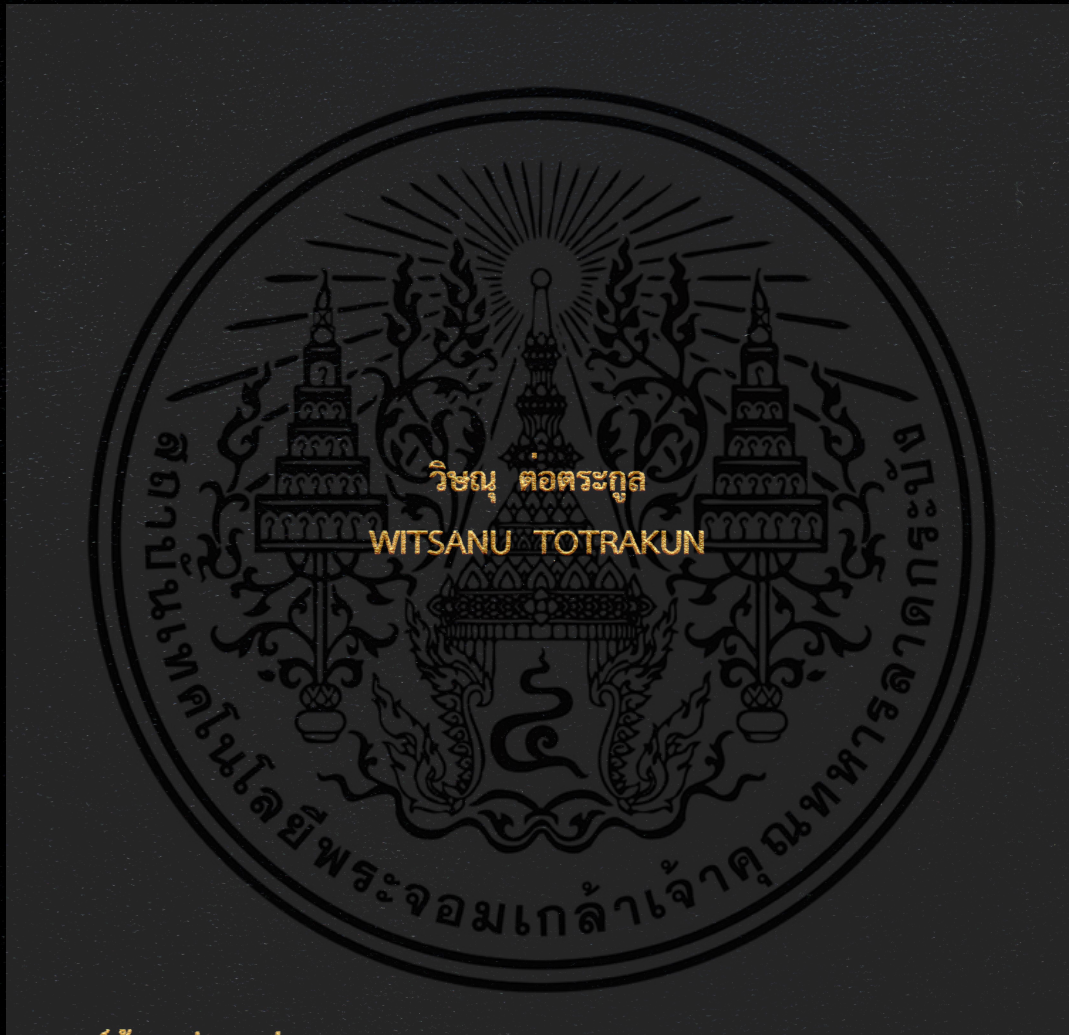


การตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

PARTIAL DISCHARGE IDENTIFICATION AND LOCATION USING ACOUSTIC
EMISSION TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-020-038

การตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

PARTIAL DISCHARGE IDENTIFICATION AND LOCATION USING ACOUSTIC
EMISSION TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาา KMITL-2016-EN-M-020-038 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARTIAL DISCHARGE IDENTIFICATION AND LOCATION USING
ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMUTL-2016-EN-M-020-038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

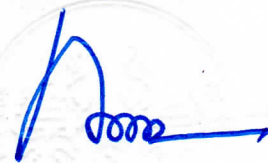
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง
Thesis Title Partial Discharge Identification and Location using Acoustic Emission
Technique
นักศึกษา นายวิษณุ ต่อดระกุล
รหัสประจำตัว 54610633
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-020-038

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.เกียรติ ชยะกุลศิริ	
ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์	
ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2559
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง
นักศึกษา	นายวิชณู ต่อตระกูล
รหัสประจำตัว	54610633
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินทร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับการตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบไม่ทำลาย การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะไม่ทำให้อุปกรณ์ทดสอบเสียหาย โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดลองใช้อะคูสติคเซ็นเซอร์ (AE Sensors) ในย่านความถี่ 1MHz และ 3MHz เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมนำไปใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วน อีกทั้งยังทำการทดลองตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนเพื่อหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEEE Std. C57.127: 2007 โดยการสร้างรูปทรงลูกบาศก์เสมือนหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงและนำอะคูสติคเซ็นเซอร์ (AE Sensors) จำนวน 3 ตัวไปติดตั้งเพื่อตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน เพื่อนำค่าสัญญาณมาคำนวณหาพิกัดตำแหน่งแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งสามารถนำสัญญาณที่วัดได้มาวิเคราะห์จำแนกประเภทและตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้องและนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าจริงได้

Thesis Title	Partial Discharge Identification and Location using Acoustic Emission Technique
Student	Mr. Witsanu Totrakun
Student ID.	54610633
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chow Chompoo-inwai

ABSTRACT

This thesis proposes the technique of how to identify and locate partial discharge (PD) using acoustic emission (AE) technique. Along with the identifying and locating techniques, MATLAB program was also created in this research to be used as a PD analyzer tool to calculate and display the PD identification and location results. This research key idea starts from the methodology and technique mentioned in IEC-60270 and IEEE C57.127-2007 Standard. Three different frequency bands of AE transducer were experimented: 1MHz and 3MHz to determine the best suit AE transducer to be used in this research. Different distances between laboratory-built PD source and AE transducer have been varied to assure the identification distance capability for each AE transducer of interest. For PD location experiment, the artificial model of the transformer has been built in the High Voltage Laboratory to represent the actual transformer's shape and dimension. The above PD source was set up inside such an artificial transformer model. Three almost identical AE transducers were installed outside such enclosure. The acquired analog signals from three AE transducers were gathered for computing and analyzing in MATLAB program through the Data Acquisition Board (DAQ) or Oscilloscope. From the experimental results, it is clear to be seen that the proposed technique is able to accurately identify PD pulses and locate the PD source at any position in the transformer model.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าไม่ได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่าน จึงจะขอกล่าวขอบพระคุณสำหรับทุกๆท่านเหล่านี้

กราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงเป็นอย่างมากที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาวิทยานิพนธ์เล่มนี้ทั้งหมดยิ่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลี้ยงดูสอนลูกให้เป็นคนดีและมอบโอกาสในการศึกษามาโดยตลอด

กราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เขาว์ ชมพูอินไหว ผศ.ดร.ชาย ชมพูอินไหวและ รศ.ดร.มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์ ที่ให้โอกาสจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คอยให้ความรู้ แนะนำสั่งสอน ให้ความเอาใจใส่ระหว่างการจัดทำเสมอมา ขอขอบพระคุณอย่างสูง

กราบขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ต่อผู้จัดทำโครงงานซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้คุมห้องทดสอบและพี่ช่างเทคนิคของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (HVES) และห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง (ESIRC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำทดสอบและเป็นสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณพี่ระดับปริญญาโทและปริญญาเอก เพื่อนในระดับปริญญาโทด้วยกัน ที่ประจำอยู่ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (HVES) ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง (ESIRC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและร้านวิจัยเจริญ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และการจัดสร้างอุปกรณ์ต่างๆในการทำทดสอบ ขอให้สิ่งศักดิ์จงอวยพรให้ทุกท่านมีความสุข ความเจริญและมีสุขภาพแข็งแรงด้วยเทอญ

วิษณุ ต่อตระกูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	4
2.2 ชนิดแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	5
2.3 ผลกระทบของการดิสชาร์จบางส่วน.....	5
2.4 ความสำคัญของการวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	6
2.5 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	6
2.5.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	6
2.5.2 วงจรสมมูลของการดิสชาร์จภายใน.....	6
2.5.3 ธรรมชาติพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน.....	8
2.6 หลักการวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	9
2.6.1 วงจรพื้นฐานการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน.....	9
2.6.2 การแสดงผลดิสชาร์จบางส่วน.....	10
2.7 คุณสมบัติของเครื่องวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	11
2.8 ระบบการวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัดประจุที่ปรากฏ (Apparent Charge).....	11
2.9 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่ไม่ใช่วิธีการทางไฟฟ้า.....	12
2.10 ทฤษฎีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย.....	12
2.10.1 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องบริเวณผิว.....	13
2.10.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องภายใน.....	16
2.11 ทฤษฎีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์.....	19
2.11.1 ระบบการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอิมพัลส์.....	20
2.11.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์.....	21
2.12 อุปกรณ์การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมพัลส์.....	21
2.12.1 หัวตรวจจับ (Sensor).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.2 อุปกรณ์กรองสัญญาณ.....	22
2.12.3 อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผล.....	22
2.13 ชนิดของคลื่นเสียง.....	23
2.13.1 แบบต่อเนื่อง (Continuous).....	23
2.13.2 แบบเป็นช่วง (Burst).....	24
2.14 ตัวแปรของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์.....	25
2.15 สัญญาณรบกวนและการกำจัดสัญญาณรบกวน.....	28
2.15.1 สัญญาณรบกวน.....	28
2.15.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน.....	28
2.16 พฤติกรรมของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์.....	29
2.16.1 ไคเซอร์เอฟเฟค (Kaiser effect).....	29
2.16.2 เฟลลิตีเอฟเฟค (Felicity effect).....	29
2.17 การคุณสมบัติหัวตรวจจับทางเสียง.....	29
บทที่ 3 แนวคิดและหลักการที่นำเสนอในงานวิจัย.....	
3.1 แนวคิดและหลักการที่นำเสนอ.....	31
3.2 การหาค่าความเร็วของคลื่นเสียงและตำแหน่งแหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมพัลส์.....	32
3.2.1 การคำนวณหาค่าความเร็วของคลื่นเสียง.....	32
3.2.2 การหาค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมพัลส์.....	33
3.3 อัตราเร็วของเสียง (Velocity of sound).....	35
3.4 การเลือกใช้หัวตรวจจับทางเสียง.....	35
3.5 วงจรการวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	37
3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.6.1 แหล่งกำเนิดโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงสูง.....	40
3.6.2 แหล่งกำเนิดโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงต่ำ.....	40
3.6.3 แหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนภายนอก.....	41
3.6.4 แหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนภายใน.....	41
3.6.5 หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือน.....	42
3.7 การวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	43
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	
4.1 ผลการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรแบบดั้งเดิม (MPD600).....	51
4.1.1 ผลการทดสอบบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์.....	51
4.1.2 ผลการทดสอบบนฐานเวลาอิลิปส์.....	55
4.2 การทดสอบดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	59
4.2.1 การทดสอบด้วยหัวตรวจจับย่านความถี่ 1MHz.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การทดสอบด้วยหัวตรวจจับย่านความถี่ 3MHz.....	77
บทที่ 5 สรุปผล	
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางนำไปพัฒนาในอนาคต.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก ก.....	97
ภาคผนวก ข.....	99
ภาคผนวก ค.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	108



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ลำดับขั้นตอนทำวิจัย.....	2
3.1 อัตราความเร็วเสียงในตัวนำชนิดต่างๆ.....	35
3.2 คุณลักษณะเฉพาะของหัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก.....	36
4.1 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	51
4.2 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	52
4.3 ผลการทดสอบดีสชาร์จตามผิว.....	53
4.4 ผลการทดสอบดีสชาร์จภายใน.....	54
4.5 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	55
4.6 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	56
4.7 ผลการทดสอบดีสชาร์จตามผิว.....	57
4.8 ผลการทดสอบดีสชาร์จภายใน.....	58
4.9 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	61
4.10 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	62
4.11 ผลการทดสอบดีสชาร์จตามผิว.....	63
4.12 ผลการทดสอบดีสชาร์จภายใน.....	64
4.13 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	66
4.14 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	67
4.15 ผลการทดสอบดีสชาร์จตามผิว.....	68
4.16 ผลการทดสอบดีสชาร์จภายใน.....	69
4.17 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	71
4.18 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	72
4.19 ผลการทดสอบดีสชาร์จตามผิว.....	73
4.20 ผลการทดสอบดีสชาร์จภายใน.....	74
4.21 ผลการหาตำแหน่งของดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกลุ่ม.....	76
4.22 ผลการหาตำแหน่งของดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบระนาบ.....	76
4.23 ผลการหาตำแหน่งของดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกระจาย.....	76
4.24 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	78
4.25 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	79
4.26 ผลการทดสอบดีสชาร์จตามผิว.....	80
4.27 ผลการทดสอบดีสชาร์จภายใน.....	81
4.28 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.29 ผลการทดสอบโคโรนาไวรัสซาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	84
4.30 ผลการทดสอบดิสซาร์จตามผิว.....	85
4.31 ผลการทดสอบดิสซาร์จภายใน.....	86
4.32 ผลการทดสอบโคโรนาไวรัสซาร์จทางด้านแรงสูง.....	88
4.33 ผลการทดสอบโคโรนาไวรัสซาร์จทางด้านแรงต่ำ.....	89
4.34 ผลการทดสอบดิสซาร์จตามผิว.....	90
4.35 ผลการทดสอบดิสซาร์จภายใน.....	91
4.36 ผลการหาตำแหน่งของดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกลุ่ม.....	93
4.37 ผลการหาตำแหน่งของดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบระนาบ.....	93
4.38 ผลการหาตำแหน่งของดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกระจาย.....	93
4.39 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งของดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกลุ่ม.....	94
4.40 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งของดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบระนาบ.....	94
4.41 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งของดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกระจาย.....	94



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ.....	5
2.2 วงจรสมมุติของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนทั่วไป.....	7
2.3 วงจรสมมุติของโคโรนาดิสชาร์จและดิสชาร์จตามผิว.....	7
2.4 แรงดันตกคล่อมแกปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัดขณะเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	8
2.5 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วนในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ.....	8
2.6 วงจรพื้นฐานสำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน.....	9
2.7 การแสดงผลของดิสชาร์จบางส่วน.....	10
2.8 การตรวจสอบด้วยสายตาภายในวัสดุทดสอบ.....	13
2.9 หลักการตรวจสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก.....	14
2.10 การตรวจสอบโดยใช้ผงแม่เหล็กบนวัสดุทดสอบ.....	14
2.11 หลักการตรวจสอบโดยใช้ของเหลวแทรกซึม.....	15
2.12 การตรวจสอบรอยเชื่อมโดยใช้ของเหลวแทรกซึม.....	15
2.13 หลักการตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน.....	16
2.14 การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวนบนวัสดุทดสอบ.....	16
2.15 หลักการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสี.....	17
2.16 การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสีรอยเชื่อมต่อ.....	17
2.17 หลักการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	18
2.18 การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกบนผิววัสดุทดสอบ.....	18
2.19 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีอื่นๆ.....	19
2.20 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน.....	20
2.21 หัวตรวจจับอะคูสติกอิมิชันผลิตภัณฑ์เพียโซอิเล็กทริก.....	22
2.22 Oscilloscope รุ่น Tektronic DPO 4054.....	23
2.23 สัญญาณอะคูสติกอิมิชันแบบต่อเนื่อง.....	24
2.24 สัญญาณอะคูสติกอิมิชันแบบเป็นช่วง.....	24
2.25 แสดงตัวแปรของสัญญาณอะคูสติก.....	25
2.26 แสดงลักษณะของสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน.....	27
2.27 การกำหนดระดับขีดจำกัดเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน.....	28
2.28 การสอบเทียบของหัวตรวจจับทางเสียงโดยวิธีการหักไส้ดินสอ.....	30
3.1 แผนภาพการตรวจจับการดิสชาร์จโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	31
3.2 แสดงการคำนวณหาค่าความเร็วของคลื่นเสียง.....	32
3.3 การติดตั้งหัวตรวจจับแบบสามเหลี่ยม.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
IX
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ใน 3 มิติ.....	34
3.5 หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก.....	35
3.6 หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก ก) 3MHz และ ข) 1MHz.....	36
3.7 วงจรออกแบบการวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	37
3.8 วงจรการวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	38
3.9 แหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงสูง.....	40
3.10 แหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงต่ำ.....	40
3.11 แหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนตามผิว.....	41
3.12 แหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนภายใน.....	41
3.13 แบบหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่ออกแบบ.....	42
3.14 หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น.....	42
3.15 สัญญาณที่บันทึกได้โดยการใช้ Oscilloscope.....	43
3.16 สัญญาณ PD ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV.....	44
3.17 FFT ของสัญญาณ PD ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV.....	44
3.18 สัญญาณแรงดันทดสอบและสัญญาณ PD ที่ลบผลจาก DC Offset.....	45
3.19 FFT ของสัญญาณ PD ที่ลบผลจาก DC Offset ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV.....	45
3.20 สัญญาณ PD ที่ลบผลจาก DC Offset ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV.....	46
3.21 สัญญาณ PD ที่ถูกรองโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้.....	46
3.22 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	48
4.1 แผนภาพการทดสอบและวิเคราะห์ดิสซาร์จบางส่วนในงานวิจัย.....	49
4.2 วงจรออกแบบตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม (MPD600).....	50
4.3 วงจรตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม (MPD600) ในห้องปฏิบัติการแรงสูง.....	50
4.4 วงจรการวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง.....	59
4.5 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกลุ่มโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 1MHz.....	60
4.6 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบระนาบโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 1MHz.....	65
4.7 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกระจายโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 1MHz.....	70
4.8 เวลาการเกิดสัญญาณเพื่อนำมาหาตำแหน่งดิสซาร์จบางส่วน.....	75
4.9 ผลการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งดิสซาร์จบางส่วนโดยหัวตรวจจับ 1MHz.....	75
4.10 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกลุ่มโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 3MHz.....	77
4.11 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบระนาบโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 3MHz.....	82
4.12 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกระจายโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 3MHz.....	87
4.13 เวลาการเกิดสัญญาณเพื่อนำมาหาตำแหน่งดิสซาร์จบางส่วน.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.14 ผลการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งดิซซาร์จบางส่วนโดยหัวตรวจจับ 3MHz..... 92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงการฉนวนมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นลักษณะคุณสมบัติของวัสดุฉนวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการฉนวน คือถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ เกิดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตหรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์เพียงบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ ความบกพร่องของฉนวนทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น และพัฒนาไปสู่การเสียหายอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งานจริงหรือในระหว่างที่ใช้งานอยู่จริง จึงเป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบถึงมาตรฐานการฉนวนของอุปกรณ์นั้นๆ ว่าเหมาะสมที่นำไปใช้อยู่หรือไม่

ปัจจุบันวงการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้านั้นมีความซับซ้อนต่อการตรวจวัดและมีราคาแพง ด้วยขีดจำกัดของการทดสอบแบบดั้งเดิม ทางผู้ทำการศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการแบบใหม่ขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน วิธีการที่จะนำเสนอคือการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง โดยอาศัยหลักการเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นมาจะมีคลื่นเสียงความถี่สูงแพร่กระจายออกมาในรูปของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง (Acoustic Emission Sensors) จะเปลี่ยนคลื่นเสียงทางกลเป็นคลื่นเสียงทางไฟฟ้าและนำสัญญาณไปวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบวงจรตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง เพื่อตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงที่ได้จำลองขึ้นและนำสัญญาณที่ได้มาเป็นข้อมูลสำหรับพัฒนาการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีการทดสอบแบบไม่ทำลายและการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียงเพื่อนำมาใช้ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้า
4. เพื่อศึกษากระบวนการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงจำลองที่สร้างขึ้น
5. ทำการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงเพื่อวิเคราะห์และระบุตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงจำลอง
6. อุปกรณ์การวัดที่คาดว่าจะสามารถใช้งานได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยทำการสืบค้นจากรฐานข้อมูล IEC, IEEE, ปรียญยานิพนธ์ วิทยานิพนธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องรวมถึงข้อมูลของอุปกรณ์ที่นำมาใช้
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับเรื่องการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและมาตรฐานเกี่ยวกับตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน IEC-60270
3. ศึกษาทฤษฎีการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยการใช้เทคนิคทางเสียง
4. ศึกษาทฤษฎีการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้า
5. ศึกษาหัวตรวจจับทางเสียงที่เหมาะสมเพื่อการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน
6. ออกแบบและทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

1.4 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย

ตารางที่ 1.1 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย

การทำงาน	ปีการศึกษา					
	2556		2557		2558	
	ภาคเรียน		ภาคเรียน		ภาคเรียน	
	1	2	1	2	1	2
1. ค้นคว้ามาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	—————		—————			
2. ศึกษาการวัดดิสชาร์จบางส่วน	—————		—————			
3. นำข้อมูลที่ได้มาสรุปเพื่อนำมาออกแบบการทดสอบ			—————			
4. ออกแบบอุปกรณ์วัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง			—————			
5. จัดเตรียมและสร้างอุปกรณ์วัดที่ออกแบบ			—————			
6. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ			—————			
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ				—————		
8. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์					—————	

————— การวางแผน - - - - - การปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคทางเสียง โดยการสร้างอุปกรณ์ขึ้นนี้ขึ้นมาเพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. การตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงเป็นการวัดดิสซาร์จบางส่วนแบบไม่ทำลายซึ่งวิธีนี้จะสามารถรักษาอุปกรณ์ที่ทดสอบให้ยังคงสภาพใช้งานได้ต่อไปและไม่ต้องหยุดอุปกรณ์ที่ทดสอบในขณะที่กำลังทำการทดสอบ

2. การตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงนั้นสามารถนำค่ามาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะสามารถนำค่ามาวิเคราะห์หาตำแหน่งการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงจำลองที่สร้างขึ้นได้

3. การตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงมีความสะดวกและง่ายต่อการทดสอบกว่าแบบดั้งเดิม

4. เพื่อทำการวัดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน เมื่อนำหัวตรวจจับทางเสียงย่านความถี่ 3MHz และ 1MHz มาติดตั้งเพื่อตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนจะทราบว่าหัวตรวจจับทางเสียงมีคุณสมบัติและมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันหรือไม่

5. การตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้นทำให้ผู้ทดสอบมีได้รับประสบการณ์จริง และมีความชำนาญในการวัดดิสซาร์จบางส่วนมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ไม่ว่าจะเป็นสายส่งจ่าย หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก็ตาม ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด เกิดมีค่าความเครียดสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤต หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ หรือเบรกดาวน์เพียงบางส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะเกิดแนวที่ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดต่ำพอหรือไม่ อีกนัยหนึ่งก็คือ พลังงานที่ทำให้เกิดดิสชาร์จมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนแปลงไปเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรดจึงเรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน เพราะว่าฉนวนของอิเล็กโทรด ด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ ซึ่งอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ

นิยามดิสชาร์จบางส่วน Kreuger [1] ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า “ดิสชาร์จบางส่วนเป็นการคายประจุทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงกันระหว่างอิเล็กโทรด” ดิสชาร์จบางส่วนจัดอยู่ในกลุ่มใหญ่ของก๊าซดิสชาร์จ ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า แล้ววิ่งชนโมเลกุลของก๊าซก่อนเป็นอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน และทิ้งไอออนบวกนี้ไว้เบื้องหลัง ที่เคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรดอีกด้านหนึ่ง อิเล็กตรอนและไอออนบวกนี้จะเส้นทางให้กระแสไหลผ่านก๊าซได้

ดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นทุกๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด [2]

พัลส์ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้ง จะมีพลังงานถ่ายเทให้กับฉนวน ในลักษณะชกกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหายได้ อายุการใช้งานของฉนวนก็จะสั้นลง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบชิงอากาศ เรียกว่า โคโรนา ย่อมหมายถึง การเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดิสชาร์จดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไประบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

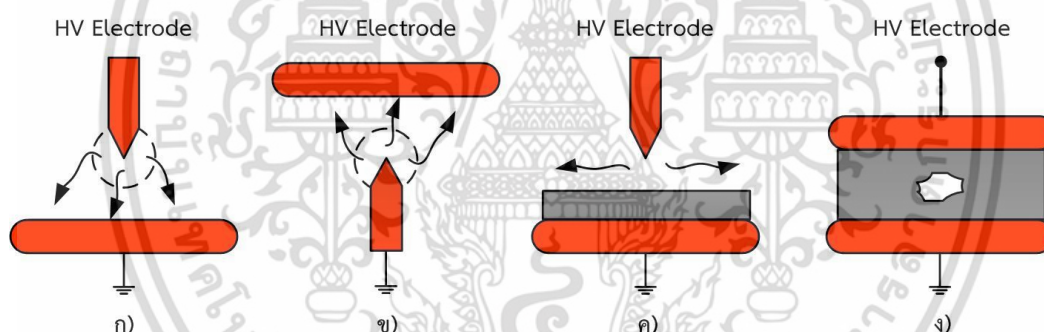
ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้อย่างยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพเพียงพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติ จะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน จะต้องไม่มีดิสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินอันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม เพื่อความ

มั่นใจในคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนตามที่มาตรฐานกำหนด [2]

2.2 ชนิดแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งตามลักษณะที่เกิดได้ 3 แบบคือ

1. โครนาดิสชาร์จ (Corona discharge or external discharge) เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลมซึ่งต่ออยู่กับไฟฟ้าแรงดันสูงเรียกว่าโครนาด้านแรงสูง ดังรูปที่ 2.1 ก) หรือปลายอิเล็กโทรดต่อกราวด์ เรียกว่า โครนาด้านแรงต่ำ ดังรูปที่ 2.1 ข)
2. ดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge) เกิดบริเวณผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกับผิวสูง อาจเกิดร่องรอยกัดกร่อนซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้า (tracking) ดังรูปที่ 2.1 ค)
3. ดิสชาร์จภายใน (Internal partial discharge) จะเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีค่าความคงทนได้อิเล็กทริกต่ำมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้เนื้อฉนวนส่วนนี้เกิดเบรกดาวนก่อน ดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นเนื่องจากมีโพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวนที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ดังรูปที่ 2.1 ง)



รูปที่ 2.1 ดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

2.3 ผลกระทบของการดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะการชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิปกติขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหายอายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบชิงอากาศเรียกว่า โครนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโครนาพัลส์ดิสชาร์จดังกล่าวทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ เรียกว่าคลื่นรบกวนวิทยุ

การเกิดดิสชาร์จเป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์หลายอย่าง คือ

1. ปฏิกิริยาทางไฟฟ้า (Electric phenomena)

- เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric losses)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท สยามไฮดรอลิก จำกัด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เกิดกระแสพัลส์ไฟฟ้าขึ้นขณะที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน (Electric pulses)
- 2. เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation)
- 3. เกิดเรืองแสง (Light)
- 4. เกิดความร้อน (Heat)
- 5. เกิดเสียงรบกวนฮิสซิง (Hissing Noise)
- 6. เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น (Gas pressure)
- 7. เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical transformations)

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานไต่ยาวนานไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน จะต้องไม่มีดิสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินอันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้นอย่างไรก็ตาม การฉนวนอุปกรณ์แรงสูง มีความยุ่งยากซับซ้อน PD อาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจหรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่า PD วัดค่าแรงดันคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio Interference Voltage = RIV) ตามที่มาตรฐานกำหนด

2.4 ความสำคัญของการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

สิ่งที่ควรคำนึงถึงการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

1. Detection ตรวจจับว่ามีหรือไม่มีดิสชาร์จบางส่วน ผลที่ได้คือ U_i (inception voltage)
2. Measurement หาขนาดของดิสชาร์จบางส่วน โดยวิธี electric
3. Location ตำแหน่งที่เกิด (ยกตัวอย่าง Transformer, Cable, Transmission Line) ใช้ฟังเสียง ดูแสง
4. Evaluation PD ขนาดไหนจะเกิดอันตราย (ตัวอย่างในเคเบิลและในหม้อแปลง) $\leq 5\text{pC}$
 $\leq 500\text{pC}$

2.5 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

2.5.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์โดยตรง พลังงานการกระแทกจากอิเล็กตรอนหรือ ไอออนพลังงานสูงจะทำให้ฉนวนเกิดความร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเหตุให้ฉนวนเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์จะสั้นลงและนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้เร็วที่สุด ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนั้นแล้วดิสชาร์จบางส่วนยังก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio interference) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสาร มาตรฐานจึงกำหนดให้มีการทดสอบตรวจวัดค่า PD [2]

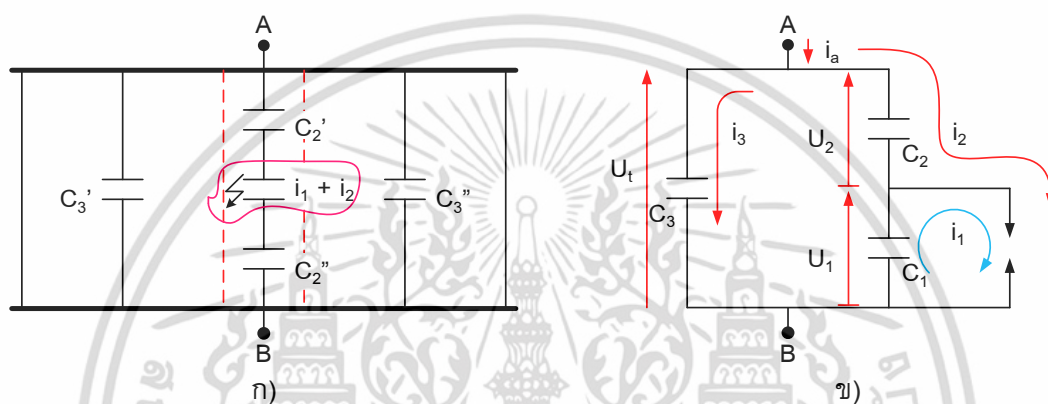
2.5.2 วงจรสมมูลของการดิสชาร์จภายใน

โดยสาเหตุที่ดิสชาร์จบางส่วนภายในฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้จึงมีการเขียนวงจรสมมูลย์สำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซขึ้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้ว วงจรสมมูลของดิซาร์จภายในนั้น จะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้า กระแสสลับ ถ้ากล่าวถึงดิซาร์จบางส่วนอย่างล่อยๆ ก็ให้หมายถึงดิซาร์จภายใน วงจรสมมูลสำหรับ ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขณะเกิดดิซาร์จบางส่วนอาจแทนด้วยตัวเก็บประจุ C_3 , C_2 , C_1 และ แกป G ตามลำดับ โดยที่แกป G จะแทนการลัดวงจรขณะเกิดดิซาร์จบางส่วน

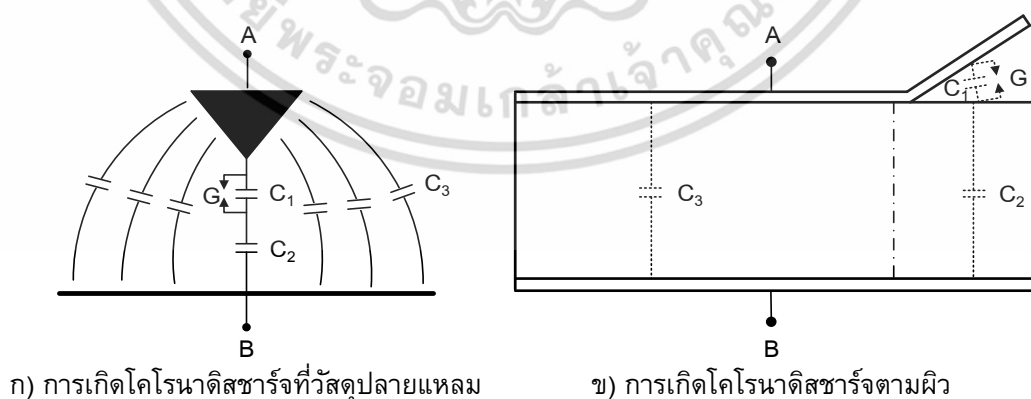
โดยที่ $C_3 = C_3' + C_3''$
และ $C_2 = C_2' C_2'' / (C_2' + C_2'')$

ดังรูปที่ 2.2 ในทางปฏิบัติจะพบว่า $C_3 \gg C_2 \gg C_1$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของการเกิดดิซาร์จบางส่วนทั่วไป

แต่อย่างไรก็ตามวงจรสมมูลในรูปที่ 2.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโคโรนาดิซาร์จและ ดิซาร์จตามผิวได้ โดยการแทนส่วนต่างๆ ของฉนวนหรืออากาศรอบๆ ด้วยค่าความจุไฟฟ้าและแกป G [2] ดังรูปที่ 2.3



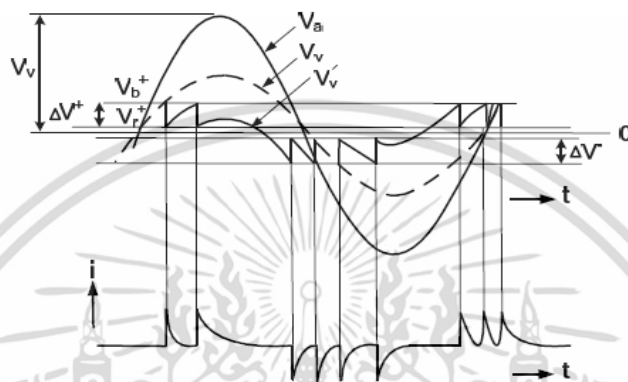
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของโคโรนาดิซาร์จและดิซาร์จตามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ธรรมชาติพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน

1. การดิสชาร์จซ้ำ

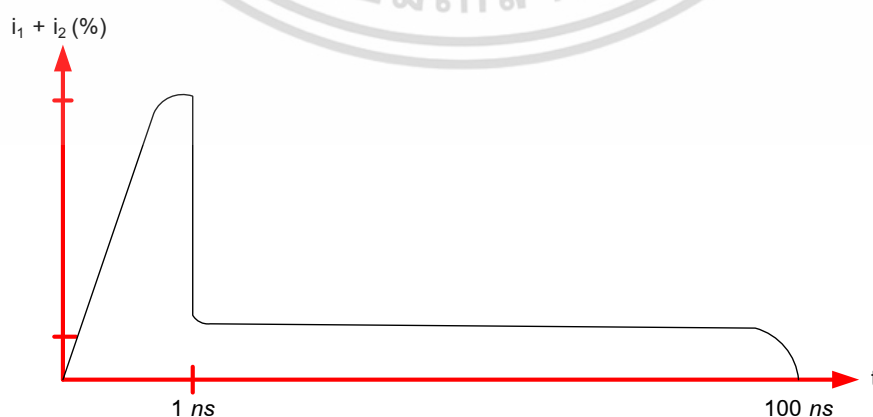
ในทางปฏิบัติดิสชาร์จบางส่วน อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลาดังรูปที่ 2.4 โดยที่ V_a คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ V_b คือ แรงดันเบรกดาวนของโพรงอากาศ หรือแก๊ป V_r คือ แรงดันหลังเบรกดาวนของโพรงอากาศหรือแก๊ป V_v คือ แรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแก๊ป ถ้าไม่มีการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนเลย และ i คือ กระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 แรงดันตกคร่อมแก๊ปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัดขณะเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2. ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊ปหรือโพรงอากาศเล็กๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.5 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านแก๊ปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊ปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแก๊ปหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว กระแสที่ลดลงจะยังคงไหลต่อเนื่องไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก ซึ่งจะพบว่ากระแสพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนจะมีช่วงเวลาน้อยกว่า 5 นาโนวินาที เพราะว่าดิสชาร์จบางส่วนเกิดในที่แคบๆ ฉนวนเนื้อเดียว เช่น ก๊าซ จะมีช่วงเวลาน้อยกว่า 5 นาโนวินาที และเวลาส่วนทาง คลื่นจะยาวกว่าช่วงเวลานั้น สำหรับในอากาศกระแสพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน มีช่วงเวลาเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาที



รูปที่ 2.5 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วนในทางทฤษฎีสำหรับแก๊ปเล็กๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

