

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบลักษณะคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้มั่นใจได้ว่า เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของภาคตรวจจับ PD และภาควิเคราะห์ PD

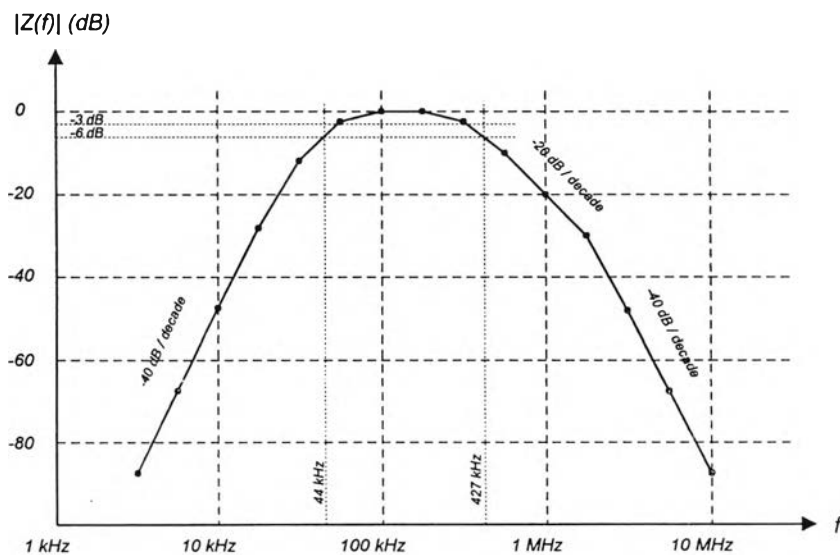
#### 4.1 การทดสอบคุณสมบัติของภาคตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

การทดสอบคุณสมบัติของภาคตรวจจับ PD แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ คุณสมบัติส่วนที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC และคุณสมบัติเรื่องความไวซึ่งขึ้นอยู่กับเทคนิคในการออกแบบระบบวัด

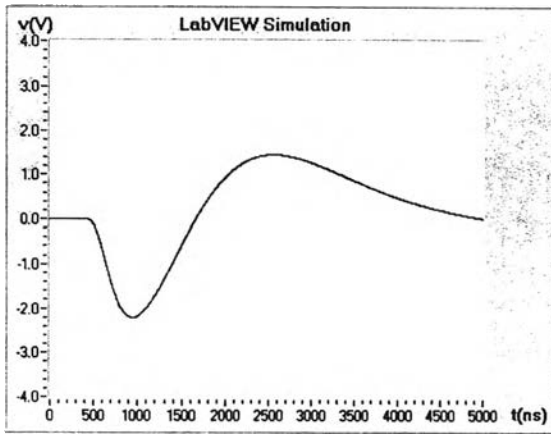
##### 4.1.1 การทดสอบตามขั้นตอนของ IEC

รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติของภาคตรวจจับ PD ตามขั้นตอนของ IEC ได้อธิบายในหัวข้อ 2.5 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน แล้ว ส่วนผลการทดสอบมีดังนี้

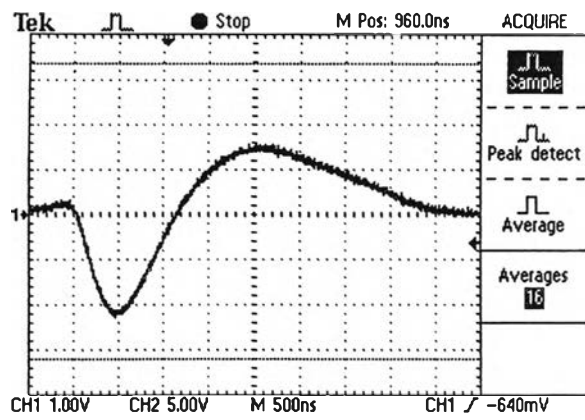
1) ช่วงความถี่จำกัดและแบนด์วิดท์ ผลการทดสอบได้  $f_1 = 44$  กิโลเฮิร์ตซ์ และ  $f_2 = 427$  กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นแบนด์วิดท์  $\Delta f = 427 - 44 = 383$  กิโลเฮิร์ตซ์ เอาต์พุตของเครื่องวัด PD เป็นแบบ  $\alpha$ -response ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ (frequency response) แสดงในรูปที่ 4.1 และรูปสัญญาณเอาต์พุตแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวัด PD



