

การศึกษาความเสื่อมสภาพและการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์  
ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

นายเกรียงไกร พัฒนภักดี

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON DEGRADATIONS AND DIAGNOSTICS OF METAL OXIDE ARRESTERS  
IN DISTRIBUTION SYSTEMS

Mr.Kriangkrai Pattanapakdee

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความสัมพันธ์ของสภาพและการตรวจสอบสภาพ กับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
โดย	นายเกรียงไกร พัฒนภักดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาค)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รั้งสีวิจิตรประภา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.ประดิษฐ์ เฟื่องฟู)

เกรียงไกร พัฒนภักดี: การศึกษาความสัมพันธ์และการตรวจสอบสภาพกับดัก  
 เสรีจชนิดโลหะออกไซด์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. (A STUDY ON DEGRADATIONS  
 AND DIAGNOSTICS OF METAL OXIDE ARRESTERS IN DISTRIBUTION  
 SYSTEMS) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 153  
 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์และการตรวจสอบสภาพของ  
 กับดักเสรีจชนิดโลหะออกไซด์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV ใน  
 การศึกษาได้รวบรวมข้อมูลการตั้งงานและความเสียหายของกับดักเสรีจโดยใช้แบบสอบถาม  
 และสุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสรีจที่ใช้งานอยู่มาทดสอบประเมินสภาพโดยพิจารณาถึง  
 สภาพแวดล้อมที่ติดตั้งและระยะเวลาการใช้งาน รวมทั้งเก็บตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ  
 และตัวอย่างที่มีการทำงานของตัวปลดวงจร การประเมินสภาพกับดักเสรีจใช้การทดสอบแบบ  
 ไม่ทำลาย เช่น การวัดค่าความต้านทาน กระแสรั่ว กำลังสูญเสีย และอุณหภูมิที่ผิว เป็นต้น  
 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ปลดวงจรมีความน่าเชื่อถือในการทำงานต่ำ  
 และไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งและระยะเวลาใช้  
 งานอย่างชัดเจน ปัญหาหลักของการเสื่อมสภาพของกับดักเสรีจเกิดขึ้นจากความชื้นเข้าไป  
 ภายใน ทำให้กับดักเสรีจมีความต้านทานต่ำ มีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูง และมีดีเอสอาร์จ  
 บางส่วนเกิดขึ้น แต่ความชื้นมีผลกระทบไม่มากนักต่อแรงดันอ้างอิงและแรงดันสี่ขาร์จคงค้าง  
 ผลการทดสอบสามารถกำหนดเกณฑ์สำหรับพิจารณาระดับความสัมพันธ์สภาพของกับดักเสรีจ  
 จากการวัดค่าความต้านทานและอุณหภูมิที่ผิว สุดท้ายได้นำเสนอแนวทางปฏิบัติของการ  
 ตรวจสอบสภาพกับดักเสรีจในภาคสนามด้วยกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2553.....

# # 4871855821 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DEGRADATION / DIAGNOSTIC / METAL OXIDE ARRESTER /  
DISTRIBUTION SYSTEM

KRIANGKRAI PATTANAPAKDEE : A STUDY ON DEGRADATIONS AND  
DIAGNOSTICS OF METAL OXIDE ARRESTERS IN DISTRIBUTION SYSTEMS.

THESIS ADVISOR : CHANNARONG BALMONGKOL, Dr.Eng, 153 pp.

This thesis presents a study of degradations and diagnostics of metal oxide arresters in 22 kV and 33 kV distribution systems. Questionnaires were used for surveying arrester application and damage. The in-service arresters were sampled by considering environment and age. The overheated arresters and the arresters with operated disconnecting devices were also taken from fields. Several non-destructive tests were conducted for condition assessment of arrester samples, such as the measurement of resistance, leakage current, power losses and surface temperature.

Test results implied that disconnecting device showed low reliability in operations. The relationship between degradation and environment or age was not obviously observed. Moisture ingress seemed to be a major cause of arrester degradation, resulting in low resistance, high resistive leakage current and partial discharge. But the moisture has less effect on reference voltage and residual voltage. Criteria for considering degradation level by measurement of resistance and temperature rise were proposed. Finally, practical guideline of infrared camera for field inspection was provided.

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

Field of Study : Electrical Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบผลสำเร็จไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย และ แก๊วข้อบกพร่องต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา และอาจารย์ ดร.ประดิษฐ์ เฟื่องฟู ที่ช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และยังให้ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์กับวิทยานิพนธ์นี้ เป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกับดักเสิร์จ และให้ความสนับสนุนในหลายด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสิ้นไปได้ด้วยดีโดยต้องขอบคุณ คณะทำงานกองวิจัยและพนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูล การสำรวจและจัดเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จทั้งหมดที่ใช้การศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และพนักงานทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ขอขอบคุณ คุณถาวร เอื้อดีและคุณเกรียงไกร โอบษฐ์ธนู ที่ให้ความช่วยเหลือในด้าน อุปกรณ์การทดสอบและให้คำแนะนำต่าง ๆ และขอขอบคุณทีมงานทั้งหมดที่ช่วยทำการทดสอบ ตลอดจนทุกท่านที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยี ไฟฟ้ากำลัง และท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบคุณครูปิตา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนและให้ วิชาความรู้ และกำลังใจ จนข้าพเจ้าประสบผลสำเร็จในที่สุด

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ

## บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
2 การเสื่อมสภาพและการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ.....	5
2.1 กัปดักเสิร์จ.....	5
2.2 กัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์.....	6
2.2.1 โครงสร้างของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์.....	6
2.2.2 คุณลักษณะทั่วไปของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์.....	8
2.3 การเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ.....	8
2.3.1 ประเภทการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ.....	8
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ.....	10
2.4 วิธีการตรวจสอบและประเมินสภาพกัปดักเสิร์จ.....	13
2.4.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance).....	14
2.4.2 การวัดกระแสรั่ว (Leakage Current) และกระแสรั่วฮาร์มอนิกที่ 3.....	14
2.4.2.1 การวัดกระแสรั่วเชิงความต้านทาน.....	14
2.4.2.2 การวัดกระแสรั่วเชิงความต้านทานฮาร์มอนิกที่ 3.....	15

บทที่	หน้า
2.4.2.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ารั่ว.....	15
2.4.3 การวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Voltage).....	17
2.4.4 การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power losses).....	17
2.4.5 การวัดอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน (Infrared Thermal Viewer).....	18
2.4.6 การวัดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD).....	19
2.4.7 การวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้าง (Residual Voltage).....	19
3 ข้อมูลการใช้งานและความเสียหายของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	20
3.1 การเก็บข้อมูลและผลการจัดส่งแบบสำรวจ.....	20
3.2 ข้อมูลทั่วไปของผู้กรอกแบบสำรวจ.....	22
3.3 ข้อมูลการติดตั้งใช้งานกับดักเสิร์จ.....	23
3.3.1 ผลกระทบกับดักเสิร์จที่มีใช้งาน.....	23
3.3.2 ระยะเวลาการติดตั้งใช้งานของกับดักเสิร์จ.....	24
3.4 ข้อมูลความเสียหายของกับดักเสิร์จ.....	25
3.4.1 ผลกระทบกับดักเสิร์จที่พบการชำรุดเสียหาย.....	26
3.4.2 การชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานในตำแหน่งต่าง ๆ.....	27
3.4.3 การชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ.....	28
3.4.4 เหตุการณ์ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการชำรุดเสียหาย.....	30
3.4.5 ลักษณะการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จ.....	31
3.4.6 ช่วงอายุการติดตั้งใช้งานของกับดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหาย.....	32
3.5 แนวทางการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จ.....	33
3.5.1 วิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จ.....	33
3.5.2 ความถี่ในการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จ.....	34
3.5.3 แนวทางการใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน.....	34
3.6 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ.....	35
3.6.1 ผลกระทบจากการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จ.....	35
3.6.1.1 ผลกระทบต่อการจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	35
3.6.1.2 ผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า	
อันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน.....	36



บทที่	หน้า
3.6.2 ปัญหาการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จที่อยากให้เกิดพิจารณาตรวจสอบแก้ไข.....	37
3.6.2.1 ปัญหาความเสียหายของกัปดักเสิร์จและวิธีการป้องกัน.....	37
3.6.2.2 ปัญหาการลัดวงจรและการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ปลดวงจร.....	39
3.6.2.3 อันตรายและความเสียหายจากการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จ.....	41
3.6.2.4 แนวทางและวิธีการตรวจสอบกัปดักเสิร์จที่ชำรุดเสียหาย.....	41
3.6.3 ข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์กัปดักเสิร์จ.....	42
4 การเก็บตัวอย่างและการทดสอบประเมินสภาพกับดักเสิร์จ.....	43
4.1 ตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	43
4.1.1 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานขออุปกรณ์ปลดวงจร.....	43
4.1.2 ตัวอย่างกับดักเสิร์จจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ.....	46
4.1.2.1 ลักษณะพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV.....	47
4.1.2.2 ลักษณะพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 kV.....	50
4.1.2.3 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	51
4.1.3 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ.....	55
4.1.3.1 แนวทางการพิจารณาเบื้องต้นในการสำรวจหา กับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ.....	55
4.1.3.2 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติที่ได้จากการสำรวจ.....	56
4.2 การเก็บรักษาและการเตรียมตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	57
4.3 การทดสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ.....	58
4.3.1 การทดสอบประเมินความคงทนขณะรับแรงดันใช้งานปกติ.....	58
4.3.1.1 การวัดค่าความต้านทาน.....	59
4.3.1.2 การวัดกระแสรั่ว แรงดันอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิของกัปดักเสิร์จ.....	59
4.3.2 การทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกิน.....	65
4.3.3 ลำดับขั้นตอนในการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	66
4.3.3.1 การทดสอบประเมินความคงทนขณะรับแรงดันใช้งานปกติ.....	66
4.3.3.2 การทดสอบประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกิน.....	67

บทที่	หน้า
5 ผลการทดสอบประเมินสภาพของกับดักเสิร์จ.....	68
5.1 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จอ้างอิง.....	68
5.1.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานอ้างอิงของกับดักเสิร์จ.....	68
5.1.2 ผลการทดสอบเบ้าองตัวของกับดักเสิร์จอ้างอิง.....	70
5.1.2.1 กับดักเสิร์จอ้างอิงขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA .....	70
5.1.2.2 กับดักเสิร์จอ้างอิงขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA.....	72
5.2 ผลทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร.....	73
5.2.1 ผลการตรวจสอบสภาพภายนอก.....	73
5.2.2 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทาน.....	75
5.2.3 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว.....	77
5.2.4 ผลประเมินการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร.....	78
5.3 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบ 22 kV.....	80
5.3.1 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	81
5.3.2 ผลการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	83
5.3.3 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	85
5.3.3.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	86
5.3.3.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี.....	88
5.3.3.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	92
5.3.4 ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	93
5.3.5 ผลการทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	94
5.3.5.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	94
5.3.5.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี.....	95
5.3.5.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	96
5.3.6 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	97
5.3.6.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	97
5.3.6.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี.....	97
5.3.6.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	99
5.3.7 สาเหตุของความผิดปกติของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	100
5.3.8 ผลการทดสอบวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้าง.....	102

บทที่	หน้า
5.3.8.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	102
5.3.8.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี.....	103
5.3.8.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	104
5.4 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบ 3 kV.....	105
5.4.1 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	106
5.4.2 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	106
5.4.3 ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	110
5.4.4 ผลการทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	111
5.4.5 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	111
5.4.6 ผลการทดสอบวัดแรงดันดีเอสอาร์จคงค้าง.....	112
6 การตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	113
6.1 ผลการสำรวจและทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ.....	113
6.1.1 กรณีตัวอย่างที่ 1 (อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์).....	113
6.1.2 กรณีตัวอย่างที่ 2 (อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์).....	115
6.1.3 กรณีตัวอย่างที่ 3 (อ.บางแสน จ.ชลบุรี).....	116
6.1.4 กรณีตัวอย่างที่ 4 (อ.บางแสน จ.ชลบุรี).....	118
6.1.5 กรณีตัวอย่างที่ 5 (อ.พระพุทธรบาท จ.สระบุรี).....	120
6.1.6 กรณีตัวอย่างที่ 6 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี).....	122
6.1.7 กรณีตัวอย่างที่ 7 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี).....	123
6.1.8 กรณีตัวอย่างที่ 8 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี).....	124
6.1.9 กรณีตัวอย่างที่ 9 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี).....	126
6.1.10 กรณีตัวอย่างที่ 10 (อ.ปลวกแดง จ.ระยอง).....	128
6.2 แนวทางการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	130
6.2.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิวกับสภาพของกับดักเสิร์จ.....	130
6.2.2 ความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	133
6.2.2.1 ผลกระทบของระยะห่างในการวัด.....	134
6.2.2.2 ผลกระทบจากความสามารถของกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	136
6.2.2.3 ผลกระทบของค่า Emissivity.....	138
6.2.3 แนวทางปฏิบัติในการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จ.....	139

บทที่	หน้า
7 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	141
7.1 สรุป .....	141
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	146
รายการอ้างอิง .....	147
ภาคผนวก .....	149
ภาคผนวก ก ผลสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจ ในพื้นที่ ๔ ภาคในระดับจังหวัด .....	150
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	153

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลสำรวจวิธีการที่ผู้ปฏิบัติงานนำมาใช้ตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จ.....	33
3.2 ผลสำรวจความถี่ของการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จ.....	34
4.1 จำนวนตัวอย่างที่เกิดการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจร.....	44
4.2 พื้นที่ต่าง ๆ ที่ได้สุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	46
4.3 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เก็บมาในแต่ละพื้นที่ของระบบ 22 kV.....	51
4.4 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เก็บมาในแต่ละพื้นที่ของระบบ 33 kV.....	51
4.5 จำนวนและพิกัดต่าง ๆ ของกับดักเสิร์จที่สุ่มเก็บจากระบบ 22 kV.....	53
4.6 จำนวนและพิกัดต่าง ๆ ของกับดักเสิร์จที่สุ่มเก็บจากระบบ 33 kV.....	54
4.7 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติในแต่ละพื้นที่.....	56
4.8 ระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จ.....	61
5.1 ผลการวัดค่าความต้านทานอ้างอิงของกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบ 22 kV.....	69
5.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นของกับดักเสิร์จอ้างอิงขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA.....	70
5.3 ผลการทดสอบตัวอย่างอ้างอิงของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A.....	71
5.4 ผลการทดสอบเบื้องต้นของกับดักเสิร์จอ้างอิงขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA.....	72
5.5 ผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร.....	76
5.6 ตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA ผลิตภัณฑ์ A ที่นำมาทดสอบ.....	80
5.7 ตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA ผลิตภัณฑ์ B และ D.....	81
5.8 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A.....	81
5.9 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่นำไปทดสอบวัดดีสชาร์จบางส่วน.....	83
5.10 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอย่างที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	87
5.11 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	92
5.12 ผลการทดสอบวัดแรงดันอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA.....	93
5.13 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	94
5.14 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี.....	96
5.15 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	97
5.16 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 48 ชั่วโมง.....	100

ตารางที่	หน้า
5.17 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี.....	103
5.18 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี.....	103
5.19 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D.....	104
5.20 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV ที่ใช้ทดสอบ.....	105
5.21 กระแสรั่วรวมที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV ในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง.....	106
5.22 กระแสรั่วเชิงความต้านทานที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV ในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง.....	107
5.23 ตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA ที่พบความผิดปกติ.....	107
5.24 ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA.....	110
5.25 ผลการทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA.....	111
5.26 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA.....	112
6.1 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 1.....	114
6.2 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 2.....	116
6.3 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 3.....	117
6.4 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 4.....	119
6.5 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 5.....	120
6.6 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 6.....	122
6.7 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 7.....	124
6.8 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 8.....	125
6.9 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 9.....	127
6.10 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 10.....	128
6.11 ระดับความรุนแรงของความเสื่อมสภาพจากปัญหาความชื้น ภายในกับดักเสิร์จ.....	132
6.12 คุณสมบัติการรับภาพของกล้องถ่ายภาพความร้อนที่ 2 ชุด.....	133
7.1 เกณฑ์การพิจารณาค่าความต้านทานกับระดับความเสื่อมสภาพจาก ปัญหาความชื้นเข้าไปภายในของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	144
7.2 เกณฑ์การพิจารณาอุณหภูมิที่สูงขึ้นกับระดับความเสื่อมสภาพ ของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	145

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างกับดักเล็ร์ชนิดโลหะออกไซด์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	5
2.2 ตัวอย่างบล็อกของกับดักเล็ร์ชนิดโลหะออกไซด์ที่ถูกอัดกดให้กลม.....	6
2.3 อนุภาคของสารออกไซด์ผสมที่ทำเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น.....	6
2.4 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงดัน – กระแสไฟฟ้าของ ZnO Block.....	7
2.5 วงจรสมมูลของแผ่นบล็อกสารโลหะออกไซด์ของกับดักเล็ร์จ.....	7
2.6 ประเภทของการเสื่อมสภาพและความเสียหายของกับดักเล็ร์จ.....	9
2.7 เฟสเซอร์โคไซด์แกรมของกระแสรั่วและแรงดันของกับดักเล็ร์จ.....	15
2.8 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดันอ้างอิงที่ขนาดกระแสอ้างอิง 1 mA.....	17
2.9 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของกับดักเล็ร์จด้วยกล้องอินฟราเรด.....	18
3.1 แผนภาพสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในแต่ละภูมิภาค.....	21
3.2 ตำแหน่งการทำงานของผู้กรอกแบบสำรวจ.....	22
3.3 ประสิทธิภาพทำงานที่เกี่ยวข้องกับกับดักเล็ร์จของผู้กรอกแบบสำรวจ.....	22
3.4 สัดส่วนผลิตภัณฑ์กับกับดักเล็ร์จที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย แรงดัน 22 kV.....	23
3.5 สัดส่วนผลิตภัณฑ์กับกับดักเล็ร์จที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย แรงดัน 33 kV.....	24
3.6 สัดส่วนกับกับดักเล็ร์จที่ใช้งานในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ของระบบ 22 kV.....	24
3.7 สัดส่วนกับกับดักเล็ร์จที่ใช้งานในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ของระบบ 33 kV.....	25
3.8 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์กับกับดักเล็ร์จที่เกิดการชำรุดเสียหายในระบบ 22 kV.....	26
3.9 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์กับกับดักเล็ร์จที่เกิดการชำรุดเสียหายในระบบ 33 kV.....	26
3.10 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกับกับดักเล็ร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบ 22 kV.....	27
3.11 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกับกับดักเล็ร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบ 33 kV.....	28
3.12 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกับกับดักเล็ร์จในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในระบบ 22 kV.....	28
3.13 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกับกับดักเล็ร์จในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในระบบ 33 kV.....	29
3.14 สัดส่วนกับกับดักเล็ร์จที่เกิดชำรุดเสียหายในเหตุการณ์ต่าง ๆ ในระบบ 22 kV.....	30
3.15 สัดส่วนกับกับดักเล็ร์จที่เกิดชำรุดเสียหายในเหตุการณ์ต่าง ๆ ในระบบ 33 kV.....	30
3.16 ลักษณะการชำรุดเสียหายของกับกับดักเล็ร์จในระบบ 22 kV.....	31
3.17 ลักษณะการชำรุดเสียหายของกับกับดักเล็ร์จในระบบ 33 kV.....	31
3.18 สัดส่วนการชำรุดของกับกับดักเล็ร์จในแต่ละช่วงอายุการใช้งานของระบบ 22 kV.....	32

รูปที่	หน้า
3.19 สัดส่วนการชำรุดของกับดักเสิร์จในแต่ละช่วงอายุการใช้งานของระบบ33 kV.....	32
4.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A.....	44
4.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์B.....	45
4.3 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์C.....	45
4.4 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์D.....	45
4.5 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์E.....	45
4.6 บริเวณพื้นที่ที่สัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	47
4.7 ลักษณะของพื้นที่บริเวณชายทะเลที่สัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 22 kV.....	48
4.8 ลักษณะของพื้นที่บริเวณภูเขาสูงที่สัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ22 kV.....	49
4.9 ลักษณะของพื้นที่บริเวณชายทะเลที่สัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ33 kV.....	50
4.10 ลักษณะของพื้นที่บริเวณภูเขาสูงที่สัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ33 kV.....	50
4.11 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ22 kV ในแต่ละช่วงอายุการติดตั้งใช้งาน.....	52
4.12 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ33 kV ในแต่ละช่วงอายุการติดตั้งใช้งาน.....	52
4.13 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ22 kV แยกตามผู้ผลิต.....	53
4.14 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ 33 kV แยกตามผู้ผลิต.....	54
4.15 การเก็บรักษาตัวอย่างกับดักเสิร์จ.....	57
4.16 การพันเทปทองแดงเป็นแหวนป้องกันกระแสรั่วตามผิว.....	58
4.17 เครื่องทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Megger).....	59
4.18 วงจรการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของกับดักเสิร์จ.....	60
4.19 เครื่องมือวัดอุณหภูมิเฉพาะจุดแบบอินฟราเรด.....	63
4.20 กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรดที่ใช้ทดสอบวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ.....	63
4.21 การเพิ่มชิ้นส่วนของอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จขนาด1 kV, 5 kA.....	64
4.22 วงจรทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	65
4.23 วงจรการทดสอบวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้างของกับดักเสิร์จ.....	65
4.24 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดันดิสชาร์จคงค้างของกับดักเสิร์จ.....	66
5.1 แผนภาพสรุปผลการตรวจสภาพภายนอกของตัวอย่างกับดักเสิร์จ ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร.....	73
5.2 ตัวอย่างกับดักเสิร์จมีการแตกของเปลือกโพลีเมอร์และภายในเกิดการเผาไหม้.....	74
5.3 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่พบการหลอมละลายของฝาครอบโลหะ และมีคราบเขม่าเป็นแนวยาวตามลำตัวของกับดักเสิร์จ.....	74



รูปที่	หน้า
5.4 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการแตกหักของแขนฉนวน (Bracket).....	75
5.5 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่พบว่าอุปกรณ์ปลดดวงจางงานไม่สมบูรณ์.....	75
5.6 แผนภาพสรุปผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดดวงจาง.....	76
5.7 ผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดดวงจางแยกแต่ละผู้ผลิต.....	76
5.8 กระแสรั่วรวมของตัวอย่างที่ Disconnecting Device ทำงาน แต่ยังคงมี ค่าความต้านทานมากกว่า 1 G $\Omega$ .....	77
5.9 รูปคลื่นกระแสรั่วรวมของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์B ที่มีค่าความต้านทานมากกว่า 9.5 G $\Omega$ และ 60 G $\Omega$ .....	78
5.10 ดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า 10 G $\Omega$ .....	84
5.11 ตัวอย่างดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากกับดักเสิร์จที่มีค่าความต้านทาน 0.35 G $\Omega$ .....	85
5.12 ตัวอย่างดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากกับดักเสิร์จที่มีค่าความต้านทาน 4.5 G $\Omega$ .....	85
5.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวอย่างกับดักเสิร์จ BS-2C.....	86
5.14 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์A รุ่นเก่า รหัส SR-5B ที่ใช้งานนานกว่า 7 ปี.....	87
5.15 ความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานกับค่าความต้านทานที่วัดได้.....	89
5.16 รูปคลื่นกระแสรั่วรวมของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์B ที่มีความต้านทานต่ำผิดปกติ (9.5 G $\Omega$ ).....	90
5.17 รูปคลื่นกระแสรั่วรวมของตัวอย่างผลิตภัณฑ์A รหัส BS-1A ที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติ (100 M $\Omega$ ).....	90
5.18 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์A รหัส SR-7A มีความต้านทาน 0.35 G $\Omega$ .....	91
5.19 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์A รหัส SR-21C มีความต้านทาน 90 G $\Omega$ .....	91
5.20 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์B ที่มีการใช้งานน้อยกว่า 3 ปี รหัส LEE-13B.....	92
5.21 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์D ที่มีการใช้งาน 3 - 7 ปี รหัส BS-3A.....	93
5.22 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดันใช้งานกับค่าความต้านทานที่วัดได้.....	95
5.23 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดัน $U_c$ กับค่าความต้านทานที่วัดได้.....	95
5.24 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของกับดักเสิร์จกับค่าความต้านทานที่วัดได้.....	98
5.25 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของกับดักเสิร์จกับกำลังไฟฟ้าสูญเสีย .....	98
5.26 ภาพถ่ายความร้อนตัวอย่าง SR-8C ขณะเริ่มต้นป้อนแรงดันระบบ 12.7 kV.....	99
5.27 ภาพถ่ายความร้อนตัวอย่าง SR-8C หลังจากปรับแรงดันระบบ 2 ชั่วโมง.....	99

รูปที่	หน้า
5.28 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่างอ้างอิงที่ 3 ก่อนและหลังการอบ.....	101
5.29 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่าง BS-1A ก่อนและหลังการอบ.....	101
5.30 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่าง BS-2C ก่อนและหลังการอบ.....	101
5.31 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่าง BS-11C ก่อนและหลังการอบ.....	102
5.32 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A (รุ่นเก่า) รหัส TSL-20A ที่ใช้งานมามากกว่า 7 ปี.....	108
5.33 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ C รหัส TSL-2A ที่ใช้งานมามากกว่า 7 ปี.....	108
5.34 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ D รหัส PNG-14 ที่ใช้งานมามากกว่า 7 ปี.....	109
5.35 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A (รุ่นใหม่) รหัส TSL-7C ที่มีความต้านทาน $2.5 \text{ G}\Omega$ .....	109
5.36 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ E รหัส TSL-4C ที่ใช้งานมามากกว่า 7 ปี และมีความต้านทาน $35 \text{ G}\Omega$ .....	109
5.37 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ E รหัส TSL-5C ที่ใช้งานมามากกว่า 7 ปี และมีความต้านทาน $16 \text{ G}\Omega$ .....	110
6.1 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 1.....	114
6.2 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส PR-14B (30 นาที).....	114
6.3 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 2.....	115
6.4 สภาพภายนอกของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส PR-15A.....	115
6.5 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส PR-15A.....	116
6.6 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 3.....	117
6.7 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส BS-19A .....	118
6.8 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 4.....	118
6.9 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส BS-23B.....	119
6.10 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส BS-24C.....	119
6.11 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 5.....	120
6.12 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส SR-9A.....	121
6.13 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส SR-10B.....	121
6.14 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส SR-11C (เริ่มต้นทดสอบ).....	121
6.15 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 6.....	122
6.16 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส CR-10A (30 นาที).....	123
6.17 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็กรหัส CR-11C .....	123

รูปที่	หน้า
6.18 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 7	123
6.19 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จCR-12C	124
6.20 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 8	125
6.21 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จCR-13A (30 นาที)	126
6.22 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 9	126
6.23 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จCR-14A (30 นาที)	127
6.24 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จCR-15C (30 นาที)	127
6.25 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 10	128
6.26 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จPD-4A	129
6.27 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จPD-5B	129
6.28 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็ร็จPD-6C	129
6.29 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กับค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเล็ร็จ ที่มีความชื้น เข้าไปภายใน	131
6.30 ภาพถ่ายความร้อนของกล่องตัวอย่างที่ ๓ ตัว ที่ระยะ 1 เมตร จากกล่องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน)	134
6.31 อุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างที่ ๘ ตัว เมื่อวัดด้วยกล่องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน, IFOV 3.5 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ	134
6.32 อุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างที่ ๓ ตัว เมื่อวัดด้วยกล่องชุดที่ 2 (เลนส์เทเล, IFOV 1.3 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ	135
6.33 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สูงสุดจากบริเวณแวลด์ล้อม( $\Delta T$ ) ของตัวอย่างที่ ๓ ตัว เมื่อวัดด้วยกล่องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน, IFOV 3.5 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ	135
6.34 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สูงสุดจากบริเวณแวลด์ล้อม( $\Delta T$ ) ของตัวอย่างที่ ๓ ตัว เมื่อวัดด้วยกล่องชุดที่ 2 (เลนส์เทเล, IFOV 1.3 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ	136
6.35 การกำหนดวัตถุจากค่า IFOV ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ d	137
6.36 การพิจารณาขนาดของกับดักเล็ร็จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมในการวัดอุณหภูมิ	138

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีอุปกรณ์จำนวนมากที่อาจได้รับความเสียหายและผลกระทบจากแรงดันเกินเสิร์จ เช่น หม้อแปลงจำหน่าย สายเคเบิลใต้ดิน รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ของผู้ใช้ไฟ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงทั้งสิ้น ทั้งนี้ กัปดักเสิร์จ (Surge Arrester) จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากช่วยลดขนาดของแรงดันเกินเสิร์จที่เกิดขึ้นไม่ให้เกินขีดจำกัดความคงทนของฉนวนของอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถลดอัตราความเสียหาย และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม กัปดักเสิร์จสามารถเกิดการเสื่อมสภาพโดยมีปัจจัยต่าง ๆ เป็นตัวเร่ง เช่น ระยะเวลาการติดตั้งใช้งาน การดีสชาร์จกระแสเสิร์จ สภาพแวดล้อมมลภาวะและความเปราะเปื้อน และกระบวนการผลิตกับดักเสิร์จ [1, 2] เป็นต้น ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าวู่ว กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิของกัปดักเสิร์จสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้กัปดักเสิร์จได้รับความเสียหายหรือเกิดระเบิดขึ้น ในขณะที่สุดแม้ว่าติดตั้งกับดักเสิร์จในระบบที่มีขนาดแรงดันปกติก็ตาม โดยเฉพาะกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Arrester) ซึ่งต้องต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าตลอดเวลา การระเบิดของกัปดักเสิร์จส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก เนื่องจากกระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานเพื่อปลดวงจรออก โดยหากเกิดขึ้นในวงจรสายจำหน่ายที่มีความสำคัญหรือมีโหลดมาก เช่น ในเขตชุมชนเมือง หรือย่านอุตสาหกรรม ก็จะส่งผลกระทบและอาจทำให้เกิดความเสียหายกับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้น แผนกรซ่อมบำรุงรักษา กัปดักเสิร์จจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบไฟฟ้าและลดปริมาณความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ในเบื้องต้นหากสามารถประเมินความเสื่อมสภาพหรืออายุการใช้งานเฉลี่ยของกัปดักเสิร์จ และดำเนินการเปลี่ยนตัวใหม่ได้ทันที่ก็จะช่วยลดความเสี่ยงต่าง ๆ เหล่านี้ได้

ในปัจจุบันมีวิธีการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จอยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งที่ดำเนินการได้ขณะที่กัปดักเสิร์จยังติดตั้งอยู่ในระบบ (On-line monitoring) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Off-line monitoring) โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงดันอ้างอิง (Reference voltage) กระแสรั่ว (Leakage current) แรงดันดีสชาร์จคงค้าง (Residual voltage) กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจสอบสภาพความเป็นฉนวนมาใช้ในการตรวจสอบกัปดักฟ้าผ่า เช่น การวัดกระแส Polarization หรือแรงดันย้อนกลับ (Return voltage) เป็นต้น [1, 3 - 6]

อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันในประเด็นของความยากง่ายในการทดสอบ ความถูกต้อง งบประมาณที่ใช้ในการลงทุนและบำรุงรักษาอุปกรณ์ ปัจจุบันบางวิธียังไม่มีแนวทาง หรือเกณฑ์ที่ใช้ประกอบการประเมินการเสื่อมสภาพหรืออายุการใช้งานของกัปดักเสิร์จเพื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติอย่างชัดเจน เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาใช้ยังมีราคาแพงหรือเป็นวิธีการที่เพิ่งนำมาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ

## 1.2 ที่มาของปัญหา

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีกัปดักเสิร์จติดตั้งอยู่เป็นจำนวนมากทั้งระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV โดยส่วนใหญ่ติดตั้งเพื่อป้องกันแรงดันเกินเสิร์จให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในสายจำหน่าย และหม้อแปลงไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่มีความสำคัญ เช่น สวิตช์ตัดตอนหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า และหม้อแปลงเครื่องวัด เป็นต้น ปัจจุบันกัปดักเสิร์จส่วนใหญ่ที่ใช้ทำงานเป็นชนิดโลหะออกไซด์ แต่บางส่วนก็ยังคงเป็นแบบเก่าหรือซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) อย่างไรก็ตามจะมีการเปลี่ยนมาใช้กัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ทั้งหมดในอนาคต โดยเฉพาะประเภทที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือกหุ้ม ซึ่งมีข้อดีมากกว่ากัปดักเสิร์จแบบเก่า แต่เนื่องจากปัญหาการระเบิดของกัปดักเสิร์จ หรือ อุปกรณ์ปลดวงจร ทำให้อุปกรณ์ป้องกันทั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์และรีโครเซอร์ทำงานตัดวงจรจนเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งส่งผลกระทบต่อและสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกรณีที่อุปกรณ์ปลดวงจร (Disconnecting Device) ไม่ทำงาน ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งเป็นการศึกษาปัญหาความเสียหายและการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยมีการสุ่มทดสอบเพื่อประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้และแนวทางการนำกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนมาใช้ตรวจสอบการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยผลการศึกษาสามารถนำมาใช้กำหนดแนวทางในการบำรุงรักษากัปดักเสิร์จให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

## 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาข้อมูลการใช้งานและความเสียหายของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
2. ศึกษาและประเมินความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
3. ศึกษาและพัฒนาแนวทางการตรวจสอบและประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์โดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน

#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. รวบรวมและศึกษาข้อมูลการใช้งานและความเสียหายของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV รวมทั้งวิธีการตรวจสอบสภาพกัปดักเสิร์จที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
2. สืบค้นและสุ่มเก็บตัวอย่างกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือกหุ้มซึ่งติดตั้งอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA และ 30 kV, 5 kA โดยพิจารณาถึงความแตกต่างของปัจจัยทางสภาพแวดล้อม และระยะเวลาการใช้งาน
3. ทดสอบตัวอย่างกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการช่วยการวัดค่าความต้านทาน กระแสรั่วแรงดันอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย อุณหภูมิที่ผิวของกัปดักเสิร์จ ดิสชาร์จบางส่วน และแรงดันดิสชาร์จคงค้าง เพื่อประเมินสภาพของตัวอย่างกัปดักเสิร์จที่ถอดเปลี่ยนมาจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า
4. ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของความแตกต่างทางสภาพแวดล้อมและระยะเวลาที่ติดตั้งใช้งานกับความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ
5. ศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิวกับความเสื่อมสภาพหรือการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จด้วยการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกัปดักเสิร์จที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ปริมาณกระแสรั่ว หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เป็นต้น โดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนเป็นเครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิ
6. ศึกษาและพัฒนาแนวทางการใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนมาตรวจสอบและประเมินความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จสำหรับการปฏิบัติงานในภาคสนาม

#### 1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1. จัดทำแบบสอบถามส่งให้กับผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดัน 22 kV และ 33 kV เพื่อสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของการติดตั้งใช้งานและปัญหาความเสียหายของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือกหุ้ม
2. รวบรวมและศึกษาข้อมูลความเสียหายของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า พร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงสาเหตุเบื้องต้น
3. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบและประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จ ซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์ทดสอบวัดค่าความต้านทาน ชุดทดสอบวัดกระแสรั่วเชิงความต้านทาน กำลังไฟฟ้าสูญเสีย แรงดันอ้างอิง และอุณหภูมิที่ผิวของกัปดักเสิร์จ รวมทั้งชุดทดสอบวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้าง และปริมาณดิสชาร์จบางส่วน

4. ตรวจสอบและเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบันทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV โดยนำข้อมูลที่รวบรวมและสรุปจากแบบสำรวจมาพิจารณา กำหนดแนวทางและสถานที่ในการถอดเปลี่ยนตัวอย่างกับดักเสิร์จ ซึ่งมีความแตกต่างทางสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งและระยะเวลาการใช้งาน รวมทั้งดำเนินการสำรวจและเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีระดับอุณหภูมิสูงผิดปกติและตัวอย่างที่มีการทำงานของอุปกรณ์ผิดปกติเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ
5. วางแผนและทำการทดสอบประเมินสภาพของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ถอดเปลี่ยนมาจากพื้นที่ต่าง ๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบและประเมินสภาพของตัวอย่างกับดักเสิร์จ รวมทั้งวิเคราะห์ผลความแตกต่างของปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ
7. ทำการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติซึ่งสำรวจพบในภาคสนามจากการใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน เพื่อนำมาประเมินสภาพของตัวอย่างกับดักเสิร์จและวิเคราะห์ถึงความเสื่อมสภาพหรือความเสียหายที่เกิดขึ้น
8. วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับความเสื่อมสภาพหรือความเสียหายของกับดักเสิร์จ โดยพิจารณาร่วมกับผลการทดสอบอื่น ๆ
9. ทำการทดสอบและวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนในทางปฏิบัติ
10. เสนอแนวทางการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน
11. สรุปและจัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

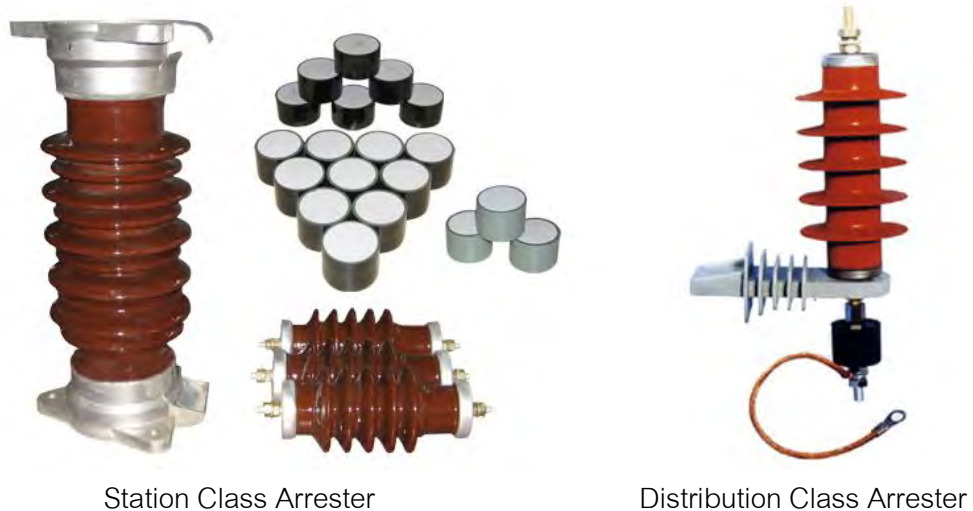
1. สามารถทำการทดสอบ วิเคราะห์ และประเมินความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ ได้
2. ทำให้ทราบถึงสภาพของกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ เพื่อนำไปใช้ประกอบการพิจารณาถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จสำหรับงานบำรุงรักษาต่อไปได้
3. ทำให้ทราบถึงแนวทางการใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนสำหรับตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และทราบถึงผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้งาน

## บทที่ 2

### การเสื่อมสภาพและการตรวจสอบสภาพของกัปเดตักเสิร์จ

#### 2.1 กัปเดตักเสิร์จ

กัปเดตักเสิร์จ (Surge Arrester) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นอุปกรณ์สำหรับป้องกันแรงดันเกินทั้งที่เป็นแรงดันเกินสวิตชิง และแรงดันเกินฟ้าผ่า ใช้สำหรับป้องกันอุปกรณ์สำคัญและมีราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า สายเคเบิลใต้ดิน เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอ็กเตอร์ หรืออุปกรณ์ทั้งหลายในสถานีไฟฟ้า เป็นต้น กัปเดตักเสิร์จมีคุณลักษณะเป็นความต้านทานไม่เชิงเส้น โดยที่ระดับแรงดันใช้งานปกติความต้านทานจะมีค่าสูง และลดลงเมื่อแรงดันมีค่าสูงขึ้น หรือเกิดแรงดันเกิน ซึ่งอาจแบ่งประเภทของกัปเดตักเสิร์จตามลักษณะโครงสร้างภายในได้เป็น 2 ชนิดคือ กัปเดตักเสิร์จชนิด SiC และชนิด ZnO แต่ในปัจจุบันได้เปลี่ยนมาใช้ชนิด ZnO เพียงอย่างเดียว ซึ่งกัปเดตักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์นี้สามารถควบคุมให้ระดับของแรงดันป้องกันหรือแรงดันดีสชาร์จคงค้างมีขนาดประมาณ 2.0 - 3.0 p.u. ได้ และยังมีควมไวต่อผลกระทบของความเปราะเปื้อนภายนอกน้อยเมื่อเทียบกับชนิด SiC ซึ่งกระแสรั่วตามผิวฉนวนภายนอกจะมีผลต่อการกระจายแรงดันและอาจทำให้อุณหภูมิของบล็อกกัปเดตักเสิร์จเพิ่มขึ้น จนจนเกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้ที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ กัปเดตักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ยังมีปริมาณกระแสรั่วต่ำมากไม่เกินหนึ่งมิลลิแอมป์ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องมีสปาร์กแกปเหมือนกัปเดตักเสิร์จชนิด SiC



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกัปเดตักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน



## 2.2 กั๊บดั๊กเสี๊รจซนดั๊โหลหะออกซั๊ต [7, 8, 9, 10]

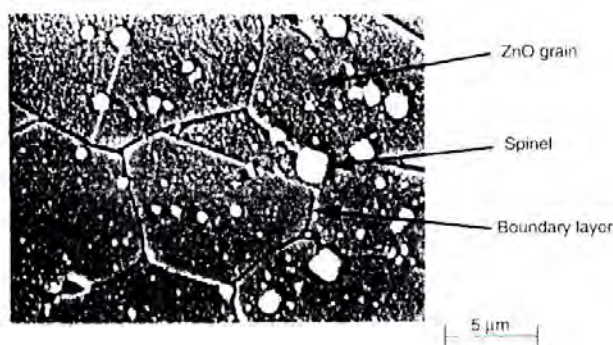
กั๊บดั๊กเสี๊รจซนดั๊ออกซั๊ตโหลหะหรือซนดั๊ไม่มีสปาร์กแก๊บเป็นผลดั๊กั๊ตที่คั๊นพบซั๊ นั๊ใหม่ (บรึ๊ษั๊ Matsushita Electric Industrial Co. in Japan ปี ค.ศ. 1968) เริ่มดั๊นใช้ป็องกั๊นแรงดั๊นเกิ๊น กั๊บวงจรวลั๊กทรอณั๊กส์เล็ก ๆ จากนั๊ นั๊มีกั๊รพั๊ฒนาเทคโนโลยั๊จนทำให๊มีซนดั๊ใหญ่ คุณภะพและ เสี๊ถั๊ยภะพในกั๊รทำงานสูงซั๊ น สะมารถนำมะประยูกดั๊ใช้ในระบะบไฟฟะกั๊ล้งได้ในเวละต่อมะ

### 2.2.1 โครงสร้างของกั๊บดั๊กเสี๊รจซนดั๊ออกซั๊ตโหลหะ

ควะมดั๊นทานไม่เป็นเซ็งเสี๊นของกั๊บดั๊กเสี๊รจทำด้วยออกซั๊ตโหลหะได้แก๊ Zinc Oxide (ZnO) เป็นวั๊สตุหลักในรฐะบของอนุภะคผสมด้วยสารเจือออกซั๊ตของ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , CoO, MnO,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CrO}_3$  สารเจือเหล่านั๊ ใส่ผสมเพิ่มเติมแล้วอดั๊กดั๊เป็นแผ่บสลั๊อกกกลมดั๊งแสดงในรฐะบที่ 2.2 ด้วยแรงอดั๊ค ประมะถ 30-50 Mpa แล้วเผาที่ควะมดั๊นบรยะกาศที่อุณหภูมั๊ 1,200°C หลังจกั๊การเผาแล้ว อนุภะคของ ZnO จะมึซนดั๊ประมะถ 5-10  $\mu\text{m}$  สั๊งเจือที่เติมเข้าไปจะทำให๊ระดั๊บพลังงานเปลั๊ยน ดั๊งนั๊ นคุณสมบั๊ติการนำไฟฟะและการจนวนเปลั๊ยนไปด้วย ออกซั๊ตเหล่านั๊จะเป็นจนวนเคลั๊ือบ อนุภะคนำไฟฟะของ ZnO เป็นฟั๊ล์มบาง ๆ หนาประมะถ 0.1  $\mu\text{m}$  ดั๊งแสดงในรฐะบที่ 2.3



รฐะบที่ 2.2 ตั๊วอย่างบสลั๊อกของกั๊บดั๊กเสี๊รจซนดั๊โหลหะออกซั๊ตที่ถูกั๊อดั๊กดั๊ให้กกลม [7]

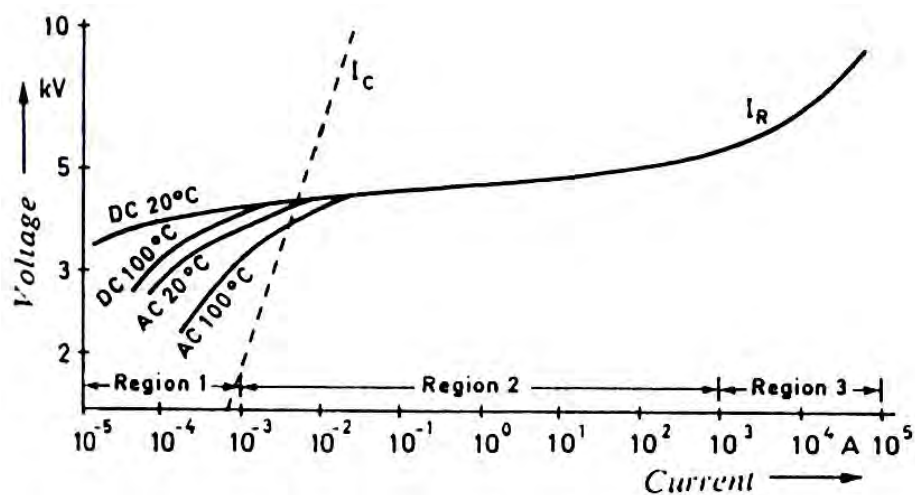


รฐะบที่ 2.3 อนุภะคของสารออกซั๊ตผสมที่ทำเป็นควะมดั๊นทานไม่เป็นเซ็งเสี๊น [9]

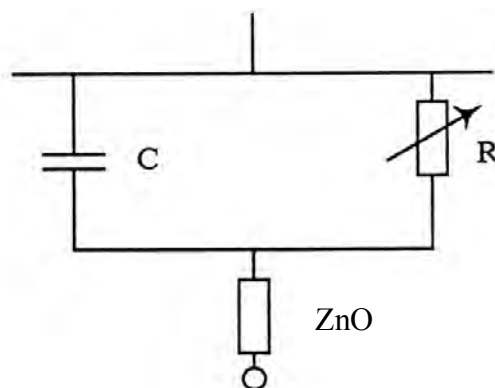
การเคลือบด้วยฟิล์มบาง ๆ ของสารฉนวนออกไซด์  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  จะทำให้ได้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันไฟฟ้า ตามสมการที่ 2.1

$$I = kV^\alpha \quad (2.1)$$

ค่าคงตัวของ  $\alpha$  มีค่าประมาณ 25 – 30 ซึ่งมีกราฟความสัมพันธ์ของ  $V$  และ  $I$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยสาร ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะน้อย ในขณะที่สารเคลือบภายนอก ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง  $10^{10} \Omega\text{-cm}$  และมีค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์สูงประมาณ 500 – 1,000 จึงมีคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ ฉะนั้นแผ่นบล็อกความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์จึงแทนได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงดัน- กระแสไฟฟ้าของ ZnO Block [9]



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของแผ่นบล็อกสารโลหะออกไซด์ของกับดักเสิร์จ [10]

## 2.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์

ลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

### *Region 1* (MCOV Region, Pre-breakdown Region)

เป็นบริเวณที่มีกระแสไหลน้อยกว่า 1 mA เนื่องจากสารเคลือบชั้น นรอบๆ ผลึกของ ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะสูง ทำให้ที่ระดับแรงดันต่ำๆ จึงมีกระแสรั่วไหลผ่านกัปดักเสิร์จที่มีปริมาณน้อยมาก โดยส่วนใหญ่เป็นกระแสรั่วเชิงความจุ (Capacitive current,  $I_C$ ) มากกว่ากระแสรั่วเชิงความต้านทาน (Resistive current,  $I_R$ ) แต่ขนาดของกระแสรั่วเชิงความต้านทานที่ไหลผ่านบล็อกจะเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิของกัปดักเสิร์จสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4

### *Region 2* (TOV and Switching Surge Region)

เป็นบริเวณที่มีกระแสไหล 1 mA ถึง 1,000 หรือ 2,000 A เมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหักโค้ง (knee point) โดยปริมาณของกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิในบริเวณนี้ เป็นผลให้กระแสเชิงความต้านทานมีค่ามากกว่ากระแสเชิงความจุไฟฟ้า

### *Region 3* (Lightning Region)

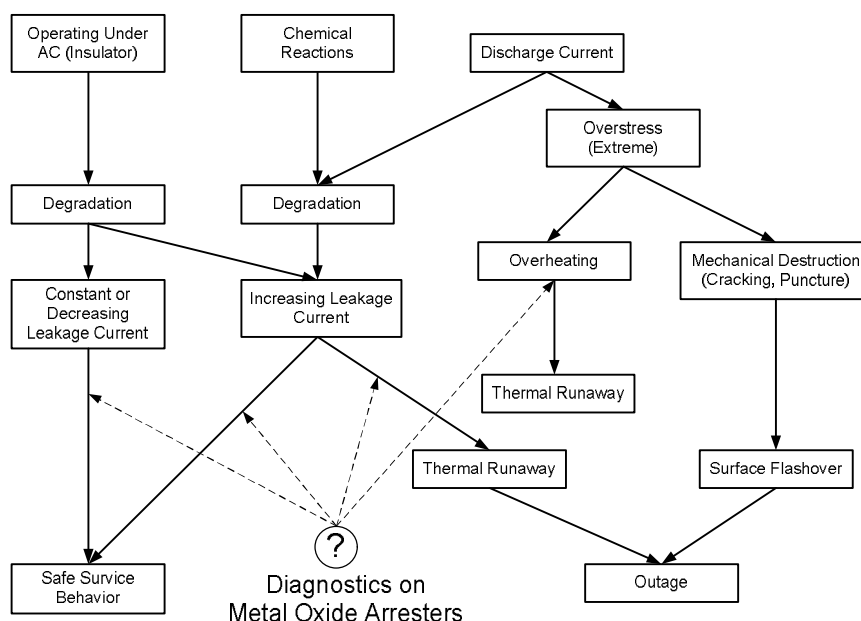
ถ้าแรงดันมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระแสมีค่าสูงมากเนื่องจากส่งผลต่อความต้านทานของผลึก หรือเกรนของ ZnO อย่างมาก ซึ่งเห็นได้จากราฟมีลักษณะโค้งขึ้น และมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น และมีปริมาณกระแสตั้งแต่ 1 ถึง 100 kA โดยแสดงถึงคุณลักษณะของความต้านทานโดยสมบูรณ์

## 2.3 การเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ

การเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ (Degradation) หรือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติภายใต้สภาวะต่าง ๆ ซึ่งทำให้กัปดักเสิร์จมีขนาดกระแสรั่วเชิงความต้านทาน (Resistive leakage current) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power losses) มีค่าสูงขึ้น [1, 2] โดยหลังจากที่กัปดักเสิร์จทำงาน หรือดีสชาร์จพลังงานจากแรงดันเกินเสิร์จ หรือแรงดันเกินชั่วคราว (TOV) พบว่าอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (V-I curve) ในช่วงก่อนการเกิดเบรคดาวน (Pre-breakdown region) หรือช่วงกระแสต่ำ ๆ โดยเฉพาะกรณีที่กัปดักเสิร์จได้รับกระแสที่มีขนาดค่ายอดสูงกว่ากระแสปกติ

### 2.3.1 ประเภทการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ

การเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จในขณะที่มีการใช้งานอยู่ในระบบไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทอย่างง่ายดังนี้ [1] ซึ่งสามารถสรุปได้ตามแผนภาพในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ประเภทของการเสื่อมสภาพและความเสียหายของกัปดักเสิร์จ [1]

1) การเสื่อมสภาพภายใต้สภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่องในระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันของระบบ เป็นการเสื่อมสภาพตามปกติของบล็อก ZnO หากมีการใช้งานเป็นเวลานาน ๆ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าว และระยะเวลาของการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จขึ้นอยู่กับการออกแบบของค้ประกอบต่าง ๆ และขั้นตอนในการผลิตบล็อก ZnO ของแต่ละบริษัท

2) การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V-I curve) เนื่องจากกระแสดีสชาร์จขณะรับแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตชิง หรือเรียกว่า Impulse degradation ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อกัปดักเสิร์จได้รับเสิร์จบ่อยครั้ง หรือเกิดจากบล็อก ZnO มีขนาดไม่เหมาะสมกับปริมาณพลังงานที่ได้รับ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อกัปดักเสิร์จได้รับมีขนาดมากกว่ากระแสดีสชาร์จปกติของกัปดักเสิร์จ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในช่วงกระแสต่ำเท่านั้น (Low current region) สำหรับที่กระแสสูง ๆ ขนาดของแรงดันคงค้าง (Residual voltage) ยังมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดจะอยู่บริเวณใกล้เคียงกับแรงดัน  $U_c$  (Continuous operating voltage) หรือ MCOV โดยขนาดกระแสรั่วที่มีชั่ววุดตรงกันข้ามกับชั่ววุดของกระแสดีสชาร์จจะมีขนาดสูงกว่ากระแสรั่วที่มีชั่ววุดเดียวกันกับกระแสดีสชาร์จ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สมมาตรของ Potential barrier รอบผลึกของ ZnO ในขณะที่กัปดักเสิร์จนำกระแสอิมพัลส์ โดยความเครียดของสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอบผลึกจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนไอออน และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ V-I curve

3) การเปลี่ยนแปลงของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V-I characteristic) เนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Chemical reactions) เช่น การลดลงของระดับออกซิเจนที่บริเวณขอบรอบ ๆ ของบอลลอค ZnO โดยสาเหตุของความเสื่อมสภาพนี้ อาจเป็นผลจากดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านในของโครงสร้างภายนอก (Housing) ทำให้ฉนวนรอบผลึก ZnO หรือ Potential barrier height มีขนาดลดลง และทำให้ปริมาณของกระแสรั่วภายใต้แรงดันพังทลาย (Breakdown or Reference voltage) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามกระแสรั่วในลักษณะนี้ จะเพิ่มขึ้นอย่างสมมาตรทั้งสองข้าง ซึ่งแตกต่างจากความเสื่อมสภาพที่เกิดจากการดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ

อัตราการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ดังต่อไปนี้ [2]

#### 1) องค์ประกอบของบอลลอค ZnO และกระบวนการผลิต

การเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานของกัปดักเสิร์จนั้นสัมพันธ์กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงของประจุออกซิเจนซึ่งส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของ ZnO โดยตรง ปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ และกระบวนการความร้อนในการผลิตบอลลอค ZnO ยังเป็นตัวกำหนดสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ( $\alpha$ ) ของบอลลอค ZnO โดยกัปดักเสิร์จที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าเนื่องจากมีปริมาณกระแสดีสชาร์จสูงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณของกระแสรั่วในระยะยาวยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ ZnO และกระบวนการผลิตของแต่ละบริษัทผู้ผลิต แม้ว่ากัปดักเสิร์จจะมีคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V-I curve) ตอนเริ่มต้นเหมือนกันก็ตาม

#### 2) ความเป็นเนื้อเดียวกันของ ZnO (Homogeneity)

ความไม่สม่ำเสมอของความนำไฟฟ้าของเนื้อ ZnO ทำให้ทางเดินของกระแสดีสชาร์จถูกจำกัดไว้บริเวณใดบริเวณหนึ่งมากกว่าจุดอื่น ๆ ส่งผลให้เกิดจุดที่มีความร้อนสูง (Hot spot) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกัปดักเสิร์จ หรือการเสื่อมสภาพภายหลังจากการดีสชาร์จที่เกิดขึ้น

### 3) อุณหภูมิภายนอก(Ambient temperature)

เนื่องจากปริมาณกระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จในช่วงก่อนการเบรกดาวน (Pre-breakdown region) หรือช่วงกระแสค่าต่ำ ๆ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบลิ๊อค ZnO เป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากคุณลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V-I curve) ดังนั้น เข้้ากับดักเสิร์จทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงก็จะมีปริมาณกระแสและกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สูงกว่าปกติ ดังนั้น การใช้งานกับดักเสิร์จที่อุณหภูมิสูงอาจเป็นตัวเร่งอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จ (Accelerated aging) เช่น ถ้ากับดักเสิร์จทำงานที่ระดับอุณหภูมิแวดล้อม 135°C เป็นระยะเวลา 1 วัน สามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference voltage,  $V_{1mA}$ ) ลดลงถึง 12% เป็นต้น นอกจากนี้ นหาการระบายความร้อนของกับดักเสิร์จทำได้ไม่ดีก็อาจทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในและมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal runaway) ได้

### 4) ระดับแรงดันที่ใช้งาน(Working voltage)

ปริมาณกระแสรั่วที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่ใช้งานโดยตรง แม้ว่ากับดักเสิร์จทำงานภายใต้แรงดันใช้งานปกติแต่การเสื่อมสภาพก็ยังคงเกิดขึ้น น้อยอย่างต่อเนื่อง จนบางกรณีสามารถนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนได้ โดยอัตราความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จนี้ ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันใช้งานและประเภทของแรงดันที่จ่ายให้กับกับดักเสิร์จ เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ เป็นต้น ดังนั้น ในการเร่งอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จมักทำการทดสอบที่แรงดันสูงกว่าปกติ

### 5) การออกแบบและลักษณะทางกายภาพของกับดักเสิร์จ

ลักษณะทางกายภาพของกับดักเสิร์จส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ โดยวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งอาจมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ล้วนเป็นตัวกำหนดความสามารถในการระบายความร้อน (Heat dissipation capability) และการกระจายแรงดัน (Voltage distribution) ตามผิวของบลิ๊อค ZnO โดยค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Stray capacitance), ความเสียหายของโครงสร้างภายนอก และสิ่งเปื้อนต่าง ๆ (Contamination) อาจทำให้การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและความร้อนไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ

## 6) มลภาวะและความเปราะเปื้อน (Pollution and Contamination)

ผลกระทบจากสิ่งเปราะเปื้อนจะสัมพันธ์กับการเกิดแถบแห้ง (Dry band) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงดันไฟฟ้ากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และอาจทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) และโคโรนา (Corona) ขึ้นภายในกับดักเสิร์จปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถทำลายและกัดกร่อนบริเวณผิวของกับดักเสิร์จหรือวัสดุที่หุ้มเปลือก ZnO ได้ โดยดีสชาร์จบางส่วนจะทำให้ปริมาณออกซิเจนของก๊าซรอบ ๆ เปลือก ZnO ลดลงจนกลายเป็นก๊าซซึ่งสามารถทำลายกับดักเสิร์จและเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จได้อีกทางหนึ่ง

## 7) สิ่งแวดล้อม (Environment)

ความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งกับดักเสิร์จ เช่น ภายในอากาศ ก๊าซ SF<sub>6</sub> หรือ ของเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) และของแข็ง ส่งผลต่อช่วงอายุการใช้งาน (Life span) ของวัสดุในส่วนต่าง ๆ โดยพบว่า ZnO ที่ติดตั้งภายในบริเวณที่บรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> จะมีการเสื่อมสภาพมากกว่าติดตั้งในอากาศ นอกจากนี้ ไอน้ำ หรือความชื้น ยังส่งผลทำให้มีกระแสรั่วสูงขึ้น ทั้งกับดักเสิร์จที่ติดตั้งภายในหม้อแปลงชนิดน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง (~ 95°) พบว่ามีอัตราการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว เป็นต้น

## 8) ความสามารถในการรองรับเสิร์จในรูปแบบต่าง ๆ (Surge absorption capability)

ดีสชาร์จจากแรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning discharge) เป็นการเสื่อมสภาพเนื่องจากการดีสชาร์จแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดค่ายอดของกระแสดีสชาร์จมากกว่าปริมาณของพลังงานที่ได้รับ โดยกระแสเสิร์จฟ้าผ่าที่มีขนาดสูงจำนวนไม่มากก็สามารถสร้างความเสียหายให้กับกับดักเสิร์จได้มากกว่ากระแสเสิร์จที่มีพลังงานสูงแต่มีขนาดของกระแสต่ำและมีจำนวนครั้งมากกว่าได้ เช่น แรงดันเกินชั่วคราวกระแสลับที่ความถี่กำลังไฟฟ้า โดยความคงทนต่อจำนวนของเสิร์จที่ดีสชาร์จผ่านกับดักเสิร์จจะลดลงอย่างมากหากได้รับกระแสเสิร์จฟ้าผ่าที่มีขนาดสูงมาก และส่งผลให้เกิดความเสื่อมสภาพจากเสิร์จฟ้าผ่าในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำ ๆ ของ V-I curve จนทำให้ปริมาณของกระแสรั่วมีขนาดสูงขึ้น

ดีสชาร์จจากแรงดันเกินสวิตช์ (Switching discharge) สำหรับการเสื่อมสภาพของ กัปดักเล็รจจากการดีสชาร์จแรงดันเกินสวิตช์จะให้ผลในลักษณะเดียวกับแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยจะ ขึ้นอยู่กับขนาดค่ายอดสูงสุดของกระแสดีสชาร์จมากกว่าพลังงานพบว่ากัปดักเล็รจภายหลังได้รับ สวิตช์เล็รจที่มีพลังงานสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงของกัปดักเล็รจน้อยมาก ในทางปฏิบัติอาจจะเลย ผลการเสื่อมสภาพเนื่องจากพลังงานที่ได้รับในการพิจารณาอายุการใช้งานของกัปดักเล็รจอย่างไร ก็ตามพลังงานที่มีค่าสูงอาจทำให้เกิดการพังทลาย (Puncture) ของบล็อก ZnO ได้ เนื่องจากเกิด การหลอมเหลวของ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ในบริเวณจุดที่มีระดับอุณหภูมิสูง (Hot spot)

ดีสชาร์จจากแรงดันเกินชั่วคราว (TOV discharge) การดีสชาร์จจากแรงดันเกิน ชั่วคราวส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามผลจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น อาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนถ้าแรงดันเกินที่ได้รับยังคงอยู่ และมีพลังงานที่สูง กว่าความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวตามที่กำหนดไว้จากบริษัทผู้ผลิต (TOV capability) เช่น กัปดักเล็รจที่ได้รับแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ เป็นต้น

## 2.4 วิธีการตรวจสอบและประเมินสภาพกัปดักเล็รจ

วิธีการทดสอบเพื่อประเมินสภาพของกัปดักเล็รจสามารถทำได้ใน 2 ลักษณะ [3] คือ การทดสอบด้วยเทคนิควิธีแบบไม่ทำลาย (Non-destructive techniques) และการทดสอบด้วย เทคนิควิธีแบบทำลาย (Destructive techniques) โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถทำได้ หลายวิธีด้วยกัน ทั้งที่เป็นการทดสอบขณะที่กัปดักเล็รจยังคงติดตั้งอยู่ในระบบ (On-line monitoring) และการถอดออกมาทดสอบ (Off-line monitoring) โดยส่วนใหญ่จะเป็นการวัด พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับคุณลักษณะการทำงานของกัปดักเล็รจโดยตรง เช่น ค่าความต้านทาน ปริมาณกระแสรั่ว แรงดันดีสชาร์จ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และความร้อน เป็นต้น [1, 3-6, 11-17] และ นำมาประเมินโดยเปรียบเทียบกับกัปดักเล็รจตัวใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งานซึ่งเป็นวิธีที่นำมาใช้ ในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ โดยวิธีการที่นำมาใช้นี้ ฝึกหลักการและข้อพิจารณาต่าง ๆ ในการประเมิน สภาพกัปดักเล็รจดังนี้



## 2.4.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance)

เนื่องจากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของขั้วลอค ZnO ของกัปดักเล็ร์จสามารถแทนได้ด้วยแผนภาพวงจรสมมูลทางไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.5 โดยตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) และความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (R) แทนคุณสมบัติของสารฉนวนออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคของ ZnO (Grain) ในสถานะที่แรงดันต่ำ ๆ หรือน้อยกว่าแรงดันเบรกดาวน์ (Knee point) กัปดักเล็ร์จจะมีค่าความต้านทานในระดับที่สูงมาก และมีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ (Temperature dependent) ซึ่งเราเรียกว่ากระแสไฟรั่ว (Leakage current) ดังนั้นภายใต้ระดับแรงดันใช้งานปกติ (System voltage) หรือต่ำกว่าแรงดันพิกัด (Rated voltage) กัปดักเล็ร์จที่มีสภาพปกติจะมีค่าความต้านทานสูงมากอยู่ในระดับ  $G\Omega$  ซึ่งเปรียบเสมือนวงจรไฟฟ้าเปิด (Open circuit) แต่จะมีค่าความต้านทานต่ำลงหากกัปดักเล็ร์จได้รับความเสียหายจนทำให้สารฉนวนเสื่อมสภาพ หรือเกิดการลัดวงจรของขั้วลอค ZnO เนื่องจากการเจาะทะลุจากจุดร้อน (Hot spot) ที่เกิดจากการนำกระแสค่าสูง ความเสียหายจากการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนหรือเกิดอาร์คภายในกัปดักเล็ร์จ ดังนั้นจึงสามารถใช้แยกแยะความแตกต่างระหว่างกัปดักเล็ร์จที่มีสภาพปกติ และกัปดักเล็ร์จที่ได้รับความเสียหายได้ โดยทั่วไปการวัดค่าความต้านทานของกัปดักเล็ร์จสามารถใช้เครื่องวัดค่าความเป็นฉนวน (Insulation tester) หรือที่เรียกกันว่าเมกเกอร์ (Megger) สำหรับกัปดักเล็ร์จชนิดติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้านิยมทดสอบด้วยเมกเกอร์ขนาด  $5\text{ kV}_{dc}$  [18, 19]

## 2.4.2 การวัดกระแสรั่ว (Leakage Current) และกระแสรั่วฮาร์มอนิกที่ 3

### 2.4.2.1 การวัดกระแสรั่วเชิงความต้านทาน (Resistive Leakage Current)

การเสื่อมสภาพของสารฉนวนออกไซด์ของกัปดักเล็ร์จชนิด ZnO จะส่งผลให้ค่าความต้านทานของกัปดักเล็ร์จในช่วง Pre-breakdown ลดต่ำลง หรือมีปริมาณกระแสไฟรั่วสูงขึ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ตรวจสอบและประเมินสภาพของกัปดักเล็ร์จได้โดยตรง อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระแสไฟรั่วของกัปดักเล็ร์จมีองค์ประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ กระแสเชิงความจุไฟฟ้า (Capacitive current) ซึ่งแสดงคุณลักษณะของค่าความจุไฟฟ้าของสารฉนวน ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในวงจร (Stray capacitance) หรือค่าความจุไฟฟ้าเกรดดิง (Grading capacitance) โดยทั่วไปมีค่ายอดกระแสเชิงความจุไฟฟ้าสูงสุดประมาณ  $0.2\text{ mA} - 3\text{ mA}$  ที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ [15] และมักไม่พบการเปลี่ยนแปลงของกระแสเชิงความจุไฟฟ้าหากกัปดักเล็ร์จเกิดการเสื่อมสภาพ สำหรับกระแสอีกส่วนหนึ่งคือกระแสเชิงความต้านทาน (Resistive current) จะแสดงคุณลักษณะของค่าความต้านทานของสารฉนวน ซึ่งหากกัปดักเล็ร์จเกิดการเสื่อมสภาพจะส่งผลให้มีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงขึ้น ดังนั้นความเสื่อมสภาพของกัปดักเล็ร์จจึงพิจารณาจากปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานได้โดยตรง

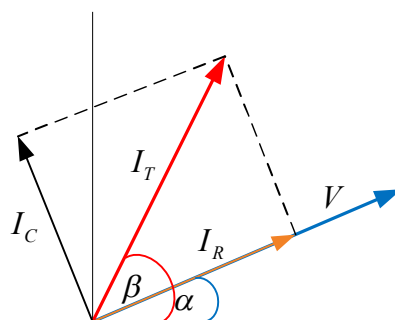
โดยทั่วไปที่ระดับแรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวนหรือที่แรงดันใช้งานปกติ กับดักเสิร์จ จะมีปริมาณกระแสในส่วนนี้ไม่เกิน 5% - 20% ของกระแสเชิงความจุไฟฟ้า หรือพิจารณาเป็นค่า ยอดได้ในช่วง  $10 \mu\text{A} - 600 \mu\text{A}$  [15] ที่ระดับแรงดันใช้งานปกติที่ระดับอุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$

#### 2.4.2.2 การวัดกระแสรั่วเชิงความต้านทานฮาร์มอนิกที่ 3

การพิจารณาความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จอีกวิธีการหนึ่ง คือทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วเชิงความต้านทานฮาร์มอนิกที่ 3 โดยขณะที่กับดักเสิร์จใช้งานภายใต้แรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่กำลังไฟฟารูปคลื่นของกระแสรั่วจะมีองค์ประกอบของความถี่มูลฐาน (Fundamental) และความถี่ที่สูงกว่า โดยขนาดของกระแสรั่วที่ความถี่ลำดับ 3 ( $3^{\text{rd}}$  Harmonic) ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของ V-I Characteristic หรือค่าคงตัว  $\alpha$  และจะเพิ่มสูงขึ้นหากบิล็อค ZnO เกิดการเสื่อมสภาพ แต่ในการทดสอบอาจไม่พบการเปลี่ยนแปลงนี้ ในช่วงแรงดันที่ต่ำกว่า 0.7 เท่าของแรงดันใช้งานต่อเนื่อง  $U_c$  ดังนั้นการพิจารณากระแสรั่วฮาร์มอนิกที่ 3 จึงควรใช้ผลการทดสอบที่แรงดัน  $U_c$  หรือ MCOV ของกับดักเสิร์จ และกำหนดให้ทดสอบที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$  [4, 6] โดยทั่วไปกระแสรั่วฮาร์มอนิกที่ 3 จะมีขนาดประมาณ 10% - 40% [15] ซึ่งอาจแปรเปลี่ยนไปตามขนาดแรงดันและระดับอุณหภูมิ

#### 2.4.2.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสไฟฟารั่ว

ในการวิเคราะห์กระแสรั่วต้องทำการแปลงกระแสไฟฟารั่วรวมของกับดักเสิร์จให้เป็นกระแสรั่วเชิงความจุไฟฟ้ากับกระแสรั่วเชิงความต้านทานซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้การคำนวณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analysis method) [20] เนื่องจากสามารถนำมาใช้วิเคราะห์กระแสรั่วเชิงความต้านทานฮาร์มอนิกที่ 3 ได้พร้อมกัน โดยกระแสรั่วเชิงความต้านทาน คือ ภาพฉาย (Projection) ของกระแสไฟฟารั่วรวมลงบนระนาบเดียวกันกับแรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสรั่วและแรงดันของกับดักเสิร์จ

เนื่องจากกระแสไฟฟ้ารั่วรวมที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิก ดังนั้น กระแสไฟฟ้ารั่วเชิงความต้านทานสามารถหาได้จากผลรวมของภาพฉายของทุก ๆ ส่วนประกอบ ฮาร์มอนิกของกระแสรั่วรวมที่ฉายลงบนระนาบเดียวกับส่วนประกอบฮาร์มอนิกของแรงดัน วิธีการ คำนวณให้นำข้อมูลทั้งรูปคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้ารั่วรวม มากระจายออกเป็นฮาร์มอนิก ลำดับต่าง ๆ โดยประยุกต์ใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ผลการ กระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสรั่วของกับดักเสิร์จแสดงได้ตามสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} V_{km} \cdot \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.2)$$

$$i_r(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{km} \cdot \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2.3)$$

เมื่อ	$V_0$	คือ	ส่วนประกอบกระแสตรงของแรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จ
	$I_0$	คือ	ส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสไฟฟ้ารั่วรวม
	$V_{km}$	คือ	ค่ายอดของแรงดันฮาร์มอนิกที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จลำดับที่ k
	$I_{km}$	คือ	ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ารั่วรวมฮาร์มอนิกลำดับที่ k
	$\alpha_k$	คือ	มุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิกที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จลำดับที่ k
	$\beta_k$	คือ	มุมเฟสของกระแสไฟฟ้ารั่วรวมฮาร์มอนิกลำดับที่ k

หลังจากกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสรั่วรวมของกับดักเสิร์จ จะสามารถคำนวณและสร้างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ารั่วรวมเชิงความต้านทานได้ตามสมการที่ 2.4, 2.5 และ 2.6

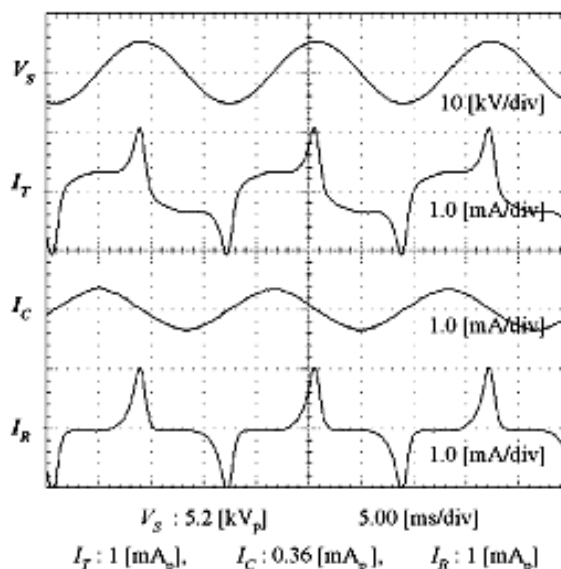
$$i_r(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{Rk} \cdot \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.4)$$

$$\text{เมื่อ} \quad I_{Rk} = I_{km} \cdot \cos(\beta_k - \alpha_k) \quad (2.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad i_r(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} I_{km} \cdot \cos(\beta_k - \alpha_k) \cdot \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2.6)$$

### 2.4.3 การวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Voltage)

แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง หรือค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับกับดักเสิร์จจนมีค่ายอดของกระแสเชิงความต้านทาน (Resistive current) ที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงคูณด้วย  $\sqrt{2}$  [4, 5, 6] สำหรับค่ายอดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในกรณีที่กระแสมีรูปคลื่นไม่สมมาตรกัน กำหนดให้เป็นค่ายอดสูงสุดของกระแสชั่ววูบชั่ววูบหนึ่งซึ่งมีค่าสูงกว่า โดยขนาดของกระแสจะต้องมีค่าสูงพอที่จะละเลยผลของกระแสเชิงความจุไฟฟ้า (Capacitive current) ได้ โดยทั่วไปมักกำหนดให้ค่าอยู่ในช่วง 0.05 mA - 1.00 mA ต่อพื้นที่หน้าตัด 1 cm<sup>2</sup> ของกับดักเสิร์จหนึ่งคอลัมน์ขึ้น อยู่กับแต่ละบริษัทผู้ผลิตปกติแล้วนิยมใช้ค่ากระแสอ้างอิงประมาณ 1 mA หรือ 3 mA รูปที่ 2.8 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบแรงดันอ้างอิงที่ขนาดของกระแสอ้างอิง 1 mA



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดันอ้างอิงที่ขนาดกระแสอ้างอิง 1 mA

### 2.4.4 การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Losses)

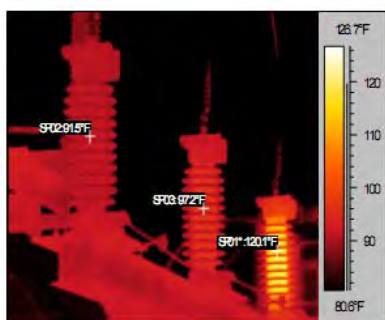
การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียใช้พื้นฐานการทดสอบเดียวกับการวัดกระแสไฟฟ้าว ซึ่ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสเฉลี่ยทั้งสองชั่ววูบของรูปคลื่นกระแสลับ โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสภาวะปกติจะมีค่าน้อยและค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จจนกว่าจะเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายขึ้น ภายในหรือภายนอกกับดักเสิร์จ ในช่วงนี้ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงถึงสภาพของกับดักเสิร์จได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับการวัดปริมาณกระแสรั่ว และกระแสรั่วฮาร์มอนิกที่ 3

อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ จะได้ผลดีมากหากทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จในสภาวะก่อนที่จะเกิดการเสื่อมสภาพเพื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกัน โดยส่วนใหญ่การทดสอบจะทำที่ระดับแรงดัน MCOV หรือ  $U_c$  (kV<sub>rms</sub>) ของกับดักเสิร์จ หรือเพื่อความสะดวกและง่ายอาจทดสอบที่ระดับแรงดัน 50% ของแรงดันดังกล่าว แต่หากทดสอบที่ระดับแรงดันต่ำกว่านั้น อาจให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อกับดักเสิร์จเสื่อมสภาพ หรือใกล้จะหมดอายุการใช้งานแล้วเท่านั้น

#### 2.4.5 การวัดอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน (Infrared Thermal Viewer)

ผลจากปัจจัยต่างๆ เช่น การดีสชาร์จกระแสเสิร์จ สภาพแวดล้อม และปัจจัยอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ นำมาส่งผลต่อความร้อนและอุณหภูมิของกับดักเสิร์จทั้งสิ้น ดังนั้นการวัดอุณหภูมิจึงเป็นพื้นฐานของการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ อุณหภูมิยังเป็นตัวกำหนดสภาพและความพร้อมในการทำงานของกับดักเสิร์จได้อีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิขณะใช้งานจริงนี้ จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับพลังงานและปริมาณกระแสรั่วของกับดักเสิร์จโดยตรง ดังนั้น การวัดอุณหภูมิของขั้วลอค ZnO หรืออุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จ จึงสามารถสื่อถึงสภาพของกับดักเสิร์จได้ และหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก็น่าจะบ่งบอกถึงเสถียรภาพทางความร้อนของกับดักเสิร์จได้เช่นกัน

ในปัจจุบันการวัดอุณหภูมินิยมใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer) หรืออาจใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด (Infrared camera) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ทั้งระดับอุณหภูมิที่ผิวและการกระจายความร้อนของกับดักเสิร์จ สื่อถึงความเสื่อมสภาพและความเสียหายภายในของกับดักเสิร์จได้ [19] รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของกับดักเสิร์จซึ่งมีอุณหภูมิสูงผิดปกติเมื่อเปรียบเทียบกับกับดักเสิร์จในเฟสข้างเคียง ในทางปฏิบัติเครื่องวัดอุณหภูมิ หรือกล้องถ่ายภาพความร้อนควรมีความละเอียดในการแยกแยะอุณหภูมิได้ในระดับ 0.5 °C [16] เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบกับกับดักเสิร์จในเฟสข้างเคียงได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของกับดักเสิร์จด้วยกล้องอินฟราเรด

#### 2.4.6 การวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD)

ดิสชาร์จบางส่วน หรือโคโรนา มักเกิดขึ้นในกับดักเสิร์จที่ใกล้หมดอายุการใช้งาน หรือเกิดความเสียหายภายในกับดักเสิร์จ เช่น ปัญหาจากความชื้น (Moisture ingress) อย่างไรก็ตาม หากตรวจพบดิสชาร์จบางส่วนก็ไม่ได้ยืนยันว่ากับดักเสิร์จเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนอาจเกิดขึ้นในบริเวณโครงสร้างด้านนอก (Housing) ของกับดักเสิร์จได้ เช่น ส่วนที่มีความแหลมคม ซึ่งไม่สร้างความเสียหายหรือส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของกับดักเสิร์จ ผลการทดสอบด้วยวิธีการนี้ จึงมีความไม่แน่นอนสูงและเชื่อถือได้น้อย นอกจากนี้ ยังมีความยุ่งยากในการนำไปใช้ปฏิบัติงานภาคสนาม เพราะต้องแยกปริมาณดิสชาร์จบางส่วนจากอุปกรณ์อื่น ๆ ออกไป อย่างไรก็ตามหากภายในกับดักเสิร์จเกิดความเสียหายหรือมีความชื้นสูงจะพบว่าปริมาณดิสชาร์จบางส่วนอาจมีค่าสูงซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกระแสรั่วที่สูงนี้ด้วย[21]

#### 2.4.7 การวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้าง (Residual Voltage)

การวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้างเป็นการทดสอบการทำงานของกับดักเสิร์จในช่วงการเบรกดาวน์ของผลึก ZnO (Breakdown region) และช่วง Upturn region เพื่อเป็นการตรวจสอบความสามารถในการป้องกันหรือลดทอนแรงดันเสิร์จของกับดักเสิร์จให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในมาตรฐานการทดสอบ [4] กำหนดให้ทดสอบแรงดันดิสชาร์จคงค้างของกับดักเสิร์จโดยจ่ายกระแสรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน  $8/20 \mu\text{s} \pm 20\%$  ขนาดค่ายอดในช่วง 0.01 – 2 เทาของกระแสพิกต์ และในระหว่างการทดสอบแต่ละครั้งให้รอจนอุณหภูมิของกับดักเสิร์จลดลงเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดิสชาร์จคงค้างที่วัดได้หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ ต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 5\%$  [6] จึงจะถือว่ากับดักเสิร์จยังคงอยู่ในสภาพดี

## บทที่ 3

### ข้อมูลการใช้งานและความเสียหายของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

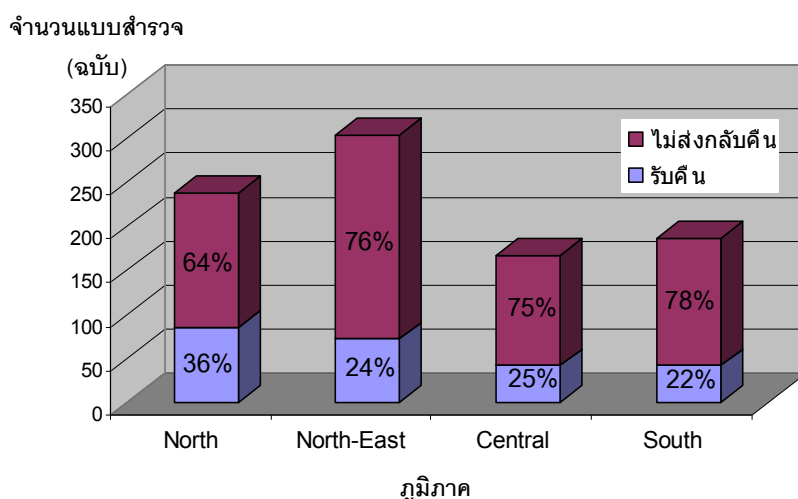
ในส่วนแรกของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาและสำรวจความเสียหายของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อนำมาพิจารณาและวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาเบื้องต้นและปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งศึกษาวิธีการบำรุงรักษา กัปดักเสิร์จ และรวบรวมข้อคิดเห็นในประเด็นต่าง ๆ จากผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ ยังนำข้อมูลความแตกต่างในแต่ละพื้นที่ มาสรุปเป็นแนวทางการสุ่มเลือก กัปดักเสิร์จ มาทดสอบประเมินสภาพในห้องปฏิบัติการในการศึกษาได้ให้ความสนใจและเลือกเก็บข้อมูลเฉพาะระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ กฟภ. ทั้งระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศและมีสภาพแวดล้อมหลายรูปแบบ จึงได้ขอความร่วมมือจากกองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อขอการจัดส่งแบบสำรวจไปยังการไฟฟ้าพื้นที่ต่าง ๆ โดยผลการเก็บข้อมูลความเสียหายของกัปดักเสิร์จสามารถสรุปเฉพาะหัวข้อที่สำคัญได้ดังนี้

#### 3.1 การเก็บข้อมูลและผลการจัดส่งแบบสำรวจ

ในการเก็บข้อมูลได้จัดทำเอกสารแบบสำรวจข้อมูลความเสียหายของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายของ กฟภ. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจและรวบรวมข้อมูลปัญหาความเสียหายของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือกหุ้มเท่านั้น รวมทั้งสำรวจข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน กัปดักเสิร์จในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและสาเหตุของความเสียหายของกัปดักเสิร์จ โดยแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อหลัก และมีเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ข้อมูลทั่วไป และข้อมูลของผู้ตอบแบบสำรวจ
- 2) ข้อมูลเบื้องต้นของพื้นที่ที่ติดตั้ง กัปดักเสิร์จ เช่น ระดับแรงดันใช้งานและสภาพแวดล้อม
- 3) ข้อมูลของกัปดักเสิร์จ เช่น จำนวนที่ติดตั้งใช้งาน ปริมาณของกัปดักเสิร์จแต่ละผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาที่ติดตั้งใช้งาน
- 4) ข้อมูลความเสียหายของกัปดักเสิร์จ โดยให้ความสำคัญกับปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น และลักษณะของความเสียหาย
- 5) ข้อมูลการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ โดยสอบถามถึงความถี่และวิธีการขณะปฏิบัติงานบำรุงรักษา และตรวจสอบสภาพ กัปดักเสิร์จ ในปัจจุบัน
- 6) ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ปฏิบัติงานในประเด็นต่าง ๆ

รวมทั้งขอความร่วมมือให้ผู้กรอกข้อมูลแบบสำรวจจัดส่ง หรือแนบบันทึเกเอกสารที่แสดงรายละเอียดของความเสียหาย หรือรูปถ่ายของกับดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหาย (ในกรณีที่สามารถทำได้) โดยแบบสำรวจได้จัดส่งไปยังการไฟฟ้าพื้นที่ต่าง ๆ ของแต่ละภูมิภาค รวมทั้งหมด 4 ภาค ซึ่งได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ จำนวนทั้งสิ้น 12 เขต แต่ละเขตได้รับแบบสำรวจในระดับการไฟฟ้าจังหวัด การไฟฟ้าอำเภอ การไฟฟ้าสาขา และการไฟฟ้าสาขาย่อย รวมจำนวนแบบสำรวจที่จัดส่งไปทั้งสิ้น 1895 ฉบับ และได้รับแบบสำรวจกลับคืนมาทั้งสิ้น จำนวน 422 ฉบับ หรือคิดเป็นเพียงร้อยละ 27 รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพสรุปผลการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในแต่ละภูมิภาค สำหรับรายละเอียดของแต่ละภูมิภาคในระดับจังหวัดสามารถดูได้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.1 แผนภาพสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในแต่ละภูมิภาค

เมื่อตรวจสอบและพิจารณาข้อมูลต่าง ๆ ในแบบสำรวจทั้งหมดที่ได้รับแล้ว กรณีที่พบเหตุการณ์ปัญหาซึ่งมีความน่าสนใจ เช่น ความเสียหายที่เกิดขึ้น อย่างรุนแรงบ่อยครั้ง หรือพบความบกพร่องของข้อมูลจึงได้ติดต่อกลับไปยังผู้กรอกแบบสำรวจและเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้อง เพื่อขอสัมภาษณ์และเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการสนับสนุนถึงสาเหตุของปัญหา และพิจารณาสุ่มเก็บกับดักเสิร์จมาทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป นอกจากนี้ ยังได้ติดต่อกลับไปยังการไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีการสำรวจภาคสนามเก็บข้อมูลความเสียหายของกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาความเป็นไปได้และแนวทางในการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จโดยใช้ภาพถ่ายความร้อนจากกล้องอินฟราเรด อย่างไรก็ตาม ในบพนี้ ได้รายงานสรุปเฉพาะหัวข้อหรือเนื้อหาที่มีความสำคัญซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาและการนำข้อมูลเหล่านี้ ไปใช้งานต่อไปเท่านั้น ซึ่งอาจแสดงรายละเอียดผลการสำรวจไม่ครบถ้วนตามหัวข้อทั้งหมดที่ได้กล่าวถึงข้างต้น



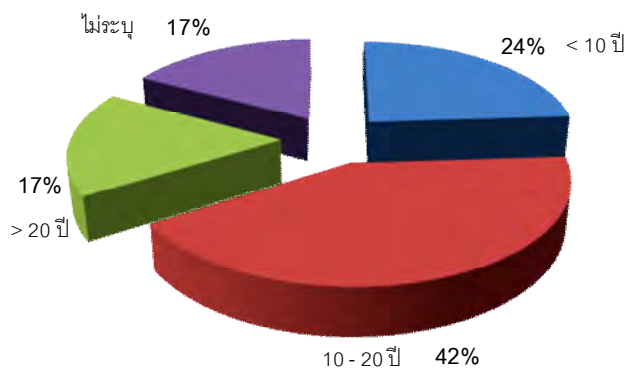
### 3.2 ข้อมูลทั่วไปของผู้กรอกแบบสำรวจ

ผู้กรอกแบบสำรวจส่วนใหญ่ถึง 74% เป็นพนักงานช่าง และส่วนน้อยเป็นวิศวกรไฟฟ้า หรืออื่น ๆ (ผู้จัดการ หรือหัวหน้า) ในสัดส่วน 12% และ 14% ตามลำดับ ดังแสดงในแผนภาพสรุปรูปที่ 3.2 ทั้งนี้เนื่องจากการไฟฟ้าในระดับอำเภอขนาดเล็ก การไฟฟ้าสาขา หรือการไฟฟ้าสาขาย่อยนั้น ส่วนใหญ่จะไม่มีวิศวกรไฟฟ้าประจำอยู่



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการทำงานของผู้กรอกแบบสำรวจ

อย่างไรก็ตามผู้กรอกแบบสำรวจส่วนใหญ่มีประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับกับดักเสิร์จมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานมากกว่า 10 ปี (59%) ตามแผนภาพในรูปที่ 3.3 จึงทำให้เชื่อมั่นได้ว่าข้อมูลที่ได้นั้นมาจากผู้ปฏิบัติงานที่ราบถึงเหตุการณ์ปัญหาความเสียหายของกับดักเสิร์จอย่างแท้จริง ตลอดจนทราบถึงวิธีปฏิบัติที่ใช้บำรุงรักษากับดักเสิร์จในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งสามารถให้ข้อเสนอแนะปัญหาต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี แม้ว่าบางส่วนอาจขาดความเข้าใจและไม่ทราบถึงวิธีในการรวบรวมข้อมูลและปัญหาต่าง ๆ เพื่อนำมากรอกลงในแบบสำรวจเชิงสถิติให้ถูกต้องและสมบูรณ์ได้



รูปที่ 3.3 ประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับกับดักเสิร์จของผู้กรอกแบบสำรวจ

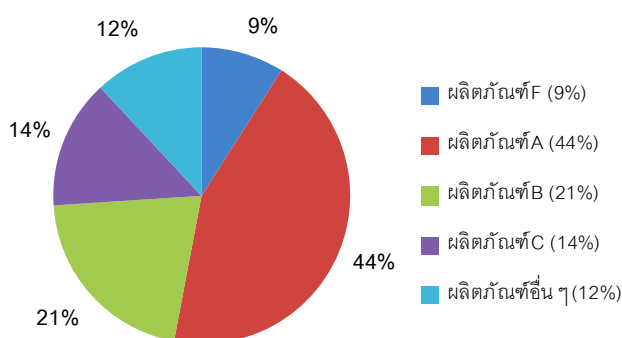
### 3.3 ข้อมูลการติดตั้งใช้งานกับดักเสิร์จ

แบบสำรวจทั้งหมดที่ส่งกลับคืนจำนวน 242 ฉบับ แบ่งออกได้เป็นข้อมูลจากระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV จำนวน 212 ฉบับ และ 30 ฉบับ ตามลำดับ หรือคิดเป็นประมาณ 28% และ 22% ของปริมาณแบบสำรวจที่จัดส่งไป เนื่องจากระบบ 33 kV มีใช้งานเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่างเท่านั้น จึงทำให้ข้อมูลที่ได้รับของระบบ 33 kV มีปริมาณน้อยตามไปด้วย สำหรับข้อมูลสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ พบว่าในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันมากที่ รูปแบบของสภาพแวดล้อมและขนาดสัดส่วนของพื้นที่ที่ครอบคลุมหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของแต่ละพื้นที่ ซึ่งยากต่อการพิจารณาหรือสรุปข้อมูลเหล่านี้ ให้แบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ให้ชัดเจนได้

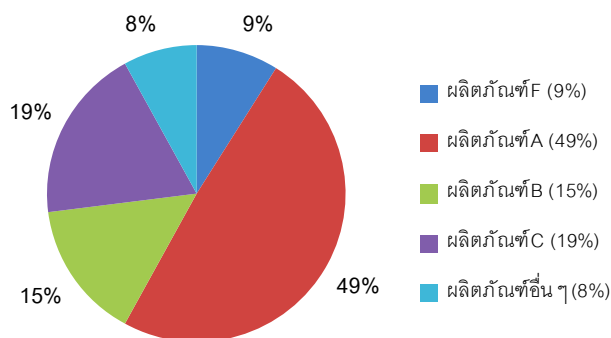
เนื่องจากในหัวข้อนี้ ต้องการสำรวจข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อให้ทราบถึงสัดส่วนการใช้งานของกับดักเสิร์จ โดยพิจารณาถึงปัจจัยพื้นฐานของผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จ และช่วงอายุการติดตั้งใช้งาน ซึ่งกำหนดให้กรอกข้อมูลในรูปแบบร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับปริมาณกับดักเสิร์จโดยรวมที่ติดตั้งในพื้นที่นั้น แต่ผลสำรวจส่วนหนึ่งให้ข้อมูลหรือกรอกรายละเอียดไม่ครบถ้วน จึงไม่สามารถนำข้อมูลเหล่านี้ มาพิจารณาได้ ทำให้ต้องละเลยหรือตัดข้อมูลของบางพื้นที่ออกไป

#### 3.3.1 ผลลัพธ์กับดักเสิร์จที่มีใช้งาน

กับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV พบว่าส่วนใหญ่มากกว่า 40% เป็นผลิตภัณฑ์ A รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์ B หรือผลิตภัณฑ์ C ในปริมาณอย่างละ 10-20% ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 20% เป็นของผลิตภัณฑ์ D, E, F และอื่น ๆ รวมกัน ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงสัดส่วนผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จที่มีการติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระดับแรงดัน 22 kV และ 33 kV ตามลำดับ สำหรับรายละเอียดของกับดักเสิร์จแต่ละผลิตภัณฑ์ได้แสดงไว้ในบทที่ 4



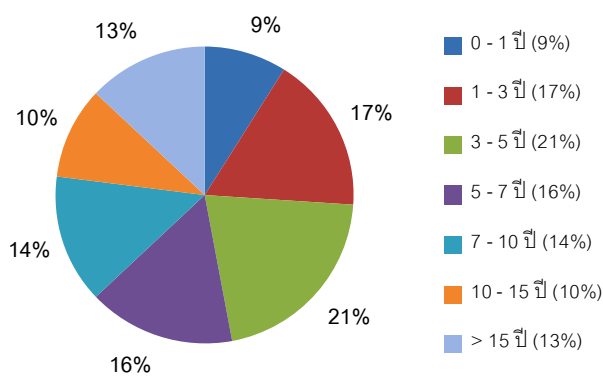
รูปที่ 3.4 สัดส่วนผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย แรงดัน 22 kV



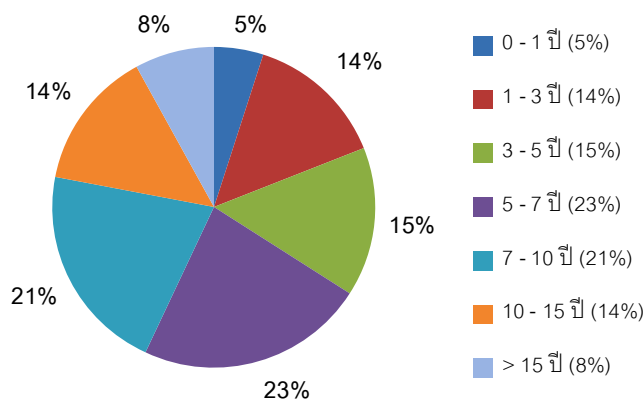
รูปที่ 3.5 สัดส่วนผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย แรงดัน 3 kV

### 3.3.2 ระยะเวลาการติดตั้งใช้งานของกับดักเสิร์จ

ในรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงให้เห็นว่ากับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์มีการใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV เป็นจำนวนมากในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีปริมาณกับดักเสิร์จชนิดนี้ ในช่วงเวลาดังกล่าวเกือบ 80% ของจำนวนกับดักเสิร์จทั้งหมด โดยมีสัดส่วนปริมาณกับดักเสิร์จที่ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา ตั้งแต่ ปี - 10 ปี ไม่แตกต่างกันมากนัก ประมาณ 14% - 23% ของกับดักเสิร์จทั้งหมด



รูปที่ 3.6 สัดส่วนกับดักเสิร์จที่ใช้งานในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ของระบบ 22 kV



รูปที่ 3.7 สัดส่วนกับดักเสิร์จที่ใช้งานในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ของระบบ 33 kV

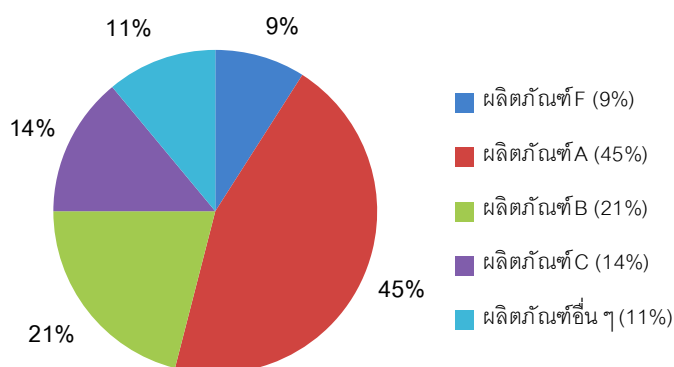
อย่างไรก็ตามข้อมูลที่แสดงนี้ เป็นผลสรุปโดยรวมของกับดักเสิร์จทั่วประเทศ ซึ่งในความเป็นจริงหากพิจารณาในแต่ละพื้นที่นั้นที่อาจพบว่ามีสัดส่วนกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกัน โดยเฉพาะพื้นที่ขนาดใหญ่ซึ่งมีปริมาณกับดักเสิร์จติดตั้งน้อย หรือในบางเขตที่ไม่ค่อยได้สร้างวงจรสายจำหน่ายไฟฟ้าขึ้นใหม่อย่างต่อเนื่อง ก็อาจพบว่ามีข้อมูลระยะเวลาที่ติดตั้งใช้งานกับดักเสิร์จไม่หลากหลาย ซึ่งทำให้มีอุปสรรคในการสุ่มเลือกกับดักเสิร์จมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น กรณีที่ต้องการตัวอย่างกับดักเสิร์จในสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกัน แต่มีระยะเวลาการติดตั้งใช้งานแตกต่างกัน เป็นต้น

### 3.4 ข้อมูลความเสียหายของกับดักเสิร์จ

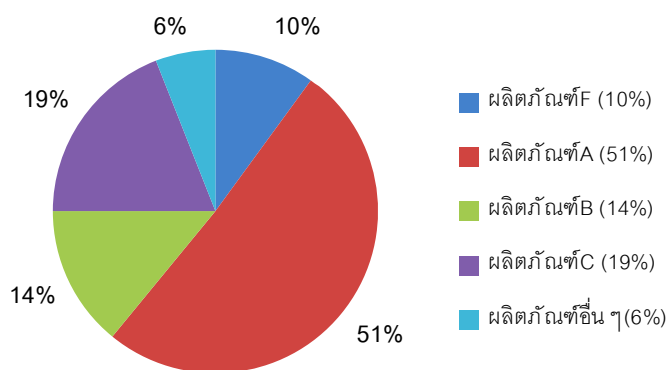
การศึกษาและสำรวจความเสียหายของกับดักเสิร์จ โดยพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อสัมพันธภาพกับความถี่และปริมาณกับดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหาย ซึ่งการให้ข้อมูลของผู้ปฏิบัติงานมีลักษณะเดียวกับการสำรวจในหัวข้อที่ 3.3 โดยให้ผู้กรอกแบบสำรวจรวบรวมปริมาณกับดักเสิร์จที่ชำรุดเสียหายในช่วงเวลา 5 ปีย้อนหลัง (พ.ศ. 2546 - 2550) ในพื้นที่ที่รับผิดชอบ และจำแนกพิจารณาในแต่ละปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจเกี่ยวข้อง ซึ่งกำหนดให้กรอกเป็นสัดส่วน หรือเปอร์เซ็นต์ (%) ลงในแต่ละตัวเลือก ดังนั้นการนำข้อมูลส่วนนี้ ไปวิเคราะห์และศึกษาในภาพรวมนี้ จำเป็นต้องทราบข้อมูลอย่างครบถ้วน โดยเฉพาะจำนวนกับดักเสิร์จที่ชำรุดเสียหายในช่วงเวลาดังกล่าว อย่างไรก็ตามสามารถสรุปผลการสำรวจความเสียหายของกับดักเสิร์จในภาพรวมของทุกพื้นที่ได้ตามลำดับดังนี้

### 3.4.1 ผลกระทบกับดักเสิร์จที่พบการชำรุดเสียหาย

ผลการสำรวจพบว่ากับดักเสิร์จของผลิตภัณฑ์ A เกิดการชำรุดเสียหายบ่อยครั้ง หรือมีจำนวนมากที่สุดในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา ทั้งในระบบแรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV โดยคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 44.1% และ 51.4% ตามลำดับ ของจำนวนกับดักเสิร์จทั้งหมดที่เกิดระเบิด หรือชำรุดเสียหายในทุก ๆ ลักษณะ และตามมาด้วยผลิตภัณฑ์ของ B และ C ในสัดส่วนประมาณ 14% - 20% และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ รวมกันประมาณ 20% ดังแผนภาพสรุปในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ของทั้งสองระดับแรงดัน ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหายในระบบ 22 kV

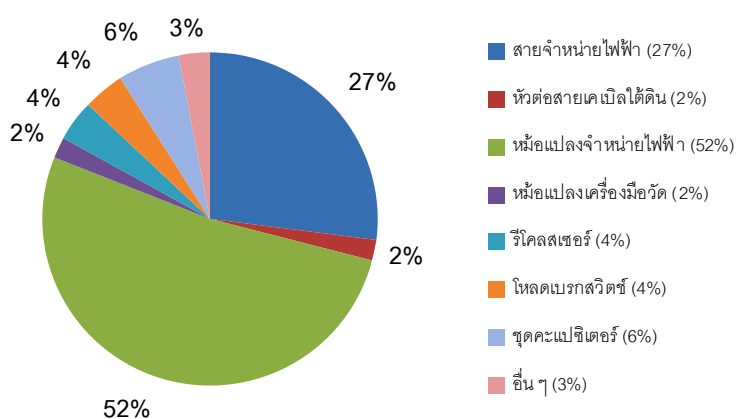


รูปที่ 3.9 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหายในระบบ 33 kV

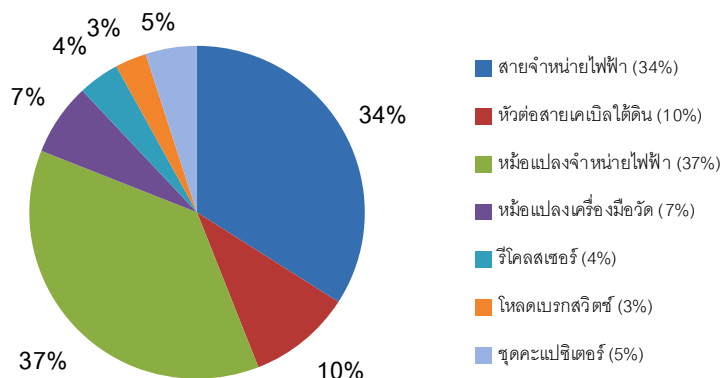
แม้ว่าผลิตภัณฑ์ A พบการชำรุดเสียหายมากที่สุด แต่สัดส่วนความเสียหายของแต่ละผลิตภัณฑ์ก็สอดคล้องกับปริมาณกับดักเสิร์จของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ติดตั้งใช้งานอยู่ ดังนั้น หากข้อมูลนี้ จึงไม่สามารถระบุได้ว่ากับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ใดมีความคงทน หรือมีคุณภาพที่ดีหรือด้อยกว่ากันอย่างไร โดยในแต่ละภูมิภาคก็พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันนี้

### 3.4.2 การชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานในตำแหน่งต่าง ๆ

การชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จพบว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับกับดักเสิร์จที่ติดตั้งป้องกันหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า ที่ระบบ 22 kV และ 33 kV ในสัดส่วน 51.5% และ 36.4% ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ รองลงมาคือกับดักเสิร์จที่ติดตั้งอยู่ในสายจำหน่ายไฟฟ้า ในสัดส่วน 27.0% และ 34.5% ตามลำดับ สำหรับกับดักเสิร์จที่บริเวณอื่น ๆ เช่น หัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน รีโคลเซอร์ หม้อแปลงเครื่องวัด มีการชำรุดเสียหายน้อยมากเมื่อเทียบกับที่ติดตั้งกับทั้งสองอุปกรณ์ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจะเห็นว่า สัดส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับปริมาณของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะหม้อแปลงและสายจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งมีการติดตั้งใช้งานเป็นจำนวนมากเป็นลำดับต้น ๆ



รูปที่ 3.10 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบ 22 kV

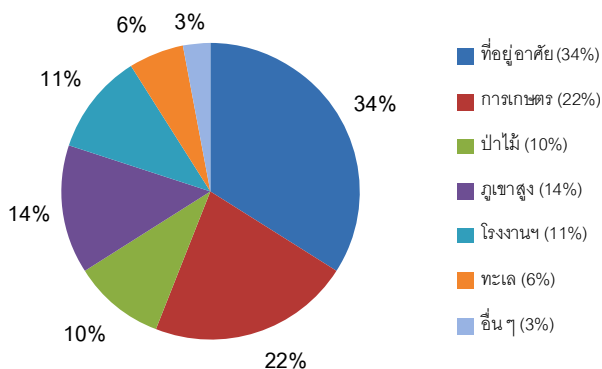


รูปที่ 3.11 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบ 33 kV

สำหรับความเสียหายของกัปดักเสิร์จที่หัวต่อสายเคเบิลใต้ดินส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยพบการระเบิดของกัปดักเสิร์จขณะสับสวิตช์จ่ายไฟหลังจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องเช่น ตัวอย่างที่พบในพื้นที่ของ อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ตของระบบ 33 kV ซึ่งมีการใช้งานสายเคเบิลใต้ดินเป็นจำนวนมาก สำหรับพื้นที่อื่น ๆ ก็มีรายงานปัญหาลักษณะเดียวกัน ทั้งที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลใต้ดิน และสายจำหน่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ

### 3.4.3 การชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

กัปดักเสิร์จในระบบ 22 kV ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของระบบจำหน่ายของ กฟภ. มักเกิดการชำรุดเสียหายในบริเวณพื้นที่ชุมชนที่อยู่อาศัย และที่ราชการเกษตร ในสัดส่วน 34% และ 22% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งมีลักษณะเดียวกันเกือบทุกพื้นที่และสอดคล้องกับผลสำรวจในหัวข้อที่ 3.5.2 เนื่องจากกัปดักเสิร์จส่วนใหญ่ที่ชำรุดเสียหายนั้นติดตั้งอยู่ที่หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในบริเวณพื้นที่ชุมชนหรือที่อยู่อาศัย



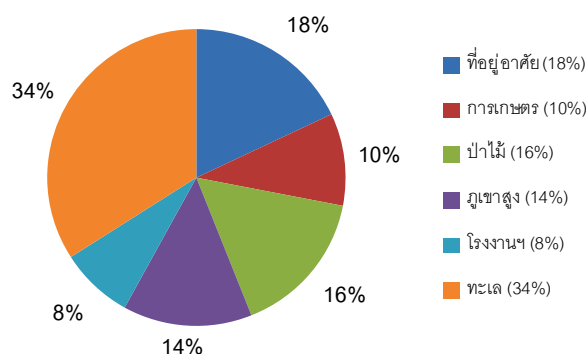
รูปที่ 3.12 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในระบบ 22 kV

โดยการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จในบริเวณสภาพแวดล้อมต่างๆ ในระบบ 22 KV นั้นเกิดขึ้น บ่อยครั้งในบางพื้นที่ โดยสามารถสรุปได้ในภาพรวมดังนี้

- 1) การชำรุดเสียหายในพื้นที่ภูเขาสูง(14%) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในพื้นที่ภาคเหนือในหลายพื้นที่ของจังหวัดเชียงใหม่ พื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในจังหวัดหนองคาย อุตรดิตถ์ และนครราชสีมา และในบางพื้นที่ของจังหวัดตราด และชลบุรี
- 2) การชำรุดเสียหายในพื้นที่ป่าไม้(10%) ส่วนใหญ่ก็เกิดขึ้นในพื้นที่ทางภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพื้นที่บางส่วนของภาคใต้ ในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์
- 3) การชำรุดเสียหายในย่านโรงงานอุตสาหกรรม (11%) ส่วนมากพบในพื้นที่ของภาคกลาง ในจังหวัดสระบุรี ชลบุรี กาญจนบุรี และนครปฐม
- 4) การชำรุดเสียหายในพื้นที่ใกล้ทะเล (6%) พบในพื้นที่ จังหวัดชลบุรี และหลายพื้นที่ในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์

อย่างไรก็ตามหลายจังหวัดในพื้นที่อุตสาหกรรมและติดทะเลนั้น ไม่ได้ส่งแบบสำรวจกลับคืน เช่น จังหวัดระยอง และปราจีนบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีความแปรอะเปื้อนและความชื้น สูง

สำหรับในระบบ 33 KV ซึ่งอยู่ในบริเวณพื้นที่ของภาคใต้ตอนล่าง การชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จส่วนมากพบในพื้นที่ใกล้ทะเล ในสัดส่วนถึง34% ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ทั้งสองด้านของภูมิภาคนี้ อยู่ใกล้กับทะเล โดยเฉพาะในพื้นที่ของจังหวัดพังงา และภูเก็ต สำหรับในสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ก็มีกับดักเสิร์จชำรุดเสียหาย แต่เกิดขึ้นในสัดส่วนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในพื้นที่ภูเขาสูงพบในจังหวัดสงขลา สำหรับพื้นที่ป่าไม้พบในจังหวัดพังงา นครศรีธรรมราช และตรัง

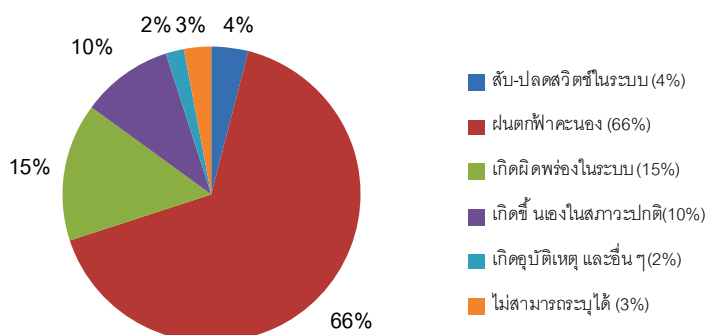


รูปที่ 3.13 สัดส่วนการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จในสภาพแวดล้อมต่างๆ ในระบบ33 KV



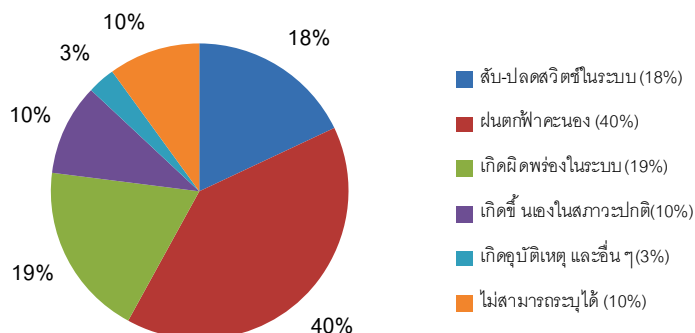
### 3.4.4 เหตุการณ์ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการชำรุดเสียหาย

การชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จในระบบ 22 kV ส่วนใหญ่เกิดขึ้น ในขณะที่มีฝนตกฟ้าคะนองถึง 66% รองลงมาเกิดขึ้น ในขณะที่เกิดการลัดวงจร (Fault) ในระบบไฟฟ้าประมาณ 15% และเกิดขึ้นเองในสภาวะปกติประมาณ 10% ตามลำดับ สำหรับเหตุการณ์ในลักษณะอื่น ๆ เช่น ขณะสับ-ปลดสวิตช์ เกิดอุบัติเหตุ หรือเกิดขึ้น โดยไม่ทราบสาเหตุนี้ มีสัดส่วนที่น้อยมา (<5%) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 สัดส่วนกับดักเสิร์จที่เกิดชำรุดเสียหายในเหตุการณ์ต่าง ๆ ในระบบ 22 kV

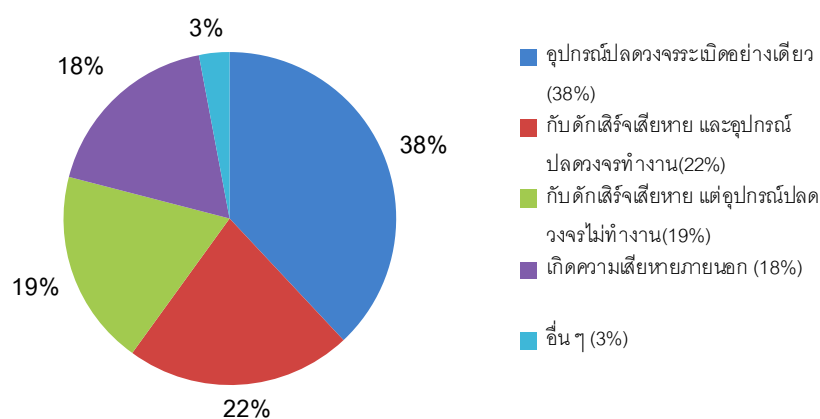
สำหรับในระบบ 33 kV พบว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้น ในขณะที่ฝนตกฟ้าคะนองเช่นกัน (40%) รองลงมา มีสาเหตุมาจากเกิดการลัดวงจรในระบบ และขณะสับ-ปลดสวิตช์ในระบบซึ่งมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันคือ 19% และ 18% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยผู้ให้ข้อมูลสรุปเบื้องต้นว่า การชำรุดของกับดักเสิร์จขณะสับ-ปลดสวิตช์ส่วนใหญ่เกิดขึ้น จากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลสำรวจในหัวข้อที่ 3.5.2 อย่างไรก็ตาม การชำรุดเสียหายโดยไม่สามารถระบุเหตุการณ์ได้ในพื้นที่นี้ มีค่อนข้างสูง (10%) ซึ่งทำให้ไม่สามารถสมมุติฐานถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นได้



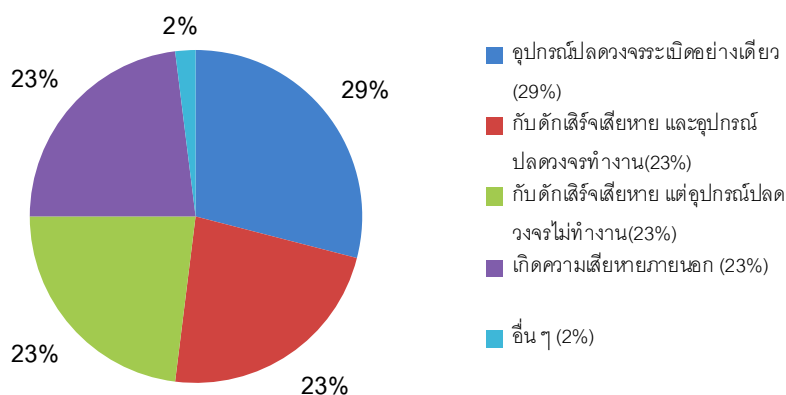
รูปที่ 3.15 สัดส่วนกับดักเสิร์จที่เกิดชำรุดเสียหายในเหตุการณ์ต่าง ๆ ในระบบ 33 kV

### 3.4.5 ลักษณะการชำรุดเสียหายของกับดีกเสิร์จ

การชำรุดเสียหายของกับดีกเสิร์จส่วนใหญ่พบเพียงการระเบิดหรือการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร (Disconnecting Device) เพียงอย่างเดียวทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV ประมาณ 38% และ 29% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 ซึ่งเป็นการทำงานเพื่อตัดวงจรของกับดีกเสิร์จที่เกิดความเสียหายให้ออกไปจากระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความเสียหายในรูปแบบอื่น ๆ ก็เกิดขึ้นในสัดส่วนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยกรณีที่กับดีกเสิร์จเกิดการระเบิดเสียหาย แต่อุปกรณ์ปลดวงจรไม่ทำงานนั้น พบมากถึงประมาณ 20% หรือกล่าวได้ว่ามีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดไฟฟ้าลัดวงจรแบบถาวร (Permanent fault) ถึง 20 ครั้ง ในเหตุการณ์ที่กับดีกเสิร์จเกิดระเบิดเสียหาย 100 ครั้ง ซึ่งปัญหานี้ ควรได้รับการพิจารณาและให้ความสนใจเป็นพิเศษ สำหรับความเสียหายรูปแบบอื่น ๆ ส่วนใหญ่เป็นปัญหาการแตกหักของแขนฉนวนจับยึดกับดีกเสิร์จ (Insulated bracket) และการอาร์คของขั้วต่อสายต่างๆ