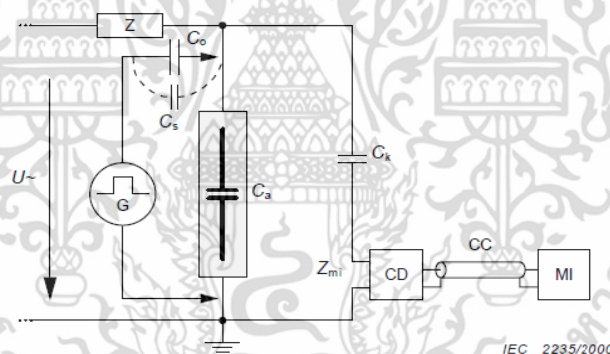
2.6 หลักการตรวจจับสนดิสชาร์จบางส่วน

การตรวจจับสนดิสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของดิสชาร์จบางส่วน อย่างไรก็ตามการวัดผลของดิสชาร์จบางส่วนในเชิงปริมาณที่ได้ผลที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับสนดิสชาร์จที่ขั้วสายของอุปกรณ์

2.6.1 วงจรพื้นฐานการตรวจจับสนดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับสนดิสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 จะประกอบด้วย

- $U\sim$: แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ
- Z_f : ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์
- C_a : วัสดุทดสอบ (Test object)
- C_k : ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Connecting capacitor)
- CD : อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device)
- CC : สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable)
- MI : เครื่องมือวัด (Measuring instrument)



รูปที่ 2.6 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับสนดิสชาร์จบางส่วน [3]

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอดดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ เป็นต้น

ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจาก แหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิก และดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย เป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกันดิสชาร์จบางส่วน จากวงจรทดสอบที่ไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจากดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High Voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

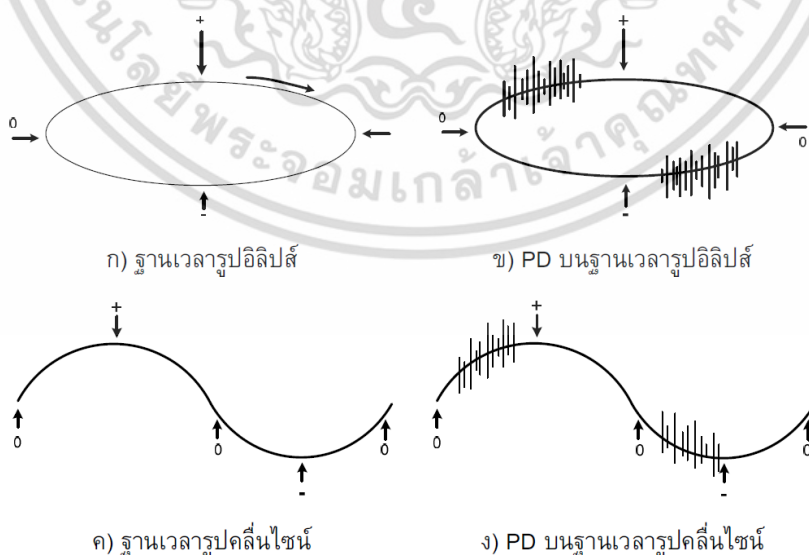
(High Voltage low-pass filter) เป็นต้นดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจากดิสชาร์จ บางส่วนที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจะไม่จำเป็นต้องกรองอีก

ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจร ระหว่าง C_a , C_k และ CD ซึ่งมีอินพีแดนซ์ต่ำสำหรับดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจากดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ

อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์โมนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ส่วนเครื่องมือวัด M ทำหน้าที่อีก 3 ประการคือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบเพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผลดิสชาร์จบางส่วน หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน เริ่มจากค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a

2.6.2 แสดงผลดิสชาร์จบางส่วน

การแสดงผลของดิสชาร์จบางส่วนนิยมแสดงบนฐานเวลารูปอิลิปส์ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.7 หรือการแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ การแสดงดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปอิลิปส์คือสามารถแยกแยะได้ว่าดิสชาร์จบางส่วนเกิดจากสาเหตุอะไร



รูปที่ 2.7 การแสดงผลของดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 คุณสมบัติของเครื่องตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270

1. เวลาแยกชัตของเครื่องตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน กำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 100 sec ในกรณีที่ไมเกิดการผิดพลาดเนื่องจากการซ้อนทับของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน
2. เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐาน ใช้สำหรับจ่ายกระแสพัลส์มาตรฐาน กำหนดให้ใช้แรงดันที่มีช่วงเวลานขึ้นไม่เกิน 0.1 sec และลดลงด้วยค่าคงตัวอยู่ในช่วง 100 – 100 sec
3. ความไวของเครื่องตรวจวัดจะต้องมีความสามารถจับพัลส์ต่ำสุดเป็น 2 เท่าของสัญญาณรบกวน
4. เครื่องกำเนิดพัลส์คู่ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติ Superposition ของเครื่องตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนนั้นต้องสามารถสร้างพัลส์ขนาดเท่ากัน 2 พัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลาขาขึ้นไม่เกิน 20n sec และมีความกว้างของพัลส์จากค่า 10% ของหน้าคลื่นถึงหางคลื่นต้องไม่เกิน 150n sec โดยทั้ง 25 พัลส์นี้สามารถปรับระยะห่างได้อย่างน้อย 0.2 – 100 sec สำหรับเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ปกติประมาณ 50 – 60 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับค่าต้องไม่เกิน 150 pF สำหรับการทดสอบในเคเบิล
5. เครื่องตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบเคเบิลยอมให้เกิด Superposition ทางลบได้ไม่เกิน 10% ในกรณีที่เกิน 10% จะต้องนำผลอันนี้มาพิจารณาในการวัดด้วย

2.8 ระบบการวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัดประจุที่ปรากฏ (Apparent Charge)

1. ระบบวัดประจุปรากฏ (c) นี้จะวัดเฉพาะค่ายอดพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนที่มีค่าสูงสุดและเกิดซ้ำๆ ทุกคาบเวลาความถี่ที่ใช้ของแรงดันทดสอบ การอ่านค่าของอุปกรณ์วัดจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรตรวจจับค่ายอดแบบอนุลือกที่มี Electric Charge Time Constant สั้นมากและมี Electric Charge Time Constant < 0.44 วินาที การตอบสนองของระบบวัดที่มีต่อพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์เท่ากันที่ถูกป้อนด้วย Pulse Repetition Frequency, N จะทำให้ค่าที่ระบบวัดอ่านได้

2. ระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน แยกกว้างจะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer Impedance, $Z(f)$ ดังนี้

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

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

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

3. ระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน แยกแคบจะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer Impedance, $Z(f)$ ดังนี้

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

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 400 \text{ kHz}$$

โดยที่ f_m สามารถปรับค่าได้ และกำหนดให้ขนาดของ $Z(f)$ ที่ความถี่ $f_m + f$ มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วง Pass-band 20 dB

4. ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดยอมให้ Scale Factor, k ผิดพลาดได้อย่างน้อย 5%

2.9 การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่ไม่ใช้วิธีการทางไฟฟ้า

ตัวอย่างการตรวจวัดด้วยวิธีอื่นๆ นอกเหนือจากวิธีทางไฟฟ้าที่สามารถใช้ในการจำแนกสาเหตุของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการบันทึกสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ 10 kHz – 2 GHz ซึ่งพบว่าสเปกตรัมที่บันทึกได้จากสาเหตุต่างๆของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน GIS จะให้สเปกตรัมที่ต่างกันออกไป [2] และพบว่าสเปกตรัมในช่วงความถี่วิทยุของดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตรวจจับโดยแคลมป์กระแสในสายนิวตรอน สามารถนำมาจำแนกในการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์และการเกิดอาร์คระหว่างปลายขดลวดสองชุดที่อยู่ติดกันได้
2. การกระจายความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงเวลาระหว่างพัลส์ที่เกิดขึ้นติดกัน การกระจายนี้ใช้ในการพิจารณาความเป็นไปได้ที่วัตถุอิสระซึ่งนำไฟฟ้าได้ใน GIS จะสามารถเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสับบาร์อันจะเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์
3. รูปลักษณ์ของคลื่นเสียงส่วนใหญ่ใช้ในการรู้จำความผิดปกติใน GIS
4. สเปกตรัมความถี่ของคลื่นเสียง มักตรวจในย่านความถี่ไม่เกิน 2 MHz ซึ่งพบว่าสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้จากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากสาเหตุต่างๆ ในน้ำมัน เช่น โครโนา วัตถุอิสระที่นำไฟฟ้า และฟองอากาศมีความแตกต่างกันและพบว่า ลักษณะสเปกตรัมกับขนาดของโพรงอากาศในเนื้อฉนวนมีความสัมพันธ์กัน
5. การกระจายของขนาดพัลส์ของแสงตามมุมเฟสใช้ในการสังเกตการเกิดเบรกดาวน์ในระยะแรก ซึ่งการเกิดการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า (Electroluminescence) จะมีความสัมพันธ์กับการฉีดประจุ (Charge Injection) การเกิด Microchannel และการขยายตัวของทรี (Tree)
6. สัญญาณพัลส์ที่ตรวจวัดได้ในย่านรังสีอินฟราเรดร่วมกับค่าแรงดันทดสอบ ใช้ในการตรวจจับการก่อตัวของลีดเดอร์ของดิสชาร์จใน GIS

จากวิธีการตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ได้กล่าวมานี้ จะพบว่าสัญญาณที่สามารถใช้ในการจำแนกแหล่งกำเนิดของดิสชาร์จบางส่วนมีหลายแบบ แต่ละแบบมีความสามารถในการจำแนกสาเหตุในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต่างๆ กันไป จะต้องเลือกวิธีการตรวจวัดที่สามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายประเภท และต้องมีความสามารถในการจำแนกดิสชาร์จบางส่วนจากสาเหตุต่างๆ ได้ดี

2.10 ทฤษฎีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Examination : NDE) หรือการทดสอบแบบไม่ทำลาย(Non-Destructive Testing : NDT) เป็นการทดสอบวัสดุชิ้นงานโดยไม่ทำลายสภาพเดิมของชิ้นงานให้เกิดความเสียหาย รอยขีดข่วน การแยกส่วน หรือการแตกหักเสียหาย เพื่อตรวจสอบลักษณะสมบัติสมรรถภาพ โครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่อยู่ภายใน โดยใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานทดสอบ เช่น แสง ความร้อน รังสี คลื่นเสียง ไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็ก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ ซึ่งการตรวจสอบแบบไม่ทำลายดังกล่าวจะเป็นการวัดลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์เหล่านี้ เพื่อประเมินความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ได้ การตรวจสอบแบบไม่ทำลายนั้นมีอยู่หลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการด้วยกัน โดยวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็วที่สุดประหยัดที่สุด และมีประสิทธิภาพ คือวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing) [4] ซึ่งจัดได้ว่าเป็นการตรวจสอบขั้นแรกของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย สำหรับการแบ่งประเภทของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ

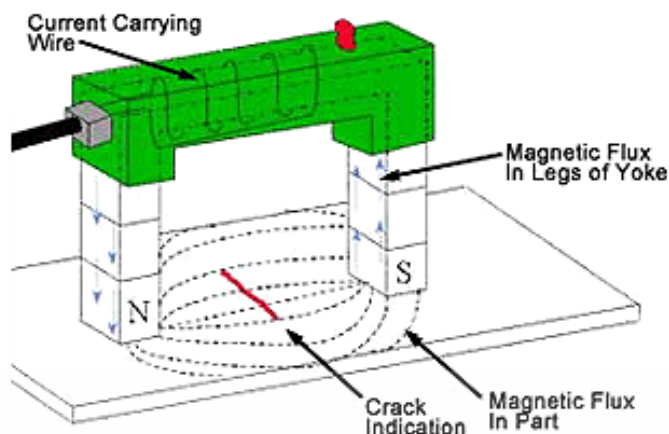
2.10.1 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องบริเวณผิว

1. การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing) ใช้ในการตรวจสอบหาตำหนิที่ผิวงานทั้งด้านนอกและด้านใน โดยทั่วไปจะใช้สายตา แต่บางกรณีจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย เช่น แว่นขยาย ไม้บรรทัด เวอร์เนีย หรือเกจวัดพิเศษ เพื่อใช้วัดหาขนาดของรอยแตก สิ่งบกพร่อง รอยเหลื่อม (Overlapped) หลุมบ่อต่างๆ ความสูงของตะเข็บเชื่อม หรือระยะของการกัดขอบงาน (Undercut) เป็นต้น



รูปที่ 2.8 การตรวจสอบด้วยสายตาภายในวัสดุทดสอบ

2. การตรวจสอบโดยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing) เป็นการทดสอบวัสดุที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ ประกอบด้วยอะตอมที่รวมอยู่กันเป็นกลุ่มซึ่งเรียกว่า โดเมนของแม่เหล็ก (Magnetic domain) โดเมนเหล่านี้จะมีขั้วบวกและลบอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม วัสดุก่อนถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กจะมีการเรียงตัวของโดเมนอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดการหักล้างกันและไม่ส่งผลการเป็นอำนาจแม่เหล็ก เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าลงสู่ขดลวดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและสร้างสนามแม่เหล็กตามยาววิ่งในวัตถุ ถ้าวัตถุที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กก็จะทำให้อนุภาคแม่เหล็กไปเกาะอยู่กันเป็นกลุ่มอย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หลักการตรวจสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก

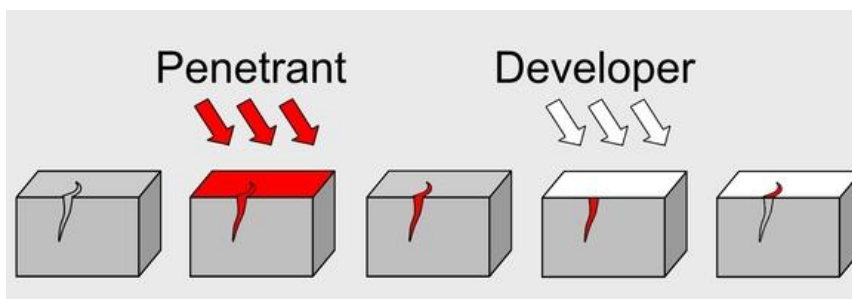
การตรวจสอบโดยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อตรวจสอบหาตำหนิที่ผิวงาน รอยแตก ร้าว และตำหนิใต้ผิวงานที่อยู่ลึกลงไปประมาณ 2-3 มิลลิเมตรจากผิวหน้าของชิ้นงานที่ไม่มีปากเปิดสู่ผิวบน สามารถบอกให้รู้ถึงตำแหน่ง รูปร่าง และขนาดของรอยบกพร่องที่มีอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การตรวจสอบโดยใช้ผงแม่เหล็กบนวัสดุทดสอบ

3. การตรวจสอบโดยใช้ของเหลวแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing) ใช้หลักการดูดซึมสารแทรกซึมลงไปบนรอยความไม่ต่อเนื่องที่เรียกว่า อากัปภิกิริยาท่อเล็ก (Capillary action) แรงดึงดูดจะมากขึ้นอยู่กับขนาดของรอยความไม่ต่อเนื่องแรงดัน โดยทำการพ่นสารแทรกซึมชนิดที่มองเห็นด้วยตาเปล่าลงไปบนวัสดุทดสอบโดยปกติจะมีสีแดงทิ้งไว้ประมาณ 15-20 นาที ทำความสะอาดและพ่นดีเวลอปเปอร์ซึ่งเป็นสีขาวเมื่อมีรอยความไม่ต่อเนื่องสารแทรกซึมจะปรากฏเป็นสีแดงออกมา แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 หลักการตรวจสอบโดยใช้ของเหลวแทรกซึม

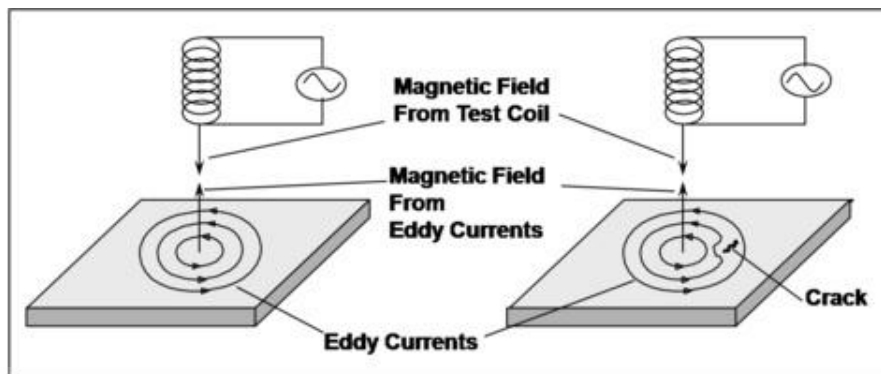
การตรวจสอบโดยใช้ของเหลวแทรกซึม ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อตรวจสอบหารอยแตก ร้าว เฉพาะที่บริเวณผิวเท่านั้น และต้องเป็นตำหนิที่เป็นปากเปิดออกสู่ภายนอก ไม่สามารถใช้ตรวจสอบกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนได้ มีหลักการคือ ทาสารละลายทดสอบบนผิวหน้าชิ้นงานที่จะตรวจสอบ เพื่อให้สารละลายแทรกซึมเข้าสู่รอยบกพร่อง แล้วใช้สารละลายสร้างภาพซึ่งจะทำหน้าที่ดูดซับสารละลายที่แทรกซึมอยู่ในรอยบกพร่องออกมา ทำให้เกิดรูปร่างของรอยบกพร่องได้อย่างชัดเจนจนสามารถตรวจพบด้วยตาเปล่าได้แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การตรวจสอบรอยเชื่อมโดยใช้ของเหลวแทรก

4. การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current Testing) เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าใกล้วัสดุทดสอบบริเวณรอบๆ ขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กกระทำต่อวัสดุทดสอบ เนื่องจากสนามแม่เหล็กของขดลวดนั้นได้รับไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำจะมีทิศทางและขนาดแปรเปลี่ยนไปตามเวลาจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุทดสอบเรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดันที่เกิดขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กบนวัสดุทดสอบลักษณะกระแสที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า กระแสไหลวน (Eddy Current) ขนาดของกระแสไหลวน การกระจายขึ้นอยู่กับจำนวนความถี่ ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ รูปร่างของวัสดุทดสอบ กระแสในขดลวดจะเปลี่ยนแปลงตามการเกิดรอยบกพร่อง แสดงดังรูปที่ 2.13

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 หลักการตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน

การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน ใช้ตรวจสอบหาตำหนิที่ผิวงานรอยแตกร้าวและตำหนิที่อยู่ใต้ผิวงานลงไปเล็กน้อย มีข้อได้เปรียบคือสามารถตรวจสอบได้โดยไม่ต้องทา Couplant gel และสามารถตรวจสอบได้โดยหัวตรวจสอบไม่ต้องสัมผัสใกล้ชิด แต่ข้อจำกัด คือ วัสดุที่จะตรวจสอบต้องเป็นตัวนำเท่านั้น ตรวจสอบรอยแตกร้าวจากค่าของกระแสที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 2.14



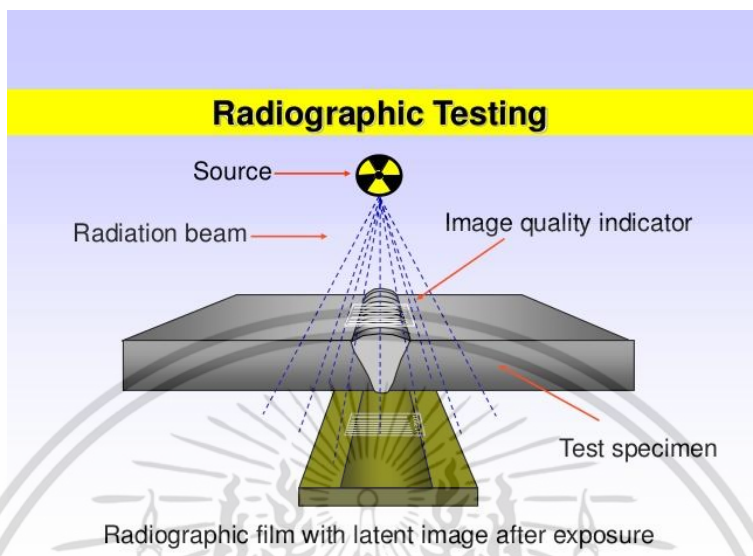
รูปที่ 2.14 การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวนบนวัสดุทดสอบ

2.10.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องภายใน

1. การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing) ใช้ในการตรวจสอบหาตำหนิที่อยู่ลึกเข้าไปตามแนวรังสีโดยใช้รังสีเอ็กซ์ (X-Ray) หรือรังสีแกมมา (Gamma-Ray) ฉายผ่านเนื้อวัสดุงานและไปทำปฏิกิริยากับฟิล์มที่อยู่ด้านหลัง จึงสามารถตรวจสอบหาสิ่งบกพร่องภายในได้ เช่น รุพ รุน รอยแตกร้าว การหลอมละลายไม่เพียงพอ สแลกฝังใน เป็นต้น โดยรังสีเอ็กซ์จะไดมาจากกระแสไฟฟ้าที่กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดที่บรรจุอยู่ในหลอดสุญญากาศด้วยความเร็วสูงและก่อให้เกิดลำของรังสีเอ็กซ์ขึ้นมา ส่วนรังสีแกมมาจะได้มาจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตภาพรังสีโดยตรง ปริมาณของรังสีที่ฉายผ่านชิ้นงานหรือวัสดุจะถูกดูดกลืนไว้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาชิ้นงานและความหนาแน่นของวัสดุ รังสีที่ผ่านจุดบกพร่องจะถูกดูดกลืนได้น้อยเนื่องจากจุดบกพร่องมีความหนาแน่นต่ำกว่าเนื้อโลหะ รังสีจึงผ่านมาทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้มาก เมื่อนำฟิล์มไปล้างจะพบว่าตำแหน่งที่มีตำหนิหรือจุดบกพร่องจะมีสีดำเข้มมากกว่าบริเวณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่วัสดุมีความหนาเท่ากัน ในลักษณะเดียวกัน ชิ้นงานที่บางจะมีความเข้มที่ปรากฏบนฟิล์มมากกว่า ชิ้นงานหนาแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หลักการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสี

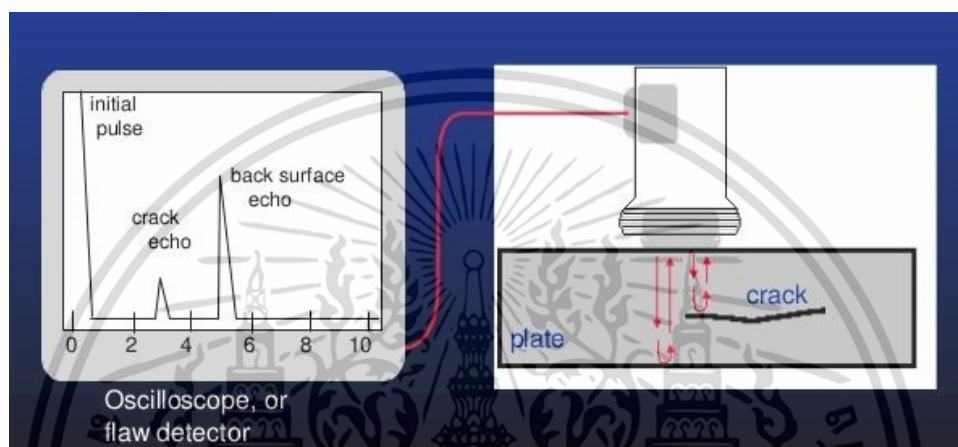
การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสี สามารถวิเคราะห์หารอยบกพร่องโดยแปรผลจากฟิล์มได้ง่ายกว่าการแปลผลจากสัญญาณของการทดสอบวิธีอื่นและนำภาพฟิล์มไว้เป็นหลักฐาน เพื่อตรวจสอบผลการทดสอบและความถูกต้องย้อนหลังได้ ชนิดของวัสดุไม่เป็นข้อจำกัดของการถ่ายภาพด้วยรังสี ในกรณีที่ชิ้นงานทดสอบต่างชนิดกัน ความสามารถในการทะลุผ่านก็จะไม่เท่ากัน เช่น ถ้าใช้รังสีเอกซ์ขนาด 150 kV ถ่ายภาพด้วยรังสีของงานที่เป็นเหล็กขนาด 1 นิ้ว ถ้าวัสดุที่ทำจากทองแดงความหนา 1 นิ้ว จะมีขนาดเทียบเท่ากับ ความหนาของเหล็กขนาด 1.6 นิ้ว การทดสอบมีความอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากจะมีรังสีสะสมในร่างกายการทดสอบจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้งหัวถ่ายภาพรังสี แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสีรอยเชื่อมท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing) เป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้ในการตรวจสอบหาจุดบกพร่องที่อยู่ในชิ้นงานลึกโดยการส่งคลื่นเสียงความถี่สูงแพร่ผ่านเข้าไปภายในเนื้อของชิ้นงานตรวจสอบ คลื่นที่ผ่านเข้าไปนั้นจะกระทบกับจุดบกพร่องหรือตำหนิและสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดคลื่น ส่วนคลื่นที่ไม่กระทบกับจุดบกพร่องจะผ่านเลยไปยังผนังด้านหลังของชิ้นงาน คลื่นที่สะท้อนกลับและผ่านเลยไปนั้นจะนำมาวิเคราะห์หาจุดบกพร่อง เช่น รอยแตก ร้าว รูพรุน การหลอมละลายไม่เพียงพอ ตลอดจนสิ่งบกพร่องอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 หลักการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ทำให้ระบบการประมวลผลสามารถทำได้ในระบบการประมวลผลร่วม ดังนั้นการแสดงผลที่หน้าจอจึงสามารถแสดงออกได้หลายรูปแบบจึงทำให้สะดวก ในการทดสอบและวิเคราะห์ผลขณะทดสอบไปพร้อมๆกัน แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกบนมิวส์ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีอื่นๆคือ กระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายดังที่ได้กล่าวมานั้นเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ ยังมีวิธีการตรวจสอบแบบอื่นๆอีก เช่น การตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน (Acoustic Emission Testing) การตรวจสอบด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Testing) การทดสอบการรั่วซึม (Leakage Testing) การวัดความเครียด (Strain Measurement Testing) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีอื่นๆ

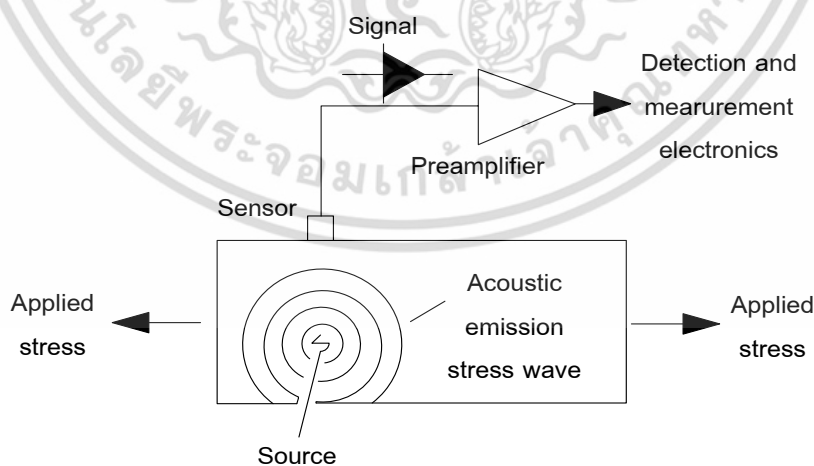
2.11 ทฤษฎีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน

การตรวจสอบด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน (Acoustic Emission Testing) จัดเป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่งที่ค่อนข้างใหม่และอาจจะยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายนักซึ่งการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอิมิชันนี้แตกต่างจากการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing) การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic Testing) การตรวจสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing) การตรวจสอบโดยใช้ของเหลวแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing) การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current Testing) เนื่องจากการตรวจสอบด้วยวิธีดั้งเดิมนั้น เป็นการตรวจสอบหาสิ่งบกพร่องหรือตำหนิที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุแล้ว แต่การตรวจสอบด้วยอะคูสติกอิมิชันเป็นการตรวจหาสิ่งบกพร่องในขณะที่กำลังเกิดขึ้นหรือกำลังขยายตัว ได้ทั้งในระดับอนุภาค (Micro structure) เช่น การที่มีอะตอมขาดหายไป (Vacancy) หรือการที่มีอะตอมเกิน (Interstitial) และในระดับมหภาค (Macro structure) เช่น การเกิดรอยร้าว (Crack) โดยรอยบกพร่องจะเป็นตัวแพร่สัญญาณออกมาในลักษณะของสัญญาณอะคูสติกอิมิชันหรือสัญญาณเสียง ดังนั้น ข้อได้เปรียบของการตรวจสอบด้วยวิธีนี้เมื่อเทียบกับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีดั้งเดิมอื่นๆ คือเป็นการตรวจสอบแบบเวลาจริง (Real Time) สามารถใช้เฝ้าระวังและเตือนล่วงหน้าก่อนที่ความเสียหายจะลุกลาม นอกจากนี้ ยังครอบคลุมผลการตรวจสอบเป็นบริเวณกว้างในการตรวจสอบคร่าวเดียว

2.11.1 ระบบการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอิมิชชัน

อะคูสติกอิมิชชัน ใช้หลักการตรวจจับพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นยืดหยุ่นแบบชั่วคราว (Transient elastic wave) ที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่องของวัสดุ [x] การตรวจจับคลื่นยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยใช้หัวตรวจจับ (Sensor) ยึดติดกับผิวของวัสดุทดสอบ หัวตรวจจับจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปของคลื่นเสียงให้เป็นคลื่นไฟฟ้า และสัญญาณคลื่นไฟฟ้าจะถูกขยายด้วยอุปกรณ์ขยายเบื้องต้น (Pre-amplifier) และส่งผ่านไปยังตัวกรองความถี่ (Filter) เพื่อกรองความถี่บางช่วงความถี่ออก และส่งสัญญาณนั้นไปวิเคราะห์เทียบกับขนาดหรือความรุนแรงของรอยความไม่ต่อเนื่องหรือรอยบกพร่อง การวิเคราะห์สัญญาณอาจทำได้ทั้งในโดเมนเวลา (Time domain) และโดเมนความถี่ (Frequency domain) หรือใช้ร่วมกันทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (Joint time frequency domain) ความถี่ที่นำไปวิเคราะห์โดยทั่วไปมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 25 กิโลเฮิรตซ์ (KHz) จนถึง 3 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) แต่ความถี่ที่นิยมใช้วิเคราะห์ในงานทั่วไปมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 KHz ถึง 1 MHz อะคูสติกอิมิชชัน มีความไวในการทดสอบ (Sensitivity) สูงมาก คลื่นผิว (Surface wave) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของวัสดุทดสอบทำให้เกิดระยะขจัด (Displacement) ที่มีขนาดเล็กสามารถทดสอบพบได้โดยใช้หัวตรวจสอบที่มีความไวสูง

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยสัญญาณอะคูสติกนั้น อาศัยหลักการในการตรวจจับคลื่นสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นซึ่งจะขยายตัวออกเป็นวงกว้างออกไปสู่ผิวงาน และสามารถตรวจจับได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอะคูสติก (AE Sensor) ที่มีการติดตั้งไว้ที่ผิวของชิ้นงาน สัญญาณที่ตรวจจับได้จะนำไปจัดสัญญาณรบกวน นำไปขยายให้สูงขึ้นและถูกนำไปแปลผลเพื่อวิเคราะห์รอยบกพร่องหรือความเสียหายที่เกิดขึ้น สามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อาทิเช่น ใช้ในการประเมินความผิดปกติรอยแตกร้าวหรือสิ่งบกพร่องในเนื้อวัสดุ การควบคุมระดับคุณภาพในกระบวนการเชื่อม การตรวจสอบรอยร้าวในท่อก๊าซ และการตรวจสอบการเกิดแผ่นดินไหว (Seismic Analysis) เป็นต้น



รูปที่ 2.20 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน [6]

โดยเมื่อวัสดุชนิดหนึ่งถูกแรงดึงกระทำที่ปลายทั้งสองจนกระทั่งเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) หรือเกิดการแตกในเนื้อวัสดุ รอยแตกนั้นจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวน ไม่ว่าจะเป็นเสียง ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งแบบคลื่นเสียงตามยาว (Longitudinal wave) และคลื่นเสียงตามขวาง (Transverse wave) คลื่นเสียงทั้งสองชนิดจะเคลื่อนไปทุกทิศทางจนถึงผิวของวัสดุและทำให้เกิดคลื่นเสียงที่ผิวขึ้น หัวตรวจจับที่ติดไว้ที่ผิวของวัสดุก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและสัญญาณทางไฟฟ้านั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป

2.11.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน

แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน จะอยู่ในรูปแบบต่างๆ ของการเกิดการเสียรูป (Deformation) หรือการเกิดรอยร้าว ตัวอย่างของต้นกำเนิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชัน ที่ทำให้เกิดสัญญาณขนาดใหญ่มากได้แก่ การเกิดแผ่นดินไหวหรือการเกิดสัญญาณขนาดเล็ก เช่น การบิดตัวที่ไม่เท่ากันของอะตอม (Twinning) หรือการไถลเสียดระหว่างขอบเกรน (Grain boundary sliding) เป็นต้น การเสียรูปของวัสดุซึ่งจะเกิดก่อนถึงจุดล้าตัว (Yield point) หรือก่อนที่จะแตกหักนั้นไม่สามารถตรวจจับด้วยการทดสอบโดยไม่ทำลายวิธีอื่น แต่สามารถทำการทดสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน

2.12 อุปกรณ์การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมิชัน

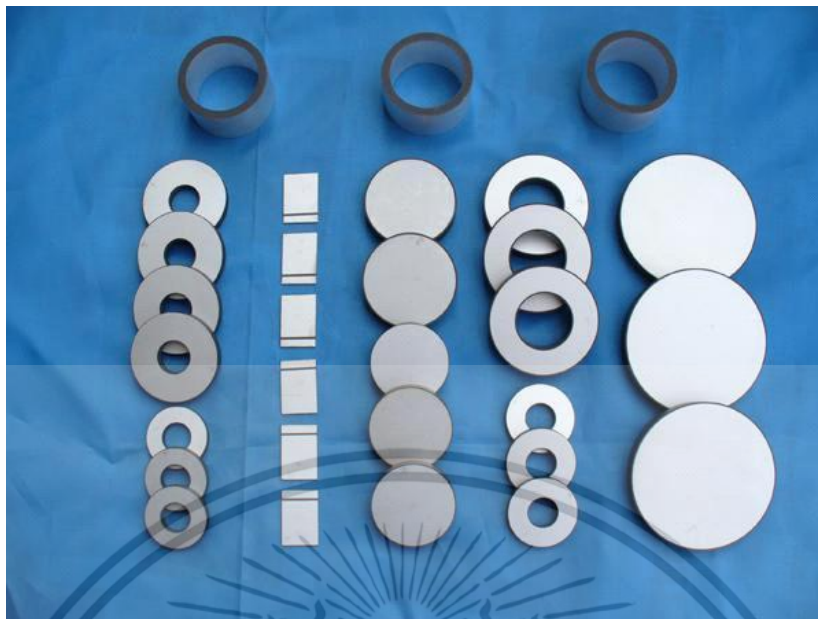
อุปกรณ์ชุดทดสอบอะคูสติกอิมิชัน ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบต้องคำนึงถึงลักษณะงานที่จะทำการทดสอบว่าเป็นการทดสอบทางไฟฟ้า หรือการทดสอบทางเครื่องกล เพราะมีความแตกต่างกันในการเข้าไปติดตั้งหัวตรวจจับ ระยะความไกลของสายส่งสัญญาณ การติดตั้งชุดเก็บข้อมูลที่และความปลอดภัยในการทดสอบ โดยมีส่วนประกอบหลักๆดังต่อไปนี้

2.12.1 หัวตรวจจับ (Sensor)

หัวตรวจจับทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือแบบสัมผัส (Contact) และแบบไม่สัมผัส (Non contact)