ก) คำนวณโดยโปรแกรม LabVIEW



ข) ผลการวัดด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล

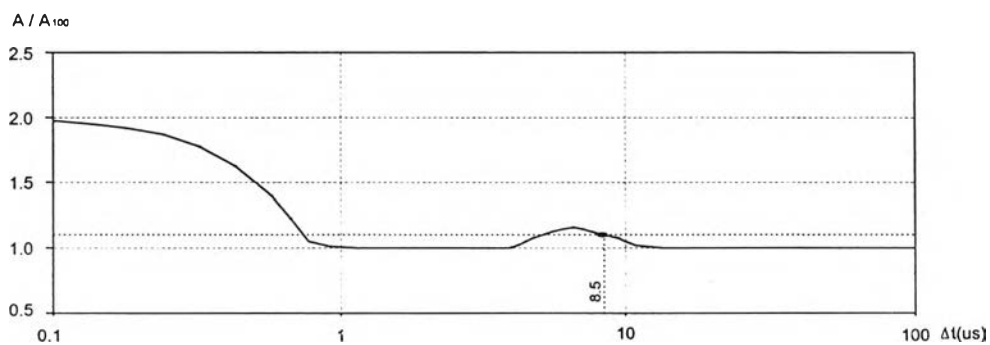
รูปที่ 4.2 รูปสัญญาณเอาต์พุตของภาคตรวจจذب PD

2) ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด ทดสอบตามขั้นตอนที่ IEC กำหนด[3] พบว่าสเกลแพกเตอร์มีค่าความผิดพลาดจากค่าเฉลี่ย 0.4 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเป็นเชิงเส้นของ k สำหรับเครื่องที่ออกแบบ

q (pC)	10	20	50	Mean k = 1.003	Max Variation = 0.4 %
k	1.007	1.000	1.002		

3) เวลาแยกชัดของพัลส์ คือเวลาระหว่างพัลส์ติดกันที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลตอบเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่า 8.5 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพพัลส์คู่ (Double-pulse diagram)

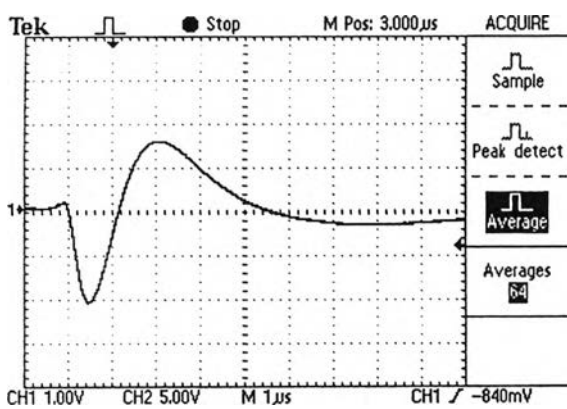
4) การแสดงผลค่าประจุที่ปรากฏ ผลการตอบสนองของระบบวัดที่มีต่อพัลส์ของ PD ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์เท่ากันที่ถูกป้อนด้วย Pulse repetition frequency, N ค่าที่ระบบวัดอ่านได้ (Reading, R) มีในตารางต่อไปนี้ โดยปรับพิสัยและอัตราขยายให้อ่านค่าได้เต็มสเกลหรือ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ N = 100 ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การตอบสนองของระบบวัดที่ออกแบบ

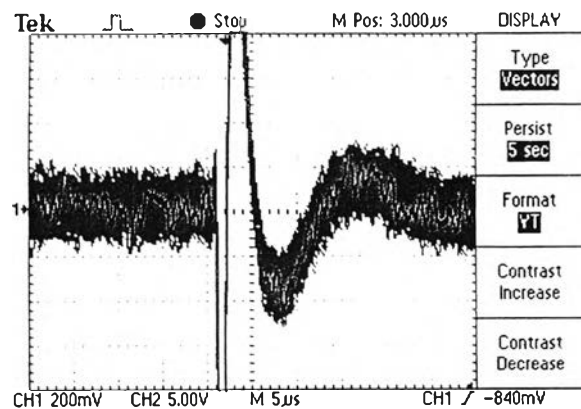
N (1/s)	1	2	5	10	50	≥100
R (%)	36.8	60.7	81.9	90.5	98.0	99.0

4.1.2 ความไวของระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน

เนื่องจากมาตรฐานกำหนดให้ความไวของระบบวัด PD มีค่าเท่ากับสองเท่าของสัญญาณรบกวนสูงสุดโดยที่ไม่คิดสัญญาณรบกวนจากภายนอก จากการทดสอบจะได้รูปสัญญาณดังตัวอย่างในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกรณีที่  $C_a$  และ  $C_k$  มีค่า 1 นาโนฟารัดเท่ากัน และป้อนประจุขนาด 2 พิโคคูลอมป์ จะคำนวณความไวได้ดังนี้ เนื่องจากความสูงของ PD และค่ายอดของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 2.1 โวลต์ และ 170 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ความไวที่ได้ในกรณีนี้จึงมีค่าเท่ากับ  $(2 \times (2 \times 170 / 2100))$  ซึ่งมีค่า 0.324 พิโคคูลอมป์ สำหรับความไวกรณีทั่วไปที่วัดทดสอบมีค่าอื่นๆแสดงในรูปที่ 4.5

