

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการ  
ปล่อยประจุบางส่วน

Study of insulation defect models in rotating machine using partial  
discharge test



รฟ.

๘๖๓/๒๗

๒๕๕๐

เลขที่..... 82986  
เลขทะเบียน..... 30 ก.ศ. 2551  
วัน,เดือน,ปี.....

b..... 11๑ 58492
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการ  
ปล่อยประจุบางส่วน  
Study of insulation defect models in rotating machine using partial  
discharge test



อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช

อ.พีรฤติ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน

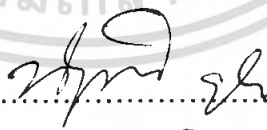
โดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

ผู้จัดทำ

นาย ณัฐพันธ์ อิ่มโคด รหัส 47010236

นาย สุริยันต์ กาชาว รหัส 47010903

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ.นเรศวรฐ พัทฒเดช)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ.พีรฉฉฉ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

### Study of insulation defect models in rotating machine using partial discharge test

1. นายณัฐพันธุ์ อิ่มโคด
  2. นายสุริยันต์ กาชาว
- อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา  
อ.พีรุฉมิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
- ปีการศึกษา 2550

#### บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน โดยมีการศึกษา 2 แบบ คือ ศึกษาการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุนในขณะที่เครื่องจักรกลหมุนกำลังทำงาน (On-Line Partial Discharge) และศึกษาการปล่อยประจุบางส่วนขณะเครื่องจักรกลหมุนหยุดทำงาน (Off-Line Partial Discharge) โดยมีการจำลองจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในฉนวนของแท่งสเตเตอร์ทำการวัดสัญญาณวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิม แล้วนำเอาข้อมูลมาทำการวิเคราะห์การปล่อยประจุเพื่อจำแนกประเภทจุดบกพร่องของแบบจำลองแต่ละประเภท อีกทั้งยังศึกษาผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำของสเตเตอร์โดยใช้กล้องเทอร์โมสแกนและนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาศึกษารูปแบบการกระจายของความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแท่งสเตเตอร์

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นแนวทางพื้นฐานในการวิเคราะห์หารูปแบบและตำแหน่งจุดบกพร่องในฉนวนสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนต่อไป

## Study of insulation defect models in rotating machine using partial discharge test

Mr. Nattapan	Imdod	
Mr. Suriyan	Kakhao	
Lecturer Norasage	pattanadadech	Advisor
Lecturer Peerawut	Yutthagowith	Advisor
2006		

### ABSTRACT

This project represents the study of partial discharge patterns in rotating machine. The study is divided into two cases, on line partial discharge measurement and off line partial discharge measurement. Many defects occurring in stator insulation are simulated. The measured partial discharge signals obtained from conventional partial discharge measurement method are analysis to classify the patterns of PD types. In addition, the temperatures of stator conductor are measured and analyzed. Besides, computer program are employed to examine electric field stress of stator conductors.

Data base obtained from the test results and analysis are very useful to develop the method for locating and examining the defects of stator insulation of rotating machine.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดี จากหลายๆฝ่าย

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช และ อาจารย์ พีรภูมิ ยุทธโกวิท ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ช่วยชี้แนะให้คำปรึกษาสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่การศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูลเพื่อจัดทำโครงการโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ที่มีประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในการจัดทำโครงการครั้งนี้ ขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ใช้เป็นสถานที่ในการทำทดสอบ และเป็นที่ยอมรับในกลุ่มเพื่อทำงานต่างๆ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณธนศ วอทอง วิศวกรไฟฟ้าที่บริษัท ผลิตไฟฟ้า Grow ให้ความอนุเคราะห์ในการศึกษาการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์ คุณ นิพนธ์ พันกลิ่น ที่บริษัท กมลวิศวกรรมเซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แท่งสเตเตอร์ และคุณ เพทาย นิ่มสนอง คุณ ภูชิต ถึงสุข ว่าที่ร้อยตรี ภูชิต บุญโท รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท ที่คอยให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษาในเรื่องการทำการทดลองเป็นอย่างดี และช่วยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง อีกทั้งขอบคุณเพื่อนร่วมงานและสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมแรงสูงทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆด้าน และคอยให้กำลังใจในการทำงานเสมอ จนกระทั่งโครงการสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนทางด้านการศึกษา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อีกทั้งช่วยเหลือทางการเงินและให้กำลังใจในการทำงานเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

หน้า

สารบัญ	
สารบัญตาราง	
สารบัญรูป	
บทที่1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	4
บทที่2. ทฤษฎีการปล่อยประจุบางส่วน	5
2.1 ปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วน	5
2.1.1 วงจรสมมูลการปล่อยประจุบางส่วน	5
2.1.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน	7
2.2 พฤติกรรมของการปล่อยประจุบางส่วน	8
2.3 การวัดการปล่อยประจุบางส่วน	12
2.4 หลักการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนโดยวิธีทางไฟฟ้า	13
2.5 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน	17
2.5.1 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์	17
2.5.1.1 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า	18
2.5.1.2 แบนวิดท์	18
2.5.1.3 การลดทอนและการสะท้อนของสัญญาณ	18
2.5.2 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออฟไลน์	18
2.5.2.1 ข้อเสียของการทดสอบแบบออฟไลน์	19
2.5.2.2 ข้อดีของการทดสอบแบบออฟไลน์	19
2.6 วิธีการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่ได้รับความนิยม	20
2.7 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า	23
2.7.1 การตรวจสอบสัญญาณรบกวน	24
2.7.2 การลดสัญญาณรบกวน	24
2.8 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน	26
2.8.1 ระดับชั้นของฉนวน	26
2.8.2 โครงสร้างระบบฉนวน	27
2.8.3 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.9 ตำแหน่งจุดบกพร่องของฉนวนที่พบในเครื่องจักรกลหมุน	29
2.9.1 เกิดในขดลวดสเตเตอร์	30
2.9.1.1 ฉนวนหลุดหล่อน	30
2.9.1.2 รอยแยกในฉนวน	30
2.9.1.3 โพรงอากาศในฉนวน	30
2.9.1.4 รอยแตกในเนื้อฉนวน	31
2.9.2 จุดบกพร่องระหว่างผิวฉนวนและสลอต	31
2.9.3 จุดบกพร่องที่บริเวณส่วนพันร่อง	31
บทที่ 3. การศึกษาการทดสอบ On-Line Partial Discharge ณ บริษัทผลิตไฟฟ้า GLOW	32
3.1 Generator ที่ทำการศึกษา	32
3.2 ตำแหน่งการเกิด Partial Discharge ใน Rotating Machines	33
3.2.1. บริเวณ slot	33
3.2.2. บริเวณ end winding	34
3.3. วงจรการตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน แบบ On-line Partial Discharge ใน rotating machine	35
3.3.1. การใช้ Coupling Capacitor ในการตรวจจับ PD	35
3.3.1.1. วิธี Differential	35
3.3.1.2. วิธี Directional	35
3.3.2. การใช้ Current Transformer ในการตรวจจับ PD	36
3.4. การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ on-line ในเครื่องจักรกลหมุนของ บริษัท PD TECH	36
3.5. การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ on-line ในเครื่องจักรกลหมุนของ บริษัท IRIS	42
3.5.1. วงจรและอุปกรณ์การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ on-line ในเครื่องจักรกลหมุนของ บริษัท IRIS	42
3.5.2 ขั้นตอนการทำการหาค่า delay time	44
3.5.3 ขั้นตอนการทำการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ On-line ของ บริษัท IRIS	44
3.6. วิเคราะห์ข้อแตกต่างระหว่าง บริษัท PD TECH และ บริษัท IRIS	45
บทที่ 4. การจัดทำแบบจำลองการออกแบบการทดสอบ	46
4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์	46
4.1.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อผู้แต่งและเนื้อหา โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

4.1.2	แบบจำลองแท่งสเตเดออร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด	47
4.1.3	แบบจำลองแท่งสเตเดออร์ ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเตเดออร์	48
4.1.4	แบบจำลองแท่งสเตเดออร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเดออร์	48
4.1.5	แบบจำลองแท่งสเตเดออร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสเตเดออร์	49
4.1.6	แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือฉนวนส่วนพื้นร่องมีรอยขีด	50
4.1.7	แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวน ส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด	50
4.2	การออกแบบการทดลอง	51
4.2.1	การทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิ	51
4.2.2	การทดสอบการเกิดดิสซาร์จบางส่วน ด้วยเครื่องทดสอบการดิสซาร์จบางส่วน	54
4.2.2.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	55
4.2.2.2	ขั้นตอนการทดสอบ	56
บทที่ 5	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	57
5.1	การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนด้วยโปรแกรม ไฟไนต์อีลิเมนต์	57
5.1.1	การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนของ ฉนวนบนแท่งสเตเดออร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง	57
5.1.2	การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนของ ฉนวนบนแท่งสเตเดออร์ที่มีจุดบกพร่องคือโพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อ ฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง	58
5.1.2.1	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อ ฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง	58
5.1.2.2	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อ ฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง	59
5.1.3	การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนของ ฉนวนบนแท่งสเตเดออร์ที่มีจุดบกพร่องคือโพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน	60
5.1.3.1	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อ ฉนวนบนแท่งสเตเดออร์	60
5.1.3.2	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อ ฉนวนบนแท่งสเตเดออร์	61

## สารบัญ(ต่อ)

5.1.3.3 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7 mm. เกิดในเนื้อ ฉนวนบนแท่งสเตเตอร์	62
5.1.4 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของ ฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่มีรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์	63
5.1.4.1 รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x0.7 mm	63
5.1.4.2 รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x1.4 mm	64
5.1.5 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของ ฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่มีรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับตัวนำทองแดง	65
5.1.5.1 มีรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับตัวนำทองแดง	65
5.1.6 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ของแท่งสเตเตอร์ที่เกิดจากรอยถลอกของเซมิคอนดักเตอร์	66
5.1.6.1 เกิดรอยถลอกที่มุมของแท่งสเตเตอร์ลึก 0.5 mm	66
5.1.6.2 เกิดรอยถลอกของแท่งสเตเตอร์บริเวณ เซมิคอนดักเตอร์ลึก 0.7 mm	67
5.1.6.3 เกิดรอยถลอกของแท่งสเตเตอร์บริเวณตรงกลางลึก 0.7 mm	68
5.1.6.4 เกิดรอยถลอกของแท่งสเตเตอร์บริเวณตรงกลางลึกถึงฉนวนกราวด์	69
5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิ	70
5.2.1 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV	70
5.2.1.1 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 11 kV	70
5.2.1.2 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 5 kV	71
5.2.1.3 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 10 kV	72
5.2.1.4 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่พิกัด 15 kV	73
5.2.1.5 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 20 kV	74
5.2.2 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV	75
5.2.2.1 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 3.3 kV	76
5.2.2.2 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 6.6 kV	76
5.2.2.3 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 9.9 kV	77
5.2.2.4 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ 13.2 kV	78
5.3 ผลการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน	79
5.3.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องพิกัด 11 kV	79
5.3.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องพิกัด 6.6 kV	83

## สารบัญ(ต่อ)

5.3.3	แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัดพิกัดแรงดัน 11 kV	86
5.3.4	แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์	90
5.3.5	แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์	94
5.3.6	แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์	98
5.3.7	แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือฉนวนส่วนพื้นร่องมีรอยขีด	102
5.3.8	แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด	106
5.4	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	110
5.4.1	วิเคราะห์ผลของรูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในร่องสลีตของแบบจำลองแท่งที่พิกัด 11 kV ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	110
5.4.2	วิเคราะห์ผลการทดสอบอุณหภูมิ	111
5.4.3	วิเคราะห์ผลการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน	115
บทที่ 6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	118
6.1	สรุป	118
6.2	ข้อเสนอแนะ	119
อ้างอิง		120
ภาคผนวก		121
	ภาคผนวก ก	121
	ภาคผนวก ข	122
	ภาคผนวก ค	125
ประวัติผู้เขียน		126

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 3.1 ตารางข้อมูลทางเทคนิคของ RFCT (CT-17)	38
ตารางที่ 3.2 Global Evaluation Table	41
ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบดีสซาร์จบางส่วนที่แบบจำลองจุดบกพร่องต่าง ๆ กัน	115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	ก) วงจรสมมูลฉนวนที่มีโพรงก๊าซ ข) วงจรสมมูลการปล่อยประจุบางส่วน	5
รูปที่ 2.2	การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน	6
รูปที่ 2.3	การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในจุดภาคที่หนึ่งและสาม	7
รูปที่ 2.4	แสดงพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ	8
รูปที่ 2.5	แบบจำลองการปล่อยประจุบางส่วนของระบบฉนวน	9
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ขั้วบวก พัลส์ขั้วลบ และฉนวนที่ทำหน้าที่เป็น แคโทด	10
รูปที่ 2.7	การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ขั้วลบเด่นกว่า	11
รูปที่ 2.8	การกระจายพัลส์การเกิดพัลส์ขั้วบวกและพัลส์ขั้วลบใกล้เคียงกัน	11
รูปที่ 2.9	การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ขั้วบวกเด่นกว่ากัน	12
รูปที่ 2.10	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับสัญญาณการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน	14
รูปที่ 2.11	วงจรการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ	16
รูปที่ 2.12	การกระจายขนาดพัลส์	21
รูปที่ 2.13	การกระจาย Phase Resolved Pattern	22
รูปที่ 2.14	สัญญาณรบกวนจากแหล่งต่างๆ	23
รูปที่ 2.15	โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน	27
รูปที่ 2.16	โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์	29
รูปที่ 2.17	ฉนวนหลุดหล่อน	30
รูปที่ 2.18	รอยแยกในฉนวน	30
รูปที่ 2.19	โพรงอากาศในฉนวน	30
รูปที่ 2.20	รอยแตกในเนื้อฉนวน	31
รูปที่ 2.21	จุดบกพร่องระหว่างผิวฉนวนและสลอต	31
รูปที่ 2.22	จุดบกพร่องที่บริเวณส่วนพันร่อง	31
รูปที่ 3.1	Generator ที่ทำการศึกษา	32
รูปที่ 3.2	แสดง รูปจริงของ Stator bar และตำแหน่งการเกิด Partial Dischargeใน Rotating Machines (slot)	33
รูปที่ 3.3	แสดงตำแหน่งการเกิด Partial Dischargeใน Rotating Machines (end winding)	34
รูปที่ 3.4	วงจร Coupling Capacitor ในการตรวจจับ PD	35
รูปที่ 3.5	วงจร Current Transformer ในการตรวจจับ PD	36
รูปที่ 3.6	วงจรการติดตั้งการวัด On-line partial discharge ของบริษัท PD TECH	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 3.7	Surgecapacitor	37
รูปที่ 3.8	RFCT (CT-17)	37
รูปที่ 3.9	Terminal Box	38
รูปที่ 3.10	Partial discharge monitoring	38
รูปที่ 3.11	การแสดงผลเกิด PD ในระบบ 3 แกน	39
รูปที่ 3.12	การเกิด PD ตำแหน่งต่างๆ	41
รูปที่ 3.13	แสดงวงจรพื้นฐานของ Directional Method	42
รูปที่ 3.14	วงจร direction method แสดงสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้น	42
รูปที่ 3.15	วงจร direction method แสดงสัญญาณ Noises ที่เกิดขึ้น	42
รูปที่ 3.16	A. จงจรแสดงการติดตั้งของ Capacitor couplers ด้านจ่ายแรงดัน B. Capacitor couplers	43
รูปที่ 3.17	Terminal box	43
รูปที่ 3.18	partial discharge monitoring (TGA-B)	44
รูปที่ 4.1	แบบจำลองแท่งสเดเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง	46
รูปที่ 4.2	แบบจำลองแท่งสเดเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด	47
รูปที่ 4.3	แบบจำลองแท่งสเดเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเดเตอร์	48
รูปที่ 4.4	แบบจำลองแท่งสเดเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเดเตอร์	48
รูปที่ 4.5	แบบจำลองแท่งสเดเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสเดเตอร์	49
รูปที่ 4.6	แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่อง	50
รูปที่ 4.7	แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีต คือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด	50
รูปที่ 4.8	วงจรการทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิ	51
รูปที่ 4.9	ฐานวางที่ทำด้วยเหล็กภาพจริง	51
รูปที่ 4.10	รูปการวางแท่งสเดเตอร์ (test object) กับฐานที่ใช้ในการทดสอบ	52
รูปที่ 4.11	ภาพวงจรการทดสอบจริง	52
รูปที่ 4.12	กล่องเทอร์โมสแกน	53
รูปที่ 4.13	วงจรการทดลอง ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ	54
รูปที่ 4.14	ภาพวงจรที่ทำการทดสอบจริง	55
รูปที่ 4.15	เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101 ใช้สำหรับ ทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 5.1	การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ของฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง	57
รูปที่ 5.2	รูปที่ 5.2 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง	58
รูปที่ 5.3	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง	59
รูปที่ 5.4	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์	60
รูปที่ 5.5	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์	61
รูปที่ 5.6	โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์	62
รูปที่ 5.7	รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x0.7 mm	63
รูปที่ 5.8	รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x1.4 mm	64
รูปที่ 5.9	มีรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับตัวนำทองแดง	65
รูปที่ 5.10	เกิดรอยถลอกที่มุมของแท่งสเตเตอร์ลิก 0.5 mm	66
รูปที่ 5.11	เกิดรอยถลอกของแท่งสเตเตอร์ลิก 0.7 mm	67
รูปที่ 5.12	เกิดรอยถลอกของแท่งสเตเตอร์บริเวณตรงกลางลิก 0.7 mm	68
รูปที่ 5.13	เกิดรอยถลอกของแท่งสเตเตอร์บริเวณตรงกลางลิกถึงฉนวนกราวด์	69
รูปที่ 5.14	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kVจ่ายแรงดันที่ พิกัด 11 kV อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 30.1 องศาเซลเซียส	70
รูปที่ 5.15	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kVจ่ายแรงดันที่ 5 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 29.6 องศาเซลเซียส	71
รูปที่ 5.16	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kVจ่ายแรงดันที่ 10 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 30.00 องศาเซลเซียส	72
รูปที่ 5.17	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kVจ่ายแรงดันที่ 15 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 31.9 องศาเซลเซียส	73
รูปที่ 5.18	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kVจ่ายแรงดันที่ 20 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 35.1 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 5.19	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kVจ่ายแรงดันที่ 3.3 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 30.5 องศาเซลเซียส	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 5.20	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเดเตอร์พิกัด 6.6 kVจ่ายแรงดันที่6.6 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 30.9 องศาเซลเซียส	76
รูปที่ 5.21	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเดเตอร์พิกัด 6.6 kVจ่ายแรงดันที่9.9 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 33.1 องศาเซลเซียส	77
รูปที่ 5.22	ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเดเตอร์พิกัด 6.6 kVจ่ายแรงดันที่ 13.2 kV มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 34.3 องศาเซลเซียส	78
รูปที่ 5.23	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	79
รูปที่ 5.24	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.62 kV ค่าดีสชาร์จ 2.78 pC ที่มุม 45 องศา	80
รูปที่ 5.25	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.72 kVค่าดีสชาร์จ 24.29 pC ที่มุม 10, 45, 60 องศา	80
รูปที่ 5.26	บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.26 kV ค่าดีสชาร์จ 64.03 pC ที่มุม 135,305 องศา	81
รูปที่ 5.27	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.77 kV ค่าดีสชาร์จ 433.83 pC ที่มุม60-135, 137-305 องศา	81
รูปที่ 5.28	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.51 kV ค่าดีสชาร์จ 419.42 pC ที่มุม 30-115, 225-315 องศา	82
รูปที่ 5.29	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.09 kV ค่าดีสชาร์จ 683.23 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-315 องศา	82
รูปที่ 5.30	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	83
รูปที่ 5.31	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.51 kV ค่าดีสชาร์จ 1.70 pC	83
รูปที่ 5.32	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.01 kV ค่าดีสชาร์จ 1.73 pC	84
รูปที่ 5.33	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.58 kV ค่าดีสชาร์จ 6.04 pC ที่มุม 67.5,100,125,315 องศา	84
รูปที่ 5.34	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.02 kV ค่าดีสชาร์จ 95.77 pC ที่มุม 22.5-135, 225-315 องศา	85
รูปที่ 5.35	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.60 kV ค่าดีสชาร์จ 260.58 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-337.5 องศา	85
รูปที่ 5.36	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.14 kV ค่าดีสชาร์จ 312.42 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-315 องศา	86
รูปที่ 5.37	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	86
รูปที่ 5.38	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.25 kV ค่าดีสชาร์จ 1.37 pC	87

### สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 5.39	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.76 kV ค่าดีสชาร์จ 2.98 pC	87
รูปที่ 5.40	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.00 kV ค่าดีสชาร์จ 5.87 pC ที่มุม 90, 135, 270-337.5 องศา	88
รูปที่ 5.41	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.69 kV ค่าดีสชาร์จ 22.42 pC ที่มุม 45-135, 225-315 องศา	88
รูปที่ 5.42	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.17 kV ค่าดีสชาร์จ 33.90 pC ที่มุม 45-135, 240-320 องศา	89
รูปที่ 5.43	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.69 kV ค่าดีสชาร์จ 96.65 pC ที่มุม ที่มุม 22.5-135, 202.5-315 องศา	89
รูปที่ 5.44	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.04 kV ค่าดีสชาร์จ 114.29 pC ที่มุม 0-110, 180-300 องศา	90
รูปที่ 5.45	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	90
รูปที่ 5.46	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.36 kV ค่าดีสชาร์จ 4.52 pC ที่มุม 55 องศา	91
รูปที่ 5.47	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.02 kV ค่าดีสชาร์จ 15.85 pC ที่มุม 80-140, 270-325องศา	91
รูปที่ 5.48	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.52 kV ค่าดีสชาร์จ 30.52 pC ที่มุม 45-135, 225-315 องศา	92
รูปที่ 5.49	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.09 kV ค่าดีสชาร์จ 52.15 pC ที่มุม 45-135, 225-315องศา	92
รูปที่ 5.50	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.63 kV ค่าดีสชาร์จ 96.91 pC ที่มุม 0-90, 180-270องศา	93
รูปที่ 5.51	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.15 kV ค่าดีสชาร์จ 321.29 pC ที่มุม 0-100,180-280องศา	93
รูปที่ 5.52	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	94
รูปที่ 5.53	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.51 kV ค่าดีสชาร์จ 1.45 pC	95
รูปที่ 5.54	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.11 kV ค่าดีสชาร์จ 1.51 pC	95
รูปที่ 5.55	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.52 kV ค่าดีสชาร์จ 1.65 pC	96
รูปที่ 5.56	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.07 kV ค่าดีสชาร์จ 20.54 pC ที่มุม 45, 110, 225, 270 องศา	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 5.57	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.55 kV ค่าดีสชาร์จ 40.06 pC ที่มุม 45,135, 225, 280องศา	97
รูปที่ 5.58	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.19 kV ค่าดีสชาร์จ 178.88 pC ที่มุม 20, 65, 95,350องศา	97
รูปที่ 5.59	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	98
รูปที่ 5.60	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.47 kV ค่าดีสชาร์จ 1.54 pC	99
รูปที่ 5.61	รูปที่ 5.61 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.04 kV ค่าดีสชาร์จ 10.56 pC ที่มุม 22.5-45, 140, 220, 315 องศา	99
รูปที่ 5.62	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.53 kV ค่าดีสชาร์จ 59.45 pC ที่มุม 112.5, 202.5, 315 องศา	100
รูปที่ 5.63	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.17 kV ค่าดีสชาร์จ 51.86 pC ที่มุม 45-90, 225-315องศา	100
รูปที่ 5.64	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.25 kV ค่าดีสชาร์จ 195.09 pC ที่มุม 10-135, 190-315 องศา	101
รูปที่ 5.65	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	102
รูปที่ 5.66	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.24 kV ค่าดีสชาร์จ 23.87 pC ที่มุม 67.5 องศา	103
รูปที่ 5.67	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.90 kV ค่าดีสชาร์จ 86.96 pC ที่มุม 0-22.5, 180, 337.5-360องศา	103
รูปที่ 5.68	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.43 kV ค่าดีสชาร์จ 176.38 pC ที่มุม 67.5-135,245-337.5 องศา	104
รูปที่ 5.69	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.00 kV ค่าดีสชาร์จ 153.23 pC ที่มุม 45-135, 225-337.5 องศา	104
รูปที่ 5.70	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.51 kV ค่าดีสชาร์จ 345.09 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-337.5 องศา	105
รูปที่ 5.71	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.14 kV ค่าดีสชาร์จ 360.51 pC ที่มุม 22.5-157.5, 202.2-337.5 องศา	105
รูปที่ 5.72	ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง	106
รูปที่ 5.73	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.52 kV ค่าดีสชาร์จ 1.55 pC	107
รูปที่ 5.74	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.01 kV ค่าดีสชาร์จ 19.99 pC ที่มุม 80, 265 องศา	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 5.75	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.52 kV ค่าดีสชาร์จ 14.07 pC ที่มุม 70, 140, 230, 290-337.5 องศา	108
รูปที่ 5.76	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.10 kV ค่าดีสชาร์จ 19.42 pC ที่มุม 20-112.5, 200-300 องศา	108
รูปที่ 5.77	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.67 kV ค่าดีสชาร์จ 52.28 pC ที่มุม 15-112.5, 202.5-292.5 องศา	109
รูปที่ 5.78	PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.18 kV ค่าดีสชาร์จ 210.60 pC ที่มุม 10-112.5, 202.5-280 องศา	109
รูปที่ 5.79	ก) แสดงส่วนที่มีอนุภาคนิวตรอนสูงสุดของแท่งสแตเตอร์ ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องเทอร์โมสแกน	111
รูปที่ 5.80	รูปภาพจริงที่เกิดความเสียหายของฉนวนส่วนพันร่อง	112
รูปที่ 5.81	กราฟระหว่างค่าอนุภาคนิวตรอนสูงสุดกับค่าแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสแตเตอร์ พิกัดแรงดัน 6.6 kV พิกัดแรงดัน 11 kV	113
รูปที่ 5.82	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปล่อยประจุบางส่วน (pc) และค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสแตเตอร์ แท่งสแตเตอร์พิกัด 6.6kV แท่งสแตเตอร์พิกัด 11kV	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1 บทนำทั่วไป

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรกลหมุน(Rotating Machine)เป็นเครื่องจักรที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิต เช่น เครื่องผลิตไฟฟ้าในโรงงานไฟฟ้า หรือมอเตอร์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เครื่องจักรกลหมุนถูกนำมาใช้เป็นเครื่องจักรหลักในการผลิต เช่นการผลิตไฟฟ้า เมื่อเกิดความชำรุดเสียหายในระหว่างกระบวนการผลิต ย่อมจะเกิดความเสียหายเป็นมูลค่ามหาศาล จากข้อมูลทางสถิติที่ได้รวบรวมความเสียหายของเครื่องจักรกลหมุนส่วนใหญ่ความเสียหายเกิดจากการชำรุด การเสื่อมสภาพของฉนวน เนื่องจากผลกระทบทางไฟฟ้า ทางกล ความร้อน และสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก [1] จึงมีการศึกษาและหาวิธีประเมินสภาพของฉนวนเพื่อลดความเสี่ยงจากการชำรุดเสียหาย ในขณะที่ใช้งาน วิธีการประเมินฉนวนมีอยู่หลายวิธี เช่น การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ(AC Current Test) การทดสอบหาดัชนีการเกิดขั้ว(Polarization Index Test) การทดสอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก(Dielectric Loss Test) การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน(Insulation Resistance Test) นอกจากนี้ยังมีวิธีประเมินสภาพฉนวนอีกวิธีหนึ่งคือการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน เนื่องจากปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนของฉนวนเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยตรง การประเมินสภาพฉนวนควรประเมินและเก็บข้อมูลเพื่อดูการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องและการประเมินจะน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นหากทราบตำแหน่งและสาเหตุการบกพร่องของฉนวน เนื่องจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนมีความรุนแรงและมีผลต่อการเสื่อมสภาพฉนวนต่างกัน หากมีการหาสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่องในฉนวนก็จะทำให้การประเมินสภาพฉนวนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วนเป็นการปล่อยประจุทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่อถึงกันระหว่างขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยการเกิดประกายไฟ (Spark) เพียงบางส่วนหรือบริเวณที่มีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ [2] เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะทำให้บริเวณนั้นเกิดความร้อนสูงและทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพ ตำแหน่งที่จะเกิดการปล่อยประจุในเครื่องจักรกลหมุนมีอยู่หลายตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งมีความรุนแรงของการเกิดแตกต่างกัน และส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนแตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งของการปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลหมุน เพื่อประโยชน์ในการประเมินคุณภาพฉนวน ได้อย่างน่าเชื่อถือ และเป็นประโยชน์ต่อการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน
2. มีความรู้ความเข้าใจถึงโครงสร้างและการฉนวนของสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนพิกัดแรงดัน 1 kV ขึ้นไป
3. สามารถจัดทำแบบจำลองจุดบกพร่องในเครื่องจักรกลหมุนและออกแบบการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนในแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้
4. สามารถทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนในแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้
5. สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดขึ้นในแบบจำลองและสรุปผลได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาปริญญาโทฉบับนี้ ได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาไว้ดังนี้

1. ศึกษาโครงสร้างและฉนวนของแท่งสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนพิกัดแรงดัน 1kV ขึ้น
2. ศึกษาหลักการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน
3. จำลองจุดบกพร่องฉนวนของสเตเตอร์
4. ทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนของสเตเตอร์ที่มีจุดบกพร่องที่จำลองขึ้น
5. นำผลที่ได้จากการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนมาวิเคราะห์
6. ศึกษาผลของแรงดันต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนแท่งสเตเตอร์

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตาราง ตารางขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตารางการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม1/2550

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน	██████████				
2.ศึกษาโครงสร้างและการฉนวนของสเตเตอร์และโรเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนพิกัดแรงดัน 1 kVขึ้นไป		██████████			
3.ทำการศึกษาคิดค้นและการตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่บริษัทผลิตไฟฟ้า GLOW				██████████	

ตารางการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม2/2550

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.จัดหาอุปกรณ์(แท่งสเตเตอร์)ที่นำมาทดสอบ	██████████				
2. ออกแบบการทดสอบ		██████████			
3.ทำการทดสอบการปล่อยบางส่วนบนแท่งสเตเตอร์				██████████	
4.วิเคราะห์ผล สรุปและจัดทำปริญญานิพนธ์				██████████	

ตารางที่ 1.1 ตารางขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถวิเคราะห์สาเหตุการชำรุดเสียหายของฉนวนได้จากการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน
2. ลดความเสี่ยงต่อความเสียหายขณะนำอุปกรณ์ไปใช้งานทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น
3. มีประโยชน์ในการวางแผนการบำรุงรักษา และการนำเอาเครื่องจักรกลหมุนไปใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

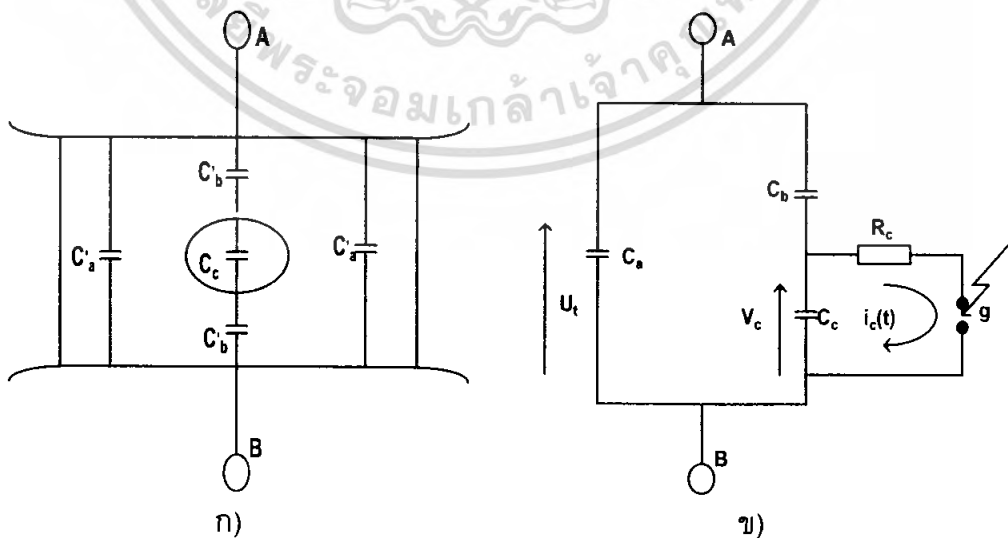
### ทฤษฎีการปล่อยประจุบางส่วน

#### 2.1 ปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วน

การปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) การปล่อยประจุไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่อกันระหว่างขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยการเกิดประกายไฟ (Spark) ในเนื้อฉนวนเพียงบางส่วนหรือบริเวณที่มีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ [2] โดยทั่วไปความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศมีค่า 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร การปล่อยประจุบางส่วนในแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวของฉนวน ในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นเหตุให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้อายุของฉนวนเสียหายและเกิดผิวดำกระจายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

#### 2.1.1 วงจรสมมูลการปล่อยประจุบางส่วน

การปล่อยประจุบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าการปล่อยประจุบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีการปล่อยประจุบางส่วนบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการปล่อยประจุบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณการปล่อยประจุบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.1



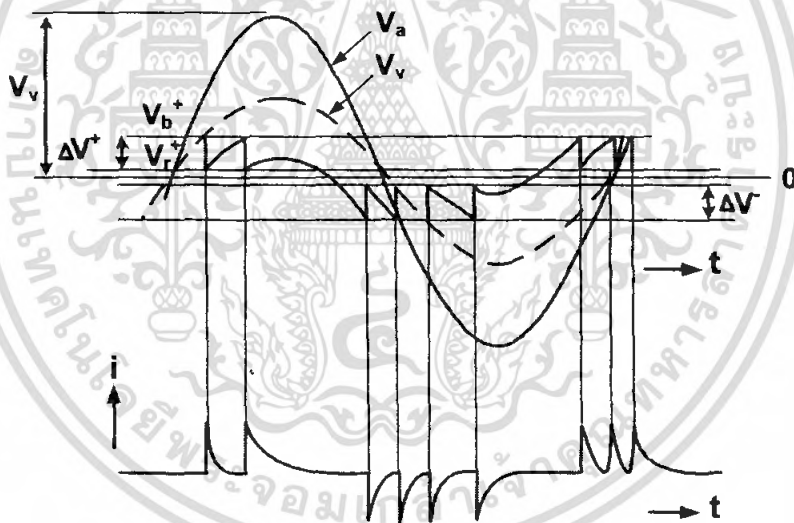
รูปที่ 2.1 ก) วงจรสมมูลฉนวนที่มีโพรงก๊าซ ข) วงจรสมมูลการปล่อยประจุบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงวัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า  $C_c$  ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ  $C_c$  เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า  $C'_c$  ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ  $C_c$  นี้จะรวมกันได้เป็น  $C_b$  ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ดีอยู่โดยรอบของ  $C_c$  จะให้ค่าเป็น  $C'_c$  และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น  $C_a$  ซึ่งจะได้วงจรสมมูลในการปล่อยประจุ ดังรูปที่ 2.1 ข) เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศ  $V_c$  เกินค่าแรงดันวิกฤตของโพรงอากาศก็จะเกิดพัลส์กระแส  $i_c$  ลัดวงจรที่โพรงอากาศ (g) [2]

### 2.1.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

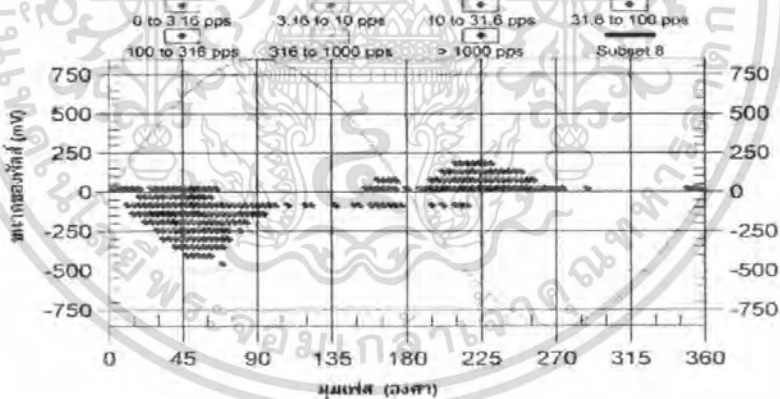
เนื่องจากการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดขึ้น เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ การเกิดปล่อยประจุบางส่วนนั้นอาจเกิดได้ซ้ำๆ หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา เมื่อแรงดันในคาบของไซเคิลบวกค่อยๆ เพิ่มขึ้น แรงที่ตกคร่อมโพรงอากาศก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามด้วย เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศเกินค่าวิกฤตก็จะปล่อยประจุบางส่วนข้ามโพรงอากาศ



รูปที่ 2.2 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

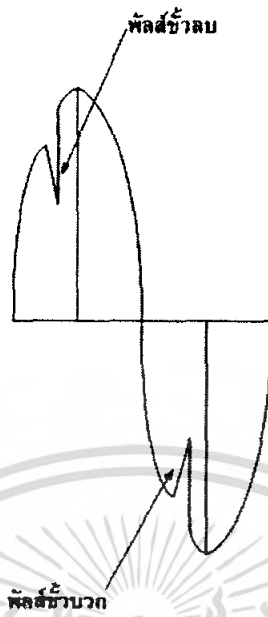
ตามรูปที่ 2.2  $V_a$  คือแรงดันที่คร่อมฉนวน  $V_b$  คือแรงดันวิกฤตคร่อมโพรงอากาศที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน  $V_r$  คือแรงดันหลังจากที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในโพรงอากาศ  $V_c$  คือแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศในกรณีที่ไม่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเลย ส่วน  $i$  คือกระแสพัลส์เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วน การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนอธิบายได้ดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนค่อยๆ เพิ่มขึ้นแรงดันคร่อมโพรงอากาศก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อถึงค่าแรงดันวิกฤตของโพรงอากาศก็จะเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโพรง

อากาศลดลงเหลือ  $V_r$  และเกิดพัลส์ของกระแสขึ้น ในขณะที่แรงดันคร่อมจนวนยังเพิ่มขึ้นแรงดันคร่อมโพรงอากาศก็จะถูกชาร์จเพิ่มขึ้นจนถึงค่าวิกฤติ และก็จะเกิดการปล่อยประจุขึ้นอีกอีกทั้งจะเกิดเข้าไปเรื่อยๆจนกว่าแรงดันในช่วงตกคร่อมโพรงอากาศจะอยู่ในช่วงขาลง จนทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าต่ำกว่าแรงดันวิกฤติของอากาศ แต่เมื่อแรงดันลดลงเรื่อยๆจนอยู่ในช่วงไซเคิลลบโพรงอากาศก็ถูกชาร์จจนแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ทิศทางของแรงดันที่โพรงอากาศจะตรงกันข้ามเมื่อแรงดันอยู่ในไซเคิลบวก เมื่อแรงดันในโพรงอากาศถูกชาร์จจนเกินค่าวิกฤติของโพรงอากาศก็จะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน และเกิดกระแสพัลส์ในทิศทางตรงข้ามกับแรงดันในช่วงไซเคิลบวกเช่นกันและการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดซ้ำๆไปเรื่อยๆเหมือนกับในช่วงไซเคิลบวก จากทฤษฎีจะเห็นว่าการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 0 ถึง 90 องศาของแรงดันในไซเคิลบวก และเกิดในช่วงมุมเฟส 180 ถึง 270 องศาของแรงดันในไซเคิลลบดังรูปที่ 2.3 การปล่อยประจุบางส่วนในช่วงแรงดันไฟฟ้าไซเคิลบวกจะเรียกว่า พัลส์ขั้วลบ (Negative Polarity Pulses) เพราะเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดพัลส์ในทิศทางขาลง และการปล่อยประจุบางส่วนในช่วงแรงดันไฟฟ้าไซเคิลลบเรียกว่า พัลส์ขั้วบวก (Positive Polarity Pulses) ซึ่งเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดพัลส์ในทิศทางขาขึ้น[2]ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในจุดภาคที่หนึ่งและสาม

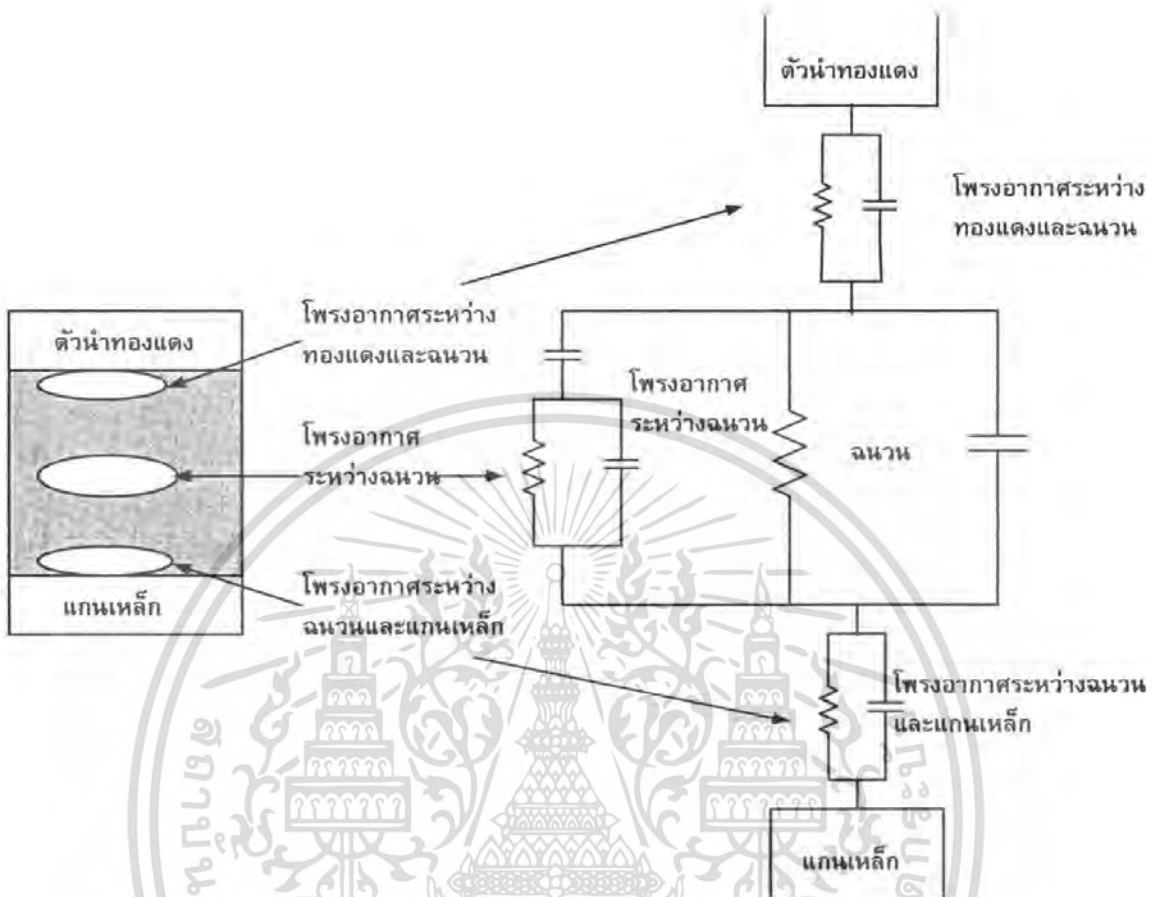
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ

## 2.2 พฤติกรรมของการปล่อยประจุบางส่วน

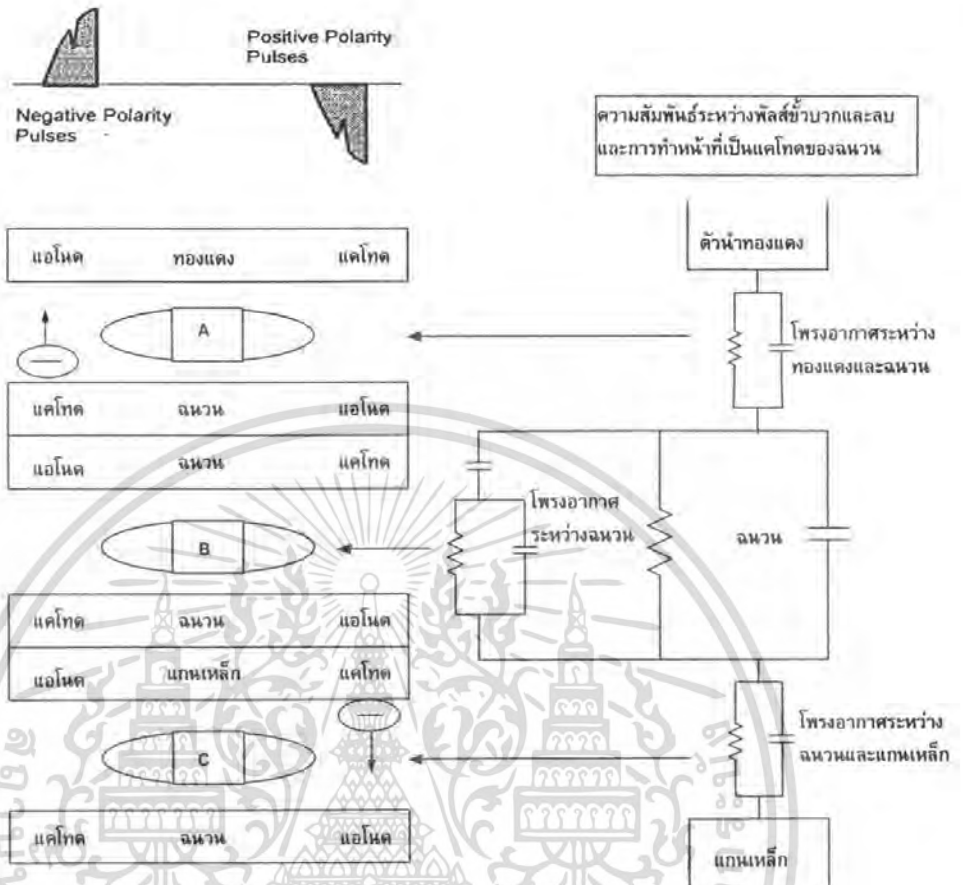
การเกิดการปล่อยประจุส่วนในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบอาจจะมีค่าเท่ากันหรืออาจมีค่าแตกต่างกันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน โดยแบบจำลองจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโพรงอากาศในฉนวนรูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆของฉนวน ตำแหน่งของโพรงอากาศจะมีผลต่อการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งของโพรงอากาศสามตำแหน่ง ตำแหน่งแรกคือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะตัวนำและฉนวน ตำแหน่งที่สองคือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน และตำแหน่งที่สามคือโพรงอากาศเกิดระหว่างผิวฉนวนและแกนเหล็ก วงจรสมมูลของฉนวนและโพรงอากาศสามารถแทนได้ด้วยตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นแบบจำลองทั้งสามกรณีสามารถเขียนแทนด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุได้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการปล่อยประจุบางส่วนจากระบบฉนวน

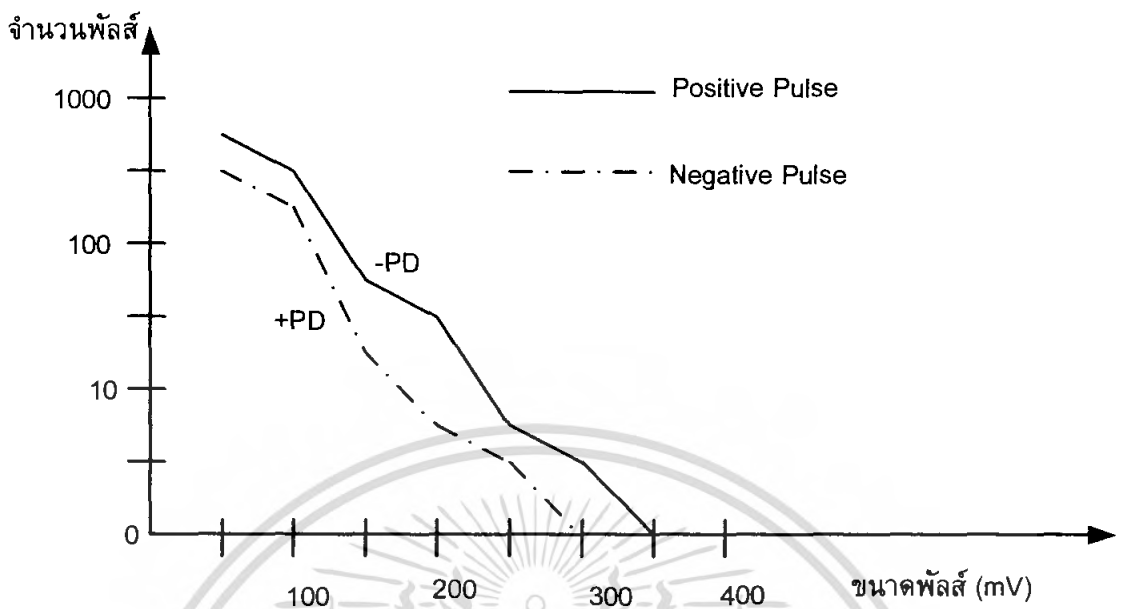
การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดที่สำคัญอีกประการก็คือ ตำแหน่งของโพรงอากาศ เนื่องจากโพรงอากาศที่เกิดขึ้นตำแหน่งต่างๆกัน วัสดุที่จะทำหน้าที่เป็น แคโทด (ขั้วลบ) และ แอโนด (ขั้วบวก) ก็จะแตกต่างกันด้วย กระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนขึ้น วัสดุต่างชนิดกันก็จะมีความสามารถในการจ่ายอิเล็กตรอนแตกต่างกันไป วัสดุที่ทำหน้าที่ในการจ่ายอิเล็กตรอนในเครื่องจักรชนิดหมุนนั้นมีอยู่สองชนิดคือ ฉนวนและแท่งโลหะตัวนำหรือแกนสเตเตอร์ รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิล์มขั้วบวก ฟิล์มขั้วลบ และฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดหรือแอโนด ฉนวนจะทำหน้าที่แบบไหนขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโพรงอากาศและแรงดันตกคร่อมขณะนั้นว่าอยู่ในช่วงไซเคิลบวกหรือลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



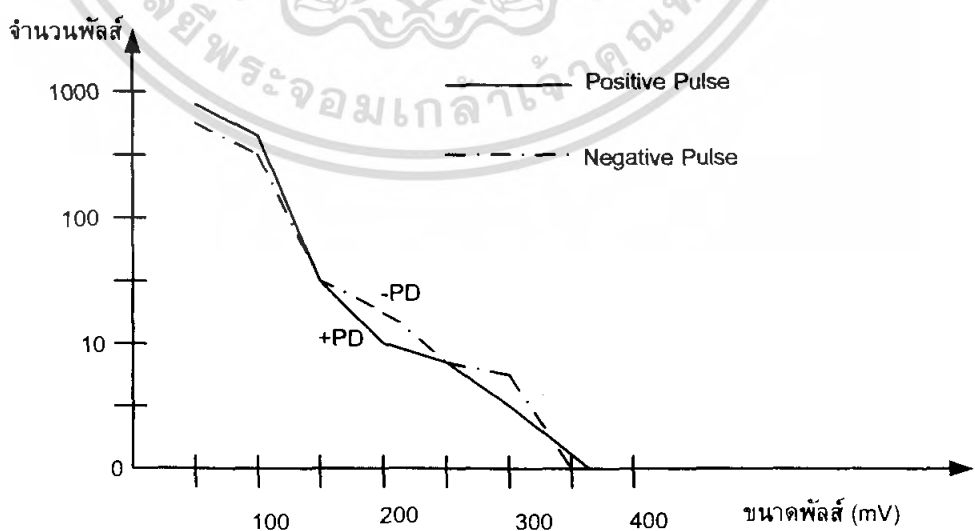
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลัสซ์บวก ฟลัสซ์ลบ และฉนวนที่ทำหน้าที่เป็น แคโทด

โพรงอากาศที่เกิดบริเวณตำแหน่งระหว่างแท่งโลหะตัวนำกับฉนวน เมื่อแรงดันตกคร่อม โพรงอากาศอยู่ในไซเคิลบวกแท่งโลหะตัวนำจะทำหน้าที่เป็นแอโนด(ขั้วบวก) และฉนวนจะทำหน้าที่เป็นแคโทด(ขั้วลบ) ดังนั้นในกรณีนี้ฉนวนจะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนและเกิดฟลัสซ์ลบ เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลลบแท่งโลหะตัวนำในตอนนี้จะทำหน้าที่เป็นแคโทด(ขั้วลบ) และฉนวนจะทำหน้าที่เป็นแอโนด(ขั้วบวก) แท่งโลหะตัวนำก็จะทำหน้าที่ในการจ่ายอิเล็กตรอนเกิดฟลัสซ์บวก แต่เนื่องจากความสามารถในการจ่ายอิเล็กตรอนน้อยกว่าฉนวน ดังนั้นฟลัสซ์ลบจึงเกิดขึ้นมากกว่าและมีลักษณะเด่นกว่าฟลัสซ์บวกดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ชั่วลบเด่นกว่า

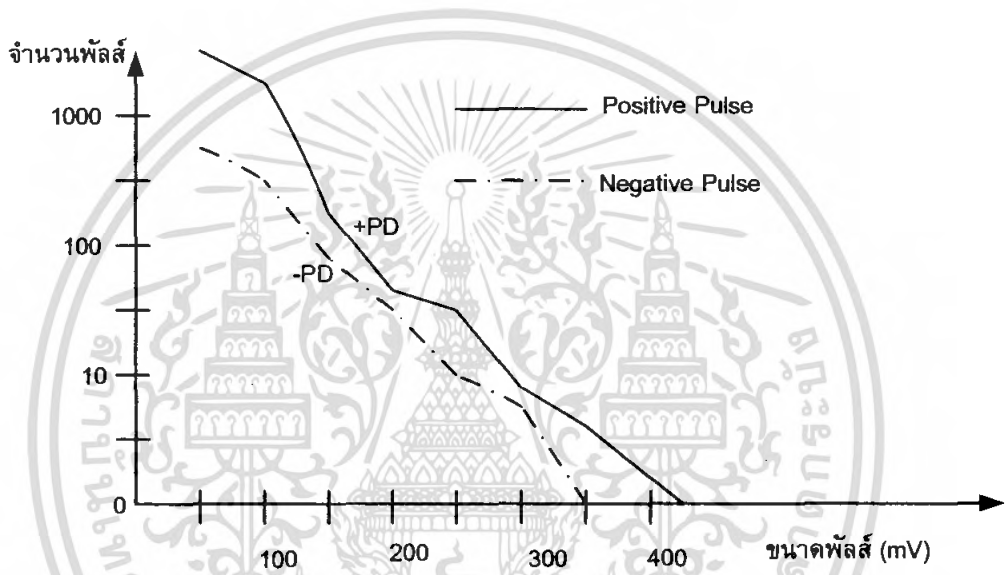
โพรงอากาศที่เกิดระหว่างฉนวน โพรงอากาศที่เกิดในตำแหน่งนี้เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบจะมีผลเหมือนกันคือ ฉนวนจะทำหน้าที่เป็นทั้งแคโทดและแอโนดเนื่องจากโพรงอากาศแทรกอยู่ตรงกลางเนื้อฉนวนนั่นเอง วัสดุที่ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนจึงมีเพียงแต่ฉนวนเท่านั้นดังนั้นพัลส์ชั่วบวกและพัลส์ชั่วลบจึงมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การกระจายพัลส์การเกิดพัลส์ชั่วบวกและพัลส์ชั่วลบใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรงอากาศที่เกิดบริเวณผิวฉนวนและแกนโลหะ เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลบวก ฉนวนจะทำหน้าที่เป็นแอโนดและแกนโลหะจะทำหน้าที่เป็นแคโทด ซึ่งจะทำให้หน้าที่ย้ายอิเล็กตรอนในระหว่างการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน แต่เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศอยู่ในช่วงไซเคิลลบ ฉนวนและแกนโลหะจะทำหน้าที่ตรงกันข้ามคือ ฉนวนจะทำหน้าที่เป็นแคโทดซึ่งจะจ่ายอิเล็กตรอนเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนและแกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นแคโทด ดังนั้นการปล่อยประจุในช่วงไซเคิลลบนี้จะเกิดมากกว่าการปล่อยประจุในช่วงไซเคิลบวกส่งผลให้พัลส์ขั้วบวกเด่นกว่าพัลส์ขั้วลบ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระจายพัลส์แสดงการเกิดพัลส์ขั้วบวกเด่นกว่า

การวิเคราะห์ตำแหน่งการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยใช้การเปรียบเทียบพัลส์ขั้วบวกและพัลส์ขั้วลบนี จะใช้ข้อมูลในการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนโดยใช้ข้อมูลสองส่วนคือ ค่าขนาดของพัลส์ซึ่งอาจวัดในหน่วยมิลลิโวลต์หรือพิโคคูลอมบ์และความถี่ของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ขนาดพัลส์นั้นๆ โดยการนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์และความถี่ เพื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างพัลส์ขั้วบวกและพัลส์ขั้วลบ

### 2.3 การวัดการปล่อยประจุบางส่วน

การวัดการปล่อยประจุบางส่วน ทำโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่มีการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ในรูปของพัลส์ของกระแสไฟฟ้า การสูญเสียไดอิเล็กตริก การเปล่งแสง เสียง ความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น หรือทางปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น[5] ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้วัดสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนจึงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการดังกล่าวข้างต้นที่จะนำมาตรวจสอบสัญญาณ และวิธีการตรวจสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนก็มีหลายวิธีซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ [2]

1. วิธีการที่ใช้การสังเกตพฤติกรรมของการปล่อยประจุบางส่วนเบื้องต้นโดยการฟังเสียงที่เกิดขึ้น การตรวจสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยวิธีการตรวจวัดเสียงที่เกิดขึ้น (Hissing Test) วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย แต่มีความแม่นยำน้อยและยากที่จะแยกแยะระหว่างเสียงที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนและเสียงสัญญาณที่เกิดจากการรบกวนภายนอก

2. การวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ ) คือการวัดอัตราส่วนของกระแสที่ผ่านค่าองค์ประกอบตัวต้านทานต่อกระแสที่ผ่านขององค์ประกอบตัวเก็บประจุในเนื้อฉนวน หรือที่เรียกว่าการวัดค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสีย (Dissipation Factor) เป็นวิธีการทดสอบหนึ่งที่ใช้สังเกตการณ์เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ โดยทั่วไป  $\tan \delta$  จะมีค่าน้อยและไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแต่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าถึงระดับหนึ่งจะพบการเปลี่ยนแปลงของค่า  $\tan \delta$  เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดการปล่อยประจุของฉนวนทดสอบ ทำให้กระแสไหลผ่านองค์ประกอบความต้านทานเพิ่มขึ้น

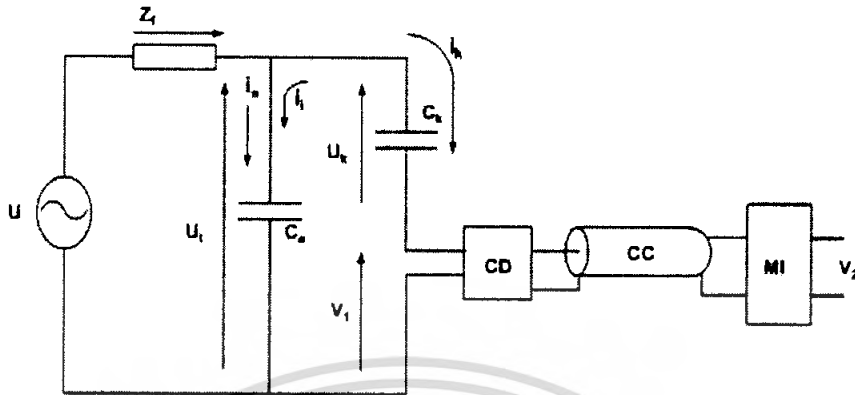
3. การตรวจสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยการตรวจวัดแสง วิธีการนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ตรวจวัดได้แต่จะมีข้อจำกัดคือ วัสดุที่ทดสอบต้องโปร่งแสงจึงจะสามารถสังเกตการณ์เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ ดังนั้นวิธีการนี้จึงใช้ในกรณีทั่วไปไม่ได้

4. การตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซและปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะมีข้อจำกัดคือจะต้องระยะเวลาที่นาน จึงไม่เหมาะสมในการนำมาตรวจสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

5. การตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมตามมาตรฐานของ IEC โดยการตรวจวัดสัญญาณอิมพัลส์ของกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน เป็นวิธีที่มีความไวสูง สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้อย่างรวดเร็ว และค่าที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการปล่อยประจุที่เกิดขึ้นภายในฉนวน

## 2.4 หลักการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนโดยวิธีทางไฟฟ้า

การตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60270[8] วงจรวัดจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  วัตถุทดสอบ (Test Object)  $C_a$  ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting Cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring Instrument) MI ดังรูปที่ 2.10 [2]



รูปที่ 2.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับสัญญาณการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

อุปกรณ์ในรูปที่ 2.10 แต่ละส่วนจะมีหน้าที่ทำงานในวงจรดังนี้

1. แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ  $U$  จะทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับวงจรทดสอบ ซึ่งมักจะใช้หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือเป็นหม้อแปลงปลอดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge Free)

2. ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_1$  จะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ เช่น ฮาร์โมนิกส์ และสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเนื่องจากตัวกรองสัญญาณ  $Z_1$  มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ จะยอมให้สัญญาณจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบความถี่ต่ำผ่านไปได้อย่างนั้น แต่สัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนซึ่งมีความถี่สูงไม่สามารถผ่านไปได้อีกทั้งในขณะเดียวกันก็จะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนจากด้านวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบผ่านทางตัวกรองสัญญาณนี้ ในกรณีที่ใช้หม้อแปลงปลอดการปล่อยประจุบางส่วนอาจไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองสัญญาณเนื่องจากตัวหม้อแปลงเองก็มีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำภายในตัวอยู่แล้ว

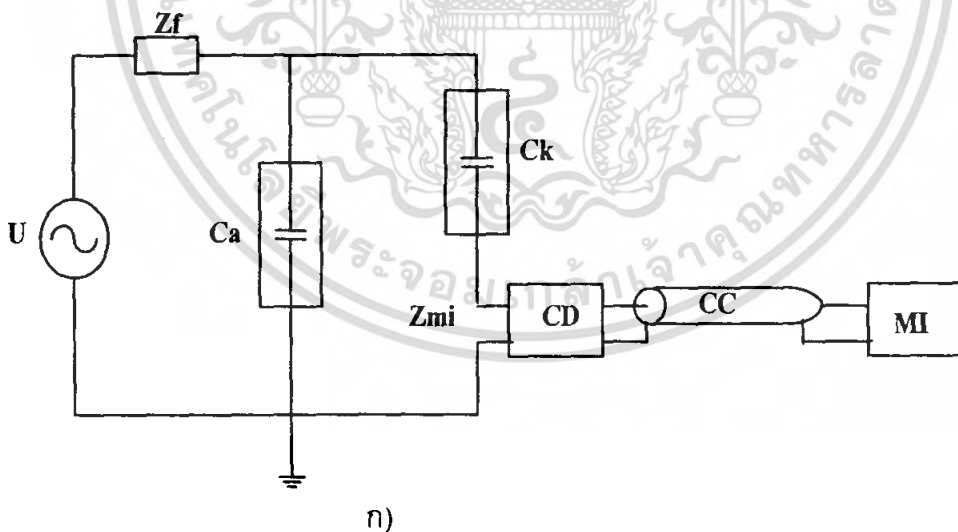
3. ตัวเก็บประจุ  $C_k$  ทำหน้าที่เป็นตัวต่อสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ CD เมื่อเกิดการปล่อยประจุเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ ตัวเก็บประจุคัปปลิงจะต้องมีคุณสมบัติปลอดการปล่อยประจุในช่วงแรงดันที่ทำการทดสอบ และมีความเหนี่ยวนำภายในต่ำ

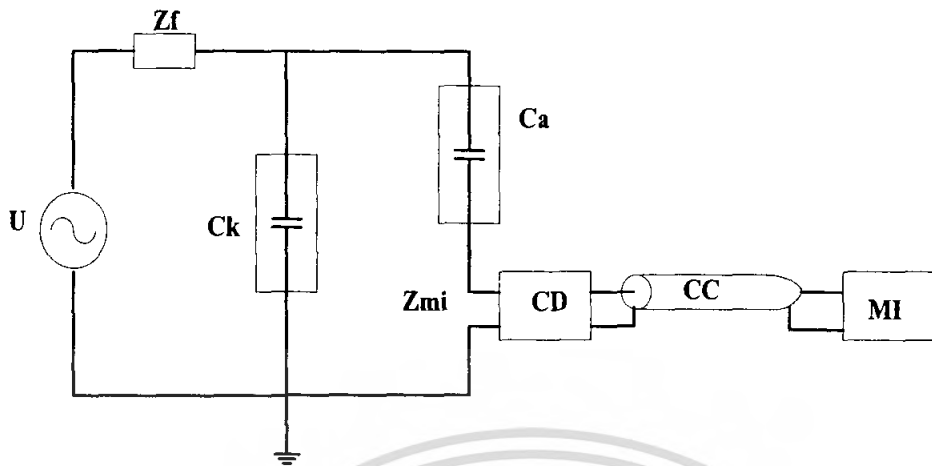
4. อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่ร่วมกันในการคำนวณค่าที่เกิดจากการปล่อยประจุในวัสดุทดสอบโดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_p$  ที่เกิดขึ้นในวงจร สายนำสัญญาณ CC จะทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณจาก CD ไป MI นอกจากนี้อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่พิเศษอีกอย่างหนึ่งคือจะกรองกระแสความถี่ต่ำ 50 – 400 เฮิรตซ์ และฮาโมนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเข้าไปเครื่องมือวัด ส่วน MI จะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ ทำหน้าที่เป็นที่

เป็นภาคขยายสัญญาณ เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ (Band Pass Filter) เพื่อกรองสัญญาณความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงจ่ายแรงดัน หน้าที่ประการสุดท้ายคือเป็นอุปกรณ์สำหรับแสดงผลการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

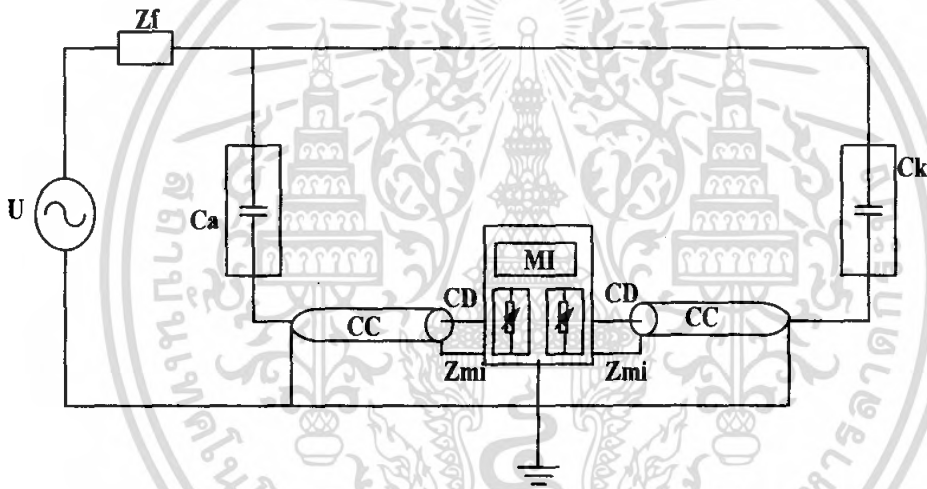
การตรวจจับสัญญาณที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนในวัสดุทดสอบนั้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรทดสอบผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในวัสดุที่ทดสอบ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ตกคล่อมวัสดุทดสอบ  $C_a$  ตกลงเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  จะทำหน้าที่ชดเชยแรงดันในการปล่อยประจุไปที่  $C_a$ ,  $C_k$  และ CD ส่วนทางด้านตัวกรอง  $Z_f$  และแหล่งจ่ายแรงดันจะถูกมองว่าเป็นวงจรเปิด เนื่องจากขณะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนอิมพีแดนซ์ของวงจรกรอง  $Z_f$  จะมีค่าสูงมาก ส่วน CD และ MI จะทำการวัดประจุที่ถ่ายเทจาก  $C_k$  ไป  $C_a$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ที่เกิดขึ้น

การแสดงผลหรือวัดผลการปล่อยประจุบางส่วนสามารถทำได้ทั้งมิเตอร์ จอภาพของออสซิลโลสโคป และทางเครื่องบันทึก[4] ค่าที่แสดงจะแสดงในเทอมของประจุที่ปรากฏ หรือขนาดของการปล่อยประจุ ซึ่งมีหน่วยเป็นพิโคคูลอมป์ (pC) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับการปล่อยประจุ  $V_2$  จะมีขนาดเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดประจุที่ปล่อยออกมา ดังนั้นค่ายอดของ  $V_2$  คือ  $V_{2(peak)}$  จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดประจุที่ปล่อยออกมาด้วย ดังนั้นการอ่านค่าประจุที่ปล่อยออกมาจึงนิยมอ่านค่ายอดของ  $V_2$  ซึ่งอ่านค่าได้จากจอภาพออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์อ่านค่ายอดก็ได้ ในรูปที่ 2.11 แสดงวงจรทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ

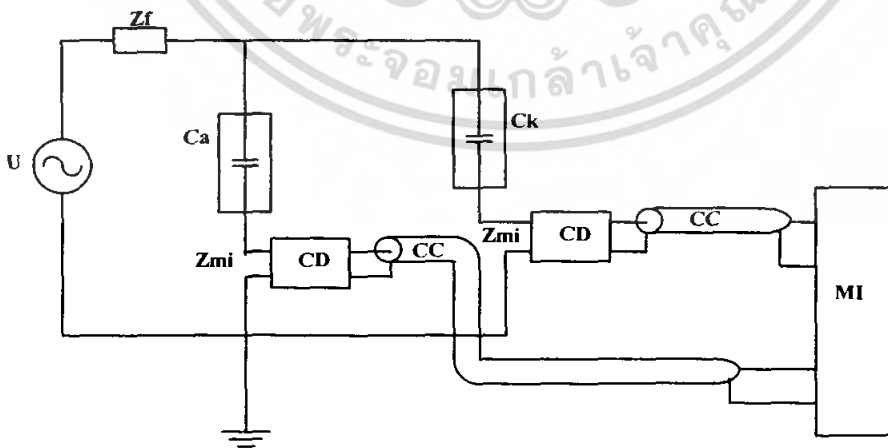




ข)



ค)



ง)

รูปที่ 2.11 วงจรการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นวิธีการที่ยอมรับโดยทั่วไป ว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประเมินสภาพฉนวนและพิสจันจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า แรงสูงเนื่องจากการทดสอบสามารถนำเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพของฉนวนได้วิธีหนึ่งเนื่องจากสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนส่วนหนึ่งเป็นผลโดยตรงที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนในบริเวณฉนวนที่มีจุดบกพร่องอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน สามารถทดสอบได้ทั้งขณะที่อุปกรณ์ใช้งานอยู่ ( On-line Partial Discharge) หรือทดสอบขณะอุปกรณ์ไม่ได้ทำงาน (Off-line Partial Discharge) ก็ได้ การทดสอบทั้งสองวิธีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปดังนั้นการจะเลือกทดสอบอุปกรณ์ด้วยวิธีไหนก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดสอบ และเวลาที่เอื้ออำนวยต่อการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดสอบทั้งสองวิธีต่างก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป [2] ดังนั้นถ้าสามารถทำการทดสอบได้ทั้งสองวิธีควบคู่กันไปก็จะเป็นประโยชน์ ต่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น

### 2.5.1 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์ (Online Partial Discharge)

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์นั้นคือ การทดสอบขณะนำอุปกรณ์เข้าไปใช้งานเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม การทดสอบขณะนำอุปกรณ์เข้าใช้งานเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาทดสอบและติดตามการเสื่อมสภาพของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน เพราะข้อดีของวิธีการนี้ก็คือสามารถเก็บข้อมูลการปล่อยประจุบางส่วนได้โดยไม่ต้องรอจังหวะให้อุปกรณ์หยุดเดินเครื่อง ดังนั้นอุปกรณ์สำหรับการตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนจะทำการติดตั้งไว้ตั้งแต่เริ่มติดตั้งเครื่องจักรกลหมุน ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทุกเวลาที่ต้องการ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือในการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนมากมายหลายแบบ ให้สามารถเลือกใช้ตามต้องการ สามารถที่จะเก็บข้อมูลการทดสอบได้อย่างต่อเนื่องหรือเก็บข้อมูลเป็นช่วงเวลาทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ดูแนวโน้มการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนตลอดอายุการใช้งานซึ่งประโยชน์ข้อนี้นับเป็นประโยชน์หลักของการทดสอบโดยวิธีนี้เลยทีเดียว เนื่องจากการวิเคราะห์และดูแนวโน้มการเสื่อมสภาพของฉนวนอย่างต่อเนื่องจะเป็นเครื่องเตือนปัญหาที่จะเกิดขึ้น และเมื่อทราบปัญหาแต่เนิ่นๆก็จะสามารถทำให้วางแผนในการซ่อมบำรุงได้อย่างถูกต้อง ลดความเสี่ยง และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์แม้ว่าการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์จะมีประโยชน์อย่างมาก ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแต่การทดสอบด้วยวิธีนี้ก็ยังมีปัญหาอยู่มากมาย เช่น ปัญหาสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า การลดทอนสัญญาณและแบนวิดธ์

### 2.5.1.1 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า

การทดสอบแบบออนไลน์เป็นการทดสอบที่มีประโยชน์มากวิธีหนึ่ง แต่ผลเสียของการทดสอบด้วยวิธีนี้ก็คือปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเนื่องจากการทดสอบแบบนี้จะทำการทดสอบขณะอุปกรณ์ใช้งานอยู่ ดังนั้นสัญญาณรบกวนจึงออกมาได้จากหลายแหล่งโดยเฉพาะเกิดจากตัวอุปกรณ์เองซึ่งเกิดจากการปล่อยประจุจากเฟสข้างเคียง ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับของอีกเฟสก็ตรวจจับได้โดยทั้งที่อาจจะยังไม่มี การปล่อยประจุบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ของเฟสนั้นเลย ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบแบบออนไลน์จึงมีความซับซ้อนมาก ต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์สูงในการวิเคราะห์

### 2.5.1.2 แบนวิดธ์

ความถี่ของพัลส์ปล่อยประจุบางส่วนขึ้นอยู่กับ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) และความกว้างของพัลส์ (pulse Width) แหล่งกำเนิดการปล่อยประจุบางส่วนแต่ละตำแหน่งจะกำเนิดพัลส์ที่มีลักษณะเฉพาะขึ้นกับตำแหน่งนั้นๆ ความถี่ของสัญญาณก็จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและขนาดของโพรงอากาศด้วย ดังนั้นเมื่อฉนวนมีการเสื่อมสภาพมากขึ้นขนาดของโพรงอากาศในฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้สัญญาณที่วัดได้มีความถี่เปลี่ยนแปลงออกไป ดังนั้นในการวัดสัญญาณของการปล่อยประจุที่เกิดขึ้นต้องคำนึงถึงแบนวิดธ์ ของตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) และตัวเครื่องมือวัดด้วย เนื่องจากสัญญาณพัลส์ที่นอกจากแบนวิดธ์จะถูกลดทอนและละลายไป การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์นั้นโดยส่วนมากมักจะถูกจำกัด โดยแบนวิดธ์ของระบบตรวจวัด ดังนั้นข้อมูลการทดสอบที่ได้ก็คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

### 2.5.1.3 การลดทอนและการสะท้อนของสัญญาณ

ในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน เมื่อเกิดพัลส์ของการปล่อยประจุบางส่วนที่มีความถี่สูงจะมีการลดทอนสัญญาณเนื่องจากขดลวดแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำ ที่สัญญาณที่เกิดมีความถี่สูงอิมพีแดนซ์ก็จะมีค่าสูงตาม ทำให้สัญญาณที่เคลื่อนสู่งจรวัดถูกลดทอนลงไปมาก และในกรณีสัญญาณที่เคลื่อนที่สู่อิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อที่ไม่สอดคล้องกันก็จะทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณและในขณะเดียวกันก็จะเกิดการสะท้อนบริเวณรอยต่อต่างๆด้วยทำให้สัญญาณที่วัดได้มีความผิดพลาดมากขึ้น

## 2.5.2 การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออฟไลน์ (Offline Partial Discharge)

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออฟไลน์ คือการทดสอบขณะที่อุปกรณ์ยังไม่ได้ใช้งานแตกต่างกับการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออนไลน์ คือต้องการแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกขณะที่ทำการทดสอบ และข้อมูลที่ได้อีกก็มีความแตกต่างจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบแรกด้วยเนื่องจากผลการทดสอบที่ได้จะให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ที่แตกต่างไปด้วยวิธีการทดสอบวิธีนี้มีทั้งข้อดีข้อเสียซึ่งสรุปได้ดังนี้