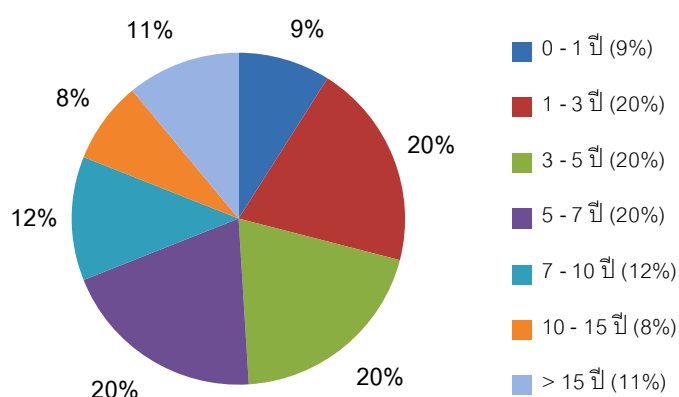
รูปที่ 3.16 ลักษณะการชำรุดเสียหายของกับดีกเสิร์จในระบบ 22 kV



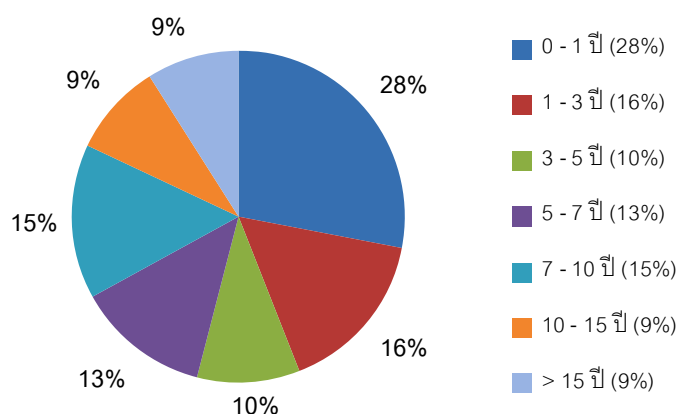
รูปที่ 3.17 ลักษณะการชำรุดเสียหายของกับดีกเสิร์จในระบบ 33 kV

### 3.4.6 ช่วงอายุการติดตั้งใช้งานของกัปดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหาย

ผลสำรวจในระบบ 22 kV และ 33 kV พบว่าระยะเวลาการติดตั้งใช้งานของกัปดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหายค่อนข้างแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19 ในระบบ 22 kV มีสัดส่วนของปริมาณกัปดักเสิร์จที่ชำรุดเสียหายในช่วงการใช้งานอายุต่าง ๆ ใกล้เคียงกับสัดส่วนของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งในช่วงอายุต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.6 แต่ในระบบ 33 kV พบว่ากัปดักเสิร์จที่ติดตั้งในช่วงไม่เกิน 1 ปี มีสัดส่วนการชำรุดเสียหายสูงถึง 28% แม้ว่ากัปดักเสิร์จที่มีอายุการใช้งานระดับนี้มีอยู่เพียง 5% ก็ตาม เนื่องจากพบการชำรุดของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งในช่วงเวลาดังกล่าวบ่อยครั้ง โดยมีสาเหตุจากปรากฏการณ์เฟลริโวลเทจเนนซ์



รูปที่ 3.18 สัดส่วนการชำรุดของกัปดักเสิร์จในแต่ละช่วงอายุการใช้งาน ของระบบ 22 kV



รูปที่ 3.19 สัดส่วนการชำรุดของกัปดักเสิร์จในแต่ละช่วงอายุการใช้งาน ของระบบ 33 kV

### 3.5 แนวทางการตรวจสอบสภาพของกบดักเสิร์จ

ในหัวข้อนี้ได้สอบถามและสำรวจความคิดเห็นของผู้รับผิดชอบและผู้ปฏิบัติงานบำรุงรักษาเกี่ยวกับกบดักเสิร์จ ถึงวิธีการและแนวทางปฏิบัติที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพกบดักเสิร์จในพื้นที่รับผิดชอบ รวมทั้ง สอบถามถึงแนวทางการพิจารณาการเสื่อมสภาพของกบดักเสิร์จด้วยการใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนที่ผิวของกบดักเสิร์จ โดยสามารถสรุปประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

#### 3.5.1 วิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพกบดักเสิร์จ

วิธีการที่ผู้ปฏิบัติงานนิยมนำมาใช้ตรวจสอบสภาพกบดักเสิร์จสามารถเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์การเลือกใช้งานในแต่ละวิธีจากผู้ตอบแบบสำรวจข้อนี้ ทั้งหมด โดยสามารถเลือกได้มากกว่าหนึ่งวิธี วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดตามลำดับ คือ พิจารณาจาก การทำงานของอุปกรณ์ปลดดวงจร การเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางภายนอกและระยะเวลาการติดตั้งใช้งาน เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ของการไฟฟ้าสาขา หรือสาขาย่อย ซึ่งไม่มีอุปกรณ์ทดสอบที่ทันสมัยมากนัก โดยเฉพาะกล้องถ่ายภาพความร้อน จึงจำเป็นต้องใช้การตรวจสอบสภาพด้วยวิธีการที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ เช่น การมองด้วยตาเปล่า หรือใช้กล้องส่องทางไกลเป็นแนวทางหลัก จะเห็นว่ามีเพียง 12% เท่านั้นที่ใช้การวัดอุณหภูมิที่ผิวของกบดักเสิร์จด้วยกล้องอินฟราเรด เนื่องจากปัจจุบันอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาแพง และยังไม่มีความพิจารณาและข้อปฏิบัติที่ชัดเจนสำหรับการตรวจสอบสภาพของกบดักเสิร์จ

ตารางที่ 3.1 ผลสำรวจวิธีการที่ผู้ปฏิบัติงานนำมาใช้ตรวจสอบสภาพกบดักเสิร์จ

วิธีการตรวจสอบ	ปริมาณการเลือกใช้งานจากผู้ตอบแบบสำรวจข้อนี้(%)
การทำงานของอุปกรณ์ปลดดวงจร	62
การเปลี่ยนแปลงของลักษณะภายนอก	55
ระยะเวลาการติดตั้งใช้งาน	35
อุณหภูมิที่ผิวของกบดักเสิร์จ	12
อื่น ๆ และไม่ตอบแบบสำรวจ	11
ค่าความต้านทานของกบดักเสิร์จ	10
ปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว	9

หมายเหตุ ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถเลือกวิธีการตรวจสอบที่ใช้ได้มากกว่า 1 วิธี

สำหรับแนวทางอื่น ๆ ที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์และคาดเดาจากเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่มักเกิดขึ้น และทำให้เกิดการชำรุดเสียหายหรือการระเบิดของกัปดักเสิร์จตามมาด้วย เช่น เกิดผิดพ่วงในระบบ การขาดตกของฟิวส์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและได้ยินเสียงดังคล้ายการระเบิด

### 3.5.2 ความถี่ในการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ

ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดความถี่ หรือระยะห่างของเวลาในการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จในแต่ละครั้งที่ชัดเจน ผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่ในแต่ละพื้นที่จึงได้กำหนดใช้ขึ้นเอง ซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.2 ตามลำดับการเลือกใช้งาน

ตารางที่ 3.2 ผลสำรวจความถี่ของการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ

ความถี่ในการตรวจสอบ	การใช้งาน (%)
ไม่มีกำหนดแน่นอน	45
ทุก 6 เดือน	17
อื่น ๆ	17
ทุก 1 ปี	13
ทุก 1-3 ปี	6
ทุก 3-5 ปี	2

ในตารางจะเห็นอย่างชัดเจนว่าส่วนใหญ่กว่า 45% นั้นยังไม่มีกำหนดหรือกำหนดระยะเวลาไว้เป็นแนวทางที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกันบางส่วนก็ใช้ระยะห่างในการตรวจสอบสภาพกัปดักเสิร์จในทุก 6 เดือน หรือ 1 ปี สำหรับแนวทางอื่น ๆ ที่มีการใช้กันอยู่นั้น ได้แก่ การตรวจสอบเมื่อเดินทางผ่าน ขณะเกิดไฟฟ้าดับหรือเหตุขัดข้องตรวจสอบในทุก 3 เดือน หรือ 1 เดือน หรือรอการเกิดชำรุดเสียหายเท่านั้น จึงค่อยทำการตรวจสอบและแก้ไข

### 3.5.3 แนวทางการใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน

ผลการสำรวจในเรื่องนี้ สอดคล้องกับผลที่ได้ในหัวข้อ 3.5.1 พบว่าผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่มากกว่า 70% ไม่เคยใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนตรวจสอบสภาพกัปดักเสิร์จเลย อย่างไรก็ตามสำหรับผู้ที่เคยใช้งานนี้ ก็มีกฎเกณฑ์ในการวิเคราะห์และพิจารณา โดยอาศัยแนวทางที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่ว ๆ ไปมาตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

- 1) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของกบดักเสิร์จในเฟสข้างเคียง
  - หากมีอุณหภูมิต่างกันมากควรพิจารณาเปลี่ยนกับดักเสิร์จในเฟสนั้น
  - เปรียบเทียบกับกับดักเสิร์จที่อยู่ในสภาพปกติ ความแตกต่างไม่เกิน 5%
- 2) พิจารณาระดับอุณหภูมิของกบดักเสิร์จ
  - พิจารณาเทียบกับค่ามาตรฐาน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อม
  - หากพบกับดักเสิร์จมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ ไม่ว่าจะระดับใดควรพิจารณาเปลี่ยน
  - หากพบว่าอุณหภูมิสูงกว่าค่ามาตรฐาน เช่น  $60^{\circ}\text{C}$  ให้ดำเนินการแก้ไขทันที
  - ดำเนินการตามมาตรฐานความร้อน ในแต่ละระดับความรุนแรง

ระดับ 1 อุณหภูมิระหว่าง  $0 - 30^{\circ}\text{C}$  แก้ไขตามวาระ

ระดับ 2 อุณหภูมิระหว่าง  $30 - 60^{\circ}\text{C}$  แก้ภายใน 1 เดือน

ระดับ 3 อุณหภูมิ  $>60^{\circ}\text{C}$  ให้แก้ไขเร่งด่วน

จากแนวทางที่ผู้ปฏิบัติงานใช้อยู่ในปัจจุบันเห็นได้ส่วนใหญ่ว่ากฎเกณฑ์ที่ใช้กับการตรวจสอบอุปกรณ์อื่น ๆ มาใช้กับกับดักเสิร์จ หรือบางแนวทางก็กำหนดขึ้นมาจาก

### 3.6 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

สำหรับความคิดเห็นและคำแนะนำจากผู้ปฏิบัติงานในเรื่องปัญหาการชำรุดเสียหายและข้อบกพร่องของกับดักเสิร์จ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 ผลกระทบจากการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จ

จากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานพบว่าการชำรุดเสียหายของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่งผลกระทบอย่างมากใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ ส่งผลกระทบต่อการทำงานของไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า ทรีพีสัน และชีวิตของผู้ใช้ไฟหรือผู้ปฏิบัติงาน

##### 3.6.1.1 ผลกระทบต่อการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ผู้ปฏิบัติงานอธิบายว่าขณะที่กับดักเสิร์จเกิดระเบิดและชำรุดเสียหายนั้น จะทำให้เกิดการผิพ่วงลงดินในระบบไฟฟ้าด้วย จนส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานเพื่อตัดกระแสลัดวงจรดังกล่าว โดยอาจพบเซอร์กิตเบรกเกอร์ทริป Lock out รีโคสเซอร์กิตเกิดการทริปรีโคส หรือฟิวส์แรงสูงหน้าหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าขาดตกเมื่อกับดักเสิร์จเกิดระเบิดขึ้น เป็นต้น การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับ ซึ่งการระเบิดหรือลัดวงจรของกับดักเสิร์จหนึ่งครั้งอาจทำให้ไฟฟ้าดับอย่างน้อย 1 ครั้งหรือมากกว่านั้น

บางครั้งการระเบิดอย่างรุนแรงอาจทำให้สายต่อกับดักเสิร์จหรือส่วนของบล็อก ZnO ขาดกระเด็นหลุดออกมาพาดบนคอนหรือส่วนอื่น ๆ ในบริเวณใกล้เคียง จนทำให้เกิดลัดวงจรแบบถาวรขึ้น นโดยความรุนแรงของกระแสลัดวงจรและความร้อนที่เกิดขึ้น บางครั้งอยู่ในระดับสูงมากพอที่จะทำให้สายแรงสูงขาดหรือหลอมละลายได้ ซึ่งหากเกิดในสายป้อนหลักก็อาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ ทั้งนี้เหตุการณ์ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นขณะมีฝนตกฟ้าคะนอง ซึ่งในสถานการณ์ดังกล่าวการปฏิบัติงานจะทำได้ยากมาก ยิ่งกรณีที่อยู่บริเวณปลดวงจรไม่ทำงานจะทำให้เกิดผิพรองลงดินถาวรจนเกิดไฟฟ้าดับเป็นเวลานานได้และส่งผลกระทบต่อการจ่ายไฟให้กับลูกค้า โดยเฉพาะในพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมนั้นอาจได้รับความเสียหายเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ หรือค่า SAIFI และ SAIDI ของระบบไฟฟ้าโดยตรง นอกจากนี้ขณะที่เกิดการระเบิดหรือลัดวงจรยังทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวได้ ซึ่งส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าบางประเภทหยุดการทำงานได้ โดยกระทบต่อคุณภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและทำให้การไฟฟ้าขาดความเชื่อมั่นจากผู้บริโภคด้วย รวมทั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการซ่อมบำรุงและค่าชดเชยต่าง ๆ ให้กับผู้ใช้ไฟ

### 3.6.1.2 ผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า อันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน

เนื่องจากปัจจุบันกับดักเสิร์จที่เกิดการชำรุดเสียหายหากไม่เป็นที่ต้นเหตุให้เกิดการผิพรองลงดินอย่างถาวรก็อาจไม่ได้รับการตรวจสอบหรือเปลี่ยนกับดักเสิร์จตัวใหม่อย่างทันทีทันใด ดังนั้นในช่วงเวลาระหว่างรอการตรวจสอบพบการชำรุดและเปลี่ยนกับดักเสิร์จนั้น ขณะที่เกิดฝนตกฟ้าคะนอง หรือมีการสับ-ปลดสวิตซ์ในสายจำหน่าย ซึ่งอาจเกิดแรงดันเกินเสิร์จขึ้นในระบบไฟฟ้าและหากมีขนาดสูงเพียงพอก็อาจทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งในบริเวณนั้นได้ช้ความเสียหายหรือเสื่อมสภาพเร็วขึ้น นี้ได้โดยเฉพาะอุปกรณ์ต่างๆ ของผู้ใช้ไฟฟ้าอาจได้รับผลกระทบจากเสิร์จที่เกิดขึ้นในสายจำหน่ายไฟฟ้านี้ด้วย

นอกจากผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแล้วแรงระเบิดและประกายไฟที่เกิดขึ้น ในขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการระเบิดยังทำให้อุปกรณ์อื่น ๆ บริเวณใกล้เคียงนั้นได้รับความเสียหายไปด้วย บางเหตุการณ์ผู้ปฏิบัติงานพบว่ถูกด้วยหรือครอบเอาที่พิวล์มีรอยแตกหรือบิ่นภายหลังจากกับดักเสิร์จเกิดระเบิดขึ้น กรณีนี้ หากเกิดขึ้น ขณะปฏิบัติงานหรืออยู่ในบริเวณที่ชุมชนอาจสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินต่าง ๆ ของผู้ใช้ไฟหรือผู้ปฏิบัติงานได้

### 3.6.2 ปัญหาการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จที่อยากให้มีพิจารณาตรวจสอบแก้ไข

จากความคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงานต่อประเด็นปัญหาและเหตุการณ์การชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จ พบว่ามีหลายประเด็นที่อยากให้มีการพิจารณาตรวจสอบแก้ไขหรือทำการศึกษา เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง ซึ่งสามารถสรุปและแบ่งออกได้เป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.6.2.1 ปัญหาความเสียหายของกัปดักเสิร์จและวิธีการป้องกัน

##### 1) การระเบิดของกัปดักเสิร์จขณะที่มีฝนตกฟ้าคะนอง หรือเกิดฟ้าผ่า

ผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่อยากให้มีการศึกษาสาเหตุและวิธีแก้ไขปัญหาการระเบิดของกัปดักเสิร์จที่เกิดขึ้น ขณะที่ฝนตก ฟ้าคะนอง แลชหรือมีฟ้าผ่าเกิดขึ้น เนื่องจากเกิดขึ้นบ่อยครั้งมากในแทบทุกพื้นที่ เมื่อเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ในลักษณะอื่น ๆ และมักตรวจพบการระเบิดของกัปดักเสิร์จโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ A (มีการระบุถึงในบางพื้นที่) และส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ที่โล่งแจ้งไม่มีสายดินเหนือศีรษะ และมีปริมาณการเกิดฟ้าผ่าบ่อยครั้ง สำหรับลักษณะความเสียหายของกัปดักเสิร์จส่วนใหญ่พบการแตกออกของเปลือกพอลิเมอร์หุ้มกัปดักเสิร์จจากแรงระเบิดและความร้อนจากภายในของบอลล็อค ZnO โดยอาจมีการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจรและความเสียหายในส่วนอื่น ๆ ร่วมอยู่ด้วย

#### สมมติฐานสาเหตุเบื้องต้นของปัญหา

ปัญหาในลักษณะนี้อาจเป็นผลจากการกำหนดขนาดพิกัดของกัปดักเสิร์จ หรือความคงทนต่อพลังงานที่ได้รับจากฟ้าผ่าไม่เพียงพอ ทำให้ในบางพื้นที่ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงในวงจรสายเฟส โดยหากฟ้าผ่าเกิดขึ้นบ่อยครั้งและมีขนาดค่ายอดของกระแสสูงก็สามารถทำให้กัปดักเสิร์จที่ติดตั้งในบริเวณใกล้เคียงนั้นได้รับความเสียหายหรือเกิดการเสื่อมสภาพจากพลังงานฟ้าผ่าและกระแสที่มีค่ายอดสูง ๆ ได้ สำหรับกรณีที่มีการตั้งข้อสังเกตในบวมผลิตภัณฑ์ในกรณีนี้หากผลิตภัณฑ์นี้มีข้อบกพร่องเรื่องของการป้องกันความชื้น หรือความเปราะเปื้อนต่าง ๆ จากภายนอก ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในกัปดักเสิร์จ และอาจเกิดวابلหรือลัดวงจรภายในกัปดักเสิร์จขึ้นได้



## 2) การระเบิดของกัปดักเสิร์จขณะสับปลดสวิตช์ในสายจำหน่ายไฟฟ้า

นอกจากการระเบิดที่เกิดขึ้นในขณะที่ฝนตกฟ้าคะนองแล้ว ผู้ปฏิบัติงานยังพบการระเบิดของกัปดักเสิร์จในบางครั้งขณะสับ-ปลดสวิตช์ หรือฟิวส์แรงสูงจ่ายไฟให้กับสายจำหน่าย หรือหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นขณะสับดรอปลเอาท์ฟิวส์ที่ละเฟส ในระบบจำหน่ายที่ติดตั้งสายไฟฟ้าซึ่งมีระยะทางยาว และมีโหลดน้อย สำหรับความเสียหายของกัปดักเสิร์จและผลกระทบต่างๆ เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับการระเบิดขณะมีฝนตกฟ้าคะนอง แต่มักเป็นเหตุการณ์เฉพาะหน้าซึ่งสามารถตรวจพบได้ง่ายกว่า

### สมมติฐานสาเหตุเบื้องต้นของปัญหา

จากการสำรวจข้อมูลของเหตุการณ์ปัญหาลักษณะนี้ พบว่าส่วนใหญ่มีโครงสร้างของระบบไฟฟ้าและรูปแบบของการปฏิบัติงานที่เอื้ออำนวยและเหมาะสมต่อการเกิดปัญหาแรงดันเกินชั่วคราวจากปรากฏการณ์โวลเทจแอนนซ์ขณะสับ-ปลดสวิตช์ต่าง ๆ ในลักษณะไม่พร้อมกันทั้ง 3 เฟส เช่น ฟิวส์ชนิดขาดตก หรือสวิตช์ใบมีด เป็นต้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนของกัปดักเสิร์จและเกิดระเบิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามในแต่ละกรณีอาจมีลักษณะเหตุการณ์รูปแบบการเกิด และความรุนแรงที่แตกต่างกันได้

## 3) การชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จในลักษณะอื่น ๆ

ในบางพื้นที่พบการระเบิดของกัปดักเสิร์จในสภาวะปกติหรือเกิดขึ้นโดยไม่มีทราบถึงสาเหตุ เช่น การระเบิดบ่อยครั้งของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งป้องกันชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังมีความเสียหายอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากสัตว์เลื้อยคลานหรือนก เช่น การเกิดวาบไฟของกัปดักเสิร์จจนทำให้ชิ้นส่วนได้รับความเสียหายบางครั้งตรวจพบการแตกหักของส่วนต่าง ๆ ภายนอกของกัปดักเสิร์จ เช่น ตัวจับยึดกัปดักเสิร์จ(Bracket) จุดสัมผัสหรือชิ้นส่วนเชื่อมต่อต่างๆ โดยพบบ่อยครั้งมากในบางผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ A และ B ที่ผลิตภายในประเทศ สำหรับในพื้นที่ที่ติดทะเลเคยพบเหตุการณ์เกิดวาบไฟตามผิวของกัปดักเสิร์จ หรือมีกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินมีปริมาณสูง เบื้องต้นผู้ปฏิบัติงานคาดว่าอาจเกิดจากคราบเกลือที่ติดตามผิวของกัปดักเสิร์จ

### สมมติฐานสาเหตุเบื้องต้นของปัญหา

กรณีปัญหาที่กับดักเสิร์จเกิดระเบิดโดยไม่ทราบถึงสาเหตุที่ชัดเจน ก็อาจเกิดขึ้น จากกับดักเสิร์จนี้ นี้อาจมีความผิดปกติ หรือเกิดการเสื่อมสภาพ จนทำให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเกิดระเบิดจากการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนในที่สุด ซึ่งผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถพิจารณาได้ด้วยตาเปล่า ควรใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนของกับดักเสิร์จมาพิจารณาเท่านั้น สำหรับกรณีอื่น ๆ ที่กับดักเสิร์จเกิดระเบิด เช่น การระเบิดของกับดักเสิร์จที่ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า อาจยังไม่สามารถสมมติฐานสาเหตุที่ชัดเจนได้

สำหรับปัญหาการการแตกหักของแขนฉนวนจับยึดกับดักเสิร์จ หรือการชำรุดของชุดเชื่อมต่อต่าง ๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ A และ B ซึ่งได้รับแจ้งจากผู้ปฏิบัติงานในหลายพื้นที่ ก็อาจเป็นผลมาจากคุณภาพของวัสดุ กะบวนการผลิต หรือความสามารถในการรับแรงกด แรงเค้นของแขนฉนวนจับยึดกับดักเสิร์จที่ออกแบบไว้ไม่เพียงพอ นอกจากนี้ ปัญหาอื่น ๆ เช่น การรวบไฟตามผิวจากสัตว์เล็ก อยุ่สถาน หรือมลภาวะและความเปราะเปื้อน ก็เป็นปัญหาที่เกิดขึ้น ตามปกติและเข้าใจถึงสาเหตุได้โดยทั่วไป จึงควรหาวิธีการป้องกัน หรือเสนอแนะแนวทางพัฒนาผลิตภัณฑ์ เช่น การเลือกวัสดุพอลิเมอร์ และการออกแบบสัดส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างภายนอก

#### 3.6.2.2 ปัญหาการลัดวงจรและการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ปลดวงจร

เนื่องจากขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการเสื่อมสภาพ หรือระเบิดขึ้น ปริมาณกระแสรั่วและความร้อนที่สูงขึ้นจะกระตุ้นทำให้สารระเบิดภายในอุปกรณ์ปลดวงจรทำงานและระเบิดออก เพื่อตัดขั้วต่อโลหะและสายต่อกับดักเสิร์จลงดินให้หลุดออกจากด้านล่างของกับดักเสิร์จ ซึ่งเป็นการตัดวงจรกับดักเสิร์จที่ได้รับความเสียหายให้ออกไปจากระบบไฟฟ้า และป้องกันไม่ให้เกิดผิดพลาดลงดินถาวรผ่านตัวกับดักเสิร์จ อย่างไรก็ตามจากผลการสำรวจได้พบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรใน 2 ลักษณะ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความเสียหายในระบบไฟฟ้าและการปฏิบัติงาน โดยในเบื้องต้นผู้ปฏิบัติงานอยากให้มีการตรวจสอบและแก้ไข ดังนี้

##### 1) ปัญหาการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าจากสายต่อกับดักเสิร์จ

ในกรณีที่ติดตั้งสายต่อกับดักเสิร์จให้มีความยาวมากเกินไป หรือติดตั้งไม่แข็งแรงพอทำให้เกิดปัญหาตามมาหลังจากที่อุปกรณ์ปลดวงจรระเบิดดีดตัวออก โดยส่วนของสายและขั้วต่อลงดินที่หลุดออกมานั้น อาจกระเด็นไปสัมผัสกับสายไฟ หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงจากแรงระเบิดที่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้น ภายหลังจากแรงลม หรือจากสัตว์ต่างๆ ที่ไปสัมผัส เช่น นก และสัตว์เลื้อยคลาน เป็นต้น

บางครั้งยังเกิดขึ้น จากสายส่งแรงสูงด้านบนของกับดักเสิร์จในกรณีทีกับดักเสิร์จเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงจนทำให้ขั้วต่อสายไฟแรงสูงด้านบนหลุดกระเด็นออกไปพาดกับคอนหรืออุปกรณ์ใกล้เคียง ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ อาจทำให้เกิดการผิพรองหรือลัดวงจรในระบบอย่างถาวร และทำให้อุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ในสายจำหน่ายทำงาน เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ หรือฟิวส์ชนิดขาดตก

## 2) ความผิดปกติในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

ความผิดปกติในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมากและทำให้ยากต่อการตรวจสอบและแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้น บ่อยครั้งที่ผู้ปฏิบัติงานพบกับกับดักเสิร์จเกิดการระเบิดเสียหายแต่อุปกรณ์ปลดวงจรกลับไม่ทำงาน หรือไม่ระเบิดเพื่อติดสายต่อลงดินของกับดักเสิร์จออก ทำให้เกิดการผิพรองลงดินอย่างถาวรผ่านกับดักเสิร์จซึ่งเสียหายหรือเกิดลัดวงจรภายในไปแล้ว เป็นสาเหตุทำให้สวิตช์ต้นทางเปิดออกและไม่สามารถสับกลับคืนได้ ก่อให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลาานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากความเสียหายภายนอกของกับดักเสิร์จเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ยากต่อการสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติได้อย่างชัดเจน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผู้ปฏิบัติงานจะพิจารณาถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จที่เสียหายโดยพิจารณาจากการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรเป็นอันดับแรก อย่างไรก็ตามบางครั้งมีการตรวจพบการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจรในสภาวะและสภาพแวดล้อมปกติทั้งทีกับดักเสิร์จยังคงมีสภาพดีอยู่ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่ทราบถึงสาเหตุที่เกิดขึ้น หนึ่งกัน

### สมมติฐานสาเหตุเบื้องต้นของปัญหา

ความผิดปกติในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรเบื้องต้นคาดว่าอาจเกิดจากคุณภาพของตัวอุปกรณ์เอง เนื่องจากภายในของอุปกรณ์ประกอบไปด้วยสารระเบิด ซึ่งหากมีความชื้น หรือสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เข้าไปภายในก็อาจทำให้การทำงานผิดพลาดหรือไม่ทำงานได้ หรืออาจเกิดขึ้น ตั้งแต่การออกแบบ มาตรฐาน และกระบวนการผลิตของอุปกรณ์ดังกล่าว ในบางกรณีก็ตรวจพบการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจรแต่การทำงานเกิดขึ้น นอย่างไม่สมบูรณ์ทำให้ยังคงติดอยู่กับส่วนล่างของกับดักเสิร์จ

### 3.6.2.3 อันตรายและความเสียหายจากการชำรุดเสียหายของกัปดักเสิร์จ

นอกจากกรณีปัญหาการระเบิดของกัปดักเสิร์จและการทำงานที่ผิดปกติของอุปกรณ์ ปลดวงจร ผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น นตามาซึ่งก่อให้เกิดอันตรายและความเสียหายกับส่วนอื่น ๆ ในบริเวณใกล้เคียง ก็เป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องได้รับความสนใจ เพื่อหาวิธีป้องกันและลดทอนปัญหา ดังกล่าว โดยเฉพาะในกรณีที่กัปดักเสิร์จเกิดระเบิดขึ้น ในย่านชุมชนที่อยู่อาศัย การกระจายออก ของชิ้นส่วนและประกายไฟต่าง ๆ ทำให้ชาวบ้านได้รับความเดือดร้อนเสียหายต่อชีวิตและ ทรัพย์สิน เช่น ยานพาหนะ ตัวอาคาร หรือแม้กระทั่งกับตัวผู้ปฏิบัติงานเองก็เคยถูกกระแสไฟฟ้าดูด ขณะกำลังแก้ไขระบบไฟฟ้าแรงต่ำในบริเวณที่มีกัปดักเสิร์จแรงสูงรั่วลงดิน หรือได้รับอันตรายจาก การระเบิดของกัปดักเสิร์จขณะปฏิบัติงานโดยตรง เป็นต้น

### 3.6.2.4 แนวทางและวิธีการตรวจสอบกัปดักเสิร์จที่ชำรุดเสียหาย

สำหรับปัญหาความล่าช้าในการปฏิบัติงาน มักเกิดขึ้นในกรณีที่กัปดักเสิร์จเกิด การชำรุดเสียหาย แต่ไม่มีการระเบิด หรือเผาไหม้อย่างรุนแรงจนทำให้โครงสร้างต่าง ๆ ของกัปดัก เสิร์จเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอาจพบเป็นปัญหามากยิ่งขึ้น นอีกหากอุปกรณ์ปลดวงจรไม่ทำงาน ซึ่ง จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานมีความยากลำบากมากในการสังเกตสีผิดปกติภายนอกของกัปดักเสิร์จจาก การตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรือใช้กล้องส่องทางไกล เนื่องจากบางครั้งสิ่งผิดปกติอาจพบเพียงจุด ดำ ๆ ที่ผิวของพอลิเมอร์เท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากกัปดักเสิร์จติดตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ นเพื่ออัด ในย่านชุมชน อยู่ในที่สูงหรือในพื้นที่ป่าเขาก็อาจปฏิบัติงานได้ยากมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากกัปดัก เสิร์จชนิดพลอสเลนที่อาจสังเกตพบรอยแตก หรือการเปลี่ยนไปของสีผิวทำให้สังเกตเห็นได้ง่าย กว่า โดยเฉพาะกัปดักเสิร์จรุ่นใหม่บางผลิตภัณฑ์มีอุปกรณ์ปลดวงจรขนาดเล็กซึ่งสังเกตเห็นได้ ยาก และอาจมีอุปสรรคมากขึ้น นอีกหากเกิดเหตุการณ์ขึ้น ในเวลากลางคืนยิ่งไปกว่านั้น การ ตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนก็ไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ เปิด วงจรออก หรือไม่ได้จ่ายไฟในระบบ ทำให้บางเหตุการณ์ต้องใช้เวลาอย่างมากในการตรวจสอบและ แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น บางกรณีจำเป็นต้องถอดกัปดักเสิร์จในสายจำหน่ายก่อนทุกตัวเพื่อขจัดการ เกิดลัดวงจรดังกล่าว โดยใช้การไล่ถอดตั้งแต่กัปดักเสิร์จปลายสายออกจนกว่าจะพบตัวที่ชำรุด เสียหาย

เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีวิธีการและขั้นตอนสำหรับตรวจสอบความชำรุดเสียหาย หรือการเสื่อมสภาพของกัปกัดเสิร์จอย่างชัดเจน ทำให้ในแต่ละพื้นที่จึงได้ปฏิบัติตามแนวทาง และวิธีการที่แตกต่างกัน อีกทั้งบางพื้นที่ซึ่งขาดแคลนอุปกรณ์ตรวจสอบที่ทันสมัย ดังนั้นส่วนใหญ่จึงยังคงใช้การสังเกตสิ่งผิดปกติด้วยตาเปล่าหรือกล้องส่องทางไกล เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายนอก เช่น การระเบิดออกของอุปกรณ์ปลดวงจร การระเบิดและแตกออกของบลิ๊อค ZnO คราบเขม่าและการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกพอลิเมอร์ ซึ่งอาจพบหลังจากเกิดระเบิดหรืออาร์คจากวาวไฟที่เกิดขึ้น นรวมถึงพิจารณาความเสียหายในส่วนอื่น ๆ ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้งานของกัปกัดเสิร์จ เช่น การแตกหักของขาจับยึดกัปกัดเสิร์จ การฉีกขาดของเปลือกหุ้มพอลิเมอร์ และการชำรุดของขั้วต่อสายแรงสูงและสายต่อลงดิน เป็นต้น

### 3.6.3 ข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์กับกัปกัดเสิร์จ

ผู้ปฏิบัติงานได้ให้ข้อสังเกตถึงความบกพร่อง หรือข้อด้อยของกัปกัดเสิร์จผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดแตกต่างกันในแต่ละบริษัท อย่างไรก็ตามข้อสังเกตเหล่านี้ เกิดขึ้นจากความรู้สึกของผู้ใช้งานเท่านั้น โดยส่วนใหญ่ให้ความเห็นว่าวัสดุที่ใช้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะการแตกหักของแขนฉนวนจับยึดกัปกัดเสิร์จซึ่งพบในหลายผลิตภัณฑ์ บางกรณีก็เป็น การแตกบนผิวของพอลิเมอร์ หรือมีคราบเขม่า อร่าและตะไคร่น้ำ เกาะที่ผิวของกัปกัดเสิร์จ ในบางผลิตภัณฑ์ก็พบปัญหาในส่วนของอุปกรณ์ปลดวงจรและขั้วต่อสายซึ่งมีความเปราะบางและเกิดชำรุดบ่อยครั้ง รวมทั้งความสูงของกัปกัดเสิร์จที่มันน้อยเกินไปทำให้เกิดปัญหาวาวไฟตามผิวจาก สัตว์ปีกหรือสัตว์เลื้อยคลานได้

อย่างไรก็ตามบางส่วนให้ความเห็นว่าทุก ๆ ผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน หรือมีข้อบกพร่องที่คล้ายคลึงกัน ส่วนสาเหตุความเสียหายหลักน่าจะเกิดขึ้นจากความรุนแรงของฟ้าผ่าและสภาพแวดล้อม รวมทั้งระยะเวลาการติดตั้งใช้งานของกัปกัดเสิร์จมากกว่าปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สำหรับในบางพื้นที่ที่มีผลิตภัณฑ์กัปกัดเสิร์จใช้งานไม่หลากหลายก็ไม่สามารถให้ความแตกต่างของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้

## บทที่ 4

### การเก็บตัวอย่างและการทดสอบประเมินสภาพกับดักเสิร์จ

เพื่อศึกษาและประเมินสภาพกับดักเสิร์จที่ติดตั้งอยู่ในปัจจุบันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบแรงดัน 22 kV และ 33 kV จึงได้ร่วมกับกองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขอความร่วมมือไปยังการไฟฟ้าพื้นที่ต่าง ๆ ในกาสำรวจและสุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จ ซึ่งติดตั้งอยู่ในแต่ละสภาพแวดล้อมและมีระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาทดสอบและประเมินสภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาถึงผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จซึ่งอาจนำมาใช้กำหนดอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จได้ พร้อมกันนี้ ยังได้ขอสำรวจและเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติในระบบไฟฟ้าด้วย เพื่อนำมาศึกษาลักษณะความเสื่อมสภาพและศึกษาแนวทางในการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน รวมทั้งยังได้รวบรวมตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เกิดการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจร (Disconnecting device) จากหลายพื้นที่ เพื่อนำมาศึกษาความเชื่อถือได้ในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร โดยสามารถสรุปผลการเก็บตัวอย่างของกับดักเสิร์จและอธิบายขั้นตอนการทดสอบ และอุปกรณ์ที่นำมาใช้ประเมินสภาพกับดักเสิร์จได้ดังนี้

#### 4.1 ตัวอย่างกับดักเสิร์จ

การศึกษาได้แบ่งตัวอย่างกับดักเสิร์จที่นำมาทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม โดยพิจารณาจากความแตกต่างของวัตถุประสงค์ที่ศึกษา ดังนี้

##### 4.1.1 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

เพื่อศึกษาความเชื่อถือได้ในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรและศึกษาลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นของกับดักเสิร์จ จึงได้รวบรวมตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เกิดการระเบิดหรือการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร โดยตัวอย่างทั้งหมดได้มาจากหลายพื้นที่ของ กฟผมีจำนวนทั้งสิ้น 33 ตัวอย่าง สามารถแยกจำนวนตามผลิตภัณฑ์ได้ตามตารางที่ 4.1 ทั้งหมดเป็นกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าชนิดโลหะออกไซด์ (ZnO) แบบมีพอลิเมอร์เป็นเปลือกหุ้ม มีแรงดันพิกัด ( $U_n$ ) 21 kV แรงดันใช้งานต่อเนื่อง ( $U_c$ ) 17 kV และพิกัดกระแสดีเอสชาร์จ ( $I_n$ ) 5 kA

ตารางที่ 4.1 จำนวนตัวอย่างที่เกิดการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจร

ผลิตภัณฑ์	จำนวน (ตัว)
A	15
B	10
D	5
C	2
E	1

รูปที่ 4.1 – รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ปลดวงจรในสภาพปกติของตัวอย่างกับดักเสิร์จแต่ละผลิตภัณฑ์ (รูปด้านซ้าย) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจร (รูปด้านขวา) อนึ่ง สำหรับกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A มีอุปกรณ์ปลดวงจรอยู่ด้วยกัน 2 รุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1



อุปกรณ์ปลดวงจรแบบที่ 1 (รุ่นเก่า)



อุปกรณ์ปลดวงจรแบบที่ 2 (รุ่นใหม่)

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจของกับดักเสิร์จผลิตภัณท์B



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจของกับดักเสิร์จผลิตภัณท์C



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจของกับดักเสิร์จผลิตภัณท์D



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจของกับดักเสิร์จผลิตภัณท์E  
(มีเฉพาะภาพตัวอย่างที่อุปกรณ์ปลดวงจกิดระเบิดไปแล้ว)



#### 4.1.2 ตัวอย่างกับดักเสิร์จจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

ทำการสำรวจและสุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในแต่ละสภาพแวดล้อมที่ ๔ รูปแบบ และอีกหนึ่งบริเวณที่มีรายงานปัญหาความเสียหายของอุปกรณ์ต่าง ๆ จากฟ้าผ่าบ่อยครั้ง ตามตารางที่ 4.2 แต่ละพื้นที่ที่ได้สุ่มเก็บตัวอย่างในหลายช่วงเวลาหรือระยะเวลาติดตั้งใช้งานโดยกำหนดให้เลือกตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ A มาเป็นอันดับแรก เนื่องจากมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด (>40%) โดยได้สุ่มตัวอย่างกับดักเสิร์จใน 8 พื้นที่ของระบบ 22 kV และอีก 2 พื้นที่ของระบบ 33 kV รวมทั้งหมด 10 พื้นที่ ซึ่งมีขั้นตอนการสำรวจ และสุ่มเก็บตัวอย่างโดยสรุปดังนี้

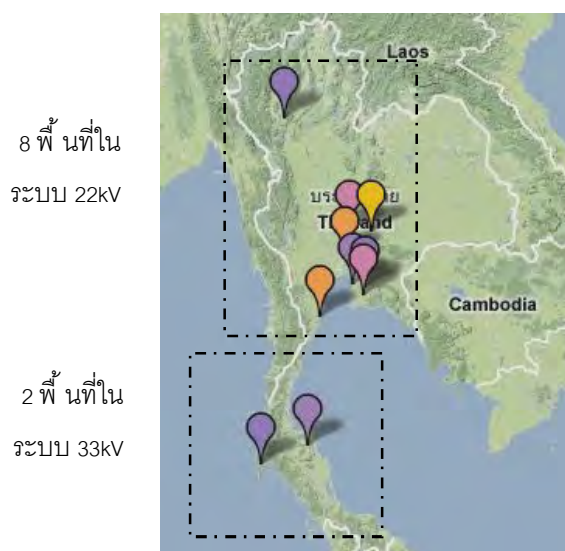
- 1) สำรวจกับดักเสิร์จในพื้นที่ เพื่อตรวจสอบระยะเวลาที่ติดตั้งใช้งานและผู้ผลิตพร้อมกับพิจารณาความสะดวกในการปฏิบัติงาน เมื่อพบตัวอย่างที่ต้องการจึงระบุหมายเลขและเฟสที่ติดตั้ง แล้วทำสัญลักษณ์บนเสาที่ติดตั้งอุปกรณ์ บันทึกข้อมูลและตำแหน่งไว้
- 2) ทำบันทึกแจ้งให้กับการไฟฟ้าในพื้นที่รับผิดชอบ เพื่อขอให้ดำเนินการถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จตามตำแหน่ง และเฟสที่ระบุไว้ ตามผลการสำรวจภาคสนามในขั้น ตอนที่ 1
- 3) เมื่อการไฟฟ้าในพื้นที่รับผิดชอบมีความพร้อมจึงดำเนินการถอดเปลี่ยนตัวอย่างกับดักเสิร์จและบรรจุลงในถุงเก็บตัวอย่าง พร้อมกับระบุชื่อพื้นที่ หมายเลขตัวอย่างและเฟสที่ติดตั้ง

สำหรับรายชื่อพื้นที่ต่าง ๆ ที่ไปสุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จในแต่ละสภาพแวดล้อมได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 โดยคัดเลือกมาจากผลการตอบแบบสำรวจในพื้นที่ ซึ่งพบความเสียหายของกับดักเสิร์จบ่อยครั้ง และมีความพร้อมในการปฏิบัติงานถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จตัวใหม่ทดแทน

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ต่าง ๆ ที่ได้สุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ลักษณะสภาพแวดล้อม	ระบบ 22 kV	ระบบ 33 kV
บริเวณชายทะเล	1) การไฟฟ้า อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์ 2) การไฟฟ้า อ.บางแสน จ.ชลบุรี	1) การไฟฟ้า อ.ตะกั่วทุ่ง จ.พังงา
บริเวณภูเขาสูง	1) การไฟฟ้า อ.ลิ้นจี่ จ.ลำพูน 2) การไฟฟ้า อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา	1) การไฟฟ้า อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช
บริเวณโรงงานอุตสาหกรรม	1) การไฟฟ้า อ.พระพุทธรบาท จ.สระบุรี 2) การไฟฟ้า อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี	-
บริเวณที่อยู่อาศัย	1) การไฟฟ้า อ.เมืองฯ จ.ปทุมธานี	-
บริเวณที่มีฟ้าผ่าบ่อยครั้ง	1) การไฟฟ้า อ.ปลวกแดง จ.ระยอง	-

ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการสัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV เฉพาะในบางสภาพแวดล้อม คือ บริเวณชายทะเล และบริเวณภูเขาสูง เนื่องจากพื้นที่ในภาคใต้ของประเทศไทยนั้น มีลักษณะภูมิประเทศ และสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่อยู่ในเขตรูปแบบนี้ สำหรับพื้นที่บริเวณโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีสัดส่วนน้อยมาก และอยู่กันอย่างกระจัดกระจาย อย่างไรก็ตามเบื้องต้น คาดว่าความสัมพันธ์เนื่องจากสภาวะแวดล้อมของกับดักเสิร์จในระบบ 22 kV น่าจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบ 33 kV โดยอาจนำผลการศึกษามาใช้อ้างอิงกับระบบ 33 kV ได้ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณตัวอย่างกับดักเสิร์จ งบประมาณ และระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้ รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งของทั้ง 10 พื้นที่ที่ไปสัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จ โดยรายละเอียดและข้อมูลต่าง ๆ ของบริเวณที่ไปสัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จนี้ สามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้

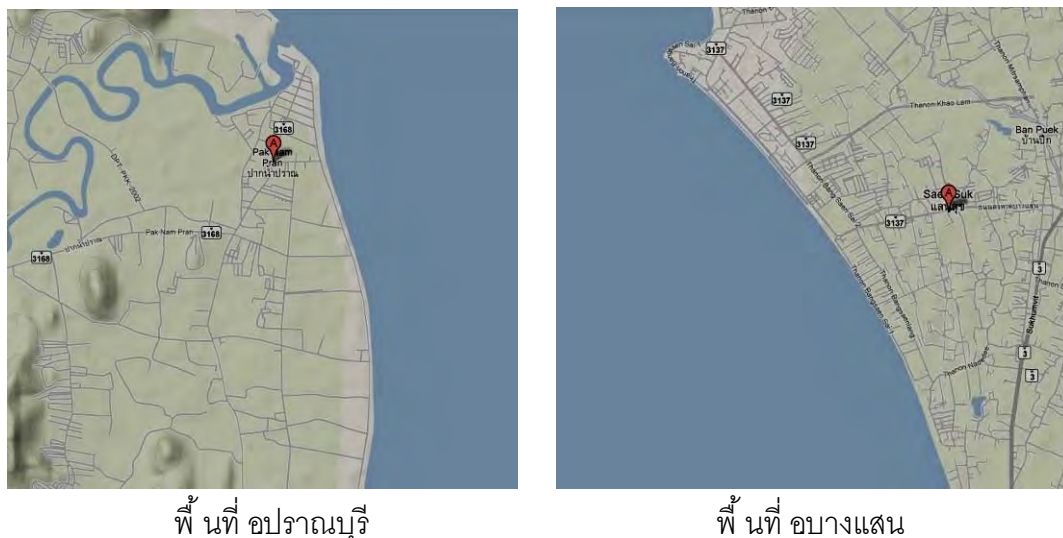


รูปที่ 4.6 บริเวณพื้นที่ที่สัมผัสกับตัวอย่างกับดักเสิร์จ

#### 4.1.2.1 ลักษณะพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV

##### 1) บริเวณชายทะเล

ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในบริเวณชายทะเลได้สัมผัสเปลี่ยนแปลงมาจาก 2 พื้นที่ คือ พื้นที่ของ ต.ปากน้ำปราณ การไฟฟ้า อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์ และในพื้นที่ของ ต.แสนสุข การไฟฟ้า อ.บางแสน จ.ชลบุรี รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของภูมิประเทศซึ่งได้สัมผัสถอดเปลี่ยนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากพื้นที่ที่ ๑ ตามลำดับ ในการสัมผัสตัวอย่างจะเลือกเฉพาะกับดักเสิร์จติดตั้งอยู่ในจุดที่อยู่ห่างจากริมทะเลไม่เกินระยะ 2 กิโลเมตร ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะติดตั้งอยู่บริเวณถนนเลียบชายทะเลในทั้ง 2 พื้นที่



รูปที่ 4.7 ลักษณะของพื้นที่บริเวณชายทะเลที่สุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบณ2 kV

จากการสังเกตและสอบถามผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ของ ต.ปากน้ำ อปราวณ พบว่ามีปัญหาการเกิดวาทไฟตามผิวของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นจากไอเกลือที่ลมพัดมาเกาะและสะสมอยู่บนผิวของอุปกรณ์ ปัญหานี้ค่อนข้างมีความรุนแรง โดยเฉพาะช่วงเข้าฤดูฝน หรือฝนตกใหม่ ๆ จะพบปัญหาค่อนข้างมาก ในขณะที่สำรวจก็สามารถสังเกตเห็นคราบเกลือบนผิวของอุปกรณ์ต่างๆ พอสมควร โดยเฉพาะฟิวส์ชนิดขาดตก (Drop-out fuse) และพบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) เกิดขึ้นในบางอุปกรณ์ สำหรับกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานนานพอสมควรก็สามารถสังเกตเห็นคราบเกลือเกาะที่ผิวพอลิเมอร์ และจุดต่อต่างๆ ได้ โดยเฉพาะบริเวณปลายสายที่ต่อเข้ากับกับดักเสิร์จ และจุดต่อลงดิน ส่วนพื้นที่ ต.แสนสุข จากการสอบถามพบว่าปัญหาลักษณะนี้เกิดขึ้นค่อนข้างน้อย และคราบเกลือที่เกาะบนผิวของอุปกรณ์ต่างๆ ก็มีปริมาณน้อยด้วยเช่นกัน

## 2) บริเวณภูเขาสูง

ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในบริเวณภูเขาสูงได้สุ่มเก็บมาจากพื้นที่ของ อ.ลำพูน และ อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา ทั้งสองจุดอยู่ในบริเวณที่มีเทือกเขาสูง และมีป่าไม้ปกคลุมอยู่พอสมควร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยตัวอย่างกับดักเสิร์จส่วนใหญ่ในพื้นที่ อ.ลำพูน ได้ถอดเปลี่ยนมาจากสายจำหน่ายไฟฟ้าบนภูเขา ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับทำการเกษตร สำหรับในพื้นที่ อ.ปากช่อง ตัวอย่างกับดักเสิร์จส่วนใหญ่ติดตั้งอยู่บนที่ราบเชิงเขา ของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยตัวอย่างที่ถอดมาจากพื้นที่เหล่านี้ พบว่ามีสิ่งเปราะอะเปื้อนเกาะติดอยู่บนผิวพอลิเมอร์ และแขนฉนวนสำหรับจับยึดกับดักเสิร์จจำพวกดิน ตะไคร่น้ำ มูลสัตว์ รังสัตว์ และซากสิ่งมีชีวิตต่างๆ



พื้นที่ อลี้



พื้นที่ อปากซ่อง

รูปที่ 4.8 ลักษณะของพื้นที่บริเวณภูเขาสูงที่สัมผัสตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบอบ 22 kV

### 3) บริเวณโรงงานอุตสาหกรรม

ตัวอย่างกับดักเสิร์จจากบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม ได้มาจาก 2 พื้นที่ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน คือ ตัวอย่างในพื้นที่ พระพุทธบาท ทั้งหมดติดตั้งอยู่ในบริเวณแวดล้อมที่มีกิจการประเภทระเบิดหินจากภูเขา โรงงานโม่หิน และอุตสาหกรรมแปรรูปหินต่าง ๆ ในบริเวณนี้ จึงมีปริมาณของฝุ่นละอองสูงมาก และเกาะติดอยู่บนผิวของกับดักเสิร์จเป็นจำนวนมาก สำหรับอีกพื้นที่หนึ่งอยู่ในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร วม็องฯ จ.ชลบุรี มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ประเภทเคมีภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก

### 4) บริเวณที่อยู่อาศัย

ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในบริเวณที่อยู่อาศัยถอดเปลี่ยนมาจากพื้นที่ของอ.เมืองฯ จ.ปทุมธานี ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบต่ำ โดยสัมผัสกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในสายจำหน่ายไฟฟ้าของหมู่บ้านจัดสรรต่าง ๆ ในพื้นที่ดังกล่าว บริเวณนี้มีมลภาวะต่ำ โดยสังเกตได้จากความเปรอะเปื้อนที่เกาะบนผิวของกับดักเสิร์จมีปริมาณค่อนข้างน้อย แม้จะติดตั้งเป็นระยะเวลานานก็ตาม

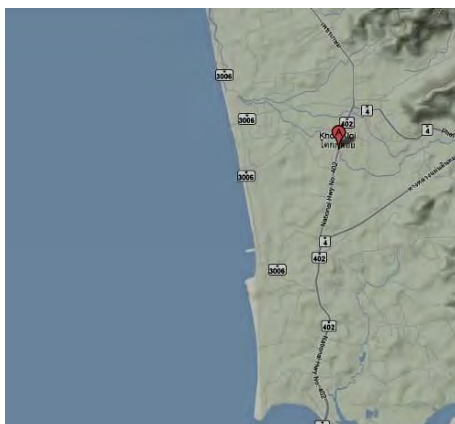
### 5) บริเวณที่มีฟ้าผ่าบ่อยครั้ง

ตัวอย่างกับดักเสิร์จในบริเวณที่มีฟ้าผ่าบ่อยครั้ง ได้มาจากพื้นที่ อ.ลวกแดง จ.ระยอง ซึ่งมีรายงานความเสียหายบ่อยครั้งของอุปกรณ์ฉนวน เช่น ฐานถ้วย และการระเบิดของกับดักเสิร์จขณะเกิดฝนฟ้าคะนอง

#### 4.1.2.2 ลักษณะพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 kV

##### 1) บริเวณชายทะเล

ตัวอย่างกับดักเสิร์จในบริเวณชายทะเลของระบบ 33 kV ได้สุ่มเก็บมาจากพื้นที่ของ ต.โคกกลอย อ.ตะกั่วทุ่ง จ.พังงา ซึ่งติดตั้งอยู่ในสายจำหน่ายไฟฟ้าบนถนนเลียบริมชายหาด ซึ่งมีลมพัดแรงอยู่ตลอดเวลา ในบริเวณนี้ พบว่ามีปัญหาวาบไฟตามผิวของอุปกรณ์ เช่นเดียวกับพื้นที่ของ ต.ปากน้ำ ปรากฏ

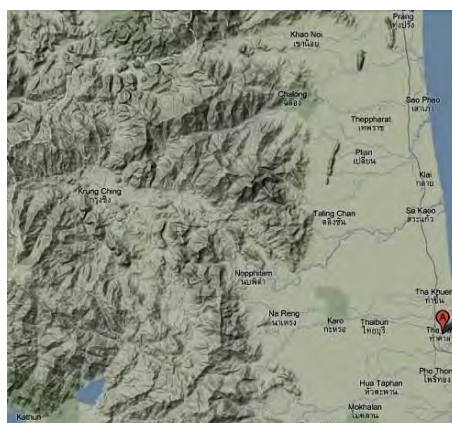


พื้นที่ อตะกั่วทุ่ง

รูปที่ 4.9 ลักษณะของพื้นที่บริเวณชายทะเลที่สุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV

##### 2) บริเวณภูเขาสูง

ตัวอย่างกับดักเสิร์จบริเวณภูเขาสูงของระบบ 33 kV สุ่มเก็บมาจากพื้นที่เทือกเขาสูง และมีต้นไม้ปกคลุมอยู่มาก ใน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช และเป็นระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟส



พื้นที่ อท่าศาลา

รูปที่ 4.10 ลักษณะของพื้นที่บริเวณภูเขาสูงที่สุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV

## 4.1.2.3 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 แสดงสรุปจำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เก็บมาในแต่ละพื้นที่ซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างกันในแต่ละช่วงระยะเวลาการติดตั้งใช้งาน ของระบบ 22 kV และ 33 kV ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เก็บมาในแต่ละพื้นที่ของระบบ 22 kV

สภาพแวดล้อม	พื้นที่	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ(ตัว)		
		ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3-7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
ชายทะเล	อ.ปราณบุรี	3	4	5
	อ.บางแสน	4	9	4
	<b>รวม</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>9</b>
ภูเขาสูง	อ.ลี่	6	4	4
	อ.ปากช่อง	0	4	0
	<b>รวม</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>4</b>
โรงงานอุตสาหกรรม	อ.พระพุทธรบาท	4	7	5
	อ.เมืองฯ ชลบุรี	2	6	4
	<b>รวม</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>9</b>
ที่อยู่อาศัย	อ.เมืองฯ ปทุมธานี	3	5	5
ฟ้าผ่าบ่อยครั้ง	อ.ปลวกแดง	0	3	0
<b>รวมทั้งสิ้น</b>	<b>91 ตัว</b>	<b>22</b>	<b>42</b>	<b>27</b>

หมายเหตุ ระยะเวลาการใช้งานที่ระบุเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น

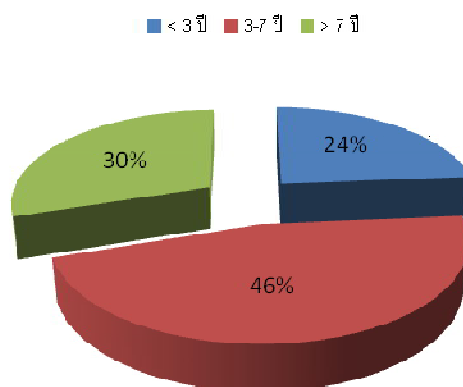
ตารางที่ 4.4 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เก็บมาในแต่ละพื้นที่ของระบบ 33 kV

สภาพแวดล้อม	พื้นที่	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ(ตัว)		
		ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3-7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
ชายทะเล	อ.ตะกั่วทุ่ง	5	5	5
ภูเขาสูง	อ.ท่าศาลา	4	3	7
<b>รวมทั้งสิ้น</b>	<b>29 ตัว</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>12</b>

หมายเหตุ ระยะเวลาการใช้งานที่ระบุเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น

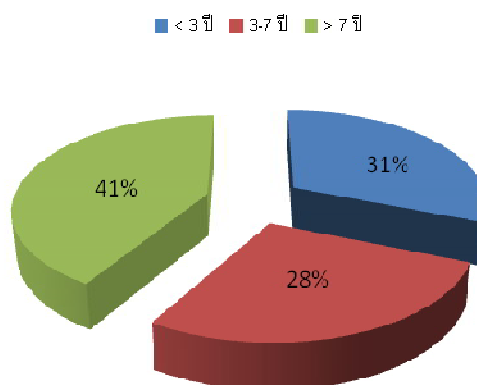
ในระบบ 22 kV มีจำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จทั้งสิ้น 06 ตัว ที่ได้ทำบันทึกแจ้งให้ดำเนินการถอดเปลี่ยน และสามารถถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จและจัดส่งมาทดสอบได้จำนวนทั้งสิ้น 91 ตัว ในจำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ได้รับส่วนใหญ่ติดตั้งมาแล้วเป็นระยะเวลา 3 - 7 ปี หรือประมาณ 46% ตามแผนภาพสรุปในรูปที่ 4.11 โดยเป็นกับดักเสิร์จพิกัด 21 kV, 5 kA จำนวน 82 ตัว (90%) และพิกัด 24 kV, 5 kA จำนวน 9 ตัว (10%) ซึ่งกลุ่มหลังติดตั้งในพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรม อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี โดยมีการต่อตัวด้านทานลงดินที่จุดนิวทรอล หรือเรียกว่า NGR ของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า สำหรับระบบ 33 kV ได้รับตัวอย่างครบตามจำนวนรวมทั้งสิ้น 29 ตัว ส่วนใหญ่เป็นกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานมากกว่า 7 ปี หรือ ประมาณ 41% ตามแผนภาพในรูปที่ 4.12 โดยตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานยาวนานที่สุดพบว่าไม่เกิน 12 ปี ทั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ ผลิตในปี ค.ศ. 1997