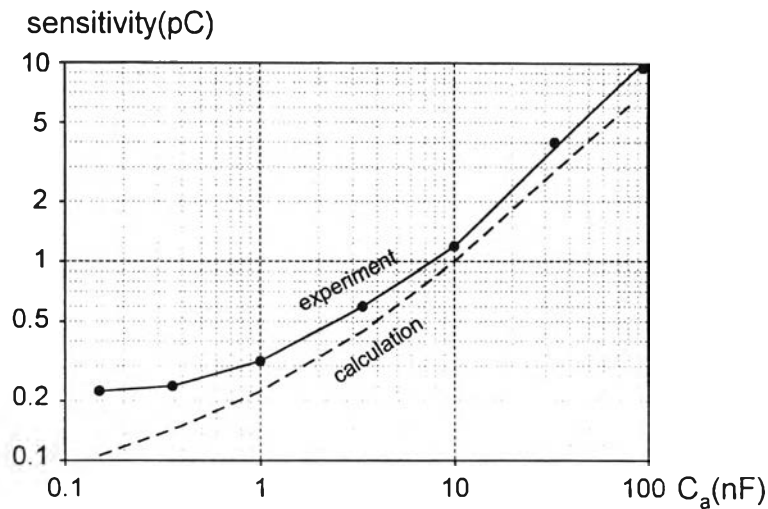


ก) รูปสัญญาณ PD ที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนแล้ว เพื่อสังเกตความสูงของ PD



ข) ส่วนขยายของรูปสัญญาณก่อนกรองสัญญาณรบกวนออก เพื่อสังเกตระดับสัญญาณรบกวน

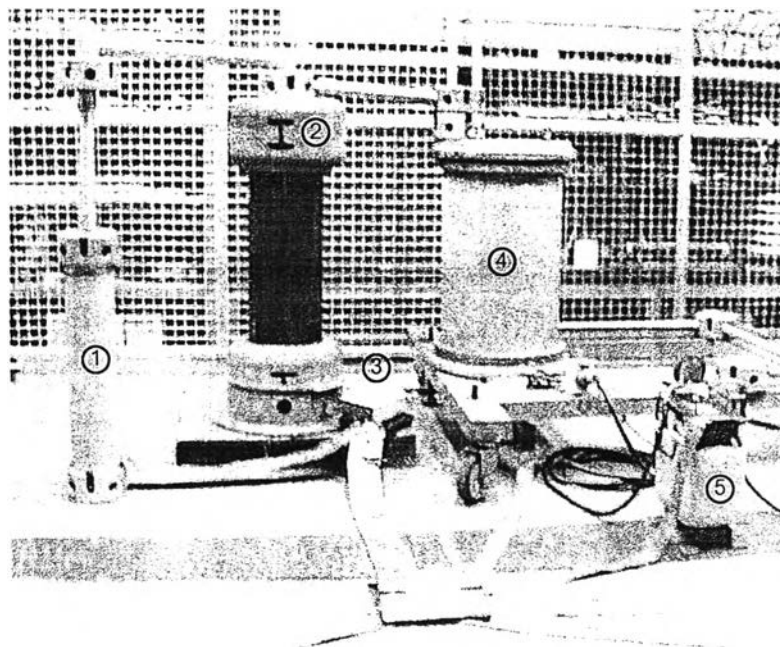
รูปที่ 4.4 รูปสัญญาณกรณีที่มี  $C_a$  และ  $C_k$  มีค่า 1 นาโนฟารัดเท่ากัน



รูปที่ 4.5 ความไวของเครื่องวัด PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

#### 4.2 การทดสอบจริง

การทดสอบจริงโดยใช้เครื่องตรวจจับ PD ที่ออกแบบสร้าง ตรวจจับ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (ในที่นี้จะใช้ตัวเก็บประจุแรงสูงเป็นวัสดุทดสอบ) โดยใช้วงจรทดสอบแบบวิธีตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากนั้นจะทำการจำลองจุดบกพร่องแบบต่างๆและทำการทดสอบเก็บผลเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างฐานข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ PD ด้วยเครื่องที่ออกแบบสร้าง