### 2.5.2.1 ข้อเสียของการทดสอบแบบออฟไลน์

#### 1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบแบบนี้ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งต่างจากการทดสอบแบบแรกทำให้การทดสอบการเก็บข้อมูลค่อนข้างยุ่งยากใช้เวลานาน และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากกว่า

#### 2. สภาวะแวดล้อมในการทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบทำในขณะที่อุปกรณ์หยุดเดินเครื่องดังนั้นสภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและความชื้นจึงแตกต่างจากสภาวะการใช้งานจริง สภาวะแวดล้อมเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการปล่อยประจุทั้งสิ้น และในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์หลวมผลเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้สเตเตอร์สั่นสะเทือน ระยะช่องว่างระหว่างแกนเหล็ก สเตเตอร์และผิวฉนวนของสเตเตอร์เปลี่ยนไปตามแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนในร่องสลิตชัดเจนแต่ในกรณีการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนแบบออฟไลน์จะไม่มีผลจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอาจจะไม่เห็นผลของการปล่อยประจุบางส่วนในร่องสลิตได้ชัดเจน

#### 3. การเสี่ยงต่อความเสียหาย

ในกรณีการทดสอบแบบออฟไลน์ทุกส่วนของขดลวดสเตเตอร์ จะได้รับแรงดันที่จ่ายจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอก แต่ในสภาวะความเป็นจริงขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนใกล้ นิวทรอน จะมีระดับแรงดันต่ำและจะไล่ระดับแรงดันสูงขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงระดับแรงดันพิกัด ดังนั้นการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับขดลวดที่มีอายุการใช้งานมานานจะเสี่ยงต่อความเสียหายได้เนื่องจากขดลวดบริเวณใกล้นิวทรอนจะต้องมารับแรงดันเท่ากับแรงดันพิกัด

### 2.5.2.2 ข้อดีของการทดสอบแบบออฟไลน์

#### 1. สัญญาณรบกวนน้อย

เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ จะถูกแยกออกจากอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ และสัญญาณรบกวนภายในเช่น การเกิดประกายไฟบริเวณแปรงถ่านก็จะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นสัญญาณรบกวนจะน้อยกว่าการทดสอบแบบออฟไลน์

#### 2. ไม่มีผลของสัญญาณรบกวนระหว่างเฟส

ในขณะที่ทำการทดสอบจะจ่ายแรงดันครั้งละเฟสเท่านั้นอีกสองเฟสที่เหลือจะถูกต่อลงกราวด์ไว้ดังนั้นจึงไม่มีผลจากสัญญาณรบกวนระหว่างเฟส ทำให้ง่ายต่อการนำข้อมูลมาวิเคราะห์

## 2.6 วิธีการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่ได้รับความนิยม

วิธีการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge Test) ทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเก็บข้อมูลโดยวิธีการทางไฟฟ้าเท่านั้นซึ่งก็มีหลายวิธีด้วยกัน การทดสอบและการวิเคราะห์การปล่อยประจุบางส่วนทางไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมมีดังนี้

1. Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) คือการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันที่ทำให้เริ่มปล่อยประจุบางส่วน ในการทดสอบเมื่อเพิ่มระดับแรงดันถึงค่าหนึ่งจะเกิดการปล่อยประจุขึ้นในขดลวดสเตเตอร์ฉนวนที่อยู่ในสภาพดีจะมีค่า PDIV สูงแต่เมื่อฉนวนเสื่อมสภาพลงค่า PDIV จะมีค่าต่ำลง

2. Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV) คือการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันที่ทำให้เริ่มปล่อยประจุบางส่วนหายไป วิธีการทดสอบนี้จะทำลักษณะเดียวกับการทดสอบแบบแรก แต่จะค่อย ๆ ลดระดับแรงดันจนกระทั่งสังเกตว่าการปล่อยประจุบางส่วนหายไปซึ่งค่า PDEV จะมีค่าต่ำลงเมื่อฉนวนเสื่อมสภาพลง

3. Maximum Discharge ( $Q_{max}$ ) การทดสอบหาค่าการปล่อยประจุสูงสุดวิธีนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากแต่ก็มีข้อเสียเช่นกัน เนื่องจากการทดสอบโดยวิธีนี้จะตรวจจับและแสดงผลพัลส์การปล่อยประจุบางส่วนที่สูงที่สุดเพียงพัลส์เดียวโดยไม่สนใจพัลส์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าสัญญาณรบกวนมีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณที่เกิดจากวัสดุทดสอบก็จะได้ค่าผิดพลาดได้ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อฉนวนเสื่อมสภาพลง

4. Normalized Quantity Number (NQN) คือการวัดค่าการปล่อยประจุบางส่วน โดยกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมตามสมการดังนี้

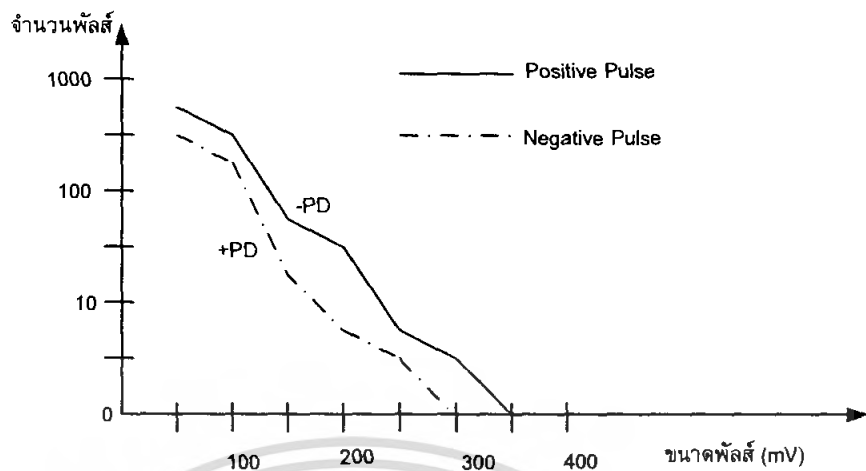
$$NQN = \frac{FS}{GN} \left[ \log_{10} p_1 + \sum_{i=1}^{N-1} \log_{10} p_i + \frac{\log_{10} p_N}{2} \right] \quad (1)$$

$p_i$  คือจำนวนพัลส์ต่อ 1 วินาทีในช่วงขนาดพัลส์ ลำดับที่  $i$

$N$  คือจำนวนช่วงขนาดพัลส์ทั้งหมด

$G$  คือค่าอัตราขยายที่ใช้ในการวัด

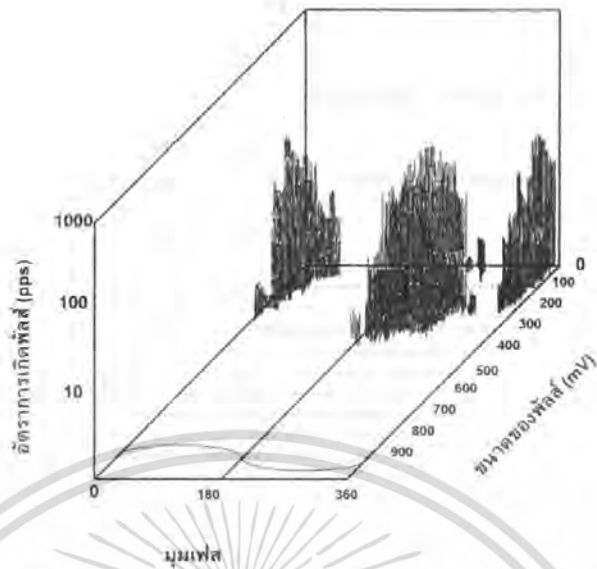
$FS$  คือค่าขนาดของพัลส์สูงสุดในหน่วยมิลลิโวลต์เมื่ออัตราขยายเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 2.12 การกระจายขนาดพัลส์

ค่า NQN เมื่อพิจารณาจากสมการข้างต้นก็จะพบว่าคือพื้นที่ใต้กราฟจากรูปนั้นเอง โดยกำหนดสเกลของจำนวนพัลส์เป็นสเกลแบบล็อก

จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการแปลความหมายของการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่นิยมใช้มานาน แต่ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์และไมโครโพรเซสเซอร์ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือสำหรับใช้เก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนของปรากฏการณ์การปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งสามารถเก็บค่าเฟสของพัลส์ที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบเดิม ๆ 4 แบบดังที่กล่าวมาข้างต้นจะมีการเก็บทั้งค่าขนาดของพัลส์ ( $q$ ) เฟส ( $\phi$ ) และจำนวนพัลส์ ( $n$ ) ที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาแสดงในรูปของ Phase Resolved Pattern ซึ่งจะแสดงแบบแผนต่าง ๆ ของความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดพัลส์ที่มุมเฟสและขนาดของพัลส์ต่าง ๆ กัน ( $q, \phi, n$ ) ดังรูป 2.13 ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าสนใจและมีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา



รูปที่ 2.13 การกระจาย Phase Resolved Pattern

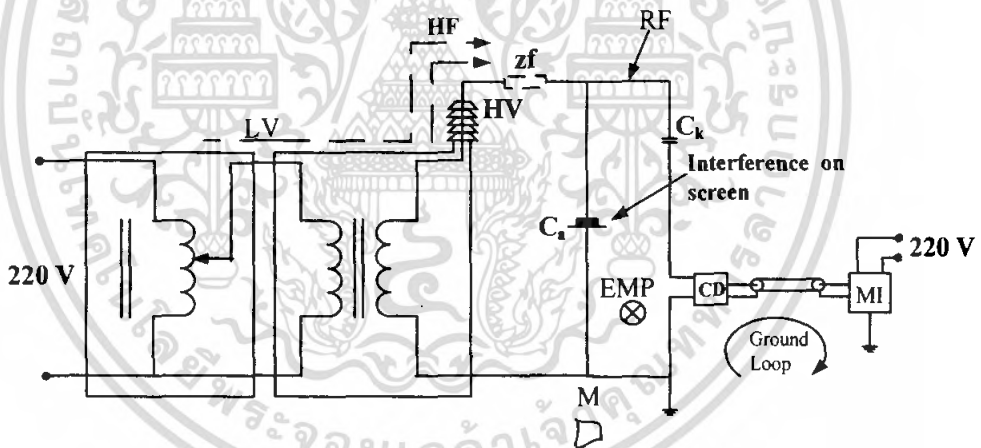
จากรูปแบบการเก็บข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบและมีความน่าสนใจดังนี้

1. การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์และขนาดของพัลส์  $n-q$  Characteristic คือการดูรูปแบบการกระจายข้อมูลของพัลส์ที่มีขนาดประจูด่างๆ โดย  $n$  และ  $q$  คือค่า จำนวนพัลส์และขนาดของพัลส์ที่เกิดขึ้น ตามลำดับ
2. การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยจำนวนพัลส์และมุมเฟส  $n-\phi$  Characteristic คือการดูรูปแบบการกระจายข้อมูลที่มีมุมเฟสต่าง ๆ โดย  $n$  คือค่าเฉลี่ยของจำนวนพัลส์ทั้งหมดในแต่ละช่วงเฟสต่อจำนวนไซเคิลทั้งหมดของแรงดันไฟฟ้า ภายในระยะเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล และ  $\phi$  คือมุมเฟสทางไฟฟ้าซึ่งแบ่งเป็นช่วงเท่า ๆ กัน
3. การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจูดเฉลี่ยและมุมเฟส  $q_{\text{mean}}-\phi$  Characteristic คือการดูลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจูดเฉลี่ย ( $q_{\text{mean}}$ ) ในแต่ละช่วงเฟสกับค่ามุมเฟสทางไฟฟ้า ( $\phi$ )
4. การวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจูดสูงสุดและค่ามุมเฟส  $q_{\text{max}}-\phi$  Characteristic คือการดูลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจูดสูงสุด ( $q_{\text{max}}$ ) ในช่วงเฟสต่าง ๆ กับค่ามุมเฟสทางไฟฟ้า ( $\phi$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า

การลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเป็นเรื่องที่จำเป็นมากในการทดสอบแบบออนไลน์ เนื่องจากการทดสอบโดยวิธีนี้จะมีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนอย่างมาก สัญญาณรบกวนนี้อาจมาจากแหล่งภายนอก เช่น การสวิตชิงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นรอบข้าง สัญญาณคลื่นวิทยุ เครื่องใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า สัญญาณรบกวนที่เกิดจากโลหะที่อยู่ใกล้วงจรทดสอบไม่ได้ต่อกราวด์ การเกิดกราวด์ลูปและเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม หรือแม้กระทั่งสัญญาณรบกวนในตัวอุปกรณ์เครื่องมือวัดเอง เป็นต้น ซึ่งสัญญาณรบกวนประเภทนี้จะสังเกตได้จากสัญญาณที่ตรวจจับได้ ขณะที่ยังไม่ได้จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบ ส่วนสัญญาณรบกวนอีกประเภทนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบแล้ว แต่ไม่ใช่สัญญาณซึ่งเกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนในอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ สัญญาณรบกวนประเภทนี้ เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดในหม้อแปลงไฟฟ้า สัญญาณรบกวนที่เกิดในบูชชิง หรือตัวนำไฟฟ้าแรงสูง สัญญาณรบกวนต่าง ๆ เหล่านี้จะมีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมาก ดังนั้นการทดสอบจึงต้องมีเทคนิคพิเศษเพื่อการลดสัญญาณรบกวนดังกล่าว



รูปที่ 2.14 สัญญาณรบกวนจากแหล่งต่าง ๆ

**HF** คือสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์โมนิกสูง ๆ จากเมนโดยตรงจากอุปกรณ์พวกไทรสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

**RF** คือคลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง

**EMP** คือสัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของสวิตช์หรือไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Interference on screen** คือสัญญาณรบกวนที่สกรีน หรือที่ชั่วแรงแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

**Ground loop** คือการเกิดครบวงรอบของสายดิน

**Ungrounded metal (M)** คือ การติสซาร์จของพวกโลหะที่ไม่ต่อลงดินวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ [3]

### 2.7.1 การตรวจสอบสัญญาณรบกวน

การตรวจสอบสัญญาณรบกวน สำหรับสัญญาณรบกวนที่ไม่ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรทดสอบ ทำได้โดยอ่านจากเครื่องมือวัดขณะที่ไม่ได้จ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบสัญญาณที่อ่านได้คือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ส่วนสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามารถตรวจสอบได้โดยการเปลี่ยนเอาอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ หรือ แทนที่อุปกรณ์ทดสอบด้วยตัวเก็บประจุที่ไม่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน ดังนั้นสัญญาณที่อ่านได้ก็จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

### 2.7.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณรบกวนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า การต่อวงจรแบบสมดุล (Balanced Circuit) ซึ่งจะใช้ในการหักล้างการปล่อยประจุบางส่วนที่มาจากแหล่งอื่น ทำให้สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบเพียงแหล่งเดียว แต่โดยทั่วไปการลดสัญญาณรบกวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบในห้องชิลด์ แต่วิธีการนี้เหมาะสมจะใช้กับการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นอุปกรณ์หรือวัสดุทดสอบขนาดเล็กเท่านั้น การลดสัญญาณรบกวนอีกวิธีที่ได้รับความนิยมและได้ผลดีอีกวิธีหนึ่งคือการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแบ่งแยกย่อยอีกหลายวิธีดังนี้ [2]

#### 1. วิธีหน้าต่างเวลา (Time Window Method)

เนื่องจากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดขึ้นในมุมเฟสทางไฟฟ้าบางช่วงเท่านั้นดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นว่า การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 0 ถึง 90 องศาของแรงดันในไซเคิลบวก และเกิดในช่วงมุมเฟส 180 ถึง 270 องศาของแรงดันในไซเคิลลบ ดังนั้นพัลส์ที่เกิดในช่วงมุมเฟสอื่นจึงเป็นพัลส์ของสัญญาณรบกวน การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธีนี้จึงเลือกที่จะกรองสัญญาณในช่วงมุมเฟสที่ไม่ได้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนทิ้งไป และปล่อยให้สัญญาณผ่านออกไปสู่วงจรวัดในช่วงมุมเฟสที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเท่านั้น

#### 2. วิธีแยกขั้ว (Polarity Discrimination Method)

การลดสัญญาณรบกวนที่อาจทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการใช้วิธีแยกขั้ว (Polarity) ของพัลส์ที่เกิดขึ้นในอิมพีแดนซ์วัด (Measured Impedance,  $Z_m$ ) วงจรทดสอบจะใช้วงจรตามรูป 2.11ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ CD สองตัวเพื่อทำการรับสัญญาณแล้วใช้การเปรียบเทียบชั่วของพัลส์ที่เกิดขึ้น ถ้าพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากภายนอกชั่วของพัลส์ที่เกิดขึ้นเหมือนกันและจะไม่นับพัลส์นั้น แต่ถ้าชั่วของพัลส์ต่างกันแสดงว่าเป็นพัลส์สัญญาณที่เกิดจากวัสดุทดสอบ

### 3. วิธีเฉลี่ยพัลส์ (Pulse Averaging)

การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธีนี้ทำโดยอาศัยหลักการคือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจัดเป็นสัญญาณแบบสุ่ม (Random Signal) และสัญญาณที่เกิดจากการปล่อยประจุจริงก็ประมาณได้ว่า จะเกิดในช่วงเวลาเต็มในแต่ละไซเคิลของแรงดัน ดังนั้นจึงใช้เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนโดยการนำค่าสัญญาณในแต่ละช่วงมุมของเฟสมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนให้น้อยลงไป

### 4. วิธีเลือกความถี่ (Frequency Selection)

แหล่งสัญญาณรบกวนที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งคือ สัญญาณคลื่นวิทยุ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเครื่องมือตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบแถบกว้าง เนื่องจากแบนด์วิดธ์ของเครื่องมือวัดจะครอบคลุมแบนด์วิดธ์ของสัญญาณคลื่นวิทยุด้วย แต่สำหรับเครื่องมือตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบแถบแคบ จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ โดยการเลือกใช้ช่วงความถี่ที่ไม่ไปซ้อนทับกับความถี่ของสัญญาณคลื่นวิทยุ แต่การเลือกใช้เครื่องมือวัดแบบแถบแคบก็จะให้ผลการทดสอบผิดเพี้ยนจากสัญญาณจริงไปบ้าง

## 2.8 ระบบฉนวนของขดลวดเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน

ฉนวนที่นำมาใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนมีอยู่หลายประเภท แต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปซึ่งจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของงาน เมื่อใช้งานอุปกรณ์นั้นเป็นเวลานานจะทำให้ระบบฉนวนเสื่อมสภาพลง ซึ่งสภาพของฉนวนก็จะไปจำกัดอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ ระบบเครื่องจักรกลหมุน ในระยะเริ่มแรกจะเป็นระบบฉนวนแบบเทอร์โมพลาสติก ซึ่งจะใช้แอสฟัลต์(Asphalt) และเซลแล็ค (Shellac) เป็นตัวประสานไมก้า (Mica) ทำให้ระบบฉนวนประเภทนี้ถูกจำกัดการใช้ที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบันระบบฉนวนเปลี่ยนเป็นแบบเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ซึ่งจะใช้โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) เป็นตัวประสานไมก้าทำให้ฉนวนมีความแข็งแรงคงทนและทนอุณหภูมิแวดล้อมได้สูงกว่าถึง 155 องศาเซลเซียส [2]

### 2.8.1 ระดับชั้นของฉนวน

การแบ่งระดับชั้นฉนวน จะใช้อุณหภูมิแวดล้อมที่ฉนวนสามารถทนได้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งฉนวนแต่ละชนิดจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิแวดล้อมเท่าไรนั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนนั่นเอง การแบ่งระดับชั้นฉนวนแบ่งได้ดังต่อไปนี้

#### 1) ฉนวนระดับชั้น A

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 105 องศาเซลเซียสวัสดุที่ใช้ทำฉนวนประเภทนี้ได้แก่ ฝ้าย ไหม กระดาษเซลลูโลส (Cellulose based Paper) และ ลินิน

#### 2) ฉนวนระดับชั้น B

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียสวัสดุที่ใช้ทำฉนวนประเภทนี้ได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาส โยหิน(Asbestos) โดยจะใช้เซลแล็ค แอสฟัลต์ และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน

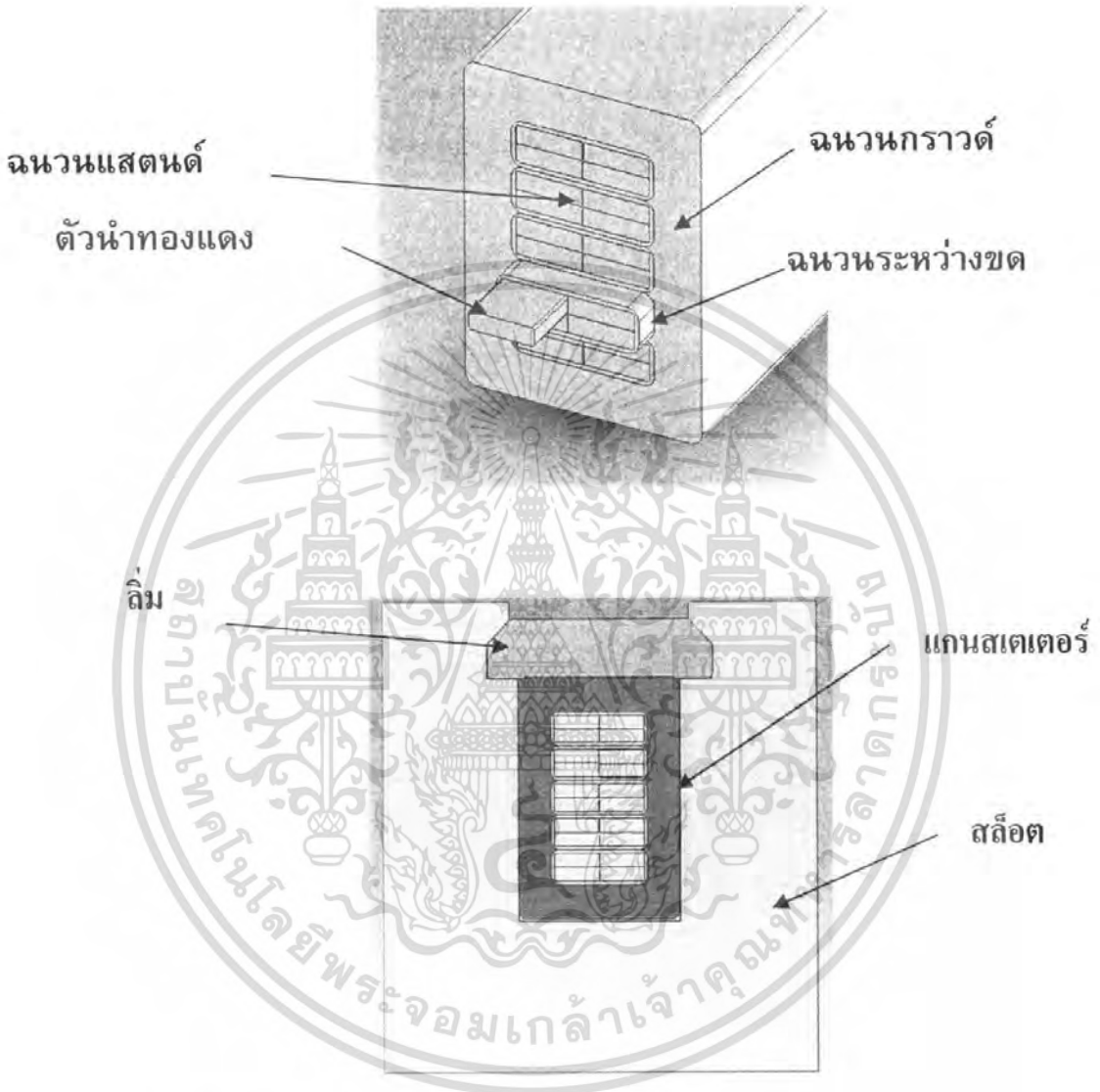
#### 3) ฉนวนระดับชั้น F

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ทำฉนวนประเภทนี้ได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาส โยหิน(Asbestos) เหมือนกับฉนวนระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึด

#### 4) ฉนวนระดับชั้น H

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาทำฉนวนได้แก่ อีลาสโตเมอร์ซิลิโคน(Silicone Elastomer) ไมก้า ไฟเบอร์กลาส และโยหิน วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานคือ เรซินซิลิโคน (Silicone Resins)

## 2.8.2 โครงสร้างระบบฉนวน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน

ในเครื่องจักรกลหมุนฉนวนนับเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมาก อายุการใช้งานจะนานหรือไม่นานย่อมขึ้นอยู่กับสภาพฉนวน ระบบฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนจากรูปที่ 2.15 ขดลวดสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดโลหะทองแดงหลายๆขด ซึ่งระหว่างขดทองแดงแต่ละขดจะหุ้มด้วยฉนวนที่เรียกว่า ฉนวนมาตรฐาน (Strand Insulation) ในขดลวดสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดทองแดงหลายๆขดมารวมกันแล้วหุ้มด้วยฉนวนที่เรียกว่าฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation) ประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนแต่ละชั้นมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ฉนวนแอสแตรด์ คือชั้นของฉนวนที่หุ้มขดลวดโลหะทองแดง แต่เดิมนั้นฉนวนชั้นนี้จะทำจากวัสดุแร่ใยหิน แต่เนื่องจากต้องการเพิ่มเนื้อที่สำหรับขดลวดโลหะทองแดงเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุประเภท แก้วโพลีเอสเตอร์ (Polyester Glass) แทน และนำไปอบก่อนที่จะพันด้วยฉนวนกราวด์

2) ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulator) จะเป็นชั้นฉนวนหลักซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างแท่งโลหะตัวนำกับแกนเหล็กสเตเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน วัสดุที่ใช้ทำเป็นฉนวนกราวด์มีหลายประเภทดังนี้

ผ้าลินินขาวชุบน้ำมัน (Varnished Cambric) ฉนวนชนิดนี้จัดเป็นฉนวน ระดับชั้น A มีข้อจำกัดคือ จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 2300 โวลต์ เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของไมก้าและการถ่ายเทความร้อนไม่ดี

ไมก้าประสานด้วยเซลแล็ค (Shellac Micafolium) ฉนวนชนิดนี้เป็นฉนวนระดับชั้น B และเป็นชนิดเทอร์โมพลาสติก ฉนวนชนิดนี้จะใช้เซลแล็คเป็นตัวยึดประสานไมก้าโดยใช้ความร้อน แต่เนื่องจากเซลแล็คเป็นสารที่ระเหยได้ง่ายดังนั้นในระหว่างกรรมวิธีประสานแผ่นไมก้าโดยอาศัยความร้อนนั้น จะทำให้เกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวนได้มาก กลายเป็นจุดอ่อนทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ง่าย

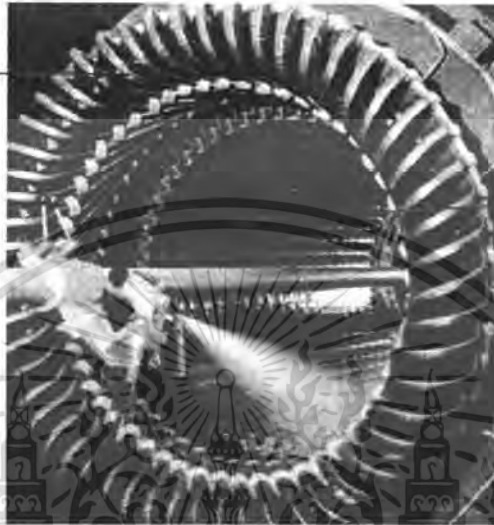
เทปไมก้าประสานด้วยแอสฟัลต์ (Asphalt-Bonded Mica Tape) ฉนวนชนิดนี้เป็นฉนวนแบบเทอร์โมพลาสติกระดับชั้น B เหมือนกับเซลแล็คไมก้าไฟเลียม แต่เปลี่ยนตัวยึดประสานแผ่นไมก้าจากเดิมที่ใช้เซลแล็คมาเป็นแอสฟัลต์ แทน กรรมวิธีในการผลิตนั้นจะใช้ถึงที่เป็นสูญญากาศซึ่งบรรจุขดลวดเตเตอร์ที่พันด้วยเทปไมก้า แล้วปล่อยแอสฟัลต์ร้อนให้แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างอากาศเพื่อลดโพรงอากาศให้เหลือน้อยที่สุด และจะใช้แรงดันอัดเข้าไปด้วยเพื่อให้แอสฟัลต์สามารถแทรกซึมเข้าไประหว่างเทปไมก้าได้มากขึ้น ฉนวนประเภทนี้มีคุณภาพดีแต่จะเสื่อมสภาพได้ง่าย หากนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูง และมีการสั่นสะเทือน ฉนวนประเภทนี้ทนความร้อนได้ไม่ดีนักจึงถูกจำกัดอยู่ในฉนวน ระดับชั้น B

### 2.8.3 โครงสร้างของขดลวดเตเตอร์

โครงสร้างของขดลวดเตเตอร์จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของขดลวดเตเตอร์ที่อยู่ในสลอต (Slot Portion) และที่สองเป็นส่วนของขดลวดเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (End winding Portion) ซึ่งเป็นส่วนที่พันออกมาจากสลอตตั้งรูป ฉนวนทั้งสองบริเวณจะใช้วัสดุค่อนข้างแตกต่างกัน ฉนวนที่อยู่ในร่องสลอตจะมีโพรงอากาศน้อยและมีความแข็งแรงมากกว่าฉนวนที่อยู่พันร่อง เนื่องจากฉนวนในบริเวณสลอตซึ่งเป็นส่วนตรงในกรรมวิธีการผลิตจะใช้เครื่องบีบอัดความร้อนบีบอัดด้วยแรงดัน และอบด้วยความร้อน ทำให้เรซินแทรกซึมในช่องว่างอากาศได้มากกว่าฉนวน

บริเวณส่วนพันร่องซึ่งมีลักษณะโค้ง ทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องบีบอัดความร้อนบีบอัดได้ ฉนวนบริเวณนี้จึงเป็นส่วนที่บอบบางและมีจุดบกพร่องมากกว่า

End winding



ส่วนร่อง  
Slot

### รูปที่ 2.16 โครงสร้างของขดลวดเตเตอร์

ระบบฉนวนขดลวดเตเตอร์ในร่องสลิต (Slot Portion) ฉนวนของขดลวดเตเตอร์ที่อยู่ในร่องสลิตจะประกอบไปด้วยชั้นฉนวนกราว์น และชั้นวัสดุกึ่งตัวนำด้านการเกิดโคโรนา ชั้นฉนวนกราว์นจะทนความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงแต่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าฉนวนที่ใช้พันบริเวณส่วนพันร่อง

ระบบฉนวนของขดลวดเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (End winding Portion) ฉนวนของขดลวดบริเวณส่วนพันร่องควรใช้ฉนวนที่มีความยืดหยุ่นเป็นพิเศษเนื่องจากบริเวณส่วนนี้เป็นบริเวณส่วนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า และการที่ฉนวนมีความยืดหยุ่นจะทำให้สะดวกในการติดตั้งขดลวดด้วย นอกจากนี้ฉนวนบริเวณนี้จะพันด้วยชั้นเทปเพื่อลดความเครียดเพื่อป้องกันการปล่อยประจุตามผิวฉนวน

### 2.9 ตำแหน่งจุดบกพร่องของฉนวนที่พบในเครื่องจักรกลหมุน

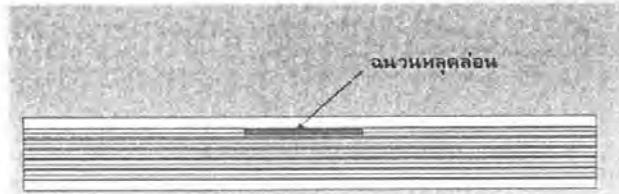
ตำแหน่งจุดบกพร่องที่อาจเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่พบในเครื่องจักรกลหมุน มีอยู่ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง [2] แต่ละตำแหน่งจุดบกพร่องที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะมีผลต่ออาการเสื่อมสภาพและความรุนแรงต่างกันไป ดังนั้นการรู้ตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่คาดว่าจะจะเป็นจุดบกพร่องจะทำให้การประเมินสภาพฉนวนน่าเชื่อถือมากขึ้น และยังทำให้สามารถวางแผนการเอาอุปกรณ์ไปใช้งานและบำรุงรักษาอย่างมีประสิทธิภาพ ตำแหน่งจุดบกพร่องที่อาจเกิดการปล่อยประจุบางส่วนมี 3 ตำแหน่งคือ ในเนื้อฉนวนของขดลวด สเตเตอร์บริเวณสลิต (Slot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และบริเวณส่วนพื้นร่อง จุดบกพร่องที่พบและทำให้เกิดความเสียหายมากที่สุดจะพบในบริเวณสลีต ร่องลงมาก็คือบริเวณส่วนพื้นร่อง

## 2.9.1 เกิดในเขตลวดเตเตอร์

### 2.9.1.1 ฉนวนหลุดหล่อน



รูปที่ 2.17 ฉนวนหลุดหล่อน

สาเหตุเกิดจากความร้อนทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประสานฉนวนลดลง และเมื่อได้รับความร้อนสูงอัตราการขยายตัวที่แตกต่างกันของฉนวนและขดลวดตัวนำทำให้ฉนวนหลุดหล่อนออกจากผิวตัวนำ

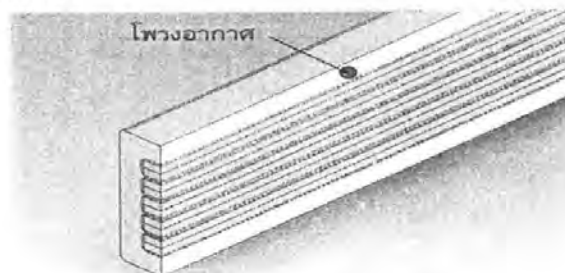
### 2.9.1.2 รอยแยกในฉนวน



รูปที่ 2.18 รอยแยกในฉนวน

สาเหตุเกิดจากความทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การสลายตัวของโมเลกุล ทำให้ความแข็งแรงระหว่างชั้นไม้ก้ำและอีพ็อกซีลดลงจนเกิดรอยแยก

### 2.9.1.3 โพรงอากาศในฉนวน

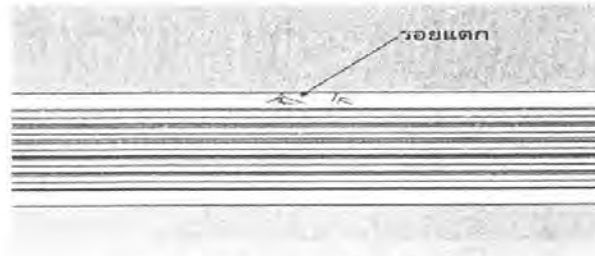


รูปที่ 2.19 โพรงอากาศในฉนวน

โพรงอากาศเป็นความบกพร่องในฉนวนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

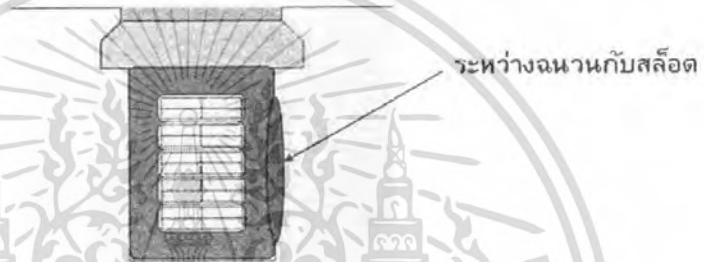
### 2.9.1.4 รอยแตกในเนื้อฉนวน



รูปที่ 2.20 รอยแตกในเนื้อฉนวน

ความร้อนทำให้อีพ็อกซีเปราะ และเมื่อได้รับความเครียดทางทงกลทำให้รอยแตกในฉนวน

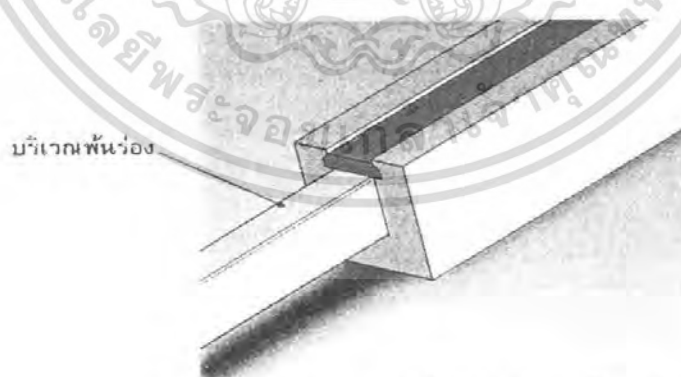
### 2.9.2 จุดบกพร่องระหว่างผิวฉนวนและสลีต



รูปที่ 2.21 จุดบกพร่องระหว่างผิวฉนวนและสลีต

ชั้นวัสดุกึ่งตัวนำหลุดล่อนหรือชำรุดเนื่องจากการขัดสีระหว่างผิวฉนวนกับสลีต

### 2.9.3 จุดบกพร่องที่บริเวณส่วนพื้นร่อง



รูปที่ 2.22 จุดบกพร่องที่บริเวณส่วนพื้นร่อง

เกิดจากความสกปรกที่ผิวฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่อง ผิวฉนวนที่สกปรกและชื้นจะนำกระแสไฟฟ้าได้ ทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อม แต่แรงดันที่เหลือจะไปตกคร่อมบริเวณที่แห้งทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นสูงจนเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การศึกษาการทดสอบ On-Line Partial Discharge

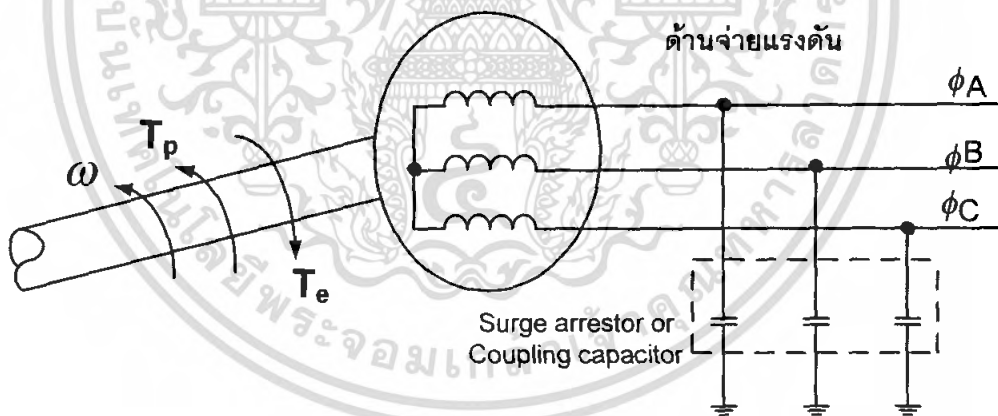
##### ณ บริษัทผลิตไฟฟ้า GLOW

จากการไปศึกษาระบบการตรวจจับและการติดตั้งการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) ที่บริษัท ผลิตไฟฟ้า GLOW ได้ทำการสรุปดังนี้

การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) ใน rotating machine จะมีสาเหตุมาจากความเครียดทางสนามไฟฟ้า ความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมี และการเสียดสีเนื่องจากแรงทางกล โดยส่วนใหญ่การเกิดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) จะเกิดที่ร่องสล๊อตและส่วนของพื้นร่องสล๊อต ดังนี้

#### 3.1 Generator ที่ทำการศึกษา

Generator ที่ทำการศึกษามีพิกัดแรงดัน 15kV การตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะทำการติดตั้ง Surge Arrester หรือ Coupling Capacitor ขึ้นกับวิธีการตรวจจับ ซึ่งจะติดตั้งทางด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะต่อเข้ากับบัสบาร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.1 ตำแหน่งของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนก็จะมาจากบริเวณร่องสล๊อต (Slot) และ บริเวณส่วนพื้นร่อง (End Winding)



รูปที่ 3.1 วงจรแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วน

### 3.2. ตำแหน่งการเกิด Partial Discharge ใน Rotating Machines

#### 3.2.1 บริเวณ slot

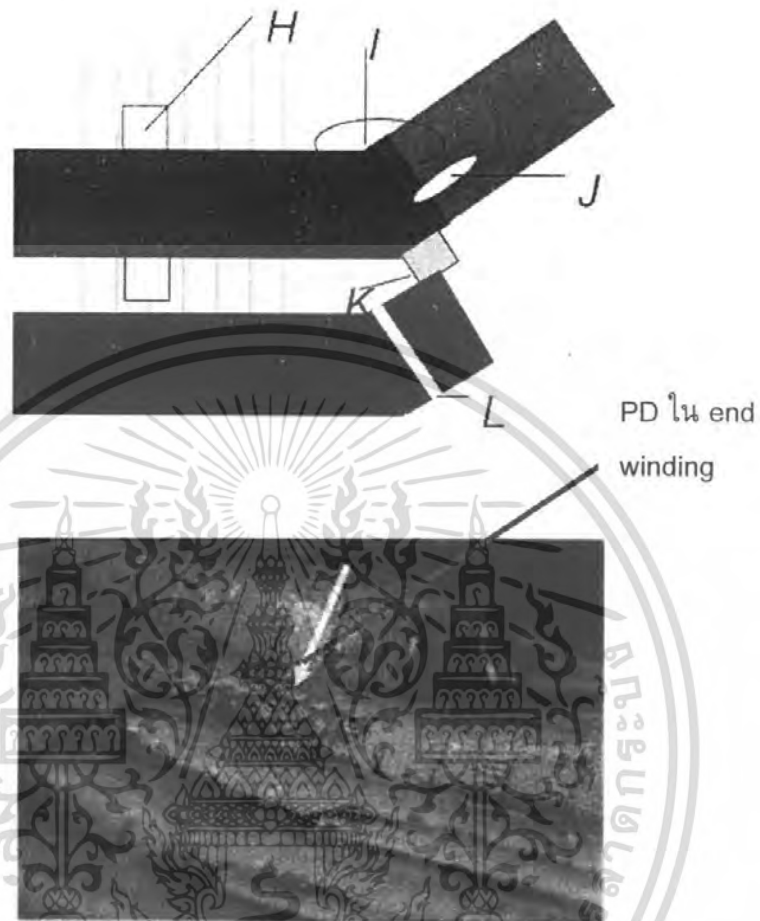


#### จากรูปที่ 3.2

- A: Very high local electric field
- B: Delamination: conductor-insulation (Electromechanical/thermal stress)
- C: Delamination of insulation layers (Thermal stress)
- D: Treeing – a long term deterioration process
- E: Broken conductors
- G: Bubbles, air inclusions
- F: Slot discharges erosion of semi conducting varnishes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.บริเวณ end winding



รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งการเกิด Partial Discharge ใน Rotating Machines (end winding)

#### จากรูปที่ 3.3

H: Discharge in cooling duct mainly created by vibration and abrasion of corona protection layers

I: Domination of insulation in Elbow (Especially when manually manufactured)

J: End winding surface discharge (contamination etc.)

