

การออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างต้นแบบ  
สำหรับการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ

PROTOTYPE DESIGN OF NARROWBAND AND WIDEBAND UHF ANTENNAS  
FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION IN GAS-INSULATED SUBSTATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

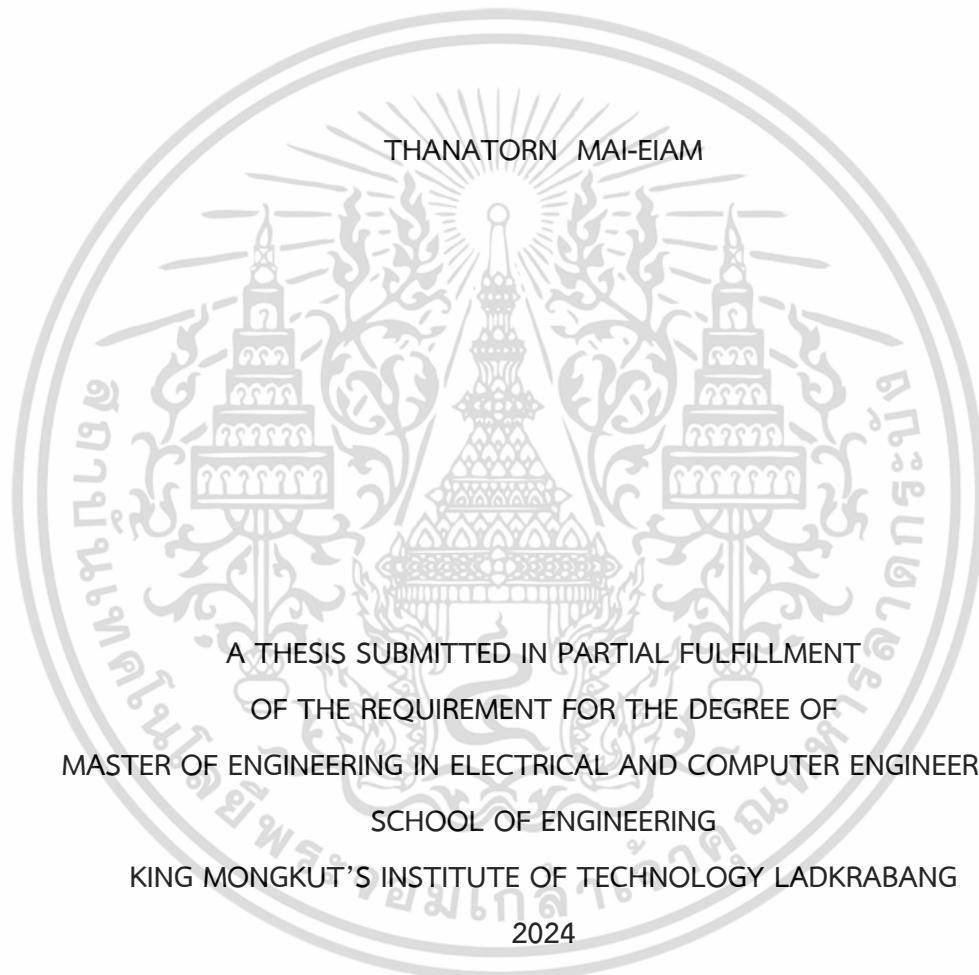
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-027-223

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROTOTYPE DESIGN OF NARROWBAND AND WIDEBAND UHF ANTENNAS  
FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION IN GAS-INSULATED SUBSTATION



THANATORN MAI-EIAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2024

KMITL-2024-EN-M-027-223

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2024**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างต้นแบบสำหรับการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ
นักศึกษา	นายธนาทร ไหมเอี่ยม
รหัสประจำตัว	65016046
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พีรฤติ ยูทธโกวิท

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบเซนเซอร์แบบตัวเก็บประจุสำหรับย่านความถี่สูงยิ่งหรือยูเอชเอฟ (Ultra-high frequency; UHF) โดยเลือกออกแบบสร้างสายอากาศในหมวดของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้นำเสนอเป็นเซนเซอร์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ ซึ่งเป็นการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนที่ไม่ใช้วิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Non-conventional method) สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้รับการออกแบบขึ้นมาทั้งหมดสองชนิดสำหรับประยุกต์ใช้งานระบบวัดแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างให้ครบตามเทคนิคการวัดยูเอชเอฟที่มีการระบุไว้ ประกอบไปด้วยสายอากาศแถบความถี่แคบอย่าง Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch และสายอากาศแถบความถี่กว้างอย่าง Two-Arm Archimedean Spiral โดยทั่วไปแล้วสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนในย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกตรวจวัดโดยใช้เซ็นเซอร์มากกว่าหนึ่งเซนเซอร์ ดังนั้นสายอากาศยูเอชเอฟทั้งสองชนิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงถูกออกแบบขึ้นมาอย่างละสามแบบภายใต้การคำนวณและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อให้มีผลตอบสนองต่อสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่ความถี่ใช้งานแตกต่างกันในย่านความถี่สูงยิ่งระหว่าง 300 MHz ถึง 3 GHz ตามมาตรฐาน IEC 62478:2016 สำหรับการประเมินคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศที่ออกแบบมาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ พบว่าสามารถแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ (พารามิเตอร์  $S_{11}$ )  $\leq -10$  dB และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า  $\leq 2:1$  ใกล้เคียงกับความถี่ใช้งานที่ออกแบบไว้ สำหรับการตรวจสอบความไวในการวัด ได้นำสายอากาศยูเอชเอฟที่ออกแบบมาทั้งหมดไปตรวจสอบจับสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนและสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟที่จำลองขึ้นมาในวงจรทดสอบภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เมื่อทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ พบว่าสายอากาศยูเอชเอฟทั้งหมดมีการตอบสนองต่อสัญญาณสามารถใช้งานในการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนได้ เหมาะที่จะนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อใช้งานในระบบจริง

<b>Thesis</b>	Prototype Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection in Gas-Insulated Substation
<b>Student</b>	Mr.Thanatorn Mai-eiam
<b>Student ID.</b>	65016046
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>Year</b>	2024
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Peerawut Yutthagowith

## ABSTRACT

This thesis introduces prototype designs of ultra-high-frequency (UHF) capacitive sensors utilizing printed circuit board (PCB) antennas for non-conventional partial discharge (PD) detection in gas-insulated substations. Two types of PCB antennas were designed in the forms of inset-fed rectangular microstrip patch and two-arm Archimedean spiral antennas for narrowband and wideband systems, respectively. Due to the detectability of UHF PD signals by various field sensors, two types of UHF antennas were designed for three different models. These designs were calculated and simulated using MATLAB to cover PD signal response at different operating frequencies within the UHF range, typically ranging from 300 MHz to 3 GHz as per IEC 62478:2016. A spectrum and vector network analyzer was utilized to evaluate the designed antenna performance. It is exhibited that the return loss (parameter  $S_{11}$ ) is not greater than -10 dB and voltage standing wave ratio is not greater than 2:1 within a close range of the designed operating frequency. For sensitivity verification, all designed UHF antennas were tested to detect PD signals and simulated UHF artificial pulse signals in test circuits at a high-voltage laboratory. The results showed that all designed UHF antennas effectively responded to the generated PD signals within the UHF range. This confirms the suitability of the developed antennas for further development in PD detection for real on-site systems.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พีรฤดี ยุทธโกวิท ที่ดูแลเอาใจใส่ ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนการให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่างๆและมอบประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ดร.เพทาย นิมสนอง ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบสายอากาศ และทำการทดลอง รวมถึงความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ทีมงานจาก ID ASSET CO., LTD. ทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุนเครื่องมือวัด และช่วยเหลือในการทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการใช้เครื่องมือภายในห้องปฏิบัติการมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดาและครอบครัวซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งที่ให้การสนับสนุน ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธนาทร ใหม่เอี่ยม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	7
บทที่ 2 หลักของสายอากาศแบบแอกทิฟ.....	8
2.1 ปรากฏการณ์เกิดดิสซาร์จบางส่วน.....	8
2.1.1 ลักษณะรูปร่างสัญญาณพัลส์ดิสซาร์จบางส่วน.....	9
2.1.2 ประเภทการเกิดดิสซาร์จบางส่วน.....	10
2.1.3 รูปแบบของสื่อสัญญาณสำหรับการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน.....	13
2.1.4 คุณลักษณะการแสดงผลดิสซาร์จบางส่วน.....	14
2.1.5 หน่วยวัดดิสซาร์จบางส่วน.....	18
2.1.6 ขนาดดิสซาร์จบางส่วนทางสถิติ.....	19
2.2 การตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270.....	20
2.3 การตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ.....	22
2.3.1 ประเภทของเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ.....	23
2.3.2 รูปแบบการติดตั้งเซนเซอร์ยูเอชเอฟ.....	24
2.4 ปรากฏการณ์แพร่สัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25

2.5	หลักการงานและการเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จที่ระบบ GIS.....	28
2.5.1	หลักการงานของระบบ GIS.....	28
2.5.2	การเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จตามระบบ GIS.....	29
2.6	การตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์สำหรับนำไปใช้ตรวจวัด ดิสชาร์จบางส่วนในระบบ GIS ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	31
2.6.1	การจัดเตรียมการทดสอบ.....	31
2.6.2	การวินิจฉัยผลการทดสอบ.....	33
2.7	ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ.....	34
2.7.1	สายอากาศบนแผ่นวงจรมิพพ์.....	34
2.7.2	ส่วนประกอบและหลักการงานของสายอากาศบน บนแผ่นวงจรมิพพ์.....	35
2.8	ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสายอากาศ.....	36
2.8.1	พารามิเตอร์การกระจาย.....	36
2.8.2	ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า.....	37
2.8.3	แบนด์วิดท์.....	38
2.8.4	การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	39
บทที่ 3	แนวคิดการออกแบบสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบและ แถบความถี่กว้างสำหรับนำไปตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	42
3.1	ระเบียบวิธีและขั้นตอนการออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟ.....	42
3.2	สายอากาศยูเอชเอฟที่เลือกออกแบบ.....	43
3.2.1	สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ.....	43
3.2.2	สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง.....	44
3.3	หลักการคำนวณโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟที่เลือกออกแบบ.....	45
3.3.1	หลักการคำนวณโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ.....	45
3.3.2	หลักการคำนวณโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง.....	48
3.4	การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศยูเอชเอฟผ่านการ จำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	50
3.4.1	การจำลองเพื่อวิเคราะห์สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ.....	53
3.4.2	การจำลองเพื่อวิเคราะห์สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง.....	59

3.5 การประเมินคุณสมบัติการทำงานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟด้วย เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	66
3.5.1 การวิเคราะห์ค่าวัดจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ.....	67
3.5.2 การวิเคราะห์ค่าวัดจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง.....	73
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	80
4.1 แบบจำลองสำหรับใช้ตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศ ยูเอชเอฟ.....	80
4.1.1 แบบจำลองสำหรับวงจรการทดสอบแรงดันสูง.....	81
4.1.2 แบบจำลองสำหรับวงจรการทดสอบแรงดันต่ำ.....	82
4.2 การตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟสำหรับนำไป ประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการ.....	82
4.2.1 ชุดวงจรการทดสอบแรงดันสูง.....	83
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงดันสูง.....	85
4.2.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทดสอบแรงดันสูง.....	86
4.3 การตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟสำหรับนำไป ประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันต่ำในห้องปฏิบัติการ.....	97
4.3.1 ชุดวงจรการทดสอบแรงดันต่ำ.....	97
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงดันต่ำ.....	99
4.3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทดสอบแรงดันต่ำ.....	99
4.4 การตรวจสอบและยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ.....	106
4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันสูง.....	106
4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันต่ำ.....	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 บทสรุป.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	109
เอกสารอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก ก.....	113
ภาคผนวก ข.....	116
ภาคผนวก ค.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	136

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1.1 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565.....	5
1.2 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565.....	5
1.3 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566.....	6
1.4 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2566.....	6
2.1 ลักษณะกลไกการเกิดการเบรคตาวน์แต่ละประเภทในระบบการฉนวน.....	12
2.2 การแสดงผลรูปแบบข้อมูลสัญญาณ PD ประเภทต่างๆ.....	16
3.1 ค่าพารามิเตอร์การออกแบบของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch.....	47
3.2 ค่าพารามิเตอร์การออกแบบของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral.....	50
3.3 ช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ในแต่ละแบบหลังจากการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	59
3.4 ช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ในแต่ละแบบหลังจากการจำลองและวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	66
3.5 ช่วงความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ในแต่ละแบบหลังจากการตรวจวัดด้วย เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	72
3.6 ช่วงความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ในแต่ละแบบหลังจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง วิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	78

4.1 รายละเอียดผลทดสอบจากขั้นตอนการปรับเทียบระบบวัดของวิธีการวัดแบบ ตั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270.....	87
4.2 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัด PD หลังถูกตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบ ตั้งเดิม.....	90
4.3 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัด PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟอ้างอิง.....	91
4.4 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณ PD หลังถูกตรวจวัดด้วย สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ที่ได้ออกแบบมา.....	93
4.5 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณ PD หลังถูกตรวจวัดด้วย สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ที่ได้ออกแบบมา.....	96
4.6 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัด ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ที่ได้ออกแบบมา.....	102
4.7 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัด ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ที่ได้ออกแบบมา.....	105
4.8 การเปรียบเทียบขนาดสัญญาณพัลส์ที่ถูกตรวจวัดจากกระบวนการตรวจสอบ ความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟ.....	107

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณพารามิเตอร์เวลาของกระแสพัลส์ PD.....	9
2.2 ปรากฏการณ์การเกิด PD แต่ละประเภท.....	11
2.3 ภาพโดยรวมของความเครียดทางไฟฟ้าแต่ละประเภทตามหลักการวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูง.....	14
2.4 สัญญาณแรงดันตกคร่อมและกระแสดิซชาร์จในช่องว่างอากาศขณะเกิด PD.....	15
2.5 ลักษณะการประมวลผลข้อมูลสัญญาณ PD.....	16
2.6 ย่านความถี่ใช้งานสำหรับการตรวจวัด PD ตามข้อกำหนดทางเทคนิคและ มาตรฐานสากล.....	18
2.7 การแสดงระดับสัญญาณ PD ที่ประมวลผลจากระบบวัด ก) ระดับแอมพลิจูด ของสัญญาณพัลส์ประจุที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง ข) ระดับสัญญาณ PD ที่มีอัตรา การเกิดซ้ำมากที่สุดจากการให้น้ำหนักข้อมูลตามมาตรฐาน IEC 60270.....	19
2.8 Pulse train response ที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน IEC 60270.....	19
2.9 หลักการประมวลผลหาขนาด PD จาก 95 % ของช่วงค่าที่ครอบคลุม ข้อมูลการตรวจวัด.....	20
2.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัด PD ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270.....	21
2.11 ตัวอย่างเทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างของวิธีการ ตรวจวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายูเอชเอฟ.....	24
2.12 การเปรียบเทียบความไวในการวัดของเซนเซอร์ภายในและเซนเซอร์ภายนอก.....	25
2.13 สถานะถูกกระตุ้นของการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) ประจุไฟฟ้า สถิตย์ในสถานะเริ่มแรก (ข) การแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการ เคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในทิศทางแกน x.....	26
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์พอยน์ติงและองค์ประกอบของเวกเตอร์ สนามไฟฟ้า.....	27
2.15 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่การเบี่ยงของมุม จากการที่ประจุ q ทำการ เคลื่อนที่ต่อไปยังตำแหน่ง C โดยมีระยะห่างจากตำแหน่ง A มากเมื่อเทียบกับ กับระยะห่างจากตำแหน่ง A ไป B.....	27

2.16 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบ GIS.....	29
2.17 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จและการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าที่มีการใช้ระบบ GIS.....	30
2.18 การอธิบายภาพรวมถึงความสำคัญของวิธีการตรวจวัด PD ด้วยการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	31
2.19 การตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์ยูเอชเอฟสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการ.....	32
2.20 การตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์ยูเอชเอฟสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันต่ำในห้องปฏิบัติการ.....	33
2.21 รูปแบบการวินิจฉัยผลลัพธ์การตรวจวัดสัญญาณพัลส์ในย่านยูเอชเอฟ.....	34
2.22 หลักการทำงานของพารามิเตอร์การกระจายในอุปกรณ์เน็ตเวิร์คหนึ่งพอร์ต.....	36
2.23 หลักการทำงานของพารามิเตอร์การกระจายในอุปกรณ์เน็ตเวิร์คสองพอร์ต.....	37
2.24 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไอโซโทรปิก.....	40
2.25 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรอบทิศทาง.....	40
2.26 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้ทิศทางเดียว.....	41
2.27 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้สองทิศทาง.....	41
3.1 ส่วนประกอบหลักของสายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch.....	44
3.2 ส่วนประกอบหลักของสายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral.....	44
3.3 พารามิเตอร์โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch.....	45
3.4 พารามิเตอร์โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral....	48
3.5 ตัวอย่างคำสั่งที่เขียนขึ้นในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch.....	51
3.6 ตัวอย่างคำสั่งที่เขียนขึ้นในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral.....	52
3.7 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	53
3.8 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	53

3.9 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	54
3.10 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	54
3.11 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	55
3.12 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่ แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 จากการ จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	55
3.13 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	56
3.14 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	56
3.15 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	57
3.16 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่ แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 จากการ จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	57
3.17 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	58
3.18 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	58
3.19 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	60

3.20 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	60
3.21 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	61
3.22 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	61
3.23 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	62
3.24 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	62
3.25 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	63
3.26 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	63
3.27 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	64
3.28 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	64
3.29 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	65

3.30 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบ ความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 จากการ จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	65
3.31 เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ SIGLENT SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer.....	67
3.32 ภาพจริงสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1, 2 และ 3 (จากซ้ายไปขวา).....	67
3.33 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่ แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 ด้วย เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	68
3.34 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่ แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 ด้วย เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	69
3.35 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่ แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 ด้วย เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	70
3.36 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟ แถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับ ผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	71
3.37 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟ แถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับ ผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	71
3.38 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟ แถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับ ผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	72
3.39 ภาพจริงสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1, 2 และ 3 (จากซ้ายไปขวา).....	73

3.40 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	74
3.41 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	75
3.42 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์ $S_{11}$ ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่.....	76
3.43 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	77
3.44 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	77
3.45 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB.....	78
4.1 แบบจำลอง Enclosure สำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.....	80
4.2 ลักษณะการวาง/ติดตั้งสายอากาศยูเอชเอฟแถบบริเวณ Window ของแบบจำลอง Enclosure.....	81
4.3 แบบจำลอง Enclosure ที่มีการจำลองการเกิด PD สำหรับการทดสอบแรงดันสูง.....	81
4.4 แบบจำลอง Enclosure ที่มีการจำลองสร้างสัญญาณพัลส์เทียมน่านความถี่ยูเอชเอฟสำหรับการทดสอบแรงดันต่ำ.....	82
4.5 ไดอะแกรมชุดวงจรทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดันสูง.....	83

4.6 ชุดวงจรการทดสอบจริงสำหรับการทดสอบแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง สจล.....	84
4.7 ขั้นตอนการปรับเทียบวงจรทดสอบของระบบวัดในวิธีการแบบดั้งเดิมตาม มาตรฐาน IEC 60270.....	85
4.8 ลักษณะการป้อนแรงดัน-เวลาในการทดสอบแรงดันสูง.....	86
4.9 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์จากขั้นตอนการปรับเทียบวงจร ทดสอบ.....	87
4.10 ใบรายงานผลการทดสอบจากชุดเครื่องวิเคราะห์ที่สื่อสารบางส่วน.....	88
4.11 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยวิธีการ วัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270.....	89
4.12 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วย สายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง.....	90
4.13 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1.....	91
4.14 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2.....	92
4.15 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3.....	92
4.16 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1.....	94
4.17 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2.....	95
4.18 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3.....	96
4.19 ไดอะแกรมชุดวงจรทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดันต่ำ.....	97
4.20 ชุดวงจรการทดสอบจริงสำหรับการทดสอบแรงดันต่ำภายในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง สจล.....	98

4.21 การติดตั้งและปรับค่าแอมพลิฟายเออร์สัญญาณเอาต์พุตของชุดอุปกรณ์ จำลองสัญญาณพัลส์เทียม.....	99
4.22 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1.....	100
4.23 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2.....	101
4.24 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3.....	101
4.25 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1.....	103
4.26 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2.....	104
4.27 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศ ยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3.....	104

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จึงได้มีการจัดหา ขยายระบบส่ง และจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานที่เพียงพอและมีคุณภาพตามมาตรฐาน โดยการนำสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas-Insulated Substation; GIS) มาใช้ทั้งในด้านการก่อสร้าง สถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งใหม่และขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีอยู่ ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะบุคลากรด้านการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้สามารถวางแผนงานบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสมและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้าแรงสูงและตัวบุคคล

การเกิดดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูง เมื่อการฉนวนของระบบมีจุดบกพร่องทั้งในเนื้อฉนวนหรือนอกเนื้อฉนวน ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตหรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ทำให้เกิด PD แต่ละครั้งขึ้นที่ฉนวนเฉพาะบางจุดภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ เรียกว่า การเกิดเบรกดาวน (Breakdown) ที่ไม่สมบูรณ์ ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้เกิดการเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนและส่งผลต่ออายุการใช้งานของฉนวน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้าที่มี GIS จนนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นการตรวจสอบ วินิจฉัยคุณภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจากวิธีการตรวจวัด PD ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งในการตรวจสอบฉนวนจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการวิเคราะห์บำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูง ในปัจจุบันมีวิธีการตรวจวัด PD อยู่หลายวิธีโดยใช้เซ็นเซอร์หลายชนิด เนื่องจากข้อสัญญาณ PD สามารถแปรผันไปตามระบบและสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น ประจุไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคลื่นความถี่วิทยุ คลื่นเสียง แสง ความร้อน เป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัด PD ด้วยวิธีการทางคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งหรือยูเอชเอฟ (Ultra-High Frequency; UHF) ระหว่าง 300 MHz ถึง 3 GHz โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเกิด PD ขึ้นมา จะมีสัญญาณคลื่นความถี่สูงในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถตรวจวัดสัญญาณได้โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างอุปกรณ์สายอากาศเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการตรวจวัด PD ใน GIS เนื่องจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงชนิดนี้มีการนำฉนวนก๊าซมาใช้ทำงานในระบบสถานีแบบปิด เมื่อเกิด PD ขึ้น กระแสพัลส์ PD (PD pulse current) นั้นจะมีความ

เร็วสูงขึ้นมา ทำให้ระยะเวลาในการเดินทางนั้นสั้นมากและอาจมีช่วงเวลาขาขึ้นของกระแสพัลส์น้อยกว่า 0.1 นาโนวินาที (Nanosecond; ns) [2] ความถี่ของกระแสพัลส์จึงมีความถี่สูงมากจนถึงย่านความถี่กิกะเฮิร์ตซ์ (Gigahertz; GHz) และแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในย่านความถี่ยูเอชเอฟได้ ซึ่งมีการลดทอนของสัญญาณน้อยกว่าคลื่นเสียง จึงสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์/สายอากาศยูเอชเอฟไว้ในระยะทางที่ไกลจากแหล่งกำเนิด PD ได้ อีกทั้งยังไม่ได้รับอิทธิพลของสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ต่ำกว่า 300 MHz หากเทียบกับวิธีการวัด PD แบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270:2000 [1] วิธีการตรวจวัด PD ด้วยการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ยูเอชเอฟตามมาตรฐาน IEC 62478:2016 [2] จะสามารถตรวจวัดสัญญาณ PD ในย่านความถี่ที่สูงกว่าได้ และยังสามารถใช้ทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนออนไลน์ (On-line PD measurement technique) ได้ ซึ่งสามารถทำการตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทำงานอยู่ในสถานะการใช้งานจริงโดยไม่ต้องปิดระบบการทำงาน ช่วยในเรื่องของการประหยัดเวลาทดสอบและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ ในขณะที่วิธีการวัดแบบดั้งเดิมนั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบกับระบบด้วยเทคนิคการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบออฟไลน์ (Off-line PD measurement technique)

การตรวจวัดโดยใช้เซ็นเซอร์เพียงชนิดเดียวนั้น ไม่สามารถยืนยัน เปรียบเทียบ และวินิจฉัยผลลัพธ์การตรวจวัดให้มีความน่าเชื่อถือได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำตามเอกสารรายงานที่เผยแพร่โดย CIGRE Technical Brochure [3] – [5] ซึ่งกล่าวถึงเทคนิคการตรวจวัด PD ในย่านความถี่ยูเอชเอฟที่สามารถจำแนกออกเป็นสองเทคนิค คือ เทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่แคบและเทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่กว้าง ด้วยเหตุนี้จึงเสนอแนวคิดการออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟต้นแบบทั้งแบบแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างที่มีโครงสร้างเหมาะแก่การนำไปวาง/ติดตั้งแถวบริเวณฉนวนที่เป็นจุดต่อหรือแถวบริเวณช่องมองของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เหมาะแก่การนำมาศึกษาวิจัย เมื่อทำการประกอบสร้างเสร็จแล้ว จะนำสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมาไปตรวจวัดสัญญาณที่จำลองขึ้นในการทดสอบเพื่อตรวจสอบความไวในการวัด (Sensitivity check) ของสายอากาศ และจะนำผลลัพธ์ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาใช้ยืนยันเป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบนอกสถานที่และการนำไปพัฒนาต่อยอด

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายในการส่งเสริม พัฒนางานวิจัยและเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในเรื่องของการตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัด PD แบบออนไลน์ได้ ซึ่งช่วยในเรื่องของการประหยัดเวลาทดสอบและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ได้มาก จึงได้นำเสนอการออกแบบสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ PD ที่มีการคำนึงถึงเทคนิค/คุณสมบัติการใช้งาน

ตามที่มาตรฐานสากลกำหนด ต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงจนเกินไป ความเหมาะสมต่อการนำมาศึกษาวิจัย และความเหมาะสมต่อการนำไปวาง/ติดตั้งตามบริเวณจุดตรวจวัดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การตรวจสอบความไวในการวัด (Sensitivity check) ของสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมา ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) เพื่อยืนยันประสิทธิภาพและคุณสมบัติการวัดของตัวสายอากาศ โดยจำลองสัญญาณ PD และสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟขึ้นมาในวงจรทดสอบ ซึ่งชุดสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดนั้นจะต้องสามารถตรวจวัดสัญญาณที่จำลองขึ้นมาได้ โดยอาจให้ผลลัพธ์การทดสอบที่แตกต่างกัน เนื่องจากสายอากาศแต่ละตัวนั้นมีคุณสมบัติเฉพาะที่ต่างกัน รวมถึงการออกแบบให้มีความถี่ใช้งานและขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่แตกต่างกัน หากทำการตรวจจับสัญญาณผ่านการใช้สายอากาศแถบความถี่แคบจะสามารถวัดสัญญาณที่ความถี่เฉพาะเจาะจงได้ รวมถึงสามารถกรองสัญญาณรบกวนจากย่านความถี่อื่นได้ ในทางกลับกันแล้ว กรณีที่ทำการตรวจจับสัญญาณผ่านการใช้สายอากาศแถบความถี่กว้างจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณได้อย่างครอบคลุมและแสดงผลลัพธ์ของสัญญาณที่ถูกตรวจวัดได้มากกว่า แต่จะทำให้การตรวจจับสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นตามมาด้วย

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวคิดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการออกแบบเพื่อสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นความถี่วิทยุในรูปแบบของสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟในย่านความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 3 GHz ตามมาตรฐาน IEC 62478:2016 [2]

การวิเคราะห์หาช่วงความถี่ใช้งานของอุปกรณ์สายอากาศที่สามารถยอมรับให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ จะวิเคราะห์จากขนาดค่าการสูญเสียย้อนกลับด้วยพารามิเตอร์  $S_{11}$  ในระดับไม่เกิน -10 dB และขนาดอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าในระดับไม่เกิน 2:1

การเลือกพิจารณาสัดส่วนขนาดแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์สายอากาศยูเอชเอฟจะวิเคราะห์ในรูปแบบของรีเลทีฟแบนด์วิดท์ (Relative bandwidth) หรือแฟรคชันนอลแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth; FBW) โดยให้สายอากาศแถบความถี่แคบมีค่า FBW น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และให้สายอากาศแถบความถี่กว้างมีค่า FBW 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป [25, 26]

การตรวจสอบความไวในการวัดของเซ็นเซอร์/สายอากาศยูเอชเอฟสำหรับใช้ตรวจวัด PD ตามระบบ GIS สามารถดำเนินการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการได้ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEC 62478:2016 โดยทำการตรวจวัดขนาดสัญญาณ PD ในการทดสอบแรงดันสูง และทำการตรวจวัดขนาดสัญญาณพัลส์เทียม

ย่านยูเอชเอฟในการทดสอบแรงดันต่ำ ซึ่งมีการพิจารณาปรับค่าแอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตของชุดอุปกรณ์จำลองสัญญาณพัลส์เทียมนำขนาดสัญญาณพัลส์เทียมนำที่ตรวจวัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับขนาดสัญญาณ PD โดยให้มีระดับค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20$  เปอร์เซ็นต์ ตามคำแนะนำที่ระบุไว้ในเอกสารรายงานที่เผยแพร่โดย CIGRE Working Group D1.25 [4] และต้องเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจากเซนเซอร์/สายอากาศตัวเดียวกัน

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด PD โดยใช้เทคนิคทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า/คลื่นวิทยุ คือ เซนเซอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitive sensors) สำหรับย่านความถี่สูงยิ่ง โดยเลือกออกแบบสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยการใช้แผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 เป็นวัสดุฐานรอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎี ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่ต้องการออกแบบอย่างละเอียดจากงานวิจัยของต่างประเทศ [14] – [21] เพื่อนำมาใช้คำนวณพารามิเตอร์โครงสร้าง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเลือกความถี่ใช้งานให้อยู่ในย่านที่ออกแบบได้ พร้อมกับศึกษาทฤษฎีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อจำลองสัญญาณค่าสูญเสียย้อนกลับ สัญญาณอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเพื่อนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์

การทดสอบถูกจัดขึ้นเพื่อทำการตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมาสำหรับใช้ตรวจวัด PD ตามระบบ GIS โดยทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEC 62478:2016 เอกสารรายงานที่เผยแพร่โดย CIGRE Working Group D1.33 และ D1.25 เพื่อยืนยันประสิทธิภาพ คุณสมบัติการตรวจวัดก่อนทำการทดสอบนอกสถานที่ (On-site test)

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดลำดับขั้นตอนการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) ศึกษาหลักการทำงาน โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศที่ต้องการออกแบบ
- 3) กำหนดเลือกขนาดและความถี่ใช้งานที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเพื่อคำนวณพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศยูเอชเอฟ
- 4) จำลองแบบสายอากาศด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อวิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศยูเอชเอฟ
- 5) ออกแบบและวาดแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตสายอากาศยูเอชเอฟ

- 6) ใช้เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ตรวจสอบค่าคุณสมบัติการทำงานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟ
- 7) ทำการตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟด้วยการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนและสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟ
- 8) วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบและแก้ไขข้อผิดพลาด
- 9) สรุปผลงานวิจัยและให้ข้อเสนอแนะ
- 10) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565				
	เดือน				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	←-----→		-----→		
ศึกษาหลักการทางาน โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศที่ต้องการออกแบบ			←-----→	-----→	
	←-----→ การวางแผน		←-----→ การปฏิบัติงานจริง		

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565					
	เดือน					
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
กำหนดเลือกขนาดและความถี่ใช้งานที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเพื่อคำนวณพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศยูเอชเอฟ		←-----→	←-----→			
จำลองแบบสายอากาศด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อวิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศยูเอชเอฟ			←-----→	-----→		
	←-----→ การวางแผน		←-----→ การปฏิบัติงานจริง			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.3 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566					
	เดือน					
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ออกแบบและวาดแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตสายอากาศยูเอชเอฟ	↔					
ใช้เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ตรวจสอบค่าคุณสมบัติการทำงานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟ			↔	↔		
ทำการตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟด้วยการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนและสัญญาณพัลส์เทียมนย่านยูเอชเอฟ						↔

↔ การวางแผน

↔ การปฏิบัติงานจริง

ตารางที่ 1.4 รายละเอียดลำดับแผนการดำเนินงานของการทำวิจัยในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2566

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2566				
	เดือน				
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบและแก้ไขข้อผิดพลาด	↔	↔	↔		
สรุปผลงานวิจัยและให้ข้อเสนอแนะ		↔	↔	↔	
จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์			↔	↔	↔

↔ การวางแผน

↔ การปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาสำคัญที่ถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎีที่มีความสำคัญเกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนการออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างสำหรับนำไปตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดสอบและผลการทดสอบการตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟที่มีการตรวจจับสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนและสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์/สายอากาศยูเอชเอฟสำหรับนำไปใช้ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) ในระบบสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas-Insulated Substation; GIS) โดยมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจวัด PD มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศยูเอชเอฟที่ถูกลำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

PD เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูงเมื่อการฉนวนของระบบเกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown) เพียงบางส่วน เรียกว่า การเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ การเกิด PD ในแต่ละครั้งจะเกิดขึ้นที่ฉนวนเฉพาะบางจุดภายใต้ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ จากสาเหตุที่ฉนวนมีจุดบกพร่องทั้งในเนื้อฉนวนหรือนอกเนื้อฉนวนนั้น จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดนั้นสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตหรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength)

จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบการฉนวนดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย อย่างข้อผิดพลาดที่ทำให้เกิดโพรงอากาศช่องเล็กๆภายในวัสดุฉนวนระหว่างกระบวนการผลิต ข้อผิดพลาดที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวนระหว่างการประกอบติดตั้ง/ปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่หน้างาน โครงสร้างพื้นตะกั่วภายในฉนวนถูกทำลายตามระยะเวลาที่ใช้งาน การได้รับความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงเกินไปจากเหตุการณ์ลัดวงจรแรงดันกระเพื่อม ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันเกินและกระแสเกินในช่วงเวลาฉับพลัน

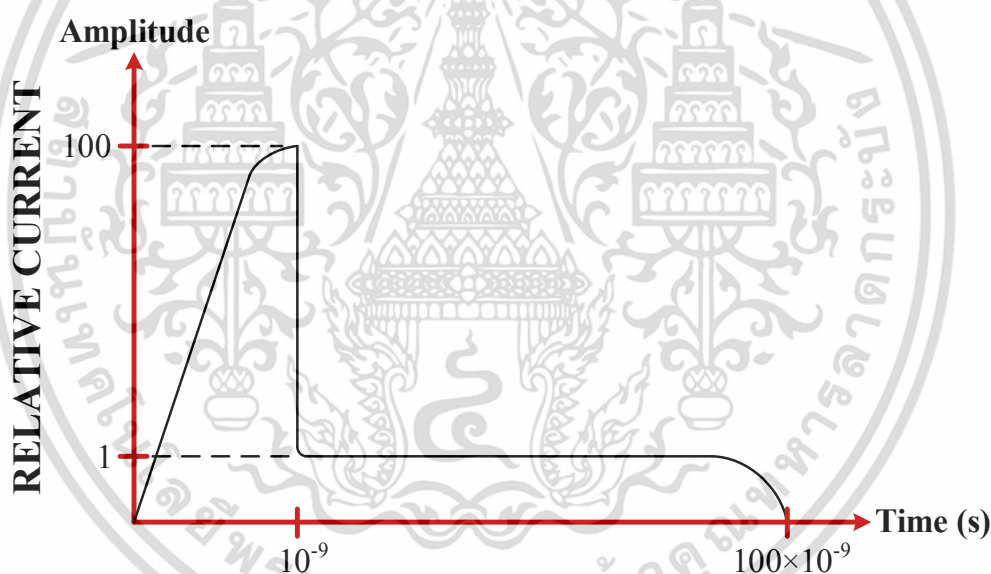
นิยามของ Küchler (2017: 249) ได้ให้คำอธิบายของ PD ไว้ว่า “เป็นการดิสชาร์จที่ส่งผลกระทบต่อเพียงส่วนหนึ่งของระบบการฉนวนและยังไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ในทันที และการเกิด PD นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบการฉนวนทุกประเภท” [6]

ในระยะเวลาอันสั้น การเกิด PD จะยังไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าแรงสูง แต่การเกิด PD ในแต่ละครั้งนั้นจะมีการถ่ายเทพลังงานไปกระทบยังพื้นผิวฉนวน ถ้าหากเกิดดิสชาร์จขึ้นในระยะยาวจะทำให้จุดบกพร่องที่ระบบการฉนวนขยายตัวมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของฉนวนนั้นสั้นลงจนนำไปสู่การเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์จากด้านแรงดันสูงลงสู่กราวด์ (Ground) ได้ และก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้การเกิด PD ยังเป็นตัวสร้างสื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แพร่สัญญาณออกไปในรูปแบบของคลื่นรบกวนวิทยุที่เป็นการรบกวนระบบสื่อสารช่วงความถี่วิทยุ ระบบควบคุม รวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 ลักษณะรูปร่างสัญญาณพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน

ขณะที่เกิด PD ในแต่ละครั้ง จะเกิดการก่อตัวของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ (Electron avalanche) ขึ้นภายในช่วงเวลาหลักนาโนวินาที (Nanosecond; ns) เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนั้นเร็วมาก ซึ่งสัมพันธ์กับกระแสพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน (PD pulse current) ที่ไหลผ่านจุดบกพร่องอย่างรวดเร็วและการเกิดประจุพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน (PD pulse charge) ขึ้นที่บริเวณอิเล็กโทรด (Electrode) ในช่วงเวลาหลักนาโนวินาทีเช่นเดียวกัน ทฤษฎีนี้ในถูกตั้งสมมติฐานขึ้นโดย Raether ในปี ค.ศ. 1964 และ Bailey ในปี ค.ศ. 1966 เวลาต่อมาทฤษฎีนี้ได้รับการยืนยันผ่านการทดลองของ Fujimoto และ Boggs ในปี ค.ศ. 1981 เช่นเดียวกับการทดลองของ Boggs และ Stone ในปี ค.ศ. 1982 ที่ได้มีการใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ความถี่ 1 GHz เป็นเครื่องมือตรวจวัดแสดงรูปคลื่นสัญญาณพารามิเตอร์เวลา (Time parameters) ของกระแสพัลส์ PD ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [7]



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณพารามิเตอร์เวลาของกระแสพัลส์ PD

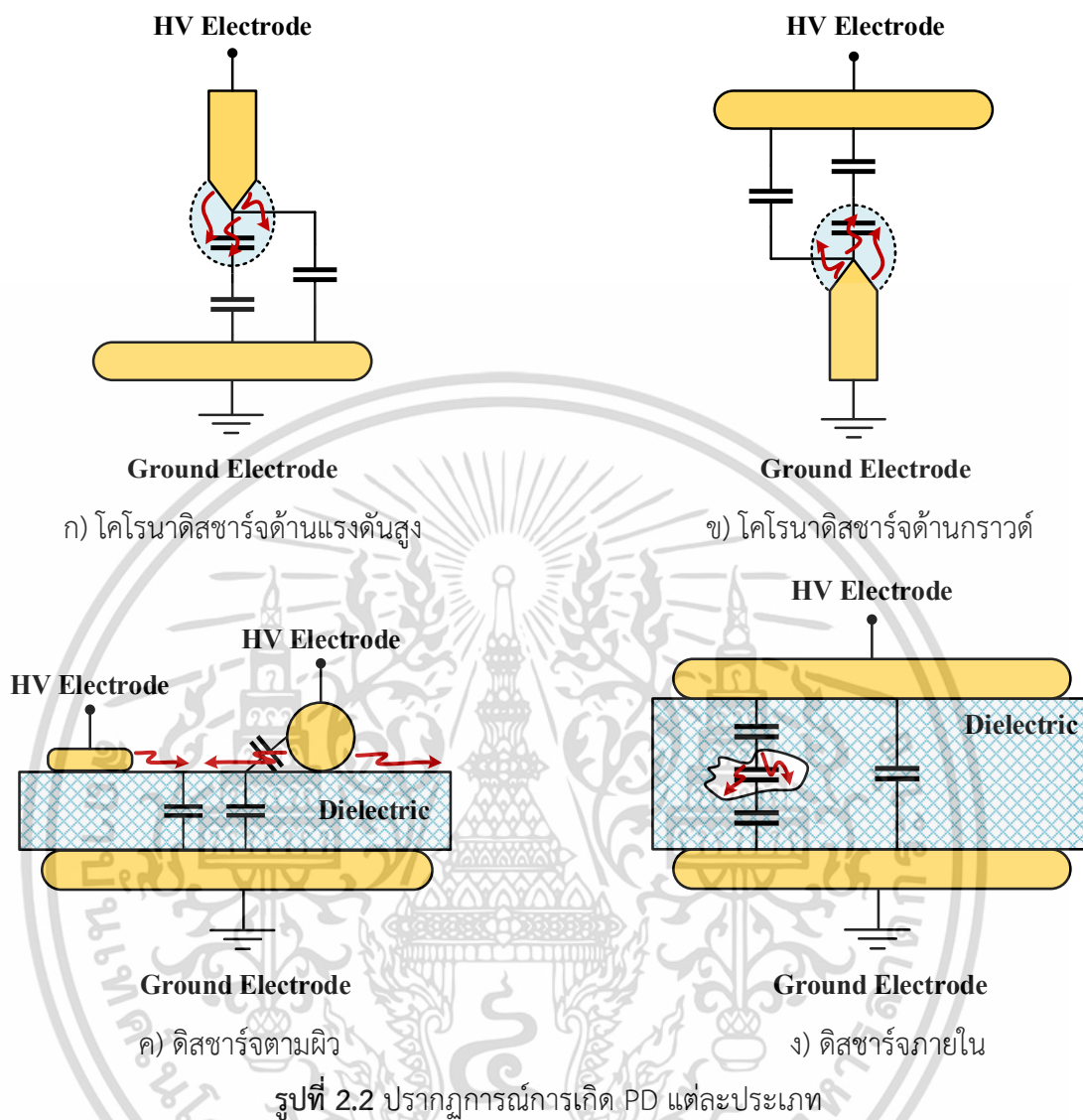
### 2.1.2 ประเภทการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะการเกิด PD นั้นขึ้นอยู่กับรูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration) และสภาพฉนวนในแนวระหว่างอิเล็กโทรดที่สามารถแสดงลักษณะสนามไฟฟ้าและค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่แตกต่างกัน การเกิด PD นั้นสามารถแสดงรูปแบบในลักษณะที่ต่างกันออกไป โดยสามารถจำแนกแบ่งลักษณะการเกิด PD ได้สามประเภทหลัก คือ

1) โครนาดีสชาร์จ (Corona discharge) สามารถเกิดขึ้นได้ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform electric field stress) รอบปลายแหลมของอิเล็กโทรด หากเกิดโครนาดีสชาร์จขึ้นในอากาศจะทำให้เกิดโอโซนที่สามารถไปทำลายพื้นผิวฉนวน (Ozone attack polymeric insulation) ในบริเวณใกล้เคียงได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างสัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์และระบบบริเวณใกล้เคียงด้วย โครนาดีสชาร์จที่เกิดรอบบริเวณอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการดีสชาร์จจากโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบอื่น จึงสามารถกำหนดช่วงปลายแหลมให้อยู่ด้านแรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ก) เรียกว่า โครนาด้านแรงดันสูง (High voltage corona) หรือกำหนดช่วงปลายแหลมให้อยู่ด้านกราวด์ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข) เรียกว่า โครนาด้านกราวด์ (Ground corona)

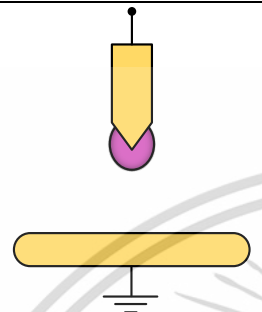
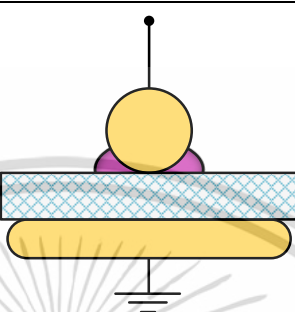
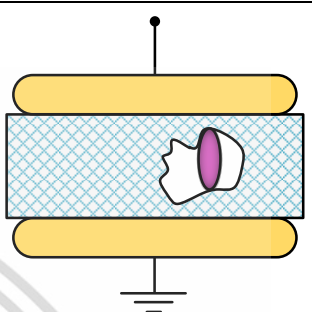
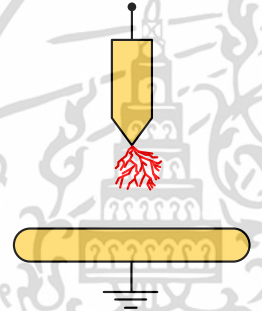
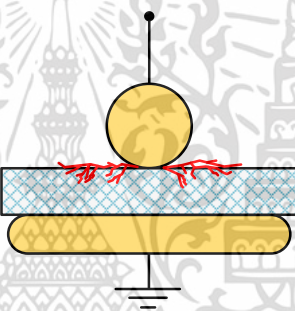
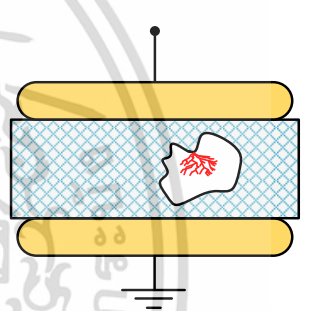
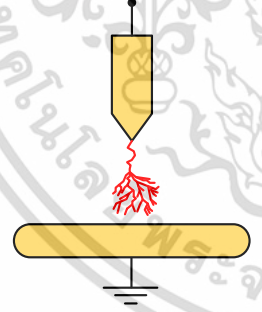
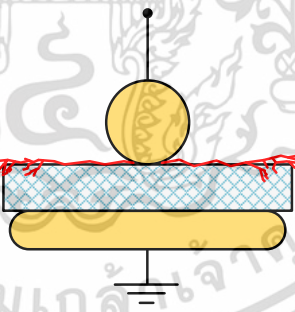
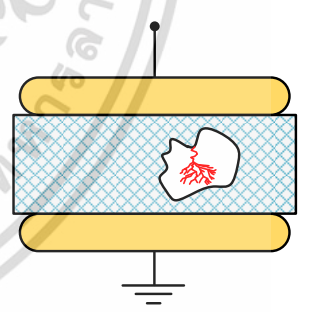
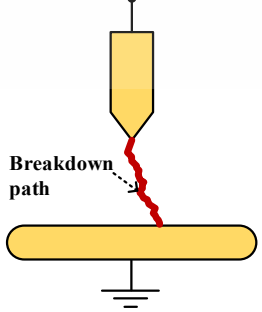
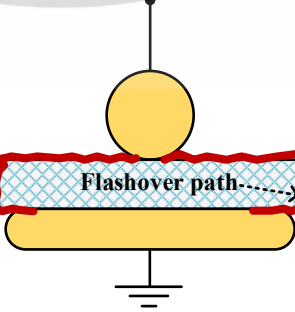
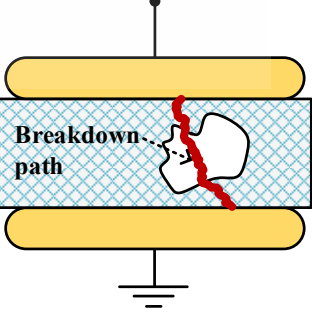
2) ดีสชาร์จตามผิว (Surface discharge) สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนาน (Tangential field) กับผิวฉนวนหรือความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤต ส่งผลให้เกิดความเสียหายในรูปแบบของรอยไหม้ (Tracking) ต่อผิวฉนวน การเกิด PD ในลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในอากาศ ฉนวนก๊าซ ฉนวนน้ำมัน โดยมักเกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อสายเคเบิล บุขซึ่ง ปีกยึดปลอกฉนวนตัวนำสายและบริเวณที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับผิวฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค)

3) ดีสชาร์จภายใน (Internal discharge) สามารถเกิดขึ้นได้ภายในเนื้อฉนวนแข็งและฉนวนเหลว ซึ่งต่างจากโครนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิวที่เกิดดีสชาร์จขึ้นในบริเวณด้านนอกฉนวน จากการมีฟองอากาศหรือโพรงอากาศ สิ่งแปลกปลอมอื่นเจือปนที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ต่ำแฝงอยู่ในฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ง) ทำให้บริเวณที่พบเจอบุคพร่องเหล่านี้มีค่าความคงทนต่อแรงดันต้นเบรกดาวน์ต่ำและมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จนเกิดลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่บริเวณฉนวน ส่งผลให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร นอกจากนี้หากเกิดการดีสชาร์จขึ้นตรงจุดบกพร่องที่มีสิ่งแปลกปลอมอื่นเจือปนอยู่ จะทำให้เกิดก๊าซขึ้นตามมาด้วย



การเบรกดาวน์ในระบบการฉนวนสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การเบรกดาวน์เพียงบางส่วนหรือการเกิด PD ซึ่งสามารถแสดงกลไกการเกิดดิสชาร์จในระดับต่างๆได้ การเบรกดาวน์ประเภทนี้ยังไม่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ (Breakdown) หรือแฟลชโอเวอร์ (Flashover) ข้ามผ่านฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดทั้งหมด แต่ส่งผลให้ฉนวนเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพ การเบรกดาวน์อีกประเภทหนึ่ง คือ การเบรกดาวน์แบบสมบูรณ์ การเบรกดาวน์ประเภทนี้ทำให้เกิดวิถีทางการเบรกดาวน์ (Breakdown path) หรือวิถีทางแฟลชโอเวอร์ (Flashover path) ข้ามผ่านฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดทั้งหมด ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวนดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะกลไกการเกิดการเบรกดาวน์แต่ละประเภทในระบบการฉนวน

ประเภท	ดิสชาร์จภายนอก		ดิสชาร์จภายใน
	ดิสชาร์จที่อิเล็กโตรดปลายแหลม	ดิสชาร์จตามผิวฉนวน	ดิสชาร์จในโพรงอากาศหรือฟองอากาศของฉนวน
การเบรกดาวน์เพียงบางส่วน	 <p>การดิสชาร์จเรืองแสง</p>	 <p>การดิสชาร์จเรืองแสง</p>	 <p>การดิสชาร์จเรืองแสง</p>
	 <p>สตรีมเมอร์ดิสชาร์จ</p>	 <p>สตรีมเมอร์ดิสชาร์จ</p>	 <p>สตรีมเมอร์ดิสชาร์จ</p>
	 <p>ลีดเดอร์ดิสชาร์จ</p>	 <p>ลีดเดอร์ดิสชาร์จ</p>	 <p>ลีดเดอร์ดิสชาร์จ</p>
การเบรกดาวน์แบบสมบูรณ์	 <p>เบรกดาวน์</p>	 <p>แฟลชโอเวอร์</p>	 <p>เบรกดาวน์</p>