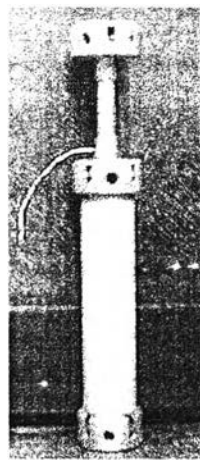


อุปกรณ์ประกอบวงจรทดสอบ : 1) ตัวเก็บประจุแรงสูง 100 pF ( $C_0$ ) 2) ตัวเก็บประจุคัปปลิง 1 nF ( $C_1$ ) 3) อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) 4) หม้อแปลงทดสอบ 100 kV 5 kVA 5) หม้อแปลงขดลวดแยก

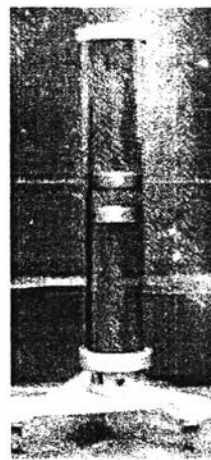
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์และการต่อวงจรทดสอบ PD ของตัวเก็บประจุแรงสูง

ในการจำลองจุดบกพร่องแบบต่างๆ จะใช้วิธีการดังนี้

- 1) โครนาดีสชาร์จ จำลองโดยใช้ลวดขนาดเล็กยึดกับขั้วแรงสูงของวัสดุทดสอบ ให้ปลายแหลมยื่นออกมาในอากาศ ห่างจากขั้วแรงสูงประมาณ 30 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4.7 ก)
- 2) ดีสชาร์จตามผิว จำลองโดยทำให้วัสดุทดสอบเกิดความเปราะเปื้อนหรือมีความชื้นที่ผิวที่บริเวณรอบๆ ผิวฉนวนใกล้ขั้วอุปกรณ์ เช่นใช้ผ้าหมาดเช็ดบริเวณผิวรอบๆ ส่วนบนของตัวเก็บประจุแรงสูงในรูปที่ 4.7 ก) เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวเกินค่าวิกฤตได้ง่ายขึ้น
- 3) ดีสชาร์จภายใน จำลองโดยการสร้างโพรงอากาศในพลาสติกใสที่วางซ้อนกัน 4 แผ่น แล้วยึดติดกันแน่นก่อนนำไปจุ่มน้ำมันหม้อแปลงเพื่อไม่ให้เกิด PD ที่บริเวณอื่น โดยมีอิเล็กโตรด 2 อันภายในท่อใสทำหน้าที่เป็นขั้วแรงสูงและขั้วกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ข)



