

การทดสอบนี้ทำเพื่อดูผลของความชื้นสัมพัทธ์ว่ามีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนอย่างไร ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของความชื้นสัมพัทธ์ในแบบจำลองที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณสลีต S3 ซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องขนาด 2x15 ตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบมีดังนี้

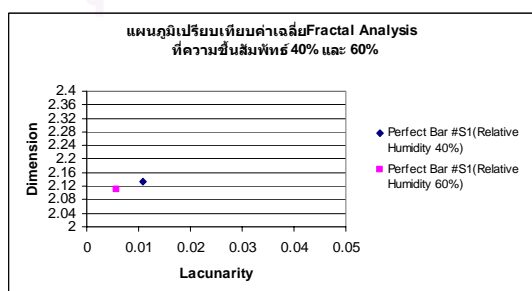


ก)

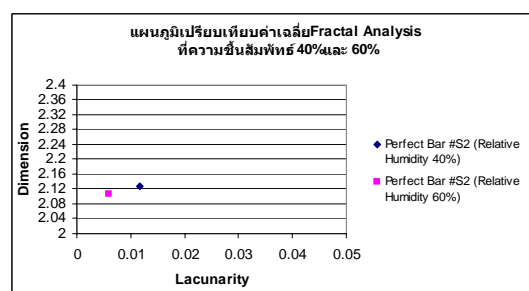


ข)

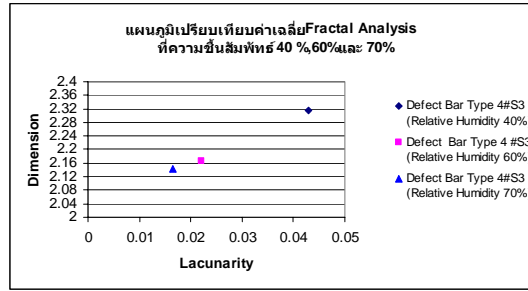
รูปที่ 5.43 การวิเคราะห์ค่า Skewness และ Kurtosis กับจุดบกพร่องในสลีตที่ความชื้นต่างๆ



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 5.44 การวิเคราะห์ค่าแฟร็กทัล ของแบบจำลอง S1,S2 และ S3 ที่ความชื้นต่างๆ

การทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 %, 60 % และ 70 % โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติได้ผลสรุปดังนี้

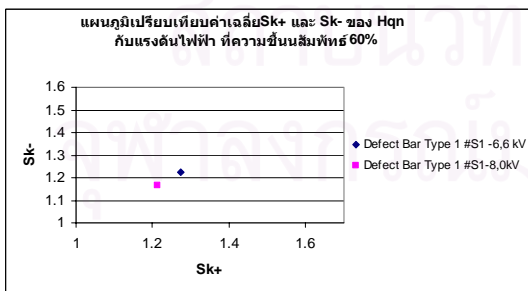
1) การวิเคราะห์ค่า Skewness และ Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ ในแบบจำลองจุดบกพร่องในสลีต S3 ที่ความชื้นต่างๆจะพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า Skewness และ Kurtosis จะน้อยลงดังรูปที่ 5.43

2) การวิเคราะห์ด้วยค่าแฟร็กทัล พบว่าค่าพารามิเตอร์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า Dimension และ Lacunarity ในทิศทางลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นดังรูปที่ 5.44

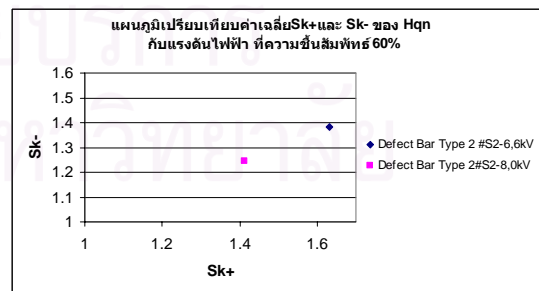
5.2.1.3 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตที่แรงดัน 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์

การทดสอบเพื่อดูผลของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงอากาศว่ามีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีตและมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทางสถิติผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.45 ถึง 5.47

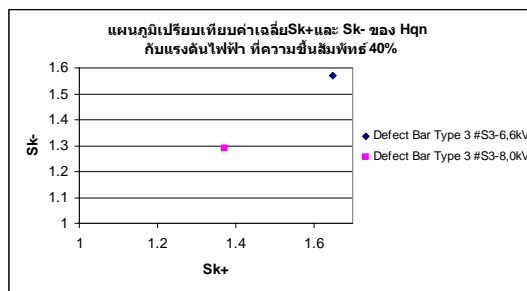
1) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์ค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$



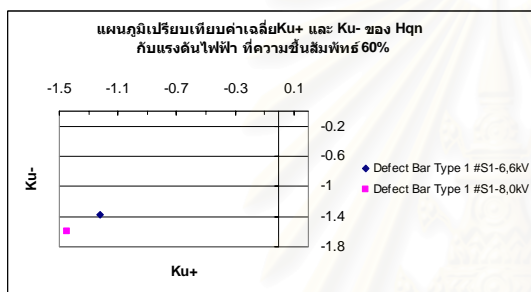
ก)



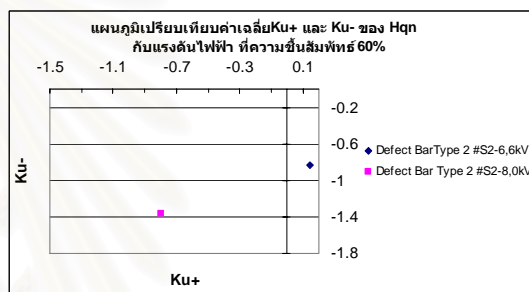
ข)



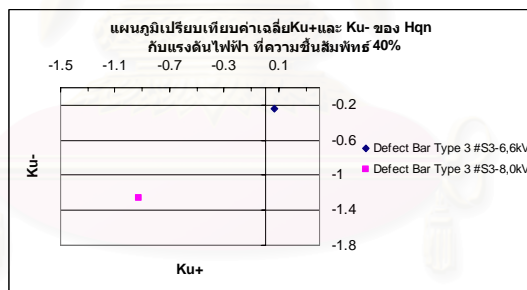
ค)

รูปที่ 5.45 การวิเคราะห์หาค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$ ที่แรงดัน 6.6 และ 8.0 kV2) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์หาค่า Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ 

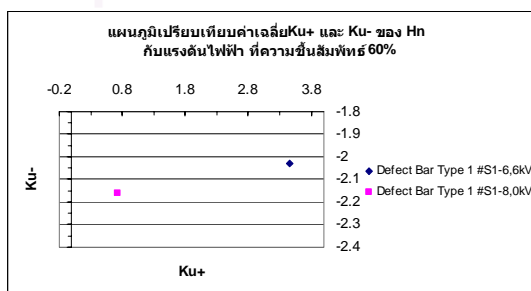
ก)



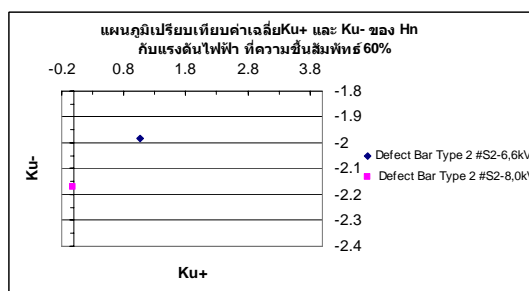
ข)



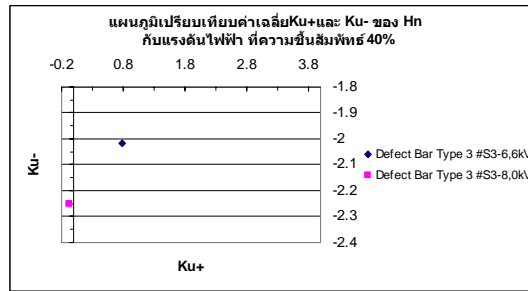
ค)

รูปที่ 5.46 การวิเคราะห์หาค่า Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ ที่แรงดัน 6.6 และ 8.0 kV3) ผลการทดสอบโดยการวิเคราะห์หาค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ 

ก)



ข)



ค)

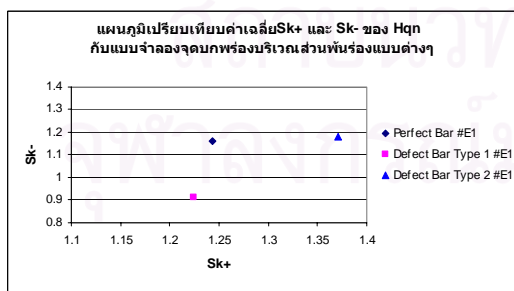
รูปที่ 5.47 การวิเคราะห์ค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ ที่แรงดัน 6.6 และ 8.0 kV

ผลการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสลีต ที่ระดับแรงดัน 6.6 และ 8.0 กิโลโวลต์โดยการวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติได้ผลสรุปดังนี้

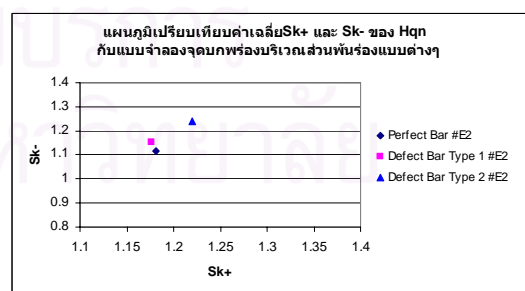
- 1) การวิเคราะห์ด้วยค่า Skewness และ Kurtosis ของ $H_{qn}(\phi)$ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 8.0 กิโลโวลต์ ค่า Skewness และ Kurtosis จะมีค่าลดลงดังรูปที่ 5.45 และ 5.46
- 2) การวิเคราะห์ด้วยค่า Kurtosis ของ $H_n(\phi)$ พบว่าที่แรงดัน 8.0 กิโลโวลต์ ค่า Kurtosis จะมีค่าลดลงเช่นกันดังรูปที่ 5.47

5.2.2 แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง

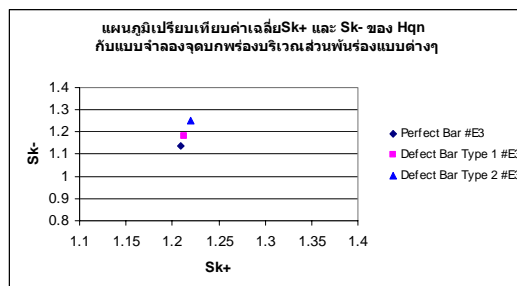
ผลการทดสอบทำการเปรียบเทียบแบบจำลองบริเวณส่วนพื้นร่องก่อนทำจุดบกพร่องและหลังทำให้เกิดจุดบกพร่อง สองประเภท คือประเภทแรกทำให้เกิดจุดบกพร่องโดยการชูดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุด้านการเกิดโคโรนาในสลีตและวัสดุด้านการเกิดโคโรนาบริเวณส่วนพื้นร่องแต่ชูดออกเพียงบางส่วน และแบบที่สองทำจุดบกพร่องโดยชูดออกรอบด้าน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % ซึ่งให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.48



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 5.48 การวิเคราะห์ค่า Skewness ของแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องแบบต่างๆ

การวิเคราะห์แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่องแบบต่างๆ โดยแบบจำลองทั้งสามแบบ พบว่าการวิเคราะห์แบบจำลองที่ยังไม่เกิดจุดบกพร่องและแบบจำลองจุดบกพร่องที่จุดบริเวณรอยต่อออกบางส่วนด้วยค่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$ ไม่มีความแตกต่างกัน แต่สำหรับแบบจำลองจุดบกพร่องโดยการขูดรอยต่อออกรอบด้านจะพบว่า Skewness ของ $H_{qn}(\phi)$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองทั้งสองแบบแรกดังรูปที่ 5.48

5.3 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นและการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนด้วยตา และการวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติต่างๆสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบบจำลองแต่ละประเภทให้ผลโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกประเภทจุดบกพร่องโดยการทดสอบนี้ได้ การจำแนกประเภทจุดบกพร่องทำได้โดยการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ คือ รูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสามมิติ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของพัลส์ของการปล่อยประจุบางส่วน (q) เฟส (ϕ) และจำนวนพัลส์ (n) ที่เกิดขึ้น $H_n(\phi, q)$ และการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายแบบสองมิติซึ่งประกอบด้วย การกระจายขนาดพัลส์เฉลี่ยตามมุมเฟส $H_{qn}(\phi)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิดพัลส์ซ้ำตามมุมเฟส $H_n(\phi)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิดพัลส์ซ้ำตามขนาด $H(q)$ และการกระจายจำนวนครั้งที่เกิดพัลส์ซ้ำตามพลังงานของการปล่อยประจุบางส่วน $H(p)$ หรือวิเคราะห์สัญญาณที่แสดงผลบนฐานเวลาแบบเชิงเส้นก็ได้เช่นเดียวกัน และเพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำยิ่งขึ้นควรใช้ทั้งสองวิธีประกอบกัน

2) การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ มีความเหมาะสมสำหรับเปรียบเทียบดูการเปลี่ยนแปลงสภาพของฉนวนเช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดของจุดบกพร่อง ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมจุดบกพร่องแตกต่างกัน หรือเปรียบเทียบสภาพฉนวนเมื่อเกิดจุดบกพร่อง

กับฉนวนที่อยู่ในสภาพดี เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติจะมีประสิทธิภาพดีกว่า การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายข้อมูลด้วยตาในกรณีที่ไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน

3) ความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนคือ การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดมาก (พัลส์มีขนาดประจุสูง) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และจะเกิดน้อย(พัลส์มีขนาดประจุต่ำ) ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น และทำให้การวิเคราะห์แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อตผิดพลาดได้เนื่องจากรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆจะผิดเพี้ยนไป ส่วนการวิเคราะห์แบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณส่วนพื้นร่อง แม้ว่าความชื้นจะมีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน แต่เนื่องจุดบกพร่องประเภทนี้จะมีความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณจุดบกพร่องสูงมากทำให้ยังคงเห็นผลการทดสอบได้ชัดเจน

4) การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติพบว่า การวิเคราะห์ด้วยค่าแฟรกต์ลมีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของขนาดจุดบกพร่องในแบบจำลองจุดบกพร่องบริเวณสล็อต และเปรียบเทียบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนกับความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุด เนื่องจากค่าแฟรกต์ลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะทางกายภาพกับรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสามมิติ ส่วนการวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติอื่นๆจะเห็นแนวโน้มได้ชัดเจนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเท่านั้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงๆแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทางสถิติจะไม่ชัดเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นวิธีการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำมาใช้ทดสอบและวิเคราะห์หาสาเหตุของจุดบกพร่องในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ได้อย่างดี ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดการปล่อยประจุบางส่วนร่วมกับการนำเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ ทำให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นกว่าการวิเคราะห์รูปแบบเดิม

ผลการศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน โดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเพื่อหารูปแบบซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการจำแนกประเภทจุดบกพร่องแบบต่างๆได้

2) แบบจำลองแต่ละประเภทมีรูปแบบของการเกิดการการปล่อยประจุที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกจุดบกพร่องในแบบจำลองแต่ละประเภทด้วยตาเปล่าได้ โดยดูจากการแสดงผลสัญญาณบนฐานเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time Scale) หรืออาจดูจากรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสามมิติและรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสองมิติดังที่สรุปไว้ใน บทที่ 5

3) การวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิเคราะห์จากค่าพารามิเตอร์ทางสถิติมีความเหมาะสมในการประเมินการติดตามการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่อง โดยการดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ โดยค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่มีความเหมาะสมที่สุดคือการวิเคราะห์ค่ามิติแฟร็กทัลและค่าลาควินาริตี เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์ทางกายภาพโดยตรงกับรูปแบบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแบบสามมิติ

4) ความขึ้นสัมพันธ์ของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน เมื่อความขึ้นสัมพันธ์สูงขึ้นการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะมีขนาดประจุต่ำลง ซึ่งทำให้รูปแบบการกระจายข้อมูลแบบต่างๆมีความผิดเพี้ยนจากรูปแบบที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของแบบจำลองแต่ละประเภท ดังนั้นในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดบกพร่องหรือเพื่อติดตามการเสื่อมสภาพของฉนวนจึงต้องระมัดระวังค่าความขึ้นสัมพันธ์ของสภาวะแวดล้อมด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนนั้นเป็นเพียงการศึกษาในส่วนของแบบจำลองเท่านั้น ยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับการทดสอบในอุปกรณ์จริงซึ่งมีความซับซ้อนของตัวอุปกรณ์และมีปัจจัยอื่นอีกมากที่มีผลต่อการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งอาจจะให้ผลการทดสอบที่มีความแตกต่างกันออกไปบ้าง การออกแบบจำลองขึ้นมาเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าจุดบกพร่องแต่ละตำแหน่งจึงพยายามออกแบบให้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์จริงให้มากที่สุด เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดบกพร่องในอุปกรณ์จริงได้ แต่อย่างไรก็ดีควรจะมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องโดยทำการทดสอบจากอุปกรณ์จริง และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลการทดสอบมาปรับใช้กับอุปกรณ์จริงต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. H. Zhu, V. Green, D. Huynh. Life Extension Experience on Rotating Machine Insulation Using On-Line PD Testing. IEEE 2002.
2. ณรงค์ ทองฉิม. เครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
3. Zezhong Wang., Chengrong Li., Pai Peng, Lijian Ding., Yimei Jia., Wei Wang., Jingchun Wang. Partial Discharge Recognition of Stator Winding Insulation Based on Artificial Neural Network . Conference Record of the 2000 IEEE , pp. 9-12.
4. Kreuger F.H.Discharge Detection in High Voltage Equipment. 2nd ed. London : Butterworth,1989, pp. 7-85.
5. Gabe Paoletti., Alex Golubev0. Partial Discharge Theory and Technologies Related to Traditional Testing Methods of Large Rotating Apparatus. IEEE Transaction, 1999, pp. 967-981.
6. Hee-Dong Kim. Analysis of Partial Discharge to High Voltage Motor Stator Windings. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena , 2001, pp. 340-343.
7. K. Mallikarjunappa., S.N. Moorching. Partial Discharge Magnitude Distribution Analysis in Characterising Ageing Phenomena in High Voltage Rotating Machine Insulation System. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10,1998, pp. 630-633.
8. J.T. Holboll., M. Henriksen., A. Jensen., F. Sorensen. PD-Pulse Characteristics in Rotating Machine Insulation. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburg, PA USA, June 5-8, 1994, pp. 322-326.
9. E. Gulski., F.H. Kreuger. Computer-aided recognition of Discharge Sources. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, February 1992, pp. 82-92.
10. Kai Gao., Kexiong Tan., Fuqi Li., Chengqi Wu., PD Pattern Recognition for Stator Bar Models with Six Kinds of Characteristic Vectors Using BP Network .IEEE

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9 No. 3, June 2002, pp. 381-389.
11. E. Gulski., A. Krivda., Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges. IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 6, December 1993, pp. 984 - 1001.
 12. Zezhong Wang., Chengrong Li., Pai Peng., Lijian Ding., Yimei Jia., Wei Wang., Jingchun Wang. Partial Discharge Recognition Based on Artificial Neural Network. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000, pp. 9-12.
 13. รัฐภูมิ วุฒิจำนงค์. เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นฐาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์, 2542.
 14. เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์. การรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์, 2544.
 15. W. McDermid. Insulation Systems and Monitoring for Stator Windings of Large Rotating Machines. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 9 No. 4, July/August 1993, pp. 7-15.
 16. L.J. Rejda., Kris Neville. Industrial Motor Users' Handbook of Insulation for Review.
 17. D.G Edwards. Slot Discharge Mechanism in High Voltage Rotating Machines. International Conference, 28-30 Sep. 1993, pp. 113-114.
 18. Surapol Puthwattana. On-Line Partial Discharge Analysis for Improving Availability and Maintenance of Hydroelectric Generator. Thesis of Master of Engineering in Engineering Management Graduate School Chulalongkorn University, 1999.
 19. IEC Pub. 505 (1975). Guide for the Evaluation and Identification of Insulation of Insulation Systems of Electrical Equipment.
 20. Ravin Arora., Wolfgang Mosch. High Voltage Insulation Engineering. India: Wiley Eastern, 1995.
 21. IEC std. 270-1981. Partial Discharge Measurement.

22. IEEE Std 1434-2000. IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
23. Yue Bo., Li Jian., Cheng Yonghong., Hengkun Xie. Study on the Multi-Stress Aging of Stator Insulation Based on Fingerprint Parameters. Proc. Of 2001 International Symposium Electrical Insulating Materials, 19-22 Nov. 2001.(ISEIM 2001), pp. 729-732.
24. F. H. kreuger., E. Gulski., A. Krivda. Classification of Partial Discharges. IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 6, December 1993, pp. 917-931.
25. Yu-Bock Cho., Joo-Young Oh., An Overview of Application of Artificial Neural Network to Partial Discharge Pattern Classification. Proceeding of the 5th International Conference on Properties and Application of Dielectric Matters, 1997.
26. Satish., L. and Zaengl, W.S. Can Fractal be used for Recognizing 3-D Partial Discharge Patterns?. IEEE Transaction of Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, 1995, pp. 352-359.
27. Osvath P. Prespective of Partial Discharge Detection and Location. IEEE-Thailand Section Seminar. Bangkok: Chulalongkorn University, 1988.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S1 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.166	1.137	-1.55	-1.66	0.928	0.3	0.278	2.365	0.618	5.495	-0.55	0.0083	2.139
2	1.286	1.184	-1.15	-1.51	1.046	0.466	0.487	2.397	0.347	5.655	-1.05	0.0127	2.139
3	1.183	1.144	-1.52	-1.64	1.07	0.395	0.423	2.362	0.457	5.35	-0.93	0.0125	2.147
4	1.2	1.163	-1.46	-1.58	1.026	0.592	0.607	2.382	0.448	5.447	-0.82	0.0126	2.141
5	1.248	1.139	-1.29	-1.65	1.132	0.225	0.255	2.352	0.298	5.523	-1.13	0.0121	2.131
6	1.241	1.19	-1.42	-1.49	1.019	0.3	0.305	2.329	0.203	5.288	-1.31	0.0119	2.133
7	1.213	1.15	-1.4	-1.62	1.004	0.491	0.493	2.258	0.389	4.654	-1	0.0115	2.15
8	1.201	1.149	-1.45	-1.62	1.02	0.608	0.621	2.326	0.267	5.161	-1.27	0.0115	2.142
9	1.183	1.16	-1.52	-1.59	1.023	0.579	0.592	2.35	0.419	5.235	-0.95	0.0106	2.131
10	1.172	1.149	-1.52	-1.62	0.902	0.448	0.405	2.264	0.422	4.821	-0.94	0.0106	2.132
11	1.155	1.15	-1.61	-1.62	0.995	0.605	0.602	2.273	0.426	4.891	-0.99	0.0103	2.127
12	1.175	1.151	-1.54	-1.62	1.015	0.493	0.5	2.077	0.339	3.701	-1.23	0.011	2.135
13	1.139	1.141	-1.65	-1.64	0.994	0.343	0.341	2.146	0.348	4.072	-1.2	0.0097	2.121
14	1.181	1.156	-1.53	-1.6	1.05	0.407	0.427	2.106	0.399	3.875	-1.09	0.0099	2.13
15	1.176	1.16	-1.54	-1.59	0.992	0.375	0.372	2.055	0.161	3.528	-1.55	0.0091	2.126
16	1.131	1.174	-1.68	-1.54	0.893	0.382	0.341	2.083	0.291	3.672	-1.33	0.0089	2.123
17	1.133	1.152	-1.67	-1.62	0.922	0.56	0.517	1.951	0.178	2.948	-1.64	0.0105	2.137
18	1.126	1.178	-1.7	-1.53	0.912	0.182	0.166	1.997	0.264	3.213	-1.4	0.0108	2.137
19	1.158	1.189	-1.6	-1.5	0.935	0.312	0.292	1.949	0.127	2.936	-1.69	0.0115	2.14
20	1.144	1.19	-1.64	-1.5	0.91	0.324	0.295	1.911	0.171	2.798	-1.61	0.0108	2.135
AVG	1.181	1.16	-1.52	-1.59	0.989	0.419	0.416	2.197	0.329	4.413	-1.18	0.01084	2.1348
SD	0.042	0.018	0.136	0.055	0.065	0.128	0.133	0.167	0.124	0.999	0.297	0.001242	0.007516

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S1 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.385	1.366	-0.73	-0.86	1.024	0.677	0.693	1.718	1.94	1.996	3.218	0.0065	2.107
2	1.2	1.276	-1.41	-1.16	0.94	0.47	0.442	1.856	1.866	2.91	3.151	0.0044	2.098
3	1.25	1.267	-1.22	-1.18	1.007	0.516	0.519	2.212	2.136	5.009	4.392	0.0046	2.103
4	1.301	1.547	-1.03	-0.01	1.012	0.532	0.538	2.018	1.855	3.911	3.539	0.0037	2.091
5	1.329	1.314	-1.01	-1.04	1.101	0.44	0.484	2.393	1.401	5.026	1.5	0.0043	2.11
6	1.135	1.21	-1.64	-1.38	0.953	0.187	0.178	2.094	0.8	3.565	-0.03	0.0053	2.111
7	1.167	1.178	-1.54	-1.5	1.007	0.138	0.139	2.326	0.857	4.503	0.187	0.0058	2.111
8	1.21	1.163	-1.41	-1.55	1.184	0.105	0.125	2.21	-0.04	4.706	-1.6	0.0066	2.119
9	1.337	1.32	-0.93	-0.95	1.085	0.497	0.539	2.305	-0.06	5.391	-1.62	0.0062	2.116
10	1.216	1.175	-1.4	-1.51	1.125	0.465	0.524	2.166	-0.05	4.293	-1.68	0.0061	2.118
11	1.293	1.226	-1.14	-1.34	1.086	0.447	0.486	1.975	-0.25	3.556	-1.92	0.0043	2.112
12	1.296	1.246	-1.14	-1.27	1.11	0.438	0.486	2.082	-0.2	4.14	-1.86	0.0071	2.114
13	1.257	1.205	-1.26	-1.42	1.072	0.291	0.312	1.987	-0.15	3.678	-1.82	0.007	2.108
14	1.305	1.218	-1.04	-1.34	1.137	0.452	0.513	1.848	-0.02	2.865	-1.89	0.0069	2.117
15	1.177	1.193	-1.53	-1.46	1.058	0.39	0.412	1.95	-0.17	3.156	-1.86	0.0066	2.111
16	1.209	1.17	-1.43	-1.54	1.107	0.381	0.422	2.006	-0.23	3.406	-1.93	0.0067	2.12
17	1.26	1.217	-1.24	-1.38	1.115	0.594	0.662	1.934	0.237	3.166	-1.31	0.0063	2.106
18	1.298	1.185	-1.1	-1.49	1.161	0.44	0.511	1.979	0.307	3.42	-1.24	0.0064	2.104
19	1.258	1.22	-1.25	-1.36	1.096	0.323	0.354	1.935	-0.16	3.043	-1.88	0.006	2.11
20	1.285	1.223	-1.16	-1.35	1.082	0.471	0.51	2	-0.2	3.381	-1.94	0.0057	2.111
AVG	1.258	1.246	-1.23	-1.25	1.073	0.413	0.442	2.05	0.494	3.756	-0.33	0.005825	2.10985
SD	0.063	0.089	0.229	0.35	0.065	0.144	0.154	0.174	0.862	0.86	2.2	0.001036	0.007154

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S1จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.333	1.303	-1.01	-1.13	1.034	0.642	0.664	2.089	0.298	2.21	-1.5	0.0303	2.237
2	1.46	1.375	-0.56	-0.87	1.012	0.671	0.679	2.055	0.21	2.03	-1.65	0.0311	2.208
3	1.31	1.288	-1.1	-1.17	0.908	0.578	0.525	2.076	0.115	2.127	-1.74	0.0312	2.221
4	1.266	1.235	-1.24	-1.34	0.902	0.504	0.455	2.105	0.058	2.297	-1.79	0.0286	2.2
5	1.224	1.221	-1.4	-1.39	0.903	0.478	0.432	2.129	-0.09	2.404	-1.94	0.0267	2.196
6	1.253	1.221	-1.29	-1.39	0.992	0.568	0.564	2.176	-0	2.684	-1.85	0.0254	2.177
7	1.197	1.19	-1.47	-1.48	0.989	0.594	0.588	2.208	-0.13	2.892	-1.99	0.024	2.165
8	1.269	1.268	-1.24	-1.23	1.02	0.501	0.511	2.219	-0.07	2.975	-1.92	0.0232	2.17
9	1.32	1.224	-1.06	-1.39	0.983	0.665	0.654	2.266	-0.06	3.294	-1.9	0.0226	2.172
10	1.291	1.223	-1.16	-1.39	0.983	0.631	0.621	2.297	-0.26	3.573	-2.08	0.0219	2.188
11	1.191	1.159	-1.5	-1.59	0.932	0.568	0.529	2.306	-0.25	3.67	-2.09	0.0221	2.191
12	1.27	1.212	-1.24	-1.42	0.986	0.525	0.518	2.323	-0.42	3.863	-2.22	0.0207	2.17
13	1.329	1.205	-1.02	-1.44	1.056	0.625	0.66	2.356	-0.39	4.079	-2.21	0.0209	2.166
14	1.225	1.189	-1.39	-1.5	0.965	0.556	0.537	2.358	-0.4	4.044	-2.22	0.0207	2.156
15	1.281	1.216	-1.19	-1.41	0.995	0.711	0.708	2.389	-0.44	4.219	-2.22	0.0199	2.147
16	1.25	1.214	-1.3	-1.41	1.012	0.678	0.686	2.39	-0.48	4.577	-2.26	0.0197	2.171
17	1.245	1.194	-1.32	-1.49	0.997	0.75	0.748	2.399	-0.41	4.526	-2.22	0.0205	2.164
18	1.237	1.194	-1.35	-1.49	0.968	0.406	0.393	2.39	-0.46	4.527	-2.26	0.0199	2.174
19	1.241	1.2	-1.34	-1.46	0.979	0.723	0.708	2.391	-0.45	4.461	-2.26	0.0197	2.158
20	1.262	1.205	-1.26	-1.46	0.96	0.57	0.547	2.395	-0.45	4.557	-2.26	0.0201	2.148
AVG	1.273	1.227	-1.22	-1.37	0.979	0.597	0.586	2.266	-0.2	3.45	-2.03	0.02346	2.17895
SD	0.059	0.049	0.21	0.162	0.042	0.089	0.1	0.123	0.248	0.926	0.234	0.004017	0.023812