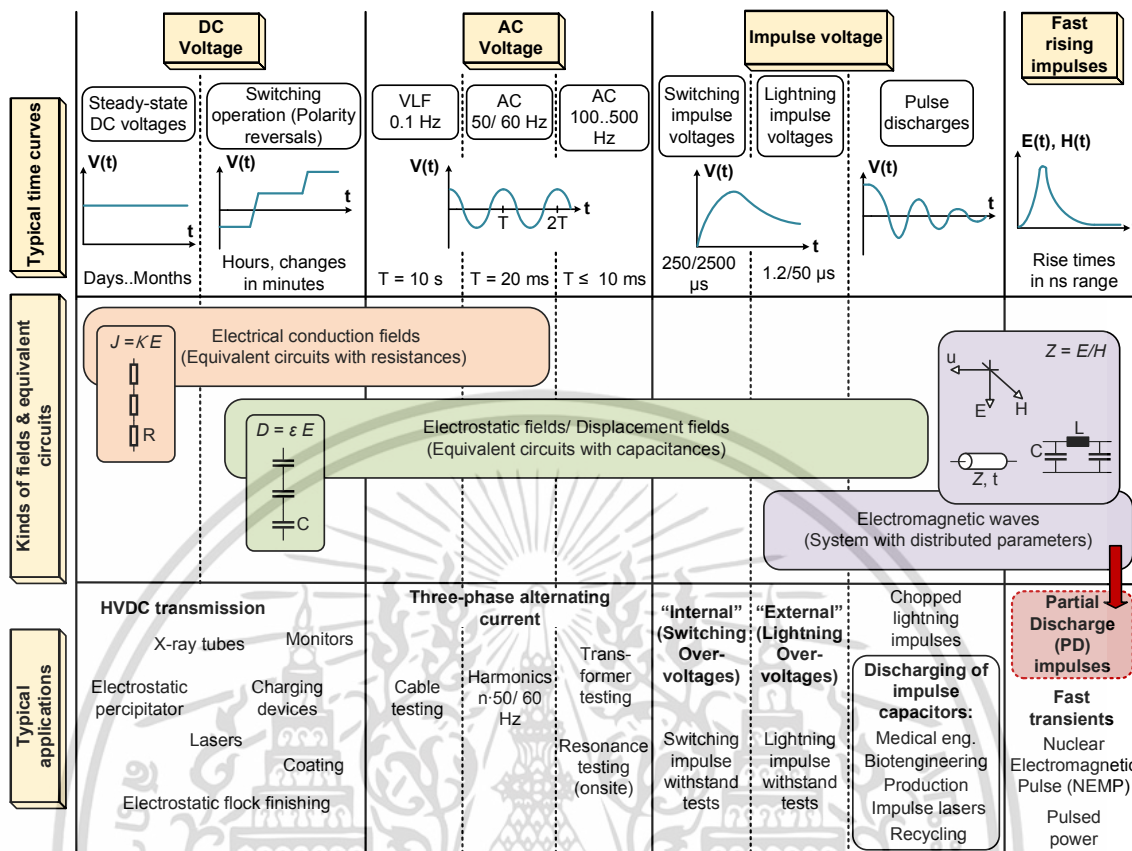
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้ว การเกิด PD ในแต่ละประเภทจะเริ่มต้นที่สภาวะการดิสชาร์จเรืองแสง (Glow discharge) [6] ตามทฤษฎีกลไกการเบรกดาวนของทาวน์เซนด์ (Townsend) แต่หากยังเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต่อไป จะทำให้เกิดอะวาลานซ์ของอนุภาคประจุเพิ่มขึ้น จนเกิดวิถีทางการดิสชาร์จของก๊าซ เรียกสภาวะนี้ว่า สตรีมเมอร์ดิสชาร์จ (Streamer discharge) ซึ่งส่งผลให้อัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเร็วขึ้นด้วย ทั้งสภาวะการดิสชาร์จเรืองแสงและสตรีมเมอร์ดิสชาร์จนั้นเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไอออไนเซชันโดยการชน (Collision ionization) แต่วิถีทางการดิสชาร์จนั้นยังสามารถเพิ่มระยะขึ้นได้อีกจากผลของปฏิกิริยาเทอร์มัลไอออไนเซชัน (Thermal ionization) ซึ่งเป็นการไอออไนเซชันอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเนื่องจากพลังงานความร้อนที่สูงขึ้นที่เกิดจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นไปอีก ส่งผลให้เกิดอะวาลานซ์ของอนุภาคประจุเพิ่มมากขึ้นอีก โดยจะเรียกว่าสภาวะนี้ว่า ลีดเดอร์ดิสชาร์จ (Leader discharge) ซึ่งเป็นกลไกสภาวะสุดท้ายก่อนเกิดการเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ในระบบการฉนวน

### 2.1.3 รูปแบบของสื่อสัญญาณสำหรับการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

การเกิด PD ในแต่ละครั้งนั้น จะสร้างปฏิกิริยาที่แปรผันไปตามสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าจนปลดปล่อยพลังงานออกมา ทำให้เกิดสื่อสัญญาณ ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ (Physical phenomena) ที่สามารถแสดงในรูปแบบที่ต่างกันออกมาหลายรูปแบบ คือ

- 1) ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า (Electrical phenomena)
  - เกิดกระแสพัลส์ไฟฟ้า (Electrical pulse current) หรือประจุพัลส์ไฟฟ้า (Electrical pulse charge) ขึ้นขณะที่เกิด PD
  - เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ขึ้นขณะที่เกิด PD
- 2) เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ในย่านความถี่สูงขณะที่เกิด PD [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.3
- 3) เกิดปรากฏการณ์เรืองแสง (Light emission) ขณะที่เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) เป็นโคโรนาดิสชาร์จ
- 4) เกิดคลื่นเสียง (Sound wave) หรือคลื่นความดัน (Pressure wave) ของสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic emission) ขณะที่เกิด PD
- 5) เกิดปฏิกิริยาทางความร้อน (Heat reaction) ขณะที่เกิด PD
- 6) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) ขณะที่เกิด PD



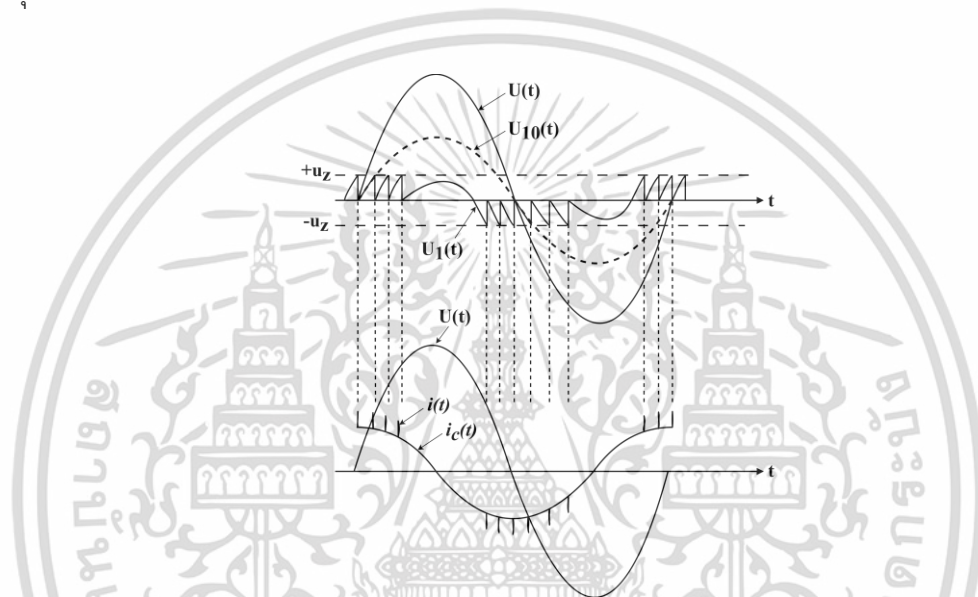
รูปที่ 2.3 ภาพโดยรวมของความเครียดทางไฟฟ้าแต่ละประเภทตามหลักการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

### 2.1.4 คุณลักษณะการแสดงผลสัขาร์จบางส่วน

สัญญาณพัลส์ PD สามารถเกิดขึ้นได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา จึงได้มีเทคนิค (Technique) วินิจฉัยข้อมูลแบบใหม่ โดยผ่านวิธีการประมวลผลสัญญาณ วิธีการทางสถิติ วิธีการจดจำรูปแบบ สำหรับแสดงคุณลักษณะรูปแบบการเกิด PD บนฐานเวลาสัญญาณแรงดันสูงกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ (Sine wave time base) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือ รูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) ซึ่งมีการเข้าจังหวะในการส่งข้อมูล (Synchronization) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณพัลส์ PD ที่สามารถแสดงขนาดและหน่วยวัดของสัญญาณพัลส์ ตำแหน่งศูนย์ของแรงดัน ตำแหน่งมุมเฟส (Phase;  $\varphi$ ) ค่าคงตัวเวลา ขั้วสัญญาณพัลส์ อัตราการเกิดซ้ำของกลุ่มสัญญาณพัลส์ที่พิจารณาจากการไล่ระดับสี

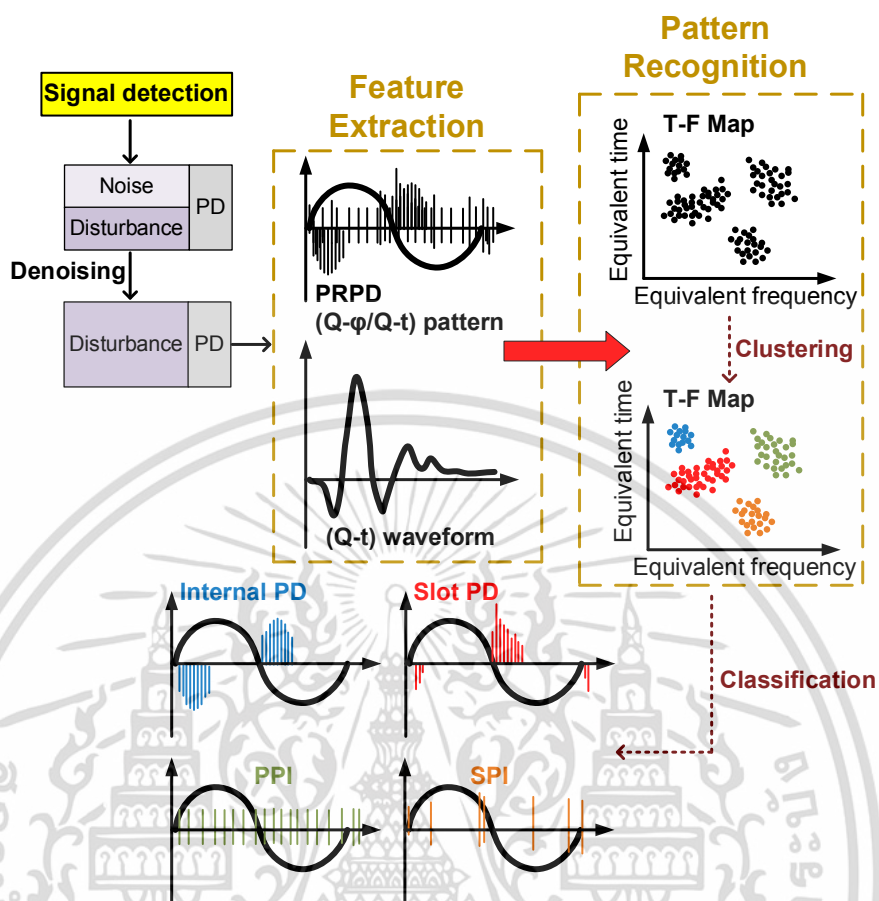
การเกิด PD บนฐานเวลาสัญญาณแรงดันสูงกระแสสลับ  $U(t)$  เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดด้านแรงดันสูง (HV electrode) และอิเล็กโทรดที่เชื่อมต่อกบกราวด์ (Ground electrode) จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเกิดแรงดันตกคร่อมช่องว่างอากาศ (จุดบกพร่อง) แถวบริเวณฉนวนขึ้นมา สัญญาณ  $U_{10}(t)$  จะแสดงถึงสัญญาณแรงดันตกคร่อมช่องว่างอากาศในกรณีที่ไม่

เกิดเบรกดาว์นขึ้นและสัญญาณ  $U_1(t)$  แสดงถึงสัญญาณแรงดันตกคร่อมช่องว่างอากาศที่เพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาว์น ทำให้อากาศเกิดไอออนเซชันและเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนมากขึ้นจนเกิดกระแสดิสชาร์จ  $i(t)$  ที่แรงดันเริ่มต้นดิสชาร์จ  $u_z$  และสามารถเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จซ้ำในช่วงครึ่งลบของแรงดันสูงกระแสสลับได้เช่นกัน ซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณกระแสคาปาซิทีฟ (Power frequency capacitive current;  $i_c(t)$ ) ที่ไหลผ่านฉนวน ซึ่งจะมีมูเฟสหน้าสัญญาณแรงดัน  $U(t)$  ที่ป้อนมาในระบบอยู่ 90 องศา ทั้งนี้อัตราการเกิดซ้ำของ PD จะขึ้นอยู่กับพิกัดและความถี่ของแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของจุดบกพร่องในระบบการฉนวน



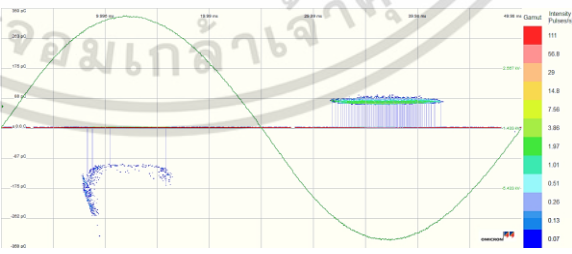
รูปที่ 2.4 สัญญาณแรงดันตกคร่อมและกระแสดิสชาร์จในช่องว่างอากาศขณะเกิด PD

ในปัจจุบัน การนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ PD ซึ่งมีวงจรภาคดิจิทัล (Digital circuit) โปรแกรมซอฟต์แวร์ (Software program) ติดตั้งไว้ภายในเป็นฐานบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์ (File) ช่วยให้สามารถทำการรับรู้ จัดจํารูปแบบข้อมูลการเกิด PD ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ โดยที่สัญญาณ PD นั้นจะได้รับการเตรียมและคัดแยกข้อมูลโดยฮาร์ดแวร์โมดูล (Hardware modules) ก่อนที่จะทำการแปลงข้อมูลไปสู่รูปแบบดิจิทัล (Digitization) ลดสัญญาณรบกวน (Denoising) โดยเทคนิคทางซอฟต์แวร์ (Software-based techniques) และจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณ PD ที่ตรวจวัดมาผ่านเทคนิคการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ (Feature extraction) การจำแนกรูปแบบข้อมูล (Pattern recognition) และอัลกอริทึมการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering algorithm) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สิ่งเหล่านี้ช่วยให้สามารถแยกแยะคุณลักษณะการแสดงผลของ PD ประเภทต่างๆได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีรูปแบบข้อมูลสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป ดังตัวอย่างผลทดสอบในตารางที่ 2.2



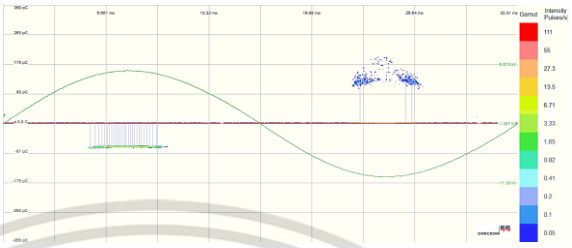
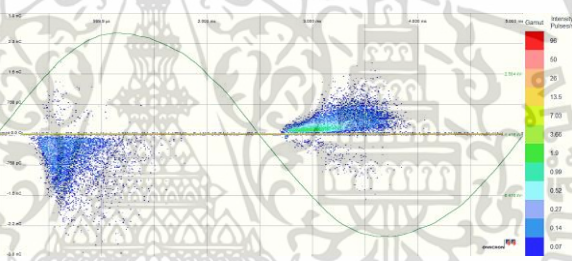
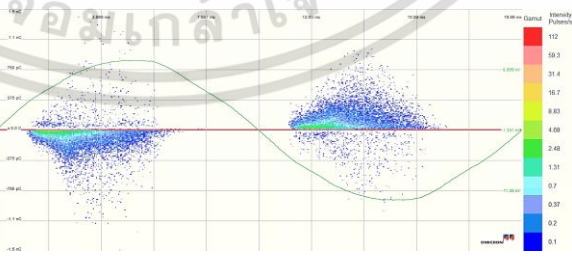
รูปที่ 2.5 ลักษณะการประมวลผลข้อมูลสัญญาณ PD

ตารางที่ 2.2 การแสดงผลรูปแบบข้อมูลสัญญาณ PD ประเภทต่างๆ

ประเภท ดิสชาร์จ	การแสดงผลผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์
โคโรนา ดิสชาร์จด้าน แรงดันสูง	<div style="text-align: center;">  </div> <p>ลักษณะที่แสดง: แรงดันเริ่มเกิด PD จะเกิดดิสชาร์จที่มีขนาดประจุคงที่ในช่วงแรงดันครึ่งลบที่มุมเฟส 270 องศา (หากเพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นอีก จะเกิดดิสชาร์จแบบขนแปรงในช่วงแรงดันครึ่งบวกที่มุมเฟส 90 องศาตามมา ซึ่งมีขนาดประจุใหญ่กว่า แต่อัตราการเกิดช้าน้อยกว่าดิสชาร์จในช่วงแรงดันครึ่งลบ)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ประเภท ดิสชาร์จ	การแสดงผลผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์
โคโรนา ดิสชาร์จด้าน กราวด์	 <p>ลักษณะที่แสดง: แรงดันเริ่มเกิด PD จะเกิดดิสชาร์จที่มีขนาดประจุคงที่ในช่วงแรงดันครึ่งบวกที่มุมเฟส 90 องศา (หากเพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นอีก จะเกิดดิสชาร์จแบบขนแปรงในช่วงแรงดันครึ่งลบที่มุมเฟส 270 องศาตามมา ซึ่งมีขนาดประจุใหญ่กว่า แต่อัตราการเกิดช้าน้อยกว่าดิสชาร์จในช่วงแรงดันครึ่งบวก)</p>
ดิสชาร์จตาม ผิว	 <p>ลักษณะที่แสดง: ที่แรงดันเริ่มเกิด PD จะเกิดดิสชาร์จทั้งในช่วงแรงดันครึ่งบวกและลบที่มีการกระจายข้อมูลในลักษณะที่ไม่สมมาตรกัน เมื่อพิจารณาในช่วงแรงดันครึ่งบวกพบว่าการเกิดดิสชาร์จมีอัตราการเกิดช้าน้อยกว่าและมีขนาดประจุที่สูงกว่าในช่วงแรงดันครึ่งลบ</p>
ดิสชาร์จ ภายใน	 <p>ลักษณะที่แสดง: ที่แรงดันเริ่มเกิด PD จะเกิดดิสชาร์จทั้งในช่วงแรงดันครึ่งบวกและแรงดันครึ่งลบที่มีการกระจายข้อมูลในลักษณะที่ค่อนข้างสมมาตรกันมากกว่า PD ประเภทอื่น</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

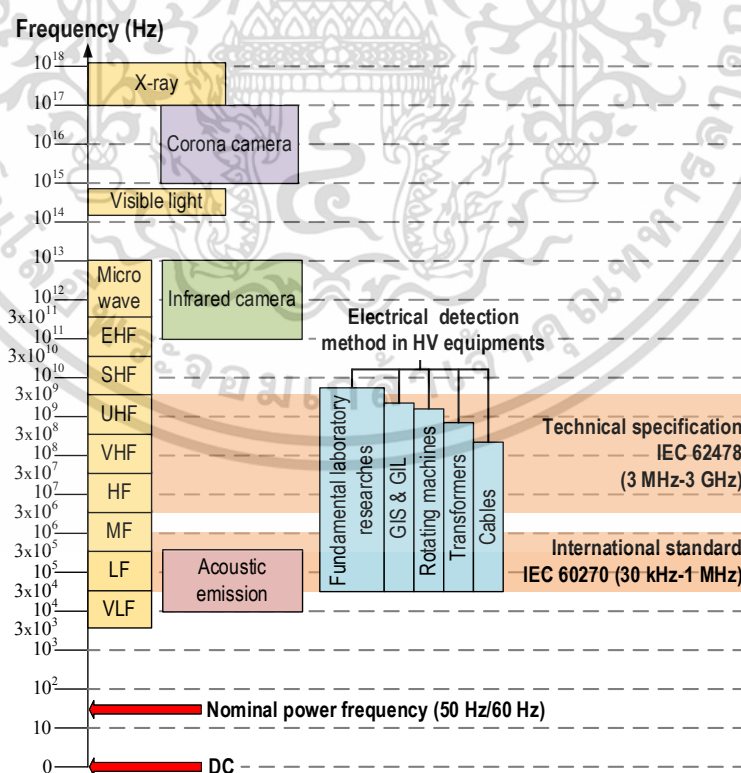
## 2.1.5 หน่วยวัดดิซชาร์จบางส่วน

ปรากฏการณ์ PD ทำให้เกิดกระแสพัลส์ที่มีช่วงเวลาขาขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ หลักนาโนวินาทีหรืออาจน้อยกว่านั้นได้ โดยขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีการใช้ระบบการฉนวนที่แตกต่างกัน สัญญาณพัลส์ PD จึงสามารถปรากฏขึ้นได้ในย่านความถี่ที่กว้างจนถึงหลัก GHz ดังนั้นการตรวจวัด PD ในแต่ละวิธีจึงมีจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไป ไว้สำหรับพิจารณาเลือกใช้งานตามความเหมาะสมของวิธีการและอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัด โดยสามารถแยกแยะได้ตามความถี่ใช้งานแต่ละย่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

การตรวจวัด PD สามารถระบุหน่วยวัดขนาดพัลส์ (PD pulse magnitude) ได้ทั้งหมดสองหน่วย คือ พิโคคูลอมบ์ (Picocoulomb; pC) และมิลลิโวลต์ (Millivolt; mV) โดยขึ้นอยู่กับวิธีการตรวจวัด เช่น

1) การตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Conventional method) ตามมาตรฐาน IEC 60270 จะทำการตรวจวัดค่าประจุปรากฏออกมาในหน่วยวัด pC ซึ่งจะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในเทคนิคการตรวจวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบออฟไลน์ (Off-line PD measurement technique) เท่านั้น

2) การตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยวิธีการทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงมากหรือวีเอชเอฟ (Very High Frequency; VHF) และย่านความถี่สูงยิ่งหรือยูเอชเอฟ (Ultra-High Frequency; UHF) จะทำการตรวจจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในหน่วยวัด mV ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในเทคนิคการตรวจวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์ (On-line PD measurement technique) ได้



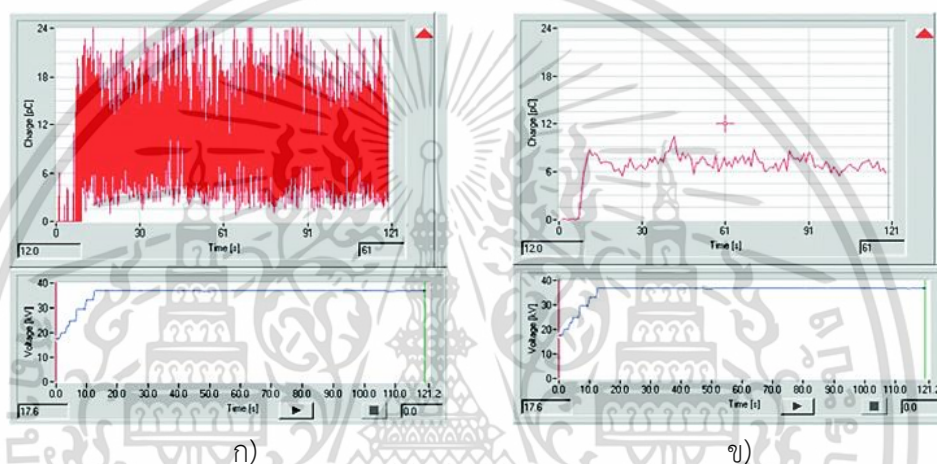
รูปที่ 2.6 ย่านความถี่ใช้งานสำหรับการตรวจวัด PD ตามข้อกำหนดทางเทคนิคและมาตรฐานสากล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

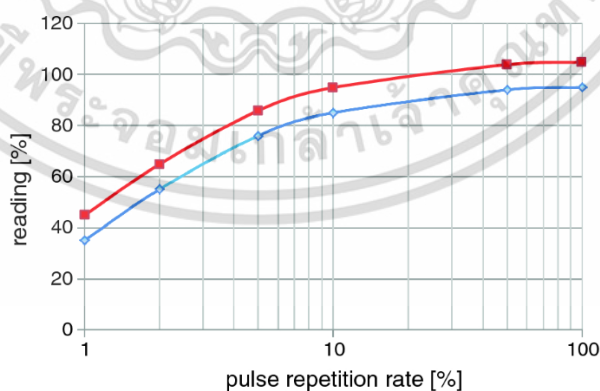
### 2.1.6 ขนาดดิสชาร์จบางส่วนทางสถิติ

1) ขนาด PD จากการตอบสนองของสัญญาณพัลส์ตามนิยามมาตรฐาน IEC 60270 ( $Q_{IEC}$ )

โดยทั่วไปแล้วขนาดพัลส์ PD ที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งจะมีรูปแบบการกระจายแบบสุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.7 ก) ดังนั้นการประมวลผลหาขนาด PD,  $Q_{IEC}$  จึงได้มีการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักข้อมูล (Weighted) สัญญาณ PD ที่ตรวจวัดออกมาในหน่วยวัด pC เพื่อหาขนาดสัญญาณ PD ที่มีอัตราการเกิดซ้ำมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ข) ผ่านการวิเคราะห์จากระบบวัดของวิธีการแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 ที่มีการนำเสนอถึง Pulse train response ที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐานสากล ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การแสดงระดับสัญญาณ PD ที่ประมวลผลจากระบบวัด ก) ระดับแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์ประจุที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง ข) ระดับสัญญาณ PD ที่มีอัตราการเกิดซ้ำมากที่สุดจากการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักข้อมูลตามมาตรฐาน IEC 60270 [7]

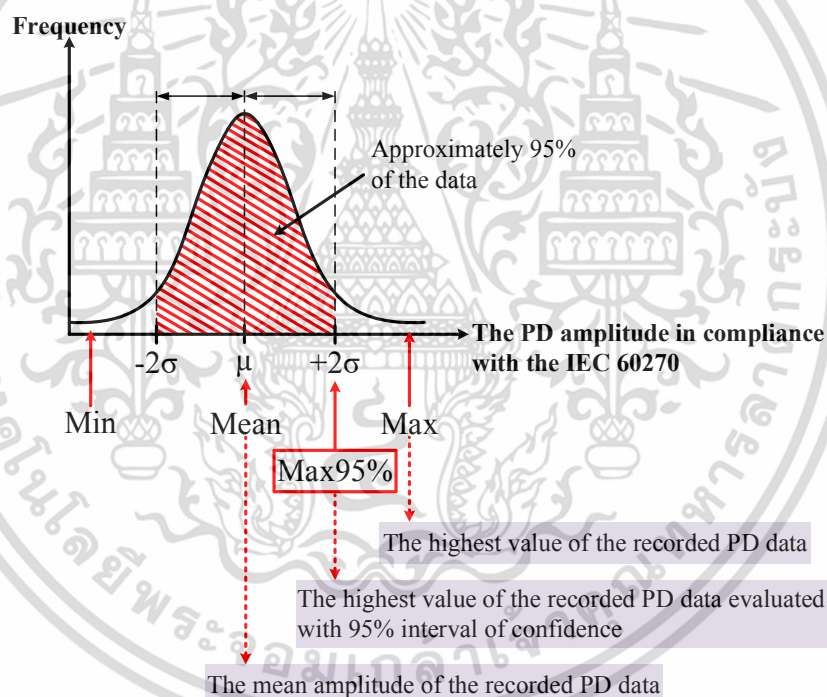


รูปที่ 2.8 Pulse train response ที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน IEC 60270 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ขนาด PD จากการประมวลผลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ครอบคลุมช่วง 95 % ของข้อมูลที่ตรวจวัดออกมา ( $Q_{Max95\%}$ )

การหาขนาด PD ทางสถิติอีกรูปแบบหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถหาได้จากการประมวลผลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ครอบคลุมช่วง 95 % ของข้อมูลสัญญาณ PD,  $Q_{Max95\%}$  ซึ่งข้อมูลสัญญาณ PD สามารถถูกตรวจวัดผ่านวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 แล้วแสดงผลลัพธ์ออกมาในหน่วยวัดสัญญาณ pC หรือถูกตรวจวัดผ่านวิธีการวัดที่ไม่ใช่แบบดั้งเดิม (Non-conventional method) อย่างการตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยวิธีการทางคลื่นความถี่วิทยุ/คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการทางสนามแม่เหล็ก แล้วแสดงผลลัพธ์ออกมาในหน่วยวัดสัญญาณ mV ทำให้การวิเคราะห์หาขนาด PD,  $Q_{Max95\%}$  นี้มีการรองรับทั้งในเทคนิคการตรวจจับ PD แบบออฟไลน์และเทคนิคการตรวจจับ PD แบบออนไลน์ที่สามารถบันทึกผลและรายงานข้อมูลขนาด PD ทางสถิติที่น่าเชื่อถือออกมาได้

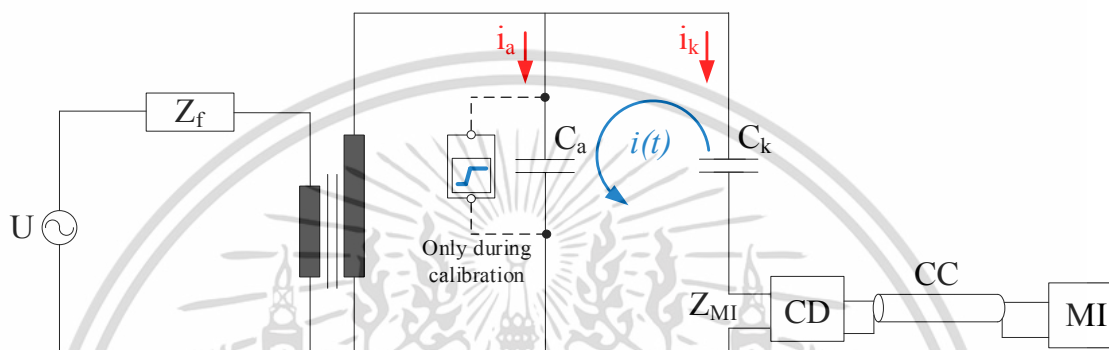


รูปที่ 2.9 หลักการประมวลผลหาขนาด PD จาก 95 % ของช่วงค่าที่ครอบคลุมข้อมูลการตรวจวัด

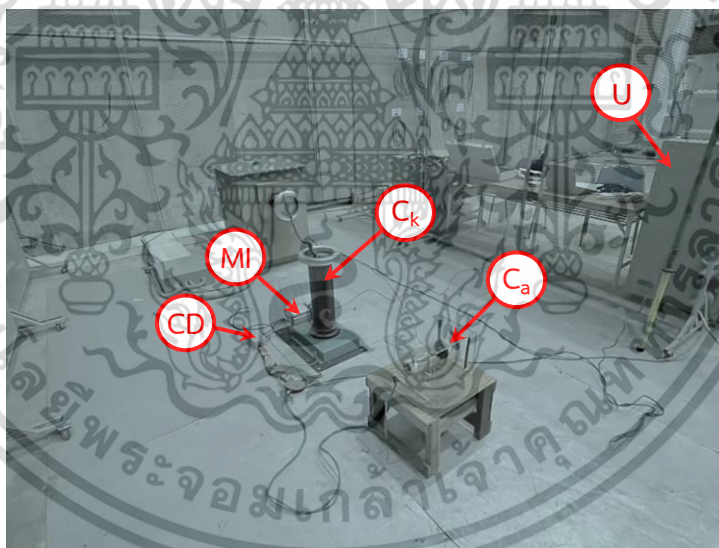
## 2.2 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270

การตรวจวัด PD โดยใช้วิธีการแบบดั้งเดิมเป็นการวัดผลทางไฟฟ้าตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 เพื่อตรวจวัดขนาดสัญญาณดิสชาร์จที่เกิดขึ้นในเชิงปริมาณที่ดีที่สุดด้วยวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะตรวจวัดกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัดและสามารถทราบขนาดของดิสชาร์จที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่การวัดสูงสุดไม่เกิน 1 MHz [5] ระบบวัดที่ใช้มีทั้งเครื่องวัดแถบความถี่กว้าง (Wideband

PD instrument) และเครื่องวัดแถบความถี่แคบ (Narrowband PD instrument) [8] ข้อได้เปรียบที่สำคัญของวิธีการนี้ คือ สามารถใช้วิธีการปรับเทียบเทียบ (Calibration) ให้แก่วงจรวัดก่อนทำการทดสอบได้ด้วยการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ  $Q_{cal}$  หากเครื่องตรวจวัดอ่านค่าประจุได้  $Q_{mea}$  จะสามารถตรวจสอบค่าสเกลแพกเตอร์การปรับเทียบ (IEC calibration factor) ที่ประมวลผลจากระบบวัดประจุปรากฏ และควรให้ระดับค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง  $Q_{cal}$  และ  $Q_{mea}$  ไม่เกิน  $\pm 5\%$  หรือ  $\pm 1\text{ pC}$  [1]



ก) ภาพวงจรไดอะแกรม (Diagram)



ข) ภาพวงจรจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

รูปที่ 2.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัด PD ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติที่สำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรการตรวจวัด PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $U$  คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับ (AC voltage supply) ที่ใช้ในการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงให้กับวงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอสำหรับจ่ายโหลด โดยใช้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง

$Z_f$  คือ ตัวกรองสัญญาณ (Filter) ที่ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงที่ความถี่สูงจากหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง ตัวกรองชนิดนี้สามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low-pass filter) ซึ่งคอยทำหน้าที่ป้องกันวงจรทดสอบจากสัญญาณรบกวนความถี่สูงอย่างฮาร์โมนิก (Harmonic) และ PD ที่อาจเกิดภายในหม้อแปลงทดสอบที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย อีกทั้งยังช่วยป้องกัน PD จากวงจรทดสอบที่สามารถไหลย้อนลงผ่านกราวด์ไปทางแหล่งจ่ายได้

$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคัปเปิลหรือตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor) ที่ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรกับวัตถุทดสอบ  $C_a$  หรืออุปกรณ์จำลอง PD และอุปกรณ์รับสัญญาณหรืออุปกรณ์คัปเปิล (Coupling Device; CD) ซึ่งมีสายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable; CC) เชื่อมต่อกับเครื่องมือวัด (Measuring instrument; MI) สำหรับแสดงคุณลักษณะการเกิด PD ผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นใน  $C_a$  จะทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ  $C_a$  เป็นเหตุให้  $C_k$  ทำการถ่ายเทประจุเข้าไปทดแทน นั่นคือจะมีกระแสพัลส์  $i(t)$  ไหลวนซ้อนกับกระแสที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุคัปเปิล  $i_k$  และกระแสที่ป้อนให้กับวัตถุทดสอบ  $i_a$  โดยกระแส  $i(t)$  จะถูกตรวจวัดออกมาในลักษณะของสัญญาณพัลส์ผ่านอุปกรณ์ CD และ MI ที่จะทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแส  $i(t)$  และมีอินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบวัด (Input impedance of measuring system;  $Z_{MI}$ ) ที่มีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว

## 2.3 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ

การเกิด PD ไม่เพียงเกิดขึ้นในช่วงความถี่การวัดของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 เท่านั้น เนื่องจากในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอย่าง GIS มีการประยุกต์ใช้ฉนวนก๊าซในระบบสถานีแบบปิด ทำให้กระแสพัลส์ PD ที่เกิดขึ้นสามารถเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอาจมีช่วงเวลาขาขึ้นของกระแสพัลส์น้อยกว่า 0.1 ns [12] ทำให้ความถี่ของกระแสพัลส์สูงมากจนถึงย่านความถี่กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz; GHz) จึงได้มีการคิดค้นการตรวจวัด PD ด้วยวิธีการทางคลื่นความถี่วิทยุยูเอชเอฟ (300 MHz ถึง 3 GHz) โดยอาศัยหลักการตรวจจับสัญญาณในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) หรือคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency; RF) ของเซนเซอร์/สายอากาศ [2] – [5] ทำให้ไม่ได้รับอิทธิพลของสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในย่านความถี่สูงมากหรือวีเอชเอฟลงมา ในปัจจุบันสามารถแสดงคุณลักษณะการเกิด PD ผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้เช่นเดียวกับการตรวจวัด PD ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม ทั้งนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจาก PD สามารถแพร่กระจายสัญญาณออกไปได้ไกลโดยมีการลดทอนของสัญญาณน้อยกว่าคลื่นเสียง [2] จึงสามารถติดตั้งเซนเซอร์/สายอากาศในระยะทางที่ไกลจาก

แหล่งกำเนิดดิสซาร์บางส่วน (PD source) ได้ ซึ่งมีการนำมาใช้งานในระบบ GIS ที่มีโครงสร้างเป็นท่อโลหะ/ตัวถังโลหะ (Enclosure) ต่อถึงกันเป็นระยะๆ

การตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟนั้นเหมาะสมสำหรับการตรวจติดตามในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ไม่พบลักษณะการหน่วงของสัญญาณในเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณ ซึ่งพบได้ในสถานีที่มีการใช้ฉนวนก๊าซแบบระบบปิดอย่าง GIS ในทางกลับกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีองค์ประกอบของไดอิเล็กทริกของเหลวและของแข็ง รวมถึงมีเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่ซับซ้อนอย่างสายเคเบิล จะพบลักษณะการหน่วงของสัญญาณที่สูงขึ้นอย่างมาก ดังนั้นการเลือกประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดยูเอชเอฟนั้นจึงมีข้อจำกัดการใช้งาน

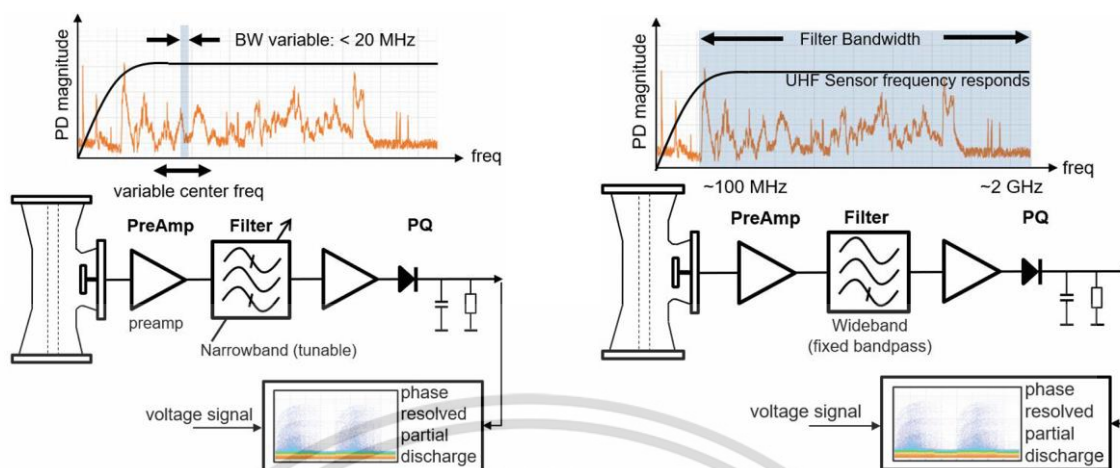
เทคนิคการวัดยูเอชเอฟดังที่กล่าวมานั้นจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการตรวจสอบ วินิจฉัยระบบ GIS ขณะที่อุปกรณ์ยังทำงานอยู่ในสภาวะปกติ และยังสามารถนำมาใช้ทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ GIS ก่อนนำไปติดตั้งในพื้นที่หน้างาน

### 2.3.1 ประเภทของเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ

สำหรับการตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ สามารถออกแบบให้ระบบวัดของอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นแบบแถบความถี่แคบหรือแถบความถี่กว้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งส่วนใหญ่มักถูกเลือกใช้งานในย่านความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 1.5 GHz เป็นหลัก [23] – [26] การนำเทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่แคบและเทคนิคการวัดแถบความถี่กว้างของเซนเซอร์ยูเอชเอฟมาประยุกต์ใช้งานร่วมกันนั้น ทำให้สามารถนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ร่วมกันและเป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยได้ [9] เนื่องจากในแต่ละเทคนิคมีคุณลักษณะและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

1) เทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่แคบ มักใช้งานในย่านความถี่ที่ไม่เกิน 2 GHz [6] สามารถเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขนาดใกล้เคียง 5 MHz ได้ [3] หรือกำหนดให้สัดส่วนขนาดแบนด์วิดท์ของสายอากาศในรูปของแฟรคชันนอลแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) มีค่าน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ [25, 26] มักถูกใช้ในบริเวณทดสอบที่พบเจอสัญญาณรบกวนจากระบบข้างเคียงสูง เนื่องจากมีการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำ ทำให้เทคนิคการตรวจวัดนี้มีโอกาสแสดงอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนที่สูง

2) เทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่กว้าง สามารถเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) สูงได้หลายร้อย MHz หรือกำหนดให้สัดส่วนขนาดแบนด์วิดท์ของสายอากาศในรูปของแฟรคชันนอลแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth) มีค่า 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป [25, 26] มักถูกใช้ในงานตรวจวัดสเปกตรัมของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นวงกว้างหรือไม่ทราบแน่ชัด ทำให้มีโอกาสตรวจพบเจอข้อมูลของสัญญาณได้มากกว่าการวัดแถบความถี่แคบ แต่มีการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนจากความถี่อื่นมากขึ้นด้วยเช่นกัน



ก) เทคนิคการวัดแถบความถี่แคบ

ข) เทคนิคการวัดแถบความถี่กว้าง

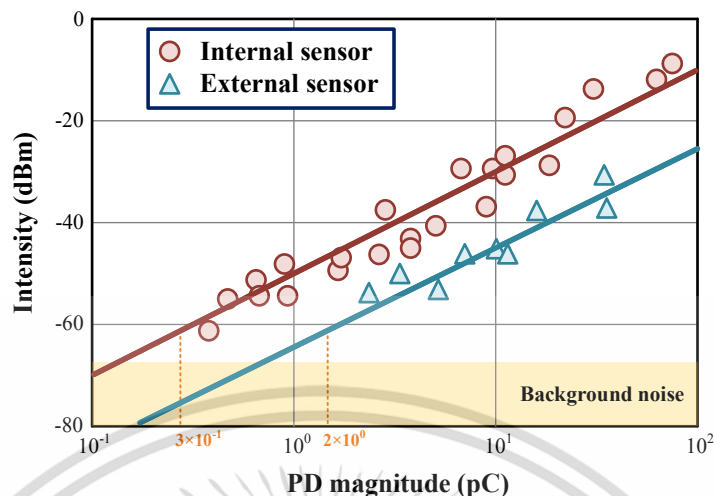
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างของวิธีการตรวจวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายูเอชเอฟ [9]

### 2.3.2 รูปแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์ยูเอชเอฟ

เทคโนโลยีที่สำคัญของวิธีการตรวจวัดสัญญาณย่านความถี่ยูเอชเอฟ คือ เซ็นเซอร์ยูเอชเอฟ เมื่อแบ่งแยกตามวิธีการติดตั้งเซ็นเซอร์ จะสามารถแบ่งประเภทเซ็นเซอร์ออกเป็นทั้งหมดสองประเภทหลัก คือ เซ็นเซอร์ภายใน (Internal sensor) ตัวอย่างเช่น ออยล์เดรนวาล์วเซ็นเซอร์ (Oil drain valve sensor) อินเทอร์นอลวินโดว์เซ็นเซอร์ (Internal window sensor) โคนเซ็นเซอร์ (Cone sensor) ลูปเซ็นเซอร์ (Loop sensor) เป็นต้น และเซ็นเซอร์ภายนอก (External sensor) ตัวอย่างเช่น แบร์ริเออร์เซ็นเซอร์ (Barrier sensor) พ็อกเก็ตเซ็นเซอร์ (Pocket sensor) เป็นต้น [3]

การติดตั้งเซ็นเซอร์ยูเอชเอฟตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น สามารถรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF electromagnetic wave) หรือคลื่นทรานเซียนต์ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF transient wave) จากการเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จบางส่วนที่สามารถเกิดขึ้นได้ตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด

การติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในนั้นมีการตอบสนองต่อการตรวจวัดสัญญาณที่ไว และได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอกต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.12 แต่ข้อจำกัดของเซ็นเซอร์ภายในนั้น คือ ไม่สามารถนำไปติดตั้งในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอย่าง GIS ขณะทำการส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ รวมทั้งไม่สามารถทำการย้ายจุดติดตั้งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดในระหว่างการทดสอบ จึงได้มีการออกแบบสร้างเซ็นเซอร์ภายนอกเพื่อให้มีความสะดวกต่อการนำเซ็นเซอร์ไปติดตั้งขณะที่ระบบทำการส่งไฟฟ้าแรงสูง และยังมีข้อดี คือ ตัวเซ็นเซอร์ภายนอกนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความเครียดสนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ที่ตรวจวัด ทำให้ไม่มีโอกาสสร้างความเสียหายภายในต่ออุปกรณ์ที่ตรวจวัดในระหว่างทดสอบ [10]

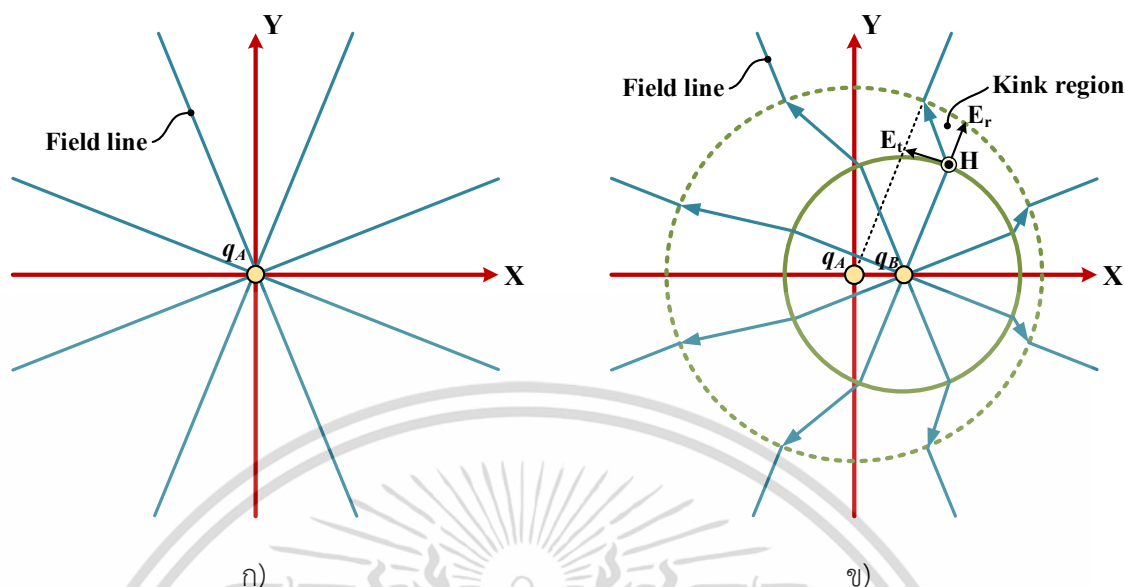


รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบความไวในการวัดของเซนเซอร์ภายในและเซนเซอร์ภายนอก

## 2.4 ปฏิกิริยาการแพร่สัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การศึกษาลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถแพร่สัญญาณในโครงสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องทำความเข้าใจสำหรับการตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ ตามพื้นฐานในระหว่างการเกิด PD ประจุอิเล็กตรอน (Electron charges) ที่หยุดนิ่งในตอนเริ่มแรกจะมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีการแปรผันตามเวลารอบๆประจุไฟฟ้า จากหลักการนี้จึงสามารถทำความเข้าใจลักษณะการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซขณะที่เกิด PD ได้

ปรากฏการณ์แพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า โดย Agoris (2009: 25) ได้กล่าวถึงประจุไฟฟ้า  $q$  ที่เคลื่อนที่จากตำแหน่ง A (ประจุไฟฟ้าหยุดนิ่ง) ไปยังตำแหน่ง B (ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่) ในรูปแบบของพลังงานจลน์ ตามทิศทางแกน  $x$  เป็นเวลา  $\Delta t$  ด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ  $v = a\Delta t$  ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในระหว่างการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า เส้นสนามไฟฟ้า (Field lines) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ทำให้สนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) [11]

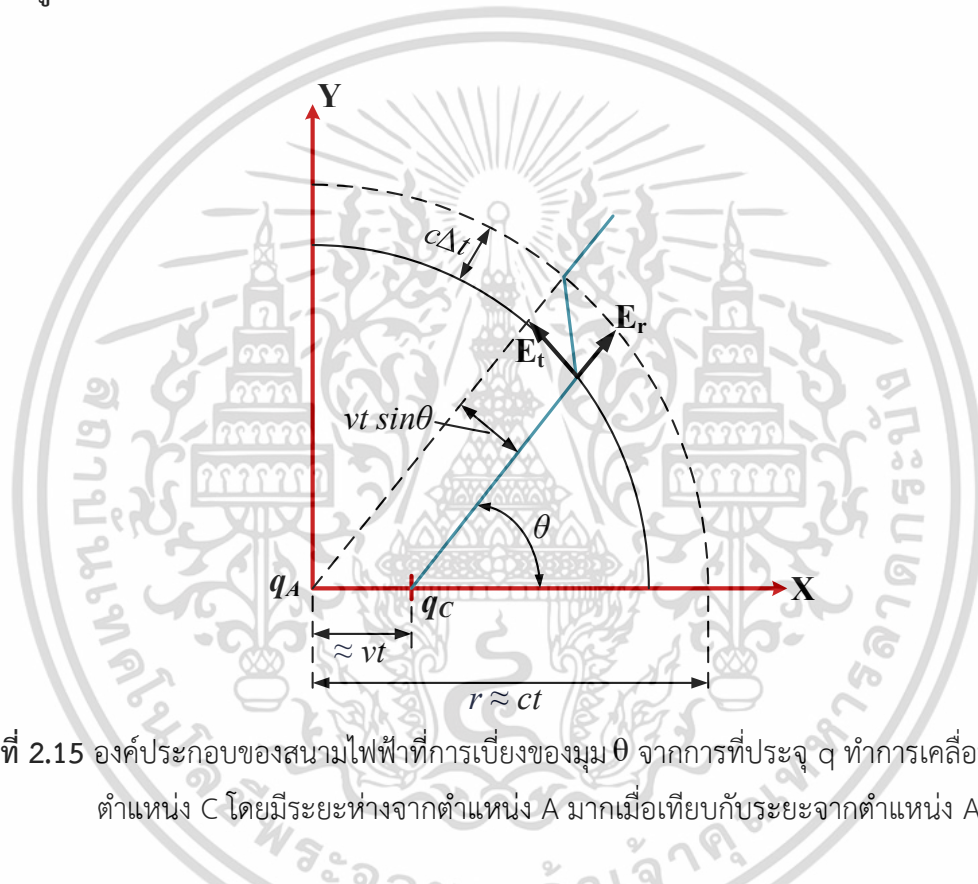


รูปที่ 2.13 สถานะฉุกเฉินเริ่มต้นของการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) ประจุไฟฟ้าสถิตอยู่ในสถานะเริ่มแรก (ข) การแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในทิศทางแกน x

จากการเปลี่ยนแปลงของเส้นสนามไฟฟ้า ทำให้เกิด Kink region ตามแนวเส้นสนามไฟฟ้า โดยมีทิศทางพุ่งเข้าหาเส้นสนามไฟฟ้าแรกเริ่ม (ประจุไฟฟ้ายังอยู่ในตำแหน่ง A,  $q_A$ ) และมีทิศทางพุ่งออกจากเส้นสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา (ประจุไฟฟ้าอยู่ในตำแหน่ง B,  $q_B$ ) โดยใน kink region มีองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (Vector field) ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เวกเตอร์ คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามแนวรัศมี  $E_r$  และเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามแนวสัมผัส  $E_t$  โดยหากพิจารณาตามหลักการของเวกเตอร์พอยน์ติง (Poynting vector)  $S = E \times H$  (เมื่อ  $E$  คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าและ  $H$  คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก) ที่แสดงถึงทิศทางและการไหลของพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  $u$  เมื่อให้เวกเตอร์  $E_t$  เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์พอยน์ติง จะทำให้เกิดทิศทางการถ่ายเทพลังงาน  $S$  ออกจากประจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.14 ก) ซึ่งเป็นลักษณะของการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ถ้าหากให้เวกเตอร์  $E_r$  เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์พอยน์ติง จะทำให้เกิดทิศทางการถ่ายเทพลังงานไม่ออกจากตัวประจุไฟฟ้า แต่ถูกจำกัดไว้ภายในเส้นรอบวงขอบเขตสนามไฟฟ้า