1. หัวตรวจจับแบบสัมผัส หัวตรวจจับชนิดนี้จะติดตั้งโดยสัมผัสกับวัสดุทดสอบ โดยใช้สารช่วยสัมผัส (Couplant gel) ซึ่งจะทำให้หน้าผิวหัวตรวจจับแนบสนิทกับวัตถุทดสอบ ช่วยในการส่งผ่านคลื่นเสียงได้ดียิ่งขึ้น ชนิดของสารช่วยสัมผัสจะเป็นชนิดเดียวกันกับการทดสอบด้วยคลื่นความถี่สูง การยึดติดกับวัตถุที่จะทดสอบอาจทำได้โดยใช้แม่เหล็ก เทปกาว หรือการใช้อีพอกซี ภายในหัวตรวจจับชนิดนี้จะมีลักษณะเหมือนกับหัวตรวจจับคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งประกอบด้วยวัสดุรองหลัง (Backing material) และอีพอกซีที่ทำหน้าที่ให้หัวตรวจจับรักษารูปร่างและตำแหน่งอยู่ได้ ภายในหัวตรวจจับจะมีผลึก ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ผลึกชนิดเพียโรโซอิเล็กทริก (Piezoelectric transducer) แสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลไปยังอุปกรณ์เก็บข้อมูลต่อไป

2. หัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส ใช้หลักการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระยะขจัดที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัตถุทดสอบและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในหัวตรวจจับแบบอิเล็กโตรแมกเนติก (Electromagnetic transducer) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าในหัวตรวจจับแบบคาปาซิแตนซ์ (Capacitance transducer)



รูปที่ 2.21 หัวตรวจจับอะคูสติกอิมพิชชันผลึกชนิดเพียโรโซอิเล็กทริก [6]

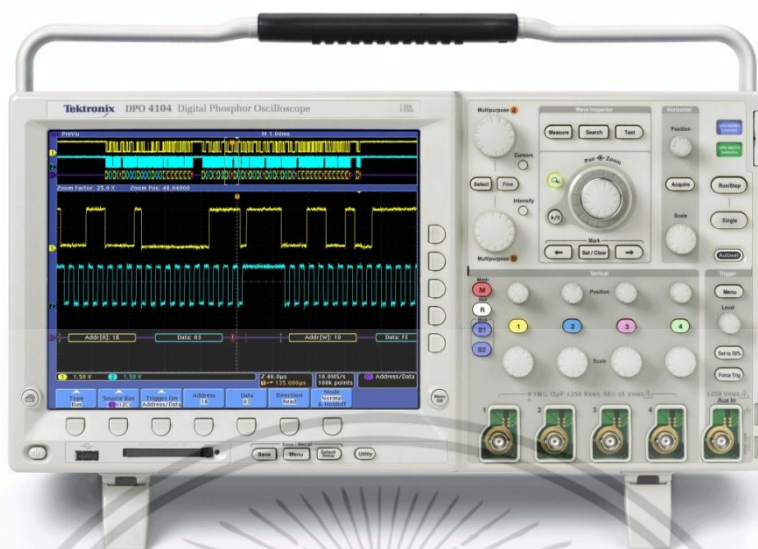
2.12.2 อุปกรณ์กรองสัญญาณ

อุปกรณ์กรองสัญญาณมักจะติดตั้งอยู่ในภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณเสียงในย่านความถี่ที่ไม่เกี่ยวข้องหรือสัญญาณรบกวน (Noise) ออกไปโดยแบ่งอุปกรณ์กรองสัญญาณเป็น 3 ชนิดคือ

1. แบบไฮพาส (Hi-pass) จะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่สูงที่กำหนดผ่าน เช่น กำหนด 100 kHz แบบไฮพาส จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า 100 kHz ผ่านได้
2. แบบแบนด์พาส (Band-pass) จะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ที่อยู่ในช่วงที่กำหนดผ่าน เช่น กำหนด 100 kHz-300kHz แบบแบนด์พาส จะยอมให้สัญญาณในช่วง 100 kHz ถึง 300 kHz ผ่านได้
3. แบบโลพาส (Low-pass) จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำที่กำหนดผ่าน เช่น กำหนด 100 kHz แบบโลพาส จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 100 kHz ผ่านได้

2.12.3 อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผล

อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผล ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก (Analog) เป็นดิจิทัล (Digital) และประมวลผลสัญญาณที่วัดได้ให้อยู่ในรูปอะคูสติกพารามิเตอร์ (AE Parameter) โดยงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องออสซิลอสโคป (Oscilloscope) รุ่น Tektronic DPO 4054 เพื่อรับสัญญาณที่ส่งมาจากหัวตรวจจับทางเสียงและทำการบันทึกเป็นไฟล์ (.CSV) ก่อนจะนำไปวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ต่อไปแสดงดังรูปที่ 2.22



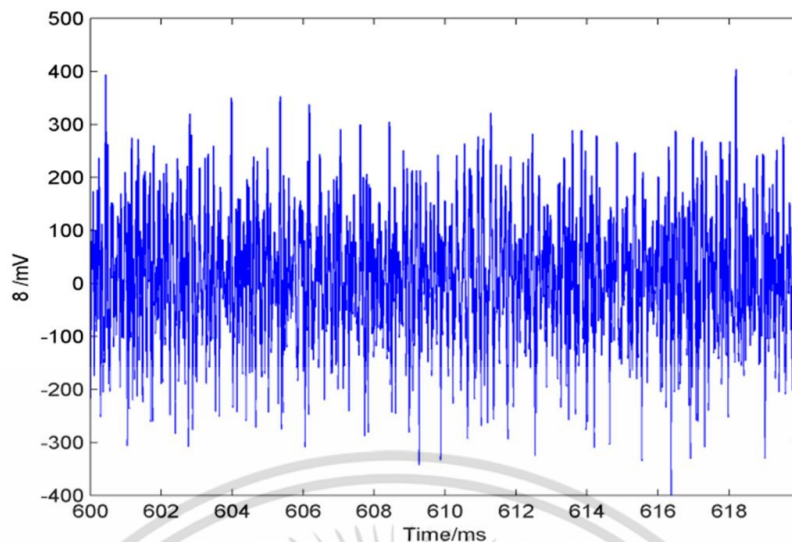
รูปที่ 2.22 Oscilloscope รุ่น Tektronic DPO 4054

2.13 ชนิดของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงทางกลที่ปลดปล่อยจากวัตถุทดสอบและสัญญาณที่วัดได้จากหัวตรวจจับทางเสียงนั้น คลื่นเสียงชนิดคลื่นผิว (Surface wave) มักส่งผลมากกว่าคลื่นเสียงชนิดตามยาว (Longitudinal wave) และคลื่นเสียงชนิดตามขวาง (Shear wave) ทั้งนี้เนื่องจากมีแอมพลิจูดของระยะขจัดที่สูงกว่าและการลดทอนของพลังงานน้อยกว่าคลื่นชนิดอื่นเนื่องจากการเคลื่อนที่ไปบนผิวของวัสดุ เมื่อหัวตรวจจับเปลี่ยนคลื่นเสียงทางกลเป็นคลื่นเสียงทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

2.13.1 แบบต่อเนื่อง (Continuous)

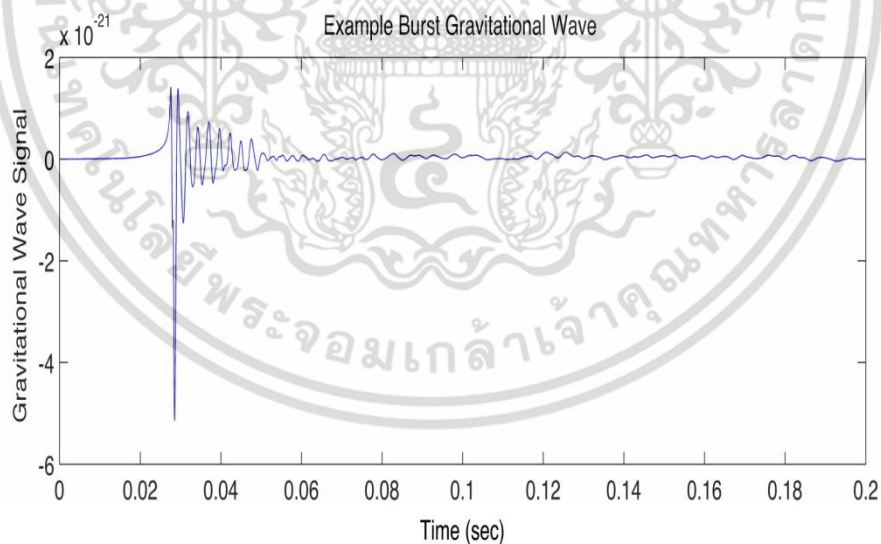
แบบต่อเนื่อง เป็นคลื่นที่มีลักษณะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไป เกิดจากแหล่งกำเนิดสั่น หรือการรบกวนตัวกลางอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดคลื่นแผ่ออกไปเป็นขบวนอย่างต่อเนื่อง เช่น สัญญาณเสียงจากการรื้อของวาล์ว สัญญาณเสียงของสนิมในถังบรรจุน้ำมัน เป็นต้น พารามิเตอร์ที่นิยมใช้มาวิเคราะห์ข้อมูลกับสัญญาณแบบต่อเนื่องคือ ค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย (ASL) หรือ AE_{rms} ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สัญญาณอะคูสติกอิมิชันแบบต่อเนื่อง

2.13.2 แบบเป็นช่วง (Burst)

แบบเป็นช่วง เกิดจากแหล่งกำเนิดสั้น การรบกวนตัวกลาง หรือคลื่นตลที่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ โดยเว้นจังหวะ โดยเป็นคลื่นที่มีลักษณะเกิดขึ้นเป็นช่วง พารามิเตอร์ที่นิยมใช้มาวิเคราะห์ข้อมูลกับสัญญาณแบบเป็นช่วงคือ เคาทช์ (Count) หรือ ฮิท (Hit) ดังแสดงในรูปที่ 2.24

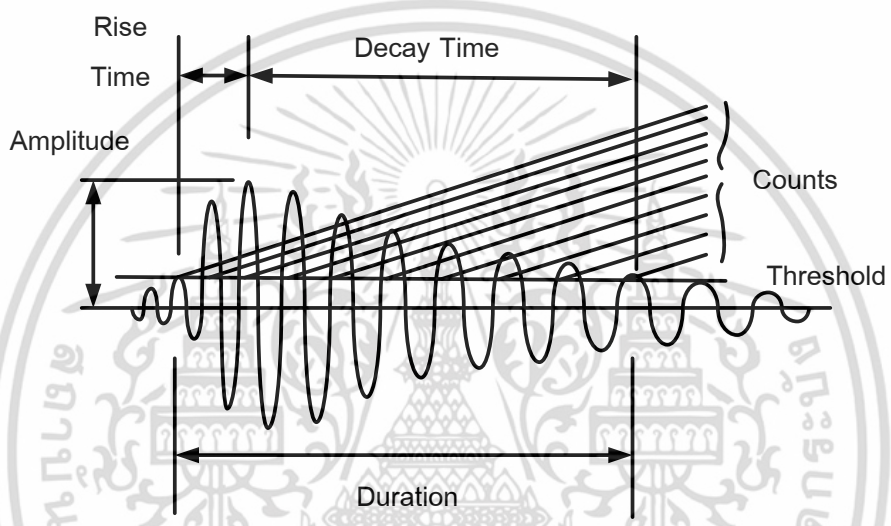


รูปที่ 2.24 สัญญาณอะคูสติกอิมิชันแบบเป็นช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 ตัวแปรของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์

สัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่ตรวจจับได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์ โดยอุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณอะคูสติกพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในงานสนามโดยทั่วไป คือพารามิเตอร์ที่ประมวลผลมาจากทางโดเมนเวลาและที่นิยมใช้กันมากที่สุดและยังใช้กันมากที่สุดและยังใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบันในการวิเคราะห์สัญญาณในตัวแปรของสัญญาณอะคูสติกจะมีส่วนประกอบดังนี้ อีเวนท์ (Event) เคานท์ (Count) พลังงานอะคูสติก (Acoustic Emission Energy) แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก (Acoustic Emission Signal Amplitude) ดูเรชั่น (Duration) ไรส์ไทม์ (Rise Time) ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงตัวแปรของสัญญาณอะคูสติก

1. อีเวนท์ (Acoustic Emission Events) คือ สัญญาณที่ปรากฏขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุนั้นที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ในอุดมคติดังในรูปที่ 2.25 สามารถแสดงได้ด้วยสมการ [2.1]

$$V = V_0 \exp(-Bt) \sin \omega t \quad [2.1]$$

โดยที่	V	คือ	ค่าของโวลต์ที่ได้จากหัวตรวจสอบ
	V ₀	คือ	สัญญาณแอมพลิจูดตัวแรก
	B	คือ	ค่าลดลงที่คงที่ (มากกว่า 0)
	T	คือ	เวลา
	ω	คือ	ค่าความถี่เชิงมุม

2. เคานท์ (Count) คือ จำนวนครั้งของสัญญาณอะคูสติกในโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นในเวลาที่กำหนดที่มีระดับสูงกว่าขีดกำหนด (Threshold) ที่กำหนดไว้ สัญญาณที่เกิดขึ้นหากมีค่าของแอมพลิจูดที่สูงและมีช่วงเวลายาวนานมากพอ ก็จะสามารถก่อให้เกิด Count ที่จำนวนมากตามไปด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนครั้งของเค้ท (Number of Counts) ที่เกิดขึ้นในเวลาที่กำหนดขึ้นอยู่กับ ความถี่ของหัวตรวจสอบ คุณลักษณะการเด็มพ์ (Damp) ของหัวตรวจสอบ คุณลักษณะการเด็มพ์ของโครงสร้าง และระดับการตั้งขีดกำหนด เค้ทสามารถหาได้จากสมการ

$$N = \frac{\omega}{2\pi B} + \ln \frac{V_o}{V_t} \tag{2.2}$$

โดยที่	N	คือ	จำนวนครั้งของเค้ท
	V_t	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขีดกำหนดของเค้ท

3. พลังงานอะคูสติก (Acoustic Emission Energy) คือ พลังงานอะคูสติกอิมิชันที่ได้จากการปลดปล่อยออกมาชั่วขณะของวัสดุ พลังงานของอะคูสติกอิมิชันที่ได้จากสัญญาณมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาและสามารถวัดได้หลายวิธี การหาพลังงานที่ถูกต้องการได้จากปฏิภาคโดยตรงของพื้นที่ใต้สัญญาณอะคูสติกอิมิชัน ซึ่งพลังงานทางไฟฟ้า U สามารถหาได้จากสมการ

$$U = \frac{1}{R} \int V^2(t) dt \tag{2.3}$$

โดยที่	U	คือ	ค่าพลังงานทางไฟฟ้า
	R	คือ	ค่าความต้านทานกระแสในวงจร
	V	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้า

4. แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก (Acoustic Emission Signal Amplitude) สัญญาณแอมพลิจูดสูงสุดมีความความสัมพันธ์กับสัญญาณอะคูสติกที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากวัสดุและความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดพลังงานอะคูสติกอิมิชัน การวัดแอมพลิจูดสูงสุดจากสัญญาณอะคูสติกอิมิชันเป็นผลมาจากการทดสอบที่เหมือนกับพารามิเตอร์ของเค้ท สัญญาณของแอมพลิจูดที่วัดได้นั้นจึงส่งผลโดยตรงกับค่าของเค้ท ปกติการวัดแอมพลิจูดสูงสุดกระทำโดยการใช้อิมิตศาสตร์เพื่อความแน่นอนของการวัดทั้งสัญญาณที่ใหญ่และเล็ก การแพร่ของแอมพลิจูดมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่ทำให้เกิดการเสีรูป ซึ่งในทางปฏิบัติการหาแอมพลิจูดหาได้จากสมการ

$$N = \frac{Pf\tau}{b} \tag{2.4}$$

โดยที่	N	คือ	เค้ทที่เพิ่มขึ้น
	P	คือ	อีเวนท์ที่เพิ่มขึ้น
	f	คือ	ความถี่เรโซแนนซ์ของหัวตรวจสอบ
	τ	คือ	เวลาในช่วงของอีเวนท์
	b	คือ	แอมพลิจูดพารามิเตอร์ที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ระยะเวลา (Duration) คือระยะเวลาตั้งแต่สัญญาณแรกที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นจนถึงเวลาของแอมพลิจูดของสัญญาณสุดท้ายที่สูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น

6. ไรซ์ไทม์ (Rise Time) คือระยะเวลาระหว่างช่วงตั้งแต่สัญญาณที่มีค่าสูงสุดกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นครั้งแรกจนถึงสัญญาณที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด

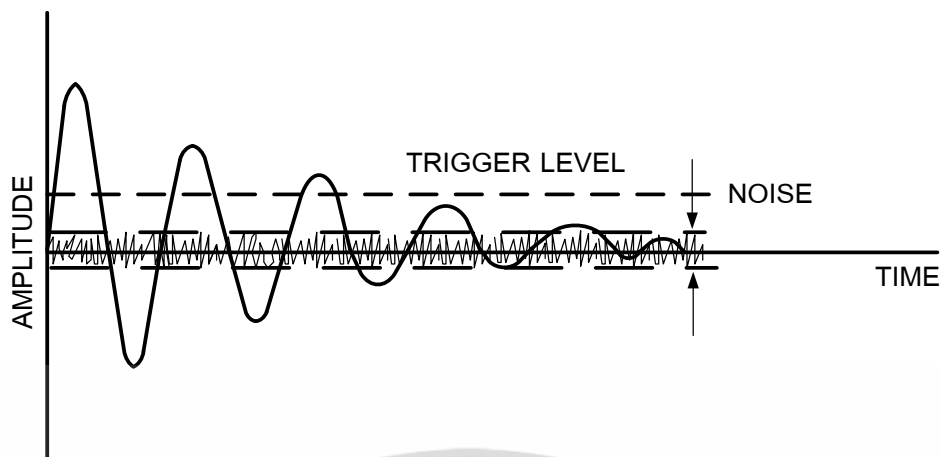
7. สัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน

สัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission) เป็นสัญญาณคลื่นที่มีความยืดหยุ่น (Elastic Wave) แบบชั่วคราวที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานอย่างรวดเร็วจากภายในเนื้อวัสดุหรือผิวของวัสดุภายใต้ความเค้นในการปล่อยคลื่นอะคูสติกนี้เกิดจากกลไกของการเปลี่ยนรูปทรง เช่น การคราก (Yielding) การเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) การขยายตัวของรอยแตก (Crack Growth) การเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Transformation) การแข็งตัว (Solidification) และการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Solidification Cracking) เป็นต้น



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน [5]

สำหรับสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันที่ใช้ในการตรวจสอบนั้น โดยปกติต้องทำการกำจัดสัญญาณรบกวนโดยการตั้งระดับขีดกำหนด (Threshold) ให้มีค่าสูงกว่าสัญญาณรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งผลจากการตั้งระดับขีดกำหนดดังกล่าว จะทำให้ได้มาซึ่งคุณลักษณะบางประการของสัญญาณอะคูสติกนั้นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.27 การกำหนดระดับขีดกำหนดเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน [5]

2.15 สัญญาณรบกวนและการกำจัดสัญญาณรบกวน

การกำจัดสัญญาณรบกวนเป็นพื้นฐานที่ดีในการทดสอบเนื่องจากผลการทดสอบที่ดีจำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบสัญญาณรบกวนแวดล้อมและสัญญาณรบกวนที่หน้างานการทดสอบโดยวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนมีดังต่อไปนี้

2.15.1 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนหมายถึง สัญญาณที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดเสียงอะคูสติคิมิซันซ์ที่กำลังต้องการตรวจจับอยู่ เช่นการทดสอบรอยร้าวของสะพาน อาจจะมีสัญญาณเสียงของรถที่วิ่งอยู่บนสะพาน เป็นต้น สัญญาณรบกวนแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. สัญญาณรบกวนทางกล อาจเกิดขึ้นจากสั่นสะเทือน หรือการเสียดสี เป็นต้น มักมีความถี่ที่ต่ำและมีแอมพลิจูดขนาดใหญ่
2. สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า อาจเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือจากไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องมือ มักมีความถี่สูงหรืออาจมีความถี่เป็นช่วงกว้างครอบคลุมความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูง

2.15.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน

การกำจัดสัญญาณรบกวนสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การกำจัดสัญญาณรบกวนให้หมดไปก่อนการทดสอบ หรือก่อนที่สัญญาณจะมีค่ามากกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน เป็นวิธีกำจัดที่ดีที่สุดแต่บางครั้งไม่สามารถกำจัดได้หมดสิ้น
2. การกำจัดสัญญาณหลังสัญญาณผ่านขีดเริ่มเปลี่ยนแล้ว แต่ไม่ทำการบันทึก (Front and filtering) มีวิธีโดยการใช้พารามิเตอร์ต่างๆเช่น ไรส์ไทม์ (Rise Time) จะกรองสัญญาณที่มีไรส์ไทม์ที่ต่ำกว่า 20 ไมโครวินาทีออกหรือไม่ บันทึกสัญญาณที่มีไรส์ไทม์ต่ำกว่านั้น เป็นต้น หรืออาจทำได้โดยการไม่บันทึกสัญญาณรบกวนโดยการใช้การ์ดเซนเซอร์ (Guard sensor) ซึ่งหมายถึงการใช้หัวตรวจจับอื่นๆ ล้อมรอบหัวตรวจจับที่กำลังบันทึกสัญญาณ ถ้าหัวตรวจจับที่ทำหน้าที่เป็นการรูดเซ็นเซอร์ได้รับสัญญาณนั้นก่อนสัญญาณนั้นจะไม่ถูกบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การกำจัดสัญญาณรบกวนขณะทำการแปรผล เป็นการกรองสัญญาณที่เกิดขึ้นโดยไม่สมเหตุสมผล อาจโดยใช้ประสบการณ์และการสังเกตคุณลักษณะต่างๆของสัญญาณ หรือจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

2.16 พฤติกรรมของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์

เมื่อวัตถุได้รับภาระกรรม (Load) หรือความเค้น (Stress) จนถึงระดับหนึ่ง ซึ่งโดยปกติแล้ว ก่อนถึงจุดคราก (Yield point) วัตถุจะมีการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นเสียงออกมา เมื่อหยุดหรือหยุดภาระกรรมหรือความเค้นนั้นแล้วเริ่มให้ความเค้นอีกครั้งหนึ่ง จะมีพฤติกรรมต่างๆที่น่าสนใจและนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบในทางปฏิบัติได้ดังนี้

2.16.1 ไคเซอร์เอฟเฟค (Kaiser effect)

ไคเซอร์เอฟเฟค หมายถึง การที่วัตถุได้รับความเค้นจนกระทั่งมีการปลดปล่อยคลื่นเสียงออกมาแล้ว เมื่อหยุดความเค้นและเริ่มกระทำใหม่ คลื่นเสียงจะถูกปลดปล่อยออกมาอีกครั้งก็ต่อเมื่อความเค้นที่กระทำซ้ำนี้เกินกว่าค่าความเค้นที่กระทำไว้ในคราวก่อนหน้านั้น พฤติกรรมนี้ถูกค้นพบใน ค.ศ. 1950 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน จึงได้ใช้นักวิทยาศาสตร์ท่านนี้ใช้ตั้งชื่อ ในตอนที่พฤติกรรมนี้ถูกค้นพบมีความเข้าใจว่าจะเกิดขึ้นในวัสดุทุกชนิด แต่ต่อมาภายหลังพบว่าวัสดุที่เป็นวัสดุผสม (Composite material) จะไม่เป็นไปตามหลักการนี้

2.16.2 เฟลลิตีเอฟเฟค (Felicity effect)

พฤติกรรมนี้ถูกค้นพบในปี 1977 เป็นพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นวัสดุผสม (Composite material) มีหลักการคล้ายกันกับไคเซอร์เอฟเฟค แต่มีส่วนที่แตกต่างกันคือ คลื่นเสียงจะถูกปลดปล่อยออกมาอีกครั้งหนึ่งก่อนที่ค่าความเค้นจะถึงระดับที่กระทำไว้ก่อนหน้านั้น คือเพียงประมาณ 95% ของความเค้นที่กระทำก่อนหน้านั้นเท่านั้น เป็นทฤษฎีที่มาหักล้างกับไคเซอร์เอฟเฟค

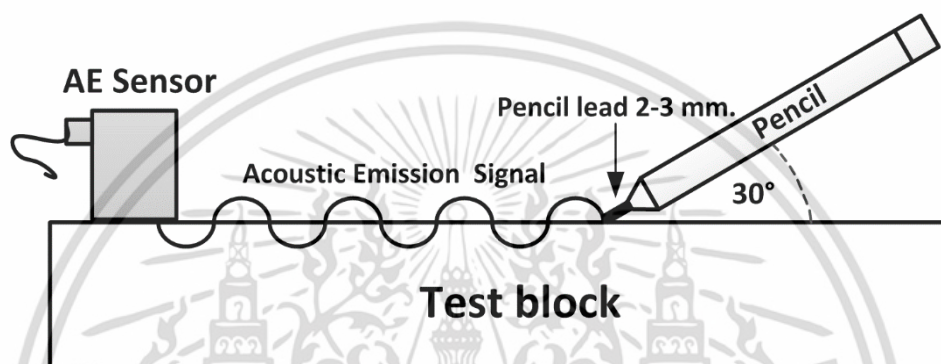
2.17 การหาคคุณสมบัติหัวตรวจจับทางเสียง

การหาคคุณสมบัติการตรวจสอบของหัวตรวจจับทางเสียงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนั้นได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM E976-99 [4] ซึ่งการทดสอบนั้นต้องทำการบ่อนแหล่งกำเนิดเสียงเทียมขึ้นมาเพื่อใช้ค่าในการกาความไวในการตอบสนองของหัวตรวจจับว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยในมาตรฐานได้กำหนดไว้มีอยู่ 3 วิธีคือ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงจากอัลตราโซนิคส์ทรานสดิวเซอร์ การใช้ Gas jet วิธีที่นิยมและเหมาะสมสำหรับทดสอบคือการหักไส้ดินสออย่างระมัดระวัง (Pencil lead break) ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ดินสอที่ใช้จะต้องเป็นชนิดกดปุ่ม ไส้ดินสอ 2H การหาคคุณสมบัติในการตรวจสอบสามารถทำได้โดยใช้การหักไส้ดินสอ 2H ขนาด 0.5 ม.
2. ความยาวของไส้ดินสอยื่นออกมาจากตัวดินสอมีขนาดที่คงที่อยู่ในช่วงประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ในทางปฏิบัติแนะนำให้เลือกดินสอกดปุ่มที่เมื่อกดแล้ว ไส้ดินสอหักไส้ดินสอเป็นวิธีที่แนะนำเนื่องจากใช้อุปกรณ์น้อย ให้ผลการสอบเทียบที่มีการทำซ้ำจะยื่นออกมาในขนาดที่คงที่
3. แอ่งดินสอทำมุม 30° กับระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสของปลายดินสอกับวัสดุที่จะทดสอบถึงจุดศูนย์กลางหัวตรวจสอบที่ระยะ 6 นิ้ว หรือ 12 นิ้ว เท่าๆกัน แล้วจึงทำการหักไส้ดินสอกำเนิดเสียงเทียบจำนวน 5 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยตรวจสอบหัวตรวจจับแต่ละหัวจะต้องมีค่าความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดสูงสุด ไม่เกิน ± 4 dB ตามมาตรฐาน ASME และ ± 6 dB ตามมาตรฐาน F914 หัวตรวจจับที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปแบบสัมผัสและมักจะทำจากผลึกเพียโรโซอิเล็กทริกมีทั้งที่เป็นแบบรีโซแนนซ์ (Resonance) ที่ให้ความไวในการทดสอบที่สูงหรือช่วงเวลาความถี่ที่กว้าง (Wide band) การเลือกใช้ชนิดและย่านความถี่ที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



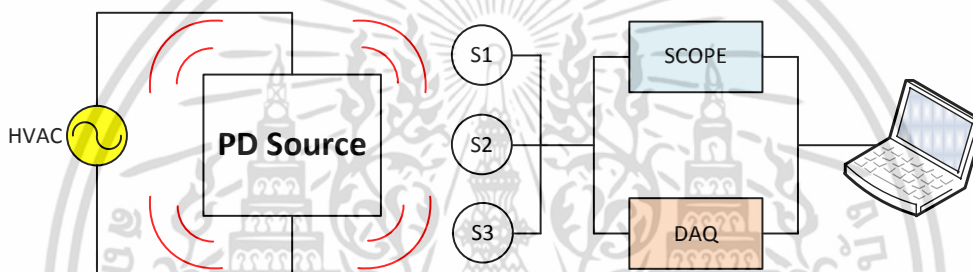
รูปที่ 2.28 การสอบเทียบของหัวตรวจจับทางเสียงโดยวิธีการหักไส้ดินสอ

บทที่ 3

แนวคิดและหลักการที่นำเสนอในงานวิจัย

3.1 แนวคิดและหลักการที่นำเสนอ

การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนเพื่อหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะมีส่วนของแหล่งกำเนิดจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆซึ่งโดยส่วนนี้จะทำการออกแบบและสร้างขึ้นจริงตามมาตรฐาน IEC-60150 และส่วนของการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง (AE Sensors) นั้นสามารถทำการติดตั้งที่ตัวทดสอบหรือบริเวณใกล้เคียงกับตัวทดสอบเพื่อตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.1 แผนภาพการตรวจจับการดิสชาร์จโดยใช้เทคนิคทางเสียง

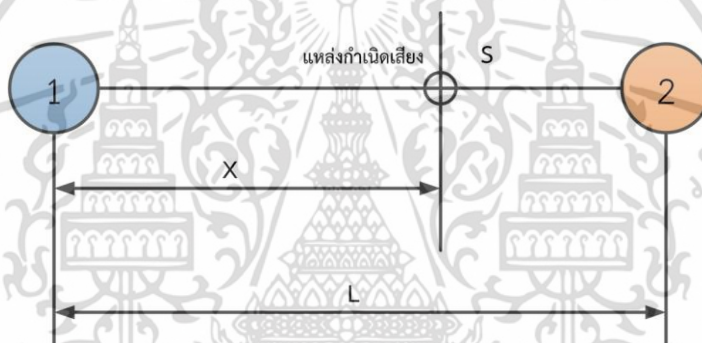
จากอุปกรณ์ที่กล่าวไปข้างต้นจะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีห้องควบคุมแรงดันสูงเป็นส่วนควบคุมการป้อนแรงดันให้กับวงจรทดสอบและเป็นห้องที่ใช้วัด PD แบบเก่า (MPD600) ทั้งนี้จะทำการวัด PD แบบเก่าไปพร้อมกับการวัด PD โดยใช้เทคนิคทางเสียงเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยแรงดันทดสอบจะป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบขนาดเพื่อป้อนแรงดันให้กับ Ck และ อุปกรณ์ที่ถูกทำการทดสอบ แล้วนำชุดอุปกรณ์ตรวจจับทางเสียง (Piezoelectric sensors) จำนวน 3 ตัวมาติดตั้งกับหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น เพื่อตรวจวัดสัญญาณ PD ซึ่งจะมีการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบดั้งเดิมและวิเคราะห์หาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น โดยการทดสอบนี้จะทำการทดสอบเฉพาะฉนวนที่เป็นอากาศเท่านั้น

3.2 การหาค่าความเร็วของคลื่นเสียงและตำแหน่งแหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมิชัน

การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมิชันสามารถทดสอบในคราวเดียวครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ไม่จำเป็นต้องนำหัวตรวจจับไปเสกนทั่วทั้งแผ่นชิ้นงานหรือวัตถุทดสอบ เพียงติดตั้งหัวตรวจจับไว้กับวัตถุที่ต้องการทดสอบ คลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงจะส่งสัญญาณผ่านมายังหัวตรวจจับทางเสียง การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมิชันสามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้หลักการวิเคราะห์ระยะเวลาที่แตกต่างกันที่หัวตรวจจับแต่ละหัวรับสัญญาณ จากนั้นป้อนค่าความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางนั้นๆ ให้กับหน่วยประมวลผล ก็จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงได้

3.2.1 การคำนวณหาค่าความเร็วของคลื่นเสียง

การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมิชัน ความถูกต้องของการกำหนดตำแหน่งขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่ผู้ทดสอบจะต้องทดลองหาค่าที่แท้จริงจากวัตถุที่จะทดสอบ โดยมีวิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการตรวจจับการดิซซาร์จโดยใช้เทคนิคทางเสียง

จากรูปที่ 3.2 กำหนดให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ตำแหน่งจุด S ห่างจากหัวตรวจจับที่ 1 เป็นระยะ X ระยะระหว่างหัวตรวจจับที่ 1 และ 2 มีขนาด L และเมื่อกำหนดให้ V คือความเร็วของคลื่นเสียงดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางจากจุด S ไปยังหัวตรวจจับที่ 1} &= \frac{X}{V} \\ \text{ระยะเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางจากจุด S ไปยังหัวตรวจจับที่ 2} &= \frac{(L - X)}{V} \\ \text{ดังนั้นระยะเวลาที่หัวตรวจจับสัญญาณเวลาที่แตกต่างกัน } (\Delta T) &= \frac{(L - X)}{V} - \frac{X}{V} \end{aligned}$$

$$X = \frac{1}{2}(L - V\Delta T) \quad [3.1]$$

จากสมการที่ 3.1 ในการทดสอบจริงจะทำการใช้แหล่งกำเนิดเทียม เช่น การหักใส่ดินสอดที่ตรงตำแหน่งระหว่างหัวตรวจจับที่ 1 และ 2 จากนั้นแทนค่า X และ L ที่ได้จากการทดสอบและอ่านค่า ΔT ที่ได้จากเครื่องมือที่ได้ จะทำให้หาค่าความเร็วของคลื่นเสียงได้ในงานที่มีขนาดเล็ก หัวตรวจจับเพียง 2-3 หัวสามารถครอบคลุมทั่วบริเวณที่ทดสอบได้ สำหรับงานที่มีขนาดใหญ่การเลือกราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

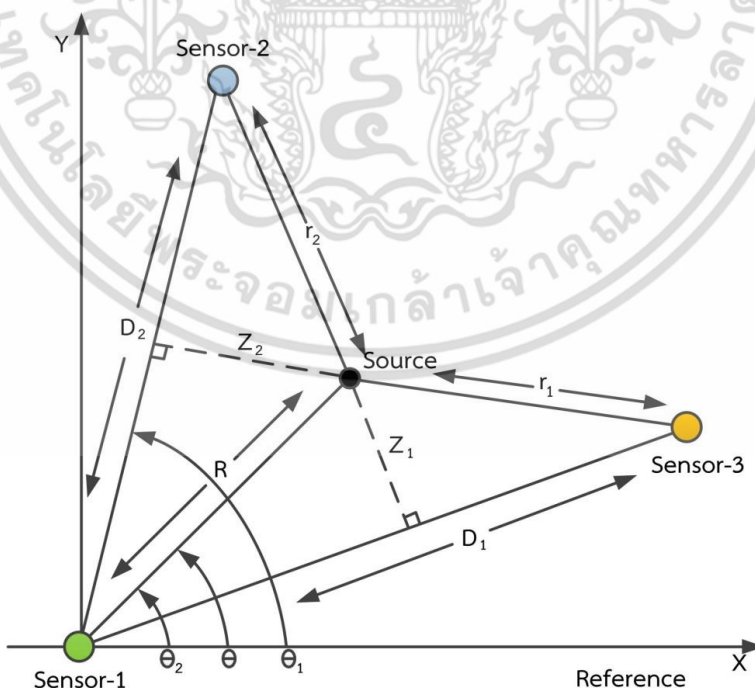
ตำแหน่งติดตั้งและจำนวนหัวตรวจจับ การพิจารณาจำนวนหัวตรวจจับขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของวัสดุทดสอบ เช่น ในการทดสอบภาชนะรับแรงดันมักใช้หัวตรวจจับจำนวน 8-10 หัว โดยมีระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับประมาณ 4-20 ฟุต

3.2.2 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมพัลส์

วิธีการทดสอบด้วยอะคูสติกอิมพัลส์สามารถนำมาใช้ในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงได้ โดยการคำนวณหาจากค่าของเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณจากหัวตรวจจับและจากค่าความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางที่นำมาทดสอบ วิธีการหาตำแหน่งสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในแนวเส้นตรง (Linear) ใช้หัวตรวจจับตั้งแต่ 2 หัวเรียงตัวอยู่ในแนวเส้นตรง
2. การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระนาบ (Planar) ใช้หัวตรวจจับตั้งแต่ 3-4 หัวขึ้นไป เรียงตัวครอบคลุมระนาบที่จะทดสอบ
3. การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ใน 3 มิติ (Three dimensions) ใช้หัวตรวจจับ 3-5 หัวขึ้นไป เรียงตัวครอบคลุมปริมาตรที่จะทดสอบ
4. การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในโซน (Zone) ใช้หัวตรวจจับตั้งแต่ 2 หัวขึ้นไป ติดตั้งครอบคลุมพื้นที่หรือปริมาตรที่จะทดสอบ

การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในแนวเส้นตรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 ส่วนการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมพัลส์แบบสามเหลี่ยม สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการหาระยะ R จากสมการ 3.2 และ 3.3 โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.3



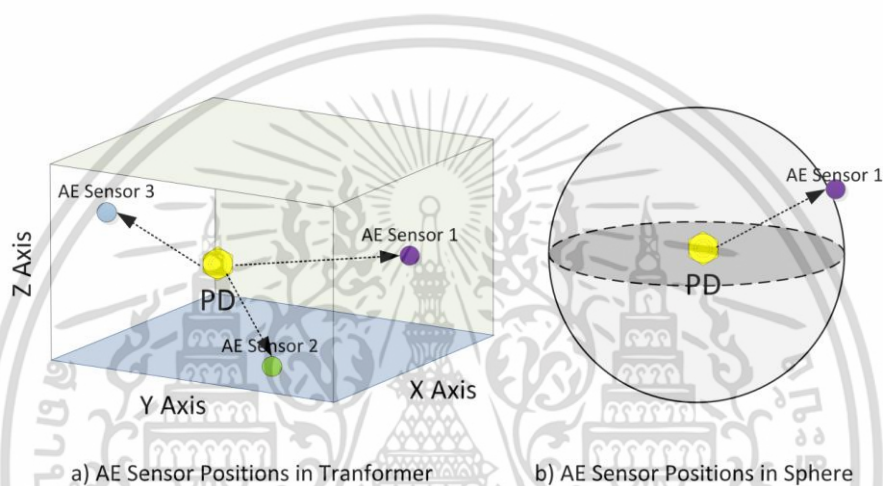
รูปที่ 3.3 การติดตั้งหัวตรวจจับแบบสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - v^2 \Delta t_1^2}{v \Delta t_1 + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad [3.2]$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - v^2 \Delta t_2^2}{v \Delta t_2 + D_2 \cos(\theta_2 - \theta)} \quad [3.3]$$

โดยในระนาบ 3 มิติสามารถคำนวณหาตำแหน่งของการเกิดดิซาร์จบางส่วนได้จากสมการที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ใน 3 มิติ

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (vt_1)^2 \quad [3.4]$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (vt_2)^2 \quad [3.5]$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = (vt_3)^2 \quad [3.6]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อัตราเร็วของเสียง (Velocity of sound)

อัตราเร็วของเสียงคือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่อุณหภูมิ 25°C ได้ประมาณ 346 เมตร/วินาที และในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C ได้ประมาณ 343 เมตร/วินาที ดังนั้นอัตราเร็วที่เสียงเดินทางได้อาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลักและการเดินทางของเสียงยังอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง โดยเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วในของแข็ง

ตารางที่ 3.1 อัตราความเร็วเสียงในตัวนำชนิดต่างๆ

Type of conductor	Velocity (m/s)
Carbon dioxide	258
Air (25C°)	346
Hydrogen	1,339
Water	1,498
Aluminum	5,000
Steel	5,200

3.4 การเลือกใช้หัวตรวจจับทางเสียง

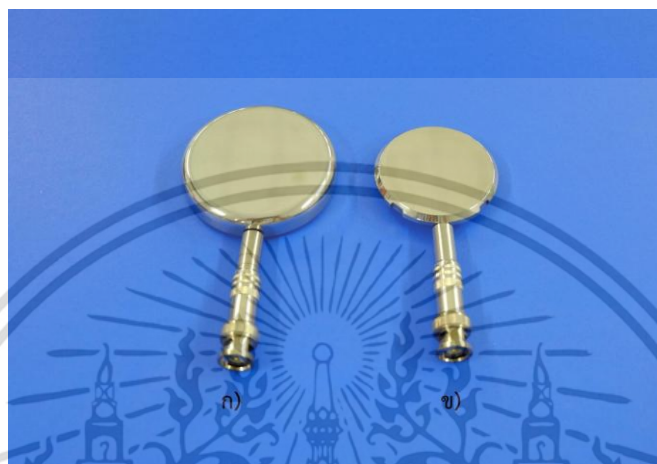
หัวตรวจจับทางเสียงมีหลายชนิด ซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่จะทำการตรวจวัดซึ่งการทดลองนี้ใช้หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งจะประกอบด้วย หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก สามารถวัดความดันที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้สูงกว่า 100 kHz วัสดุรองหลัง ใช้สำหรับช่วยลดทอนพลังงานเสียงในช่วงความถี่อื่นในการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและช่วยดูดซับพลังงานนั้นไว้โดยที่ไม่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง แผ่นป้องกันสีก เป็นวัสดุที่ใช้ป้องกันหน้าสัมผัสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จะใช้หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก รุ่น HNB-4P1-4325 ความถี่ 1MHz และเพียโซอิเล็กทริก รุ่น HNB-4P3-6545 ความถี่ 3MHz คุณสมบัติพิเศษคือเมื่อได้รับแรงกดเป็น ห้วงๆ แล้วจะปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมา ข้อดีของหัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก คือมีความไวสูง สัญญาณขาออกที่วัดได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) และให้ผลตอบสนองในงานที่มีความถี่สูง (High Frequency Response) ได้ดีกว่าหัวตรวจจับแบบอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก ก) 3MHz และ ข) 1MHz

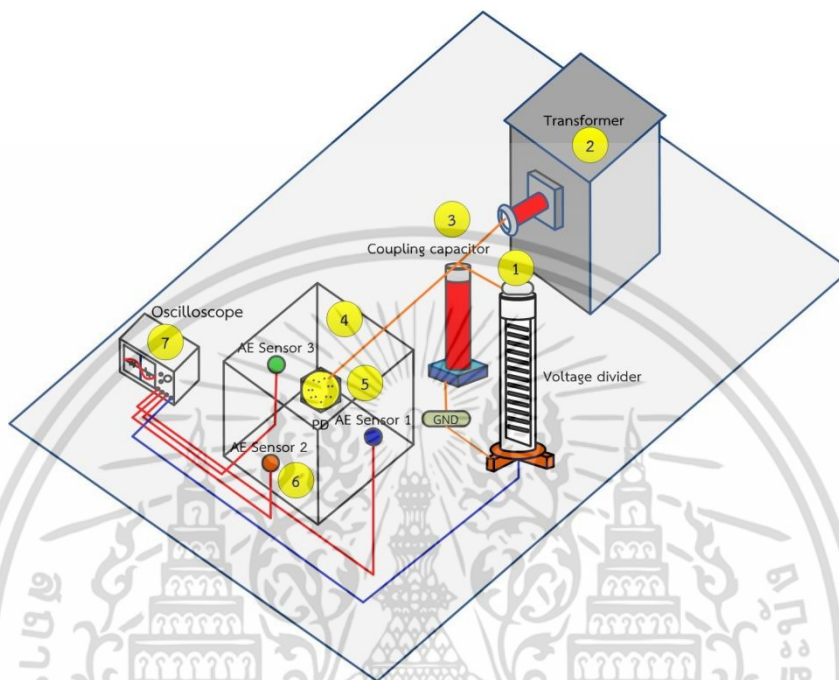
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเฉพาะของหัวตรวจจับทางเสียงชนิดเพียโซอิเล็กทริก

Type	Frequency (MHz)	Power (W)	Size		Dimension Drawing
			Diameter (mm)	High (mm)	
HNB-4P1-4325	1±15%	20	43.2	14	
HNB-4P3-6545	3±15%	30	65	11	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

หลักการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงที่ได้นำเสนอไปแล้ว การทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนในห้องทดสอบแรงสูงตามวงจรที่ได้นำเสนอแสดงดังรูปที่ 3.7



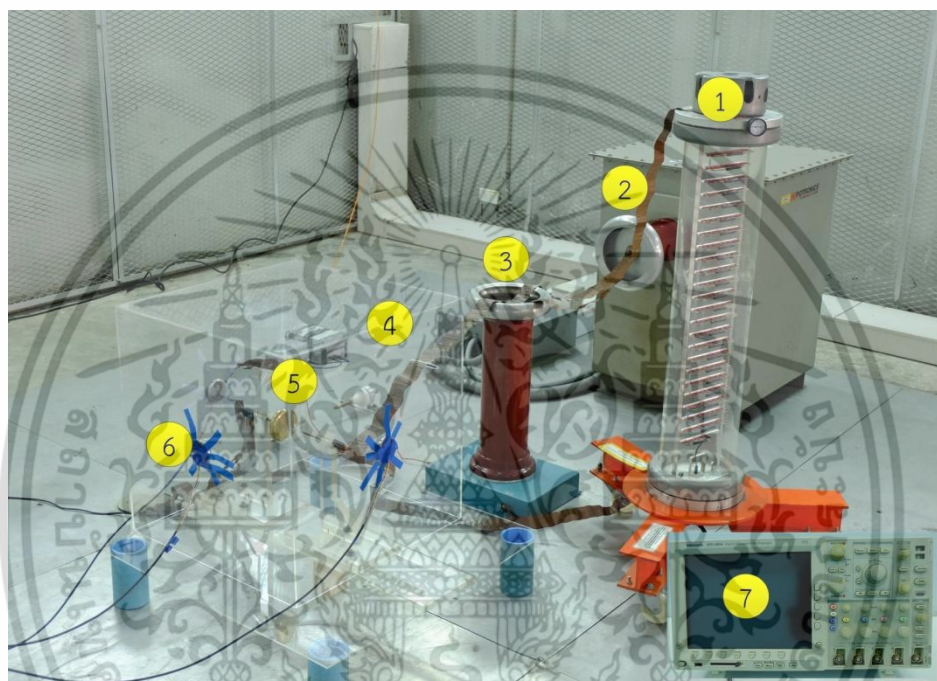
รูปที่ 3.7 วงจรออกแบบการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

โดยอุปกรณ์ในแผนภาพจำลองดังนี้

1. Voltage divider 1000V/1V
2. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง AC พิกัด 460V/75V, 40kVA, 50Hz
3. Coupling capacitor (Ck) พิกัด 0.001 microfarad 100kV
4. หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น ขนาด (60cmx60cmx60cm)
5. ชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Test Object)
6. หัวตรวจจับทางเสียง (Acoustic Sensor)
7. Oscilloscope รุ่น Tektronic DPO 4054

จากอุปกรณ์ที่กล่าวไปข้างต้นจะนำมาติดตั้งและทำการทดสอบจะประกอบไปด้วยห้องควบคุมแรงดันสูงเป็นส่วนควบคุมการป้อนแรงดันให้กับวงจรทดสอบและเป็นห้องที่ใช้วัด PD แบบเก่าทั้งนี้เราจะทำการวัด PD แบบเก่าไปในตัวด้วยเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการวัด PD โดยใช้เทคนิคทางเสียงที่ได้นำเสนอไป แรงดันทดสอบจะป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบขนาด 460V/75kV, 40kVA, 50Hz เพื่อป้อนแรงดันให้กับ Ck และ อุปกรณ์ที่ถูกทำการทดสอบ แล้วนำชุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาได้เห็นว่าใบเซประยะชันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับทางเสียง (Piezoelectric sensors) จำนวน 3 ตัวมาติดตั้งกับหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น (60cmx60cmx60cm) เพื่อตรวจวัดสัญญาณ PD ซึ่งจะมีการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดแบบดั้งเดิมและวิเคราะห์หาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น การตรวจวัดนี้จะทดสอบเฉพาะฉนวนที่เป็นอากาศเท่านั้น โดยทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเพื่อตรวจจับ PD ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทดสอบตามทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

ขั้นตอนการทดสอบ

1. การทดสอบในขั้นตอนแรกควรศึกษาเกี่ยวกับหลักการวัดและการป้องกันในการทดสอบไฟฟ้าแรงดันสูงก่อนที่จะทำการวัดเนื่องจากการทดสอบแรงดันสูงมีอันตรายถึงชีวิต ดังนั้นควรปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ทางห้องทดสอบกำหนดไว้สามารถดูได้จากภาคผนวก
2. ทำการตรวจสอบอุปกรณ์และทำการต่อวงจรตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจริงตามที่ออกแบบไว้ในวงจรการทดสอบในห้องทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.2
3. ในห้องทดสอบโดยชุดอุปกรณ์วัด PD ในห้องทดสอบแรงดันสูง จำเป็นจะต้อง Calibrate ก่อนทุกครั้ง เมื่อ Calibrate เสร็จเรียบร้อยก็เตรียมพร้อมที่จะขึ้นแรงดันเพื่อดูการเกิด PD ต่อไป
4. ก่อนจะขึ้นแรงดันควรดูค่าของ Background noise จากวงจรที่ต่อขึ้นทั้งนี้ถ้าหาก Background noise มีค่ามากเกินไปไม่ควรทำการทดสอบเพราะจะส่งผลถึงค่าของ PD ที่วัดได้นั้นมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดพลาด ผลนั้นอาจมาจากการต่อวงจรหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่รอบตัวในระหว่างการทดสอบ ซึ่ง Background noise ไม่ควรเกิน 5% ของค่า PD ที่วัดได้

5. ทำการขึ้นแรงดันจนเห็นการเกิด PD แล้วจดค่าเริ่มต้นของการเกิด PD คือคูพิกัดของแรงดันที่เริ่มเกิด และค่าขนาดของ PD ทั้งนี้ในการทดสอบจะมีการวัด 2 ส่วนด้วยกันคือ การวัดจากชุดอุปกรณ์ตรวจจับ PD ที่สร้างขึ้น กับ ชุดอุปกรณ์วัด PD ในห้องทดสอบแรงดันสูง จากการทดสอบเราจะสามารถวัดสัญญาณ แรงดันเริ่มเกิด และขนาด PD ได้เลยจากอุปกรณ์วัดแบบเก่า แต่ถ้าเป็นชุดอุปกรณ์ตรวจจับ PD ที่สร้างขึ้นจะสามารถวัดค่าของรูปสัญญาณของ PD และ สัญญาณขนาดแรงดันที่ป้อนให้กับวงจร

6. เก็บค่าของ PD ที่ต้องการซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

6.1 ชุดอุปกรณ์วัด PD ในห้องทดสอบแรงดันสูง

- รูปสัญญาณของ PD
- ค่า Background noise
- ขนาดแรงดัน
- ขนาด PD

7. การทดสอบจะใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบตามทฤษฎีคือมีทั้งหมด 4 ประเภท

- 7.1 H.V.-electrode Corona discharge
- 7.2 Ground-electrode corona discharge
- 7.3 Surface discharge
- 7.4 Internal discharge

เมื่อเก็บค่าได้ตามที่กำหนดไว้เสร็จตามต้องการก็จะเปลี่ยนชุดอุปกรณ์ทดสอบแล้วทำการทดสอบตามข้อที่ 1 ถึง 6 อีกครั้งแล้วทำการเก็บผลตามที่กำหนด

8. การทดสอบก่อนจะจับอุปกรณ์แรงดันสูงในวงจรทดสอบจะต้องกราวด์วงจรก่อนทุกครั้ง ทำด้วยความระมัดระวังในระหว่างการเปลี่ยนอุปกรณ์และทำการทดสอบ

9. เมื่อเก็บผลที่ได้จาก Oscilloscope แล้วจะนำมาวิเคราะห์ผลในโปรแกรม MATLAB เพื่อดูค่าต่างๆซึ่งจะกล่าวต่อไปในส่วนของกราวด์วิเคราะห์ผล

3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนหลักๆนั้นจะมี อุปกรณ์ที่เป็นหัวตรวจจับ PD หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมและแหล่งกำเนิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนซึ่งจะใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนทั้ง 4 ชนิดดังนี้

3.6.1 แหล่งกำเนิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง (H.V.-electrode Corona Discharge)

โดยด้านปลายแหลมของแหล่งกำเนิดดิสชาร์จจะต่อเข้ากับด้านแรงสูงของระบบไฟฟ้า ส่วนด้านเพลทจะต่อลงกราวด์เพื่อศึกษาโคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงสูง

3.6.2 แหล่งกำเนิดโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงต่ำ (L.V.-electrode Corona Discharge)

โดยด้านปลายแหลมของแหล่งกำเนิดดิสชาร์จจะต่อลงกราวด์ ส่วนด้านเพลทจะต่อด้านแรงสูงของระบบไฟฟ้าเพื่อศึกษาโคโรนาดิสชาร์จทางด้านกราวด์แสดงดังรูปที่ 3.9

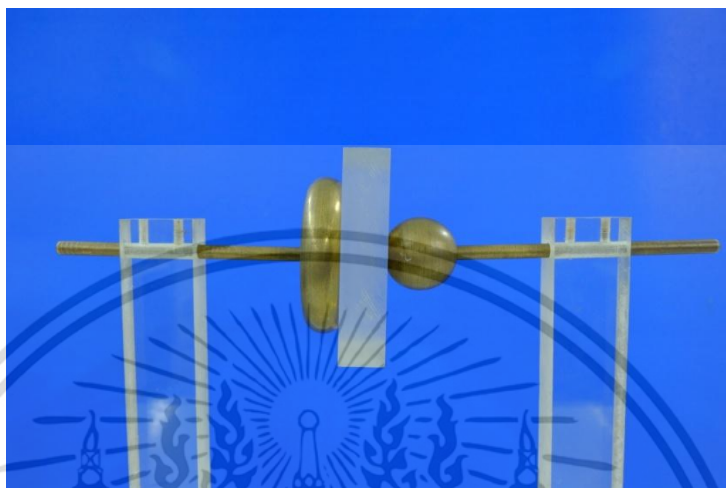


รูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว (Surface Discharge)

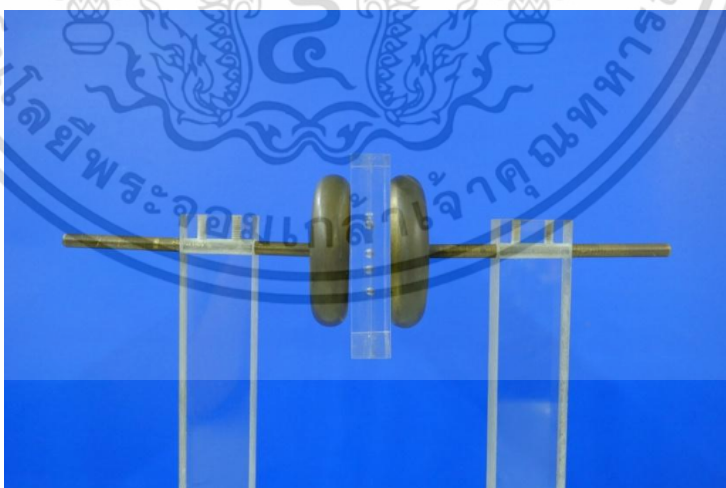
โดยจะให้โอเล็กโตรดทรงกลมต่อทางด้านไฟฟ้าแรงสูงและระนาบต่อลงกราวด์เพื่อศึกษาดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวของฉนวน แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว

3.6.4 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal Discharge)

โดยจะประกอบด้วยเฟลทที่ต่อทางด้านไฟฟ้าแรงสูงและเฟลทอีกด้านต่อลงกราวด์เพื่อศึกษาดิสชาร์จภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีโพรงอากาศในเนื้อฉนวนที่เป็นของแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.12

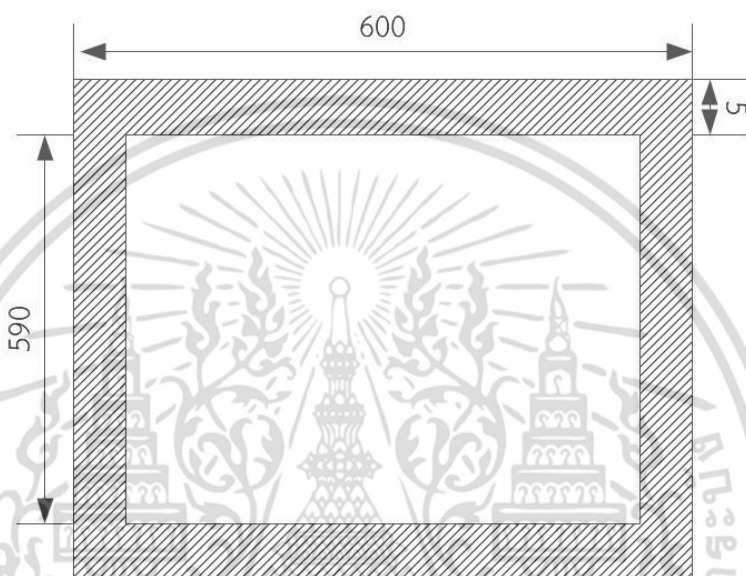


รูปที่ 3.12 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือน

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนขึ้นเพื่อทำการทดสอบหาตำแหน่งการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงโดยทำการสร้างรูปทรงลูกบาศก์ขนาดยาว 60 เซนติเมตร กว้าง 60 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ซึ่งสร้างจากอะคริลิกที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าสำหรับการทดสอบวัดดีสชาร์จบางส่วน แสดงดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 แบบหม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่ออกแบบ



รูปที่ 3.14 หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

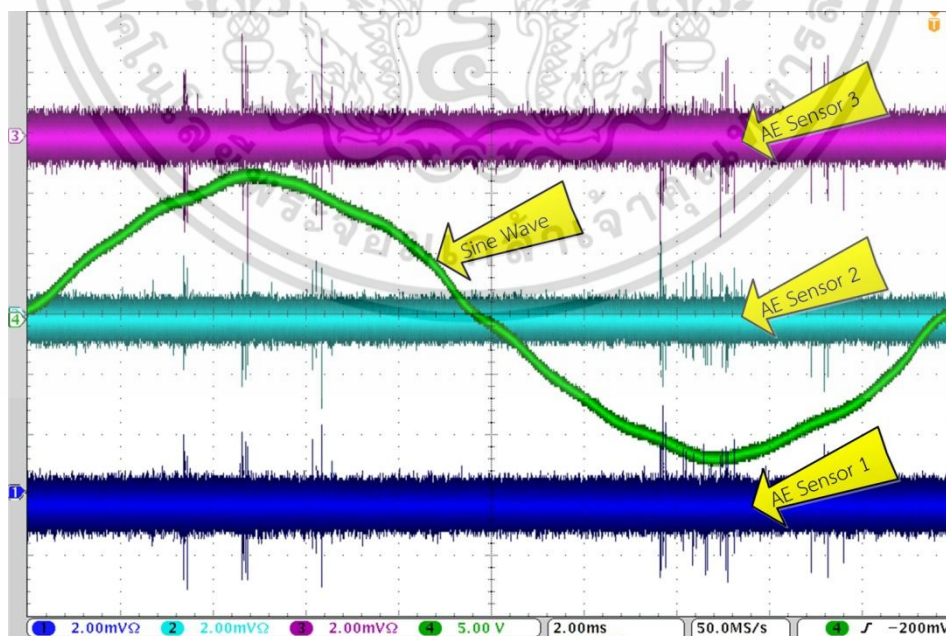
3.7 การวิเคราะห์สัญญาณติสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

การตรวจจับติสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะนำข้อมูลที่วัดได้ผ่านหัวตรวจจับแล้วเก็บผลในรูปแบบไฟล์รูปภาพและไฟล์ข้อมูลนามสกุล .csv จาก Oscilloscope มาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB มีขั้นตอนดังนี้

ส่วนแรกจะแสดงผลที่วัดได้จาก Oscilloscope และในส่วนต่อไปจะเป็นส่วนที่แสดงการวิเคราะห์ผลจากไฟล์ที่บันทึกมาเป็นไฟล์ .csv โดยจะนำไปวิเคราะห์ในหลายๆส่วนด้วยกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ ไปจนถึงการหาค่าของ PD

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MATLAB มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

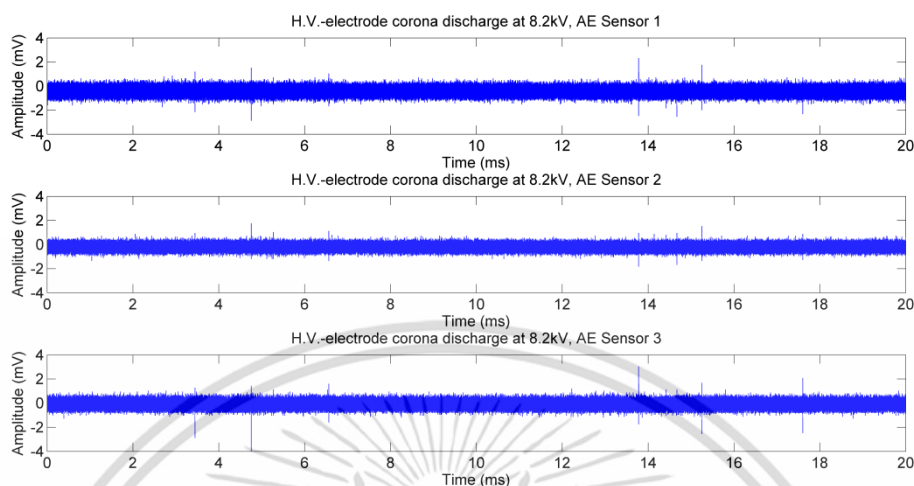
ในขั้นตอนที่ 1 เมื่อได้ไฟล์ .csv จาก Oscilloscope มาแล้วจะนำมาพล็อตกราฟโดยส่วนสำคัญจะต้องทราบค่า Sampling rate ของตัว Oscilloscope และจำนวนของข้อมูลทั้งหมดในการทดสอบซึ่งถ้าหากว่าใช้ข้อมูลที่วัดได้จาก Oscilloscope เลยซึ่งผลนั้นจะไม่ได้กราฟเหมือนกับที่วัดผลได้จาก Oscilloscope ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นเป็นค่าของตัวเลขเชิงเวลาซึ่งจาก MATLAB การพล็อตกราฟจะใช้ผลของตำแหน่งมาเป็นตัวพล็อตโดยแกนเวลาดังนั้นจึงต้องหาค่าของเวลาที่เป็นเวลาในการพล็อตจากค่าของ Sampling rate และดูตำแหน่งทั้งหมดเพื่อทราบค่าของ Time interval แล้วหาค่าของเวลาจาก $T = nT_s$ เมื่อ $T_s = \frac{1}{f_s}$ ดังนั้นเราจะได้ค่าเวลาที่แท้จริงในการพล็อตกราฟออกมาจากค่า T แล้วนำไปพล็อตในแกนเวลาและเมื่อได้ค่าของเวลาที่แท้จริงแล้วนำเวลาที่ได้ไปพล็อตเทียบกับค่าของสัญญาณที่วัดได้ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สัญญาณที่บันทึกได้โดยการใช้ Oscilloscope

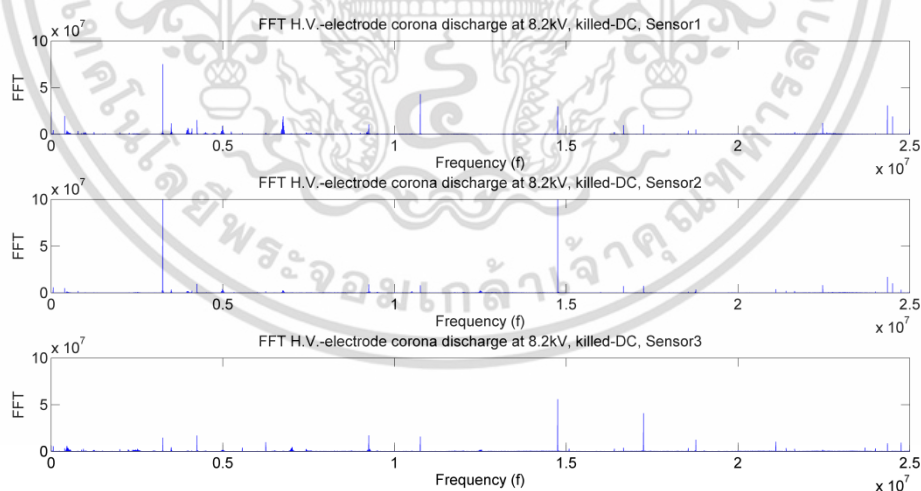
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รูปสัญญาณที่ต้องการจะทำการแยกส่วนของ PD ออกมาเพียงส่วนเดียวเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์
ในขั้นตอนต่อไปโดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สัญญาณ PD ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV

ในขั้นตอนที่ 2 นำสัญญาณ PD ที่ได้จากรูปที่ 3.16 ไปแปลง FFT เพื่อดูสัญญาณ PD ว่า
ประกอบไปด้วยความถี่ใดบ้างในสัญญาณ PD ในการดูลักษณะประกอบความถี่นี้เป็นการบอกถึงช่วงของ
ความถี่ที่เกิด PD และดูว่าผลของสัญญาณรบกวนเกิดในช่วงความถี่เท่าไร โดยจะแสดงให้เห็นในรูป
ที่ 3.17

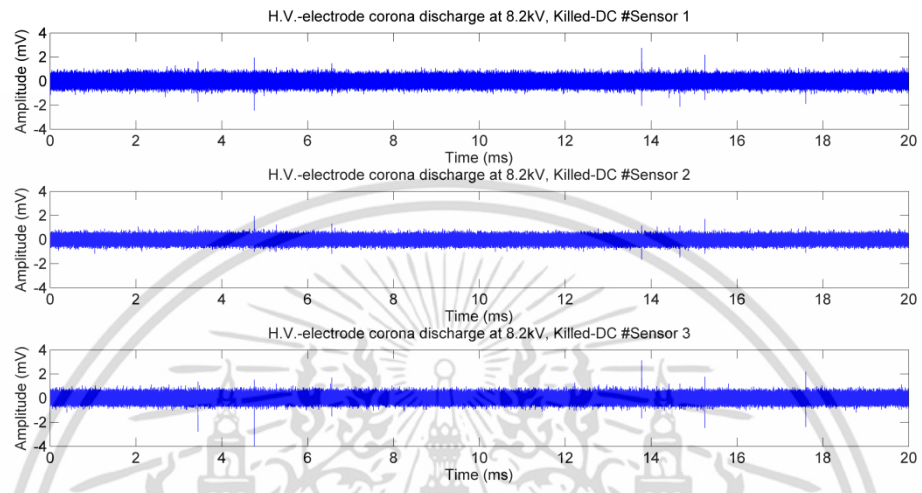


รูปที่ 3.17 FFT ของสัญญาณ PD ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV

จากผล FFT ที่แสดงให้เห็นนั้นพบว่าช่วงของความถี่ของสัญญาณมีตั้งแต่ 0Hz ไปจนถึง
25MHz โดยช่วงของ PD นั้นจะเกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 0 ถึง 5MHz และจะไปพบขนาดของสัญญาณมาก
ขึ้นอีกที่ประมาณ 10 ถึง 17MHz ซึ่งเป็นช่วงของความถี่ของสัญญาณรบกวน

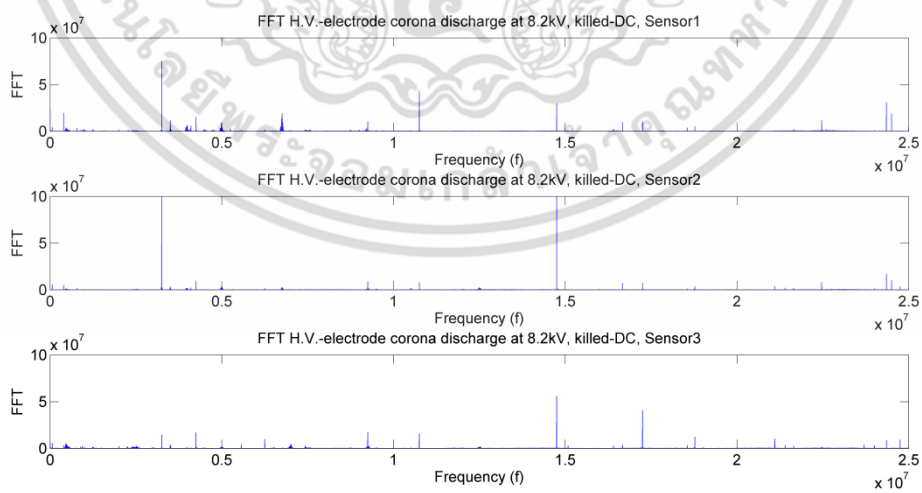
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนที่ 3 เป็นส่วนของการลบผลที่เกิดขึ้นจาก DC Offset ที่ได้จากการวัดโดยผลจากการลบค่า DC Offset จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.18 โดยผลของ DC Offset นั้นจะทำให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของขนาดแรงดันและขนาดของ PD มีค่าผิดเพี้ยนไปดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.18 สัญญาณแรงดันทดสอบและสัญญาณ PD ที่ลบผลจาก DC Offset

ในขั้นตอนที่ 4 เป็นส่วนที่ต้องการดูผล FFT ของสัญญาณ PD ที่ถูกลบผลจาก DC Offset แล้วว่ามีลักษณะและผลแตกต่างหรือเปลี่ยนไปจากผล FFT ของสัญญาณ PD ที่ไม่ได้ถูกลบผลจาก DC Offset ทั้งนี้ผลที่ได้ในการแปลง FFT จะแสดงในรูปที่ 3.19

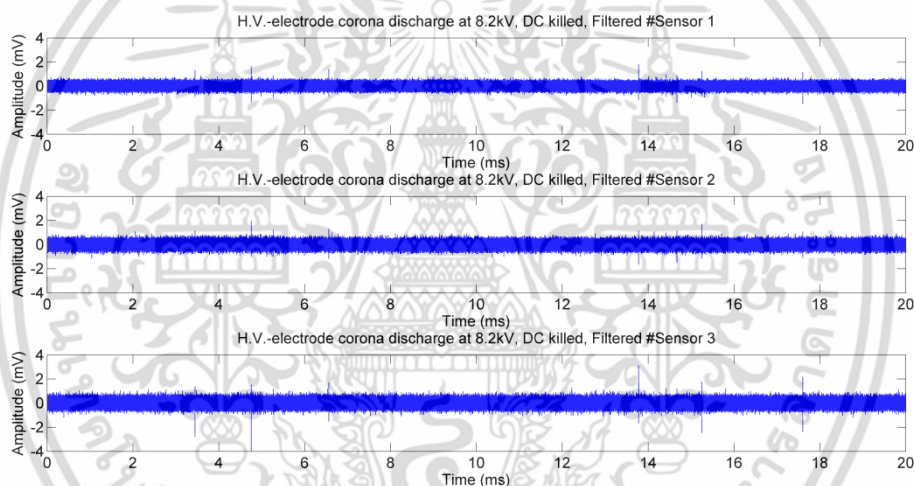


รูปที่ 3.19 FFT ของสัญญาณ PD ที่ลบผลจาก DC Offset ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.19 ทำให้ทราบว่าผลของ FFT ที่ไม่มีผลของ DC Offset กับผลของ FFT ที่ไม่มีผลของ DC Offset ในรูปที่ 3.17 มีลักษณะกราฟเหมือนกันดังนั้นทำให้ทราบว่าเราสามารถแปลง FFT ก่อนหรือหลังจากการลบผลของ DC Offset ออกจากสัญญาณก็ได้ ซึ่งผลนั้นเหมือนกันดังนั้นเมื่อทราบแล้วว่าสัญญาณรอบบวกรอบอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 ถึง 17MHz ดังนั้นในส่วนต่อไปจะทำการกรองสัญญาณรอบบวกรอบออกในขั้นตอนต่อไป