ระยะเวลาติดตั้งใช้งานของตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 22 kV



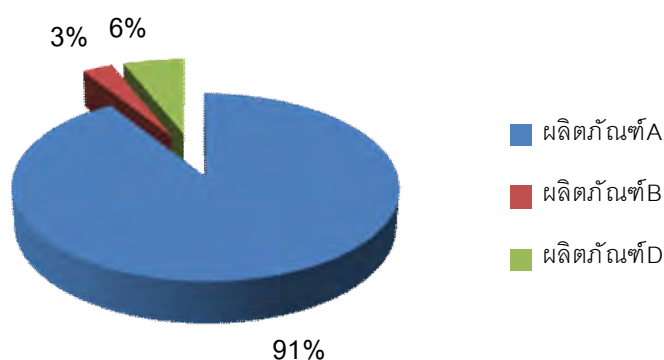
รูปที่ 4.11 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ 22 kV ในแต่ละช่วงอายุการติดตั้งใช้งาน

ระยะเวลาติดตั้งใช้งานของตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV



รูปที่ 4.12 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ 33 kV ในแต่ละช่วงอายุการติดตั้งใช้งาน

สำหรับผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จที่สุ่มเก็บมาจากระบบ 22 kV ประกอบไปด้วยตัวอย่างจาก 3 ผลิตภัณฑ์ ซึ่งโดยตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นของผลิตภัณฑ์ A ประมาณ 91% (83 ตัว) และเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ คือ B และ D รวมกันอีก 9% (แบ่งเป็น B 3 ตัว และ D 5 ตัว) ตามแผนภาพสรุปในรูปที่ 4.13 เนื่องจากได้พิจารณาเลือกกับดักเสิร์จของผลิตภัณฑ์ที่มีการติดตั้งใช้งานมากที่สุด และสามารถสำรวจหาพบได้ง่ายในภาคสนาม ตารางที่ 4.5 แสดงรหัสรุ่น และพิกัดต่าง ๆ ของทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.13 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ 22 kV แยกตามผู้ผลิต

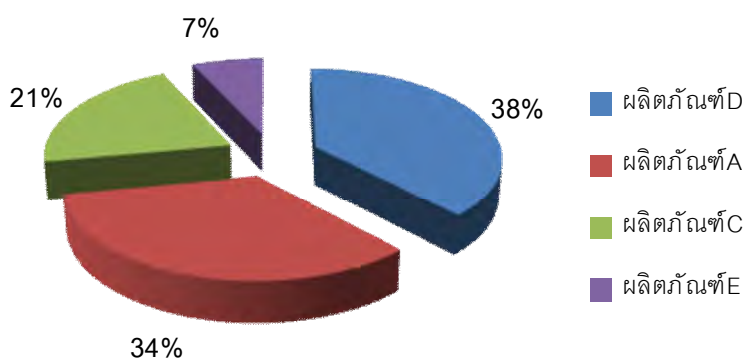
ตารางที่ 4.5 จำนวนและพิกัดต่าง ๆ ของกับดักเสิร์จที่สุ่มเก็บจากระบบ 22 kV

ผลิตภัณฑ์	แรงดันพิกัด $U_n$ (kV)	กระแสพิกัด $I_n$ (kA)	แรงดัน $U_c$ (kV)	แรงดันคงค้าง ( $kV_{pk}$ ที่ 5kA)	จำนวน (ตัว)
A	21	5	17	70	74
	24	5	19.5	80	9
D	21	5	17	62.4	5
B	21	5	17	65.1	3

เบื้องต้นพบว่ากับดักเสิร์จของผลิตภัณฑ์ A พิกัด 21 kV, 5 kA แบ่งออกได้เป็น 2 รุ่น คือ รุ่นที่ผลิตก่อนปี ค.ศ. 2002 และรุ่นที่ผลิตตั้งแต่ปี 2002 จนถึงปัจจุบัน โดยทั้งสองรุ่นนี้มีความแตกต่างกันทั้งในด้านการออกแบบ วัสดุเปลือกพอลิเมอร์และแขนจับฉนวนจับยึดกับดักเสิร์จที่ใช้ รวมทั้ง อุปกรณ์ปลดดวงจรมีความแตกต่างกัน



สำหรับตัวอย่างจากระบบ 33 kV ประกอบไปด้วยตัวอย่างจาก 4 ผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในแผนภาพสรุปรูปที่ 4.14 โดยตัวอย่างกับดักเสิร์จส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ของ D และ A คือ 38% (11 ตัว) และ 34% (10 ตัว) ตามลำดับ ที่เหลือเป็นผลิตภัณฑ์ C และ E ประมาณ 21% (6 ตัว) และ 7% (2 ตัว) ตามลำดับ ตารางที่ 4.6 แสดงจำนวนและพิกัดต่าง ๆ ของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่สุ่มเก็บจากระบบ 33 kV



รูปที่ 4.14 สัดส่วนตัวอย่างกับดักเสิร์จจากระบบ 33 kV แยกตามผู้ผลิต

ตารางที่ 4.6 จำนวนและพิกัดต่าง ๆ ของกับดักเสิร์จที่สุ่มเก็บจากระบบ 33 kV

ผู้ผลิต	แรงดันพิกัด $U_n$ (kV)	กระแสพิกัด $I_n$ (kA)	แรงดัน $U_c$ (kV)	แรงดันคงค้าง $(kV_{pk}, 5kA)$	จำนวน (ตัว)
D	30	5	24.4	91.8	11
A	30	5	24.4	100	10
C	30	5	24.4	91.8	6
E	30	5	24.4	93.5	2

ผลิตภัณฑ์ A มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ แบบที่ 1 และ 2 เป็นรุ่นที่ผลิตมาตั้งแต่แรกเริ่มก่อนปี ค.ศ. 2002 ซึ่งใช้วัสดุต่าง ๆ เหมือนกัน แต่แบบที่ 2 ออกแบบมาสำหรับพื้นที่มลภาวะ เช่น ชายทะเล จึงมีระยะตามผิวหรือความสูงมากกว่าสำหรับแบบที่ 3 เป็นรุ่นที่ผลิตขึ้นภายหลังปี ค.ศ. 2002 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีความแตกต่างกันของวัสดุพอลิเมอร์ การออกแบบและวัสดุแขนฉนวน รวมทั้ง อุปกรณ์ปลดวงจร เช่นเดียวกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ขนาด 21 kV สำหรับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการออกแบบ อุปกรณ์และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้

#### 4.1.3 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ

เพื่อศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน มาตรวจสอบและประเมินสภาพกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงได้สำรวจหาตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ เพื่อนำมาศึกษาความสัมพันธ์ของระดับความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จกับอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรด สำหรับนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพออกจากระบบไฟฟ้าก่อนที่จะเสียหาย และนำมาใช้ศึกษาลักษณะความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบันโดยสำรวจอุณหภูมิและถ่ายภาพความร้อนของกับดักเสิร์จด้วยกล้องอินฟราเรดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้ง 10 พื้นที่ซึ่งไปสุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จ ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 หากพบกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ จะทำบันทึกแจ้งกับการไฟฟ้าในพื้นที่ เพื่อขอถอดเปลี่ยนและนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

##### 4.1.3.1 แนวทางการพิจารณาเบื้องต้นในการสำรวจกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ

หลักการพิจารณาหา กับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ ซึ่งนำมาใช้ระหว่าง การสำรวจในภาคสนาม สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การสำรวจกระทำในช่วงเวลากลางคืน หลังดวงอาทิตย์ตกอย่างน้อย 1-2 ชั่วโมง เพื่อลดผลกระทบโดยตรงจากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ และเป็นการรอกให้กับดักเสิร์จคายความร้อนจากดวงอาทิตย์และปรับระดับอุณหภูมิจนคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังสามารถปฏิบัติได้อย่างสะดวก ร่างกายและสายตาไม่อ่อนล้าจากความร้อนและแสงจ้าของดวงอาทิตย์

2) การวัดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิหรือวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ บริเวณรอบข้างกับดักเสิร์จด้วยกล้องอินฟราเรด โดยเลือกวัตถุที่ไม่สามารถสร้างความร้อนหรือสัมผัสอยู่กับแหล่งกำเนิดความร้อนอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จ

3) การสำรวจในระบบไฟฟ้า 3 เฟส พิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิของกับดักเสิร์จในแต่ละเฟส ซึ่งหากพบว่ากับดักเสิร์จมีระดับอุณหภูมิแตกต่างกันมากกว่า  $1^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป ให้ถือว่ากับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามีความผิดปกติ อย่างไรก็ตามหากพบว่ากับดักเสิร์จในเฟสที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดยังมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมจนผิดสังเกต หรือมากกว่า  $1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$  ในเบื้องต้นพิจารณาว่ากับดักเสิร์จที่ 3 เฟสมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ และระมัดระวังในกรณีที่กับดักเสิร์จในแต่ละเฟสใช้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกันเพราะอาจเห็นว่ามีระดับอุณหภูมิต่างกันได้เนื่องจากมีความแตกต่างกันของคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกับดักเสิร์จและวัสดุที่ใช้ อาจมีค่า Emissivity ต่างกัน ทั้งที่จริงแล้วกับดักเสิร์จอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันก็ได้

4) การสำรวจในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ใช้การพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิของกับดักเสิร์จกับอุณหภูมิของวัตถุแวดล้อม ซึ่งหากพบว่ากับดักเสิร์จมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติจนผิดสังเกตหรือมากกว่า  $1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$  ในเบื้องต้นพิจารณาว่าเป็นกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ หรือใช้การเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของกับดักเสิร์จที่เป็นผลิตภัณฑ์รุ่นเดียวกันและติดตั้งอยู่ในบริเวณแวดล้อมเดียวกัน

#### 4.1.3.2 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติที่ได้จากการสำรวจ

ตัวอย่างกับดักเสิร์จในพื้นที่ของระบบ 22 kV และ 33 kV ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติซึ่งสำรวจพบด้วยกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนและสามารถถอดเปลี่ยนลงมาได้ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.7 สำหรับตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บมานี้ บางส่วนเป็นตัวอย่างที่ติดตั้งในเฟสข้างเคียงของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติและได้ถอดเปลี่ยนออกมาพร้อมกันด้วย

ตารางที่ 4.7 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติในแต่ละพื้นที่

พื้นที่สำรวจกับดักเสิร์จที่: อุณหภูมิสูงผิดปกติ	จำนวนตัวอย่างในระบบ 22 kV (ตัว)	จำนวนตัวอย่างในระบบ 33 kV (ตัว)
อ.ปราณบุรี	4	-
อ.บางแสน	6	-
อ.ปากช่อง	0	-
อ.พระพุทธรบาท	3	-
อ.เมืองฯ ชลบุรี	6	-
อ.เมืองฯ ปทุมธานี	0	-
อ.ปลวกแดง	3	-
อ.ตะกั่วทุ่ง	-	3
อ.ท่าศาลา	-	0
รวม	22	3

## 4.2 การเก็บรักษาและการเตรียมตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ตัวอย่างทั้งหมดที่ถอดเปลี่ยนออกมาจากระบบไฟฟ้าได้ถูกบรรจุลงในถุงซิปลาสติกใส และติดป้ายสัญลักษณ์แสดงหมายเลขรหัสและพื้นที่ที่ติดตั้งใช้งานดังรูปที่ 4.15 โดยเก็บรักษาไว้ภายใต้อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมปกติภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พร้อมกับบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ลักษณะภายนอก และถ่ายภาพเก็บไว้



รูปที่ 4.15 การเก็บรักษาตัวอย่างกับดักเสิร์จ

เนื่องจากกับดักเสิร์จที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว มีสัณฐานต่าง ๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมสภาพ หรือมีสิ่งเปรอะเปื้อนเกาะติดมาบนผิวภายนอก ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันตามแต่ละสภาพแวดล้อมและระยะเวลาที่ติดตั้งใช้งานเพื่อให้ได้ผลการทดสอบของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ยังคงสภาพเดิมมากที่สุดในการทดสอบประเมินความคงทนของกับดักเสิร์จขณะรับแรงดันใช้งานปกติจึงเลือกทดสอบโดยไม่ทำความสะอาด อย่างไรก็ตามเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากกระแสรั่วที่ผิว (Surface leakage current) ขณะวัดกระแสไฟฟ้าวของกับดักเสิร์จจึงได้ลัดวงจรกระแสรั่วที่ผิวลงดิน (Bypass) ด้วยการพันด้วยเทปทองแดงรอบบริเวณโคนด้านล่างของเปลือกพอลิเมอร์ (Guard ring) ขนาดความหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร และต่อเทปทองแดงนี้ลงดินพร้อมกับวัดปริมาณกระแสรั่วตามผิวนี้ ด้วยโดยวิธีการนี้ สามารถแยกกระแสรั่วตามผิวให้ออกจากกระแสรั่วที่แท้จริงของกับดักเสิร์จซึ่งสัมพันธ์กับสภาพภายในหรือความเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO โดยตรง ทำให้การวัดกระแสไฟฟ้าวและการคำนวณกำลังสูญเสียมีความผิดพลาดเพียงน้อยเนื่องจากผลของกระแสรั่วตามผิวลดน้อยลง ในรูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างการพันเทปทองแดงสำหรับลัดวงจรกระแสรั่วตามผิวลงดินขณะทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จ



รูปที่ 4.16 การพันเทปทองแดงเป็นแหวนป้องกันกระแสรั่วตามผิว

#### 4.3 การทดสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ

การทดสอบสภาพเพื่อประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบประเมินความคงทนขณะรับแรงดันใช้งานปกติ และการทดสอบประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกิน โดยมีรายละเอียดของการทดสอบและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ตามลำดับดังนี้

##### 4.3.1 การทดสอบประเมินความคงทนขณะรับแรงดันใช้งานปกติ

เป็นการทดสอบความคงทนของกัปดักเสิร์จขณะที่ต่อใช้งานกับแรงดันปกติในระบบไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จและเป็นการทำงานของกัปดักเสิร์จในช่วงกระแสต่ำ ๆ โดยการทดสอบที่นำมาใช้ประเมินในหัวข้อนี้ ประกอบไปด้วย การทดสอบวัดค่าความต้านทาน ปริมาณกระแสไฟฟ้าว แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิที่ผิวของกัปดักเสิร์จ นอกจากนี้ ยังได้นำตัวอย่างบางส่วนไปทดสอบวัดปริมาณดีสชาร์จบางส่วนด้วย

#### 4.3.1.1 การวัดค่าความต้านทาน

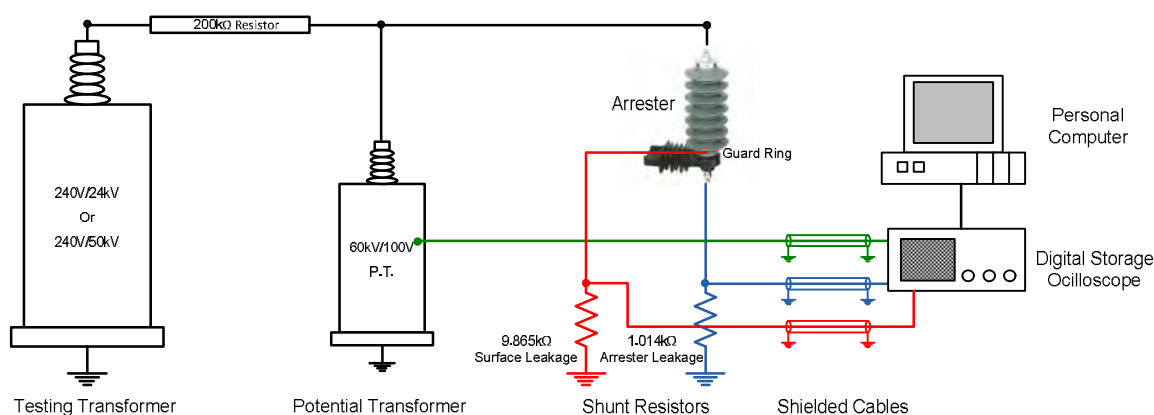
การทดสอบวัดค่าความต้านทานใช้เมกเกอร์ขนาดแรงดัน 5 kV<sub>dc</sub> ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดค่าความต้านทานของฉนวนแบบเข็มซึ่งหลายระดับแรงดัน คือ 500 V<sub>dc</sub>, 1 kV<sub>dc</sub>, 2.5 kV<sub>dc</sub> และ 5 kV<sub>dc</sub> สามารถแสดงค่าความต้านทานในช่วง 100 kΩ - 100 GΩ ได้ทุกช่วงของแรงดัน มีความแม่นยำ 1.5% ของระยะส่วนโค้ง (Arc length, 123 mm) เนื่องจากภายในกับดักเล็รจ์มีค่าความจุไฟฟ้าของสารฉนวนอยู่ด้วย ดังนั้นหลังจากกดสวิตช์ป้อนแรงดันทดสอบซึ่งรอให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับดักเล็รจ์มีค่าลดลงจนคงที่ โดยสังเกตได้จากเข็มชี้ ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนคงที่ที่ค่าหนึ่งขณะทดสอบอาจพบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 1 - 10 นาที หรือมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความแตกต่างของตัวอย่างกับดักเล็รจ์ในขณะทดสอบตัวอย่างถูกยึดให้ตั้งตรงในแนวตั้งเหมือนกับการใช้งานปกติและป้องกันไม่ให้มีวัตถุหรือสิ่งใดไปสัมผัสส่วนใดส่วนหนึ่งของกับดักเล็รจ์ ที่สำคัญคือระวังไม่ให้สายไฟที่ใช้สัมผัสกันขณะทดสอบ



รูปที่ 4.17 เครื่องทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Megger)

#### 4.3.1.2 การวัดกระแสรั่ว แรงดันอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิของกับดักเล็รจ์

ในรูปที่ 4.18 แสดงวงจรการทดสอบที่ใช้วัดกระแสรั่ว แรงดันอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเล็รจ์ เนื่องจากการทดสอบทั้งหมดใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกัน โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.18 วงจรการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของกับดักเสิร์จ

### 1) สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วของกับดักเสิร์จมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ดังนั้น สภาพแวดล้อมขณะทดสอบควรมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงทำการทดสอบโดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอยู่ในช่วงที่กำหนดสำหรับการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐานสากล [4, 6] คือ  $20^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$  สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศขณะทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 45% - 75% และ 990 - 1,010 hPa ตามลำดับ โดยค่าทั้งหมดมีการบันทึกไว้ตลอดการทดสอบในแต่ละตัวอย่าง

ทั้งนี้ ก่อนการทดสอบอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ต้องนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาตั้งไว้ในห้องเพื่อปรับอุณหภูมิให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องซึ่งควบคุมไว้ที่ประมาณ  $25^{\circ}\text{C}$  สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในทั่วทุกภาคมีค่าอยู่ในระหว่าง  $23.1^{\circ}\text{C}$  (ฤดูหนาวในภาคเหนือ) -  $29.6^{\circ}\text{C}$  (ฤดูร้อนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยทุกภูมิภาคตลอดทั้งปีประมาณ  $27^{\circ}\text{C}$  [22]

### 2) แหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดสอบ

ใช้แหล่งจ่ายแรงดันขนาด 220 V ป้อนให้กับหม้อแปลงปรับค่าได้ (Variac) ขนาด 25.5 kVA, 0-260 V เพื่อต่อไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดหนึ่งเฟส ขนาด 37.5 kVA, 240 V/24 kV สำหรับทดสอบกับดักเสิร์จพิกัด 21 kV หรือหม้อแปลง พิกัด 240 V/50 kV สำหรับกับดักเสิร์จพิกัด 24 kV และ 30 kV แรงดันทดสอบมีความถี่เพี้ยนของรูปคลื่นอยู่ในระดับต่ำ และมีความถี่คงที่ประมาณ 50 Hz ต่อผ่านตัวต้านทานน้ำ ำ ขนาด  $200\text{ k}\Omega$  ไปยังตัวอย่างกับดักเสิร์จ ซึ่งหากเกิดการลัดวงจรหรืออาร์กผ่านตัวกับดักเสิร์จ ตัวต้านทานน้ำ ำ จะช่วยจำกัดขนาดกระแสลัดวงจรได้ โดยใช้ฟิวส์ขนาด 2 A ร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 10 A ต่อด้านวงจรแรงต่ำ เพื่อตัดวงจรหากเกิดกระแสไฟฟ้าเกินหรือลัดวงจรขึ้นขณะทำการทดสอบ

### 3) ขนาดแรงดันที่ทดสอบ

ขนาดแรงดันที่ใช้ทดสอบวัดกระแสรั่วและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย กำหนดให้ทดสอบที่ระดับแรงดันเฟสของระบบไฟฟ้าและที่แรงดัน MCOV หรือ  $U_c$  ของกัปดักเสิร์จ ตารางที่ 4.8 แสดงระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบของกัปดักเสิร์จในระบบ 22 kV และ 33 kV สำหรับอุณหภูมิที่ผิวทำการวัดเฉพาะที่แรงดันใช้งานปกติเท่านั้น

ตารางที่ 4.8 ระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกัปดักเสิร์จ

ระบบ 22 kV				ระบบ 33 kV	
แรงดันพิกัด 21 kV		แรงดันพิกัด 24 kV		แรงดันพิกัด 30 kV	
แรงดันเฟส (kV)	แรงดัน $U_c$ (kV)	แรงดันเฟส (kV)	แรงดัน $U_c$ (kV)	แรงดันเฟส (kV)	แรงดัน $U_c$ (kV)
12.70	17.00	12.70	19.00	19.05	24.40

### 4) การวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าวของกัปดักเสิร์จ

การวัดรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมกัปดักเสิร์จใช้หม้อแปลงวัดแรงดันซึ่งมีขนาดพิกัด 1 VA, 60 kV/100 V มีค่าความแม่นยำในการวัด 0.03% ต่อผ่านชุดลดทอน (Attenuator) อัตราส่วน 11.32 เท่า ทำให้มีอัตราการลดทอนรวม ประมาณ 6,792 เท่า สำหรับรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าวตามผิวภายนอกของกัปดักเสิร์จจะวัดผ่าน Guard ring โดยใช้ตัวต้านทาน (Shunt resistor) ขนาด 9.865 k $\Omega$  ต่อระหว่าง Guard ring ลงดิน และใช้ตัวต้านทานขนาด 1.014 k $\Omega$  อีกชุดหนึ่งต่อที่จุดต่อลงดินของกัปดักเสิร์จลงดินสำหรับวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าวรวมของกัปดักเสิร์จ รูปคลื่นต่าง ๆ ที่วัดจะแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลที่มีความแบนด์วิดท์ 100 MHz และอัตราการสุ่มตัวอย่างสูงสุด (Sampling rate) 1 GS/s ซึ่งเพียงพอต่อการวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสสลับความถี่ต่ำ โดยเก็บบันทึกข้อมูลรูปคลื่นเหล่านี้ ไปยังคอมพิวเตอร์



สำหรับการคำนวณกำหนดเพื่อวิเคราะห์กระแสรั่วเชิงความต้านทานด้วยวิธี Harmonic Analysis และกำหนดให้ฮาร์มอนิกลำดับที่ 100 เป็นค่าสูงสุดในการพิจารณา โดยวิธีการดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ปริมาณกระแสรั่วที่ความถี่ลำดับ 3 (3<sup>rd</sup> Harmonic) ของกระแสรั่วเชิงความต้านทานไปได้พร้อมกัน สำหรับการคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เลือกใช้การคำนวณตามวิธี C (Method C) ในมาตรฐาน IEC 60099-5 [15] โดยใช้การอินทิเกรตด้วยเวลาของผลคูณระหว่างรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้ารั่วของกับดักเสิร์จ หรืออาจใช้การคูณระหว่างค่าแรงดันRMS และกระแสไฟฟ้ารั่ว RMS ของกับดักเสิร์จ ซึ่งวิธีการนี้ มีผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกในระดับต่ำ อย่างไรก็ตามการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีการนี้ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผลของการเลื่อนเฟสของรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้ารั่วเป็นอย่างมาก รวมถึงผลกระทบของกระแสไฟฟ้ารั่วตามผิวของกับดักเสิร์จด้วย

#### 5) การวัดอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จ

ในการทดสอบใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จใน 2 ลักษณะ ดังนี้

##### *เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer)*

เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิที่ผิววัตถุแบบเฉพาะจุด (Spot) ใช้งานง่าย และมีความคล่องตัวสูง อย่างไรก็ตามการวัดจำเป็นต้องกระทำในระยะห่างที่จำกัดจากวัตถุที่ต้องการทดสอบ โดยที่ตัวอุปกรณ์จะระบุค่าอัตราส่วนของระยะทางต่อขนาดของจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ (Distance to spot size, D/S) ในการใช้งานต้องมั่นใจว่าขนาดของวัตถุ หรือบริเวณที่เราต้องการทราบค่าอุณหภูมิจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิ (Spot size) อย่างน้อยที่สุดควรมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่า และอุณหภูมิที่วัดได้เป็นค่าเฉลี่ยภายในพื้นที่ของจุดที่เราหนดให้วัดอุณหภูมิ

โดยทั่วไปกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีขนาดความกว้างของลำตัวเล็กสุดประมาณ 4 เซนติเมตร (พิกัดกระแส 5 kA) การทดสอบจึงใช้เครื่องวัดอุณหภูมิที่มีค่า D/S เท่ากับ 50 และติดตั้งห่างจากกับดักเสิร์จในระยะ 1 เมตร ดังนั้นขนาดของจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดประมาณครึ่งหนึ่งของความกว้างของกับดักเสิร์จ และกำหนดให้วัดอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางลำตัวของกับดักเสิร์จ รูปที่ 4.19 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดที่ใช้ในการทดสอบวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ



รูปที่ 4.19 เครื่องมือวัดอุณหภูมิเฉพาะจุดแบบอินฟราเรด

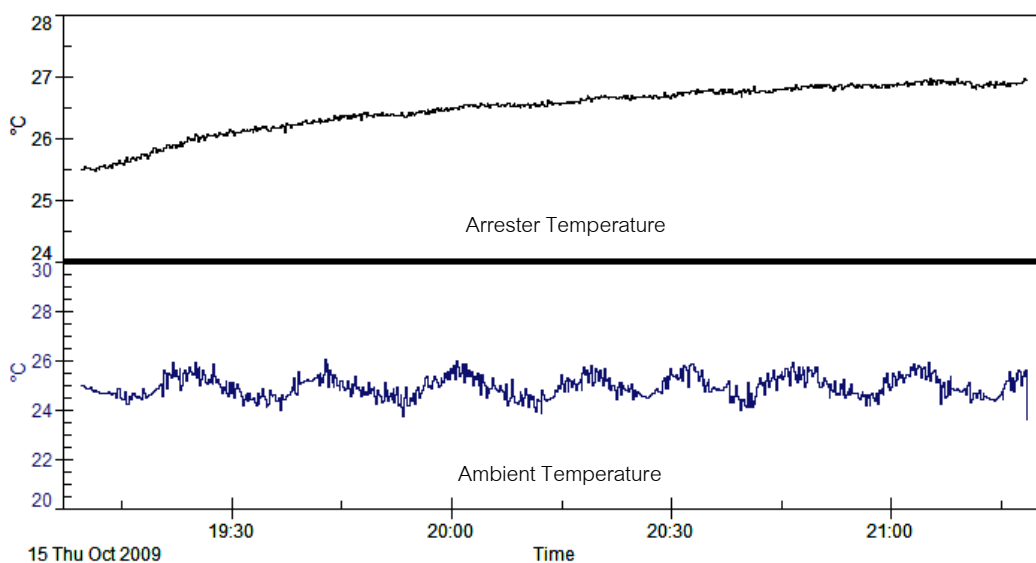
*กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด (Infrared thermography camera)*

เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดอุณหภูมิที่ผิวทั้งตัวของวัตถุและแสดงการกระจายความร้อนออกมาเป็นแผนภาพ หรือภาพถ่ายความร้อน (Thermography) ในการทดสอบวัตถุอุณหภูมิของกับดักเสิร์จใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีตัวตรวจจับสนีอินฟราเรดจำนวน  $160 \times 120$  pixels ซึ่งมีความไวในการแยกแยะความแตกต่างของอุณหภูมิในระดับ  $0.1^{\circ}\text{C}$  และมีความแม่นยำ  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  โดยขนาดของวัตถุหรือจุดที่เล็กที่สุดในการวัดอุณหภูมิควรมีขนาดเท่ากับขนาดของตัวตรวจจับสนีจำนวน  $3 \times 3$  pixels หรือประมาณ 4 มิลลิเมตร ที่ระยะห่าง 1 เมตร เนื่องจากกล้องที่ใช้มีขนาดของวัตถุต่อหนึ่งพิกเซล (IFOV) เมื่อใช้ร่วมกับ Telephoto lens ประมาณ 1.3 มิลลิเมตร ที่ระยะห่าง 1 เมตร โดยการทดสอบกำหนดให้ติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนห่างจากกับดักเสิร์จที่ระยะ 2 เมตร ทำให้ขนาดของวัตถุที่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 8 มิลลิเมตร หรือมีขนาดเล็กกว่าความกว้างของลำตัวกับดักเสิร์จประมาณ 5 เท่า รูปที่ 4.20 แสดงกล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรดที่ใช้ทดสอบวัตถุอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ



รูปที่ 4.20 กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรดที่ใช้ทดสอบวัตถุอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ

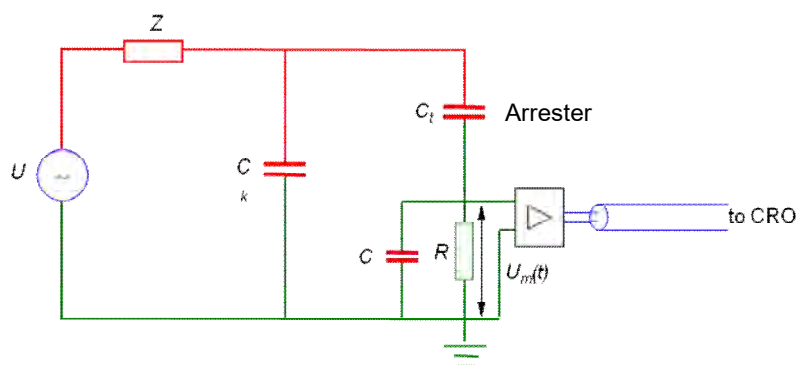
เนื่องจากเปลือกพอลิเมอร์ของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่นำมาทดสอบทำมาจากวัสดุประเภทยางซิลิโคน จึงกำหนดให้ค่าคงที่ในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดำ หรือค่า Emissivity ( $\epsilon$ ) มีค่าประมาณ 0.94 [23] นอกจากนี้ในการทดสอบยังกำหนดให้วัตถุอุณหภูมิภายหลังจากป้อนแรงดันประมาณ 2 ชั่วโมง เนื่องจากกับดักเสิร์จส่วนใหญ่ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง จึงจะมีระดับอุณหภูมิที่ผิวคงที่ รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA ขณะได้รับแรงดันทดสอบขนาด 12.7 kV เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA

#### 6) การวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD)

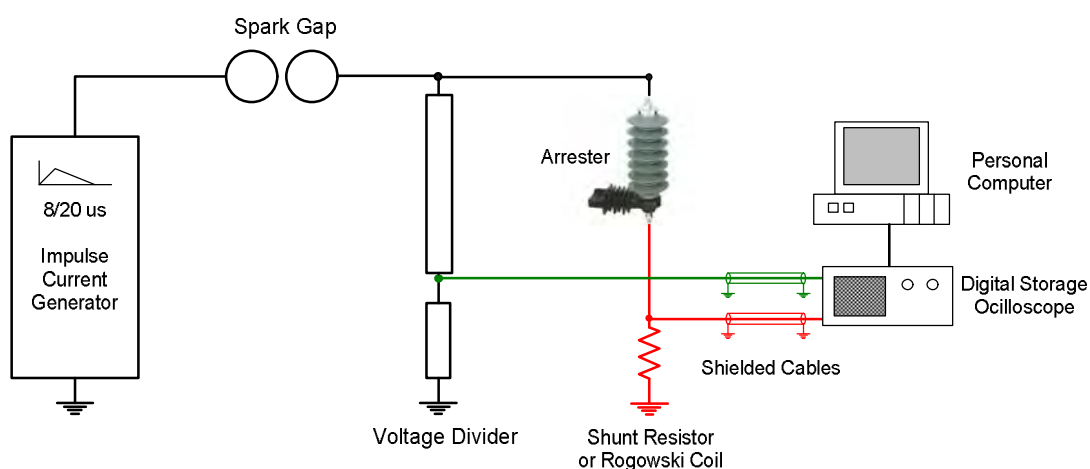
ตัวอย่างบางส่วนถูกนำไปทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนและมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.22 ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60099-4 [4] และ IEC 60270 [24] ในตอนเริ่มต้นให้ปรับเพิ่มแรงดันทดสอบเท่ากับแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จและป้อนค้างไว้ประมาณ 2 - 10 วินาที จากนั้นจึงลดแรงดันลงจนมีค่าเท่ากับ 1.05 เท่าของแรงดัน MCOV หรือ  $U_c$  ของกับดักเสิร์จ แล้วให้วัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันนี้



รูปที่ 4.22 วงจรทดสอบวัดดีสชาร์จบางส่วน

#### 4.3.2 การทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกิน

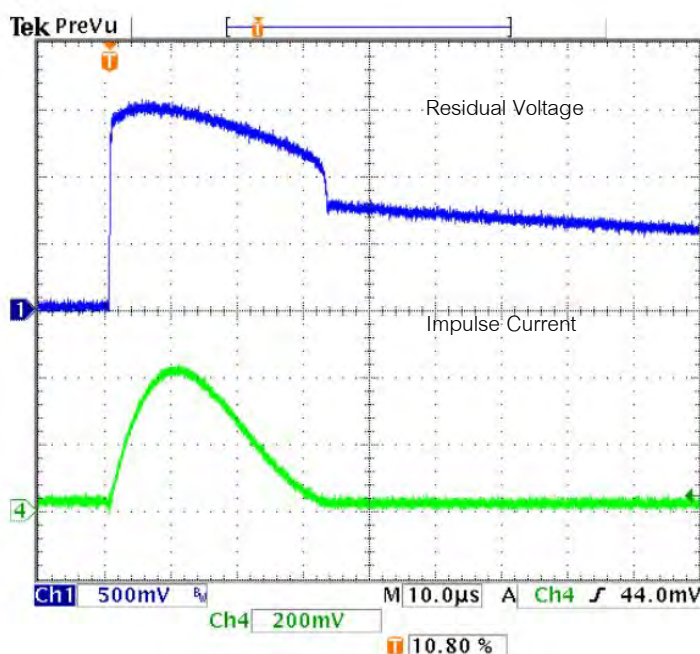
สำหรับการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินใช้การทดสอบวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้าง (Residual voltage) ที่ขนาดกระแสฟลักซ์ของกับดักเสิร์จ ในรูปที่ 4.23 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้าง



รูปที่ 4.23 วงจรการทดสอบวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้างของกับดักเสิร์จ

สำหรับเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบมีขนาดฟลักซ์ 30 kJ แรงดันทดสอบสูงสุด 200 kV และจ่ายกระแสอิมพัลส์สูงสุดขณะลัดวงจรได้ประมาณ 10 kA รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบแรงดันดีสชาร์จคงค้างที่วัดได้ โดยรูปคลื่นของกระแสได้จากการวัดด้วยขดลวดโรกอฟสกี ฟลักซ์สูงสุด 30 kA มีค่าความไว (Sensitivity) 0.095 mV/A และมีช่วงความถี่ในการทำงาน 100Hz - 2.5 MHz ซึ่งเพียงพอกับการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

สำหรับรูปคลื่นของแรงดันดีสชาร์จคงค้างวัดด้วยตัวแบ่งแรงดันชนิดความต้านทาน และตัวเก็บประจุไฟฟ้า (R-C Voltage divider) ขนาด 400 kV ร่วมกับชุดลดทอน (Attenuator) ขนาด 100 เท่า ทำให้มีอัตราส่วนการลดทอนรวม ประมาณ 28,720 เท่า



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดันดีสชาร์จคงค้างของกับดักเสิร์จ

การทดสอบแรงดันดีสชาร์จคงค้างกำหนดให้กระทำภายหลังจากเสิร์จลี้ หารทดสอบ ในหัวข้อที่ 4.3.1 เรียบร้อยแล้ว เนื่องจากการทดสอบนี้ อาจทำให้กับดักเสิร์จเกิดความเสื่อมสภาพ หรือเกิดความเสียหายได้ โดยกำหนดให้ทดสอบที่กระแสดีสชาร์จพิกัดเพียงค่าเดียวเท่านั้น (5 kA) เนื่องจากตัวอย่างทั้งหมดล้วนเป็นกับดักเสิร์จชนิดที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป และทำการทดสอบทั้งกระแส วนบวกและขั้วลบ

#### 4.3.3 ลำดับขั้นตอนในการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จ

##### 4.3.3.1 การทดสอบประเมินความคงทนขณะรับแรงดันใช้งานปกติ

ประกอบไปด้วยการทดสอบวัดค่าความต้านทาน ปริมาณกระแสรั่ว แรงดันอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ โดยมีลำดับขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

- 1) วัดค่าความต้านทานกับดักเสิร์จ ด้วยเมกเกอร์ที่ระดับแรงดัน  $5 \text{ kV}_{\text{dc}}$
- 2) ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $12.7 \text{ kV}$  และ  $19.05 \text{ kV}$  สำหรับกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่าย  $22 \text{ kV}$  และ  $33 \text{ kV}$  ตามลำดับ และควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ บันทึกค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าวัดที่ผิวภายนอก และกระแสไฟฟ้าวัดรวมของกับดักเสิร์จ รวมทั้งบันทึกอุณหภูมิที่วัดได้ ณ จุดกึ่งกลางของกับดักเสิร์จ และอุณหภูมิแวดล้อมจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และกล้องถ่ายภาพความร้อน พร้อมกับบันทึกภาพถ่ายความร้อนประกอบ
- 3) วัดและบันทึกค่าต่าง ๆ ที่ระบุไว้ในข้อนี้ ตอนที่ 1 ภายหลังจากป้อนแรงดันที่ระดับแรงดันใช้งานปกติเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) วัดและบันทึกค่าต่าง ๆ ที่ระบุไว้ในข้อนี้ ตอนที่ 2 ภายหลังจากป้อนแรงดันที่ระดับแรงดันใช้งานปกติเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) เพิ่มแรงดันทดสอบให้เท่ากับแรงดัน MCOV หรือ  $U_c$  ของกับดักเสิร์จ และบันทึกรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าวัดรวมของกับดักเสิร์จ
- 6) เพิ่มแรงดันทดสอบจนค่ากระแสไฟฟ้าวัดรวมชั่ว วินาที หนึ่ง ในขณะเวลาที่ตรงกับค่ายอดของแรงดันทดสอบมีค่าเท่ากับ  $1 \text{ mA}$  บันทึกรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าวัดรวมของกับดักเสิร์จ
- 7) คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าวัดเชิงความต้านทาน และกระแสวัดเชิงความต้านทานที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3 จากรูปคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าวัดรวมที่บันทึกได้ขณะทดสอบในข้อนี้ ตอนที่ 4 และ 5
- 8) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จจากรูปคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าวัดรวมที่บันทึกได้ขณะทดสอบในข้อนี้ ตอนที่ 4 และ 5
- 9) คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ที่ได้จากการทดสอบในข้อนี้ ตอนที่ 6

#### 4.3.3.2 การทดสอบประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกิน

- 1) วัดค่าความต้านทานกับดักเสิร์จ ด้วยเมกเกอร์ที่ระดับแรงดัน  $5 \text{ kV}_{\text{dc}}$
- 2) จ่ายกระแสดีเอสอาร์จรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน ชั่ววนรอบ ขนาดค่ายอด  $5 \text{ kA}$  ให้กับตัวอย่างกับดักเสิร์จ วัดค่ายอดและบันทึกรูปคลื่นของแรงดันดีเอสอาร์จคงค้าง
- 3) จ่ายกระแสดีเอสอาร์จรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน ชั่ววนรอบ ขนาดค่ายอด  $5 \text{ kA}$  ให้กับตัวอย่างกับดักเสิร์จ วัดค่ายอดและบันทึกรูปคลื่นของแรงดันดีเอสอาร์จคงค้าง

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จ

ในบทนี้ นำเสนอผลการทดสอบประเมินสภาพของตัวอย่างกัปดักเสิร์จจำนวน 2 กลุ่ม คือ ตัวอย่างกัปดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร และตัวอย่างที่สุ่มเก็บมาจากพื้นที่ต่าง ๆ สำหรับผลการทดสอบกลุ่มตัวอย่างกัปดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติจะแยกไปนำเสนอในบทที่ 6 โดยทำการทดสอบทั้งตัวอย่างที่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และที่ถอดเปลี่ยนมาจากระบบไฟฟ้า ด้วยวิธีการทดสอบและขั้นตอนตามที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์และประเมินสภาพกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งทำให้ทราบถึงปัญหาความเสียหายและความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งทราบถึงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

#### 5.1 ผลการทดสอบกัปดักเสิร์จอ้างอิง

ในการประเมินความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จจากผลการทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น วัดค่าความต้านทาน กระแสไฟฟ้าวู แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และแรงดันดีเอสอาร์ คงค้าง จำเป็นต้องทราบข้อมูลการทดสอบของกัปดักเสิร์จตัวใหม่แต่ละรุ่นของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ในที่นี้ จะเรียกว่า "กัปดักเสิร์จอ้างอิง" เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์เริ่มต้นสำหรับเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกัปดักเสิร์จที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยประเมินสภาพจากระดับการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างของค่าที่วัดได้ ดังนี้ จึงได้รวบรวมข้อมูลและทำการทดสอบตัวอย่างกัปดักเสิร์จอ้างอิงเท่าที่สามารถจัดหาได้เพื่อนำมาใช้ประกอบในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้

##### 5.1.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานอ้างอิงของกัปดักเสิร์จ

เพื่อให้ทราบถึงค่าความต้านทานอ้างอิงของกัปดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงได้ทำการวัดค่าความต้านทานของกัปดักเสิร์จที่ยังไม่ได้ใช้งานโดยใช้เมกเกอร์ทดสอบที่แรงดัน  $5 \text{ kV}_{dc}$  เบื้องต้นได้ทดสอบกับกัปดักเสิร์จอ้างอิงจำนวน 3 ผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีขนาดพิกัด  $21 \text{ kV}, 5 \text{ kA}$  และ  $24 \text{ kV}, 5 \text{ kA}$  ซึ่งใช้งานในระบบแรงดัน  $22 \text{ kV}$  โดยมีรายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบดังนี้

- 1) ตัวอย่างอ้างอิงผลิตภัณฑ์ A พิกัด 21 kV, 5 kA และ 17 kV ( $U_o$ ) ปีที่ผลิต 2009 Contract ปก.ล. 160/2551, Lot 07 จำนวน 20 ตัว
- 2) ตัวอย่างอ้างอิงผลิตภัณฑ์ B พิกัด 24 kV, 5 kA และ 19.5 kV ( $U_o$ ) ปีที่ผลิต 2009 Contract ปก.บ. 030/2552 จำนวน 5 ตัว
- 3) ตัวอย่างอ้างอิงผลิตภัณฑ์ D พิกัด 21 kV, 5 kA และ 17 kV ( $U_o$ ) ปีที่ผลิต 05/2009 Contract ปก.ล. 056/2552, Lot 06 C/N 23/45 จำนวน 20 ตัว

ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง  $34^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50% โดยผลการวัดค่าความต้านทานของกัปดักเสิร์จอ้างอิงที่ 3 รุ่น สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.1 ซึ่งเห็นได้ว่าที่แรงดันทดสอบ  $5\text{ kV}_{\text{dc}}$  กัปดักเสิร์จมีค่าความต้านทานสูงมากในระดับ  $\text{G}\Omega$  และพบว่าแต่ละผลิตภัณฑ์อาจมีค่าไม่เท่ากัน โดยผลิตภัณฑ์ A มีค่าความต้านทานต่ำที่สุด และบางตัวอย่างก็มีค่าแตกต่างจากตัวอื่นไปมาก ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง  $40 - 50\text{ G}\Omega$  และมีค่าเฉลี่ยประมาณ  $44\text{ G}\Omega$  สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D เกือบทั้งหมดมีค่าความต้านทานมากกว่า  $100\text{ G}\Omega$  ซึ่งเกินกว่าความสามารถของเมกเกอร์ที่ใช้จะวัดค่าได้

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดค่าความต้านทานอ้างอิงของกัปดักเสิร์จที่ใช้ในระบบ 22 kV

ผลิตภัณฑ์	พิกัด	จำนวน (ตัว)	ค่าความต้านทาน ( $\text{G}\Omega$ )			
			ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
A	21 kV, 5 kA	20	30	70	44.10	8.84
B	24 kV, 5 kA	5	90	>100	-	-
D	21 kV, 5 kA	20	100	>100	-	-

ค่าความต้านทานของกัปดักเสิร์จที่วัดได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ  $\text{ZnO}$  ในช่วงก่อนการนำกระแส ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันได้ในแต่ละบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานเริ่มต้นของกัปดักเสิร์จที่ยังไม่ได้ใช้งานไม่สามารถแสดงถึงความแตกต่างของคุณภาพและความคงทนของกัปดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ แต่ค่าความต้านทานของตัวอย่างในแต่ละรุ่นจะนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่สุ่มเก็บมาจากระบบไฟฟ้าหรือตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ เพื่อใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานกับปริมาณอื่น ๆ ที่สามารถทดสอบได้ เช่น กระแสไฟฟ้ารั่วและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย สำหรับประเมินความเสี่ยงสภาพหรือความผิดปกติของกัปดักเสิร์จร่วมกัน



## 5.1.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นของกับดักเสิร์จอ้างอิง

### 5.1.2.1 กับดักเสิร์จอ้างอิงขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA

ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่ว และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ยังไม่ได้ใช้งาน ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA และ 17 kV ( $U_c$ ) จำนวนทั้งสิ้น 164 ตัว จาก 8 ผลิตภัณท์ ในระหว่างปี พ.ศ.2550 – พ.ศ.2552 พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วรวมที่แรงดันใช้งาน 12.7 kV (ระบบ 22 kV) และแรงดัน  $U_c$  17.0 kV โดยภาพรวมมีขนาดแตกต่างกันไม่มากนัก และมีขนาดสูงสุดไม่เกิน 0.2 mA และ 0.28 mA ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 แต่พบความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กระแสอ้างอิง 1 mA (ยกเว้นผลิตภัณท์ D ใช้กระแสอ้างอิงที่ 3 mA) ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากความแตกต่างของคุณลักษณะ V-I Characteristic ของบล็อก ZnO ซึ่งผู้ผลิตแต่ละผลิตภัณท์เลือกมาใช้งาน

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเบื้องต้นของกับดักเสิร์จอ้างอิงขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA

ผลิตภัณท์	จำนวน (ตัว)	กระแสไฟฟ้ารั่วรวมที่แรงดัน 12.7 kV (mA)	กระแสไฟฟ้ารั่วรวมที่แรงดัน 17 kV $U_c$ (mA)	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กระแสอ้างอิง 1 mA (kV)
A	28	0.08 - 0.20 (0.15)	0.09 - 0.28 (0.20)	21 – 29 (25.2)
B	11	0.14 - 0.17 (0.16)	0.20 - 0.25 (0.22)	22 - 23.5 (22.6)
C	4	0.16 - 0.18 (0.17)	0.22 - 0.24 (0.235)	25 – 28 (26.0)
D	13	0.10 - 0.16 (0.13)	0.15 - 0.22 (0.19)	27 – 28 (27.5) @ 3 mA
G	4	0.16 - 0.18 (0.17)	0.20 - 0.22 (0.21)	22 – 23 (22.5)
H	2	0.12 - 0.20 (0.16)	0.14 - 0.26 (0.20)	26 – 29 (27.5)
I	1	0.16 (0.16)	0.22 (0.22)	27 (27)
J	1	0.20 (0.20)	0.24 (0.24)	28 (28)

หมายเหตุ ในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ารั่วรวม และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจากตัวอย่างอ้างอิงทั้งหมด

จากตารางที่ 5.2 เมื่อพิจารณาเป็นรายผู้ผลิตจะเห็นว่ากับดักเสิร์จที่ผลิตในช่วงเวลาดังกล่าว มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน ยกเว้นผลิตภัณท์ A คาดว่าผู้ผลิตอาจมีการเปลี่ยนแปลงบล็อก ZnO ที่นำมาใช้งานหรือเปลี่ยนแปลงการออกแบบ โดยแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของผลิตภัณท์ที่ผลิตในช่วงต้นปี พ.ศ.2550 มีค่าประมาณ 28 - 29 kV แต่กับดักเสิร์จที่ผลิตในช่วงกลางปี พ.ศ.2552 มีค่าลดลงเหลือ 21 - 22 kV ซึ่งทำให้ปริมาณกระแสรั่วของกับดักเสิร์จที่ผลิตในช่วงปีหลังมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยตามไปด้วย ดังนั้น การพิจารณาความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงอาจทำได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะหากผู้ผลิตเปลี่ยนแปลงบล็อก ZnO ที่ใช้ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนค่าอ้างอิงต่าง ๆ ตามไปด้วย ทำให้เกิดปัญหาและความยุ่งยากในทางปฏิบัติได้

นอกจากนี้ ยังได้ทดสอบตัวอย่างอ้างอิงของผลิตภัณฑ์ A จำนวน 5 ตัว ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA ซึ่งนำมาจากคลังอุปกรณ์ของ กฟภ. เพื่อนำผลมาใช้อ้างอิงและเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่สุ่มถอดมาจากพื้นที่ต่าง ๆ ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างอ้างอิงของผลิตภัณฑ์ A ทั้ง 5 ตัว พบว่าตัวอย่างอ้างอิง ตัวที่ 3 และตัวที่ 5 มีความผิดปกติเกิดขึ้นเห็นได้ชัดเจนจาก  $\%I_{r,pk} / I_{c,pk}$  เนื่องจากมีค่าสูงกว่าปกติที่ 20% และยังมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าตัวที่ 1 และ 2 ที่มีค่าต่าง ๆ ปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบวัดค่าความต้านทาน กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ด้วย สำหรับตัวที่ 4 ก็เริ่มมีความผิดปกติเล็กน้อยเช่นกัน เมื่อพิจารณาปริมาณดีเอสอาร์บางส่วนจะเห็นว่าตัวที่ 3 มีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (10 pC) อย่างไรก็ตามเบื้องต้นยังไม่ขอสรุปถึงสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้น คุณภาพและความคงทนของผลิตภัณฑ์จากปัญหาดังกล่าวทั้งนี้ มีความแตกต่างกันของปีที่ผลิตระหว่างตัวอย่างที่ 1 - 2 กับตัวอย่างที่ 3 - 5 ซึ่งมีผลในปี ค.ศ. 2005 และ 2008 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบตัวอย่างอ้างอิงของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A

ผลการตรวจสอบ	ตัวอย่างอ้างอิงของผลิตภัณฑ์ A				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5
ปีที่ผลิต (ค.ศ.)	2005	2005	2008	2008	2008
ความต้านทานที่แรงดัน 5 kV <sub>dc</sub> (GΩ)	>100	100	2.8	8	9.5
กระแสรั่วรวมที่แรงดัน ใช้งาน 12.7 kV (mA)	0.161	0.175	0.197	0.18	0.192
กระแสรั่วรวมที่แรงดัน U <sub>c</sub> 17 kV (mA)	0.213	0.244	0.260	0.233	0.257
กระแสรั่วเชิงความต้านทาน ที่แรงดัน 12.7 kV (μA)	15.28	23.05	61.92	39.32	66.38
% I <sub>r,pk</sub> / I <sub>c,pk</sub> ที่ 12.7 kV	12.35	18.71	36.52	24.71	48.81
% I <sub>r,3rd</sub> / I <sub>r</sub> ที่ U <sub>c</sub> 17 kV	30.64	38.62	6.54	9.11	8.51
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่แรงดัน 12.7 kV (W)	0.187	0.275	0.780	0.493	0.840
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่แรงดัน U <sub>c</sub> 17 kV (W)	0.543	1.138	1.570	1.036	1.668
แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ที่กระแส 1 mA (kV)	22.67	20.75	21.90	21.90	21.90
อุณหภูมิกับดักเสิร์จ (°C)	25.4	25.5	26.2	25.2	26.7
อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น (°C)	0.5	1	1.5	0.5	2.1
PD ที่ 1.05 U <sub>c</sub> (pC)	3.8	3.5	27.0	-	-

หมายเหตุ “ - ” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ

### 5.1.2.2 กั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งอั้งขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA

ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว และแรงดันไฟฟ้าอั้งของกั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA และ 24.4 kV ( $U_c$ ) ที่ใช้ในระบับ 33 kV จำนวน 75 ตัว จาก 5 ผลิตภัณท์ ในระหว่างปี พ.ศ.2547 - พ.ศ.2552 พบว่าโดยรวมตัวอย่างอั้งของทุกผลิตภัณท์มีกระแสรั่วในปริมาณใกล้เคียงกัน ตามตารางที่ 5.4 พบว่าที่แรงดันระบับ (19.0 kV) และแรงดัน  $U_c$  (24.4 kV) มีปริมาณกระแสรั่วอยู่ในช่วง 0.10 - 0.24 mA และ 0.13 - 0.29 mA ตามลำดับ และมีแรงดันอั้งอยู่ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 29 - 40 kV โดยเฉพาะผลิตภัณท์ A และ B และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 34 kV และ 32 kV ตามลำดับ สำหรับผลิตภัณท์ C และ D มีแรงดันอั้งใกล้เคียงกันประมาณ 40 - 41 kV ซึ่งสูงกว่าผลิตภัณท์อื่น ๆ เนื่องจากทดสอบที่ขนาดกระแสอั้ง 3 mA

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบเบี๊ องต้นของกั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA

ผู้ผลิต	จำนวน (ตัว)	กระแสไฟฟ้ารั่วรวม ที่แรงดัน 19.0 kV (mA)	กระแสไฟฟ้ารั่วรวม ที่แรงดัน 24.4 kV $U_c$ (mA)	แรงดันไฟฟ้าอั้งที่ กระแสอั้ง 1 mA (kV)
A	37	0.10 - 0.23 (0.15)	0.14 - 0.29 (0.20)	29 - 40 (34.5)
B	28	0.12 - 0.24 (0.17)	0.13 - 0.28 (0.22)	29 - 37 (32.5)
C	1	0.16 (0.16)	0.20 (0.2)	40 (40) @ 3 mA
D	6	0.12 - 0.14 (0.13)	0.16 - 0.18 (0.18)	40 - 41 (40.3) @ 3 mA
J	3	0.14 - 0.18 (0.16)	0.18 - 0.24 (0.22)	30 - 32 (30.7)

หมายเหตุ : ในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ารั่วรวม และแรงดันไฟฟ้าอั้งจากตัวอย่างอั้งทั้งหมด

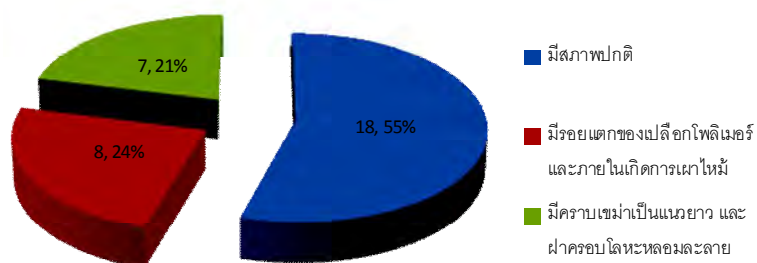
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบเบี๊ องต้นของกั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA และ 30 kV, 5 kA ในตารางที่ 5.2 และ 5.4 จะเห็นว่าแม้มีพิกัดต่างกันแต่มีปริมาณกระแสรั่วรวมอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดที่แรงดันใช้งานไม่เกิน 0.20 mA และ 0.24 mA ตามลำดับ และที่ระดับแรงดัน  $U_c$  ก็มีขนาดไม่เกิน 0.28 mA และ 0.29 mA ตามลำดับ แต่กั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งที่มีแรงดันพิกัดเดียวกันแต่สามารถรับพลังงานได้สูงกว่า เบี๊ องต้นพบว่า มีปริมาณกระแสรั่วรวมสูงกว่ากั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งขนาด 5 kA ทั่วไป เช่น กั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งผลิตภัณท์ A ที่มีขนาดพิกัด 21 kV, 10 kA Class 3 วัดปริมาณกระแสรั่วรวมได้ 0.54 - 0.65 mA ที่แรงดันระบับ และ 0.60 - 0.80 mA ที่แรงดัน  $U_c$  ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาปริมาณกระแสรั่วรวมปกติของกั๊บดั๊กเสี๊รจ้อ๊งในแต่ละประเภทจึงไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้

## 5.2 ผลทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

เพื่อศึกษาและประเมินความน่าเชื่อถือในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร จึงทำการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีการทำงานหรือการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจร จำนวน 33 ตัว ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยนำมาตรวจสอบสภาพภายนอกด้วยตาเปล่า และทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักเสิร์จด้วยการวัดค่าความต้านทานและปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบในเบื้องต้นได้ดังนี้

### 5.2.1 ผลการตรวจสอบสภาพภายนอก

ผลการตรวจสอบสภาพภายนอกของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรสามารถสรุปได้ตามแผนภาพในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพสรุปผลการตรวจสอบสภาพภายนอกของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