ก) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามแนวสัมผัส  $E_t$       ข) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามแนวสัมผัส  $E_r$   
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์พอยน์ดิงและองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่การเบี่ยงของมุม  $\theta$  จากการที่ประจุ  $q$  ทำการเคลื่อนที่ต่อไปยังตำแหน่ง C โดยมีระยะห่างจากตำแหน่ง A มากเมื่อเทียบกับระยะจากตำแหน่ง A ไป B

ในรูปที่ 2.15 แสดงถึงเส้นสนามไฟฟ้าเส้นใดเส้นหนึ่ง ณ เวลา  $t$  หลังจากที่ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $v = a\Delta t$  ไปยังตำแหน่ง C ตามทิศทางในแนวแกน X โดยกำหนดให้  $v \ll$  ความเร็วของแสง ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) และ  $t \gg \Delta t$  ดังนั้นระยะทาง  $r$  จึงเท่ากับ  $AB + BC \approx BC = vt$  และ  $r \gg c\Delta t$  จึงสามารถกำหนดสมการได้ดังนี้ [11]

$$\frac{E_t}{E_r} = \frac{vt \sin \theta}{c\Delta t} = \frac{at \sin \theta}{c} = \frac{ar \sin \theta}{c^2} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_i = E_r \frac{ar \sin \theta}{c^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{a \sin \theta}{c^2 r} \quad (2.2)$$

สมการเหล่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า โดยจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมานั้นจะแปรผันตรงกับความเร่งของประจุไฟฟ้าและจำนวนประจุไฟฟ้าทั้งหมด  $N$  เมื่อวิเคราะห์จากสมการ (2.3)

$$E_i = \frac{Nq}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sin \theta}{c^2 r} \left[ \frac{dv}{dt} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sin \theta}{c^2 r} \left[ \frac{dJ}{dt} \right] \quad (2.3)$$

โดยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J=Nqv$  จึงสามารถสรุปได้ว่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากปรากฏการณ์ PD นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนแปลงของกระแสพัลส์ PD จากการที่ความเร่งประจุอิเล็กตรอนนั้นเพิ่มขึ้น หรือขนาดสัญญาณพัลส์เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน
- 2) การผกผันของระยะทาง
- 3) การเบี่ยงของมุม  $\theta$  โดยที่สนามไฟฟ้าจะแพร่กระจายได้สูงสุดเมื่อเส้นสนามไฟฟ้าทำมุมตั้งฉากกับประจุไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่

## 2.5 หลักการทำงานและการเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จที่ระบบ GIS

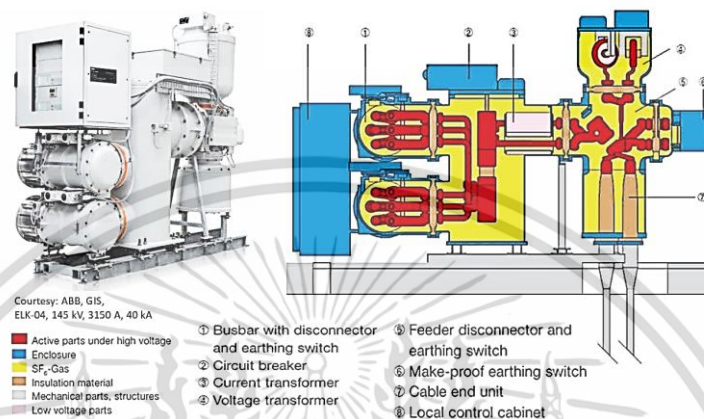
### 2.5.1 หลักการทำงานของระบบ GIS

ในปัจจุบันสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas-Insulated Substation; GIS) นั้นเข้ามามีบทบาทในระบบไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ซึ่งมีความมั่นคงในระบบไฟฟ้าและสามารถมีอายุการใช้งานได้หลายปี หากมีการพิจารณาทุกขั้นตอน โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบทางวิศวกรรม มีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพได้ตามมาตรฐานสากล มีการควบคุมงานก่อสร้างที่ดำเนินการตามหลักวิศวกรรมได้ทุกขั้นตอน มีการทดสอบและการตรวจรับได้อย่างครบถ้วนตามมาตรฐานสากล รวมถึงมีการวางแผนงานบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นในภายหลัง

GIS เป็นสถานีไฟฟ้าที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อย่างบัสบาร์ (Bus-bar) ฉนวนรองรับ (Insulation spacer) อุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Contactor) หม้อแปลงวัดแรงดันและกระแสอยู่ภายใน Enclosure ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยภายในได้มีการอัดฉนวนก๊าซในระบบสถานีแบบปิดเพื่อใช้เป็นฉนวนภายในสำหรับใช้ดับอาร์ก (Arc) ในขณะตัดต่อวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร อย่างไรก็ตาม ความเป็นฉนวนไฟฟ้าของฉนวนก๊าซจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของก๊าซมีค่าสูงขึ้นภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีขนาดสูง ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อนนวนก๊าซเกิดการเสียสภาพความเป็นฉนวนหรือเกิดการดิสชาร์จในก๊าซ จึงสามารถเกิดปรากฏการณ์ PD ที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุโดยมีสนามไฟฟ้าเป็นต้นเหตุที่ทำให้อนุภาคประจุมีพลังงานและเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดได้

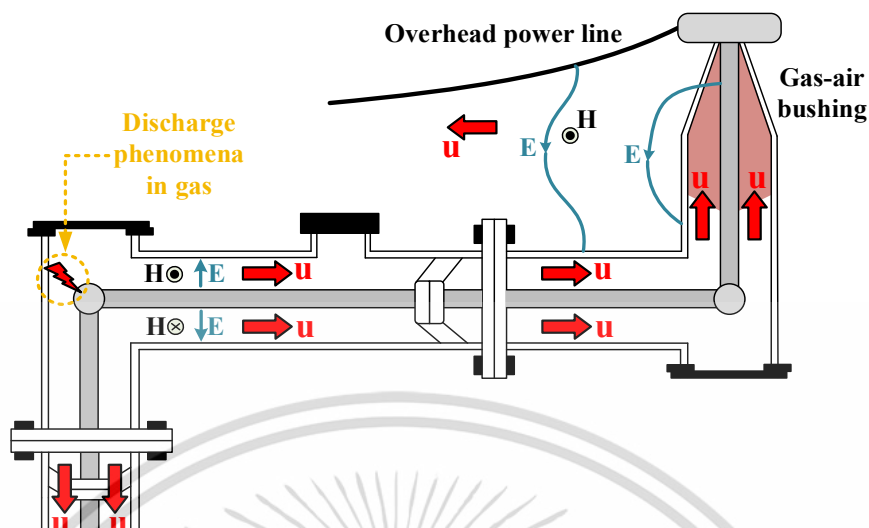


รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบ GIS

[<https://library.abb.com/r?cid=9AAC710047>]

## 2.5.2 การเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จตามระบบ GIS

จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ GIS อย่างปรากฏการณ์ดิสชาร์จ (Discharge phenomena) สามารถเกิดจากปรากฏการณ์วาบไฟตามผิว (Flashover) หรือในขณะที่ตัดต่อวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายในระบบ โดยในระบบ GIS นั้นได้มีการอัดฉนวนก๊าซในระบบสถานีแบบปิดและมีระยะห่างของฉนวนที่ต่ำ ทำให้กระแสดิสชาร์จมีช่วงเวลาขาขึ้นอยู่ในหน่วยนาโนวินาที ความถี่ของกระแสดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงมาก และเกิดการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ (Traveling electromagnetic waves; u) หรือเรียกว่า สัญญาณฟาสต์ทรานเซียนต์ (Fast transients) [6] โดยที่ไม่พบลักษณะการหน่วงของสัญญาณในเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณของระบบ GIS โดยปกติแล้วคลื่นเคลื่อนที่ที่จะแพร่สัญญาณอยู่ภายใน Enclosure ของ GIS ซึ่งทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสะสมที่บริเวณฉนวน อีกทั้งคลื่นเคลื่อนที่ยังสามารถแพร่สัญญาณออกภายนอกระบบ GIS ได้ โดยแพร่สัญญาณออกผ่านบุชชิ่ง (Bushing) ของสายส่งกำลังไฟฟ้าพาดในอากาศ (Overhead power line) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อระบบใกล้เคียง



รูปที่ 2.17 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จและการแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าที่มีการใช้ระบบ GIS

จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ GIS ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฉนวนในระบบ สาเหตุอาจเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยโดยมีสาเหตุหลัก ดังนี้ [2]

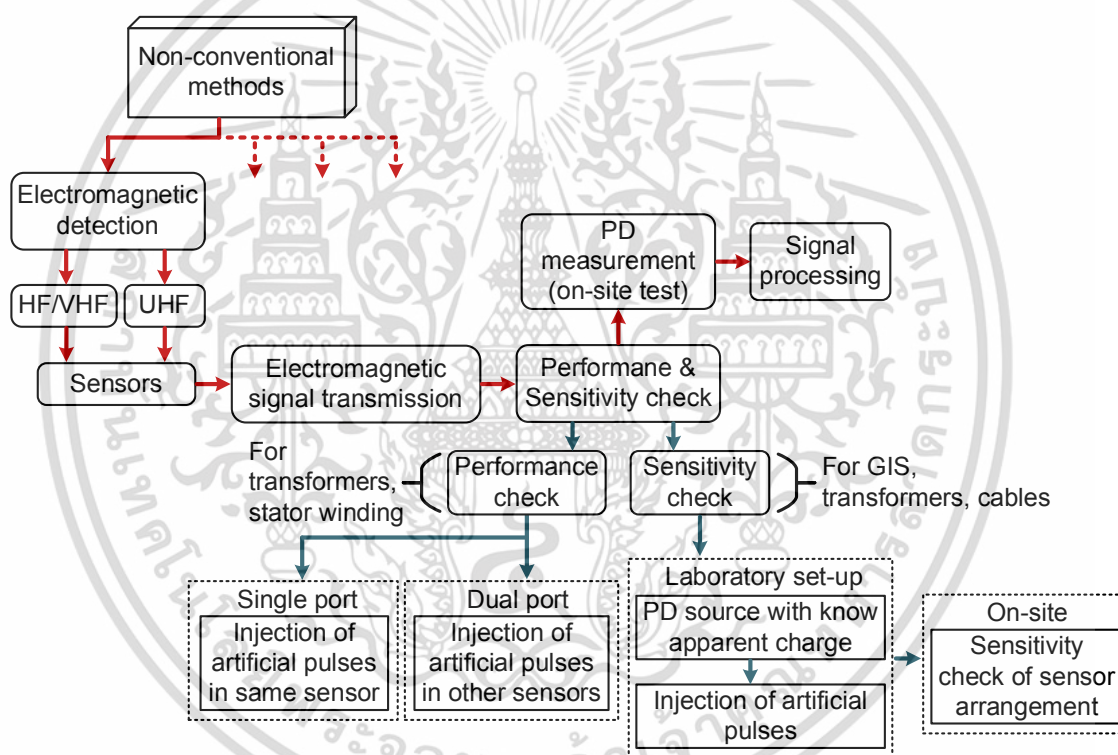
- 1) ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผลิต ประกอบหรือติดตั้ง
- 2) สิ่งปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติของตัวนำทางไฟฟ้า อย่างอนุภาคโลหะ
- 3) การเสื่อมสภาพของหน้าสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนตัวนำ อย่างอิเล็กโทรด (Electrode) และชิลด์ (Shield) ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ที่ส่วนประกอบต่างๆ
- 4) จุดบกพร่องเชิงระบบที่อาจเกิดจากการยื่นออกมาของชิ้นส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าแรงสูง และอนุภาคโลหะที่ติดอยู่กับพื้นผิวฉนวนแข็ง
- 5) ข้อผิดพลาดภายในวัสดุฉนวนระหว่างกระบวนการผลิต
- 6) การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวนจากปรากฏการณ์วาบไฟตามผิวระหว่างการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง
- 7) สิ่งปนเปื้อนที่ส่งผลต่อคุณภาพของฉนวนก๊าซ  $\text{SF}_6$  ที่มาจากปริมาณความชื้น ข้อผิดพลาดระหว่างขณะทำการเติมก๊าซ

สำหรับวิธีการตรวจติดตาม (Monitoring) ในระบบ GIS นั้น สามารถทำการตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทำงานอยู่ในสถานะการใช้งานจริงโดยไม่ต้องปิดระบบการทำงาน อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคการตรวจวัด PD ได้ทั้งแบบออนไลน์ ซึ่งสามารถทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอย่างเซนเซอร์/สายอากาศแถบบริเวณช่องมองอุปกรณ์ GIS (GIS window) เพื่อใช้ตรวจสอบปรากฏการณ์ PD ที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายใน Enclosure โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด PD ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

## 2.6 การตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์สำหรับนำไปใช้ตรวจวัด

### ดิสชาร์จบางส่วนในระบบ GIS ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

พิจารณาจากรูปที่ 2.18 การตรวจวัด PD ที่ไม่ใช่วิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Non-conventional method) ด้วยวิธีการตรวจจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic detection) ควรมีการตรวจสอบประสิทธิภาพและความไวในการวัด (Performance and sensitivity check) ของเซนเซอร์ ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory set-up test) ก่อนทำการทดสอบนอกสถานที่ (On-site test) ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบที่แตกต่างกันออกไปโดยขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการตรวจติดตาม [2]



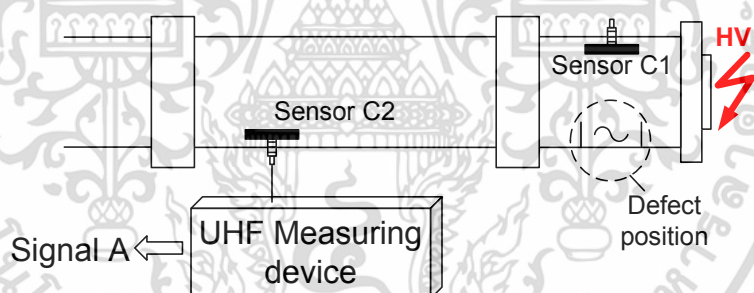
รูปที่ 2.18 การอธิบายภาพรวมถึงความสำคัญของวิธีการตรวจวัด PD ด้วยการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.6.1 การจัดเตรียมการทดสอบ

การตรวจสอบความไวในการวัด (Sensitivity check/verification) ของเซนเซอร์ในห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการและได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความเหมาะสมในทางปฏิบัติจริง ก่อนทำการทดสอบนอกสถานที่ตามระบบ GIS จริง วิธีการตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์ยูเอชเอฟด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้น จะทำการตรวจจับขนาดของสัญญาณพัลส์ที่แสดงผ่านชุดเครื่องวัด โดยจะดำเนินการ

วัดสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟ (UHF artificial pulse) ที่ถูกจำลองขึ้นมาในการทดสอบแรงดันต่ำ (Low voltage measurement) และวัดสัญญาณพัลส์ PD จากการใช้แบบจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD defect model) ในการทดสอบแรงดันสูง (High voltage measurement) ดังนี้ [3] – [4]

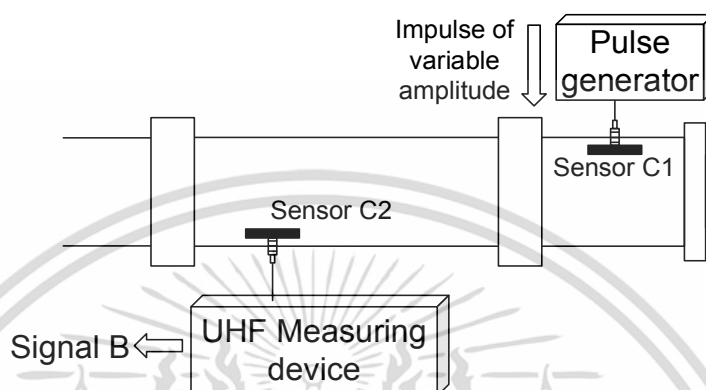
1) การทดสอบแรงดันสูงจะทำการป้อนแรงดันทดสอบสูงให้กับแบบจำลอง Enclosure ที่มีติดตั้งจุดบกพร่องดิสชาร์จบางส่วน (PD defect) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เพื่อจำลองการเกิดสัญญาณ PD เซ็นเซอร์ยูเอชเอฟที่ต้องการตรวจสอบความไวในการวัด (Sensor C2) จะทำการตรวจวัด PD ผ่านสื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเป็นสัญญาณ A (Signal A) และจะนำขนาดสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกับขนาดสัญญาณจากการทดสอบแรงดันต่ำในขั้นตอนถัดไป จากเอกสารรายงานในปี ค.ศ. 1999 ที่เผยแพร่โดย CIGRE Task Force 15/33.03.05 [22] ทำให้ทราบว่าหากประจุปรากฏ PD ที่เกิดขึ้นมีค่าตั้งแต่ 5 pC ขึ้นไป จะสามารถใช้เทคนิคการวัดยูเอชเอฟตรวจจับสัญญาณ PD ออกมาได้ ในวงจรทดสอบนี้สามารถดำเนินการตรวจวัดหาขนาดประจุปรากฏได้โดยการวัดผ่านตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวหรือตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor) ของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 จากการนำวิธีการวัดแบบดั้งเดิมมารวมใช้ ทำให้สามารถใช้วิธีการปรับเทียบเทียบ (Calibration) ให้แก่ระบบวัดได้



รูปที่ 2.19 การตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์ยูเอชเอฟสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการ

2) การทดสอบแรงดันต่ำจะหยุดป้อนแรงดันทดสอบสูงและจำลองสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ (Pulse generator) โดยจะทำการเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ยูเอชเอฟอ้างอิง (Sensor C1) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เพื่อยิงสัญญาณพัลส์ยูเอชเอฟ โดยต้องมีช่วงเวลาขาขึ้นไม่เกิน 500 ps และอัตราการเกิดความถี่อย่างน้อยกว่า 100 kHz จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ถูกจำลองขึ้นจะถูกตรวจวัดผ่านเซ็นเซอร์ยูเอชเอฟที่ต้องการตรวจสอบความไวในการวัด (Sensor C2) ผ่านสื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเป็นสัญญาณ B (Signal B) และนำขนาดสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกับขนาดสัญญาณ A ที่วัดได้จากการทดสอบแรงดันสูง โดยค่าแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์เทียมที่ยิงจาก

เครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่จะถูกปรับค่าจนกว่าขนาดของสัญญาณ B ที่วัดได้จะมีขนาดสัญญาณที่ใกล้เคียงกับขนาดสัญญาณ A ในระดับค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20$  เปอร์เซ็นต์ ตามคำแนะนำที่ระบุไว้ในเอกสารรายงานที่เผยแพร่โดย CIGRE Working Group D1.25 [4]



รูปที่ 2.20 การตรวจสอบความไวในการวัดของเซนเซอร์ยูเอชเอฟสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันต่ำในห้องปฏิบัติการ

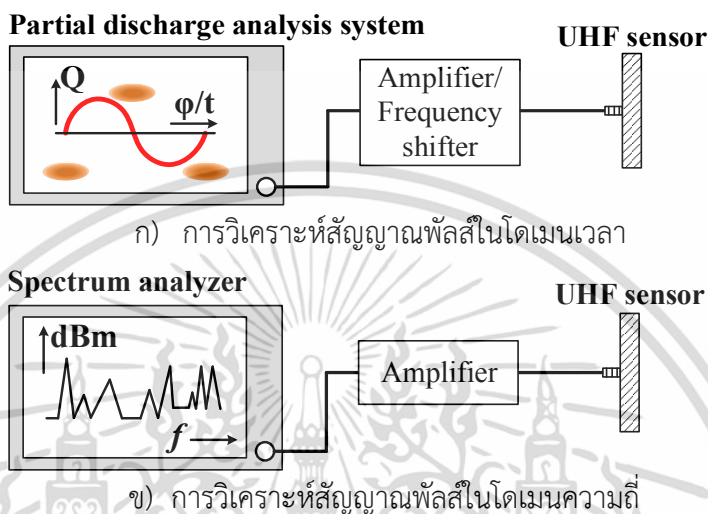
ในการทดสอบเบื้องต้นควรให้มีการลดทอนของสัญญาณต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยติดตั้งตำแหน่งเซนเซอร์ให้มีระยะห่างที่สั้นที่สุดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ อย่างไรก็ตาม ความไวในการตรวจวัดของระบบตรวจวัดโดยรวมนั้นจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ อุปกรณ์ขยายสัญญาณหรือแอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) อุปกรณ์กรองสัญญาณหรือฟิลเตอร์ (Filter) และอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณที่เหมาะสม

### 2.6.2 การวินิจฉัยผลการทดสอบ

การวินิจฉัยผลการตรวจวัดสัญญาณพัลส์ที่ถูกวัดด้วยเซนเซอร์ยูเอชเอฟสามารถวิเคราะห์หาขนาดสัญญาณได้ 2 วิธีการ [4, 13] ได้แก่ การวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ในโดเมนเวลา (Time domain) ซึ่งสามารถแสดงผลผ่านระบบวิเคราะห์ PD (Partial discharge analysis system) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ก) และการวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ในโดเมนความถี่ (Frequency domain) ซึ่งสามารถแสดงผลผ่านเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ข)

ในปัจจุบันการตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟผ่านระบบวิเคราะห์ PD นั้นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ควบคุม/เลื่อนความถี่ (Frequency shifter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณสำหรับใช้แปลงสัญญาณความถี่สูงจากเซนเซอร์ยูเอชเอฟมาเป็นความถี่ในย่านเดียวกับเครื่องวิเคราะห์ข้อมูล PD ที่มีการติดตั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ PD ด้วยฟังก์ชันการทำงานสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลได้หลากหลาย ละเอียดครบถ้วน อย่างการวิเคราะห์สัญญาณผ่านรูปแบบ

Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) การประมวลหาขนาดทางสถิติของสัญญาณพัลส์และการแสดงรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์ เป็นต้น ทำให้สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 ได้



รูปที่ 2.21 รูปแบบการวินิจฉัยผลลัพธ์การตรวจวัดสัญญาณพัลส์ในย่านยูเอชเอฟ

## 2.7 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่สูงเพิ่มมากขึ้นสำหรับใช้งานเฉพาะด้านต่างๆ จึงได้มีการคิดค้นสายอากาศ ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นความถี่วิทยุจากแหล่งที่มีข้อมูลไปยังแหล่งที่ต้องการข้อมูลแบบไร้สาย โดยสายอากาศนั้นจะทำหน้าที่แปลงพลังงานระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ส่งข้อมูลผ่านอากาศ ในภายหลังได้มีการพัฒนา ออกแบบสายอากาศขึ้นมาอีกหลายประเภท อย่างสายอากาศแบบเส้นลวด (Wire antenna) สายอากาศแบบช่อง (Aperture antenna) สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (Reflector antenna) สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna) สายอากาศแบบเลนส์ (Lens antenna) สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed antenna) และสายอากาศในงานเฉพาะด้านอีกมากมาย

### 2.7.1 สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์

สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board; PCB) คือ สายอากาศที่ใช้แผ่น PCB เป็นฐานรองไดอิเล็กทริก (Dielectric substrate) ประกบด้วยแผ่นตัวนำ ซึ่งอาจมีด้านเดียวหรือสองด้านก็ได้ สำหรับกระบวนการผลิตสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์จะผ่านวิธีการกัดกร่อนโดยใช้กรดกัดแผ่นปริ้นซ์หรือเฟอร์ริคคลอไรด์ (Ferric Chloride) เพื่อให้ออกแบบสายอากาศให้ทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์นั้นเหมาะกับการใช้งานในย่านความถี่เอชเอฟขึ้นไป และได้ถูกคิดค้นขึ้นมาเฉพาะการใช้งานอยู่หลายชนิดที่มีทั้งสายอากาศแบบแพร่สัญญาณคลื่นตามยาว (ทิศทางการส่งสัญญาณตามแนวเดียวกับแผ่นตัวนำ) และสายอากาศแบบแพร่สัญญาณคลื่นตามกว้าง (ทิศทางการส่งสัญญาณตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ) สายอากาศชนิดนี้มีข้อดีตรงที่มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักที่เบา ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ทำให้มีนักวิจัยให้ความสนใจในการออกแบบเป็นอย่างมาก

### 2.7.2 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์

ในปัจจุบัน สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์นั้นได้ถูกคิดค้น ออกแบบขึ้นมาเฉพาะการใช้งานอยู่หลายชนิด แต่ส่วนประกอบหลักที่มีเหมือนกันในแต่ละชนิด มีดังนี้

- 1) หัวเชื่อมต่อชนิดเอสเอ็มเอ (Subminiature version A; SMA) คืออุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศและอุปกรณ์ส่ง/รับข้อมูล โดยปกติแล้วจะใช้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) เท่ากับ  $50 \Omega$  ตามมาตรฐาน SMA นอกจากนี้ SMA connector ยังสามารถแบ่งชนิดย่อยออกไปได้หลายชนิด หัวเชื่อมต่อมีทั้งแบบตัวผู้และตัวเมียเพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์การใช้งาน
- 2) แผ่นตัวนำ (Conductor plate) ใช้เป็นสื่อในการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยสามารถประกอบไปด้วยขั้วจากด้านสายพีด (Conductive feed line) ที่คอยส่ง/รับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุ และขั้วจากด้านระนาบกราวด์ (Ground plane) ที่ช่วยป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสัญญาณรบกวนได้ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องออกแบบสายพีดที่อิมพีแดนซ์  $50 \Omega$  เพื่อเชื่อมต่อกับ SMA connector โดยปกติแล้วแผ่นตัวนำมักใช้เป็นทองแดง (Copper) หรืออะลูมิเนียม (Aluminum) และสามารถเลือกออกแบบโครงสร้าง ขนาดแผ่นตัวนำเพื่อกำหนดความถี่ของสายอากาศที่ต้องการเลือกใช้งานได้
- 3) แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ช่วยเป็นฐานรองไดอิเล็กตริกและแยกขั้วระหว่างด้านสายพีดและด้านระนาบกราวด์ให้กับสายอากาศเสมือนเป็นเซนเซอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitive sensors) อีกทั้งยังเป็นตัวแปรสำคัญในเรื่องของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ค่าอิมพีแดนซ์ แบนด์วิดท์ และลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศว่าสามารถส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าใด ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุ PCB จึงสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศได้ โดยวัสดุ PCB ส่วนใหญ่ที่ใช้งานกัน ได้แก่ เอฟอาร์ โฟร์ (FR-4) และพีทีเอฟอี (PTFE) หรือเทฟลอน (Teflon) เป็นต้น

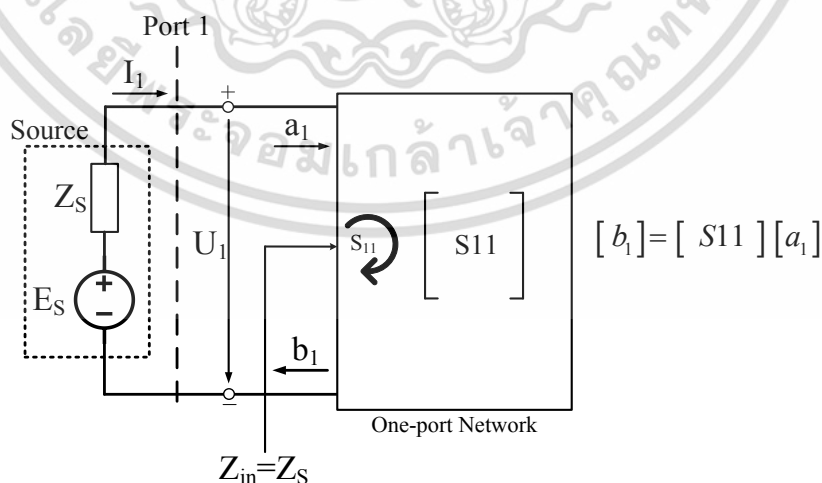
## 2.8 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสายอากาศ

สายอากาศจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่สูงชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญมากในเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ดังนั้น ในการออกแบบสร้างสายอากาศจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการรับ/ส่งสัญญาณให้ได้ดีที่สุด โดยสามารถพิจารณาถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศดังนี้

### 2.8.1 พารามิเตอร์การกระจาย

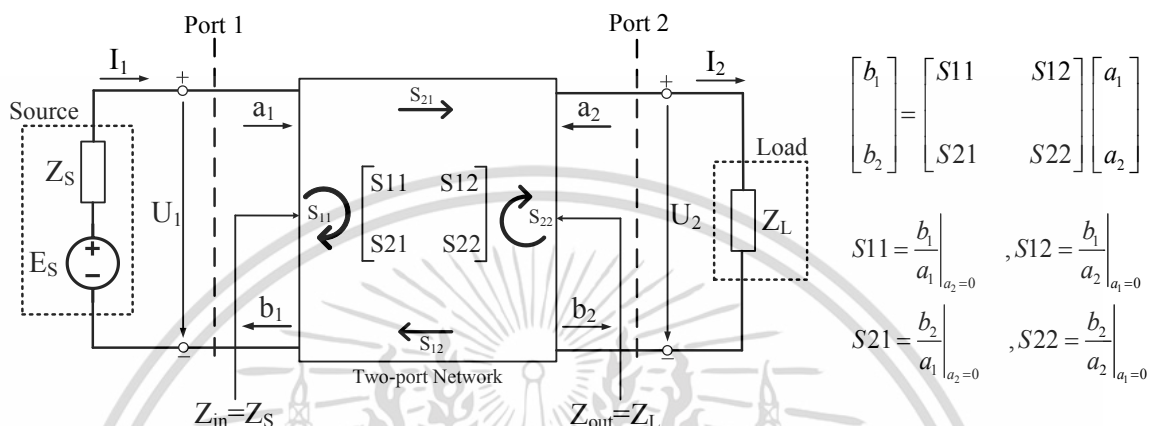
พารามิเตอร์การกระจาย (Scattering parameters; S-parameters) คือ เซตของตัวเลขเชิงซ้อนที่ใช้อธิบายหลักการสะท้อนกลับ การส่งผ่านและการแพร่สัญญาณในหลักวิศวกรรมคลื่นความถี่วิทยุและคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่ต่างๆ โดยทั่วไปแล้ว S-parameters จะแสดงอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ของจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งเรียกว่า S-matrix เพื่อนำมาใช้อธิบายหลักการทำงานของอุปกรณ์เน็ตเวิร์ค (Network) ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกำลังส่งผ่านและสัญญาณกำลังสะท้อนกลับในแต่ละพอร์ต (Port) ขนาดของเมทริกซ์นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนพอร์ตในอุปกรณ์เน็ตเวิร์ค โดยมีจำนวนแถวและคอลัมน์เท่ากัน กล่าวคือ จำนวน N พอร์ตจะมี S-matrix ขนาด  $N \times N$  โดยให้ N คือ จำนวนพอร์ตของอุปกรณ์เน็ตเวิร์ค ในแต่ละองค์ประกอบของเมทริกซ์นั้น คือ S-parameters ซึ่งจะแสดงในรูปแบบ  $S_{ij}$  เพื่อใช้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตพอร์ต (Output port; i) และอินพุตพอร์ต (Input port; j)

ตัวอย่างหลักการทำงานของอุปกรณ์เน็ตเวิร์คแบบหนึ่งพอร์ต (One-port network) สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานส่งผ่าน  $a_1$  และพลังงานสะท้อนกลับ  $b_1$  ในแต่ละพอร์ตด้วยเมทริกซ์ขนาด  $1 \times 1$  ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 หลักการทำงานของพารามิเตอร์การกระจายในอุปกรณ์เน็ตเวิร์คหนึ่งพอร์ต

ตัวอย่างหลักการทำงานของอุปกรณ์เน็ตเวิร์คแบบสองพอร์ต (Two-port network) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานส่งผ่าน ( $a_1$  และ  $a_2$ ) และพลังงานสะท้อน ( $b_1$  และ  $b_2$ ) ในแต่ละพอร์ต ด้วยเมทริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของพารามิเตอร์การกระจายในอุปกรณ์เน็ตเวิร์คสองพอร์ต

โดยที่ พารามิเตอร์  $S_{11}$  แสดงถึงค่าของสัญญาณกำลังที่สะท้อนกลับจากพอร์ตที่ 1 เมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านพอร์ตที่ 1

พารามิเตอร์  $S_{22}$  แสดงถึงค่าของสัญญาณกำลังที่สะท้อนกลับจากพอร์ตที่ 2 เมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านพอร์ตที่ 2

พารามิเตอร์  $S_{21}$  แสดงถึงค่าของสัญญาณกำลังส่งผ่าน จากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2

พารามิเตอร์  $S_{12}$  แสดงถึงค่าของสัญญาณกำลังส่งผ่านแบบย้อนกลับ จากพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 1

## 2.8.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า

สายอากาศนั้นเป็นอุปกรณ์เน็ตเวิร์คแบบหนึ่งพอร์ต ซึ่งสามารถแทนพารามิเตอร์การกระจายด้วยพารามิเตอร์  $S_{11}$  หรือค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss; RL) ดังสมการ (2.4) ถึง (2.5) เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าของสัญญาณกำลังที่สะท้อนกลับเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านระบบ ใช้ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์สายอากาศ ภาวะแมตซิงเชิงอิมพีแดนซ์ (Matching impedance) และความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) เป็นต้น การวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นได้

ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะแสดงหน่วยเรียกเฉพาะด้วย dB โดยหากค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่ามาก จะแสดงถึงค่าของสัญญาณกำลังที่สะท้อนกลับมายังแหล่งจ่ายกำลังน้อย และเกิดภาวะแมตซิงเชิงอิมพีแดนซ์กับระบบอุปกรณ์ส่ง/รับข้อมูลที่ดี ทำให้อุปกรณ์สายอากาศสามารถส่ง/รับสัญญาณได้มาก ซึ่ง

วิเคราะห์จากอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกำลังสะท้อนกลับ ( $P_{ref}$ ) ต่อสัญญาณกำลังส่งผ่าน ( $P_{trans}$ ) และสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient;  $\Gamma$ )

$$RL = -S_{11} = -10 \log \left( \left| \frac{P_{ref}}{P_{trans}} \right| \right) = -20 \log (|\Gamma|) \quad (2.4)$$

$$|\Gamma| = 10^{\frac{-RL}{20}} \quad (2.5)$$

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio; VSWR) นั้นถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศเช่นกัน มักถูกนำมาใช้หาช่วงความถี่ใช้งานของอุปกรณ์สายอากาศ โดยพื้นฐานแล้วคลื่นนิ่ง คือ การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนสายนำสัญญาณ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของคลื่นสัญญาณส่งผ่านและคลื่นสัญญาณสะท้อนกลับระหว่างแหล่งจ่ายกำลังกับโหลด ดังนั้นพารามิเตอร์ VSWR จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าแรงดันสูงสุด ( $U_{max}$ ) และแรงดันต่ำสุด ( $U_{min}$ ) ของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณได้ ดังสมการ (2.6)

$$VSWR = \frac{|U|_{max}}{|U|_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.6)$$

โดยทั่วไปแล้วในระบบสื่อสารไร้สาย ควรออกแบบสายอากาศให้มีค่า  $S_{11}$  ไม่เกิน -10 dB และค่า VSWR ไม่เกิน 2:1 ซึ่งเป็นช่วงที่สัญญาณกำลังมีการสะท้อนกลับเพียงราวๆ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศได้ เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์แบบส่วนกลับกัน

### 2.8.3 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ (Bandwidth; BW) คือ ช่วงกว้างของความถี่ที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในสายอากาศจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในข้อนี้ โดยสามารถพิจารณาถึงความสำคัญของค่าอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานในสายอากาศ ดังนั้นหากพูดถึงช่วงกว้างของความถี่ที่สายอากาศทำงานได้ จะสามารถเข้าใจได้ว่าเป็นช่วงความถี่ที่อากาศยังมีอิมพีแดนซ์ในขอบเขตที่ยอมรับได้หรือมีค่า  $S_{11}$  ไม่เกิน -10 dB และค่า VSWR ไม่เกิน 2:1 ในลักษณะนี้เรียกว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ทำให้

สามารถหาระยะห่างของความถี่คutoffสูงสุด (High frequency cut-off;  $f_{high}$ ) และความถี่คutoffต่ำสุด (Low frequency cut-off;  $f_{low}$ ) ซึ่งอยู่บนความถี่ศูนย์กลาง (Center frequency;  $f_{center}$ ) ดังแสดงในสมการ (2.7) ถึง (2.8)

$$BW = |f_{high} - f_{low}| \quad (2.7)$$

$$f_{center} = \frac{f_{high} + f_{low}}{2} \quad (2.8)$$

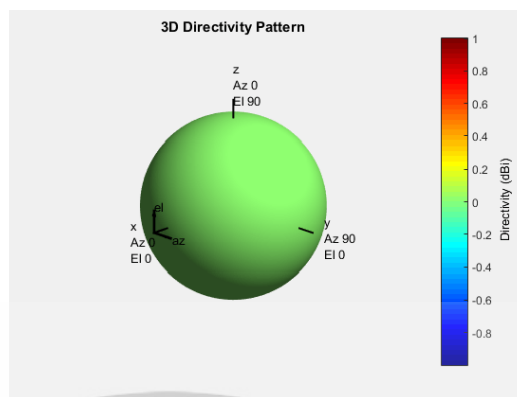
นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนขนาดแบนด์วิดท์ของสายอากาศในรูปของรีเลทีฟแบนด์วิดท์ (Relative bandwidth) หรือแฟรคชันนอลแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth; FBW) ที่ถูกกำหนดในสถานะอัตราที่แตกต่างของแบนด์วิดท์เทียบกับความถี่ศูนย์กลางดังแสดงในสมการ (2.9) ซึ่งค่า FBW จะมีอัตราอยู่ระหว่าง 0 ถึง 200 เปอร์เซ็นต์ ยังมีอัตราที่สูง แบนด์วิดท์ของสายอากาศก็จะกว้างขึ้นตาม โดยปกติในสายอากาศแถบความถี่กว้างจะมีค่า FBW 10 หรือ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

$$FBW = \frac{2(f_{high} - f_{low})}{f_{high} + f_{low}} \times 100\% \quad (2.9)$$

#### 2.8.4 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) สามารถแสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงานด้วยฟังก์ชันในพิกัดทรงกลม ซึ่งสามารถอธิบายคุณสมบัติของการแผ่พลังงานต่างๆ อย่างอัตรายาย ความเข้มของการแผ่พลังงานที่แสดงรูปของพลังงานด้วยฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติและสองมิติ ดังนั้นการสังเกตลักษณะการกระจายคลื่น จะทำให้ทราบทิศทางที่มีความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดของสายอากาศได้ โดยสามารถแบ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นออกเป็น 4 รูปแบบ ดังนี้

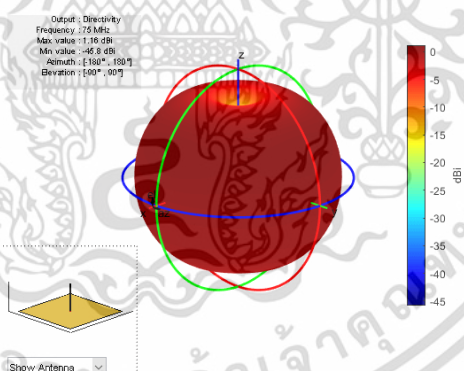
- 1) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) มีคุณสมบัติการรับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในทุกทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.24 ยกตัวอย่างเช่น ไอโซทรอปิกเรดิเอเตอร์ (Isotropic radiator) ซึ่งเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่นในเรื่องของการแสดงคุณสมบัติและทิศทาง



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไอโซโทรปิก

[<https://www.mathworks.com/help/antenna/gs/antenna-classification.html>]

- 2) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) มีคุณสมบัติการรับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้รอบทิศทาง 360 องศา การแผ่พลังงานแบบไอโซโทรปิก แต่อยู่ในระนาบเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.25 ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศไดโพล (Dipole antenna) เหมาะสมสำหรับใช้ติดต่อกับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เคลื่อนไหวอยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ไม่แน่นอน



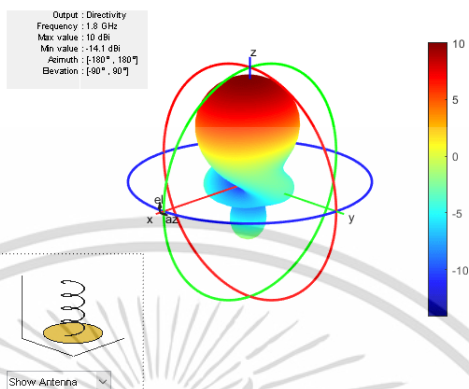
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรอบทิศทาง

[<https://www.mathworks.com/help/antenna/gs/antenna-radiation-patterns.html>]

- 3) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียว (Directional) มีคุณสมบัติการรับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในทิศทางที่ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 2.26 เหมาะสำหรับการติดต่อสัญญาณระหว่างจุดต่อจุด สามารถที่ระยะทางการใช้งานได้ไกลกว่าสายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางเพราะมีอัตราขยายที่สูง ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบสูงเกลียว (Helix antenna) สายอากาศไมโครสตริปแพทช์ (Microstrip patch antenna) แต่มีข้อเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

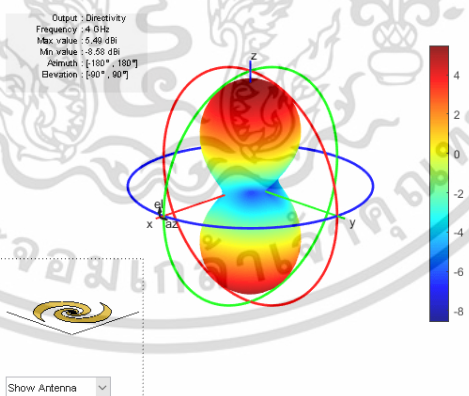
คือ ถ้าไม่วางตำแหน่งให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแหล่งกำเนิดสัญญาณจะไม่สามารถรับคลื่นสัญญาณได้เลย



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้ทิศทางเดียว

[<https://www.mathworks.com/help/antenna/gs/antenna-radiation-patterns.html>]

- 4) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้สองทิศทาง (Bi-directional) มีคุณสมบัติการรับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในทิศทางที่ชัดเจนเหมือนสายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบชี้ทิศทางเดียว แต่มีการชี้ทิศทางเพิ่มมาอีกในด้านตรงข้ามดังแสดงในรูปที่ 2.27 ทำให้สามารถรับ/ส่งสัญญาณได้ในสองทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศสไปรัล (Spiral antenna)



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบชี้สองทิศทาง

[<https://www.mathworks.com/help/antenna/gs/antenna-radiation-patterns.html>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# แนวคิดการออกแบบสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ และแถบความถี่กว้างสำหรับนำไปตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

ในเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งหรือยูเอชเอฟ (Ultra-High Frequency; UHF) ต้นแบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งได้ทำการศึกษารายละเอียดการออกแบบสายอากาศจากงานวิจัยของต่างประเทศ [14] – [21] และได้นำความรู้ที่ได้จากการศึกษางานวิจัยเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบเซนเซอร์ยูเอชเอฟที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) ในระบบสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas-Insulated Substation; GIS) ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ โดยจำแนกเซนเซอร์ออกเป็นสายอากาศแถบความถี่แคบและสายอากาศแถบความถี่กว้าง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการตรวจค่าวัดจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

### 3.1 ระเบียบวิธีและขั้นตอนการออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟ

- 1) ศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศแต่ละชนิดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปตรวจวัด PD โดยคำนึงถึงเรื่องแบนด์วิดท์ อัตราขยาย โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับนำไปวาง/ติดตั้ง ต้นทุนการผลิตที่ต้องใช้ และต้องสามารถวิเคราะห์ จำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้
- 2) ศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ใช้งานและภาวะแมตชิ่งเชิงอิมพีแดนซ์ (Matching impedance)
- 3) เลือกออกแบบความถี่ใช้งานที่ต้องการ โดยเลือกวิเคราะห์และคำนึงถึงย่านความถี่ยูเอชเอฟระหว่าง 300 MHz ถึง 1.5 GHz เป็นหลัก เนื่องจากการวิจัยและประสบการณ์จากการปฏิบัติงานต่างๆ ได้สรุปว่าช่วงยูเอชเอฟนี้เป็นแบนด์วิดท์ที่มีความสำคัญมากต่อเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการตรวจสอบสัญญาณ PD ในระบบไฟฟ้าแรงสูง เพราะโดยทั่วไปแล้วสัญญาณพัลส์ PD ส่วนใหญ่มักจะแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงยูเอชเอฟนี้ [23] – [26] นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงขนาดโครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งขนาดโครงสร้างสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ใช้งานที่เลือกออกแบบ
- 4) คำนวณพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศโดยศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ และนำความรู้ที่ได้จากการศึกษางานวิจัยเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้เพื่อจำลองสายอากาศผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- 5) ทำการออกแบบสายอากาศ โดยใช้โปรแกรมที่สามารถจำลองโครงสร้างสายอากาศและวิเคราะห์สัญญาณค่าสูญเสียย้อนกลับด้วยพารามิเตอร์  $S_{11}$  (Parameter  $S_{11}$ ) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio; VSWR) รวมถึงแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นๆได้ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศและนำไปเปรียบเทียบกับค่าวัดจริงในภายหลัง

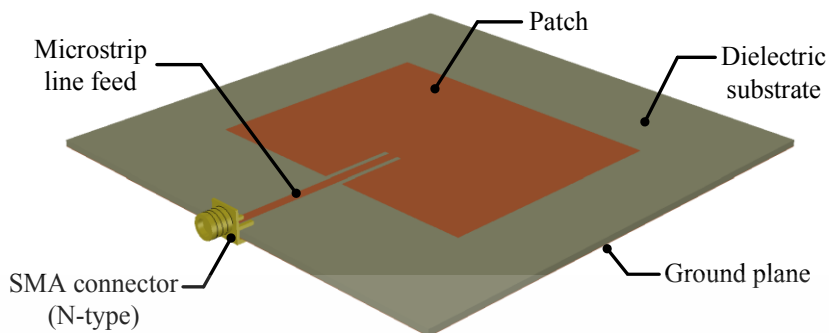
### 3.2 สายอากาศยูเอชเอฟที่เลือกออกแบบ

ลักษณะปรากฏการณ์ทางกายภาพของ PD สามารถแสดงสัญญาณออกมาในรูปแบบของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในย่านความถี่ยูเอชเอฟ (ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 3 GHz) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้สามารถแผ่ออกไปในอากาศและทำการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระยะห่างจากแหล่งกำเนิด PD ได้ด้วยอุปกรณ์วัดไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์พิเศษอย่างเซนเซอร์/สายอากาศยูเอชเอฟ ซึ่งมีทั้งเทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่แคบและเทคนิคการตรวจวัดแถบความถี่กว้าง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้น ออกแบบสายอากาศขึ้นมาหลายชนิดที่มีคุณสมบัติการใช้งานแตกต่างกันออกไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกออกแบบสร้างสายอากาศยูเอชเอฟในหมวดของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถออกแบบสร้างให้ใช้งานในระบบวัดแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างได้โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบของสายอากาศนั้นๆ เนื่องจากมีโครงสร้างที่กะทัดรัด น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เหมาะแก่การนำมาศึกษาวิจัย และเหมาะสำหรับนำไปวาง/ติดตั้งแถวบริเวณฉนวนที่เป็นจุดต่อหรือแถวบริเวณช่องมองของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

#### 3.2.1 สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ

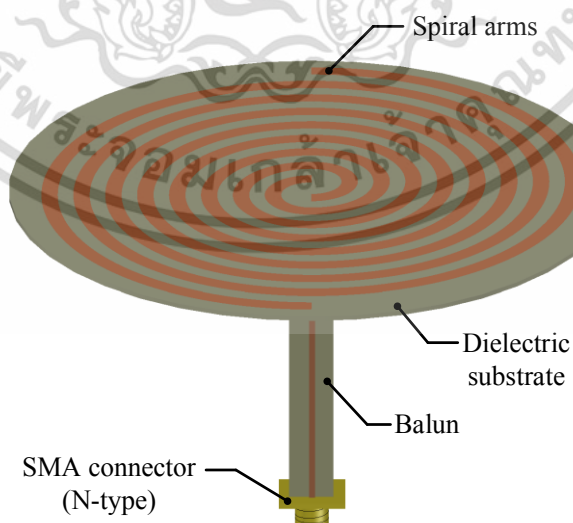
สายอากาศอินเซตเฟดเรคแทงกูลาร์ไมโครสตริปแพทช์ (Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch) มีลักษณะโครงสร้างที่ออกแบบได้ง่ายและกะทัดรัดดังแสดงในรูปที่ 3.1 เหมาะสำหรับนำไปวาง/ติดตั้งในจุดตรวจวัดที่มีพื้นที่จำกัด ตัวสายอากาศสามารถออกแบบขนาดโครงสร้างได้ตามความถี่ที่ต้องการเลือกใช้งาน มีโอกาสตรวจพบความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) ได้สองถึงสามความถี่พร้อมกัน จากการมีคลื่นที่มีความถี่สูงกวานั้น คือ ฮาร์มอนิกลำดับสูงกว่า (Higher order harmonic) นอกจากนี้ยังเป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) แคบ ทำให้โอกาสเกิดการทับซ้อนของสัญญาณรบกวนค่อนข้างต่ำกว่าสายอากาศชนิดแบนด์วิดท์กว้าง สายอากาศชนิดนี้สามารถออกแบบให้ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ (Characteristic impedance) เท่ากับ  $50 \Omega$  ได้ ซึ่งสามารถเกิดภาวะแมตชิงเชิงอิมพีแดนซ์กับหัวเชื่อมต่อนิดเอสเอ็มเอ (Subminiature version A; SMA) ได้โดยตรง โดยที่ไม่ต้องใช้ตัวแปลงแปลงอิมพีแดนซ์



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของสายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch

### 3.2.2 สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง

สายอากาศทูอาร์มอาร์คิมิดีสไปรัล (Two-Arm Archimedean Spiral) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นสายอากาศที่มีช่วงแบนด์วิธกว้าง และอัตราขยายค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงแบนด์วิธ สามารถออกแบบและคำนวณความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency) ต่ำสุดและสูงสุดได้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับรัศมีภายนอกและรัศมีภายในของสไปรัลอาร์ม (Spiral arms) ในสายอากาศชนิดนี้จำเป็นต้องใช้บาลัน (Balun) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปลงแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance transformer) สำหรับการแปลงอิมพีแดนซ์  $50 \Omega$  ของหัวเชื่อมต่อชนิดเอสเอ็มเอ (Subminiature version A; SMA) ให้เกิดภาวะแมตชิงอิมพีแดนซ์กับตัวสายอากาศ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกออกแบบเอกซ์โพเนนเชียลเทเปอร์บาลัน (Exponential tapered balun) ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์ได้ดีและออกแบบได้จริง