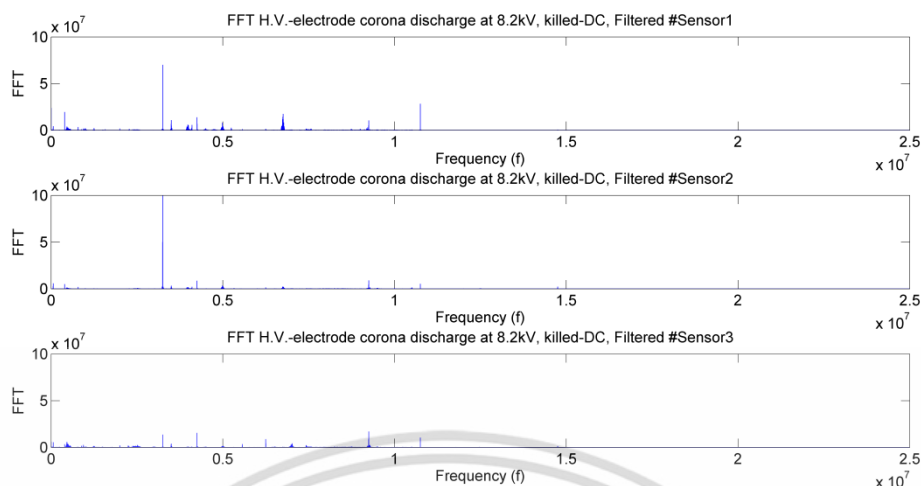
ในขั้นตอนที่ 5 เป็นส่วนที่ทำการกรองสัญญาณรอบบวกรอบออกโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ โดยใช้ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ในกรณีวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งในการเลือกค่าความถี่คัตออฟเพื่อนำไปใส่ค่าในฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้เพื่อกรองสัญญาณรอบบวกรอบที่อยู่ในสัญญาณ PD ถูกกรองให้หายไปโดยจะเลือกค่าความถี่คัตออฟ f_c ที่ความถี่ 10MHz โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะแสดงผลในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 สัญญาณ PD ที่ลบผลจาก DC Offset ที่แรงดันทดสอบ 8.2kV

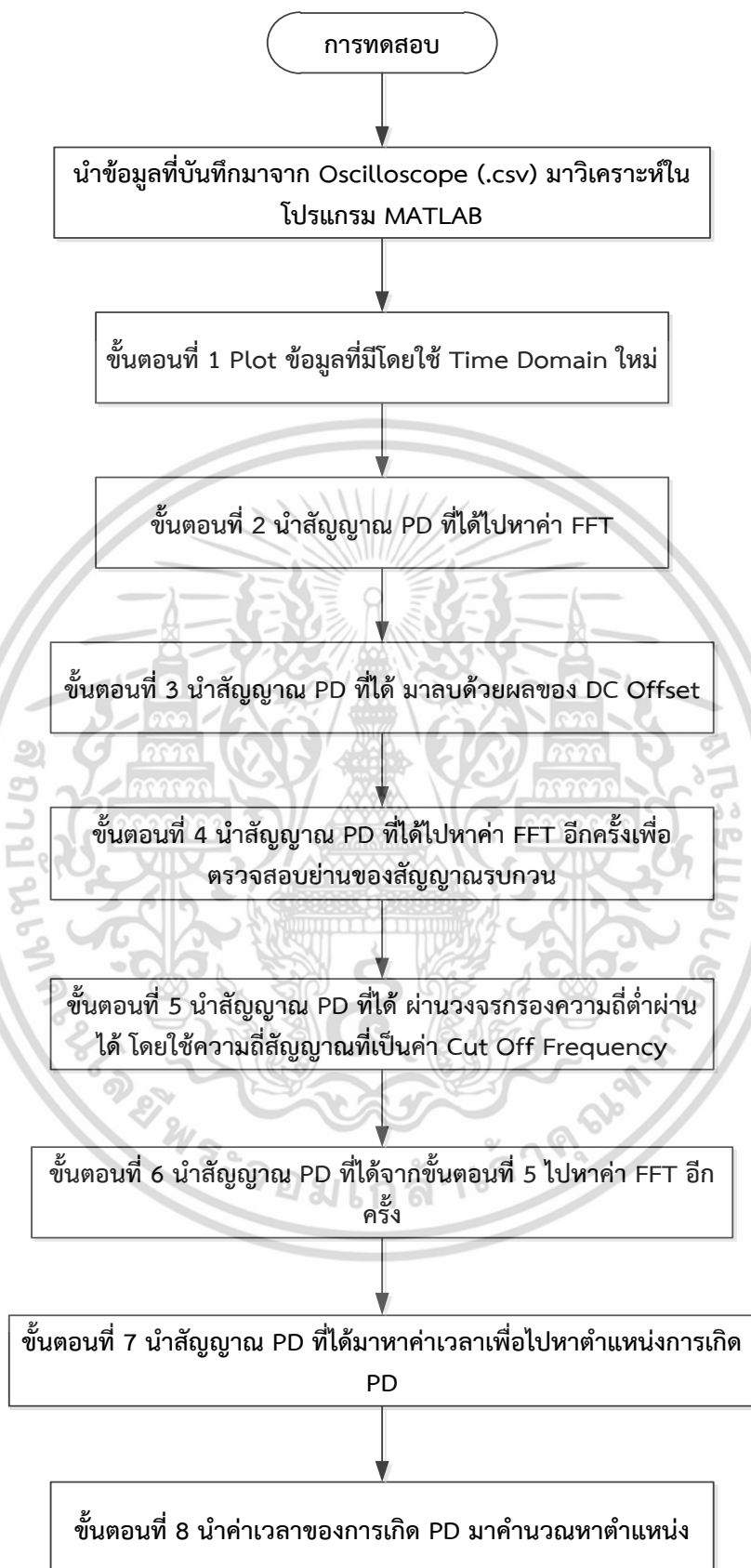
จากผลที่ได้ในรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณนั้นมีขนาดลักษณะที่ขึ้นสัญญาณรอบบวกรอบลดลงเมื่อเทียบจากรูปที่ 3.17 ที่ยังไม่ได้ถูกกรองสัญญาณรอบบวกรอบด้วยฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ในโปรแกรม MATLAB สัญญาณที่ได้นี้เพื่อความแน่ใจจะนำไปแปลง FFT อีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่าสัญญาณรอบบวกรอบนั้นได้ถูกลบออกไปแล้วด้วยความถี่คัตออฟที่เรากำหนดในขั้นตอนต่อไป

ในขั้นตอนที่ 6 เป็นส่วนที่ตรวจสอบว่าผลของสัญญาณรอบบวกรอบนั้นได้ถูกลบออกไปแล้วจึงนำสัญญาณในรูปที่ 3.20 มาแปลง FFT เพื่อตรวจสอบว่าสัญญาณที่ได้มีประกอบด้วยความถี่ใดบ้างในสัญญาณ ทั้งนี้ผลของ FFT ที่ได้นี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผล FFT ของสัญญาณ PD ที่ยังไม่ถูกกรองสัญญาณรอบบวกรอบออกไปผลจากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 สัญญาณ PD ที่ถูกรองโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้

จากผลที่ได้ในรูปที่ 3.21 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.19 และ 3.20 ทำให้เห็นว่าสัญญาณที่ได้ในรูปที่ 3.21 นั้นจะไม่มีส่วนประกอบของความถี่ในช่วง 10MHz ขึ้นไปเลยหรืออาจจะมีแต่น้อยมากในช่วงที่ใกล้ๆ ความถี่ในช่วง 10 ถึง 13MHz ทั้งนี้จากผลที่ได้นั้นจึงสามารถบอกได้ว่าสัญญาณรบกวนได้ถูกรองออกจากสัญญาณ PD แล้วดังนั้นสัญญาณที่ได้ในรูปที่ 3.21 จะเป็นสัญญาณที่สมบูรณ์แบบที่สุดในการที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งการเกิด PD ต่อไปทั้งนี้ในขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 6 เป็นเพียงแค่ส่วนประกอบในการวิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้แล้วนำมาผ่านการคัดสัญญาณให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการหาตำแหน่งการเกิด PD โดยค่าของ PD นั้นจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเพราะถ้าหากนำสัญญาณที่ได้ไปหาค่าเลยนั้นจะเกิดค่าผิดพลาดที่เกินมาจาก สัญญาณรบกวนและผลจาก DC Offset จะทำให้ค่า PD ที่ได้มากกว่าความเป็นจริงดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจะเป็นส่วนที่วิเคราะห์เพื่อทำการหาตำแหน่งการเกิด PD ในระนาบ 3 มิติแสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

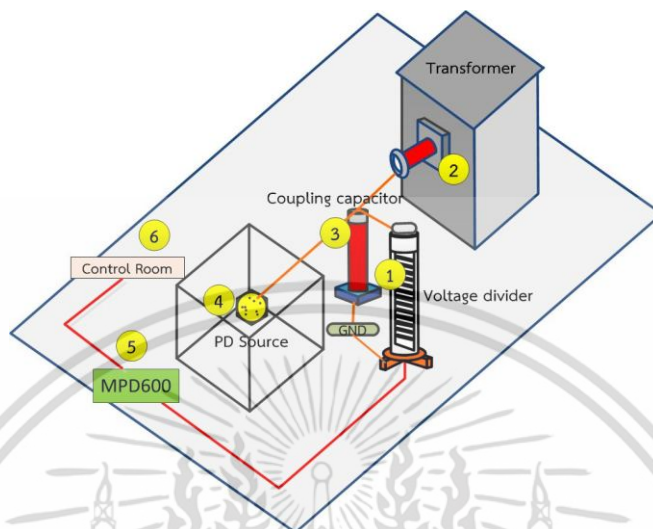
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะแสดงให้เห็นเนื้อหาซึ่งจะมีทั้งหมด 4 ส่วนโดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆด้วยกันคือ 4.1 การทดสอบโดยใช้เทคนิคการวัดแบบเก่าตามมาตรฐาน IEC-60270 และ 4.2 การทดสอบโดยใช้เทคนิคการวัดใช้เทคนิคทางเสียงที่ได้นำเสนอซึ่งเป็นการวัด PD ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบทั้ง 2 แบบนั้นจะแสดงผลการทดสอบที่ได้แสดงในบทที่ 4 โดยจะแสดงให้เห็นวิธีการวัดผลที่ได้จากการวัดทั้ง 2 แบบและวิธีการวิเคราะห์ผลของการวัดด้วยโปรแกรม MATLAB เนื้อหาทั้งหมดในบทที่ 4 จะแสดงให้เห็นในแผนภาพในรูปที่ 4.1



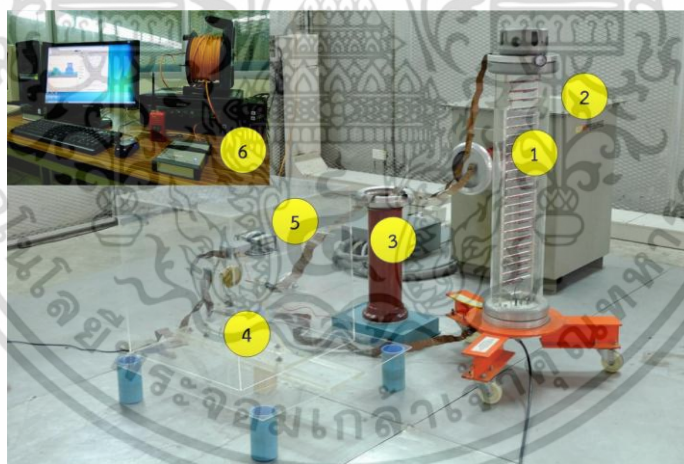
รูปที่ 4.1 แผนภาพการทดสอบและวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วนในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม (MPD600) ในห้องปฏิบัติการแรงสูงตาม
วงจรรูปแบบและอุปกรณ์การวัดในวงจรจริงแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 วงจรรูปแบบตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม (MPD600)



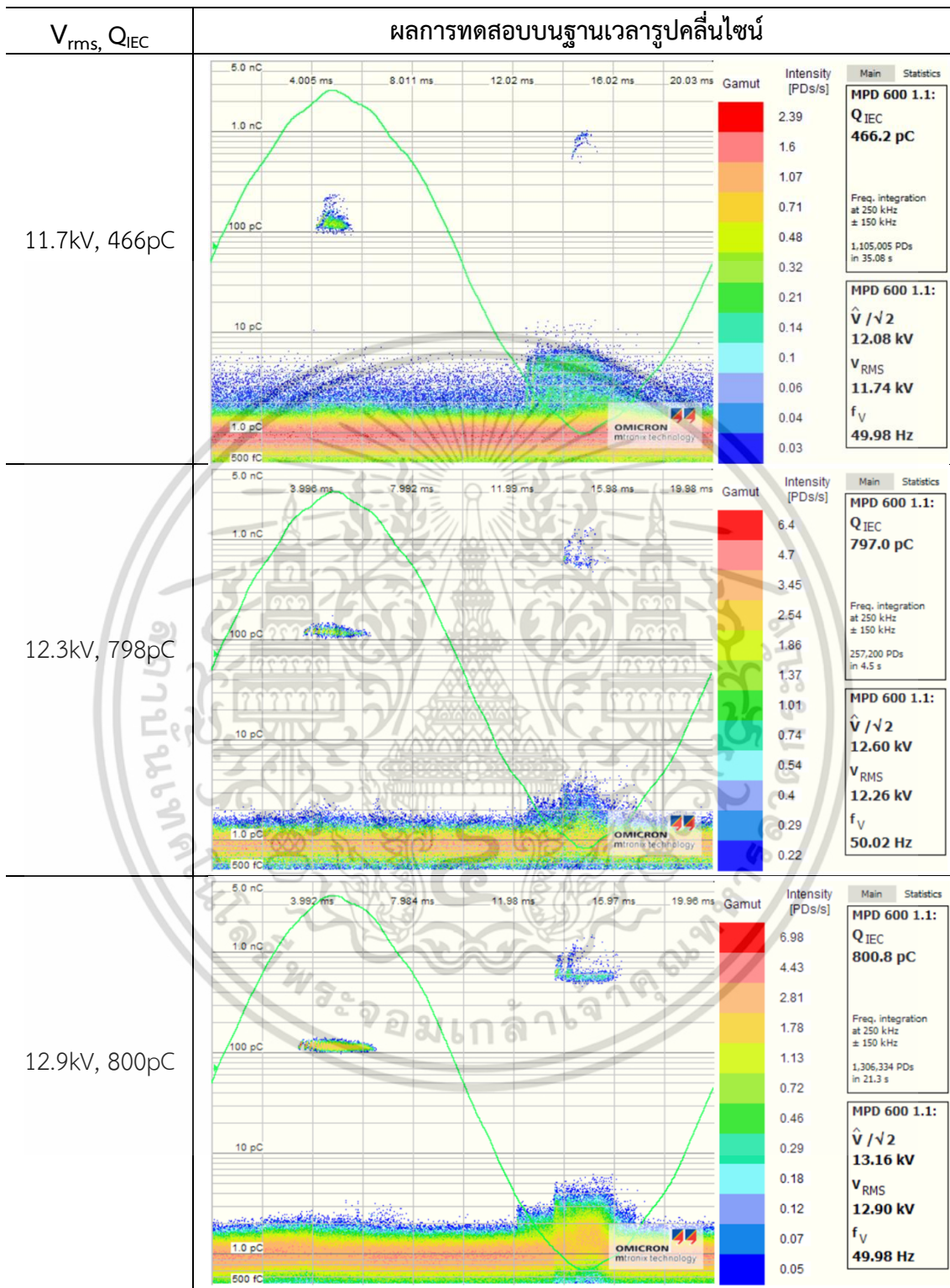
รูปที่ 4.3 วงจรตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม (MPD600) ในห้องปฏิบัติการแรงสูง

โดยอุปกรณ์ในวงจรดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงมีดังนี้

1. Voltage divider 1000V/1V
2. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง AC พิกัด 460V/75V, 40kVA, 50Hz
3. Coupling capacitor (Ck) พิกัด 0.001 microfarad 100kV
4. ชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Test Object)
5. ชุดอุปกรณ์วัด (MPD600)

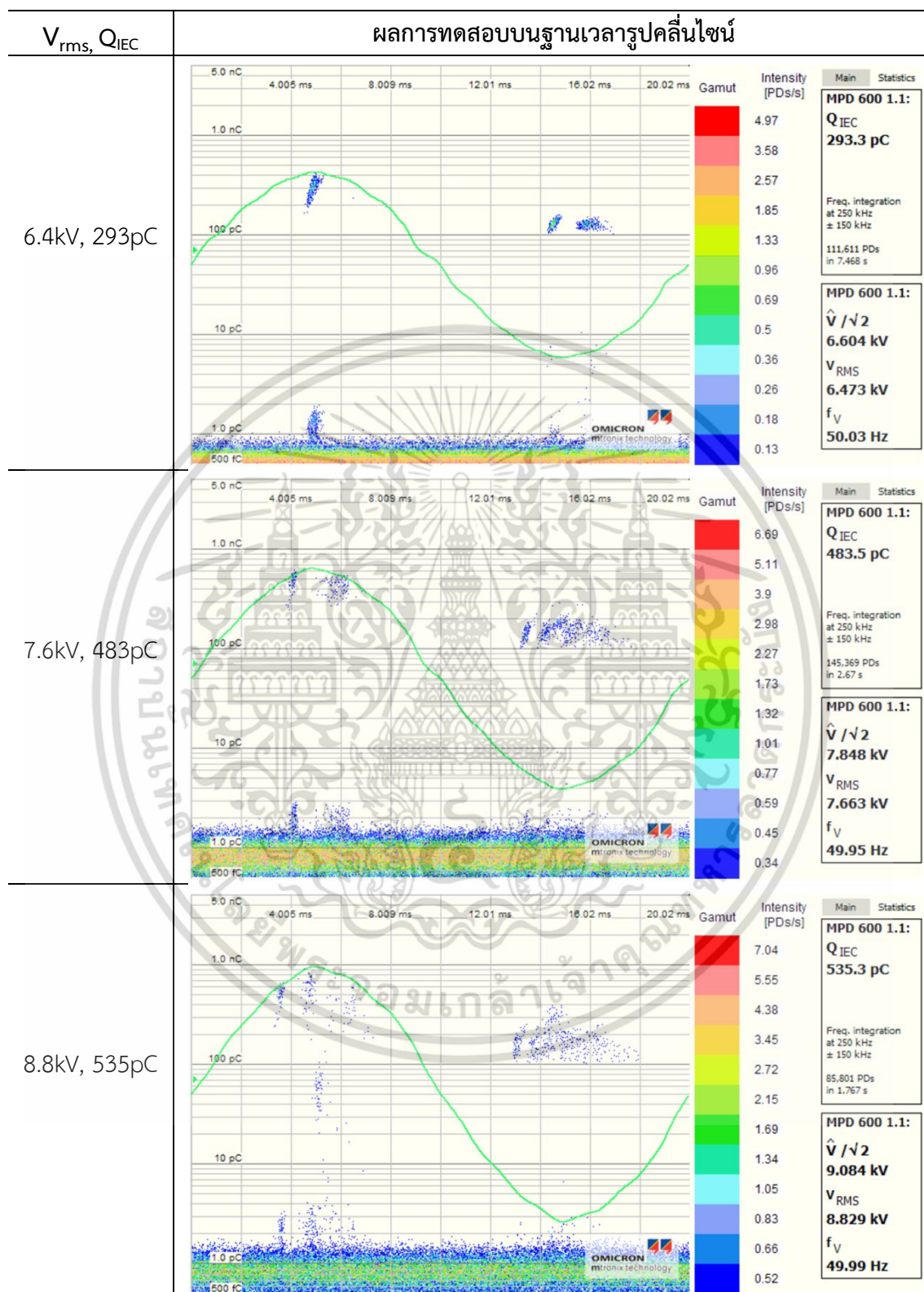
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ



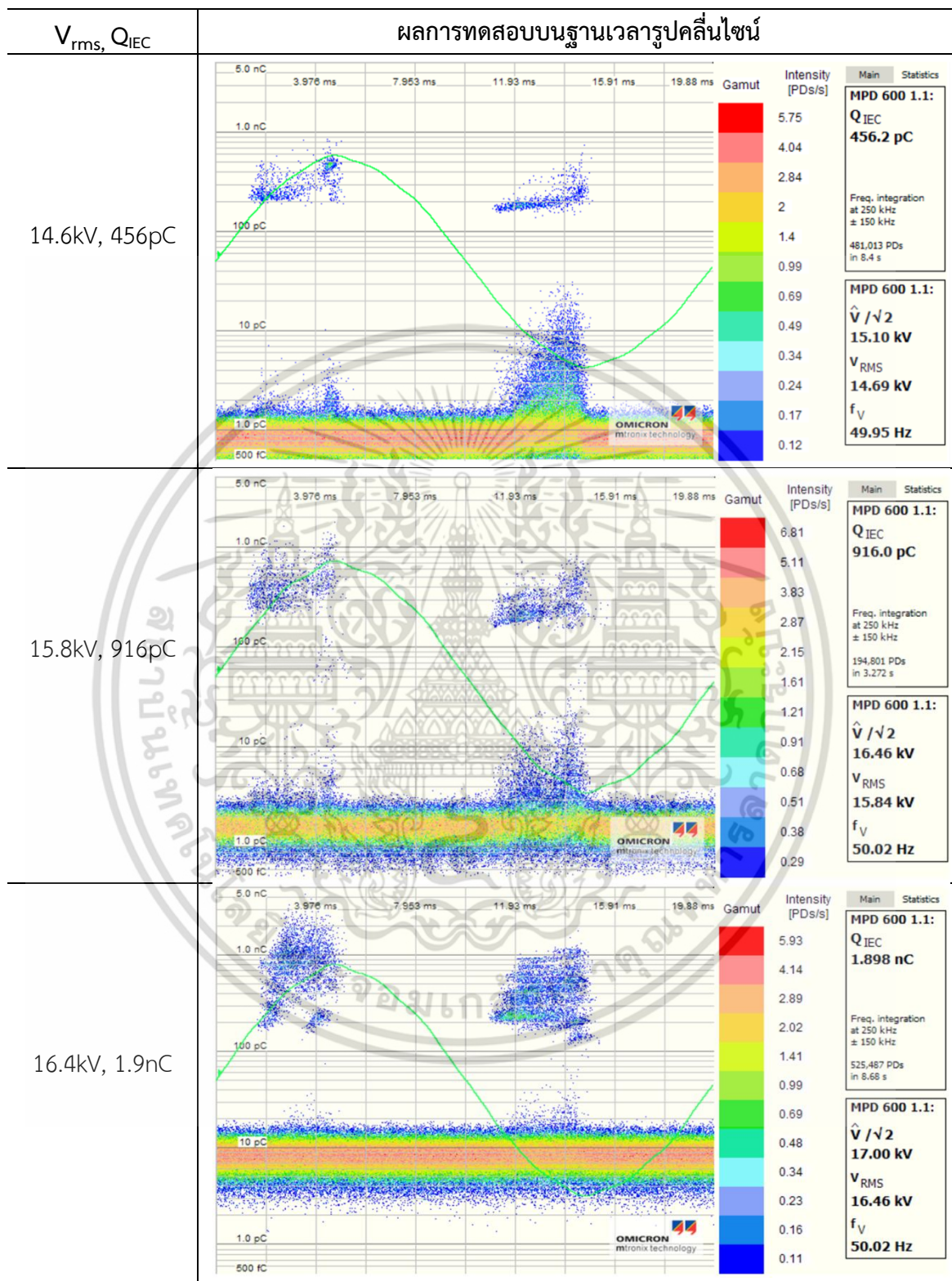
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

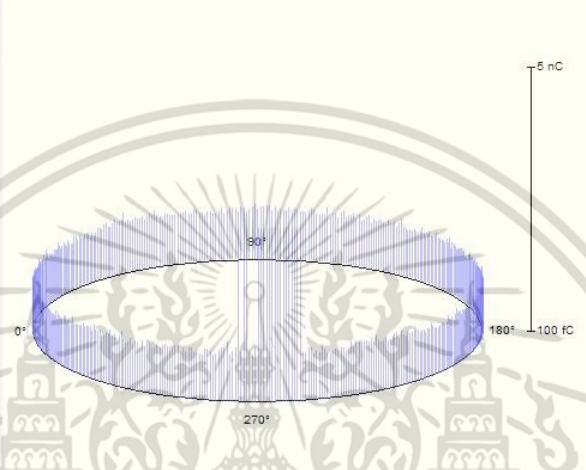

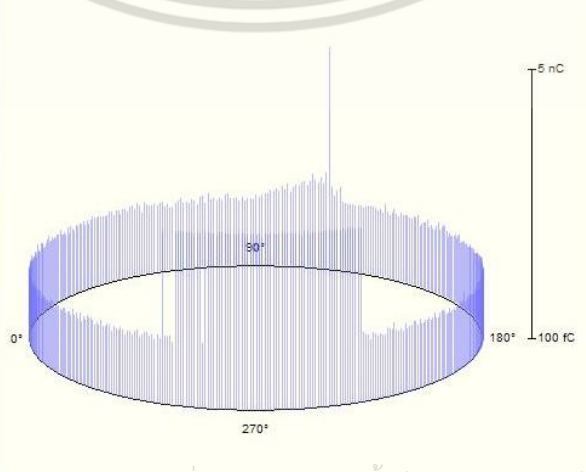


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดสอบบนฐานเวลาอิลิปส์

จากการทดสอบวัดดิซชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงในสภาพบรรยากาศทางทดลองดังนี้
อุณหภูมิ 32 °C ความดันบรรยากาศ 767 mmHg

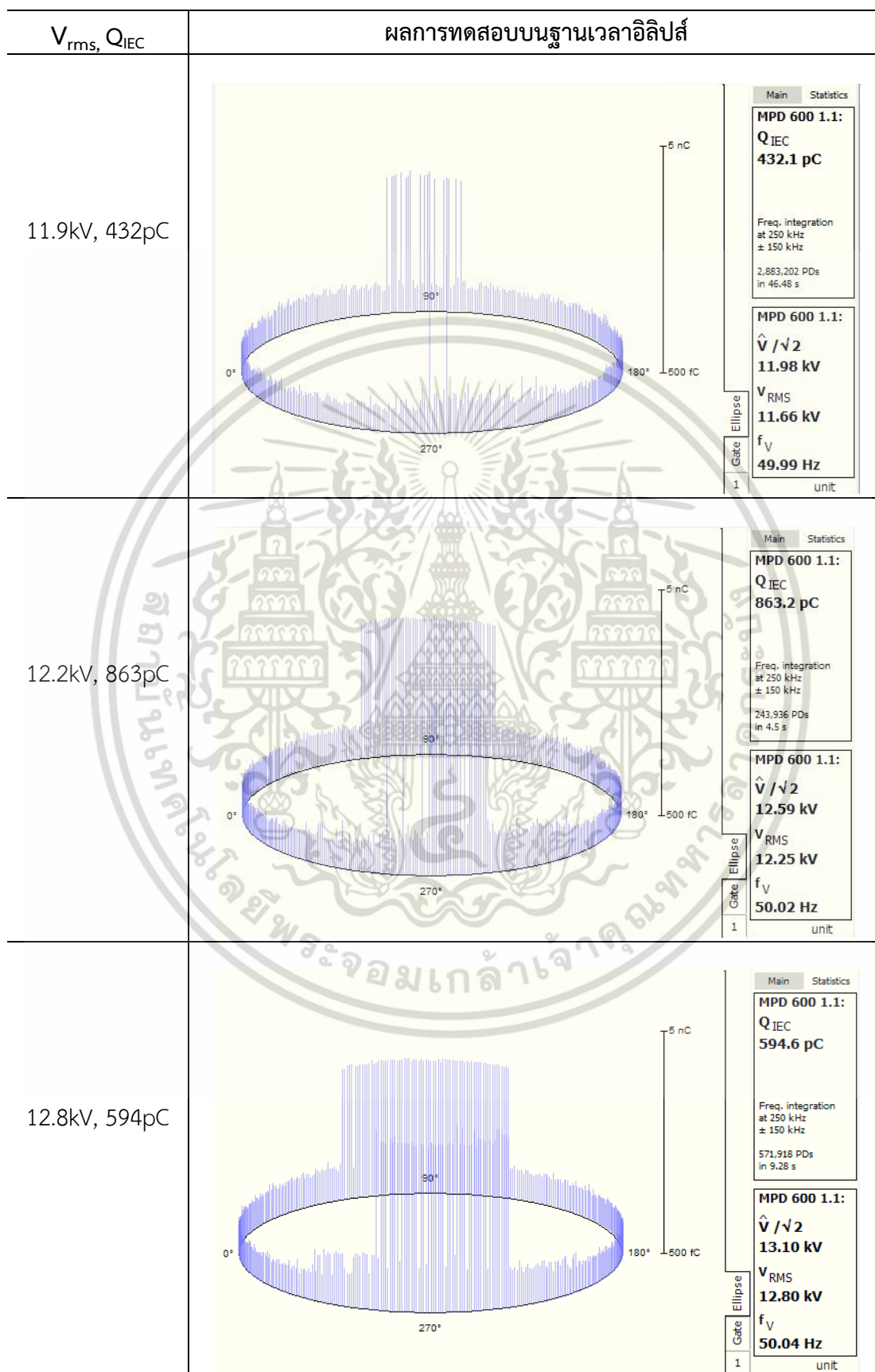
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบโคโรนาดิซชาร์จทางด้านแรงสูง

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบบนฐานเวลาอิลิปส์	
8.2kV, 125pC		<p>Main Statistics</p> <p>MPD 600 1.1: Q_{IEC} 125.0 pC</p> <p>Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz</p> <p>724,015 PDs in 11.37 s</p> <hr/> <p>MPD 600 1.1: $\hat{V} / \sqrt{2}$ 8.479 kV</p> <p>V_{RMS} 8.216 kV</p> <p>f_V 50.05 Hz</p> <p>Gate Ellipse 1 unit</p>
8.8kV, 114pC		<p>Main Statistics</p> <p>MPD 600 1.1: Q_{IEC} 114.3 pC</p> <p>Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz</p> <p>3,794,484 PDs in 1 m</p> <hr/> <p>MPD 600 1.1: $\hat{V} / \sqrt{2}$ 9.092 kV</p> <p>V_{RMS} 8.802 kV</p> <p>f_V 50.03 Hz</p> <p>Gate Ellipse 1 unit</p>
9.4kV, 491pC		<p>Main Statistics</p> <p>MPD 600 1.1: Q_{IEC} 491.1 pC</p> <p>Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz</p> <p>1,141,771 PDs in 17.7 s</p> <hr/> <p>MPD 600 1.1: $\hat{V} / \sqrt{2}$ 9.715 kV</p> <p>V_{RMS} 9.389 kV</p> <p>f_V 49.96 Hz</p> <p>Gate Ellipse 1 unit</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

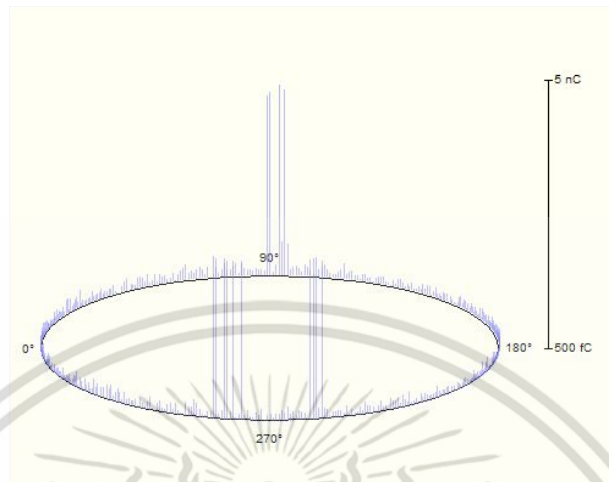
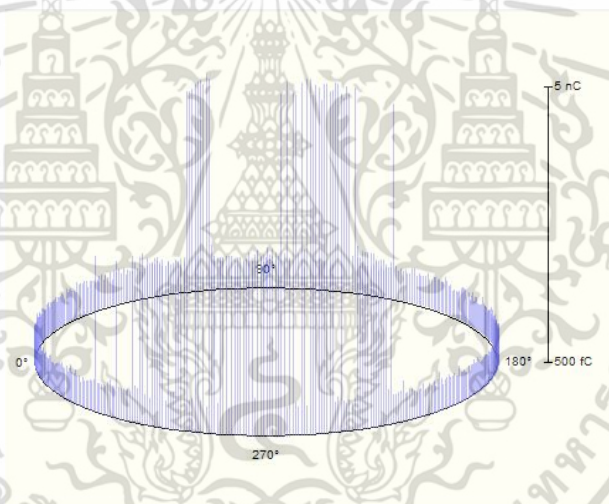
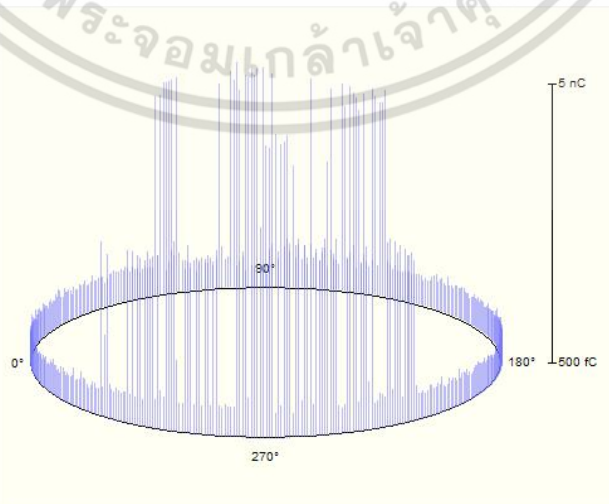
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ



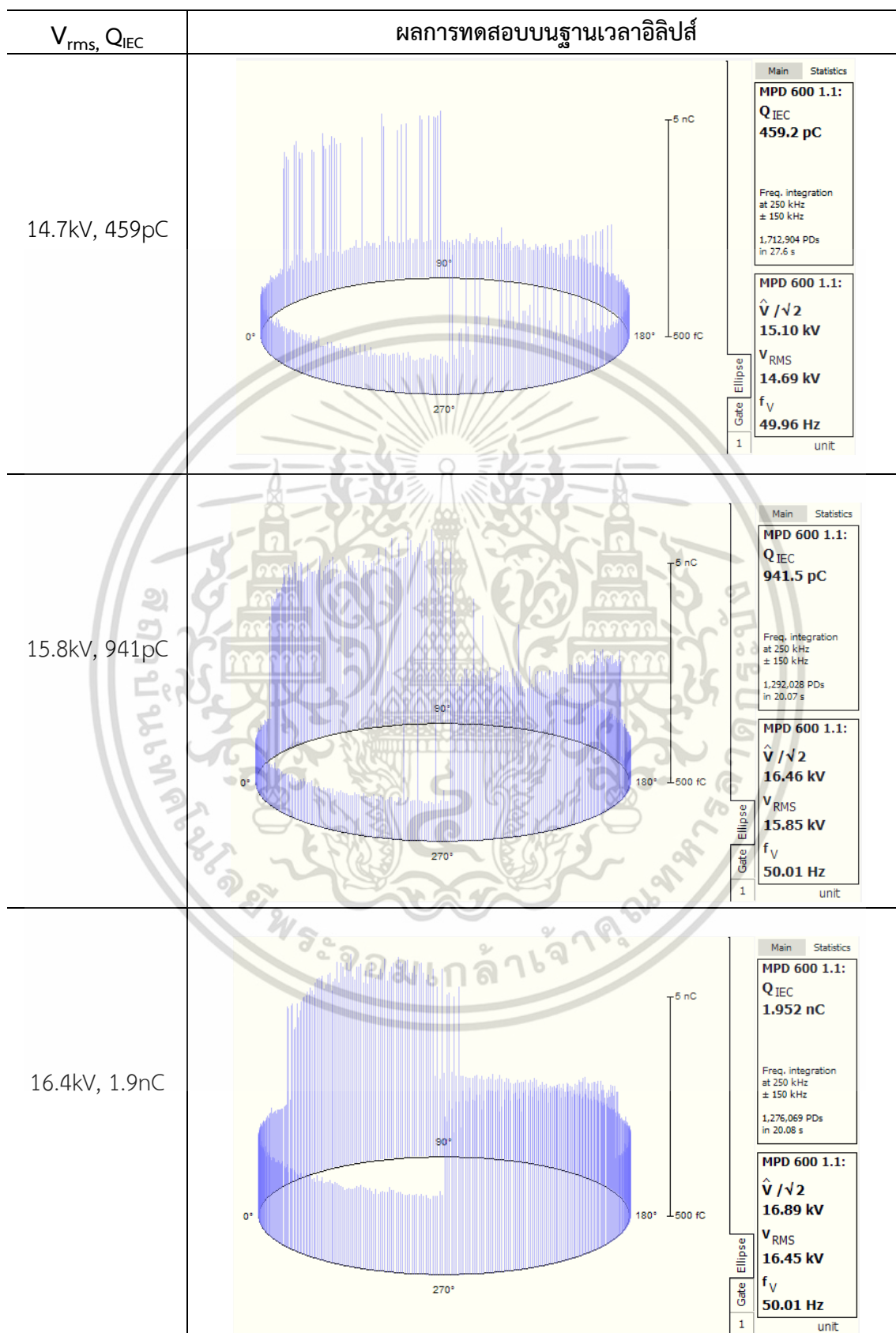
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบบนฐานเวลาอีลิปส์																														
6.4kV, 298pC	 <table border="1" data-bbox="1111 369 1262 851"> <thead> <tr> <th>Main</th> <th>Statistics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">MPD 600 1.1:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Q_{IEC}</td> </tr> <tr> <td colspan="2">298.2 pC</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz</td> </tr> <tr> <td colspan="2">184,283 PDs in 11.7 s</td> </tr> <tr> <td colspan="2">MPD 600 1.1:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">$\hat{V} / \sqrt{2}$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">6.612 kV</td> </tr> <tr> <td colspan="2">V_{RMS}</td> </tr> <tr> <td colspan="2">6.473 kV</td> </tr> <tr> <td colspan="2">f_V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">50.03 Hz</td> </tr> <tr> <td>Gate</td> <td>unit</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Main	Statistics	MPD 600 1.1:		Q_{IEC}		298.2 pC		Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz		184,283 PDs in 11.7 s		MPD 600 1.1:		$\hat{V} / \sqrt{2}$		6.612 kV		V_{RMS}		6.473 kV		f_V		50.03 Hz		Gate	unit	1	
Main	Statistics																														
MPD 600 1.1:																															
Q_{IEC}																															
298.2 pC																															
Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz																															
184,283 PDs in 11.7 s																															
MPD 600 1.1:																															
$\hat{V} / \sqrt{2}$																															
6.612 kV																															
V_{RMS}																															
6.473 kV																															
f_V																															
50.03 Hz																															
Gate	unit																														
1																															
7.6kV, 483pC	 <table border="1" data-bbox="1111 896 1262 1400"> <thead> <tr> <th>Main</th> <th>Statistics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">MPD 600 1.1:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Q_{IEC}</td> </tr> <tr> <td colspan="2">483.7 pC</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz</td> </tr> <tr> <td colspan="2">1,214,152 PDs in 20.07 s</td> </tr> <tr> <td colspan="2">MPD 600 1.1:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">$\hat{V} / \sqrt{2}$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">7.854 kV</td> </tr> <tr> <td colspan="2">V_{RMS}</td> </tr> <tr> <td colspan="2">7.662 kV</td> </tr> <tr> <td colspan="2">f_V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">49.97 Hz</td> </tr> <tr> <td>Gate</td> <td>unit</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Main	Statistics	MPD 600 1.1:		Q_{IEC}		483.7 pC		Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz		1,214,152 PDs in 20.07 s		MPD 600 1.1:		$\hat{V} / \sqrt{2}$		7.854 kV		V_{RMS}		7.662 kV		f_V		49.97 Hz		Gate	unit	1	
Main	Statistics																														
MPD 600 1.1:																															
Q_{IEC}																															
483.7 pC																															
Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz																															
1,214,152 PDs in 20.07 s																															
MPD 600 1.1:																															
$\hat{V} / \sqrt{2}$																															
7.854 kV																															
V_{RMS}																															
7.662 kV																															
f_V																															
49.97 Hz																															
Gate	unit																														
1																															
8.8kV, 603pC	 <table border="1" data-bbox="1111 1444 1262 1948"> <thead> <tr> <th>Main</th> <th>Statistics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">MPD 600 1.1:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Q_{IEC}</td> </tr> <tr> <td colspan="2">603.6 pC</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz</td> </tr> <tr> <td colspan="2">249,091 PDs in 4.167 s</td> </tr> <tr> <td colspan="2">MPD 600 1.1:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">$\hat{V} / \sqrt{2}$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">9.078 kV</td> </tr> <tr> <td colspan="2">V_{RMS}</td> </tr> <tr> <td colspan="2">8.826 kV</td> </tr> <tr> <td colspan="2">f_V</td> </tr> <tr> <td colspan="2">49.98 Hz</td> </tr> <tr> <td>Gate</td> <td>unit</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Main	Statistics	MPD 600 1.1:		Q_{IEC}		603.6 pC		Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz		249,091 PDs in 4.167 s		MPD 600 1.1:		$\hat{V} / \sqrt{2}$		9.078 kV		V_{RMS}		8.826 kV		f_V		49.98 Hz		Gate	unit	1	
Main	Statistics																														
MPD 600 1.1:																															
Q_{IEC}																															
603.6 pC																															
Freq. integration at 250 kHz ± 150 kHz																															
249,091 PDs in 4.167 s																															
MPD 600 1.1:																															
$\hat{V} / \sqrt{2}$																															
9.078 kV																															
V_{RMS}																															
8.826 kV																															
f_V																															
49.98 Hz																															
Gate	unit																														
1																															

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบดิซชาร์จภายใน

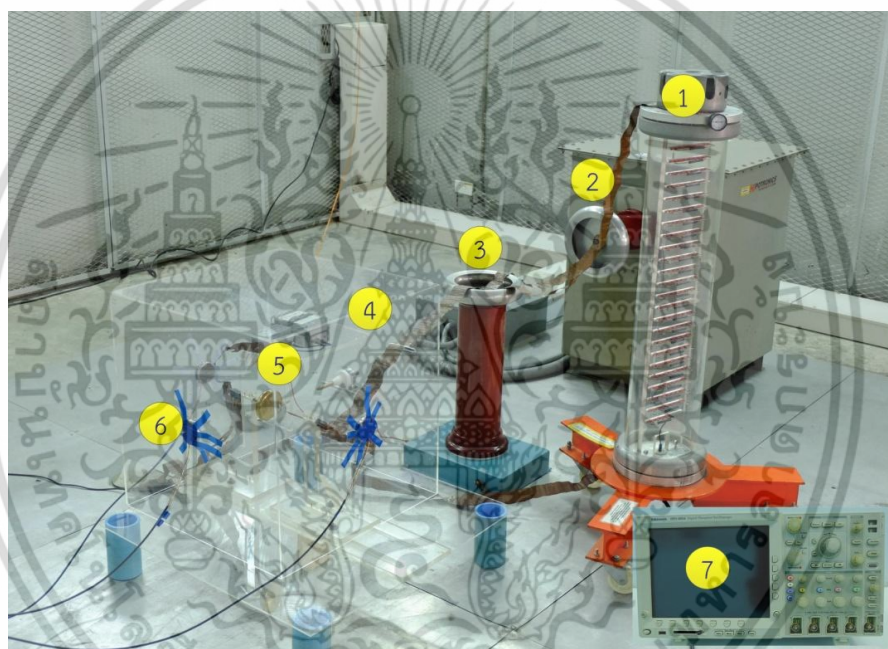


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

ในงานวิจัยนี้จะทดสอบดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 4 รูปแบบโดยทำการต่อวงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งทำการทดสอบกับชุดอุปกรณ์ทดสอบตามทฤษฎีทั้งหมด 4 ประเภทดังนี้

1. โคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงสูง (H.V.-electrode Corona Discharge)
2. โคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงต่ำ (L.V.-electrode corona Discharge)
3. ดิสชาร์จบางส่วนตามผิว (Surface Discharge)
4. ดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal Discharge)



รูปที่ 4.4 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

โดยอุปกรณ์ในวงจรดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงมีดังนี้

1. Voltage divider 1000V/1V
2. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง AC พิกัด 460V/75V, 40kVA, 50Hz
3. Coupling capacitor (Ck) พิกัด 0.001 microfarad 100kV
4. หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น ขนาด (60cmx60cmx60cm)
5. ชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Test Object)
6. หัวตรวจจับทางเสียง (Acoustic Sensor)
7. Oscilloscope รุ่น Tektronic DPO 4054

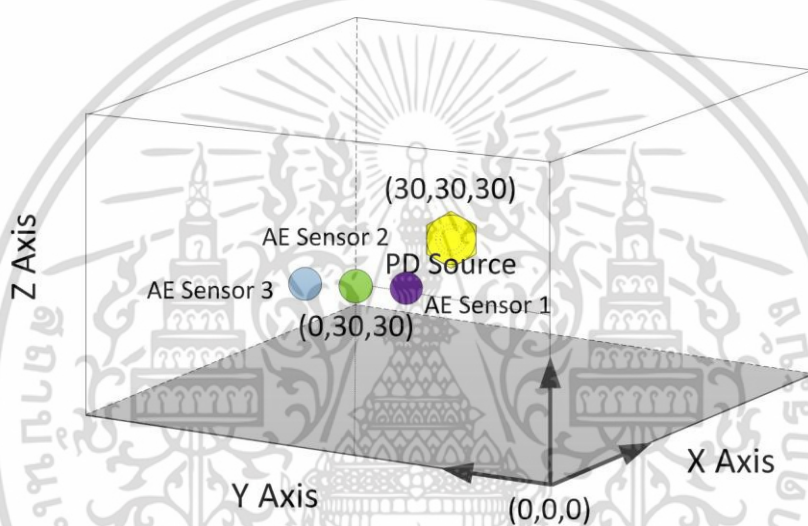
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การทดสอบด้วยหัวตรวจจับย่านความถี่ 1MHz

ทำการทดลองตรวจจับดิสชาร์จโดยใช้หัวตรวจจับย่านความถี่ 1MHz เพื่อหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

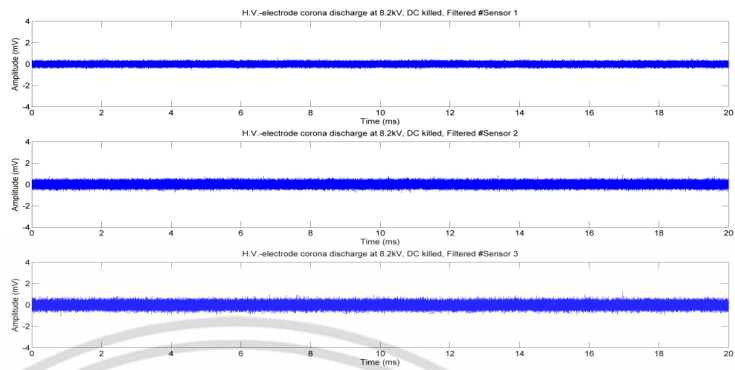
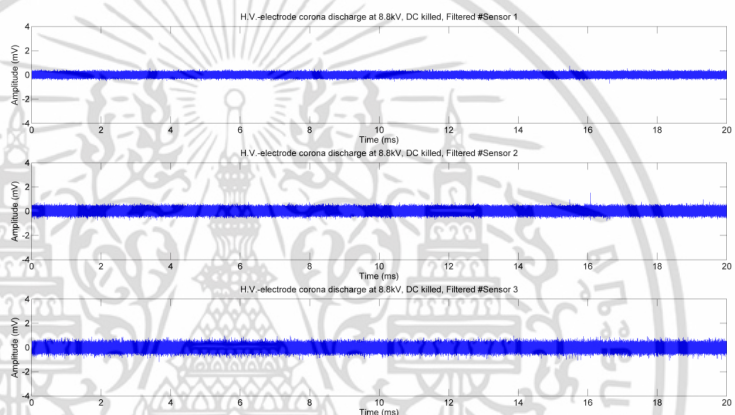
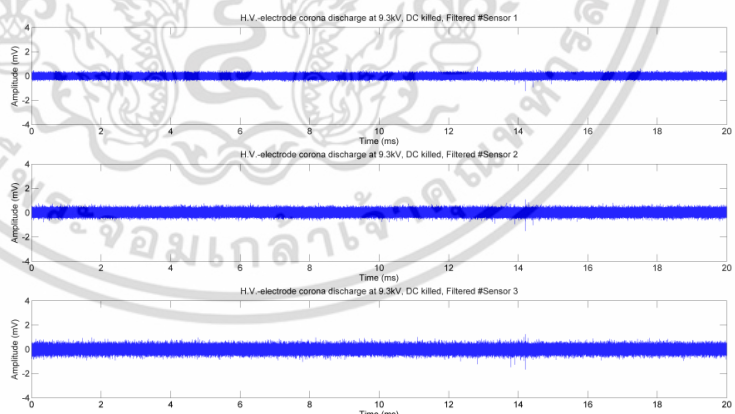
4.2.1.1 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกลุ่มโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (0, 30, 30), S2 (0, 30, 30), S3 (0, 30, 30) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.5



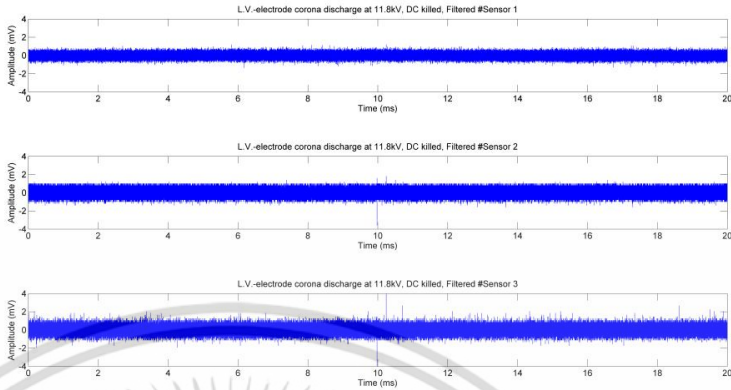
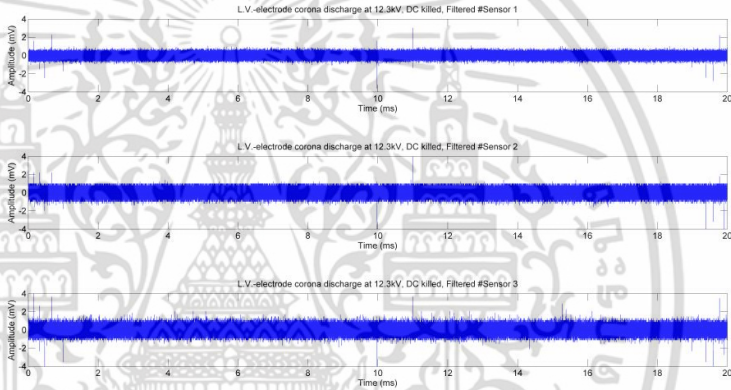
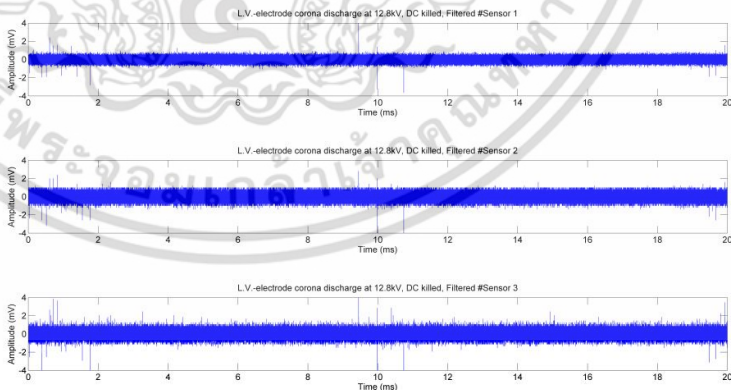
รูปที่ 4.5 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกลุ่มโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 1MHz

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
8.2kV, 114pC	
8.8kV, 120pC	
9.4kV, 300pC	

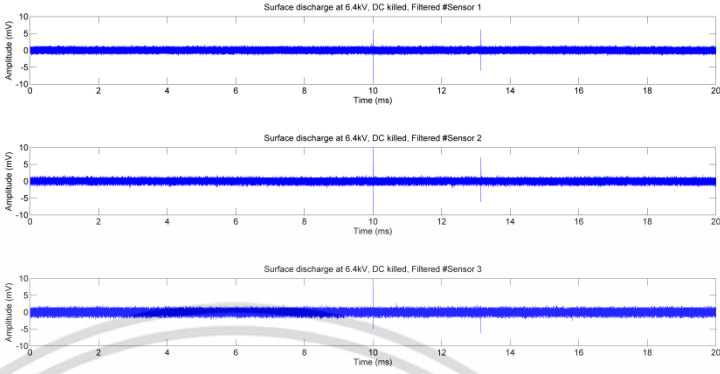
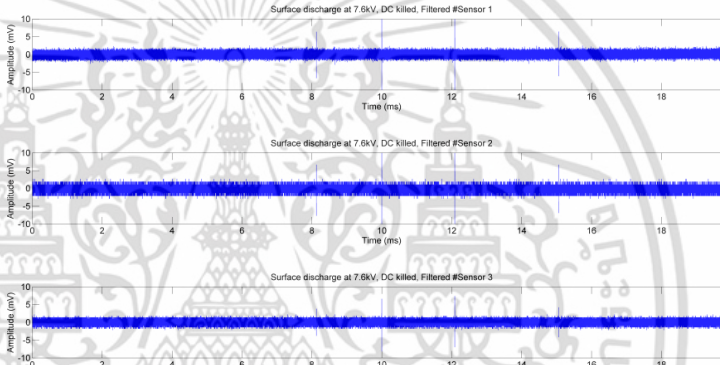
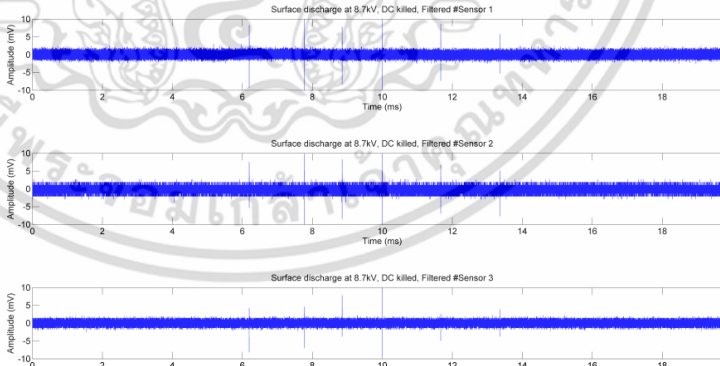
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบโคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงต่ำ

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
11.8kV, 689pC	
12.3kV, 950pC	
12.8kV, 600pC	

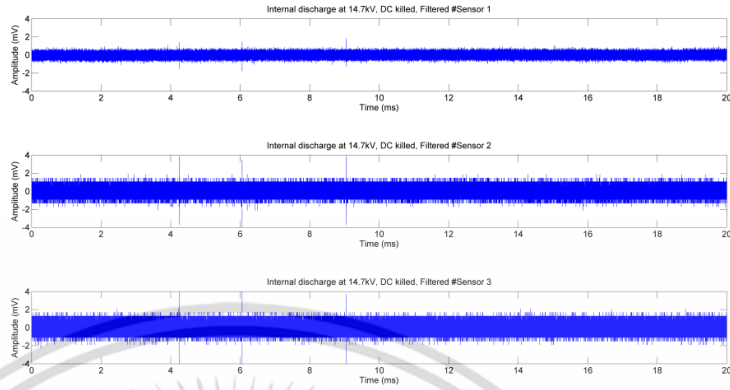
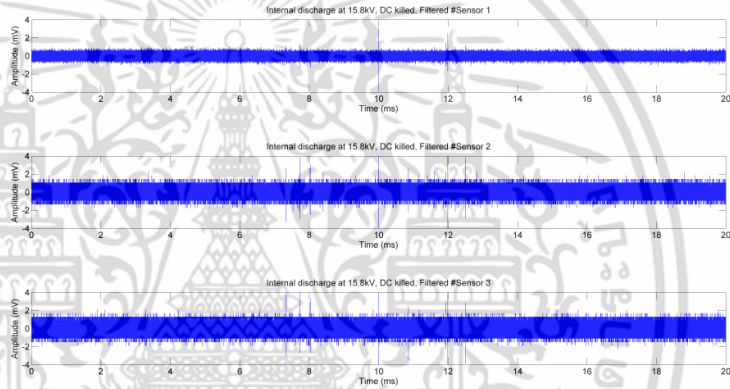
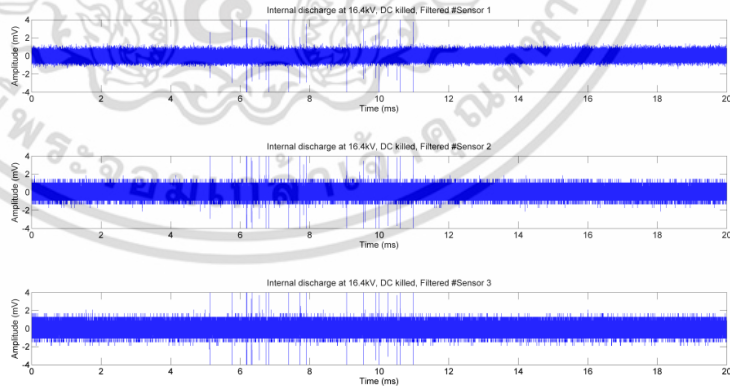
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
6.4kV, 298pC	 <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
7.6kV, 483pC	 <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
8.7kV, 603pC	 <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

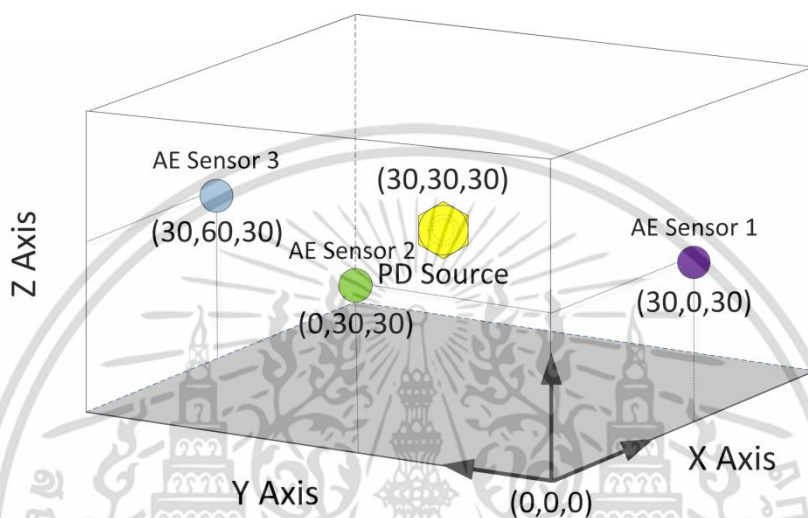
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
14.7kV, 127pC	
15.8kV, 225pC	
16.4kV, 515pC	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบระนาบโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิซาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (30, 0, 30), S2 (0, 30, 30), S3 (30, 60, 30) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบระนาบโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 1MHz

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางดำนแรงสูง

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
8.2kV, 134pC	
8.8kV, 140pC	
9.4kV, 450pC	

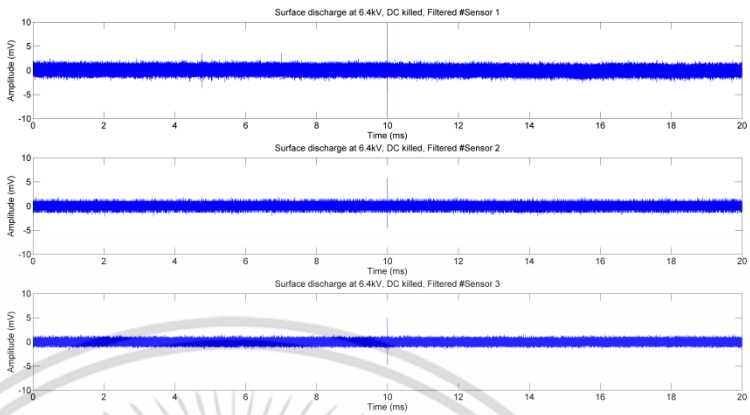
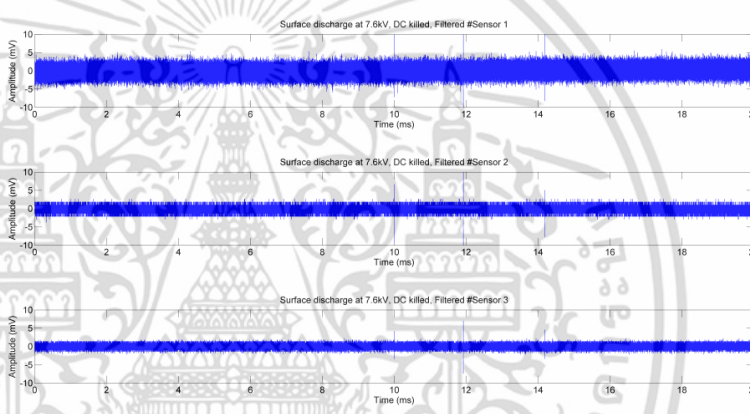
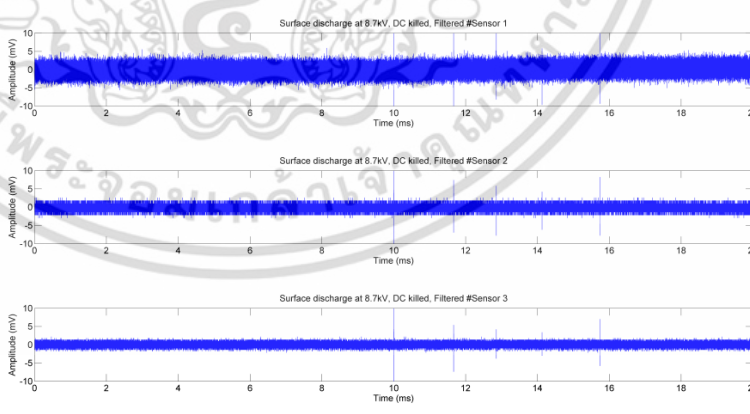
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
11.8kV, 600pC	<p>L.V.-electrode corona discharge at 11.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>L.V.-electrode corona discharge at 11.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>L.V.-electrode corona discharge at 11.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
12.3kV, 910pC	<p>L.V.-electrode corona discharge at 12.3kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>L.V.-electrode corona discharge at 12.3kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>L.V.-electrode corona discharge at 12.3kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
12.8kV, 622pC	<p>L.V.-electrode corona discharge at 12.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>L.V.-electrode corona discharge at 12.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>L.V.-electrode corona discharge at 12.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
6.4kV, 122pC	 <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
7.6kV, 425pC	 <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
8.7kV, 515pC	 <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

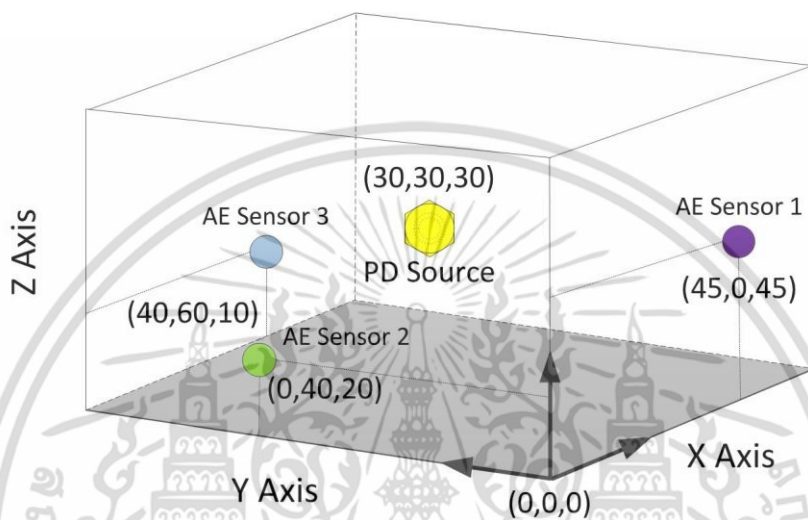
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
14.1kV, 421pC	
15.2kV, 525pC	
15.8kV, 915pC	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

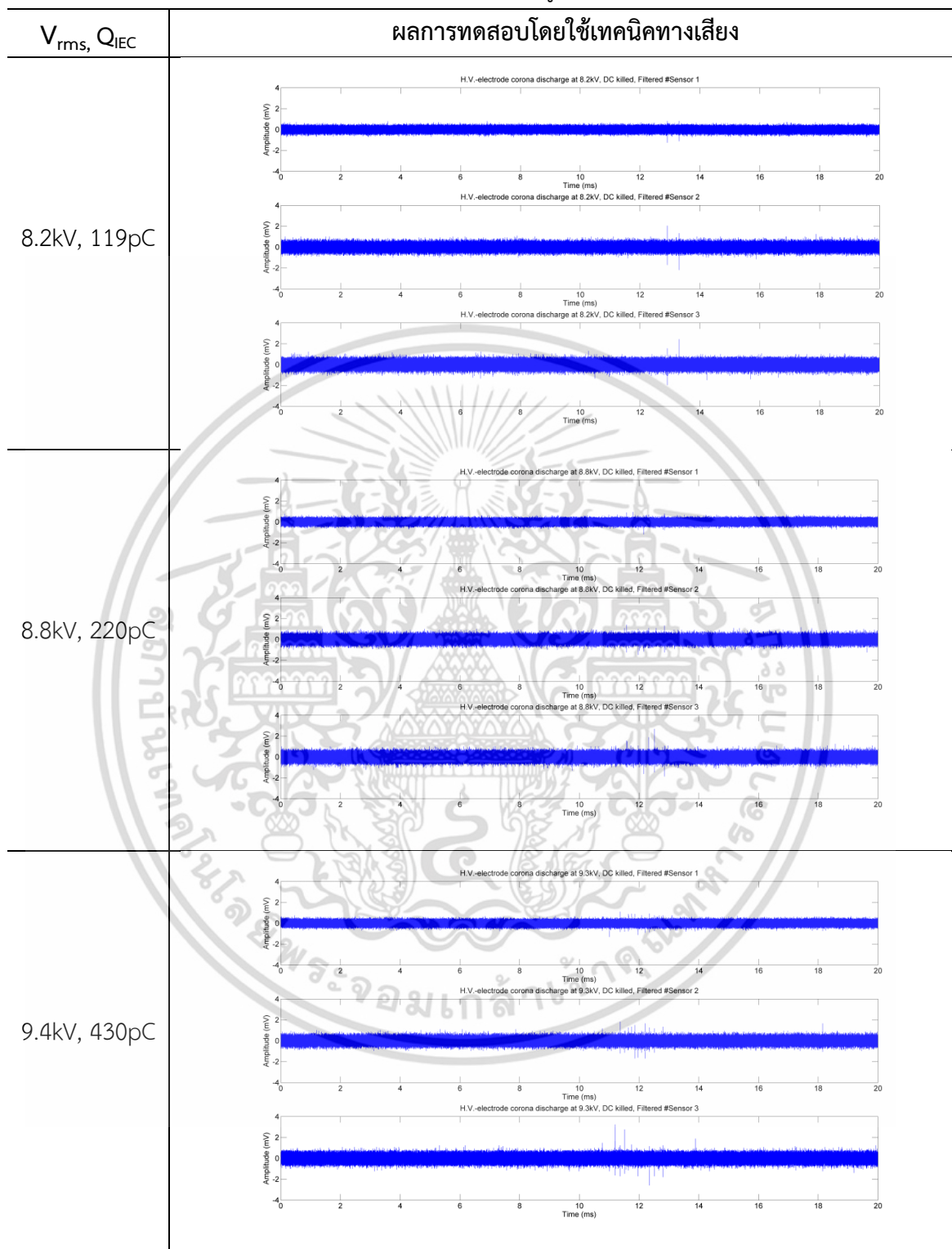
4.2.1.3 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกระจายโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิซาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (45, 0, 45), S2 (0, 40, 20), S3 (40, 60, 10) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.7



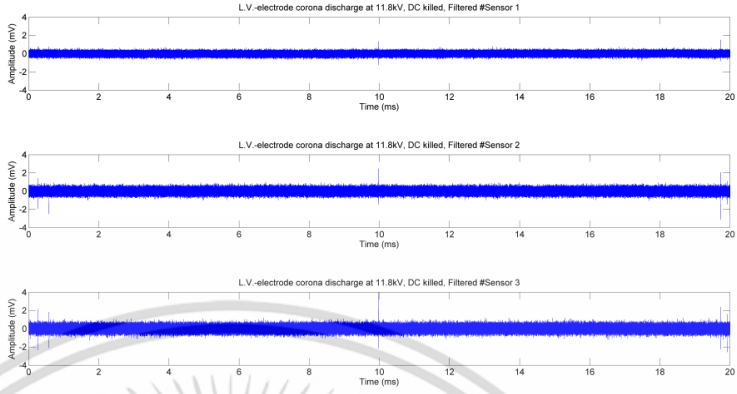
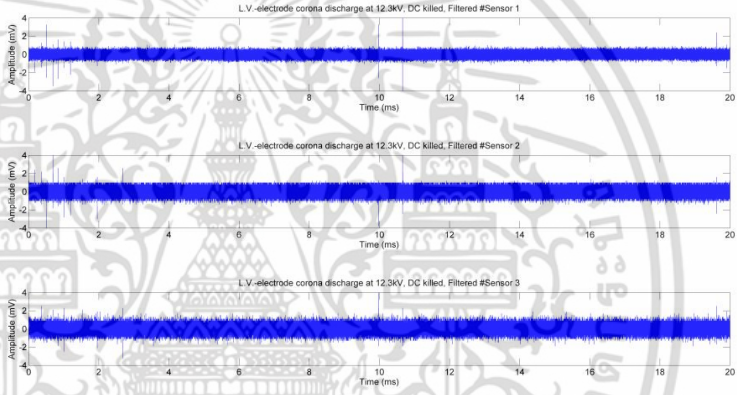
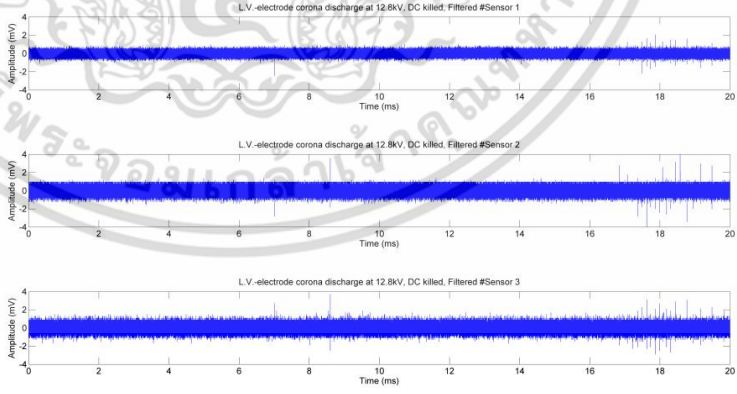
รูปที่ 4.7 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกระจายโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 1MHz

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบโคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงสูง



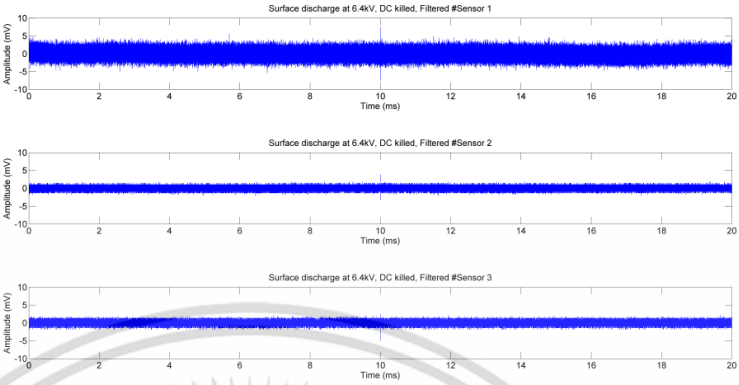
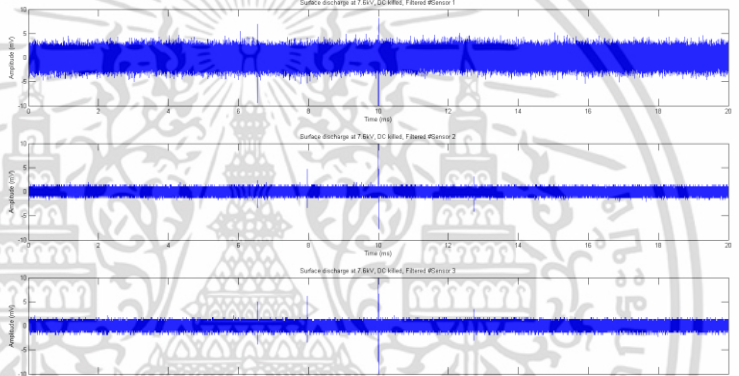
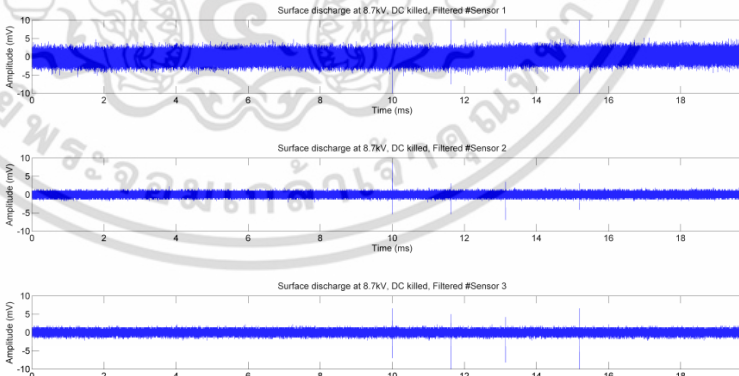
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
11.2kV, 123pC	
12.3kV, 139pC	
12.8kV, 672pC	