ผลการตรวจสอบพบว่าตัวอย่างกับดักเสิร์จเกินกว่าครึ่งยังมีสภาพภายนอกปกติ ซึ่งประกอบด้วยทุกตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ B และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ อีกบางส่วน สำหรับในจำนวนที่เหลือสามารถสังเกตเห็นลักษณะของความผิดปกติและความเสียหายของกับดักเสิร์จได้ใน 2 รูปแบบ ดังนี้

- 1) มีรอยแตกของเปลือกโพลีเมอร์บริเวณลำตัวของกับดักเสิร์จ ภายในมีการเผาไหม้ของวัสดุหุ้มและZnO Block รวมทั้งมีคราบเขม่ากระจายทั่วทั้งตัวที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.2 กลุ่มนี้มีจำนวนทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ A จำนวน 3 ตัว ผลิตภัณฑ์ C จำนวน 2 ตัว และผลิตภัณฑ์ D จำนวน 3 ตัว
- 2) มีคราบเขม่าควันเป็นแนวยาวตามลำตัวของกับดักเสิร์จ และมีการหลอมละลายของฝาครอบโลหะ หรือขั้วต่อสายไฟฟ้าเบื้องต้นคาดการณ์ว่าอาจเกิดจากการวาบไฟตามผิวของกับดักเสิร์จ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.3 จำนวนตัวอย่างที่พบ 7 ตัว เป็นผลิตภัณฑ์ A ทั้งหมด



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการแตกของเปลือกพอลิเมอร์และภายในเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่พบการหลอมละลายของฝาครอบโลหะ และมีคราบเขม่าเป็นแนวยาวตามลำตัวของกับดักเสิร์จ

สำหรับความเสียหายอื่น ๆ พบการหักของแขนฉนวนจับยึดกับดักเสิร์จ (Bracket) ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A จำนวน 2 ตัว ซึ่งอาจได้รับผลจากแรงระเบิด ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และพบการทำงานที่ไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ปลดวงจร จากตัวอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ A เช่นกัน โดยสังเกตเห็นรูทะลุขนาดเล็กบนลำตัวของอุปกรณ์ปลดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 5.5 มีลักษณะคล้ายกับการถูกเจาะด้วยความร้อนจากด้านใน แต่เมื่อวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่อทั้งสองด้าน พบว่ามีค่าประมาณ  $1.06\Omega$  ซึ่งแสดงว่าภายในของอุปกรณ์ปลดวงจรทั้งสองด้านยังคงต่อถึงกันทางไฟฟ้า ทั้งที่กับดักเสิร์จตัวนี้ เกิดการระเบิดและวัดค่าความต้านทานได้ต่ำกว่าคล้ายกับการลัดวงจรภายใน แต่อุปกรณ์ปลดวงจรกลับไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์



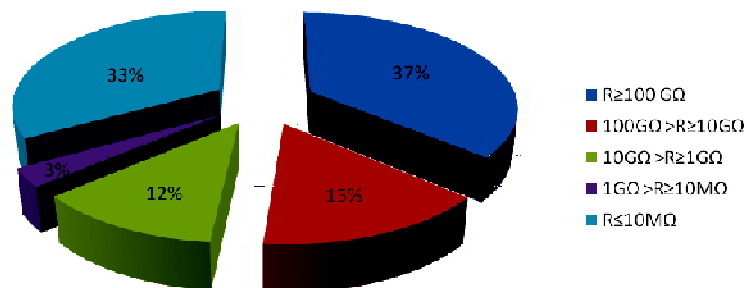
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการแตกหักของแขนฉนวน(Bracket)



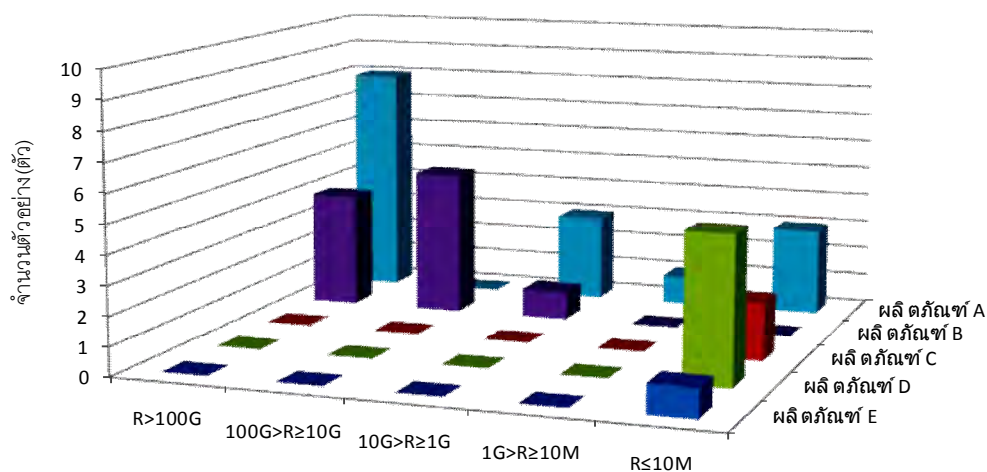
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่พบว่าอุปกรณ์ปลดดวงจทำงานไม่สมบูรณ์

### 5.2.2 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทาน

ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดดวงจด้วยเมกเกอร์ที่แรงดันทดสอบ 5 kV<sub>dc</sub> พบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่ยังคงมีค่าความต้านทานสูง ตามแผนภาพสรุปในรูปที่ 5.6 โดยกับดักเสิร์จจำนวน 21 ตัวอย่าง (64%) มีค่าความต้านทานสูงมากกว่า 1 GΩ และมีเพียง 11 ตัวอย่างเท่านั้น (33%) ที่มีความต้านทานอยู่ในระดับต่ำมาก หรือน้อยกว่า 10 MΩ (ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 100 kΩ) สำหรับตัวอย่างทั้งหมดที่พบการแตกของเปลือกพอลิเมอร์และมีการเผาไหม้ภายในนี้ อยู่ในกลุ่มที่มีความต้านทานต่ำมาก หรือเป็นกับดักเสิร์จที่เกิดความเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้ อย่างไรก็ตามมี 3 ตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำมากแต่ยังมีสภาพภายนอกปกติ สำหรับตัวอย่างที่พบคราบเขม่าและฝาครอบโลหะหลอมละลายนั้น ทุกตัวมีค่าความต้านทานสูง ซึ่งช่วยยืนยันได้ว่าความเสียหายลักษณะนี้ เกิดขึ้นจากการวาบไฟตามผิวของกับดักเสิร์จตามที่ได้คาดไว้เบื้องต้น สำหรับรูปที่ 5.7 และตารางที่ 5.5 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างแต่ละผลิตภัณฑ์



รูปที่ 5.6 แผนภาพสรุปผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเล็รจ  
ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร



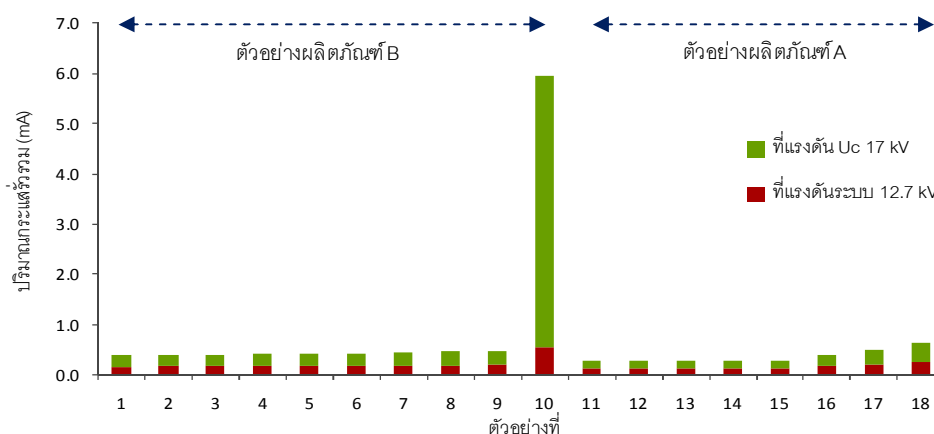
รูปที่ 5.7 ผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเล็รจ  
ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรแยกแต่ละผู้ผลิต

ตารางที่ 5.5 ผลการวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเล็รจ  
ที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

ผล ตักณ์ท์	จำนวนตัวอย่างกับดักเล็รจในแต่ละช่วงของความต้านทานที่วัดได้ (ตัว)				
	$R \geq 100 \text{ G}\Omega$	$100 \text{ G}\Omega > R \geq 10 \text{ G}\Omega$	$10 \text{ G}\Omega > R \geq 1 \text{ G}\Omega$	$1 \text{ G}\Omega > R \geq 10 \text{ M}\Omega$	$R \leq 10 \text{ M}\Omega$
A	8	-	3 (1-7 GΩ)	1 (0.48 GΩ)	3 (<0.1 MΩ)
B	4	5 (60-80 GΩ)	1 (9.5 GΩ)	-	-
C	-	-	-	-	2 (<1.6 MΩ)
D	-	-	-	-	5 (<0.45 MΩ)
E	-	-	-	-	1 (2 MΩ)

### 5.2.3 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว

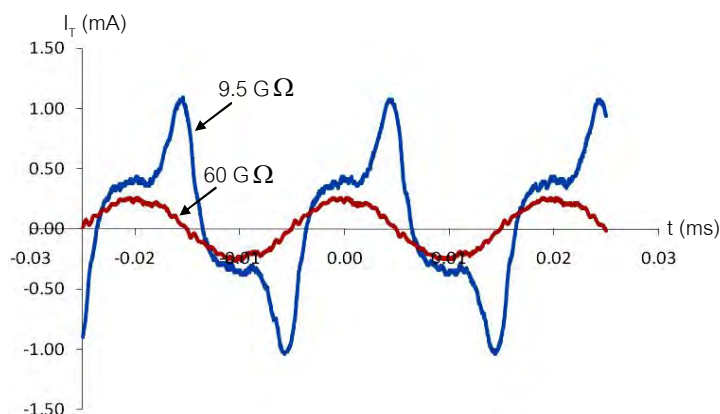
เพื่อตรวจสอบและประเมินสภาพตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร จึงนำตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานสูงกว่า  $1 \text{ G}\Omega$  จำนวน 18 ตัว แบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ A จำนวน 8 ตัว และ B จำนวน 10 ตัว ไปทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ 12.7 kV และแรงดัน  $U_c$  17.0 kV รูปที่ 5.8 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างพบว่าส่วนใหญ่มีปริมาณกระแสรั่วรวมทั้ง 2 ระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ปกติตามตารางที่ 5.2 บางตัวอย่างอาจมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่มีตัวอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ B มีกระแสรั่วรวมสูงถึง 0.55 mA และมีค่ายอดสูงสุดประมาณ  $1.10 \text{ mA}_{pk}$  ซึ่งสูงเกินกว่าค่าปกติมาก ทั้งที่มีค่าความต้านทานสูงถึง  $9.5 \text{ G}\Omega$  ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และที่แรงดัน  $U_c$  17 kV พบว่าตัวอย่างนี้ มีกระแสรั่วรวมสูงมากถึง 5.40 mA และ  $11.60 \text{ mA}_{pk}$  อย่างไรก็ตามปริมาณกระแสรั่วดังกล่าวนี้ ไม่ควรทำให้อุปกรณ์ปลดวงจรทำงาน โดยตัวอย่างนี้ อาจเป็นกับดักเสิร์จที่เกิดการเสื่อมสภาพหรือเกิดความเสียหายของบล็อก ZnO โดยสังเกตได้จากมีค่าความต้านทานต่ำกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์เดียวกันและลักษณะรูปคลื่นกระแสรั่วที่มียอดแหลม และองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ 3 ผสมอยู่มาก



รูปที่ 5.8 กระแสรั่วรวมของตัวอย่างที่อุปกรณ์ปลดวงจรทำงาน แต่ยังคงมีค่าความต้านทานมากกว่า  $1 \text{ G}\Omega$

ในรูปที่ 5.9 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่วรวมที่มีค่าสูงผิดปกติของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B ที่มีค่าความต้านทาน  $9.5 \text{ G}\Omega$  เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างจากผลิตภัณฑ์เดียวกันที่มีความต้านทานประมาณ  $60 \text{ G}\Omega$  ดังนั้นหากพบว่ากับดักเสิร์จมีค่าความต้านทานลดลงจากระดับปกติสามารถสันนิษฐานได้ว่ากับดักเสิร์จดังกล่าวมีความผิดปกติเกิดขึ้น และอาจมีกระแสรั่วในปริมาณสูง กรณีนี้ พบว่าค่าความต้านทานลดลงจากระดับปกติมากกว่า 6 เท่า





รูปที่ 5.9 รูปคลื่นกระแสรั่วรวมของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ B  
ที่มีค่าความต้านทาน 9.5 GΩ และ 60 GΩ

#### 5.2.4 ผลประเมินการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

จากผลการตรวจสอบสภาพภายนอกของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร และการทดสอบเบ็องต้นทางไฟฟ้า สามารถสรุปและประเมินผลการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าและให้ข้อสังเกตต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) โดยภาพรวมการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีตัวอย่างเพียง 33% เท่านั้นที่คาดว่าอุปกรณ์ปลดวงจรทำงานได้อย่างถูกต้อง เพราะเกิดการชำรุดเสียหายอย่างชัดเจนของบล็อก ZnO และส่วนประกอบภายในอื่น ๆ เห็นได้จากความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำมาก และเมื่อพิจารณาในแต่ละผลิตภัณฑ์สามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์ต่างประเทศมีความน่าเชื่อถือในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรค่อนข้างสูง เนื่องจากทุกตัวอย่างมีค่าความต้านทานต่ำมาก ซึ่งเป็นผลจากการชำรุดเสียหาย หรือความผิดปกติของกับดักเสิร์จจนไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป
- ผลิตภัณฑ์ภายในประเทศที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรส่วนใหญ่ยังคงมีสภาพใกล้เคียงปกติ ไม่เกิดการชำรุดเสียหาย แม้ว่าจะมีหนึ่งตัวอย่างที่พบว่ามีการรั่วสูงกว่าปกติ ซึ่งอาจเกิดการเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO แต่ก็มี ความรุนแรงไม่มากนัก
- ตัวอย่างกว่าครึ่งของบางผลิตภัณฑ์มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรขณะเกิดวาทไฟตามผิวของกับดักเสิร์จ เนื่องจากกระแสอาร์คสามารถไหลผ่านอุปกรณ์ปลดวงจรจนเป็นเหตุให้เกิดการทำงานได้

2) ความไม่แน่นอนหรือการทำงานผิดพลาด ส่วนใหญ่พบว่าเป็นการทำงานของอุปกรณ์ ปลดวงจรในขณะที่กับดักเล็กรังยังคงมีสภาพปกติ หรือยังสามารถใช้งานต่อไป แต่บางกรณีก็ไม่สามารถตัดวงจรกับดักเล็กรังซึ่งเกิดการชำรุดเสียหายให้ออกไปจากระบบไฟฟ้าได้ โดยกรณีหลังนี้อาจเกิดขึ้นจากการทำงานไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ปลดวงจรเอง หรือจากความไม่แน่นอนตั้งแต่การออกแบบ คุณภาพการผลิต และความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

3) อุปกรณ์ปลดวงจรของแต่ละผู้ผลิตมีคุณลักษณะในการทำงานแตกต่างกัน ดังนั้นการกำหนดจุดทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรให้เหมาะสมและมีความน่าเชื่อถือจึงเป็นสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาและศึกษาให้ชัดเจน โดยศึกษาข้อมูลการออกแบบ หลักการทำงาน และพิจารณาคุณลักษณะต่าง ๆ ของอุปกรณ์ปลดวงจร พร้อมกับศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรให้มีความน่าเชื่อถือได้มากขึ้น และสอดคล้องกับการชำรุดเสียหายของกับดักเล็กรังอย่างแท้จริง

4) กับดักเล็กรังที่เกิดการชำรุดเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้แล้ว อาจสังเกตเห็นได้จากความผิดปกติภายนอก เช่น การแตกของเปลือกหุ้มพอลิเมอร์ การเผาไหม้ของบลิ๊อค ZnO หรือส่วนประกอบอื่น ๆ และคราบเขม่าควัน แต่บางกรณีอาจไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงหรือสิ่งผิดปกติใด ๆ ภายนอกเลยก็ได้ อย่างไรก็ตามกับดักเล็กรังที่ชำรุดเสียหายจะมีค่าความต้านทานต่ำมาก โดยความต้านทานที่วัดได้ที่ระดับแรงดัน  $5 \text{ kV}_{dc}$  อาจมีค่าไม่เกิน  $10 \text{ M}\Omega$  และส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่า  $100 \text{ k}\Omega$

5) การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ปลดวงจรให้ต่อแยกออกมาจากกับดักเล็กรังข้างครึ่ง อาจทำให้อุปกรณ์ปลดวงจรทำงานในขณะที่เกิดวาบไฟตามผิวของกับดักเล็กรังจากสาเหตุต่าง ๆ ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.3 และ 5.5 โดยจุดต่อด้านบนของอุปกรณ์ปลดวงจรหากใช้วัสดุโลหะที่นำกระแสไฟฟ้าได้ ขณะเกิดการวาบไฟตามผิวของกับดักเล็กรังจะช่วยทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์ปลดวงจรไปยังสายตัวนำลงดิน ซึ่งหากมีพลังงานสูงพอก็อาจทำให้อุปกรณ์ปลดวงจรทำงานทั้งที่บลิ๊อค ZnO ยังไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งแตกต่างจากการฝังอุปกรณ์ปลดวงจรไว้ในส่วนของแขนฉนวนจับยึดกับดักเล็กรัง อย่างไรก็ตามควรพิจารณาและให้ข้อสรุปที่ชัดเจนในกรณีดังกล่าวนี้ว่าอุปกรณ์ปลดวงจรควรทำงานด้วยหรือไม่ เนื่องจากความเสียหายต่าง ๆ จากเหตุการณ์วาบไฟตามผิวอาจทำให้จุดต่อสายไลน์ ฟาครชโลหะด้านบน จุดต่อลงดิน และผิวของเปลือกพอลิเมอร์ได้รับความเสียหายได้จนไม่สามารถใช้งานกับดักเล็กรังได้เช่นกัน

6) แชนนวนวนจับยึดกับดักเสิร์จบางผลิตภัณฑ์อาจมีความแข็งแรงไม่เพียงพอกับแรงทางกลที่เกิดขึ้น เมื่ออุปกรณ์ปลดวงจรหรือกับดักเสิร์จเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง เห็นได้จากบางตัวอย่างพบการแตกหักของแชนนวนวนซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาลัดวงจรในระบบไฟฟ้าได้

อย่างไรก็ตามผลสรุปเหล่านี้ ได้มาจากกลุ่มตัวอย่างกับดักเสิร์จเพียง 3 ตัว เท่านั้น ซึ่งหากมีตัวอย่างเป็นจำนวนมาก ก็อาจทำให้ผลการประเมินมีความชัดเจนและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

### 5.3 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบ 22 kV

จากการสุ่มเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จในพื้นที่ที่แวดล้อมต่าง ๆ ของระบบ 22 kV สามารถถอดเปลี่ยนตัวอย่างได้จำนวนทั้งสิ้น 191 ตัวอย่าง ตามที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 เพื่อนำมาทดสอบและประเมินสภาพกับดักเสิร์จด้วยวิธีการต่าง ๆ ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ตัวอย่างทั้งหมดแบ่งออกเป็นตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA จำนวน 75 ตัว ซึ่งแบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ A จำนวน 67 ตัว ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 3 ตัว และผลิตภัณฑ์ D จำนวน 5 ตัว และตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาดพิกัด 24 kV, 5 kA ผลิตภัณฑ์ A จำนวน 9 ตัว โดยตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาทดสอบของแต่ละผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งเป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้ตามตารางที่ 5.6 และ 5.7

ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA ผลิตภัณฑ์ A ที่นำมาทดสอบ

สภาพแวดล้อม	พื้นที่	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ(ตัว)		
		ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3 - 7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
ชายทะเล	อ.ปราณบุรี	3	4	5
	อ.บางแสน	4	6	4
ภูเขาสูง	อ.ลี่	3	3	4
	อ.ปากช่อง	0	4	0
โรงงานอุตสาหกรรม	อ.พระพุทธรบาท	4	4	5
	อ.เมืองฯ ชลบุรี	0	0	0
ที่อยู่อาศัย	อ.เมืองฯ ปทุมธานี	3	4	5
ฟ้าผ่าบ่อยครั้ง	อ.ปลวกแดง	0	2	0
รวมทั้งสิ้น	รวม 67 ตัว	17	27	23

หมายเหตุ ระยะเวลาใช้งานเป็นเพียงค่าประมาณการ

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA ผลิตรหัส B และ D

ผลิตรหัส	สภาพแวดล้อม	พื้นที่	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ(ตัว)		
			ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3 - 7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
B	ภูเขาสูง	อ.ลี้	3	0	0
D	ภูเขาสูง	อ.ลี้	0	1	0
	ชายทะเล	อ.บางแสน	0	3	0
	ที่อยู่อาศัย	จ.ปทุมธานี	0	1	0

ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จด้วยวิธีการต่าง ๆ สามารถสรุปได้ตามลำดับดังนี้

### 5.3.1 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ผลการวัดค่าความต้านทานด้วยเมกเกอร์ที่แรงดัน 5 kV<sub>dc</sub> ของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตรหัส A จำนวนทั้งสิ้น ๖7 ตัว พบว่าตัวอย่างจำนวนมากมีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของผลิตรหัส A ที่มีค่าอยู่ในช่วง 30 - 70 GΩ หรือมากกว่า 100 GΩ ตามตารางที่ 5.1 และ 5.3 โดยตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำเป็นรุ่นใหม่ที่เกิดตั้งแต่ปี ค.ศ.2002 หรือเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานมาไม่เกิน 7 ปี อย่างไรก็ตามไม่พบว่าค่าความต้านทานที่วัดได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพแวดล้อมและระยะเวลาการใช้งาน เนื่องจากพบว่าตัวอย่างกับดักเสิร์จรุ่นเก่าที่ใช้งานเกินกว่า 7 ปีขึ้นไปนั้น ทั้งหมดยังคงมีความต้านทานสูงมาก และไม่แตกต่างกันในแต่ละสภาพแวดล้อม ส่วนใหญ่วัดค่าได้มากกว่า 100 GΩ แต่มีเพียง 2 ตัวอย่างเท่านั้นที่วัดได้ต่ำกว่า คือ 70 GΩ และ 90 GΩ ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างผลิตรหัส A ในแต่ละช่วงระยะเวลาการใช้งาน โดยไม่คำนึงถึงความแตกต่างกันทางสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างผลิตรหัส A

ระยะเวลาที่ใช้งาน (ปี)	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จในแต่ละช่วงของความต้านทานที่วัดได้(ตัว)				
	R≥100 GΩ	100 GΩ > R ≥ 10 GΩ	10 GΩ > R ≥ 1 GΩ	1 GΩ > R ≥ 100 MΩ	R ≤ 100 MΩ
< 3	1	6 (10-90 GΩ)	4 (1.2-8.0 GΩ)	4 (0.12-0.33 GΩ)	2 (40, 100 MΩ)
3-7	7	6 (20-60 GΩ)	4 (2.1-9.5 GΩ)	8 (0.12-0.58 GΩ)	2 (48, 50 MΩ)
> 7	21	2 (70, 90 GΩ)	-	-	-
รวม 67 ตัว	29	14 (10-90 GΩ)	8 (1.2-9.5 GΩ)	12 (0.12-0.58 GΩ)	4 (40-100 MΩ)

หมายเหตุ ในวงเล็บแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้จากตัวอย่างกับดักเสิร์จ

จากตารางที่ 5.8 จะเห็นว่า มีตัวอย่างจำนวนมากถึง 24 ตัว (36%) มีค่าความต้านทานต่ำกว่า  $10 \text{ G}\Omega$  แบ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้งานมาไม่เกิน 3 ปี และ 3 - 7 ปี อย่างละ 10 ตัว (59%) และ 14 ตัว (52%) ตามลำดับ ในจำนวนนี้ มีถึง 16 ตัว ที่มีค่าน้อยกว่า  $1 \text{ G}\Omega$  และมี 4 ตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำเพียง 40 - 100  $\text{M}\Omega$  ซึ่งมากกว่าค่าที่วัดได้จากตัวอย่างที่เกิดการระเบิดในตารางที่ 5.5 เพียงเล็กน้อย โดยความผิดปกตินี้พบเฉพาะในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานมาน้อยกว่า 7 ปี เท่านั้น แต่สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ติดตั้งมามากกว่า 7 ปี ทั้ง 23 ตัว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รุ่นเก่าทั้งหมด ยังคงมีค่าความต้านทานสูงมากไม่แตกต่างจากกับดักเสริมที่ยังไม่ผ่านการใช้งานโดยผลประเมินจากการทดสอบวัดค่าความต้านทานของผลิตภัณฑ์ A มีข้อสังเกตที่น่าสนใจอยู่ 2 ประการ ดังนี้

1) ตัวอย่างที่ ๒ กลุ่มนี้ แม้ว่าจะใช้รหัสรุ่นเดียวกัน แต่การออกแบบและวัสดุที่ใช้มีความแตกต่างกันในหลายส่วน ซึ่งได้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ว่าปี ค.ศ. 2002 (พ.ศ.2545) เป็นต้นมา และมีค่าความต้านทานที่วัดได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน กับดักเสริมรุ่นเก่าจะมีค่าสูงมาก ส่วนใหญ่วัดได้มากกว่า  $100 \text{ G}\Omega$  หรือต่ำกว่านั้นเล็กน้อยแต่ในรุ่นใหม่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า เช่น ตัวอย่างอ้างอิงที่ผลิตในปี 05/2009 มีค่าความต้านทานเฉลี่ยเพียง  $44 \text{ G}\Omega$  เท่านั้น อย่างไรก็ตามพบว่ากับดักเสริมรุ่นใหม่บางส่วนที่ผลิตในปี ค.ศ. 2004 - 2005 ก็มีความต้านทานสูงกว่า  $100 \text{ G}\Omega$  เช่นกัน ดังนั้น นอกจากจะได้ว่าในช่วงหลังผู้ผลิตอาจมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในส่วนของบล็อก ZnO แต่ในเบื้องต้นไม่สามารถบอกได้ว่า ตัวอย่างรุ่นใหม่ที่มีความต้านทานต่ำกว่านี้ มาจากสาเหตุใดได้อย่างชัดเจน และมีคุณสมบัติต่าง ๆ ต่ำกว่าหรือไม่

2) ตัวอย่างบางส่วนที่วัดค่าความต้านทานได้ต่ำมาก ซึ่งคาดว่าไม่สามารถนำไปใช้งานได้ อีกต่อไป อย่างไรก็ตามตัวอย่างเหล่านี้ เคยติดตั้งอยู่ในระบบได้อย่างปกติก่อนที่จะปลดออกจากระบบ ดังนั้นการลดลงของค่าความต้านทานอาจเกิดขึ้น ภายหลังจากการเก็บรักษาเพื่อรอการทดสอบ ซึ่งอาจเกิดจากปัญหาความชื้น เข้าไปข้างในหรือจากสาเหตุอื่น ๆ โดยความผิดปกตินี้ ไม่ได้เกิดขึ้นกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ทุกตัวในรุ่นเดียวกันนี้

สำหรับผลทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B ที่เพิ่งใช้งานมาไม่เกิน 3 ปี มี 2 ตัวอย่าง วัดค่าได้  $100 \text{ G}\Omega$  และอีกตัวหนึ่งวัดค่าได้ประมาณ  $60 \text{ G}\Omega$  ส่วนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ D ทั้ง 5 ตัว ซึ่งผลิตมาตั้งแต่ว่าปี ค.ศ.2002 และ 2003 ทั้งหมดมีค่าความต้านทานมากกว่า  $100 \text{ G}\Omega$  โดยตัวอย่างทั้งสองผลิตภัณฑ์ยังมีค่าความต้านทานสูงมาก ไม่แตกต่างจากกับดักเสริมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และไม่พบตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำกว่าปกติมาก

### 5.3.2 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

เนื่องจากพบว่ามตัวอย่างบางส่วนมีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติมากจึงเลือกตัวอย่างกับดักเสิร์จ ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA จำนวน 29 ตัว ซึ่งมีค่าความต้านทานแตกต่างกัน ตั้งแต่  $48 \text{ M}\Omega$  จนถึงมากกว่า  $100 \text{ G}\Omega$  ตามตารางที่ 5.9 มาทดสอบวัดปริมาณดิสชาร์จบางส่วน โดยคัดเลือกมาจากตัวอย่างในพื้นที่ของการไฟฟ้า อ.ลี้ อ.ปราณบุรี อ.พระพุทธรบาท และ อ.เมืองฯ จ.ปทุมธานี แบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ A 24 ตัว ผลิตภัณฑ์ B 3 ตัว และ ผลิตภัณฑ์ D 2 ตัว ทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ  $33.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และความชื้น  $55\%$  โดยป้อนแรงดันที่พิกัดของกับดักเสิร์จ 21 kV ค้างไว้ 10 วินาที แล้วจึงลดแรงดันมาที่  $1.05$  เท่าของแรงดัน  $U_c$  หรือ 17.85 kV เพื่อวัดปริมาณดิสชาร์จบางส่วน (pC)

ตารางที่ 5.9 ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่นำไปทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วน

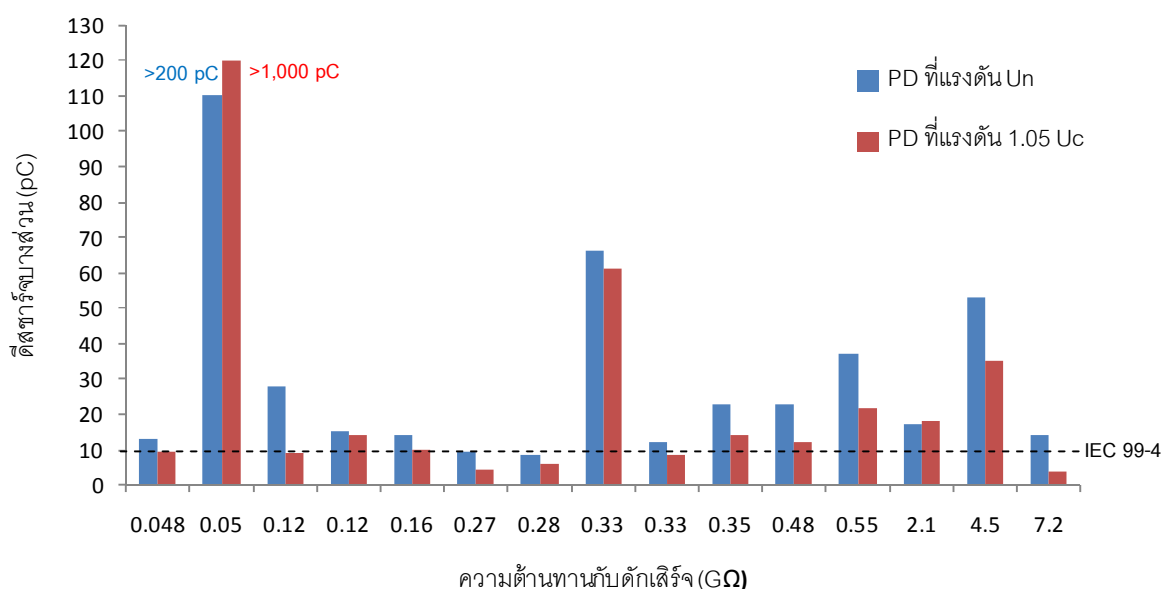
พื้นที่	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ			รวม (ตัว)
	$R < 1 \text{ G}\Omega$	$1 \text{ G}\Omega \leq R < 100 \text{ G}\Omega$	$R \geq 100 \text{ G}\Omega$	
อ.ลี้	3	3	5	11
อ.ปราณบุรี	1	1	0	2
อ.พระพุทธรบาท	2	1	5	8
จ.ปทุมธานี	6	1	1	8

ผลการทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างกับดักเสิร์จสรุปเบื้องต้นได้ดังนี้

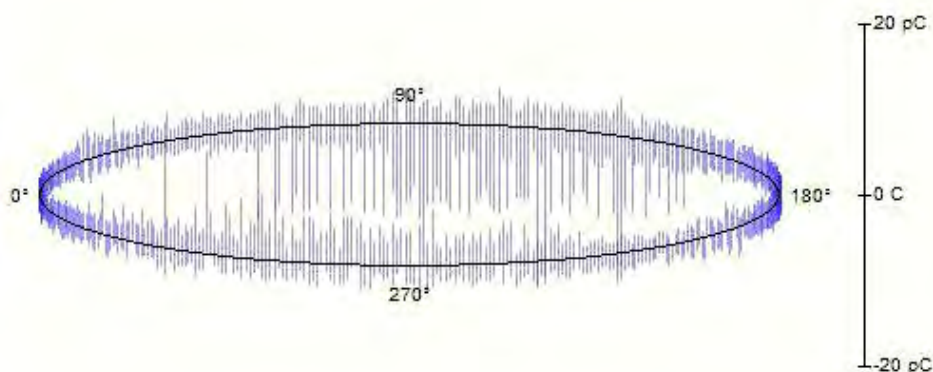
1) ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีค่าความต้านทานมากกว่า  $10 \text{ G}\Omega$  จำนวน 14 ตัว มีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในระดับต่ำไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ยังไม่เคยใช้งาน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.5 - 3.8 pC แบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ A จำนวน 9 ตัว ผลิตภัณฑ์ B และผลิตภัณฑ์ D จำนวน 3 ตัว และ 2 ตัว ตามลำดับ

2) ตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำกว่า  $10 \text{ G}\Omega$  จำนวน 15 ตัว ทุกตัวมีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนสูงกว่าปกติ และมี 8 ตัวอย่างที่มีค่าเกินกว่า 10 pC ซึ่งมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 6099-4 ในหัวข้อที่ 8.8 เรื่อง การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนภายในกับดักเสิร์จ บางตัวอย่างพบว่าปริมาณดิสชาร์จบางส่วนสูงเกินกว่า 1,000 pC ในระหว่างการป้อนแรงดันที่พิกัดค้างไว้ ตัวอย่างทุกตัวในกลุ่มนี้ มีดิสชาร์จบางส่วนสูงมากโดยส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่า 10 pC ถึงมากกว่า 200 pC แล้วจึงมีค่าลดลงเมื่อลดแรงดันลงมาที่ 1.05 เท่าของแรงดัน  $U_c$  แต่บางตัวอย่างกลับพบว่ามีค่าสูงขึ้นอีกหลังจากลดแรงดันลง

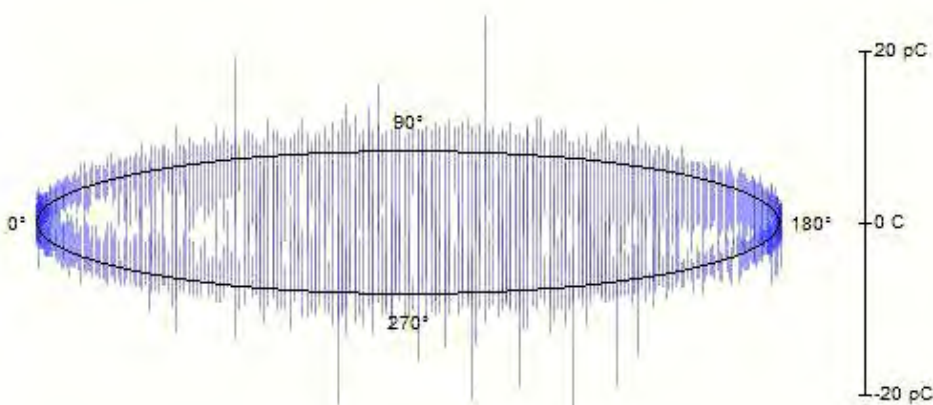
รูปที่ 5.10 แสดงผลการวัดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างจำนวน 15 ตัว ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำกว่า  $10 \text{ G}\Omega$  จะเห็นได้ว่าปริมาณดิสชาร์จบางส่วนไม่ได้แปรผันโดยตรงกับค่าความต้านทานของกัปดักเสิร์จ แต่สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำอาจมีดิสชาร์จบางส่วนสูงกว่าระดับปกติ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากปัญหาความชื้นภายในกัปดักเสิร์จ ซึ่งอาจทำให้มีค่าความต้านทานต่ำลงและมีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนสูงเช่นนี้ อย่างไรก็ตามเพียงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน ต้องพิจารณาข้อมูลหรือผลการทดสอบอื่น ๆ ประกอบเพิ่มเติม รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงตัวอย่างดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ระหว่างการทดสอบตัวอย่างกัปดักเสิร์จซึ่งมีค่าความต้านทาน  $0.35 \text{ G}\Omega$  และ  $4.5 \text{ G}\Omega$  โดยวัดปริมาณดิสชาร์จบางส่วนสูงสุดได้  $18 \text{ pC}$  และ  $35 \text{ pC}$  ตามลำดับ สำหรับในรูปแสดงดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี



รูปที่ 5.10 ดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า  $10 \text{ G}\Omega$



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากกับดักเสิร์จที่มีค่าความต้านทาน  $0.35 \text{ G}\Omega$

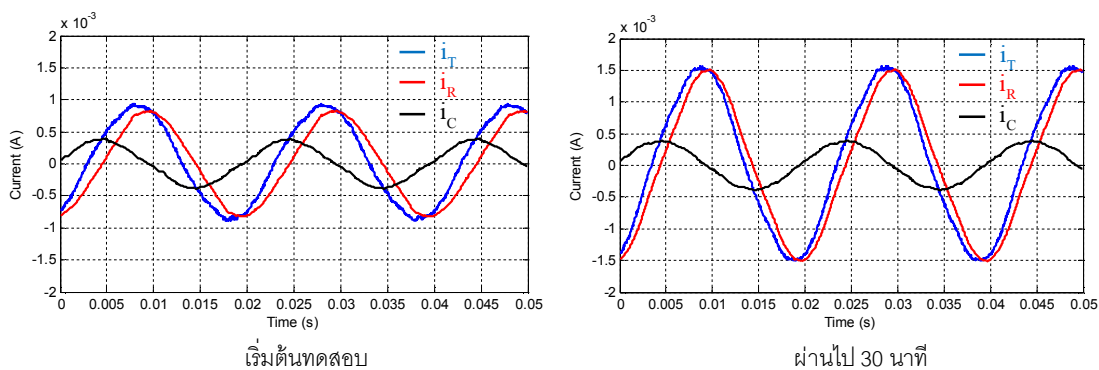


รูปที่ 5.12 ตัวอย่างดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากกับดักเสิร์จที่มีค่าความต้านทาน  $4.5 \text{ G}\Omega$

### 5.3.3 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

เพื่อประเมินสภาพของตัวอย่างกับดักเสิร์จ จึงนำตัวอย่างทั้งหมดมาทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่ว โดยตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ A จำนวน 3 ตัว ที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า  $100 \text{ M}\Omega$  ไม่สามารถทดสอบจนครบตามขั้น ตอนต่าง ๆ ได้ เนื่องจากพบว่า มีปริมาณกระแสรั่วสูงมาก และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป พร้อมกับมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยไม่มีแนวโน้มคงที่ จึงต้องยุติการทดสอบเมื่อเห็นว่าตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงมากจนเกรงว่าอาจเกิดอันตรายและความเสียหายขึ้นได้ ในรูปที่ 5.13 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่วที่ไหลผ่านตัวอย่างรหัส BS-2C ที่วัดค่าความต้านทานได้เพียง  $40 \text{ M}\Omega$





รูปที่ 5.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวอย่างกับดักเสิร์จBS-2C

ในช่วงเริ่มต้นทดสอบตัวอย่างมีกระแสรั่วขนาด  $0.57 \text{ mA}$  ( $0.93 \text{ mA}_{pk}$ ) และเพิ่มขึ้น เป็น  $1.03 \text{ mA}$  ( $1.50 \text{ mA}_{pk}$ ) หลังจากผ่านไป 30 นาที โดยเพิ่มขึ้นในส่วนของการกระแสรั่วเชิงความต้านทานเท่านั้น ทำให้บริเวณกลางลำตัวมีอุณหภูมิสูงถึง  $40.5^{\circ}\text{C}$  และมีแนวโน้มสูงขึ้นไปอีก นอกจากนี้ ยังมีลักษณะความผิดปกติของรูปคลื่นกระแสรั่วเชิงความต้านทานเนื่องจากมีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์เป็นอย่างมาก แตกต่างจากรูปคลื่นกระแสรั่วปกติของกับดักเสิร์จซึ่งจะมีองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกลำดับอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะลำดับที่ 3 เมื่อกับดักเสิร์จนำกระแส

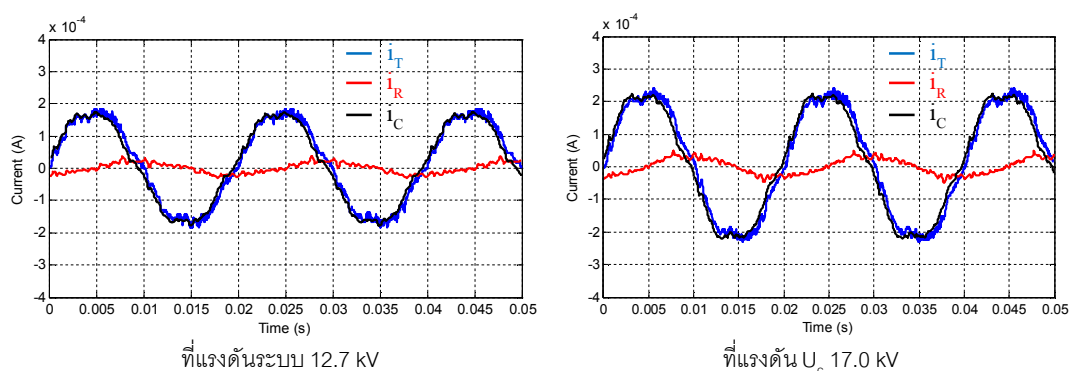
#### 5.3.3.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างรุ่นเก่าที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี ทั้งหมดมีกระแสรั่วรวม และกระแสรั่วเชิงความต้านทานที่แรงดันระบบ  $12.7 \text{ kV}$  ในระดับต่ำ มีค่าเฉลี่ยเพียง  $0.12 \text{ mA}$  และ  $14.66 \mu\text{A}$  ตามลำดับ สำหรับที่แรงดัน  $U_c$  มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $0.16 \text{ mA}$  และ  $23.45 \mu\text{A}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบตัวอย่างที่ยังไม่ใช้งานในตารางที่ 5.2 พบว่ามีต่ำกว่าเล็กน้อย โดยมีความน้อยกว่าที่วัดได้จากตัวอย่างอ้างอิงตัวที่ 1 และ 2 ในตารางที่ 5.3 ซึ่งมีค่าความต้านทานสูงในระดับเดียวกัน ( $100 \text{ G}\Omega$ ) แต่เป็นผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ ผลการทดสอบตัวอย่างกลุ่มนี้ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.10 ในรูปที่ 5.14 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A รหัส SR-5B ซึ่งติดตั้งอยู่ในพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมของ พระพุทธบาท และมีระยะเวลาการใช้งานมากกว่า 7 ปี ที่ระดับแรงดันระบบ  $12.7 \text{ kV}$  และแรงดัน  $U_c$   $17.0 \text{ kV}$

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

พื้นที่	กระแสรั่วรวม ที่แรงดันระบบ $I_r$ ( $\mu\text{A}$ )	กระแสรั่วเชิง ความต้านทาน $I_r$ ( $\mu\text{A}$ )	$\% I_{r, pk} / I_{c, pk}$ ที่แรงดันระบบ	กระแสรั่วรวม ที่แรงดัน $U_c$ $I_r$ ( $\mu\text{A}$ )	$\% I_{r, 3rd} / I_r$ ที่แรงดัน $U_c$
อ.พระพุทธรบาท	119-123 (121.2)	14.7-20.0 (16.4)	15.9-21.4 (18.9)	154-162 (159.4)	11.8-24.0 (17.4)
อ.ลิ	114-126 (119.8)	12.6-18.3 (14.8)	13.9-18.4 (16.7)	149-164 (156.8)	14.2-20.2 (18.6)
อ.ปากช่อง	119 (119)	13.7 (13.7)	16.9 (16.9)	156 (156)	18.4 (18.4)
อ.บางแสน	116-122 (119.5)	14.1-15.6 (14.9)	15.3-19.6 (17.1)	155-161 (157.8)	19.2-24.4 (21.9)
อ.ปราณบุรี	117-120 (119.2)	13.2-14.4 (13.7)	14.0-16.6 (14.9)	154-158 (156.4)	20.0-21.8 (21.0)
จ.ปทุมธานี	114-121 (117.5)	12.9-14.9 (13.6)	14.3-17.4 (15.9)	151-160 (155.3)	16.6-23.6 (20.2)
ค่าเฉลี่ย	119.5	14.7	16.7	157.1	19.7

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 5.14 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A รุ่นเก่า รหัส SR-5B ที่ใช้งานนานกว่า 7 ปี

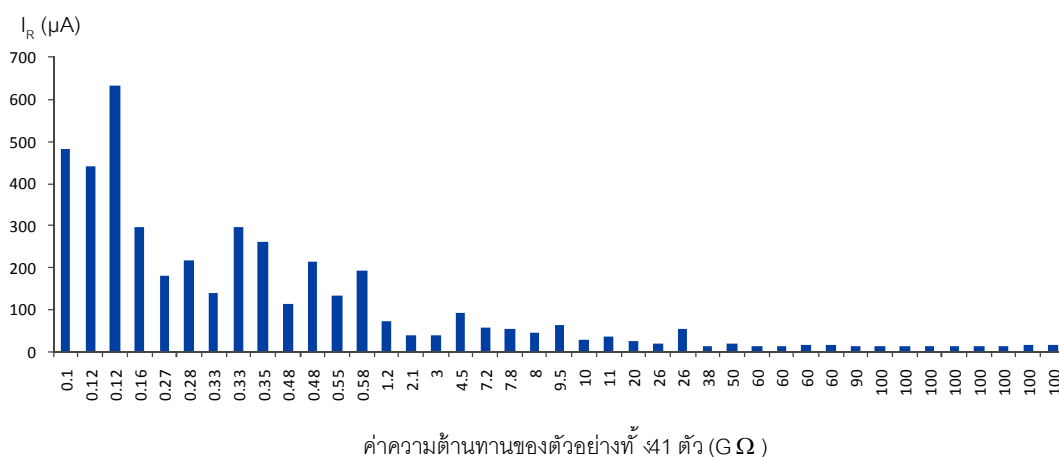
จากตารางที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างในแต่ละสภาพแวดล้อมมีขนาดกระแสรั่วเชิงความต้านทานใกล้เคียงกันในช่วง 12.6 – 20.0  $\mu\text{A}$  และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 14.7  $\mu\text{A}$  ซึ่งมีปริมาณและสัดส่วนอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยพิจารณาได้จาก  $\% I_{r, pk} / I_{c, pk}$  มีค่าเฉลี่ยประมาณ 16.7% ไม่เกินจากระดับปกติที่ 20% และมีสัดส่วนของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 เฉลี่ย 19.7% ซึ่งอยู่ในระดับปกติในช่วง 10% - 40% เช่นกัน ผลการทดสอบเห็นได้ชัดเจนว่าตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ A รุ่นเก่าที่ติดตั้งใช้งานเกินกว่า 7 ปี (7-12 ปี) ยังคงมีกระแสรั่วอยู่ในระดับต่ำหรือไม่เกิดการเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO และไม่แสดงผลกระทบของความแตกต่างทางสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง อย่างชัดเจน แม้ว่าตัวอย่างที่ติดตั้งในพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม พระพุทธรบาท จะมีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานเฉลี่ยสูงกว่าจากพื้นที่อื่น ๆ อยู่เล็กน้อย

อย่างไรก็ตามหากมีการใช้งานนานขึ้น นกว่านี้ ก็อาจเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นได้ โดยความแตกต่างทางสภาพแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติและการสึกกร่อนของวัสดุต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มบล็อก ZnO หรือแม้แต่ส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น แชนนอน หรืออุปกรณ์ปลดวงจร เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ก็อาจส่งผลกระทบต่อความเสื่อมสภาพและการชำรุดของกับดักเสิร์จตามมาได้เช่นกัน ดังนั้น นอกจากการพิจารณาความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้ว การตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและความคงทนของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ด้วย ซึ่งอาจใช้เป็นเกณฑ์สำหรับกำหนดอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จก็ได้ หากพบว่าบล็อก ZnO สามารถคงทนต่อการใช้งานภายใต้แรงดันระบบปกติในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ยาวนานกว่าความเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ในส่วนประกอบอื่น ๆ

### 5.3.3.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี

เนื่องจากพบว่ากับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A พิกัด 21 kV, 5 kA มีความแตกต่างกันของรุ่นที่ผลิตก่อน และหลังปี ค.ศ.2002 ทั้งในด้านการออกแบบและวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าความต้านทานที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงแยกการพิจารณาผลการทดสอบกับดักเสิร์จที่ ๒ รุ่น ออกจากกัน ตัวอย่างนี้ จึงประกอบไปด้วยกับดักเสิร์จที่ใช้งานมานานน้อยกว่า ๖ ปี และ 3 - 7 ปี ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาในลักษณะเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่าปริมาณกระแสรั่วมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานของกับดักเสิร์จ แต่สำหรับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งกับดักเสิร์จและระยะเวลาที่ใช้งานไม่สามารถอธิบายถึงความแตกต่างของผลการทดสอบได้ โดยเฉพาะความผิดปกติที่เกิดขึ้นของตัวอย่างกลุ่มนี้ ดังนั้น จึงสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบในภาพรวมได้เท่านั้น

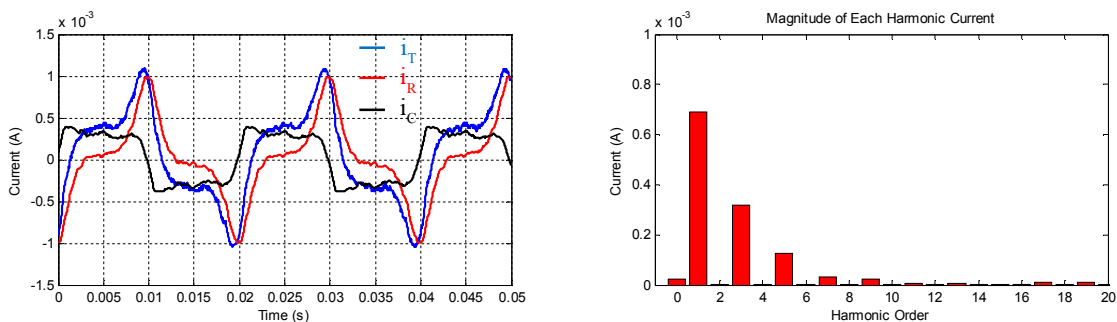
ผลทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วพบว่า มี 3 ตัวอย่างที่มีกระแสรั่วสูงมากจนไม่สามารถทดสอบได้จนครบขั้น ตอนตามที่กล่าวถึงไปแล้วข้างต้น ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำมาก ( $<100 \text{ M}\Omega$ ) สำหรับตัวอย่างที่เหลือจำนวน 41 ตัว วัดปริมาณกระแสรั่วรวมที่แรงดันระบบได้ตั้งแต่ 0.119 mA - 0.671 mA โดยมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานตั้งแต่ 12.04  $\mu\text{A}$  - 634.50  $\mu\text{A}$  อย่างไรก็ตามขนาดกระแสรั่วเชิงความต้านทานไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดกระแสรั่วโดยตรงเนื่องจากแต่ละตัวอย่างอาจมีกระแสรั่วเชิงความจุไฟฟ้าแตกต่างกันได้ จากการทดสอบพบว่า 26 ตัวอย่างมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงผิดปกติ โดยมี  $\% I_{r, pk} / I_{c, pk}$  สูงกว่า 20% ซึ่งทั้งหมดเป็นตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติ รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานกับค่าความต้านทานที่วัดได้ของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ 41 ตัว



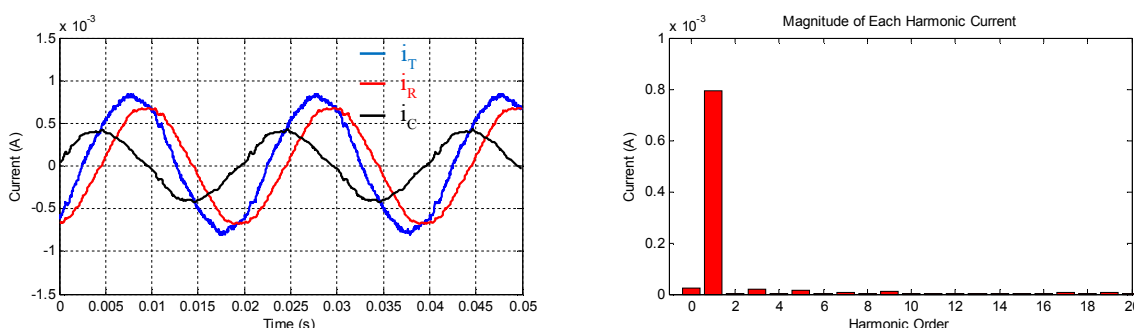
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานกับค่าความต้านทานที่วัดได้

จากรูปที่ 5.15 พบว่าตัวอย่าง 15 ตัวที่มีค่าความต้านทานมากกว่า 30 GΩ มีกระแสรั่วเชิงความต้านทานในระดับต่ำและไม่ต่างกันมากในช่วง 12.04 μA - 18.82 μA มีค่าเฉลี่ยประมาณ 14.94 μA และทั้งหมดมี  $I_{r, pk} / I_{c, pk}$  ต่ำกว่า 20% ด้วย แต่สำหรับตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานน้อยกว่า 30 GΩ จำนวน 26 ตัว นี้มีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าปกติตั้งแต่ 20.46 μA - 634.50 μA โดยตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า 1 GΩ จะมีค่าเกินกว่า 100 μA

ตัวอย่างทั้งหมดที่มีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าปกติพบว่ามีสัดส่วนของกระแสรั่วฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ลดลง ( $\% I_{r, 3rd} / I_r$ ) ต่ำกว่า 10% และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นความถี่มูลฐาน 50 Hz ซึ่งแตกต่างจากคุณลักษณะการนำกระแสของกับดักเสิร์จที่จะมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 เพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 5.16 และ 5.17 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่วรวมของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ B ที่อุปกรณ์ปลดวงจรทำงานและมีกระแสรั่วสูงผิดปกติ โดยมีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติที่ 9.5 GΩ เปรียบเทียบกับรูปคลื่นของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A รหัส BS-1A ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำมากเพียง 100 MΩ และมีปริมาณกระแสรั่วสูงเช่นกัน โดยทั้งสองตัวอย่างมีขนาดกระแสรั่วรวมใกล้เคียงกัน คือ 0.548 mA และ 0.563 mA ตามลำดับ แต่มีค่าความต้านทานลักษณะรูปคลื่น และสัดส่วนของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ต่างกันมาก



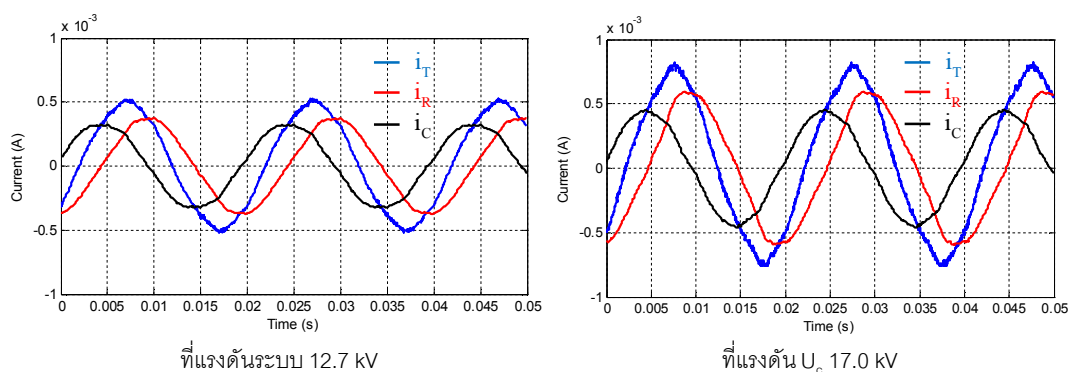
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นกระแสรวมของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลึกภัณฑ์ B ที่มีความต้านทานต่ำปกติ (9.5 GΩ)



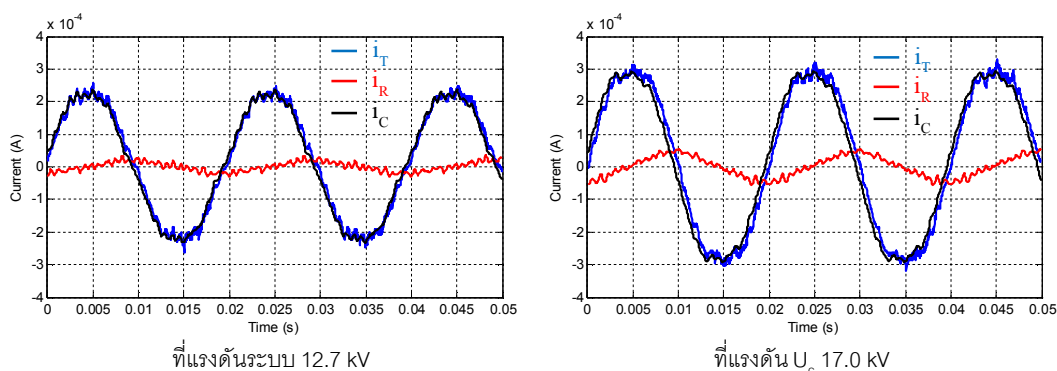
รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสรวมของตัวอย่างผลึกภัณฑ์ A รหัส BS-1A ที่มีค่าความต้านทานต่ำมาก (100 MΩ)

ในรูปที่ 5.16 กระแสรวมมี %  $I_{r, pk} / I_{c, pk}$  สูงถึง 254.5 % และมี %  $I_{r, 3rd} / I_r$  ประมาณ 44.74% ซึ่งมีความสูงกว่าระดับปกติโดยสรุปได้ว่าตัวอย่างนี้ เกิดการชำรุดหรือเกิดการเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO สำหรับกระแสรวมในรูปที่ 5.17 ก็มีค่า %  $I_{r, pk} / I_{c, pk}$  สูงเช่นกันประมาณ 157.4 % แต่กลับมี %  $I_{r, 3rd} / I_r$  เพียง 0.89% เท่านั้น ในกรณีหลังนี้ รูปคลื่นของกระแสรวม และกระแสเชิงความต้านทานมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz มาก ซึ่งผิดปกติจากรูปแบบการเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO โดยทั่วไป ที่กระแสรวมจะมีปริมาณสูงขึ้น และ %  $I_{r, 3rd} / I_r$  ก็มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพจะนำกระแสได้ง่ายขึ้น ที่ระดับแรงดันเท่าเดิม แต่ยังมีคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของ V-I Characteristic จึงมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย โดยเฉพาะฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ดังนั้นความผิดปกติที่เกิดขึ้นไม่ได้มีลักษณะเหมือนกับ ความเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO แต่น่าจะเกิดขึ้น หากสาเหตุอื่น