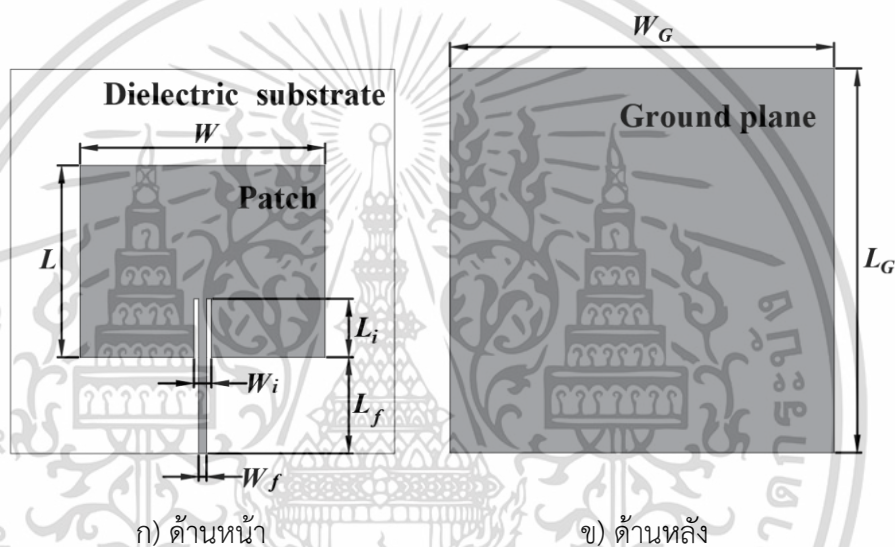
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของสายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 หลักการคำนวณโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟที่เลือกออกแบบ

#### 3.3.1 หลักการคำนวณโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกออกแบบสายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch สำหรับใช้เป็นสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ โดยออกแบบสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์เอพอาร์โพร์ (FR-4) ขนาดความหนา ( $h$ ) 1.6 mm ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_R$ ) เท่ากับ 4.3 ซึ่งและสามารถทำให้เกิดภาวะแมตชิงเชิงอิมพีแดนซ์ระหว่างหัวเชื่อมต่อกับพอร์ตเอสเอ็มเอ 50  $\Omega$  กับส่วนแพทช์ (Patch) ของสายอากาศชนิดนี้ได้โดยใช้เทคนิคอินเซตคัท (Inset cut technique)



รูปที่ 3.3 พารามิเตอร์โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch

พารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อเลือกความถี่ใช้งาน ( $f_0$ ) ที่ต้องการใช้ตรวจวัด โดยคำนวณจากสมการ (3.1) ถึง (3.9) ดังนี้ [14] – [16]

- 1) การคำนวณความกว้างของแพทช์ ( $W$ ) และความยาวของแพทช์ ( $L$ ):

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (3.1)$$

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left( \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \right) \quad (3.2)$$

โดยแทนค่าความเร็วแสง ( $c$ ) เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s และสามารถคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผล ( $\epsilon_{eff}$ ) ได้ ดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \sqrt{\frac{1}{1 + 12\left(\frac{h}{W}\right)} + 0.04\left(1 - \left(\frac{W}{h}\right)\right)^2} \right], \frac{W}{h} < 1 \\ \left[ \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \sqrt{\frac{1}{1 + 12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right], \frac{W}{h} \geq 1 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

2) การคำนวณความกว้างของสายพีด ( $W_f$ ) และความยาวของสายพีด ( $L_f$ ):

$$Z_0 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left( \frac{8h}{W_f} + \frac{W_f}{4h} \right), \frac{W_f}{h} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_f}{h} + 1.444 \right) \right]}, \frac{W_f}{h} \geq 1 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$L_f = \frac{\lambda_d}{4} = \frac{c}{4f_0\sqrt{\epsilon_R}} \quad (3.5)$$

โดยที่  $\lambda_d$  คือ ความยาวคลื่นฐานรองไดอิเล็กทริก และ  $Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ

3) การคำนวณความกว้างรอยตัดเทคนิคอินเซคต์ ( $W_i$ ) และความยาวรอยตัดเทคนิคอินเซคต์ ( $L_i$ ):

$$W_i = 2W_f \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_i = \frac{10^{-4}L}{2} \begin{pmatrix} 0.001699\varepsilon_R^7 + 0.13761\varepsilon_R^6 - 6.1783\varepsilon_R^5 + \\ 93.187\varepsilon_R^4 - 682.69\varepsilon_R^3 + 2561.9\varepsilon_R^2 - \\ 4043\varepsilon_R + 6697 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

4) การคำนวณความกว้างของระนาบกราวด์ ( $W_G$ ) และความยาวของระนาบกราวด์ ( $L_G$ ):

$$W_{G,\min} = 6h + W \quad (3.8)$$

$$L_{G,\min} = 6h + L \quad (3.9)$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ไว้ทั้งหมดสามแบบดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 เพื่อออกแบบให้มีผลตอบสนองต่อความถี่ใช้งานที่แตกต่างกัน เพราะว่าโดยทั่วไปแล้วสัญญาณ PD ควรถูกตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์มากกว่าหนึ่งเซนเซอร์เพื่อที่จะนำข้อมูลทั้งหมดมาใช้วิเคราะห์ร่วมกันให้ได้มากที่สุด นอกจากนี้สายอากาศแต่ละแบบจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันไปตามความถี่ใช้งานที่ออกแบบ จึงสามารถใช้เป็นทางเลือกสำหรับการนำไปวาง/ติดตั้งตามพื้นที่จุดตรวจวัดต่างๆได้

**ตารางที่ 3.1** ค่าพารามิเตอร์การออกแบบของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch

พารามิเตอร์	สายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความถี่ใช้งาน, $f_0$	1.2 GHz	1.0 GHz	0.8 GHz
ความกว้างของแพทช์, $W$	76.79 mm	92.14 mm	115.18 mm
ความยาวของแพทช์, $L$	60.05 mm	72.13 mm	90.24 mm
ความกว้างของสายพีด, $W_f$	2.498 mm	2.498 mm	2.498 mm
ความยาวของสายพีด, $L_f$	30.14 mm	36.17 mm	45.21 mm
ความกว้างรอยตัดเทคนิคอินเซคท์, $W_i$	4.996 mm	4.996 mm	4.996 mm
ความยาวรอยตัดเทคนิคอินเซคท์, $L_i$	18.3 mm	21.98 mm	27.5 mm
ความกว้างของระนาบกราวด์, $L_G$	120.33 mm	144.47 mm	180.66 mm
ความยาวของระนาบกราวด์, $W_G$	120.33 mm	144.47 mm	180.66 mm

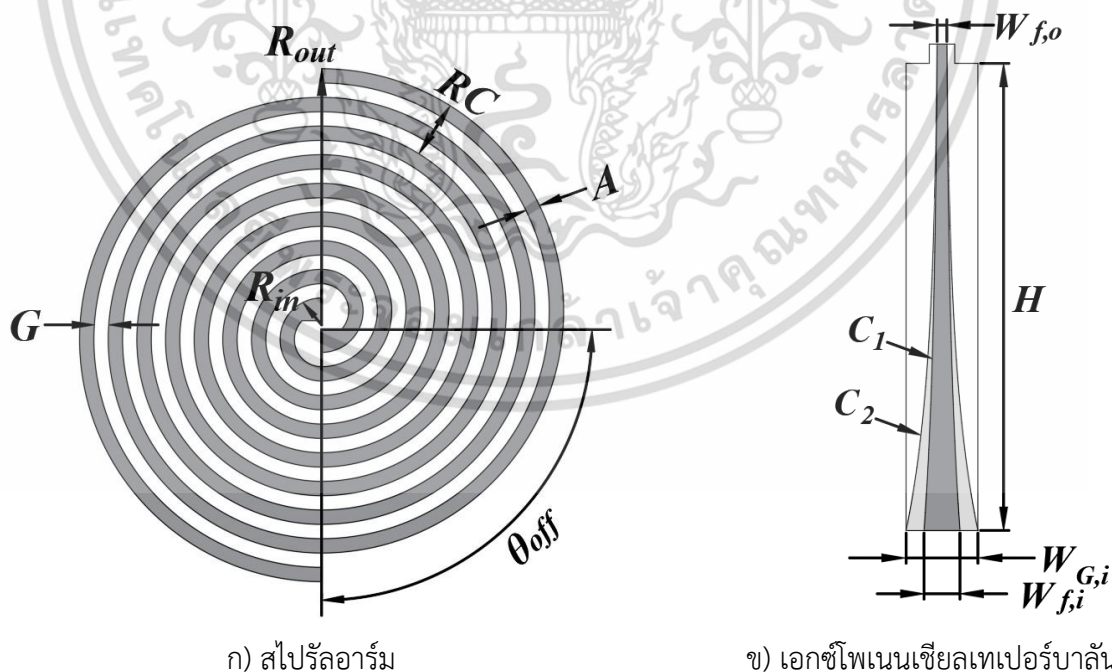
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 หลักการคำนวณโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกออกแบบสายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral สำหรับใช้เป็นสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง โดยออกแบบสร้างสไปรัลอาร์ม (Spiral arms) ไว้บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 ขนาดความหนา ( $h$ ) 0.8 mm ( $\epsilon_R$  เท่ากับ 4.3) และจะออกแบบสร้างเอกซ์โพเนนเชียลเทเปอร์บาลูน (Exponential tapered balun) ไว้บนแผ่นวงจรพิมพ์ ขนาดความหนา ( $h$ ) 1.6 mm ( $\epsilon_R$  เท่ากับ 4.3) ไว้สำหรับเป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์ระหว่างสไปรัลอาร์มและหัวเชื่อมต่อชนิดเอสเอ็มเอ 50  $\Omega$  โดยสามารถคำนวณอินพุตอิมพีแดนซ์ของสไปรัลอาร์มได้จากสมการของ Babinet [17] ดังแสดงในสมการ (3.10)

$$Z_s = \frac{377}{2} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_R}} \quad (3.10)$$

เมื่อมีแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 เป็นฐานรองไดอิเล็กทริก จะทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสไปรัลอาร์มมีค่าเท่ากับ 90.9  $\Omega$  แต่หากกรณีที่ต้องการจำลองสไปรัลอาร์มโดยที่ไม่มีแผ่นวงจรพิมพ์เป็นฐานรองไดอิเล็กทริก สามารถแทนค่า  $\epsilon_R$  เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอากาศ จะทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสไปรัลอาร์มมีค่าเท่ากับ 188.5  $\Omega$



รูปที่ 3.4 พารามิเตอร์โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อเลือกขนาดแบนด์วิดท์ที่ต้องการตรวจวัด โดยคำนวณจากสมการ (3.11) ถึง (3.14) ดังนี้ [17] – [21]

- 1) สำหรับการคำนวณโครงสร้างของสไปรัลอาร์มจะต้องระบุจำนวนรอบขดของสไปรัลอาร์ม ( $N$ ) ความกว้างของสไปรัลอาร์ม ( $A$ ) ช่องว่างระหว่างสไปรัลอาร์ม ( $G$ ) ความต่างรัศมีของขดสไปรัลอาร์มในแต่ละรอบ ( $RC$ ) รัศมีภายในสไปรัลอาร์ม ( $R_{in}$ ) และรัศมีภายนอกสไปรัลอาร์ม ( $R_{out}$ ) เพื่อกำหนดความถี่คutoffต่ำสุด ( $f_{low}$ ) ความถี่คutoffสูงสุด ( $f_{high}$ ) และมุมออฟเซ็ทสไปรัลอาร์มทั้งสอง ( $\theta_{off}$ )

$$G = A = \frac{R_{out} - R_{in}}{4N} \quad (3.11)$$

$$f_{low} \geq \frac{c}{2\pi R_{out}} \quad (3.12)$$

$$f_{high} \leq \frac{c}{2\pi R_{in}} \quad (3.13)$$

$$\theta_{off} = \frac{2\pi A}{RC} \quad (3.14)$$

- 2) สำหรับการคำนวณโครงสร้างของเอกซ์โพเนนเชียลเทเปอร์บาลัน ความกว้างสายพิดทางฝั่งอินพุต อิมพีแดนซ์ของบาลัน ( $W_{f,i}$ ) ความกว้างสายพิดทางฝั่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของบาลัน ( $W_{f,o}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3) ถึง (3.4) ส่วนความกว้างระนาบกรวดของบาลัน ( $W_{G,i}$ ) จะเท่ากับช่องว่างระหว่างกรวดพิน (Ground pins) ของหัวเชื่อมต่อชนิดเอสเอ็มเอ การเลือกขนาดความสูงของบาลัน ( $H$ ) ที่เหมาะสมจะสอดคล้องกับระยะเรโซแนนซ์ที่จะเกิดทุกความยาวเท่ากับ  $1/4$  ของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ที่ความถี่ศูนย์กลาง ( $f_{center}$ ) และเส้นเอกซ์โพเนนเชียลของตัวนำบนบาลันกำหนดได้จาก  $C_1 = W_{f,o} \cdot e^{mt}$  และ  $C_2 = W_{f,o} \cdot e^{nt}$  โดยที่ค่า  $t$  จะมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง  $H$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ไว้ทั้งหมดสามแบบดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 เพื่อออกแบบให้มีผลตอบสนองต่อความถี่คutoffต่ำสุดและแบนด์วิดท์ที่แตกต่างกัน เพราะว่าโดยทั่วไปแล้วสัญญาณ PD ควรถูกตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์มากกว่าหนึ่งเซนเซอร์เพื่อที่จะนำข้อมูลทั้งหมดมาใช้วิเคราะห์ร่วมกันให้ได้มากที่สุด นอกจากนี้สายอากาศแต่ละแบบจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันไปตามความถี่คutoffต่ำสุดที่ออกแบบ จึงสามารถใช้เป็นทางเลือกสำหรับการนำไปวาง/ติดตั้งตามพื้นที่จุดตรวจวัดต่างๆได้

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์การออกแบบของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral

พารามิเตอร์	สายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความถี่คัทออฟต่ำสุด, $f_{low}$	$\geq 0.92$ GHz	$\geq 0.636$ GHz	$\geq 0.486$ GHz
ความถี่คัทออฟสูงสุด, $f_{high}$	$\leq 8.681$ GHz	$\leq 8.681$ GHz	$\leq 8.681$ GHz
จำนวนรอบขดของสไปรัลอาร์ม, $N$	4	6	8
ความกว้างของสไปรัลอาร์ม, $A$	2.9 mm	2.9 mm	2.9 mm
ช่องว่างระหว่างสไปรัลอาร์ม, $G$	2.9 mm	2.9 mm	2.9 mm
รัศมีภายนอกสไปรัลอาร์ม, $R_{out}$	51.9 mm	75.1 mm	98.3 mm
รัศมีภายในสไปรัลอาร์ม, $R_{in}$	5.5 mm	5.5 mm	5.5 mm
รัศมีฐานรองไดอิเล็กทริก	55 mm	80 mm	105 mm
มุมออฟเซ็ทสไปรัลอาร์ม, $\theta_{off}$	90 [°]	90 [°]	90 [°]
ความกว้างสายพีดทางฝั่งอินพุตของบาลัน, $W_{f,i}$	3.13 mm	3.13 mm	3.13 mm
ความกว้างสายพีดทางฝั่งเอาต์พุตของบาลัน, $W_{f,o}$	0.922 mm	0.922 mm	0.922 mm
ความกว้างระนาบกราวด์ของบาลัน $W_{G,i}$	6 mm	6 mm	6 mm
ความสูงของบาลัน, $H$	62 mm	70 mm	75 mm
ค่าพารามิเตอร์แสดงอัตราของ $C_1$ , $m$	12.697952	11.246757	10.496973
ค่าพารามิเตอร์แสดงอัตราของ $C_2$ , $n$	21.334968	18.896686	17.636907

### 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศยูเอชเอฟผ่านการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

หลังจากเลือกออกแบบความถี่ใช้งาน แบนด์วิดท์และค่านพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศที่ต้องการออกแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ซึ่งสามารถจำลองขนาดโครงสร้างสายอากาศ กำหนดชนิดแผ่นตัวนำ กำหนดชนิดวัสดุไดอิเล็กทริก วิเคราะห์สัญญาณค่าสูญเสียย้อนกลับด้วยพารามิเตอร์  $S_{11}$  (Parameter  $S_{11}$ ) วิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Standing Wave Ratio; VSWR) และแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ของสายอากาศนั้นๆ ด้วยการรัน (run) คำสั่งที่เขียนขึ้นมาในโปรแกรม ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.6

### Create antenna structure

```

25 % Patch side
26 patch = antenna.Rectangle('Length', L, 'Width', W);
27 microstrip_feed = antenna.Rectangle('Length', Lf, 'Width', Wf, 'Center', [(Lg/2)-(Lf/2),0]);
28 inset_feed = antenna.Rectangle('Length', Li, 'Width', Wi, 'Center', [(L/2)-(Li/2),0]);
29 top_layer = (patch-inset_feed)+ microstrip_feed;
30 % Dielectric substrate type
31 substrate_material = dielectric('Name', 'FR4', 'EpsilonR', er, 'Thickness', h);
32 % Ground plane side
33 groundplane = antenna.Rectangle('Length', Lg, 'Width', Wg);

```

### PCB stack-Mathworks

```

34 Microstrip_antenna = pcbStack;
35 Microstrip_antenna.BoardThickness = h;
36 Microstrip_antenna.BoardShape = groundplane;
37 Microstrip_antenna.Layers = {top_layer,substrate_material,groundplane};
38 Microstrip_antenna.FeedLocations = [Lg/2 0 1 3];
39 Microstrip_antenna.Conductor = metal('Copper');
40 % Display antenna structure
41 figure;
42 show(Microstrip_antenna)

```

### ก) จำลองโครงสร้างสายอากาศ

#### Plot the simulated parameter S11 signal

```

43 % Enumerate frequencies
44 freqs = [10e+6:2e+6:3.0e+9];
45 % Plot signal
46 S11 = sparameters(Microstrip_antenna, freqs, 'Z0', 50);
47 figure;
48 rfplot(S11);

```

#### Plot the simulated VSWR signal

```

49 % Enumerate frequencies
50 freqs = [10e+6:2e+6:3.0e+9];
51 % Plot signal
52 figure;
53 VSWR = vswr(Microstrip_antenna, freqs, 'Z0', 50);

```

#### Plot the simulated radiation pattern

```

54 % 3D radiation pattern
55 pattern(Microstrip_antenna, f0, 'Type', 'gain');
56 % 2D radiation pattern in XZ-plane
57 pattern(Microstrip_antenna, f0, 0, 1:1:360, 'Type', 'gain');
58 % 2D radiation pattern in XY-plane
59 pattern(Microstrip_antenna, f0, 90, 1:1:360, 'Type', 'gain');

```

### ข) วิเคราะห์สัญญาณสำหรับประเมินคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศ

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างคำสั่งที่เขียนขึ้นในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch

### Create antenna structure

```

81 % Spiral arm side
82 spr = spiralArchimedean('Turns', N, 'InnerRadius', Rin, 'OuterRadius', Rout);
83 top_layer = pcbStack(spra).Layers{1};
84 % Dielectric substrate type
85 substrate_material = dielectric('Name', 'FR4', 'EpsilonR', er, 'Thickness', h);

```

### PCB stack-Mathworks

```

86 Spiral_antenna = pcbStack;
87 Spiral_antenna.BoardThickness = h;
88 Spiral_antenna.BoardShape = antenna.Circle("Radius", substrate_radius);
89 Spiral_antenna.Layers = {top_layer, substrate_material};
90 Spiral_antenna.FeedLocations = [0 0 1];
91 Spiral_antenna.Conductor = metal('Copper');
92 % Display antenna structure
93 figure;
94 show(Spiral_antenna)

```

### ก) จำลองโครงสร้างสายอากาศ

#### Plot the simulated parameter S11 signal

```

95 % Enumerate frequencies
96 freqs = [10e+6; 5e+6; 3.0e+9];
97 % Plot signal
98 S11 = sparameters(spra, freqs, 'Z0', 188.5);
99 figure;
100 nfpplot(S11);

```

#### Plot the simulated VSWR signal

```

101 % Enumerate frequencies
102 freqs = [10e+6; 5e+6; 3.0e+9];
103 % Plot signal
104 figure;
105 VSWR = vswr(spra, freqs, 'Z0', 188.5);

```

#### Plot the simulated radiation pattern

```

106 % 3D radiation pattern
107 pattern(Spiral_antenna, fcenter, 'Type', 'gain');
108 % 2D radiation pattern in XZ-plane
109 pattern(Spiral_antenna, fcenter, 0, 1:1:360, 'Type', 'gain');
110 % 2D radiation pattern in XY-plane
111 pattern(Spiral_antenna, fcenter, 90, 1:1:360, 'Type', 'gain');

```

### ข) วิเคราะห์สัญญาณสำหรับประเมินคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศ

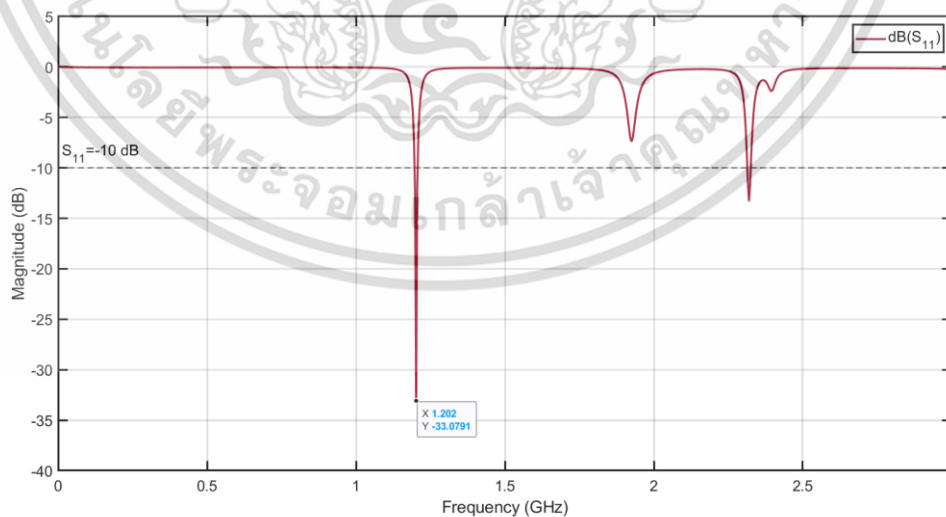
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างคำสั่งที่เขียนขึ้นในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral

### 3.4.1 การจำลองเพื่อวิเคราะห์สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบขนาดของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ไว้ทั้งหมดสามแบบ ซึ่งสามารถนำมาจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ตามรายละเอียดโครงสร้างที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และสามารถให้โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  วิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า และแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ทั้งแบบ 3 มิติและ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.18

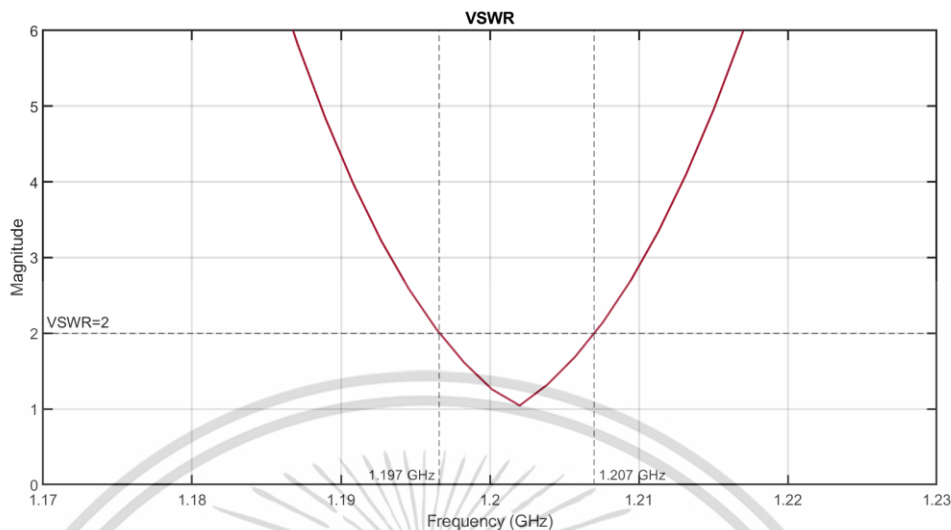


รูปที่ 3.7 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม MATLAB

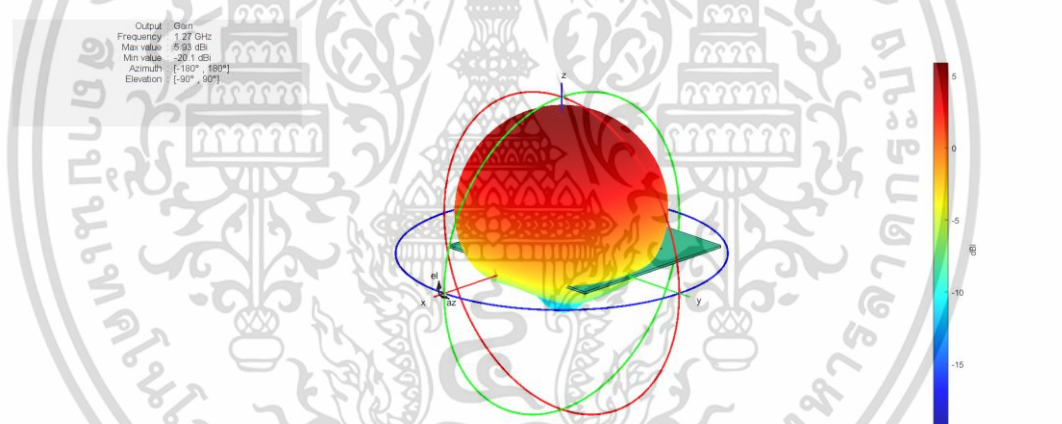


รูปที่ 3.8 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

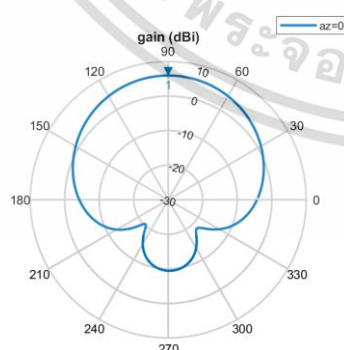
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



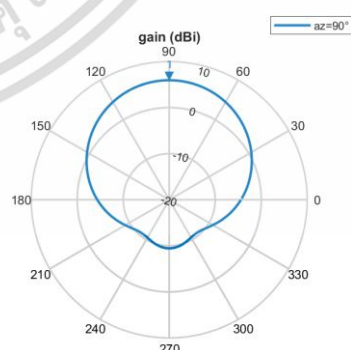
รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



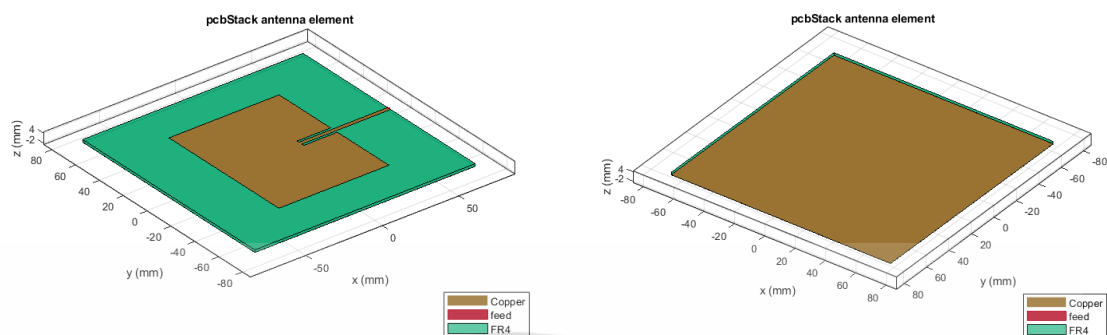
ข) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน XZ



ค) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน YZ

รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

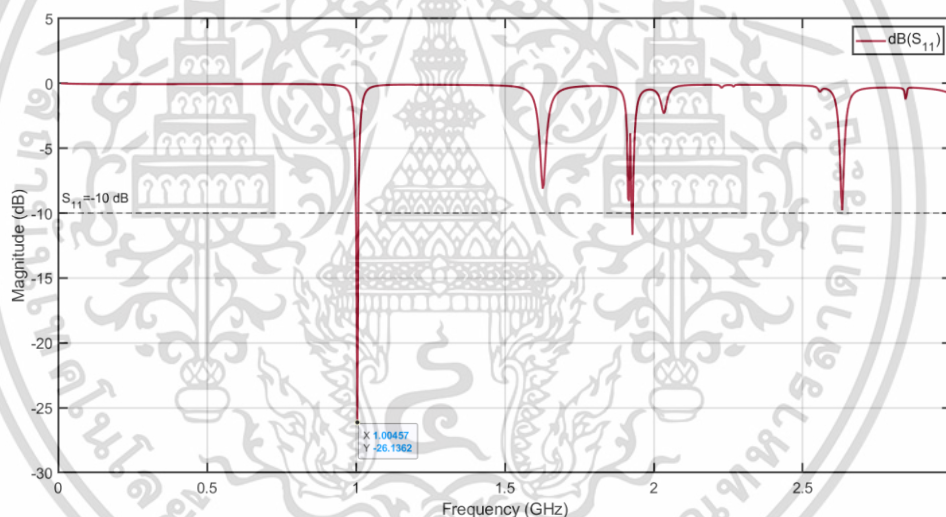
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) มุมมองด้านบน

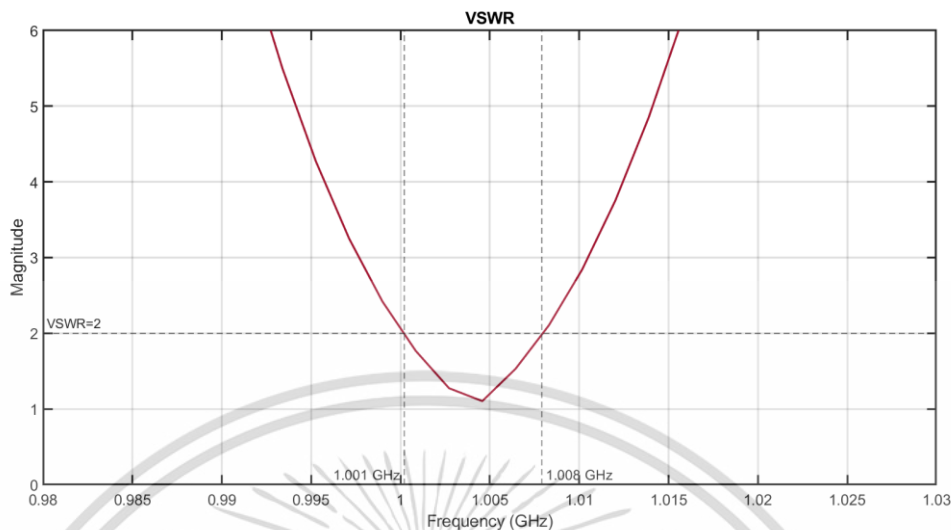
ข) มุมมองด้านล่าง

รูปที่ 3.11 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB

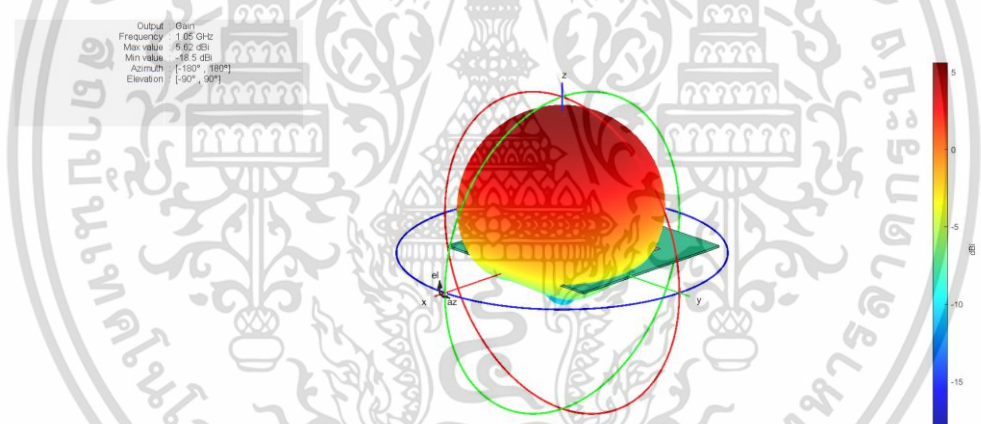


รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

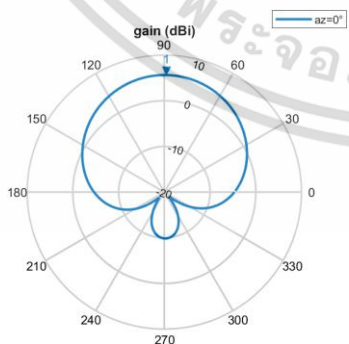
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



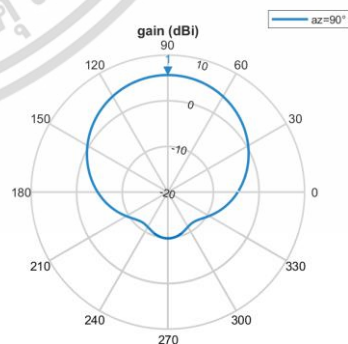
รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์ห้อตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



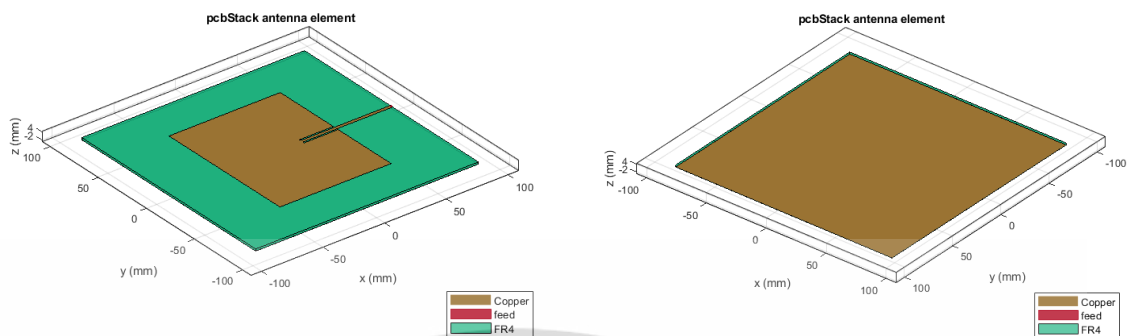
ข) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน XZ



ค) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน YZ

รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

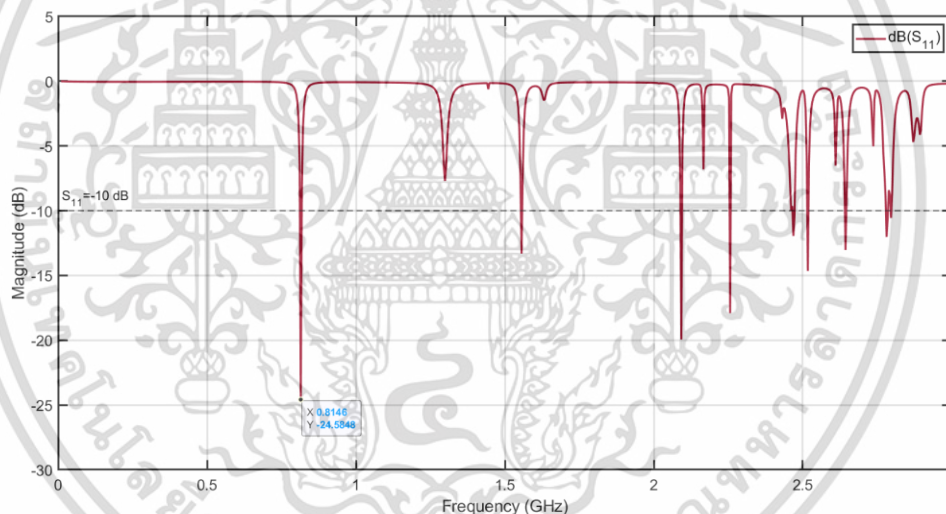
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) มุมมองด้านบน

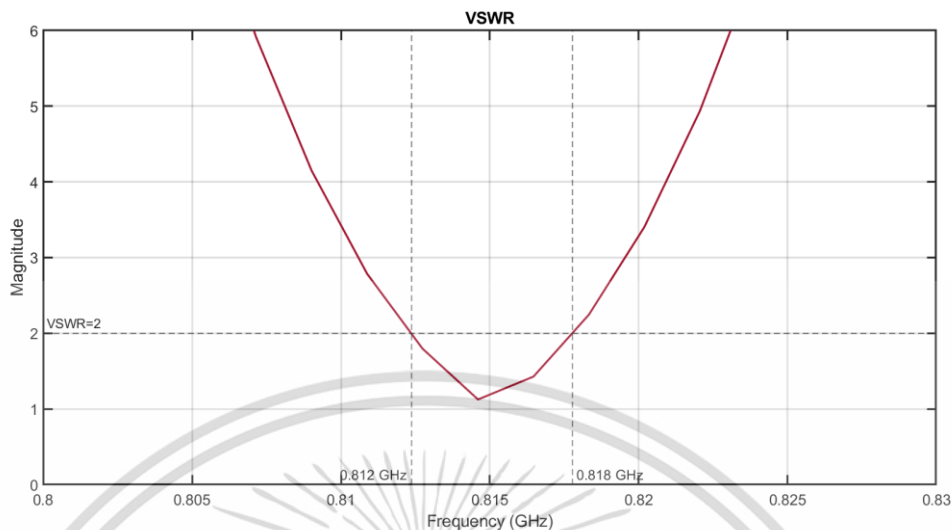
ข) มุมมองด้านล่าง

รูปที่ 3.15 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 ด้วยโปรแกรม MATLAB

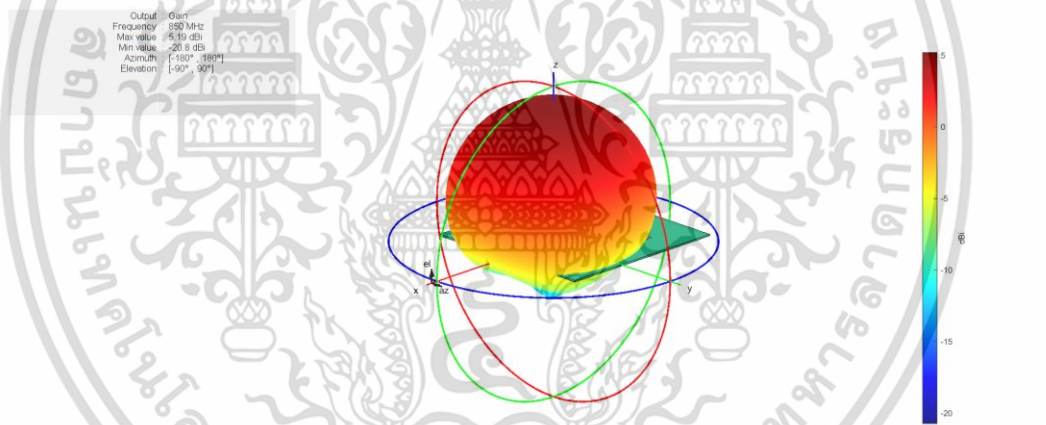


รูปที่ 3.16 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

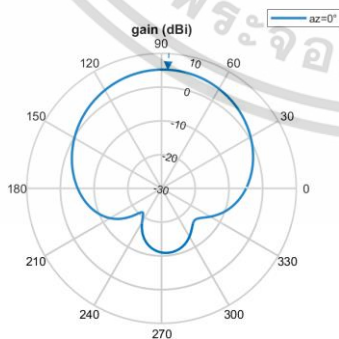
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



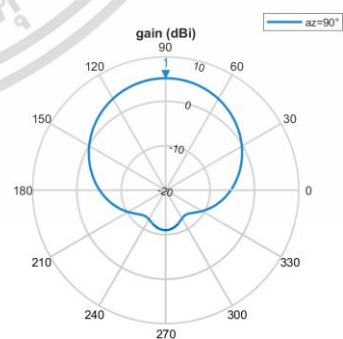
รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



ข) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน XZ



ค) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน YZ

รูปที่ 3.18 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

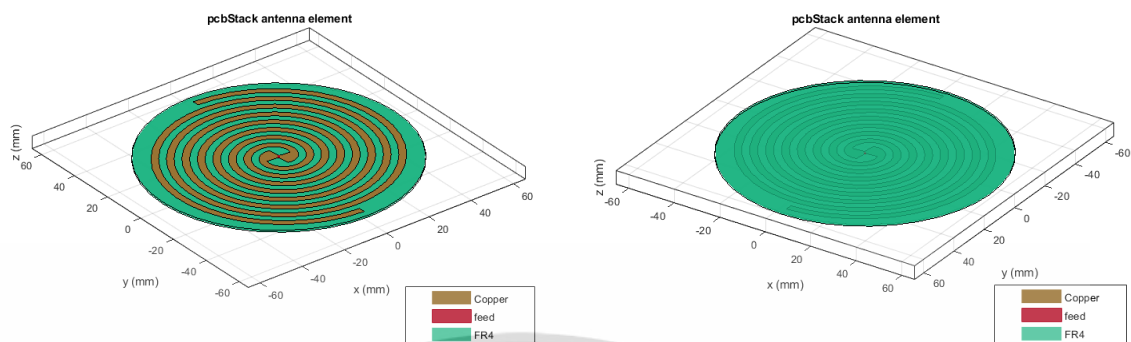
จากการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาช่วงความถี่ใช้งานที่ยอมรับได้ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ในแต่ละแบบ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 โดยผ่านการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าที่มีค่า  $\leq 2:1$  (2:1 VSWR bandwidth) ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าความถี่ใช้งานที่ออกแบบไว้

**ตารางที่ 3.3** ช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ในแต่ละแบบหลังจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์			
พารามิเตอร์	สายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความถี่ใช้งานที่ออกแบบ	1.2 GHz	1.0 GHz	0.8 GHz
2:1 VSWR bandwidth	1.197 – 1.207 GHz	1.001 – 1.008 GHz	0.812 – 0.818 GHz
ขนาดแบนด์วิดท์	10 MHz	7 MHz	6 MHz
ความถี่ศูนย์กลาง	1.202 GHz	1.0045 GHz	0.815 GHz
แฟรคชันนอลแบนด์วิดท์	0.8319 %	0.6968 %	0.7362 %
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (VSWR)	1.0454:1 – 2:1	1.1038:1 – 2:1	1.1253:1 – 2:1

### 3.4.2 การจำลองเพื่อวิเคราะห์สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง

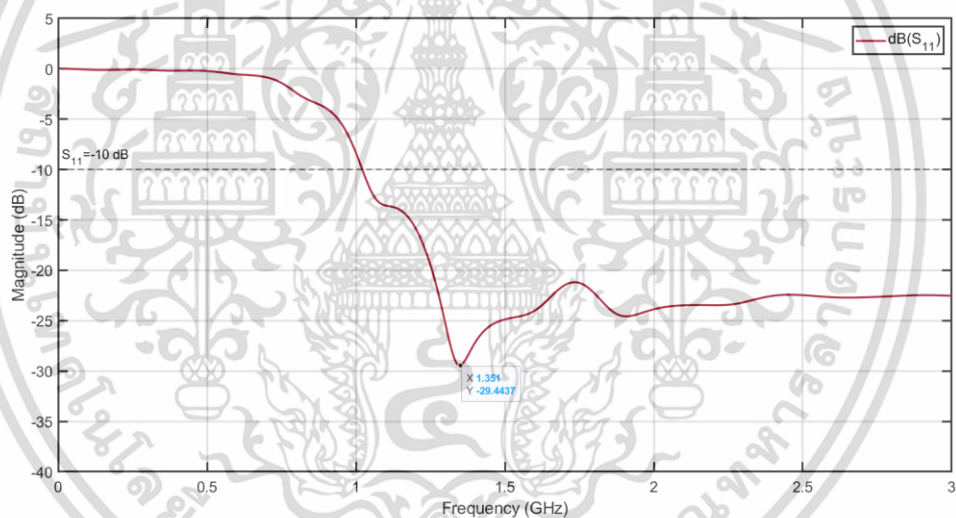
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบขนาดของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ไว้ทั้งหมดสามแบบ ซึ่งสามารถนำมาจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ตามรายละเอียดโครงสร้างที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และสามารถให้โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  วิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าและแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ทั้งแบบ 3 มิติและ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ถึงรูปที่ 3.30



ก) มุมมองด้านบน

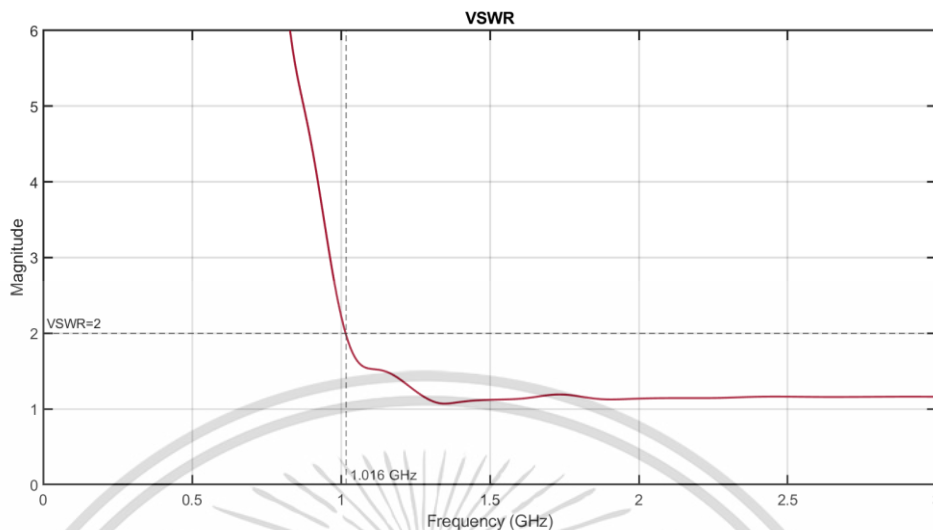
ข) มุมมองด้านล่าง

รูปที่ 3.19 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 ด้วยโปรแกรม MATLAB

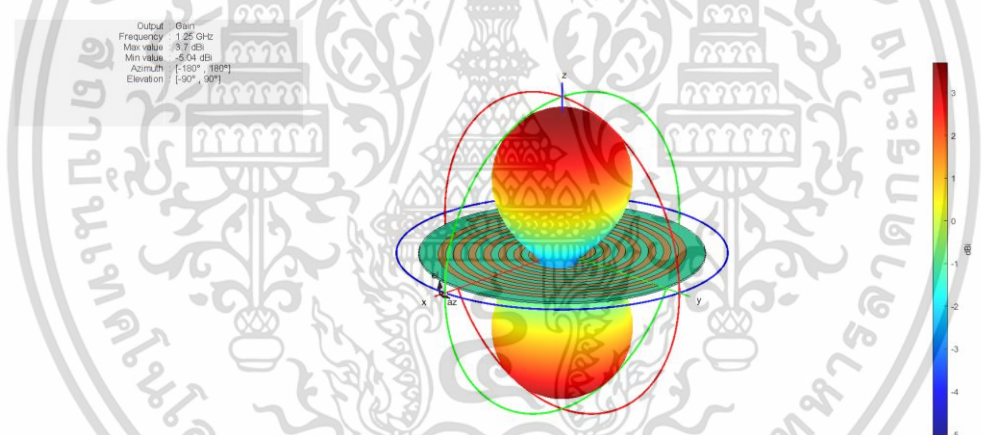


รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

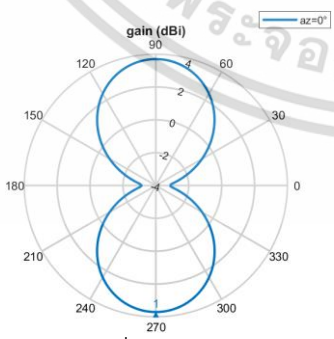
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



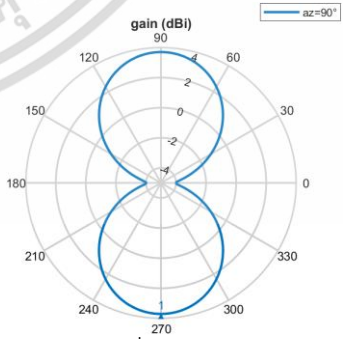
รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



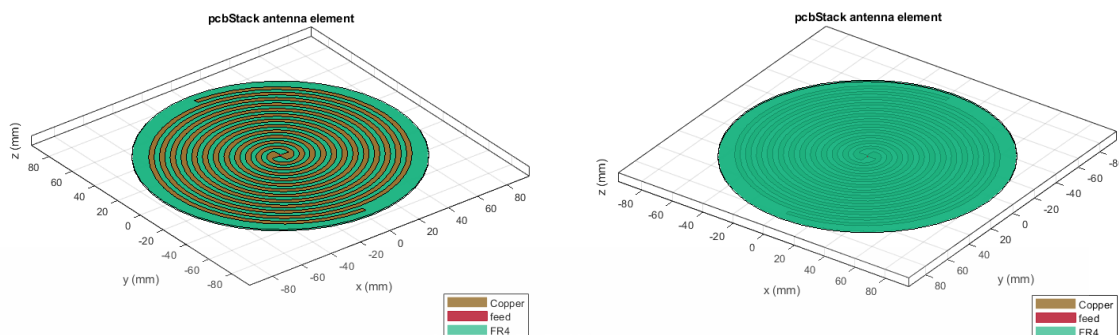
ข) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน XZ



ค) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน YZ

รูปที่ 3.22 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

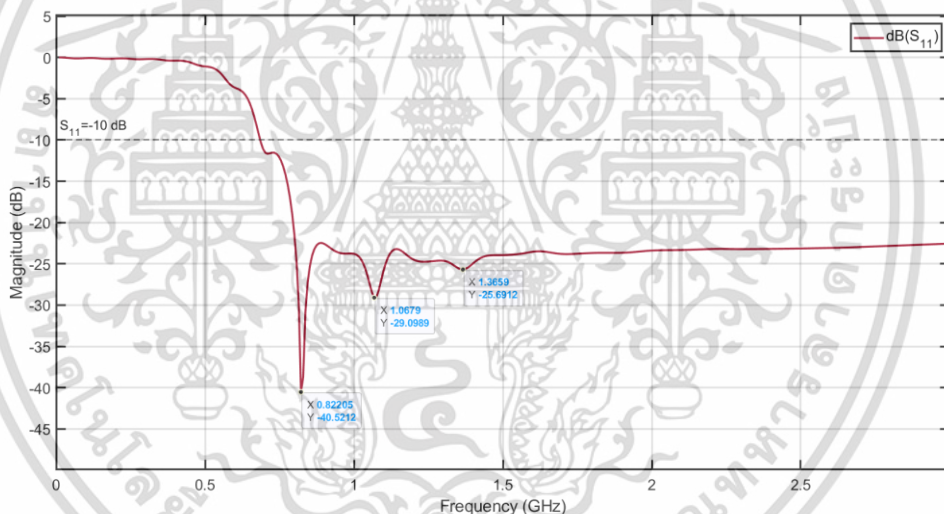
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) มุมมองด้านบน