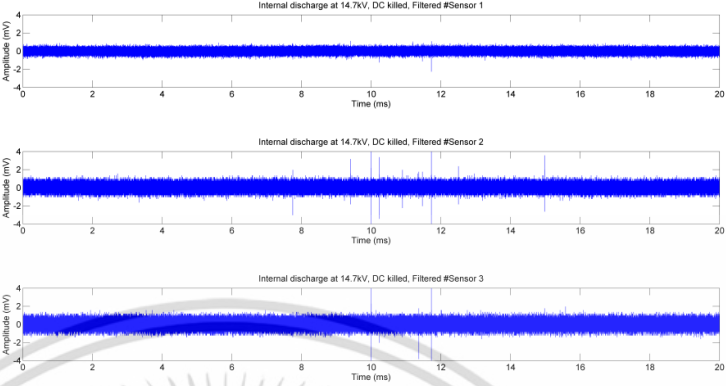
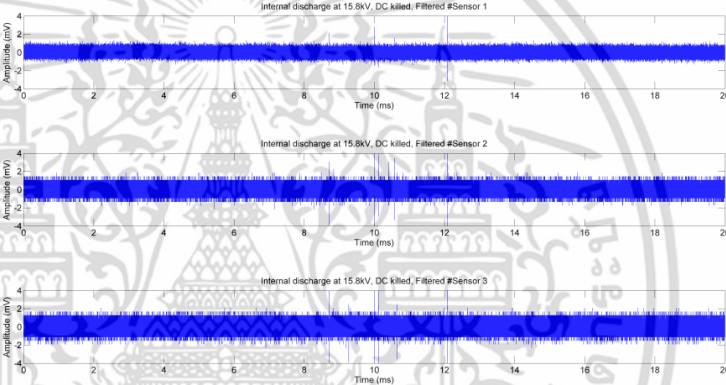
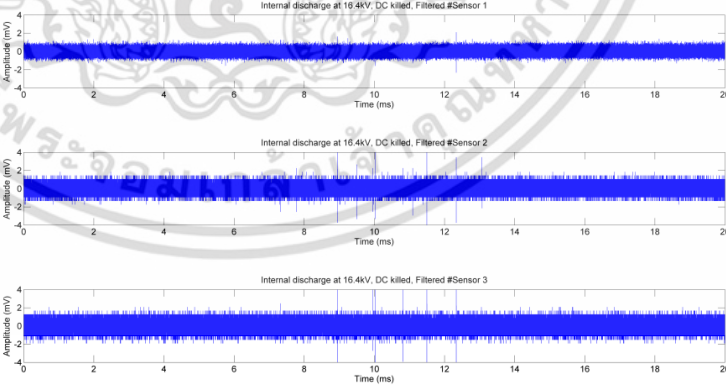
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
7.1kV, 258pC	
8.2kV, 467pC	
8.8kV, 655pC	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

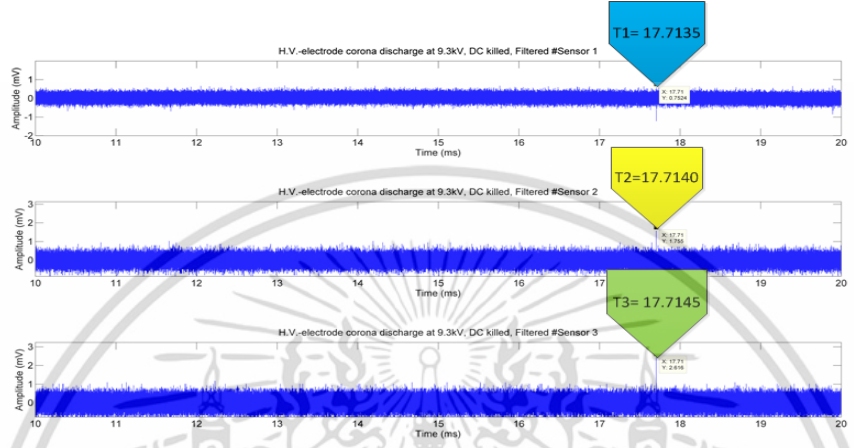
ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
14.7kV, 521pC	 <p>Internal discharge at 14.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Internal discharge at 14.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Internal discharge at 14.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
15.8kV, 789pC	 <p>Internal discharge at 15.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Internal discharge at 15.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Internal discharge at 15.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
16.4kV, 1.5nC	 <p>Internal discharge at 16.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Internal discharge at 16.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Internal discharge at 16.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

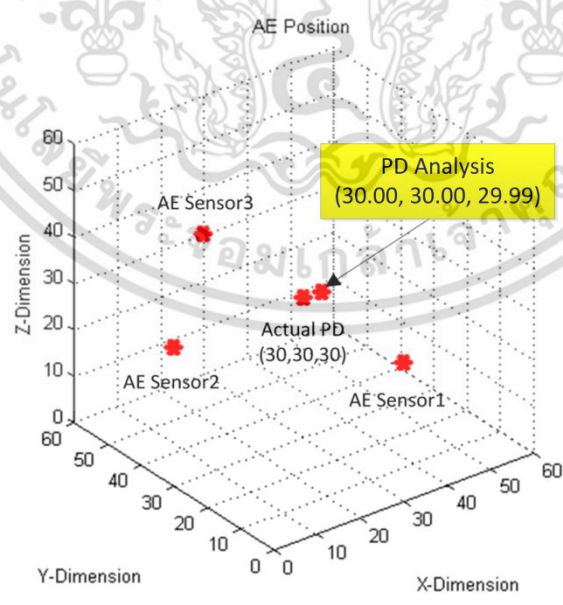
4.2.1.4 การระบุตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (0, 30, 30), S2 (0, 30, 30), S3 (0, 30, 30) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เวลาการเกิดสัญญาณเพื่อนำมาหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วน

โดยผลการทดลองที่ได้สามารถระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้มีค่าคือ PD Source (30.00, 30.00, 29.99) โดยมีค่า Error ที่ตำแหน่ง $x = 0.00\%$, $y = 0.00\%$, $z = 0.03\%$ แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนโดยหัวตรวจจับ 1MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ผลการหาค่าตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกลุ่ม

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	ระยะจากการคำนวณ (cm)	%Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(29.99, 30.00, 29.50)	(0.03%, 0.00%, 1.60%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(29.99, 30.00, 30.00)	(0.03%, 0.00%, 0.00%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(30.00, 30.00, 30.00)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(29.99, 29.50, 28.50)	(0.03%, 0.16%, 3.50%)

ตารางที่ 4.22 ผลการหาค่าตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบระนาบ

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	ระยะจากการคำนวณ (cm)	%Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(29.99, 30.00, 30.00)	(0.03%, 0.00%, 0.00%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(30.00, 30.00, 29.99)	(0.00%, 0.00%, 0.03%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(30.00, 30.00, 30.00)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(29.99, 30.00, 30.00)	(0.03%, 0.00%, 0.00%)

ตารางที่ 4.23 ผลการหาค่าตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกระจาย

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	ระยะจากการคำนวณ (cm)	%Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(30.22, 29.54, 29.73)	(0.73%, 1.50%, 0.90%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(30.24, 29.54, 28.50)	(0.80%, 1.50%, 5.00%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(28.50, 29.54, 30.24)	(5.00%, 1.50%, 0.80%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(30.22, 29.99, 30.10)	(0.73%, 0.03%, 0.33%)

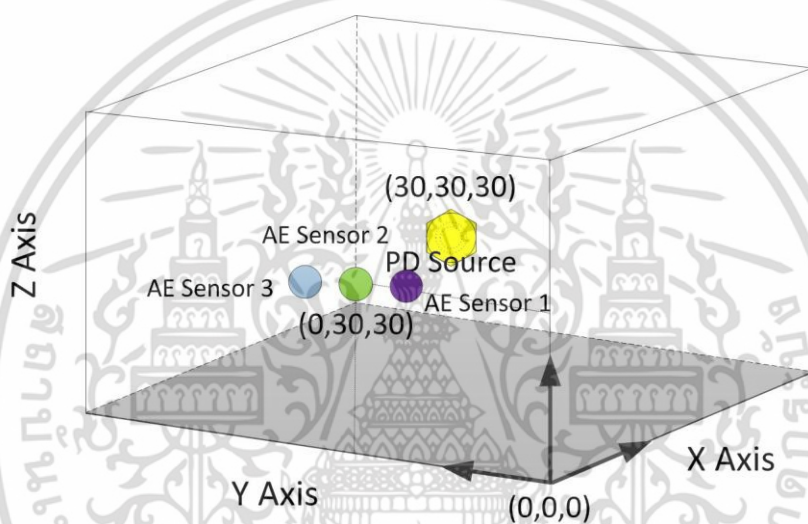
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบด้วยหัวตรวจจับย่านความถี่ 3MHz

ทำการทดลองตรวจจับดิสชาร์จโดยใช้หัวตรวจจับย่านความถี่ 3MHz เพื่อหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

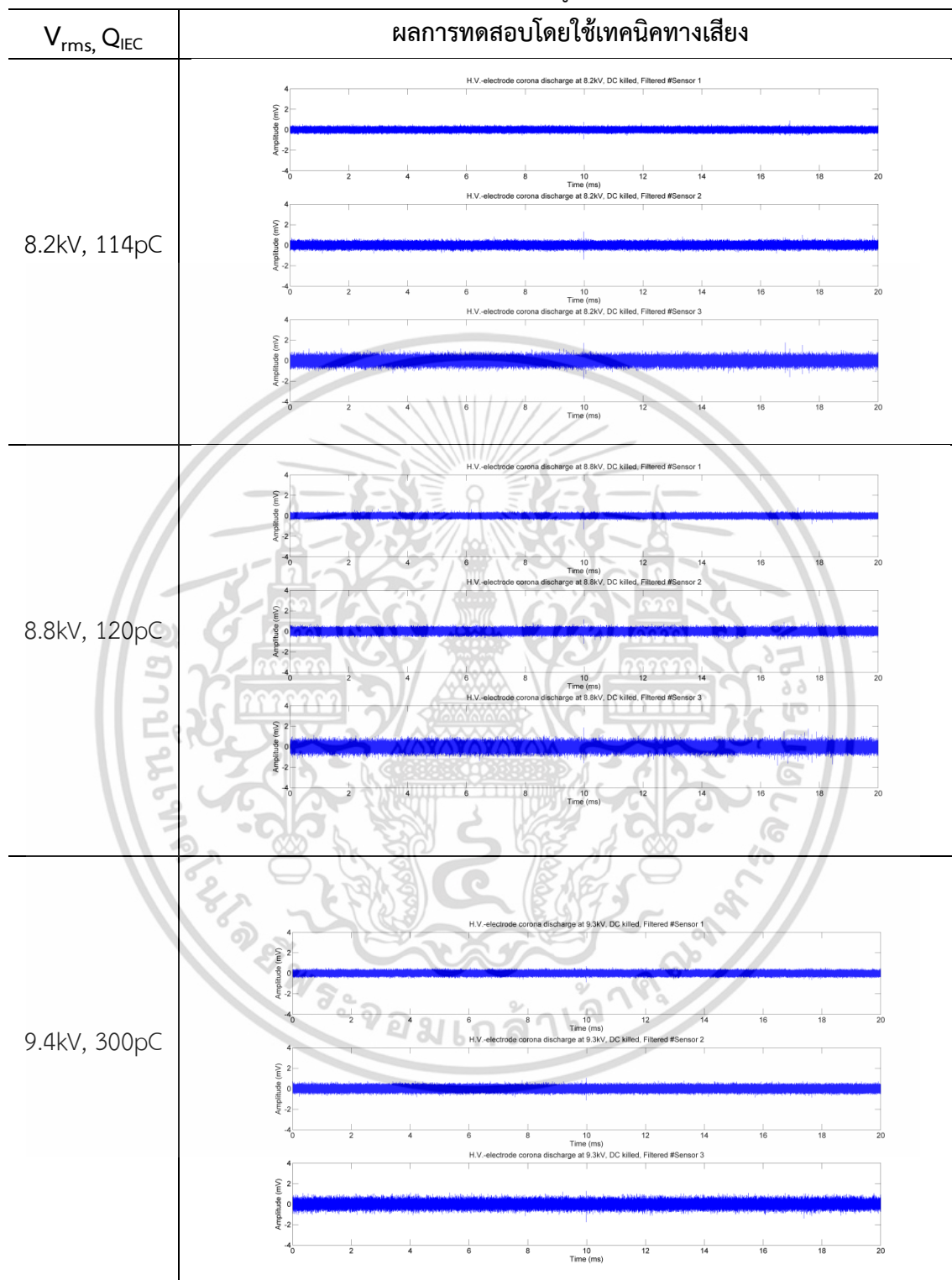
4.2.2.1 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกลุ่มโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (0, 30, 30), S2 (0, 30, 30), S3 (0, 30, 30) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.10



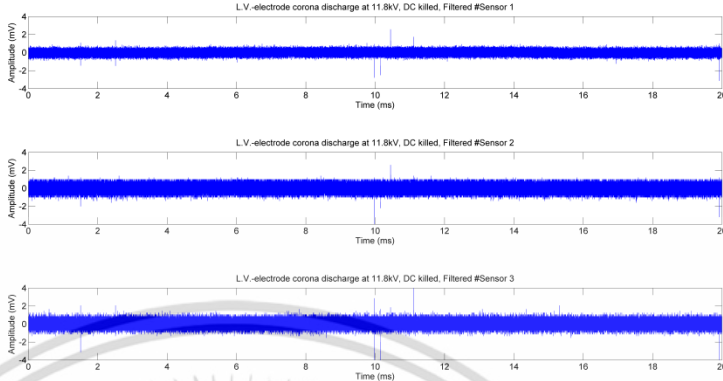
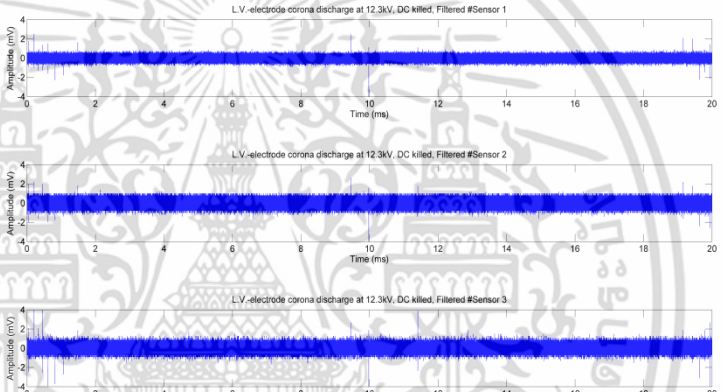
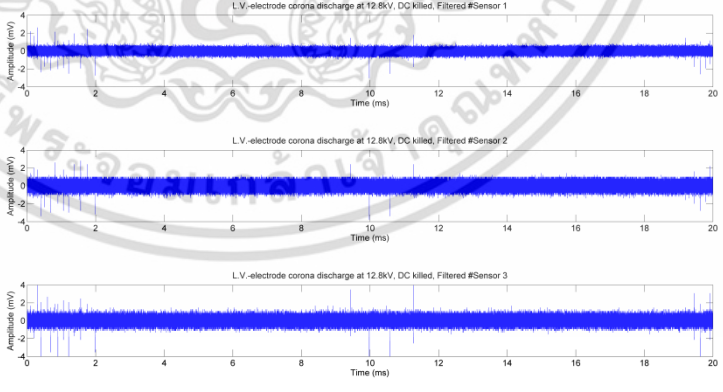
รูปที่ 4.10 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกลุ่มโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 3MHz

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง



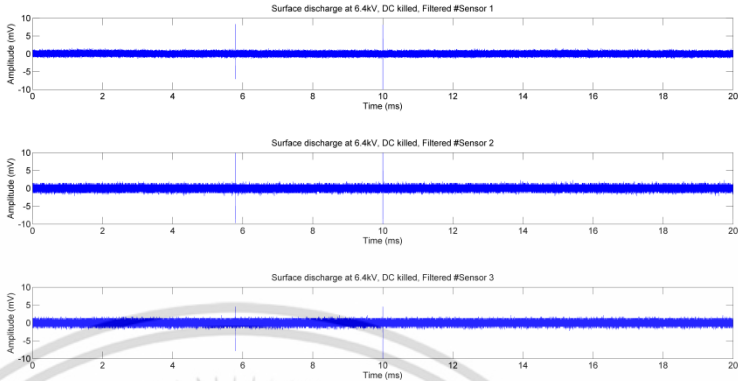
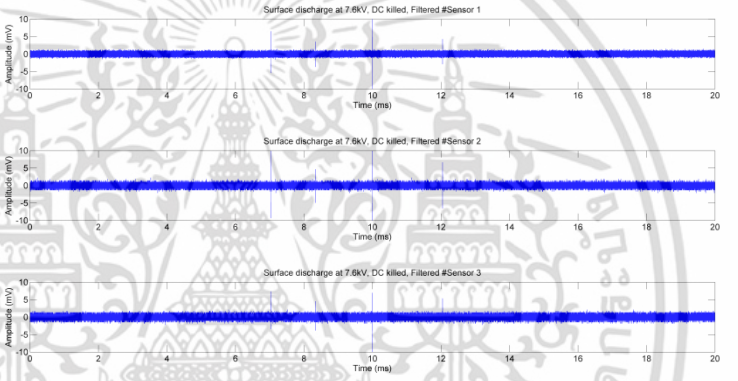
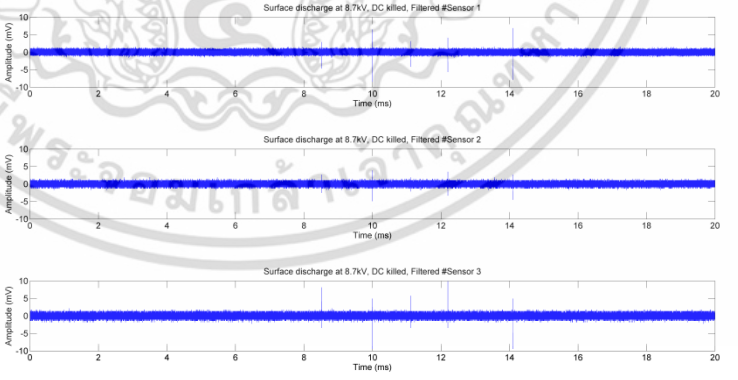
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
11.8kV, 118pC	 <p>LV-electrode corona discharge at 11.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>LV-electrode corona discharge at 11.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>LV-electrode corona discharge at 11.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
12.3kV, 123pC	 <p>LV-electrode corona discharge at 12.3kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>LV-electrode corona discharge at 12.3kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>LV-electrode corona discharge at 12.3kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
12.8kV, 472pC	 <p>LV-electrode corona discharge at 12.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>LV-electrode corona discharge at 12.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>LV-electrode corona discharge at 12.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
7.6kV, 121pC	 <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
8.7kV, 125pC	 <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
9.4kV, 415pC	 <p>Surface discharge at 9.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 9.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 9.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

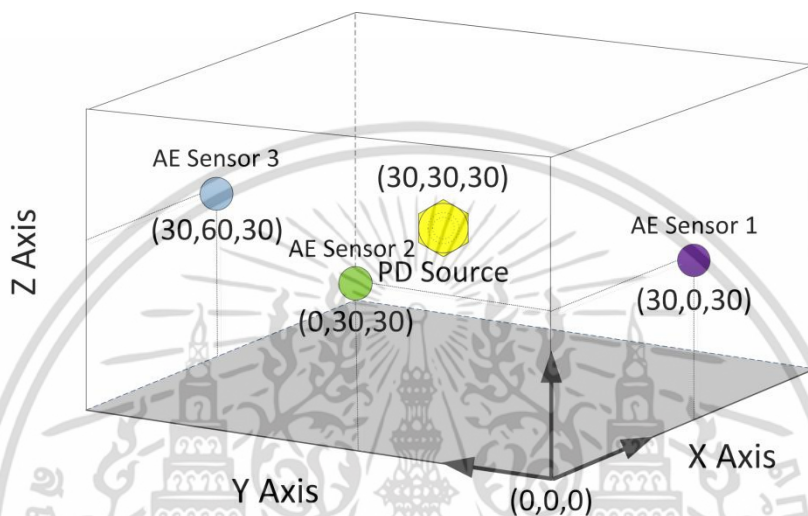
ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
14.0kV, 121pC	
15.1kV, 125pC	
16.3kV, 415pC	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบระนาบโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิซาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (30, 0, 30), S2 (0, 30, 30), S3 (30, 60, 30) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบระนาบโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 3MHz

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
8.2kV, 134pC	
8.8kV, 150pC	
9.4kV, 430pC	

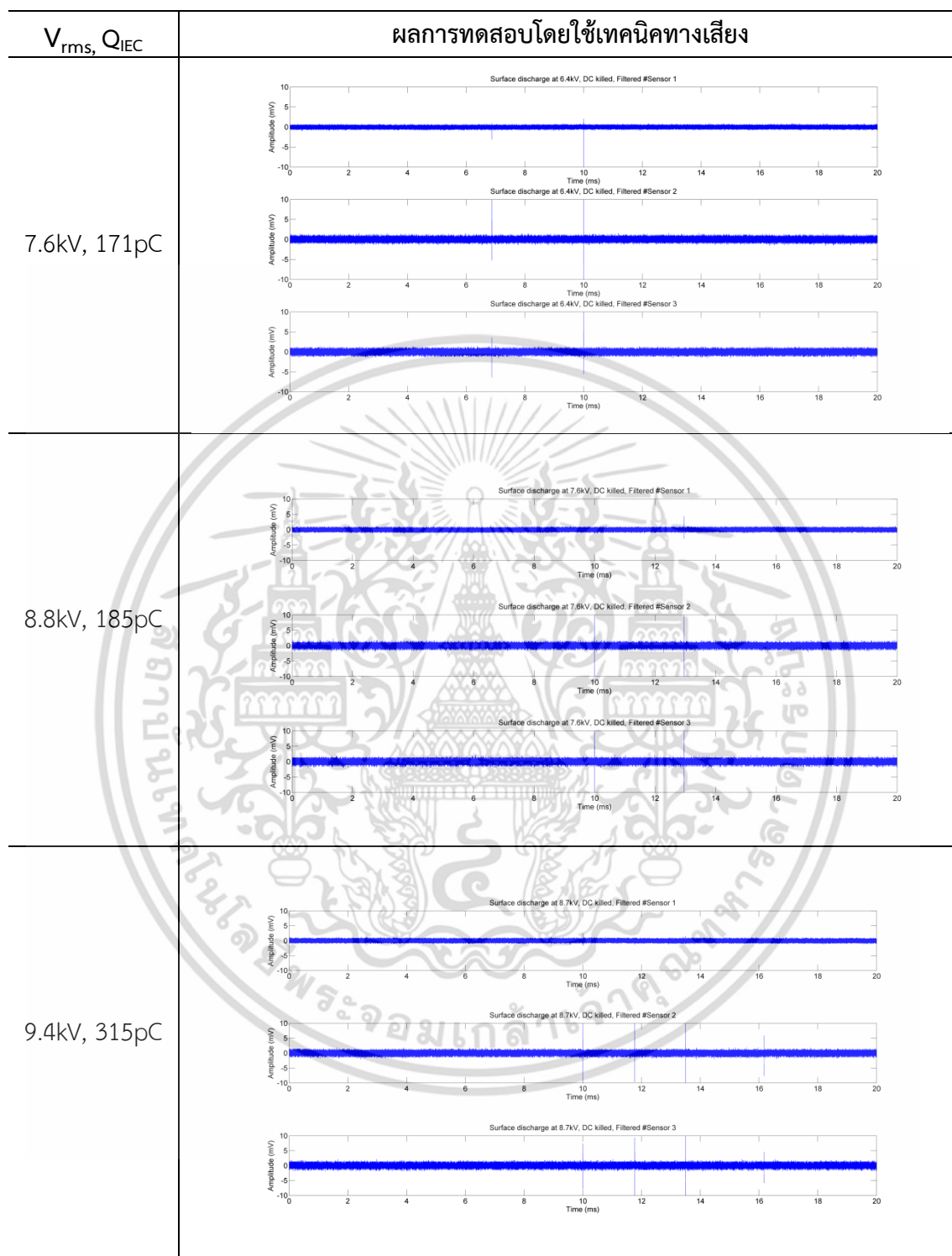
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
11.8kV, 128pC	
12.3kV, 131pC	
12.8kV, 482pC	

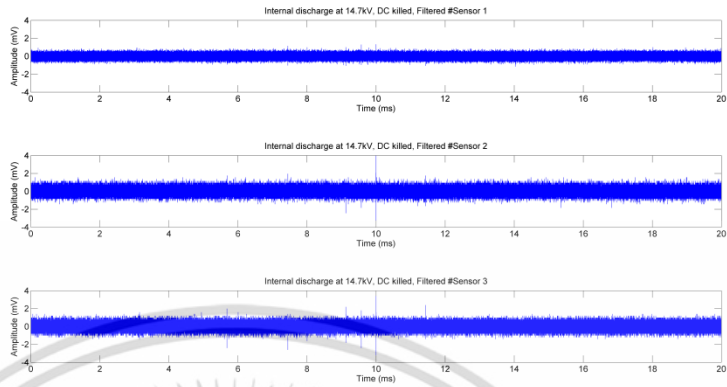
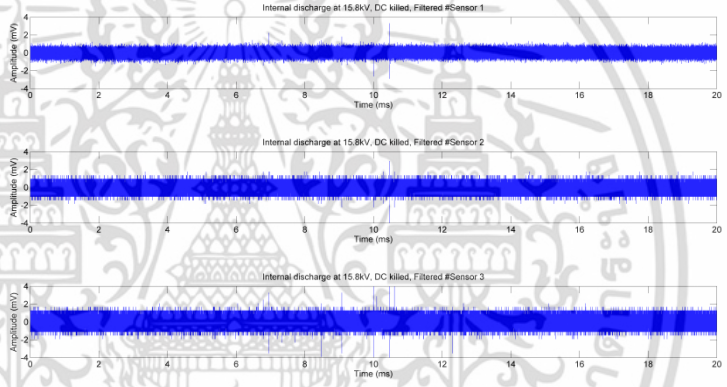
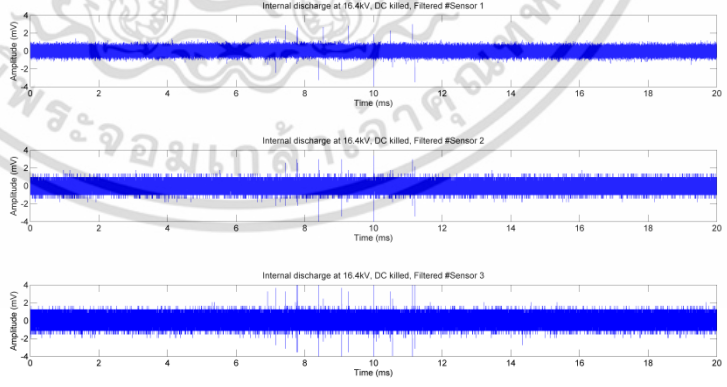
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

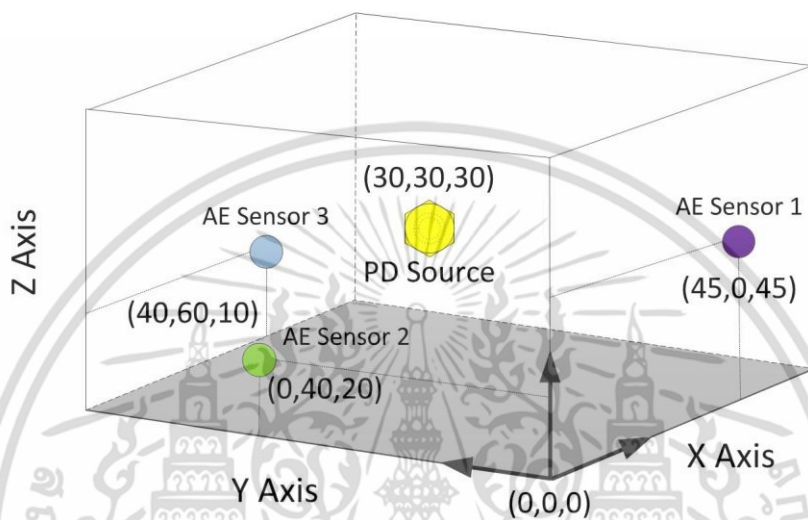
ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
14.6kV, 721pC	 <p>Internal discharge at 14.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Internal discharge at 14.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Internal discharge at 14.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
15.7kV, 925pC	 <p>Internal discharge at 15.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Internal discharge at 15.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Internal discharge at 15.8kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
16.2kV, 875pC	 <p>Internal discharge at 16.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Internal discharge at 16.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Internal discharge at 16.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกระจายโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียง

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิซชาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (45, 0, 45), S2 (0, 40, 20), S3 (40, 60, 10) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงแบบกระจายโดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงความถี่ 3MHz

ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงสูง

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
8.2kV, 154pC	
8.8kV, 160pC	
9.4kV, 650pC	

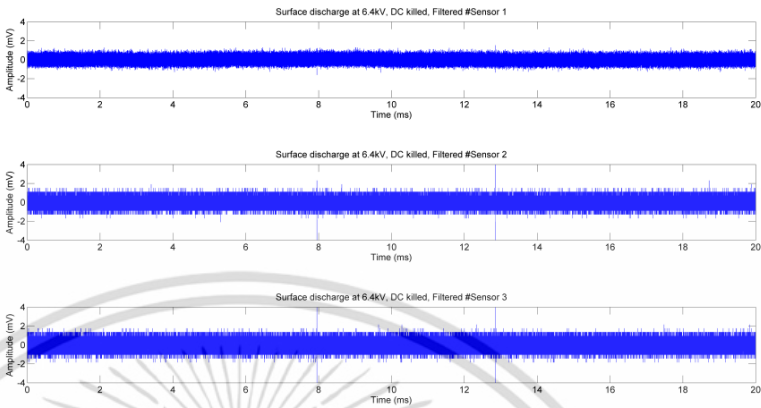
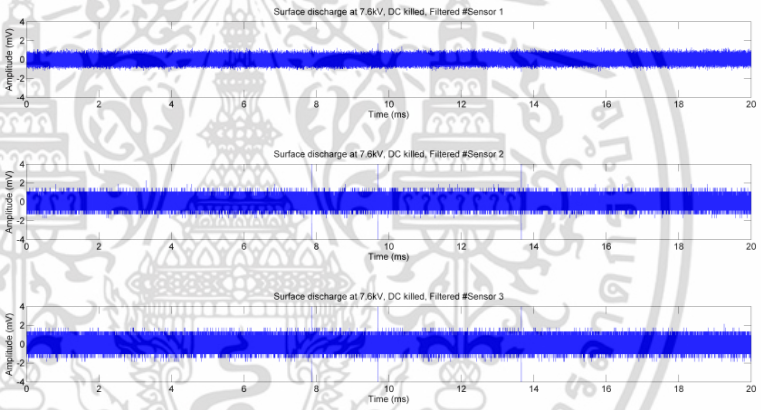
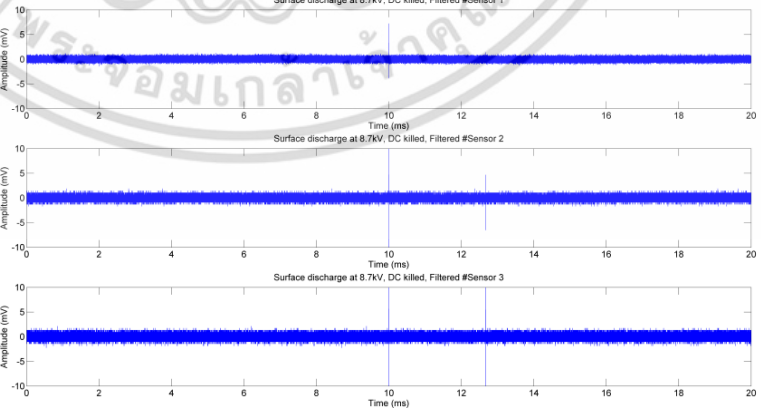
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จทางด้านแรงต่ำ

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
11.2kV, 128pC	
12.3kV, 143pC	
12.8kV, 462pC	

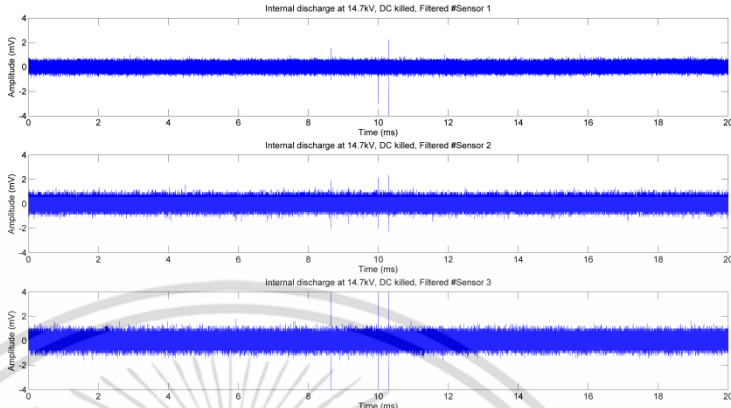
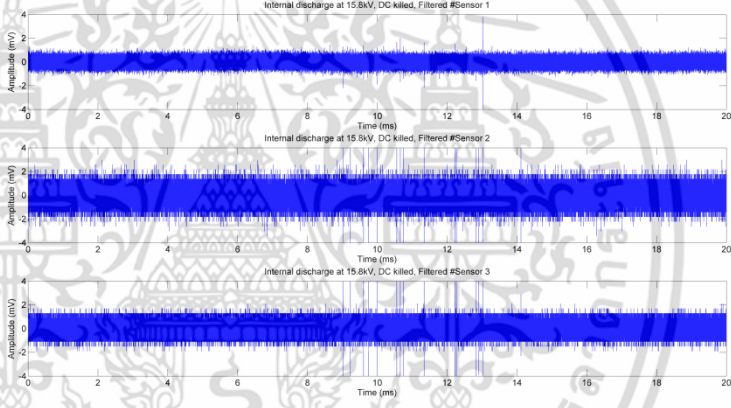
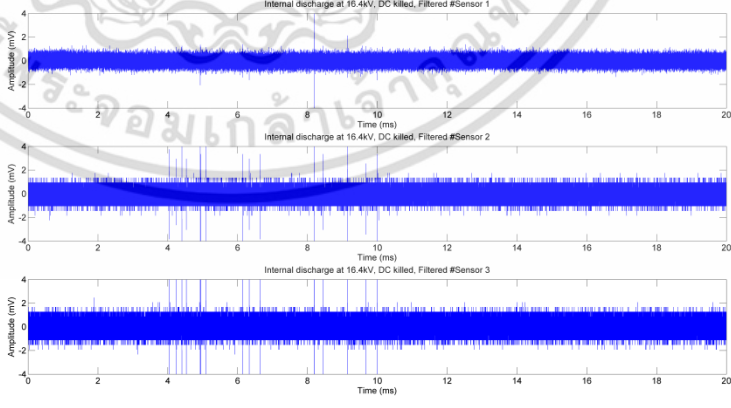
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบดิสชาร์จตามผิว

V_{rms} , Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
7.6kV, 181pC	 <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 6.4kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
8.8kV, 175pC	 <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 7.6kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>
9.4kV, 405pC	 <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 1</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 2</p> <p>Surface discharge at 8.7kV, DC killed, Filtered #Sensor 3</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