K: Insufficient Spacing, Tracking, especially between bar with big voltage difference, difference phases

L: Connection area between slot corona protection and end winding corona protection [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วงจรการตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน แบบ on-line Partial Discharge ใน rotating machine

จากการไปศึกษาดูงานการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนจะใช้วิธีการตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) แบบ On-Line Partial Discharge ซึ่งจะทำให้การตรวจจับในขณะที่เครื่องจักรกลหมุนในขณะที่กำลังทำงานอยู่ ซึ่งจะมีวงจรการติดตั้งการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนดังต่อไปนี้ [4]

#### On-Line Partial Discharge

การการติดตั้งตรวจจับที่ได้ไปศึกษาดูงานจะใช้การตรวจจับอยู่ 2 วิธีคือ

#### 3.3.1.การใช้ Coupling Capacitor ในการตรวจจับ PD

Coupling Capacitor จะมีคุณสมบัติเป็น high impedance เมื่อความถี่ต่ำและ low impedance เมื่อความถี่สูง สัญญาณที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) จะเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง ทำให้เกิดสัญญาณความถี่สูงของการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) สามารถผ่านตัว Coupling Capacitor เข้าไปยังเครื่องขยายสัญญาณแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ การใช้ Coupling Capacitor จะมีวิธีการใช้อยู่ 2 วิธีคือ [4]

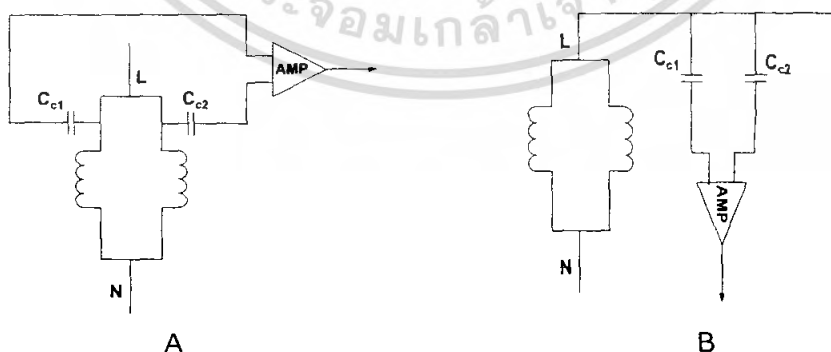
##### 3.3.1.1.วิธี Differential

สัญญาณ Common mode noise จะถูกกำจัดออกโดยแยกออกของการเชื่อมต่อของสัญญาณ ในขณะที่เกิด PD จะมีแรงดันที่ไม่สมดุลเข้าไปที่ตัวขยายสัญญาณซึ่งจะแสดงในรูปที่

#### 3.4 วงจร A

##### 3.3.1.2.วิธี Directional

วิธีนี้จะใช้ความแตกต่างเวลาของสัญญาณที่เข้ามา (Time delay) โดยสัญญาณรบกวนจะถูกกำจัดโดยความแตกต่างกันของช่วงเวลาการเดินทางมาถึงตัว couplers (amplifier)



รูปที่ 3.4 วงจร Coupling Capacitor ในการตรวจจับ PD

A คือ Differential Method

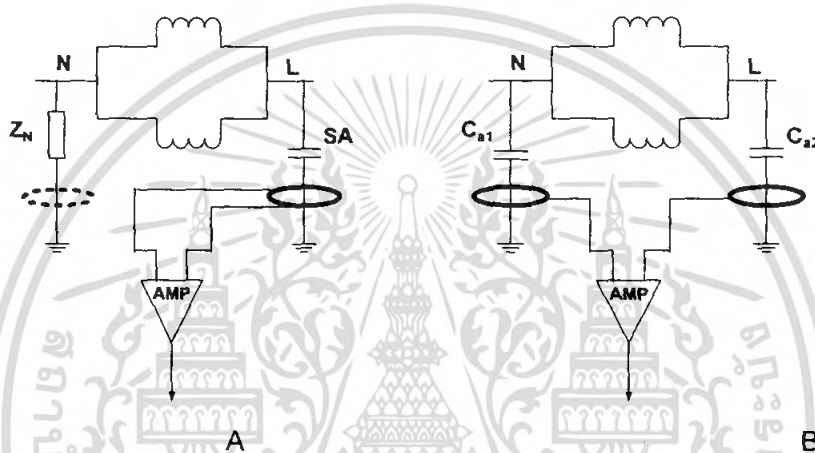
B คือ Directional Method

### 3.3.2. การใช้ Current Transformer ในการตรวจจับ PD

วิธีนี้จะใช้หลักการของการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ RFCT คล้อง สัญญาณความถี่สูงที่ผ่านตัว capacitor โดยตัว capacitor จะเป็นตัวรับสัญญาณความถี่สูงเข้ามา โดยตัวรับขยายสัญญาณจะรับสัญญาณที่มีแรงดันต่ำ จะมีการคล้องของ RFCT 2 แบบคือ

A. คล้องผ่าน surge arrester or neutral impedance ตามวงจร A ในรูปที่ 3.5

B. คล้องผ่าน coupling capacitors โดยคล้องที่สาย line และ neutral ตามวงจร B ในรูป 3.5



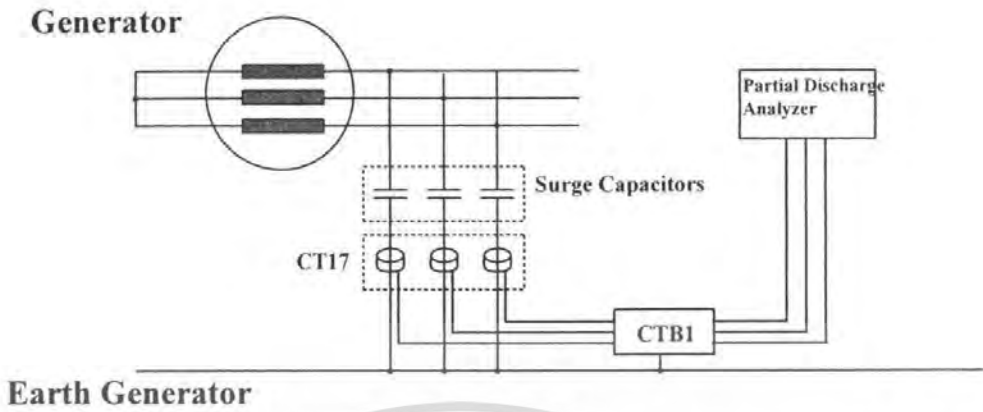
รูปที่ 3.5 วงจร Current Transformer ในการตรวจจับ PD

A คือ วงจรการคล้อง RFCT ผ่านทาง surge arrester

B คือ วงจรการคล้อง RFCT ผ่านทาง coupling capacitors ที่ต่อจาก line และ neutral terminal

### 3.4 การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ on-line ในเครื่องจักรกลหมุนของบริษัท PD-TECH

การตรวจจับ on-line partial discharge ของบริษัท PD THCH จะใช้ inductive couples (RFCT) และใช้การต่อวงจรแบบใช้ surge capacitor เป็นตัวรับสัญญาณความถี่สูงให้ผ่านเข้าไปใน RFCT เพื่อลดทอนสัญญาณให้เข้าไปยังเครื่องมือวิเคราะห์การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ โดยใช้วงจรการติดตั้งดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะคล้ายกับวงจรรูปที่ 3.5 A.



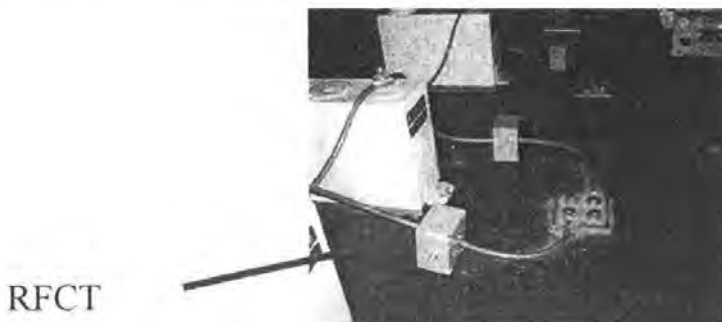
รูปที่ 3.6 วงจรการติดตั้งการวัด On-line partial discharge ของบริษัท PD TECH จากรูป

- Generator ขนาด 150 MW ทำงานที่แรงดัน 15 KV
- Surge capacitor ที่ขนาด  $0.25\mu\text{F}$ - $0.3\mu\text{F}$  ซึ่งสามารถให้สัญญาณความถี่สูงผ่านตัวมันตั้งแต่  $1\text{kHz}$ - $20\text{MHz}$  เพราะค่า impedance ของตัวเก็บประจุจะมีค่าต่ำที่ความถี่สูงๆนั้นเองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Surge capacitor

- RFCT (CT-17) เป็นตัว Sensor ที่อาศัยการเหนี่ยวนำของสัญญาณความถี่สูงเข้ามา [5] ซึ่งข้อดีของ RFCT ก็คือเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณไม่ต้องต่อเข้ากับทางด้านแรงดันสูงโดยตรงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 RFCT (CT-17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางข้อมูลทางเทคนิคของ RFCT (CT-17) [5]

General:		Voltage Tests:	
Saturation:	>25A ที่ 50/60 Hz	Connection:	Coaxial BNC
Diameter:	17mm	Tolerance:	+/- 10%
Dimension (LxBxW)	64x58x34	Max Voltage:	Depends on application
Protection:	IP65	Operation Temp:	-20 to +85 °C

### ตารางที่ 3.1 ตารางข้อมูลทางเทคนิคของ RFCT (CT-17)

-Terminal Boxเป็นจุดต่อสายเคเบิลที่ออกมาจาก RFCT แล้วเชื่อมออกไปยังตัว partial discharge Monitoring อุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ใน Terminal Box คือ Air gap ทำหน้าที่ตัดสัญญาณไม่ให้เข้าไปยังตัว partial discharge Monitoring เมื่อสัญญาณเกินค่าแรงดัน 9 V เพื่อความปลอดภัยของตัวเครื่องมือวัด แสดงดังรูปที่ 3.9



Terminal box  
(CTB1)

รูปที่ 3.9 Terminal Box

-Partial discharge Monitoring system (MicaMaxx@pdpuls) เป็นตัวรับสัญญาณที่ต่อมาจาก Terminal box แล้วสามารถแสดงผลของสัญญาณการเกิด partial discharge ได้และสามารถเลือกช่วงความถี่แบนวิดธ์ของสัญญาณ  $f_1$ - $f_2$  (Time Window) และแสดงผลแบบ 3 แกน (n,  $\phi$ , q) ดังรูปที่ 3.10

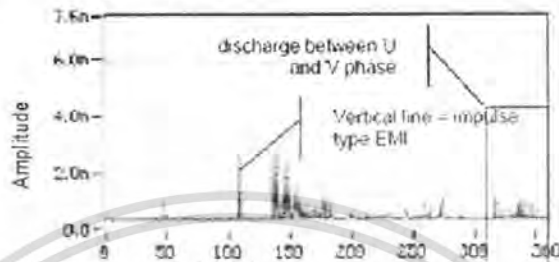


Partial  
discharge  
Monitoring

รูปที่ 3.10 Partial discharge monitoring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงผลสัญญาณการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะแสดงในรูปของระบบ 3 แกน คือจะมี ขนาดของพัลส์ อัตราการเกิดพัลส์ และมุมเฟส ที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งในรูปแสดงแกนตั้งคือ ขนาดของพัลส์ แกนนอนคือมุมเฟส และแสดงอัตราการเกิดพัลส์โดยแสดงเป็นความเข้มสีที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.111

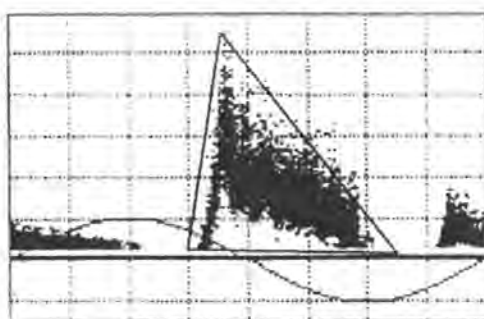


รูปที่ 3.11 การแสดงเกิด PD ในระบบ 3 แกน

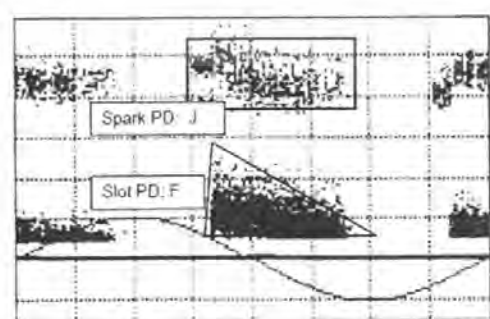
การเก็บผลการเกิด Partial discharge ทางบริษัท GLOW จะให้ทางบริษัท IRIS และ PD TECH มาเก็บผลไปวิเคราะห์ทุกๆ 2 เดือน

#### ขั้นตอนการวัด PD ของบริษัท PD TECH

- 1) ทางบริษัทจะต้องวงจร on-line ไว้แล้ว จะทำการ calibrate แล้วโดยใช้การยิงประจุ 5 nC เข้าไปโดยทำการ calibrate ที่ละเฟสซึ่งจะจับสองเฟส short แล้วต่อลงกราวด์ เครื่องวัดจะคิดค่า scale factor ออกมาเท่ากับ 1 โดยจะลากสาย coaxial มาต่อที่ Terminal Box เราจะต้องต่อสายเข้าเครื่อง PD Monitoring แล้วต่อสายจาก PD Monitoring เข้าที่จอแสดงผล (computer)
- 2) RFCT จะรับสัญญาณเข้ามาหมดในช่วง 1KHz-20MHz แล้วมาแยกสัญญาณรบกวนโดยใช้ช่วงสัญญาณ 0.6 MHz-20MHz เนื่องจากสัญญาณรบกวนจะมีช่วงความถี่ต่ำ โดยที่ PD TECH จะใช้เครื่อง MICAMAXX@PD TECH
- 3) ข้อมูลที่ได้จะแสดงผลได้ทั้ง 2 แกนและ 3 แกน (n,  $\phi$ , q) ซึ่ง แอมพลิจูด มุมเฟส อัตราการเกิดพัลส์จะสามารถระบุตำแหน่งการเกิด PD ดังรูป

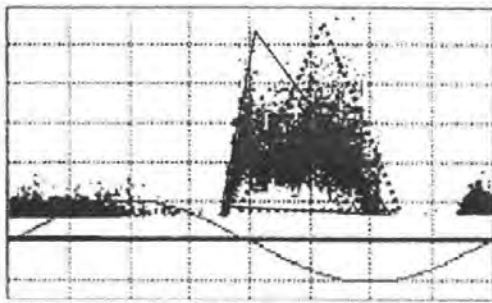


Slot Discharge: F

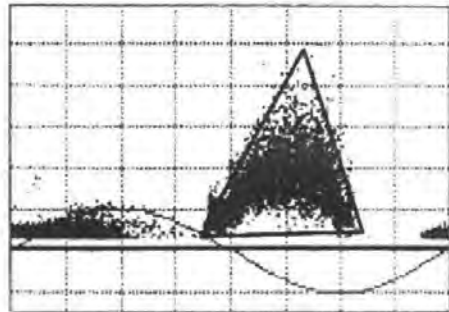


Slot discharge and end winding discharge: F+J

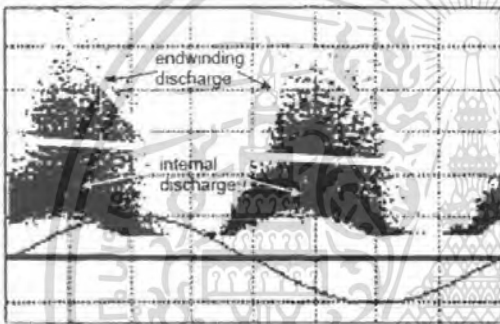
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



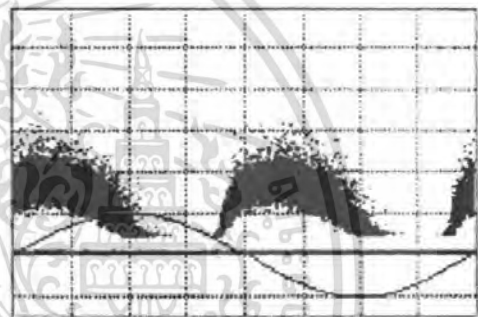
End winding discharge: J



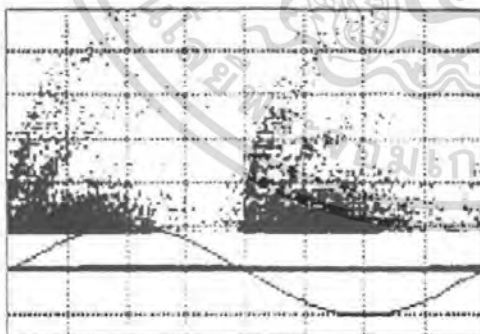
Edges discharge



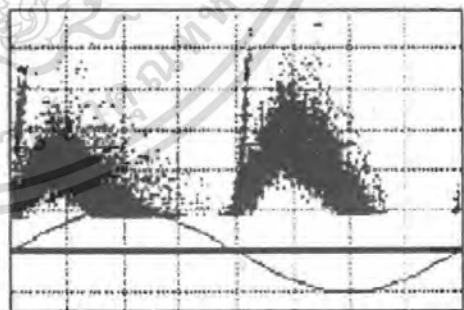
External and Internal PD



Internal discharge : A,B,C

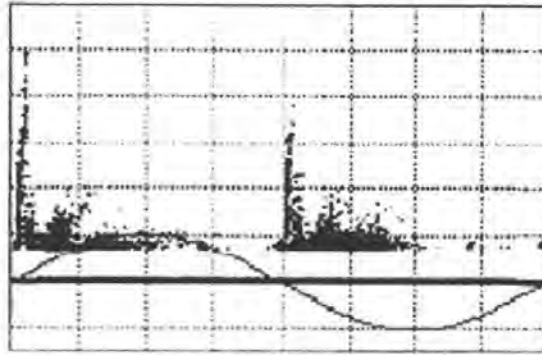


No asymmetry: probably c



Rather symmetrical : Maybe c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### Slight asymmetry, positive higher A or B

รูปที่ 3.12 การเกิด PD ตำแหน่งต่างๆ [5]

จากรูปที่ 3.12 ลักษณะสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนโดยเทียบกับตำแหน่งของรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3

ปกติทางบริษัทจะกำหนดการวัด PD ไว้ระยะเวลา 2 เดือนถ้าหากมีการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดและอัตราการเกิดพัลส์ที่ผิดปกติ จะต้องมีการประชุมหารือกันเพื่อวางแผนในการซ่อมบำรุง เพื่อไม่ให้เกิดการ shut down ของระบบ

ตาราง Global Evaluation Table [5]

Quality	PD (slot section),nC	PD (end winding),nC
Excellent	< 2	< 2
Good	< 4 to 5	< 4 to 5
Average	4 to 10	4 to 10
Acceptable	~10	< 15 to 20
Inspection necessary	> 15	> 20
Potential problem	> 20	> 50

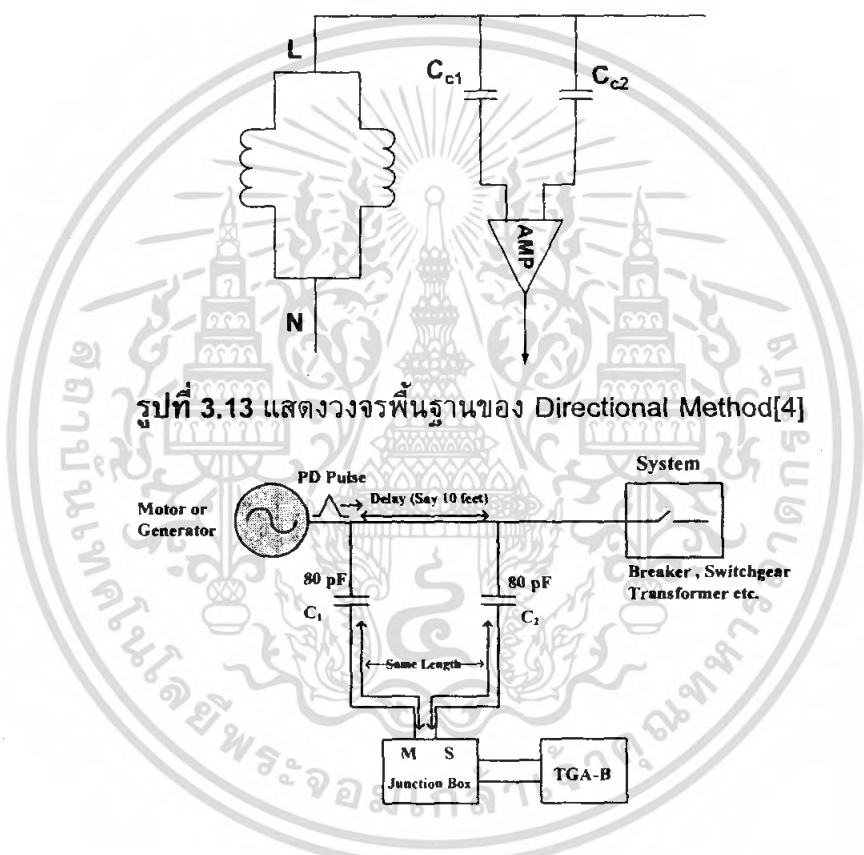
ตารางที่ 3.2 Global Evaluation Table

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

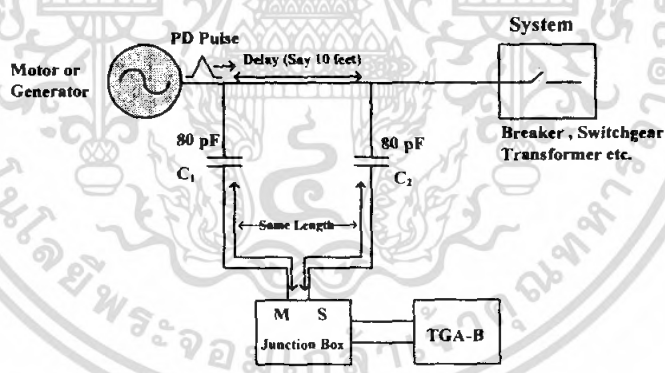
### 3.5 การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ on-line ในเครื่องจักรกลหมุนของบริษัท IRIS

#### 3.5.1 วงจรและอุปกรณ์การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ on-line ในเครื่องจักรกลหมุนของบริษัท IRIS

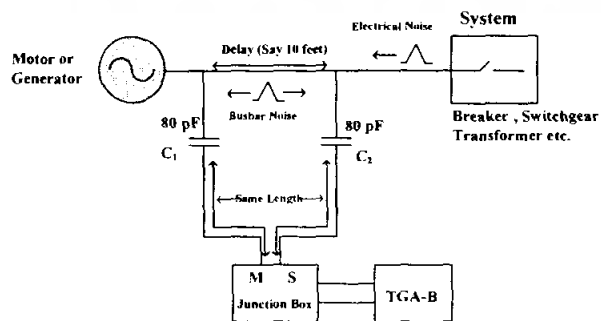
ทางบริษัท Glow ได้มีการติดตั้งการทดสอบ on-line PD บนเครื่องจักรกลหมุนเอาไว้แล้วมีการเก็บผลของสัญญาณ partial discharge เพื่อที่จะได้นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป ซึ่งวงจรการติดตั้งของบริษัท IRIS ใช้วงจรการติดตั้งโดยใช้ capacitive couplers ที่มีการต่อวงจรแบบ direction method ซึ่งมีการต่อวงจร ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรพื้นฐานของ Directional Method[4]



รูปที่ 3.14 วงจร direction method แสดงสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้น [6]



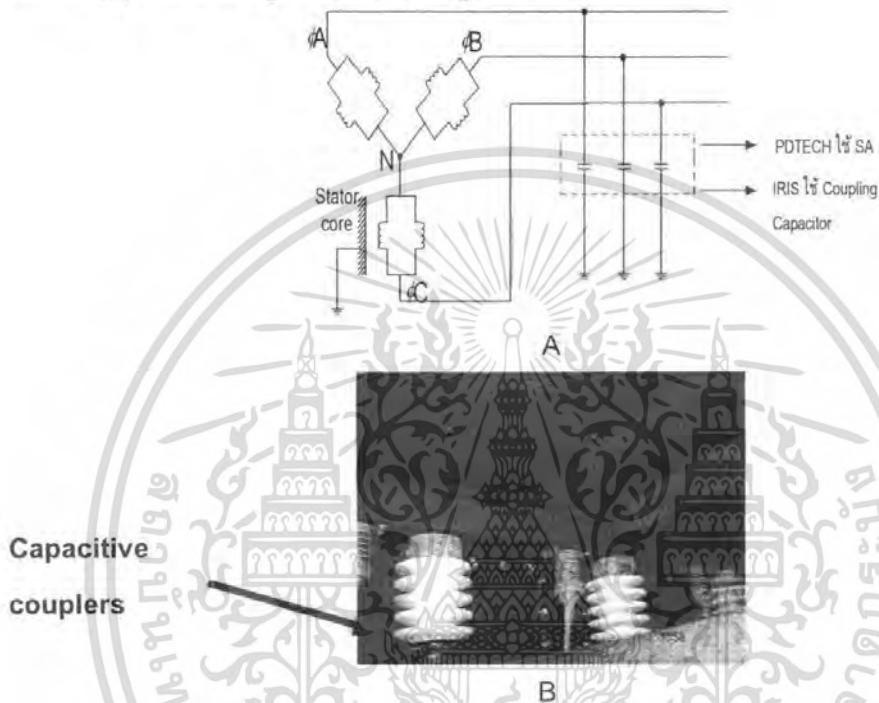
รูปที่ 3.15 วงจร direction method แสดงสัญญาณ Noises ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 ประกอบด้วยดังนี้

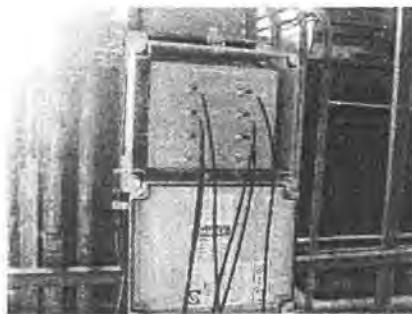
-Generator: 150MW ที่แรงดัน 15 KV และทุกๆการเก็บค่าแต่ละครั้งควรบันทึก  
พิกัดการทำงานไว้ด้วยเพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลการเกิด partial discharge ได้

-capacitive couplers: จะใช้ epoxy-Mica Capacitors (EMCs) ขนาด 80 pF ซึ่งทำ  
หน้าที่รับสัญญาณความถี่สูงผ่านตัวมัน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 A. จงจรแสดงการติดตั้งของ Capacitor couplers ด้านจ่ายแรงดัน  
B. Capacitor couplers

-Junction box: ทำหน้าที่เป็นจุดต่อของสัญญาณที่ผ่านมาจากตัว capacitive  
couplers และหน้าที่ของมันจะคล้ายกับ voltage divider ซึ่งจะทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณแรงดันจาก  
15kV ให้เหลือ 360mV เพื่อที่จะส่งสัญญาณไปยัง partial discharge monitoring เพื่อที่จะวิเคราะห์  
สัญญาณที่ได้ต่อไป ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 Terminal box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-Partial discharge monitoring (TGA-B) เป็นตัววิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นแล้วจะแสดงผลในรูปแบบ 3 แกน และสามารถแสดงผลของสัญญาณ PD, noise ที่เกิดจากระบบ, noise ที่เกิดใน bus bar ได้โดยอาศัยหลักการของ delay time ของสัญญาณที่จับได้ เามาเปรียบเทียบผลต่างระหว่างเวลาที่ตรวจจับได้จะสามารถแยกแยะสัญญาณความถี่สูงที่มาจากระบบกับที่มาจาก rotating machine ได้แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 partial discharge monitoring (TGA-B)

### 3.5.2 ขั้นตอนการทำการหาค่า delay time

ติดตั้งวงจรตามรูปที่ 3.3 แต่ตอนการทำการติดตั้งวงจรในตอนแรกไม่ได้ต่อไฟฟ้าเข้ากับระบบคือตอนที่ Generator หยุดทำงานนั้น เราได้ทำการหาค่า delay time ของสัญญาณในแต่ละเฟส โดยทำการยิงสัญญาณ plus ที่ด้านจ่ายแรงดัน generator แล้วใช้ ตรวจจับว่าเวลาที่เกิดการ delay มีค่าเท่าไร ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของ bus bar ที่ต่อระหว่าง capacitive coupler ทั้งสองของแต่ละเฟส ค่าที่ได้คือ

เฟส A	ค่า delay time เท่ากับ 22 ns
เฟส B	ค่า delay time เท่ากับ 18 ns
เฟส c	ค่า delay time เท่ากับ 12 ns

และทำการ Calibration เพื่อชดเชยประจุที่สูญเสียที่เกิดจากวงจรด้วย

### 3.5.3 ขั้นตอนการทำการตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนแบบ On-line ของบริษัท IRIS

การทำการเก็บผลนี้ทางบริษัท Glow จะทำการเก็บผลทุกๆ 2 เดือน ตามขั้นตอนดังนี้

- 1) ทำการต่อสาย coaxial จาก Junction box ไปยัง partial discharge monitoring (TGA-B) แล้วต่อเข้า computer ทำการเปิดโปรแกรมที่จะใช้วิเคราะห์ PD
- 2) ทำการใส่ข้อมูล delay time ของสัญญาณในแต่ละเฟส นั่นคือ 22 ns, 18 ns, 12 ns ตามลำดับเฟส A, B, C เพื่อที่จะให้เครื่องตรวจจับสามารถแยกสัญญาณได้
- 3) ทำการตรวจจับค่า PD ที่ได้โดยการจับผลที่ละเฟส
- 4) นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผล ซึ่งทางบริษัทได้จัดทำข้อมูลทางสถิติ จะบอกว่า Gen ขนาดเท่าไรเกิด PD ขนาดไหนแล้วสามารถยอมรับได้หรือวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วิเคราะห์ ข้อแตกต่างระหว่างบริษัท PD TECH และ บริษัท IRIS

จากการที่บริษัท PD TECH และ บริษัท IRIS ได้ทำการติดตั้งระบบตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดขึ้นที่ไขว้วงจรตรวจจับที่แตกต่างกันคือ

ทางบริษัท PD TECH จะใช้การตรวจจับโดยใช้ RFCT ซึ่งมีการตรวจจับสัญญาณในช่วง 1 KHz -20 MHz ซึ่งจะรับสัญญาณเข้ามาทั้งหมดเข้ามาในเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ และเครื่องวิเคราะห์จะใช้วิธี Time Window Method ซึ่งลดสัญญาณรบกวนโดยตัดช่วงสัญญาณความถี่ที่คิดว่าเป็นสัญญาณรบกวนออกไป และเลือกวิเคราะห์สัญญาณที่คิดว่าเป็นสัญญาณของการปล่อยประจุบางส่วนเท่านั้น และการใช้ RFCT เข้าไปเกี่ยวคล้องสัญญาณจะมีข้อดีคือไม่ได้ต่อกับวงจรทางด้านแรงดันสูงโดยตรงจะทำให้ปลอดภัยแก่เครื่องมือที่เอามาวิเคราะห์สัญญาณที่จะเกิดขึ้น

ทางบริษัท IRIS จะใช้การตรวจจับการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยใช้ capacitor couplers ที่มีการใช้วงจรแบบ direction method จะทำให้สามารถแยกแยะสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นได้จากตำแหน่งการเกิดที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธี delay time เพราะฉะนั้น จะสามารถแยกสัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบ (system noise) ได้จากสัญญาณความถี่สูงที่มาจากรีเลย์หรือเครื่องจักรกลหมุนได้ แต่วงจรการวัดโดยใช้ capacitor couplers จะมีการต่อเครื่องมือวิเคราะห์โดยตรงกับระบบไฟฟ้าแรงสูงซึ่งอาจจะทำให้ได้รับสัญญาณที่มีแรงดันสูงทำให้มีผลเรื่องความปลอดภัยของเครื่องมือตรวจจับได้

การตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนของบริษัท PD TECH และ บริษัท IRIS สัญญาณที่จะทำการวัดตรงที่ด้านเดียวของเครื่องจักรกลไฟฟ้าคือด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดทางด้านท้ายของเครื่องจักรกลไฟฟ้างดรูปที่ 3.1 ทำให้สัญญาณความถี่สูงถูกลดทอนได้เนื่องจากในโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะมีค่า impedance ที่มีค่าสูงทำให้สัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนที่เกิดตรงด้านท้ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกลดทอนไปทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้อาจจะมีค่าน้อยหรืออาจตรวจจับไม่ได้ก็เป็นได้

## บทที่ 4

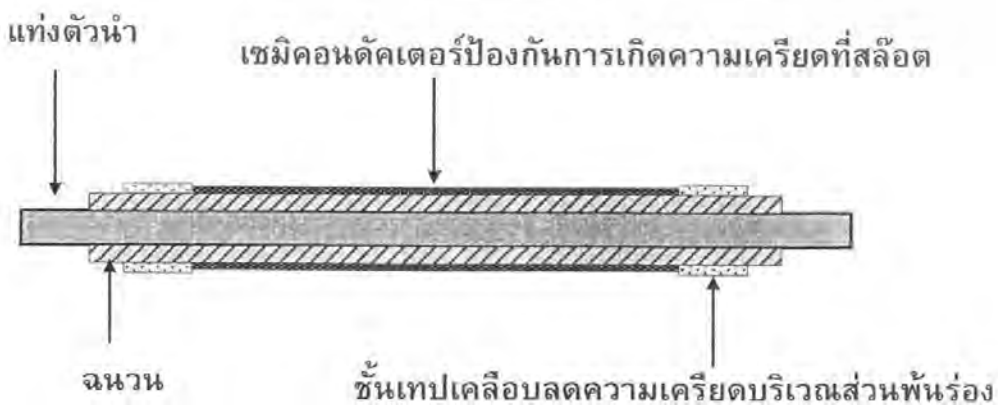
### การจัดทำแบบจำลองการออกแบบการทดสอบ

#### 4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์

ในการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน และการทดสอบการตรวจจับความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลหมุนนั้นได้นำแท่งสเตเตอร์ของจริงที่ได้รับคำแนะนำมาจาก บริษัท กมลวิศวกรรม ที่ได้ให้แท่งสเตเตอร์มาเพื่อการทดสอบ ดังนี้คือ ทดสอบตรวจจับความร้อนที่เกิดขึ้นที่แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง สอง การทดสอบคือที่แท่งสเตเตอร์ที่ 6.6 และ 11kV ตามลำดับ และจัดทำแบบจำลองให้เกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน ดังนี้คือแบบที่หนึ่งแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง แบบที่สองแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด แบบที่สามแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่ แบบที่สี่แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีฝุ่น แบบที่ห้าแบบจำลองที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ แบบที่หกแบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือส่วนพื้นร่องมีรอยขีดข่วน แบบที่เจ็ดแบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและจุดบกพร่องในร่องสลิตรวมกันคือส่วนพื้นร่องและในร่องสลิตมีรอยขีดข่วน