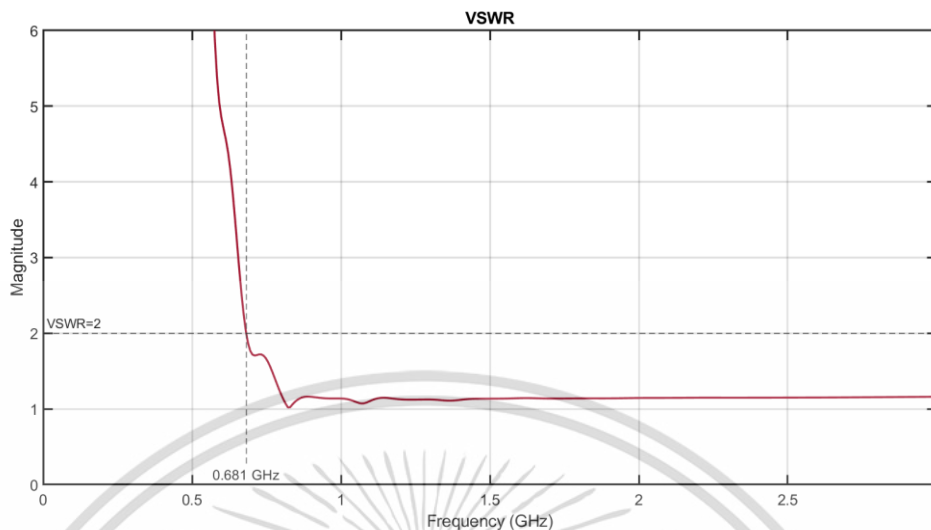
ข) มุมมองด้านล่าง

รูปที่ 3.23 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB

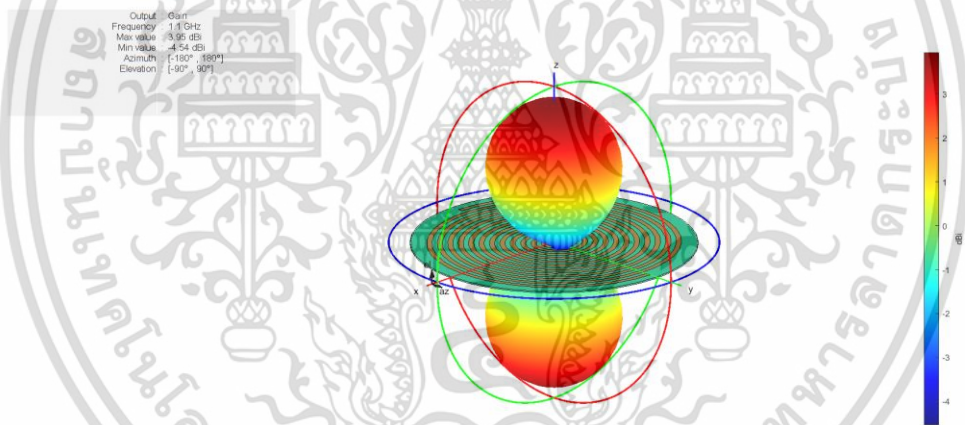


รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

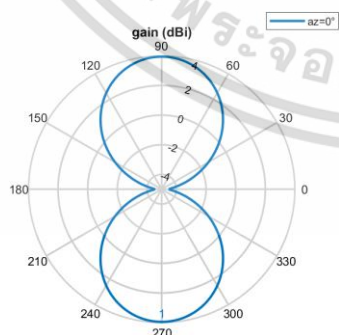
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



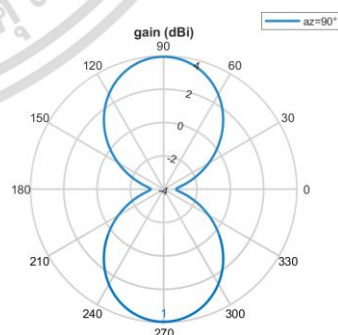
รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



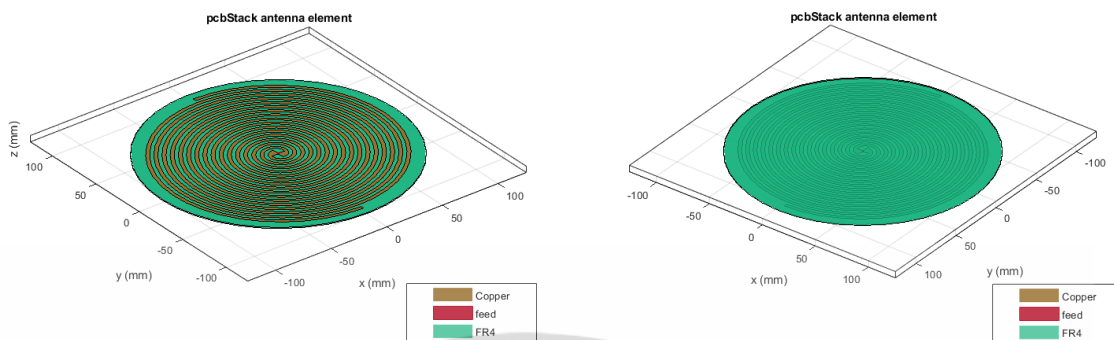
ข) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน XZ



ค) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน YZ

รูปที่ 3.26 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

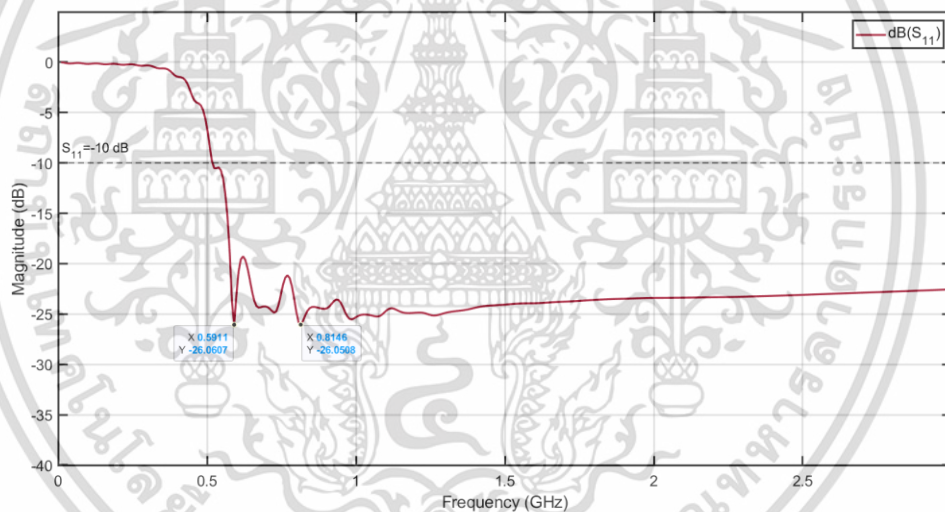
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) มุมมองด้านบน

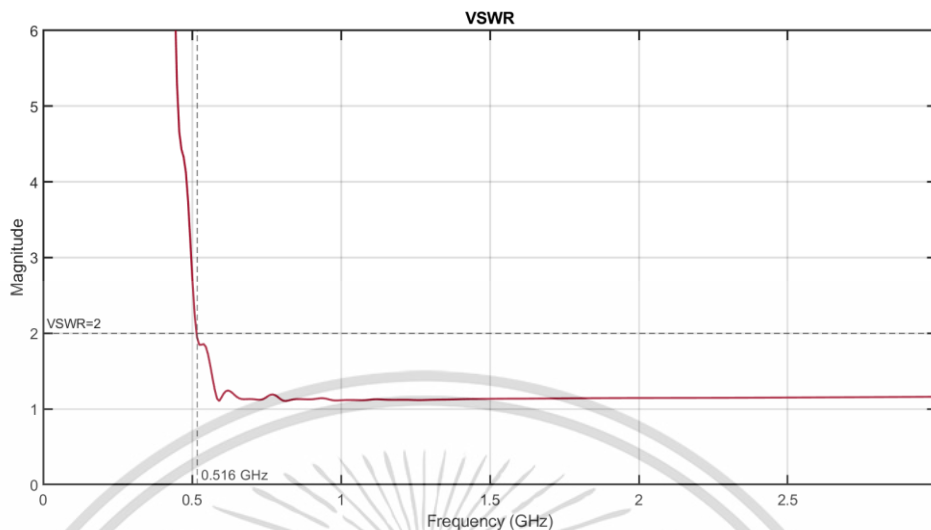
ข) มุมมองด้านล่าง

รูปที่ 3.27 การจำลองโครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 ด้วยโปรแกรม MATLAB

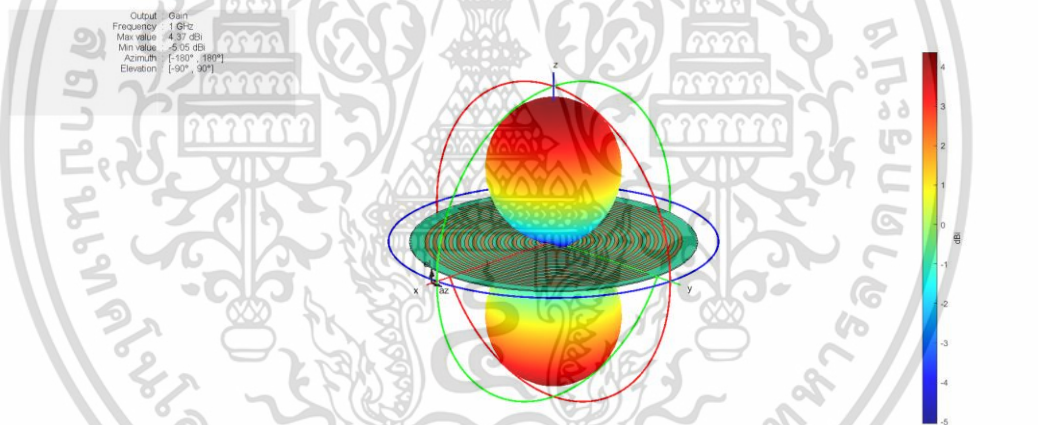


รูปที่ 3.28 การวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 การวิเคราะห์อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



ข) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน XZ

ค) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติในแกน YZ

รูปที่ 3.30 การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถหาช่วงความถี่ใช้งานที่ยอมรับได้ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ในแต่ละแบบ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 โดยผ่านการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าที่มีค่า  $\leq 2:1$  (2:1 VSWR bandwidth) ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่าค่าความถี่คutoffต่ำสุดนั้นสามารถยอมรับได้ ซึ่งตรงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

**ตารางที่ 3.4** ช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ในแต่ละแบบหลังจากการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์			
พารามิเตอร์	สายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความถี่คutoffต่ำสุดที่ออกแบบ	$\geq 0.92$ GHz	$\geq 0.636$ GHz	$\geq 0.486$ GHz
2:1 VSWR bandwidth	1.016 ~ 3 GHz	0.681 ~ 3 GHz	0.516 ~ 3 GHz
ขนาดแบนด์วิดท์	$\geq 1984$ MHz	$\geq 2319$ MHz	$\geq 2484$ MHz
ความถี่ศูนย์กลาง	$\geq 2.008$ GHz	$\geq 1.8405$ GHz	$\geq 1.758$ GHz
แฟรคชันนอลแบนด์วิดท์	$\geq 98.8048$ %	$\geq 125.9984$ %	$\geq 141.297$ %
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (VSWR)	1.0681:1 – 2:1	1.019:1 – 2:1	1.1048:1 – 2:1

### 3.5 การประเมินคุณสมบัติการทำงานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

หลังจากทำการออกแบบสร้างสายอากาศทั้งหมดแล้ว จะนำสายอากาศแต่ละตัวไปทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับผ่านการวิเคราะห์สัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ตรวจวัดและจะนำผลค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ที่ได้จากการวัดจริงมาคำนวณหาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาแบนด์วิดท์สำหรับใช้งานจริง และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ถูกระบุผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากหัวข้อก่อนหน้านี้



รูปที่ 3.31 เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ SIGLENT SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer

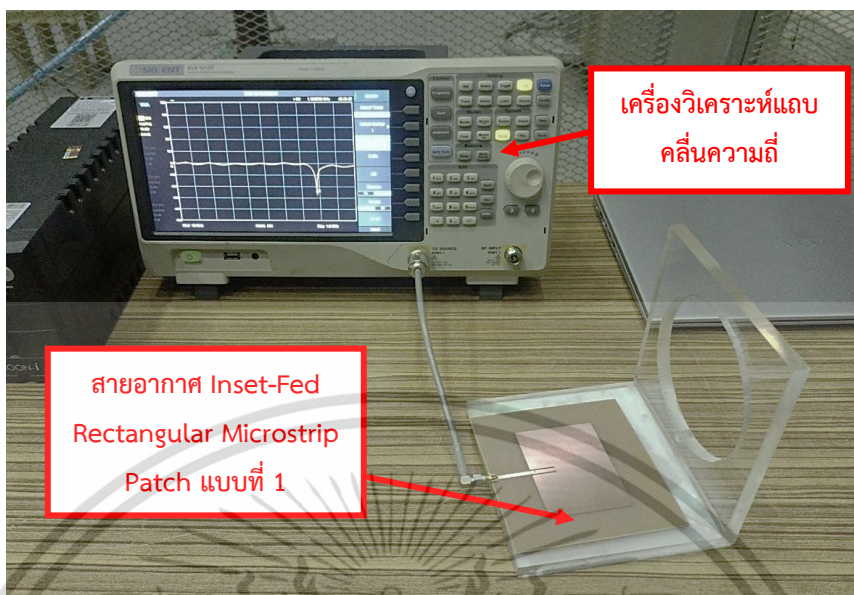
### 3.5.1 การวิเคราะห์ค่าวัดจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ

การออกแบบสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ได้ทำตามรูปแบบเดียวกับการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยสายอากาศแต่ละแบบดังแสดงในรูปที่ 3.32 จะถูกตรวจวัดค่าประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ SIGLENT SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.31 ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่มีความสามารถในการวัดแอมพลิจูดของสัญญาณ  $S_{11}$  ของค่าสูญเสียย้อนกลับในย่านความถี่สูงจากสายอากาศผ่านตัวเลือกการทำงาน Vector Network Analysis ได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 MHz ถึง 1.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.33 ถึง 3.35

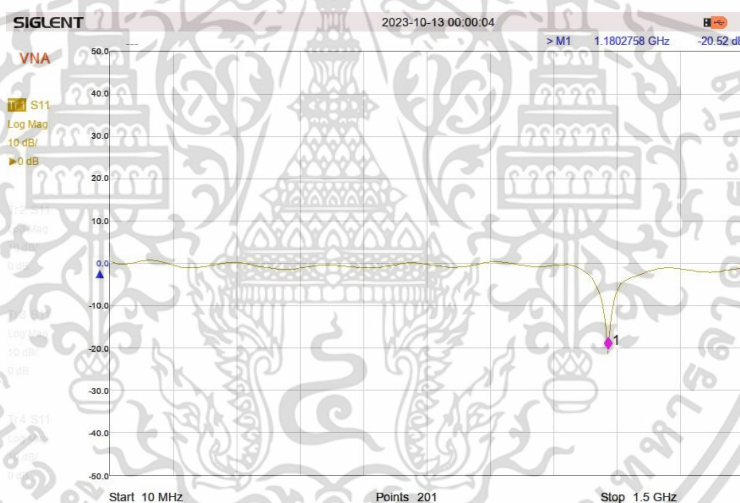


รูปที่ 3.32 ภาพจริงสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1, 2 และ 3 (จากซ้ายไปขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



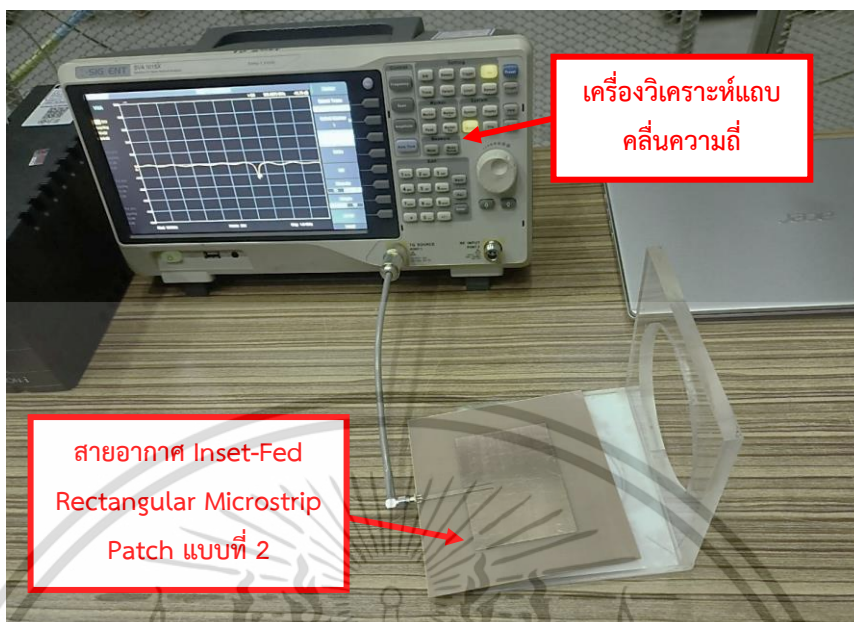
ก) ภาพจริงขณะทำการวิเคราะห์ค่าวัดจริง



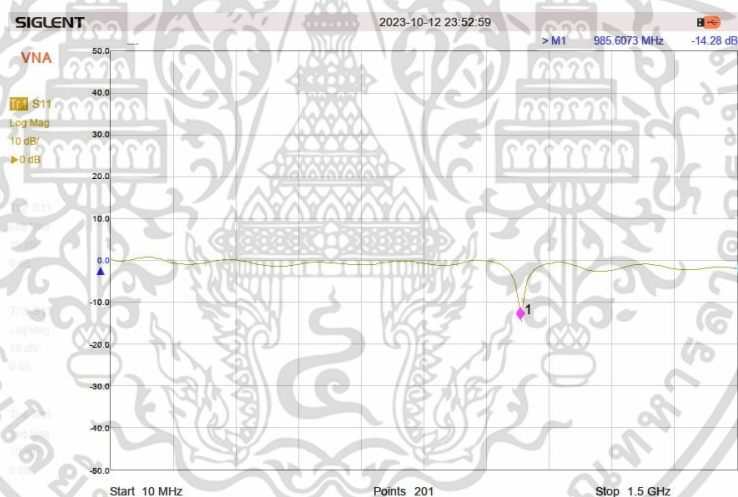
ข) ภาพจากเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

รูปที่ 3.33 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



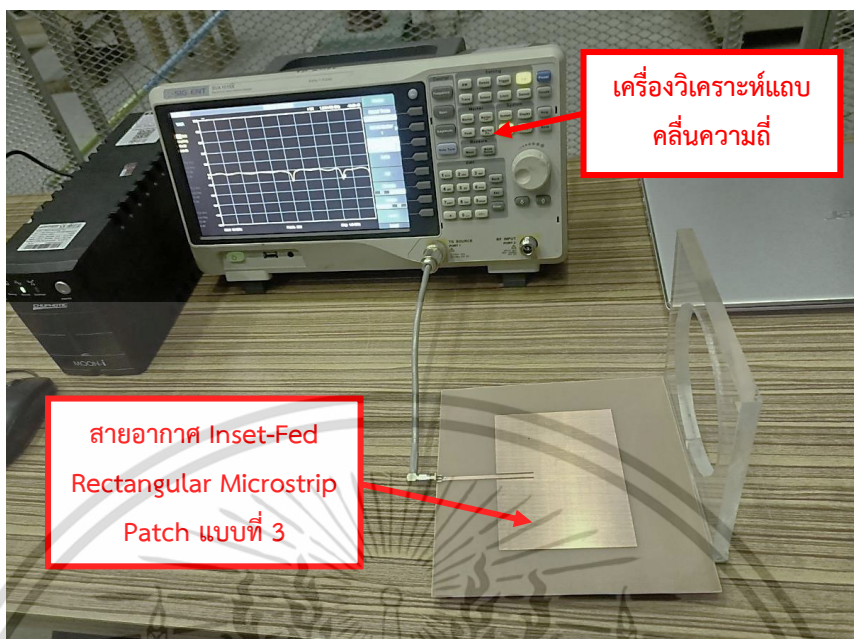
ก) ภาพจริงขณะทำการวิเคราะห์ค่าวัดจริง



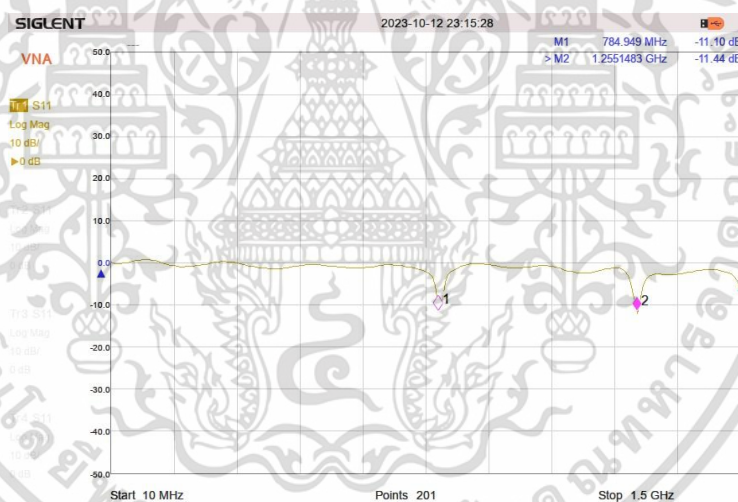
ข) ภาพจากเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

รูปที่ 3.34 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ภาพจริงขณะทำการวิเคราะห์ค่าวัดจริง

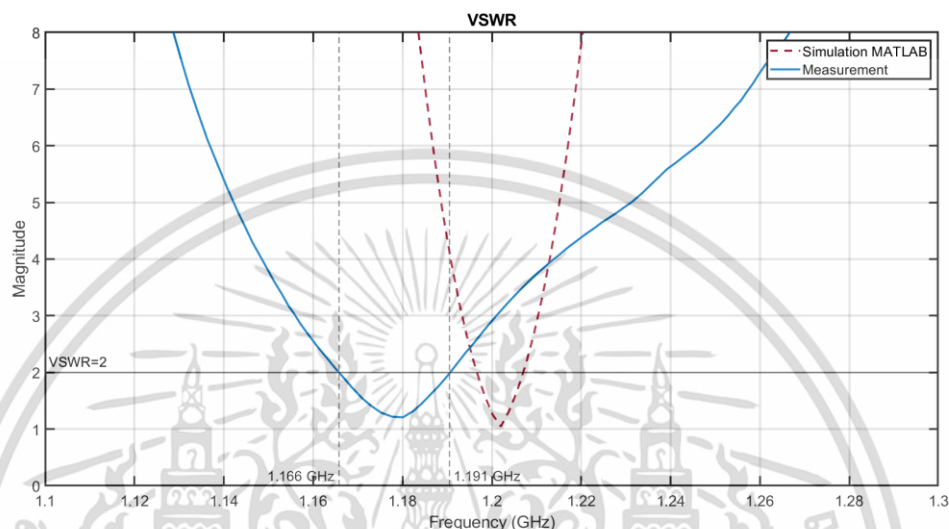


ข) ภาพจากเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

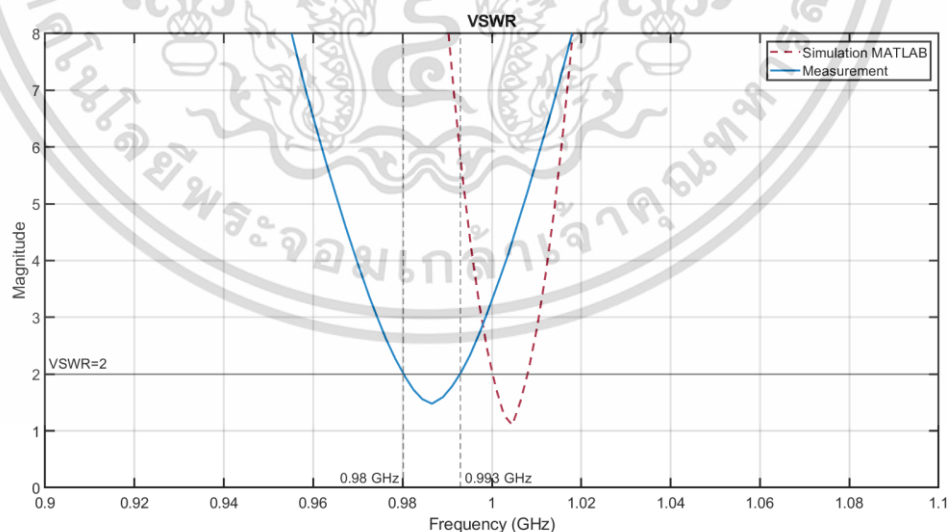
รูปที่ 3.35 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะนำผลค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ที่ได้จากการวัดค่าจริงมาคำนวณหาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าตามสมการ (2.4) ถึง (2.6) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ถูกระบุผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 3.36 ถึง 3.38 จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาช่วงความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศ

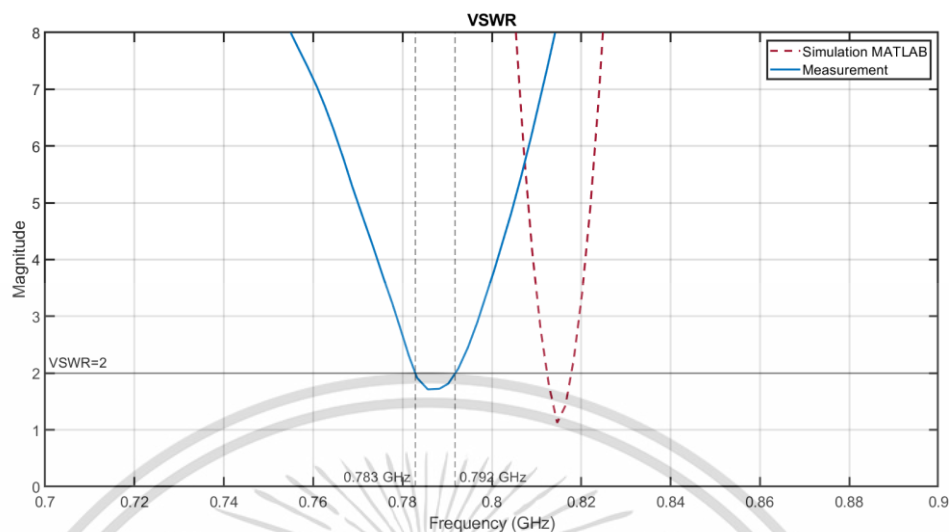


รูปที่ 3.36 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.37 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 3.5 ช่วงความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ในแต่ละแบบหลังจากการตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

การตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่			
พารามิเตอร์	สายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความถี่ใช้งานที่ออกแบบ	1.2 GHz	1.0 GHz	0.8 GHz
2:1 VSWR bandwidth	1.166 – 1.191 GHz	0.98 – 0.993 GHz	0.783 – 0.792 GHz
ขนาดแบนด์วิดท์	25 MHz	13 MHz	9 MHz
ความถี่ศูนย์กลาง	1.1785 GHz	0.9865 GHz	0.7875 GHz
แฟรคชันนอลแบนด์วิดท์	2.1213 %	1.3178 %	1.1429 %
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (VSWR)	1.2078:1 – 2:1	1.4788:1 – 2:1	1.7138:1 – 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

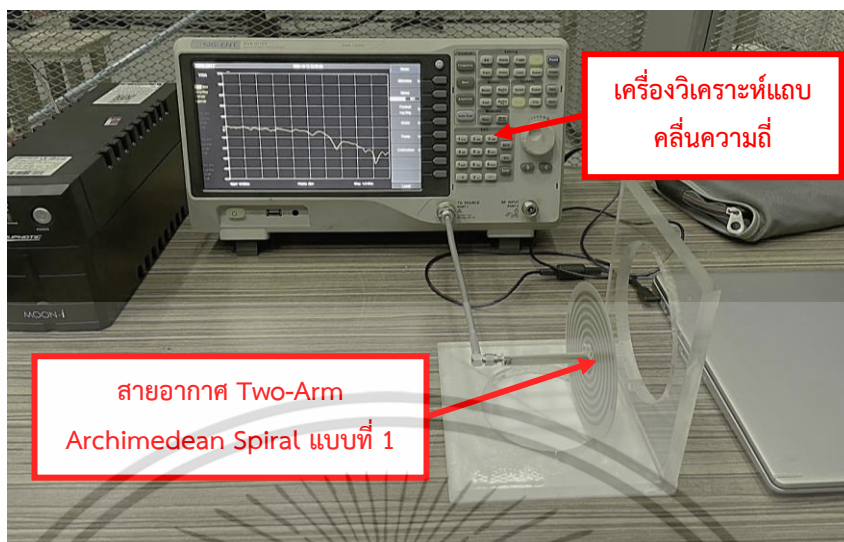
จากการตรวจค่าวัดจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่สามารถหาช่วงความถี่ใช้งานจริงที่ยอมรับได้ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ในแต่ละแบบดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 โดยผ่านการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าที่มีค่า  $\leq 2:1$  (2:1 VSWR bandwidth) พบว่าในสายอากาศแต่ละแบบนี้มีความถี่ใช้งานจริงใกล้เคียงกับที่ได้คำนวณไว้และผลจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในระดับนี้ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสัดส่วนขนาดแบนด์วิดท์ของสายอากาศในรูปของแฟรคชันนอลแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth)  $< 10$  เปอร์เซนต์ออกมาได้ทุกกรณี ซึ่งสามารถยอมรับให้อยู่ในเกณฑ์ของอุปกรณ์วิทยุเอชเอฟแถบความถี่แคบได้ [25, 26] ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์อาจได้มาจากข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต (Fabrication errors) ของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์

### 3.5.2 การวิเคราะห์ค่าวัดจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง

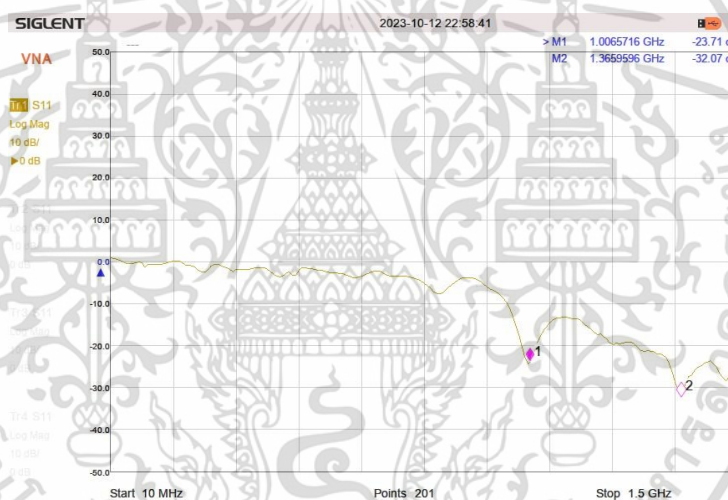
การออกแบบสร้างสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ได้ทำตามรูปแบบเดียวกับการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 โดยสายอากาศแต่ละแบบดังแสดงในรูปที่ 3.39 จะถูกตรวจวัดค่าประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่ SIGLENT SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.31 ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่มีความสามารถในการวัดแอมพลิจูดของสัญญาณ  $S_{11}$  ของค่าสูญเสียย้อนกลับในย่านความถี่สูงจากสายอากาศผ่านตัวเลือกการทำงาน Vector Network Analysis ได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 MHz ถึง 1.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.40 ถึง 3.42



รูปที่ 3.39 ภาพจริงสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1, 2 และ 3 (จากซ้ายไปขวา)



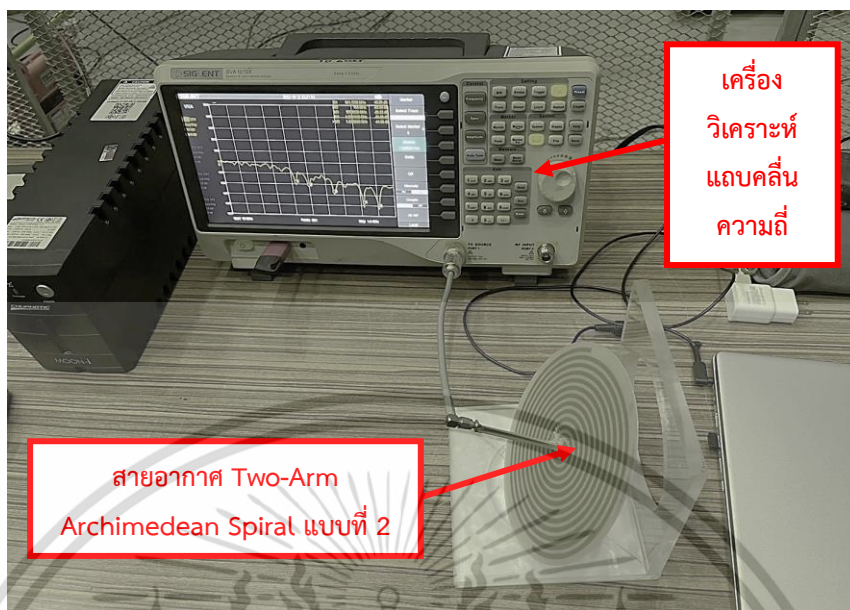
ก) ภาพจริงขณะทำการวิเคราะห์ค่าวัดจริง



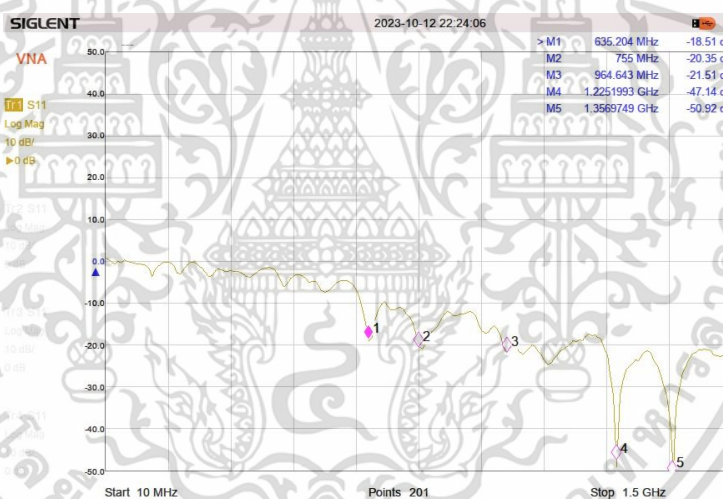
ข) ภาพจากเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

รูปที่ 3.40 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



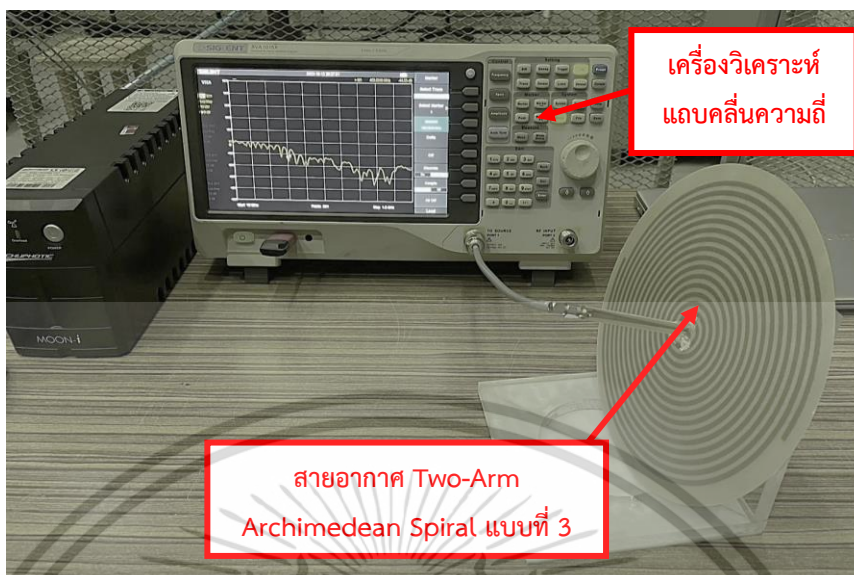
ก) ภาพจริงขณะทำการวิเคราะห์ค่าวัดจริง



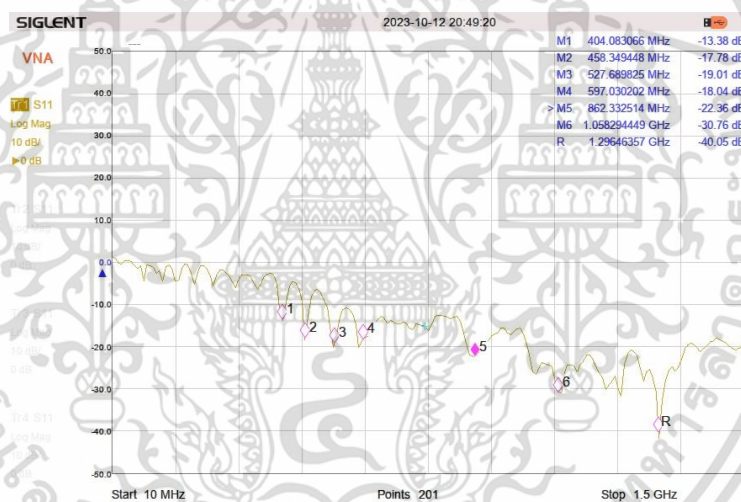
ข) ภาพจากเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

รูปที่ 3.41 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ภาพจริงขณะทำการวิเคราะห์ค่าวัดจริง

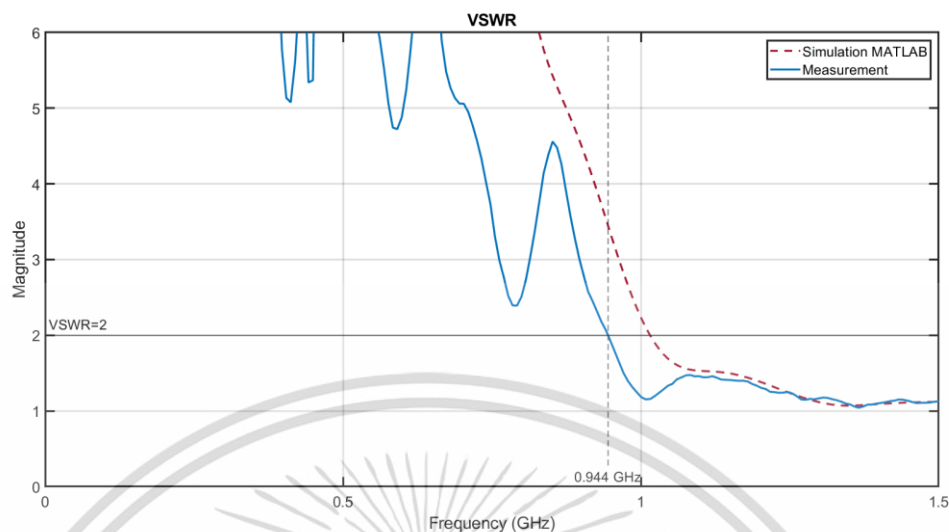


ข) ภาพจากเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

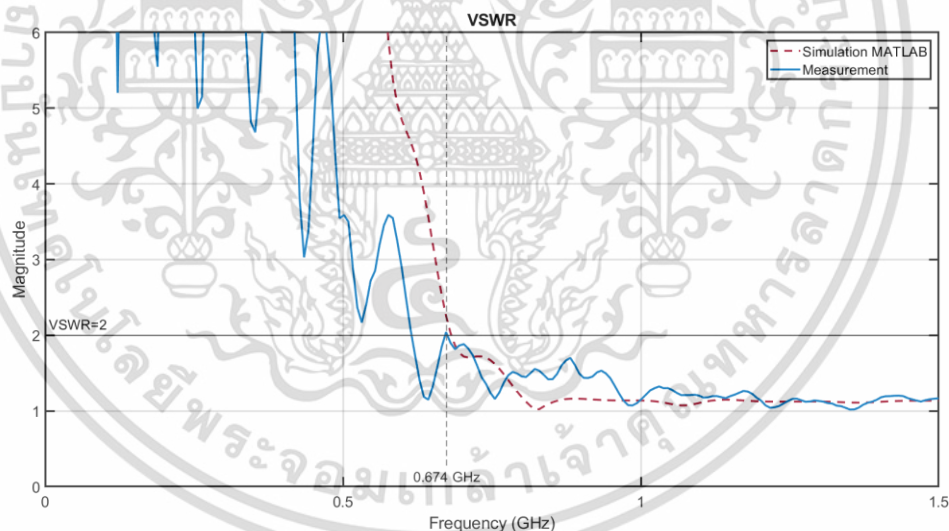
รูปที่ 3.42 การตรวจวัดสัญญาณพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

หลังจากนั้นจะนำผลค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ที่ได้จากการวัดค่าจริงมาคำนวณหาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าตามสมการ (2.4) ถึง (2.6) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ถูกวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 3.43 ถึง 3.45 จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาช่วงความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศ

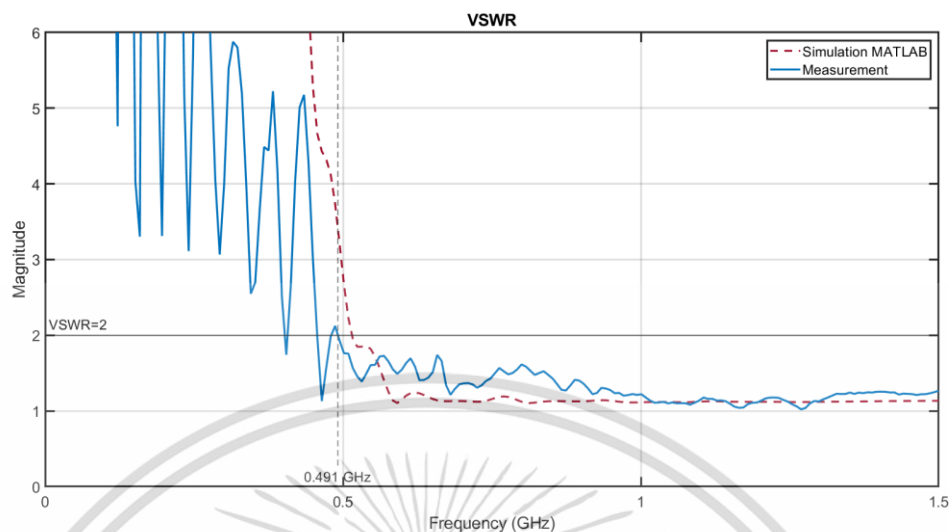
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.44 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.45 การแสดงผลคำนวณอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 หลังจากตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่พร้อมเปรียบเทียบกับผลจำลองจากโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 3.6 ช่วงความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ในแต่ละแบบหลังจากการตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่

การตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่			
พารามิเตอร์	สายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral		
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความถี่คัทออฟต่ำสุดที่ออกแบบ	$\geq 0.92$ GHz	$\geq 0.636$ GHz	$\geq 0.486$ GHz
2:1 VSWR bandwidth	0.944 ~ 1.5 GHz	0.674 ~ 1.5 GHz	0.491 ~ 1.5 GHz
ขนาดแบนด์วิดท์	$\geq 556$ MHz	$\geq 826$ MHz	$\geq 1009$ MHz
ความถี่ศูนย์กลาง	$\geq 1.222$ GHz	$\geq 1.087$ GHz	$\geq 0.9955$ GHz
แฟรคชันนอลแบนด์วิดท์	$\geq 45.4992$ %	$\geq 75.989$ %	$\geq 101.3561$ %
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (VSWR)	1.0423:1 – 2:1	1.0186:1 – 2:1	1.0206:1 – 2:1

จากการตรวจค่าวัดจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่สามารถหาแถบความถี่ใช้งานจริงที่ยอมรับได้ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ในแต่ละแบบดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 โดยผ่านการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันไฟฟ้าที่มีค่า  $\leq 2:1$

(2:1 VSWR bandwidth) พบว่าในสายอากาศแต่ละแบบนั้นมีความถี่คutoffต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ และมีความใกล้เคียงกับผลจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสัดส่วนขนาดแบนด์วิธของสายอากาศในรูปของแฟรคชันนอลแบนด์วิธ (Fractional bandwidth) 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปออกมาได้ทุกกรณี ซึ่งสามารถยอมรับให้อยู่ในเกณฑ์ของอุปกรณ์วิทยุเอชเอฟแถบความถี่กว้างได้ [25, 26]



## บทที่ 4

### การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

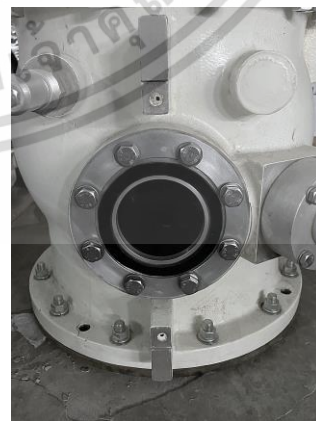
ในเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการตรวจสอบความไวในการวัด (Sensitivity check/verification) ของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งหรือยูเอชเอฟ (Ultra-High Frequency; UHF) ที่ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพ คุณสมบัติการตรวจวัดก่อนทำการทดสอบนอกสถานที่เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas-Insulated Substation; GIS) ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในทางปฏิบัติจริง โดยจะดำเนินการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. และแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การทดสอบแรงดันสูงและการทดสอบแรงดันต่ำตามที่ระบุไว้ในเอกสารรายงานที่เผยแพร่โดย CIGRE Technical Brochure [3] – [4]

#### 4.1 แบบจำลองสำหรับใช้ตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟ

การตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟสำหรับนำไปใช้ตรวจวัด PD ในระบบ GIS นั้นสามารถดำเนินการทดสอบได้ภายในห้องปฏิบัติการตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.6 โดยการทดสอบได้มีการใช้ตัวถังโลหะ/ท่อโลหะ (Enclosure) จากส่วนประกอบแฉกบริเวณจุดต่อของ GIS ที่ใช้ล้อมอุปกรณ์ปลดวงจร/เชื่อมต่อวงจรเข้าระบบ (Disconnecter switch) มาจำลองและใช้เซนเซอร์ตรวจวัดสัญญาณพัลส์ที่ถูกจำลองขึ้นมาจากด้านใน การทดสอบได้จัดเตรียมแบบจำลอง Enclosure ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 320 มม. สูง 420 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และจะทำการใช้สายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมาตรวจวัดสัญญาณพัลส์ผ่านบริเวณช่องมอง (Window) ของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



ก) โครงสร้างแบบจำลอง



ข) บริเวณ Window

รูปที่ 4.1 แบบจำลอง Enclosure สำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

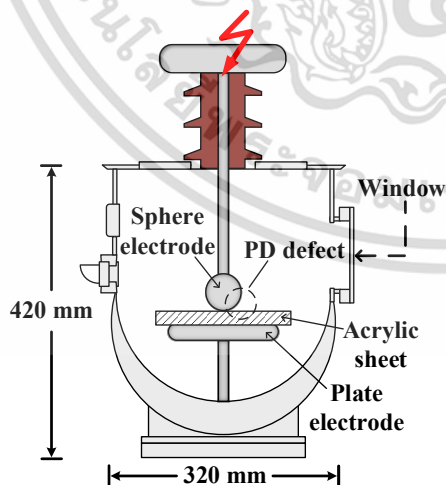


ก) สายอากาศซูเอชเอฟแถบความถี่แคบ ข) สายอากาศซูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง

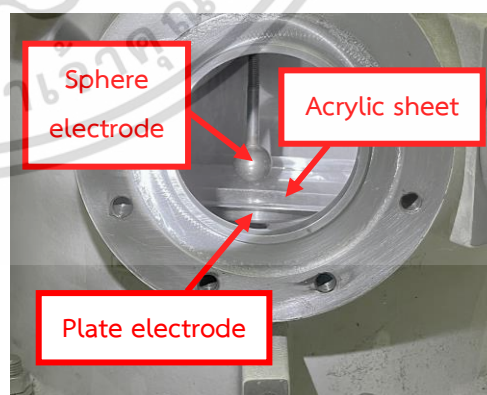
#### รูปที่ 4.2 ลักษณะการวาง/ติดตั้งสายอากาศซูเอชเอฟแถบบริเวณ Window ของแบบจำลอง Enclosure

##### 4.1.1 แบบจำลองสำหรับวงจรทดสอบแรงดันสูง

จุดบกพร่อง (Defect) ที่ถูกจำลองผ่านการป้อนแรงดันทดสอบสูงให้กับแบบจำลอง Enclosure นี้ ได้จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD defect) ประเภทดิสชาร์จตามผิวเพื่อสร้างปรากฏการณ์วาบไฟตามผิว (Flashover) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ GIS โดยการใช้อิเล็กโตรดทรงกลม (Sphere electrode) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. และอิเล็กโตรดระนาบ (Plate electrode) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. คั่นด้วยฉนวนอะคริลิก (Acrylic sheet) ขนาด 115×115×12 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.3



ก) ไดอะแกรมแบบจำลอง



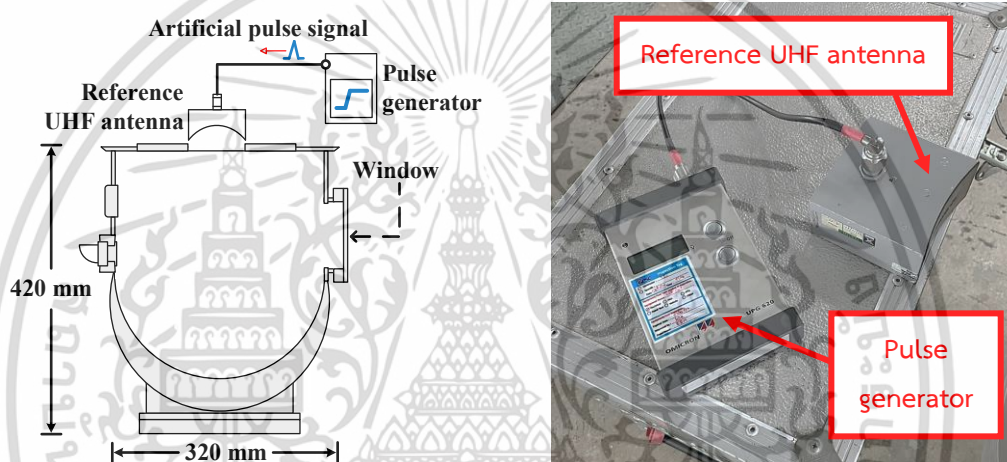
ข) การวางแนวอิเล็กโตรด

#### รูปที่ 4.3 แบบจำลอง Enclosure ที่มีการจำลองการเกิด PD สำหรับการทดสอบแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 แบบจำลองสำหรับวงจรทดสอบแรงดันต่ำ

การจัดวางแบบจำลองลักษณะนี้จะทำการหยุดป้อนแรงดันทดสอบสูงให้กับแบบจำลอง Enclosure เพื่อจำลองสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ (Pulse generator) โดยจะทำการเชื่อมต่อกับสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง (Reference UHF antenna) ที่จัดเตรียมไว้ คือ สายอากาศยูเอชเอฟฮอร์น (UHF Horn antenna) ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียว ทำให้มีคุณสมบัติการรับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในระยะทางไกล เหมาะสำหรั้นำมาใช้ยังสัญญาณพัลส์เทียม



ก) โดอะแกรมแบบจำลอง

ข) ชุดอุปกรณ์จำลองสัญญาณพัลส์เทียม

รูปที่ 4.4 แบบจำลอง Enclosure ที่มีการจำลองสร้างสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟสำหรับการทดสอบแรงดันต่ำ