ก) โครนา

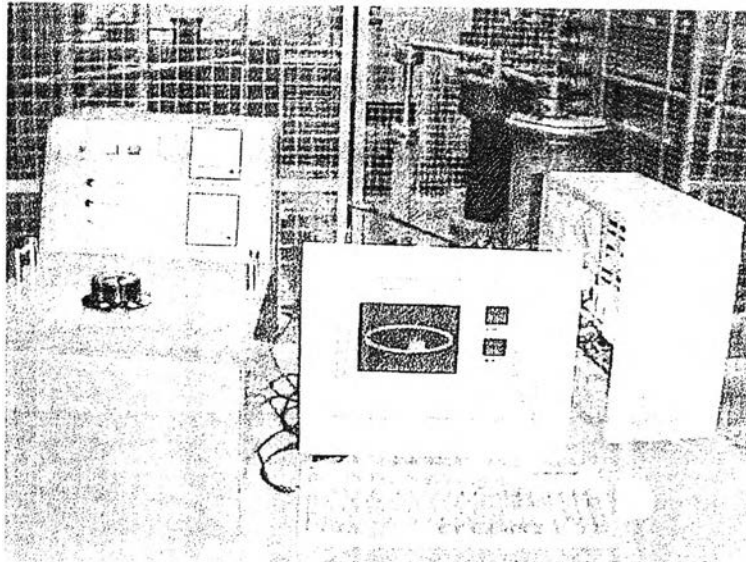


ข) ดีสชาร์จภายใน

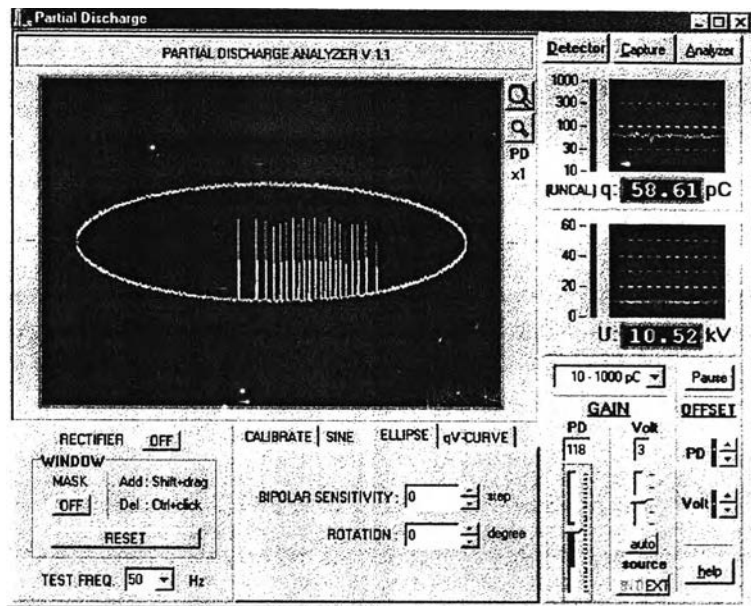
รูปที่ 4.7 การจำลองจุดบกพร่องของวัสดุทดสอบ

นอกจากนั้นกรณีที่โลหะในบริเวณทดสอบไม่ได้ต่อลงกราวด์จะเกิดการดีสชาร์จขึ้นที่โลหะนั้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณที่สามารถตรวจจับโดยระบบวัด PD ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.13 สามารถจำลองได้โดยการปลดรั้วโลหะที่กั้นบริเวณทดสอบออกบางส่วนไม่ให้ต่อลงกราวด์

เริ่มต้นการทดสอบด้วยการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานป้อนประจุปรับเทียบคร่อมที่ขั้วไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ แล้วทำการปรับเทียบตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.5.1 พบว่าเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนอ่านค่าสัญญาณรบกวนสภาพแวดล้อมได้ 0.24 พิโคคูลอมป์ แสดงว่าความไวในการวัด PD ขณะนั้นคือ 0.48 พิโคคูลอมป์ เมื่อป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบเริ่มจากศูนย์และเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึง 70 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันพิคัดของเครื่องที่ออกแบบสร้างพบว่าไม่เกิด PD ใดๆ จึงทำการจำลองให้เกิด PD แบบต่างๆ แล้วป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบอีกครั้ง ในการจำลอง PD แบบโครนา พบว่าที่แรงดันประมาณ 11 กิโลโวลต์ เกิด PD ประมาณ 60 พิโคคูลอมป์ จึงได้บันทึกผลไว้ ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