##### 4.1.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

แบบจำลองนี้จัดทำเพื่อนำมาทดสอบเก็บข้อมูลความร้อนที่เกิดขึ้นที่แบบจำลอง และทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเพื่อนำข้อมูลมาใช้อ้างอิงว่าในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนที่มีสภาพดีนั้นจะมีรูปแบบการปล่อยประจุอย่างไร แม้ว่าในกระบวนการผลิตนั้นจะมีเทคโนโลยีในการผลิตดีอย่างไรก็ตามยังคงมีโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ในเนื้อฉนวน และโพรงอากาศเหล่านี้จะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนขึ้นนั่นเอง ดังรูป 4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง



รูปที่ 4.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องจะประกอบด้วย แท่งโลหะตัวนำซึ่งทำจากทองแดง ชั้นฉนวน วัสดุความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนา และวัสดุความต้านทานสูงต้านการเกิดโคโรนา( เทปเคลือบลดความเครียด) แท่งวัสดุทองแดงจะนำมาพันด้วยชั้นฉนวนที่มีความหนาตามต้องการ เพื่อป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่บริเวณผิวฉนวนและร่องสลิต ที่ผิวฉนวนจะหุ้มด้วยวัสดุความต้านทานต่ำเพื่อทำหน้าที่กราวด์ผิวฉนวนกับร่องสลิตทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าดกคร่อมโพรงอากาศระหว่างผิวฉนวนกับร่องสลิตไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนได้ ส่วนฉนวนบริเวณส่วนปลายซึ่งเป็นส่วนที่ร่องสลิตออกมาจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าวิกฤติของอากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ผิวฉนวนส่วนนี้ลงกราวด์ที่สลิต ดังนั้นผิวฉนวนส่วนนี้จะพันด้วยเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อจะช่วยลดความเข้มของสนามไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเกินค่าวิกฤติของอากาศ โดยการพันจะพันให้ซ้อนกับฉนวนความต้านทานต่ำเล็กน้อย

#### 4.1.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด

แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัดนั้นจะทำแบบเดียวเดียวกันกับแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง เพียงแต่เอาที่สเตเตอร์มาตัดเพื่อที่จะทำให้ออนปืนแรงดันเข้าไปในการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนนั้นแท่งสเตเตอร์จะได้รับแรงดันเท่ากันหมดทุกจุด เพื่อนำข้อมูลมาใช้อ้างอิงว่าในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนที่มีสภาพดีนั้นจะมีรูปแบบการปล่อยประจุอย่างไร ดังรูปที่ 4.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด



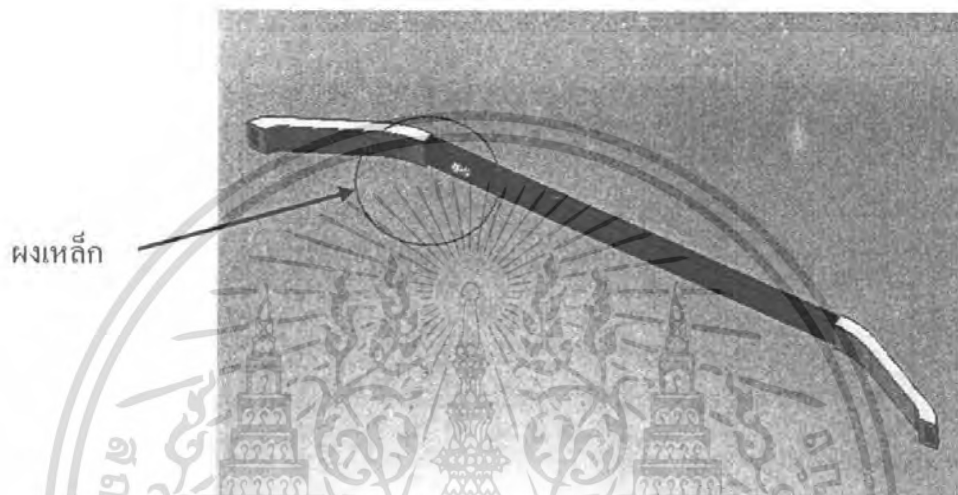
รูปที่ 4.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์

แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์ตัดนั้นจะทำแบบเดียวกันกับแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด เพียงแต่เอาแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด มาใส่ผงเหล็กเข้าไป เพื่อเป็นการจำลองมลภาวะที่แท่ง

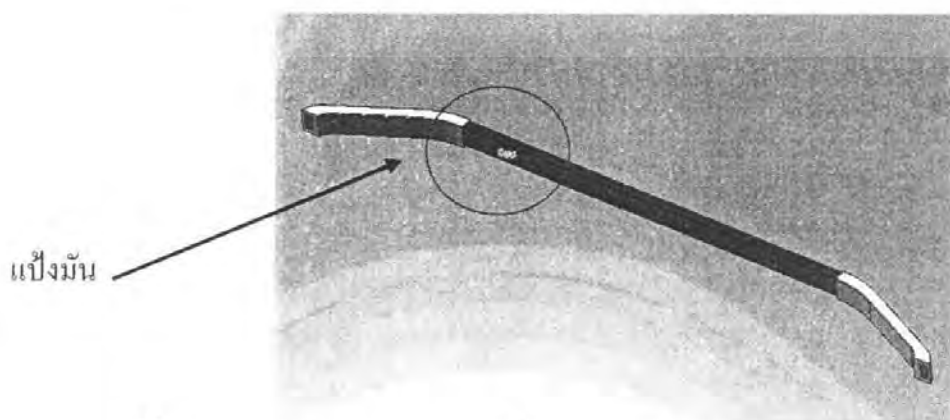
สเตเตอร์มีสิ่งปนเปื้อนอยู่ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์

#### 4.1.4 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์

แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์ตัดนั้นจะทำแบบเดียวกันกับแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด เพียงแต่เอาแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด มาใส่ผงแป้งมันเข้าไปซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายๆ ฝุ่น เพื่อเป็นการจำลองมลภาวะที่แท่งสเตเตอร์มีสิ่งปนเปื้อนอยู่ ดังรูปที่ 4.4 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์

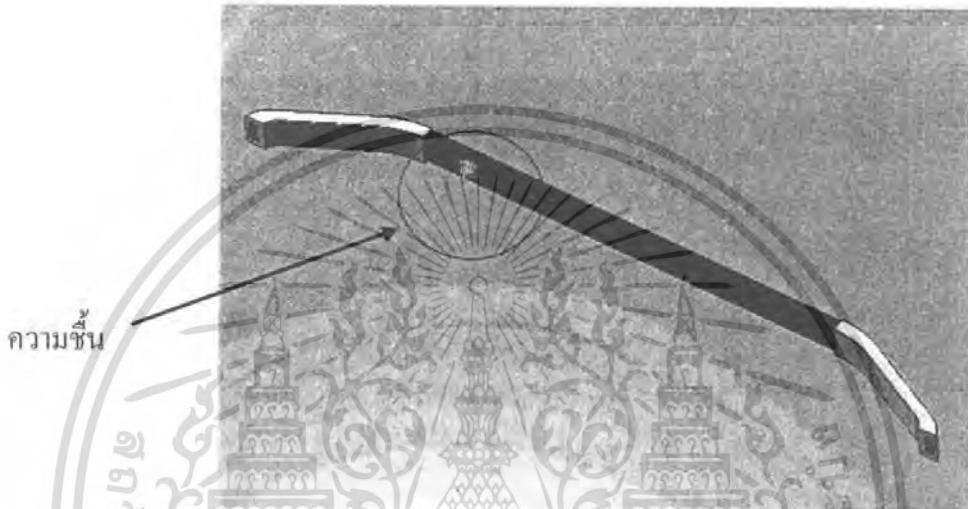


รูปที่ 4.4 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับโครงการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขของระเบียบการแข่งขันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์

แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีความชื้นติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์ดัดนั้นจะทำแบบเดียวกันกับแบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบดัด เพียงแต่เอาแบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบดัด มาใส่ละอองน้ำเข้าไป เพื่อเป็นการจำลองมลภาวะที่แท่งสแตเตอร์มีความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์ ดังรูปที่ 4.5 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์

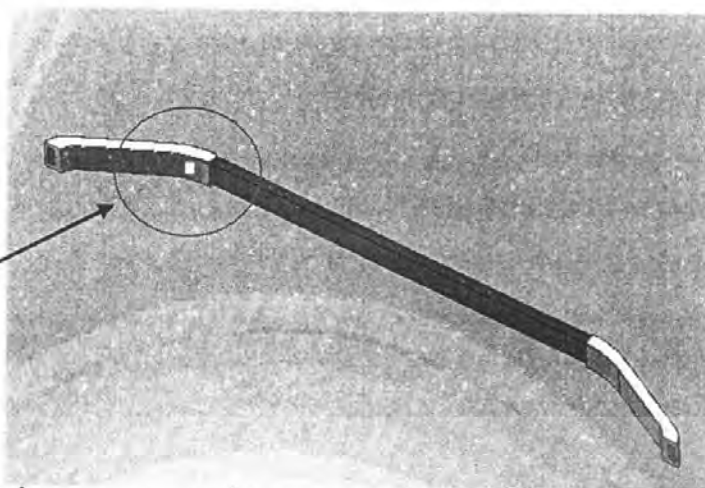


รูปที่ 4.5 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์

#### 4.1.6 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือฉนวนส่วนพื้นร่องมีรอยขีด

การสร้างแบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องนั้น จะทำโดยอาศัยหลักการดังนี้คือ ฉนวนบริเวณที่ติดกับแกนสแตเตอร์จะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงจึงต้องพันด้วยเทปลดความเครียด เพื่อช่วยลดความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤติของอากาศ แต่เนื่องจากแท่งสแตเตอร์นั้นมักจะได้รับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ฉนวนบริเวณปากร่องสลัดขั้วติดกับปากร่องสลัดจนผิวชั้นเคลือบลดความเครียดบริเวณต่อซึ่งติดอยู่กับปากร่องสลัดถลอกจนถึงชั้นฉนวน ทำให้ฉนวนบริเวณส่วนพื้นร่องไม่ถูกกราวด์ และทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากที่บริเวณปากร่องสลัดโดยอาศัยหลักการนี้ออกแบบจะออกแบบให้แบบจำลองมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่ฉนวนบริเวณที่ติดอยู่กับแกนสแตเตอร์ โดยจะนำแบบจำลองที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบดัดมาขูดบริเวณรอยต่อของชั้นความต้านทานต่ำด้านการเกิดโคโรนาและเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อให้แยกออกจากกันดังรูปที่ 4.6 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่อง

จุดบกพร่อง  
ส่วนพื้นร่อง



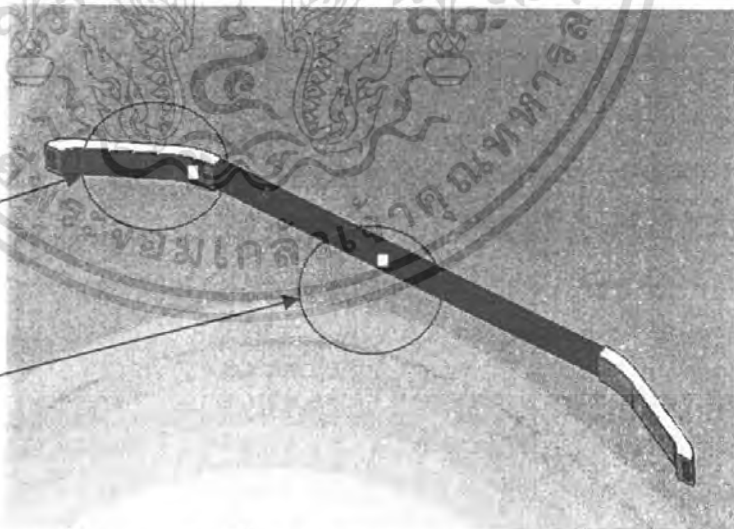
รูปที่ 4.6 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่อง

#### 4.1.7 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด

แบบจำลองนี้ก็เหมือนกับแบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องเพียงแต่เพิ่มรอยขีดที่ผิววัสดุความต้านทานต่ำ ที่ทำหน้าที่เป็นกรวดผิวฉนวนออกบางส่วนและใช้แผ่นแท่งเหล็กเสมือนเป็นร่องสลีตวางประกบ ซึ่งทำให้เกิดแผ่นฟิล์มอากาศบางๆ ระหว่างแท่งสเตเตอร์กับแกนเหล็กจำลองเป็นโพรงอากาศขึ้นดังรูปที่ 4.7 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด

จุดบกพร่อง  
ส่วนพื้นร่อง

จุดบกพร่อง  
ส่วนในร่อง  
สลีต



รูปที่ 4.7 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบ่งเป็นการทดสอบ 2 อย่างคือ การทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิที่ระดับแรงดันต่าง และการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งมีวิธีการทดสอบและวงจรการทดสอบดังต่อไปนี้

### 4.2.1 การทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิ

การทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น นั้นทุกครั้งที่ทำการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องวัดค่าของ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ เสมอทุกครั้ง การทดสอบนี้จะทำการทดสอบแท่งสเดเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องตามรูปที่ 4.1 และทำการทดสอบแท่งสเดเตอร์สองแท่งด้วยกัน และแต่ละแท่งจะมีพิกัดแรงดันที่ 6.6 และ 11 kV ตามลำดับ จะมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิ



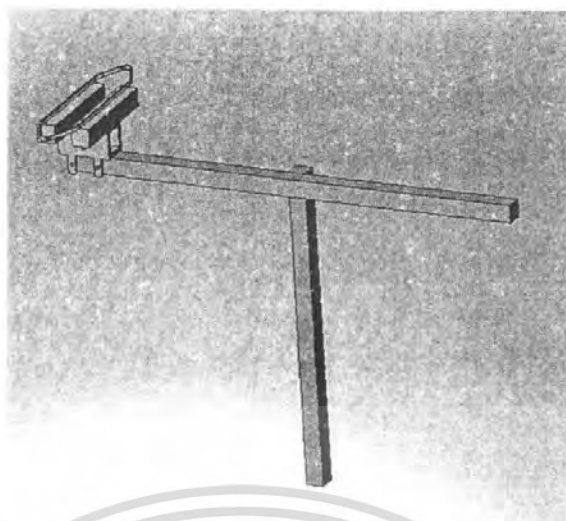
รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิ

ในการทดสอบจะต้องมีฐานวางเพื่อที่จะจำลองว่าเป็นร่องสลีต และฐานวางจะทำด้วยเหล็กมีความยาวเท่ากับร่องสลีตจริง และมีการต่อฐานวางลงกราวด์ด้วยดังรูปที่ 4.9 ฐานวางที่ทำด้วยเหล็กภาพจริง และ มีการวางแท่งสเดเตอร์กับฐานวางดังรูปที่ 4.10 รูปการวางแท่งสเดเตอร์ (test object) กับฐานที่ใช้ในการทดสอบ และมีภาพการต่อวงจรในการทดสอบจริงดังรูปที่ 4.11 ภาพการทดสอบจริง

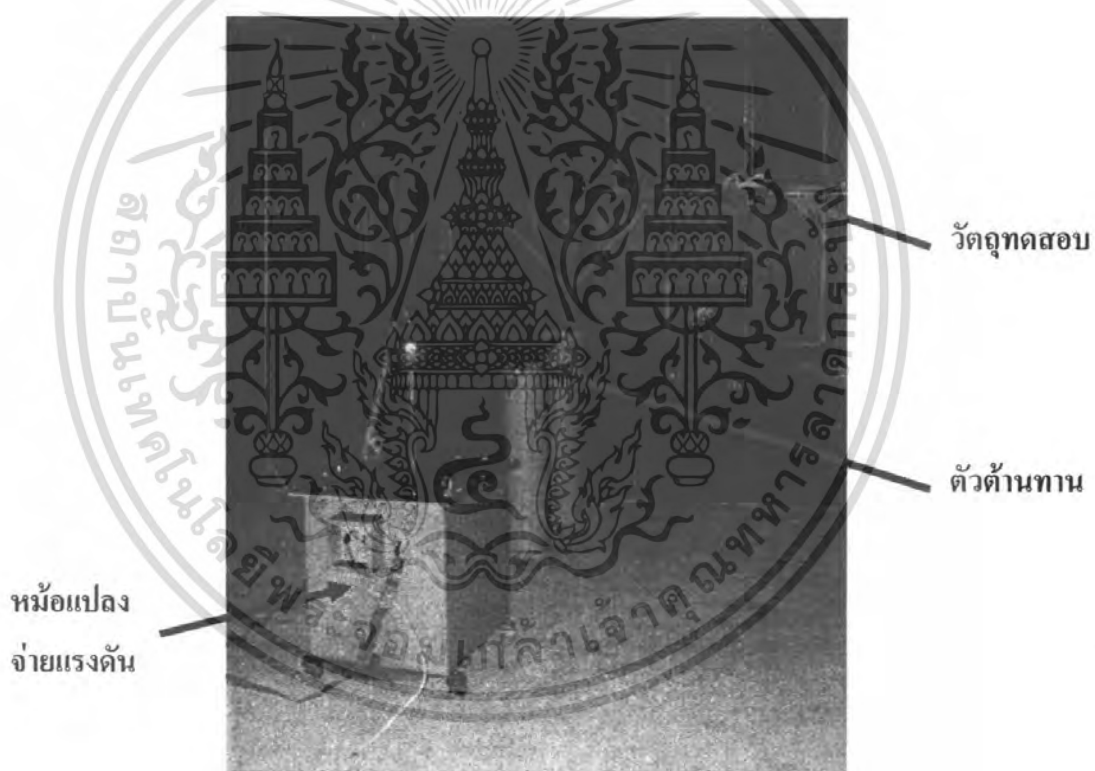


รูปที่ 4.9 ฐานวางที่ทำด้วยเหล็กภาพจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



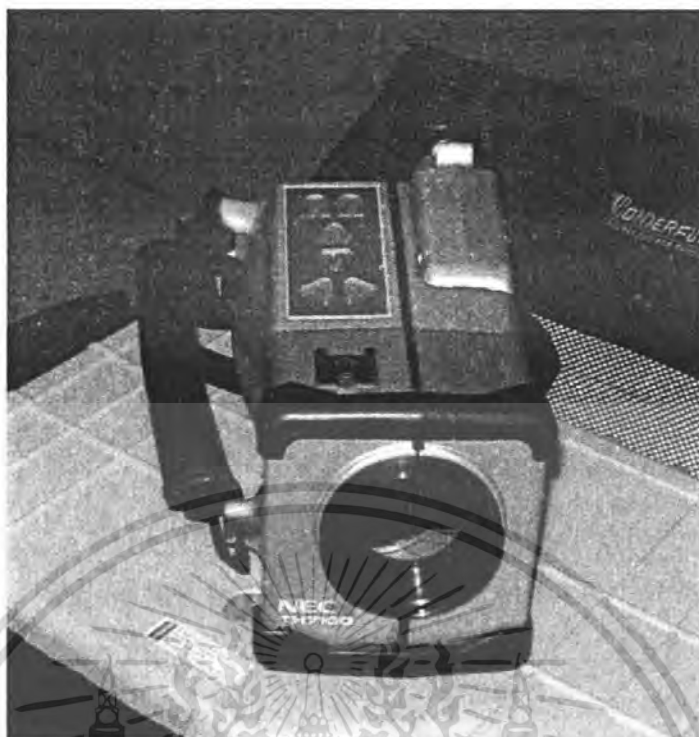
รูปที่ 4.10 รูปการวางแท่งสเตเตอร์ (test object) กับฐานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.11 ภาพวงจรการทดสอบจริง

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้กับแท่งสเตเตอร์จะเป็นระดับแรงดันที่ 50 เปรอร์เซ็นต์ 100 เปรอร์เซ็นต์ 150 เปรอร์เซ็นต์ และ 200 เปรอร์เซ็นต์ของแรงดันพิกัด ตามลำดับและมีการตรวจจับอุณหภูมิโดยกล้องเทอร์โมสแกน โดยมีภาพของกล้องเทอร์โมสแกนที่ใช้ตรวจจับอุณหภูมิดังรูปที่ 4.11 กล้องเทอร์โมสแกนเมื่อตรวจจับอุณหภูมิเสร็จแล้วก็นำผลของอุณหภูมิตที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กล้องเทอร์โมสแกน

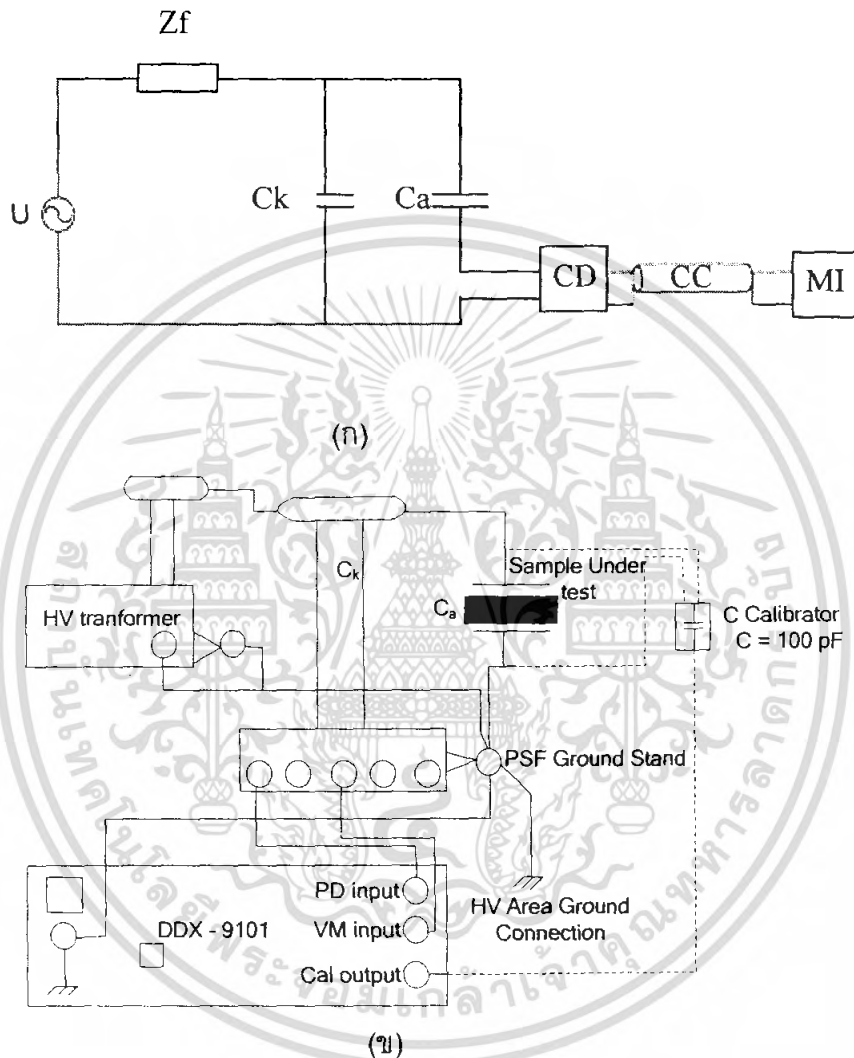
#### 4.2.2 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องทดสอบการดีสชาร์จบางส่วน

กระบวนการทดสอบจะเป็นการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่สภาวะเริ่มเกิดและที่ระดับแรงดันต่างๆของของแบบจำลองจุดบกพร่องรูปแบบต่างๆโดยต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.13 หลังจากนั้นค่อยๆเพิ่มแรงดันจนกระทั่งสามารถตรวจจับสัญญาณการปล่อยประจุบางส่วนเริ่มเกิด บันทึกการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องตรวจจับ PD รวมทั้งบันทึกค่าแรงดันดังกล่าวด้วย จากนั้นจะทำการเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ บันทึกการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและค่าแรงดัน และบันทึกผลการทดสอบจากเครื่องวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (เครื่อง PD DERECTOR DDX-9101) ที่แต่ละระดับแรงดันและทำการวิเคราะห์ผลต่อไป รูปที่ 4.14 ภาพวงจรที่ทำการทดสอบจริง รูปที่ 4.15 เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101 ใช้สำหรับทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องตรวจจับการเกิดดีสชาร์จบางส่วน PD DETECTOR DDX-9101
2. ตัวควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า
3. ตัวเก็บประจุคองที่มีค่า 100 pF (C ปรับเทียบ)
4. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40kVA, PD<2 pC



รูปที่ 4.13 วงจรการทดลอง ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ

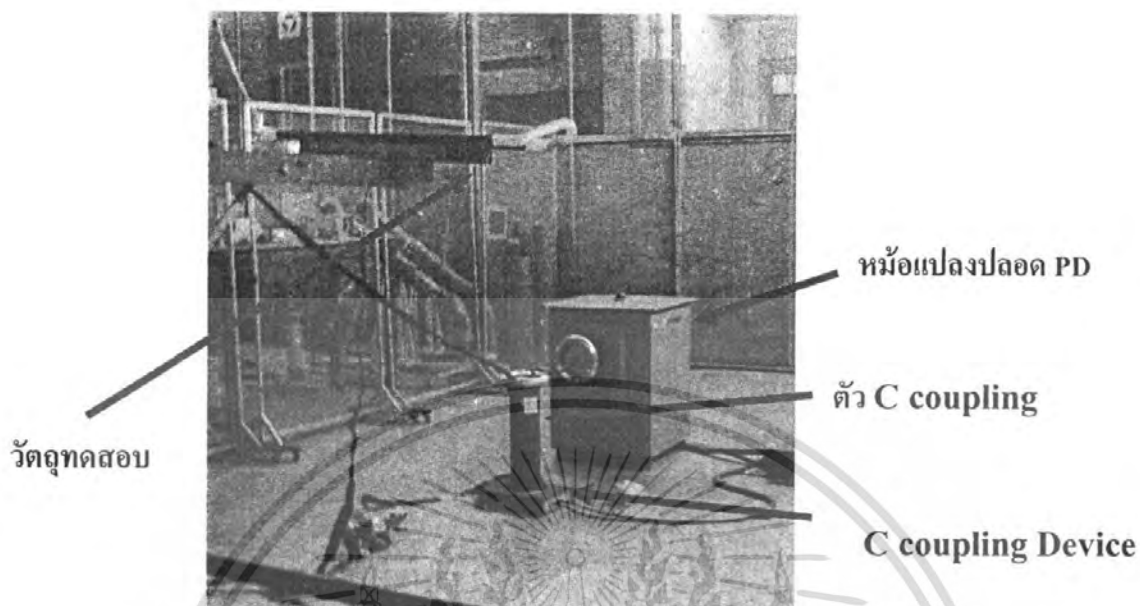
โดยที่ U คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40kVA, PD<2 pC

$C_k$  คือ Coupling Capacitor 100 kV

CD คือ ตัวตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน โดยที่ภายใน PD DETECTOR ได้รวมเอา PD Calibrator ไว้ด้วย

$C_a$  คือ Test Object

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพวงจรที่ทำการทดสอบจริง

การตรวจจับโคโรนาด้วยกล่องตรวจจับโคโรนาเครื่อง PD DETECTOR DDX-9101 ใช้สำหรับทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.15 เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101

ใช้สำหรับทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ตัวอย่างการทดลองดังรูปที่ 4.13 โดยที่อุปกรณ์ทดสอบ ( $C_a$ ) คือแท่งสแตเตอร์ที่จะนำมาทดสอบ

\*\*\* ก่อนการทำการทดลองจะต้องนำ C Calibration ออกจากวงจรทดสอบทุกครั้ง

2. จัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก

3. ทำการปรับเทียบชุดวัด PD มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข

5. หลังจากทำการทดสอบ PD ของ Test Object ในวัสดุที่หนึ่งเสร็จแล้วทำการบันทึกค่าแล้วทำการเปลี่ยน Test Object มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

5.2 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัด

5.3 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์

5.4 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีฝุ่น

5.5 แบบจำลองที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่

5.6 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือส่วนพื้นร่องมีรอยขีดข่วน

5.7 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและจุดบกพร่องในร่องสลีดรวมกันคือส่วนพื้นร่องและในร่องสลีดมีรอยขีดข่วน

6. ในส่วนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

6.1 บันทึกค่าประจู้ที่รู้ค่าของชุดปรับเทียบ และที่อ่านได้จากเครื่องตรวจจับรวมทั้ง Background noise

6.2 จ่ายแรงดันทดสอบ ให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบวัด PD ค่อยๆ เพิ่มแรงดันครั้งจาก 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 kV ตามลำดับ

6.3 บันทึกค่า PD จาก Test Report โดยให้แสดงค่า PD บนฐานรูปวงรีที่ค่า PD สูงสุด และบันทึกค่าขนาดของ PD (pC) ที่ระดับแรงดัน ต่างๆ (ห้ามป้อนแรงดันจนวัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน)

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในร่องสลีตของแบบจำลองแท่งที่พิกัด 11 kV ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1.1 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.8 kV/cm แสดงดังรูป 5.1

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงแต่ยังไม่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนของฉนวนไม่ก้ำต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 170 kV/cm [7]



รูปที่ 5.1 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนบนแท่งสแตเตอร์ที่มีจุดบกพร่องคือโพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง

5.1.2.1 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.58 kV/cm แสดงดังรูป 5.2
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ  $E = 51.11$  kV/cm แสดงดังรูป 5.2

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงและจะเกิดปล่อยประจุบางส่วนขึ้นเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm [7]



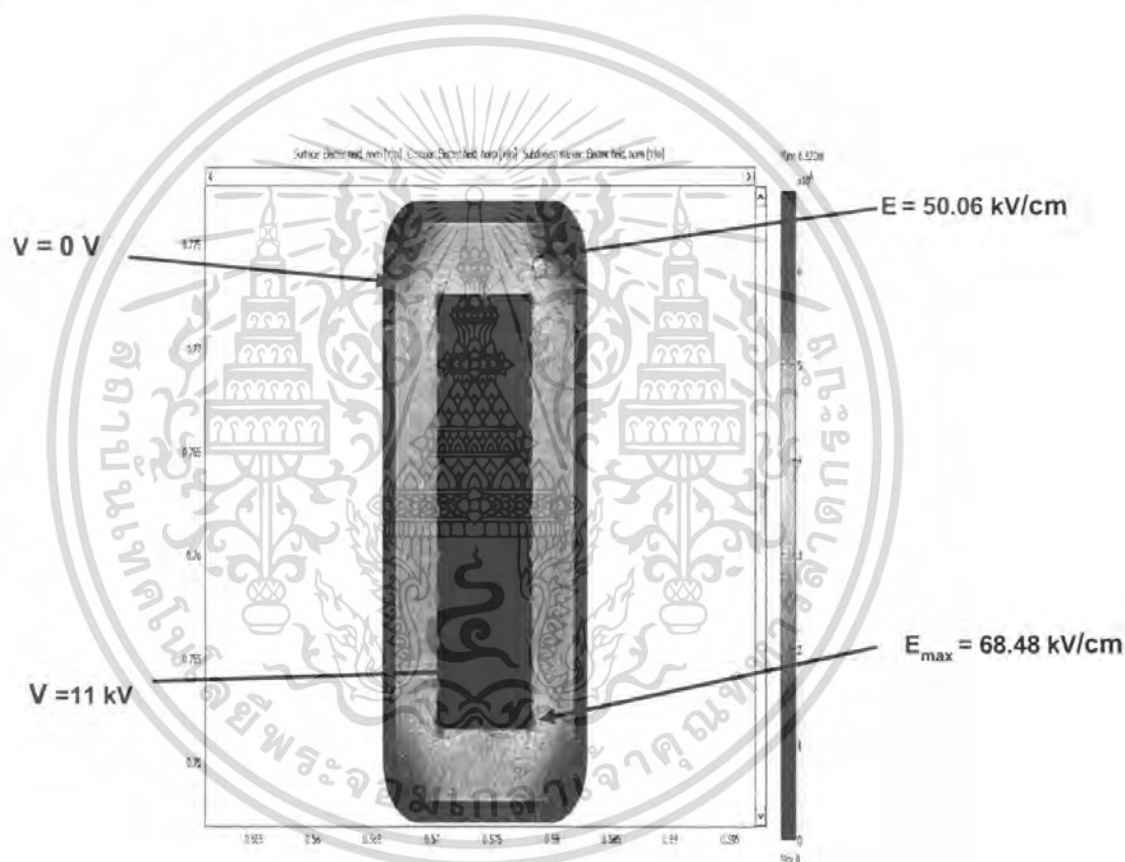
รูปที่ 5.2 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2.2 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบริเวณ ส่วนมุมของทองแดง

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.48 kV/cm แสดงดังรูป 5.3
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 50.06 kV/cm แสดงดังรูป 5.3

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงและจะเกิดปล่อยประจุบางส่วนขึ้นเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



รูปที่ 5.3 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง

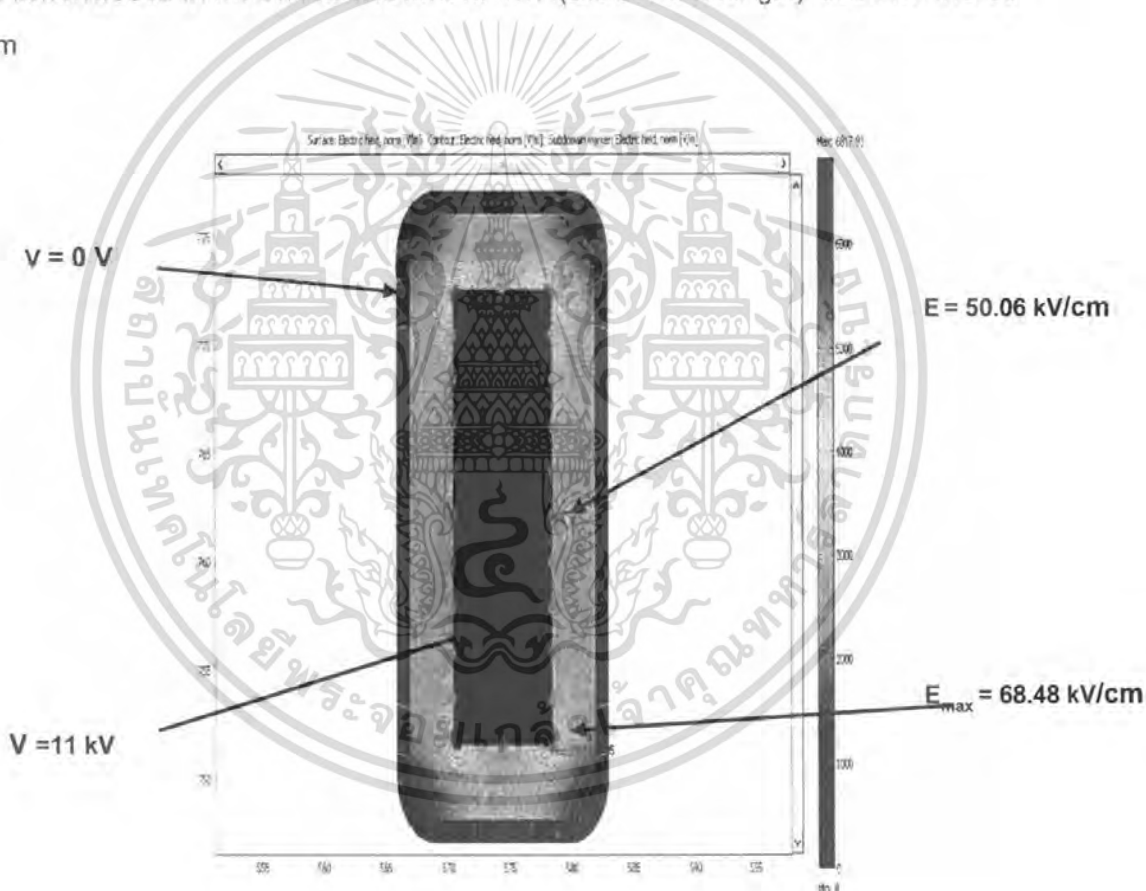
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่มีจุดบกพร่องคือโพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน

5.1.3.1 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 69.22 kV/cm แสดงดังรูป 5.4
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 45.87 kV/cm แสดงดังรูป 5.4

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงและจะเกิดปล่อยประจุบางส่วนขึ้นเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



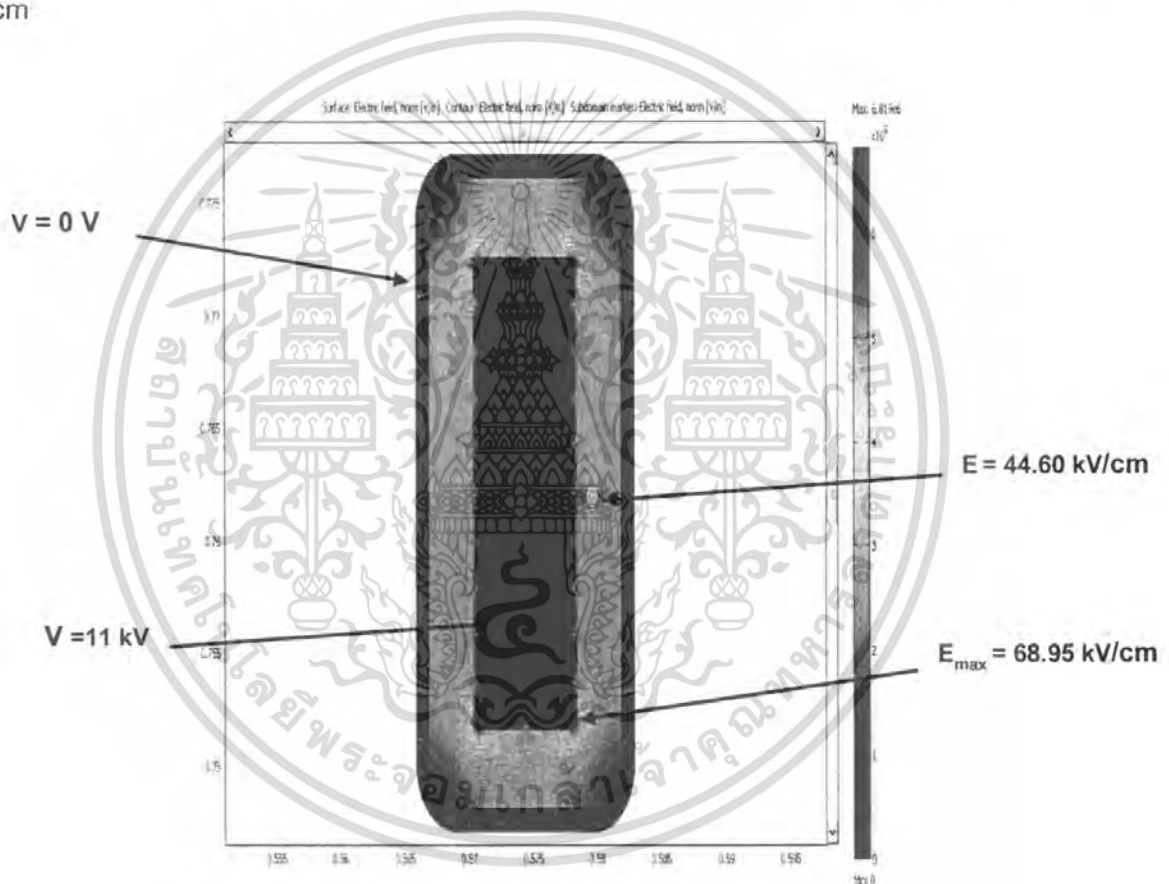
รูปที่ 5.4 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3.2 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.95 kV/cm แสดงดังรูป 5.5
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 44.60 kV/cm แสดงดังรูป 5.5