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S1จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 8.0 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.196	1.177	-1.5	-1.54	0.993	0.592	0.587	1.778	-0.04	0.521	-2.13	0.0284	2.205
2	1.173	1.15	-1.57	-1.63	0.982	0.372	0.365	1.815	-0.1	0.681	-2.18	0.0218	2.185
3	1.193	1.155	-1.51	-1.62	1.032	0.364	0.375	1.818	-0.01	0.699	-2.18	0.0271	2.207
4	1.211	1.16	-1.45	-1.6	1.031	0.483	0.498	1.814	-0.09	0.686	-2.18	0.0262	2.203
5	1.18	1.145	-1.55	-1.65	1.024	0.237	0.243	1.816	-0.08	0.687	-2.17	0.0267	2.196
6	1.213	1.169	-1.45	-1.57	0.997	0.388	0.387	1.822	0.004	0.711	-2.11	0.0271	2.196
7	1.198	1.165	-1.49	-1.59	0.981	0.331	0.325	1.836	-0.05	0.78	-2.15	0.0262	2.198
8	1.244	1.166	-1.35	-1.59	1.004	0.308	0.309	1.859	-0.08	0.895	-2.17	0.0252	2.197
9	1.181	1.146	-1.54	-1.64	0.976	0.582	0.568	1.824	-0.02	0.72	-2.13	0.0271	2.201
10	1.2	1.256	-1.49	-1.61	1.031	0.5	0.516	1.823	-0.02	0.714	-2.13	0.0225	2.192
11	1.234	1.18	-1.38	-1.54	1.002	0.582	0.584	1.824	-0.02	0.712	-2.13	0.0267	2.194
12	1.243	1.18	-1.35	-1.53	1.058	0.63	0.667	1.832	-0.1	0.745	-2.18	0.0255	2.186
13	1.25	1.159	-1.32	-1.6	1.048	0.547	0.573	1.825	-0.09	0.703	-2.16	0.0253	2.204
14	1.215	1.167	-1.44	-1.57	1.029	0.632	0.65	1.815	-0.07	0.673	-2.16	0.0263	2.198
15	1.233	1.163	-1.38	-1.58	1.036	0.597	0.619	1.826	-0.09	0.723	-2.17	0.0263	2.187
16	1.232	1.171	-1.38	-1.56	0.998	0.538	0.537	1.837	-0.1	0.783	-2.19	0.0265	2.188
17	1.198	1.163	-1.49	-1.58	1.029	0.506	0.521	1.832	-0.08	0.757	-2.18	0.0262	2.202
18	1.209	1.164	-1.45	-1.58	0.988	0.343	0.339	1.852	-0.08	0.832	-2.17	0.0253	2.188
19	1.213	1.166	-1.45	-1.58	1.003	0.539	0.54	1.844	-0.1	0.815	-2.19	0.0258	2.201
20	1.229	1.159	-1.39	-1.6	1.047	0.434	0.454	1.86	-0.1	0.884	-2.18	0.0255	2.197
AVG	1.212	1.168	-1.45	-1.59	1.014	0.475	0.483	1.828	-0.07	0.736	-2.16	0.025885	2.19625
SD	0.023	0.023	0.073	0.031	0.025	0.119	0.125	0.018	0.035	0.083	0.024	0.001499	0.006727

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S1จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.414	1.333	-0.72	-1.05	0.921	0.676	0.617	2.051	0.109	1.992	-1.78	0.0297	2.187
2	1.407	1.302	-0.76	-1.15	0.888	0.755	0.67	2.049	0.112	1.946	-1.76	0.0294	2.206
3	1.434	1.356	-0.77	-1.09	0.987	0.786	0.64	2.031	0.124	1.89	-1.65	0.031	2.198
4	1.346	1.285	-1	-1.2	0.912	0.882	0.75	2.044	0.18	1.906	-1.69	0.03	2.191
5	1.304	1.265	-1.15	-1.27	0.968	0.799	0.773	2.058	0.186	1.976	-1.67	0.0292	2.191
6	1.322	1.268	-1.07	-1.25	0.928	0.826	0.767	2.057	0.164	1.981	-1.71	0.029	2.187
7	1.274	1.235	-1.24	-1.37	0.901	0.765	0.69	2.062	0.152	1.997	-1.71	0.0284	2.178
8	1.274	1.229	-1.24	-1.39	0.914	0.722	0.66	2.081	0.139	2.108	-1.71	0.0283	2.182
9	1.327	1.24	-1.04	-1.35	0.936	0.808	0.756	2.077	0.126	2.086	-1.73	0.028	2.183
10	1.265	1.241	-1.27	-1.34	0.928	0.62	0.576	2.085	0.189	2.093	-1.66	0.0275	2.169
11	1.345	1.243	-1.23	-1.27	0.899	0.76	0.62	2.011	0.156	1.97	-1.76	0.0298	2.176
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
AVG	1.337	1.272	-1.04	-1.25	0.926	0.764	0.684	2.055	0.149	1.995	-1.71	0.029118	2.186182
SD	0.059	0.042	0.209	0.116	0.03	0.072	0.069	0.022	0.029	0.073	0.043	0.001014	0.010362

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S1จุดบกพร่องแบบที่ 3 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.342	1.284	-0.99	-1.18	0.83	0.672	0.557	2.015	-0	1.848	-1.93	0.0305	2.2
2	1.304	1.223	-1.13	-1.4	0.907	0.658	0.597	2.014	0.055	1.82	-1.85	0.03	2.2
3	1.312	1.268	-1.11	-1.23	0.916	0.583	0.534	2.023	0.078	1.865	-1.83	0.0306	2.187
4	1.291	1.254	-1.18	-1.29	0.915	0.551	0.504	2.013	0.066	1.791	-1.84	0.0296	2.175
5	1.262	1.22	-1.27	-1.4	0.894	0.761	0.68	2.041	0.114	1.91	-1.78	0.0296	2.181
6	1.274	1.222	-1.24	-1.38	0.973	0.677	0.659	2.048	0.011	1.957	-1.87	0.0286	2.185
7	1.235	1.237	-1.36	-1.34	0.884	0.694	0.614	2.062	0.09	2.007	-1.78	0.0287	2.175
8	1.257	1.227	-1.28	-1.38	0.906	0.651	0.589	2.064	0.067	2.024	-1.81	0.0285	2.171
9	1.32	1.2	-1.05	-1.47	0.982	0.531	0.521	2.077	0.071	2.113	-1.8	0.0283	2.166
10	1.262	1.194	-1.27	-1.49	0.968	0.633	0.613	2.088	0.027	2.193	-1.85	0.025	2.167
11	1.241	1.202	-1.34	-1.45	0.938	0.623	0.585	2.101	0.048	2.271	-1.79	0.0281	2.177
12	1.24	1.22	-1.34	-1.4	0.931	0.552	0.514	2.092	-0.02	2.204	-1.87	0.0278	2.166
13	1.246	1.187	-1.32	-1.51	1.015	0.682	0.692	2.095	0.067	2.209	-1.77	0.0283	2.177
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
AVG	1.276	1.226	-1.22	-1.38	0.928	0.636	0.589	2.056	0.052	2.016	-1.83	0.028738	2.179
SD	0.035	0.029	0.12	0.098	0.048	0.067	0.062	0.033	0.038	0.167	0.046	0.001454	0.011446

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S2 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.197	1.231	-1.41	-1.32	0.833	0.487	0.406	1.361	1.144	-0.07	-1.12	0.0134	2.121
2	1.426	1.165	-0.46	-1.6	0.944	0.822	0.776	1.497	0.981	0.846	-1.56	0.0099	2.102
3	1.304	1.326	-0.99	-0.89	0.985	0.858	0.846	1.493	1.283	0.711	-0.27	0.0105	2.102
4	1.296	1.299	-1.03	-0.99	1.054	0.827	0.871	1.482	1.261	0.653	-0.39	0.01	2.121
5	1.135	1.18	-1.66	-1.5	0.865	0.302	0.261	1.591	0.983	1.16	-0.92	0.0103	2.124
6	1.37	1.253	-0.7	-1.16	1.066	0.812	0.866	1.595	0.911	1.294	-1.04	0.01	2.117
7	1.294	1.264	-1.04	-1.13	0.962	0.919	0.884	1.527	0.659	0.825	-1.52	0.0103	2.128
8	1.241	1.224	-1.27	-1.33	1.004	0.662	0.665	1.505	0.01	0.733	-2	0.011	2.129
9	1.228	1.231	-1.29	-1.28	0.981	0.784	0.769	1.371	-0.22	-0.07	-2.26	0.0106	2.127
10	1.245	1.313	-0.87	-1.13	1.001	0.645	0.794	1.323	0.578	0.849	-1.23	0.0108	2.119
11	1.236	1.294	-1.26	-0.99	0.926	0.778	0.72	1.347	-0.22	-0.02	-2.28	0.0111	2.142
12	1.299	1.199	-0.96	-1.4	1.035	0.872	0.902	1.251	-0.64	-0.74	-2.3	0.0123	2.136
13	1.253	1.221	-1.17	-1.3	0.97	0.803	0.779	1.354	-0.55	-0.09	-2.32	0.013	2.14
14	1.265	1.262	-1.13	-1.14	1.015	0.814	0.826	1.331	-0.53	-0.28	-2.32	0.0117	2.133
15	1.395	1.271	-0.59	-1.09	1.04	0.876	0.911	1.952	-0.75	3.159	-2.29	0.0124	2.13
16	1.403	1.369	-0.59	-0.77	1.057	0.909	0.961	1.653	-0.76	1.546	-2.3	0.0122	2.133
17	1.384	1.352	-0.68	-0.83	1.064	0.894	0.951	1.578	-0.67	1.163	-2.26	0.012	2.13
18	1.398	1.392	-0.61	-0.67	1.097	0.897	0.984	1.554	-0.67	0.963	-2.26	0.0136	2.137
19	1.302	1.351	-1.04	-0.86	1.023	0.863	0.883	1.521	-0.66	0.716	-2.26	0.0161	2.143
20	1.276	1.257	-1.12	-1.25	1.018	0.719	0.732	1.3	-0.7	-0.55	-2.28	0.0127	2.15
AVG	1.297	1.273	-0.99	-1.13	0.997	0.777	0.789	1.479	0.073	0.64	-1.76	0.011695	2.1282
SD	0.078	0.063	0.315	0.248	0.067	0.154	0.179	0.161	0.794	0.875	0.695	0.001573	0.012399

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S2 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.231	1.292	-1.34	-1.12	0.869	0.641	0.557	1.426	-0.08	0.068	-2.3	0.0167	2.16
2	1.216	1.445	-1.38	-0.38	0.846	0.231	0.196	1.447	1.154	0.458	-0.75	0.0122	2.111
3	1.377	1.234	-0.72	-1.32	1.03	0.46	0.474	1.399	0.955	0.194	-1.62	0.0102	2.1
4	1.222	1.374	-1.3	-0.61	0.805	0.431	0.347	1.494	0.11	0.781	-1.92	0.009	2.103
5	1.483	1.293	-0.06	-0.9	0.864	0.863	0.745	1.639	1.009	1.732	-1.88	0.0057	2.096
6	1.292	1.246	-0.96	-1.16	0.923	0.788	0.728	1.335	0.988	-0.23	-1.87	0.0053	2.1
7	1.352	1.201	-0.71	-1.32	0.91	0.787	0.717	1.458	0.964	0.46	-1.94	0.005	2.107
8	1.473	1.383	-0.12	-0.54	0.934	0.853	0.796	1.377	0.924	0.053	-1.96	0.0045	2.095
9	1.26	1.237	-1.11	-1.16	0.882	0.554	0.489	1.54	0.884	1.034	-2.09	0.0037	2.098
10	1.252	1.109	-1.17	-1.74	0.916	0.769	0.705	1.353	0.963	-0.15	-1.66	0.0041	2.104
11	1.257	1.17	-1.19	-1.48	0.91	0.569	0.518	1.344	1.126	-0.3	-1.12	0.0036	2.103
12	1.454	1.162	-0.32	-1.54	1.042	0.356	0.371	1.439	1.231	0.375	-0.86	0.0036	2.1
13	1.35	1.245	-0.69	-1.08	0.948	0.75	0.71	1.316	1.186	-0.36	-0.94	0.0034	2.098
14	1.136	1.113	-1.67	-1.73	0.896	0.88	0.789	1.143	1.119	-1.4	-1.44	0.004	2.108
15	1.162	1.113	-1.58	-1.73	1.021	0.597	0.61	1.237	1.031	-0.92	-1.39	0.0042	2.112
16	1.208	1.12	-1.35	-1.71	0.973	0.821	0.798	1.227	1.091	-1.02	-1.45	0.004	2.105
17	1.28	1.143	-0.96	-1.64	0.951	0.832	0.792	1.245	0.808	-0.8	-1.71	0.0041	2.107
18	1.181	1.122	-1.5	-1.7	0.969	0.841	0.815	1.29	0.428	-0.48	-2.18	0.0042	2.108
19	1.169	1.258	-1.57	-1.05	0.942	0.715	0.674	1.187	0.431	-1.15	-2.13	0.0049	2.105
20	1.2	1.117	-1.4	-1.72	1.008	0.82	0.827	1.218	0.092	-1.03	-2.33	0.005	2.105
AVG	1.278	1.219	-1.05	-1.28	0.932	0.678	0.633	1.356	0.821	-0.13	-1.68	0.00587	2.10625
SD	0.105	0.101	0.481	0.43	0.063	0.19	0.181	0.127	0.397	0.806	0.476	0.003483	0.01351