อย่างไรก็ตามความผิดปกตินี้ไม่ได้เกิดขึ้นกับตัวอย่างทุกตัวในรุ่นเดียวกัน ยังมีตัวอย่างอีกจำนวนหนึ่งมีปริมาณกระแสรวม และกระแสเชิงความต้านทานต่ำในระดับปกติ โดยวัดค่าความต้านทานได้มากกว่า  $50 \text{ G}\Omega$  และส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่า  $100 \text{ G}\Omega$  บางส่วนเป็นกับดักเสิร์จรุ่นเก่าที่ผลิตก่อนปี ค.ศ.2002 แต่นำมาใช้งานไม่ถึง 7 ปี และอีกส่วนหนึ่งจำนวน 9 ตัว เป็นกับดักเสิร์จรุ่นใหม่ที่ผลิตในช่วงเดียวกันระหว่างปี ค.ศ.2004 – 2005 โดยตัวอย่างกลุ่มนี้ ถอดมาจากหลายพื้นที่และทุกตัวก็ไม่พบความผิดปกติ ทั้งที่ตัวอย่างในพื้นที่เดียวกันแต่ผลิตต่างช่วงเวลากันกลับพบปัญหาในลักษณะนี้ รูปที่ 5.18 และ 5.19 แสดงรูปคลื่นกระแสของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในพื้นที่อุตสาหกรรมระเบิดหิน อ.พระพุทธรบาท รหัส SR-7A และ SR-21C โดยวัดค่าความต้านทานได้  $0.35 \text{ G}\Omega$  และ  $90 \text{ G}\Omega$  ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 กระแสของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A รหัส SR-7A มีความต้านทาน  $0.35 \text{ G}\Omega$



รูปที่ 5.19 กระแสของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A รหัส SR-21C มีความต้านทาน  $90 \text{ G}\Omega$

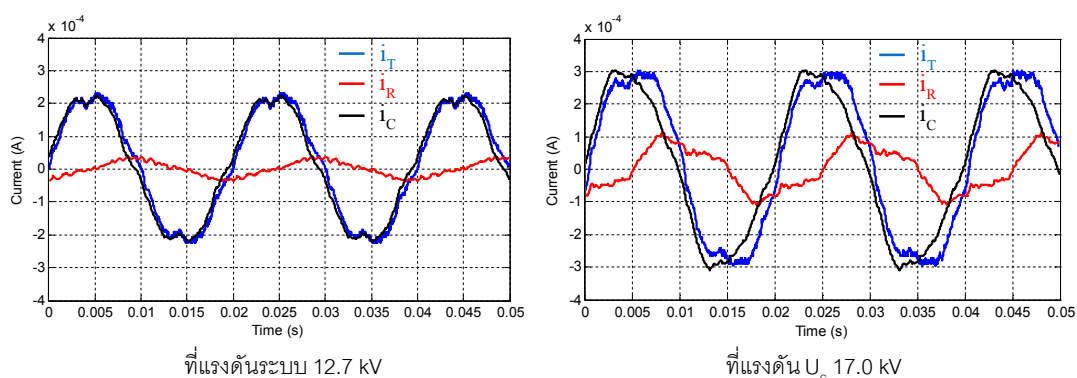
### 5.3.3.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.11 จะเห็นว่าตัวอย่างทั้งสองผลิตภัณฑ์ปริมาณกระแสรั่วอยู่ในระดับต่ำและมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบของกับดักเสิร์จที่ยังไม่ใช้งานในตารางที่ 5.2 โดยตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ B มีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าตัวอย่างที่ยังไม่ใช้งานของผลิตภัณฑ์อื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $23.3 \mu\text{A}$  และ  $63.74 \mu\text{A}$  ที่ระดับแรงดันใช้งาน และแรงดัน  $U_c$  ตามลำดับ และมี  $\% I_{r, pk} / I_{c, pk}$  ประมาณ 18.5% สำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ D มีกระแสรั่วเชิงความต้านทานต่ำมาก เฉลี่ยประมาณ  $9.6 \mu\text{A}$  และ  $20.3 \mu\text{A}$  ที่แรงดันใช้งาน และแรงดัน  $U_c$  ตามลำดับ โดยมี  $\% I_{r, pk} / I_{c, pk}$  เฉลี่ยเพียง 11.5% และมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ทั้งหมด ตัวอย่างทั้งสองผลิตภัณฑ์นี้มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์สัดส่วนของกระแสรั่วอนิกที่ 3 ที่แรงดัน  $U_c$  ใกล้เคียงกันประมาณ 30% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ ในรูปที่ 5.20 และ 5.21 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นกระแสรั่วของทั้งสองผลิตภัณฑ์

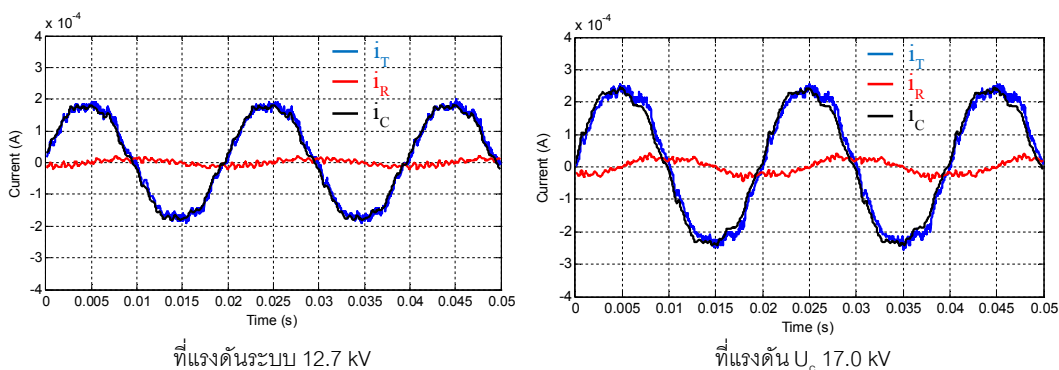
ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

ผลิตภัณฑ์	กระแสรั่วรวมที่แรงดันระบบ $I_r (\mu\text{A})$	กระแสรั่วเชิงความต้านทาน $I_r (\mu\text{A})$	$\% I_{r, pk} / I_{c, pk}$ ที่แรงดันระบบ	กระแสรั่วรวมที่แรงดัน $U_c$ $I_r (\mu\text{A})$	$\% I_{r, 3rd} / I_r$ ที่แรงดัน $U_c$
B	159-162 (160.3)	21.8-25.3 (23.3)	17.1-21.5 (18.5)	217-214 (220.7)	25.1-35.2 (30.8)
D	127-131 (129.2)	8.1-11.2 (9.6)	8.9-13.6 (11.5)	168-176 (172.4)	18.1-39.6 (30.2)

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 5.20 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B ที่มีการใช้งานน้อยกว่า 3 ปี รหัส LEE-13B



รูปที่ 5.21 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ D ที่มีการใช้งาน 3 - 7 ปี รหัส BS-3A

### 5.3.4 ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ในการศึกษาได้นำตัวอย่างทั้งหมดมาทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ที่ระดับกระแสอ้างอิง  $1 \text{ mA}_{pk}$  เพื่อนำผลที่ได้มาประเมินสภาพของตัวอย่างกับดักเสิร์จด้วยการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการใช้งานในตารางที่ 5.2 และ 5.3 ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ในภาพรวมตามตารางที่ 5.12 พบว่าตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงต่ำกว่าปกติอย่างชัดเจนเพียง 3 ตัว เท่านั้น มีค่าอยู่ในช่วง  $3.45 \text{ kV} - 17.67 \text{ kV}$  ทั้งที่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นี้พบความผิดปกติมากถึง 26 ตัว ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานและกระแสรั่ว โดยตัวอย่างที่มีแรงดันอ้างอิงต่ำกว่าปกติมีค่าความต้านทานต่ำมาก ส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน  $1 \text{ G}\Omega$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าความผิดปกตินี้ส่งผลกระทบต่อความต้านทานและปริมาณกระแสรั่วอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิงไม่มากนัก โดยทั้ง 3 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างในกลุ่มที่มีการใช้งานน้อยกว่า 3 ปี จำนวน 2 ตัว และใช้งานมา 3 - 7 ปีอีก 1 ตัว ส่วนกลุ่มที่ใช้งานมาเกิน 7 ปี ไม่พบความผิดปกติใดๆ

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบวัดแรงดันอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด  $21 \text{ kV}$ ,  $5 \text{ kA}$

ผลิตภัณฑ์	ระยะเวลาการใช้งาน (ปี)	แรงดันอ้างอิงที่กระแสอ้างอิง $1 \text{ mA}_{pk}$ (kV)	
		ตัวอย่างปกติ	ตัวอย่างผิดปกติ
A	< 3	20.75-25.6 (22.40)	15.75, 17.67
	3 - 7	21.52-26.5 (24.46)	13.45
	> 7	25.3-26.6 (25.72)	-
B	< 3	21.13 (21.13)	20.75
D	3 - 7	23.05-23.44 (23.28)	-

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง



สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B จำนวน 3 ตัว พบว่าแรงดันอ้างอิงใกล้เคียงกัน แต่มีตัวอย่างหนึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงต่ำสุดในตารางที่ 5.2 เกินกว่า 5% ไปเล็กน้อย (5.7%) สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ D ทั้ง 5 ตัว ก็มีแรงดันอ้างอิงใกล้เคียงกัน แต่ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบค่าอ้างอิงได้ เนื่องจากผลการทดสอบของผลิตภัณฑ์นี้ ในตารางที่ 5.2 กำหนดให้กระแสอ้างอิงมีขนาด  $3 \text{ mA}_{pk}$  จึงทำให้มีแรงดันอ้างอิงสูงกว่าค่าที่ทดสอบได้ อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่กระแสอ้างอิงเดียวกันก็พบว่ามีความอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน

### 5.3.5 ผลการทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ผลการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จมีความสอดคล้องกับค่าความต้านทาน และปริมาณกระแสไฟฟ้าวู๋เชิงความต้านทานของกับดักเสิร์จ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มตัวอย่างได้เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 5.3.2 ดังนี้

#### 5.3.5.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

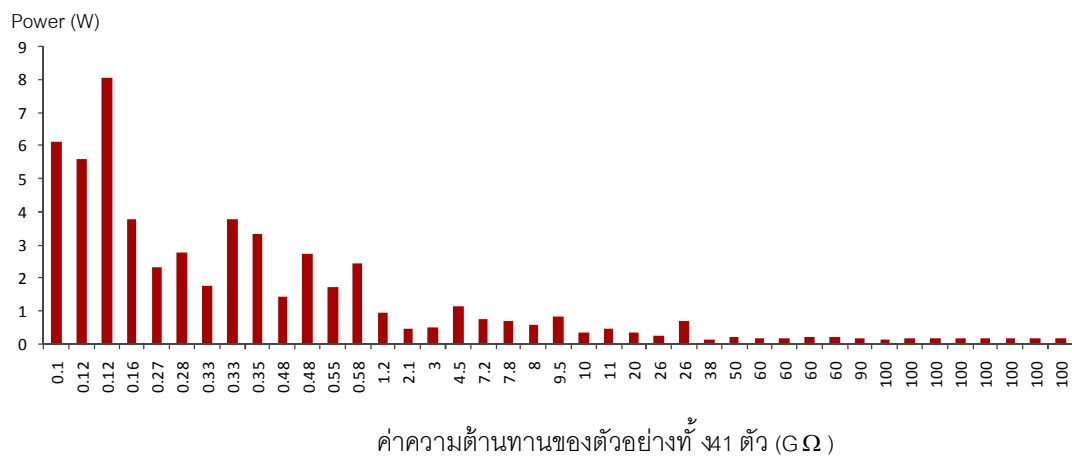
เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวอย่างในกลุ่มมีค่าสูงมาก จึงทำให้ปริมาณกระแสวู๋เชิงความต้านทาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าต่ำ ผลการทดสอบจึงพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยประมาณ 0.18 W ที่แรงดันใช้งาน 12.7 kV และ 0.38 W ที่แรงดัน  $U_c$  17.0 kV โดยมีสูงสุดไม่เกิน 0.25 W และ 0.51 W ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบตัวอย่างในแต่ละสภาพแวดล้อมสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างในแต่ละพื้นที่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่างกันน้อยมาก โดยตัวอย่างในพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม พระพุทธบาท มีค่าสูงกว่าในพื้นที่อื่น ๆ เล็กน้อย

ตารางที่ 5.13 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

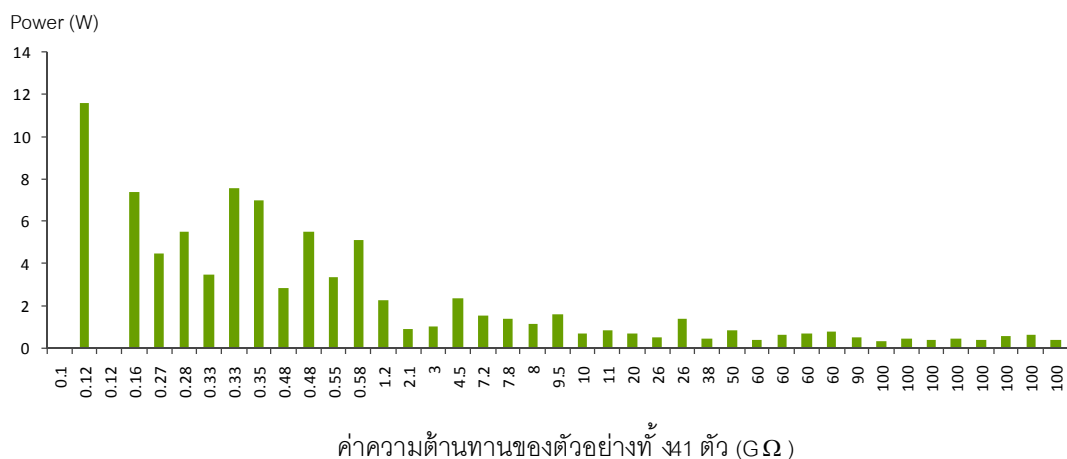
พื้นที่	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดันใช้งาน 12.7 kV (W)		กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดัน $U_c$ 17.0 kV (W)	
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
อ.พระพุทธบาท	0.18 - 0.25	0.20	0.38 - 0.51	0.42
อ.สี	0.16 - 0.23	0.18	0.33 - 0.49	0.39
อ.ปากช่อง	0.16	0.16	0.36	0.36
อ.บางแสน	0.17 - 0.18	0.18	0.35 - 0.40	0.37
อ.ปราณบุรี	0.16 - 0.18	0.17	0.33 - 0.40	0.37
จ.ปทุมธานี	0.15 - 0.18	0.16	0.34 - 0.39	0.37
รวมทั้งหมด	0.15 - 0.25	0.18	0.33 - 0.51	0.38

### 5.3.5.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะแปรผันตามปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานของกับดักเล็ร์จ ดังนั้นตัวอย่างในกลุ่มนี้ บางส่วนจึงมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าปกติ ในรูปที่ 5.22 และ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานของกับดักเล็ร์จกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่วัดได้ที่แรงดันใช้งาน และแรงดัน  $U_c$  ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานสูงกว่า  $30 \text{ G}\Omega$  จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำกว่าประมาณ  $0.14 - 0.22 \text{ W}$  ที่แรงดันใช้งานปกติ และ  $0.33 - 0.81 \text{ W}$  ที่แรงดัน  $U_c$  โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ  $0.18 \text{ W}$  และ  $0.53 \text{ W}$  ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบของตัวอย่างรุ่นเก่าที่มีการใช้งานมากกว่า 7 ปี แต่ที่แรงดัน  $U_c$  มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดันใช้งานกับค่าความต้านทานที่วัดได้



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดัน  $U_c$  กับค่าความต้านทานที่วัดได้

จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำกว่า  $30 \text{ G}\Omega$  จะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนสำหรับตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำกว่า  $1 \text{ G}\Omega$  เช่นเดียวกับผลการวัดปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทาน โดยตัวอย่างกับดักเสิร์จรหัส SR-8C ที่มีค่าความต้านทาน  $120 \text{ M}\Omega$  วัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดันใช้งานได้ถึง  $8.07 \text{ W}$  ซึ่งเป็นตัวอย่างที่วัดค่าได้สูงสุด ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกลุ่มนี้ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.14 โดยแบ่งออกเป็นแต่ละช่วงของค่าความต้านทานที่วัดได้ สำหรับการทดสอบที่แรงดัน  $U_c$  มี 2 ตัวอย่างที่ไม่ได้ทดสอบ คือ BS-1A และ SR-8C เนื่องจากพบว่ามีความผิดปกติสูงมาก ภายหลังจากการทดสอบที่แรงดันใช้งานนาน 2 ชั่วโมง จึงทำให้ไม่มีผลการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดังแสดงในรูปที่ 5.23 โดยทั้ง 2 ตัวอย่างมีค่าความต้านทาน  $100 \text{ M}\Omega$  และ  $120 \text{ M}\Omega$  ตามลำดับ

ตารางที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี

ค่าความต้านทาน ( $\text{G}\Omega$ )	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ แรงดันใช้งาน $12.7 \text{ kV}$ (W)		กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ แรงดัน $U_c$ $17.0 \text{ kV}$ (W)	
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
> 30	0.14 – 0.22	0.18	0.33 – 0.81	0.53
1 - 30	0.26 – 1.16	-	0.54 – 2.32	-
< 1	1.44 – 8.07	-	2.84 – 11.61	-

### 5.3.5.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ B และ D สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.15 ซึ่งเห็นได้ว่าตัวอย่างทั้ง 5 ตัว ของผลิตภัณฑ์ D มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ โดยมีค่าเพียงเฉลี่ยที่แรงดันใช้งานเพียง  $0.11 \text{ W}$  และ  $0.32 \text{ W}$  ที่แรงดัน  $U_c$  แต่สำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ B พบว่ายังคงมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำเช่นกัน แต่มีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ทั้งที่มีค่าความต้านทานสูงถึง  $100 \text{ G}\Omega$  เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ D และผลิตภัณฑ์ A ในรุ่นเก่า โดยเฉพาะที่แรงดัน  $U_c$  มีค่าสูงถึง  $1.02 \text{ W}$  ซึ่งมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เกือบ 3 เท่าตัว

ตารางที่ 5.15 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

ผลิตภัณฑ์	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ แรงดันใช้งาน 12.7 kV (W)		กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ แรงดัน $U_c$ 17.0 kV (W)	
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
B	0.27 - 0.31	0.29	0.98 - 1.05	1.02
D	0.10 - 0.13	0.11	0.23 - 0.40	0.32

### 5.3.6 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

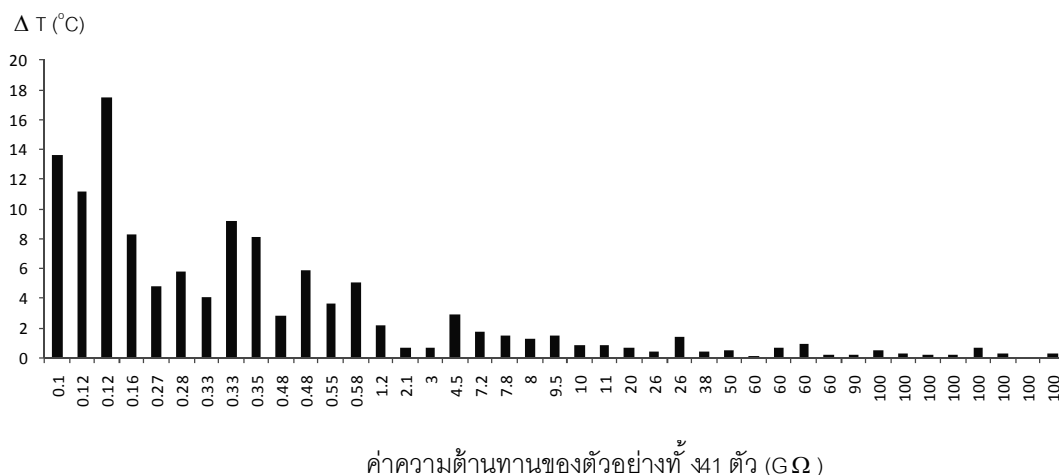
การทดสอบวัดอุณหภูมิที่บริเวณกลางลำตัวของกับดักเสิร์จ และถ่ายภาพการกระจายความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด พบว่าตัวอย่างทุกผลิตภัณฑ์ที่มีสภาพปกติจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ไม่เกิน  $0.5^{\circ}\text{C}$  หรืออย่างมากไม่เกิน  $1.0^{\circ}\text{C}$  แต่ตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำพบว่าอุณหภูมิสูงกว่าปกติ โดยความแตกต่างจากอุณหภูมิแวดล้อม ( $\Delta T$ ) จะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จ สำหรับผลการทดสอบวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จในแต่ละกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.3.6.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทั้ง 23 ตัว สามารถทนรับแรงดันใช้งานได้อย่างปกติ และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิแวดล้อมขณะรับแรงดัน 12.7 kV นาน 2 ชั่วโมง เฉลี่ยเพียง  $0.3^{\circ}\text{C}$  แต่มีบางตัวเพิ่มขึ้นถึง  $1.0^{\circ}\text{C}$  และบางตัวก็ไม่สามารถตรวจวัดความแตกต่างนี้ได้ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จรุ่นนี้ เนื่องจากที่แรงดันใช้งานมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ เฉลี่ยเพียง 0.18 W เท่านั้น

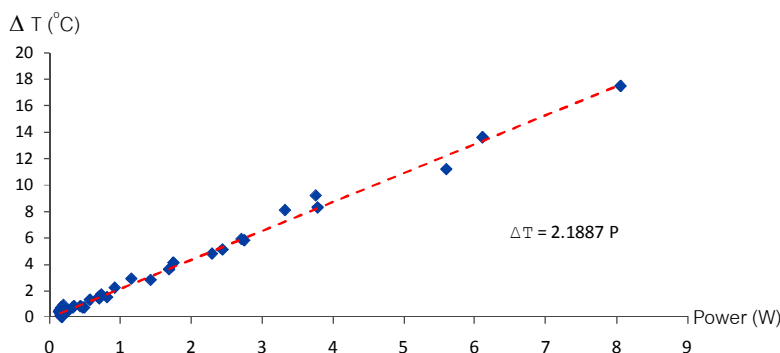
#### 5.3.6.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี

อุณหภูมิของกับดักเสิร์จที่วัดได้จากตัวอย่างกลุ่มนี้ พบว่าแปรผันแบบเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทาน รูปที่ 5.24 แสดงผลการวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างทั้ง 41 ตัว จะเห็นว่าตัวอย่างที่มีความต้านทานสูงมากกว่า  $30\ \text{G}\Omega$  มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ไม่เกิน  $1.0^{\circ}\text{C}$  มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $0.4^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยเพียง 0.18 W แต่ตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำพบว่าอาจมีอุณหภูมิสูงขึ้นผิดปกติ โดยวัดอุณหภูมิได้สูงสุดประมาณ  $42.1^{\circ}\text{C}$  จากตัวอย่างรหัส SR-8C ที่มีค่าความต้านทาน  $120\ \text{M}\Omega$  ซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ( $\Delta T$ ) ประมาณ  $17.5^{\circ}\text{C}$  จากอุณหภูมิแวดล้อมอ้างอิงที่  $24.6^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตาม 3 ตัวอย่างที่ไม่สามารถทดสอบได้จนครบขั้นตอนนี้ อาจมีอุณหภูมิสูงกว่านี้มาก



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของกับดักเสิร์จกับค่าความต้านทานที่วัดได้

เมื่อนำอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มาหาความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างในกลุ่มนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ซึ่งจะเห็นว่ากับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A รุ่นใหม่ จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $7^{\circ}\text{C}$  ถ้ามีกำลังไฟฟ้าสูญเสียประมาณ  $0.47\text{ W}$

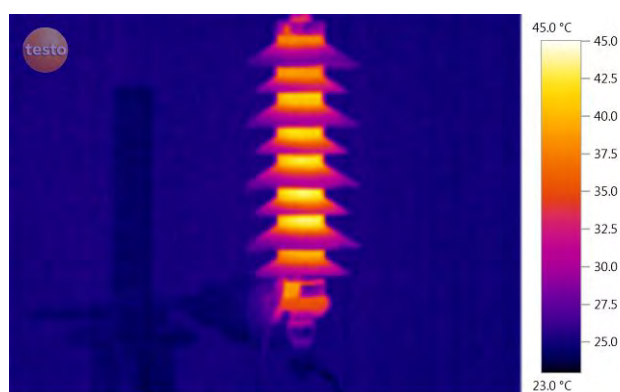


รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของกับดักเสิร์จกับกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

รูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 แสดงภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A รหัส SR-8C ขณะเริ่มต้นป้อนแรงดันระบบ  $12.7\text{ kV}$  และหลังจากนั้น  $2$  ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นว่ากับดักเสิร์จมีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอจากบริเวณบล็อก ZnO ไปทั่วทั้งตัว โดยรูปแบบการกระจายความร้อนอาจแสดงถึงสาเหตุและบริเวณที่เกิดความเสียหายได้ ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ทุกตัวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติจะสังเกตเห็นการกระจายความร้อนในรูปแบบเดียวกันนี้



รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายความร้อนตัวอย่าง SR-8C ขณะเริ่มต้นป้อนแรงดันระบบ 12.7 kV



รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายความร้อนตัวอย่าง SR-8C หลังจากรับแรงดันระบบนาน 2 ชั่วโมง

### 5.3.6.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B ทั้ง 3 ตัวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประมาณ  $0.6^{\circ}\text{C}$  -  $0.7^{\circ}\text{C}$  จะเห็นว่า อาจมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เล็กน้อย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ย  $0.29\text{ W}$  ซึ่งมีค่ามากกว่า สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ D ทั้ง 5 ตัว มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิแวดล้อมน้อยมาก โดย ค่าสูงสุดที่วัดได้เพียง  $0.4^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น และมีหลายตัวอย่างไม่สามารถตรวจจับได้เลย ซึ่งตัวอย่าง ของผลิตภัณฑ์นี้ มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยเพียง  $0.11\text{ W}$  เท่านั้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิได้เพิ่มขึ้น เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งตัวอย่างที่ ๕ ผลิตภัณฑ์ ยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ

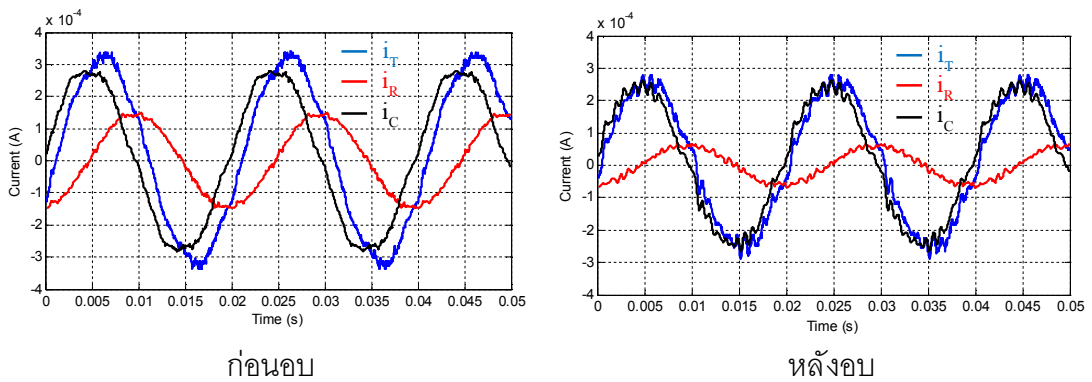
### 5.3.7 สาเหตุของความผิดปกติของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

เพื่อหาสาเหตุของความผิดปกติของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่พบว่าบางส่วนมีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติและมีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างกลุ่มนี้ มีรูปคลื่นกระแสรั่วแตกต่างจากการเสื่อมสภาพของซิลิคอน ZnO ทั่วไป คือมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz หรือมีองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกอื่น ๆ ต่ำ และยังมีดีเอสอาร์จบางส่วนสูงกว่ากับดักเสิร์จปกติจากลักษณะดังกล่าวนี้สันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากปัญหาความชื้น ในภายในกับดักเสิร์จเพื่อให้ทราบถึงสาเหตุที่ชัดเจนจึงนำตัวอย่าง 4 ตัว ประกอบด้วย 3 ตัวอย่างที่พบความผิดปกติ คือ ตัวอย่างอ้างอิงที่ 3, BS-1A และ BS-2C และอีกหนึ่งตัวอย่างที่มีสภาพปกติ คือ BS-11C มาอบที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 60 °C นาน 48 ชั่วโมง และนำมาเก็บไว้ในกล่องเดซิกเคเตอร์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 6% โดยทั้งก่อนและหลังอบได้ทำการทดสอบสภาพของทั้ง 4 ตัวอย่าง ตามผลการทดสอบในตารางที่ 5.16

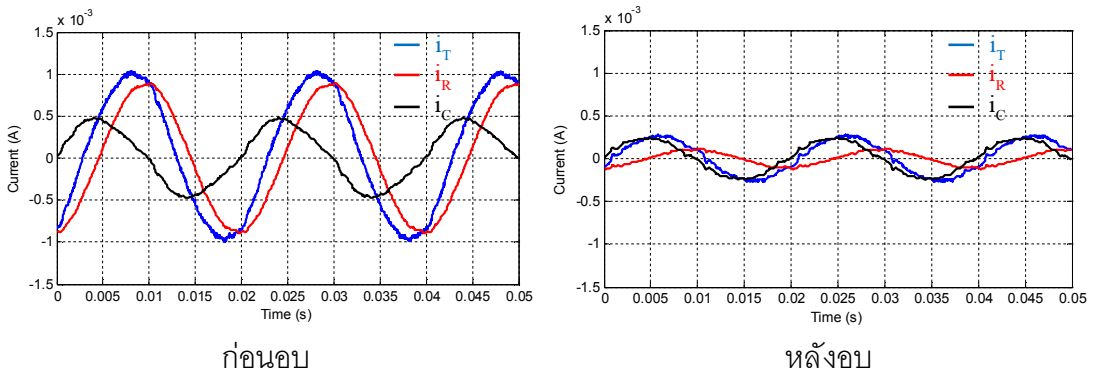
ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 48 ชั่วโมง

การตรวจสอบ	ผลการทดสอบทางไฟฟ้าก่อนและหลังการอบ							
	ตัวอย่างอ้างอิงที่ 3		BS-1A		BS-2C		BS-11C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
ความต้านทานที่แรงดัน 5 kV <sub>dc</sub> (GΩ)	1.25	4.8	0.10	1.1	0.04	40	>100	>100
กระแสรั่วรวมที่แรงดัน ใช้งาน 12.7 kV (mA)	0.226	0.182	0.701	0.185	1.190	0.157	0.125	0.122
กระแสรั่วรวมที่แรงดัน U <sub>c</sub> 17 kV (mA)	0.307	0.240	-	0.246	1.270	0.208	0.163	0.163
กระแสรั่วเชิงความต้านทาน ที่แรงดัน 12.7 kV (μA)	103.1	43.66	626.8	75.03	1,247	17.66	14.97	14.14
% I <sub>r,pk</sub> / I <sub>c,pk</sub> ที่ 12.7 kV	53.46	25.17	184.77	47.80	469.79	18.87	14.02	13.21
% I <sub>r,3rd</sub> / I <sub>r</sub> ที่ U <sub>c</sub> 17 kV	0.98	11.01	-	4.37	-	10.17	21.02	20.72
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่แรงดัน 12.7 kV (W)	1.31	0.55	7.94	0.95	15.87	0.20	0.19	0.17
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ที่แรงดัน U <sub>c</sub> 17 kV (W)	2.64	1.17	-	1.83	-	0.49	0.37	0.39
แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ที่กระแส 1 mA (kV)	21.6	21.9	13.3	22.8	น้อยกว่า 12.7	22.8	25.3	25.3
อุณหภูมิกับดักเสิร์จ (°C)	27.5	24.7	41.0	26.0	สูงมาก	24.1	24.7	24.0
อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น (°C)	3.2	1.3	16.7	2.6	สูงมาก	0.7	0.1	0.2

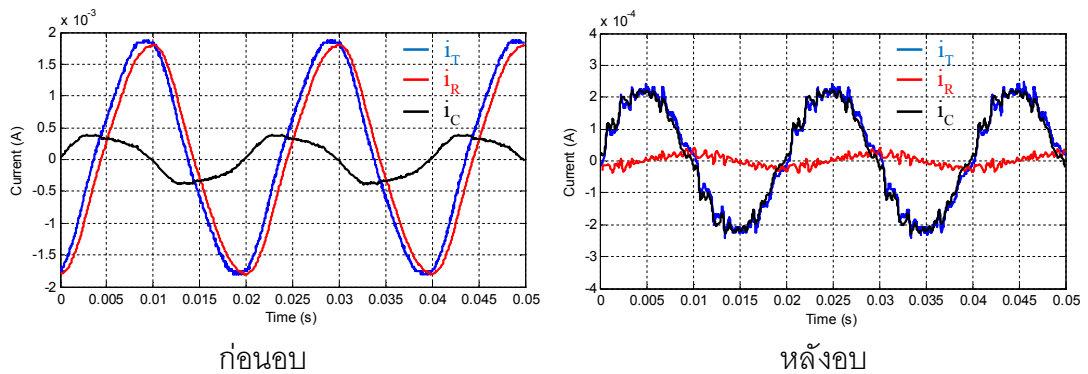
ผลการทดสอบในตารางที่ 5.16 เห็นได้ชัดเจนว่าทั้ง 3 ตัวอย่างที่พบความผิดปกติ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น อย่างชัดเจนหลังจากผ่านการอบ ยกเว้นตัวอย่าง BS-11C ที่ยังคงสภาพปกติเหมือนเดิม โดยตัวอย่าง BS-1A มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น จาก 100 MΩ เป็น 40 GΩ และมีปริมาณกระแสรั่วลดลงเหลือเพียง 0.16 mA ที่แรงดันระบบ ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ยังไม่ใช้งาน สิ่งที่เห็นชัดเจนที่สุดคือมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 0.7 °C เท่านั้น ทั้งที่ก่อนหน้านี้ มีอุณหภูมิสูงมากจนไม่สามารถทดสอบอย่างต่อเนื่องได้ ในรูปที่ 5.28 - 5.31 แสดงกระแสรั่วของทั้ง 4 ตัวอย่าง ก่อนหน้าและภายหลังการอบ



รูปที่ 5.28 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่างอ้างอิงที่ 3 ก่อนและหลังการอบ

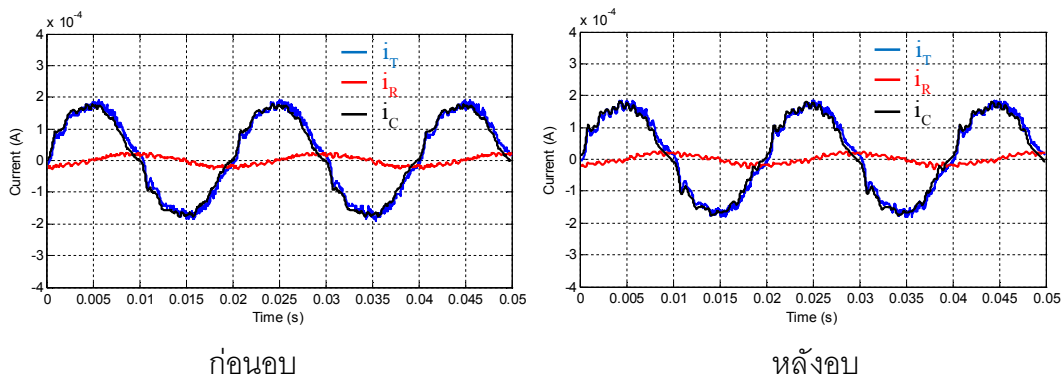


รูปที่ 5.29 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่าง BS-1A ก่อนและหลังการอบ



รูปที่ 5.30 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่าง BS-2C ก่อนและหลังการอบ





รูปที่ 5.31 รูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่าง BS-11C ก่อนและหลังการอบ

จากผลการทดสอบนี้ ทำให้สรุปได้ว่าสาเหตุของความผิดปกติที่พบกับตัวอย่างกับดัก เสรีจเกิดจากมีความชื้น น้เข้าไปภายใน ทั้งที่ได้รับมาตั้งแต่ช่วงการใช้งานในระบบไฟฟ้าและระหว่างการเก็บรักษาเพื่อรอทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแสดงว่ากับดักเสรีจรุ่นนี้ มีข้อบกพร่องในเรื่องของการออกแบบและวัสดุที่นำมาใช้สำหรับป้องกันความชื้น โดยปัญหาที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างเฉพาะผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 เท่านั้น และยังไม่มีพบกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ถอดเปลี่ยนมาพร้อมกัน ผลสรุปที่ได้นี้ ยังสามารถนำไปอธิบายเหตุการณ์ระเบิดของกับดักเสรีจของผลิตภัณฑ์นี้ ที่ติดตั้ง อยู่ในสภาวะปกติได้ออกจากนั้น การใช้งานผลิตภัณฑ์รุ่นนี้ จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในการจัดเก็บระหว่างรอติดตั้ง ในระบบไฟฟ้า หรือควรมีการตรวจสอบสภาพกับดักเสรีจรุ่นนี้ ก่อนการใช้งานเสมอ

### 5.3.8 ผลการทดสอบวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้าง

ในการประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินของตัวอย่างกับดักเสรีจได้นำตัวอย่างทั้งหมดไปทดสอบวัดแรงดันดีสชาร์จคงค้างที่กระแสพิกต์ 5 kA ทั้งชั่ว วบวกและชั่ว วัลโดยผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.3.8.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

ผลการทดสอบแรงดันดีสชาร์จคงค้างของผลิตภัณฑ์ A รุ่นเก่า แต่ละตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 62 kV ใกล้เคียงกันทั้งกระแสชั่ว วบวกและชั่ว วัลตามตารางที่ 5.17 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดจากผู้ผลิตที่ 70 kV พบว่ามีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าถึง 10.8% อย่างไรก็ตามจากผลทดสอบของตัวอย่างอ้างอิงจำนวน 5 ตัว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ A รุ่นใหม่ พบว่ามีค่าเฉลี่ยของแรงดันคงค้างทั้งสองชั่ว วัลเพียง 54.44 kV ทั้งที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ที่ 70 kV เช่นกัน ในกรณีจะเห็นว่าผลิตภัณฑ์รุ่นเก่าจะมีแรงดันคงค้างเฉลี่ยสูงกว่าถึง 14.4%

ดังนั้น หนาวพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคงค้างเพื่อประเมินความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินคงไม่สามารถกระทำได้อีกหากข้อมูลอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร

ตารางที่ 5.17 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

ชื่อของกระแส	แรงดันคงค้าง ที่กระแสฟลักซ์ 5 kA (kV)		แรงดันคงค้าง ที่กำหนดจากผู้ผลิต (kV)
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
บวก	59.53 - 67.09	62.44	70
ลบ	59.84 - 65.88	62.15	

5.3.8.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง LEE-2A ที่มีความผิดปกติจากตัวอย่างอื่น ๆ อย่างชัดเจน คือมีแรงดันคงค้างชั่วคราวและชั่วขณะเพียง 47.75 kV และ 48.35 kV อย่างไรก็ตามตัวอย่างตัวอื่น ๆ นั้นก็มีแรงดันคงค้างแตกต่างกันค่อนข้างมาก ตามตารางที่ 5.18 (ไม่รวมผลทดสอบตัวอย่าง LEE-2A) โดยมีข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ ตัวอย่างกลุ่มที่คาดว่าภายในมีความชื้นสูงนี้ มีแรงดันคงค้างไม่แตกต่างจากตัวอย่างอื่น ๆ ที่ไม่พบปัญหาดังกล่าว หรือกล่าวได้ว่าผลของความชื้นภายในกับดักเสิร์จทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเฉพาะที่แรงดันใช้งาน 50 Hz เท่านั้น แต่กลับไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดีสชาร์จกระแสเสิร์จ ยังคงมีระดับแรงดันดีสชาร์จคงค้างไม่เปลี่ยนแปลงจากตัวอย่างปกติ

ตารางที่ 5.18 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่ใช้งานน้อยกว่า 7 ปี

ชื่อของกระแส	แรงดันคงค้าง ที่กระแสฟลักซ์ 5 kA (kV)		แรงดันคงค้าง ที่กำหนดจากผู้ผลิต (kV)
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
บวก	51.37 - 65.40	59.62	70
ลบ	50.10 - 64.51	59.16	

ความแตกต่างค่อนข้างมากของแรงดันคงค้างในตารางที่ 5.18 เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า ตัวอย่างที่ผลิตในช่วงหลัง มีแรงดันคงค้างเฉลี่ยประมาณ 55 kV ใกล้เคียงกันทั้ง ขั้วบวกและขั้วลบ และใกล้เคียงกับผลทดสอบของตัวอย่างอ้างอิงที่ 5 ตัว ที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 54.44 kV ตามที่บรรยายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงแสดงให้เห็นว่าผู้ผลิตจะมีการเปลี่ยนแปลงของบล็อก ZnO ที่นำมาใช้ผลิตกับดักเรย์จุ่นดังกล่าว ทำให้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคงค้างกรณีที่ผู้ผลิตมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบที่นำมาใช้งานกระทำได้ยากมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบต้องเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงจะสามารถประเมินความเสื่อมสภาพหรือการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักเรย์จู้ได้

### 5.3.8.3 ผลการทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

ผลการทดสอบแรงดันดีสชาร์จคงค้างที่กระแสฟัด 5 kA ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D พบว่าตัวอย่างของแต่ละผลิตภัณฑ์มีค่าแรงดันคงค้างใกล้เคียงกันทั้งกระแสขั้วบวกและขั้วลบ แต่ผลิตภัณฑ์ B มีแรงดันคงค้างต่ำกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ อยู่มากพอสมควร ตามตารางสรุปที่ 5.19 ผลทดสอบที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในข้อมูลของผู้ผลิตตามตารางที่ 4.5 เกินกว่า 5% ทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ B มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าถึง 23.87% จากข้อมูลซึ่งคาดว่าจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร และเนื่องจากไม่มีตัวอย่างอ้างอิงของทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์มาทดสอบเปรียบเทียบจึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดีสชาร์จคงค้างได้

ตารางที่ 5.19 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ B และ D

ผลิตภัณฑ์	ผลการทดสอบแรงดันคงค้าง ที่กระแสฟัด 5 kA (kV)		แรงดันคงค้าง ที่กำหนดจากผู้ผลิต (kV)
	กระแสขั้วบวก	กระแสขั้วลบ	
B	48.96 - 50.17 (49.56)	48.96 - 50.17 (49.56)	65.1
D	56.21 - 59.84 (58.39)	56.21 - 59.23 (58.26)	62.4

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

#### 5.4 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบ 33 kV

การทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV ซึ่งมีพิกัด 30 kV, 5 kA โดยสุ่มเก็บจากบริเวณพื้นที่ชายทะเล และภูเขาสูง รวม 29 ตัว ประกอบไปด้วย 4 ผลิตรหัส คือ ผลิตรหัส A, C, D และ E จำนวนตัวอย่างของแต่ละผลิตรหัสสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จในระบบ 33 kV ที่ใช้ทดสอบ

ผลิตรหัส	สภาพแวดล้อม	จำนวนตัวอย่างกับดักเสิร์จ (ตัว)		
		ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3-7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
A	ภูเขาสูง	3 (1)	-	2
	ชายทะเล	3	2	-
C	ภูเขาสูง	-	-	3
	ชายทะเล	-	3	-
D	ภูเขาสูง	1	3	-
	ชายทะเล	2	-	5
E	ภูเขาสูง	-	-	2 (2)
	ชายทะเล	-	-	-

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บเป็นจำนวนตัวอย่างที่สังเกตพบความผิดปกติ

ผลการทดสอบในภาพรวมพบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่มีปริมาณกระแสรั่วและกำลังไฟฟ้าสูญเสียอยู่ในระดับต่ำและมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ยังไม่ใช้งาน มีเพียง 3 ตัวอย่างที่พบความผิดปกติ การเปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัยทางสภาพแวดล้อมทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีจำนวนตัวอย่างน้อยและไม่ครอบคลุมในทุกช่วงอายุการใช้งานและพื้นที่ติดตั้ง ดังเห็นได้จากตารางที่ 5.20 อย่างไรก็ตามผลการทดสอบโดยรวมให้ผลคล้ายคลึงกับตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA โดยตัวอย่างจากทั้งสองพื้นที่ที่ไม่แสดงผลความแตกต่างเนื่องจากสภาพแวดล้อมอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับผลของระยะเวลาการติดตั้งใช้งาน มีเพียงความแตกต่างของผลิตรหัสเท่านั้นที่อาจสังเกตเห็นได้ อย่างไรก็ตามบางผลิตรหัสก็มีผลทดสอบใกล้เคียงกัน สำหรับรายละเอียดผลการทดสอบในแต่ละวิธีสามารถสรุปได้ต่อดังนี้

#### 5.4.1 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทานด้วยเมกเกอร์ที่ระดับแรงดัน 5 kV<sub>dc</sub> พบว่าตัวอย่างเกือบทั้งหมดในทุกผลิตภัณฑ์ และทุกช่วงเวลาใช้งานมีค่าความต้านทานสูงกว่า 100 GΩ ไม่เห็นความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ A ทั้งรุ่นเก่าและรุ่นใหม่ แต่มีเพียง 3 ตัวอย่างเท่านั้นที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าตัวอื่น ๆ คือ 35 GΩ, 16 GΩ และ 2.5 GΩ สองตัวแรกเป็นตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ E ที่ใช้งานเกินกว่า 7 ปี และมีสภาพภายนอกค่อนข้างทรุดโทรม เนื่องจากตัวอย่างติดตั้งอยู่ในพื้นที่ภูเขาสูง จึงทำให้มีสิ่งเปราะเปื้อนจากคราบสกปรกของเศษฝุ่น นดินและตะไคร่น้ำเกาะติดอยู่ สำหรับตัวสุดท้ายเป็นของผลิตภัณฑ์ A ในรุ่นปัจจุบันซึ่งติดตั้งอยู่ในบริเวณเดียวกันแต่ใช้งานมาไม่เกิน 3 ปี มีสภาพภายนอกปกติ พบเพียงฝุ่นและคราบสกปรกบาง ๆ เท่านั้น

#### 5.4.2 ผลการทดสอบวัดปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณกระแสรั่วรวมที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV ในระดับต่ำ วัดได้สูงสุด 0.194 mA จากตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ A ที่มีค่าความต้านทาน 2.5 GΩ โดยตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 0.13 mA หรือต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ละผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.21 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของตัวอย่างอ้างอิงที่ยังไม่ใช้งานในตารางที่ 5.4 จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับกระแสรั่วรวมที่แรงดัน U<sub>c</sub> ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 0.17 mA และวัดได้สูงสุด 0.258 mA สำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ E ที่วัดค่าความต้านทานได้ต่ำ (35 GΩ และ 16 GΩ) กลับมีกระแสรั่วรวมต่ำกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ทั้งหมด โดยมีค่าประมาณ 0.12 mA

ตารางที่ 5.21 กระแสรั่วรวมที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV ในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

ผลิตภัณฑ์	สภาพแวดล้อม	กระแสรั่วรวมที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV (mA)		
		ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3-7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
A	ภูเขาสูง	0.125 - 0.194	-	0.126 - 0.129
	ชายทะเล	0.167 - 0.176	0.127 - 0.128	-
C	ภูเขาสูง	-	-	0.125 - 0.129
	ชายทะเล	-	0.127 - 0.128	-
D	ภูเขาสูง	0.133	0.123 - 0.134	-
	ชายทะเล	0.129 - 0.130	-	0.125 - 0.132
E	ภูเขาสูง	-	-	0.118 - 0.120
	ชายทะเล	-	-	-

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานในตารางที่ 5.22 และเปอร์เซ็นต์กระแสรั่วเชิงความต้านทานต่อกระแสรั่วเชิงความจุไฟฟ้า ( $\% I_{r,pk} / I_{c,pk}$ ) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพของกับดักเสิร์จอย่างแท้จริง พบว่าตัวอย่างเกือบทั้งหมดมี  $\% I_{r,pk} / I_{c,pk}$  ต่ำกว่า 20% หรือมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานในปริมาณน้อย ซึ่งวัดได้ประมาณ 7.97  $\mu\text{A}$  - 18.06  $\mu\text{A}$  และมีค่ายอดสูงสุดอยู่ในช่วง 15.41  $\mu\text{A}_{pk}$  - 35.89  $\mu\text{A}_{pk}$  แต่สำหรับ 3 ตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า 100  $\text{G}\Omega$  นั้นพบว่า  $\% I_{r,pk} / I_{c,pk}$  สูงกว่า 20% และมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ อย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากปัญหาความชื้นขึ้นชั้นกันตามตารางที่ 5.23 สอดคล้องกับผลการวัดค่าความต้านทาน แต่อาจไม่สัมพันธ์กับปริมาณของกระแสรั่วรวมเนื่องจากตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ E พบว่ามีกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าตัวอย่างของผลิตภัณฑ์อื่น ๆ แต่กลับมีปริมาณกระแสรั่วรวมต่ำกว่าเนื่องจากมีกระแสรั่วเชิงความจุไฟฟ้าต่ำกว่า

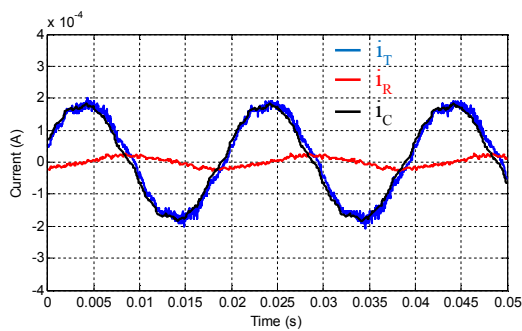
ตารางที่ 5.22 กระแสรั่วเชิงความต้านทานที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV ในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

ผลิตภัณฑ์	สภาพแวดล้อม	กระแสรั่วรวมเชิงความต้านทาน ( $\mu\text{A}$ )		
		ใช้งาน < 3 ปี	ใช้งาน 3-7 ปี	ใช้งาน > 7 ปี
A	ภูเขาสูง	8.18 - 63.68	-	14.66 - 15.03
	ชายทะเล	16.42 - 18.06	15.17 - 17.10	-
C	ภูเขาสูง	-	-	11.08 - 13.19
	ชายทะเล	-	12.65 - 15.09	-
D	ภูเขาสูง	7.97	8.34 - 10.52	-
	ชายทะเล	9.96 - 10.87	-	9.05 - 10.47
E	ภูเขาสูง	-	-	27.11 - 31.02
	ชายทะเล	-	-	-

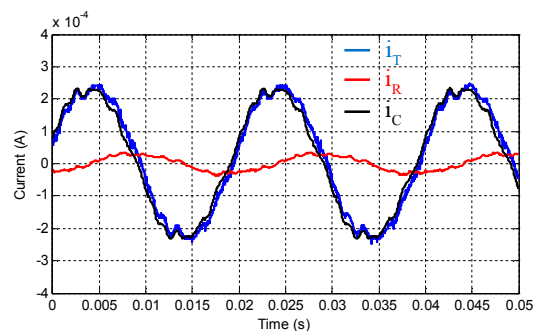
ตารางที่ 5.23 ตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาดพิกัด 30 kV, 5 kA ที่พบความผิดปกติ

ชื่อตัวอย่าง	ผลิตภัณฑ์	$R_{dc}$ ( $\text{G}\Omega$ )	$I_t$ (mA)	$I_r$ ( $\mu\text{A}$ )	$I_{r,pk}$ ( $\mu\text{A}$ )	$\% I_{r,pk} / I_{c,pk}$	$\% I_{r,3h}$ ที่ $U_c$
TSL-7C	A	2.5	0.194	63.68	102.91	40.27	5.80
TSL-4C	E	35	0.118	27.11	45.35	27.71	9.73
TSL-5C	E	16	0.120	31.02	49.95	30.84	7.48

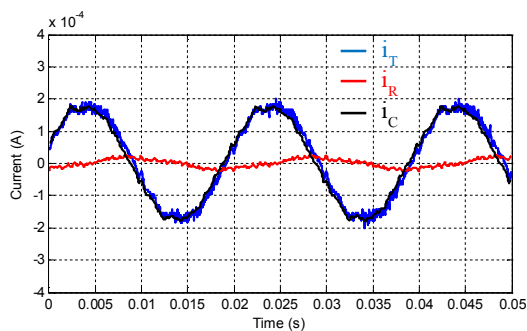
เมื่อพิจารณาความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งและระยะเวลาที่ติดตั้งใช้งานของกับดักเล็ร์จผลิตรภัณฑ์ A และ D จะเห็นได้ว่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานมีขนาดไม่แตกต่างกัน แม้พบว่าตัวอย่างหนึ่งของผลิตรภัณฑ์ A มีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานสูงกว่าปกติ แต่ตัวอย่างตัวอื่น ๆ ยังมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นความผิดปกติของตัวอย่างดังกล่าวจึงไม่ใช่เป็นผลจากระยะเวลาที่ใช้งาน หรือสภาพแวดล้อม รูปที่ 5.32 - รูปที่ 5.34 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่วของตัวอย่างกับดักเล็ร์จผลิตรภัณฑ์ A (รุ่นเก่า), C และ D ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 5.35 - รูปที่ 5.37 แสดงกระแสรั่วของตัวอย่างผลิตรภัณฑ์ A (รุ่นใหม่) และ E ที่มีความต้านทานต่ำกว่า  $100 \text{ G}\Omega$  และมีกระแสรั่วสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ



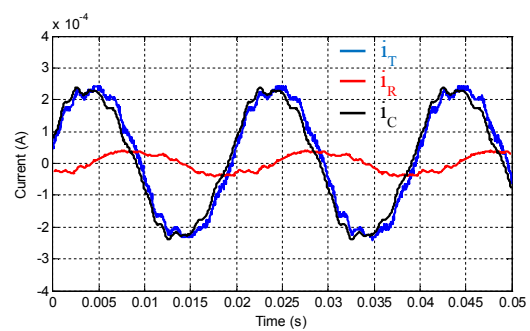
ที่แรงดันระบบ 19.0 kV

ที่แรงดัน  $U_c$  24.4 kV

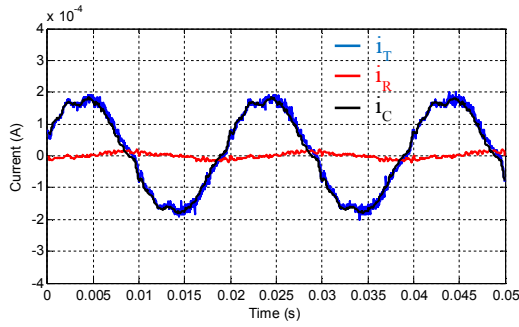
รูปที่ 5.32 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตรภัณฑ์ A (รุ่นเก่า) รหัส TSL-20A ที่ใช้งานมานานมากกว่า 7 ปี



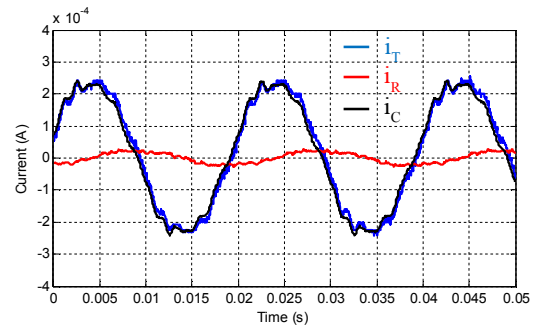
ที่แรงดันระบบ 19.0 kV

ที่แรงดัน  $U_c$  24.4 kV

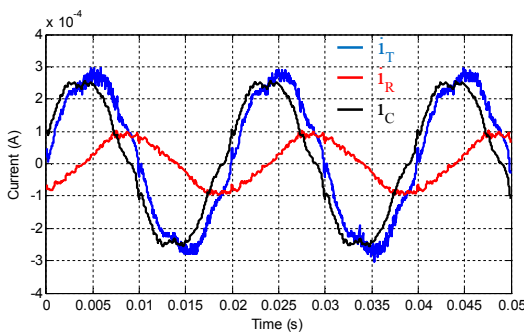
รูปที่ 5.33 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตรภัณฑ์ C รหัส TSL-2A ที่ใช้งานมานานมากกว่า 7 ปี



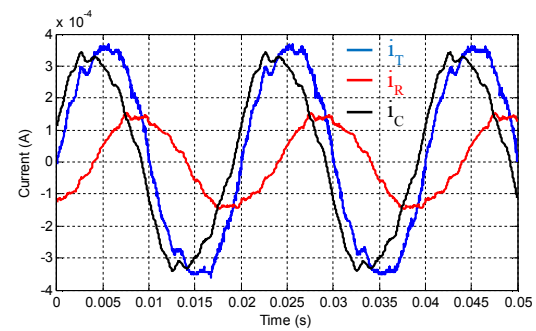
ที่แรงดันระบบ 19.0 kV

ที่แรงดัน  $U_c$  24.4 kV

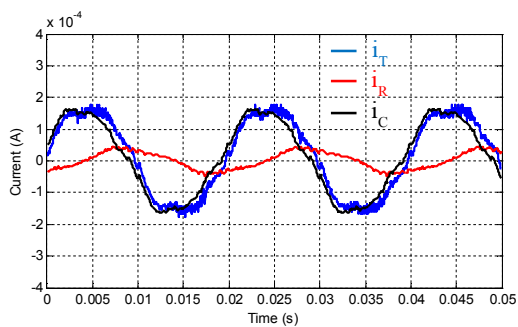
รูปที่ 5.34 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ D รหัส PNG-14 ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี



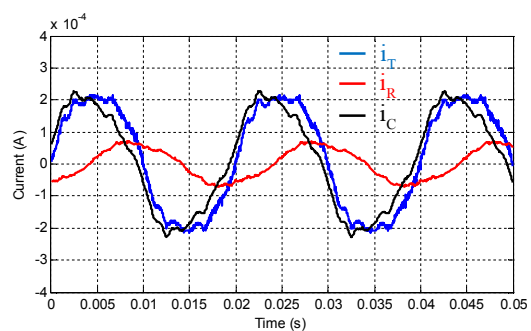
ที่แรงดันระบบ 19.0 kV

ที่แรงดัน  $U_c$  24.4 kV

รูปที่ 5.35 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A (รุ่นใหม่) รหัส TSL-7C ที่มีความต้านทาน 2.5 GΩ



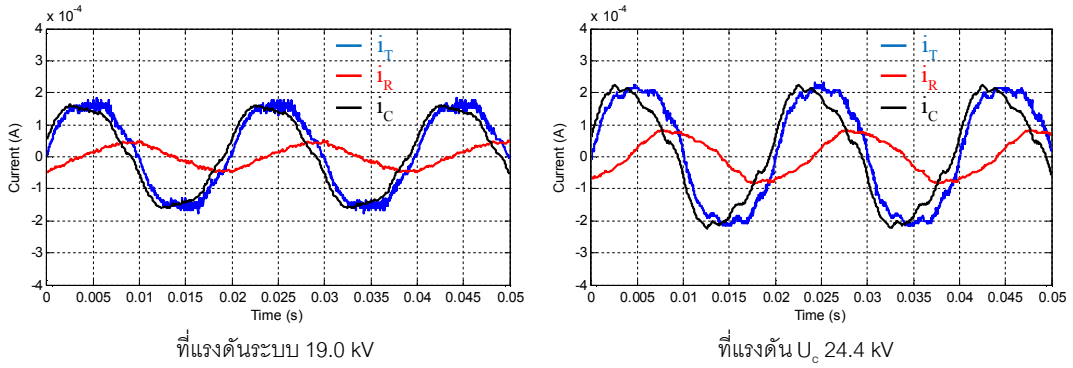
ที่แรงดันระบบ 19.0 kV

ที่แรงดัน  $U_c$  24.4 kV

รูปที่ 5.36 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ E รหัส TSL-4C ที่ใช้งานมากกว่า 7 ปี

และมีความต้านทาน 35 GΩ





รูปที่ 5.37 กระแสรั่วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ E รหัส TSL-5C ที่ใช้งานมามากกว่า 7 ปี และมีความต้านทาน 16 GΩ

5.4.3 ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.24 โดยตัวอย่างทุกตัวของผลิตภัณฑ์ A ยังคงมีแรงดันอ้างอิงอยู่ในช่วงเกณฑ์ปกติตามตารางที่ 5.4 สำหรับตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำที่สุดก็ยังคงมีแรงดันอ้างอิงปกติ คือ 31.2 kV และไม่ใช่ตัวอย่างที่มีค่าต่ำที่สุด แต่อาจต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเล็กน้อย ทั้งที่มีปริมาณกระแสรั่วสูงกว่าตัวอื่น ๆ อย่างชัดเจน สำหรับผลิตภัณฑ์ C และ D ไม่สามารถเปรียบเทียบข้อมูลอ้างอิงได้เนื่องจากทดสอบที่กระแสอ้างอิงต่างกัน แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ E เบื้องต้นยังไม่มีข้อมูลอ้างอิงในส่วนนี้ จึงไม่สามารถพิจารณาได้ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าทั้ง 4 ผลิตภัณฑ์มีแรงดันอ้างอิงเฉลี่ยใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 5.24 ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA

ผลิตภัณฑ์	แรงดันอ้างอิงที่กระแสอ้างอิง 1 mA <sub>pk</sub> (kV)	
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
A	31.0 – 37.0	34.16
C	33.2 – 34.0	33.37
D	33.2 - 34.8	33.95
E	34.0 - 34.2	34.10

#### 5.4.4 ผลการทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน และปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยตรง ตัวอย่างส่วนใหญ่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำไม่เกิน 0.3 W ที่แรงดันใช้งานปกติ 19.0 kV และไม่เกิน 1.0 W ที่แรงดัน  $U_c$  24.4 kV มีเพียง 3 ตัวอย่างที่มีค่าสูงกว่าตัวอื่น ๆ ชัดเจน คือ ตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่า 100 G $\Omega$  โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่มีค่าความต้านทาน 2.5 G $\Omega$  มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียประมาณ 1.2 W และ 2.5 W ที่แรงดันใช้งานและแรงดัน  $U_c$  ตามลำดับ ผลการทดสอบโดยภาพรวมในแต่ละผลิตภัณฑ์สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.25 ซึ่งจะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ D มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยต่ำที่สุด รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์ของ C และ A ตามลำดับ แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ E ไม่สามารถนำมาพิจารณาได้เนื่องจากมีเพียง 2 ตัวอย่างเท่านั้น โดยมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เกือบเท่าตัว

ตารางที่ 5.25 ผลการทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 0 kV, 5 kA

ผลิตภัณฑ์	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดันใช้งาน 19.0 kV (W)		กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แรงดัน $U_c$ 24.4 kV (W)	
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
A	0.149 – 0.330	0.279	0.303 – 1.024	0.681
A (2.5 G $\Omega$ )	1.203	-	2.493	-
C	0.202 – 0.282	0.231	0.549 – 0.761	0.644
D	0.140 – 0.197	0.164	0.315 – 0.542	0.436
E	0.507, 0.588	0.547	1.139, 1.373	1.256

#### 5.4.5 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างกับดักเสิร์จ สอดคล้องกับปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วเชิงความต้านทาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยพบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่ทุกผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$ ) น้อยกว่า 1.0 $^{\circ}$ C เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 5.25 โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ E รหัส TSL-5C ที่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงกว่ามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 0.7 $^{\circ}$ C สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ที่มีค่าความต้านทาน 2.5 G $\Omega$  มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 1.203 W ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประมาณ 2.6 $^{\circ}$ C จากอุณหภูมิแวดล้อม หรือประมาณ 0.463 W/ $^{\circ}$ C ซึ่งใกล้เคียงกับผลทดสอบของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ A ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.25 เป็นผลจากกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ทั้งสองพิกัดมีการออกแบบขนาดและใช้วัสดุที่ใช้เหมือนกัน จึงมีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกัน

#### 5.4.6 ผลการทดสอบวัตต์แรงดันดีสชาร์จคงค้าง

ผลการทดสอบวัตต์แรงดันคงค้างของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA ที่กระแสพิกัดของแต่ละผลิตภัณฑ์สรุปได้ตามตารางที่ 5.26 เกือบทุกผลิตภัณฑ์ยกเว้นผลิตภัณฑ์ A แต่ละตัวอย่างมีแรงดันคงค้างใกล้เคียงกัน แต่มีค่าเฉลี่ยโดยรวมต่ำกว่าที่กำหนดจากผู้ผลิตพอสมควร ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่มีตัวอย่างอ้างอิงของแต่ละผลิตภัณฑ์ในรุ่นพิกัดนี้ จึงทำให้ไม่สามารถพิจารณาความเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิงของตัวอย่างที่ผ่านการใช้งานแล้วได้ สำหรับผลิตภัณฑ์ A มีผลทดสอบค่อนข้างกว้างเนื่องจากพบว่าตัวอย่างที่ผลิตขึ้นมาในช่วงหลังมีแรงดันคงค้างต่ำ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 76 kV ทั้งชั่วคราวและขั้วบในเบื้องต้นคาดว่าผู้ผลิตอาจมีการเปลี่ยนแปลงผลึก ZnO ที่ใช้ผลิตกับดักเสิร์จในล็อตดังกล่าว

ตารางที่ 5.26 ผลการทดสอบแรงดันคงค้างของตัวอย่างกับดักเสิร์จขนาด 30 kV, 5 kA

ผลิตภัณฑ์	แรงดันดีสชาร์จคงค้างที่กระแสพิกัด 5 kA <sub>pk</sub> (kV <sub>pk</sub> )				แรงดันคงค้างที่กำหนดจากผู้ผลิต (kV)
	ชั่วคราว		ขั้วลบ		
	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	ผลการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
A	74.39 - 88.21	82.22	74.46 - 87.9	82.04	100.0
C	83.77 - 85.02	84.29	83.57-84.86	84.08	91.8
D	81.91 - 87.96	84.83	81.94-87.15	84.65	91.8
E	87.22, 87.66	87.47	87.52-87.63	87.58	93.5

## บทที่ 6

### การตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

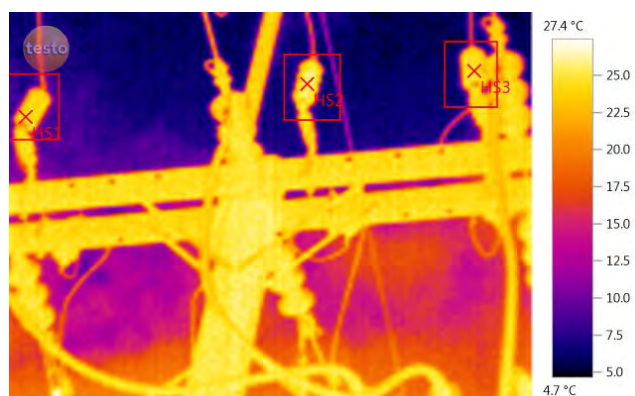
เพื่อศึกษาและพัฒนาแนวทางในการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน เบื้องต้นได้สำรวจและเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติในพื้นที่ต่าง ๆ และนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความเสื่อมสภาพกับระดับอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับความแตกต่างจากที่วัดได้ในภาคสนาม และศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จสำหรับนำมากำหนดแนวทางในการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนในภาคสนาม นอกจากนี้ผลการทดสอบยังทำให้ทราบถึงลักษณะความเสียหายของกับดักเสิร์จที่เกิดขึ้นนี้ด้วย โดยผลการศึกษสามารถสรุปในแต่ละส่วนได้ดังนี้

#### 6.1 ผลการสำรวจและทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ

ผลการสำรวจหาตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถตรวจพบตัวอย่างดังกล่าวในระบบ 22 kV และ 33 kV ตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.7 โดยสามารถถอดเปลี่ยนและดำเนินการทดสอบตัวอย่างจำนวน 22 ตัว ได้จาก 10 กรณีตัวอย่างในระบบ 22 kV ทั้งนี้บางส่วน (9 ตัว) เป็นตัวอย่างที่มีอุณหภูมิปกติแต่ติดตั้งอยู่ในเฟสข้างเคียง ได้ถูกถอดออกมาด้วยเพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกันในห้องปฏิบัติการ ผลการถ่ายภาพความร้อนในภาคสนามและผลการทดสอบตัวอย่างในแต่ละกรณีสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 6.1.1 กรณีตัวอย่างที่ 1 (อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์)

พบกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ขนาด 21 kV 5 kA ในเฟส B (PR-14B) ที่ติดตั้งป้องกันสวิตช์รีโคลสเซอร์แบบ SF<sub>6</sub> (PNA85-16) มีอุณหภูมิสูงกว่าเฟสข้างเคียงเล็กน้อยประมาณ 1°C ( $\Delta T_2$ ) และสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม 1.8°C ( $\Delta T_1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 แต่เมื่อนำมาทดสอบกลับพบว่าตัวอย่างมีค่าความต้านทานต่ำมากเพียง 48 M $\Omega$  และมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงมากจนไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ ตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 แสดงผลการทดสอบ และรูปคลื่นกระแสรั่วของกับดักเสิร์จพร้อมกับภาพถ่ายความร้อนเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที จากผลการทดสอบคาดว่าตัวอย่างนี้มีปัญหาด้านความชื้น จนทำให้กับดักเสิร์จมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีความความรุนแรงมากขึ้น หลังจากถอดเปลี่ยนมาเก็บไว้ในบรรยากาศปกติ เห็นได้จากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากบริเวณแวดล้อมสูงกว่าที่ได้ในภาคสนามมาก



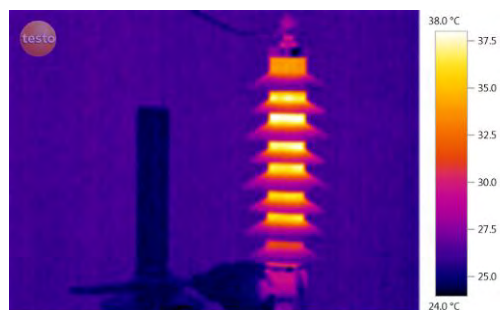
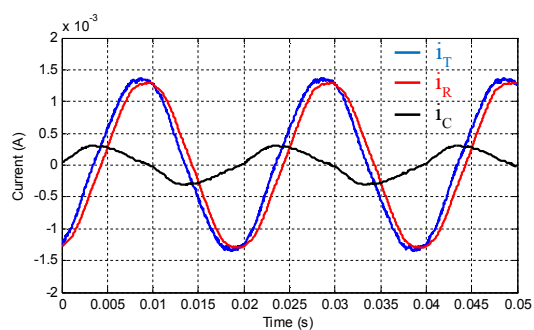
จุดที่วัด	Ambient	เพลส C	เพลส B	เพลส A
อุณหภูมิ (°C)	24.4	25.2	26.2	25.3
$\Delta T_1$ (°C)	Ref.	0.8	1.8	0.9
$\Delta T_2$ (°C)	-	Ref.	1.0	0.1

รูปที่ 6.1 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่าง	R (G $\Omega$ )	$I_T$ (mA)	% $I_{r,pk}/I_{c,pk}$ ที่แรงดันระบบ	$I_r$ (mA)	% $I_{r,3rd}/I_r$ ที่แรงดันระบบ	Power (W)	T (°C)	$\Delta T$ (°C)	$V_{ref}$ (kV)
PR-14B (30 นาที)	0.048	0.950	423.69	0.928	0.47	11.81	36.4	11.4	-

หมายเหตุ “-” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ



รูปที่ 6.2 กระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ PR-14B (30 mins)

### 6.1.2 กรณีตัวอย่างที่ 2 (อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์)

สำรวจพบกับดักเสิร์จเฟส A ที่ติดตั้งป้องกันสายจำหน่ายไฟฟ้าบริเวณเชิงสะพานข้ามแม่น้ำปราณ (PR-15A) มีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม  $11^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_1$ ) ดังรูปที่ 6.3 โดยกับดักเสิร์จในเฟสที่เหลือนี้อุณหภูมิใกล้เคียงกันและสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเล็กน้อย กรณีนี้ได้ถอดเปลี่ยนตัวอย่างทั้ง 3 เฟส มาทดสอบ พบว่าทั้งหมดเป็นกับดักเสิร์จของผลิตภัณฑ์ K ขนาดพิกัด 21 kV, 10 kA ผลิตในปี ค.ศ.1994 หรืออาจติดตั้งใช้งานมานานมากกว่า 15 ปี ตัวอย่างทั้ง 3 ตัว มีการชำรุดและเสื่อมสภาพของเปลือกโพลีเมอร์อย่างมาก สังเกตได้จากการแข็งตัวและแตกของเนื้อโพลีเมอร์อย่างชัดเจนอยู่ในสภาพที่ไม่ควรนำมาใช้งานต่อไปดังแสดงในรูปที่ 6.4



จุดที่วัด	Ambient	เฟส A	เฟส B	เฟส C
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	28.3	39.4	28.6	28.7
$\Delta T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ref.	11.1	0.3	0.4
$\Delta T_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	-	10.8	Ref.	0.1

รูปที่ 6.3 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 2

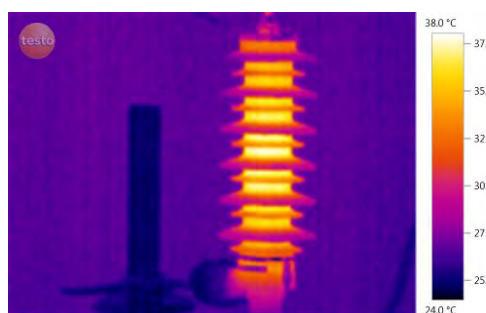
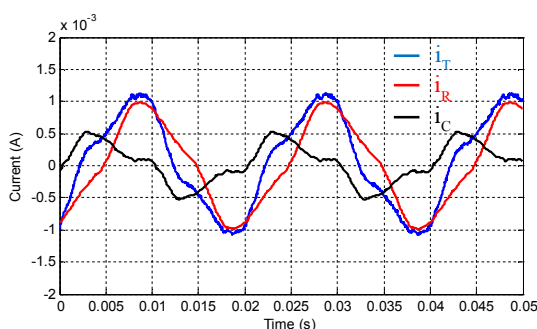


รูปที่ 6.4 สภาพภายนอกของตัวอย่างกับดักเสิร์จ PR-15A

ผลการทดสอบในตารางที่ 6.2 พบว่าตัวอย่าง PR-15A นั้นเกิดการเสื่อมสภาพจนมีกระแสรั่วเชิงความต้านทานและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงถึง 0.65 mA และ 8.13 W ตามลำดับ แรงดันอ้างอิงมีค่าลดลงเหลือเพียง 12.4 kV ซึ่งเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 5% จากระดับปกติ และมีอุณหภูมิสูงขึ้น  $3^{\circ}\text{C}$  จากบริเวณแวดล้อม โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่บริเวณกลางลำตัวของกับดักเสิร์จ ซึ่งมากกว่าค่าที่วัดได้ในภาคสนามเล็กน้อยสำหรับตัวอย่างเฟสที่เหลืองพบว่าเริ่มมีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทาน กำลังสูญเสีย และอุณหภูมิสูงกว่าปกติ รูปที่ 6.5 แสดงกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ PR-15A

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 2

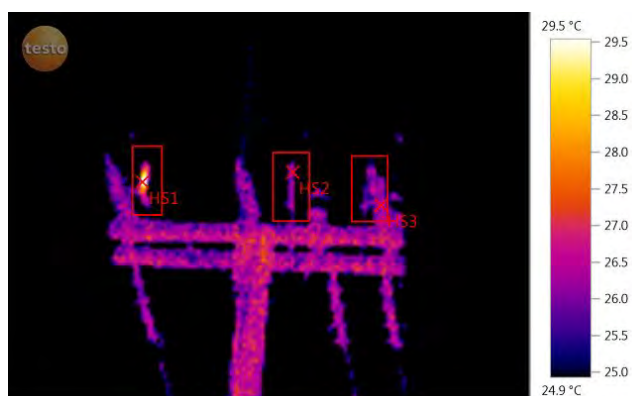
ตัวอย่าง	R (G $\Omega$ )	$I_T$ (mA)	% $I_{r, pk} / I_{c, pk}$ ที่แรงดันระบบ	$I_r$ (mA)	% $I_{r, 3rd} / I_r$ ที่แรงดันระบบ	Power (W)	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$V_{ref}$ (kV)
PR-15A	0.11	0.715	184.97	0.65	13.00	8.13	37.9	13.0	12.4
PR-16B	1.0	0.292	37.31	0.095	11.02	1.19	26.8	2.1	22.4
PR-17C	2.2	0.299	41.92	0.11	12.63	1.34	27.2	2.6	21.6



รูปที่ 6.5 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ PR-15A

### 6.1.3 กรณีตัวอย่างที่ 3 (อ.บางแสน จ.ชลบุรี)

สำรวจพบกับดักเสิร์จที่ติดตั้งป้องกันสายจำหน่ายไฟฟ้า บริเวณเชิงสะพานข้ามแม่น้ำในเฟส A มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ ดังรูปที่ 6.6 โดยมีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ  $3.6^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_1$ ) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามกรณีนี้ มีระยะห่างในการถ่ายภาพความร้อนค่อนข้างไกล เห็นได้จากกับดักเสิร์จในภาพถ่ายมีขนาดเล็กซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากผลการลดทอนของตัวกลางและข้อจำกัดด้านความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจจับรังสีอินฟราเรด (Detector) โดยผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 3 เฟส แสดงได้ในตารางที่ 6.3



จุดที่วัด	Ambient	เฟส C	เฟส B	เฟส A
อุณหภูมิ (°C)	26.2	29.8	26.7	26.6
$\Delta T_1$	Ref.	3.6	0.5	0.4
$\Delta T_2$	-	3.2	0.1	Ref.

รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 3

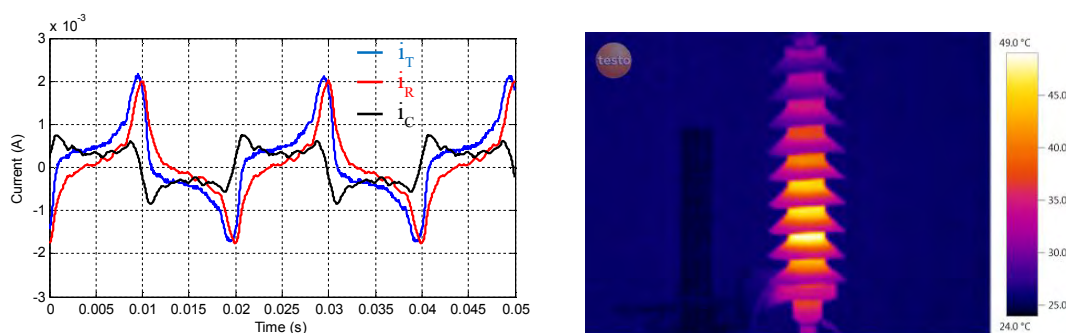
ตัวอย่างทั้ง 3 ตัว เป็นผลิตภัณฑ์ D ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA ผลิตในปี ค.ศ. 2002 มีสภาพภายนอกปกติ แต่มีฝุ่นดินเกาะอยู่บริเวณเปลือกโพลีเมอร์พอสมควร ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างเฟส A (BS-19A) ยังคงมีค่าความต้านทานสูงมากประมาณ 90 GΩ แต่ต่ำกว่าเฟสอื่น ๆ ที่วัดได้มากกว่า 100 GΩ อย่างไรก็ตามกระแสรั่วของตัวอย่างเฟส A ได้แสดงให้เห็นว่าบลิ๊อค ZnO เกิดความเสื่อมสภาพหรือเสียหายอย่างมากจนทำให้มีกระแสรั่วเชิงความต้านทาน และกำลังสูญเสียถึง 0.76 mA และ 8.32 W ตามลำดับ กรณีนี้ จะเห็นว่ากระแสรั่วฮาร์มอนิกที่ 3 ก็มีค่าสูงด้วยเช่นกัน มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 16.3 °C ซึ่งแตกต่างจากที่วัดในภาคสนามมาก สำหรับตัวอย่างในเฟส B และ C พบว่ายังมีสภาพปกติ ตามผลสรุปในตารางที่ 6.3 ในรูปที่ 6.7 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่าง BS-19A จะเห็นว่าจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่บริเวณลำตัวส่วนล่างของกับดักเสิร์จ

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่าง	R (GΩ)	$I_r$ (mA)	$\%I_{r,pk}/I_{c,pk}$ ที่แรงดันระบบ	$I_r$ (mA)	$\%I_{r,3rd}/I_r$ ที่แรงดันระบบ	Power (W)	Temp (°C)	$\Delta T$ (°C)	$V_{ref}$ (kV)
BS-19A	90	0.876	263.36	0.76	41.56	8.32	40.7	16.3	-
BS-20B	>100	0.128	19.10	0.012	12.98	0.12	25.2	0.6	23.05
BS-21C	>100	0.127	9.92	0.0086	21.61	0.10	25.0	0.3	23.44

หมายเหตุ “-” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ

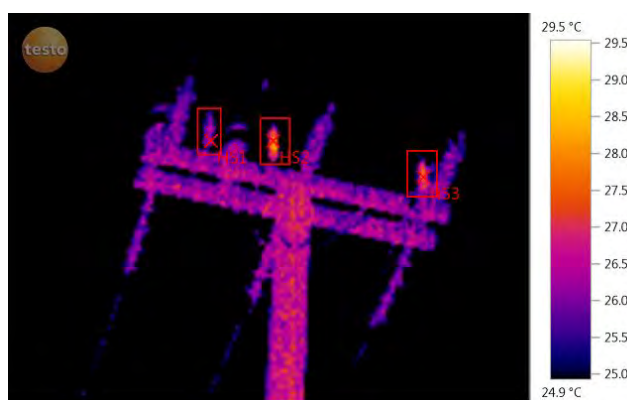




รูปที่ 6.7 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จBS-19A

### 6.1.4 กรณีตัวอย่างที่ 4 (อ.บางแสน จ.ชลบุรี)

ในฝั่งตรงกันข้ามกันของเชิงสะพานในกรณีตัวอย่างที่ 3 พบว่าในเฟส B (กลาง) และเฟส C (ขวา) มีกับดักเสิร์จที่ติดตั้งป้องกันสายมีอุณหภูมิสูงผิดปกติเล็กน้อย โดยมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแวดล้อม ( $\Delta T_1$ ) ประมาณ  $2.6^{\circ}\text{C}$  และ  $2.3^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ในรูปที่ 6.8 แสดงภาพถ่ายความร้อนที่ได้จากภาคสนาม กับดักเสิร์จทั้ง 3 เฟส เป็นผลิตภัณฑ์ A ขนาดพิกัด 21 kV, 5 kA รุ่นปัจจุบัน และมีสภาพภายนอกปกติโดยผลการทดสอบทางไฟฟ้าสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 6.4 ในรูปที่ 6.9 และ 6.10 แสดงกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จในเฟส B (BS-23B) และเฟส C (BS-24C) ตามลำดับ



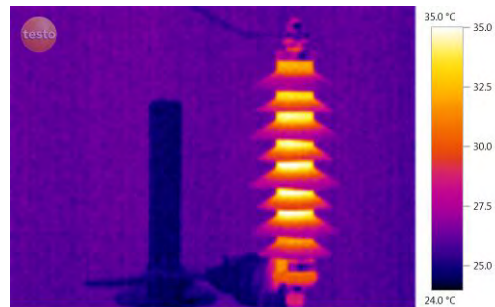
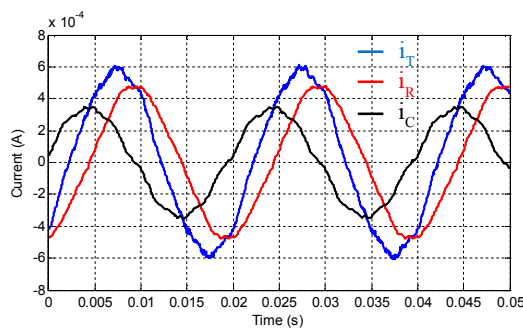
จุดที่วัด	Ambient	เฟส A	เฟส B	เฟส C
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25.8	26.5	28.4	28.1
$\Delta T_1$	Ref.	0.7	2.6	2.3
$\Delta T_2$	-	Ref.	1.9	1.6

รูปที่ 6.8 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 4

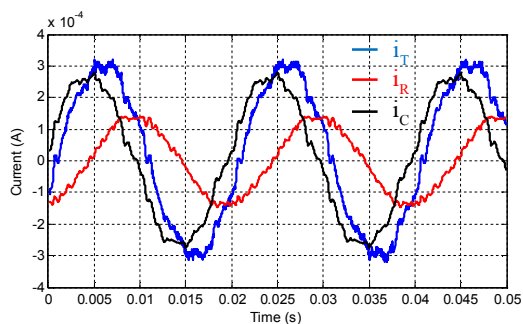
ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเล็รจ์ของกรณีตัวอย่างที่4

ตัวอย่าง	R (GΩ)	I <sub>T</sub> (mA)	%I <sub>r, pk</sub> / I <sub>c, pk</sub> ที่แรงดันระบบ	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, 3rd</sub> / I <sub>r</sub> ที่แรงดันระบบ	Power (W)	Temp (°C)	ΔT (°C)	V <sub>ref</sub> (kV)
BS-22A	>100	0.163	5.92	0.014	16.9	0.17	24.3	0.0	22.28
BS-23B	0.175	0.408	163.29	0.331	3.46	4.20	34.5	9.9	18.44
BS-24C	0.85	0.214	49.83	0.099	2.87	1.25	27.9	3.6	21.13

ในตารางที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างกับดักเล็รจ์เฟส A มีสภาพปกติ โดยมีค่าความต้านทานสูงกว่า 100 GΩ แต่ตัวอย่างเฟส B และ C นั้นวัดค่าความต้านทานได้เพียง 175 MΩ และ 850 MΩ ตามลำดับ จึงปริมาณกระแสรั่วและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงกว่าปกติ และมีแรงดันอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า 5% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของตัวอย่างเฟส A เมื่อพิจารณาผลทดสอบและรูปคลื่นกระแสรั่วคาดว่ากรณีนี้ เกิดจากปัญหาด้านความถี่ ของกับดักเล็รจ์ เช่นเดียวกับกรณีตัวอย่างที่ 1 แต่มีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากกับดักเล็รจ์ที่ 3 ตัวนี้ ผลิตซี่ นมาในช่วงเวลาเดียวกันแสดงว่าเมื่อมีความถี่ นเข้าไปภายในกับดักเล็รจ์สามารถทำให้ค่าความต้านทานลดลงจากมากกว่า 100 GΩ จนเหลือไม่ถึง 1 GΩ ได้



รูปที่ 6.9 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็รจ์BS-23B



รูปที่ 6.10 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็รจ์BS-24C

### 6.1.5 กรณีตัวอย่างที่ 5 (อ.พระพุทธรบาท จ.สระบุรี)

สำรวจพบตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ ๓ เฟส เป็นกับดักเสิร์จติดตั้งเพื่อป้องกันสายจำหน่ายไฟฟ้า อยู่บริเวณตรงข้ามโรงงานโมหิน ดังแสดงในรูปที่ 6.11 กับดักเสิร์จมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแวดล้อม ( $\Delta T_1$ ) ประมาณ 8.5 °C, 11 °C และ 3 °C ตามลำดับเฟส A, B และ C โดยตัวอย่างเฟส B มีอุณหภูมิสูงที่สุดประมาณ 38.6 °C



จุดที่วัด	Ambient	เฟส A	เฟส B	เฟส C
อุณหภูมิ (°C)	26.8	35.3	38.6	29.8
$\Delta T_1$	Ref.	8.5	11.8	3.0
$\Delta T_2$	-	5.5	8.8	Ref.

รูปที่ 6.11 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 5

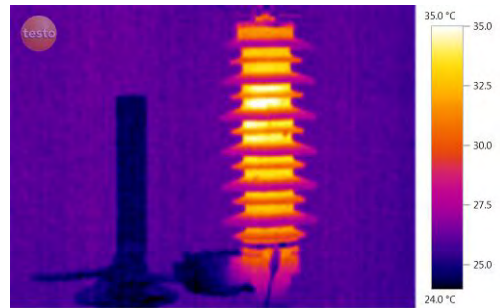
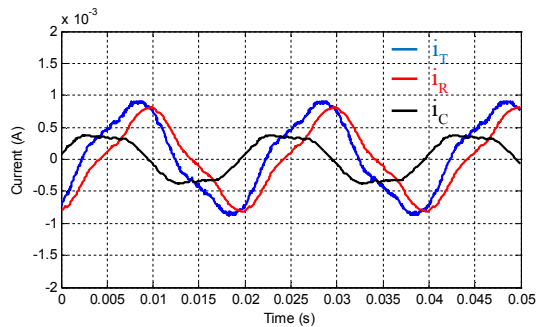
ตัวอย่างที่ ๓ ตัว เป็นกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ K ขนาด 21 kV, 10 kA เช่นเดียวกับกรณีตัวอย่างที่ 2 และพบว่ามีอาการชำรุดเสียหายของเปลือกโพลีเมอร์ในลักษณะเดียวกัน แต่บางจุดมีรอยแตกรุนแรงเข้าไปถึงด้านในของกับดักเสิร์จ เมื่อนำมาทดสอบก็ให้ผลตามตารางที่ 6.5 รูปที่ 6.12 – รูปที่ 6.14 แสดงกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของกับดักเสิร์จที่ ๓ เฟส ตามลำดับ

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 5

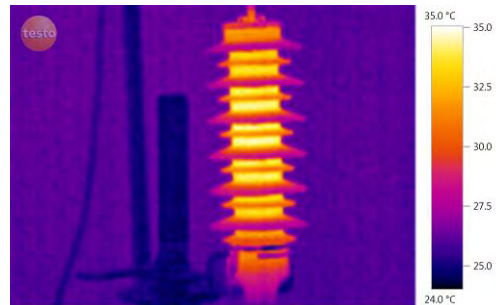
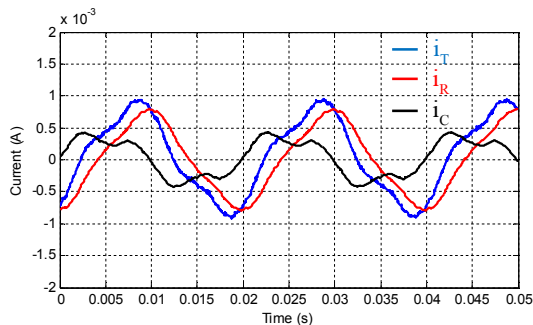
ตัวอย่าง	R (G $\Omega$ )	I <sub>T</sub> (mA)	%I <sub>r, pk</sub> /I <sub>c, pk</sub> ที่แรงดันระบบ	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, 3rd</sub> /I <sub>r</sub> ที่แรงดันระบบ	Power (W)	Temp (°C)	$\Delta T$ (°C)	V <sub>ref</sub> (kV)
SR-9A	0.098	0.585	221.33	0.510	14.58	6.40	34.0	9.3	13.7
SR-10B	0.12	0.583	187.04	0.512	11.48	6.43	34.4	9.7	13.3
SR-11C (ช่วงเริ่มต้น)	0.0051	2.942	536.96	2.909	4.72	37.21	-	-	-

หมายเหตุ “-” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ

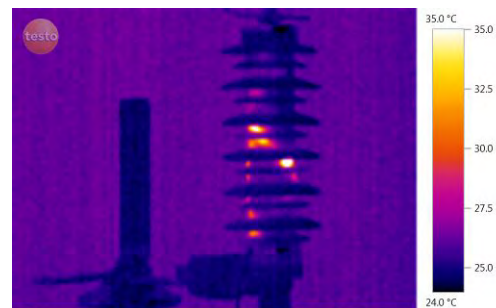
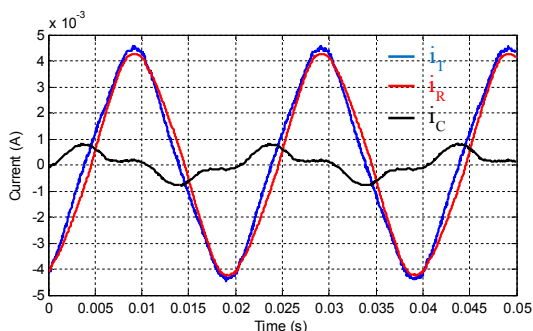
ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ 3 เฟส มีค่าความต้านทานต่ำ โดยเฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 98 M $\Omega$  และ 120 M $\Omega$  ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างเฟส C ซึ่งมีอุณหภูมิไม่สูงมาก ขณะสำรวจในภาคสนาม แต่กลับวัดค่าความต้านทานได้ต่ำมาก เพียง 51 M $\Omega$  เมื่อวิเคราะห์จากกระแสรั่วจะเห็นว่ากับดักเสิร์จทั้ง 3 ตัว เกิดการเสื่อมสภาพโดยเห็นได้จากปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานที่มีค่าสูงมาก โดยเฉพาะตัวอย่างในเฟส C (SR-11C) ซึ่งมีกระแสรั่วสูงมากซึ่งคาดว่าเกิดขึ้นจากปัญหาความชื้น ภายหลังจากที่ถอดเปลี่ยนมาจากระบบไฟฟ้า สำหรับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างเฟส A (SR-9A) และเฟส B (SR-10B) มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดได้ในภาคสนาม



รูปที่ 6.12 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จSR-9A



รูปที่ 6.13 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จSR-10B



รูปที่ 6.14 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จSR-11C (เริ่มต้นทดสอบ)

### 6.1.6 กรณีตัวอย่างที่ 6 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี)

สำรวจพบกับดักเสิร์จที่ติดตั้ง ป้องกันหม้อแปลง 1 เฟส ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมโดยกับดักเสิร์จที่ ๒ ตัว ในเฟส A (ด้านขวา) และเฟส C (ด้านซ้าย) มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแวดล้อม ( $\Delta T_1$ ) ไม่มากนัก ประมาณ  $1.7^{\circ}\text{C}$  และ  $3.6^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.15



จุดที่วัด	Ambient	เฟส C	เฟส B	เฟส A
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	24.9	28.5	-	26.6
$\Delta T_1$	Ref.	3.6	-	1.7
$\Delta T_2$	-	1.9	-	Ref.

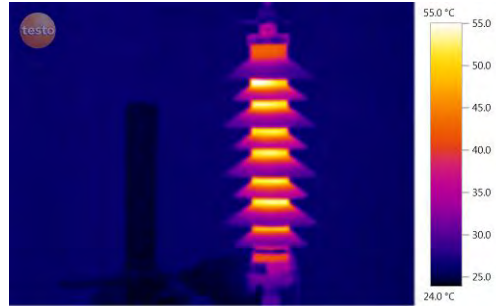
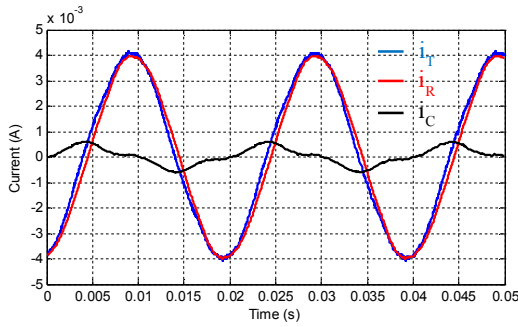
รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 6

ทั้งสองตัวเป็นกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ขนาดพิกัด 24 kV, 5 kA เป็นรุ่นใหม่และมีสภาพภายนอกปกติ ผลทดสอบตามตารางที่ 6.6 พบว่าทั้ง 2 ตัวอย่างมีค่าความต้านทานต่ำมาก โดยเฉพาะตัวอย่างเฟส A มีค่าเพียง  $28\text{ M}\Omega$  เมื่อทดสอบวัดกระแสรั่วที่แรงดันจึงมีกำลังสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงมากจนต้องยุติการทดสอบ แต่สำหรับตัวอย่างเฟส C สามารถทดสอบได้และมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากบริเวณแวดล้อมประมาณ  $2.7^{\circ}\text{C}$  เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสรั่วของทั้ง 2 ตัวอย่างในรูปที่ 6.16 และ 6.17 แสดงให้เห็นปัญหาเช่นเดียวกับกรณีตัวอย่างอื่น ๆ ของผลิตภัณฑ์ A ในรุ่นนี้ คือปัญหาจากความชื้น ซึ่งอาจทำให้กับดักเสิร์จเกิดการชำรุดเสียหายได้

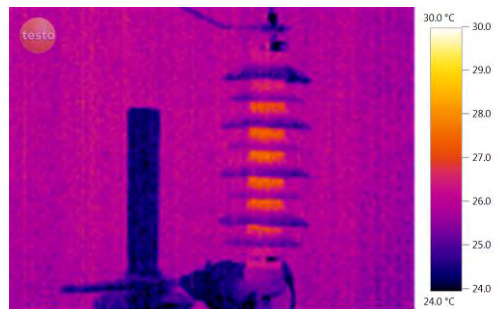
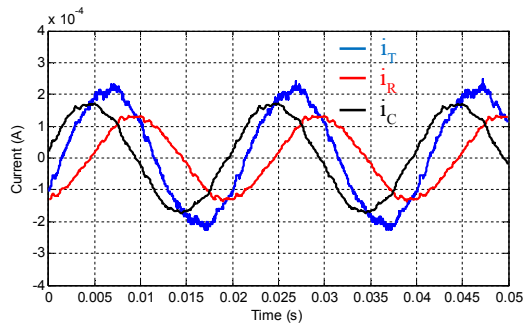
ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 6

ตัวอย่าง	R ( $\text{G}\Omega$ )	$I_T$ (mA)	$\%I_{r, pk}/I_{c, pk}$ ที่แรงดันระบบ	$I_r$ (mA)	$\%I_{r, 3rd}/I_r$ ที่แรงดันระบบ	Power (W)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$V_{ref}$ (kV)
CR-10A (30 นาที)	0.028	2.80	643.65	2.779	1.65	35.41	52.4	27.8	-
CR-11C	0.52	0.151	77.44	0.091	2.69	1.16	28.2	2.7	-

หมายเหตุ “ - ” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ



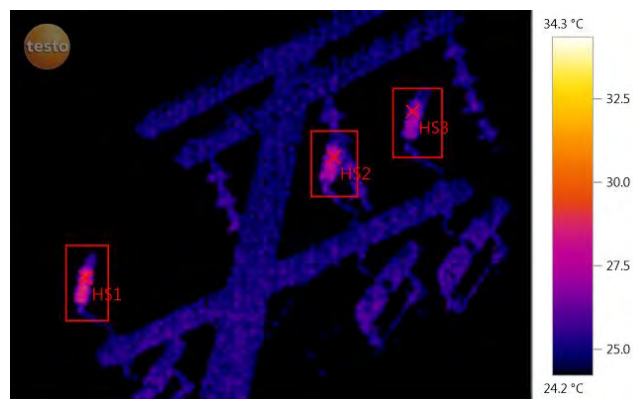
รูปที่ 6.16 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ CR-10A (30 นาที)



รูปที่ 6.17 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ CR-11C

### 6.1.7 กรณีตัวอย่างที่ 7 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี)

สำรวจพบกับดักเสิร์จที่ติดตั้งป้องกันหม้อแปลงจำหน่ายในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมีอุณหภูมิสูงผิดปกติที่ 8 เฟส แต่อยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนัก ตามภาพถ่ายความร้อนในรูปที่ 6.18



จุดที่วัด	Ambient	เฟส C	เฟส B	เฟส A
อุณหภูมิ (°C)	25.2	29.3	28.0	27.4
$\Delta T_1$	Ref.	4.1	2.8	2.2
$\Delta T_2$	-	1.9	0.6	Ref.

รูปที่ 6.18 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 7

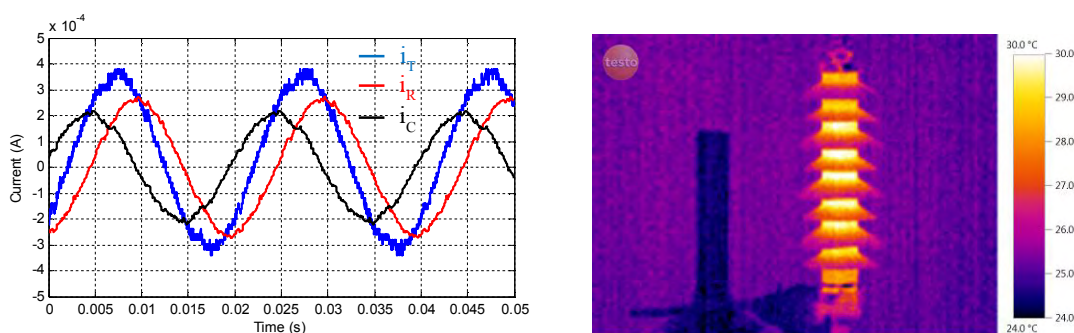
ในกรณีนี้ได้ถอดเปลี่ยนมาทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงสุดในเฟส C (CR-12C) เท่านั้น ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแวดล้อม ( $\Delta T_r$ ) ประมาณ  $4.1^\circ\text{C}$  โดยผลการทดสอบสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 7

ตัวอย่าง	R (G $\Omega$ )	I <sub>T</sub> (mA)	%I <sub>r, pk</sub> /I <sub>c, pk</sub> ที่แรงดันระบบ	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, 3rd</sub> /I <sub>r</sub> ที่แรงดันระบบ	Power (W)	T ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^\circ\text{C}$ )	V <sub>ref</sub> (kV)
CR-12C	0.25	0.237	125.73	0.183	1.48	2.32	29.8	5.2	-

หมายเหตุ “-” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ

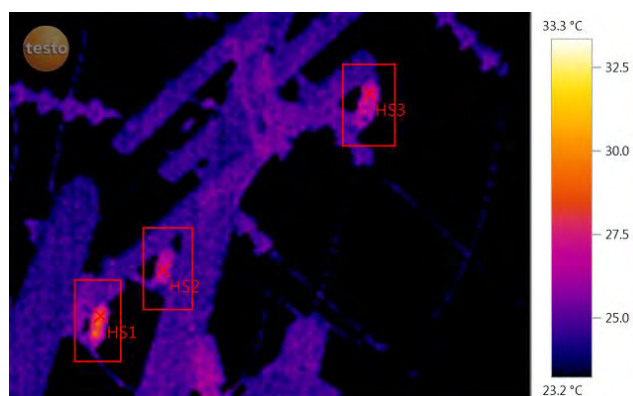
สำหรับตัวอย่าง CR-12C มีค่าความต้านทานต่ำประมาณ 250 M $\Omega$  และมีกระแสรั่วและกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่ากับดักเสิร์จปกติ โดยมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ  $5.2^\circ\text{C}$  ซึ่งมีความมากกว่าจากที่วัดได้ในภาคสนามไม่มากนัก ในรูปที่ 6.19 แสดงผลการวัดกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของกับดักเสิร์จ CR-12C จากข้อมูลผลการทดสอบกรณีนี้คาดว่าเกิดจากปัญหาด้านความชื้น เช่นเดียวกับตัวอย่างกับดักเสิร์จในกรณีตัวอย่างอื่น ๆ



รูปที่ 6.19 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ CR-12C

### 6.1.8 กรณีตัวอย่างที่ 8 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี)

สำรวจพบกับดักเสิร์จที่ติดตั้งป้องกันหม้อแปลงเคื่องมือวัด มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติทั้ง 3 เฟส ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของโรงงานภายในนิคมอุตสาหกรรม ดังแสดงในภาพถ่ายความร้อนรูปที่ 6.20 ทั้ง 3 ตัว เป็นกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ขนาดพิกัด 24 kV, 5 kA ในเบื้องต้นได้เลือกถอดเฉพาะในเฟส A (CR-13A) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดเพียงตัวเดียว โดยมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ( $\Delta T_r$ ) ประมาณ  $4.6^\circ\text{C}$



จุดที่วัด	Ambient	เฟส A	เฟส B	เฟส C
อุณหภูมิ (°C)	24.9	29.5	27.0	27.5
$\Delta T_1$	Ref.	4.6	2.1	2.6
$\Delta T_2$	-	2.5	Ref.	0.5

รูปที่ 6.20 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 8

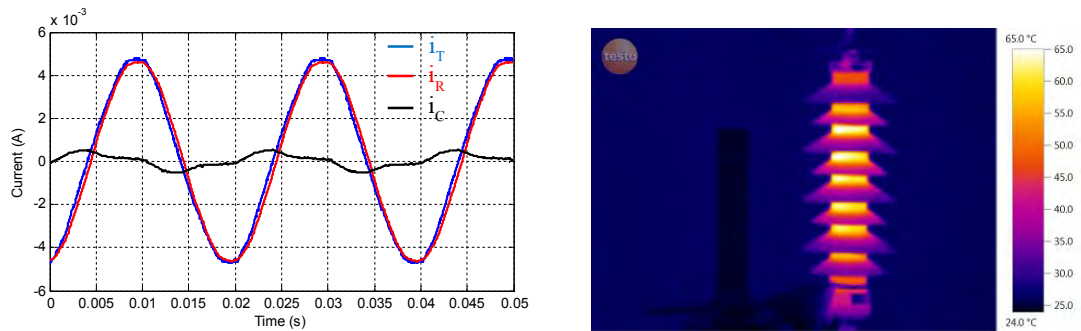
ผลการทดสอบในตารางที่ 6.8 พบว่ากับดักเล็รจ์มีค่าความต้านทานเพียง 52 M $\Omega$  เท่านั้นและไม่สามารถทดสอบจนอุณหภูมิคงที่ได้ เนื่องจากมีกระแสรั่วเชิงความต้านทาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูง ซึ่งตลอดเวลาโดยเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที มีค่าสูงถึง 3.3 mA และ 41.7 W ตามลำดับ จนมีอุณหภูมิมิบริเวณกลางลำตัวสูงถึง 61.6°C จึงต้องยุติการทดสอบ ในรูปที่ 6.21 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็รจ์ CR-13A เมื่อทำการทดสอบไปประมาณ 30 นาที สำหรับกรณีนี้ ปัญหาด้านความชื้น ยังคงเป็นต้นเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะภายหลังที่ถอดเปลี่ยนกับดักเล็รจ์ออกมา นั้นพบว่าปัญหามีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น จนไม่สามารถใช้งานหรือติดตั้งตัวอย่างเหล่านี้ เข้ากับแรงดันระบบปกติได้อีกต่อไป

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเล็รจ์ของกรณีตัวอย่างที่ 8

ตัวอย่าง	R (G $\Omega$ )	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, pk</sub> /I <sub>c, pk</sub> ที่แรงดันระบบ	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, 3rd</sub> /I <sub>r</sub> ที่แรงดันระบบ	Power (W)	T (°C)	$\Delta T$ (°C)	V <sub>ref</sub> (kV)
CR-13A (30 นาที)	0.052	4.80	852.22	3.308	0.58	41.70	61.6	36.3	-

หมายเหตุ “-” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ

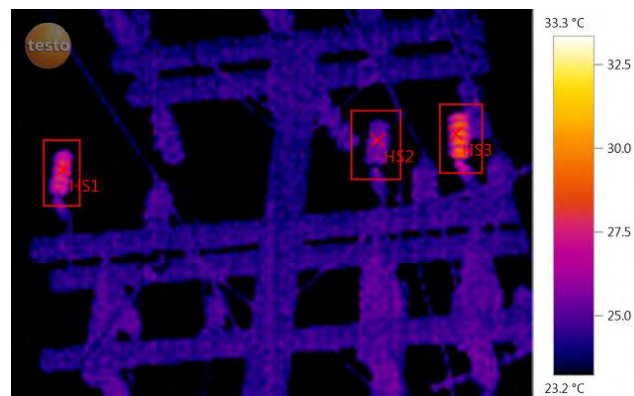




รูปที่ 6.21 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ CR-13A (30 นาที)

### 6.1.9 กรณีตัวอย่างที่ 9 (อ.เมืองฯ จ.ชลบุรี)

สำรวจพบกับดักเสิร์จชนิดไรเซอร์โพล (Riser pole) สำหรับป้องกันสายไลน์บริเวณหน้าสถานีไฟฟ้าบางประกง ในเฟส A (ด้านขวา) และ C (ด้านซ้าย) มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 6.22 โดยมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแวดล้อม ( $\Delta T_1$ ) ประมาณ  $3.7^{\circ}\text{C}$  และ  $5.2^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ สำหรับเฟส B ก็พบว่าเริ่มมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติแล้วเช่นกัน กรณีนี้ปลดกับดักเสิร์จออกมาเฉพาะตัวอย่างเฟส A และ C เท่านั้น โดยผลการทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 6.9



จุดที่วัด	Ambient	เฟส C	เฟส B	เฟส A
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	24.6	28.3	26.3	29.8
$\Delta T_1$	Ref.	3.7	1.7	5.2
$\Delta T_2$	-	2.0	Ref.	3.5

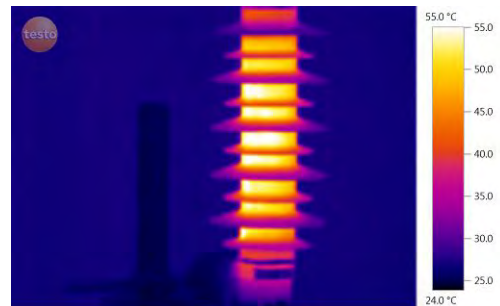
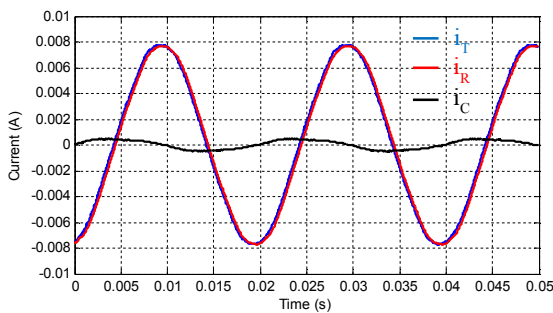
รูปที่ 6.22 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 9

ตัวอย่างทั้งสองเฟสเป็นกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ขนาดพิกัด 24 kV, 10 kA วัตต์ค่าความต้านทานได้ต่ำมากประมาณ 9 MΩ และ 14 MΩ ตามลำดับ ทำให้มีกระแสรั่วเชิงความต้านทาน และอุณหภูมิสูงขึ้น มากโดยไม่มีแนวโน้มคงที่ จึงต้องยุติการทดสอบลงทั้ง 2 ตัวอย่าง ในขณะที่เวลาประมาณ 30 นาที ตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 55.8°C และ 40.1°C ตามลำดับ และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียถึง 69.4 W และ 30.3 W รูปที่ 6.23 และ 6.24 แสดงรูปคลื่นของกระแสรั่วและภาพถ่ายความร้อนของทั้ง 2 ตัวอย่าง เป็นกรณีที่มีกระแสรั่วปริมาณสูงมากจากปัญหาด้านความชื้น

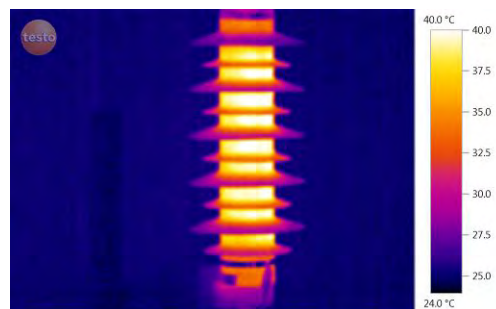
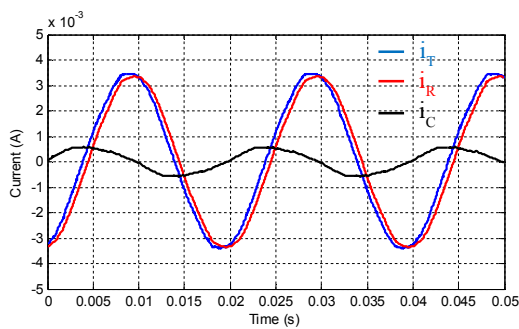
ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 9

ตัวอย่าง	R (GΩ)	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, pk</sub> /I <sub>c, pk</sub> ที่แรงดันระบบ	I <sub>r</sub> (mA)	%I <sub>r, 3rd</sub> /I <sub>r</sub> ที่แรงดันระบบ	Power (W)	T (°C)	ΔT (°C)	V <sub>ref</sub> (kV)
CR-14A (30 นาที)	0.090	5.471	1,550.10	5.46	1.15	69.40	55.8	30.8	-
CR-15C (30 นาที)	0.014	2.424	577.88	2.39	0.82	30.39	40.1	15.1	-

หมายเหตุ “-” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ



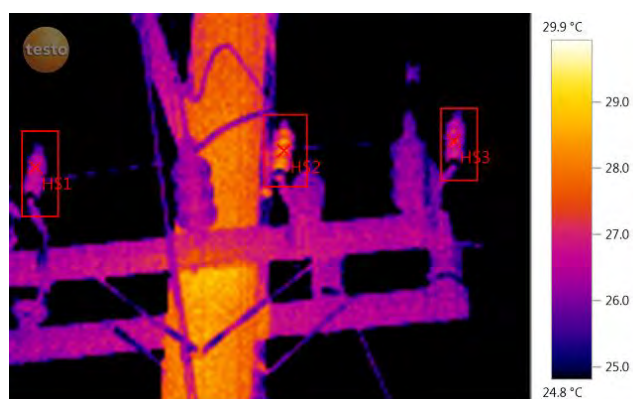
รูปที่ 6.23 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ CR-14A (30 นาที)



รูปที่ 6.24 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเสิร์จ CR-15C (30 นาที)

### 6.1.10 กรณีตัวอย่างที่ 10 (อ.ปลวกแดง จ.ระยอง)

ในพื้นที่ อ.ปลวกแดง พบตัวอย่างกับดักเสิร์จจำนวนมากมีอุณหภูมิสูงผิดปกติ แต่สามารถถอดเปลี่ยนมาทดสอบได้เพียงกรณีตัวอย่างเดียวเท่านั้น เป็นกับดักเสิร์จที่ติดตั้งเพื่อป้องกันสายไลน์ พบว่ากับดักเสิร์จเฟส B มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม และเฟสข้างเคียงประมาณ  $2.4^{\circ}\text{C}$  และ  $1.7^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.25



จุดที่วัด	Ambient	เฟส C	เฟส B	เฟส A
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	26.3	27	28.7	27.5
$\Delta T_1$	Ref.	0.7	2.4	1.2
$\Delta T_2$	-	Ref.	1.7	0.5

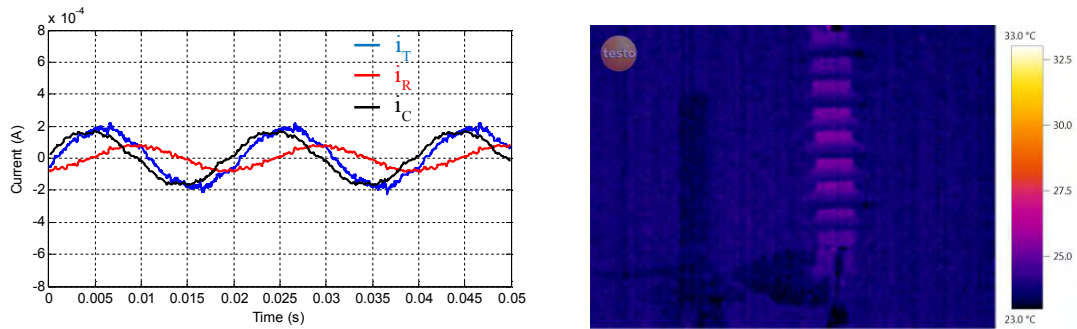
รูปที่ 6.25 ภาพถ่ายความร้อนในภาคสนามของกรณีตัวอย่างที่ 10

ตัวอย่างทั้ง 3 เฟส เป็นกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ขนาดพิกัด 24 kV, 5 kA มีสภาพภายนอกปกติ ผลการทดสอบสรุปได้ตามตารางที่ 6.10 พบว่ามีค่าความต้านทานอยู่ในระดับต่ำทั้ง 3 ตัว คือ  $1.1\text{ G}\Omega$ ,  $180\text{ M}\Omega$  และ  $500\text{ M}\Omega$  ตามลำดับ โดยตัวอย่างเฟส B (กลาง) มีค่าความต้านทานต่ำที่สุด สอดคล้องกับอุณหภูมิที่วัดได้ในภาคสนาม ในรูปที่ 6.26 - รูปที่ 6.28 แสดงรูปคลื่นกระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนขณะทดสอบของตัวอย่างทั้งสามตัว