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงและจะเกิดปล่อยประจุบางส่วนขึ้นเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



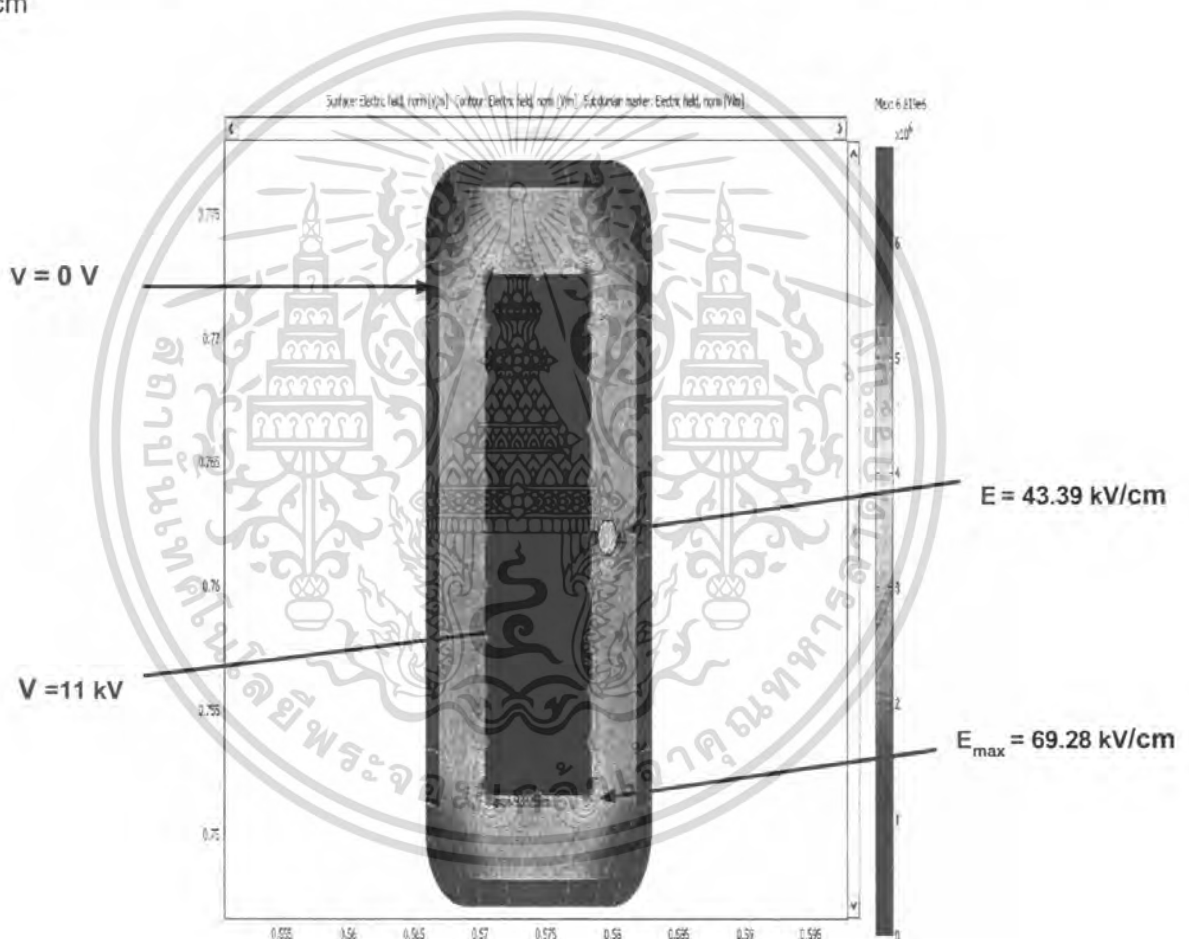
รูปที่ 5.5 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3.3 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 69.28 kV/cm แสดงดังรูป 5.6
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 43.39 kV/cm แสดงดังรูป 5.6

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงและจะเกิดปล่อยประจุบางส่วนขึ้นเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



รูปที่ 5.6 โพรงอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7 mm. เกิดในเนื้อฉนวนบนแท่งสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1.4 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่มีรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์

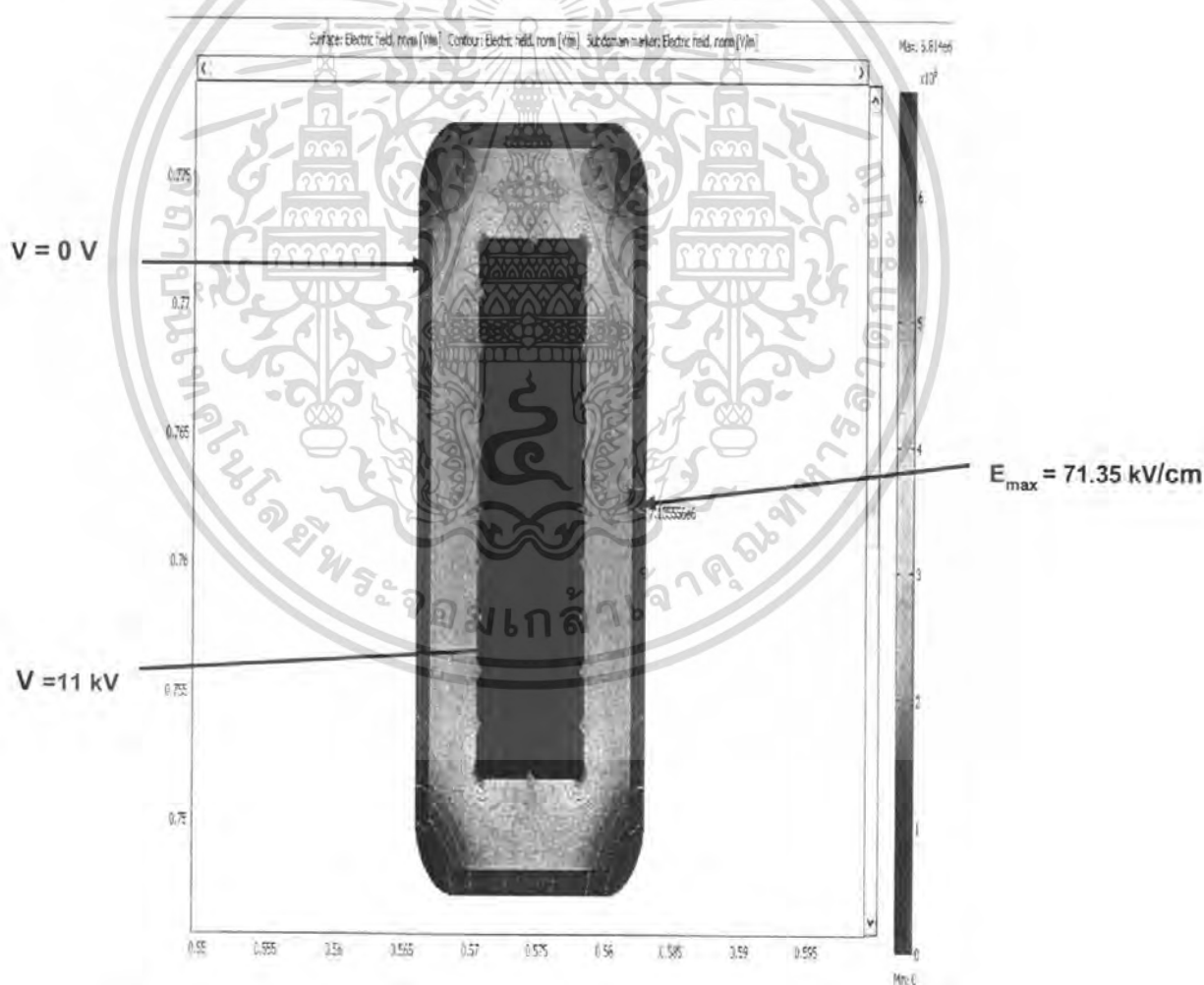
### 5.1.4.1 รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x0.7 mm

คุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV

2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดบริเวณรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ 71.35 kV/cm แสดงดังรูป 5.7

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งจะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



รูปที่ 5.7 รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x0.7 mm

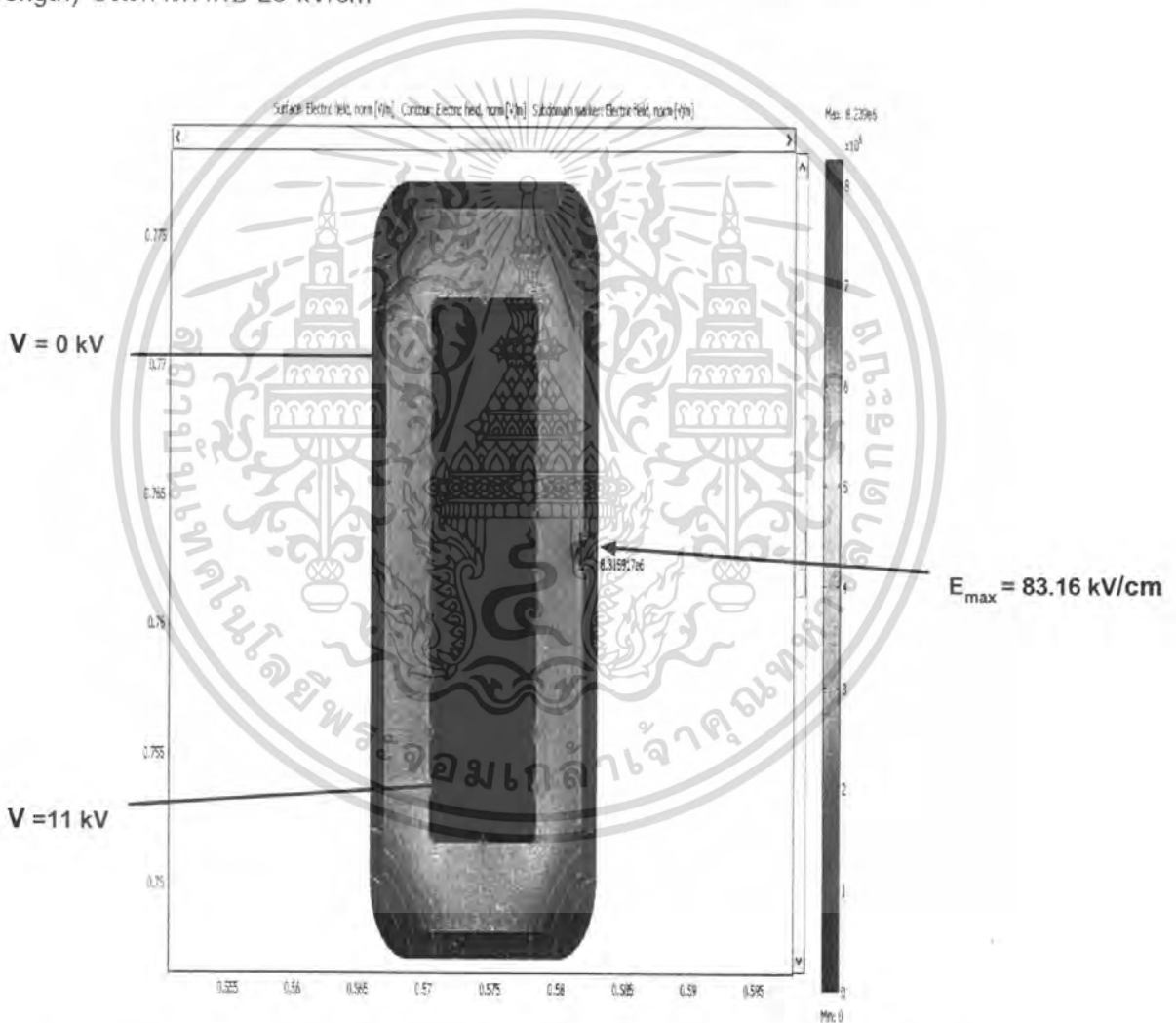
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4.2 รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x1.4 mm

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV

2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดบริเวณรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ 83.16 kV/cm แสดงดังรูป 5.8

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณรอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งจะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



รูปที่ 5.8 รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ขนาด 0.3x1.4 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

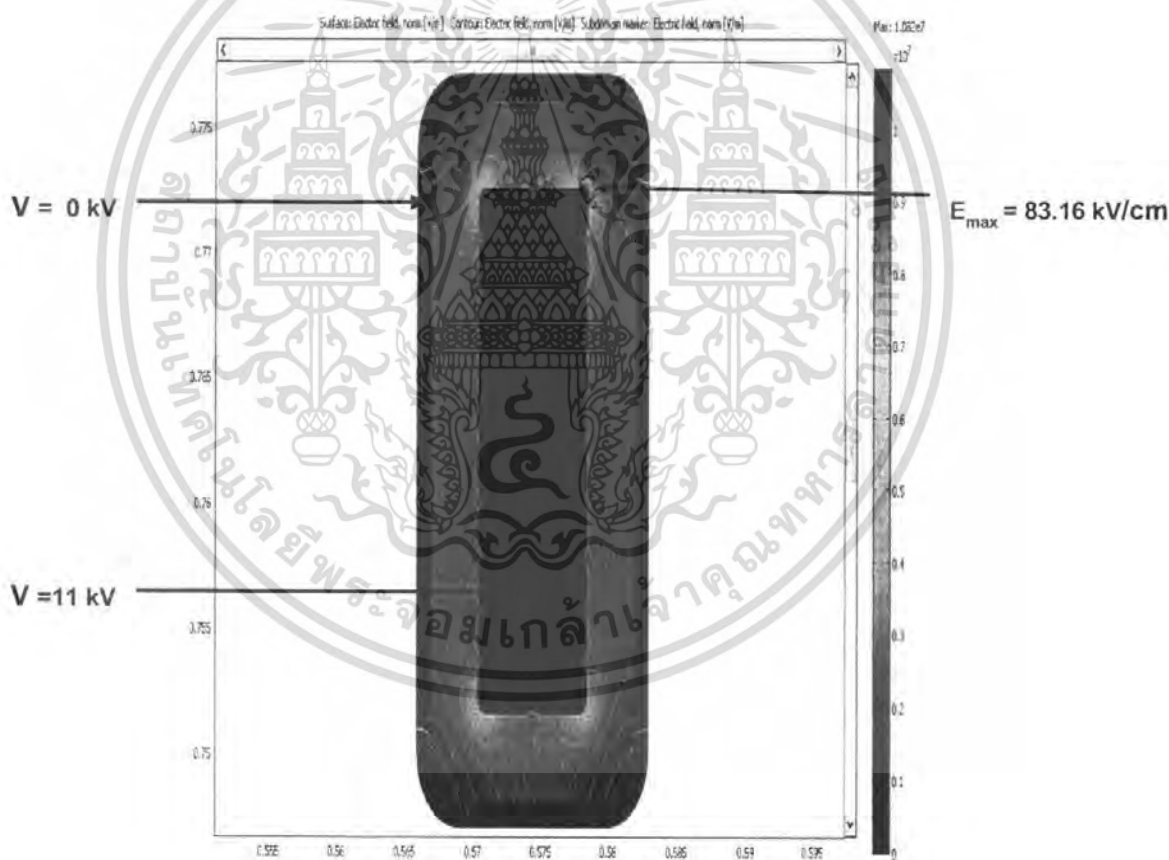
## 5.1.5 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของฉนวนบนแท่งสเตเตอร์ที่มีรอยแยกระหว่างฉนวนกรวดกับตัวนำทองแดง

### 5.1.5.1 มีรอยแยกระหว่างฉนวนกรวดกับตัวนำทองแดง

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV

2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นตรงบริเวณรอยแยกระหว่างฉนวนกับที่มุมของทองแดง 69.22 kV/cm แสดงดังรูป 5.9

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณรอยแยกระหว่างฉนวนกรวดกับเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งจะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



รูปที่ 5.9 มีรอยแยกระหว่างฉนวนกรวดกับตัวนำทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1.6 การศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนของแท่งสเตเตอร์ที่เกิดจากรอยถลอกของเซมิคอนดักเตอร์

### 5.1.6.1 เกิดรอยถลอกที่มุมของแท่งสเตเตอร์ลึก 0.5 mm

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.8 kV/cm แสดงดังรูป 5.11
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 21.60 kV/cm แสดงดังรูป 5.11

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงแต่ยังไม่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



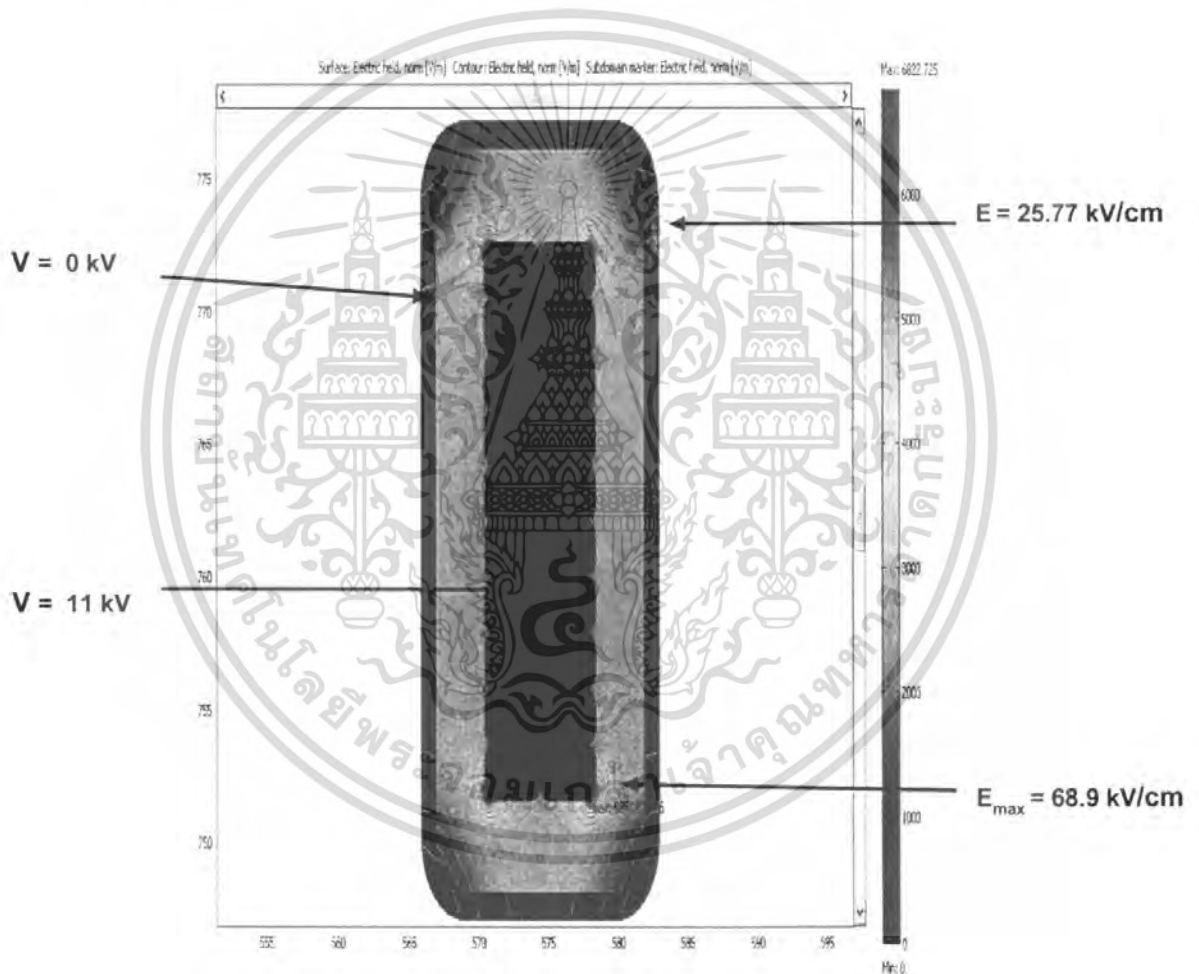
รูปที่ 5.10 เกิดรอยถลอกที่มุมของแท่งสเตเตอร์ลึก 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.6.2 เกิดรอยถลอกของแท่งสแตเตอร์ลึกลับ 0.7 mm

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.9 kV/cm แสดงดังรูป 5.12
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 25.77 kV/cm แสดงดังรูป 5.12

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงซึ่งจะเกิดการปล่อยประจุบางส่วนเล็กน้อยเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



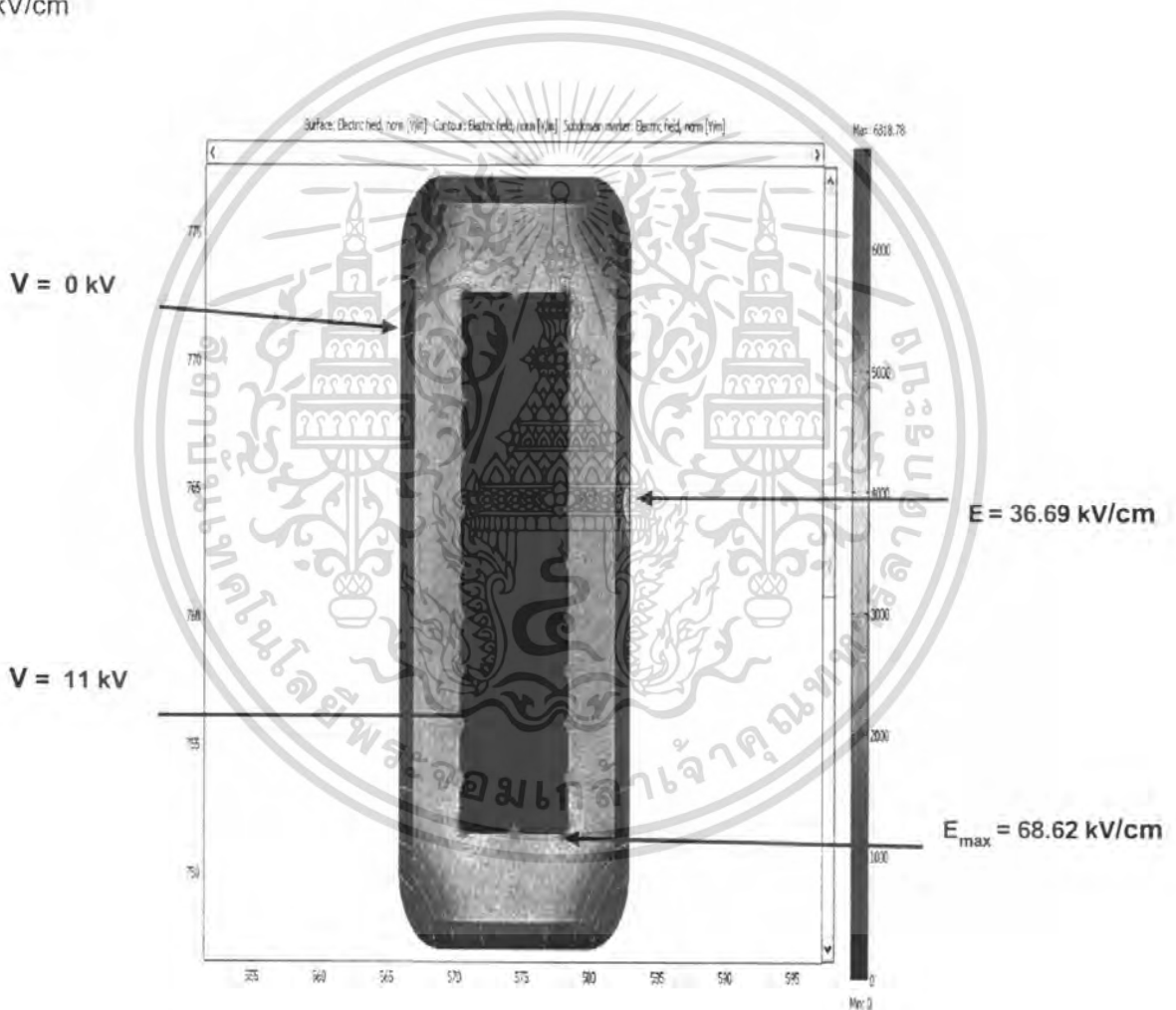
รูปที่ 5.11 เกิดรอยถลอกของแท่งสแตเตอร์ลึกลับ 0.7 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.6.3 เกิดรอยถลอกของแท่งสแตเตอร์บริเวณตรงกลางลึก 0.7 mm

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.62 kV/cm แสดงดังรูป 5.13
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 36.69 kV/cm แสดงดังรูป 5.13

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงซึ่งจะเกิดเกิดการป้อยประจุบางส่วนเล็กน้อยเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



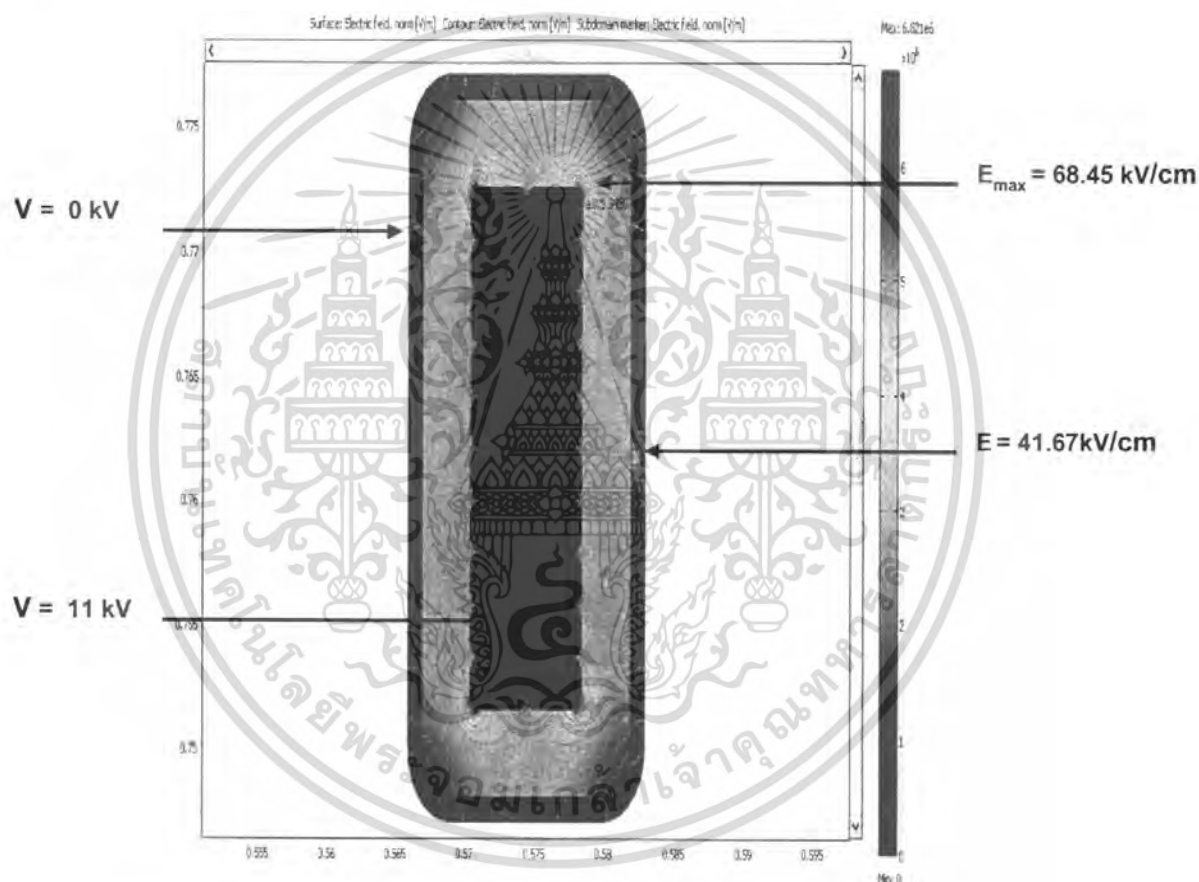
รูปที่ 5.12 เกิดรอยถลอกของแท่งสแตเตอร์บริเวณตรงกลางลึก 0.7 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.6.4 เกิดรอยถลอกของแท่งสเดเตอร์บริเวณตรงกลางลึกลงถึงฉนวนกราวด์

1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันที่พิกัด 11 kV
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 68.45 kV/cm แสดงดังรูป 5.14
3. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่โพรงอากาศ 41.67 kV/cm แสดงดังรูป 5.13

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณมุมของตัวนำทองแดงและจะเกิดปล่อยประจุบางส่วนขึ้นเนื่องจากค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าของโพรงอากาศมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kV/cm



รูปที่ 5.13 เกิดรอยถลอกของแท่งสเดเตอร์บริเวณตรงกลางลึกลงถึงฉนวนกราวด์

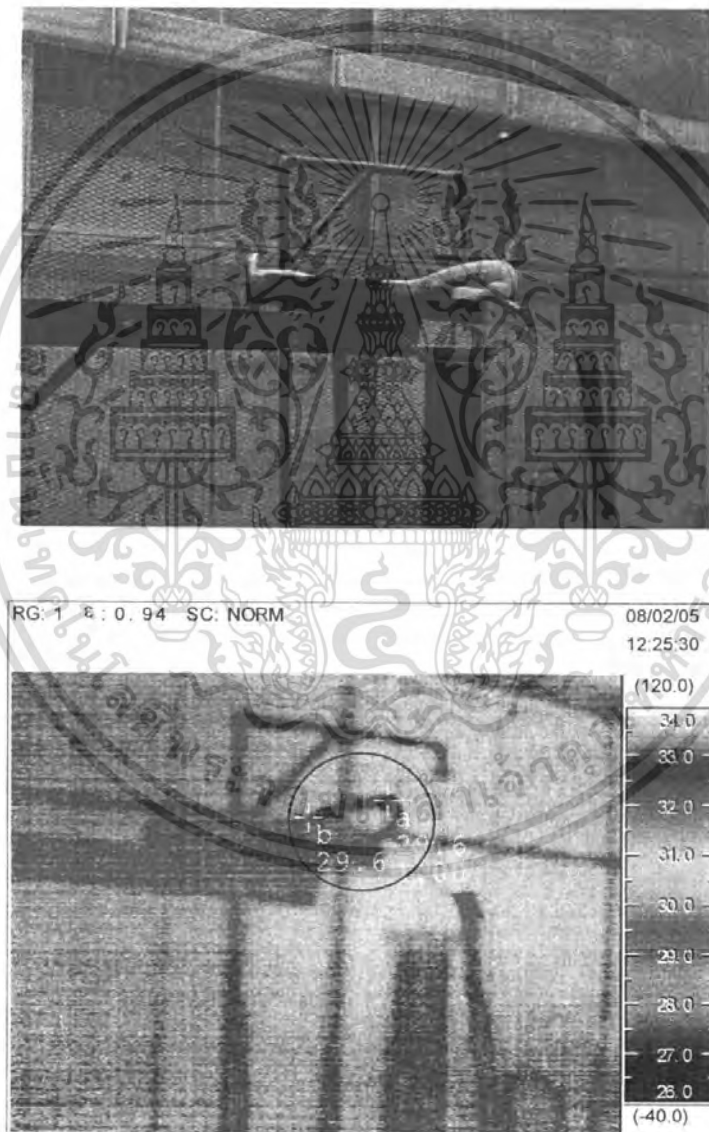
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิ

### 5.2.1 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV

#### 5.2.1.1 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 5 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 5 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 29.6 องศาเซลเซียส



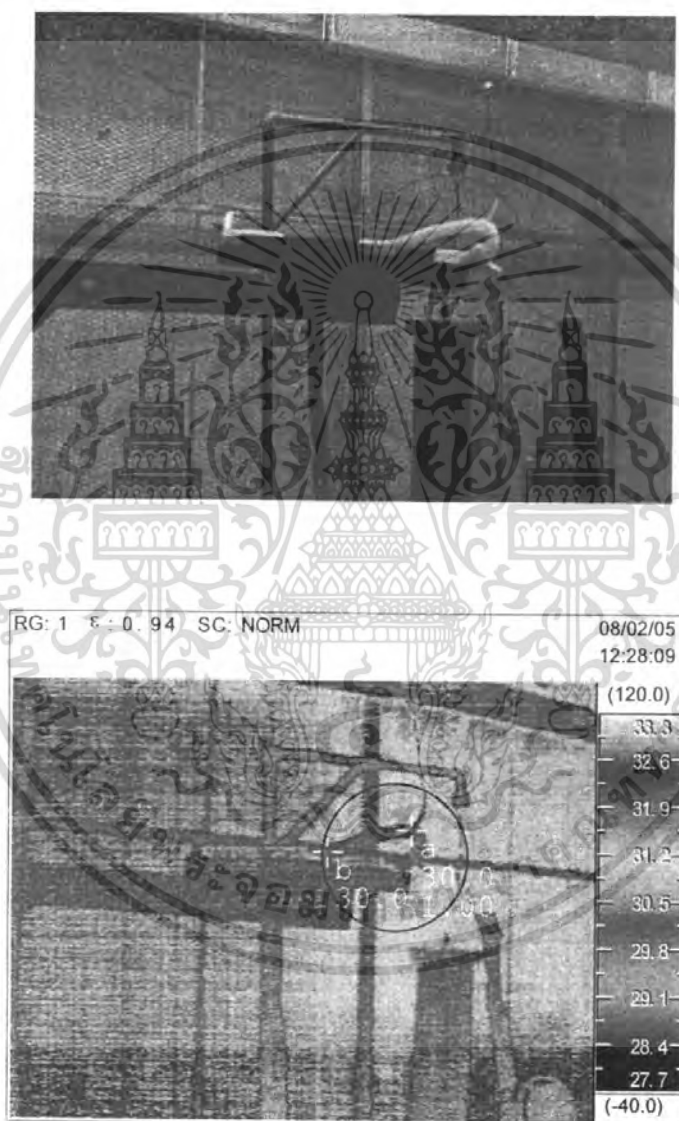
รูปที่ 5.15 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV

จ่ายแรงดันที่ 5 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 29.6 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.2 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 10 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 10 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 30.00 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.16 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 10 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 30.00 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.3 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 11 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 11 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 30.1 องศาเซลเซียส

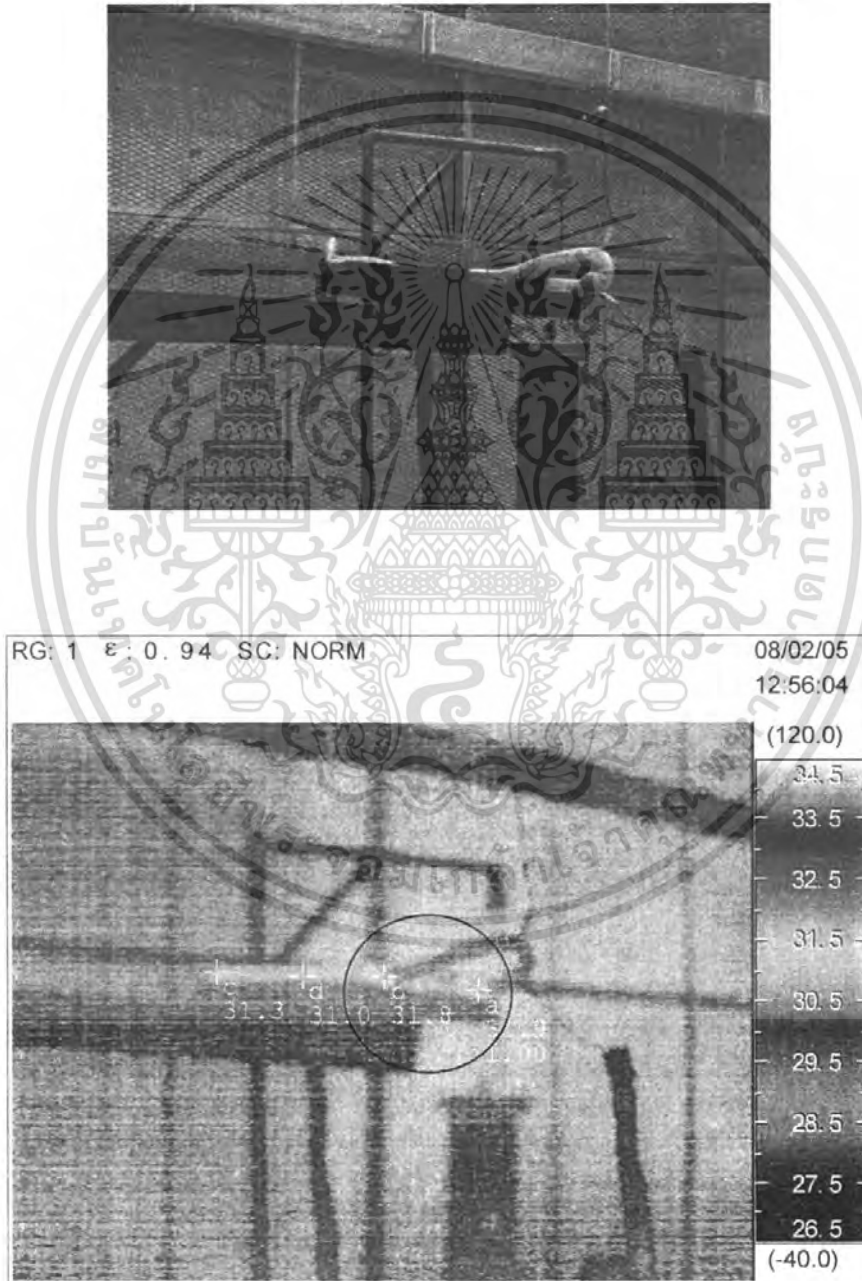


รูปที่ 5.14 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV

จ่ายแรงดันที่ พิกัด 11 kV อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 30.1 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อใช้ในการวินิจฉัยของหม้อแปลงเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อกำหนดการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.2.1.4 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่พิกัด 15 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 15 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเคมีคอนคิเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 31.9 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.17 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV