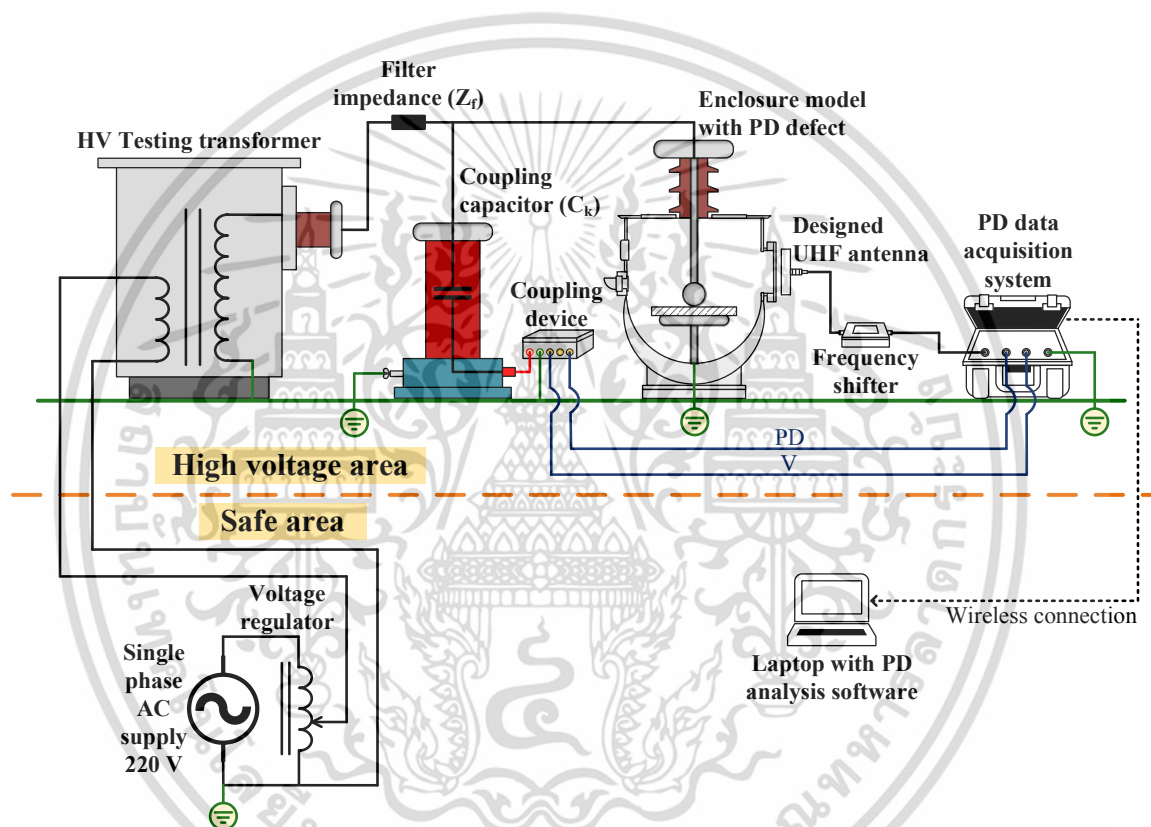
#### 4.2 การตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟสำหรั้นำไปประยุกต์ใช้ในระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการ

กระบวนการทดสอบจะเป็นการทดสอบการเกิด PD ประเภทดิสชาร์จตามผิวในแบบจำลอง Enclosure ที่ระดับแรงดันทดสอบสูงเพื่อใช้ตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟแต่ละตัวที่ถูกออกแบบมาและนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การทดสอบนี้สามารถตรวจวัดขนาดประจุปรากฏโดยใช้การตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 ที่ใช้หลักการตรวจวัดกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์และมีการประยุกต์ใช้วิธีการเปรียบเทียบเทียบให้แก่เครื่องมือวัดเข้ามาใช้ทดสอบร่วมกันได้ ทำให้สามารถยืนยันระดับค่าขนาดประจุปรากฏและขนาดสัญญาณ PD ที่ตรวจวัดจากอุปกรณ์สายอากาศได้ ในการทดสอบจะทำการบันทึกผลการทดสอบจากชุดเครื่องวิเคราะห์ PD ที่สามารถบันทึกข้อมูลขนาด

ทางสถิติและรูปคลื่นของสัญญาณดิสชาร์จ พร้อมวิเคราะห์ผลลัพธ์ในรูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) และรูปแบบ Time-Frequency (T-F) map ออกมาได้

#### 4.2.1 ชุดวงจรการทดสอบแรงดันสูง

องค์ประกอบในวงจรทดสอบนี้สอดคล้องกับวงจรตรวจวัดของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 โดยจัดเตรียมวงจรดังไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบจริงดังแสดงในรูปที่ 4.6



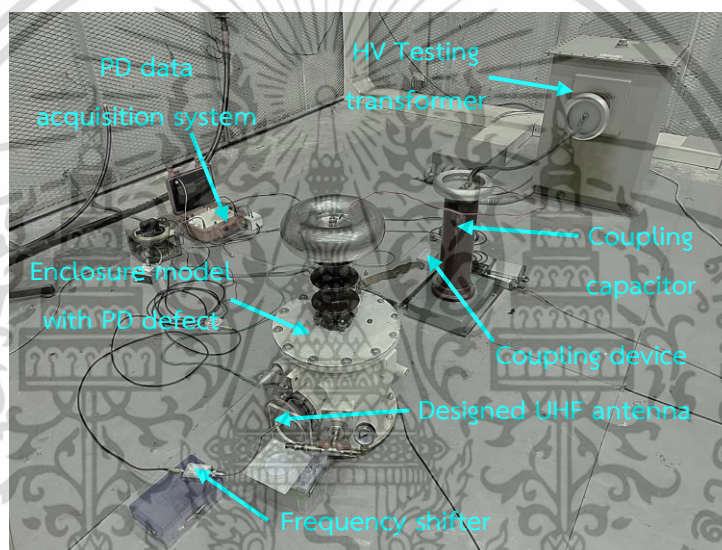
รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมชุดวงจรทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดันสูง

ในบริเวณไฟฟ้าแรงสูง (High voltage area) อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย

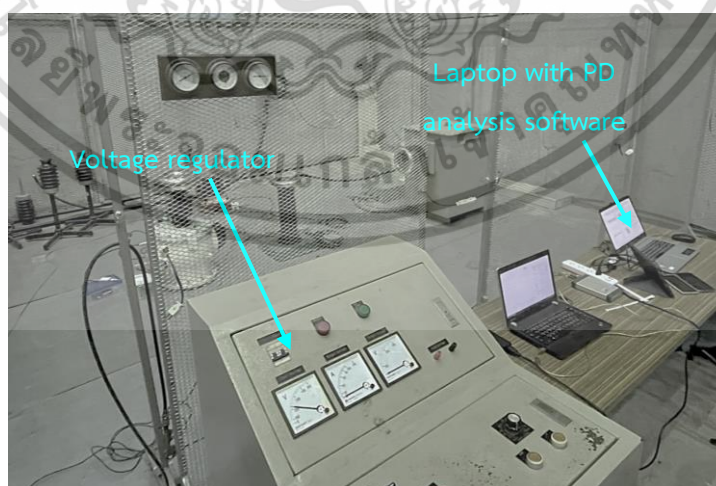
- 1) หม้อแปลงทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง (HV Testing transformer) ขนาด 40kVA, 460V/75kV, 50/60 Hz, PD < 2 pC
- 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor;  $C_k$ ) ขนาด 1 nF, 100kV
- 3) อุปกรณ์รับสัญญาณหรืออุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling device)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) สายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมา (Designed UHF antenna)
- 5) อุปกรณ์ควบคุม/เลื่อนความถี่ (Frequency shifter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณสำหรับใช้แปลงสัญญาณความถี่สูงจากเซ็นเซอร์ยูเอชเอฟมาเป็นความถี่ในย่านเดียวกับเครื่องวิเคราะห์ข้อมูล PD ที่ประกอบด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่าน 100 MHz, แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) อัตราขยาย 20 dB
- 6) ชุดเครื่องวิเคราะห์ข้อมูล PD (PD data acquisition system) ช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 16 kHz ถึง 30 MHz
- 7) แบบจำลองตัวถังโลหะที่มีการจำลองการเกิด PD (Enclosure model with PD defect)



ก) บริเวณไฟฟ้าแรงสูง



ข) บริเวณที่ปลอดภัยจากไฟฟ้าแรงสูง

รูปที่ 4.6 ชุดวงจรการทดสอบจริงสำหรับการทดสอบแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณที่ปลอดภัยจากไฟฟ้าแรงสูง (Safe area) อุปกรณ์/เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย

- 1) แผงควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator)
- 2) คอมพิวเตอร์แสดงผลที่ติดตั้งโปรแกรมซอฟต์แวร์วิเคราะห์สัญญาณบางส่วน (Laptop with PD analysis software)

#### 4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงดันสูง

- 1) หลังจากเตรียมวงจรการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.5 พร้อมทำการติดตั้งสายอากาศยูเอชเอฟตัวใดตัวหนึ่งที่ต้องการใช้ทดสอบแถวบริเวณ Window ของแบบจำลอง Enclosure ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นจะทำการปรับเทียบวงจรทดสอบของระบบวัดในวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 โดยนำอุปกรณ์ปรับเทียบดิซาร์จมาตรฐานมาต่อกับขั้วสายของแบบจำลองที่ใช้ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.7 และเลือกป้อนกระแสพัลส์สั้นๆที่มีขนาดประจุ ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วสายทั้งสองของแบบจำลอง เมื่อทำการปรับเทียบเสร็จจะนำอุปกรณ์ปรับเทียบดิซาร์จมาตรฐานออกจากวงจร แล้วเริ่มทำการทดสอบ

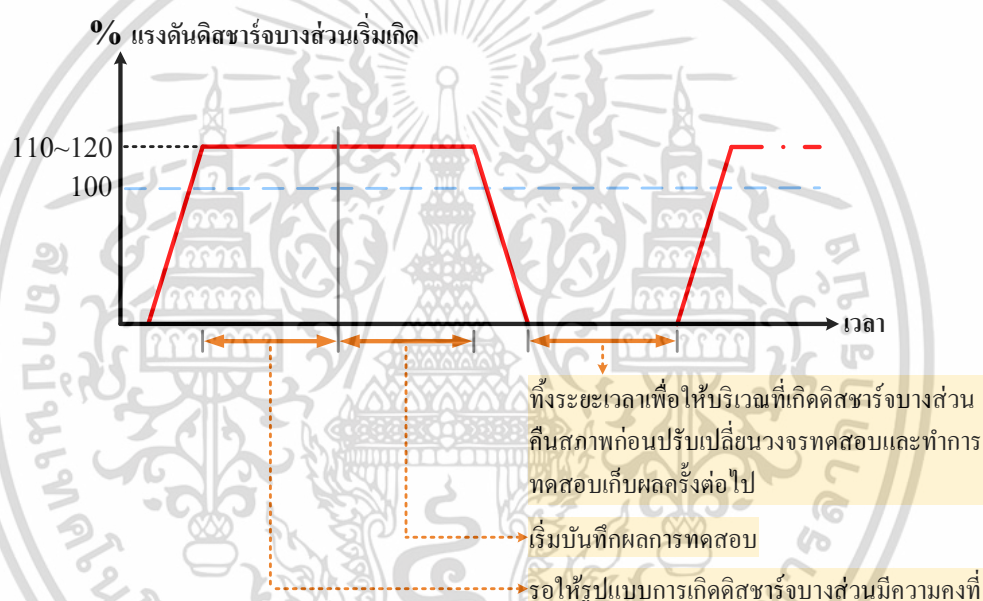


รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการปรับเทียบวงจรทดสอบของระบบวัดในวิธีการแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270

- 2) ทำการป้อนแรงดันทดสอบโดยเพิ่มค่าแรงดันทดสอบขึ้นอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พร้อมสังเกตว่า PD เริ่มเกิดที่แรงดันเท่าไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ทำการป้อนแรงดันทดสอบให้อยู่ในช่วง 110 % ถึง 120 % ของแรงดัน PD เริ่มเกิดเพื่อให้เห็นรูปแบบการเกิด PD สามารถแสดงข้อมูลสัญญาณพัลส์ออกมาได้ชัดเจน [28] และรองนกว่าลักษณะรูปแบบที่เกิดจะมีความคงที่เพื่อให้สามารถบันทึกผลการทดสอบได้
- 4) ทำการบันทึกผลการทดสอบที่ตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 พร้อมกับบันทึกผลการทดสอบที่ตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟในวงจรทดสอบ
- 5) หลังจากบันทึกผลการทดสอบเสร็จแล้ว จะทำการลดแรงดันทดสอบจนเหลือศูนย์และทิ้งระยะเวลาเพื่อให้บริเวณที่เกิด PD คืบสภาพ
- 6) ทำการปรับเปลี่ยนวงจรทดสอบโดยนำสายอากาศยูเอชเอฟตัวอื่นมาใช้ทดสอบเก็บผลลัพธ์ถัดไป

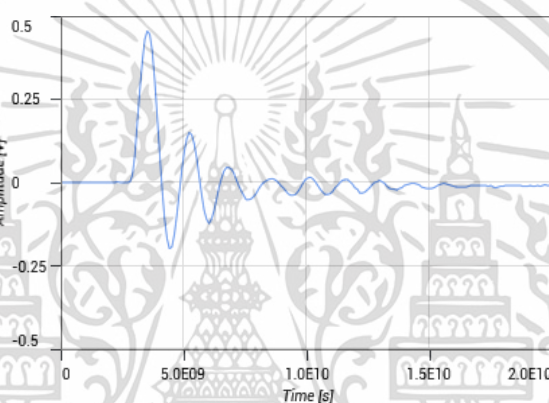
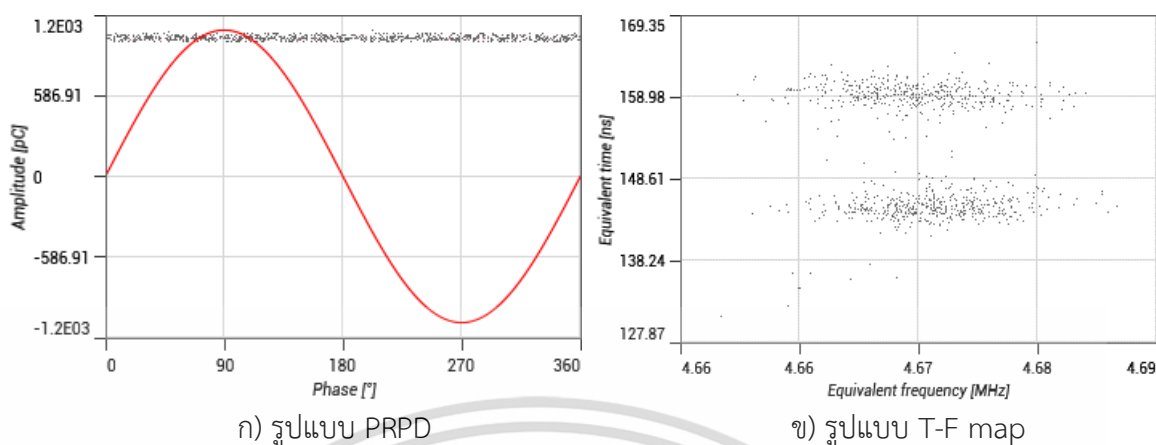


รูปที่ 4.8 ลักษณะการป้อนแรงดัน-เวลาในการทดสอบแรงดันสูง

#### 4.2.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทดสอบแรงดันสูง

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. สภาพบรรยากาศการทดสอบแสดง อุณหภูมิห้องทดสอบ  $33^{\circ}\text{C}$ , ความชื้นสัมพัทธ์ 76.5 % และความดันบรรยากาศ 756 mmHg

ผลทดสอบการเปรียบเทียบวงจรทดสอบของระบบวัดในวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 ได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.1 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณในรูปแบบของ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Time-Frequency (T-F) map และรูปคลื่นพัลส์ดังแสดง ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์จากขั้นตอนการปรับเทียบวงจรถดสอบ

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดผลทดสอบจากขั้นตอนการปรับเทียบระบบวัดของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270

ประจุที่ป้อน, $Q_{cal}$	1000 pC
ค่าประจุที่อ่านได้จากเครื่องวัด, $Q_{mea}$	1017.9 pC
ระดับค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง $Q_{cal}$ และ $Q_{mea}$	1.79 %
สเกลแฟกเตอร์การปรับเทียบ (IEC calibration factor)	0.6278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการตรวจวัดการเกิด PD ประเภทดิสชาร์จตามผิวในแบบจำลอง Enclosure ที่พิกัดแรงดันทดสอบ 9.5 kV ความถี่ 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.10 หลังถูกตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Conventional method) และได้ใช้วิธีการที่ไม่ใช่วิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Non-conventional method) คือ เทคนิคการวัดยูเอชเอฟ ตรวจจับ PD ผ่านสื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสายอากาศยูเอชเอฟ โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้



Techimp - Altanova group Srl - Via Toscana 11/C - 40069 Zola Predosa (BO) Italy  
tel. +39.051.19986050 - Fax +39.551.19986099 - email: info@altanova-group.com

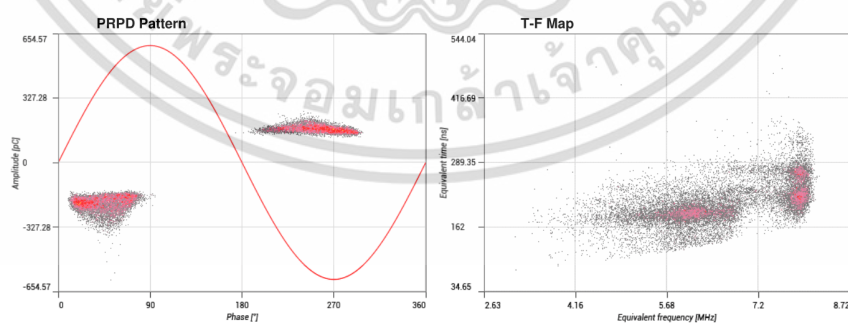
### PDPro automatic report

#### Asset information

Customer	KMITL_Thanatorn
Asset name	UHF_sensor
Location	HV_Lab
Apparatus serial number	xxxx
Phase	1
Detection point	Window_PD
Sensor typology	Ck

#### General info

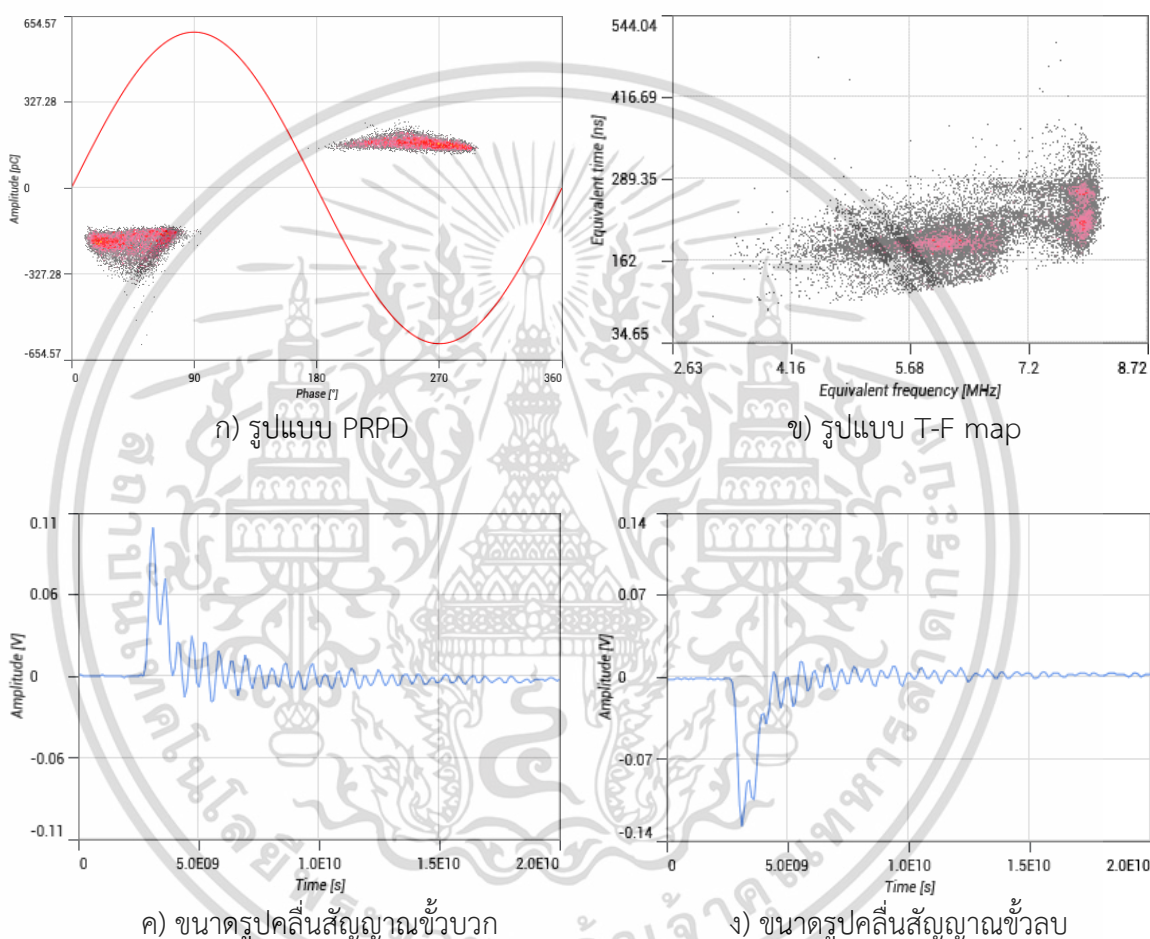
Acquisition date	2/15/2024 2:40:19 PM
Pulses	20000
Acquisition time [s]	9.55E+000 s
Applied voltage	9.542 kV
Phase shift	0 [°]
Pre-trigger	3E-07
Bandwidth	IEC
IEC calibration factor	0.6278
Sync Frequency	50.041 Hz
Sync RMS	0.303 V
Time length	2.00E-006 s



รูปที่ 4.10 ใบรายงานผลการทดสอบจากชุดเครื่องวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) วิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 ที่ใช้หลักการตรวจวัดกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดค่าประจุปรากฏ PD รายละเอียดผลการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD ในรูปแบบของ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD), Time-Frequency (T-F) map และขนาดรูปคลื่นสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

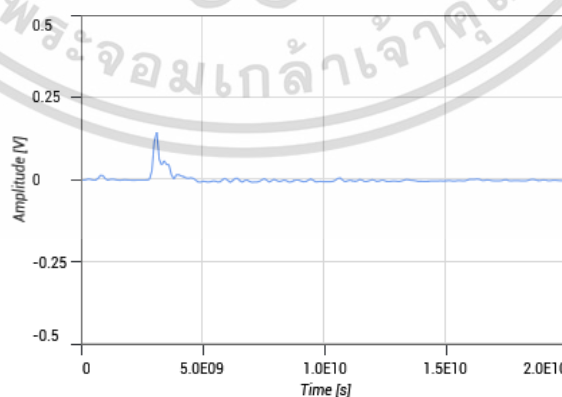
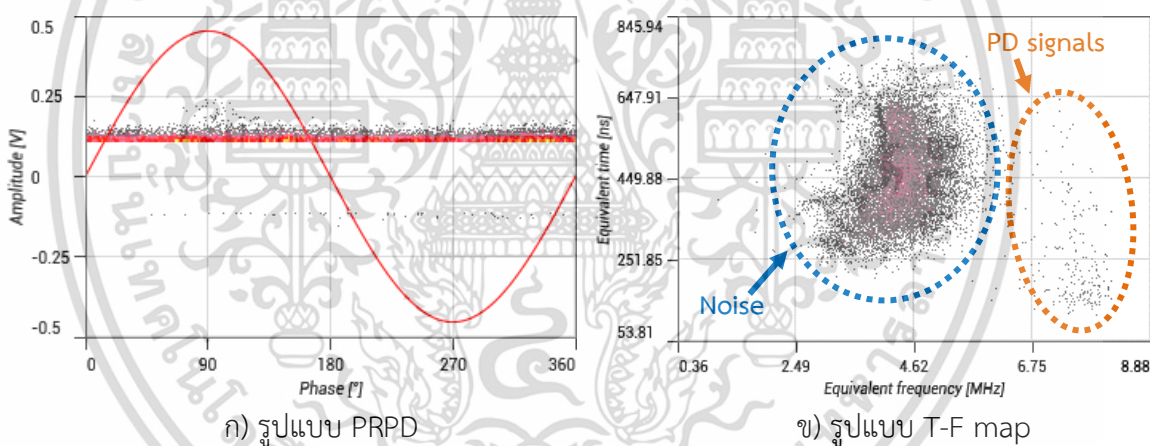


รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัด PD หลังถูกตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม

แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	260.8 pC, -595.1 pC
ขนาดประจุปรากฏ PD, $Q_{\text{Max}95\%}$	204.6 pC, -276.1 pC
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	-
ช่วง Equivalent time ของสัญญาณพัลส์ PD	74.88 ns – 503.86 ns
ช่วง Equivalent frequency ของสัญญาณพัลส์ PD	3.14 MHz – 8.2 MHz

2) ก่อนทำการตรวจวัด PD ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟที่ออกแบบมา จะทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการตรวจวัด จึงทำการบันทึกผลโดยใช้สายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิงที่มีการออกแบบมาให้ใช้งานช่วง 1.2 GHz ถึง 1.27 GHz รายละเอียดผลการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD ในรูปแบบของ PRPD, T-F map และขนาดรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.12



ค) ขนาดรูปคลื่นสัญญาณ

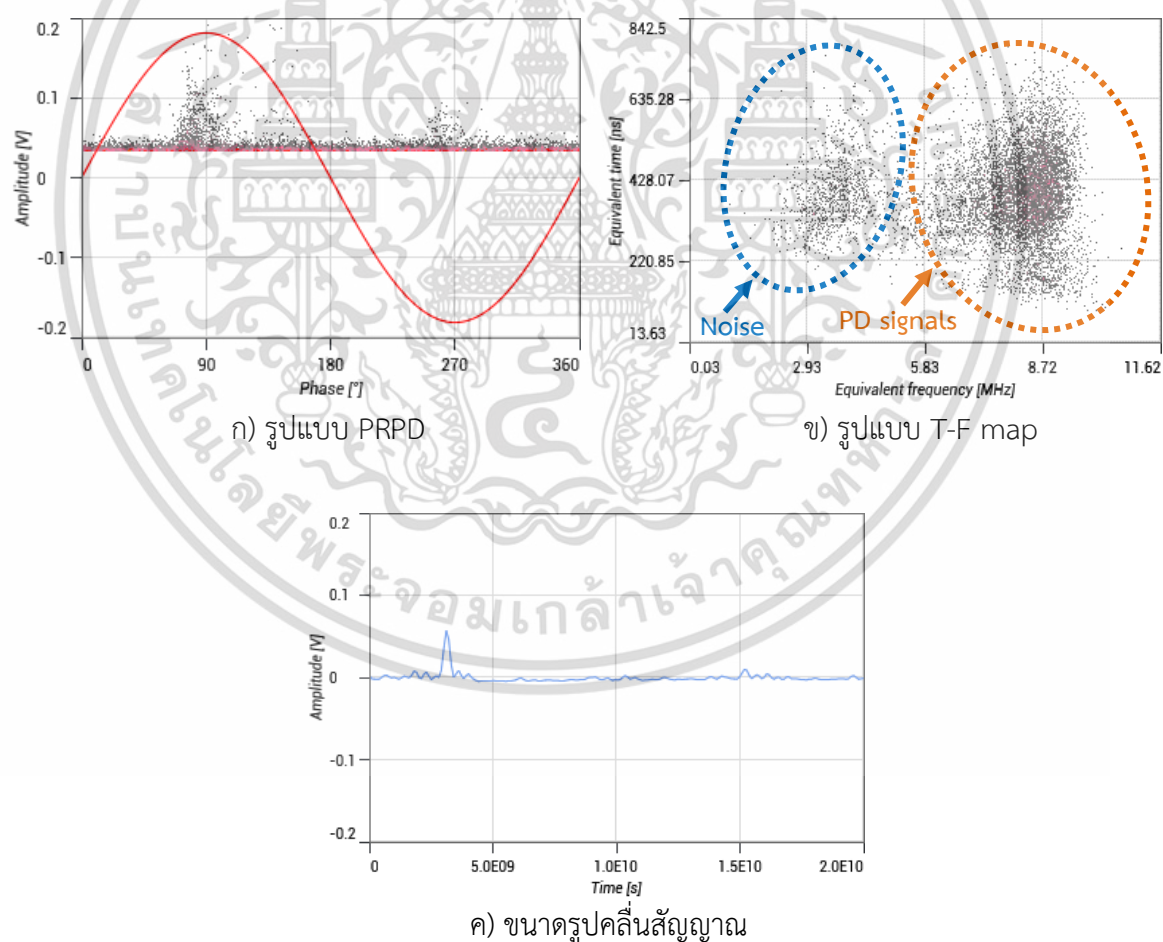
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัด PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง

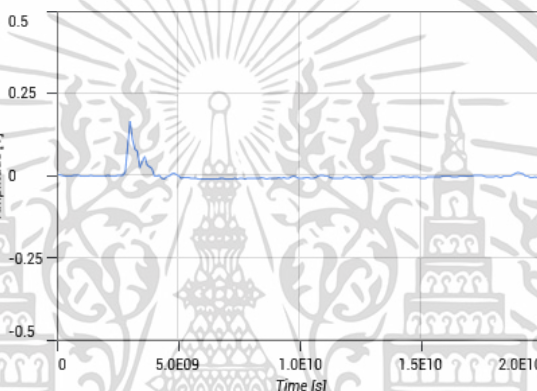
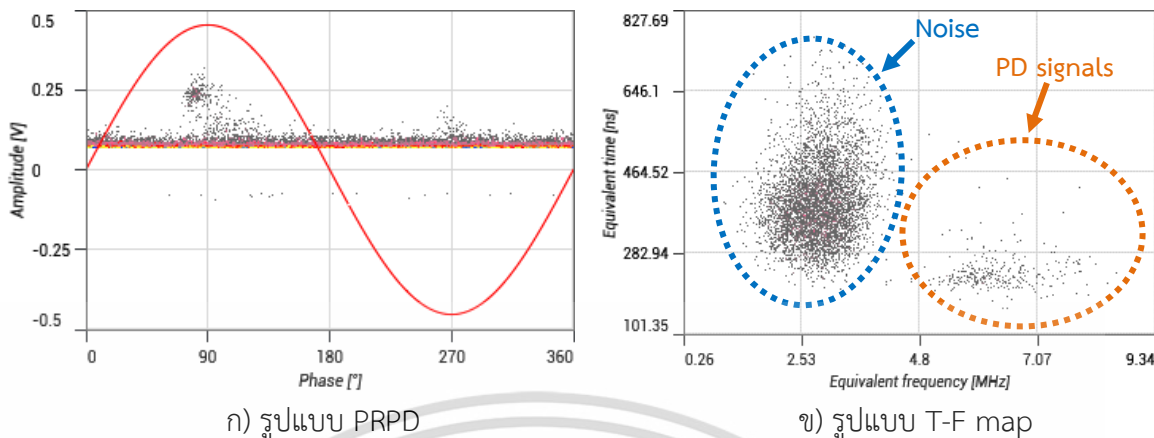
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	242.3 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	186.7 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	140.6 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	1.7233

3) การตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ คือ สายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดสามแบบให้มีความถี่ใช้งานที่ต่างกันได้ รายละเอียดผลการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD ในรูปแบบของ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD), Time-Frequency (T-F) map และขนาดรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15

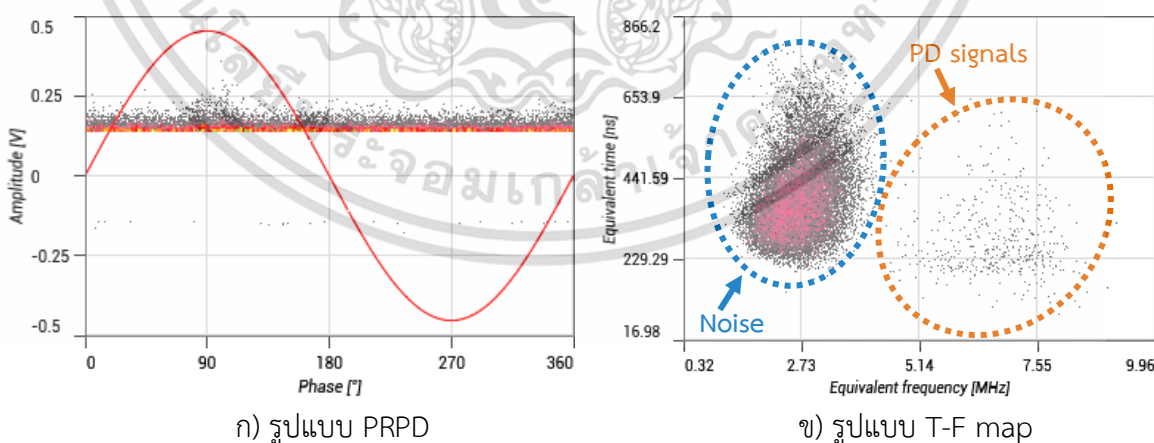


รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

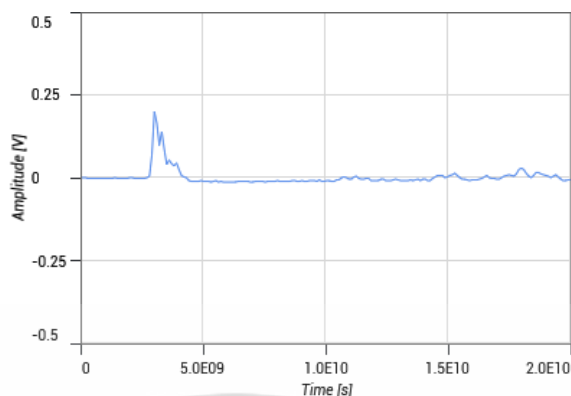


รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ขนาดรูปคลื่นสัญญาณ

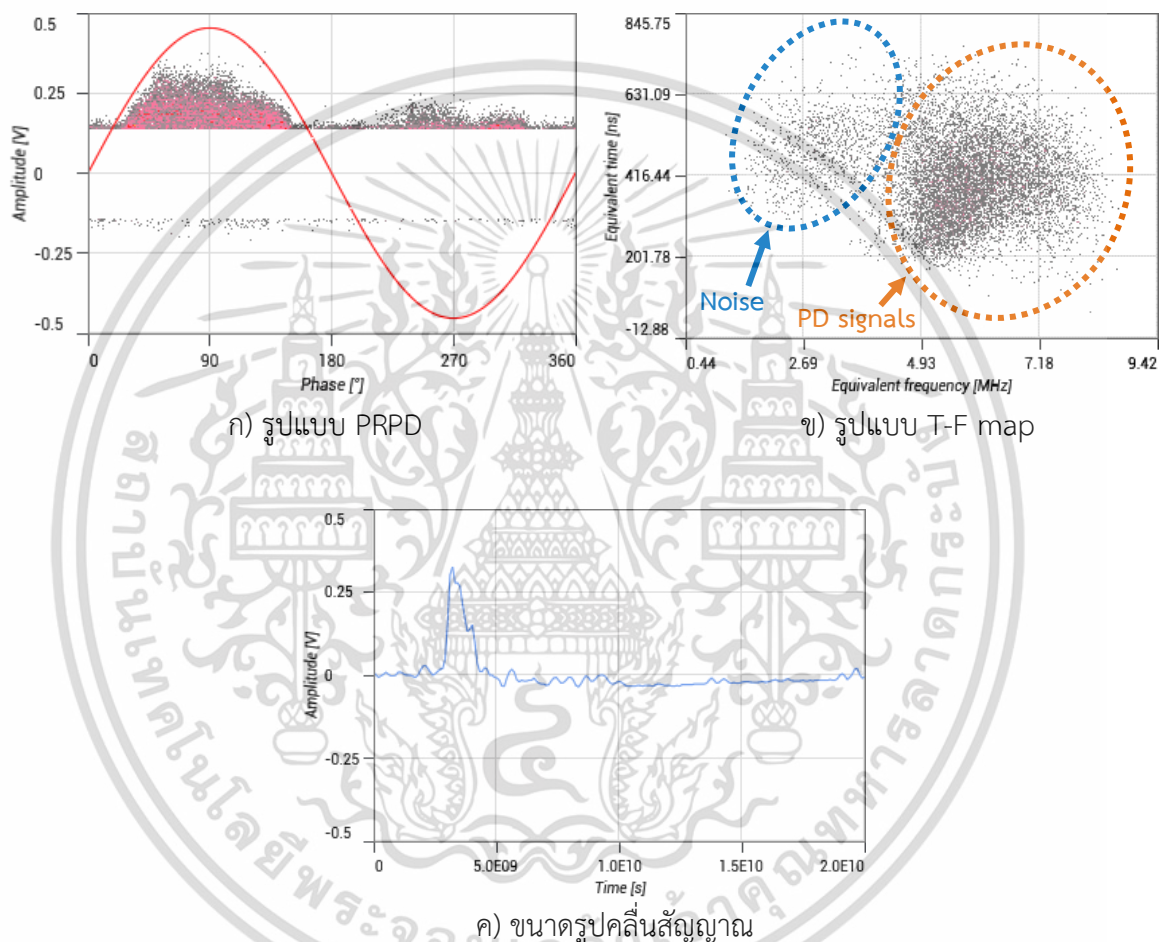
รูปที่ 4.15 (ต่อ)

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ที่ได้ออกแบบมา

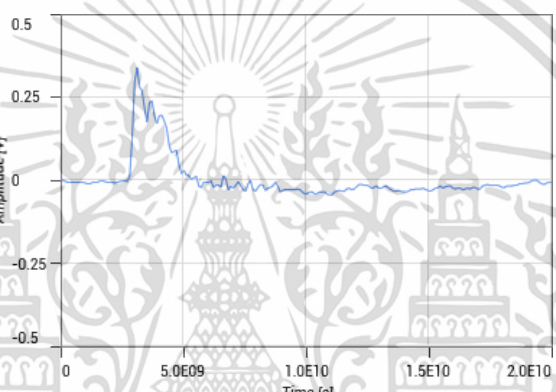
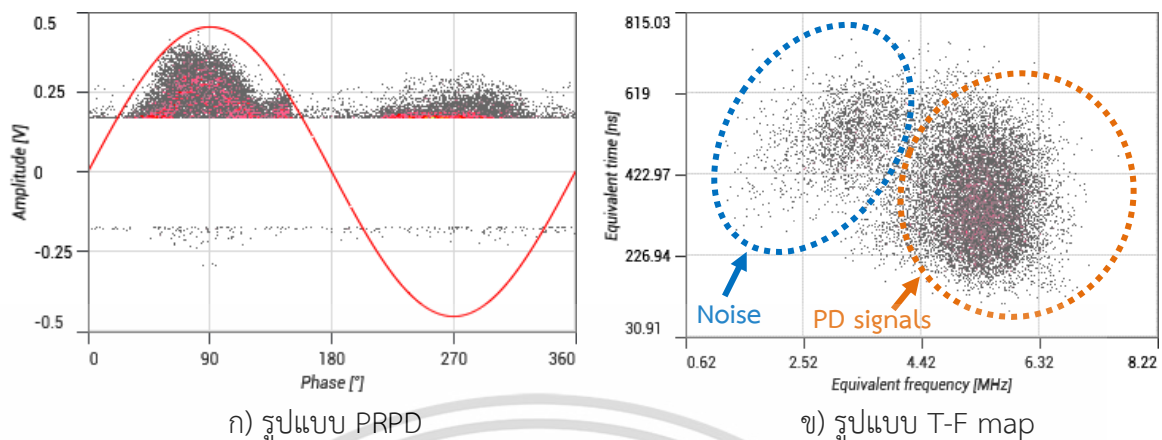
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 1.166 GHz – 1.191 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	192.2 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	62.5 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	46.9 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	4.0981
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.98 GHz – 0.993 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	273.4 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	156.3 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	117.2 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	2.3328
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.783 GHz – 0.792 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	359.4 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	183.6 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	180.7 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	1.9889

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

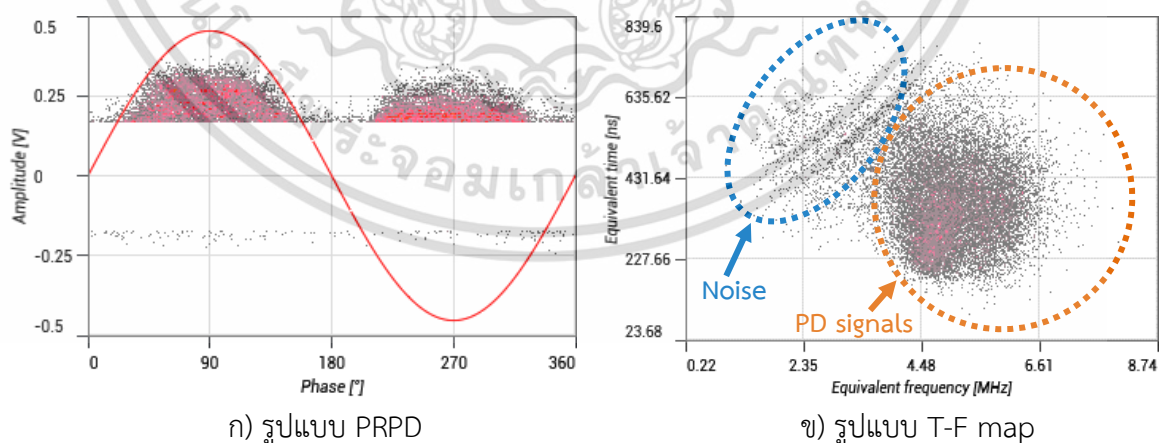
- 4) การตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง คือ สายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral ที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดสามแบบให้มีขนาดแบนด์วิดท์แตกต่างกัน รายละเอียดผลการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD ในรูปแบบของ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD), Time-Frequency (T-F) map และขนาดรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1

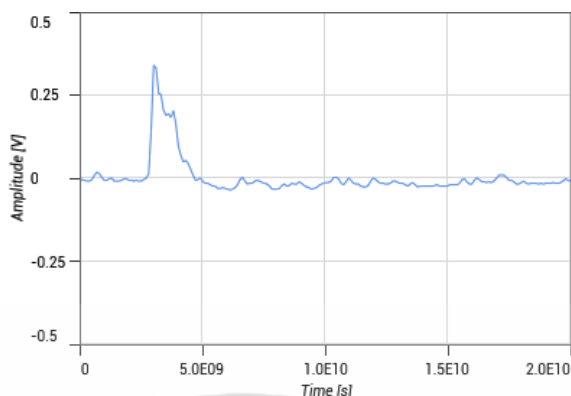


รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ขนาดรูปคลื่นสัญญาณ

รูปที่ 4.18 (ต่อ)

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณ PD หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ที่ได้ออกแบบมา

<b>สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1</b> (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.944 GHz ~ 1.5 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	415.6 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	335.6 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	179.9 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	2.3101
<b>สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2</b> (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.674 GHz ~ 1.5 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	437.9 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	329.0 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	210.9 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	2.0763
<b>สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3</b> (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.491 GHz ~ 1.5 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	415.6 mV
ขนาดสัญญาณ PD, $Q_{\text{max}95\%}$	320.1 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	223.4 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	1.8603

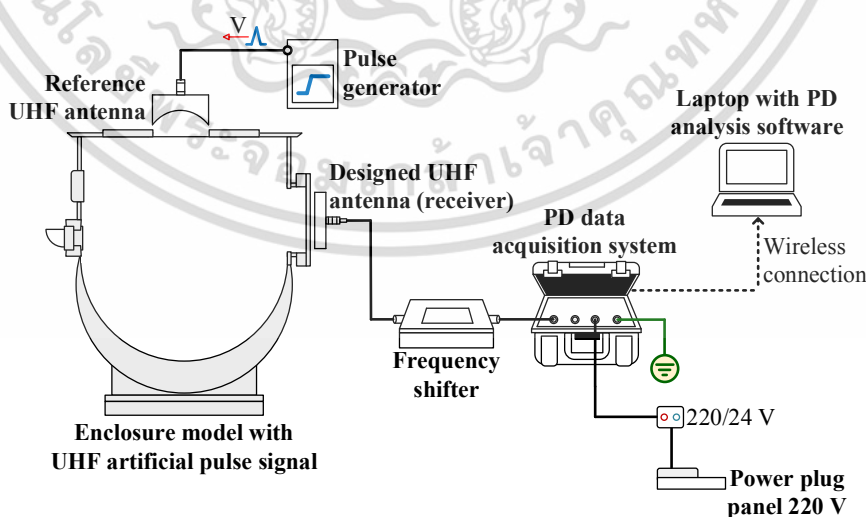
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ใน ระบบ GIS ด้วยการทดสอบแรงดันต่ำในห้องปฏิบัติการ

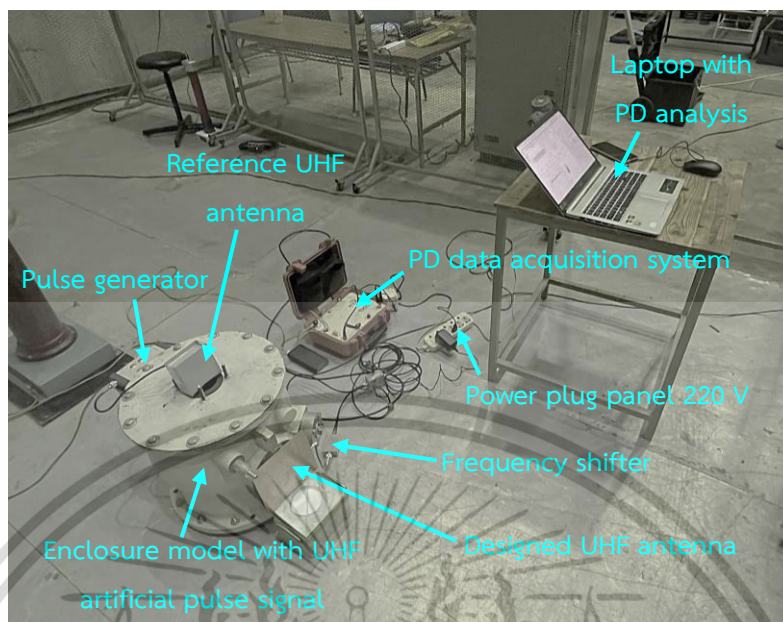
กระบวนการทดสอบจะเป็นการจำลองสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟในแบบจำลอง Enclosure โดยทำการหยุดป้อนแรงดันทดสอบสูงเพื่อใช้ตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟแต่ละตัว ที่ถูกออกแบบและนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การทดสอบนี้สามารถนำขนาดสัญญาณพัลส์เทียมที่ ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณ PD ที่ถูกตรวจวัดจากการทดสอบแรงดันสูงเพื่อตรวจสอบระดับค่า ความคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณ ในการทดสอบจะทำการบันทึกผลการทดสอบจากชุดเครื่อง วิเคราะห์ PD ที่สามารถบันทึกข้อมูลขนาดทางสถิติและรูปคลื่นของสัญญาณพัลส์เทียม พร้อมวิเคราะห์ ผลลัพธ์ในรูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) และรูปแบบ Time-Frequency (T-F) map ออกมาได้

#### 4.3.1 ชุดวงจรการทดสอบแรงดันต่ำ

ในวงจรทดสอบนี้จะทำการหยุดป้อนแรงดันทดสอบสูงให้กับแบบจำลอง Enclosure เพื่อจำลอง สัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ ( Pulse generator) โดยจะทำการ เชื่อมต่อกับสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง (Reference UHF antenna) ที่จัดเตรียมไว้เพื่อใช้ยิงสัญญาณ พัลส์ยูเอชเอฟ จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ถูกยิงมาจะถูกตรวจวัดผ่านสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมา ผ่านสื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจัดเตรียมวงจรตั้งไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.19 วงจรการ ทดสอบจริงดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 ไดอะแกรมชุดวงจรทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดันต่ำ



รูปที่ 4.20 ชุดวงจรการทดสอบจริงสำหรับการทดสอบแรงดันต่ำในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

ในชุดวงจรทดสอบแรงดันต่ำ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

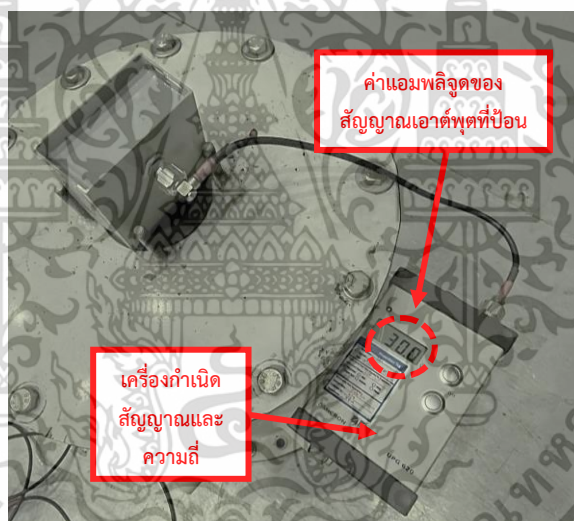
- 1) เครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ (Pulse generator) สเปกตรัมความถี่สูงสุด  $< 2$  GHz, ค่าแอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตปรับได้ตั้งแต่ 0.5 V ถึง 60 V, อัตราการเกิดความถี่ซ้ำ 100 Hz
- 2) สายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง (Reference UHF antenna) ที่จัดเตรียมไว้ คือ สายอากาศยูเอชเอฟฮอร์น (UHF Horn antenna) ที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานช่วง 1.2 GHz ถึง 1.27 GHz
- 3) สายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมา (Designed UHF antenna)
- 4) อุปกรณ์ควบคุม/เลื่อนความถี่ (Frequency shifter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณสำหรับใช้แปลงสัญญาณความถี่สูงจากเซ็นเซอร์ยูเอชเอฟมาเป็นความถี่ในย่านเดียวกับเครื่องวิเคราะห์ข้อมูล PD ที่ประกอบด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่าน 100 MHz, แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) อัตราขยาย 20 dB
- 5) ชุดเครื่องวิเคราะห์ข้อมูล PD (PD data acquisition system) ช่วงแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 16 kHz ถึง 30 MHz
- 6) เพาเวอร์ปลั๊กพANEL (Power plug panel) 220 V พร้อมอะแดปเตอร์แปลงไฟ 220/24 V สำหรับเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟแรงดันต่ำ ซึ่งใช้ในการเข้าจังหวะส่งข้อมูล (Synchronization) ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณพัลส์
- 7) แบบจำลองตัวถังโลหะที่มีการจำลองสร้างสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟ (Enclosure model with UHF artificial pulse signal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) คอมพิวเตอร์แสดงผลที่ติดตั้งโปรแกรมซอฟต์แวร์วิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน (Laptop with PD analysis software)

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงดันต่ำ

- 1) หลังจากเตรียมวงจรการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.19 พร้อมทำการติดตั้งสายอากาศยูเอชเอฟตัวใดตัวหนึ่งที่ต้องการใช้ทดสอบแถบบริเวณ Window ของแบบจำลอง Enclosure ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นจะทำการปรับค่าแอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตที่เครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จนกว่าขนาดสัญญาณพัลส์เทียมนที่ตรวจวัดได้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดสัญญาณ PD ที่ถูกตรวจวัดจากการทดสอบแรงดันสูงโดยให้มีระดับค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20$  เปอร์เซ็นต์ และต้องเปรียบเทียบขนาดสัญญาณจากผลการตรวจวัดของสายอากาศตัวเดียวกัน



รูปที่ 4.21 การติดตั้งและปรับค่าแอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตของชุดอุปกรณ์จำลองสัญญาณพัลส์เทียมน

- 2) ทำการบันทึกผลการทดสอบที่ตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟในวงจรทดสอบ
- 3) หลังจากบันทึกผลการทดสอบเสร็จแล้ว จะทำการปรับเปลี่ยนวงจรทดสอบโดยนำสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมาตัวอื่นมาใช้ทดสอบเก็บผลครั้งต่อไป