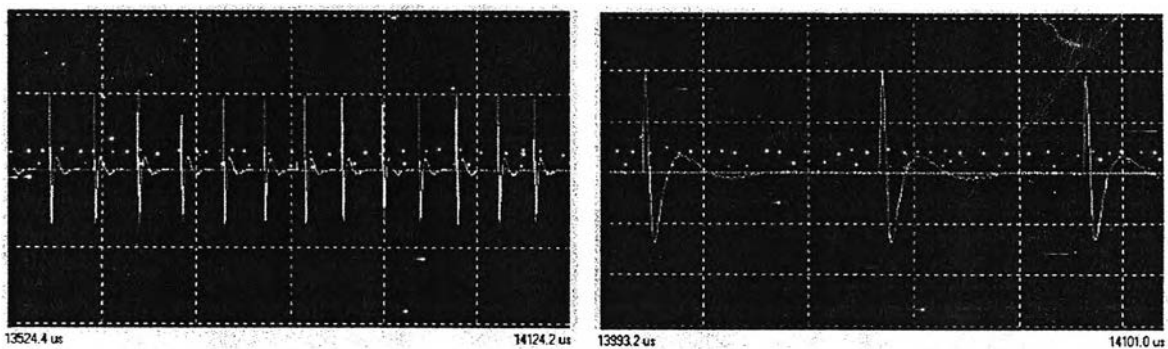


ก) การตรวจจับ PD โดยใช้เครื่องที่ออกแบบสร้าง



ข) ผลการตรวจจับ PD

รูปที่ 4.8 PD แบบโคโรนาที่เกิดที่ปลายลวดแหลมยึดบนตัวเก็บประจุแรงสูง

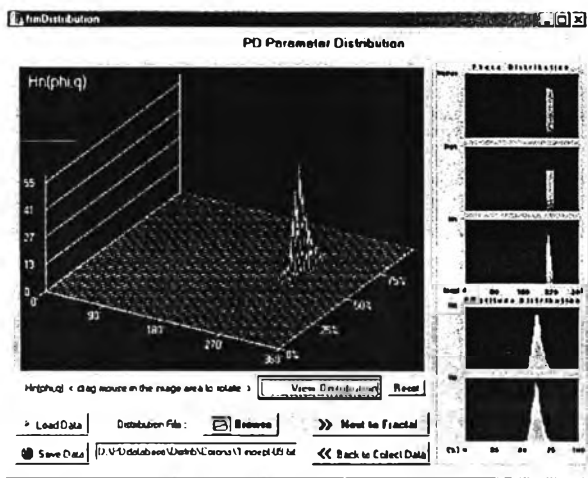


ก) ลักษณะของการเกิด PD

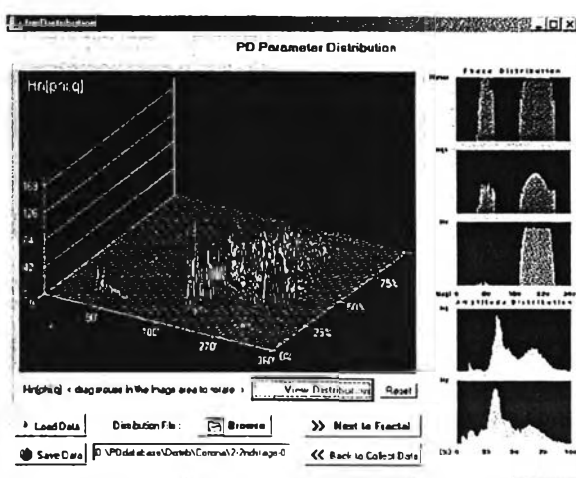
ข) การขยายเพื่อสังเกตรูปสัญญาณ

รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณ PD แบบโคโรนา

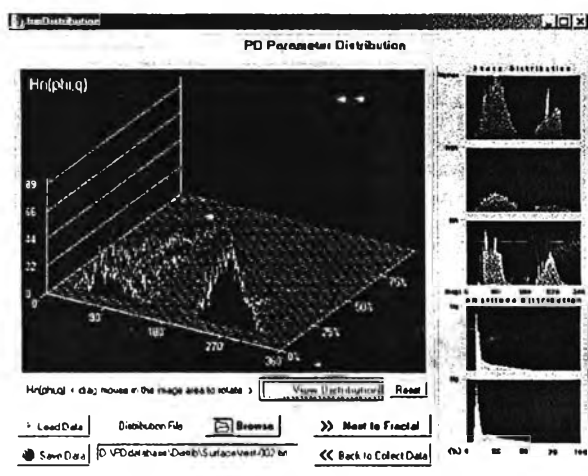
จากนั้นได้ทำการทดสอบวัสดุทดสอบที่ได้สร้างจุดบกพร่องจำลองเพื่อนำผลการตรวจจับมาคำนวณการกระจายและค่าคุณลักษณะแฟร็กทัล เก็บเป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ดิสรชาร์จบางส่วน โดยการกระจายที่ได้จากสาเหตุต่างๆแสดงในรูปที่ 4.10



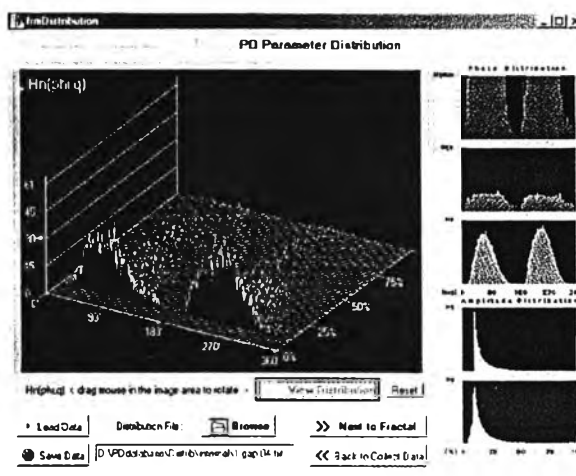
ก) โครนาที่แรงดันเริ่มต้น (Inception voltage)



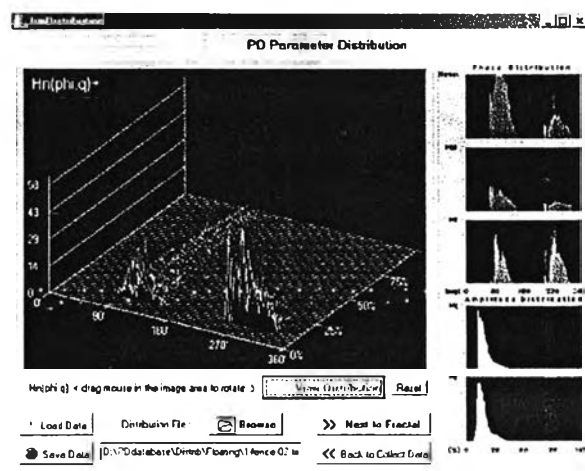
ข) โครนาที่แรงดันสูงกว่าแรงดันเริ่มต้นมาก