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S2 จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.574	1.623	-0.08	0.127	0.983	0.829	0.815	2.093	-0.19	2.217	-2.04	0.0271	2.155
2	1.434	1.522	-0.59	-0.24	0.947	0.699	0.662	2.171	-0.54	2.707	-2.29	0.0243	2.157
3	1.575	1.632	-0.03	0.208	0.953	0.829	0.791	2.189	-0.45	2.815	-2.23	0.0234	2.15
4	1.457	1.596	-0.53	0.079	0.995	0.712	0.68	2.216	-0.51	2.998	-2.27	0.0229	2.159
5	1.584	1.614	0.003	0.115	0.962	0.737	0.709	2.243	-0.51	3.186	-2.26	0.0223	2.163
6	1.515	1.551	-0.31	-0.1	0.935	0.836	0.781	2.168	-0.39	2.572	-2.22	0.0233	2.139
7	1.29	1.278	-1.17	-1.22	0.969	0.415	0.402	2.17	-0.46	2.576	-2.26	0.0227	2.152
8	1.407	1.354	-0.64	-0.9	1.067	0.473	0.504	2.161	-0.46	2.55	-2.27	0.0231	2.148
9	1.345	1.407	-0.97	-0.72	0.931	0.45	0.419	2.143	-0.25	2.426	-2.12	0.0238	2.142
10	1.568	1.434	-0.06	-0.62	0.964	0.73	0.704	2.159	-0.13	2.544	-2.2	0.0241	2.167
11	1.416	1.413	-0.71	-0.69	0.984	0.465	0.457	2.188	-0.12	2.712	-2.01	0.0236	2.139
12	1.454	1.424	-0.56	-0.68	0.955	0.599	0.572	2.201	-0.13	2.833	-2.02	0.024	2.162
13	1.319	1.326	-1.07	-1	0.953	0.626	0.596	2.152	-0.11	2.528	-1.99	0.0247	2.148
14	1.326	1.411	-1.02	-0.67	0.901	0.637	0.573	2.141	-0.11	2.446	-1.99	0.025	2.166
15	1.398	1.215	-0.79	-1.41	1.072	0.408	0.437	2.147	-0.03	2.488	-1.93	0.0251	2.175
16	1.314	1.228	-1.07	-1.36	1.036	0.539	0.559	2.163	-0.07	2.593	-1.95	0.0255	2.181
17	1.511	1.22	-0.29	-1.39	1.141	0.419	0.479	2.136	-0.05	2.392	-1.93	0.0254	2.171
18	1.46	1.205	-0.53	-1.44	1.155	0.361	0.417	2.145	-0.05	2.448	-1.93	0.0222	2.152
19	1.511	1.23	-0.29	-1.36	1.106	0.515	0.569	2.152	-0.02	2.504	-1.92	0.0258	2.167
20	1.486	1.233	-0.43	-1.35	1.119	0.576	0.645	2.194	-0.1	2.746	-1.96	0.0248	2.159
AVG	1.447	1.396	-0.56	-0.73	1.006	0.593	0.589	2.167	-0.23	2.614	-2.09	0.024155	2.1576
SD	0.094	0.152	0.373	0.587	0.077	0.154	0.131	0.033	0.19	0.223	0.142	0.001275	0.011646

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S2 จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.787	1.539	0.769	-0.3	1.017	0.855	0.87	1.845	0.023	0.988	-1.97	0.0386	2.272
2	1.727	1.504	0.486	-0.44	1.028	0.807	0.83	1.836	0.072	0.947	-1.94	0.0388	2.259
3	1.751	1.397	0.622	-0.08	1.001	0.759	0.76	1.847	0.071	0.985	-1.93	0.0387	2.26
4	1.647	1.483	0.167	-0.49	0.997	0.833	0.831	1.842	0.009	0.958	-1.98	0.038	2.256
5	1.802	1.45	0.88	-0.62	0.948	0.789	0.748	1.855	0.074	1.025	-1.91	0.0382	2.247
6	1.748	1.446	0.639	-0.62	1	0.808	0.808	1.844	0.043	0.98	-1.94	0.038	2.237
7	1.737	1.385	0.599	-0.86	1	0.71	0.711	1.842	0.007	0.966	-1.97	0.0385	2.237
8	1.731	1.429	0.58	-0.69	0.982	0.755	0.741	1.866	-0.06	1.103	-2.03	0.0371	2.236
9	1.678	1.382	0.356	-0.89	0.968	0.727	0.704	1.862	0.022	1.084	-1.96	0.0375	2.24
10	1.669	1.387	0.295	-0.86	0.949	0.786	0.745	1.846	-0.09	0.982	-2.05	0.0372	2.22
11	1.609	1.323	0.049	-1.11	0.956	0.687	0.656	1.862	0.012	1.068	-1.97	0.0372	2.236
12	1.61	1.347	0.055	-1.01	0.958	0.725	0.695	1.861	-0.03	1.068	-2	0.0361	2.231
13	1.593	1.359	-0.01	-0.97	0.951	0.736	0.7	1.866	-0.01	1.084	-1.98	0.0359	2.217
14	1.523	1.302	-0.32	-1.17	0.982	0.715	0.702	1.867	-0.02	1.087	-2	0.036	2.225
15	1.544	1.317	-0.21	-1.12	0.955	0.69	0.658	1.881	-0.05	1.158	-2.01	0.0359	2.232
16	1.51	1.322	-0.34	-1.09	0.937	0.734	0.687	1.878	-0.03	1.149	-2.01	0.0352	2.219
17	1.493	1.343	-0.43	-1.02	0.926	0.724	0.671	1.889	-0.03	1.206	-2	0.0347	2.223
18	1.529	1.324	-0.26	-1.07	0.919	0.735	0.675	1.88	-0.08	1.133	-2.04	0.035	2.21
19	1.487	1.308	-0.44	-1.13	0.944	0.743	0.701	1.884	-0.04	1.141	-2.01	0.0344	2.211
20	1.434	1.292	-0.66	-1.18	0.955	0.791	0.755	1.913	-0.02	1.3	-1.98	0.0338	2.219
AVG	1.63	1.382	0.142	-0.84	0.969	0.755	0.732	1.863	-0.01	1.071	-1.98	0.03674	2.23435
SD	0.113	0.072	0.463	0.318	0.031	0.047	0.061	0.02	0.047	0.094	0.036	0.001575	0.01734

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S2 จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 8.0 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.426	1.274	-0.75	-1.28	0.956	0.687	0.657	1.641	-0.04	-0	-2.16	0.0388	2.239
2	1.403	1.237	-0.83	-1.39	0.952	0.573	0.545	1.646	-0.02	0.016	-2.15	0.0386	2.235
3	1.436	1.278	-0.72	-1.26	0.951	0.713	0.678	1.642	-0.04	0.001	-2.16	0.039	2.242
4	1.474	1.279	-0.56	-1.26	0.966	0.695	0.672	1.641	-0.05	0.002	-2.17	0.0385	2.251
5	1.444	1.291	-0.68	-1.21	0.98	0.729	0.714	1.643	-0	0.013	-2.15	0.0386	2.243
6	1.447	1.248	-0.67	-1.36	0.974	0.556	0.541	1.635	-0.03	-0.02	-2.16	0.0386	2.233
7	1.415	1.262	-0.79	-1.31	0.94	0.594	0.559	1.635	-0.05	-0.02	-2.17	0.0383	2.252
8	1.419	1.236	-0.77	-1.4	0.963	0.508	0.489	1.632	-0.08	-0.03	-2.19	0.0387	2.253
9	1.394	1.236	-0.86	-1.4	0.961	0.561	0.539	1.632	-0.03	-0.03	-2.17	0.0385	2.24
10	1.406	1.267	-0.82	-1.3	0.953	0.672	0.64	1.622	-0.05	-0.08	-2.17	0.0386	2.242
11	1.404	1.224	-0.83	-1.43	0.978	0.434	0.424	1.631	-0.07	-0.04	-2.18	0.0389	2.256
12	1.392	1.248	-0.87	-1.36	0.975	0.606	0.591	1.631	-0.08	-0.04	-2.19	0.0383	2.232
13	1.407	1.249	-0.81	-1.36	0.947	0.521	0.494	1.638	-0.06	-0.01	-2.18	0.0379	2.253
14	1.443	1.237	-0.67	-1.39	0.948	0.547	0.518	1.634	-0.08	-0.02	-2.18	0.038	2.241
15	1.419	1.238	-0.76	-1.38	0.967	0.665	0.643	1.639	-0.07	-0.01	-2.18	0.0384	2.247
16	1.372	1.222	-0.93	-1.43	0.991	0.536	0.531	1.641	-0.07	0.002	-2.17	0.0376	2.237
17	1.379	1.204	-0.9	-1.49	0.997	0.351	0.35	1.636	-0.07	-0.02	-2.18	0.0373	2.242
18	1.395	1.213	-0.84	-1.46	1.013	0.477	0.483	1.638	-0.07	-0.01	-2.18	0.0376	2.248
19	1.363	1.192	-0.96	-1.52	1.037	0.2	0.207	1.638	-0.06	-0.01	-2.18	0.038	2.243
20	1.395	1.226	-0.85	-1.42	1.019	0.518	0.528	1.641	-0.07	0.003	-2.18	0.0378	2.237
AVG	1.412	1.243	-0.79	-1.37	0.973	0.557	0.54	1.637	-0.05	-0.02	-2.17	0.0383	2.2433
SD	0.028	0.026	0.098	0.08	0.026	0.129	0.12	0.006	0.022	0.022	0.012	0.000475	0.007042

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S2 จุดบกพร่องแบบที่ 3 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.521	0.418	-0.4	-0.82	0.979	0.846	0.828	1.761	-0.01	0.589	-2.03	0.0396	2.267
2	1.453	1.34	-0.66	-1.07	0.933	0.836	0.78	1.767	-0.01	0.621	-2.12	0.039	2.26
3	1.449	1.33	-0.66	-1.09	0.939	0.816	0.767	1.788	-0.13	0.717	-2.11	0.0376	2.235
4	1.428	1.298	-0.76	-1.21	0.943	0.697	0.657	1.792	-0.13	0.75	-2.11	0.0378	2.263
5	1.413	1.296	-0.8	-1.21	0.95	0.736	0.699	1.788	-0.1	0.718	-2.09	0.0379	2.246
6	1.426	1.306	-0.74	-1.17	0.94	0.687	0.646	1.798	-0.13	0.774	-2.11	0.0373	2.247
7	1.445	1.27	-0.68	-1.3	0.965	0.719	0.694	1.785	-0.13	0.697	-2.11	0.0381	2.252
8	1.407	1.264	-0.82	-1.31	0.988	0.64	0.632	1.791	-0.12	0.731	-2.11	0.0371	2.251
9	1.402	1.28	-0.84	-1.26	0.961	0.626	0.602	1.8	-0.14	0.779	-2.12	0.0379	2.265
10	1.43	1.263	-0.71	-1.31	0.964	0.662	0.638	1.802	-0.12	0.795	-2.1	0.0377	2.263
11	1.41	1.289	-0.8	-1.22	0.961	0.64	0.615	1.811	-0.1	0.834	-2.08	0.0371	2.248
12	1.421	1.292	-0.75	-1.21	0.987	0.72	0.711	1.809	-0.15	0.832	-2.12	0.037	2.264
13	1.382	1.285	-0.91	-1.23	0.973	0.642	0.625	1.816	-0.15	0.868	-2.11	0.0373	2.26
14	1.365	1.268	-0.97	-1.29	0.976	0.61	0.595	1.808	-0.16	0.815	-2.12	0.0368	2.261
15	1.411	1.264	-0.79	-1.31	0.985	0.718	0.707	1.834	-0.21	0.95	-2.16	0.0366	2.252
16	1.389	1.238	-0.87	-1.39	1.002	0.653	0.655	1.826	-0.21	0.926	-2.15	0.0365	2.257
17	1.404	1.265	-0.81	-1.3	1.014	0.708	0.718	1.828	-0.23	0.922	-2.17	0.0361	2.246
18	1.395	1.255	-0.85	-1.33	1.008	0.624	0.629	1.844	-0.19	1	-2.14	0.0359	2.245
19	1.409	1.252	-0.79	-1.35	1.023	0.623	0.637	1.848	-0.23	1.028	-2.17	0.0358	2.251
20	1.376	1.27	-0.92	-1.28	1.024	0.661	0.677	1.844	-0.18	1	-2.13	0.0354	2.236
AVG	1.417	1.237	-0.78	-1.23	0.976	0.693	0.676	1.807	-0.14	0.817	-2.12	0.037225	2.25345
SD	0.034	0.194	0.122	0.126	0.028	0.071	0.062	0.025	0.061	0.125	0.032	0.001045	0.009406

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.249	1.266	-1.28	-1.25	1.013	0.524	0.531	2.546	0.556	5.611	-0.5	0.0155	2.178
2	1.169	1.261	-1.56	-1.26	0.866	0.213	0.184	2.548	0.523	5.691	-0.54	0.0156	2.173
3	1.352	1.457	-0.92	-0.51	0.986	0.614	0.606	2.513	0.373	5.489	-0.83	0.0154	2.171
4	1.326	1.474	-1.01	-0.45	0.906	0.666	0.603	2.54	0.368	5.782	-0.8	0.016	2.184
5	1.316	1.355	-1.05	-0.89	1.008	0.779	0.786	2.545	0.421	5.782	-0.68	0.0156	2.164
6	1.305	1.298	-1.1	-1.11	1.08	0.603	0.651	2.51	0.348	5.597	-0.84	0.0153	2.16
7	1.318	1.36	-1.04	-0.96	1.04	0.779	0.81	2.478	0.389	5.352	-0.82	0.0156	2.171
8	1.276	1.315	-1.2	-1.05	1.003	0.628	0.629	2.455	0.383	5.443	-0.83	0.0156	2.171
9	1.321	1.36	-1.05	-0.92	1.003	0.757	0.759	2.529	0.498	5.622	-0.56	0.0155	2.157
10	1.268	1.364	-1.24	-0.91	0.917	0.77	0.706	2.526	0.559	5.517	-0.43	0.0154	2.17
11	1.255	1.289	-1.28	-1.17	0.973	0.41	0.399	2.54	0.619	5.68	-0.32	0.0149	2.168
12	1.236	1.254	-1.25	-1.05	0.899	0.53	0.602	2.465	0.523	5.489	-0.42	0.0151	2.162
13	1.231	1.337	-1.37	-1.02	0.933	0.587	0.547	2.55	0.468	5.741	-0.57	0.0146	2.162
14	1.27	1.274	-1.24	-1.22	1.025	0.732	0.751	2.535	0.417	5.622	-0.66	0.0142	2.165
15	1.263	1.305	-1.27	-1.12	1.017	0.549	0.558	2.515	0.449	5.588	-0.68	0.0153	2.169
16	1.216	1.17	-1.42	-1.57	1.041	0.452	0.47	2.473	0.419	5.371	-0.81	0.0147	2.165
17	1.207	1.204	-1.44	-1.46	0.972	0.441	0.428	2.55	0.582	5.873	-0.41	0.0142	2.171
18	1.306	1.228	-1.13	-1.39	1.054	0.477	0.502	2.504	0.475	5.626	-0.66	0.0192	2.155
19	1.243	1.216	-1.33	-1.43	0.993	0.54	0.536	2.504	0.401	5.623	-0.82	0.0145	2.157
20	1.259	1.203	-1.28	-1.47	1.058	0.543	0.574	2.46	0.451	5.318	-0.71	0.0144	2.161
AVG	1.269	1.3	-1.22	-1.11	0.989	0.58	0.582	2.514	0.461	5.591	-0.64	0.01533	2.1667
SD	0.046	0.081	0.162	0.295	0.058	0.145	0.148	0.032	0.079	0.15	0.167	0.001053	0.00732