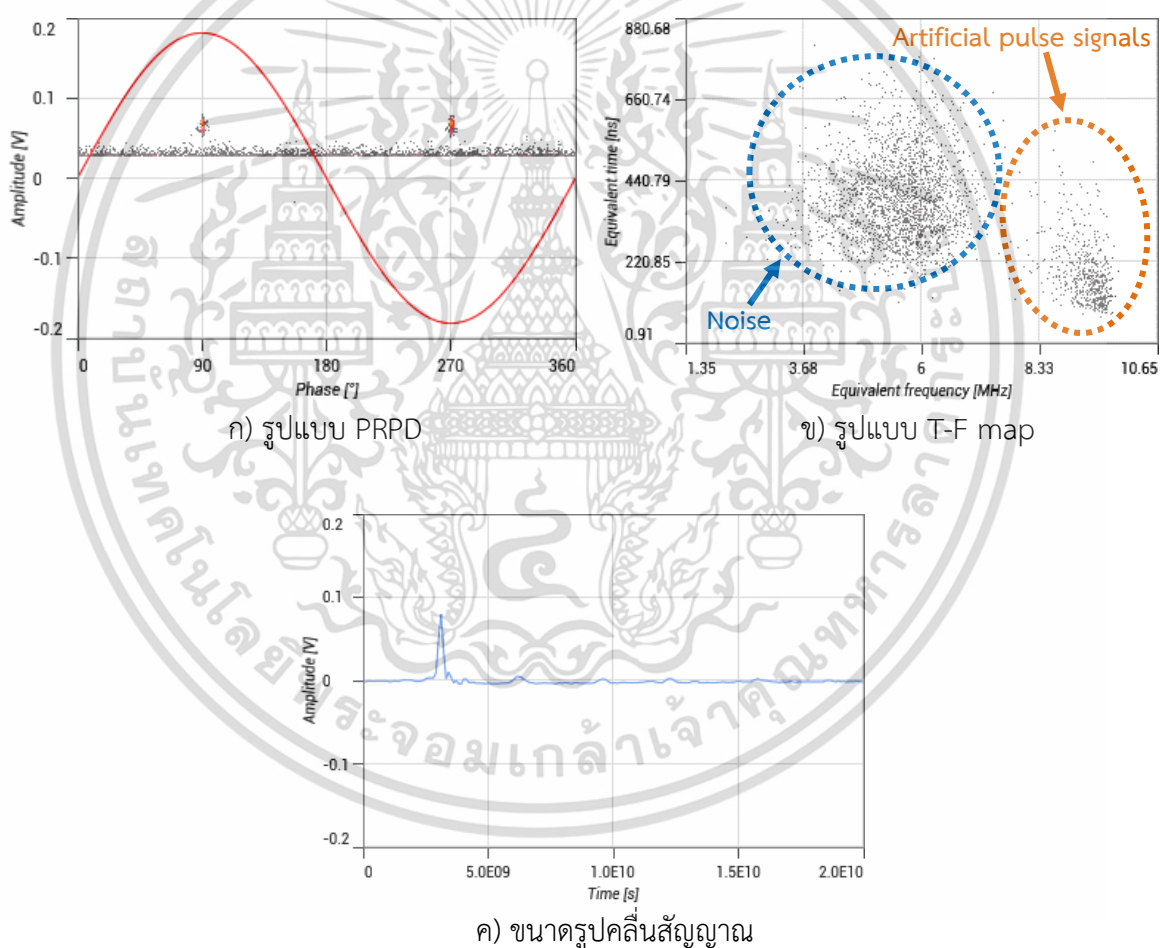
#### 4.3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทดสอบแรงดันต่ำ

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. สภาพบรรยากาศการทดสอบแสดงอุณหภูมิห้องทดสอบ  $30^{\circ}\text{C}$ , ความชื้นสัมพัทธ์ 74 % และความดันบรรยากาศ 758 mmHg

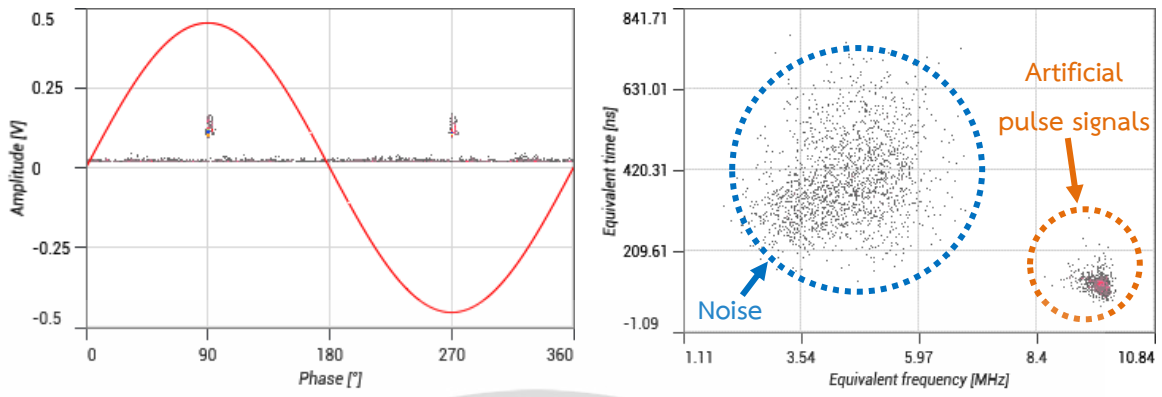
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณพัลส์เทียมน่านยูเอชเอฟในแบบจำลอง Enclosure ที่พิกัดค่าแอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุต 30 V อัตราการเกิดความถี่ซ้ำ 100 Hz และมีช่วงเวลาซ้ำ  $< 200$  ps หลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมา โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ คือ สายอากาศ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ที่ออกแบบมาทั้งหมดสามแบบให้ใช้งานที่ความถี่ต่างกัน รายละเอียดผลการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณในรูปแบบของ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD), Time-Frequency (T-F) map และขนาดรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24

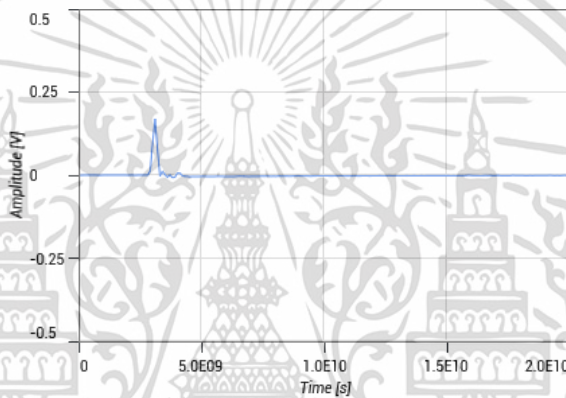


รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมนหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1



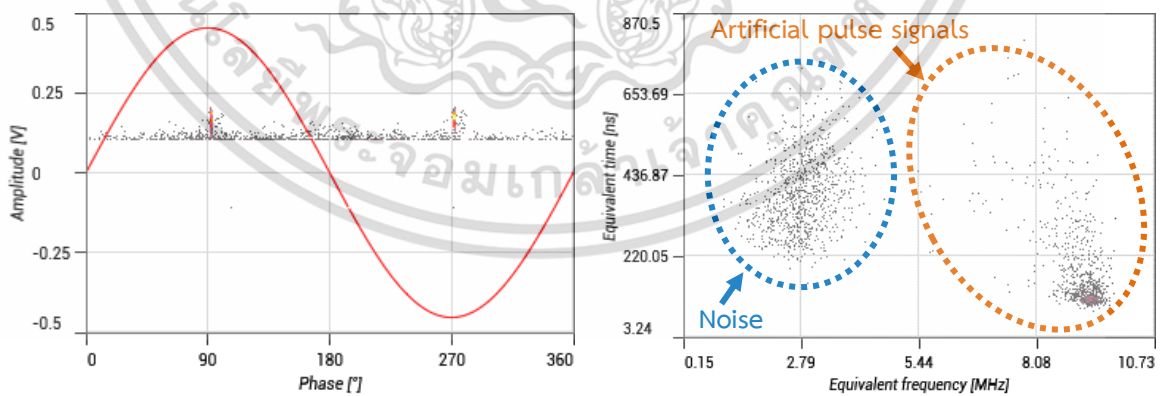
ก) รูปแบบ PRPD

ข) รูปแบบ T-F map



ค) ขนาดรูปคลื่นสัญญาณ

รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2

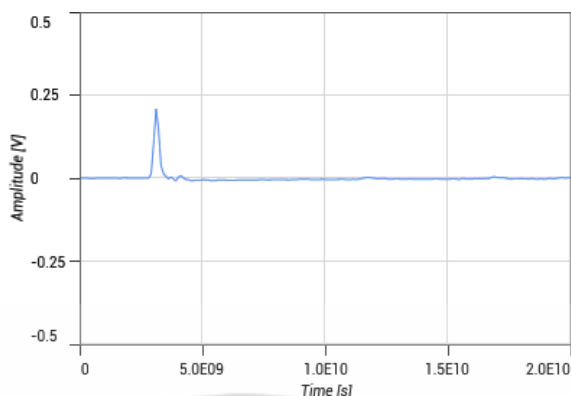


ก) รูปแบบ PRPD

ข) รูปแบบ T-F map

รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ขนาดรูปคลื่นสัญญาณ

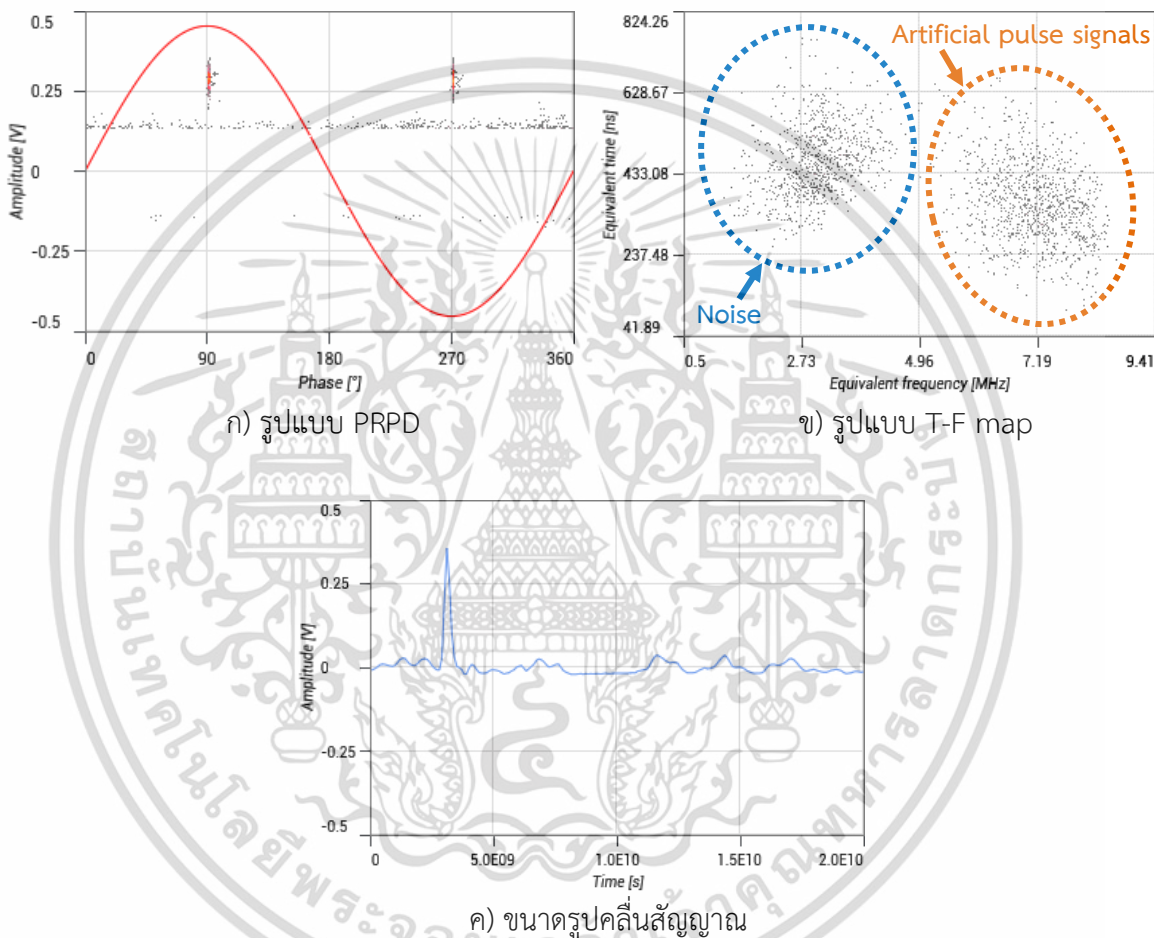
รูปที่ 4.24 (ต่อ)

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch ที่ได้ออกแบบมา

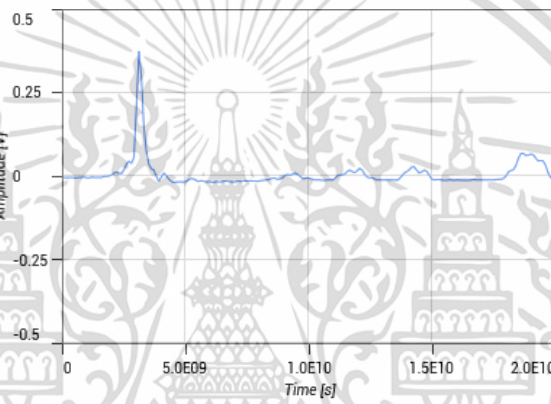
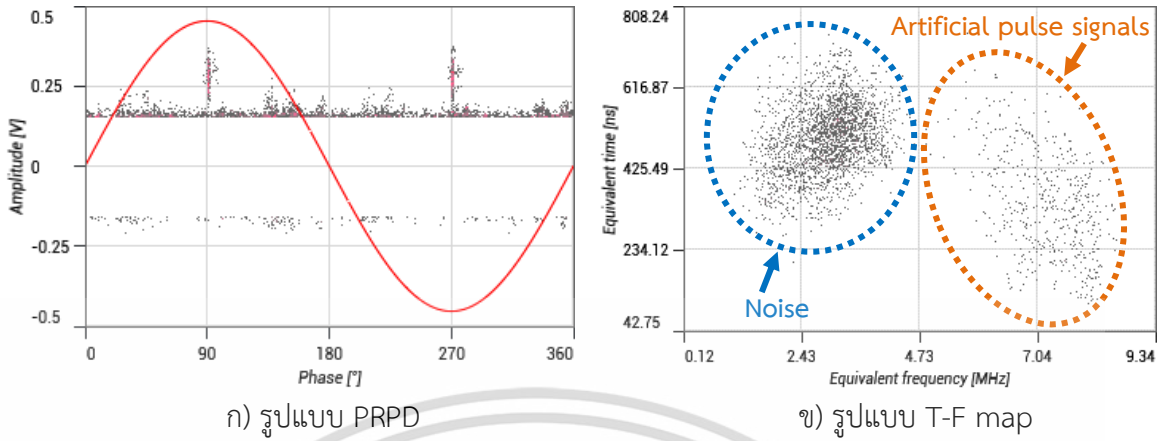
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 1 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 1.166 GHz – 1.191 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	79.9 mV
ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม, $Q_{\text{max}95\%}$	70.2 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	39.1 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	2.0435
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 2 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.98 GHz – 0.993 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	168.0 mV
ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม, $Q_{\text{max}95\%}$	144.5 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	31.3 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	5.3674
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.783 GHz – 0.792 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	207.0 mV
ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม, $Q_{\text{max}95\%}$	187.5 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	136.7 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	1.5143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

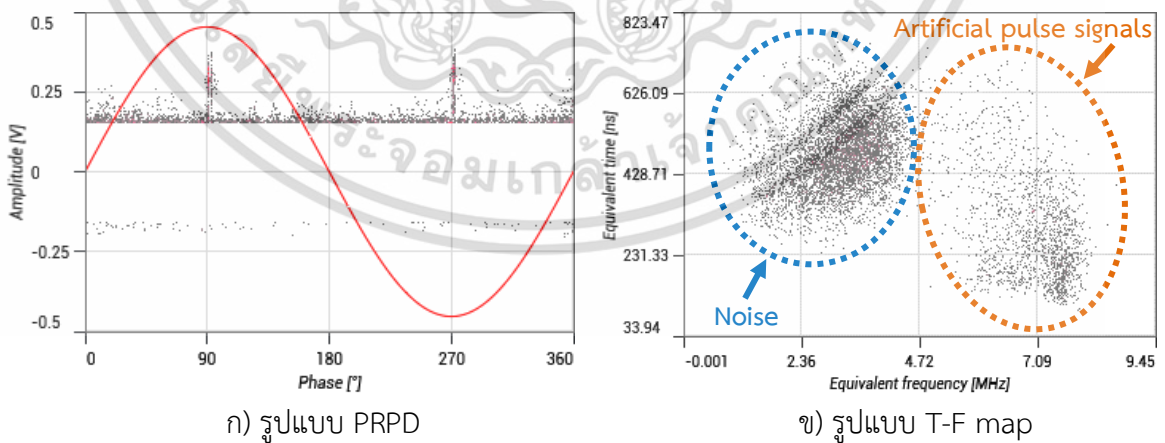
2) การตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง คือ สายอากาศ Two-Arm Archimedean Spiral ที่ออกแบบมาทั้งหมดสามแบบให้ใช้งานที่ความถี่ต่างกัน รายละเอียดผลการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 พร้อมแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณในรูปแบบของ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD), Time-Frequency (T-F) map และขนาดรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1

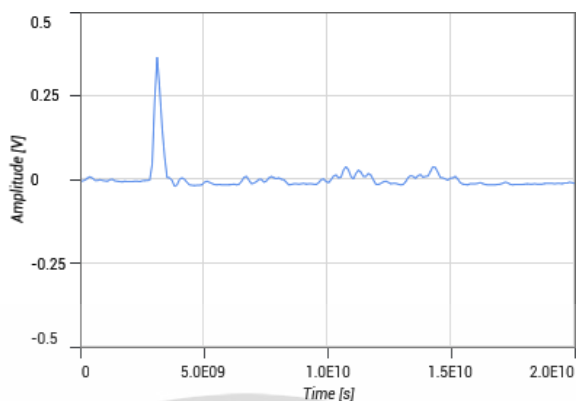


รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2



รูปที่ 4.27 การวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ขนาดรูปคลื่นสัญญาณ

รูปที่ 4.27 (ต่อ)

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดผลการทดสอบการตรวจวัดสัญญาณพัลส์เทียมหลังถูกตรวจวัดด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral ที่ได้ออกแบบมา

สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 1 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.944 GHz ~ 1.5 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	355.5 mV
ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม, $Q_{\text{max}95\%}$	332.0 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	175.8 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	2.0222
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 2 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.674 GHz ~ 1.5 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	371.1 mV
ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม, $Q_{\text{max}95\%}$	300.8 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	195.3 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	1.9002
สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้าง Two-Arm Archimedean Spiral แบบที่ 3 (แบนด์วิดท์ 2:1 VSWR = 0.491 GHz ~ 1.5 GHz)	
แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้, $Q_{\text{Amplitude}}$	375.0 mV
ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม, $Q_{\text{max}95\%}$	293.0 mV
ระดับสัญญาณรบกวน (Background noise level)	207.0 mV
อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR)	1.8116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 การตรวจสอบและยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

### 4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันสูง

จากผลการทดสอบแรงดันสูงที่ทำการตรวจวัด PD ประเภทดิสชาร์จตามผิวในแบบจำลอง กรณีที่สัญญาณ PD ถูกตรวจวัดด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งจะทำการตรวจวัดกระแสพัลส์ PD ที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัด พบว่ากลุ่มพัลส์ PD ที่แสดงในช่วงแรงดันครึ่งบวกและช่วงแรงดันครึ่งลบของรูปแบบ PRPD จะมีการกระจายข้อมูลในลักษณะที่ไม่สมมาตรกัน ซึ่งตรงตามทฤษฎีและฐานข้อมูลอ้างอิงในตารางที่ 2.2 โดยกลุ่มพัลส์ในช่วงแรงดันครึ่งบวกจะมีค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่สูงกว่ากลุ่มพัลส์ในช่วงแรงดันครึ่งลบดังแสดงในรูปที่ 4.11 ก) นอกจากนี้ยังตรวจไม่พบเจอร์ระดับสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นผลจาก Shielding effect ของแบบจำลอง Enclosure ทำให้สามารถวิเคราะห์ Equivalent time และ Equivalent frequency ของสัญญาณ PD ที่แน่นอนได้

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบที่ได้ออกแบบมาดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 พบว่าสายอากาศในแต่ละแบบนั้นทำการตรวจวัดขนาดสัญญาณ PD ได้แตกต่างกันออกไปโดยมีค่าต่ำกว่า 200 mV และพบว่าผลการตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ PD นั้นจะแสดงข้อมูลออกมาได้น้อยหากเทียบกับผลลัพธ์ของวิธีการวัดแบบดั้งเดิม เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีขนาดแบนด์วิดท์น้อยกว่า 30 MHz แต่สามารถแสดงรูปแบบของผลลัพธ์ออกมาได้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ของสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิงที่มีขนาดแบนด์วิดท์ 70 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ก) นอกจากนี้ผลลัพธ์จากกรณีส่วนใหญ่ยังแสดงให้เห็นว่าตัวสายอากาศแถบความถี่แคบที่ออกแบบมานั้นสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง ทำให้ระดับสัญญาณรบกวนไม่สูงมาก จึงสามารถสังเกตรูปแบบพัลส์ PD ได้มากขึ้นบนรูปแบบ PRPD และช่วยให้แยกแยะประเภทของ PD ได้

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากกรณีของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch แบบที่ 3 พบว่าผลลัพธ์ในกรณีนี้มีการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ก) ทำให้ไม่สามารถสังเกตพัลส์ PD ได้อย่างชัดเจนบนรูปแบบ PRPD เช่นเดียวกับผลลัพธ์ของสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง จากผลข้างเคียงของสัญญาณฮาร์โมนิกลำดับสูงกว่า (Higher order harmonic) ที่ความถี่ 1.255 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ซึ่งเป็นจุดความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงกว่าความถี่ออกแบบ สัญญาณฮาร์โมนิกลำดับสูงนี้สามารถก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ [27]

ในทางกลับกันหากเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้างที่มีขนาดแบนด์วิดท์มากกว่า 500 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 พบว่าสายอากาศในแต่ละแบบนั้นทำการตรวจวัดขนาดสัญญาณ PD ได้ใกล้เคียงกันโดยมีค่าสูงกว่า 300 mV และพบว่าผลการตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ PD นั้นสามารถแสดงข้อมูลออกมาได้มากกว่าสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิงและ

สายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ รวมทั้งสามารถแสดงผลรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ออกมาได้ชัดเจนกว่า ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลลัพธ์ของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมทุกกรณี แต่ไม่สามารถแยกข้อสัญญาณพัลส์ PD ได้ จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์พบว่าตัวสายอากาศสามารถตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ PD ได้มากขึ้นอีก หากออกแบบให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น แต่จะทำให้มีการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ระดับสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นและอาจทำให้ความไวในการวัดของสายอากาศผิดเพี้ยนได้ หากเลือกออกแบบใช้งานได้ไม่เหมาะสม

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันต่ำ

จากผลการทดสอบแรงดันต่ำที่ทำการตรวจวัดสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟในแบบจำลอง พบว่าสายอากาศยูเอชเอฟที่ได้ออกแบบมาสามารถมีผลการตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์เทียมได้ทุกกรณีดังแสดงในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.27 เมื่อวิเคราะห์ขนาดสัญญาณที่ถูกตรวจวัดในแต่ละกรณี พบว่าขนาดสัญญาณพัลส์เทียมนั้นมีความใกล้เคียงกับขนาดสัญญาณ PD ที่ถูกตรวจวัดจากการทดสอบแรงดันสูง โดยมีระดับค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20\%$  ตรงตามคำแนะนำที่ระบุไว้ในเอกสารรายงานที่เผยแพร่โดย CIGRE Working Group D1.25 [4] ดังผลลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบขนาดสัญญาณพัลส์ที่ถูกตรวจวัดจากระบบการตรวจสอบความไวในการวัดของสายอากาศยูเอชเอฟ

ผลการตรวจวัดขนาดสัญญาณพัลส์ของสายอากาศแถบความถี่แคบที่ได้ออกแบบมา				
ชื่อสายอากาศ	แบบที่	ขนาดสัญญาณพัลส์ PD (จากการทดสอบ HV)	ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม (จากการทดสอบ LV)	ความคลาด เคลื่อน
Inset-Fed	1	62.5 mV	70.2 mV	+12.32 %
Rectangular	2	156.3 mV	144.5 mV	-7.5496 %
Microstrip Patch	3	183.6 mV	187.5 mV	+2.1242 %
ผลการตรวจวัดขนาดสัญญาณพัลส์ของสายอากาศแถบความถี่กว้างที่ได้ออกแบบมา				
ชื่อสายอากาศ	แบบที่	ขนาดสัญญาณพัลส์ PD (จากการทดสอบ HV)	ขนาดสัญญาณพัลส์เทียม (จากการทดสอบ LV)	ความคลาด เคลื่อน
Two-Arm	1	335.6 mV	332.0 mV	-1.0727 %
Archimedean	2	329.0 mV	300.8 mV	-8.5714 %
Spiral	3	320.1 mV	293.0 mV	-8.4661 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุป

จากการออกแบบเซนเซอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitive sensors) สำหรับย่านความถี่สูงยิ่งหรือยูเอชเอฟ (Ultra-high frequency; UHF) โดยทำการเลือกออกแบบสร้างสายอากาศในหมวดของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board; PCB) ให้มีการตอบสนองต่อสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) ที่ความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 3 GHz ตามมาตรฐาน IEC 62478:2016 โดยถูกออกแบบขึ้นมาทั้งหมดสองชนิดสำหรับประยุกต์ใช้งานระบบวัดแถบความถี่แคบและแถบความถี่กว้างให้ครบตามเทคนิคการวัดยูเอชเอฟที่มีการระบุไว้ เพื่อนำเสนอเป็นเซนเซอร์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดสัญญาณ PD ตามสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซ (Gas-Insulated Substation; GIS) เมื่อนำสายอากาศที่ประกอบสร้างเสร็จแล้วไปทำการประเมินหาค่าคุณสมบัติ ประสิทธิภาพการทำงานพบว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบขึ้นมาทั้งหมดนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมใกล้เคียงกับความถี่ใช้งานที่ออกแบบไว้ภายใต้การคำนวณและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB

จากการนำสายอากาศที่ได้ออกแบบมาทั้งหมดไปตรวจวัดสัญญาณพัลส์ PD และสัญญาณพัลส์เทียมย่านยูเอชเอฟที่จำลองขึ้นมาในวงจรทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. เพื่อตรวจสอบความไวในการวัด (Sensitivity check) ของสายอากาศ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ พบว่าสายอากาศทั้งหมดมีการตอบสนองต่อสัญญาณ สามารถนำไปใช้ตรวจจับสัญญาณ PD ได้จริง

ในการทดสอบตรวจวัดสัญญาณ PD ได้มีการเปรียบเทียบรูปแบบผลลัพธ์กับวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Conventional method) ตามมาตรฐาน IEC 60270:2000 และสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิงที่มีแบนด์วิดท์ขนาด 70 MHz จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่กว้างที่ได้ออกแบบมา ซึ่งมีแบนด์วิดท์หลายร้อย MHz สามารถตรวจวัดสัญญาณออกมาได้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ของวิธีการวัดแบบดั้งเดิมและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถแสดงผลรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ออกมาได้ชัดเจนกว่าผลลัพธ์ของสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบ

ในทางกลับกัน ผลการตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบจะตรวจจับสัญญาณพัลส์ออกมาได้น้อยหากเทียบกับผลลัพธ์ของวิธีการวัดแบบดั้งเดิม เหตุเพราะตัวสายอากาศที่ได้ออกแบบมานั้นมีแบนด์วิดท์น้อยกว่า 30 MHz เพื่อใช้สำหรับลดทอนระดับสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามการตรวจวัดสัญญาณ PD ด้วยสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบนั้นสามารถกรองสัญญาณ PD ช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งแบบเฉพาะเจาะจงได้ ซึ่งแสดงข้อมูลของขนาดสัญญาณที่ตรวจวัดออกมาในลักษณะ

ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ผลลัพธ์จากกรณีส่วนใหญ่ยังแสดงให้เห็นว่าตัวสายอากาศที่ออกแบบมานั้นสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าสายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง ทำให้ระดับสัญญาณรบกวนไม่สูงมาก จึงสามารถสังเกตรูปแบบพัลส์ PD ได้มากขึ้นและช่วยให้แยกแยะประเภทของ PD ได้ หากเลือกออกแบบใช้งานในความถี่ที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงผลข้างเคียงจากสัญญาณฮาร์โมนิกลำดับสูงกว่า (Higher order harmonic) ที่สามารถก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้น

ทั้งสายอากาศยูเอชเอฟแถบความถี่แคบและกว้างสามารถแสดงคุณสมบัติการตรวจวัดที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้งานนั้นควรขึ้นอยู่กับขอบเขตการวินิจฉัย PD ความเหมาะสมของวิธีการ และประสบการณ์ของผู้ทำการตรวจวัด ในทางปฏิบัติสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกันเพื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ร่วมกันและเป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยได้ ทำให้ความน่าเชื่อถือของการตรวจวัดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การตรวจวัด PD ด้วยเทคนิคการวัดยูเอชเอฟ ไม่สามารถนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบให้สมบูรณ์ได้เหมือนกับของ Conventional method ที่ทำการตรวจวัดกระแสพัลส์ PD ผ่านขั้วสายของอุปกรณ์วัด เนื่องจากการใช้สายอากาศตรวจวัดสัญญาณ PD จะทำการตรวจจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไปในอากาศ ซึ่งมีคุณลักษณะการแพร่กระจายของสัญญาณที่ซับซ้อน อีกทั้งความไวในการตรวจวัดสัญญาณยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ประเภทของ PD ที่เกิดขึ้น และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณ PD กับสายอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เทคนิคการวัดยูเอชเอฟ นั้นได้รับอิทธิพลจากสัญญาณรบกวนต่ำมาก เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับ PD แบบออนไลน์ (On-line PD monitoring) ที่ควบคุมสัญญาณรบกวนต่างๆจากสภาพแวดล้อมได้ยาก แต่สามารถทำการตรวจสอบการเกิด PD ได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงยังทำงานอยู่ในสภาวะการใช้งานจริง ช่วยในเรื่องของการประหยัดเวลาทดสอบและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการพัฒนาในอนาคต

ในทางปฏิบัติ รูปแบบการเกิด PD สามารถมีได้ถึงสามประเภทขึ้นไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์มากขึ้นถ้ามีการศึกษา ทดสอบเก็บข้อมูล PD รูปแบบอื่นๆเพิ่มเติม เนื่องจาก PD ในแต่ละประเภทนั้นเกิดขึ้นที่ความถี่แตกต่างกัน

ลักษณะของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จำเป็นต้องมีการใช้ความรู้ในด้านภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมในการออกแบบสายอากาศ จึงควรมีการศึกษา พัฒนาสายอากาศให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น พร้อมกับการจำลองด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์การออกแบบที่มีความเฉพาะทางมากขึ้น

สายอากาศยูเอชเอฟที่ถูกออกแบบขึ้นในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการทดสอบ Sensitivity check ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พร้อมยืนยันจากผลลัพธ์ได้ว่าสายอากาศที่ออกแบบมีแนวโน้มสูงในการนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับการทดสอบนอกสถานที่ (On-site test) จริงได้ในอนาคตอันใกล้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC-60270. “High-voltage test techniques–Partial discharge measurements.” IEC standard. 2001
- [2] IEC/TS 62478. “High-voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods.” IEC standard. 2016
- [3] CIGRE Working Group D1.33. “Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements.” CIGRE Technical Brochure 444. 2010
- [4] CIGRE Working Group D1.25. “UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification.” CIGRE Technical Brochure 654. 2016
- [5] CIGRE Working Group D1.37. “Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods.” CIGRE Technical Brochure 662. 2016
- [6] KÜchler A. **High Voltage Engineering**. 1st ED. Heidelberg : Springer Vieweg Berlin. 2017
- [7] Hauschild W., Lemke E. **High-Voltage Test and Measuring Techniques**. 2nd ED. Aargau : Springer Nature Switzerland. 2019
- [8] สำรวัย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547
- [9] Hoek S., Al-Gunaid M., Badicu L. V. “Tuned Medium Band and Wideband UHF PD Measurement System for GIS.” **VDE High Voltage Technology; 4. ETG-Symposium**, 2022. pp. 1-5
- [10] Neuhold S., Heizmann T., Bräunlich R., Köchli D., Riechert U., Dehne C. “Experience with UHF PD detection in GIS using external capacitive sensors in windows and disk-insulators.” **15th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)**, 2007. pp. 1-4
- [11] Agoris P. D. “**Sensitivity Verification of Radio Frequency Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment.**” Ph.D. Thesis, Delft University of Technology. 2009
- [12] Hampton B. F., Meats R. J. “Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations.” **IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)**, vol. 135, Mar. 1988. pp. 137-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Piccin R. “**Partial Discharge Analysis in HVDC Gas Insulated Substations.**” Ph.D. dissertation, Delft University of Technology. 2013
- [14] Hiçdurmaz B., Gümüş Ö. F. “Design and analysis of 28 GHz microstrip patch antenna for different type FR4 claddings.” **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, vol. 24, no.2, Aug. 2019. pp. 265-288
- [15] Rahman M. Z., Mynuddin M., Debnath K. C. “The significance of notch width on the performance parameters of inset feed rectangular microstrip patch antenna.” **International Journal of Electromagnetics and Applications**, vol. 10, no.1, Oct. 2020. pp. 7-18
- [16] Gupta A., Dargar S. K., Raghavaiah B., Rao A. N. “Comparison between Rectangular Microstrip Patch Antenna with and without Defected Ground Structure at 1.85 GHz.” **International Conference for Advancement in Technology**, Jan. 2022. pp. 1-4
- [17] Udaiyakumar R., Maheswar R., Janani T., Vigneshram R., Amiri I. S., Yupapin P. “Performance enhancement of shorted polygonal archimedean spiral antenna using hybrid reflector.” **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, vol. 107, Jul. 2019. pp. 1-8
- [18] Kim H. B., Hwang K. C., Kim H. S., “Cavity-backed two-arm spiral antenna with a ring-shaped absorber for partial discharge diagnosis.” **Journal of Electrical Engineering & Technology**, vol. 8, no. 4, July 2013. pp. 856-862
- [19] Chen T. K., Huff G. H. “Modal resistance of spiral antenna.” **Journal of Electromagnetic Analysis and Applications**, vol. 5, May 2013. pp. 223-228
- [20] Singh K. P., Ranjan R., Deshpande R. “Design of a wideband Balun for Archimedean spiral antenna in energy harvesting.” **2015 International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)**, Oct. 2015. pp. 45-49
- [21] Geng J., Liu X., Liu C., Guo H. “A unidirectional ultra-wideband circularly polarized spiral antenna array.” **Microwave and Optical Technology Letters**, vol. 62, no. 7, Mar. 2020. pp. 2569-2575
- [22] CIGRE TF 15/33.03.05. “PD Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method.” **Electra**, no. 183, Apr. 1999. pp. 75-78

- [23] Ashliegh D. “A Guide to Understanding Partial Discharge Sensor Applications.” [Online]. Available : <https://www.linkedin.com/pulse/guide-understanding-partial-discharge-sensor-dustin-ashliegh>. 2015
- [24] Cruz J.D.N., Serres A.J.R., de Oliveira A.C., Xavier G.V.R., de Albuquerque C.C.R., da Costa E.G., Freire, R.C.S. “Bio-inspired printed monopole antenna applied to partial discharge detection.” *Sensors*, vol. 19, no. 3, 2019, p. 628
- [25] Chen L., Chen X., Shao X., Xu H. “Present Situation and Development of Internal Sensors for Ultra-high Frequency Detection in Gas Insulated Switchgear.” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1659, no. 1, 2020, p. 012013
- [26] Kayser A.S., Mohamadarriff O., Azil I.H., Tarik A.L., Mohammad T.I., Mohd F.A. “Ultra-high frequency printable antennas for partial discharge diagnostics in high voltage equipment.” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 64, 2023, pp. 709-729
- [27] Xie W. L., Wei Y., Wang, J., Hong, T., Mao L. F., Liu F., Ning H. S. “A rectangular patch antenna with wideband high order harmonic suppression using compact defected microstrip structure.” *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Aug. 2016 , pp. 2009-2013
- [28] CIGRE Task Force 15.11/33.03.02. “KNOWLEDGE RULES FOR PARTIAL DISCHARGE DIAGNOSIS IN SERVICE.” CIGRE Technical Brochure 226. 2003



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณลักษณะเฉพาะของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงดันสูง

อุปกรณ์	คุณลักษณะเฉพาะ
หม้อแปลงทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูง AC	Rated power: 40 kVA
	Rated voltage: 460 V (LV), 75 kV (HV)
	Rated frequency: 50/60 Hz
ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว	Rated capacitance: 1 nF
	Maximum voltage: 100 kV
อุปกรณ์ปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐาน OMICRON CAL 542 Version D	Ranges of charge pulses: 100 pC – 10000 pC
	Pulse repetition frequency: 300 Hz
	Pulse rise time: < 4 ns
	Compliance: IEC standard 60270
อุปกรณ์รับสัญญาณหรืออุปกรณ์คาบเกี่ยว OMICRON CPL 542	Maximum current: 0.5 A – 2 A
	Frequency range (PD output): 20 kHz – 6 MHz
	Low-arm capacitance: 30 $\mu$ F – 120 $\mu$ F
อุปกรณ์ควบคุม/เลื่อนความถี่ TECHIMP 00513120-21B070	High-pass filter: 100 MHz
	Amplifier gain: 20 dB
ชุดเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลดิสชาร์จบางส่วน TECHIMP Microaquila portable	Frequency range: 16 kHz – 30 MHz
	Resolution: 10 bits
	Dynamic range: 75 dB
	Maximum sampling frequency: 100 MS/s
	Compliance: IEC standard 60270
	Connectivity: Fiber optics, Wi-Fi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณลักษณะเฉพาะของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงดันต่ำ

อุปกรณ์	คุณลักษณะเฉพาะ
เครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ OMICRON UPG 620 Pulse Generator	The peak voltage of the output: 0.5 V – 60 V
	Frequency spectrum: $\leq 2$ GHz
	Rise time: $< 200$ ps
	Decay time: $> 100$ ns
	Frequency repetition rate: 100 Hz
สายอากาศยูเอชเอฟอ้างอิง UHF PD sensors/Horn antenna	Frequency range: 1.2 GHz – 1.27 GHz
	VSWR range: 1.3681:1 – 2:1
	Impedance: 50 ohms
อุปกรณ์ควบคุม/เลื่อนความถี่ TECHIMP 00513120-21B070	High-pass filter: 100 MHz
	Amplifier gain: 20 dB
ชุดเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลดิจิทัลบางส่วน TECHIMP Microaquila portable	Frequency range: 16 kHz – 30 MHz
	Resolution: 10 bits
	Dynamic range: 75 dB
	Maximum sampling frequency: 100 MS/s
	Compliance: IEC standard 60270
	Connectivity: Fiber optics, Wi-Fi

### คุณลักษณะเฉพาะของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ประเมินคุณสมบัติการทำงานจริงของสายอากาศยูเอชเอฟ

อุปกรณ์	คุณลักษณะเฉพาะ	
เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่น ความถี่ SIGLENT SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer	Vector Network Analysis (VNA)	Measurement: $S_{11}$ , $S_{21}$
	Tracking Generator (TG)	Frequency range: 10 MHz – 1.5 GHz
		DC: $\pm 50$ V <sub>DC</sub>
	Mean power: 30 dBm	
สายส่งสัญญาณ NP-SMAP-LA w/cable TOYO	Impedance: 50 ohms N-male to SMA plug angle with cable	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อปฏิบัติในการทดลองทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

- 1) จะต้องลงชื่อบันทึกการใช้เครื่องมือทุกครั้งในการลงมือปฏิบัติเพื่อรับผิดชอบ หากเครื่องมือเกิดความเสียหาย
- 2) ผู้ทดลองต้องแต่งกายเรียบร้อย รัดกุม และสวมรองเท้าหุ้มส้นเท่านั้น
- 3) การต่อวงจรและทำการทดลองจะต้องถูกต้องตามหลักวิศวกรรม
- 4) การทดลองจะต้องมีผู้ร่วมปฏิบัติงานอย่างน้อย 2 คนทุกครั้ง
- 5) สถานที่และบริเวณทดลอง จะต้องมีการจัดระยะป้องกันและระยะปลอดภัยให้ถูกต้องตามมาตรฐาน ดังต่อไปนี้
  - (ในกรณีที่แรงดันทดสอบน้อยกว่า 1 MV)
    - ระยะปลอดภัยของการทดสอบแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับ 50 cm ต่อ 100 kV
    - ระยะปลอดภัยของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ 25 cm ต่อ 100 kV
    - ระยะปลอดภัยต่ำสุดในการทดลอง ที่ทุกระดับแรงดัน คือ 50 cm
- 6) ต้องตรวจสอบเครื่องมือวัดหรือเครื่องมืออื่นๆ ก่อนใช้งาน ถ้าพบความผิดปกติต้องแจ้งเจ้าหน้าที่หรืออาจารย์ทันที มิฉะนั้นจะถือว่าท่านทำให้เกิดความเสียหาย
- 7) ต้องตัดวงจร กราวด์อุปกรณ์ ก่อนสัมผัสอุปกรณ์ทุกครั้ง ก่อนเข้าไปปฏิบัติงาน
- 8) ก่อนการทดลองจะต้องตรวจสอบ และให้สัญญาณเตือนก่อนทุกครั้ง ถ้าหากเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ร่วมปฏิบัติงานหรือบุคคลที่อยู่ในบริเวณผู้ทดลองจะต้องรับผิดชอบ
- 9) อุบัติเหตุใดๆ ที่เกิดขึ้นอยู่นอกเหนือความรับผิดชอบของห้องปฏิบัติการฯ หากนักศึกษา นักวิจัย หรือผู้ทดลองคนใด ไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนด จะถูกลงโทษโดยเด็ดขาด ในการห้ามใช้เครื่องมือทดสอบเป็นระยะเวลาตามที่กำหนด

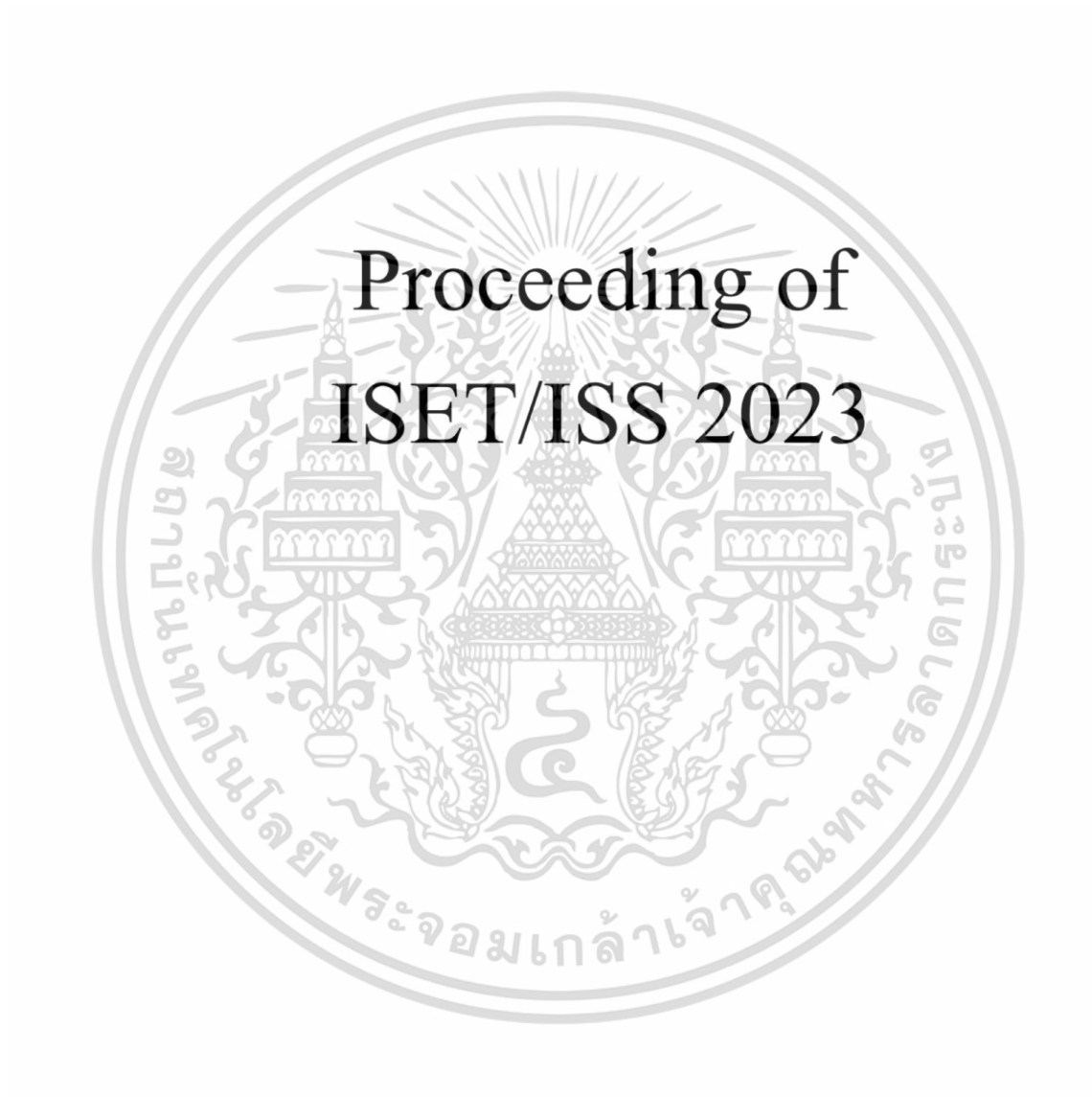
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

**ผลงานทางวิชาการในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ**

- 1) **Mai-eiam T., Nimsanong P., Yutthagowith P.** “Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment.” **The 17th International Symposium on EMC and transients in Infrastructures/International Student Session (ISET/ISS)**, Dec. 2023. pp. 45-50
- 2) **Mai-eiam T., Nimsanong P., Yutthagowith P.** “Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment.” **The 8th International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH)**, Feb. 2024. pp. 55-61

ISET / ISS, 9<sup>th</sup> December, 2023



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS, 9<sup>th</sup> December, 2023

3.2	<b>[ISET2023-10] Development of Data Recorder for Lightning Current Waveforms using STM32 Nucleo-64</b> , Kenta Hanai, Kazuo Yamamoto (Chubu University).....	40
3.3	<b>[ISET2023-11] Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment</b> , Thanatorn Mai-eiam (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Phethai Nimsanong (Power System Control Department, Metropolitan Electricity Authority), Peerawut Yuthagowith (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang).....	45
3.4	<b>[ISET2023-12] Calibration of Partial Discharge Calibrators Based on Numerical Integration</b> , Peerawut Yuthagowith (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Sumitta Konglathong (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Sarawuth Pramualsingha (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) .....	51
<b>4.</b>	<b>Lightning Analysis and High Voltage</b> .....	<b>56</b>
4.1	<b>[ISET2023-09] Effects of Soil Frequency Dependence on Electromagnetic Fields and Surges in FDTD Simulations</b> , Toshihisa Ohno (Doshisha University), Yoshihiro Baba (Doshisha University).....	56
4.2	<b>[ISET2023-14] Effects of Filter Circuit to Suppress Transfer Surge on Surge Isolation Transformer</b> , Shohei Yamashita, Kazuo Yamamoto (Chubu University) .....	60
4.3	<b>[ISET2023-15] Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor</b> , Jedsada Raxsa (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Peerawut Yuthagowith (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang).....	65
4.4	<b>[ISET2023-16] FDTD simulation of LEMP propagation in the Earth-Ionosphere waveguide</b> , Koki Ryokume (Doshisha University), Yoshihiro Baba (Doshisha University).....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment

Thanatorn Mai-eiam  
School of Engineering, King  
Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang, Thailand  
65016046@kmitl.ac.th

Phethai Nimsanong  
Power System Control Department,  
Metropolitan Electricity Authority,  
Thailand  
phethai.ni@mea.or.th

Peerawut Yutthagowith  
School of Engineering, King  
Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang, Thailand  
peerawut.yu@kmitl.ac.th

**Abstract**—In this paper, the ultra-high-frequency (UHF) electromagnetic sensors based on the printed circuit board (PCB) antennas for partial discharge detection are presented. The sensors were designed to meet the requirement of narrowband/wideband UHF measuring systems for UHF partial discharge (PD) detection in gas insulated substation (GIS). The PD signals in the physical characteristic of the high-frequency electromagnetic (EM) wave were detected using the designed UHF antennas, which include the inset-fed rectangular microstrip patch (IFRMP) antennas, known for their narrowband characteristics that offer high interference signal rejection to improve signal-to-noise ratio and the two-arm Archimedean spiral (TAAS) antennas, recognized for their broadband frequency spectrum capability. Because UHF PD signals are typically detected using various field sensor designs, both IFRMP and TAAS antennas were designed for three different models under calculation and simulation using MATLAB to apply in different operating frequency bands within the UHF range of PD detection (300 MHz-3 GHz). The designed UHF antennas have very characteristics, i.e. portable, lightweight, and attractive for practical applications with a low fabrication cost. Additionally, they are more convenient to install on the insulating flange compared to some types of external antenna sensors. In terms of antenna performance, they exhibit parameters like return loss (parameter  $S_{11}$ ) less than -10 dB and voltage standing wave ratio (VSWR) less than 2 within a close range of the designed operating frequency. Using the designed antennas, the phase-resolved PD (PRPD) patterns, the statistical magnitudes ( $V_{max95\%}$ ) and waveforms of detected UHF signal have been obtained from laboratory testing for the sensitivity check to help users in the effective application of the UHF PD detection.

**Keywords**—UHF antenna, Return loss, Parameter  $S_{11}$ , VSWR, Electromagnetic wave, UHF signal detection

## I. INTRODUCTION

In recent years, the statistical data from The CIGRE (International Council on Large Electric Systems) 23.10 working group report emphasizes the prevalence of partial discharge (PD) as a primary cause of insulation failures in high voltage (HV) electrical equipment [1]-[3]. PD signal has been widely studied as a diagnostic tool for assessing the condition of gas insulated substation (GIS) insulation [4]. Currently, specialized PD detection has been introduced by the non-conventional method that can detect PD signals using different physical characteristics (electromagnetic transients, acoustical emission, optical occurrences, chemical compounds). The ultra-high-frequency (UHF) PD detection method is widely used in the field of GIS by detecting electromagnetic (EM) waves in the frequency range of 300 MHz to 3 GHz, which usually can effectively remove the noise signal interference below 300 MHz [4]-[6].

In The UHF PD detection method, antenna sensors are commonly used, and they can operate using either narrowband method or wideband method depending on the monitoring objectives and the expected frequency content of PD signals in the specific application, which are typically picked up in the frequency range of 300 MHz-1.5 GHz [4]. According to the different installation methods that have been studied, the UHF sensors can be categorized into internal sensors and external sensors. The advantage of the external UHF sensor as detailed in this study is that it is easy to install on the insulating flange for capturing leakage EM waves emitted during PD events and does not affect the internal electric field of the equipment. At present, external UHF sensors that have been studied mainly include spiral antennas, ultra-wideband dipole antennas, micro-strip patch antenna, and quasi-TEM horn antenna [7]. However, some available external antennas do not fulfill the facility installation and do not provide a continuous wide frequency range that is suitable for PD detection covering a broad spectrum [8]-[9].

To solve the problems, this study designs the UHF antennas based on the printed circuit board flame retardant 4 (PCB FR4) substrate to be portable and lightweight. The structural parameters and performance trends of the two types of designed UHF antennas are calculated and simulated to receive specific narrowband and continuous wideband characteristics which are represented on the major topics below. To verify the designed UHF antennas, the analysis of antenna performance parameters and the measurement results of UHF signal detection have been investigated in this paper.

## II. STRUCTURAL PARAMETERS OF THE UHF DESIGNED ANTENNAS

### A. Narrowband UHF antenna sensors

As seen in Fig. 1, the inset-fed rectangular microstrip patch (IFRMP) antenna is proposed as a narrowband UHF measuring system allowing for more precise targeting of a specific frequency and the rejection of external high frequency interferences. The IFRMP antennas have been fabricated on PCB FR4 substrate height ( $h$ ) of 1.6 mm with its permittivity ( $\epsilon_R=4.3$ ) and input impedance of 50  $\Omega$  matching with the SMA connector.