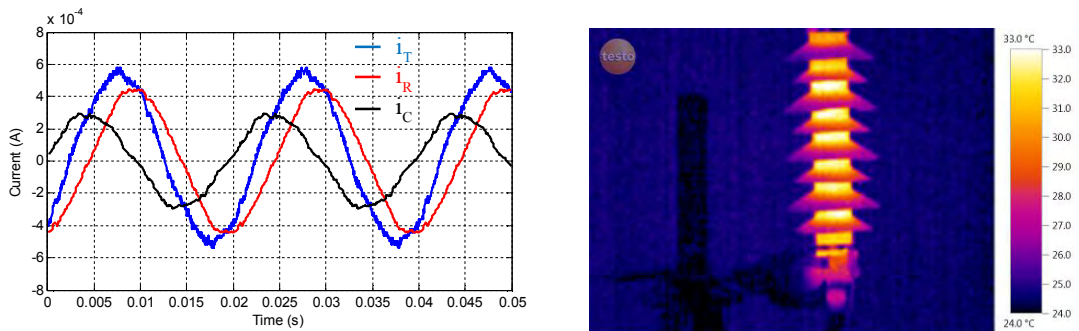
ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จของกรณีตัวอย่างที่ 10

ตัวอย่าง	R ( $\text{G}\Omega$ )	$I_T$ (mA)	$\%I_{r, pk} / I_{c, pk}$ ที่แรงดันระบบ	$I_r$ (mA)	$\%I_{r, 3rd} / I_r$ ที่แรงดันระบบ	Power (W)	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$V_{ref}$ (kV)
PD-4A	1.1	0.129	48.15	0.055	3.73	0.69	25.4	1.4	-
PD-5B	0.18	0.372	150.25	0.311	2.52	3.96	32.5	8.5	-
PD-6C	0.5	0.157	73.92	0.091	2.20	1.15	26.9	2.3	-

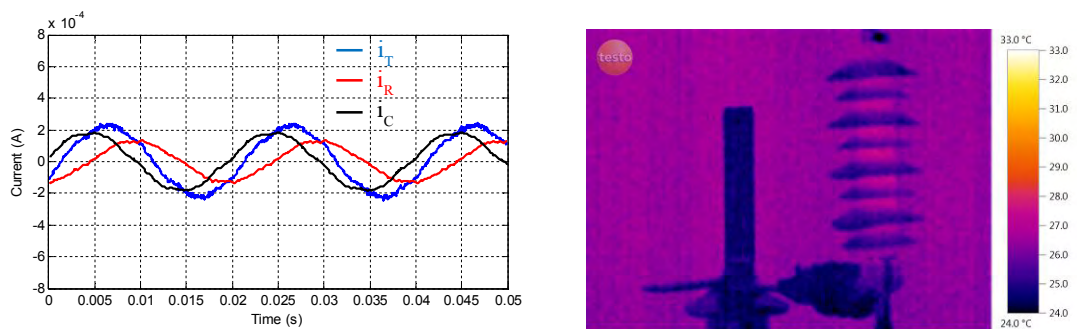
หมายเหตุ “ - ” หมายถึงไม่ได้ทดสอบ



รูปที่ 6.26 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็รจPD-4A



รูปที่ 6.27 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็รจPD-5B



รูปที่ 6.28 กระแสรั่ว และภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างกับดักเล็รจPD-6C

จากผลการทดสอบจะเห็นว่านอกจากตัวอย่างเฟส B แล้ว อีก 2 เฟส ที่เหลือก็เริ่มมีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงกว่าปกติ

## 6.2 แนวทางการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

จากผลการทดสอบตัวอย่างที่สุ่มเก็บมาจากพื้นที่ต่าง ๆ เห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทาน กระแสรั่วเชิงความต้านทานและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 ซึ่งแสดงถึงสภาพหรือความผิดปกติของกับดักเสิร์จโดยตรง นอกจากนี้ ผลการสำรวจและหารทดสอบตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติในหัวข้อที่ 6.1 เห็นได้ว่ากล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนสามารถใช้ตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ได้ จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับสภาพของกับดักเสิร์จและปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในเบื้องต้น เพื่อนำไปใช้กำหนดแนวทางการใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนของผู้ปฏิบัติงานในภาคสนามได้ดังนี้

### 6.2.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิวกับสภาพของกับดักเสิร์จ

ผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดสามารถสรุปความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิวกับสภาพของกับดักเสิร์จและปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาได้ดังนี้

1) อุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนมีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานหรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกับดักเสิร์จแต่ละตัวโดยตรง และไม่ได้รับผลกระทบจากกระแสไหลเหมือนกับอุณหภูมิของจุดต่อต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้า แต่อาจได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากกว่า ดังนั้น การประเมินสภาพของกับดักเสิร์จจึงควรให้ความสำคัญกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิแวดล้อมเป็นอันดับแรก มากกว่าความแตกต่างกับเฟสข้างเคียงเหมือนวิธีการพิจารณาที่ใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ

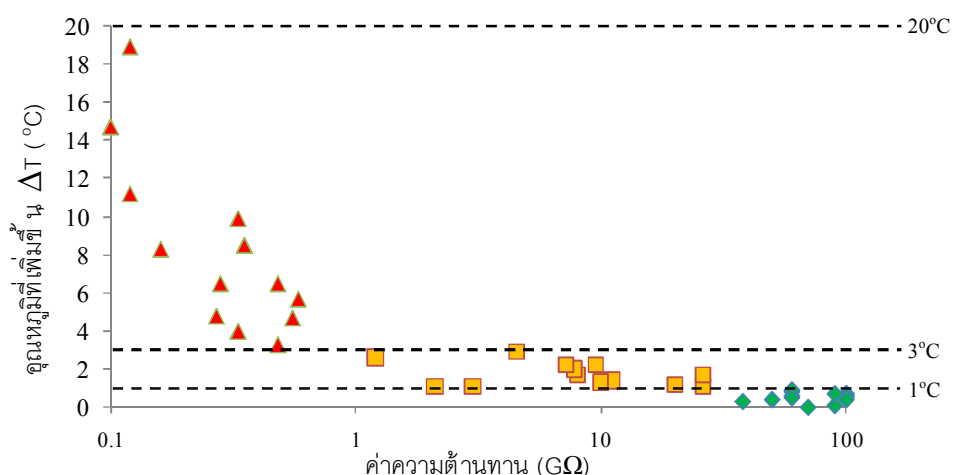
2) อุณหภูมิที่ผิวแสดงถึงสภาพภายในของกับดักเสิร์จและความรุนแรงของความเสื่อมสภาพได้จากกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้น แต่อาจไม่แสดงถึงความแตกต่างของสาเหตุของปัญหาได้ เช่น การเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO หรือปัญหาความชื้น ภายในกับดักเสิร์จอย่างไรก็ตามสามารถใช้การพิจารณาร่วมกับการทดสอบอื่น ๆ เช่น การทดสอบวัดกระแสรั่ว หรือกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ประกอบกัน

3) การเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO หรือปัญหาจากความชื้น ภายในทำให้ปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานและกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิแวดล้อมอาจมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับพิกัดกระแสและการออกแบบของแต่ละผลิตภัณฑ์ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดชนิดและขนาดของบล็อก ZnO และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากับดักเสิร์จที่มีขนาดลำตัวใหญ่ เช่น กับดักเสิร์จพิกัดกระแส 10 kA จะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น น้อยกว่ากับดักเสิร์จขนาด kA ที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากันเป็นต้น

4) จากผลการทดสอบตัวอย่างต่าง ๆ พบว่ากับดักเสิร์จทุกผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งระบบ 22 kV และ 33 kV ขนาดกระแสพิกัด 5 kA ที่ติดตั้งในบริเวณแวดล้อมอุณหภูมิ  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  และไม่มีลมพัดแรง ในสภาพปกติจะมีอุณหภูมิที่ผิวสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน ( $\Delta T$ , Temp Rise)  $1^\circ\text{C}$  แต่อาจแตกต่างกันบ้างในแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยส่วนใหญ่จะต่ำกว่า  $0.5^\circ\text{C}$  ซึ่งนำมาใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาเกี่ยวกับดักเสิร์จที่เริ่มเกิดความเสื่อมสภาพ หรือชำรุดเสียหาย

5) ความสัมพันธ์ของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) กับความคงทนต่อการใช้งานกับดักเสิร์จขณะรับแรงดันปกติอาจนำมาใช้เป็นตัวกำหนดความรุนแรงของปัญหาจากระดับของอุณหภูมิที่วัดได้ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพทางความร้อนของกับดักเสิร์จ และปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ ในเบื้องต้นพบว่าคุณลักษณะทางความร้อน และความเสียหายที่เกิดขึ้น อาจมีความแตกต่างกันไปตามสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา เช่น เกิดจากการเสื่อมสภาพของฟิล์ม ZnO หรือเกิดจากปัญหาด้านความชื้น โดยการเปลี่ยนแปลงของ V-I Characteristic ในช่วงกระแสต่ำจากการเสื่อมสภาพ จะทำให้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับกระแสรั่วเชิงความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น การศึกษาเพื่อกำหนดเกณฑ์หรือระดับอุณหภูมิที่ใช้ประเมินนี้ กระทำได้ค่อนข้างยาก และซับซ้อน อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปเกณฑ์การพิจารณาระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ด้บความรุนแรงของความเสื่อมสภาพสำหรับกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ขนาดกระแสพิกัด 5 kA โดยประเมินจากผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดได้ดังนี้

- ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เกิดความเสื่อมสภาพจากปัญหาความชื้น เข้าไปภายในพบว่า มีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ( $\Delta T$ , Temp Rise) มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของกับดักเสิร์จที่วัดได้จากเมกเกอร์  $5 \text{ kV}_{\text{dc}}$  ดังแสดงในรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กับค่าความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีความชื้น เข้าไปภายใน

จากรูปที่ 6.29 สามารถแบ่งระดับของความรุนแรงจากปัญหาความชื้น ให้สอดคล้องกับค่าความต้านทานและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ใต้ตามตารางที่ 6.11 โดยกับดักเสิร์จที่มีสภาพปกติหรือเริ่มเกิดความผิดปกติจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นไม่เกิน  $1^{\circ}\text{C}$  สำหรับกับดักเสิร์จที่เกิดความเสื่อมสภาพมากจนเกิดความเสียหายและไม่สามารถรับแรงดันปกติได้อาจมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า  $20^{\circ}\text{C}$  ดังเช่นตัวอย่างที่มีความต้านทานต่ำกว่า  $100\text{ M}\Omega$  ซึ่งไม่สามารถทำการทดสอบที่แรงดันระบบได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกับดักเสิร์จมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 6.11 ระดับความรุนแรงของความเสื่อมสภาพจากปัญหาความชื้น ภายในกับดักเสิร์จ

สภาพกับดักเสิร์จ	ปกติ (ใหม่)	ระดับความเสื่อมสภาพจากความชื้น ภายใน			เสียหาย
		เริ่มผิดปกติ	น้อย	มาก	
ค่าความต้านทาน ( $G\Omega$ )	>100	30-100	1-30	< 1	< 0.1
อุณหภูมิที่สูงขึ้น ( $\Delta T, ^{\circ}\text{C}$ )	< 1	< 1	1 - 3	3 - 20	> 20

- ตัวอย่างกับดักเสิร์จที่บิล็อค ZnO เกิดความเสื่อมสภาพจำนวน 3 ตัวอย่างพบว่าทั้งหมดมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  โดยขนาดของกระแสรั่วเชิงความต้านทานและอุณหภูมิสามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างมากเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความเสื่อมสภาพลักษณะนี้ ค่อนข้างเสี่ยงต่อการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนของกับดักเสิร์จ และจัดเป็นความเสื่อมสภาพในระดับมาก สอดคล้องกับผลการพิจารณาตัวอย่างที่มีความเสื่อมสภาพจากความชื้น ภายในใตตามตารางที่ 6.11 ดังนั้นในเบื้องต้นอาจใช้เกณฑ์ดังกล่าวนี้ ประเมินระดับความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$  สำหรับที่อุณหภูมิแวดล้อมอื่น ๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากนี้ได้ ซึ่งอาจทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดตัวประกอบในการแก้ไขค่า (Correction factor) ต่อไป

6) ความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่สำคัญ โดยคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ เช่น ระยะทางที่ใช้วัด ความสามารถของกล้องถ่ายภาพความร้อน และการกำหนดค่า Emissivity ในหัวข้อถัดไปได้ นำเสนอผลการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยเหล่านี้ สำหรับผลกระทบของสภาพแวดล้อมก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรนำมาพิจารณา เช่น อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิที่สะท้อนจากบริเวณรอบข้าง (Reflected Temp) และความเร็วลมที่พัดผ่านกับดักเสิร์จ อย่างไรก็ตามในกล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีความสามารถสูงสามารถตั้งค่าชดเชยจากผลกระทบของปัจจัยแวดล้อมเหล่านี้ได้

## 6.2.2 ความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิของกั๊บดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 6.1 พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ( $\Delta T$ ) ของกั๊บดักเสิร์จทั้งหมดที่วัดได้ในภาคสนามมีค่าต่ำกว่าผลทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากตัวอย่างมีความเสื่อมสภาพจากความชื้นภายในพื้้มมากขึ้น แต่บางส่วนก็เป็นผลโดยตรงจากความคลาดเคลื่อนของการวัดอุณหภูมิในภาคสนาม โดยเฉพาะระยะห่างในการถ่ายภาพความร้อน เห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีตัวอย่างที่ 3 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติจากการเสื่อมสภาพของ ZnO Block และถ่ายภาพความร้อนจากจุดที่มีระยะห่างค่อนข้างไกลจากกั๊บดักเสิร์จ

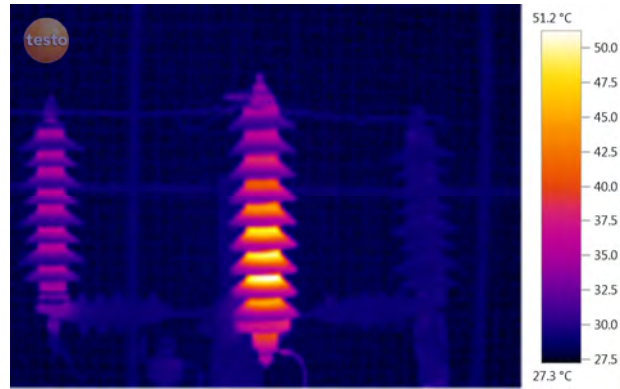
ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของระยะห่างของจุดที่ถ่ายภาพความร้อนกับอุณหภูมิของกั๊บดักเสิร์จที่วัดได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของวัตถุหรือจุดร้อน (Hot spot) และความสามารถของกล้องถ่ายภาพความร้อน จึงได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิที่ผิวของกั๊บดักเสิร์จขนาด 21 kV, 5 kA จำนวน 3 ตัวอย่าง พร้อมกัน ในการทดสอบกำหนดให้วัดที่ระยะห่างตั้งแต่ 1 - 20 เมตร (ปรับเพิ่มครั้งละ 1 เมตร) โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใส่เลนส์ปกติ (Standard lens) และเลนส์เทเล (Tele photo lens) ซึ่งทำให้คุณสมบัติในการรับภาพหรือรังสีอินฟราเรดของกล้องถ่ายภาพความร้อนแตกต่างกัน ตามตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 คุณสมบัติการรับภาพของกล้องถ่ายภาพความร้อนทั้ง 2 ชุด

คุณสมบัติ	กล้องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน)	กล้องชุดที่ 2 (เลนส์เทเล)
จำนวน Detector	160 x 120	160 x 120
FOV	32°x24°	12°x9°
IFOV	3.5 mRad	1.3 mRad
Accuracy	±2 °C	±2 °C

ขณะทดสอบมีอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 29.0 °C ในรูปที่ 6.30 แสดงภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างทั้ง 3 ตัว ที่ระยะ 1 เมตร ด้วยกล้องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน) วัดอุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างตัวที่ 1 (ด้านซ้าย) ได้ประมาณ 35.8 °C ตัวอย่างตัวที่ 2 (ตรงกลาง) ประมาณ 51.3 °C และตัวอย่างตัวที่ 3 (ด้านขวา) ประมาณ 29.9 °C โดยตัวอย่างตัวที่ 1 เป็นกั๊บดักเสิร์จที่เกิดความเสื่อมสภาพจากความชื้นภายใน ตัวที่ 2 เกิดความเสื่อมสภาพจากบด็อค ZnO สำหรับตัวอย่างที่ 3 เป็นกั๊บดักเสิร์จที่ยังมีสภาพปกติ

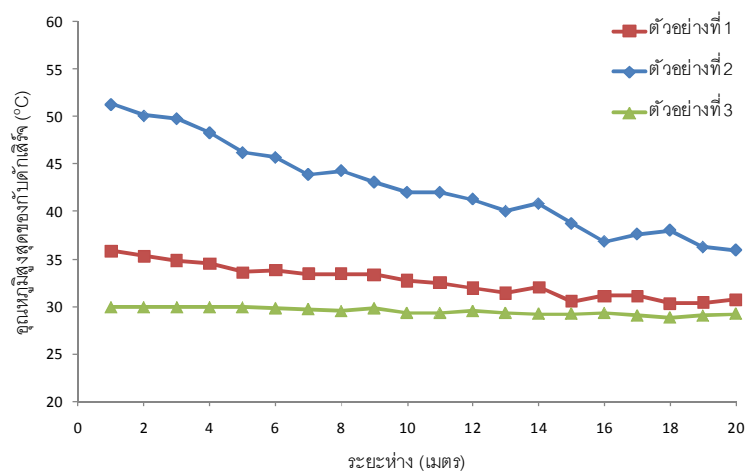




รูปที่ 6.30 ภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างทั้ง 3 ตัว ที่ระยะ 1 เมตร จากกล้องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน)

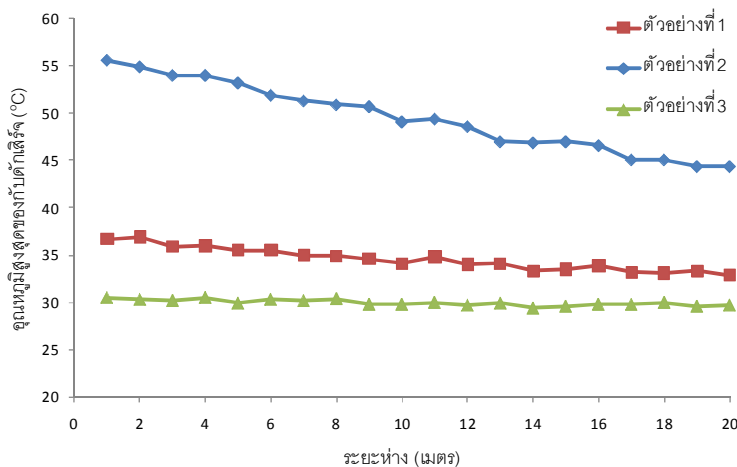
#### 6.2.2.1 ผลกระทบของระยะห่างในการวัด

ในรูปที่ 6.31 และ 6.32 แสดงผลการวัดอุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างกับดักเลิ์จทั้ง 3 ตัว ซึ่งวัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนทั้ง 2 ชุด ที่ระยะต่าง ๆ กันตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่า เมื่อระยะห่างมากขึ้น อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จะลดลง โดยตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณ แวดล้อมมากจะมีสัดส่วนการลดลงที่สูงกว่า ผลการทดสอบด้วยกล้องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน, IFOV 3.5 mrad) ที่ระยะ 20 เมตร พบว่าตัวอย่างที่ 2 มีอุณหภูมิลดเคลื่อนมากที่สุดถึง 30.02% โดยมีอุณหภูมิสูงสุดลดลงจากการวัดที่ตำแหน่ง 1 เมตร ประมาณ  $15.4^{\circ}\text{C}$  เหลือเพียง  $35.9^{\circ}\text{C}$  รองลงมาคือตัวอย่างที่ 2 และ 3 โดยมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 14.25% ( $5.1^{\circ}\text{C}$ ) และ 2.34% ( $0.7^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ



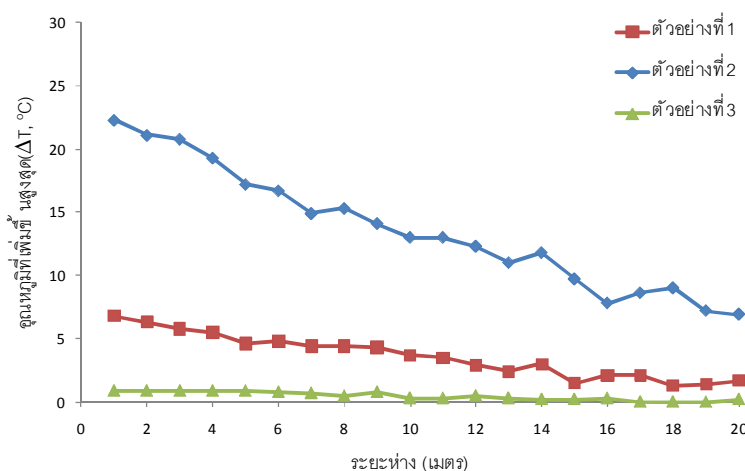
รูปที่ 6.31 อุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างทั้ง 3 ตัว เมื่อวัดด้วย กล้องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน, IFOV 3.5 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ

สำหรับผลการวัดด้วยกล้องชุดที่ 2 (เลนส์เทเล, IFOV 1.3 mrad) ที่ระยะ 20 เมตร พบว่าตัวอย่างที่ 2 มีอุณหภูมิคลาดเคลื่อนมากที่สุดเช่นกันประมาณ 20.14% โดยมีอุณหภูมิสูงสุดลดลงจากการวัดที่ตำแหน่ง 1 เมตร ประมาณ 11.2 °C เหลือประมาณ 44.4 °C รองลงมาคือ ตัวอย่างที่ 2 และ 3 มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10.35% (3.8 °C) และ 2.62% (0.8 °C) ตามลำดับ

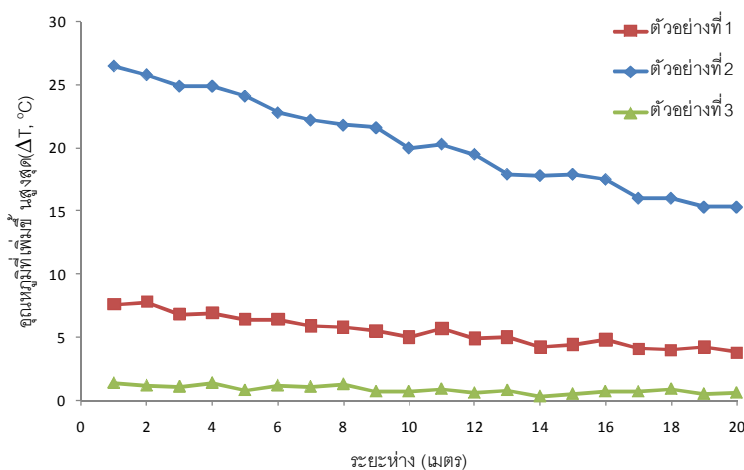


รูปที่ 6.32 อุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างที่ 3 ตัว เมื่อวัดด้วยกล้องชุดที่ 2 (เลนส์เทเล, IFOV 1.3 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ

สำหรับในรูปที่ 6.33 และ 6.34 แสดงให้เห็นผลของระยะห่างในการวัดกับความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิกับดักเสิร์จที่สูงขึ้น จากอุณหภูมิแวดล้อมของตัวอย่างที่ 3 ตัว เมื่อวัดด้วยกล้องทั้ง 2 ชุด ตามลำดับ



รูปที่ 6.33 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดจากบริเวณแวดล้อม ( $\Delta T$ ) ของตัวอย่างที่ 3 ตัว เมื่อวัดด้วยกล้องชุดที่ 1 (เลนส์มาตรฐาน, IFOV 3.5 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ



รูปที่ 6.34 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สูงสุดจากบริเวณแวดล้อม( $\Delta T$ ) ของตัวอย่างที่ 3 ตัว เมื่อวัดด้วยกล้องชุดที่ 2 (เลนส์เทเล, IFOV 1.3 mrad) ที่ระยะต่าง ๆ

จากรูปด้านบนจะเห็นว่าความแตกต่างจากอุณหภูมิแวดล้อม( $\Delta T$ ) ก็จะมีค่าลดลงไปด้วยเช่นกันเมื่อวัดที่ระยะห่างมากขึ้น ดังนั้นในกรณีที่วัดไกลมาอาจเห็นว่กับดักเสิร์จเกิดความเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงขึ้ นไม่มากนัก ดังเช่น หากวัดอุณหภูมิของตัวอย่างที่ 1 ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนชุดที่ 1 ที่ระยะตั้งแต่ 15 เมตร ขึ้ นไปตามรูปที่ 6.33 จะเห็นว่ามีอุณหภูมิสูงขึ้ นน้อยกว่า  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งหากประเมินตามเกณฑ์การพิจารณาในตารางที่ 6.11 ก็อาจทำให้เข้าใจว่กับดักเสิร์จมีการเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และอาจทำให้การวางแผนบำรุงรักษาหรือถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จเกิดความผิดพลาดขึ้ นได้

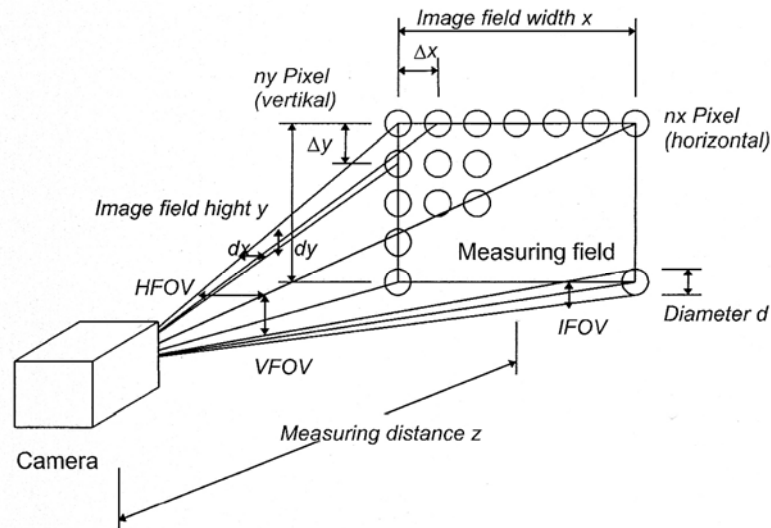
#### 6.2.2.2 ผลกระทบจากความสามารถของกล้องถ่ายภาพความร้อน

ความสามารถของกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ และสัมพันธ์กับการกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมในการวัดโดยตรง โดยคุณสมบัติที่สำคัญของกล้องถ่ายภาพความร้อน คือ ความละเอียดหรือจำนวนของตัวตรวจจ้งรังสีอินฟราเรด (Detector) กับมุมในการรับภาพ (Field of view, FOV) ทั้ง 2 ปัจจัยนี้เป็นตัวกำหนดขนาดของวัตถุหรือจุดร้อนที่เหมาะสมในการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนแต่ละตัวหรือเรียกว่า IFOV<sub>mea</sub> โดยปกติกำหนดให้มีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของขนาดส่วนย่อยของมุมรับภาพ (IFOV) เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่วัดได้จากกล้องที่ ๒ ชุด พบว่กล้องที่มีค่า IFOV น้อยกว่า หรือกล้องชุดที่ 2 (IFOV 1.3 mrad) จะมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ ณ ตำแหน่งเดียวกัน หรือที่ระยะห่างเท่ากันน้อยกว่ากล้องชุดที่ 1 (IFOV 3.5 mrad) ซึ่งมีค่า IFOV มากกว่า ผลการทดสอบที่ได้สามารถอธิบายได้ดังนี้

ในรูปที่ 6.35 แสดงวัตถุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) เท่ากับ  $d$  ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่า IFOV ของกล้องถ่ายภาพความร้อนและระยะห่างในการวัด โดยสามารถประมาณได้ตามสมการที่ 6.1

$$d \approx \text{IFOV} \cdot z \quad (6.1)$$

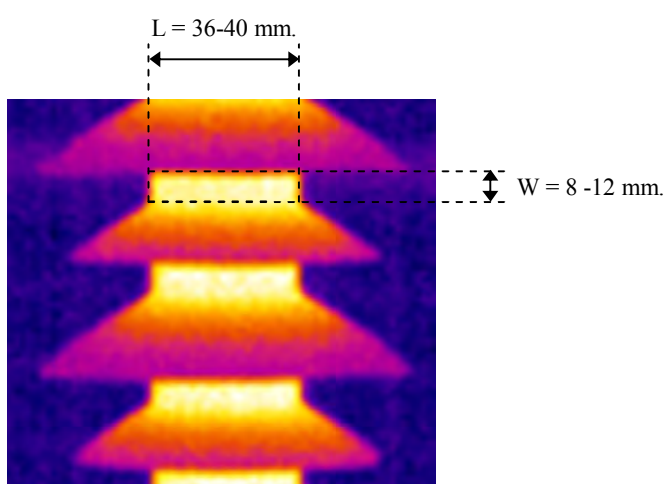
- เมื่อ  $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุในช่วงมุมรับภาพย่อย IFOV (มิลลิเมตร)  
 $z$  คือ ระยะห่างในการวัดอุณหภูมิ(เมตร)  
 IFOV คือ ส่วนประกอบย่อยของมุมรับภาพของกล้องอินฟราเรด (มิลลิเรเดียน)



รูปที่ 6.35 การกำหนดวัตถุจากค่า IFOV ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $d$

จากรูปที่ 6.35 ถ้าระยะห่างในการวัดไกลมากจนทำให้ขนาดพื้นที่ของจุดร้อนบนตัวกับดักเล็กรมีขนาดเล็กกว่าขนาดวัตถุ  $d$  (ในทางปฏิบัติกำหนดให้อย่างน้อยเท่ากับ  $3d$ ) จะส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดที่ตีเทคเตอร์ตรวจจับได้มีค่าลดลงเนื่องจากการเฉลี่ยอุณหภูมิบริเวณใกล้เคียงหรืออุณหภูมิพื้นหลังที่มีค่าต่ำกว่ารวมเข้าไปด้วย ดังนั้น ยิ่งระยะห่างมากขึ้น อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ก็จะลดลงและเข้าใกล้อุณหภูมิพื้นหลังขึ้นเรื่อยๆ สำหรับกล้องที่มีค่า IFOV น้อยกว่าที่ระยะห่างเท่ากัน จะมีขนาดวัตถุ  $d$  น้อยกว่าด้วยเช่นกัน จึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น น้อยกว่า

เนื่องจากกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพจะมีอุณหภูมิที่ผิวสูงสุดอยู่ในพื้นที่บริเวณลำตัวของกับดักเสิร์จ สำหรับในบริเวณส่วนครีบจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าตามคุณสมบัติการกระจายความร้อน ดังนั้นการกำหนดขนาดของวัตถุสำหรับกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อให้สามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดได้อย่างถูกต้อง จึงควรพิจารณาให้เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวเท่ากับขนาดลำตัวของกับดักเสิร์จ และมีความกว้างเท่ากับความสูงของส่วนลำตัวในช่วงระหว่างครีบถึงครีบของกับดักเสิร์จ ดังแสดงในรูปที่ 6.36 โดยทั่วไปพื้นที่ดังกล่าวสำหรับกับดักเสิร์จขนาด 5 kA จะมีขนาดเพียง 36-40 มิลลิเมตร และ 8-12 มิลลิเมตร ตามลำดับ เท่านั้น ดังนั้นหากพิจารณาตามหลักปฏิบัติข้างต้นจะเห็นว่าหากใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีค่า IFOV เท่ากับ 3.5 หรือ 1.3 มิลลิเรเดียน ควรวัดอุณหภูมิในระยะห่างไม่เกิน 1 เมตร และ 2 เมตร เท่านั้น ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้มาก ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องใช้รถกระเช้าหรือวิธีการอื่น ๆ เพื่อให้สามารถวัดอุณหภูมิในระยะดังกล่าวได้ แต่หากไม่สามารถกระทำได้อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่แสดงไว้ข้างต้น



รูปที่ 6.36 การพิจารณาขนาดของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า  
เพื่อกำหนดระยะห่างที่เหมาะสมในการวัดอุณหภูมิ

### 6.2.2.3 ผลกระทบของค่า Emissivity

สำหรับผลกระทบของค่า Emissivity หรือ ค่าคงที่ในการแผ่รังสีความร้อนของผิววัตถุ เนื่องจากกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่จะมีเปลือกหุ้มภายนอกทำด้วยวัสดุ ยางซิลิโคน หรือ ยางสังเคราะห์ Ethylene-Propylene Diene (EPDM) โดยวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ มีค่า Emissivity สูง ประมาณ 0.94 และ 0.88 ตามลำดับ ทำให้มีผลกระทบจากการสะท้อนความร้อน ในบริเวณรอบข้างน้อย

### 6.2.3 แนวทางปฏิบัติในการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จ

สำหรับแนวทางปฏิบัติในการใช้งานกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนมาตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถกระทำได้ตามแนวทางเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- 1) จัดหากำลังถ่ายภาพความร้อนที่มีความสามารถในการวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จในระยะทางไกลได้ ให้มีจำนวนเพียงพอกับความต้องการ และการหมุนเวียนใช้งานในแต่ละพื้นที่
- 2) กำหนดให้ในแต่ละพื้นที่ทำการสำรวจและถ่ายภาพความร้อนของกับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติเป็นประจำ หรือทำพร้อมกับการสำรวจอุปกรณ์อื่น ๆ

3) สำหรับแนวทางในการสำรวจ และพิจารณากับดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.1) การสำรวจด้วยกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อนให้ปฏิบัติงานในเวลากลางวัน ภายหลังจากดวงอาทิตย์ตกดินอย่างน้อย 2 ชั่วโมง หรือ หลังเวลา 20.00 น และควรมีปริมาณความชื้นในอากาศต่ำ
- 3.2) การถ่ายภาพความร้อนของกับดักเสิร์จเบื้องต้นกำหนดให้ตั้งค่าEmissivity สำหรับวัสดุอย่างซิลิโคน ประมาณ 0.94 หรือ 0.95 สำหรับพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้กำหนดตามความเหมาะสม เช่น ระยะทางที่ใช้วัดความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิเบื้องต้น อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถกำหนดได้ในกล้องถ่ายภาพความร้อนความสามารถสูงบางรุ่นเท่านั้น
- 3.3) วัดค่าอุณหภูมิแวดล้อมของกับดักเสิร์จ ด้วยการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุบริเวณรอบข้างกับดักเสิร์จด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยเลือกวัตถุที่มีค่าEmissivity สูงใกล้เคียงกัน มีค่าความจุความร้อนต่ำ และอยู่ห่างจากบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน
- 3.4) การสำรวจในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ติดตั้งกับดักเสิร์จจำนวน 3 ตัว หรือระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่ติดตั้งกับดักเสิร์จจำนวน 2 ตัว เบื้องต้นให้ใช้การเปรียบเทียบอุณหภูมิกันระหว่างเฟส หากพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างน้อย  $1.0^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าพบความผิดปกติ ถ้าแต่ละเฟสมีอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ให้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม หากพบว่าอุณหภูมิสูงเกินกว่า  $1.0^{\circ}\text{C}$  แสดงว่ากับดักเสิร์จตัวนั้นเกิดการเสื่อมสภาพ หรือมีความผิดปกติ อย่างไรก็ตามสำหรับความรุนแรงของปัญหาให้พิจารณาด้วยผลต่างจากอุณหภูมิแวดล้อมเป็นสำคัญ
- 3.5) การสำรวจในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตัวเดียว ให้พิจารณาอุณหภูมิของกับดักเสิร์จเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อมเท่านั้น หากพบว่าอุณหภูมิสูงเกินกว่า  $1.0^{\circ}\text{C}$  อาจพิจารณาว่ากับดักเสิร์จตัวนั้นมีความผิดปกติ

4) เมื่อพบกับดักเสิร์จที่มีคุณหมูงสูงกว่าปกติให้บันทึกภาพถ่ายความร้อน คุณหมูง แวดล้อม ระยะทางที่วัด และความเร็วลม (ถ้าสามารถทำได้) ตามหลักปฏิบัติที่ถูกต้อง พร้อมกับจดบันทึกรายละเอียดบริเวณที่สำรวจพบ หมายเลขอุปกรณ์ หรือเสาที่ติดตั้งกับดักเสิร์จ ลำดับเฟส และข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการพิจารณา

5) ทำการสำรวจสภาพภายนอกของกับดักเสิร์จที่พบว่ามีความหมูงสูงกว่าปกติอีกครั้งในเวลากลางวัน ด้วยกล้องส่องทางไกล พร้อมกับถ่ายรูปในส่วนต่าง ๆ เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาปัญหาหรือความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จที่เกิดขึ้น

6) พิจารณาคุณหมูงของกับดักเสิร์จที่เพิ่มขึ้น กับระดับความรุนแรงของปัญหา ร่วมกับพิจารณาสภาพภายนอกของกับดักเสิร์จ เพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษาหรือช่วงเวลาในการถอดเปลี่ยนกับดักเสิร์จ พร้อมกับจัดทำรายงานผลการสำรวจ เพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูล และนำเสนอหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

จากการศึกษาความเสื่อมสภาพและการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ตามลำดับดังนี้

##### 7.1.1 ข้อมูลการใช้งานและความเสียหายของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ผลการสำรวจข้อมูลจากแบบสอบถามพบว่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า แรงดัน 22 kV และ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีการติดตั้งใช้งานกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ (ZnO) แบบมีโพลีเมอร์เป็นเปลือกหุ้มแทนการใช้งานกับดักเสิร์จรุ่นเก่าชนิด SiC ในช่วงระยะเวลา 15 ปีที่ผ่านมา โดยมีกับดักเสิร์จใช้งานอยู่หลายผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ สำหรับข้อมูลความเสียหายของกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ในภาพรวมสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

##### 1) ความเสียหายของกับดักเสิร์จ

ความเสียหายหรือการระเบิดของกับดักเสิร์จส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขณะที่มีฝนตกฟ้าคะนอง และบางครั้งก็เกิดขึ้นในขณะที่มีการสับปลดสวิตช์แบบหนึ่งเฟสในวงจรไฟฟ้าที่มีรูปแบบและสภาวะที่เหมาะสมกับการเกิดแรงดันเกินชั่วคราวจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ ในบางกรณีก็พบการระเบิดของกับดักเสิร์จในสภาวะปกติซึ่งอาจเป็นผลจากความเสื่อมสภาพจนทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนของกับดักเสิร์จได้ โดยกับดักเสิร์จที่เสียหายส่วนใหญ่ติดตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่อยู่อาศัยและที่รบกวนการเกษตรสำหรับป้องกันแรงดันเกินเสิร์จให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า สายจำหน่ายไฟฟ้า และสายเคเบิลใต้ดิน

##### 2) ปัญหาจากการทำงานที่ผิดปกติของอุปกรณ์ปลดวงจร

ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดลัดวงจรหรือระเบิด บางครั้งพบว่าอุปกรณ์ปลดวงจรไม่ทำงานหรือทำงานไม่สมบูรณ์ ทำให้ไม่สามารถตัดวงจรกับดักเสิร์จที่เสียหายให้ออกจากระบบไฟฟ้าได้ ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจรอย่างถาวรขึ้นในระบบ แต่ในหลายเหตุการณ์พบว่าอุปกรณ์ปลดวงจรทำงานทั้งที่กับดักเสิร์จยังคงมีสภาพดีและสามารถใช้งานได้อย่างปกติ



### 3) ปัญหาอื่น ๆ

ปัญหาการแตกหักของแขนฉนวนจับยึดกับดักเสิร์จและการเกิดลัดวงจรจากสายตัวนำหรือสายต่อลงดินในขณะที่กับดักเสิร์จหรืออุปกรณ์ปลดวงจรเกิดการระเบิด นอกจากนี้ ยังพบปัญหาการเกิดลัดวงจรหรืออาร์คผ่านผิวของกับดักเสิร์จโดยมีสาเหตุจากสัตว์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งบางครั้งอาจรุนแรงจนทำให้กับดักเสิร์จเสียหาย หรืออุปกรณ์ปลดวงจรทำงานได้ ตลอดจนปัญหาความเสื่อมสภาพของเปลือกโพลีเมอร์และวัสดุที่ใช้ป้องกันความชื้น โดยบางกรณีมีสาเหตุจากความบกพร่องในการออกแบบและการเลือกวัสดุที่ใช้ของแต่ละผลิตภัณฑ์

#### 7.1.2 ผลการประเมินตัวอย่างกับดักเสิร์จที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร

ผลการตรวจสอบสภาพภายนอกและการทดสอบทางไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในภาพรวมอุปกรณ์ปลดวงจรมีความน่าเชื่อถือในการทำงานค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีตัวอย่างเพียง 33% เท่านั้น ที่อุปกรณ์ปลดวงจรทำงานได้ตามปกติ คือกับดักเสิร์จเกิดเสียหายอย่างรุนแรงหรือลัดวงจรภายในทำให้มีกระแสไหลผ่านกับดักเสิร์จในปริมาณมาก ตัวอย่างกลุ่มนี้ วัดค่าความต้านทานได้ต่ำมาก หรือน้อยกว่า 10 M $\Omega$  อย่างไรก็ตามบางตัวอย่างอุปกรณ์ปลดวงจรมีการทำงานลัดวงจรไม่สมบูรณ์ สำหรับตัวอย่างที่เหลือส่วนใหญ่ยังคงมีสภาพปกติมีค่าความต้านทานสูงและมีปริมาณกระแสรั่วต่ำในระดับปกติ หรือสูงกว่าไม่มากนัก

2) ความน่าเชื่อถือในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรของแต่ละผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันพอสมควร ซึ่งเป็นผลจากการออกแบบและวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้งาน โดยรวมผลิตภัณฑ์กับดักเสิร์จภายในประเทศมีความน่าเชื่อถือในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ต่างประเทศ

3) อุปกรณ์ปลดวงจรบางผลิตภัณฑ์สามารถทำงานได้ในขณะเกิดการวาบไฟตามผิวของกับดักเสิร์จ เนื่องจากกระแสอาร์คสามารถไหลผ่านอุปกรณ์ปลดวงจรได้โดยตรง ซึ่งเป็นผลจากการออกแบบลักษณะการติดตั้งของอุปกรณ์ปลดวงจรและวัสดุที่เลือกใช้ บางผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงของแขนฉนวนไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการแตกหักขณะที่กับดักเสิร์จหรืออุปกรณ์ปลดวงจรเกิดการระเบิดขึ้น

### 7.1.3 ผลการทดสอบประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ผลการทดสอบตัวอย่างกัปดักเสิร์จที่สุ่มเก็บมาจากพื้นที่ต่าง ๆ และตัวอย่างที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดัน 22 kV และ 33 kV สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 7.1.3.1 ความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ปัจจุบัน

1) ตัวอย่างกัปดักเสิร์จทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV ที่มีระยะเวลาการใช้งาน 7-12 ปี เกือบทั้งหมดยังคงมีสภาพอยู่ในเกณฑ์ปกติเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอ้างอิงของกัปดักเสิร์จตัวใหม่ มีเพียงตัวอย่างบางผลิตภัณฑ์ในระบบ 33 kV เท่านั้น ที่มีความเสื่อมสภาพเกิดขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้ อาจมีอายุการใช้งานได้เกินกว่า 2 ปี

2) ตัวอย่างกัปดักเสิร์จในระบบ 22 kV ที่มีระยะเวลาใช้งานน้อยกว่า 7 ปี ส่วนใหญ่เกิดปัญหาความเสื่อมสภาพจากความชื้น น้เข้าไปภายใน ทำให้กัปดักเสิร์จมีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติ มีกระแสรั่วเชิงความต้านทาน กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิสูง ซึ่งอย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้น ในบางผลิตภัณฑ์เท่านั้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ที่มีการออกแบบและใช้วัสดุแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเกินกว่า 7 ปี สำหรับตัวอย่างในระบบ 33 kV พบความผิดปกติในลักษณะเดียวกันนี้ เพียงตัวเดียวเท่านั้น

3) ตัวอย่างกัปดักเสิร์จที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติที่ตรวจสอบพบด้วยกล้องอินฟราเรด ถ่ายภาพความร้อนทั้งหมดเกิดความเสื่อมสภาพ โดยส่วนใหญ่เกิดจากปัญหาความชื้น น้เข้าไปภายใน และบางส่วนเกิดจากการเสื่อมสภาพของบลิ๊อค ZnO

#### 7.1.3.2 แนวทางการตรวจสอบสภาพกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ผลการทดสอบตัวอย่างกัปดักเสิร์จด้วยวิธีการต่าง ๆ สามารถสรุปความเหมาะสมและแนวทางสำหรับพิจารณาและประเมินความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของแต่ละวิธีได้ดังนี้

1) การทดสอบวัดค่าความต้านทานด้วยเมกเกอร์ที่แรงดัน 5 kV<sub>ac</sub> สามารถใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสภาพของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เนื่องจากความต้านทานมีค่าลดลงเมื่อกัปดักเสิร์จเกิดความเสื่อมสภาพ หรือชำรุดเสียหาย ทั้งสาเหตุจากปัญหาความชื้น และการเสื่อมสภาพของบลิ๊อค ZnO โดยผลการทดสอบสามารถสรุปแนวทางการพิจารณาสภาพของกัปดักเสิร์จจากค่าความต้านทานที่วัดได้ดังนี้

- กับดักเสิร์จที่มีสภาพปกติควรมีค่าความต้านทานไม่น้อยกว่า 100 G $\Omega$
- กับดักเสิร์จที่เกิดความเสื่อมสภาพจากความชื้น เข้าไปภายในมีค่าความต้านทานลดลงสัมพันธ์กับระดับความเสื่อมสภาพ เมื่อพิจารณาเทียบกับปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทาน กำลังไฟฟ้าสูญเสียหรืออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นที่แรงดันใช้งานปกติ โดยสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 เกณฑ์การพิจารณาค่าความต้านทานกับระดับความเสื่อมสภาพจากปัญหาความชื้น  
เข้าไปภายในของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

สภาพกับดักเสิร์จ	ปกติ (ใหม่)	ระดับความเสื่อมสภาพ			ชำรุด เสียหาย
		เล็กน้อย	ปานกลาง	มาก	
ค่าความต้านทาน (G $\Omega$ )	>100	30-100	1-30	< 1	< 0.1

- กับดักเสิร์จที่เกิดการเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO มีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติ (<100 G $\Omega$ ) แต่อาจไม่สัมพันธ์หรือสอดคล้องกับระดับความเสื่อมสภาพที่แรงดันใช้งานปกติ อย่างไรก็ตามหากพบว่ากับดักเสิร์จมีค่าความต้านทานต่ำกว่าปกติสามารถพิจารณาในเบื้องต้นได้ว่ากับดักเสิร์จอาจเกิดการเสื่อมสภาพ หรือชำรุดเสียหายได้

2) การทดสอบวัดปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานสามารถแสดงถึงความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จและสาเหตุที่เกิดขึ้นได้โดยกับดักเสิร์จที่ยังมีสภาพปกติควรมีปริมาณกระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ดังนี้

- มีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานไม่เกิน 30  $\mu$ A
- มีสัดส่วนของกระแสรั่วเชิงความต้านทานต่อกระแสรั่วเชิงความจุไฟฟ้า หรือ  $\% \frac{I_{r,pk}}{I_{c,pk}}$  ไม่เกิน 20%
- มีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หรือ  $\% \frac{I_{r,3rd}}{I_r}$  อยู่ในช่วงระหว่าง 10% – 40%

โดยกับดักเสิร์จที่เกิดการเสื่อมสภาพจะมีปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานมากกว่าเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้น สำหรับการเสื่อมสภาพจากปัญหาความชื้น ในภายใต้อุณหภูมิ  $\% \frac{I_{r,3rd}}{I_r}$  ต่ำกว่า 10% ซึ่งแตกต่างจากการเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO ที่ค่าดังกล่าวสูงขึ้นมากกว่า 40%

3) การทดสอบวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสามารถแสดงถึงสภาพของกับดักเสิร์จได้ดี เช่นเดียวกับการทดสอบกระแสรั่วเชิงความต้านทาน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สะดวกหากนำไปใช้ตรวจสอบภาคสนามเนื่องจากจำเป็นต้องวัดทั้งรูปคลื่นของกระแสรั่วและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จ สำหรับการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงพบว่ากับดักเสิร์จที่เกิดการความเสื่อมมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิงเพียงบางส่วนเท่านั้น จึงเป็นวิธีที่ให้ผลไม่ดีนักในการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จ เช่นเดียวกับการทดสอบวัดแรงดันดิสชาร์จบางส่วนที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เกิดการเสื่อมสภาพจากความชื้นเข้าไปภายใน อย่างไรก็ตามกรณีที่กับดักเสิร์จเกิดความเสื่อมสภาพของบล็อก ZnO ทั้งสองวิธีสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

#### 7.1.4 แนวทางการตรวจสอบสภาพกับดักเสิร์จโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ผิวของกับดักเสิร์จหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิแวดล้อมสัมพันธ์กับปริมาณกระแสรั่วเชิงความต้านทานและกำลังสูญเสียของกับดักเสิร์จโดยตรงอย่างเป็นเชิงเส้น แต่วิธีการนี้ ไม่สามารถบอกถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นได้และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อก่อนอยู่กับพิกัดกระแสและการออกแบบของกับดักเสิร์จ โดยกับดักเสิร์จที่อยู่ในสภาพปกติจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน  $1^{\circ}\text{C}$  ผลการทดสอบสามารถสรุปเกณฑ์ในการพิจารณาอุณหภูมิที่สูงขึ้น กับความระดับความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จได้ตามตารางที่ 7.2 ซึ่งสัมพันธ์กับผลการทดสอบอื่น ๆ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่ายหากมีระยะห่างในการวัดอุณหภูมิมาก เนื่องจากกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีขนาดเล็ก จึงควรวัดในระยะใกล้เท่านั้น โดยพิจารณาให้สัมพันธ์กับค่า FOV ของกล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน

ตารางที่ 7.2 เกณฑ์การพิจารณาอุณหภูมิที่สูงขึ้น ณระดับความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

สภาพกับดักเสิร์จ	ปกติ (ใหม่)	ระดับความเสื่อมสภาพ			ชำรุด เสียหาย
		เล็กน้อย	ปานกลาง	มาก	
อุณหภูมิที่สูงขึ้น $\Delta T, ^{\circ}\text{C}$	<1	<1	1-3	3-20	>20

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการรวบรวม และเก็บตัวอย่างกับดักเสิร์จที่เกิดการระเบิดของอุปกรณ์ปลดวงจร เพื่อนำมาพิจารณาความน่าเชื่อถือในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจรของกับดักเสิร์จแต่ละผลิตภัณฑ์ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- 2) ควรกำหนดมาตรฐานและเกณฑ์ต่าง ๆ ในการผลิต และการทดสอบกับดักเสิร์จ ให้มีแนวทางที่ชัดเจน เช่น วัสดุที่นำมาใช้งาน เพื่อให้สามารถพิจารณาเปรียบเทียบความเสื่อมสภาพ หรือคุณภาพของกับดักเสิร์จที่ใช้งานอยู่ได้ ซึ่งอาจนำมาใช้กำหนดอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จ
- 3) ควรกำหนดให้มีการทดสอบในเรื่องของความคงทนของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตกับดักเสิร์จ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของแขนฉนวนจับซึ่งพบว่ากับดักเสิร์จรุ่นใหม่ในหลายผลิตภัณฑ์แตกหักง่าย
- 4) ควรออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ปลดวงจรให้มีการทำงานที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เพื่อลดปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับอย่างถาวรจากการระเบิดของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

## รายการอ้างอิง

- [1] Christian Heinrich, and Volker Hinrichsen. Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks – Comparison of Existing and Newly Developed Procedures. IEEE Transactions on Power Delivery 16, 1 (January 2001).
- [2] A. Haddad and D. Warne. Advances in High Voltage Engineering. IEE Power & Energy Series 40, 2004.
- [3] K.P. Mardira, T.K. Saha, and R.A. Sutton. Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation 12, 1 (February 2005).
- [4] IEC 60099-4, Surge arresters – Part 4 : Metal-oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems. IEC Standard (2003).
- [5] ANSI/IEEE Std C62.11-1999, IEEE Standard for Metal-oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV). IEEE Standard (1999).
- [6] AS 1307.2-1996, Surge arresters-Part 2: Metal-oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems. Australian Standard (1996).
- [7] Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler. Technical Seminar on Insulation Coordination in High Voltage Power Systems. PES Chapter of IEEE Thailand Section, 2003.
- [8] Andrew R. Hileman. Insulation Coordination for Power Systems. Marcel Dekker, 1999.
- [9] E. Kuffel. High Voltage Engineering. Newnes, 2000.
- [10] สำรวัย สังข์สะอาด. เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง
- [11] T.K. Saha and K.P. Mardira. Modeling Metal Oxide Surge Arrester for the Modern Polarization Based Diagnostics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 12, 6 (December 2005).
- [12] K.P. Mardira, M. Darveniza and T.K. Saha. Search for New Diagnostics for Metal Oxide Surge Arrester. Proceedings of The 6<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (21-26 June 2000).

- [13] K.P. Mardira and T.K. Saha. Modern Electrical Diagnostcs for Metal Oxide Surge Arresters. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES (6-10 October 2002).
- [14] T.K. Saha, T. Dinh. Return Voltage Measurements on Metal Oxide Surge Arresters. High Voltage Engineering Symposium (22-27 August 1999).
- [15] IEC 60099-5, Surge Arresters- Part 5 : Selection and Application Recommendations. IEC Standard (1999).
- [16] Jonathan Woodworth. Guide for Selecting an Arrester Field Test Method. ArresterFacts-002b ArresterWorks (18 February 2008).
- [17] Jonathan Woodworth. Overview of Field Testing Arresters. ArresterFacts-002 ArresterWorks.
- [18] M. Darveniza, T.K. Saha and S. Wright. Studies of In-service and Laboratory Failures of Metal-oxide Distribution Arresters. Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia 22, 2 (2003).
- [19] M. Darveniza, T.K. Saha and S. Wright. Comparisons of In-service and Laboratory Failure Modes of Metal-oxide Distribution Surge Arresters. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting (2000).
- [20] R. Liao, H. Liu, Y. Song, C. Sun and Y. Mi. Analysis of the Performance of Two Digital Methods for Measuring MOA Resistance Current. Chongqing University, China (2000).
- [21] K. Lahti, P. Pakonen, K. Kannus and K. Nousiainen. Possibilities to Reveal Internal Moisture in Polymeric Metal Oxide Surge Arresters by Means of PD and EMR Measurements. International Conference on Electric Power Engineering (1999).
- [22] ภูมิอากาศของประเทศไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.tmd.go.th> [2552, ธันวาคม 13]
- [23] J. Fraden. Handbook of Modern Sensors. AIP Press, 1997.
- [24] IEC 60270 : High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements. IEC Standard (2000).

ภาคผนวก



## ภาคผนวก ก

## ผลสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในพื้นที่ทั้ง ๕ ภาคในระดับจังหวัด

## ก.1 ผลสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในพื้นที่ภาคเหนือ

น.1			น.2			น.3		
จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ
เชียงใหม่	30	12	พิษณุโลก	15	6	ลพบุรี	10	5
ลำปาง	14	6	พิจิตร	11	3	สิงห์บุรี	6	2
ลำพูน	10	3	ตาก	10	5	เพชรบูรณ์	16	5
เชียงราย	20	7	อุตรดิตถ์	9	6	นครสวรรค์	17	3
พะเยา	9	6	น่าน	11	4	อุทัยธานี	9	2
แม่ฮ่องสอน	5	0	สุโขทัย	9	3	ชัยนาท	7	1
			แพร่	8	4			
			กำแพงเพชร	12	3			
รวม (ฉบับ)	88	34	รวม (ฉบับ)	85	34	รวม (ฉบับ)	65	18

ก.2 ผลสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จ.1			จ.2			จ.3		
จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ
อุดรธานี	20	11	อุบลราชธานี	20	4	นครราชสีมา	32	5
หนองบัวลำภู	6	2	อำนาจเจริญ	7	0	ชัยภูมิ	17	3
หนองคาย	17	3	ยโสธร	8	1	บุรีรัมย์	19	5
ขอนแก่น	24	9	ร้อยเอ็ด	19	7	สุรินทร์	15	2
เลย	14	4	กาฬสินธุ์	17	4			
สกลนคร	18	4	มหาสารคาม	13	0			
นครพนม	11	4	ศรีสะเกษ	18	3			
			มุกดาหาร	8	1			
รวม (ฉบับ)	110	37	รวม (ฉบับ)	110	20	รวม (ฉบับ)	83	15

### ก.3 ผลสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในพื้นที่ภาคกลาง

ก.1			ก.2			ก.3		
จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ
อยุธยา	17	2	ชลบุรี	13	3	นครปฐม	8	4
ปทุมธานี	9	1	ฉะเชิงเทรา	14	3	สมุทรสาคร	6	1
อ่างทอง	7	2	ระยอง	12	0	สุพรรณบุรี	13	9
สระบุรี	14	2	จันทบุรี	12	5	กาญจนบุรี	15	5
นครนายก	4	1	ตราด	7	2			
ปราจีนบุรี	9	0						
สระแก้ว	7	2						
รวม (ฉบับ)	67	10	รวม (ฉบับ)	58	13	รวม (ฉบับ)	42	19

### ก.4 ผลสรุปการจัดส่งและตอบกลับแบบสำรวจในพื้นที่ภาคใต้

ต.1			ต.2			ต.3		
จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ	จังหวัด	ส่ง	รับ
เพชรบุรี	10	2	นครศรีธรรมราช	20	3	ยะลา	7	3
ประจวบคีรีขันธ์	11	4	ตรัง	11	2	ปัตตานี	12	3
ราชบุรี	14	4	กระบี่	8	3	นราธิวาส	13	2
สมุทรสงคราม	3	0	สุราษฎร์ธานี	18	2	สงขลา	16	5
ชุมพร	11	2	ภูเก็ต	5	1	สตูล	5	3
ระนอง	4	0	พังงา	9	1	พัทลุง	10	2
รวม (ฉบับ)	53	12	รวม (ฉบับ)	71	12	รวม (ฉบับ)	63	18

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเกรียงไกร พัฒนภักดี เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ.2523 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2544 และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548