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.67	1.536	0.209	-0.36	0.821	0.918	0.754	1.994	0.004	1.841	-1.8	0.0335	2.347
2	1.582	1.426	-0.14	-0.76	0.826	0.847	0.7	2.077	0.093	2.273	-1.65	0.0323	2.318
3	1.554	1.397	-0.26	-0.86	0.885	0.836	0.74	2.144	0	2.702	-1.68	0.0315	2.324
4	1.497	1.382	-0.49	-0.91	0.874	0.748	0.654	2.136	-0.09	2.68	-1.78	0.0312	2.299
5	1.522	1.414	-0.4	-0.79	0.859	0.849	0.729	2.173	0.041	2.868	-1.62	0.0314	2.301
6	1.517	1.366	-0.39	-0.97	0.847	0.796	0.674	2.128	0.012	2.587	-1.67	0.0328	2.303
7	1.458	1.369	-0.64	-0.96	0.855	0.653	0.558	2.136	0.101	2.651	-1.58	0.0324	2.29
8	1.424	1.303	-0.78	-1.19	0.935	0.747	0.698	2.131	0.066	2.638	-1.63	0.0329	2.292
9	1.48	1.261	-0.56	-1.33	0.943	0.599	0.565	2.125	0.032	2.628	-1.73	0.0321	2.287
10	1.418	1.291	-0.81	-1.22	0.9	0.71	0.64	2.111	0.043	2.532	-1.68	0.0322	2.276
11	1.418	1.267	-0.8	1.304	0.912	0.641	0.585	2.115	0.049	2.551	-1.67	0.0325	2.28
12	1.386	1.26	-0.91	-1.32	0.94	0.753	0.707	2.119	0.075	2.6	-1.64	0.032	2.279
13	1.397	1.227	-0.86	-1.43	1.013	0.584	0.592	2.138	-0	2.722	-1.71	0.032	2.266
14	1.354	1.258	-1.03	-1.33	0.957	0.649	0.621	2.161	0.057	2.921	-1.62	0.032	2.246
15	1.362	1.247	-1	-1.37	0.972	0.521	0.507	2.147	0.049	2.824	-1.67	0.0318	2.26
16	1.358	1.207	-1.02	-1.49	1.019	0.354	0.361	2.136	0.017	2.759	-1.71	0.0308	2.258
17	1.336	1.233	-1.09	-1.41	1.037	0.592	0.614	2.128	-0.01	2.736	-1.74	0.0309	2.236
18	1.305	1.203	-1.19	-1.5	1.028	0.569	0.584	2.13	-0.01	2.688	-1.74	0.0305	2.251
19	1.322	1.209	-1.13	-1.48	1.036	0.513	0.532	2.122	-0.02	2.657	-1.74	0.0303	2.231
20	1.293	1.201	-1.23	-1.51	1.002	0.566	0.567	2.091	-0.07	2.403	-1.81	0.0311	2.236
AVG	1.433	1.303	-0.72	-1.04	0.933	0.672	0.619	2.122	0.022	2.613	-1.69	0.03181	2.279
SD	0.101	0.093	0.386	0.636	0.073	0.141	0.094	0.037	0.048	0.234	0.062	0.00084	0.031489

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.696	1.676	0.325	0.243	1.104	0.922	1.018	1.981	0.244	1.682	-1.61	0.0331	2.343
2	1.565	1.583	-0.26	-0.17	1.162	0.889	1.033	1.971	0.155	1.65	-1.71	0.0342	2.312
3	1.602	1.487	-0.03	-0.54	1.14	0.855	0.975	2.068	0.285	2.285	-1.48	0.0336	2.292
4	1.536	1.511	-0.35	-0.43	1.179	0.835	0.985	2.029	0.172	1.99	-1.63	0.034	2.284
5	1.545	1.465	-0.3	-0.62	1.144	0.801	0.916	2.06	0.014	2.236	-1.61	0.0338	2.27
6	1.52	1.433	-0.41	-0.75	1.143	0.85	0.972	2.05	0.13	2.159	-1.65	0.0341	2.296
7	1.506	1.485	-0.47	-0.53	1.147	0.846	0.97	2.059	0.14	2.211	-1.63	0.0333	2.275
8	1.531	1.421	-0.34	-0.8	1.097	0.794	0.872	2.066	0.124	2.281	-1.66	0.0338	2.279
9	1.52	1.45	-0.41	-0.65	1.1	0.818	0.899	2.073	0.133	2.324	-1.64	0.0331	2.282
10	1.47	1.374	-0.6	-0.97	1.082	0.774	0.838	2.051	0.049	2.169	-1.74	0.037	2.273
11	1.528	1.38	-0.38	-0.94	1.075	0.766	0.824	2.065	0.052	2.308	-1.7	0.0332	2.274
12	1.466	1.34	-0.64	-1.09	1.086	0.803	0.872	2.044	0.009	2.167	-1.77	0.0337	2.275
13	1.441	1.401	-0.73	-0.86	1.079	0.78	0.842	2.072	0.057	2.344	-1.71	0.0337	2.265
14	1.409	1.377	-0.83	-0.94	1.139	0.762	0.867	2.102	0.01	2.541	-1.71	0.0324	2.248
15	1.442	1.352	-0.71	-1.04	1.106	0.733	0.81	2.027	-0.05	2.051	-1.85	0.0334	2.257
16	1.293	1.201	-1.23	-1.51	1.002	0.566	0.567	2.091	-0.07	2.403	-1.81	0.0311	2.236
17	1.429	1.301	-0.75	-1.2	1.116	0.698	0.779	2.061	0.023	2.296	-1.77	0.0325	2.248
18	1.417	1.343	-0.8	-1.07	1.085	0.703	0.763	2.056	-0	2.246	-1.82	0.0331	2.256
19	1.395	1.289	-0.88	-1.24	1.093	0.528	0.577	2.058	-0.01	2.299	-1.83	0.0323	2.251
20	1.426	1.332	-0.77	-1.1	1.07	0.661	0.707	2.052	-0.03	2.226	-1.86	0.033	2.258
AVG	1.487	1.41	-0.53	-0.81	1.107	0.769	0.854	2.052	0.072	2.193	-1.71	0.03342	2.2737
SD	0.087	0.108	0.34	0.4	0.04	0.1	0.13	0.031	0.097	0.215	0.097	0.001119	0.024596

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 3 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.281	1.2	-1.26	-1.5	1.074	0.006	0.006	1.714	-0.26	0.345	-2.24	0.0346	2.241
2	1.601	1.592	-0.14	-0.2	0.973	0.929	0.904	1.763	0.074	0.615	-1.96	0.0422	2.342
3	1.64	1.563	0.021	-0.29	0.952	0.934	0.889	1.752	0.015	0.564	-2	0.0428	2.329
4	1.638	1.627	0.006	-0.05	0.97	0.907	0.88	1.758	0.066	0.61	-1.97	0.0444	2.334
5	1.703	1.611	0.312	-0.11	1.006	0.887	0.892	1.731	0.007	0.467	-2.02	0.0436	2.34
6	1.679	1.639	0.018	0.013	0.917	0.939	0.861	1.756	0.047	0.609	-1.97	0.0435	2.336
7	1.69	1.561	0.233	-0.32	0.968	0.898	0.869	1.772	0.049	0.704	-1.97	0.0433	2.331
8	1.774	1.635	0.343	0.009	0.942	0.913	0.86	1.822	0.12	0.997	-1.91	0.0416	2.302
9	1.675	1.625	0.177	-0.03	0.958	0.893	0.855	1.783	-0.01	0.77	-2	0.0426	2.305
10	1.649	1.58	0.036	-0.23	1	0.887	0.887	1.783	-0.07	0.769	-2.04	0.0416	2.31
11	1.582	1.622	-0.23	-0.05	0.92	0.921	0.847	1.78	-0.05	0.755	-2.03	0.0418	2.295
12	1.645	1.614	0.071	-0.09	0.95	0.92	0.874	1.813	-0.04	0.976	-2	0.0408	2.289
13	1.752	1.628	0.562	-0.03	0.955	0.918	0.876	1.809	-0.04	0.933	-2.01	0.0408	2.282
14	1.641	1.553	0.058	-0.33	0.988	0.894	0.884	1.784	-0.14	0.78	-2.07	0.0406	2.285
15	1.663	1.603	0.139	-0.14	0.983	0.884	0.869	1.803	-0.11	0.897	-2.05	0.0403	2.283
16	1.64	1.561	0.07	-0.3	0.934	0.837	0.782	1.814	-0.07	0.96	-2.02	0.0405	2.28
17	1.588	1.542	-0.16	-0.37	0.948	0.877	0.832	1.822	-0.08	0.989	-2.03	0.0387	2.268
18	1.704	1.577	0.358	-0.24	0.982	0.878	0.862	1.829	-0.09	1.035	-2.03	0.0388	2.288
19	1.72	1.553	0.433	-0.33	0.979	0.887	0.868	1.827	-0.1	1.007	-2.05	0.0386	2.287
20	1.71	1.545	0.281	-0.25	0.987	0.869	0.892	1.734	-0.11	0.854	-1.98	0.0395	2.293
AVG	1.649	1.572	0.066	-0.24	0.969	0.854	0.824	1.782	-0.04	0.782	-2.02	0.04103	2.301
SD	0.1	0.093	0.373	0.321	0.035	0.201	0.194	0.035	0.088	0.198	0.064	0.002277	0.027123

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 3 ที่แรงดัน 8.0 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.44	1.323	-0.75	-1.15	0.96	0.68	0.653	1.617	-0.19	-0.02	-2.23	0.0328	2.285
2	1.366	1.29	-0.01	-1.25	0.961	0.516	0.496	1.605	-0.22	-0.08	-2.25	0.044	2.274
3	1.369	1.324	-1	-1.15	0.941	0.664	0.625	1.599	-0.23	-0.1	-2.26	0.0438	2.302
4	1.352	1.306	-1.05	-1.2	0.972	0.638	0.62	1.61	-0.23	-0.06	-2.25	0.0427	2.288
5	1.379	1.283	-0.96	-1.27	0.974	0.687	0.669	1.614	-0.23	-0.04	-2.25	0.0432	2.281
6	1.381	1.304	-0.95	-1.21	0.966	0.647	0.626	1.603	-0.23	-0.09	-2.25	0.0435	2.281
7	1.399	1.313	-0.89	-1.18	1.008	0.771	0.777	1.591	-0.27	-0.13	-2.27	0.043	2.293
8	1.365	1.309	-1.01	-1.19	0.961	0.64	0.615	1.613	-0.22	-0.04	-2.24	0.0434	2.288
9	1.375	1.302	-0.98	-1.21	1.025	0.697	0.715	1.614	-0.25	-0.04	-2.25	0.0429	2.274
10	1.345	1.27	-1.08	-1.31	0.985	0.592	0.583	1.602	-0.25	-0.09	-2.26	0.0428	2.293
11	1.367	1.29	-1.01	-1.25	0.997	0.578	0.576	1.604	-0.24	-0.095	-2.25	0.0432	2.278
12	1.381	1.291	-0.96	-1.24	0.981	0.572	0.561	1.617	-0.23	-0.03	-2.24	0.0425	2.278
13	1.389	1.286	-0.93	-1.26	0.998	0.646	0.645	1.63	-0.23	0.023	-2.24	0.0419	2.259
14	1.386	1.254	-0.94	-1.36	1.028	0.478	0.491	1.597	-0.31	-0.12	-2.28	0.0419	2.271
15	1.392	1.269	-0.92	-1.31	0.992	0.615	0.61	1.593	-0.3	-0.14	-2.27	0.0424	2.263
16	1.385	1.258	-0.94	-1.35	0.989	0.569	0.563	1.592	-0.3	-0.14	-2.22	0.0432	2.295
17	1.372	1.249	-0.99	-1.37	0.996	0.488	0.486	1.595	-0.28	-0.13	-2.27	0.0433	2.286
18	1.361	1.261	-1.02	-1.34	0.994	0.67	0.666	1.598	-0.3	-0.12	-2.27	0.0418	2.272
19	1.338	1.306	-1.1	-1.2	0.952	0.643	0.612	1.61	-0.27	-0.07	-2.25	0.0325	2.268
20	1.326	1.283	-1.14	-1.27	0.933	0.576	0.537	1.601	-0.28	-0.11	-2.26	0.0429	2.273
AVG	1.373	1.289	-0.93	-1.25	0.981	0.618	0.606	1.605	-0.25	-0.08	-2.25	0.041885	2.2801
SD	0.024	0.023	0.233	0.069	0.025	0.073	0.074	0.01	0.034	0.047	0.014	0.003214	0.011206

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 4 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	2.055	1.896	2.107	1.258	0.789	0.972	0.767	1.767	0.07	0.722	-1.96	0.0417	2.386
2	1.994	1.907	1.865	1.379	0.814	0.973	0.792	1.775	-0.05	0.784	-2.03	0.0429	2.364
3	1.982	1.873	1.8	1.24	0.771	0.976	0.752	1.779	-0.08	0.82	-2.04	0.044	2.342
4	1.866	1.669	1.256	0.168	0.749	0.964	0.722	1.785	0.016	0.873	-2	0.0434	2.344
5	1.904	1.622	1.385	-0.03	0.753	0.951	0.716	1.763	-0.03	0.729	-2.02	0.0432	2.335
6	1.97	1.673	1.721	0.208	0.747	0.953	0.711	1.792	-0.02	0.934	-2	0.044	2.339
7	1.935	1.627	1.67	0.001	0.746	0.955	0.712	1.805	0.064	1.014	-1.95	0.0434	2.336
8	1.995	1.682	1.895	0.231	0.794	0.949	0.753	1.792	-0.03	0.921	-2.01	0.0442	2.336
9	1.898	1.593	1.36	-0.16	0.812	0.936	0.76	1.803	-0.04	0.979	-2	0.0437	2.33
10	1.841	1.591	0.983	-1.64	0.822	0.93	0.765	1.761	-0.13	0.734	-2.07	0.0439	2.315
11	1.902	1.595	1.275	-0.16	0.787	0.91	0.717	1.821	-0	1.116	-1.98	0.0429	2.319
12	1.87	1.534	1.147	-0.39	0.79	0.873	0.689	1.848	-0.08	1.28	-2	0.0414	2.298
13	1.875	1.525	1.321	-0.43	0.818	0.897	0.734	1.843	-0.07	1.251	-1.99	0.0428	2.287
14	1.763	1.52	0.605	-0.45	0.844	0.897	0.757	1.805	-0.16	0.969	-2.07	0.0439	2.297
15	1.792	1.484	0.833	-0.6	0.849	0.854	0.725	1.803	-0.21	1.003	-2.09	0.0412	2.302
16	1.813	1.487	0.894	-0.58	0.816	0.873	0.712	1.807	-0.23	1.032	-2.1	0.0425	2.294
17	1.762	1.576	0.635	-0.21	0.847	0.9	0.762	1.804	-0.23	1.017	-2.11	0.0423	2.284
18	1.74	1.567	0.553	-0.23	0.858	0.907	0.779	1.806	-0.22	1.007	-2.1	0.042	2.283
19	1.73	1.505	0.48	-0.49	0.844	0.871	0.734	1.807	-0.21	1.017	-2.1	0.0415	2.259
20	1.765	1.458	0.693	-0.69	0.82	0.853	0.7	1.819	-0.22	1.087	-2.1	0.0421	2.279
AVG	1.873	1.619	1.224	-0.08	0.804	0.92	0.738	1.799	-0.09	0.964	-2.03	0.04285	2.31645
SD	0.096	0.134	0.504	0.718	0.036	0.041	0.028	0.024	0.102	0.157	0.052	0.000968	0.03203