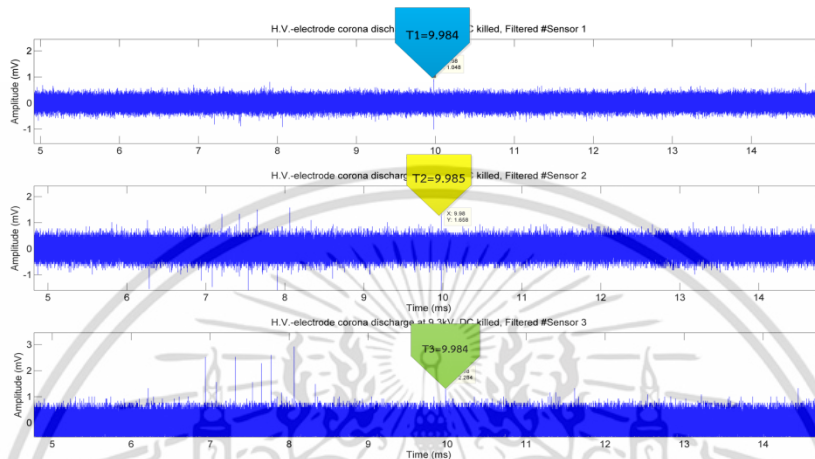
ตารางที่ 4.35 ผลการทดสอบดิสชาร์จภายใน

V_{rms}, Q_{IEC}	ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง
15.0kV, 521pC	
16.1kV, 625pC	
16.7kV, 915pC	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

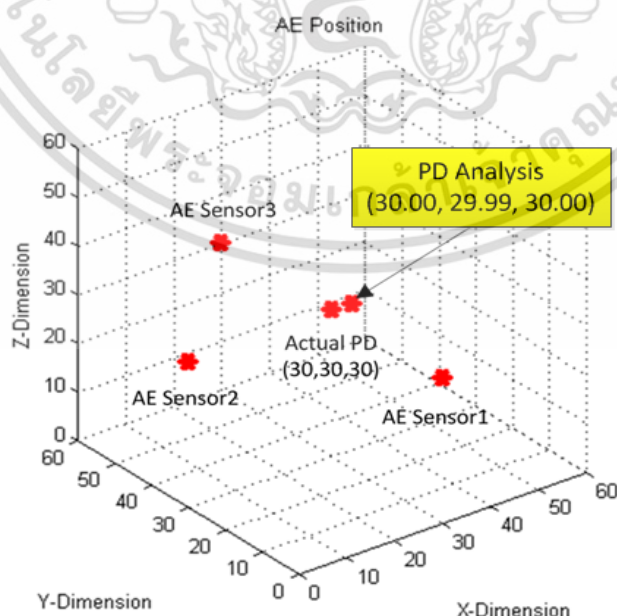
4.2.1.4 การระบุตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงจำนวน 3 ตัวไปติดตั้งยังอุปกรณ์หม้อแปลงทดสอบจำลอง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน (PD source) อยู่ที่พิกัด (30, 30, 30) โดยพิกัดของหัวตรวจจับ คือ S1 (0, 30, 30), S2 (0, 30, 30), S3 (0, 30, 30) ในแนวระนาบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เวลาการเกิดสัญญาณเพื่อนำมาหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วน

โดยผลการทดลองที่ได้สามารถระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้มีค่าคือ PD Source (30.00, 29.99, 30.00) โดยมีค่า Error ที่ตำแหน่ง $x = 0.00\%$, $y = 0.03\%$, $z = 0.00\%$ แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนโดยหัวตรวจจับ 3MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.36 ผลการหาค่าตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกลุ่ม

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	ระยะจากการคำนวณ (cm)	%Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(30.10, 30.00, 30.00)	(0.33%, 0.00%, 0.00%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(30.10, 29.99, 29.95)	(0.33%, 0.03%, 0.16%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(29.99, 29.95, 29.99)	(0.03%, 0.16%, 0.03%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(30.00, 30.10, 30.10)	(0.00%, 0.33%, 0.33%)

ตารางที่ 4.37 ผลการหาค่าตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบระนาบ

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	ระยะจากการคำนวณ (cm)	%Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(30.00, 29.99, 30.00)	(0.00%, 0.03%, 0.00%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(30.00, 30.00, 30.00)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(30.00, 30.00, 30.00)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(30.00, 30.00, 30.00)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)

ตารางที่ 4.38 ผลการหาค่าตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกระจาย

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	ระยะจากการคำนวณ (cm)	%Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(30.00, 29.95, 29.99)	(0.00%, 0.16%, 0.03%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(30.10, 29.95, 29.50)	(0.33%, 0.16%, 1.60%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(30.00, 29.99, 30.00)	(0.00%, 0.33%, 0.00%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(30.00, 29.99, 29.99)	(0.00%, 0.03%, 0.03%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกลุ่ม

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	1MHz %Error	3MHz %Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(0.03%, 0.00%, 1.60%)	(0.33%, 0.00%, 0.00%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(0.03%, 0.00%, 0.00%)	(0.33%, 0.03%, 0.16%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)	(0.03%, 0.16%, 0.03%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(0.03%, 0.16%, 3.50%)	(0.00%, 0.33%, 0.33%)

ตารางที่ 4.40 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบระนาบ

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	1MHz %Error	3MHz %Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(0.03%, 0.00%, 0.00%)	(0.00%, 0.03%, 0.00%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(0.00%, 0.00%, 0.03%)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(0.03%, 0.00%, 0.00%)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)

ตารางที่ 4.41 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงแบบกระจาย

PD Type	V_{rms} (kV)	ระยะ PD Source (cm)	1MHz %Error	3MHz %Error
H.V. Corona	9.3	(30, 30, 30)	(0.73%, 1.50%, 0.90%)	(0.00%, 0.16%, 0.03%)
L.V. Corona	12.8	(30, 30, 30)	(0.80%, 1.50%, 5.00%)	(0.33%, 0.16%, 1.60%)
Surface	8.8	(30, 30, 30)	(5.00%, 1.50%, 0.80%)	(0.00%, 0.33%, 0.00%)
Internal	16.4	(30, 30, 30)	(0.73%, 0.03%, 0.33%)	(0.00%, 0.03%, 0.03%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการออกแบบวงจรตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง เพื่อทำการวัดสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่มีแหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วน 1 จุดนั้น เมื่อนำหัวตรวจจับทางเสียงย่านความถี่ 3MHz และ 1MHz มาติดตั้งเพื่อตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนปรากฏว่าหัวตรวจจับทางเสียงมีคุณสมบัติสามารถตรวจจับสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนได้จริง

เมื่อนำผลตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมนั้นได้ผลของสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่ใกล้เคียงกันโดยผลของการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนแต่ละประเภท

จากผลการทดสอบนั้นชี้ให้เห็นว่าผลการทดสอบการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงนั้นสามารถตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนได้และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิม แต่การติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงนั้นควรคำนึงถึงการใช้สารตัวนำโดยมีผลต่อการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงเนื่องจากความเข้มของสัญญาณจะลดลงเมื่อมีระยะแกปอากาศระหว่างหัวตรวจจับทางเสียงและแหล่งกำเนิดดิสซาร์จบางส่วนจำลอง

การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงมีจุดเด่นดังนี้ สามารถตรวจจับดิสซาร์จโดยไม่ต้องปิดระบบคืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบดิสซาร์จนั้นสามารถทำงานได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าสัญญาณดิสซาร์จมีความคงที่ อุปกรณ์ตรวจจับมีขนาดกะทัดรัดวงจรตรวจจับไม่ซับซ้อนสามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวกมีความปลอดภัยสูงและราคาถูกกว่าอุปกรณ์ของการตรวจจับดิสซาร์จแบบดั้งเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางนำไปพัฒนาในอนาคต

1. ขณะทำการทดสอบจะต้องปิดอุปกรณ์สื่อสารทุกชนิดเนื่องจากหัวตรวจจับทางเสียงมีความไวต่อสัญญาณต่างๆมากมาย อาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้

2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทดสอบในหม้อแปลงจำลองที่มีตัวกลางเป็นน้ำมันได้เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาตำแหน่งการเกิด PD ในหม้อแปลงจริงได้ในอนาคต

3. การนำสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่วัดได้นั้นยังไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณดิสซาร์จบางส่วนได้เนื่องจากการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงนั้นยังเป็นงานวิจัยอยู่จึงไม่มีมาตรฐานเพื่อนำมารองรับการเปรียบเทียบหาปริมาณดิสซาร์จได้ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต

4. หัวตรวจจับทางเสียงยังไม่มีจำหน่ายในประเทศไทยจึงต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศจึงทำให้งานวิจัยนั้นมีข้อจำกัดในการเลือกใช้หัวตรวจจับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kreuger, F.H., Discharge Detection in High Voltage Equipment, Temple Press Books Ltd., London, 1964, pp. 13-25.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [3] IEC-60270. “High-voltage test techniques-Partial discharge measurements” IEC Standard™. 2001
- [4] ASTM, “ASTM E976-99: Standard Guild for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response”, 1999
- [5] IEEE Std. C57.127: 2007, “Guide for the Detection and Location of Acoustic Emission from Partial Discharge in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors”
- [6] Nasser, E., Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics, Wiley-Interscience, 1971, pp. 14-17, 189.
- [7] Kuffel, E. and Zaengl, W.S., High Voltage Engineering, Pergamon Press, NY, 1984, pp.304-336.
- [8] Su-Yeon Choi, Dea-Won Park, Il-Kwon Kim, Chan-Yong Park and Gyung-Suk Kil, “Analysis of Acoustic Signals Generated by Partial Discharges in Insulation Oil”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008
- [9] Yasmin Hanum Md Thayoob, Nur Faizah Abidin, Zurita Zakaria and Ahmad Qisti Ramli, “Detection of Acoustic Emission Signals from Partial Discharges Sources in Oil-Pressboard Insulation System”, Proceedings of 2010 IEEE Student Conference on Research and Development, Putrajaya, Malaysia, Dec 13-14, 2010
- [10] Iago Bua-Nunez, Julio E. Posada-Roman, Jesus Rubio-Serrano and Jose A. Garcia-outo, “Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, No. 5, May 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

Voltage divider	1000V/1V
หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง AC	460V/75kV 40kVA 50/60H
Coupling capacitor (CK)	0.001microfarad 100kV
ชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Test Object)	
หัวตรวจจับ Piezoelectric ceramic ring (PED1205T20)	ความถี่ใช้งาน 1 MHz
หัวตรวจจับ Piezoelectric ceramic ring (PED1206T20)	ความถี่ใช้งาน 3 MHz
Oscilloscope	Tektronic DPO 4054
หม้อแปลงรูปทรงลูกบาศก์เสมือนที่สร้างขึ้น	(60cmx60cmx60cm)
สายส่งสัญญาณ BELDEN RG58 C/D	50 Ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ข้อกำหนดและกฎการใช้ห้องทดสอบแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ห้องทดสอบแรงดันสูงควรทำตามข้อปฏิบัติดังนี้

- จะต้องลงชื่อบันทึกการใช้เครื่องมือทุกครั้งในการลงมือปฏิบัติเพื่อรับผิดชอบหากเครื่องมือเกิดความเสียหาย
- ผู้ทดสอบต้องแต่งกายเรียบร้อย รัดกุม และสวมรองเท้าหุ้มส้นเท่านั้น
- การต่อวงจรและทดสอบต้องถูกต้องตามหลักวิศวกรรม
- การทดสอบต้องมีผู้ร่วมปฏิบัติอย่างน้อย 2 คนทุกครั้ง
- สถานที่ทดสอบและบริเวณทดสอบจะต้องมีระยะป้องกันและระยะปลอดภัยให้ถูกต้องตามมาตรฐานดังนี้

ในกรณีที่แรงดันทดสอบน้อยกว่า 1MV

ระยะปลอดภัยในการทดสอบแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับคือ 50cm/1kV

ระยะปลอดภัยของการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ 25cm/100kV

ระยะปลอดภัยของการทดสอบทุกระดับแรงดันคือ 50cm

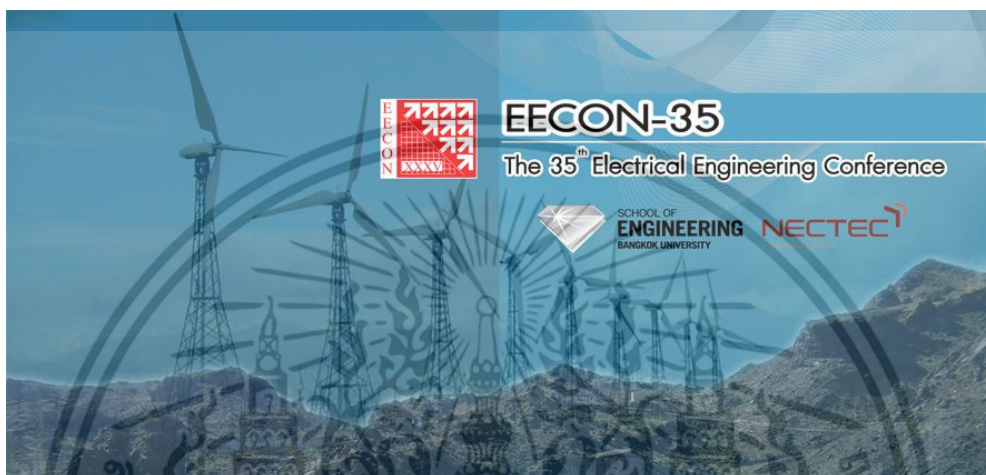
- ต้องตรวจสอบเครื่องมือวัดและเครื่องมืออื่น ๆ ก่อนการใช้งานหากพบความผิดปกติควรแจ้งอาจารย์และเจ้าหน้าที่มีหน้าที่นั้นจะถือว่าผู้ทดสอบทำให้เกิดความเสียหาย
- ต้องตัดวงจรราวด์อุปกรณ์ก่อนสัมผัสอุปกรณ์ทุกครั้งก่อนเข้าไปปฏิบัติงาน
- ก่อนทำการทดสอบจะต้องตรวจสอบและให้สัญญาณเตือนก่อนทุกครั้งถ้าหากเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ร่วมปฏิบัติงานหรือบุคคลที่อยู่ในบริเวณการทดสอบผู้ทดสอบจะต้องรับผิดชอบ
- อุบัติเหตุใดๆที่เกิดขึ้นอยู่นอกเหนือความรับผิดชอบของห้องทดสอบแรงดันสูง
- หากทำการยืมเครื่องมือต้องตรวจสอบสภาพก่อนนำไปใช้งานหากนำมาคืนแล้วพบความเสียหายผู้ยืมต้องรับผิดชอบ
- ผู้ทำการทดสอบต้องรักษาความสะอาดในห้องทดสอบแรงดันสูงและเมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นจะต้องเก็บเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบเข้าที่เดิมทุกครั้ง
- ในการทดสอบทุกครั้งผู้ทดสอบควรมีสติในการทดสอบห้ามทดสอบด้วยความประมาทโดยเด็ดขาด
- หากผู้ทดสอบคนใดไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดจะถูกลงโทษโดยเด็ดขาดในการห้ามใช้ห้องทดสอบแรงดันสูงตามเวลาที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการ

1. วิษณุ ต่อตระกูล, ทิพรัตน์ กมลพัฒนานันท์, วิชิต พิชัยชาญเลิศและเชาว์ ชมภูอินโหว “การวิเคราะห์และตรวจวัดดีเอสอาร์บางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON 35)*, P. 127-130, 12-14 ธันวาคม 2555



The 35th Electrical Engineering Conference (EECON-35)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

PW026	The Novel-Design Method and Implementation on PD Measurement Using the LPDA Ultra High Frequency Technique สุวพัชร ธนินทรานู โครดร ศักดิ์กมล สีลาจินดาไกรฤกษ์ เชาว์ ชมพูอิน ไหว ชาย ชมภูอิน ไหว สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	111
PW027	A Study Effect of Three type Electric Field on Exhaust Reduction Emission from Benzene Engine วรกัลป์ สิมเจริญ กฤษณ์ กิจวัฒนา รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และสุธี สัจงเพิ่มพูน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	115
PW028	ชุดควบคุมเครื่องกระตุ้นมลพิษที่รับข้อมูลด้วยสนามไฟฟ้าขนาดเล็ก กฤษฎา แซ่จิ่ง รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และกฤษณ์ กิจวัฒนา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	119
PW029	Development of High Frequency Current Transducer for Partial Discharge Detection <i>Cattareeya Siwanasri, Thanapong Siwanasri, Pongsakorn Thawonsukanan and Sayan Ruankon King Mongkut's University of Technology North Bangkok</i>	123
PW030	PD Measurement Using Acoustic Emission Technique วิษณุ ต่อตระกูล, ทิพรรัตน์ กมลพัฒนานันท์, วิชิต พิษขัญเต็ส และเชาว์ ชมพูอิน ไหว สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	127
PW031	Study on the Ozone Concentration Control with Ultraviolet Light ชิดชนก มากจันทร์ รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และสุธี สัจงเพิ่มพูน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	131
PW032	Resistive current waveform analysis of the degradation of MOSA lightning arrester using the leakage current method in three phase system จูตินันท์ ศิริประภาวัฒน์ ชาญมรงค์ บาลมงคล และเอกชัย สีลารัมย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	135

การวิเคราะห์และตรวจวัดดิสราร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง PD Measurement Using Acoustic Emission Technique

วิมล ต่อดรรณ, ทิพรรัตน์ กมลพัฒนานันท์, วิชิต พิชัยชาญเลิศ และ เขาว์ ชมภูอิน ไหว
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทร 0-2326-9902 E-mail: rockman_17_1@hotmail.com, chompooc@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นกรนำเสนอการวิเคราะห์และตรวจวัดการดิสราร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับดิสราร์จบางส่วนที่มีขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวกจึงสามารถนำไปติดตั้งที่ตัวทดสอบหรือบริเวณใกล้เคียงกับตัวทดสอบเพื่อทำการตรวจจับการเกิดดิสราร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ซึ่งในปัจจุบันการตรวจจับดิสราร์จบางส่วนแบบเก่านั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่มีขนาดใหญ่และต้องทำในห้องทดสอบส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกในการนำอุปกรณ์บางตัวในระบบไฟฟ้าแรงสูงมาตรวจสอบได้ ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์นี้จะส่งผลให้เกิดความสะดวกในการตรวจจับดิสราร์จบางส่วน โดยนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์และจำแนกประเภทของการเกิดดิสราร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้อง

ABSTRACT

This article presents the design and implementation of the novel PD measuring unit using Acoustic Emission Technique. The main goal is to build a small, portable and accurate PD measuring unit. In the present, detecting partial discharge need to be done in the laboratory environment. The device built in this paper can resolve this problem and make the PD measurement better and easier than the conventional way. The modern digital signal processing technique is also applied to the gathered data from the proposed technique in order that the quantification and qualification of PD signals can be obtained.

Keywords: Acoustic Emission (AE), PD measurement

1. บทนำ

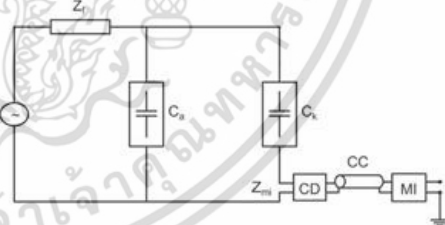
การตรวจจับการดิสราร์จแบบดั้งเดิม (Conventional PD-Measuring Method) นั้นทำได้โดยการต่อวงจรวัดตามมาตรฐาน IEC-60270 [1] (รายละเอียดแสดงในรูปที่ 1) ซึ่งจากการวัดแบบเดิมนั้นต้องใช้พื้นที่มาก อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ และไม่รองรับการ

ทำงานแบบ Online Network ได้ ดังนั้นจึงนำเสนอการวิเคราะห์และตรวจวัดการดิสราร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงเพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณดิสราร์จบางส่วน โดยจะมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนย้ายได้ และรองรับการทำงานแบบ Online Network ได้ ซึ่งจะทำให้การวัดดิสราร์จบางส่วนนั้นมีความทันสมัยและสะดวกต่อการวัด

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ดิสราร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD)

ดิสราร์จบางส่วน คือ การเบรคความถี่ที่ไม่สมบูรณ์พลังงานที่ทำให้เกิดดิสราร์จนั้น ไม่มากพอที่จะทำให้จำนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ โดยจะเกิดขึ้นในระบบแรงดันที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจึงทำให้สนามไฟฟ้าบางจุดมีแรงดันมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติแต่ไม่อาจทำให้เกิดการเบรคความถี่อย่างสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดบางส่วนเท่านั้น ซึ่งการเกิดดิสราร์จบางส่วนจะทำให้จำนวนเกิดการเปลี่ยนสภาพอย่างรวดเร็ว आयुการซึ่งมีจำนวนจะสั้นลงทำให้เกิดการนำไปสู่การเบรคความถี่ได้ในที่สุด ซึ่งก่อให้เกิดการเสียหายต่อระบบหมั่น



รูปที่ 1 การวัดแบบมาตรฐานตาม IEC-60270 [1]

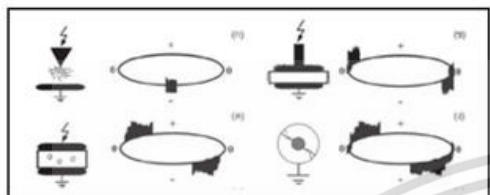
2.2 การวิเคราะห์ดิสราร์จบางส่วน

เมื่อตรวจพบดิสราร์จบางส่วนในการหมั่นของอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ดิสราร์จบางส่วนจะวิเคราะห์สิ่งที่สำคัญ 2 ประการคือ

- 2.2.1 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของการดิสราร์จบางส่วน
- 2.2.2 เพื่อวิเคราะห์สาเหตุการดิสราร์จบางส่วน

2.3 การแยกประเภทของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์สัญญาณรูปวงรีที่ได้จากการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน โดยวิธีการแบบดั้งเดิมนั้น จะทำโดยการดูลักษณะของพัลส์ที่เกิดขึ้นในเฟสแรงดันที่แตกต่างกัน แต่จะรูปแบบที่มีความแตกต่างกันจะเป็นตัวบ่งชี้ชนิดและแหล่งกำเนิดของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนได้ดังรูปที่ 2

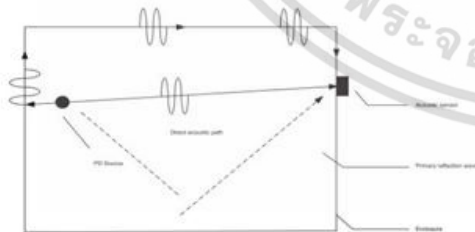


รูปที่ 2 ตัวอย่างชนิดต่างๆ ของการวัดดิซชาร์จบางส่วน [2]

- (ก) Corona Discharge เกิดขึ้นบริเวณปลายแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในฉนวน
- (ข) Surface Discharge เกิดขึ้นที่ผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง
- (ค) Internal Discharge เกิดขึ้นใน โฟรมหรือช่องก๊าซในฉนวนฉนวน
- (ง) Electric Tree เกิดจากขอบคมของฉนวนนำหรือไอออนในฉนวนแข็ง

2.4 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคทางเสียง (Non-Destructive using Acoustic Emission Technique)

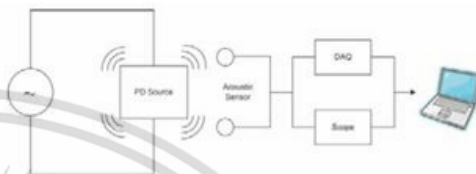
การตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีนี้ค่อนข้างใหม่และอาจจะยังไม่เป็นที่รู้จักและแพร่หลายนักซึ่งการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียงนี้แตกต่างจากการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีดั้งเดิม โดยใช้หัวตรวจจับทางเสียงตรวจหาสิ่งบกพร่องในขณะที่กำลังเกิดขึ้นหรือกำลังขยายตัว โดยรอบบทร่องจะเป็นตัวแพร่สัญญาณออกมาในลักษณะของสัญญาณอะคูสติกหรือสัญญาณเสียง ดังนั้นข้อได้เปรียบของการตรวจสอบด้วยวิธีนี้เมื่อเทียบกับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีดั้งเดิม คือเป็นการตรวจสอบไม่ต้องตัดวงจร และสามารถตรวจจับแบบเวลาจริง (Real Time) สามารถใช้ใ้สำรวจและเตือนล่วงหน้าก่อนที่ความเสียหายจะลุกลาม นอกจากนั้นยังครอบคลุมผลการตรวจสอบเป็นบริเวณกว้างในการตรวจสอบในคราวเดียว



รูปที่ 3 การตรวจจับดิซชาร์จโดยใช้เทคนิคทางเสียง [3]

3. แนวคิดและหลักการที่น่าสนใจ

การวิเคราะห์และตรวจวัดการดิซชาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคทางเสียงจะมีส่วนของแหล่งกำเนิดจำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่มีลักษณะการเกิดดิซชาร์จบางส่วนแบบต่างๆซึ่งโดยส่วนนี้จะทำการออกแบบและสร้างขึ้นตามมาตรฐาน IEC-60156 และส่วนของการตรวจจับสัญญาณดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้หัวตรวจจับ (Acoustic sensor) นั้นสามารถทำการติดตั้งที่ตัวทดสอบหรือบริเวณใกล้เคียงกับตัวทดสอบเพื่อตรวจจับสัญญาณที่เกิดได้

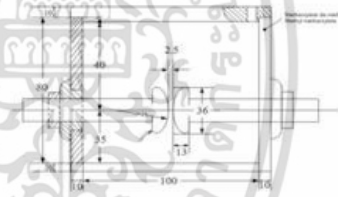


รูปที่ 4 แนวภาพการตรวจจับการดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

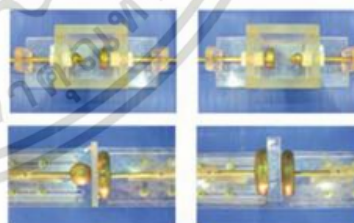
4. การออกแบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

4.1 แหล่งกำเนิดดิซชาร์จจำลอง

การสร้างแหล่งกำเนิดการเกิดดิซชาร์จนั้นจะต้องทำตามมาตรฐาน IEC-60156 ดังรูปที่ 5 และนำไปสร้างเป็นแหล่งกำเนิดจริงทั้ง 4 แบบดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 แหล่งกำเนิดดิซชาร์จตามมาตรฐาน IEC-60156 [4]



รูปที่ 6 แหล่งกำเนิดดิซชาร์จที่สร้างขึ้นมา

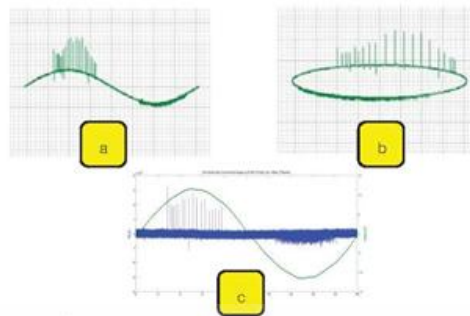
4.2 การเลือกใช้หัวตรวจจับทางเสียง

หัวตรวจจับทางเสียงมีหลายชนิด ซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่จะทำการตรวจวัดซึ่งการทดลองนี้ใช้หัวตรวจจับเปียโซอิเล็กทริก

(Piezoelectric sensor) โดยคุณสมบัติพิเศษคือเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกมากระตุ้นจะปล่อยพลังงานไฟฟ้าที่สามารถวัดค่าได้ออกมา จึงสามารถนำไปประยุกต์วัดแรงสั่นสะเทือนที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ขึ้นไป



รูปที่ 7 ชนิดของหัวตรวจจับปิโซเซนติควมเหวนขรามิก



รูปที่ 9 HV-electrode corona discharge at 8.2 kV, 513 pC

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของหัวตรวจจับปิโซเซนติควมเหวนขรามิก

Model	Dimensions			Resonant Frequency (kHz)	Static Capacitance (pF)	Electromechanical Coupling Factor (K _{eff})
	Outer Diameter (mm)	Inner Diameter (mm)	Thickness (mm)			
PED1205T20	10	5	2	14.2±4	350±15%	>35%
PED1206T20	12	6	2	11.6±3	600±15%	>35%
PED3813T63	38	12.7	6.3	44±2	2000±15%	>40%

5. ผลการทดลอง

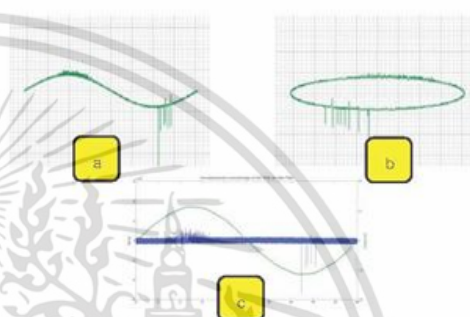
5.1 ผลของการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง

การตรวจจับการดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง โดยมีแหล่งกำเนิดดิซชาร์จบางส่วนคือวงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC-60270 ดังรูปที่ 8 โดยนำหัวตรวจจับทางเสียงชนิด PED1205T20 และ PED1206T20 ติดตั้งกับแหล่งกำเนิดดิซชาร์จบางส่วนแล้วจึงนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับวิธีตรวจสอบแบบดั้งเดิมโดยทดสอบชนิดการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง (KMITL High Voltage Laboratory) ของสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่

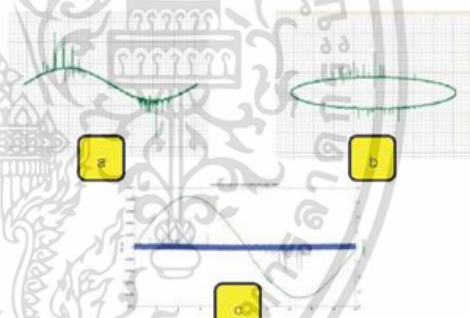
- 5.1.1. HV-electrode corona discharge
- 5.1.2. Grounded-electrode corona discharge
- 5.1.3. Internal discharge
- 5.1.4. Surface discharge



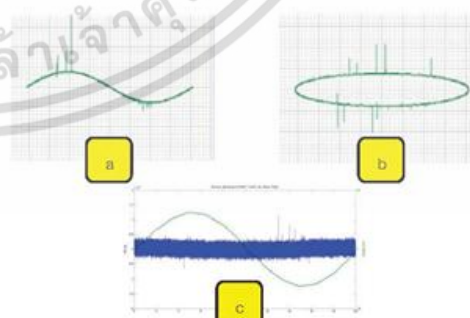
รูปที่ 8 วงจรทดสอบโดยใช้เทคนิคทางเสียง (a) Transformer, (b) Coupling Capacitor, (c) Test Object, (d) Acoustic sensor and (e) Voltage divide



รูปที่ 10 Grounded-electrode corona discharge at 8.2 kV, 123 pC



รูปที่ 11 Internal discharge at 8.2 kV, 63.9 pC



รูปที่ 12 Surface discharge at 8.8 kV, 1.04 nC

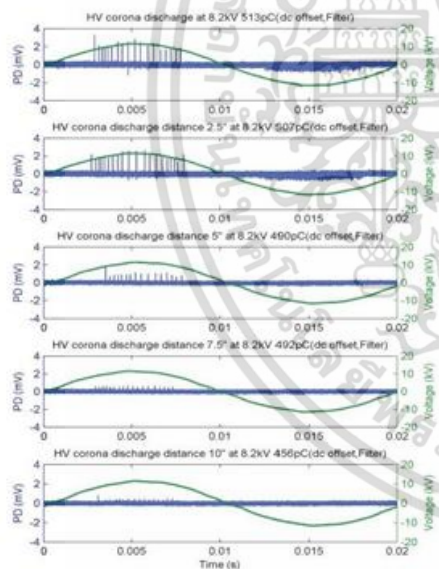
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดโคโรนาค้นพบโดยพลานที่แสดงบนรูปคลื่นไซม์ 9 (a) และบนฐานเวลารูปอิลิปส์ 9 (b) ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศา สำหรับการวัดแบบคิงเคม และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะเกิดในช่วง 90 องศาเช่นเดียวกันดังรูป 9 (c)

การเกิดโคโรนาค้นพบโดยพลาน ลักษณะของการเกิดที่แสดงบนรูปคลื่นไซม์ 10 (a) และบนฐานเวลารูปอิลิปส์ 10 (b) ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศา สำหรับการวัดแบบคิงเคมและเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะเกิดในช่วง 90 องศาเช่นเดียวกันดังรูป 10 (c)

การเกิดดิสชาร์จตามผิวที่แสดงบนรูปคลื่นไซม์ 11 (a) และบนฐานเวลารูปอิลิปส์ 11 (b) ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศาและ 180-270 องศา สำหรับการวัดแบบคิงเคม และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง จะเกิดขึ้นในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศาเช่นเดียวกันดังรูป 11 (c)

การเกิดดิสชาร์จภายในที่แสดงบนรูปคลื่นไซม์ 12 (a) และบนฐานเวลารูปอิลิปส์ 12 (b) ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศาและ 180-270 องศา สำหรับการวัดแบบคิงเคม และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงจะเกิดขึ้นในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศาเช่นเดียวกันดังรูป 12 (c)



รูปที่ 13 HV-electrode corona discharge ที่ระยะต่างๆกัน

5.2 ผลของระยะห่างในการติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียง

การทดลองหาผลของสัญญาณที่ระยะห่างต่างๆเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับว่าระยะห่างการติดตั้งหัวตรวจจับนั้นมีผลต่อสัญญาณการเกิด

ดิสชาร์จบางส่วนหรือไม่ โดยทำการทดลองติดตั้งหัวตรวจจับทางเสียงกับแหล่งกำเนิด HV-Electrode corona discharge ที่ระยะต่างๆดังนี้ 2.5 นิ้ว, 5 นิ้ว, 7.5 นิ้ว และ 10 นิ้ว โดยใช้หัวตรวจจับ PED3813163

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าผลของระยะติดตั้งหัวตรวจจับนั้นมีผลต่อการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน โดยระยะ 2.5 นิ้วนั้นสัญญาณที่วัดได้นั้นจะมีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่สูงกว่าการตรวจวัดที่ระยะอื่นๆ ทั้ง 5 นิ้ว, 7.5 นิ้ว และ 10 นิ้ว ทำให้ต้องคำนึงถึงผลของระยะการติดตั้งหัวตรวจจับในการทดลองตรวจจับการเกิดดิสชาร์จเพื่อความถูกต้องในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วย ผลการทดลองดังรูปที่ 13

6. สรุป

จากการทดสอบตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียงสามารถตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนได้จริง โดยสามารถนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบคิงเคมเพื่อวิเคราะห์หาชนิดของการเกิดดิสชาร์จว่าเป็นชนิดใดได้ โดยการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จโดยใช้เทคนิคทางเสียงนั้นมีจุดเด่นดังนี้ สามารถทำการตรวจจับโดยไม่ต้องปิดระบบคืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบดิสชาร์จนั้นสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องตัดต่อระบบไฟฟ้า อีกทั้งอุปกรณ์ตรวจจับมีขนาดกะทัดรัดสามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวก และวงจรตรวจจับไม่ซับซ้อนมีความปลอดภัยสูงและราคาถูกกว่าอุปกรณ์ของการตรวจจับดิสชาร์จแบบคิงเคมอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ห้องปฏิบัติการ KMTEL High Voltage Laboratory และห้องปฏิบัติการพลังงานและวิศวกรรมการส่องสว่าง (Energy System and Illumination Research Center: ESIRC) ที่ส่งเสริมและสนับสนุนอุปกรณ์การวิจัย และ ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินทร์ สำหรับคำแนะนำที่มีคุณค่าสำหรับการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC-60270:2000 "Partial Discharge Measurement Techniques"
- [2] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharge", 1995, *IEEE Trans. Dielectric and Electric In Solution*, Vol. 2, No. 5, Oct., pp. 822-837.
- [3] IEEE Std. C57.127:2007, "Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors"
- [4] IEC-60156:1995-07, "Insulating liquids-Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method"
- [5] Y Tian, P L Lewin, A E Davies, G Hathaway, "Acoustic Emission Techniques for Partial discharge detection within cable insulation" 2000 , pp 503 - 508
- [6] N. Guptas and T. S. Ramun, "Estimation of Partial discharge Parameter in GIS using Acoustic Emission Techniques" 2005 , pp 91 - 94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิษณุ ต่อตระกูล
วัน เดือน ปีเกิด	5 มกราคม 2531
ที่อยู่	2/4 ถ.เจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ประวัติการศึกษา	2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	2553 - 2555 R&D Engineer, Thai Nondestructive Testing Co., Ltd 2557 -2559 Sales and Project Sales Engineer, ABB LIMITED

ผลงานทางวิชาการ

1. วิษณุ ต่อตระกูล, ทิพรรัตน์ กมลพัฒนานันท์, วิชิต พิชัยชาญเลิศและเชาว์ ชมภูอินโหว “การวิเคราะห์และตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON 35), P. 127-130, 12-14 ธันวาคม 2555



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้