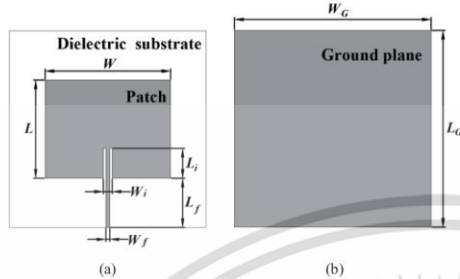


Fig. 1. Structural parameters of the IFRMP antenna (a) Front view (b) Back view

The structural parameters of IFRMP antenna as shown in Fig. 1(a) and Fig. 1(b) have been calculated using (1)-(9) below [10]-[12]:

- 1) Calculation of the patch width ( $W$ ) and the patch length ( $L$ ):

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_R + 1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} = 0.824h \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right) \right) \quad (2)$$

Where,  $f_0$  = the operating frequency,  
 $c$  = the velocity of light ( $3 \times 10^8$  m/s), and  
the effective dielectric constant ( $\epsilon_{eff}$ ) can be given by

$$\epsilon_{eff} = \begin{cases} \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} + 0.04 \left( 1 - \left( \frac{W}{h} \right)^2 \right) \right], & \frac{W}{h} < 1 \\ \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right], & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

- 2) Calculation of the feed line width ( $W_f$ ) and the feed line length ( $L_f$ ):

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left( \frac{8h}{W_f} + \frac{W_f}{4h} \right), & \frac{W_f}{h} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_f}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_f}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$L_f = \frac{\lambda_d}{4} = \frac{c}{4f_0 \sqrt{\epsilon_R}} \quad (5)$$

Where,  $Z_0$  = the characteristic impedance of the feed line  
 $\lambda_d$  = the dielectric substrate wavelength

- 3) Calculation of the inset feed width ( $W_i$ ) and the inset feed length ( $L_i$ ):

$$W_i = 2W_f \quad (6)$$

$$L_i = \frac{10^{-4} L}{2} \left( \frac{0.001699\epsilon_R^7 + 0.13761\epsilon_R^6 - 6.1783\epsilon_R^5 + 93.187\epsilon_R^4 - 682.69\epsilon_R^3 + 2561.9\epsilon_R^2 - 4043\epsilon_R + 6697}{\epsilon_R} \right) \quad (7)$$

- 4) Calculation of the ground plane width ( $W_G$ ) and the ground plane length ( $L_G$ ):

$$W_{G,\min} = 6h + W \quad (8)$$

$$L_{G,\min} = 6h + L \quad (9)$$

The dimensions of three different models of the designed IFRMP antennas used in this work are shown in Table I. They have been designed to operate at the operating frequency of 1.2, 1.0, and 0.8 GHz in models 1, 2, and 3 respectively.

TABLE I  
STRUCTURAL PARAMETERS OF THE DESIGNED IFRMP ANTENNAS

Parameters	IFRMP antenna		
	Model 1	Model 2	Model 3
$W$ (mm)	76.79	92.14	115.18
$L$ (mm)	60.05	72.13	90.24
$W_f$ (mm)	2.498	2.498	2.498
$L_f$ (mm)	30.14	36.17	45.21
$W_i$ (mm)	4.996	4.996	4.996
$L_i$ (mm)	18.3	21.98	27.5
$W_G$ (mm)	120.33	144.47	180.66
$L_G$ (mm)	120.33	144.47	180.66

#### B. Wideband UHF antenna sensors

As seen in Fig. 2, the two-arm Archimedean spiral (TAAS) antenna is proposed as a wideband UHF measuring system allowing for a broader analysis of the frequency content and characteristics of the signals. The TAAS antennas have been fabricated on PCB FR4 substrate height of 0.8 mm for the spiral arm and 1.6 mm for the tapered balun with their permittivity ( $\epsilon_R = 4.3$ ). The spiral arm's input impedance of  $90.9 \Omega$  which is calculated from Babinet's equation [13] can be matched with the  $50 \Omega$  of the SMA connector by using the exponential tapered balun.

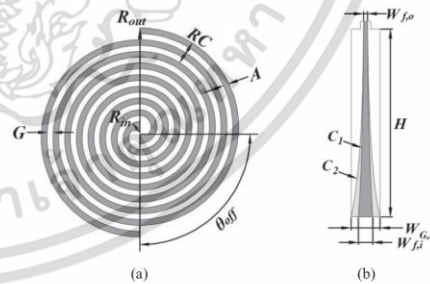


Fig. 2. Structural parameters of the TAAS antenna (a) spiral arm (b) exponential tapered balun

The structural parameters of TAAS antenna including the spiral arm and the exponential tapered balun as shown in Fig. 2(a) and Fig. 2(b) have been calculated using (10)-(13) and the following description below [13]-[17]:

- 1) *Calculation of the spiral arm*: specify the number of turns of the arm ( $N$ ), the arm width ( $A$ ), the gap between arms ( $G$ ), the radius change in one turn of arm ( $RC$ ), the inner radius ( $R_{in}$ ) and the outer radius ( $R_{out}$ ) to determine the low frequency ( $f_{low}$ ) and high frequency ( $f_{high}$ ) cut-off and the offset angle ( $\theta_{off}$ ).

$$G = A = \frac{R_{out} - R_{in}}{4N} \quad (10)$$

$$f_{low} \geq \frac{c}{2\pi R_{out}} \quad (11)$$

$$f_{high} \leq \frac{c}{2\pi R_{in}} \quad (12)$$

$$\theta_{off} = \frac{2\pi A}{RC} \quad (13)$$

- 2) *Calculation of the exponential tapered balun*: the conductor width of input impedance ( $W_{f,i}$ ) and output impedance ( $W_{f,o}$ ) of the exponential tapered balun are determined from (3) and (4), the conductor width of ground plane ( $W_{G,i}$ ) is equal to the gap between SMA connector ground pins, the height of the exponential tapered balun ( $H$ ) corresponding to one-quarter wavelength ( $\lambda/4$ ) of the center frequency and the balun exponential curves are  $C_1 = W_{f,o} \cdot e^{mt}$  and  $C_2 = W_{f,i} \cdot e^{nt}$  where  $t$  is a variable from 0 to  $H$ .

The dimensions of three different models of the designed TAAS antennas used in this work are shown in Table II. They have been designed to operate at the low frequency cut-off  $\geq 0.92$ ,  $\geq 0.63$ , and  $\geq 0.48$  GHz in models 1, 2, and 3 respectively.

TABLE II  
STRUCTURAL PARAMETERS OF THE DESIGNED TAAS ANTENNAS

Parameters	TAAS antenna		
	Model 1	Model 2	Model 3
$N$	4	6	8
$A$ (mm)	2.9	2.9	2.9
$G$ (mm)	2.9	2.9	2.9
$R_{out}$ (mm)	51.9	75.1	98.3
$R_{in}$ (mm)	5.5	5.5	5.5
$\theta_{off}$ (degree)	90	90	90
$W_{f,i}$ (mm)	3.13	3.13	3.13
$W_{f,o}$ (mm)	0.922	0.922	0.922
$W_{G,i}$ (mm)	6	6	6
$H$ (mm)	62	70	75
$m$	12.697952	11.246757	10.496973
$n$	21.334968	18.896686	17.636907

### III. ANALYSIS OF ANTENNA PERFORMANCE PARAMETERS

#### A. Return loss and Voltage Standing Wave Ratio

In a single port system like the antenna, the return loss ( $RL$ ) represents the parameter  $S_{11}$  to indicate its performance. The parameter  $S_{11}$  is a parameter that describes how much power is reflected back ( $P_{ref}$ ) towards the source (transmitter) compared to the power incident ( $P_{inc}$ ) on the antenna corresponding to the reflection coefficient ( $\Gamma$ ), as in (14) and (15). The voltage

standing wave ratio (VSWR) is defined as the ratio of the maximum voltage ( $U_{max}$ ) to the minimum voltage ( $U_{min}$ ) on the transmission line, as in (16). Both parameter  $S_{11}$  and VSWR provide insights into how well the antenna is impedance-matched to the system it is connected to.

$$RL = -S_{11} = -10 \log \left( \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \right) = -20 \log (|\Gamma|) \quad (14)$$

$$|\Gamma| = 10^{\frac{-RL}{20}} \quad (15)$$

$$VSWR = \frac{|U_{max}|}{|U_{min}|} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (16)$$

#### B. Simulation and Measurement

All measured parameter  $S_{11}$  results of the designed UHF antennas as shown in Fig. 3 and Fig. 4 are recorded by SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer to calculate the result of measured VSWR.

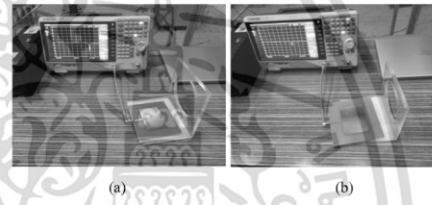


Fig. 3. The parameter  $S_{11}$  measurement of the designed IFRMP antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

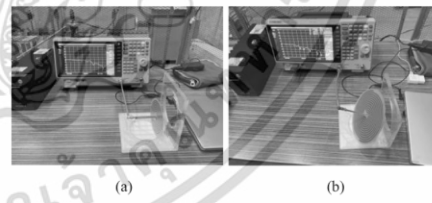


Fig. 4. The parameter  $S_{11}$  measurement of the designed TAAS antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

The results of simulated VSWR are obtained in MATLAB pcbStack to evaluate the operating frequency band of the designed UHF antennas compared with the measured VSWR as shown in Fig. 5 and Fig. 6.

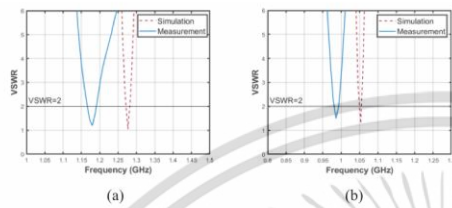


Fig. 5. The VSWR of simulation and measurement for the designed IFRMP antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

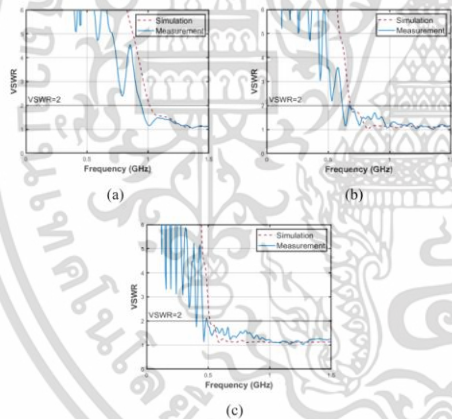


Fig. 6. The VSWR of simulation and measurement for the designed TAAS antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

The antenna with a VSWR of less than 2 is considered to have acceptable performance across its operating frequency band, and high radiation efficiency is indicative of a well-matched, efficient, and suitable antenna. As they can see from the measured VSWR graphs, all designed UHF antennas have the operating frequency band in a close range to the designed operating frequency as seen in Table III.

TABLE III  
THE ACCEPTABLE OPERATING FREQUENCY BAND OF THE DESIGNED UHF ANTENNAS

Narrowband UHF antenna sensors		
Name	The operating frequency band	
IFRMP antenna	Model 1	1.17 GHz-1.19 GHz
	Model 2	0.98 GHz-0.99 GHz
	Model 3	0.78 GHz-0.79 GHz
Wideband UHF antenna sensors		
Name	The operating frequency band	
TAAS antenna	Model 1	0.94 GHz-1.5 GHz
	Model 2	0.68 GHz-1.5 GHz
	Model 3	0.49 GHz-1.5 GHz

IV. UHF SIGNAL DETECTION EXPERIMENT

To verify the detection sensitivity of the designed UHF antennas, they were used to detect the simulated UHF signals that propagate in the line enclosure of test setup No.1 and the joint enclosure of test setup No.2 which were used in the GIS system as shown in Fig. 7 and Fig. 8. These enclosures have a circular waveguide characteristic that can be modeled as the GIS enclosure without HV conductor when a disconnecter switch is open [18]. The experimental circuit in laboratory was carried out to generate the pulse of artificial voltage pulses (magnitude of 30 V and frequency of 100 Hz) from the UHF Pulse generator into EM waves and transmit through the enclosure from one side. Then the measured results are obtained by the designed UHF antennas on another side conducted with the PD data acquisition system.

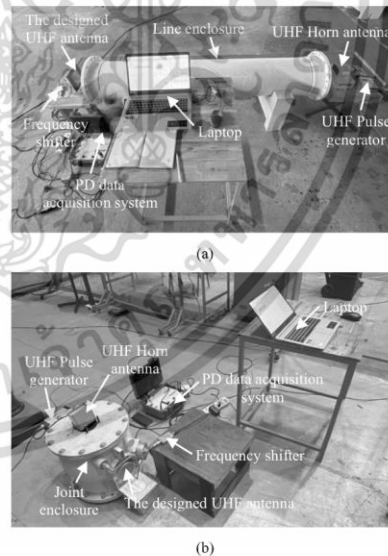


Fig. 7. The arrangement of the experimental circuit for UHF signal detection (a) test setup No.1 (b) test setup No.2

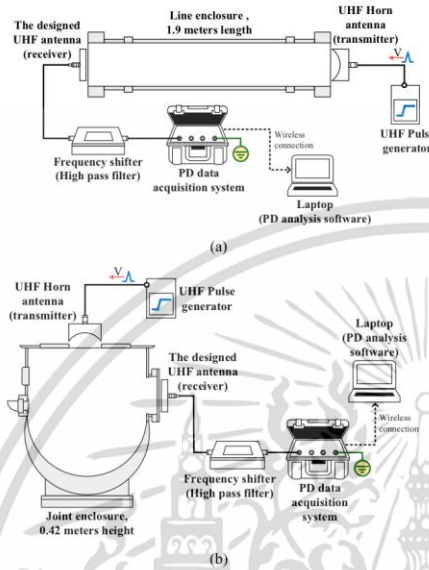


Fig. 8. The diagram of the experimental circuit for UHF signal detection (a) test setup No.1 (b) test setup No.2

V. EXPERIMENTAL RESULT

A. IFRMP antennas

Table IV and Table V represent the detected UHF signals which are obtained by using all IFRMP antennas in test setups No.1 and No.2. The phase-resolved PD (PRPD) patterns, the statistical magnitudes ( $V_{max95\%}$ ) and waveforms are displayed.

TABLE IV  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED IFRMP ANTENNAS IN TEST SETUP No.1

IFRMP antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1		
Model 2		
Model 3		

TABLE V  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED IFRMP ANTENNAS IN TEST SETUP No.2

IFRMP antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1		
Model 2		
Model 3		

B. TAAS antennas

Table VI and Table VII represent the detected UHF signals which are obtained by using all TAAS antennas in test setups No.1 and No.2. The phase-resolved PD (PRPD) patterns, the statistical magnitudes ( $V_{max95\%}$ ) and waveforms are displayed.

TABLE VI  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED TAAS ANTENNAS IN TEST SETUP No.1

TAAS antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1		
Model 2		
Model 3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE VII  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED TAAS  
ANTENNAS IN TEST SETUP NO.2

TAAS antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1		
	$V_{\max 95\%} = 360 \text{ mV}$	
Model 2		
	$V_{\max 95\%} = 370 \text{ mV}$	
Model 3		
	$V_{\max 95\%} = 380 \text{ mV}$	

## VI. CONCLUSION

The performance of the designed antennas for UHF signal detection has been investigated in this paper. Based on the experimental results, the phase-resolved PD (PRPD) patterns of UHF signal detection were analyzed for all cases. In the narrowband UHF antenna sensor, the inset-fed rectangular microstrip patch (IFRMP) antenna demonstrated the ability to detect UHF signals with minimal background noise intensity. This intensity was lower than the cases of the wideband UHF antenna sensor, as the two-arm Archimedean spiral (TAAS) antenna. The broader frequency coverage of the TAAS antenna may make it more susceptible to interference from unrelated signals, influencing the distorted sensitivity of the signal from the high intensity of interference. In contrast, the wideband UHF antennas can represent more information, resulting in a higher statistical magnitude of the detected UHF signals. When signals span a wide range of frequencies, the narrowband antenna may not detect all relevant information. The different statistical magnitudes of UHF signals in each of the three different models of the designed UHF antennas correspond to the characteristics of multiple magnitudes varying across the frequency spectrum. These variations are influenced by propagation effects within the enclosure, including attenuation, reflection, dispersion, and interference. Therefore, the detection of UHF PD signals typically requires the use of various field sensor designs.

All designed UHF antennas have been verified in the laboratory from the detection of simulated UHF signals. This study provides information of the narrowband and wideband UHF antenna properties and the behavior of UHF signals in this experiment. However, the selection of designed antennas should depend on the monitoring objectives and the expected frequency content of signals in the specific application.

## ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express special thanks to ID ASSET CO., LTD. for supplying the measuring instruments, and other devices.

## REFERENCES

- [1] B. F. Hampton, and R. J. Meats, "Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations," *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 135, pp. 137-144, Mar. 1988.
- [2] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, "Partial discharge classification on high voltage equipment with K-Means," in *2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*, pp. 191-194.
- [3] S. Ludpa, N. Pattanadech, M. Leelajindakrairek and P. Yutthagowith, "Pattern classification of partial discharge in high voltage equipment by regression analysis," in *2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 921-924.
- [4] CIGRE WG D1.25, Tech. Brochure 654, "UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification," Apr. 2016.
- [5] IEC/TS 62478 *High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods*, IEC std., Aug. 2016.
- [6] P. Petchphung, M. Leelajindakrairek, N. Pattanadech, P. Yutthagowith and K. Aunchaleevarapan, "The study of disc monopole antenna for partial discharge measurement," in *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*, pp. 1292-1296.
- [7] Y. Wang, J. Li, C. Li, B. Ouyang and Z. Zheng, "A study on a miniaturized planar spiral antenna for partial discharge detection in GIS," in *MATEC Web of Conferences*, pp. 02015.
- [8] Z. Cai, R. Wilkinson, and A. Bojovschi, "Partial discharge detection approach for a medium voltage switchgear system," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 144, pp. 221-228, Jan. 2014.
- [9] X. Zhang, Y. Han, W. Li, and X. Duan, "A rectangular planar spiral antenna for GIS partial discharge detection," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-7, Jun. 2014.
- [10] B. Hırdurmaz and Ö.F. Gümüş, "Design and analysis of 28 GHz microstrip patch antenna for different type FR4 claddings," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 24, pp. 265-288, Aug. 2019.
- [11] M.Z. Rahman, M. Mynuddin, and K.C. Debnath, "The significance of notch width on the performance parameters of inset feed rectangular microstrip patch antenna," *International Journal of Electromagnetics and Applications*, vol. 10, pp. 7-18, Oct. 2020.
- [12] A. Gupta, S.K. Dargar, B. Raghavaiah and A.N. Rao, "Comparison between Rectangular Microstrip Patch Antenna with and without Defected Ground Structure at 1.85 GHz," in *2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, pp. 1-4.
- [13] R. Udaiyakumar, R. Maheswar, T. Janani, R. Vigneshram, I.S. Amiri, and P. Yupapin, "Performance enhancement of shorted polygonal archimedean spiral antenna using hybrid reflector," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 107, pp. 1-8, Jul. 2019.
- [14] H.B. Kim, K.C. Hwang, and H.S. Kim, "Cavity-backed two-arm spiral antenna with a ring-shaped absorber for partial discharge diagnosis," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 8, pp. 856-862, Jul. 2013.
- [15] T.K. Chen, and G.H. Huff, "Modal resistance of spiral antenna," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 5, pp. 223-228, May 2013.
- [16] K.P. Singh, R. Ranjan and R. Deshpande, "Design of a wideband Balun for Archimedean spiral antenna in energy harvesting," in *2015 International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATecT)*, pp. 45-49.
- [17] J. Geng, X. Liu, C. Liu, and H. Guo, "A unidirectional ultra-wideband circularly polarized spiral antenna array," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, pp. 2569-2575, Mar. 2020.
- [18] M. Shi, X. Han, X. Zhang, Z. Zhang, and J. Li, "Effect of disconnector and high-voltage conductor on propagation characteristics of PD-induced UHF signals," *High voltage*, vol. 3, pp. 187-192, Sep. 2018.



**SCHOOL OF ENGINEERING** **KMITL**



**KMITL**  
King Mongkut's  
Institute of Technology  
Ladkrabang

Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on  
Lightning Protection and High Voltage Engineering  
(ISLH 2024)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TECHNICAL PROGRAM

<b>08.00 – 08.50</b>	<b>Registration</b>
<b>08.50-09.20</b>	<b>Opening ceremony</b> - Dean of School of Engineering, KMITL - Head of Dept. of Electrical Engineering, KMITL - Head of High Voltage Engineering Laboratory, KMITL
<b>09.20-10.00</b>	<b>Keynote speech session 1</b> Testing of Distribution Transformers at Manufacturer Facilities <i>Mr. Virat Pongpitak Mr. Siriwit Pongpitak</i>
<b>10.00-10.15</b>	<b>Coffee Break</b>
<b>10.20-12.00</b>	<b>Oral presentation session 1</b>
10.20-10.43	Effects of Filter Circuit to Suppress Transfer Surge on Surge Isolation Transformer <i>Presenter: Shohei Yamashita</i>
10.45-11.08	Fringing Flux Factors Used for Design of High-Voltage Reactor <i>Presenter: Jedsada Rassa</i>
11.10-11.33	Development of Lightning Detection System Using Large-diameter Rogowski Coil and its Performance Evaluation Results <i>Presenter: Rikuto Tanaka</i>
11.35-11.58	Calibration of Partial Discharge Calibrators Based on Numerical Integration <i>Presenter: Sarawuth Pramualsingha</i>
<b>12.00 - 13.00</b>	<b>Lunch</b>
<b>13.00-13.40</b>	<b>Keynote speech session 2</b> Field test experience of PD measurement <i>Dr. Phethai Nimsanong</i>
<b>13.45-16.00</b>	<b>Oral presentation session 2</b>
13.45-14.08	Development of Data Recorder for Lightning Current Waveforms using STM32 Nucleo-64 <i>Presenter: Kenta Hanai</i>
14.10-14.33	Lightning Impulse Voltage Test on Low Voltage Windings of Transformers <i>Presenter: Sarun Pinthong</i>
14.35-14.58	Statistical Data of Lightning Points and Damage on Automobiles and Effect of Outflow Route on Lightning Current Distributions inside Automobiles <i>Presenter: Teisei Omura</i>
15.00-15.15	<b>Coffee Break</b>
15.15-15.38	Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment <i>Presenter: Thanatorn Mai-elim</i>
15.40-16.03	Study of Lightning Detection Method Using Acoustic Data <i>Presenter: Yutaro Higashi</i>
16.05-16.28	A System for PD Pulse Generating, Monitoring, and System Characterization <i>Presenter: Dr. Busayapol Paophan</i>
<b>16.30-16.40</b>	<b>Best presentation award ISHL2024</b>
<b>16.40-17.00</b>	<b>Closing Ceremony</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment

T. Mai-ciam<sup>1</sup>, P. Nimsanong<sup>2</sup>, and P. Yutthagowith<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
1 Chalong Krung 1 Alley Lat krabang Bangkok 10520 Thailand

<sup>2</sup>Power System Analysis Section, Power System Control Dept., Metropolitan Electricity Authority  
Bangkok 10330 Thailand  
65016046@kmitl.ac.th

## Abstract

In this paper, the ultra-high-frequency (UHF) electromagnetic sensors based on the printed circuit board (PCB) antennas for partial discharge detection are presented. The sensors were designed to meet the requirement of narrowband/wideband UHF measuring systems for the UHF partial discharge (PD) detection in gas insulated substation (GIS). The PD signals in the physical characteristic of the high-frequency electromagnetic (EM) wave were detected using the designed UHF antennas, which include the inset-fed rectangular microstrip patch (IFRMP) antennas, known for their narrowband characteristics that offer high interference signal rejection to improve signal-to-noise ratio and the two arm Archimedean spiral (TAAS) antennas, recognized for their broadband frequency spectrum capability. Because UHF PD signals are typically detected using various field sensor designs, both IFRMP and TAAS antennas were designed for three different models under calculation and simulation using MATLAB to apply in different operating frequency bands within the UHF range of PD detection (300 MHz-3 GHz). The designed UHF antennas have very characteristics, i.e. portable, lightweight, and attractive for practical applications with a low fabrication cost. Additionally, they are more convenient to install on the insulating flange compared to some types of external antenna sensors. In terms of antenna performance, they exhibit parameters like return loss (parameter  $S_{11}$ )  $\leq -10$  dB and voltage standing wave ratio (VSWR)  $\leq 2$  within a close range of the designed operating frequency. Using the designed antennas, the phase-resolved PD (PRPD) patterns, the statistical magnitudes and waveforms of detected UHF signal have been obtained from laboratory testing for the sensitivity check to help users in the effective application of the UHF PD detection.

**Keywords:** UHF antenna, Return loss, Parameter  $S_{11}$ , VSWR, Electromagnetic wave, UHF signal detection

## 1. Introduction

In recent years, the statistical data from The CIGRE (International Council on Large Electric Systems) 23.10 working group report emphasizes the prevalence of partial

discharge (PD) as a primary cause of insulation failures in high voltage (HV) electrical equipment [1 – 3]. PD signal has been widely studied as a diagnostic tool for assessing the condition of gas insulated substation (GIS) insulation [4]. Currently, specialized PD detection has been introduced by the non-conventional method that can detect PD signals using different physical characteristics (electromagnetic transients, acoustical emission, optical occurrences, chemical compounds). The ultra-high-frequency (UHF) PD detection method is widely used in the field of GIS by detecting electromagnetic (EM) waves in the frequency range of 300 MHz to 3 GHz [4 – 5], which usually can effectively remove the noise signal interference below 300 MHz [6].

In The UHF PD detection method, antenna sensors are commonly used, and they can operate using either narrowband method or wideband method depending on the monitoring objectives and the expected frequency content of PD signals in the specific application, which are picked up in the frequency range of typically 300 MHz-1500 MHz [4]. According to the different installation methods that have been studied, the UHF sensors can be categorized into internal sensors and external sensors. The advantage of the external UHF sensor as detailed in this study is that it is easy to install on the insulating flange for capturing leakage EM waves emitted during PD events and does not affect the internal electric field of the equipment. At present, external UHF sensors that have been studied mainly include spiral antennas, ultra-wideband dipole antennas, micro-strip patch antenna, and quasi-TEM horn antenna [7]. However, some available external antennas do not fulfill the facility installation and do not provide a continuous wide frequency range that is suitable for PD detection covering a broad spectrum [8 – 9].

To solve the problems, this study designs the UHF antennas based on the printed circuit board flame retardant 4 (PCB FR4) substrate to be portable and lightweight. The structural parameters and performance trends of the two types of designed UHF antennas are calculated and simulated to receive specific narrowband and continuous wideband characteristics which are represented on the topic below. To verify the designed UHF antennas, the analysis of antenna performance parameters and the

measurement results of UHF signal detection have been investigated in this paper.

## 2. Structural Parameters of The UHF Designed Antennas

### 2.1 Narrowband UHF Antenna Sensors

As seen in Fig. 1, the inset-fed rectangular microstrip patch (IFRMP) antenna is proposed as a narrowband UHF measuring system allowing for more precise targeting of a specific frequency and the rejection of external high frequency interferences. The IFRMP antennas have been fabricated on PCB FR4 substrate height ( $h$ ) of 1.6 mm with its permittivity ( $\epsilon_R = 4.3$ ) and input impedance of 50  $\Omega$  matching with the SMA connector.

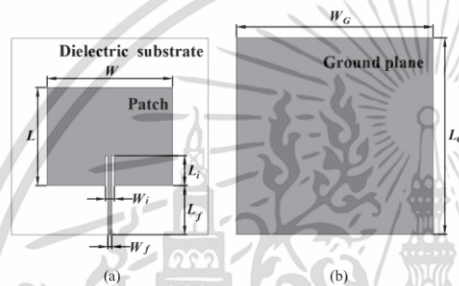


Fig. 1. Structural parameters of the IFRMP antenna (a) Front view (b) Back view

The structural parameters of IFRMP antenna as shown in Fig. 1(a) and 1(b) have been calculated using (1)-(9) below [10 – 12]:

- 1) Calculation of the patch width ( $W$ ) and the patch length ( $L$ ):

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right) \quad (2)$$

Where,  $f_0$  = the operating frequency,  
 $c$  = the velocity of light ( $3 \times 10^8$  m/s), and  
the effective dielectric constant ( $\epsilon_{eff}$ ) can be given by

$$\epsilon_{eff} = \begin{cases} \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} + 0.04 \left( 1 - \left( \frac{W}{h} \right) \right)^2 \right], & \frac{W}{h} < 1 \\ \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right], & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

- 2) Calculation of the feed line width ( $W_f$ ) and the feed line length ( $L_f$ ):

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left( \frac{8h}{W_f} + \frac{W_f}{4h} \right), & \frac{W_f}{h} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_f}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_f}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$L_f = \frac{\lambda_d}{4} = \frac{c}{4f_0 \sqrt{\epsilon_R}} \quad (5)$$

Where,  $\lambda_d$  = the dielectric substrate wavelength,  
 $Z_0$  = the characteristic impedance of the feed line

- 3) Calculation of the inset feed width ( $W_i$ ) and the inset feed length ( $L_i$ ):

$$W_i = 2W_f \quad (6)$$

$$L_i = \frac{10^{-3} L}{2} \left( \frac{0.001699\epsilon_R^2 + 0.13761\epsilon_R^6 - 6.1783\epsilon_R^5 + 93.187\epsilon_R^4 - 682.69\epsilon_R^3 + 2561.9\epsilon_R^2 - 4043\epsilon_R + 6697}{4043\epsilon_R + 6697} \right) \quad (7)$$

- 4) Calculation of the ground plane width ( $W_G$ ) and the ground plane length ( $L_G$ ):

$$W_{G,min} = 6h + W \quad (8)$$

$$L_{G,min} = 6h + L \quad (9)$$

The dimensions of three different models of the designed IFRMP antennas used in this work are shown in Table 1. They have been designed to operate at the operating frequency of 1.2, 1.0, and 0.8 GHz in models 1, 2, and 3 respectively.

TABLE 1  
STRUCTURAL PARAMETERS OF THE DESIGNED IFRMP ANTENNAS

Parameters	IFRMP antenna		
	Model 1	Model 2	Model 3
$W$ (mm)	76.79	92.14	115.18
$L$ (mm)	60.05	72.13	90.24
$W_f$ (mm)	2.498	2.498	2.498
$L_f$ (mm)	30.14	36.17	45.21
$W_i$ (mm)	4.996	4.996	4.996
$L_i$ (mm)	18.3	21.98	27.5
$W_G$ (mm)	120.33	144.47	180.66
$L_G$ (mm)	120.33	144.47	180.66

### 2.2 Wideband UHF Antenna Sensors

As seen in Fig. 2, the two arm Archimedean spiral (TAAS) is proposed as a wideband UHF measuring system allowing for a broader analysis of the frequency content and characteristics of the signals. The TAAS antennas have been fabricated on PCB FR4 substrate height of 0.8 mm for the spiral arm and 1.6 mm for the tapered balun with their permittivity ( $\epsilon_R = 4.3$ ). The spiral arm's input impedance of 90.9  $\Omega$  which is calculated from Babinet's equation [13] can be matched with the 50  $\Omega$  of the SMA connector by using the exponential tapered balun.

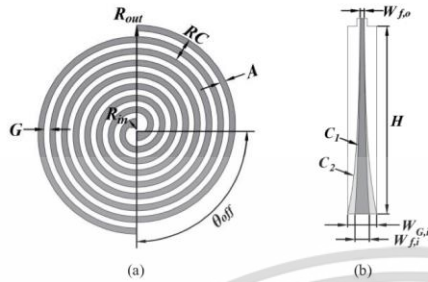


Fig. 2. Structural parameters of the TAAS antenna (a) spiral arm (b) exponential tapered balun

The structural parameters of TAAS antenna including the spiral arm and the exponential tapered balun as shown in Fig. 2(a) and 2(b) have been calculated using (10)-(13) and the following description below [13–17]:

- 1) Calculation of the spiral arm: specify the number of turns of the arm ( $N$ ), the arm width ( $A$ ), the gap between arms ( $G$ ), the radius change in one turn of arm ( $RC$ ), the inner radius ( $R_{in}$ ) and the outer radius ( $R_{out}$ ) to determine the low frequency ( $f_{low}$ ) and high frequency ( $f_{high}$ ) cut-off and the offset angle ( $\theta_{off}$ ).

$$G = A = \frac{R_{out} - R_{in}}{4N} \quad (10)$$

$$f_{low} \geq \frac{c}{2\pi R_{out}} \quad (11)$$

$$f_{high} \leq \frac{c}{2\pi R_{in}} \quad (12)$$

$$\theta_{off} = \frac{2\pi A}{RC} \quad (13)$$

- 2) Calculation of the exponential tapered balun: the conductor width of input impedance ( $W_{fo}$ ) and output impedance ( $W_{fa}$ ) of the exponential tapered balun are determined from (3) and (4), the conductor width of ground plane ( $W_{gi}$ ) is equal to the gap between SMA connector ground pins, the height of the exponential tapered balun ( $H$ ) corresponding to one-quarter wavelength ( $\lambda/4$ ) of the center frequency and the balun exponential curves are  $C_1 = W_{fo}e^{mt}$  and  $C_2 = W_{fa}e^{mt}$  where  $t$  is a variable from 0 to  $H$ .

The dimensions models of three different models of the designed TAAS antennas used in this work are shown in Table II. They have been designed to operate at the low frequency cut-off  $\geq 0.92$ ,  $\geq 0.63$ , and  $\geq 0.48$  GHz in models 1, 2, and 3 respectively.

TABLE II  
STRUCTURAL PARAMETERS OF THE DESIGNED TAAS ANTENNAS

Parameters	TAAS antenna		
	Model 1	Model 2	Model 3
$N$	4	6	8
$A$ (mm)	2.9	2.9	2.9
$G$ (mm)	2.9	2.9	2.9
$R_{out}$ (mm)	51.9	75.1	98.3
$R_{in}$ (mm)	5.5	5.5	5.5
$\theta_{off}$ (degree)	90	90	90
$W_{fi}$ (mm)	3.13	3.13	3.13
$W_{fo}$ (mm)	0.922	0.922	0.922
$W_{gi}$ (mm)	6	6	6
$H$ (mm)	62	70	75
$m$	12.697952	11.246757	10.496973
$n$	21.334968	18.896686	17.636907

### 3. Analysis of Antenna Performance Parameters

#### 3.1 Return Loss and Voltage Standing Wave Ratio

In a single port system like the antenna, the return loss ( $RL$ ) represents the parameter  $S_{11}$  to indicate its performance. The parameter  $S_{11}$  is a parameter that describes how much power is reflected back ( $P_{ref}$ ) towards the source (transmitter) compared to the power incident ( $P_{inc}$ ) on the antenna corresponding to the reflection coefficient ( $\Gamma$ ), as in (14) and (15). The voltage standing wave ratio (VSWR) is defined as the ratio of the maximum voltage ( $U_{max}$ ) to the minimum voltage ( $U_{min}$ ) on the transmission line, as in (16). Both parameter  $S_{11}$  and VSWR provide insights into how well the antenna is impedance-matched to the system it is connected to.

$$RL = -S_{11} = -10 \log \left( \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \right) = -20 \log (|\Gamma|) \quad (14)$$

$$|\Gamma| = 10^{\frac{-RL}{20}} \quad (15)$$

$$VSWR = \frac{|U_{max}|}{|U_{min}|} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (16)$$

#### 3.2 Simulation and Measurement

All measured parameter  $S_{11}$  results of the designed UHF antennas as shown in Fig. 3 and 4 are recorded by SVA 1015X Spectrum & Vector network analyzer for calculation of the measured VSWR.

The results of simulated VSWR are obtained in MATLAB pcbStack to evaluate the operating frequency band of the designed UHF antennas compared with the measured VSWR as shown in Fig. 5 and Fig. 6.

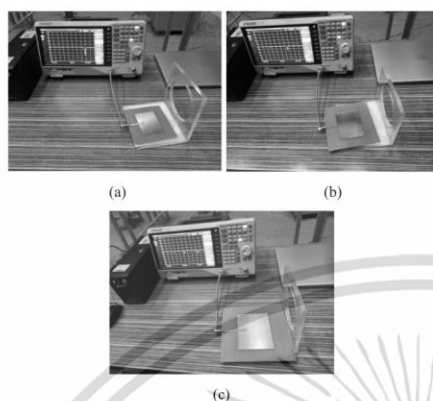


Fig. 3. The parameter  $S_{11}$  measurement of the designed IFRMP antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

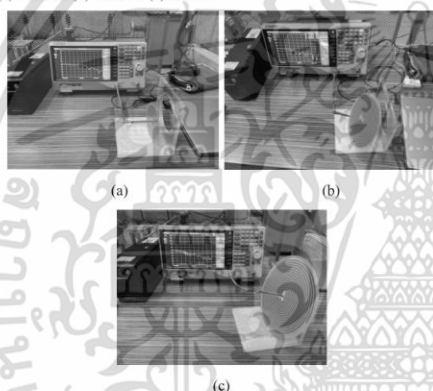


Fig. 4. The parameter  $S_{11}$  measurement of the designed TAAS antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

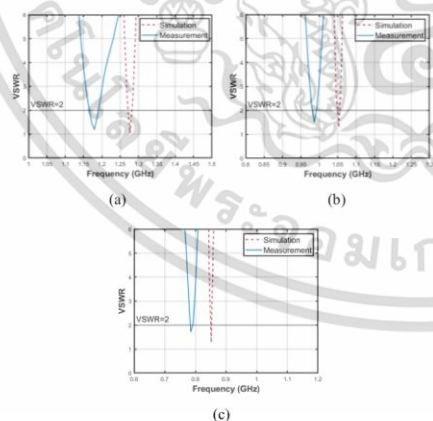


Fig. 5. The VSWR of simulation and measurement for the designed IFRMP antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

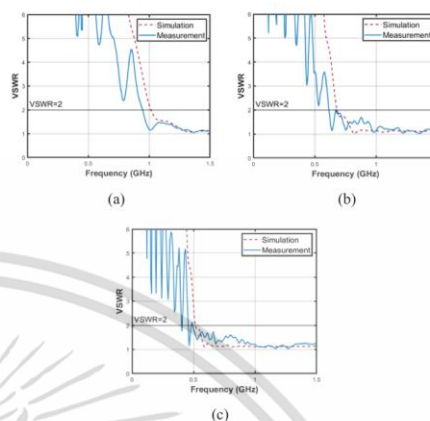


Fig. 6. The VSWR of simulation and measurement for the designed TAAS antenna (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3

The antenna with a VSWR of less than 2 is considered to have acceptable performance across its operating frequency band, and high radiation efficiency is indicative of a well-matched, efficient, and suitable antenna. As they can see from the measured VSWR graphs, all designed UHF antennas have the operating frequency band in a close range to the designed operating frequency as seen in Table III.

TABLE III  
THE ACCEPTABLE OPERATING FREQUENCY BAND OF THE DESIGNED UHF ANTENNAS

Narrowband UHF antenna sensors		
Name	The operating frequency band	
IFRMP antenna	Model 1	1.17-1.19 GHz
	Model 2	0.98-0.99 GHz
	Model 3	0.78-0.79 GHz
Wideband UHF antenna sensors		
Name	The operating frequency band	
TAAS antenna	Model 1	0.94-1.5 GHz
	Model 2	0.68-1.5 GHz
	Model 3	0.49-1.5 GHz

#### 4. UHF Signal Detection Experiment

To verify the detection sensitivity of the designed UHF antennas for GIS system, they were simulated to detect EM waves as the UHF signals that propagate in the line enclosure of test setup No.1 and the joint enclosure of test setup No.2 which were used in GIS system as shown in Fig. 7 and Fig. 8. These enclosures have a circular waveguide characteristic that can be modeled as the GIS enclosure without HV conductor when a disconnect switch is open [18 – 19]. The experimental circuit in laboratory was carried out by low-voltage measurement of sensitivity verification [4] to generate the pulse of UHF signals using the UHF Horn antenna (generally high power directional antenna, the operating frequency between 1.2 GHz-1.27 GHz) as the transmitter. It will convert the injection of artificial voltage pulses (magnitude of 30 V

and frequency repetition rate of 100 Hz) from the UHF pulse generator into EM waves and transmit through the enclosure from one side. Then the measured results are obtained by the designed UHF antennas on another side conducted with the PD data acquisition system.

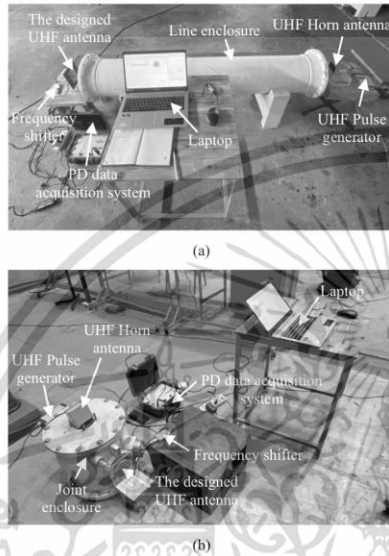


Fig. 7. The arrangement for the experimental circuit of UHF signal detection (a) test setup No.1 (b) test setup No.2

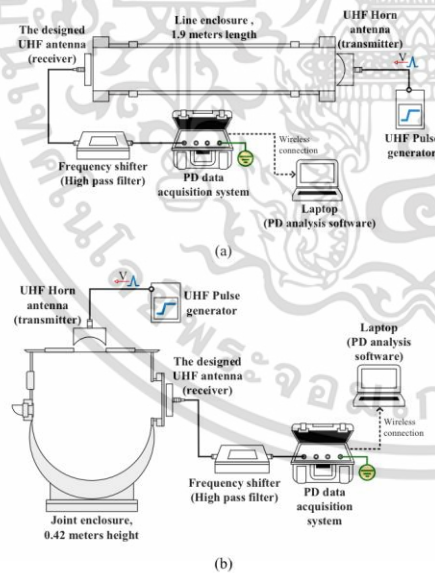


Fig. 8. The diagram for the experimental circuit of UHF signal detection (a) test setup No.1 (b) test setup No.2

## 5. Experimental Result

### 5.1 IFRMP Antennas

Table IV and Table V represent the detected UHF signals which are obtained by using all IFRMP antennas in test setup No.1 and No.2. The phase-resolved PD (PRPD) patterns, the statistical magnitudes ( $V_{max95\%}$ ) and waveforms are displayed.

TABLE IV  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED IFRMP ANTENNAS IN TEST SETUP NO.1

IFRMP antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1		
	$V_{max95\%} = 40 \text{ mV}$	
Model 2		
	$V_{max95\%} = 100 \text{ mV}$	
Model 3		
	$V_{max95\%} = 150 \text{ mV}$	

TABLE V  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED IFRMP ANTENNAS IN TEST SETUP NO.2

IFRMP antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1		
	$V_{max95\%} = 80 \text{ mV}$	
Model 2		
	$V_{max95\%} = 170 \text{ mV}$	
Model 3		
	$V_{max95\%} = 210 \text{ mV}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 TAAS Antennas

Table VI and Table VII represent the detected UHF signals which are obtained by using all TAAS antennas in test setup No.1 and No.2. The phase-resolved PD (PRPD) patterns, the statistical magnitudes ( $V_{\max 95\%}$ ) and waveforms are displayed.

TABLE VI  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED TAAS ANTENNAS IN TEST SETUP No.1

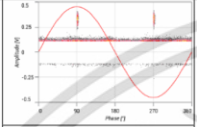
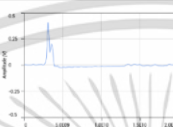
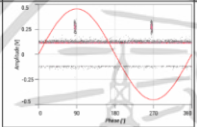
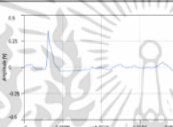
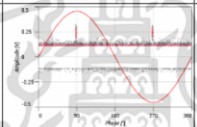
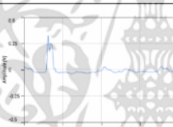
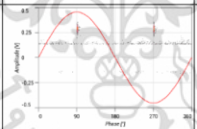
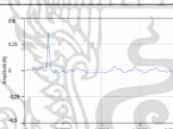
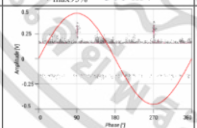
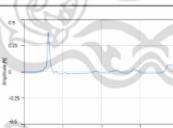
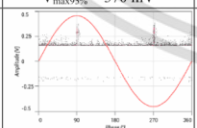
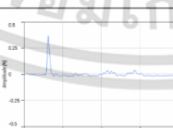
TAAS antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1	 $V_{\max 95\%} = 410 \text{ mV}$	
Model 2	 $V_{\max 95\%} = 350 \text{ mV}$	
Model 3	 $V_{\max 95\%} = 330 \text{ mV}$	

TABLE VII  
THE RESULTS OF UHF SIGNALS OBTAINED BY USING THE DESIGNED TAAS ANTENNAS IN TEST SETUP No.2

TAAS antenna	PRPD Patterns	Waveforms
Model 1	 $V_{\max 95\%} = 360 \text{ mV}$	
Model 2	 $V_{\max 95\%} = 370 \text{ mV}$	
Model 3	 $V_{\max 95\%} = 380 \text{ mV}$	

## 6. Conclusion

The performance of the designed antennas for UHF signal detection has been investigated in this paper. Based on the experimental results, the phase-resolved PD (PRPD) patterns of UHF signal detection were analyzed for all cases. In the narrowband UHF antenna sensor, the inset-fed rectangular microstrip patch (IFRMP) antenna demonstrated the ability to detect UHF signals with minimal background noise intensity. This intensity was lower than the cases of the wideband UHF antenna sensor, as the two-arm Archimedean spiral (TAAS) antenna. The broader frequency coverage of the TAAS antenna may make it more susceptible to interference from unrelated signals, influencing the distorted sensitivity of the signal from the high intensity of interference. In contrast, the wideband UHF antennas can represent more information, resulting in a higher statistical magnitude of the detected UHF signals. When signals span a wide range of frequencies, the narrowband antenna may not detect all relevant information. The different statistical magnitudes of UHF signals in each of the three different models of the designed UHF antennas correspond to the characteristics of multiple magnitudes varying across the frequency spectrum. These variations are influenced by propagation effects within the enclosure, including attenuation, reflection, dispersion, and interference.

All designed UHF antennas have been verified in the laboratory to detect simulated signals in the UHF range. This study provides information of the narrowband and wideband UHF antennas properties and the characteristics of UHF signals in this experiment. However, the selection of designed antennas should depend on the monitoring objectives and the expected frequency content of signals in the specific application.

## ACKNOWLEDGMENT

The author would like to express special thanks to ID ASSET CO., LTD. for supplying the measuring instruments, and other devices.

## References

- [1] B. F. Hampton, and R. J. Meats, "Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations," *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 135, no. 2, pp. 137-144, Mar. 1988.
- [2] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and P. Yuthagowith, "Partial discharge classification on high voltage equipment with K-Means," in *2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*, 2006, pp. 191-194.
- [3] S. Ludpa, N. Pattanadech, M. Leelajindakrairerk and P. Yuthagowith, "Pattern classification of partial discharge in high voltage equipment by regression analysis," in *2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2008, pp. 921-924.
- [4] UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification, CIGRE WG D1.25, Tech. Brochure 654, Apr. 2016.
- [5] High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods, IEC/Ts Standard 62478, Aug. 2016.

The 8<sup>th</sup> International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH2024)

- [6] P. Petchphung, M. Leelajindakrairerk, N. Pattanadech, P. Yuthagowith and K. Aunchaleevarapan, "The study of disc monopole antenna for partial discharge measurement," in *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*, 2007, pp. 1292-1296.
- [7] Y. Wang, J. Li, C. Li, B. Ouyang and Z. Zheng, "A study on a miniaturized planar spiral antenna for partial discharge detection in GIS," in *MATEC Web of Conferences*, 2015, pp. 02015.
- [8] Z. Cai, R. Wilkinson, and A. Bojovschi, "Partial discharge detection approach for a medium voltage switchgear system," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 144, pp. 221-228, Jan. 2014.
- [9] X. Zhang, Y. Han, W. Li, and X. Duan, "A rectangular planar spiral antenna for GIS partial discharge detection," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-7, Jun. 2014.
- [10] B. Hiçdurmaz, and Ö.F. Gümüş, "Design and analysis of 28 GHz microstrip patch antenna for different type FR4 claddings," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 265-288, Aug. 2019.
- [11] M.Z. Rahman, M. Mynuddin, and K.C. Debnath, "The significance of notch width on the performance parameters of inset feed rectangular microstrip patch antenna," *International Journal of Electromagnetics and Applications*, vol. 10, no. 1, pp. 7-18, Oct. 2020.
- [12] A. Gupta, S.K. Dargar, B. Raghavaiah and A.N. Rao, "Comparison between Rectangular Microstrip Patch Antenna with and without Defected Ground Structure at 1.85 GHz," in *2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, 2022, pp. 1-4.
- [13] R. Udaiyakumar, R. Maheswar, T. Janani, R. Vigneshram, I.S. Amiri, and P. Yupapin, "Performance enhancement of shorted polygonal archimedean spiral antenna using hybrid reflector," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 107, pp. 1-8, Jul. 2019.
- [14] H.B. Kim, K.C. Hwang, and H.S. Kim, "Cavity-backed two-arm spiral antenna with a ring-shaped absorber for partial discharge diagnosis," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 856-862, Jul. 2013.
- [15] T.K. Chen, and G.H. Huff, "Modal resistance of spiral antenna," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 5, pp. 223-228, May 2013.
- [16] K.P. Singh, R. Ranjan and R. Deshpande, "Design of a wideband Balun for Archimedean spiral antenna in energy harvesting," in *2015 International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2015, pp. 45-49.
- [17] J. Geng, X. Liu, C. Liu, and H. Guo, "A unidirectional ultra-wideband circularly polarized spiral antenna array," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 7, pp. 2569-2575, Mar. 2020.
- [18] M. Shi, X. Han, X. Zhang, Z. Zhang, and J. Li, "Effect of disconnector and high-voltage conductor on propagation characteristics of PD-induced UHF signals," *High voltage*, vol. 3, no. 3, pp. 187-192, Sep. 2018.
- [19] A. Darwish, S.S. Refaat, H. Abu-Rub, and H.A. Toliyat, "PD signal propagation in GIS: Ultra-high frequency detection-based modeling," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 16, pp. 9417-9426, Aug. 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธนาทร ใหม่เอี่ยม  
 วัน เดือน ปีเกิด 30 สิงหาคม 2542 ที่ระยอง  
 ที่อยู่ 4/157 หมู่บ้านสวนสุขสิริ ถ.วัดโหนดหิน-เขาไผ่ 2  
 ต.เนินพระ อ.เมืองระยอง จ.ระยอง 21150 โทร.0-3868-8345  
 ประวัติการศึกษา 2561 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย  
 โรงเรียนระยองวิทยาคม  
 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ. บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานทางวิชาการ

- 1) **Mai-eiam T., Raxsa J., Nimsanong P., Yutthagowith P.** “The Study of the Voltage Frequency Effects on Partial Discharge Characteristics.” **The 7th International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH)**, Feb. 2023. pp. 30-35
- 2) **Mai-eiam T., Nimsanong P., Yutthagowith P.** “Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment.” **The 17th International Symposium on EMC and transients in Infrastructures/International Student Session (ISET/ISS)**, Dec. 2023. pp. 45-50
- 3) **Mai-eiam T., Nimsanong P., Yutthagowith P.** “Design of Narrowband and Wideband UHF Antennas for Partial Discharge Detection on High Voltage Equipment.” **The 8th International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH)**, Feb. 2024. pp. 55-61