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 4 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.76	1.639	0.656	0.118	0.839	0.803	0.674	2.354	-0.45	4.674	-2.22	0.0229	2.165
2	1.862	1.663	1.092	0.146	0.794	0.882	0.7	2.313	-0.24	4.078	-2.09	0.0254	2.179
3	1.842	1.626	0.982	0.001	0.823	0.797	0.656	2.31	-0.37	4.385	-2.17	0.0246	2.183
4	1.877	1.537	1.174	-0.34	0.816	0.761	0.621	2.334	-0.36	4.596	-2.17	0.0239	2.162
5	1.609	1.495	-0.01	-0.47	0.814	0.557	0.453	2.342	-0.4	4.613	-2.21	0.0236	2.158
6	1.653	1.45	0.129	-0.62	0.933	0.585	0.546	2.371	-0.45	4.681	-2.21	0.0227	2.17
7	1.775	1.506	0.667	-0.47	0.911	0.736	0.671	2.37	-0.41	4.189	-2.22	0.0197	2.16
8	1.739	1.591	0.576	-0.14	0.909	0.728	0.662	2.356	-0.43	4.202	-2.21	0.0226	2.157
9	1.701	1.548	0.399	-0.23	0.948	0.556	0.527	2.348	-0.34	4.065	-2.18	0.0228	2.139
10	1.633	1.789	0.105	0.791	0.927	0.842	0.781	2.404	-0.48	4.804	-2.21	0.016	2.152
11	1.634	1.608	0.006	-0.07	0.941	0.831	0.782	2.362	-0.52	3.962	-2.23	0.0231	2.173
12	1.711	1.56	0.403	-0.29	0.897	0.697	0.625	2.419	-0.48	4.534	-2.22	0.0218	2.168
13	1.798	1.511	0.782	-0.47	0.953	0.768	0.732	2.364	-0.45	4.015	-2.19	0.0223	2.158
14	1.767	1.531	0.617	-0.38	0.918	0.816	0.749	2.446	-0.34	5.464	-2.15	0.0182	2.161
15	1.725	1.509	0.452	-0.47	0.928	0.768	0.713	2.42	-0.41	5.044	-2.18	0.0216	2.166
16	1.659	1.502	0.241	-0.41	0.952	0.784	0.746	2.409	-0.57	4.991	-2.2	0.0218	2.164
17	1.781	1.649	0.762	0.271	0.949	0.868	0.823	2.402	-0.51	5.245	-2.16	0.0218	2.163
18	1.69	1.633	0.413	0.111	0.947	0.843	0.799	2.384	-0.42	4.776	-2.1	0.0226	2.17
19	1.766	1.561	0.718	-0.22	0.93	0.835	0.777	2.426	-0.38	5.217	-2.04	0.0229	2.19
20	1.909	1.712	1.484	0.481	0.932	0.902	0.841	2.389	-0.42	5.007	-2.12	0.0226	2.179
AVG	1.745	1.581	0.582	-0.13	0.903	0.768	0.694	2.376	-0.42	4.627	-2.18	0.022145	2.16585
SD	0.086	0.084	0.399	0.365	0.053	0.102	0.103	0.038	0.074	0.448	0.052	0.002118	0.0115

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง S3 จุดบกพร่องแบบที่ 4 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 70%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.234	1.232	-1.4	-1.41	1.035	0.743	0.769	1.76	0.142	0.527	-1.9	0.031	2.253
2	1.195	1.278	-1.49	-1.2	0.807	0.228	0.184	1.901	-0.71	3.077	-2.44	0.0159	2.135
3	1.182	1.307	-1.54	-1.05	0.809	0.413	0.334	1.868	-0.72	2.938	-2.42	0.0163	2.145
4	1.204	1.304	-1.46	-1.12	0.831	0.289	0.24	2.079	-0.72	4.066	-2.39	0.0165	2.14
5	1.173	1.223	-1.56	-1.4	0.921	0.258	0.237	1.985	-0.7	3.679	-2.39	0.0155	2.134
6	1.234	1.284	-1.35	-1.15	0.922	0.646	0.596	1.979	-0.72	3.757	-2.42	0.0148	2.127
7	1.179	1.218	-1.55	-1.42	0.893	0.235	0.21	1.984	-0.71	3.619	-2.41	0.0154	2.153
8	1.184	1.276	-1.53	-1.2	0.904	0.339	0.306	1.881	-0.72	3.032	-2.4	0.0159	2.13
9	1.168	1.252	-1.57	-1.27	0.898	0.468	0.42	1.945	-0.73	3.484	-2.4	0.0155	2.141
10	1.191	1.213	-1.5	-1.41	0.91	0.573	0.521	1.875	-0.72	3.114	-2.41	0.0155	2.141
11	1.167	1.227	-1.57	-1.37	0.929	0.226	0.21	1.888	-0.73	3.221	-2.4	0.0152	2.14
12	1.186	1.227	-1.52	-1.36	0.895	0.403	0.361	1.977	-0.73	3.806	-2.4	0.0158	2.132
13	1.17	1.215	-1.57	-1.41	0.895	0.505	0.452	1.942	-0.72	3.513	-2.39	0.0156	2.13
14	1.177	1.229	-1.55	-1.339	0.946	0.477	0.451	1.868	-0.73	3.168	-2.39	0.0152	2.137
15	1.145	1.18	-1.64	-1.52	0.907	0.543	0.493	1.89	-0.72	3.251	-2.37	0.0158	2.135
16	1.162	1.229	-1.59	-1.35	0.854	0.402	0.343	1.859	-0.74	3.102	-2.35	0.0158	2.132
17	1.164	1.223	-1.58	-1.38	0.844	0.398	0.336	2.09	-0.74	4.405	-2.37	0.0164	2.127
18	1.172	1.216	-1.56	-1.4	0.888	0.472	0.419	1.959	-0.74	3.723	-2.36	0.0157	2.14
19	1.188	1.221	-1.5	-1.38	0.892	0.47	0.419	1.965	-0.74	3.888	-2.38	0.0152	2.138
20	1.168	1.193	-1.58	-1.49	0.889	0.471	0.419	1.87	-0.74	3.178	-2.37	0.016	2.142
AVG	1.182	1.237	-1.53	-1.2	0.893	0.428	0.386	1.928	-0.68	3.327	-2.37	0.01645	2.1426
SD	0.022	0.035	0.067	0.61	0.051	0.14	0.144	0.078	0.194	0.767	0.112	0.003451	0.026753

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E1 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.2	1.135	-1.51	-1.68	1.138	0.069	0.079	1.853	-0.57	1.675	-2.27	0.0182	2.156
2	1.203	1.122	-1.5	-1.71	1.175	-0.01	-0.01	1.838	-0.59	1.566	-2.29	0.0183	2.174
3	1.21	1.126	-1.48	-1.7	1.201	0	0	1.843	-0.58	1.639	-2.29	0.0182	2.166
4	1.203	1.136	-1.5	-1.67	1.126	-0.08	-0.09	1.829	-0.59	1.554	-2.29	0.013	2.16
5	1.189	1.112	-1.54	-1.74	1.209	-0.19	-0.22	1.82	-0.55	1.539	-2.26	0.0186	2.159
6	1.21	1.119	-1.48	-1.72	1.195	-0.13	-0.16	1.839	-0.54	1.553	-2.26	0.0196	2.174
7	1.188	1.134	-1.54	-1.68	1.094	-0.06	-0.06	1.852	-0.55	1.654	-2.26	0.0199	2.165
8	1.176	1.132	-1.57	-1.68	1.071	0.105	0.113	1.845	-0.6	1.619	-2.29	0.0147	2.167
9	1.197	1.132	-1.51	-1.68	1.149	0.096	0.11	1.851	-0.61	1.69	-2.3	0.0145	2.168
10	1.172	1.142	-1.58	-1.65	1.04	0.273	0.284	1.833	-0.62	1.589	-2.3	0.0145	2.165
11	1.197	1.116	-1.52	-1.73	1.219	0.14	0.171	1.855	-0.61	1.706	-2.3	0.0203	2.166
12	1.179	1.13	-1.57	-1.69	1.09	0.046	0.05	1.83	-0.63	1.559	-2.31	0.0207	2.176
13	1.164	1.134	-1.61	-1.67	1.028	-0.06	-0.06	1.836	-0.62	1.612	-2.3	0.0205	2.165
14	1.181	1.136	-1.56	-1.67	1.069	0.143	0.153	1.845	-0.61	1.67	-2.29	0.0206	2.175
15	1.179	1.128	-1.57	-1.7	1.088	0.38	0.414	2	-0.59	1.565	-2.28	0.0155	2.172
16	1.18	1.137	-1.57	-1.67	1.052	0.133	0.139	1.826	-0.57	1.632	-2.27	0.0149	2.168
17	1.209	1.134	-1.48	-1.68	1.131	0.094	0.106	1.817	-0.56	1.59	-2.27	0.0208	2.166
18	1.18	1.128	-1.56	-1.69	1.084	-0.12	-0.13	1.826	-0.58	1.629	-2.27	0.0204	2.163
19	1.168	1.143	-1.6	-1.65	0.995	0.045	0.045	1.824	-0.57	1.554	-2.27	0.0209	2.167
20	1.167	1.12	-1.6	-1.71	1.101	0.119	0.131	1.818	-0.57	1.539	-2.26	0.0149	2.159
AVG	1.188	1.13	-1.54	-1.69	1.113	0.05	0.053	1.835	-0.58	1.607	-2.28	0.01795	2.16655
SD	0.015	0.008	0.043	0.024	0.064	0.137	0.152	0.012	0.026	0.053	0.016	0.002716	0.005596

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E1 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.235	1.135	-1.4	-1.68	1.246	-0.11	-0.13	1.775	0.143	1.198	-1.71	0.0207	2.228
2	1.243	1.167	-1.37	-1.59	1.129	0.135	0.153	1.766	0.152	1.126	-1.7	0.0203	2.232
3	1.245	1.156	-1.37	-1.63	1.19	0.215	0.256	1.78	0.131	1.221	-1.72	0.02	2.223
4	1.228	1.194	-1.42	-1.51	1.067	0.31	0.33	1.79	0.173	1.263	-1.67	0.0285	2.21
5	1.251	1.175	-1.35	-1.57	1.158	0.273	0.316	1.807	0.202	1.341	-1.62	0.0281	2.215
6	1.245	1.186	-1.37	-1.54	1.101	0.401	0.441	1.816	0.169	1.384	-1.65	0.0192	2.217
7	1.252	1.165	-1.34	-1.62	1.15	0.181	0.209	1.829	0.134	1.334	-1.69	0.0187	2.221
8	1.251	1.158	-1.35	-1.62	1.15	0.181	0.209	1.829	0.134	1.416	-1.69	0.0274	2.212
9	1.246	1.162	-1.36	-1.61	1.135	0.177	0.201	1.83	0.218	1.457	-1.58	0.0182	2.208
10	1.253	1.158	-1.34	-1.62	1.127	0.189	0.231	1.84	0.223	1.525	-1.56	0.0189	2.197
11	1.251	1.152	-1.35	-1.64	1.13	0.228	0.258	1.831	0.151	1.532	-1.65	0.0259	2.205
12	1.236	1.158	-1.4	-1.62	1.14	0.197	0.224	1.838	0.07	1.551	-1.75	0.0256	2.203
13	1.263	1.187	-1.31	-1.54	1.1	0.399	0.439	1.836	0.07	1.551	-1.75	0.0256	2.203
14	1.237	1.159	-1.39	-1.62	1.089	0.168	0.183	1.855	0.248	1.656	-1.54	0.0243	2.202
15	1.25	1.156	-1.35	-1.62	1.118	0.266	0.298	2	0.145	1.617	-1.67	0.0173	2.196
16	1.228	1.157	-1.42	-1.62	1.183	0.305	0.36	1.849	0.159	1.639	-1.65	0.0241	2.206
17	1.256	1.153	-1.33	-1.63	1.115	0.173	0.192	1.872	0.278	1.739	-1.49	0.0171	2.206
18	1.232	1.166	-1.41	-1.6	1.087	0.249	0.271	1.845	0.201	1.579	-1.62	0.0241	2.195
19	1.23	1.146	-1.42	-1.65	1.174	0.201	2.36	1.859	0.303	1.713	-1.47	0.0245	2.201
20	1.228	1.165	-1.42	-1.6	1.09	0.109	0.119	1.876	0.282	1.794	-1.49	0.0241	2.196
AVG	1.243	1.163	-1.37	-1.61	1.134	0.212	0.346	1.828	0.179	1.482	-1.63	0.02263	2.2088
SD	0.011	0.014	0.034	0.04	0.043	0.108	0.49	0.031	0.065	0.191	0.086	0.003728	0.010851