ค) ดิสรชาร์จตามผิว



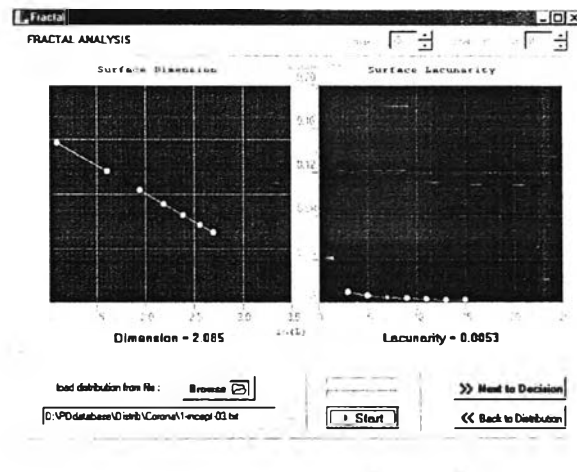
ง) ดิสรชาร์จภายใน



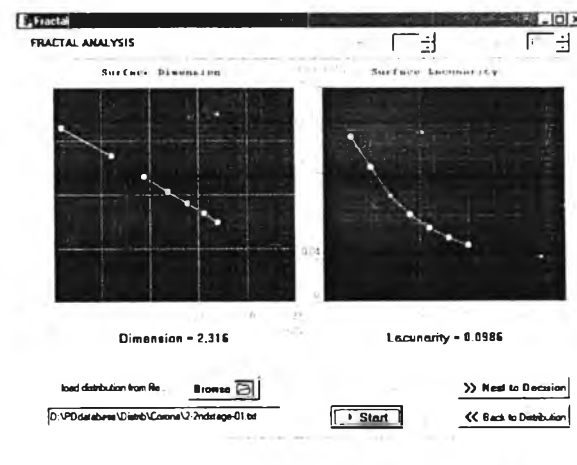
จ) โลหะไม่ได้ต่อลงกราวด์

รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายของข้อมูล PD ที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ

หลังจากเก็บข้อมูลการกระจายและคำนวณค่าคุณลักษณะแฟร็กทัลแล้ว ก็จะทำการบันทึกข้อมูลโดยแบ่งตามสาเหตุของการเกิด PD ไว้ในฐานข้อมูล ต่อจากนั้นจะทำการทดสอบความสามารถในการจำแนกสาเหตุการเกิด PD ของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น โดยการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีจุดบกพร่องที่ทราบแน่ชัด และเก็บผลมาคำนวณการกระจายและค่าคุณลักษณะแฟร็กทัล จากนั้นทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลตัวที่นำมาจำแนกสาเหตุเทียบกับกลุ่มข้อมูลที่เกิดจากสาเหตุเดียวกันในฐานข้อมูล จากการทดสอบกับจุดบกพร่องแบบต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.11

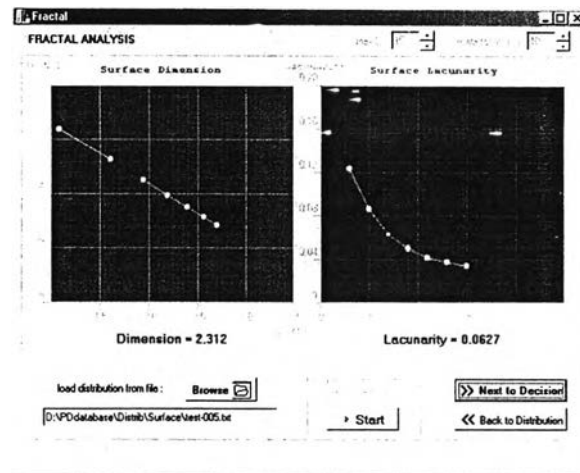


ก) จุดบกพร่องแบบโคโรนา (ที่แรงดันเริ่มต้น)

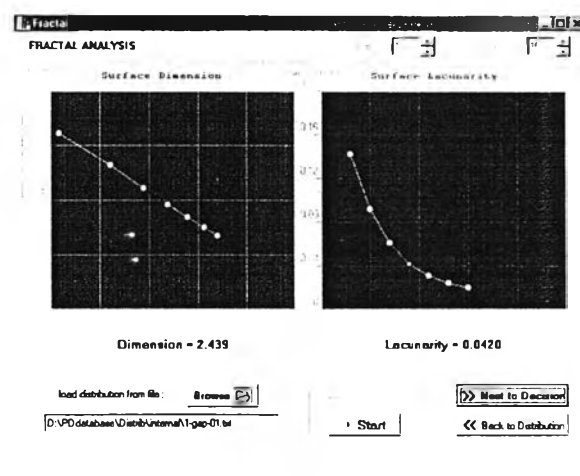


ข) จุดบกพร่องแบบโคโรนา (ที่แรงดันสูงกว่าแรงดันเริ่มต้นมาก)