จ่ายแรงดันที่ 15 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 31.9 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เขียนเมื่อครั้งก่อนหน้าและข้อมูลอาจไม่ตรงกับเอกสารฉบับปัจจุบัน การดำเนินการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.5 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV จ่ายแรงดันที่ 20 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 20 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 35.1 องศาเซลเซียส



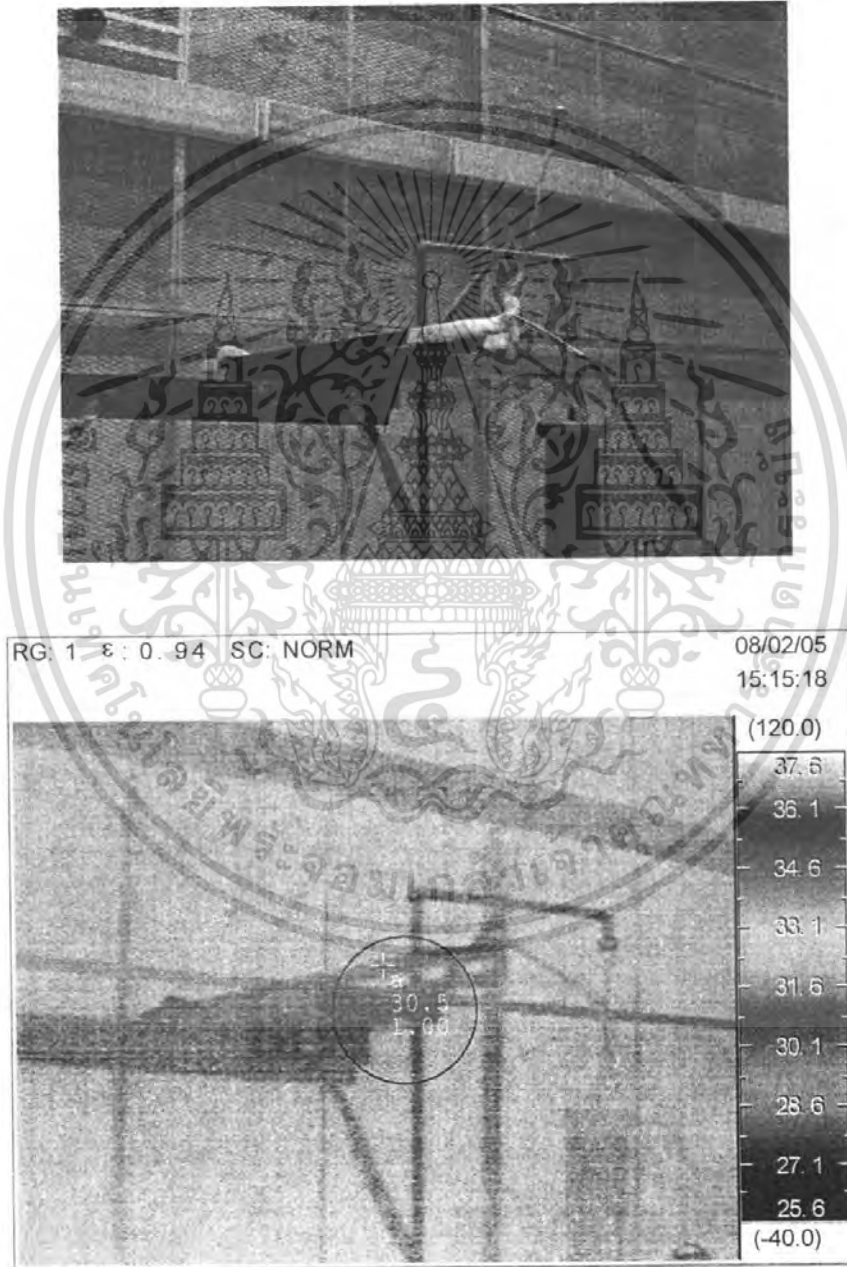
รูปที่ 5.18 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 11 kV

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

## 5.2.2 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV

### 5.2.2.1 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 3.3 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 3.3 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 30.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.19 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV

จ่ายแรงดันที่ 3.3 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 30.5 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.2 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 6.6 kV

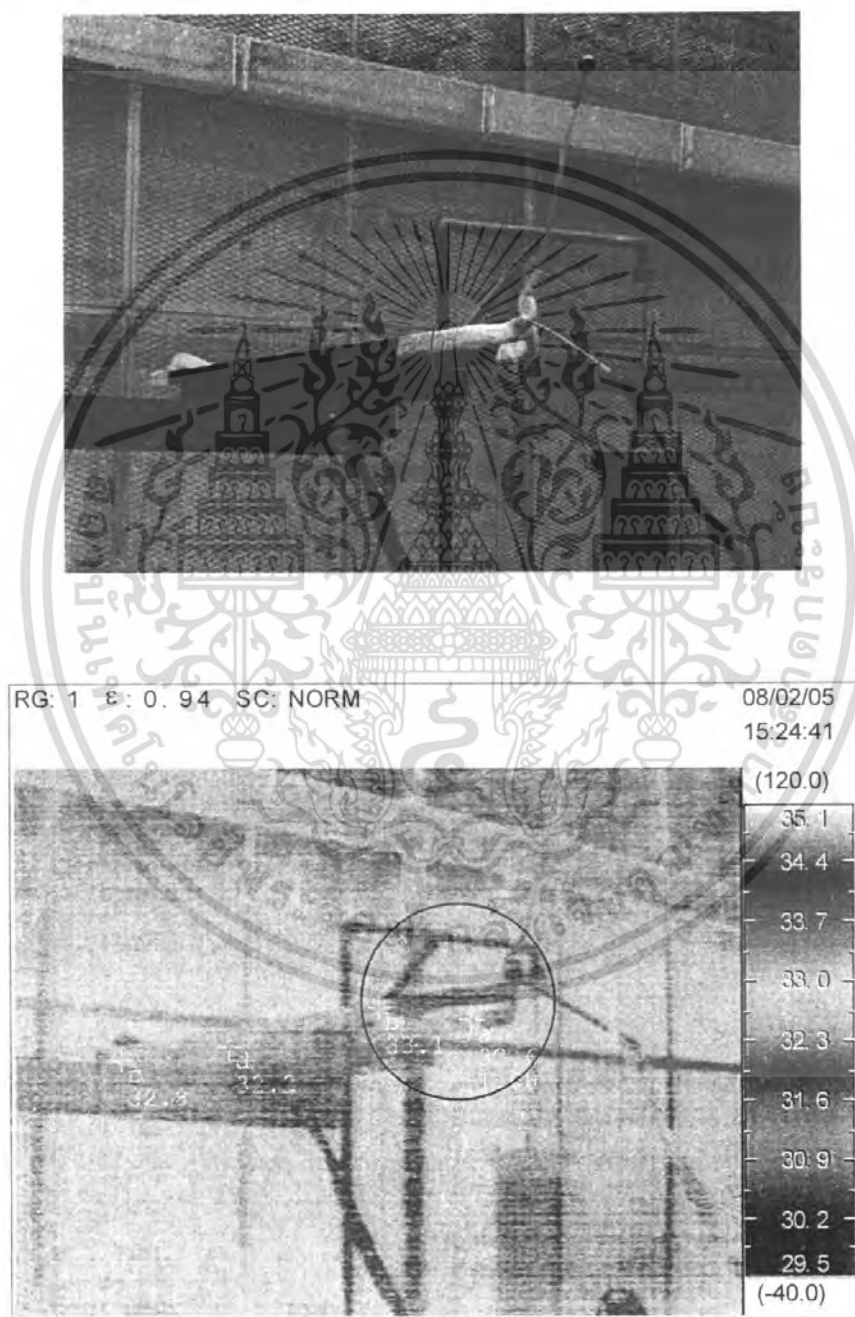
การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 6.6 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 30.9 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.20 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะจ่ายแรงดันที่ 6.6 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 30.9 องศาเซลเซียสไปใช้

### 5.2.2.3 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ พิกัด 9.9 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 9.9 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเคมีคอนคิตเตอรืกับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 33.1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.21 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV

จ่ายแรงดันที่ 9.9 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 33.1 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.2.2.4 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV จ่ายแรงดันที่ 13.2 kV

การทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV โดยทำการจ่ายแรงดันที่ระดับ 13.2 kV ให้กับสเตเตอร์และทำการตรวจเช็คอุณหภูมิด้วยกล้องตรวจจับความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ส่วนพื้นร่องของแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อระหว่างเซมิคอนดักเตอร์กับวัสดุความต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 34.3 องศาเซลเซียส



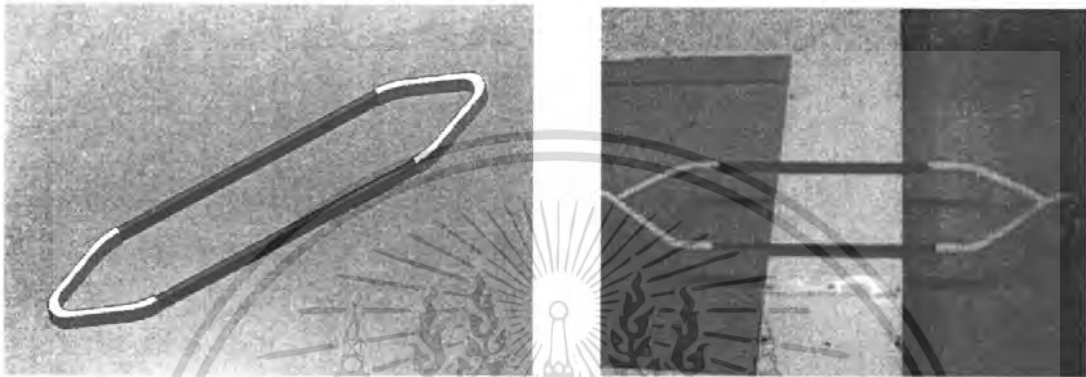
รูปที่ 5.22 ทดสอบอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์พิกัด 6.6 kV

จ่ายแรงดันที่ 13.2 kV และมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อทำการทดสอบเท่ากับ 34.3 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลการทดสอบการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน

#### 5.3.1 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องพิกัด 11 kV

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องพิกัด 11 kV
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนเครื่อง DDX DETECTOR 9101
3. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV



รูปที่ 5.23 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

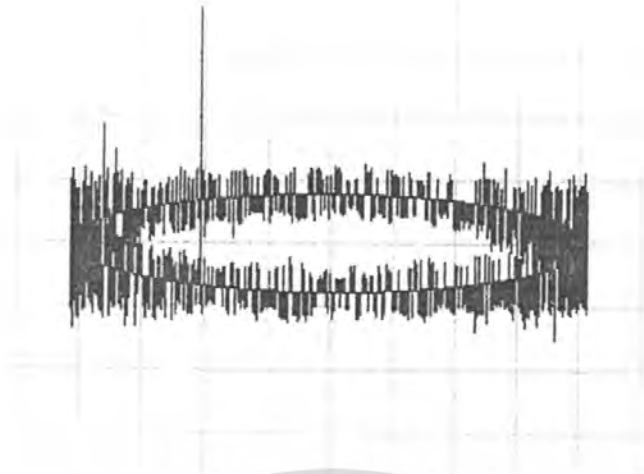
#### 4. การทดสอบ

- 1.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท
- 1.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส
- 1.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %
- 1.4 Background Noise 1.10 pC

#### 2. ผลการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

- 2.1 แรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จ 2.62 kV
- 2.2 ค่าดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 2.78 pC
- 2.3 ดีสชาร์จเกิดขึ้นในระดับแรงดันทดสอบ ดังรูป 5.24 – 5.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

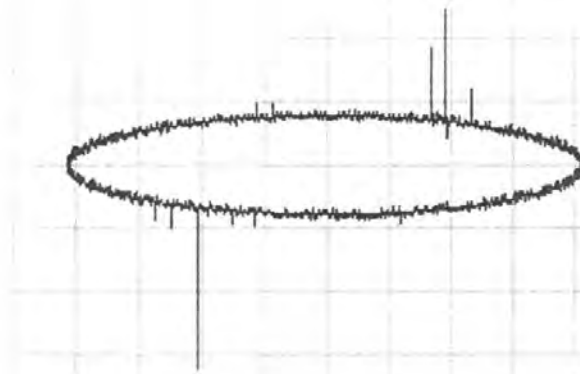


รูปที่ 5.24 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.62 kV  
ค่าดีสชาร์จ 2.78 pC ที่มุม 45 องศา



รูปที่ 5.25 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.72 kV  
ค่าดีสชาร์จ 24.29 pC ที่มุม 10, 45, 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.26 kV  
ค่าดีสชาร์จ 64.03 pC ที่มุม 135,305 องศา



รูปที่ 5.27 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.77 kV

ค่าดีสชาร์จ 433.83 pC ที่มุม 60-135, 137-305 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



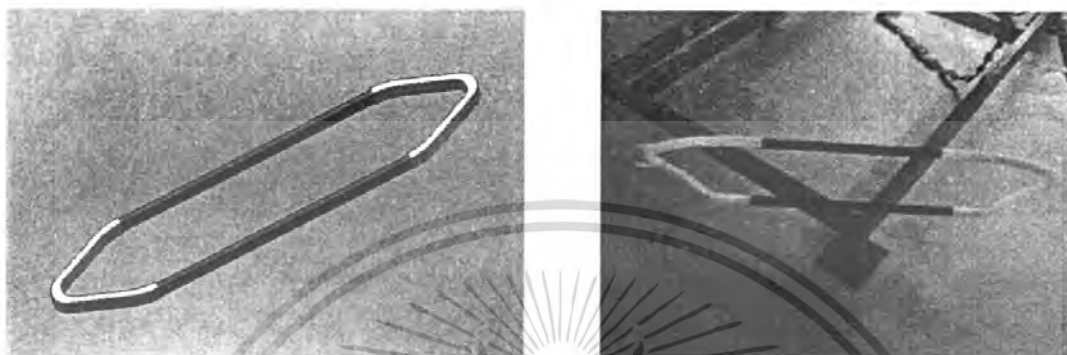
รูปที่ 5.29 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.09 kV

ค่าดีสชาร์จ 683.23 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องพิกัด 6.6 kV

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องพิกัด 6.6 kV
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101
3. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 6.6 kV



รูปที่ 5.30 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

#### 5. การทดสอบ

- 5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท
- 5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส
- 5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %
- 5.4 Background Noise 1.10 pC

#### 6. ผลการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

- 6.1 แรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จ 3.58 kV
- 6.2 ค่าดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 6.04 pC
- 6.3 ดีสชาร์จเกิดขึ้นระดับแรงดันทดสอบ ดังรูป 5.31 – 5.36



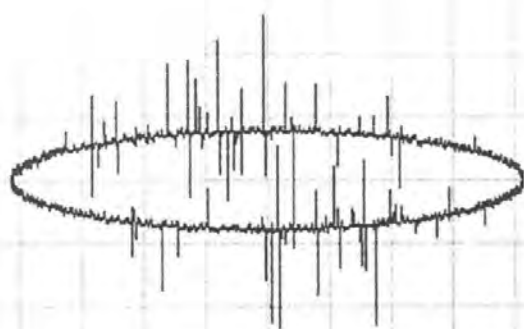
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์  
รูปที่ 5.31 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.51 kV ค่าดีสชาร์จ 1.70 pC ระเบียบด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.58 kV

ค่าดีสชาร์จ 6.04 pC ที่มุม 67.5, 100, 125, 315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.02 kV

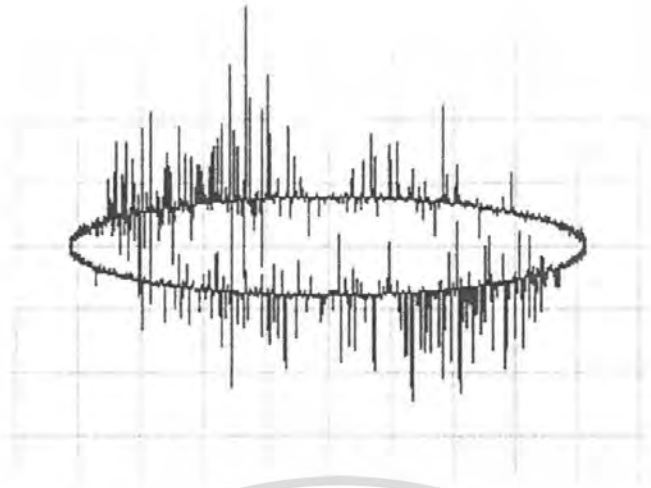
ค่าดีสชาร์จ 95.77 pC ที่มุม 22.5-135, 225-315 องศา



รูปที่ 5.35 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.60 kV

ค่าดีสชาร์จ 260.58 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-337.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

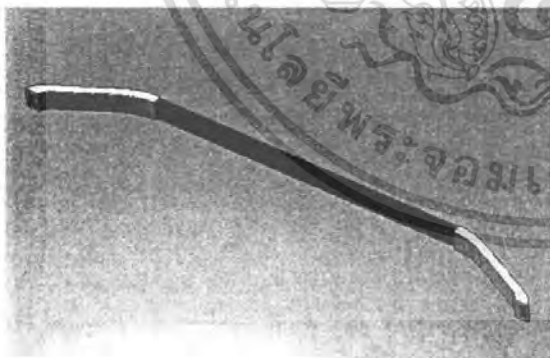


รูปที่ 5.36 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.14 kV

ค่าดีสชาร์จ 312.42 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-315 องศา

### 5.3.3 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัดพีกัดแรงดัน 11 kV

1. วัสดุทดสอบแท่งสแตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัดพีกัดแรงดัน 11 kV
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101
3. พีกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV



รูปที่ 5.37 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ

ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

#### 5. การทดสอบ

5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท

5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส

5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %

5.4 Background Noise 0.98 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. ผลการตรวจจับตีสชาร์จบางส่วน

6.1 แรงดันเริ่มเกิดตีสชาร์จ 3.00 kV

6.2 ค่าตีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 5.87 pC

6.3 ตีสชาร์จเกิดขึ้นระดับแรงดันทดสอบ ดังรูป 5.38 – 5.44



รูปที่ 5.39 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.76 kV ค่าตีสชาร์จ 2.98 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.40 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.00 kV

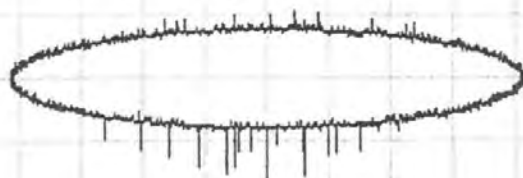
ค่าดีสชาร์จ 5.87 pC ที่มุม 90, 135, 270-337.5 องศา



รูปที่ 5.41 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.69 kV

ค่าดีสชาร์จ 22.42 pC ที่มุม 45-135, 225-315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.42 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.17 kV

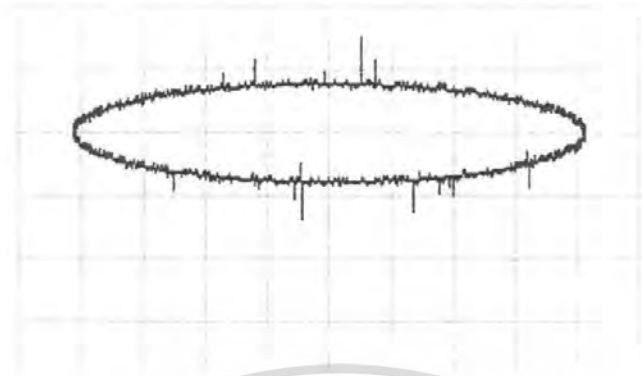
ค่าดีสชาร์จ 33.90 pC ที่มุม 45-135, 240-320 องศา



รูปที่ 5.43 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.69 kV

ค่าดีสชาร์จ 76.65 pC ที่มุม ที่มุม 45-90, 155, 225-315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



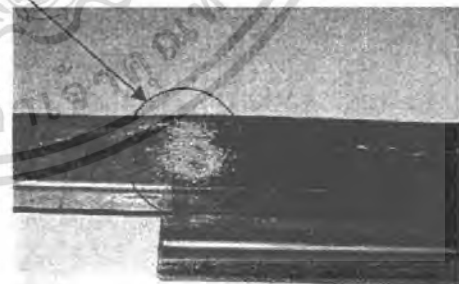
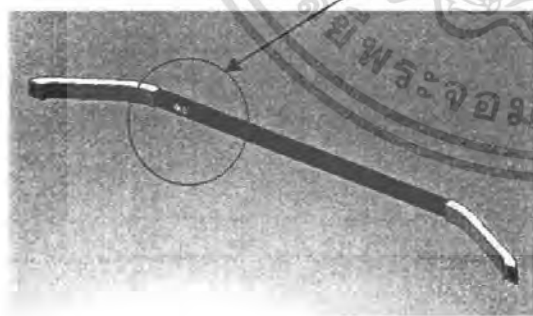
รูปที่ 5.44 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.04 kV

ค่าดีสชาร์จ 95.29 pC ที่มุม 45-110, 200-315 องศา

#### 5.3.4 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์
2. มีผงเหล็กติดอยู่แท่งสแตเตอร์ส่วนที่อยู่ในร่องสลิตปริมาณ 5 mg
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101
4. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV

ผงเหล็ก



รูปที่ 5.45 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ

ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

#### 5. การทดสอบ

- 5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท
- 5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส
- 5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5.4 Background Noise 0.98 pC ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.ผลการตรวจจับตีสชาร์จบางส่วน

6.1 แรงดันเริ่มเกิดตีสชาร์จ 2.36 kV

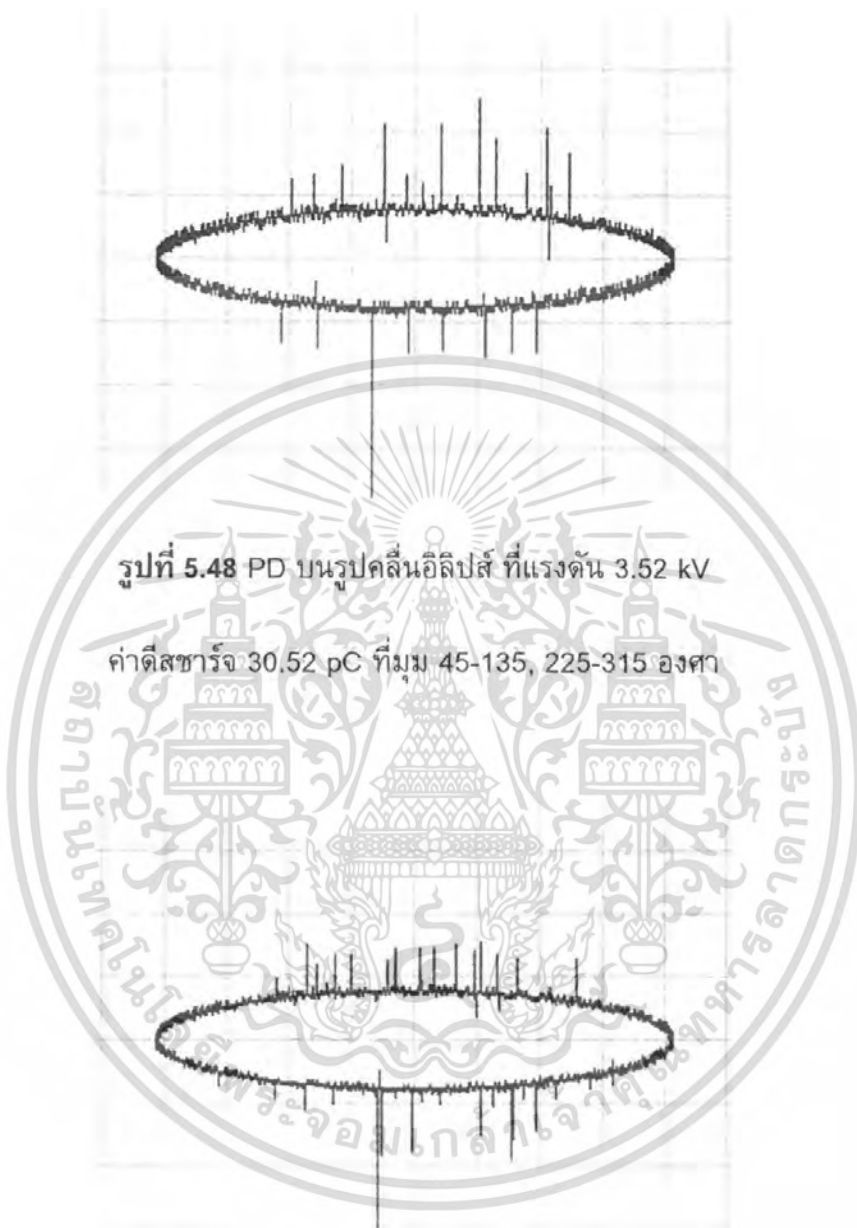
6.2 ค่าตีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 4.52 pC

6.3 5.ตีสชาร์จเกิดขึ้นระดับแรงดันทดสอบ 46 – 5.51



รูปที่ 5.47 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.02 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.48 PD บนรูปคลื่นอีลิปส์ ที่แรงดัน 3.52 kV

ค่าดีสชาร์จ 30.52 pC ที่มุม 45-135, 225-315 องศา

รูปที่ 5.49 PD บนรูปคลื่นอีลิปส์ ที่แรงดัน 4.09 kV

ค่าดีสชาร์จ 52.15 pC ที่มุม 45-135, 225-315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.50 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.63 kV

ค่าตีสชาร์จ 96.91 pC ที่มุม 0-90, 180-270องศา



รูปที่ 5.51 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.15 kV

ค่าตีสชาร์จ 321.29 pC ที่มุม 0-100, 180-280องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.5 แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์
2. ใส่น้ำมันซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์ส่วนที่อยู่ในร่องสลีต ปริมาณ 5 mg
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101
4. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV



รูปที่ 5.52 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

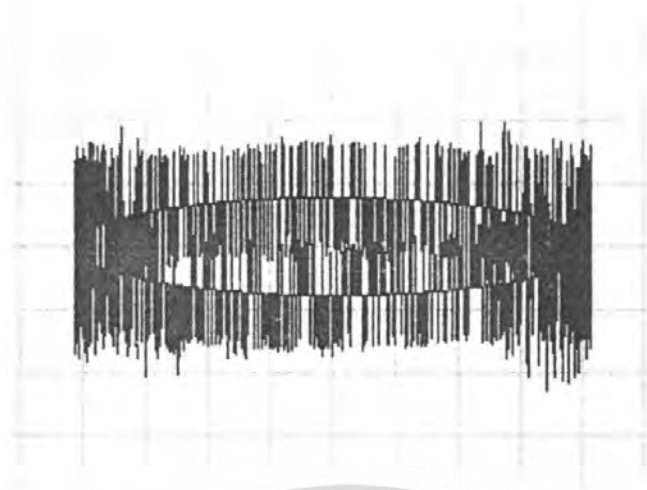
#### 5. การทดสอบ

- 5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท
- 5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส
- 5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %
- 5.4 Background Noise 1.10 pC

#### 6. ผลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

- 6.1 แรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จ 4.07 kV
- 6.2 ค่าดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 20.54 pC
- 6.3 ดิสชาร์จเกิดขึ้นระดับแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 5.53 – 5.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.53 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.51 kV ค่าดีสชาร์จ 1.45 pC



รูปที่ 5.54 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.11 kV ค่าดีสชาร์จ 1.51 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

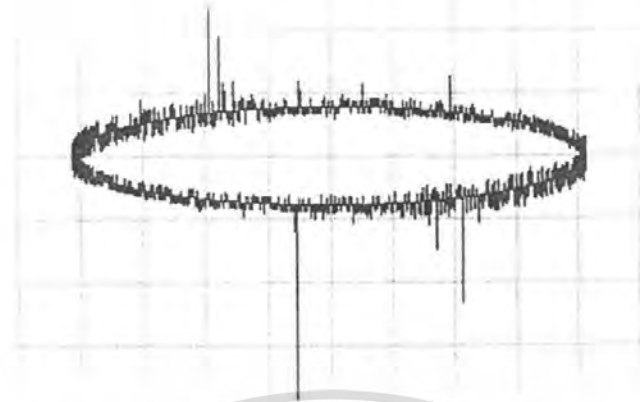


รูปที่ 5.55 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.52 kV ค่าดีสชาร์จ 1.65 pC

รูปที่ 5.56 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.07 kV

ค่าดีสชาร์จ 20.54 pC ที่มุม 45, 110, 225, 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.57 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.55 kV

ค่าดีสชาร์จ 40.06 pC ที่มุม 45, 135, 225, 280 องศา



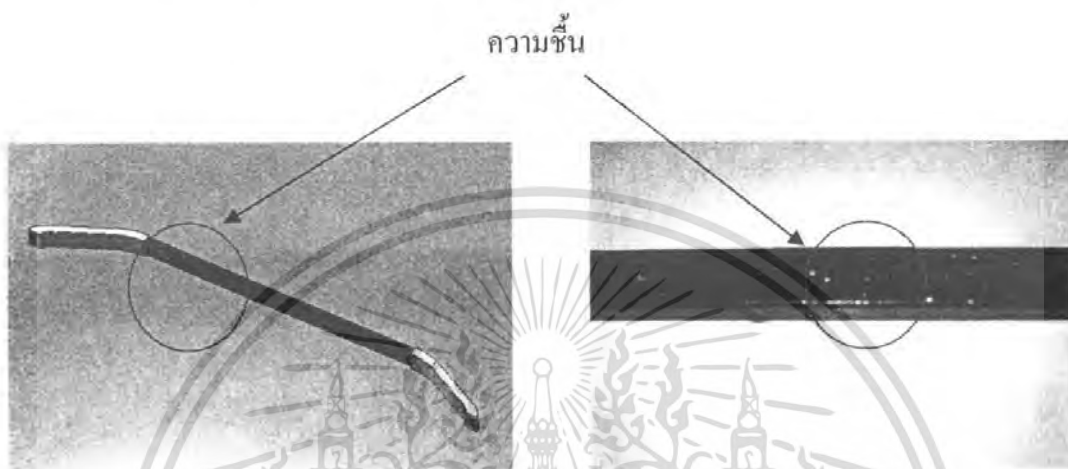
รูปที่ 5.58 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.19 kV

ค่าดีสชาร์จ 178.88 pC ที่มุม 20, 65, 95, 350 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.6 แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์
2. ใส่ละอองน้ำเข้าไปในแท่งสแตเตอร์ส่วนที่อยู่ในร่อง
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101
4. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV



รูปที่ 5.59 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

#### 5. การทดสอบ

- 5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท
- 5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส
- 5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %
- 5.4 Background Noise 1.10 pC

#### 6. ผลการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

- 6.1 แรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จ 3.04 kV
- 6.2 ค่าดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 10.56 pC
- 6.3 ดังรูปที่ 5.50 – 5.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



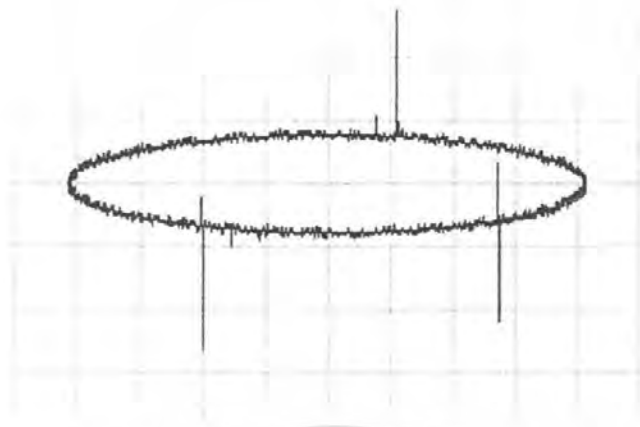
รูปที่ 5.60 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.47 kV ค่าดีสชาร์จ 1.54 pC



รูปที่ 5.61 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.04 kV

ค่าดีสชาร์จ 10.56 pC ที่มุม 22.5-45, 140, 220, 315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.62 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.53 kV

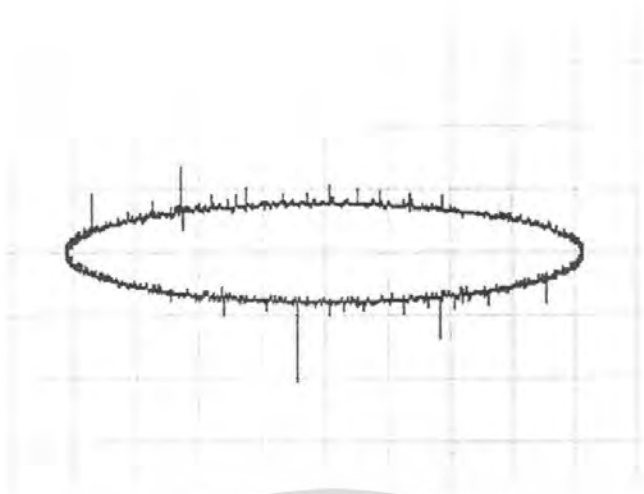
ค่าดีสชาร์จ 59.45 pC ที่มุม 112.5, 202.5, 315 องศา



รูปที่ 5.63 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.17 kV

ค่าดีสชาร์จ 51.86 pC ที่มุม 45-90, 225-315 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.64 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.25 kV

ค่าดีสชาร์จ 195.09 pC ที่มุม 10-135, 190-315 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.7 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือฉนวนส่วนพื้นร่องมีรอยขีด

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสเตเตอร์ที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือฉนวนส่วนพื้นร่องมีรอยขีด
2. ขูดแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อของชั้นความต้านทานต่ำด้านการเกิดโคลไลนา และเทปเคลือบลดความเครียดให้มีขนาด 1x1 cm.
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101
4. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV



รูปที่ 5.65 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

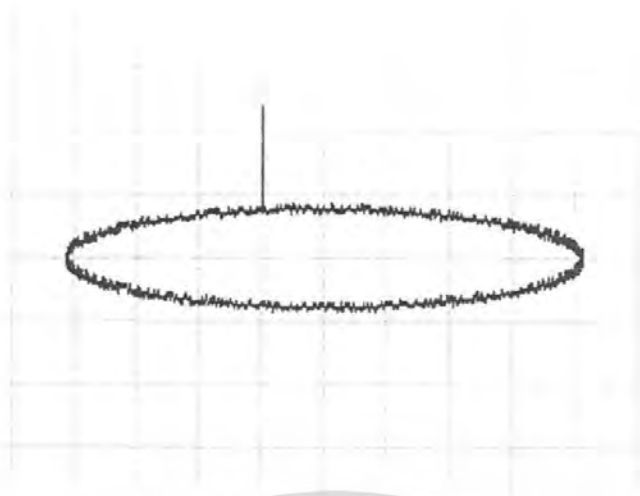
#### 5. การทดสอบ

- 5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท
- 5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส
- 5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %
- 5.4 Background Noise 1.10 pC

#### 6. ผลการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

- 6.1 แรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จ 2.24 kV
- 6.2 ค่าดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 23.87 pC
- 6.3 ดีสชาร์จเกิดขึ้นระดับแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 5.66 – 5.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.66 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.24 kV

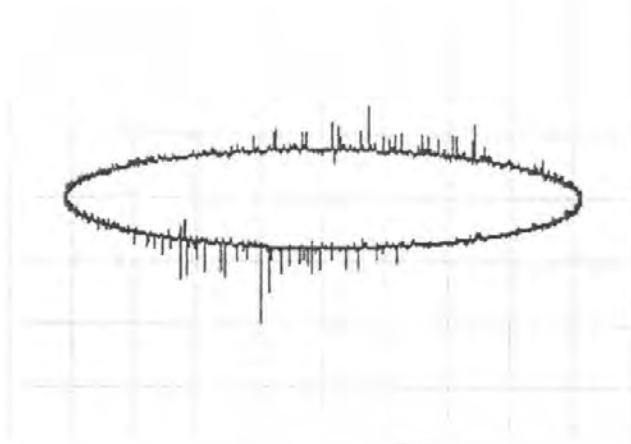
ค่าดีสชาร์จ 23.87 pC ที่มุม 67.5 องศา



รูปที่ 5.67 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 2.90 kV

ค่าดีสชาร์จ 86.96 pC ที่มุม 0-22.5, 180, 337.5-360 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.68 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.43 kV

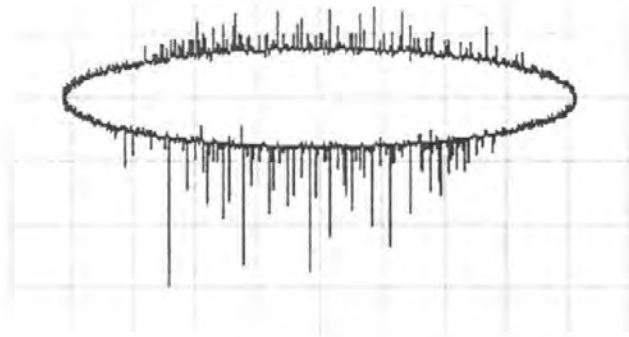
ค่าดีสชาร์จ 176.38 pC ที่มุม 67.5-135, 245-337.5 องศา



รูปที่ 5.69 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.00 kV

ค่าดีสชาร์จ 153.23 pC ที่มุม 45-135, 225-337.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.70 PD บนรูปคลื่นอีลิปส์ ที่แรงดัน 4.51 kV

ค่าดีสชาร์จ 345.09 pC ที่มุม 22.5-135, 202.5-337.5 องศา



รูปที่ 5.71 PD บนรูปคลื่นอีลิปส์ ที่แรงดัน 5.14 kV

ค่าดีสชาร์จ 360.51 pC ที่มุม 22.5-157.5, 202.2-337.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

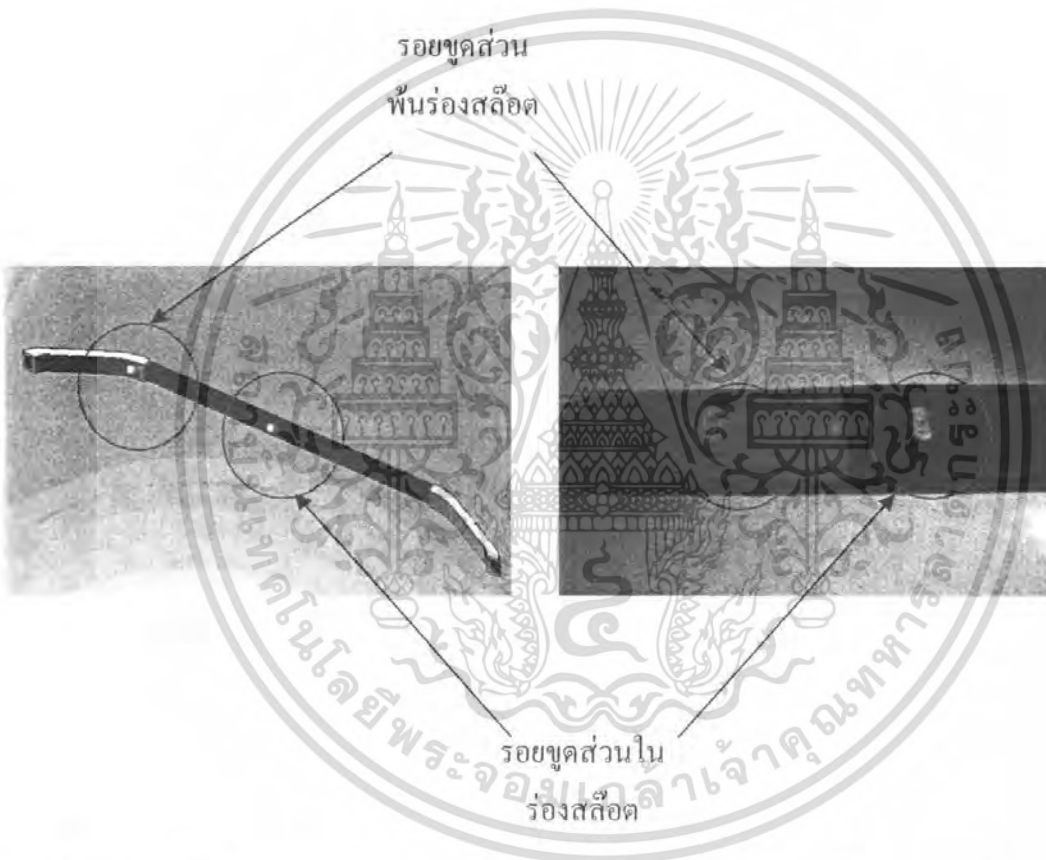
### 5.3.8 แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด

1. วัสดุทดสอบประเภทแท่งสเตเตอร์ที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด

2. ขูดแท่งสเตเตอร์บริเวณรอยต่อของชั้นความต้านทานต่ำด้านการเกิดโคโลนาและเทปเคลือบลดความเครียดให้มีขนาด 1x1 cm. และขูดที่ผิววัสดุความต้านทานต่ำที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ผิวฉนวนออกบางส่วนขนาด 1x1 cm.

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน เครื่อง DDX DETECTOR 9101

4. พิกัดแรงดันของวัสดุทดสอบ 11 kV



รูปที่ 5.72 ก) ตัวอย่างวัสดุที่ทำการทดสอบ

ข) รูปภาพวัสดุทดสอบจริง

#### 5. การทดสอบ

5.1 ความดันบรรยากาศ 765.9 มิลลิเมตรปรอท

5.2 อุณหภูมิแวดล้อม 28 องศาเซลเซียส

5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ 68.5 %

5.4 Background Noise 1.10 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. ผลการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

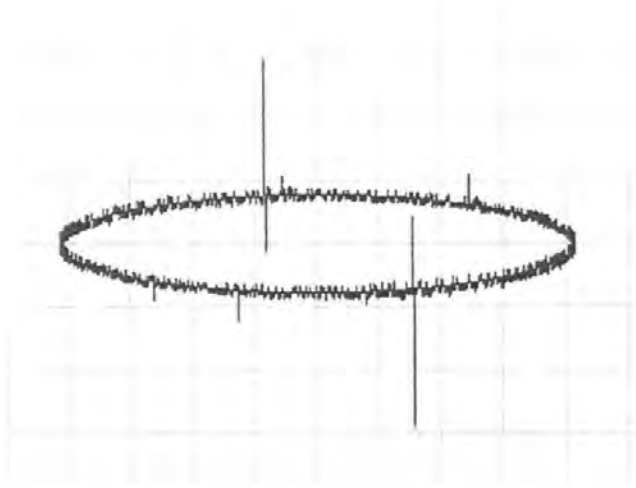
- 6.1 แรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จ 3.01 kV
- 6.2 ค่าดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด 19.99 pC
- 6.3 ดีสชาร์จเกิดขึ้นระดับแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 5.73 – 5.78



รูปที่ 5.74 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.01 kV

ค่าดีสชาร์จ 19.99 pC ที่มุม 80, 265 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.75 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 3.52 kV

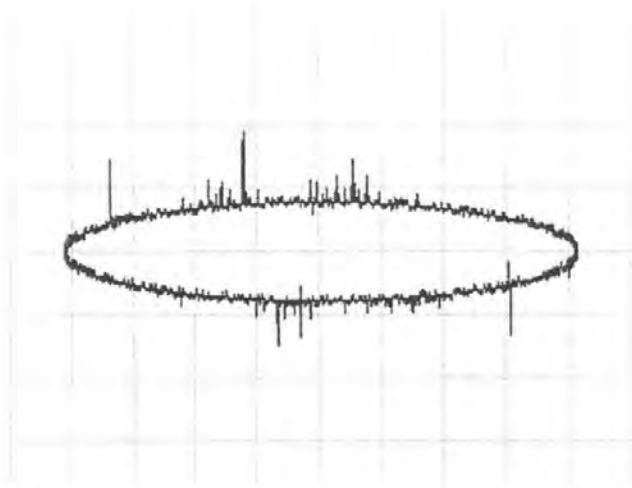
ค่าดีสชาร์จ 14.07 pC ที่มุม 70, 140, 230, 290-337.5 องศา



รูปที่ 5.76 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.10 kV

ค่าดีสชาร์จ 19.42 pC ที่มุม 20-112.5, 200-300 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.77 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 4.67 kV

ค่าดีสชาร์จ 52.28 pC ที่มุม 15-112.5, 202.5-292.5 องศา



รูปที่ 5.78 PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.18 kV

ค่าดีสชาร์จ 210.60 pC ที่มุม 10-112.5, 202.5-280 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

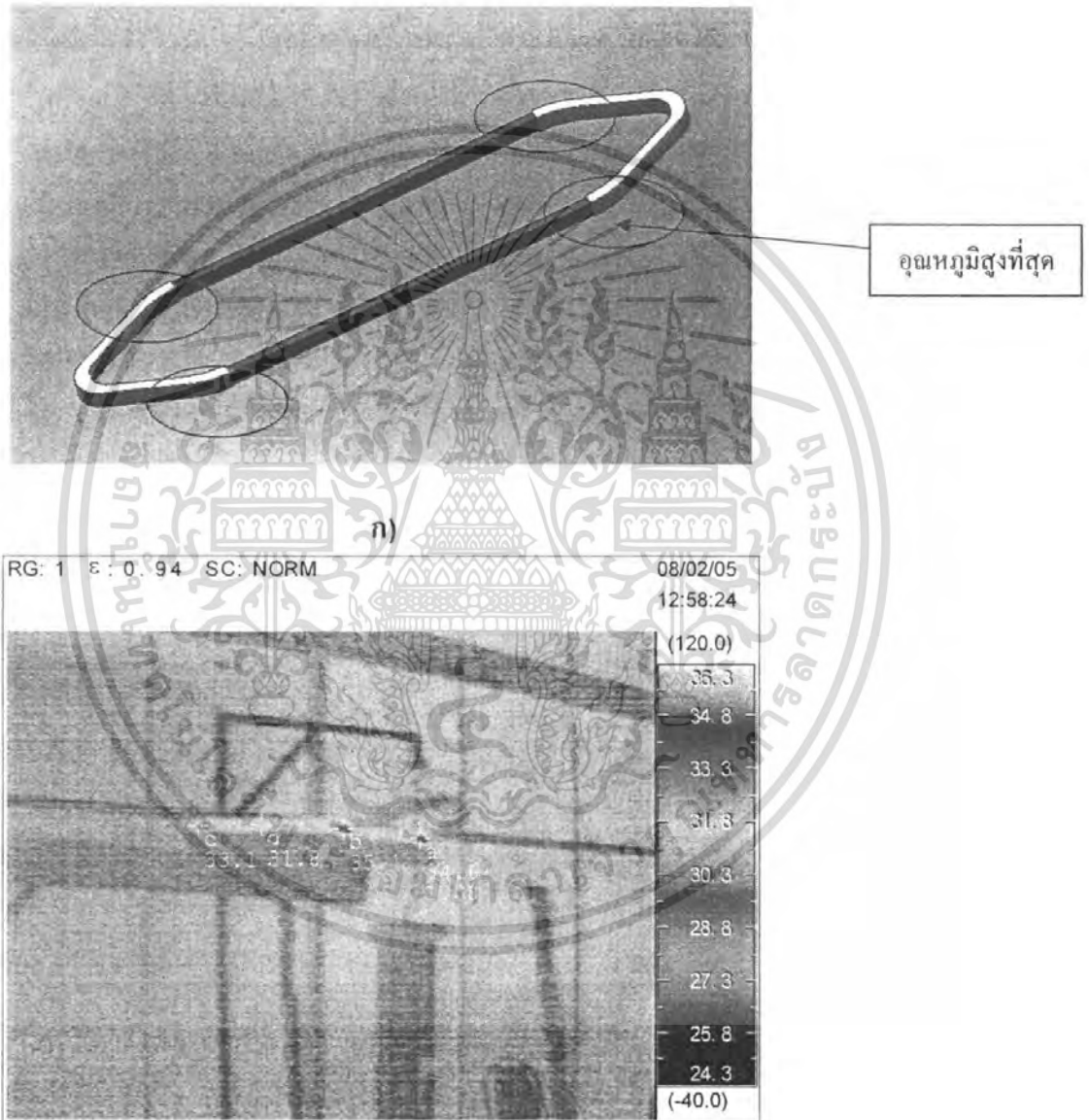
## 5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 5.4.1 วิเคราะห์ผลของรูปแบบของสนามไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในร่องสลีตของแบบจำลองแท่งที่พิกัด 11 kV ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์

จากข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองแท่งสเดเตอร์ที่พิกัด 11 kV ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นสูงที่สุดที่มุมของแท่งตัวนำของแดงสำหรับฉนวนที่ไม่มีจุดบกพร่อง อธิบายได้ดังรูปที่ 5.1 และเมื่อจำลองให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นในเนื้อของฉนวนกราวด์แล้วความเครียดของสนามไฟฟ้าที่จุดบกพร่องนั้นจะมีค่ามากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งและขนาดของจุดบกพร่องนั้นๆ ซึ่งถ้าความเครียดของสนามไฟฟ้านั้นมีค่ามากกว่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(Dielectric Strength) ของฉนวนของจุดบกพร่องนั้น ก็เกิดการปล่อยประจุขึ้นได้ที่จุดจุดบกพร่องนั้นได้ และผลที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์จะเห็นได้ว่าจุดบกพร่องที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งจุดบกพร่องแตกต่างกันและสามารถเปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งจุดบกพร่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด ไป น้อยที่สุดได้ดังนี้ คือ รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับตัวนำทองแดง รอยแยกระหว่างฉนวนกราวด์กับเซมิคอนดักเตอร์ โพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนบริเวณส่วนมุมของทองแดง จุดบกพร่องคือโพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน และ แท่งสเดเตอร์ที่เกิดจากรอยถลอกของเซมิคอนดักเตอร์ ตามลำดับ

### 5.4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบอุณหภูมิ

จากการตรวจจับอุณหภูมิด้วยกล้องเทอร์โมสแกนจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของแท่งสเตเตอร์จะแตกต่างกันในแต่ละช่วงของแท่งสเตเตอร์ คือส่วนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดคือส่วนบริเวณพื้นร่องที่โค้งตรงที่บริเวณรอยต่อของชั้นความต้านทานต่ำต้านการเกิดโคโรนาและเทปเคลือบลดความเครียดดังรูปที่ 5.79 แสดงส่วนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของแท่งสเตเตอร์



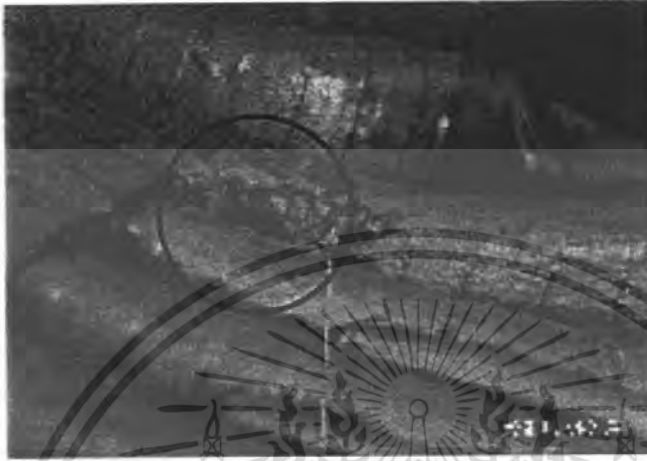
ข)

รูปที่ 5.79 ก) แสดงส่วนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของแท่งสเตเตอร์

ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องเทอร์โมสแกน

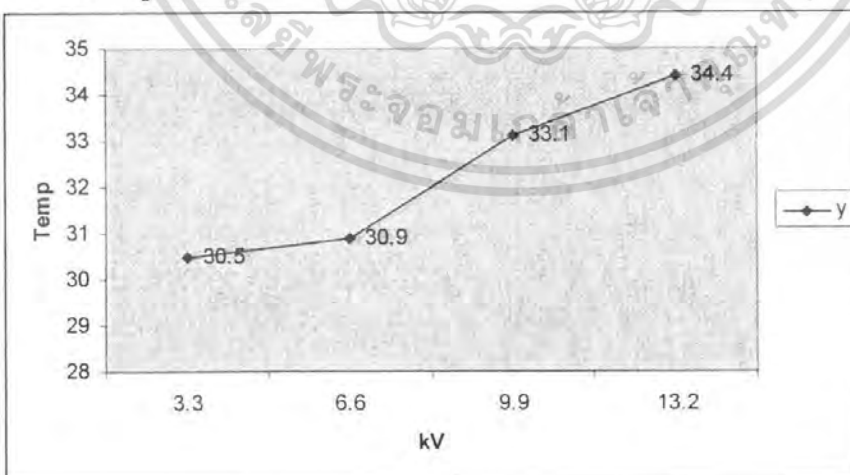
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่าฉนวนส่วนบริเวณพื้นร่องได้รับอุณหภูมิสูงสุด และมีโอกาสเสียหายมากที่สุด เพราะว่ายิ่งฉนวนใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงแล้วโอกาสที่จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนยิ่งลดลงด้วย และจะเห็นได้ว่าในกรณีของลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณส่วนพื้นร่องบ่อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 5.80 รูปภาพจริงที่เกิดความเสียหายของฉนวนส่วนพื้นร่อง



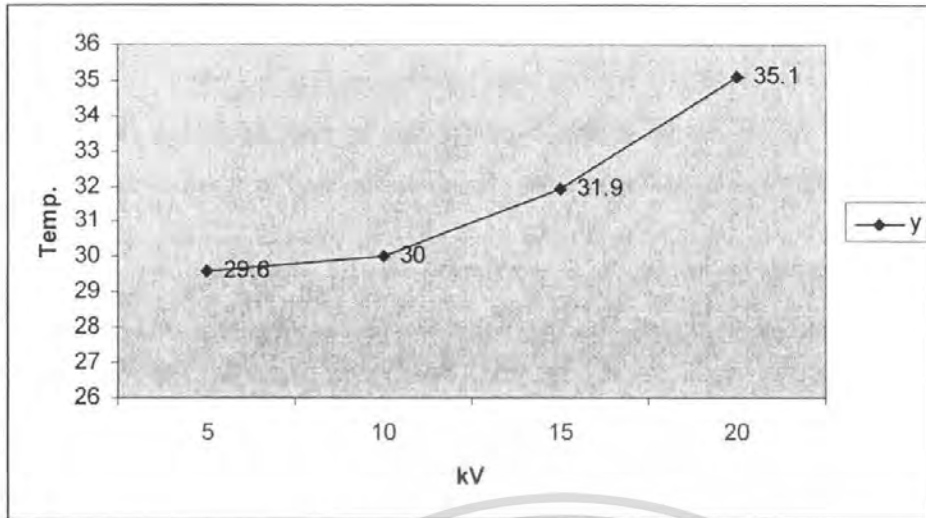
รูปที่ 5.80 รูปภาพจริงที่เกิดความเสียหายของฉนวนส่วนพื้นร่อง

จากการทดลองจะทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบผลของอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 50 เฟอร์เซนต์ 100 เฟอร์เซนต์ 150 เฟอร์เซนต์ และ 200 เฟอร์เซนต์ตามลำดับ และนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจจับได้กับค่าแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสเตเตอร์ของแท่งสเตเตอร์ที่พิกัดแรงดัน 6.6 kV และแท่งสเตเตอร์ที่พิกัดแรงดัน 11 kV ดังรูปที่ 5.81



ก)

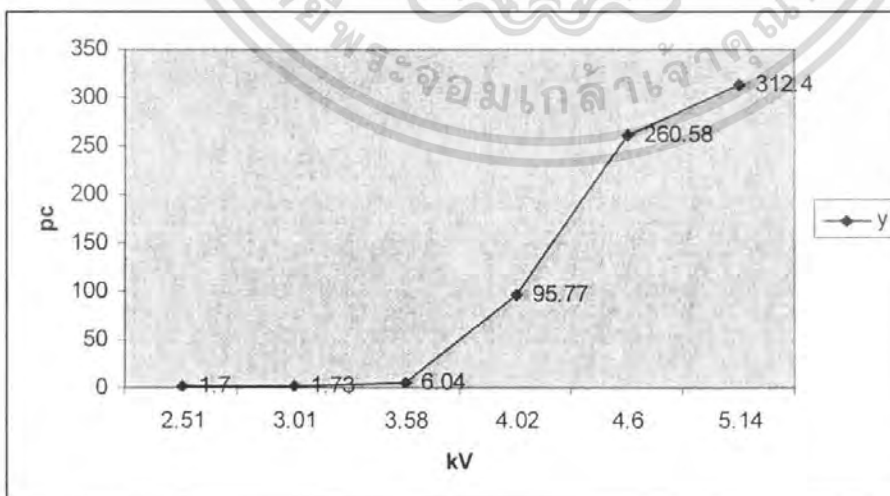
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)

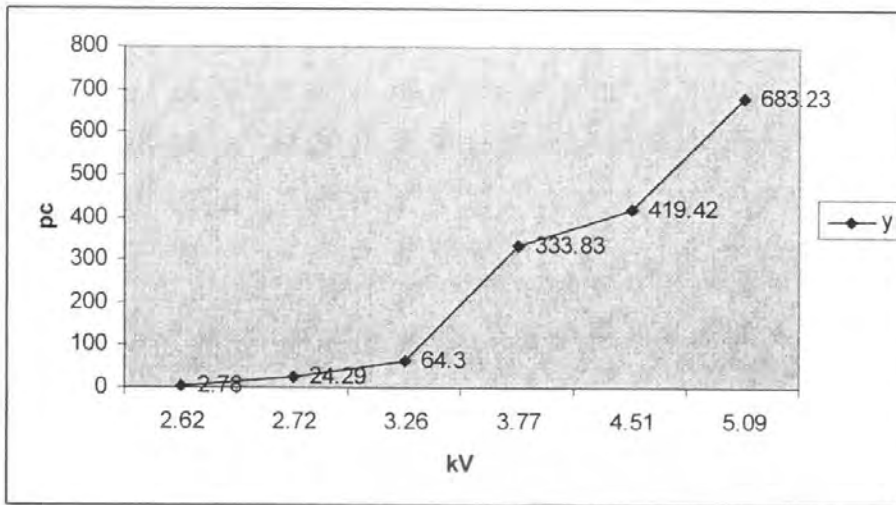
**รูปที่ 5.81** ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสูงสุดกับค่าแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสเตเตอร์ ก) พิกัดแรงดัน 6.6 kV ข) พิกัดแรงดัน 11 kV

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสเตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าของอุณหภูมิสูงสุด ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วยดังกราฟรูปที่ 5.82 และเมื่อทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปล่อยประจุบางส่วน (pc) และค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสเตเตอร์ดังรูปที่ 5.82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปล่อยประจุบางส่วน (pc) และค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสเตเตอร์ดังการทดลองที่ 5.3.1 และ 5.3.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อระดับแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสเตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วจะทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเพิ่มขึ้นไปด้วย



ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)

รูปที่ 5.82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปล่อยประจุบางส่วน (pc) และค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับแท่งสแตเตอร์ ก) แท่งสแตเตอร์พิกัด 6.6kV ข) แท่งสแตเตอร์พิกัด 11kV



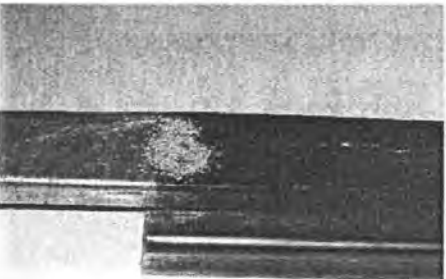
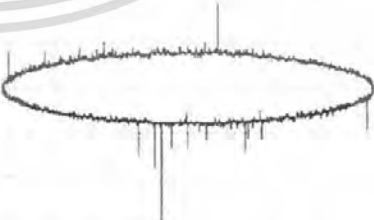


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน

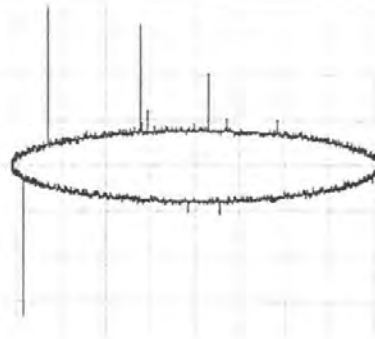
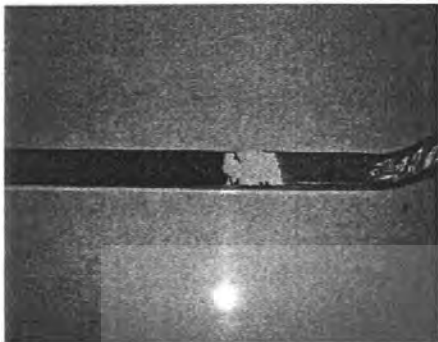
สรุปผลการทดลองที่เกิดขึ้นในการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนที่จุดบกพร่องต่าง ๆ กัน

สรุปผลการทดลองที่เกิดขึ้นในการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนที่จุดบกพร่องต่าง ๆ กัน แสดงผลดังตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนที่แบบจำลองจุดบกพร่องต่าง ๆ กัน

ชนิดของการทดสอบ	รูปสัญญาณที่เกิดขึ้น
<p>1.แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัดพีกัดแรงดัน 11 kV</p> 	 <p>รูป PD บนรูปคลื่นอีลิปส์ ที่แรงดัน 5.04 kV ค่าดีสชาร์จ 95.29 pC ที่มุม 45-110, 200-315 องศา</p>
<p>2. แบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์</p> 	 <p>รูป PD บนรูปคลื่นอีลิปส์ ที่แรงดัน 5.15 kV ค่าดีสชาร์จ 321.29 pC ที่มุม 0-100, 180-280 องศา</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสแตเตอร์



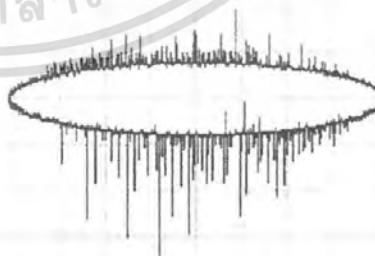
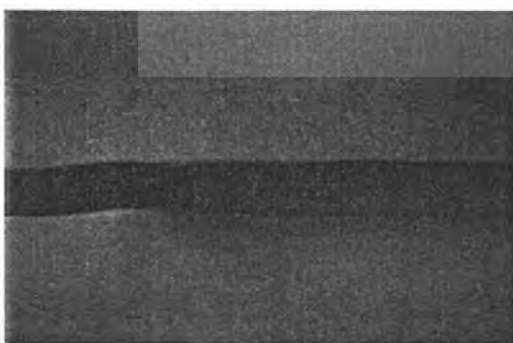
รูป PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.19 kV ค่าดีสชาร์จ 178.88 pC ที่มุม 20, 65, 95, 350 องศา

4.แบบจำลองแท่งสแตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสแตเตอร์



รูป PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.25 kV ค่าดีสชาร์จ 195.09 pC ที่มุม 10-135, 190-315 องศา

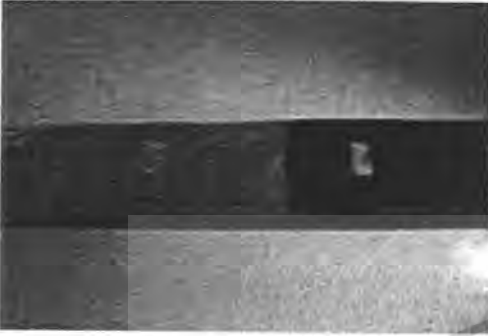
5.แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องคือฉนวนส่วนพื้นร่องมีรอยขีด



รูป PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.14 kV ค่าดีสชาร์จ 360.51 pC ที่มุม 22.5-157.5, 202.2-337.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่อง และส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่อง และในร่องสลีตมีรอยขีด



รูป PD บนรูปคลื่นอิลิปส์ ที่แรงดัน 5.18 kV ค่าทีสชาร์จ 210.60 pC ที่มุม 10-112.5, 202.5-280 องศา

### ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบดีเอสอาร์บางส่วนที่แบบจำลองจุดบกพร่องต่างๆกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าดีเอสอาร์บางส่วนเริ่มเกิดและค่ามุมเริ่มเกิดของการปล่อยประจุบางส่วนแตกต่างกันออกไปและรูปแบบของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนแตกต่างกันด้วยและสามารถเปรียบเทียบขนาดของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจากน้อยไปหามากได้ดังนี้คือ หนึ่งแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่ไม่มีจุดบกพร่องแบบตัดพิกัดแรงดัน 11 kV สองแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงฝุ่นติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์ สามแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะความชื้นเกาะอยู่ที่แท่งสเตเตอร์ สี่แบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด ห้าแบบจำลองแท่งสเตเตอร์ที่มีมลภาวะมีผงเหล็กติดอยู่บนแท่งสเตเตอร์ และหกแบบจำลองที่มีจุดบกพร่องที่ส่วนพื้นร่องและส่วนในร่องสลีตคือฉนวนส่วนพื้นร่องและในร่องสลีตมีรอยขีด ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นวิธีการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำมาใช้ทดสอบและวิเคราะห์หาสาเหตุจุดบกพร่องในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ได้เป็นอย่างดี ด้วยความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือตรวจจับการปล่อยประจุบางส่วนทำให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าเดิม

ผลการศึกษาอนุภูมิที่ตรวจจับได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อนุภูมิจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงของแท่งสเตเตอร์และส่วนที่มีอนุภูมิสูงที่สุดคือส่วนบริเวณพันร่องที่โค้งงอตรงที่บริเวณรอยต่อของชั้นความต้านทานต่ำต้านการเกิด โครโรนา และเทปเคลือบลดความเครียด และทำให้บริเวณนี้เกิดความเสียหายบ่อยที่สุด

2. การศึกษาอนุภูมิที่ตรวจจับได้เมื่อมีการเพิ่มแรงดันขึ้นไปจะพบว่า อนุภูมิก็จะเพิ่มขึ้น และ การเกิดการปล่อยประจุบางส่วนก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังที่สรุปไว้ในบทที่ 5

ผลการศึกษาการปล่อยประจุบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเพื่อหารูปแบบเฉพาะนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนเป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการจำแนกประเภทของจุดบกพร่องต่างๆได้

2. แบบจำลองแต่ละแบบมีรูปแบบการปล่อยประจุที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกจุดบกพร่องในแบบจำลองแต่ละประเภทโดยรูปแบบการกระจายข้อมูลแบบสองมิติ ดังที่สรุปไว้ในบทที่ 5

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วนนั้นเป็นเพียงการศึกษาในส่วนของแบบจำลองเท่านั้น ยังไม่ได้นำไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบในอุปกรณ์จริงซึ่งมีความซับซ้อนของตัวอุปกรณ์และมีปัจจัยอื่นอีกมากที่มีผลต่อการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งอาจจะทำให้ผลการทดสอบมีความแตกต่างกันออกไป การออกแบบจำลองขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบจุดบกพร่องแต่ละตำแหน่งจึงพยายามออกแบบให้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์จริงให้มากที่สุด เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดบกพร่องในอุปกรณ์จริงได้

2. ควรมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องโดยทำการทดสอบจากอุปกรณ์จริง และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลการทดสอบมาปรับใช้กับอุปกรณ์จริงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Zhu, V. Green, D. Huynh. **Life Extension on Rotating Machine Insulation Using On-Line PD Testing**. IEEE 2002.
- [2] ศุภวัตร น้าประเสริฐ. การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตมหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
- [3] ณรงค์ ทองฉิม. เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตมหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533
- [4] A.Kheirmand. **Partial Discharges in Large Rotating Machines. Continuous On-Line Monitoring and Localisation, Based on a New Developed Technique (InTech)**. Department of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Goteborg, Sweden 2002.
- [5] **MICAMAXX®pdplus Partial Discharge Basics**, Seestrassse 14b | 5432 Neuenhof - Switzerland, PDTACH Power Engineering AG, [www.pdtech.ch](http://www.pdtech.ch) ,E-Mail: [info@pdtech.ch](mailto:info@pdtech.ch)
- [6] **On-Line Partial Discharge Testing For Motors And Generator**, Iris Power Engineering, Inc. 30 September 2004, [www.irispower.com](http://www.irispower.com).
- [7] รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

สามารถศึกษาข้อมูลต่อไปนี้ได้จาก Electrical Power Engineering Laboratory II, ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- วิธีการจัดเตรียมรายงานผลการทดสอบ PD และวิธีการวัด PD ของเครื่อง PD DETECTOR DDX – 9101
- การปรับเทียบค่าเก็บประจุในวงจรวัด PD
- การจ่ายแรงดันทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับ PD ตามมาตรฐาน IEC โครงการนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดตาม IEC 270(1981) ซึ่งยังคงใช้อยู่ถึงปัจจุบันนี้ และ IEC 60270(1998 ฉบับร่าง)ที่มีการแก้ไข ข้อบกพร่องและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนด วิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติ เพื่อให้การตรวจจับหรือการวัด PD มีความถูกต้องและเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งจะมาแทน IEC 270(1981) ในอนาคตอันใกล้นี้ ซึ่งข้อกำหนดตาม IEC 60270 จะครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อตาม IEC 270 ส่วนกรณีที่ใช้เครื่องตรวจจับ PD ในการวัด PD ในสายเคเบิลนั้น เครื่องตรวจจับ PD จะต้องมีความสัมพันธ์เพิ่มเติมตามมาตรฐาน IEC 885-3

#### 1. ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC 270

##### ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติของเครื่องตรวจจับ PD ที่สำคัญมีดังนี้

- 1) เวลาแยกชัดของพัลส์ (Pulse resolution time) ของเครื่องตรวจจับ PD ต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาที ในกรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากเกิดชุปเปอร์โพสิชันของพัลส์ PD
- 2) เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน ที่ใช้ในการปรับเทียบวงจรทดสอบ ได้กำหนดให้แรงดันรูปขึ้นของเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานมีช่วงเวลาขึ้น (rise time) ไม่เกิน 0.1 ไมโคร วินาที และแรงดันค่อยๆ ลดลงด้วยเวลาลดถอย (decay time) อยู่ในช่วง 100 ไมโครวินาที ถึงหลักพันของไมโคร วินาที และ  $C_0 \leq 0.1 (C_a + C_k)$

#### 2. ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC60270

มาตรฐาน IEC 60270 มีการแก้ไขและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนดวิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติหลายประการ

##### 2.1 นิยามเพิ่มเติมและนิยามที่กำหนดใหม่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรง

นิยามเพิ่มเติมและนิยามที่กำหนดใหม่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกแบบเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนได้แก่

- 1) Pulse Repetition Frequency, N คือจำนวนพัลส์ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์ทุกคู่ เท่ากันที่นับได้ต่อวินาที
- 2) Phase Angle,  $\phi$ , และ Time,  $t$ , ของพัลส์ PD ที่เกิดขึ้น กำหนดดังนี้  

$$\phi_i = 360(t_i / T)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $t_r$  คือ เวลาที่เริ่มมมเฟสของแรงดันทดสอบ เริ่มที่มุมศูนย์องศาจนถึงเวลาที่เกิดพัลส์ PD

T คือ คาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ

3) Transfer impedance,  $Z(f)$  ในที่นี้ใช้  $Z_m(f)$  แทน  $Z(f)$  ของระบบวัด PD คือ อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อกระแสอินพุตของระบบวัด PD โดยการป้อนกระแสที่มีขนาดคงที่รูปไซน์ที่อินพุตและปรับเปลี่ยนความถี่เพื่อหาอัตราส่วนดังกล่าวที่ความถี่ต่างๆ

4) ความถี่จำกัดล่างและบน (lower and upper frequencies,  $f_1$  and  $f_2$ ) คือ ความถี่ที่ขนาด transfer impedance,  $Z(f)$  มีค่าลดลง 6 dB จากค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน

$$5) \text{แบนด์วิดท์, } \Delta f = f_2 - f_1 \text{ และ midband frequency, } f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

## 2.2 ระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ

คุณสมบัติที่สำคัญของระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏมีดังนี้

1) ระบบวัดประจุที่ปรากฏ(q)นี้จะวัดเฉพาะค่ายอดพัลส์ของ PD ที่มีค่าสูงสุดและเกิดซ้ำๆ ทุกคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ การอ่านค่าของอุปกรณ์วัดจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรตรวจจับค่ายอดแบบแอนะล็อกที่มีค่าคงตัวทางเวลาของการอัดประจุ (electric charging time constant) สั้นมาก และมีค่าคงตัวทางเวลาของการคายประจุ (electric discharging time constant)  $\leq 0.44$  วินาที การตอบสนองของระบบวัดที่มีต่อพัลส์ของ PD ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์เท่ากันที่ถูกป้อนด้วย Pulse repetition frequency, N จะทำให้ค่าที่ระบบวัดอ่านได้ R เป็นตามตารางต่อไปนี้ โดยสมมติว่าพิสัย (range) และอัตราขยาย (gain) ถูกปรับให้อ่านเต็มสเกลหรือ 100% เมื่อ  $N = 100$

N(1/s)	1	2	5	10	50	$\geq 100$
$R_{\min}(\%)$	35	55	76	85	94	95
$R_{\max}(\%)$	45	65	86	95	104	105

2) ระบบวัด PD แบบแถบกว้าง จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance,  $Z(f)$  ดังนี้

$$30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}$$

$$f_2 \leq 500\text{kHz}$$

$$100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$$

3) ระบบวัด PD แบบแถบแคบ จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance,  $Z(f)$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$9\text{kHz} \leq \Delta f \leq 30\text{kHz}$$

$$50\text{kHz} \leq f_m \leq 1\text{MHz}$$

ซึ่ง  $f_m$  สามารถปรับค่าได้ และกำหนดให้ขนาดของ  $Z(f)$  ที่ความถี่  $f_m \pm \Delta f$  มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน 20 dB

4) ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด มาตรฐานยอมให้สเกลแฟกเตอร์  $k$  ผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

### 2.3 ระบบวัด PD แบบดิจิตอล สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ

ข้อกำหนดของระบบวัด PD แบบดิจิตอล สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ มีดังนี้

1) ระบบวัดนี้จะต้องใช้หลักการระบบวัดแบบแอนะล็อกที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2.5.2.2 ส่วนภาคดิจิตอลนั้นจะวัดประจุที่ปรากฏโดยใช้การรับข้อมูลแบบดิจิตอลในการอ่านข้อมูลสัญญาณเพื่อนำไปแสดงผลและวิเคราะห์ต่อไป

2) ข้อกำหนดค่าสุดของระบบวัด PD แบบดิจิตอล คือ ต้องสามารถแสดงผลค่าประจุที่ปรากฏได้ โดยค่าที่อ่านได้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในข้อ 2.5.2.2 เวลาแสดงผลใหม่แต่ละครั้งของการแสดงผลแบบดิจิตอลต้องไม่เกิน 1 วินาที และในกรณีที่มีการใช้ Bipolar sensitivity threshold นั้น จะต้องมีการบันทึกระดับ threshold ด้วย

3) ข้อกำหนดในการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสของแรงดันทดสอบ ถ้าระบบวัดนี้สามารถวัดระดับแรงดันของแรงดันทดสอบได้ ค่าที่อ่านได้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน IEC 60060-2(1994) ถ้าต้องการออกแบบให้ระบบวัดนี้สามารถวัดมุมเฟสของแรงดันทดสอบได้ มุมเฟสจะผิดพลาดได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ และถ้าหากระบบวัดนี้มีความสามารถในการวัดค่าขณะหนึ่ง (instantaneous value) ของแรงดันทดสอบ ค่าที่อ่านได้จะต้องผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอดของแรงดันทดสอบ การควอนไทซ์ (quantization) ของแรงดันทดสอบ จะต้องมีความละเอียดอย่างน้อย 8 บิต และต้องมีอัตราซีกตัวอย่าง (sampling rate) ไม่น้อยกว่า 100 ตัวอย่างในหนึ่งคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ

## ภาคผนวก ค

### คุณสมบัติทางไฟฟ้าของส่วนประกอบต่างๆของแท่งตัวนำ

คุณสมบัติของ ทองแดง มีดังนี้

- Relative permittivity เท่ากับ 1
- Electrical conductivity  $5.99 \times 10^7$

คุณสมบัติของ ฉนวนกราวด์ซึ่งทำมาจาก ไมก้ามีดังนี้ มีดังนี้

- Relative permittivity เท่ากับ 6
- Electrical conductivity  $2.01 \times 10^{-15}$

คุณสมบัติของ สารเซมิคอนดักเตอร์ มีดังนี้

- Relative permittivity เท่ากับ 12.1
- Electrical conductivity  $1 \times 10^{-12}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายสุริยันต์ กาขาว เกิดเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม 2527 ที่จังหวัดยโสธร  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์  
อำเภอคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ จังหวัดยโสธร  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์  
อำเภอคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ จังหวัดยโสธร  
มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
แขนงวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ความสามารถในการใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรม Finite element, Solidwork, SPSS, AutoCAD, PSpice, Microsoft office.

ทักษะทางภาษาต่างประเทศ คือ ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่ Provincial Electricity Authority ระหว่างเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2550



นายณัฐพันธุ์ อิมโอด เกิดเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม 2528 ที่จังหวัดแพร่  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเทพพิทักษ์วิทยา อำเภอเมือง  
จังหวัดแพร่  
สำเร็จมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิริยาลัยแพร่ อำเภอเมือง จังหวัดแพร่  
มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
แขนงวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ความสามารถในการใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรม Finite element, Solid work, AutoCAD, PSpice, Microsoft office.

ทักษะทางภาษาต่างประเทศ คือ ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่ Carpets International Thailand Public Company Limited ระหว่างเดือนเมษายนถึง  
พฤษภาคม พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้