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E1 จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.246	1.151	-1.36	-1.64	1.138	-0	-0	1.906	0.26	1.912	-1.49	0.0171	2.195
2	1.221	1.156	-1.45	-1.62	1.099	0.107	0.118	1.82	0.347	1.62	-1.36	0.0168	2.198
3	1.218	1.158	-1.45	-1.62	1.077	0.015	0.016	1.784	0.256	1.418	-1.5	0.0236	2.198
4	1.231	1.147	-1.41	-1.65	1.149	0.067	0.076	1.801	0.149	1.473	-1.63	0.0232	2.2
5	1.232	1.17	-1.41	-1.59	1.083	0.142	0.154	1.747	0.118	1.276	-1.66	0.0163	2.201
6	1.228	1.152	-1.42	-1.64	1.106	0.303	0.335	1.742	0.131	1.275	-1.62	0.0166	2.185
7	1.227	-1.15	-1.43	-1.63	1.092	0.138	0.15	1.74	0.086	1.255	-1.69	0.0233	2.188
8	1.222	1.138	-1.44	-1.68	1.162	0.064	0.074	1.715	0.01	1.174	-1.76	0.0163	2.185
9	1.222	1.139	-1.44	-1.67	1.155	0.292	0.337	1.667	0.062	0.96	-1.7	0.0228	2.188
10	1.214	1.141	-1.47	1.665	1.081	0.137	0.148	1.691	0.045	1.026	-1.71	0.0229	2.198
11	1.191	1.139	-1.54	-1.67	1.067	0.025	0.026	1.645	-0.01	0.784	-1.76	0.0226	2.19
12	1.213	1.111	-1.47	-1.74	1.221	0.286	0.349	1.644	-0.01	0.787	-1.79	0.0157	2.194
13	1.224	1.133	-1.44	-1.69	1.136	0.183	0.208	1.662	-0.08	0.822	-1.85	0.0223	2.191
14	1.21	1.118	-1.48	-1.73	1.226	0.073	0.089	1.646	-0.13	0.776	-1.9	0.0152	2.191
15	1.229	1.143	-1.42	-1.66	1.13	0.023	0.026	2	-0.08	0.733	-1.85	0.0221	2.192
16	1.239	1.115	-1.39	-1.74	1.283	0.06	0.077	1.626	-0.26	0.674	-2.03	0.0223	2.192
17	1.217	1.115	-1.46	-1.73	1.197	-0.16	-0.19	1.622	-0.2	0.66	-1.97	0.0209	2.189
18	1.229	1.121	-1.42	-1.72	1.224	0.116	0.142	1.617	-0.28	0.619	-2.03	0.0214	2.179
19	1.222	1.135	-1.45	-1.68	1.133	0.157	0.178	1.615	-0.31	0.608	-2.06	0.0221	2.187
20	1.248	-1.11	-1.37	-1.74	1.265	0.155	0.196	1.606	-0.33	0.573	-2.08	0.0151	2.178
AVG	1.224	0.911	-1.44	-1.51	1.151	0.109	0.126	1.697	-0.01	1.021	-1.77	0.01993	2.19095
SD	0.013	0.699	0.039	0.748	0.065	0.11	0.128	0.083	0.198	0.384	0.202	0.003263	0.006403

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E1 จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.383	1.182	-1	-1.56	1.264	0.347	0.439	1.628	-0.24	0.147	-2.14	0.0205	2.102
2	1.38	1.174	-1.01	-1.58	1.242	0.136	0.169	1.675	-0.2	0.613	-2.12	0.0166	2.086
3	1.299	1.183	-1.24	-1.56	0.978	0.234	0.229	1.818	0.978	1.31	-0.73	0.014	2.117
4	1.325	1.203	-1.17	-1.51	0.991	0.382	0.379	1.817	0.673	1.346	-1.23	0.0114	2.103
5	1.308	1.217	-1.2	-1.46	1.071	0.55	0.589	1.412	0.098	-0.76	-2.12	0.0281	2.148
6	1.28	1.186	-1.3	-1.55	0.964	0.25	0.241	1.867	0.705	1.469	-1.14	0.0128	2.117
7	1.343	1.171	-1.11	-1.59	0.893	0.107	0.095	1.88	0.623	1.523	-1.27	0.0128	2.129
8	1.416	1.192	-0.88	-1.54	1.052	0.297	0.312	1.87	0.826	1.621	-0.89	0.013	2.122
9	1.318	1.218	-1.17	-1.46	1.081	0.293	0.317	1.604	1.606	-0.14	0.377	0.0226	2.145
10	1.177	1.186	-1.57	-1.55	1.297	0.051	0.066	1.342	1.515	-1.08	0.041	0.0197	2.109
11	1.425	1.183	-0.85	-1.56	0.985	0.042	0.041	1.664	1.558	0.194	0.631	0.0222	2.08
12	1.317	1.152	-1.17	-1.64	1.174	0.033	0.039	1.345	1.679	-1.06	0.798	0.0184	2.087
13	1.512	1.136	-0.56	-1.68	1.145	0.116	0.132	1.531	1.246	-0.42	-0.17	0.0164	2.054
14	1.492	1.173	-0.63	-1.59	1.13	0.407	0.46	1.485	1.831	-0.59	1.583	0.0147	2.051
15	1.409	1.158	-0.89	-1.63	1.125	0.019	0.216	2	1.852	0.23	1.58	0.0156	2.108
16	1.419	1.148	-0.86	-1.65	1.126	0.11	0.124	1.516	1.662	-0.44	0.953	0.022	2.105
17	1.455	1.235	-0.71	-1.42	1.055	0.314	0.332	1.894	0.472	1.661	-1.66	0.0126	2.135
18	1.394	1.181	-0.916	-1.57	1.039	0.003	0.003	1.828	1.864	1.43	1.389	0.0121	2.109
19	1.379	1.205	-0.97	-1.5	0.81	0.089	0.072	1.878	1.05	1.681	-0.91	0.011	2.151
20	1.389	1.167	-0.98	-1.6	1.426	0.285	0.406	1.408	-0.69	-0.52	-2.37	0.0192	2.071
AVG	1.371	1.183	-1.01	-1.56	1.092	0.203	0.233	1.656	0.955	0.411	-0.47	0.016785	2.10645
SD	0.078	0.025	0.247	0.066	0.144	0.154	0.166	0.194	0.772	1.007	1.321	0.00465	0.028666

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E2 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.524	1.477	-0.37	-0.28	0.85	0.649	0.552	1.727	1.257	2.026	-0.29	0.0064	2.075
2	1.562	1.51	-0.19	-0.38	0.918	0.791	0.726	1.847	1.115	2.887	-0.87	0.0051	2.074
3	1.282	1.59	-1.19	0.016	0.736	0.47	0.346	2.014	1.064	2.86	-1.44	0.0047	2.072
4	1.454	1.656	-0.54	0.296	0.741	0.669	0.495	2.137	1.154	3.376	-1.37	0.0041	2.071
5	1.469	1.593	-0.48	0.01	0.771	0.695	0.536	2.216	1.237	3.718	-1.17	0.0033	2.073
6	1.323	1.544	-0.54	0.34	0.88	0.715	0.614	2.118	1.345	2.15	-1.06	0.0024	2.073
7	1.314	1.51	-0.38	0.465	0.91	0.679	0.718	2.119	1.28	3.14	-0.89	0.0028	2.075
8	1.426	1.492	-0.45	0.314	0.922	0.712	0.656	2.01	1.47	2.48	-1.13	0.0031	2.084
9	1.46	1.523	-0.23	0.276	0.848	0.732	0.644	2.21	1.328	2.53	-0.84	0.0017	2.081
10	1.557	1.655	-0.01	0.298	0.779	0.79	0.615	2.131	1.304	2.432	-0.69	0.0018	2.076
11	1.505	1.588	-0.28	0.08	0.789	0.71	0.56	2.139	1.335	2.643	-0.23	0.0015	2.077
12	1.559	1.475	-0.13	-0.41	0.859	0.654	0.562	1.928	1.308	1.681	-0.78	0.0017	2.082
13	1.477	1.515	-0.46	-0.26	0.847	0.771	0.653	1.91	1.426	1.772	0.403	0.0022	2.1
14	1.388	1.396	-0.77	-0.74	0.842	0.735	0.618	1.883	1.65	1.344	1.383	0.0018	2.092
15	1.36	1.388	-0.89	-0.79	0.806	0.694	0.559	2	1.694	0.112	1.407	0.0016	2.092
16	1.445	1.437	-0.54	-0.57	0.853	0.783	0.669	1.84	1.85	1.245	2.167	0.0013	2.088
17	1.427	1.336	-0.57	-0.97	0.802	0.767	0.615	2.054	1.724	2.187	1.056	0.0011	2.087
18	1.452	1.406	-0.51	-0.69	0.901	0.774	0.697	1.979	0.88	2.156	-0.79	0.0011	2.092
19	1.324	1.442	-0.99	-0.52	0.833	0.638	0.531	1.937	1.372	1.654	0.283	0.007	2.088
20	1.374	1.401	-0.79	-0.72	0.845	0.723	0.611	1.916	0.666	1.495	-1.18	0.007	2.087
AVG	1.434	1.497	-0.51	-0.21	0.837	0.708	0.599	1.998	1.323	2.194	-0.3	0.003085	2.08195
SD	0.085	0.09	0.296	0.456	0.055	0.074	0.087	0.138	0.281	0.834	1.06	0.001969	0.008451

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E2 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.017	1.026	-1.96	-1.94	0.903	0.889	0.803	1.013	2.07	-1.96	1.967	0.0016	2.056
2	1.042	1.02	-1.87	-1.95	0.906	0.848	0.769	1.032	1.848	-1.9	0.86	0.0015	2.056
3	1.025	1.061	-1.94	-1.84	0.837	0.645	0.54	1.039	1.742	-1.88	0.411	0.0014	2.057
4	1.252	1.145	-1.13	-1.64	0.951	0.488	0.464	1.277	1.361	-0.85	-0.95	0.0014	2.06
5	1.411	1.282	-0.69	-1.14	0.863	0.504	0.435	1.684	1.266	0.339	-0.66	0.0014	2.078
6	1.177	1.112	-1.5	-1.72	0.933	0.49	0.457	1.282	1.141	-1.01	-1.47	0.0008	2.063
7	1.211	1.107	-1.41	-1.73	1.071	0.283	0.304	1.492	1.137	-0.21	-1.18	0.0009	2.066
8	1.231	1.139	-1.33	-1.65	0.969	0.349	0.338	1.466	1.187	-0.33	-1.1	0.0005	2.063
9	1.228	1.152	-1.34	-1.58	1.029	0.431	0.443	1.476	1.34	-0.27	-0.35	0.0006	2.064
10	1.216	1.115	-1.38	-1.71	1.153	0.354	0.408	1.841	1.831	1.362	1.493	0.001	2.077
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
AVG	1.181	1.116	-1.45	-1.69	0.962	0.528	0.496	1.36	1.492	-0.67	-0.1	0.00111	2.064
SD	0.123	0.075	0.392	0.229	0.098	0.206	0.166	0.283	0.345	1.076	1.207	0.000398	0.007916

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E2 จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.153	1.124	-1.5	-1.61	0.951	0.46	0.486	1.632	1.241	0.202	-0.64	0.01	2.097
2	1.187	1.149	-1.5	-1.63	0.985	0.44	0.433	1.599	1.103	0.155	-0.55	0.0009	2.089
3	1.185	1.15	-1.5	-1.63	0.887	0.54	0.445	1.553	1.017	0.245	-0.59	0.0013	2.076
4	1.162	1.21	-1.54	-1.61	0.927	0.48	0.417	1.642	1.085	0.176	-0.61	0.0012	2.094
5	1.219	1.13	-1.39	-1.68	1.152	0.363	0.418	1.607	0.177	0.213	-1.98	0.0011	2.094
6	1.188	1.13	-1.49	-1.68	1.078	0.374	0.403	1.619	0.449	0.297	-1.68	0.001	2.092
7	1.194	1.138	-1.47	-1.66	1.123	0.435	0.489	1.607	0.25	0.221	-1.9	0.001	2.091
8	1.175	1.184	-1.53	-1.51	1.021	0.519	0.53	1.612	0.11	0.218	-1.98	0.001	2.091
9	1.185	1.17	-1.5	-1.56	1.047	0.325	0.341	1.651	0.216	0.383	-1.87	0.0016	2.102
10	1.169	1.137	-1.56	-1.67	1.082	0.272	0.294	1.677	0.076	0.446	-1.98	0.0016	2.108
11	1.176	1.16	-1.54	-1.59	1.063	0.254	0.27	1.738	0.219	0.651	-1.78	0.0021	2.11
12	1.165	1.129	-1.57	-1.69	1.05	0.317	0.333	1.734	0.014	0.588	-1.98	0.0029	2.116
13	1.184	1.133	-1.51	-1.67	1.071	0.374	0.4	1.733	-0.17	0.616	-2.13	0.0022	2.108
14	1.18	1.14	-1.52	-1.65	1.009	0.454	0.458	1.8	-0.04	0.95	-2.02	0.0023	2.118
15	1.187	1.165	-1.5	-1.58	1.039	0.577	0.599	2	-0.19	0.702	-2.14	0.0022	2.113
16	1.163	1.138	-1.58	-1.66	1.064	0.591	0.629	1.745	-0.33	0.716	-2.23	0.0023	2.111
17	1.175	1.162	-1.54	-1.59	1.006	0.324	0.326	1.797	-0.17	0.975	-2.11	0.0021	2.113
18	1.173	1.162	-1.54	-1.59	1.047	0.254	0.266	1.768	-0.1	0.869	-2.05	0.0021	2.116
19	1.15	1.157	-1.62	-1.6	1.024	0.364	0.373	1.705	-0.22	0.504	-2.14	0.0021	2.113
20	1.151	1.149	-1.61	-1.62	1.065	0.328	0.35	1.703	-0.17	0.534	-2.1	0.0023	2.113
AVG	1.176	1.151	-1.52	-1.62	1.035	0.402	0.413	1.683	0.228	0.483	-1.72	0.002165	2.10325
SD	0.017	0.021	0.051	0.046	0.063	0.104	0.1	0.072	0.494	0.268	0.591	0.001935	0.011827