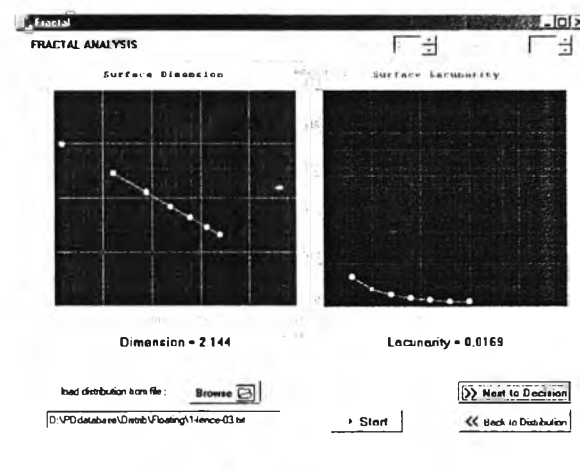




ค) จุดบกพร่องแบบตีสจาร์จตามผิว



ง) จุดบกพร่องแบบตีสจาร์ภายใน



จ) โลหะไนบริเวณทดสอบไม่ได้ต่อลงกราวด์

รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าคุณลักษณะที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ

### 4.3 การประเมินผล

ในการประเมินผลเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่ออกแบบสร้างนั้น ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทั้งส่วนที่เป็นข้อกำหนดตามมาตรฐาน และส่วนที่เป็นการนำไปใช้งานจริง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินผลการทำงานของภาคตรวจจับ PD และภาควิเคราะห์ PD

#### 4.3.1 การประเมินผลภาคตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

จากการพิจารณาผลการทดสอบตามขั้นตอน IEC เปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติต่างๆของภาคตรวจจับ PD อันได้แก่ ช่วงความถี่จำกัด แบนดิวิดท์ ความเป็นเชิงเส้น เวลาแยกชุดของพัลส์ และการแสดงผลค่าประจุที่ปรากฏ มีค่าอยู่ในช่วงที่มาตราฐาน IEC 60270 ยอมรับ ดังนั้นภาคตรวจจับ PD ของเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่ออกแบบสร้างจึงมีคุณสมบัติตามที่มาตราฐาน IEC กำหนดไว้ทุกประการ

จากการพิจารณาค่าความไวที่คำนวณได้จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ จะพบว่าค่าความไวที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าความไวที่ออกแบบไว้เล็กน้อย สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการทำการวัดในห้องทดลองปกติโดยไม่มีการชิลด์สัญญาณรบกวน สัญญาณจากภายนอกทั้งที่เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงเกิดการคาบเกี่ยว (coupling) กับระนาบกราวด์ (ground plane) ลายวงจร (trace) รวมทั้งที่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่วัดได้ อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยได้ออกแบบวงจรตามหลักความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility, EMC)[54] เพื่อให้สัญญาณรบกวนมีผลต่อความไวของระบบวัดน้อยที่สุด

#### 4.3.2 การประเมินผลภาควิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน

จากผลการนำเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนมาทำการทดสอบจริงโดยใช้ตรวจวัด PD และวิเคราะห์ PD จะเห็นได้ว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่เริ่มป้อนแรงดันทดสอบจนถึงค่าแรงดันพิกัดของเครื่อง โดยมีความไวเพียงพอต่อการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปเนื่องจากสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้มาก การแสดงผลการตรวจจับ PD เมื่อทดสอบจุดบกพร่องจำลองแบบต่างๆ มีรูปแบบที่สังเกตได้บนฐานเวลารูปวงรีสอดคล้องกับรูปแบบของสัญญาณ PD ที่แสดงไว้ในรายงานวิจัยของ CIGRE[21] ผลการวินิจฉัยสาเหตุของการเกิด PD โดยอัตโนมัติด้วยเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่ออกแบบสร้างแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึม (algorithm) ต่างๆ ที่เลือกใช้ในกระบวนการรู้จำและจำแนกสาเหตุของ

การเกิด PD อันได้แก่ การเก็บข้อมูลการกระจายในแบบ  $H_n(\phi, q)$  เพื่อนำมาคำนวณค่าคุณลักษณะแฟรคทัล และการใช้ Centour score ในการจำแนกสาเหตุที่ทำให้เกิด PD นั้นสามารถจำแนกสาเหตุต่างๆได้จริง และมีความถูกต้องของการวินิจฉัยอยู่ในระดับที่น่าพอใจ