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E2 จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.19	1.211	-1.53	-1.48	0.95	0.879	0.835	1.776	0.382	0.986	-1.53	0.0134	2.064
2	1.21	1.197	-1.5	-1.51	0.922	0.895	0.825	1.738	0.646	0.786	-1.22	0.0135	2.027
3	1.212	1.225	-1.47	-1.44	0.853	0.826	0.705	1.689	1.608	0.533	0.711	0.0133	2.062
4	1.208	1.224	-1.48	-1.44	0.861	0.796	0.686	1.717	1.317	0.652	0.116	0.0129	2.063
5	1.215	1.23	-1.47	-1.43	0.845	0.758	0.64	1.683	1.573	0.523	0.664	0.0128	2.034
6	1.223	1.217	-1.45	-1.46	0.844	0.67	0.566	1.702	1.082	0.674	-0.35	0.0137	2.052
7	1.215	1.27	-1.47	-1.33	0.791	0.645	0.511	1.693	1.055	0.643	-0.43	0.0143	2.042
8	1.226	1.237	-1.44	-1.41	0.931	0.714	0.665	1.705	0.738	0.646	-0.97	0.0177	2.049
9	1.242	1.249	-1.4	-1.38	0.879	0.701	0.616	1.693	0.64	0.573	-1.12	0.012	2.069
10	1.206	1.246	-1.49	-1.39	0.843	0.607	0.512	1.705	1.179	0.667	-0.1	0.0133	2.035
11	1.234	1.199	-1.42	-1.51	1.025	0.858	0.88	1.711	0.687	0.752	-1.02	0.0139	2.067
12	1.205	1.27	-1.49	-1.33	0.86	0.505	0.434	1.692	0.64	0.658	-1.08	0.0198	2.064
13	1.235	1.259	-1.42	-1.36	0.846	0.552	0.467	1.672	0.52	0.533	-1.22	0.0125	2.093
14	1.239	1.255	-1.41	-1.37	0.876	0.518	0.454	1.664	0.462	0.555	-1.31	0.0129	2.083
15	1.223	1.231	-1.45	-1.43	0.859	0.819	0.704	1.646	0.161	0.445	-1.71	0.0128	2.084
16	1.217	1.238	-1.46	-1.41	0.843	0.681	0.574	1.644	0.175	0.471	-1.7	0.0176	2.096
17	1.238	1.241	-1.41	-1.4	0.841	0.677	0.569	1.636	0.106	0.478	-1.77	0.0174	2.088
18	1.228	1.264	-1.44	-1.34	0.758	0.452	0.343	1.631	0.179	0.437	-1.67	0.0176	2.079
19	1.268	1.203	-1.33	-1.49	0.954	0.838	0.799	1.594	-0.07	0.315	-1.96	0.0219	2.087
20	1.159	1.334	-1.59	-1.14	0.704	0.333	0.235	1.171	1.632	1.052	0.412	0.0221	2.123
AVG	1.22	1.24	-1.45	-1.4	0.864	0.686	0.601	1.658	0.736	0.619	-0.86	0.01527	2.06805
SD	0.022	0.032	0.054	0.084	0.071	0.155	0.169	0.122	0.528	0.178	0.844	0.003195	0.024182

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E3 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.116	1.094	-1.72	-1.78	1.148	0.433	0.497	2.062	0.679	3.513	-0.55	0.0176	2.166
2	1.103	1.074	-1.75	-1.83	1.175	0.37	0.435	2.177	1.036	4.123	0.392	0.0177	2.158
3	1.104	1.067	-1.74	-1.85	1.198	0.315	0.377	2.117	1	3.943	0.336	0.0116	2.145
4	1.167	1.083	-1.56	-1.81	1.314	0.279	0.367	2.023	0.655	3.459	-0.6	0.0131	2.168
5	1.157	1.093	-1.59	-1.78	1.233	0.437	0.539	2.111	0.62	3.987	-0.64	0.0124	2.16
6	1.169	1.091	-1.56	-1.78	1.343	0.378	0.508	2.103	0.604	3.994	-0.57	0.012	2.16
7	1.169	1.097	-1.55	-1.77	1.254	0.398	0.499	2.08	0.654	3.834	-0.59	0.0176	2.168
8	1.163	1.092	-1.58	-1.79	1.295	0.165	0.213	2.087	0.496	3.842	-0.87	0.018	2.162
9	1.194	1.14	-1.48	-1.65	1.152	0.404	0.466	2.191	0.6	4.266	-0.69	0.0125	2.166
10	1.174	1.117	-1.56	-1.72	1.167	0.269	0.314	2.137	0.413	3.994	-1.05	0.0126	2.165
11	1.192	1.132	-1.49	-1.68	1.215	0.163	0.199	2.077	0.302	3.769	-1.25	0.0186	2.17
12	1.176	1.11	-1.54	-1.74	1.237	0.147	0.182	2.007	0.261	3.361	-1.35	0.0183	2.176
13	1.173	1.11	-1.56	-1.74	1.212	0.263	0.319	2.159	0.189	3.936	-1.37	0.0168	2.164
14	1.185	1.127	-1.53	-1.7	1.232	0.316	0.39	2.145	0.22	3.966	-1.36	0.0169	2.166
15	1.179	1.116	-1.54	-1.73	1.269	0.149	0.189	2	0.178	3.972	-1.43	0.0108	2.155
16	1.181	1.106	-1.54	-1.75	1.316	0.169	0.223	2.114	0.234	3.707	-1.38	0.0165	2.167
17	1.174	1.132	-1.56	-1.68	1.178	0.273	0.321	2.133	0.238	3.814	-1.34	0.0153	2.163
18	1.186	1.127	-1.52	-1.69	1.246	-0.2	-0.25	2.105	0.257	3.625	-1.37	0.0148	2.154
19	1.188	1.116	-1.52	-1.73	1.366	0.266	0.363	2.072	0.234	3.524	-1.36	0.0144	2.154
20	1.196	1.152	-1.48	-1.62	1.234	0.238	0.294	1.943	0.12	2.933	-1.56	0.0147	2.148
AVG	1.167	1.109	-1.57	-1.74	1.239	0.261	0.322	2.1	0.45	3.778	-0.93	0.01511	2.16175
SD	0.028	0.022	0.079	0.059	0.063	0.145	0.177	0.06	0.271	0.306	0.565	0.002551	0.007622

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E3 ที่ไม่มีจุดบกพร่อง ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.303	1.229	-1.06	-1.33	1.152	0.302	0.348	2.232	1.525	4.163	2.094	0.0085	2.11
2	1.195	1.093	-1.46	-1.78	1.316	0.243	0.32	2.098	2.056	3.491	3.243	0.006	2.109
3	1.17	1.101	-1.55	-1.76	1.25	0.308	0.385	1.937	1.941	2.558	2.433	0.0057	2.105
4	1.262	1.088	-1.21	-1.79	1.442	0.307	0.443	1.893	1.989	2.428	2.576	0.0051	2.103
5	1.256	1.116	-1.23	-1.72	1.303	0.173	0.225	1.656	1.797	1.053	1.642	0.0036	2.094
6	1.276	1.121	-1.2	-1.7	1.311	0.088	0.116	1.563	1.775	0.559	1.522	0.0033	2.09
7	1.175	1.094	-1.55	-1.78	1.407	-0.01	-0.02	1.419	0.247	-0.27	-1.83	0.0091	2.117
8	1.18	1.107	-1.54	-1.75	1.312	-0.26	-0.33	1.466	0.454	-0.06	-1.61	0.0104	2.136
9	1.164	1.107	-1.59	-1.75	1.261	0.069	0.087	1.433	0.439	-0.2	-1.62	0.0097	2.135
10	1.174	1.125	-1.56	-1.7	1.152	-0.01	-0.01	1.441	0.533	-0.15	1.526	0.0101	2.129
11	1.194	1.122	-1.5	-1.71	1.222	0.05	0.06	1.44	0.472	-0.18	-1.58	0.0102	2.134
12	1.182	1.118	-1.53	-1.72	1.232	-0.1	-0.12	1.489	0.669	0.066	-1.37	0.0104	2.148
13	1.207	1.14	-1.45	-1.66	1.207	0.325	0.392	1.447	0.301	-0.1	-1.79	0.011	2.147
14	1.192	1.177	-1.5	-1.55	1.139	0.412	0.469	1.424	0.042	-0.3	-2.05	0.0112	2.146
15	1.203	1.124	-1.47	-1.71	1.333	-0.08	-0.1	1	-0.05	0.12	-2.11	0.0124	2.147
16	1.201	1.142	-1.48	-1.66	1.23	0.115	0.141	1.597	0.026	0.663	-1.99	0.0119	2.156
17	1.202	1.171	-1.47	-1.57	1.166	0.117	0.136	1.665	0.048	1	-1.91	0.0125	2.161
18	1.221	1.201	-1.43	-1.5	1.124	-0.06	-0.07	1.776	0.255	1.263	-1.69	0.0116	2.172
19	1.204	1.171	-1.49	-1.58	1.146	0.073	0.084	1.73	0.442	1.041	-1.46	0.0117	2.173
20	1.215	1.158	-1.45	-1.62	1.15	0.138	0.158	1.737	0.201	1.21	-1.71	0.0133	2.163
AVG	1.209	1.135	-1.44	-1.67	1.243	0.111	0.136	1.645	0.758	0.918	-0.38	0.009385	2.13375
SD	0.038	0.038	0.143	0.114	0.092	0.17	0.213	0.24	0.76	1.306	1.949	0.003032	0.025705

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E3 จุดบกพร่องแบบที่ 1 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.228	1.166	-1.4	-1.59	1.24	0.226	0.28	1.724	-0.13	1.187	-1.98	0.0116	2.156
2	1.223	1.163	-1.42	-1.6	1.204	0.06	0.073	1.607	-0.29	0.604	-2.14	0.0116	2.153
3	1.207	1.197	-1.47	-1.5	1.103	0.299	0.329	1.433	-0.29	-0.16	-2.14	0.0113	2.156
4	1.228	1.166	-1.4	-1.59	1.24	0.226	0.28	1.724	-0.13	1.187	-1.98	0.0116	2.156
5	1.2	1.18	-1.48	-1.53	1.149	0.33	0.379	1.441	-0.25	-0.11	-2.11	0.0126	2.167
6	1.206	1.202	-1.46	-1.49	1.104	0.314	0.347	1.406	-0.37	-0.26	-2.18	0.0121	2.16
7	1.197	1.193	-1.49	-1.51	1.111	0.063	0.07	1.423	-0.35	-0.16	-2.14	0.0105	2.158
8	1.206	1.202	-1.46	-1.49	1.104	0.314	0.347	1.406	-0.37	-0.26	-2.18	0.0121	2.16
9	1.22	1.191	-1.42	-1.53	1.181	0.166	0.196	1.399	-0.41	-0.28	-2.19	0.0104	2.152
10	1.209	1.215	-1.46	-1.44	1.104	0.299	0.331	1.428	-0.42	-0.15	-2.2	0.0124	2.167
11	1.213	1.184	-1.45	-1.54	1.12	-0.04	-0.04	1.468	-0.37	0.034	-2.19	0.0121	2.168
12	1.209	1.196	-1.46	-1.51	1.105	0.311	0.343	1.466	-0.36	-0.01	-2.18	0.0128	2.161
13	1.201	1.179	-1.49	-1.55	1.126	0.212	0.239	1.374	-0.44	-0.43	-2.21	0.0117	2.164
14	1.215	1.189	-1.45	-1.5	1.105	0.222	0.234	1.452	-0.4	-0.44	-2.18	0.0113	2.158
15	1.213	1.179	-1.46	-1.51	1.107	0.223	0.245	1	-0.27	-0.26	-2.12	0.0117	2.149
16	1.223	1.183	-1.45	-1.5	1.113	0.232	0.253	1.452	-0.36	-0.31	-2.11	0.0112	2.154
17	1.201	1.194	-1.43	-1.52	1.121	0.243	0.263	1.448	-0.31	-0.27	-2.12	0.0115	2.158
18	1.208	1.188	-1.44	-1.52	1.119	0.231	0.238	1.426	-0.33	-0.31	-2.15	0.0118	2.148
19	1.233	1.144	-1.39	-1.65	1.109	0.029	0.032	1.809	0.328	1.736	-1.34	0.011	2.162
20	1.218	1.143	-1.4	-1.51	1.132	0.232	0.248	1.468	0.345	-0.31	-2.14	0.0115	2.146
AVG	1.213	1.183	-1.44	-1.53	1.135	0.21	0.234	1.489	-0.26	0.053	-2.1	0.01164	2.15765
SD	0.01	0.019	0.031	0.048	0.045	0.104	0.116	0.123	0.219	0.617	0.19	0.000617	0.006252

ตารางค่าสถิติของแบบจำลอง E3 จุดบกพร่องแบบที่ 2 ที่แรงดัน 6.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ครั้งที่	Hqn							Hn				Lacunarity	Dimension
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Q	cc	mcc	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-		
1	1.192	1.19	-1.52	-1.53	1.004	0.912	0.915	1.826	-0.14	1.013	-2.1	0.0139	2.092
2	1.185	1.207	-1.53	-1.49	0.98	0.867	0.85	1.833	0.434	1	-1.54	0.0152	2.126
3	1.186	1.194	-1.53	-1.52	0.943	0.842	0.794	1.888	0.342	1.404	-1.6	0.0128	2.091
4	1.198	1.214	-1.5	-1.47	0.891	0.749	0.667	1.873	0.534	1.261	-1.39	0.0161	2.117
5	1.205	1.291	-1.48	-1.25	1.017	0.789	0.802	1.753	-0.19	0.56	-2.22	0.0132	2.185
6	1.179	1.23	-1.56	-1.42	0.964	0.911	0.879	1.748	0.34	0.569	-1.69	0.0147	2.157
7	1.228	1.227	-1.43	-1.44	0.966	0.92	0.888	1.832	0.238	1.071	-1.8	0.015	2.135
8	1.212	1.243	-1.47	-1.39	0.929	0.829	0.77	1.803	0.277	0.849	-1.83	0.0126	2.143
9	1.326	1.186	-1.15	-1.54	1.166	0.644	0.75	1.644	-0.09	0.038	-2.15	0.0164	2.211
10	1.206	1.291	-1.48	-1.26	0.95	0.642	0.609	1.765	0.074	0.636	-2.03	0.011	2.139
11	1.235	1.321	-1.41	-1.16	1.105	0.636	0.703	1.645	-0.14	0.049	-2.2	0.0097	2.163
12	1.225	1.293	-1.44	-1.25	0.968	0.681	0.659	1.726	-0.07	0.47	-2.13	0.0108	2.153
13	1.21	1.328	-1.47	-1.14	0.939	0.563	0.529	1.728	-0.05	0.458	-2.13	0.0099	2.149
14	1.189	1.338	-1.53	-1.11	1.119	0.474	0.531	1.771	-0.36	0.626	-2.33	0.0106	2.183
15	1.25	1.386	-1.37	-0.95	1.144	0.652	0.746	1.744	-0.54	0.575	-2.36	0.0087	2.152
16	1.212	1.193	-1.48	-1.53	1.082	0.779	0.843	1.767	0.747	0.869	-1.1	0.0226	2.087
17	1.22	1.187	-1.45	-1.55	0.968	0.7	0.677	1.768	1.25	0.78	-0.11	0.0183	2.111
18	1.236	1.189	-1.41	-1.54	0.954	0.856	0.817	1.784	1.192	0.942	-0.22	0.0233	2.101
19	1.245	1.334	-1.45	-1.55	0.998	0.844	0.815	1.732	0.75	0.832	-2.23	0.0197	2.132
20	1.253	1.216	-1.37	-1.47	1.053	0.716	0.754	1.672	1.088	0.295	-0.35	0.0182	2.122
AVG	1.22	1.253	-1.45	-1.38	1.007	0.75	0.75	1.765	0.285	0.715	-1.67	0.014635	2.13745
SD	0.034	0.063	0.088	0.18	0.078	0.125	0.111	0.067	0.514	0.36	0.708	0.004182	0.033262

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภวัตร น้าประเสริฐ เกิดวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541 และเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นเวลา 2 ปี จึงมาศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2543 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งวิศวกร ระดับ 5 ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย