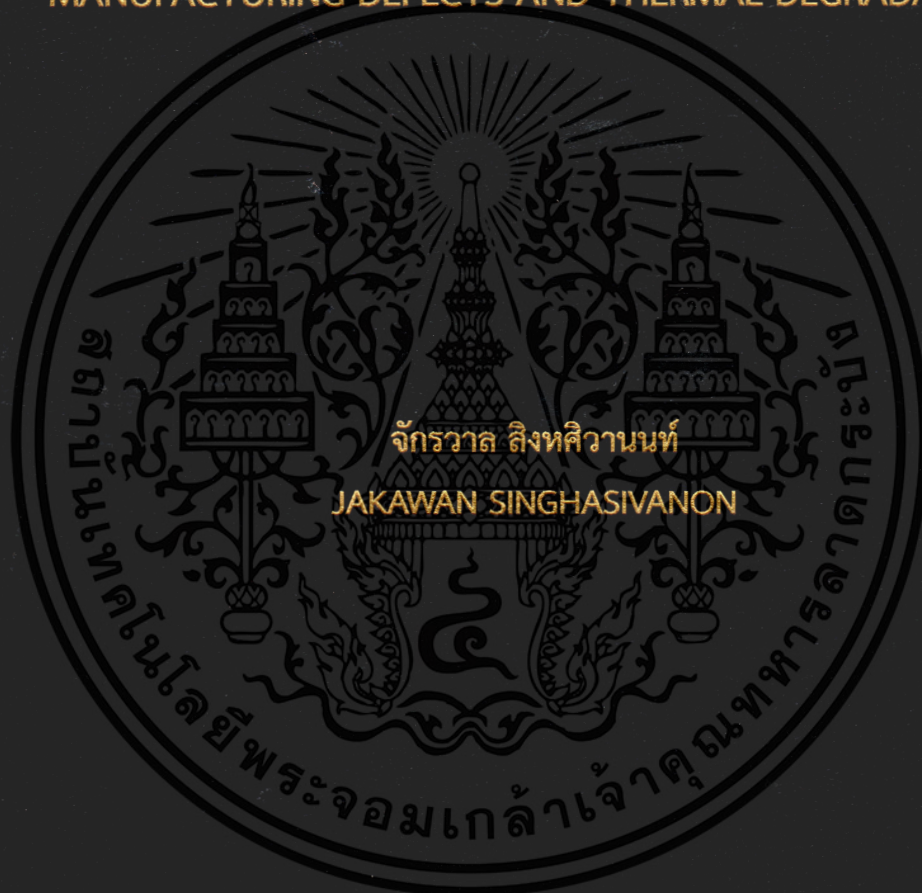


การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสายเคเบิล XLPE
พิกัดแรงดันไฟฟ้า 0.6/1kV ที่มีความบกพร่องจากกระบวนการผลิต
และเสื่อมสภาพจากความร้อน

THE STUDY ON DIELECTRIC RESPONSE OF 0.6/1KV XLPE CABLE WITH
MANUFACTURING DEFECTS AND THERMAL DEGRADATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-020-066

การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสายเคเบิล XLPE
พิกัดแรงดันไฟฟ้า 0.6/1kV ที่มีความบกพร่องจากกระบวนการผลิต
และเสื่อมสภาพจากความร้อน

THE STUDY ON DIELECTRIC RESPONSE OF 0.6/1KV XLPE CABLE WITH
MANUFACTURING DEFECTS AND THERMAL DEGRADATION



จักรวาล สิงหสิวานนท์
JAKAWAN SINGHASIVANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY ON DIELECTRIC RESPONSE OF 0.6/1KV XLPE CABLE WITH
MANUFACTURING DEFECTS AND THERMAL DEGRADATION



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
2018
KMITL-2018-EN-M-020-066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสายเคเบิล XLPE พิกัดแรงดันไฟฟ้า 0.6/1kV
ที่มีความบกพร่องจากกระบวนการผลิตและเสื่อมสภาพจากความร้อน

Thesis Title The Study on Dielectric Response of 0.6/1kV XLPE Cable with
Manufacturing Defects and Thermal Degradation

นักศึกษา นายจักรวาล สิงห์วานนท์

รหัสประจำตัว 59601161

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.นิรุธ จิรสวรรณกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-020-066

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินทร์	
ดร.เปี่ยมภูมิ	สุฤกษ์ฤกษ์	
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	
ผศ.ดร.นิรุธ	จิรสวรรณกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.30-15.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และวันที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสายเคเบิล XLPE พักัดแรงดันไฟฟ้า 0.6/1kV ที่มีความบกพร่องจากกระบวนการผลิตและเสื่อมสภาพจากความร้อน
นักศึกษา	นายจักรวาล สิงหิควานนท์
รหัสประจำตัว	59601161
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลฉนวน XLPE พักัดแรงดันไฟฟ้า 0.6/1kV ที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวนและการเสื่อมสภาพจากความร้อน โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา คือ 1) และ 2) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและทดสอบแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน กรณี 3) และ 4) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและทดสอบแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ในการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล ทดสอบโดยป้อนแรงดันกระแสตรงรูปขั้น และทำการวัดกระแสโพลาริเซชัน หลังจากนั้นหยุดจ่ายแรงดัน และดิสชาร์จประจุลงดิน พร้อมกับวัดกระแสดีโพลาริเซชัน จากนั้นสร้างโมเดลฉนวนและคำนวณ พารามิเตอร์ไดอิเล็กตริก ได้แก่ ค่าความต้านทานกระแสตรง ดัชนีการโพลาริเซชัน อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ในการศึกษาแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ทดสอบโดยป้อนแรงดันสูงกระแสสลับด้วยอัตรา 1kV ต่อ วินาที โดยทดสอบตัวอย่างละ 6 ครั้ง จากนั้นคำนวณพารามิเตอร์ทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ค่าความคงทนต่อแรงดันและค่าแรงดันเบรกดาวน 63 เปอร์เซนต์ จากการศึกษาวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบว่า เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและแรงดันเบรกดาวนที่นำเสนอ ให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ สามารถนำมาประเมินสภาพฉนวนและสมรรถนะของฉนวนจากกระบวนการผลิตได้ดี นำไปประยุกต์ใช้กับสายเคเบิล ณ จุดติดตั้งใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Study on Dielectric Response of 0.6/1kV XLPE Cable with Manufacturing Defects and Thermal Degradation
Student	Mr. Jakawan Singhasivanon
Student ID.	59601161
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nirudh Jirasuwankul
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis proposes the study on dielectric response of 0.6/1kV XLPE cable with insulating contamination and thermal degradation by using the polarization and depolarization current (PDC) measurement technique. To figure out the polarization phenomena and dielectric breakdown strength of the tested cable, a total of 4 experiments were conducted as of following. Experiment 1 and 2 were testing of defective cables from insulating contamination while experiment 3 and 4 were those of thermal degradation. To investigate the polarization phenomena of the tested cable, the step DC low voltage was applied to insulation system for measuring polarization current, $i_{pol}(t)$. Then, the DC applied voltage source was suddenly disconnected to short circuit the tested cable to measure depolarization current, $i_{dep}(t)$. From the experiment, the dielectric models were analyzed from PDC test results. Thus, dielectric parameters, i.e. DC resistance, polarization index, complex capacitance ratio, and dielectric loss factor were calculated. In case of dielectric breakdown voltage test, an AC high voltage was applied across the XLPE insulation with a rate-of-rise of 1kV/s and a total of 6 breakdown events were recorded for each test sample. Finally, statistical parameters i.e. average breakdown voltages, relative standard deviation, withstand voltage, and 63% breakdown voltage were calculated. From all cases of experiment, it is found that PDC and breakdown voltage tests can provide useful information and are able to apply as a tool to evaluate condition of electric cable insulation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ต่างๆที่ดีแก่ข้าพเจ้า จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณภาณุพงศ์ สิงห์ศิวานนท์ และ คุณปาริชาติ สิงห์ศิวานนท์ บิดามารดา และ ครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.ประพิณ อภินรเศรษฐ์ คุณสุมนา อภินรเศรษฐ์ และ บริษัท ไทรแค็บ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อต่อตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณสาธิต ไกรระภี และ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนการทดสอบและข้อมูลตลอดการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณเพทาย นิมนสนอง รุ่นพี่ที่คอยให้คำปรึกษา ทั้งในส่วนของ การเรียน, การทดสอบ และการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกท่าน และขอขอบคุณภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเป็นที่รักเคารพยิ่ง ตลอดจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จักรวาล สิงห์ศิวานนท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สายเคเบิล.....	5
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิล.....	5
2.1.2 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนในสายเคเบิล.....	5
2.2 กระบวนการโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชันในฉนวน.....	10
2.3 การเสื่อมสภาพในฉนวน.....	14
2.4 กระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชัน.....	15
2.5 เปรอริมิตติวิตีเชิงซ้อน.....	17
2.6 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	20
2.7 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวน.....	20
2.8 พารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	22
2.8.1 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ.....	22
บทที่ 3 การทดสอบ.....	25
3.1 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	26
3.1.1 การเตรียมสายเคเบิล.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	28
3.1.3 วิธีการทดสอบ.....	29
3.2 การทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	30
3.2.1 การเตรียมสายเคเบิล.....	30
3.2.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
3.2.3 วิธีการทดสอบ.....	32
3.3 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	33
3.3.1 การเตรียมสายเคเบิล.....	33
3.3.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
3.3.3 วิธีการทดสอบ.....	34
3.4 การทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	35
3.4.1 การเตรียมสายเคเบิล.....	35
3.4.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
3.4.3 วิธีการทดสอบ.....	36
บทที่ 4 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	37
4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการ ปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	37
4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา.....	42
4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา.....	43
4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลที่มีการ ปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	46
4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการ เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	48
4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา.....	51
4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกความชื้นของสายเคเบิลที่มีการ เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนจนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	65
ภาคผนวก ข PDC Specifications.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และหียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	9
ตารางที่ 3.1 สรุปการทดสอบในกรณีศึกษาต่างๆ.....	25
ตารางที่ 4.1 สรุปการทดสอบในกรณีศึกษาต่างๆ.....	37
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานฉนวน.....	42
ตารางที่ 4.3 ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวน.....	44
ตารางที่ 4.4 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	45
ตารางที่ 4.5 แรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	46
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานฉนวน.....	52
ตารางที่ 4.7 ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวน.....	54
ตารางที่ 4.8 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	55
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิล.....	56
ตารางที่ 4.10 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นและแรงดันเบรกดาว์น 63% ของสายเคเบิลปกติและ สายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิล.....	1
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์แบบต่างๆ.....	5
รูปที่ 2.2 การเกิดพอลิไวนิลคลอไรด์.....	7
รูปที่ 2.3 การเกิดพอลิเอทิลีน.....	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด.....	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ XLPE.....	8
รูปที่ 2.6 การป้อนแรงดันให้กับฉนวนหรือไดอิเล็กตริก.....	10
รูปที่ 2.7 อิเล็กตรอนกิสโพลาร์ไรเซชัน.....	11
รูปที่ 2.8 ไอออนิกโพลาร์ไรเซชัน.....	11
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของออเรนเทชันโพลาร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลของน้ำ.....	12
รูปที่ 2.10 ฮอปปีงโพลาร์ไรเซชัน.....	12
รูปที่ 2.11 สเปซชาร์จโพลาร์ไรเซชัน.....	13
รูปที่ 2.12 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาร์ไรเซชันประเภทต่างๆ.....	13
รูปที่ 2.13 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและปัญหาของฉนวนสายเคเบิล.....	14
รูปที่ 2.14 วัสดุฉนวนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก.....	17
รูปที่ 2.15 เฟสเซอร์โอดอะแกรมของฉนวนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก.....	20
รูปที่ 2.16 รูปร่างการกระจายสนามไฟฟ้าในฉนวนของสายไฟ.....	21
รูปที่ 2.17 ฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง.....	23
รูปที่ 2.18 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง.....	23
รูปที่ 2.19 ฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวบูลล์และค่าพารามิเตอร์ (β, η).....	24
รูปที่ 3.1 โมเดลสายเคเบิลสำหรับศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริก.....	26
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมโมเดลสายเคเบิล.....	27
รูปที่ 3.3 วงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก.....	28
รูปที่ 3.4 การเตรียมวงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก.....	28
รูปที่ 3.5 โมเดลสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน.....	30
รูปที่ 3.6 วงจรทดสอบหาแรงดันเบรกดาวนของฉนวน.....	31
รูปที่ 3.7 การเตรียมวงจรทดสอบหาแรงดันเบรกดาวนของฉนวน.....	31
รูปที่ 3.8 โมเดลสายเคเบิลกรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกเนื่องจากผลของความร้อน.....	33
รูปที่ 3.9 โมเดลสายเคเบิลกรณีการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.10 ไตอะแกรมวงจรทดสอบหาแรงดันเบรกตาวานของสายเคเบิลที่มีการเชื่อมสภาพจาก ความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ.....	38
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชั้นส่วนของกระดาษ แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	38
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชั้นส่วนของพลาสติก แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	38
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยจารบี แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	39
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชั้นส่วนของทองแดง แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	39
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร.....	39
รูปที่ 4.7 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ.....	40
รูปที่ 4.8 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชั้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	40
รูปที่ 4.9 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชั้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	40
รูปที่ 4.10 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	41
รูปที่ 4.11 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชั้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	41
รูปที่ 4.12 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร.....	41
รูปที่ 4.13 กระแสโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	42
รูปที่ 4.14 PI ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	42
รูปที่ 4.15 กระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.16 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	43
รูปที่ 4.17 อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	44
รูปที่ 4.18 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	45
รูปที่ 4.19 คาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	45
รูปที่ 4.20 แรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อน แทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน.....	47
รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ.....	48
รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที.....	49
รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 60 นาที.....	49
รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 60 นาที.....	49
รูปที่ 4.25 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ.....	50
รูปที่ 4.26 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 90°C.....	50
รูปที่ 4.27 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 140°C.....	50
รูปที่ 4.28 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 250°C.....	51
รูปที่ 4.29 กระแสโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.30 PI ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.31 กระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

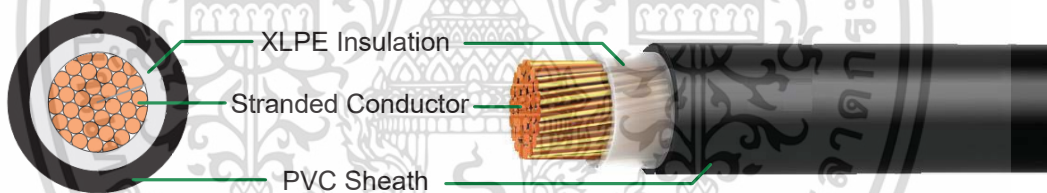
รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.32 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.33 คาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	54
รูปที่ 4.34 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.35 คาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.36 กราฟความน่าจะเป็นของแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	57
รูปที่ 4.37 กราฟความน่าจะเป็นของแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สายเคเบิล คือสายที่ใช้ในการนำส่งกระแสไฟฟ้าจากต้นทางการผลิตไฟฟ้าไปยังปลายทางที่ต้องการใช้งาน สายเคเบิลมีประวัติศาสตร์การใช้งานมาอย่างยาวนานในทั้งระดับจุลภาค (ครัวเรือน) และมหภาค (ธุรกิจและอุตสาหกรรม) สายเคเบิลมีโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 1.1 ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เป็นส่วนที่ใช้ส่งกระแสไฟฟ้า, ฉนวน (Insulator) ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เป็นส่วนที่ป้องกันตัวนำไฟฟ้าจากสภาวะแวดล้อมต่างๆ และป้องกันไฟฟ้ารั่วไหลไปยังภายนอกอันอาจก่อให้เกิดอันตราย และเปลือกหุ้ม (Sheath, Jacket) เป็นส่วนที่ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับตัวนำและฉนวน ในช่วงทศวรรษที่ 1960 ได้มีการเริ่มใช้สายเคเบิลที่มีฉนวนไฟฟ้าเป็นพลาสติก ฉนวนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), พอลิเอทิลีน (PE), และครอสลิงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) โดยฉนวนที่มีประสิทธิภาพยอดเยี่ยมที่สุดคือฉนวน XLPE



รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิล

ในกระบวนการผลิตสายเคเบิล ตัวนำผลิตด้วยกระบวนการตีพันสายเคเบิล (Stranding) ฉนวนและเปลือกหุ้มผลิตด้วยกระบวนการหุ้มฉนวน (Extrusion) แน่นอนว่าสายเคเบิลที่นำมาใช้งานย่อมต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบคุณภาพหลังการผลิตที่ได้มาตรฐานจากโรงงานผู้ผลิต ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบแบบ 100% หรือการตรวจสอบแบบสุ่ม (Sampling) เพื่อรับรองคุณภาพของสายเคเบิลชุดนั้นๆ แต่ถึงกระนั้น ก็อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการเกิดฟองอากาศในฉนวน หรือมีการปนเปื้อนต่างๆเกิดขึ้นในสายเคเบิล ฯลฯ ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสายเคเบิล หรือทำให้เกิดข้อบกพร่องในการผลิต (Defect) ซึ่งมีโอกาสหลุดไปหาผู้ใช้ อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ติดตั้ง ผู้ใช้, ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ และแน่นอนว่าย่อมก่อเกิดค่าใช้จ่ายอันไม่พึงประสงค์ต่อโรงงานผู้ผลิต ทั้งค่าใช้จ่ายจากของเสีย, แรงงานและเวลาที่ใช้ทดสอบสาย, ค่าเสียหายที่ต้องชดใช้ หรือค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบกระบวนการที่มีความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดของเสีย (Risk process) เพื่อที่จะแก้ไขและป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในกระบวนการตรวจสอบคุณภาพหลังการผลิต หากตรวจสอบพบของเสีย แล้วสามารถวิเคราะห์หรือระบุจากผลการทดสอบได้อย่างรวดเร็วว่า เป็นของเสียที่เกิดมาจากกระบวนการใด จะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อโรงงานผู้ผลิตได้เป็นอย่างมาก

ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบและทดสอบสายเคเบิลที่มีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ จึงมีความจำเป็นและมีประโยชน์อย่างมากในโรงงานผลิต และด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้มีเทคนิคในการตรวจสอบและทดสอบสายเคเบิลด้วยกันหลายวิธี เช่น การวัดความต้านทานของฉนวน การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวิธีที่ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงในการทดสอบ อาจทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายที่จะได้รับความเสียหายจากการทดสอบ และทำให้เกิดโอกาสที่จะเสื่อมสภาพก่อนอายุการใช้งานจริง ดังนั้นเพื่อที่จะได้รับผลการทดสอบที่แม่นยำ และทดสอบสายเคเบิลโดยไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายหรือเสียหายเพิ่มเติมไปจากความเป็นจริง จึงควรใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำในการทดสอบ PDC (Polarization and Depolarization current) เป็นหนึ่งในวิธีการทดสอบฉนวนที่ใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำ เริ่มเป็นที่แพร่หลาย หากแต่วิธีการดังกล่าวยังไม่เคยถูกนำมาใช้ในการทดสอบฉนวนในสายเคเบิล และด้วยเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของการทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัด 0.6/1 kV ในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสายเคเบิลปกติ สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน หรือสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสายเคเบิลชนิดและรูปแบบเดียวกัน ด้วยวิธีการทำลายฉนวน เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการใช้วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในการวิเคราะห์สายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัด 0.6/1 kV

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อปรับปรุงกระบวนการทดสอบสายเคเบิลในกระบวนการอุตสาหกรรม
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในฉนวนของสายเคเบิล
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สภาพฉนวน XLPE ของสายเคเบิลปกติ, สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาวิธีการใหม่เพื่อแยกแยะสายเคเบิลปกติ, สายเคเบิลที่ผิดปกติเช่น วิธี PDC และหาความสัมพันธ์ระหว่างวิธี PDC และค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนในฉนวน XLPE ของสายเคเบิล และศึกษาการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1) และ 2) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและทดสอบแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน โดยเปรียบเทียบ 6 กรณีย่อย คือ 1. สายเคเบิลปกติ 2. สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนขึ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน 3. สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนขึ้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน 4. สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน 5. สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนขึ้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และ 6. สายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร กรณีศึกษาที่ 3) และ 4) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและทดสอบแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน โดยเปรียบเทียบ 4 กรณีย่อย คือ 1. สายเคเบิลปกติ 2. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที 3. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 60 นาที 4. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 60 นาที

ซึ่งการทดสอบ PDC วัดและวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กตริก และในส่วนของ การเบรกดาวนจะหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน และพารามิเตอร์พื้นฐานทางสถิติ วัสดุที่นำมาทดสอบ ถูกจัดเตรียมโดยโรงงานผู้ผลิตและทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และจรัญไทยไวแอนเคเบิล โดยดำเนินการตั้งตั้งแต่ปี 59-61

1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2543 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus” โดย Jean-Jacques Alff, Vahe Der Houhanessian and Walter S. Zaengl and Adolf J. Kachler ใน IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, 2-5 April 2000. โดยได้นำเสนอเครื่องมือวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมาใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง วัดกระแสต้านขนาดพิโกแอมแปร์

ปี พ.ศ. 2544 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “DIELECTRIC SPECTROSCOPY IN TIME AND FREQUENCY DOMAIN FOR HV POWER EQUIPMENT (TRANSFORMERS, CABLES ETC.)” โดย Walter S. Zaengl, Prof. em. Dr.-Ing ใน Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2001, Bangalore, India, 20 - 24 August 2001. โดยได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับผลตอบสนองไดอิเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทรอนิกส์ และการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

ปี พ.ศ. 2553 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “On-site Non-destructive Diagnosis of In-service Power Cables by Polarization / Depolarization Current Analysis” โดย Supatra A. Bhumiwat ใน Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 โดยได้นำเสนอการวินิจฉัยฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน ณ จุดใช้งานด้วยเทคนิคการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

ปี พ.ศ. 2556 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Study on the Dielectric Response Characteristic of XLPE Cables” โดย Gang YE, Hua Li, Fuchang Lin, Xiaogang Wu, Zeqi Huang, Qin zhang, Jingwei Cai ใน Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2013 โดยได้นำเสนอการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลใต้ดินในกรณีฉนวนใหม่ไม่ได้ใช้งานเทียบกับฉนวนเสื่อมสภาพ

ปี พ.ศ. 2560 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Determining the Number of Parallel RC Branches in Polarization/Depolarization Current Modeling for XLPE Cable Insulation” โดย S. Sulaiman, A. Mohd Ariffin, D. T. Kien ใน International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology 2017 โดยได้นำเสนอการหาจำนวน RC ขนานสำหรับโมเดลสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในระบบฉนวนของสายเคเบิล
2. มีความเข้าใจในทฤษฎีของกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน
3. มีความเข้าใจผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ, สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายเคเบิล

สายเคเบิล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยกระแสไฟฟ้าจะผ่านตัวนำไปตามสายไปจนถึงเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างสายเคเบิลที่สำคัญ 3 ส่วนหลัก ดังนี้

2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิล

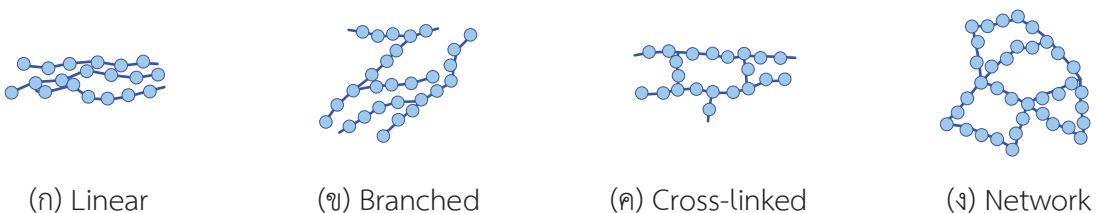
1. ตัวนำ (Conductor) ตัวนำเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำตัวนำมีอยู่ 2 ชนิด คือทองแดง (Copper) และอะลูมิเนียม (Aluminum)

2. ฉนวน (Insulator) ฉนวนทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวนำสัมผัสกัน หรือเกิดการสัมผัสของตัวนำกับอุปกรณ์ที่ต่อลงกราวด์ และยังป้องกันตัวนำจากความร้อน, ของเหลวหรือสารเคมีที่จะทำอันตรายกับตัวนำได้ โดยวัสดุที่ห่อหุ้มจะมีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิการใช้งานสูง, มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี และสามารถทนแรงดึงได้มาก

3. เปลือกนอก (Sheath/ Jacket) เปลือกนอกทำหน้าที่ห่อหุ้มแกนหรือหุ้มสายเคเบิลชั้นนอกสุดจะต้องมีคุณสมบัติในด้านที่ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมีได้ดี และทนความร้อนได้สูง และถ่ายเทความร้อนได้ดี อีกทั้งทนแรงดึงได้สูง แข็งและเหนียวไม่เปื่อยง่าย เปลือกของสายเคเบิลอาจจะมี 1 หรือ 2 ชั้นก็ได้เพื่อป้องกันความเสียหายทางกายภาพที่อาจเกิดขึ้นในขณะติดตั้งหรือใช้งาน การเลือกใช้ชนิดของเปลือกสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง วัสดุที่นิยมทำเป็นเปลือกสายเคเบิลมากที่สุดคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีน ส่วนกรณีของสายเคเบิลที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษก็อาจใช้วัสดุชนิดอื่นตามแต่ความเหมาะสม

2.1.2 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนในสายเคเบิล

ในการทำฉนวนและเปลือกของสายไฟหรือสายเคเบิลต่างๆ วัสดุที่ได้รับความนิยมในการขึ้นรูปนั้นได้แก่ พอลิเมออร์ อาทิเช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิเอทิลีน (PE) ทรอปอลิเอทิลีน (XLPE) และยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมออร์แต่ละชนิดนั้นมีรูปแบบต่างกันไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมออร์แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พอลิเมอร์แบบเส้น (Linear) ภายในหนึ่งโซ่พอลิเมอร์แบบเส้นจะมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละหน่วยย่อยของพอลิเมอร์แบบปลายชนปลาย แต่ละสายโซ่จะถูกนำมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์หรือพันธะไฮโดรเจน พอลิเมอร์แบบเส้นจะมีคุณสมบัติยืดหยุ่น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

2. พอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน (Branched) จะมีลักษณะการเชื่อมต่อกันของกิ่งก้านสายโซ่พอลิเมอร์ออกมาจากสายโซ่พอลิเมอร์เส้นหลัก การเกิดลักษณะนี้จะเกิดจากการทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) หรือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นต้น

3. พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (Cross-linked) จะมีลักษณะการเชื่อมต่อกันของสายโซ่พอลิเมอร์เส้นหลักกับสายโซ่พอลิเมอร์เส้นหลักเส้นอื่นด้วยตัวเชื่อมขวาง ที่เชื่อมด้วยพันธะโคเวเลนต์ การเกิดพอลิเมอร์ลักษณะนี้จะเกิดจากการทำการสังเคราะห์หรือเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ย้อนกลับ ตัวเชื่อมขวางมักจะเกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่เติมเข้าไปในกระบวนการผลิตเพื่อทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างโซ่พอลิเมอร์ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) และยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) เป็นต้น

4. พอลิเมอร์แบบตาข่าย (Network) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีการเชื่อมต่อเป็นตาข่ายแบบ 3 มิติด้วยพันธะโคเวเลนต์ พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางที่มีการเชื่อมต่อกันในปริมาณ การเชื่อมต่อกันลักษณะนี้ จะทำให้มีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางความร้อนดีขึ้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ อีพอกซี (Epoxy) เป็นต้น

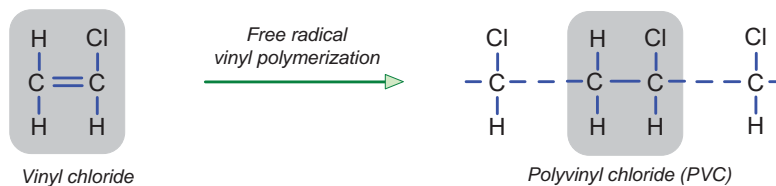
พอลิเมอร์สามารถแบ่งตามประเภทของพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อน เป็น 2 ประเภทคือ

1. พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ประเภทนี้ได้โดยการหลอมเหลวด้วยความร้อน จากนั้นขึ้นรูปใหม่ตามที่ต้องการและปล่อยให้เย็นลง การขึ้นรูปใหม่สามารถทำซ้ำได้ แต่เพื่อให้ได้มาตรฐาน การผลิตสายไฟหรือสายเคเบิลจะใช้พอลิเมอร์ที่ถูกผลิตขึ้นมาในครั้งแรกเท่านั้น พอลิเมอร์ชนิดที่นิยมใช้ทำฉนวนหรือเปลือกของสายเคเบิลหรือสายเคเบิล ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

1.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิไวนิลคลอไรด์ เกิดจากมอนอเมอร์ชื่อ ไวนิลคลอไรด์ มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.2

พอลิไวนิลคลอไรด์ มีคุณสมบัติเหนียว การขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ สามารถทำได้โดยง่าย ราคาถูก ทนต่อตัวทำละลาย เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำยาละลายอินทรีย์ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด-ด่าง แต่ไม่ทนต่อความชื้น ติดไฟยาก แต่หากติดไฟจะทำให้เกิดก๊าซพิษเป็นปริมาณมาก มีค่าความหนาแน่นประมาณ 1.4 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวประมาณ $204\text{--}212 \text{ }^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ $60\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 105°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

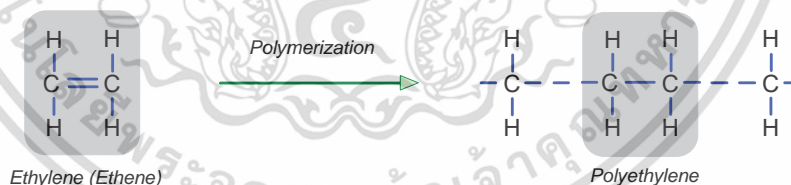


รูปที่ 2.2 การเกิดพอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์ มีคุณสมบัติเหนียว การขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ สามารถทำได้โดยง่าย ราคาถูก ทนต่อตัวทำละลาย เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด-ด่าง แต่ไม่ทนต่อความชื้น ติดไฟยาก แต่หากติดไฟจะทำให้เกิดก๊าซพิษเป็นปริมาณมาก มีค่าความหนาแน่นประมาณ 1.4 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวประมาณ $204\text{--}212 \text{ }^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ $60\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 105°C

ฉนวนและเปลือกของสายไฟแรงดันต่ำ, เปลือกนอกของสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงปานกลาง หรือเปลือกนอกของสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง นิยมใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ในการขึ้นรูป ในขณะที่ฉนวนหรือเปลือกของสายไฟที่ใช้ในระบบสายเคเบิลอากาศแรงสูง จะไม่นิยมนำพอลิไวนิลคลอไรด์ มาใช้ในการขึ้นรูป เนื่องจากไม่ทนต่อสภาพอากาศ แสงแดด และความชื้น ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกหรือเปราะได้ง่าย

1.2 พอลิเอทิลีน (PE) พอลิเอทิลีน เกิดจากมอนอเมอร์ชื่อ เอทิลีน มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดพอลิเอทิลีน

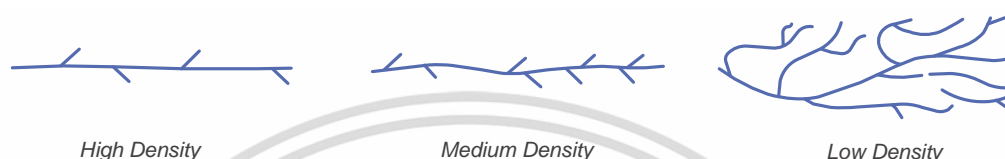
พอลิเอทิลีน มีคุณสมบัติส่วนใหญ่เช่นเดียวกับพอลิไวนิลคลอไรด์ แต่ทนต่อสภาพอากาศ แสงแดด และความชื้นได้ดีกว่า และติดไฟได้ง่ายกว่า มีค่าความหนาแน่นประมาณ $0.91\text{--}0.97 \text{ g/cm}^3$ มีจุดหลอมเหลวประมาณ $105\text{--}180^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานปกติ $70\text{--}80^\circ\text{C}$ ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ประมาณ $80\text{--}110^\circ\text{C}$ และเนื่องจากพอลิเอทิลีนมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า และมีราคาถูก จึงทำให้พอลิเอทิลีนได้รับความนิยมได้การนำมาใช้งานเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีน แบ่งตามความหนาแน่นที่แตกต่างกันได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene : MDPE)
3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)

พอลิเอทิลีนทั้ง 3 ประเภท มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.4

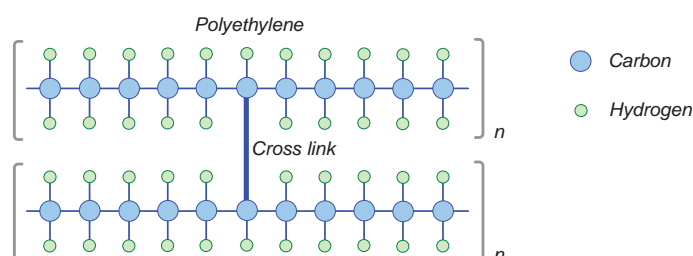


รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด

LDPE นั้นนิยมใช้ทำเป็นเปลือกของสายโทรศัพท์ ส่วน MDPE นิยมใช้ทำเป็นเปลือกของสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงปานกลาง และสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง ส่วน HDPE นิยมใช้ทำเป็นฉนวนของสายโทรศัพท์และยังใช้ทำเป็นเปลือกของสายเคเบิลอากาศและสายไฟเบอร์ออปติก

2. พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง จะแตกต่างจากพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นอย่างมาก พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง มีโครงสร้างเป็นแบบแห หรือแบบสามมิติ ไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ประเภทนี้ได้โดยการหลอมเหลวด้วยความร้อนอีกครั้ง กล่าวคือ การขึ้นรูปใหม่ไม่สามารถทำซ้ำได้นั้นเอง หากได้รับความร้อนปริมาณสูงมาก จะทำให้พอลิเมอร์สลายตัวและเสียหาย พอลิเมอร์ชนิดที่นิยมใช้ทำฉนวนของสายเคเบิล ได้แก่ ครอบลึงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) และยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) เป็นต้น

2.1 ครอบลึงค์พอลิเอทิลีน (XLPE) ครอบลึงค์พอลิเอทิลีนประเภท LDPE ที่ถูกนำมาเปลี่ยนจากโครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้นหรือกิ่งก้าน ให้เป็นพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางหรือแบบตาข่าย นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลแรงดันสูง มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ XLPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XLPE มีคุณสมบัติเหนียวและแข็ง การขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ สามารถทำได้โดยง่าย ทนต่อตัวทำละลาย เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด-ด่าง และความชื้นได้ดี เรียกว่ามีคุณสมบัติส่วนใหญ่เหมือนพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนนั่นเอง แต่มีราคาแพงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีน และติดไฟได้ง่ายกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ มีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.92 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวมากกว่า 200°C อุณหภูมิใช้งานปกติ $90-110^\circ\text{C}$ ทนอุณหภูมิสูงสุด $130-140^\circ\text{C}$ เป็นฉนวนที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง

2.2 ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPR) เอทิลีนพรอพิลีน เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากสารประกอบเอทิลีนและไอโซพรอพิลีน ที่ถูกเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลให้มีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง มีคุณสมบัติส่วนใหญ่เหมือนครอสลิงค์พอลิเอทิลีน แต่มีลักษณะอ่อนกว่า และไม่ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด-ด่าง มีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.87 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวประมาณ 200°C อุณหภูมิใช้งานปกติ 90°C ทนอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 110°C นิยมใช้ทำท่อ ยางรถยนต์ และฉนวนสายเคเบิล เช่น ฉนวนสายเคเบิลแรงดันต่ำ และสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงปานกลาง แต่ไม่นิยมนำมาใช้ทำเป็นเปลือกของสายไฟ

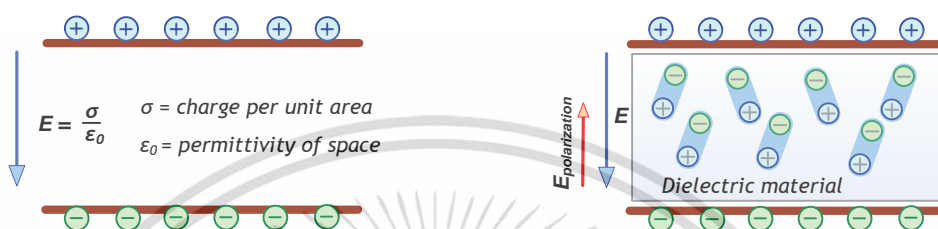
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

คุณสมบัติ	PVC	PE			XLPE	EPR
		LDPE	MDPE	HDPE		
โครงสร้างพอลิเมอร์	Linear	Branched	Branched	Linear	Cross-linked	Network
สามารถขึ้นรูปใหม่ เมื่อได้รับความร้อน	√	√	√	√	-	-
Density (g/cm^3)	1.4	0.91-0.93	0.93-0.95	0.95-0.97	0.92	0.87
Melting point ($^\circ\text{C}$)	204-212	105-115	120-180	120-180	> 200	200
Thermal resistivity ($^\circ\text{C}-\text{cm/W}$)	500		350		350	500
Operating temperature ($^\circ\text{C}$)	60-75	70	70-80	70-80	90-110	90
Min. operating temperature ($^\circ\text{C}$)	-20		-45		-55	-50
Max. operating temperature ($^\circ\text{C}$)	105	80	110	110	130-140	110
Short-circuit temperature ($^\circ\text{C}$)	140-160	140	160	160	250	250
Tensile strength (N/mm^2)	13-20	7-30	20-30	14-34	19-23	12
Elongation (%)	150-300	300-800	400-900	600-700	500-600	400
Hardness (Shore D)	35-43	43	53-54	57-61	59	50
Volume resistivity : ρ (W-cm)	10^{14}		$> 10^{17}$		$> 10^{17}$	$> 10^{16}$
Relative permittivity : ϵ_r	6 - 8	2.5-2.8	2.5	2.3-2.5	2.3	2.3-3.5
Dielectric strength (kV/mm)	20-35		20-45		30-50	30-40
Dissipation factor : Tan d (%)	4-12	0.02	0.03	0.03	0.02-0.03	0.15-0.4
Oxygen Index @ 25°C (%)	47		18		18	18
Halogen content (%wt)	22-29		<0.02		<0.02	<0.02
Water Absorption 24 hr@ 25°C %wt)	0.2-1		0.005-0.01		0.005-0.01	0.005-0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กระบวนการโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันเซชันในฉนวน

เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนหรือไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 2.6 โดยที่ ขนาดของแรงดันไม่สามารถทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ได้ โมเลกุลของฉนวนจะเกิดการตอบสนอง ต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำ ทำให้เกิด “กระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization process)” ขึ้นภายในฉนวน



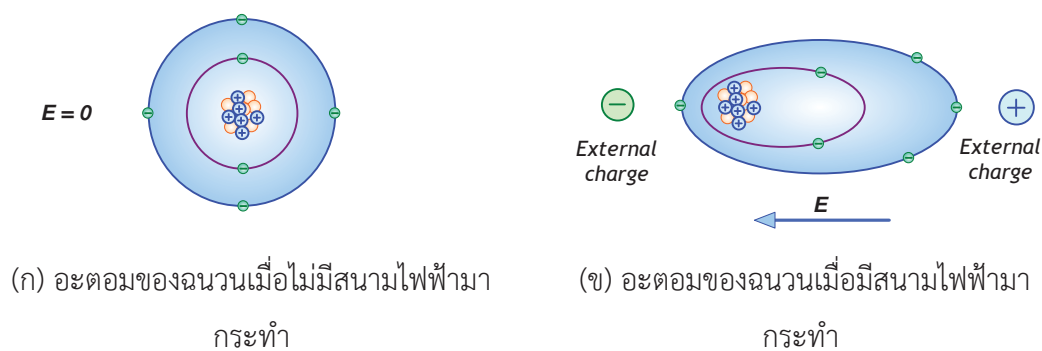
(ก) สนามไฟฟ้าในสุญญากาศ

(ข) กระบวนการโพลาไรเซชันในฉนวน

รูปที่ 2.6 การป้อนแรงดันให้กับฉนวนหรือไดอิเล็กตริก

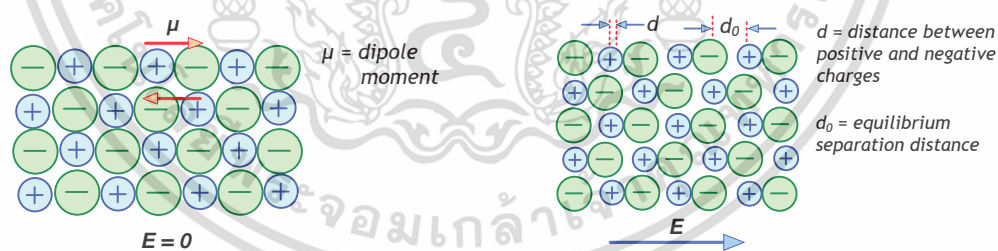
กระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นภายในฉนวนถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (Electronic Polarization) หรือ ออปติคอล โพลาไรเซชัน (Optical Polarization) อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชันเป็นกระบวนการโพลาไรเซชันในระดับอะตอมของฉนวน เมื่อฉนวนได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่อยู่โดยรอบนิวเคลียสของอะตอมของฉนวน จะเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวใหม่ตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ซึ่งการจัดเรียงตัวใหม่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะทำให้อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล (dipole) หรือเกิดการมีขั้วขึ้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนเพื่อจัดเรียงตัวใหม่ภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอก อิเล็กตรอนดังกล่าวจะมีขนาดเล็กมาก เพราะแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่อกลุ่มหมอก อิเล็กตรอนและนิวเคลียสมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่นิวเคลียสกระทำต่อกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชันนี้เป็นการโพลาไรเซชันที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า และเป็นกระบวนการโพลาไรเซชันที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กระบวนการโพลาไรเซชันประเภทนี้จะ เกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-14} วินาที



รูปที่ 2.7 อีเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน

2. ไอออนิกโพลาไรเซชัน (Ionic Polarization) หรืออะตอมมิคโพลาไรเซชัน (Atomic Polarization) ไอออนิกโพลาไรเซชันเป็นกระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นผลึกไอออนิก เช่น เกลือ (NaCl) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นต้น เมื่อฉนวนได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ไอออนบวกและไอออนลบของพันธะไอออนิกจะเคลื่อนที่ โดยที่ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางสนามไฟฟ้าและไอออนลบจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางสนามไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบนี้จะทำให้เกิดโพลที่เกิดขึ้นภายใน ผลึกไอออนิกของฉนวนเกิดความไม่สมดุล ดังนั้นจึงทำให้เกิดไดโพลล์ขึ้นภายในวัสดุฉนวน การเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบดังกล่าวจะทำให้เกิดการไม่สมดุลของไดโพลภายในฉนวนซึ่ง กระบวนการดังกล่าวถูกเรียกว่า ไอออนิกโพลาไรเซชัน



รูปที่ 2.8 ไอออนิกโพลาไรเซชัน

3. ออเรนเทชันโพลาไรเซชัน (Orientation Polarization) หรือ ไดโพลาร์โพลาไรเซชัน (Dipolar Polarization) ออเรนเทชันโพลาไรเซชัน เป็นการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นกับไดอิเล็กตริกที่มีโมเลกุลเป็นแบบ เชิงขั้วถาวร (permanent dipole) เช่น น้ำ กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น โดยปกติเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า จากภายนอกมากระทำ โมเลกุลเชิงขั้วถาวรภายในไดอิเล็กตริกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ นั่นคือโมเลกุลจะหมุนและกระจายกระจายอย่างอิสระ ซึ่งการจัดเรียงตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

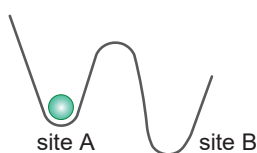
ไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเชิงขั้วถาวรนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าลัพท์ภายในไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อไดอิเล็กตริกดังกล่าวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โมเลกุลของไดอิเล็กตริกจะเกิดการหมุนและมีการเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ ซึ่งการเรียงตัวของโมเลกุลเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มากกระทำนี้จะทำให้เกิดออเรนเทชันโพลาริเซชันขึ้น ซึ่งการโพลาริเซชันประเภทนี้จะใช้เวลาในการเกิดนานกว่าอิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชันและอะตอมมิคโพลาริเซชัน



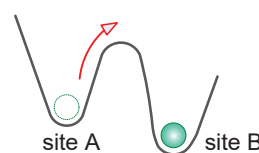
ก) โมเลกุลของน้ำเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากกระทำ (ข) โมเลกุลของน้ำเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากกระทำ

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของออเรนเทชันโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลของน้ำ

4. ฮอปปีงโพลาริเซชัน (Hopping Polarization) ฮอปปีงโพลาริเซชัน เป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่อธิบายปรากฏการณ์ที่ประจุภายใน ฉนวน (localized charges) เช่น อิเล็กตรอน และ โฮล (hole) สามารถกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไป ยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดพฤติกรรมโพลาริเซชันภายในฉนวนได้ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนและโฮลภายในฉนวนจะเกิดพฤติกรรมการกระโดดจากอีกตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยที่พฤติกรรมการกระโดดนี้จะเกิดในระยะเวลาสั้น จากนั้นประจุดังกล่าวจะค้างอยู่ในตำแหน่งใหม่ที่กระโดดไป ซึ่งพฤติกรรมการย้ายตำแหน่งของประจุภายในฉนวนจะทำให้เกิดการโพลาริเซชันภายในฉนวน ตัวอย่างฮอปปีงโพลาริเซชัน เช่น อิเล็กตรอนสามารถกระโดดจากตำแหน่งเดิมของมันไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งการกระโดดของอิเล็กตรอนนี้จะทำให้ตำแหน่งเดิมกลายเป็นโฮล หรือแสดงพฤติกรรมเป็นประจุบวก และทำให้ตำแหน่งใหม่ที่อิเล็กตรอนกระโดดไปแสดงพฤติกรรมเป็นประจุลบ จากปรากฏการณ์ที่ได้อธิบายข้างต้นสามารถทำให้เกิดขั้วหรือเกิดการโพลาริเซชันภายในฉนวนได้



(ก) ประจุภายในฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากกระทำ

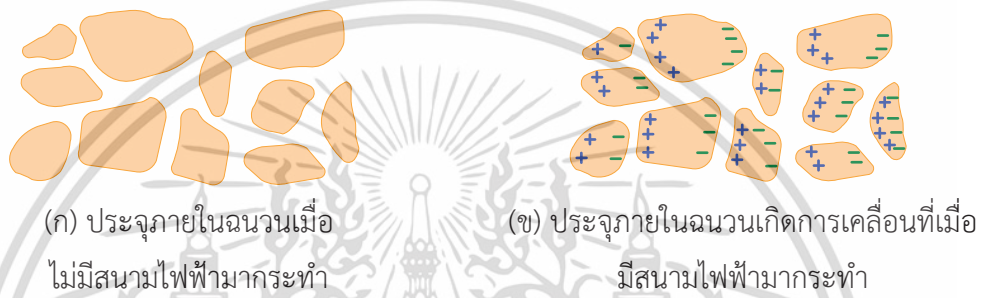


(ข) ประจุภายในฉนวนเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากกระทำ

รูปที่ 2.10 ฮอปปีงโพลาริเซชัน

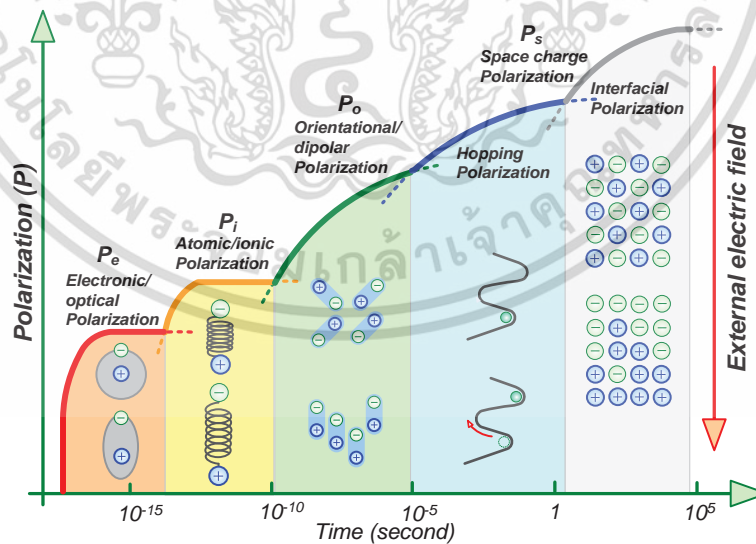
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน (Space Charge Polarization) หรือ อินเตอร์เฟซเชียล โพลาริเซชัน (Interfacial Polarization) สเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน เป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่มีกระบวนการเกิดดังนี้ เมื่อฉนวน อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ภายในฉนวนจะเคลื่อนที่แยกออกจากกัน และอนุภาคประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงรอยต่อของ ฉนวน 2 ชนิดที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกหรือประจุลบที่รอยต่อของฉนวนดังกล่าว การเคลื่อนที่ของประจุจนกระทั่งทำให้เกิดการสะสมของประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวน 2 ชนิด ถูกเรียกว่า สเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน ซึ่งสเปซชาร์จ์โพลาริเซชันนี้ จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในฉนวนผิดเพี้ยนไป



รูปที่ 2.11 สเปซชาร์จ์โพลาริเซชัน

ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาริเซชันประเภทต่างๆ และขนาดของการโพลาริเซชัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



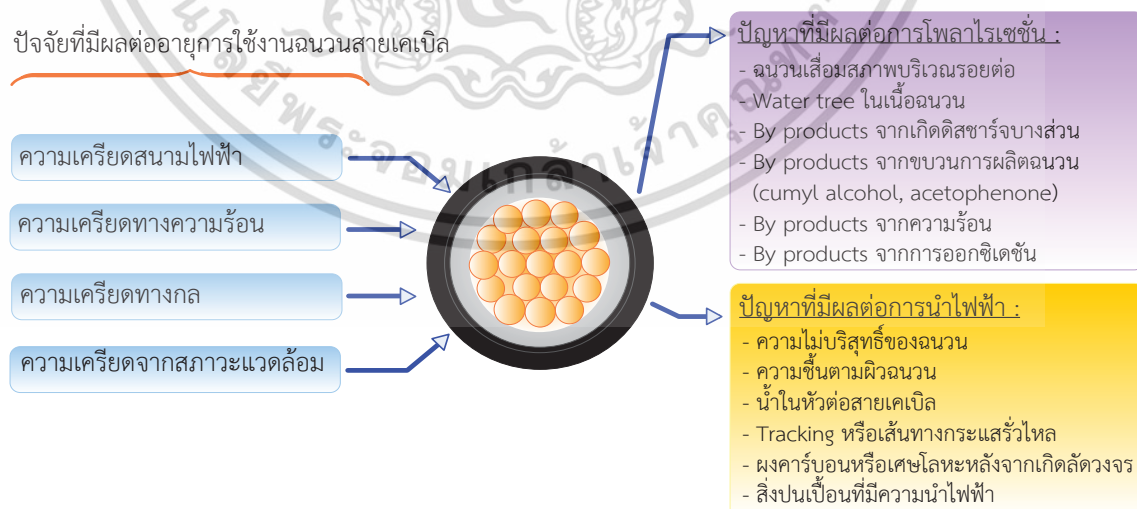
รูปที่ 2.12 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาริเซชันประเภทต่างๆ

2.3 การเสื่อมสภาพในฉนวน

วัสดุพอลิเมอร์เสื่อมสภาพ (deterioration or degradation) ได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากส่วนใหญ่ถูกใช้งานที่ภายนอกอาคาร ผลของการเสื่อมสภาพนี้เราเรียกว่า การเสื่อมสภาพในบรรยากาศ (weathering deterioration) ซึ่งอาจจะเป็นผลรวมของกระบวนการเสื่อมสภาพหลายกระบวนการ การเสื่อมสภาพในสภาวะนี้ส่วนใหญ่เกิดจากออกซิเดชันซึ่งถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากแสงแดด พอลิเมอร์อาจดูดซับน้ำได้ทำให้ความแข็งและความต้านทานการบิดงอลดลง ยกตัวอย่างเช่น PVC จะเกิดการเสื่อมสภาพในบรรยากาศได้ค่อนข้างง่าย

พอลิเมอร์อาจเสื่อมสภาพโดยกระบวนการที่เรียกว่า ชิซชัน (scission) ซึ่งคือการแตกสลายของพันธะในสายโมเลกุล เป็นเหตุให้เกิดการแยกสลายที่ตำแหน่งจุดชิซชัน และทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ การแตกสลายของพันธะอาจมีผลจากการแผ่รังสี (ความถี่) ผลของความชื้น ความร้อน ผลของปฏิกิริยาเคมี และผลจากแรงดันไฟฟ้าเอง

ฉนวนของสายเคเบิลเมื่อติดตั้งใช้งานฉนวนจะได้รับความเครียดผสม จาก ความร้อน สนามไฟฟ้า สภาวะแวดล้อม และแรงทางกล ส่งผลให้ฉนวนสายเคเบิลเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน หรือชำรุดเสียหายจากความบกพร่องเนื่องจากกระบวนการติดตั้ง ณ จุดใช้งาน โดยทั่วไปสามารถแบ่งปัญหาที่เกิดขึ้นจากความเสื่อมสภาพหรือความบกพร่องของระบบฉนวนออกเป็น 2 กลุ่มดังรูปที่ 2.13 ได้แก่ 1) ความเสื่อมสภาพหรือความบกพร่องของระบบฉนวนที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการโพลาริเซชันของฉนวน 2) ความเสื่อมสภาพหรือความบกพร่องของฉนวนที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำไฟฟ้าผ่านฉนวน



รูปที่ 2.13 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและปัญหาของฉนวนสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบฉนวนจะส่งผลทั้งกระบวนการโพลาริเซชันและกระบวนการนำไฟฟ้า ดังนั้นค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน ได้แก่ ค่าเปอร์มิตติวิตีจริง ค่าเปอร์มิตติวิตีจินตภาพ ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าแพคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นในฉนวนสามารถทำได้โดยการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกต่อแรงดันกระแสตรงรูปขั้น (step DC voltage) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคขั้นสูงเทคนิคหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์สภาพฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนำเสนอโดย Prof. W.S. Zaengl ในปี 2000 โดยวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และประมาณโมเดลฉนวน (RC model) จากกระบวนการโพลาริเซชันและกระบวนการนำไฟฟ้า โดยใช้เทคนิค Curve fitting ประมาณโมเดลฉนวน และคำนวณคาปาซิแตนซ์เชิงซ้อน และแพคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจากโมเดลฉนวนเพื่อวิเคราะห์หรือวินิจฉัยสภาพฉนวน

2.4 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกด้วยวิธี PDC ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าแรงดันกระแสตรงรูปขั้นตกคร่อมวัสดุที่เป็นฉนวนเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยที่ขนาดของแรงดันไม่สามารถทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ได้ โมเลกุลของฉนวนจะเกิดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำ ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการโพลาริเซชัน (Polarization process) ส่งผลให้เกิดกระแสโพลาริเซชันขึ้นภายในฉนวน (Polarization current, i_{pol}) กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$i_{pol}(t) = C_0 V_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_0 \delta(t) + f(t) \right] \quad (2.1)$$

โดยที่

C_0	คือค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิตของวัตถุทดสอบ (Geometric capacitance)
V_c	คือแรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ
σ_0	คือค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (Pure dc conductivity)
ϵ_0	คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (Permittivity of vacuum)
ϵ_∞	คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น
$\delta(t)$	คือฟังก์ชันเดลต้า (Delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้น แบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น
$f(t)$	คือฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (Dielectric response function)

ในทางทฤษฎีเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะเกิดกระแสโพลาริเซชันซึ่งมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

- 1) กระแสคาปาซิทีฟ (Capacitive current, i_c) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและจะลดลงในทันทีทันใด
- 2) กระแสแอบซอร์ปชัน (Absorption current, i_{ab}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลาริเซชันภายในฉนวน
- 3) กระแสการนำไฟฟ้า (Conductance current, i_{con}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุและมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด

แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (Leakage current, i_l) รวมอยู่ด้วย ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ โดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสการนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (Practical conduction current, $i_{con(practical)}$) และเมื่อทำการหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำ กระแสคายประจุ (Discharge current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่า กระแสดีโพลาริเซชัน (Depolarization current, i_{dep}) กระแสดีโพลาริเซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_c [f(t) - f(t + T_c)] \quad (2.2)$$

โดยที่ T_c คือระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ

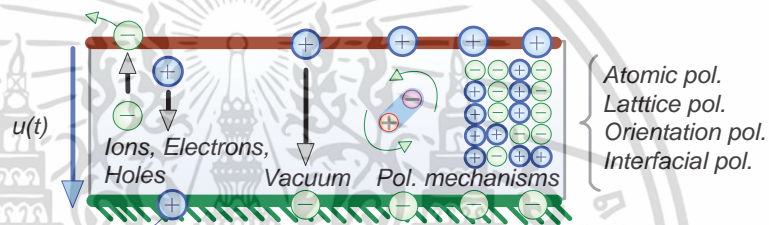
กระแสดีโพลาริเซชัน (depolarization current, i_{dep}) มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ 1) กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (capacitive discharge current, $i_c (discharge)$) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดและมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลาริเซชัน แต่มีขั้วตรงข้ามกัน และ 2) กระแสแอบซอร์ปชันดิสชาร์จ (absorption discharge current, $i_{ab}(discharge)$) ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อทำการคายประจุให้กับฉนวนต่อไปเรื่อยๆ กระแสดังกล่าวจะมีค่าลดลง กระแสแอบซอร์ปชันดิสชาร์จนี้มีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสแอบซอร์ปชันของกระแสโพลาริเซชัน แต่มีขั้วตรงข้ามกัน สำหรับกระแสดีโพลาริเซชันจะไม่มียังองค์ประกอบของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วยเนื่องจากทำการหยุดป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้ว

2.5 เพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน

เพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน $\epsilon_r^*(\omega)$ คือพารามิเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุฉนวน ดังสมการที่ 2.3 โดยที่ส่วนจริงของเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน $\epsilon_r'(\omega)$ แสดงความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า และส่วนจินตภาพของเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน $\epsilon_r''(\omega)$ แสดงถึงความสูญเสียในวัสดุฉนวนจากการเก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปเมื่อวัสดุฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกจะเกิด 2 ปรากฏการณ์ คือ 1) การนำไฟฟ้า 2) การโพลาไรเซชัน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วัสดุฉนวนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้า $u(t)$ ที่ป้อนวัสดุฉนวนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังสมการที่ 2.4 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าในรูปเฟสเซอร์ \underline{U} แสดงดังสมการที่ 2.5

$$u(t) = u_m \cos(\omega t + \Phi) \quad (2.4)$$

$$\underline{U} = R_e(\underline{U}e^{j\omega t}) = U_m \angle \Phi \quad (2.5)$$

โดยที่สนามไฟฟ้าภายนอกในรูปเฟสเซอร์ \underline{E} แสดงดังสมการที่ 2.6

$$\underline{E} = \frac{U_m e^{j(\omega t + \Phi)}}{d} = \frac{\underline{U}}{d} \quad (2.6)$$

1) กระบวนการนำไฟฟ้า เกิดจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \underline{J}_σ ไหลผ่านระบบฉนวน พื้นที่หน้าตัด A คำนวณได้ดังสมการที่ 2.7 ในทางปฏิบัติความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีขนาดน้อยมากสำหรับความถี่กำลังไฟฟ้า (50Hz) ดังนั้นการวัดกระแสที่ไหลผ่านฉนวนควรป้อนด้วยแรงดันกระแสตรง แต่ต้องระวังประจุค้างในฉนวนหลังการวัดด้วย

$$\underline{J}_\sigma = \sigma \cdot \underline{E} \quad (2.7)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า หน่วยพื้นฐานคือ คือ โมห์ (mho) หรือ ซีเมนส์ (siemens)

2) กระบวนโพลาริเซชัน \underline{P} เกิดขึ้นเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก ประจุภายในฉนวนจะเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าเรียกว่าปรากฏการณ์โพลาริเซชัน ประกอบด้วย อิเล็กตรอนิกส์ โพลาริเซชัน ไอออนิกโพลาริเซชัน ออเรนเทชันโพลาริเซชัน ฮอปปีงโพลาริเซชัน และ สเปนซาร์จโพลาริเซชัน ดังที่กล่าวในตอนต้น กระบวนการโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างของระบบฉนวน ส่งผลให้เกิดดิสเพลสเมนต์ \underline{D} ในระบบฉนวน เพิ่มความหนาแน่นประจุที่อิเล็กโตรดตั้งสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$\underline{D} = \epsilon_0 \underline{E} + \underline{P} \quad (2.8)$$

$$\underline{D} = \epsilon_0 \epsilon_r^* \underline{E} \quad (2.9)$$

เมื่อ

\underline{D}

คือ ดิสเพลสเมนต์ (displacement)

\underline{P}

คือ โพลาริเซชัน

ϵ_0

คือ เพอร์มิตติวิตี้สุญญากาศ

ϵ_r^*

คือ เพอร์มิตติวิตี้เชิงซ้อน

ในกรณีไดโพลโพลาริเซชันค่าเพอร์มิตติวิตี้เชิงซ้อน ϵ_r^* คำนวณได้จากสมการ Debye ตั้งสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$\epsilon_r'(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} + \epsilon_\infty \quad (2.10)$$

$$\epsilon_r''(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	τ	คือ Relaxation time constant
	ϵ_s	คือ static dielectric constant
	ϵ_∞	คือ optical dielectric constant

ดังนั้นดิสเพลสเมนต์ \underline{D} แสดงได้ดังสมการที่ 2.12

$$\underline{D} = \epsilon_0 \epsilon_r' \underline{E} - j \epsilon_0 \epsilon_r'' \underline{E} \quad (2.12)$$

เมื่อแรงดันที่ป้อนเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือสนามไฟฟ้าภายนอกเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นความหนาแน่นกระแสดิสเพลสเมนต์ \underline{J}_D ของระบบคำนวณค่าพจน์ได้จากสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$\underline{J}_D = \frac{d\underline{D}}{dt} = j\omega \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \underline{E} \quad (2.13)$$

$$\underline{J}_D = \underbrace{j\omega \epsilon_0 \epsilon_r' \underline{E}}_{\text{capacitive current}} + \underbrace{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'' \underline{E}}_{\text{dielectric loss current}} \quad (2.14)$$

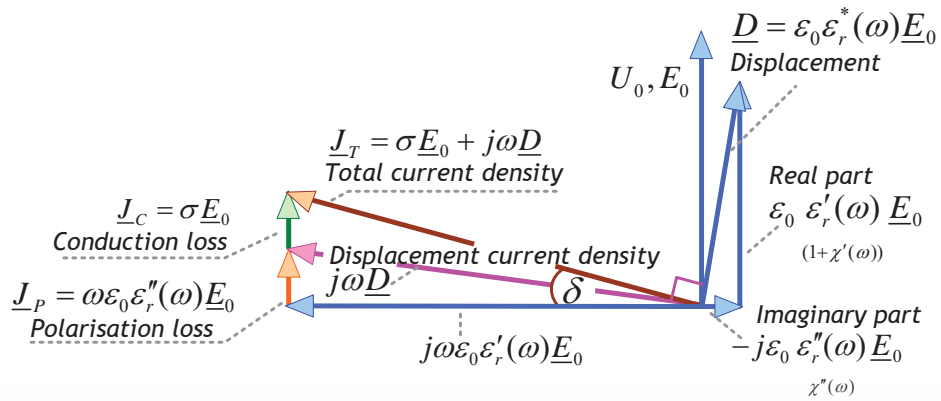
ดังนั้นความหนาแน่นกระแสรวม \underline{J}_T ของระบบคำนวณแสดงดังสมการที่ 2.15 – 2.17 และแสดงความสัมพันธ์ตามเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.15

$$\underline{J}_T = \underline{J}_D + \underline{J}_\sigma \quad (2.15)$$

จะได้

$$\underline{J}_T = j\omega \underline{D} + \sigma \underline{E} \quad (2.16)$$

$$\underline{J}_T = \left(\epsilon_r' - j(\epsilon_r'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) \right) j\omega \epsilon_0 \underline{E} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.15 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของฉนวนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก

2.6 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก $\tan \delta$ เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการประเมินสภาพฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยคำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในฉนวน P_{loss} ต่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_C ดังสมการที่ 2.18

$$\tan \delta = \frac{P_{loss}}{Q_C} \quad (2.18)$$

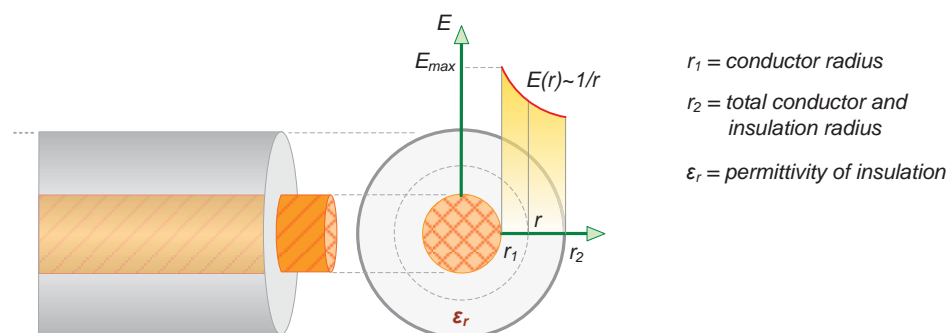
จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.15 สามารถคำนวณแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกดังสมการที่ 2.19

$$\tan \delta = \frac{\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_r''}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'} \quad (2.19)$$

2.7 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนในฉนวน

เมื่อฉนวนถูกป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งที่มีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นๆ หรือทนต่อสนามไฟฟ้านั้นได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรง เรียกรวมในลักษณะนี้ว่า การเกิดเบรกดาวนในฉนวน ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนในฉนวนคือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย เกิดการเบรกดาวนหรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ

ในทางทฤษฎี พื้นที่หน้าตัดของสายไฟจะมีลักษณะเป็นรูปวงกลม มีวงกลมสองวงทับซ้อนกันวงแรกได้แก่ตัวนำ และวงที่สองได้แก่ฉนวน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปร่างการกระจายสนามไฟฟ้าในฉนวนของสายไฟ

จากรูปที่ 2.16 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด หรือ E_{\max} ที่เกิดขึ้นใกล้กับผิวของตัวนำที่มีรัศมียาว r_1 อยู่ในชั้นฉนวนที่มีรัศมีรวมยาว r_2 หาได้ดังสมการที่ 2.20

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.20)$$

แรงดันเบรกดาวน์ หรือ U_b สามารถหาได้ดังสมการที่ 21 โดย E_b คือค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน ตัวอย่างเช่น ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE โดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ที่ 22-50 kV/mm

$$U_b = E_b r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.21)$$

ในทางปฏิบัติ การประเมินความเครียดเบรกดาวน์หรือเวลาในการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวน จะถูกทดสอบในรูปแบบต่างๆเพื่อที่จะทำนายประสิทธิภาพหลังการใช้งาน โดยมีการทดสอบเบื้องต้นตามที่สถาบันต่างๆได้กำหนดมาตรฐานไว้ การทดสอบดังกล่าวโดยทั่วไปจะออกแบบมาให้เหมาะสมกับการใช้งานและเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพ เพื่อให้สายไฟได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งาน การทดสอบส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นไปที่การวัดความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ให้เป็นตัวแทนของระบบ

นอกจากนี้ยังมีการคาดการณ์อายุการใช้งาน ความแม่นยำ และความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวหรือเบรกดาวน์ของสายเคเบิลในอนาคต โดยการเร่งการเสื่อมสภาพในฉนวน (Accelerated aging) เพื่อจำลองสภาพหลังการใช้งานจริงของสายไฟ ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.4 การทดสอบเบรกดาวน์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเพื่อเร่งกระบวนการการเสื่อมสภาพ แต่ก็ยังมีเทคนิคอื่นๆ อีก 2 เทคนิค อันได้แก่ การเร่งกระบวนการด้วยความถี่ (Frequency acceleration) โดยจะใช้ความถี่ที่มีค่าสูงกว่าความถี่ของแหล่งจ่ายปกติ หรือความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่ฉนวนถูกออกแบบมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ใช้งาน มาใช้ในการเร่งการเสื่อมสภาพ และการเร่งกระบวนการด้วยอุณหภูมิ (Temperature acceleration) ฉนวนพอลิเมอร์ โดยปกติจะเริ่มละลายที่ประมาณ 95 องศาเซลเซียสและส่งผลอย่างรุนแรงต่อความคงทนต่อเบรกดาวน์

2.8 พารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดสอบ

2.8.1 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

การดิสชาร์จหรือการเบรกดาวน์ของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไปเกิดขึ้นแบบสุ่ม ไม่สามารถวัดค่าที่แน่นอนได้ ดังนั้นในการประเมินค่าการดิสชาร์จหรือการเบรกดาวน์ของฉนวน จะใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเป็นตัวแทนข้อมูล โดยเลือกใช้ค่าทางสถิติให้เหมาะสมกับการแจกแจงข้อมูล การแจกแจงข้อมูลที่นิยมใช้อธิบายผลการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง คือ แจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และ การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

1) ฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติของตัวอย่างข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.17 และ รูปที่ 2.18 โดยที่พารามิเตอร์ทางสถิติของการแจกแจงแบบปกติ ที่ใช้อธิบายผลการทดสอบคือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ความแปรปรวนของตัวอย่าง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง ดังสมการที่ 2.22 – 2.24 ตามลำดับ

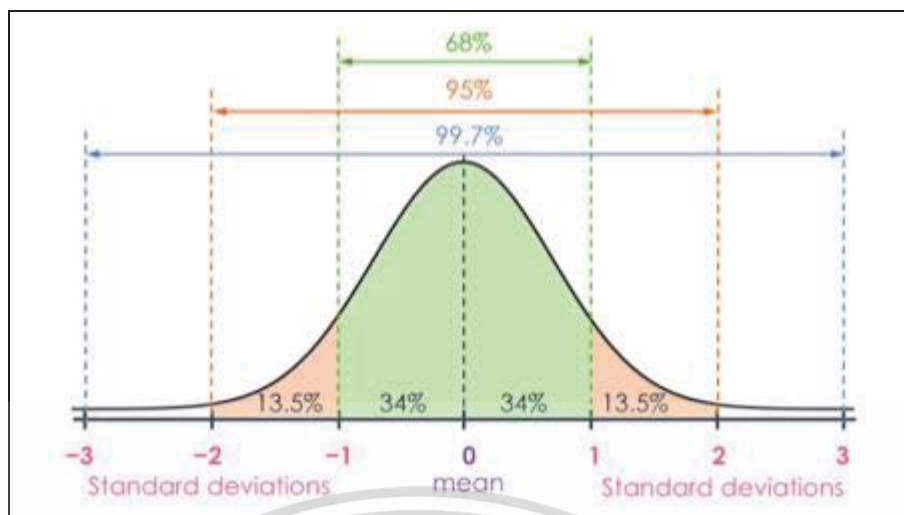
$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \approx \mu \quad (2.22)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \approx \sigma^2 \quad (2.23)$$

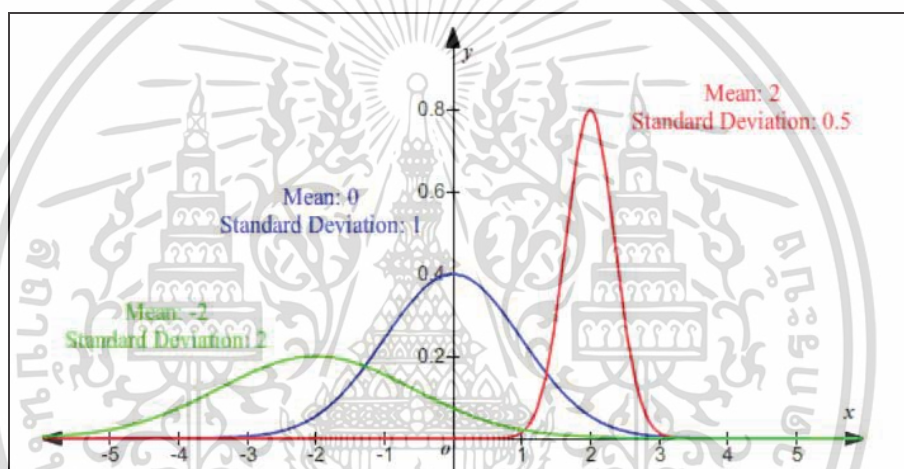
$$s = \sqrt{s^2} \approx \sigma \quad (2.24)$$

เมื่อ	μ	คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร (แรงดันเบรกดาวน์)
	σ^2	คือ ความแปรปรวนของประชากร (แรงดันเบรกดาวน์)
	σ	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร (แรงดันเบรกดาวน์)
	x_m	คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันเบรกดาวน์
	s^2	คือ ความแปรปรวนของแรงดันเบรกดาวน์
	s	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันเบรกดาวน์
	n	คือ จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง



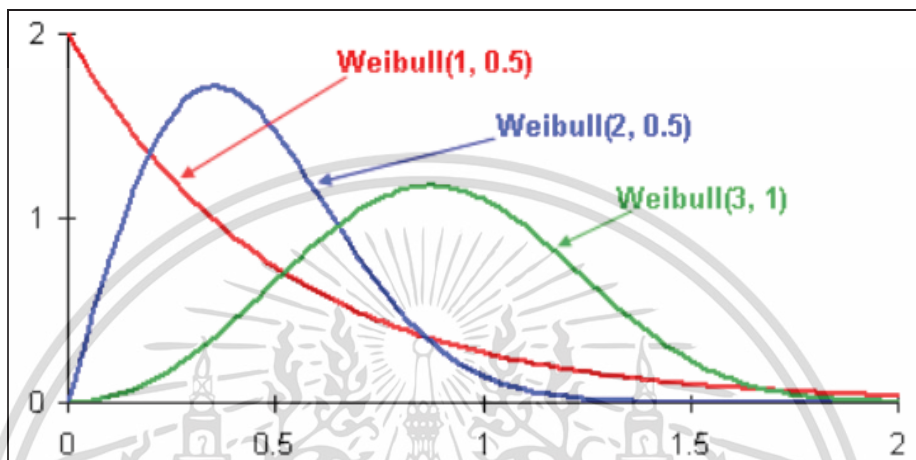
รูปที่ 2.18 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

2) ฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวบูลล์ของตัวอย่างข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.19 โดยที่พารามิเตอร์ทางสถิติของการแจกแจงแบบไวบูลล์ ที่ใช้อธิบายผลการทดสอบคือ พารามิเตอร์บอกสัดส่วน (Scale parameter) และพารามิเตอร์บอกรูปร่าง (Shape parameter) ดังสมการที่ 2.25 การแจกแจงแบบไวบูลล์เหมาะสำหรับอธิบายการดิสชาร์จหรือการเบรกดาวน์ของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยที่สามารถประมาณค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ V_{bd0} ได้ โดยที่ค่าแรงดันที่ต่ำกว่า V_{bd0} จะไม่เกิดการเบรกดาวน์

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\eta)^\beta} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$F(x)$	คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม
	x	คือ แรงดันเบรกดาวน
	η	คือ พารามิเตอร์บอกสัดส่วน
	β	คือ พารามิเตอร์บอกรูปร่าง



รูปที่ 2.19 ฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวบูลล์และค่าพารามิเตอร์ (β, η)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของการทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัด 0.6/1 kV ในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสายเคเบิลปกติ สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน และศึกษาความคงทนต่อแรงดันของฉนวนโดยการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ โดยสรุปการทดสอบทั้งหมดได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปการทดสอบในกรณีศึกษาต่างๆ

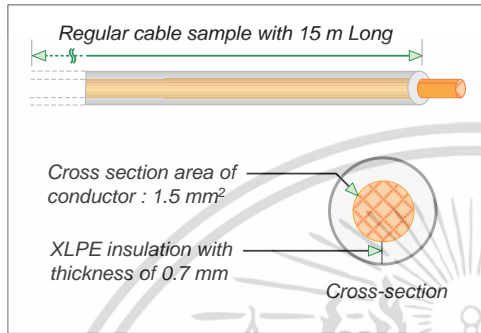
กรณีศึกษา	สายเคเบิลปกติ	สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน					สายเคเบิลปกติ	สายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)		
		ปนเปื้อนชั้นส่วนของกระดาษ	ปนเปื้อนชั้นส่วนของพลาสติก	ปนเปื้อนจารบี	ปนเปื้อนชั้นส่วนของทองแดง	สายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร		90	140	250
		PDC	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Breakdown	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

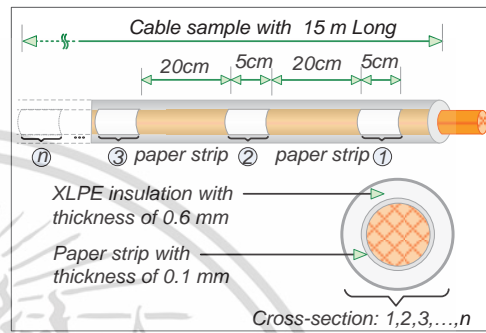
3.1 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

3.1.1 การเตรียมสายเคเบิล

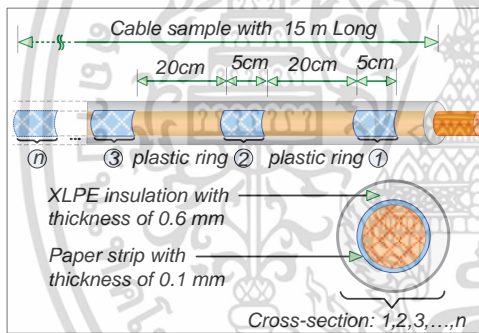
ในการทดสอบนี้ จะใช้สายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 1.5 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร จำนวนทั้งหมด 6 สายในการทดสอบ โมเดลดังรูปที่ 3.1 และการเตรียมสายเคเบิลดังรูปที่ 3.2



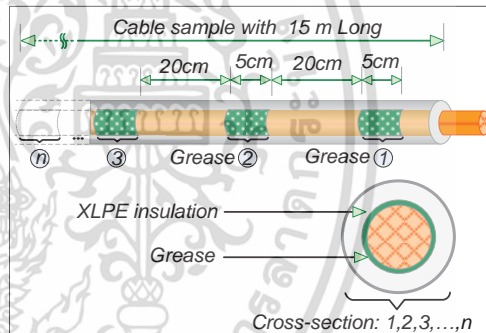
(ก) สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการปนเปื้อน)



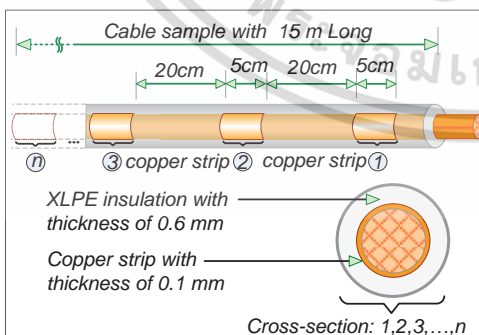
(ข) สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน



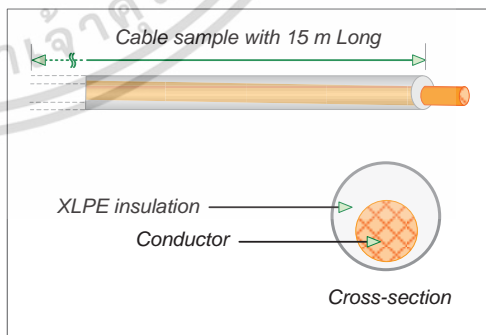
(ค) สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน



(ง) สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน



(จ) สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน



(ฉ) สายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

รูปที่ 3.1 โมเดลสายเคเบิลสำหรับศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมโมเดลสายเคเบิล

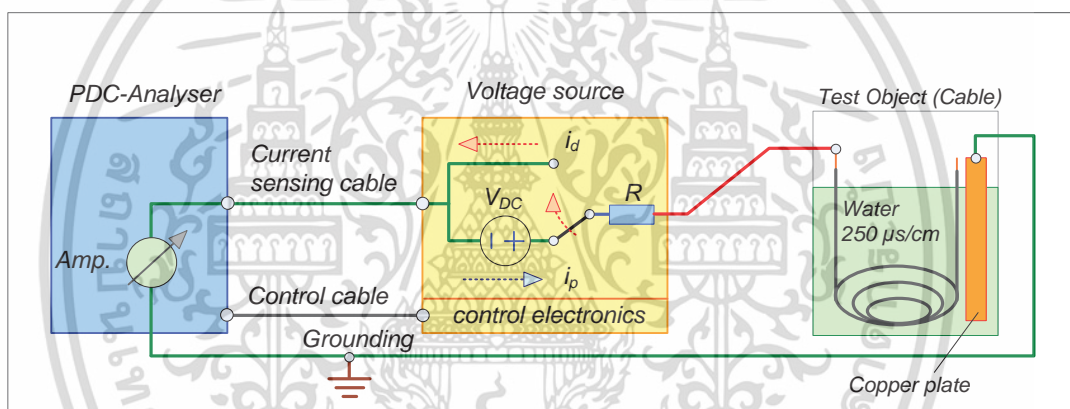
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

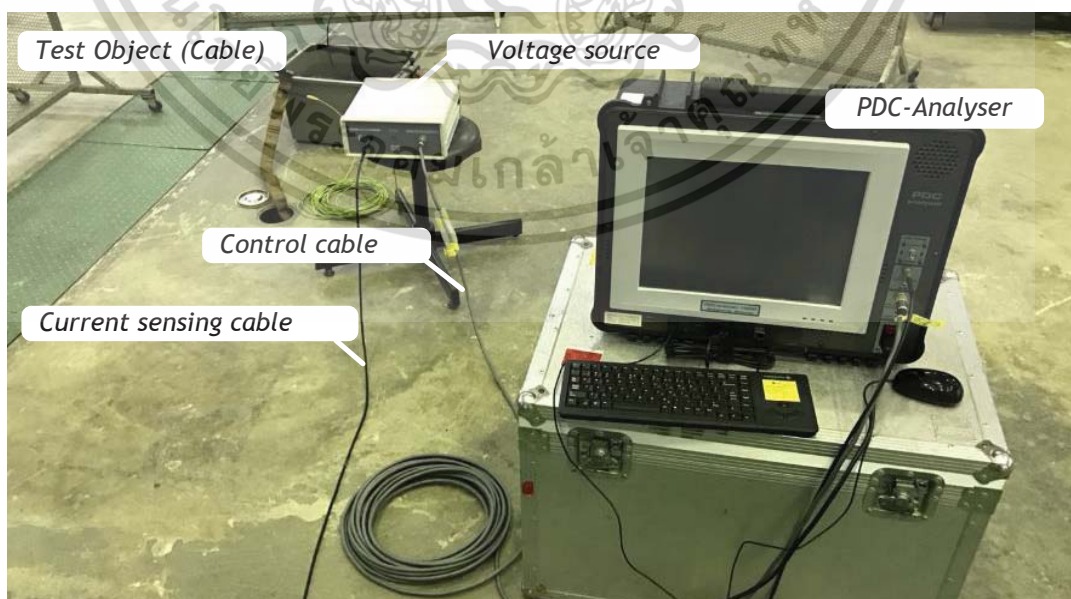
โมเดลสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ดังรูปที่ 3.1 จะถูกวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกด้วยเครื่อง PDC-Analyser-1MOD และแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงรูปคลื่น PDC-Phantom-1000XE ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

และเนื่องจากการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก เป็นการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าน้อยมาก เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบ จึงต้องควบคุมการทดสอบทุกขั้นตอนให้เหมือนกันในทุกๆ การทดสอบ ไม่ว่าจะเป็นชนิดของสายเคเบิล อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ลักษณะการยึดจับตัวนำสายเคเบิล รวมทั้งระยะในการยึดจับสายเคเบิล

โดยเฉพาะในส่วนของปลายสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ จะทำการติดตั้ง Terminal ชนิดทองแดง และใช้ตัวยึดจับสายสำหรับจ่ายแรงดันทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดการดิสชาร์จที่หน้าผิวสัมผัสระหว่างทำการทดสอบ



รูปที่ 3.3 วงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก



รูปที่ 3.4 การเตรียมวงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วิธีการทดสอบ

ก่อนเริ่มการวัดผลทดสอบไดอิเล็กตริก สายเคเบิลที่ต้องการทดสอบจะต้องถูกลดลงกราวด์เพื่อคายประจุที่คงค้างในสายเคเบิล เพราะอาจส่งผลกระทบต่อระดับกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน จากนั้นในส่วนของกระแสโพลาริเซชันจะวัดได้ในระหว่างที่จ่ายแรงดัน 220 V_{DC} ให้กับสายเคเบิลที่ต้องการทดสอบเป็นเวลา 2,000 วินาที กระแสดีโพลาริเซชันจะวัดในระหว่างที่ทำการคายประจุเป็นเวลา 2,000 วินาที

จากวงจรที่ใช้ในการทดสอบ กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันจะถูกวัดโดย PDC Analyzer ระหว่างการทดสอบ สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส โดยจะบันทึกผลการทดสอบ จากการทดสอบทั้ง 6 ดังนี้

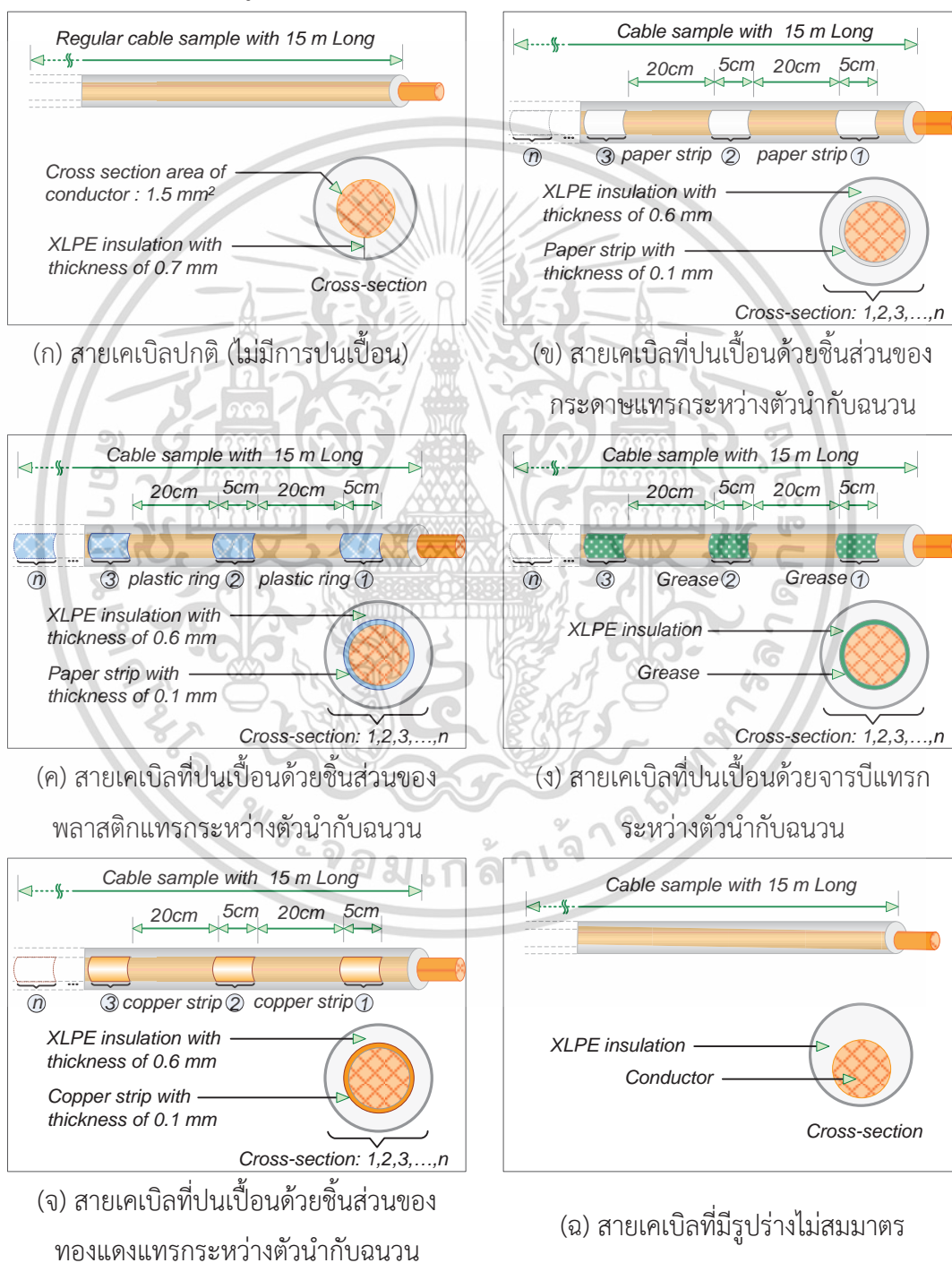
- 1) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปกติ (ไม่มีการปนเปื้อน)
- 2) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 3) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 4) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 5) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 6) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบแรงดันเบรกดาวนของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

3.2.1 การเตรียมสายเคเบิล

สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวนของฉนวนนี้ จะใช้สายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 1.5 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร จำนวนทั้งหมด 6 สาย ดังรูปที่ 3.5

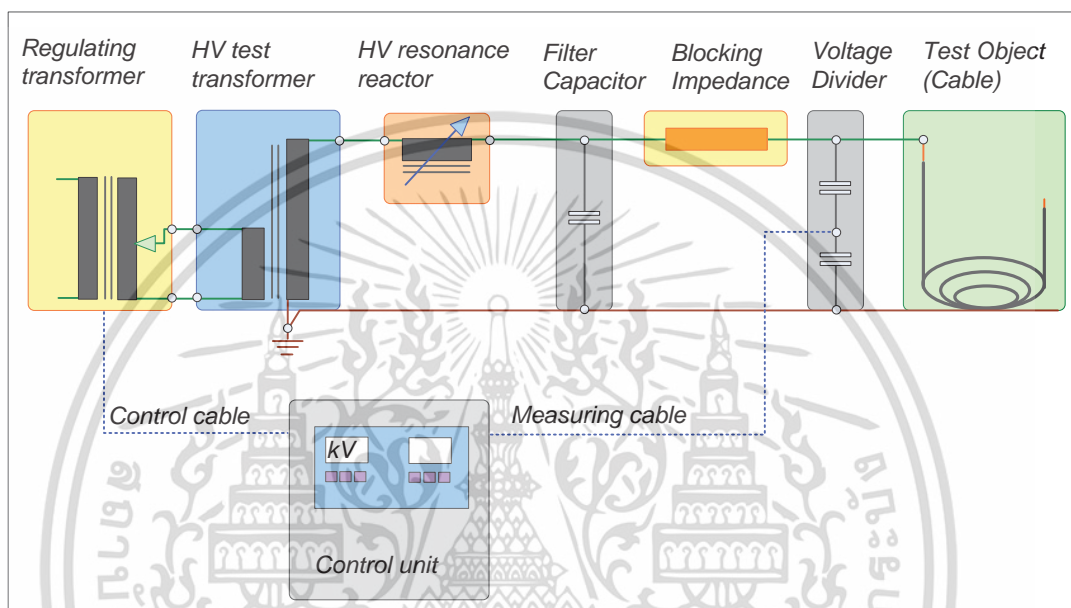


รูปที่ 3.5 โมเดลสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน

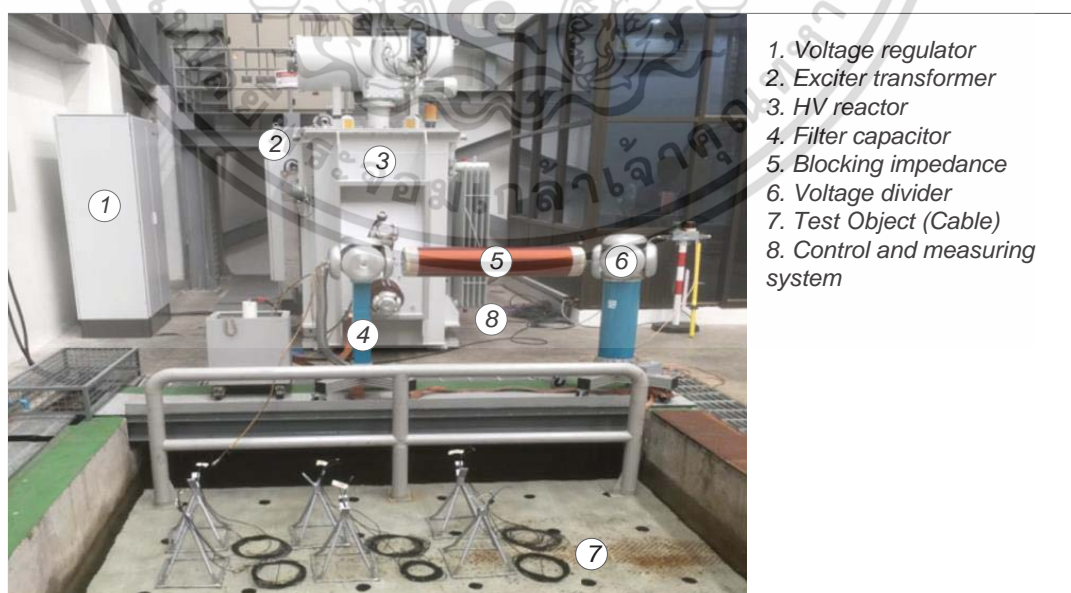
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการปนเปื้อน) และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน จะถูกทดสอบเพื่อหากระแสไหลโวลตาโรเซชันก่อน แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของฉนวน การทดสอบด้วยวิธีนี้จะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ด้วยมาตรฐาน IEC 60270 วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรทดสอบหาแรงดันเบรกดาวนของฉนวน



รูปที่ 3.7 การเตรียมวงจรทดสอบหาแรงดันเบรกดาวนของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวน สายเคเบิลที่ต้องการทดสอบจะถูกจ่ายแรงดันด้วย Exciter transformer จากศูนย์จนกระทั่งฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ด้วยอัตรา 1kV/s โดยแบ่งเป็น 4 กรณีศึกษา และบันทึกผลการทดสอบ จากการทดสอบทั้ง 4 ดังนี้

- 1) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปกติ (ไม่มีการปนเปื้อน)
- 2) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 3) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 4) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 5) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน
- 6) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

3.3 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

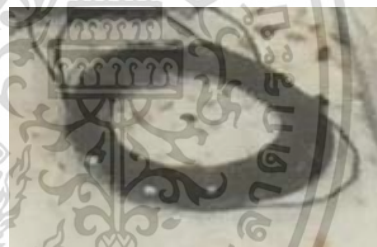
3.3.1 การเตรียมสายเคเบิล

ในการทดสอบนี้ จะใช้สายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 1.5 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร โดยจะต้องเตรียมสายเคเบิลดังนี้

- 1) สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน)
- 2) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที
- 3) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 60 นาที
- 4) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 60 นาที



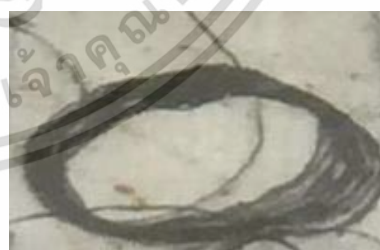
(ก) สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน)



(ข) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C



(ค) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C



(ง) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C

รูปที่ 3.8 โมเดลสายเคเบิลกรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกเนื่องจากผลของความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

โมเดลสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิต่างๆ จะถูกวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการทดสอบ วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.1

3.3.3 วิธีการทดสอบ

ก่อนเริ่มการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก สายเคเบิลที่ต้องการทดสอบจะต้องถูกลดลงกราวด์เพื่อคายประจุที่ค้างค้างในสายเคเบิล เพราะอาจส่งผลกระทบต่อระดับกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน จากนั้นในส่วนของกระแสโพลาริเซชันจะวัดได้ในระหว่างที่จ่ายแรงดัน 220 V_{DC} ให้กับสายเคเบิลที่ต้องการทดสอบเป็นเวลา 2,000 วินาที กระแสดีโพลาริเซชันจะวัดในระหว่างที่ทำการคายประจุเป็นเวลา 2,000 วินาที

จากวงจรที่ใช้ในการทดสอบ กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันจะถูกวัดโดย PDC Analyzer โดยในระหว่างการทดสอบ สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส โดยจะบันทึกผลการทดสอบ จากการทดสอบทั้ง 4 ดังนี้

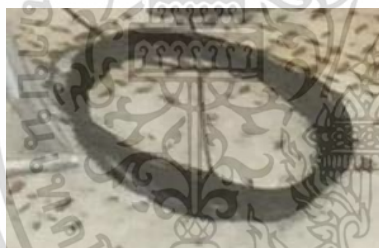
- 1) การทดสอบวัดกระแสวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ไม่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน
- 2) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C
- 3) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C
- 4) การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C

3.4 การทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

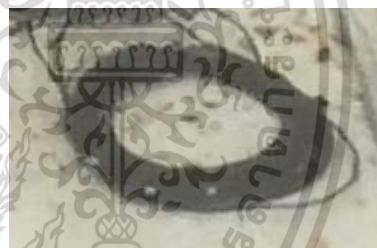
3.4.1 สายเคเบิลที่ต้องการทดสอบ

สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนนี้ จะใช้สายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 1.5 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร จำนวนทั้งหมด 4 สาย ดังรูปที่ 3.10

- 1) สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน)
- 2) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที
- 3) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 60 นาที
- 4) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 60 นาที



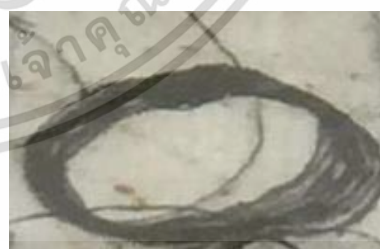
(ก) สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน)



(ข) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C



(ค) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C



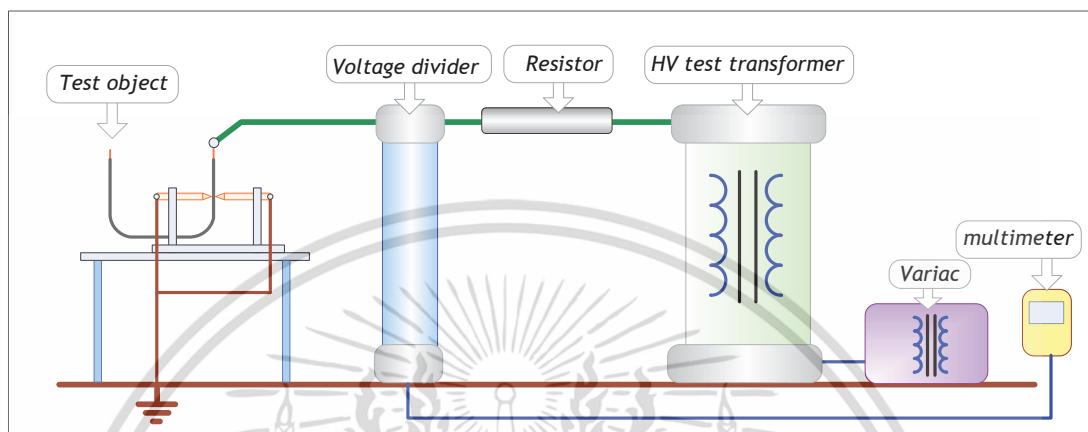
(ง) สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C

รูปที่ 3.9 โมเดลสายเคเบิลกรณีการทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบจะดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงด้วยมาตรฐาน IEC 60270 เช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้วงจรทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ ไตอะแกรมของวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 ไตอะแกรมวงจรทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

3.4.3 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวน สายเคเบิลที่ต้องการทดสอบจะถูกจ่ายแรงดันด้วยหม้อแปลงทดสอบ จากศูนย์จนกระทั่งฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ด้วยอัตรา 1kV/s โดยแบ่งเป็น 4 กรณีศึกษาดังนี้

- 1) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่ไม่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน
- 2) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C
- 3) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140°C
- 4) การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัด 0.6/1 kV ที่มีความบกพร่องในรูปแบบต่างๆ ที่จำลอง เพื่อแสดงคุณสมบัติของฉนวนที่ได้จำลองในงานวิจัยนี้ โดยจากบทที่ 3 แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 การทดสอบหลักดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปการทดสอบในกรณีศึกษาต่างๆ

กรณีศึกษา	สายเคเบิลปกติ	สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน					สายเคเบิลปกติ	สายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)		
		ปนเปื้อนชั้นส่วนของกระดาษ	ปนเปื้อนชั้นส่วนของพลาสติก	ปนเปื้อนจารบี	ปนเปื้อนชั้นส่วนของทองแดง	สายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร		90	140	250
PDC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Breakdown	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

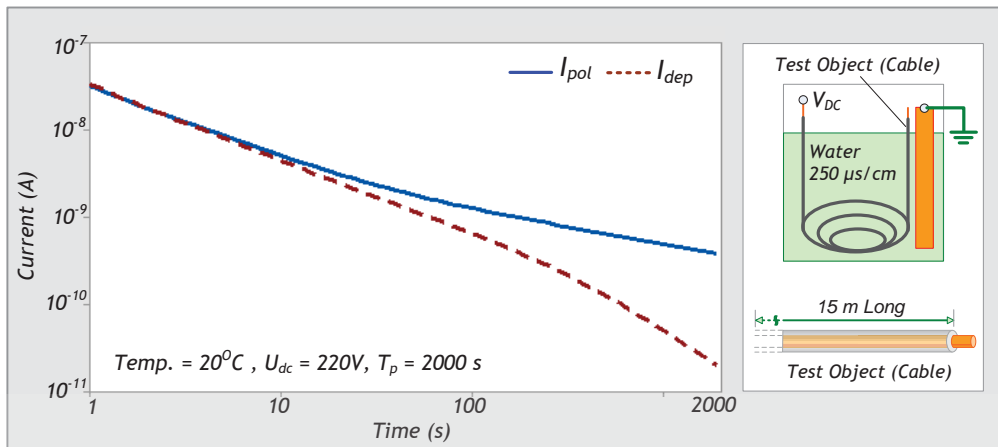
4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

ในการทดสอบข้อที่ 4.1 ได้ทำการทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กตริก โดยวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัด 0.6/1kV ที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้แรงดันกระแสตรงรูปขั้น 220 V_{DC} สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส

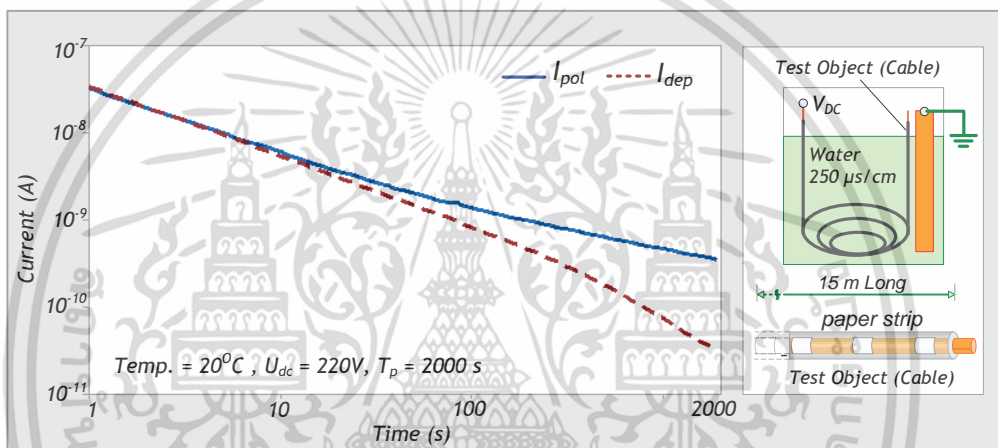
ผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ดังรูปที่ 4.1-4.6 ผลการคำนวณแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ดังรูปที่ 4.7-4.12

จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ โดยผลของกระแสโพลาริเซชัน รูปที่ 4.13 จะใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา

และผลของกระแสดีโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 4.15 จะใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนความถี่

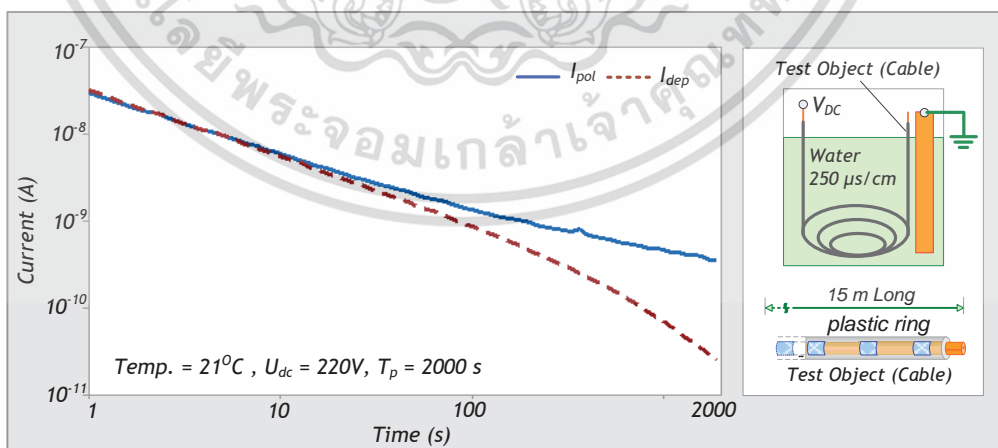


รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล

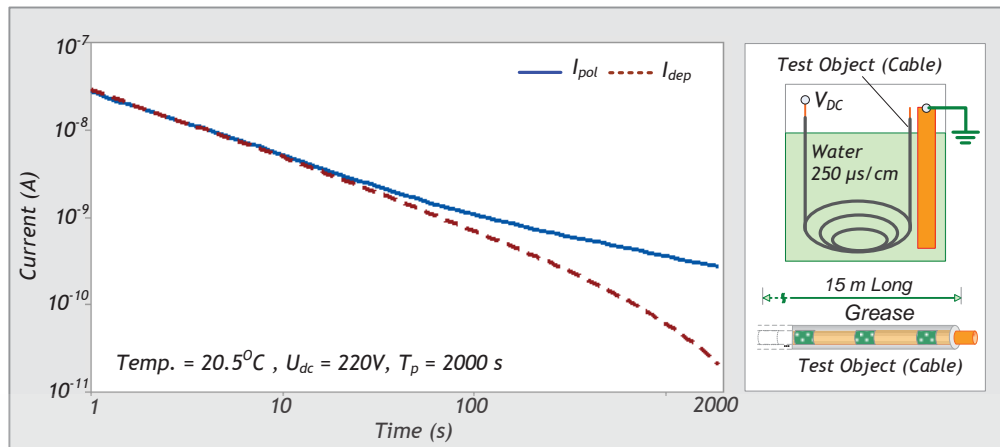
ที่พันเป็นชั้นด้วยชิ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน



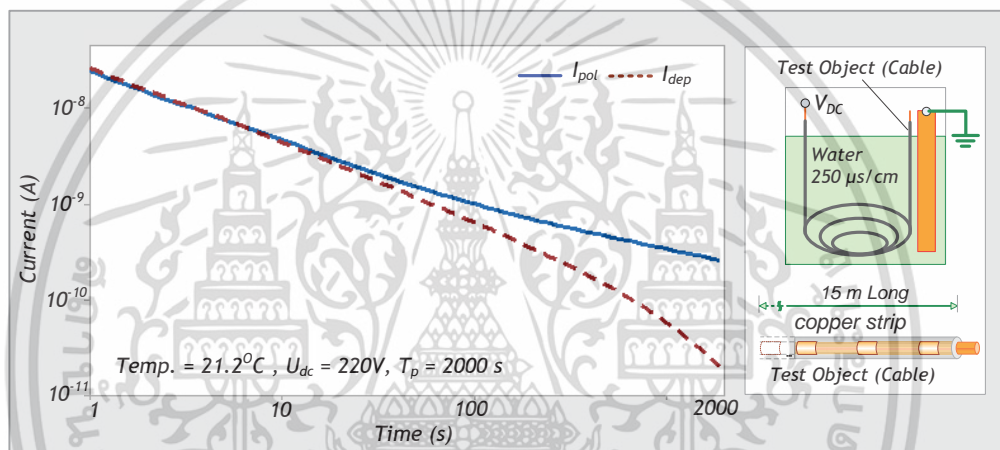
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล

ที่พันเป็นชั้นด้วยส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

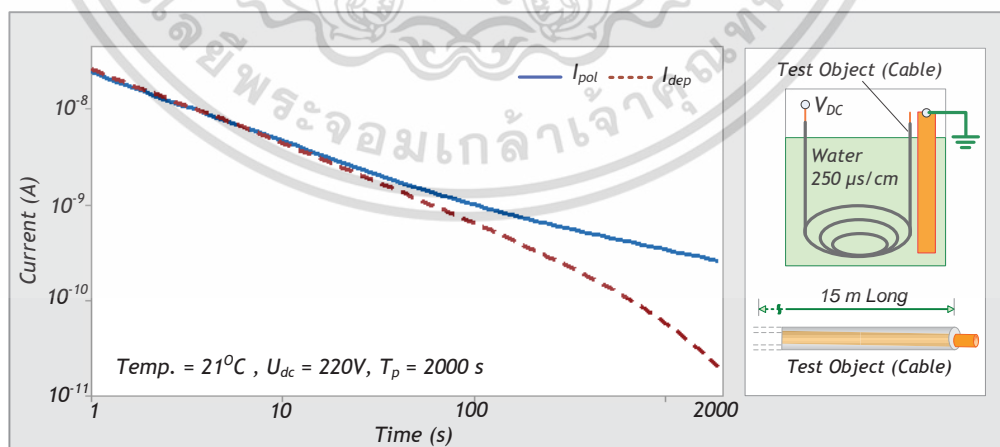
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

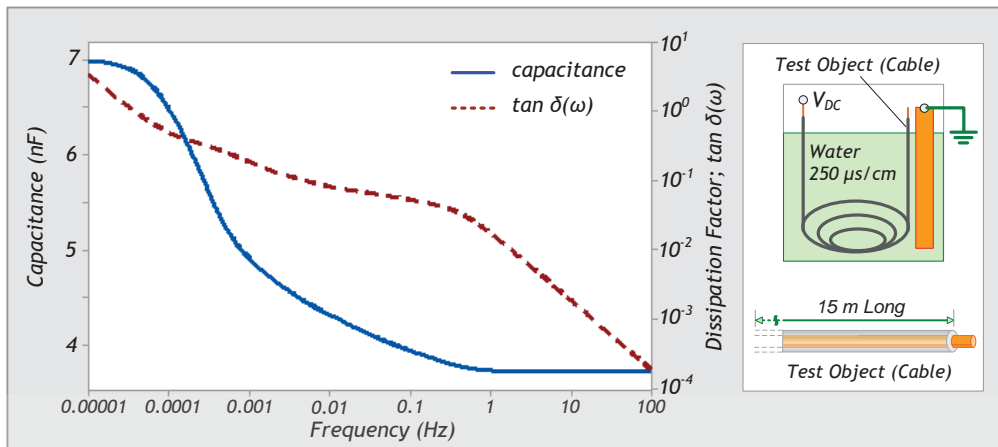


รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของสายเคเบิล
ที่ปนเปื้อนขึ้นด้วยส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

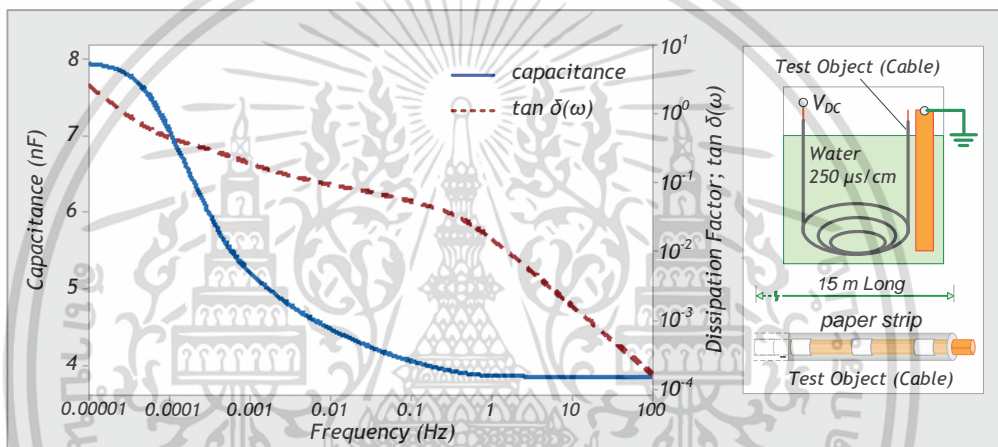


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของสายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

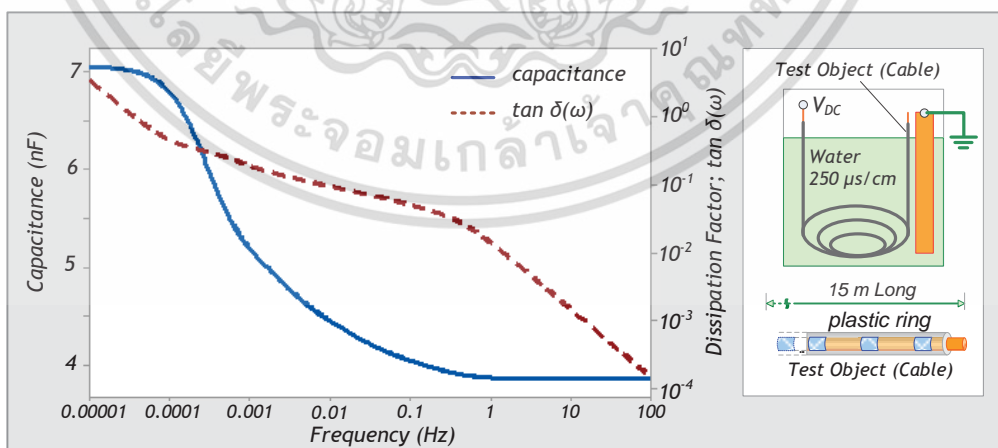
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ

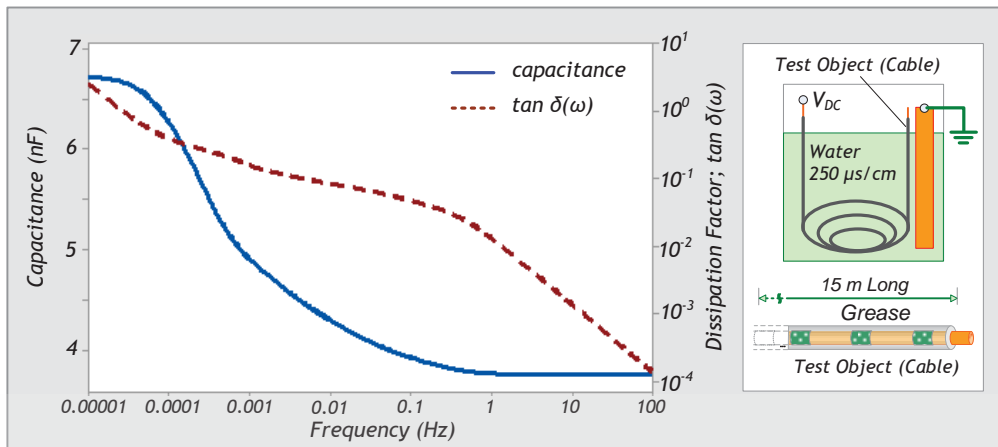


รูปที่ 4.8 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

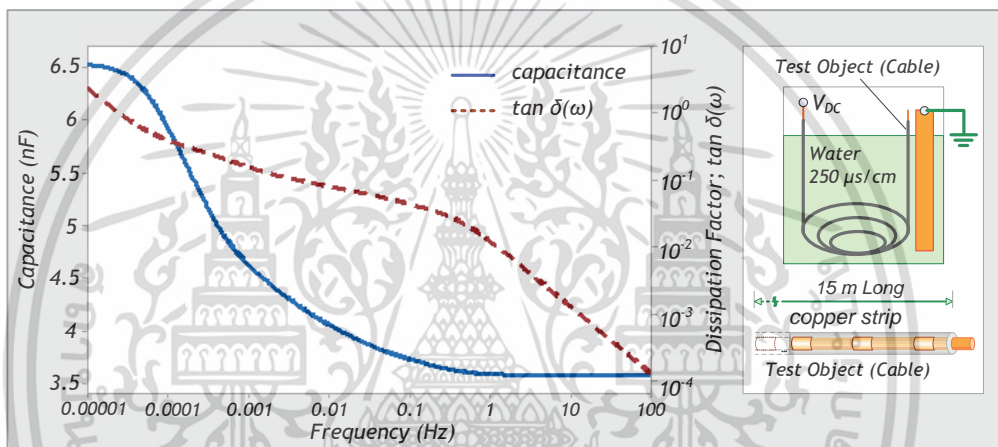


รูปที่ 4.9 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

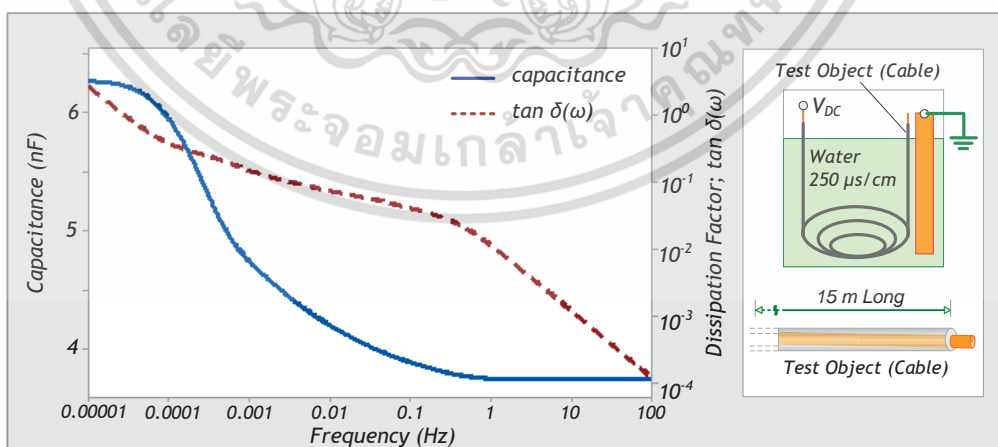
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน



รูปที่ 4.11 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

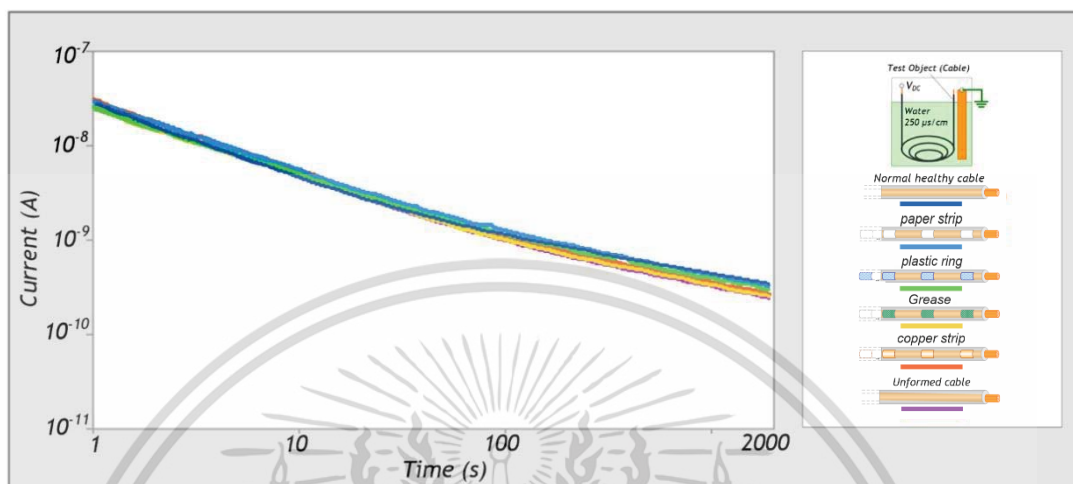


รูปที่ 4.12 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา

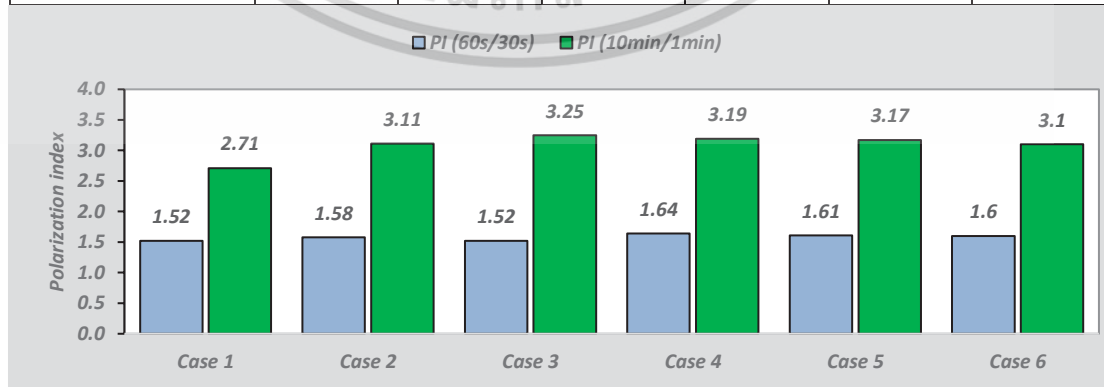
จากรูปที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของกระแสโพลาริเซชัน ทั้ง 6 กรณี จากวินาทีที่ 1 ถึง 2000 พบว่าผลการทดสอบมีความแตกต่างที่ไม่ชัดเจน จึงทำการหาค่าความต้านทานฉนวน และ Polarization Index (PI) ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.23 กระแสโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานฉนวน

เวลา (วินาที)	ค่าความต้านทานฉนวน ($G\Omega$)					
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5	กรณี 6
30	92.7	78.9	51.3	95.2	103	106
60	141	125	121	156	167	171
600	381	387	392	498	531	532
PI (60s/30s)	1.52	1.58	1.52	1.64	1.61	1.60
PI (10min/1min)	2.71	3.11	3.25	3.19	3.17	3.10



รูปที่ 4.14 PI ของสายเคเบิลปกติ

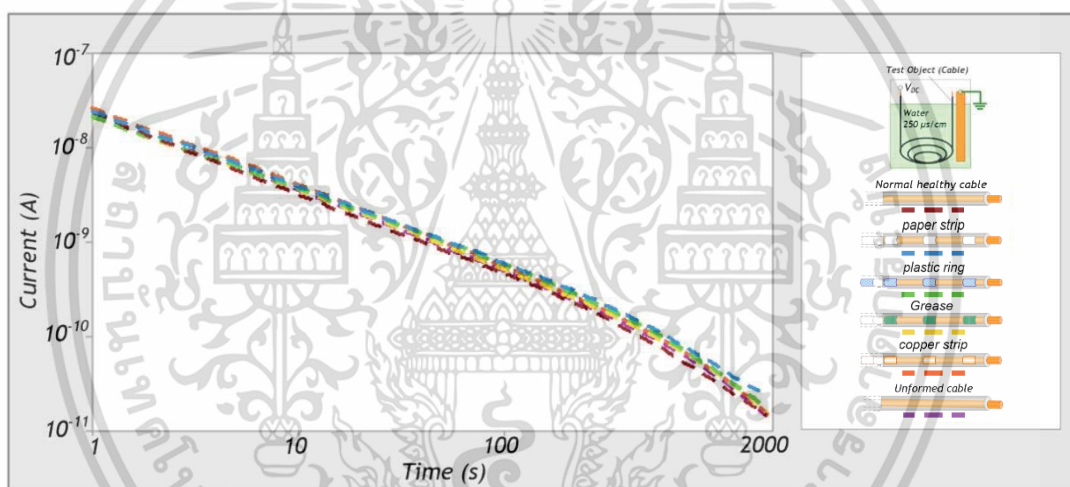
และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานที่เวลาเดียวกัน และทำการคำนวณหาค่า PI พบว่าค่าความต้านทาน และ ค่าPI มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า PI เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน พบว่าทั้ง ค่า PI (60s/30s) และ PI (10min/1min) ที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก ทั้งนี้เพราะ สายเคเบิลในทั้ง 6 กรณี ไม่ว่าจะเป็นสายเคเบิลปกติ หรือสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ไม่ใช่การปนเปื้อนภายในเนื้อของฉนวน จึงทำให้ฉนวนยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้ จึงไม่สามารถนำมาแยกแยะสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

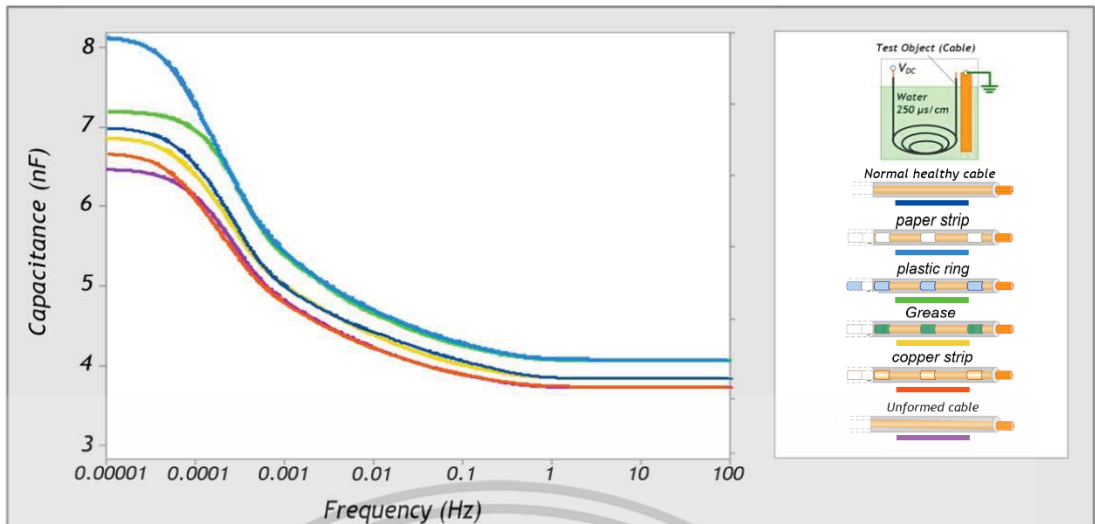
4.1.2 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของกระแสดีโพลาริเซชัน ทั้ง 6 กรณี จากวินาทีที่ 1 ถึง 2000 พบว่าผลมีความแตกต่างที่ไม่ชัดเจน จึงจะพิจารณาค่าความคาปาซิแตนซ์ และแพคเตอร์กำลังสูญเสียเพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.16 และ 4.18



รูปที่ 4.15 กระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่เดียวกัน และทำการหาค่าอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ พบว่าค่าคาปาซิแตนซ์ และอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ มีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆความถี่ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน พบว่าทั้ง ค่า C (0.001)/C(50) และ C (0.01)/C(50) ที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก ทั้งนี้เพราะสายเคเบิลในทั้ง 6 กรณี ไม่ว่าจะเป็นสายเคเบิลปกติ หรือสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ไม่ใช่การปนเปื้อนภายในเนื้อของฉนวน จึงทำให้ฉนวนยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้ จึงไม่สามารถนำมาแยกแยะสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวนได้

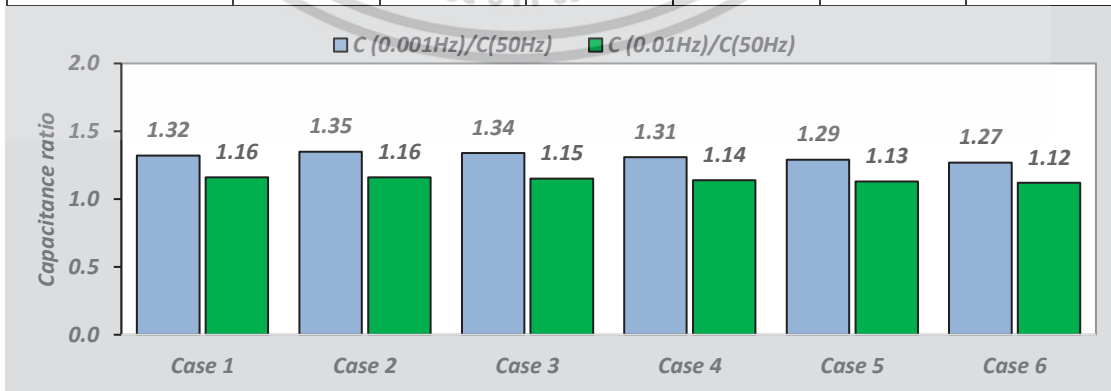


รูปที่ 4.16 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ

และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

ตารางที่ 4.3 ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวน

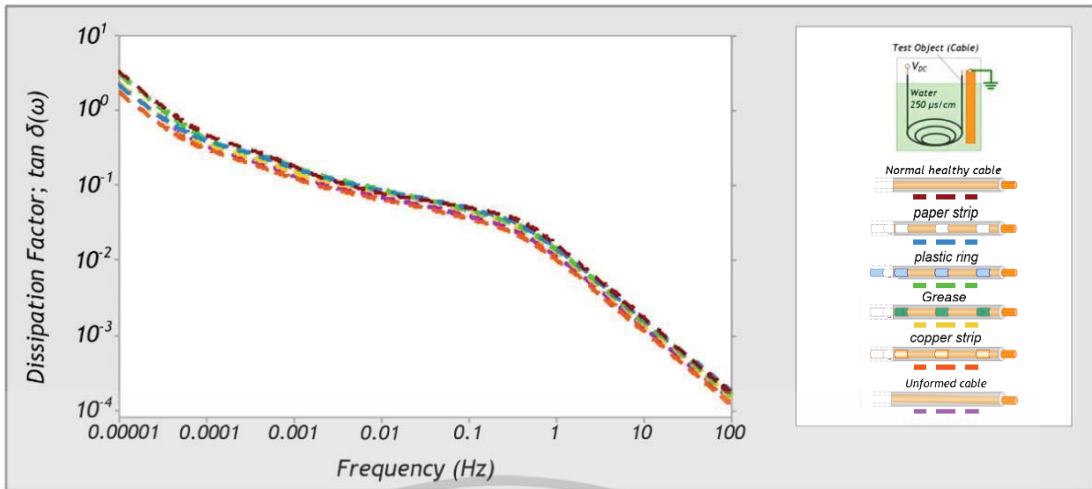
ความถี่ (Hz)	ค่าคาปาซิแตนซ์ (pF)					
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5	กรณี 6
0.001	4.91	5.22	5.19	4.9	4.36	4.74
0.01	4.32	4.48	4.45	4.29	4.06	4.2
0.1	3.94	4.05	4.04	3.92	3.73	3.88
1	3.73	3.86	3.87	3.76	3.59	3.74
50	3.72	3.85	3.86	3.75	3.58	3.74
C (0.001) /C(50)	1.32	1.35	1.34	1.31	1.29	1.27
C (0.01) /C(50)	1.16	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12



รูปที่ 4.17 อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ

และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

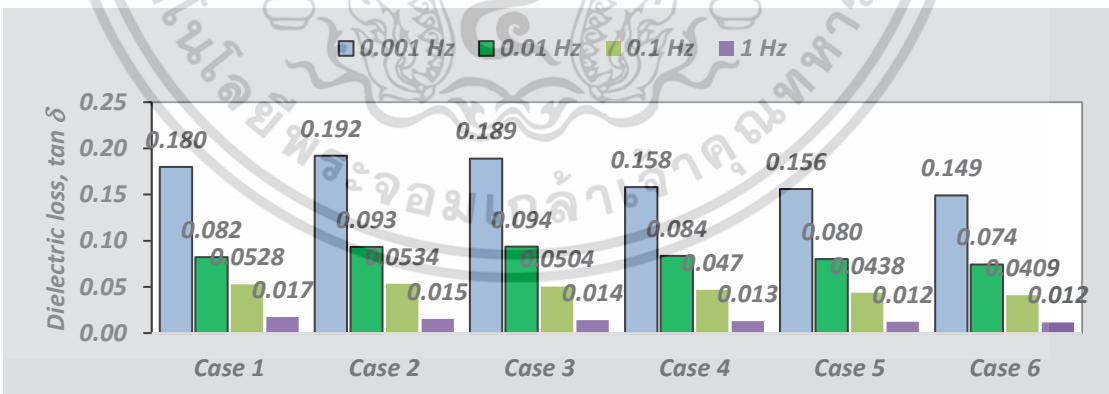
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

ตารางที่ 4.4 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

ความถี่ (Hz)	แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก, $\tan \delta$					
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5	กรณี 6
0.001	0.18	0.192	0.189	0.158	0.156	0.149
0.01	0.0821	0.0934	0.0935	0.0837	0.0802	0.0743
0.1	0.0528	0.0534	0.0504	0.047	0.0438	0.0409
1	0.0173	0.0154	0.0141	0.0131	0.0122	0.0116



รูปที่ 4.19 คาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่เดียวกัน พบว่า ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆความถี่ แม้ว่าที่ความถี่ 0.001 Hz จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างกันอยู่บ้าง แต่ถึงกระนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าแฟลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน ก็ยังพบว่า ยังอยู่ในเกณฑ์ดี ทั้งนี้เพราะ สายเคเบิลในทั้ง 6 กรณี ไม่ว่าจะเป็สายเคเบิลปกติ หรือสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ไม่ใช่การปนเปื้อนภายในเนื้อของฉนวน จึงทำให้ฉนวนยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้ จึงไม่สามารถนำมาแยกแยะสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวนได้

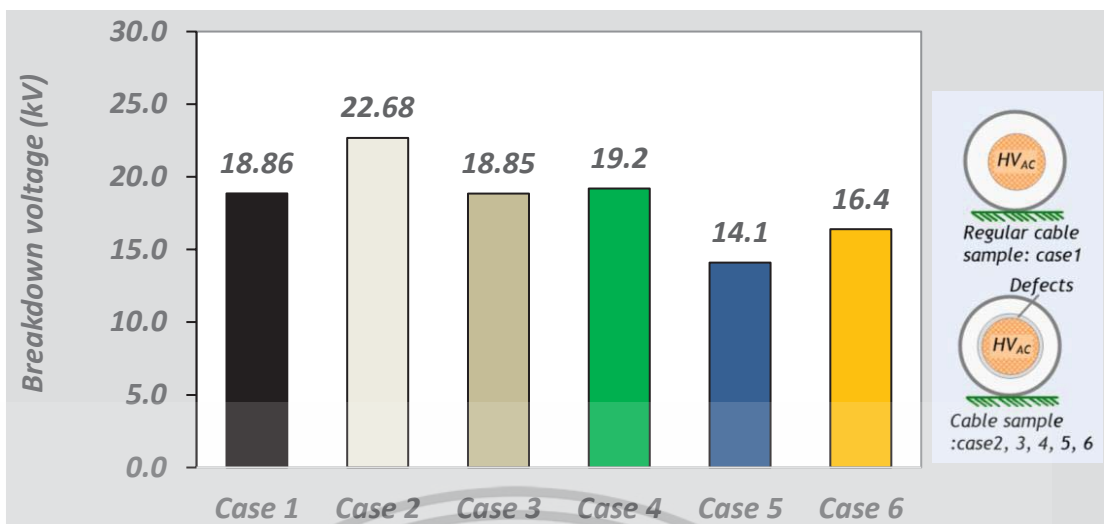
4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้แรงดันกระแสสลับ โดยป้อนแรงดันด้วยอัตรา 1kV ต่อ วินาที สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

กรณีศึกษา	แรงดันเบรกดาว์น (kV)
1. สายเคเบิลปกติ (ไม่มีการปนเปื้อน)	18.56
4. สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของกระดาษแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน	22.68
3. สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของพลาสติกแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน	18.85
4. สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยจารบีแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน	19.2
2. สายเคเบิลที่ปนเปื้อนด้วยชิ้นส่วนของทองแดงแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน	14.1
2. สายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร	16.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน

จากการผลการทดสอบพบว่า เมื่อเราใช้ V_{BD} ของฉนวนสายเคเบิลปกติที่ 18.86kV เป็นค่าอ้างอิงพบว่า ฉนวนสายเคเบิลกรณีที่ 2 มีค่า V_{BD} สูงกว่า เนื่องจากได้มีการเพิ่มฉนวน (กระดาษ) เข้าไประหว่างตัวนำกับฉนวน จึงทำให้ V_{BD} เพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่ 3, 4 พบว่าค่า V_{BD} มีค่าใกล้เคียงกับสายเคเบิลปกติที่สุด เนื่องจากพลาสติกและจารบีที่ใช้มีคุณลักษณะเป็นฉนวน แต่เมื่อผ่านกระบวนการหุ้มสายไป เกิดการละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันของฉนวน XLPE จึงไม่ส่งผลใดๆกับค่าความเป็นฉนวน สำหรับกรณีที่ 5 พบว่าค่า V_{BD} ที่ได้จากการทดสอบ มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ 1 เนื่องจากเทพทองแดงมีขอบคมเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่ขอบคมของแผ่นทองแดง จึงทำให้มี V_{BD} ต่ำกว่าในกรณีที่ 1 ส่วนกรณีสุดท้าย กรณีที่ 6 พบว่าในสายเคเบิลที่มีรูปร่างไม่สมมาตร แรงดันเบรกดาวน์จะลดลงจากกรณีที่ 1 และจะเกิดการเบรกดาวน์ในส่วนของฉนวนที่บางก่อน เนื่องจากในส่วนของฉนวนที่มีความบางจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าส่วนของฉนวนที่หนากว่า

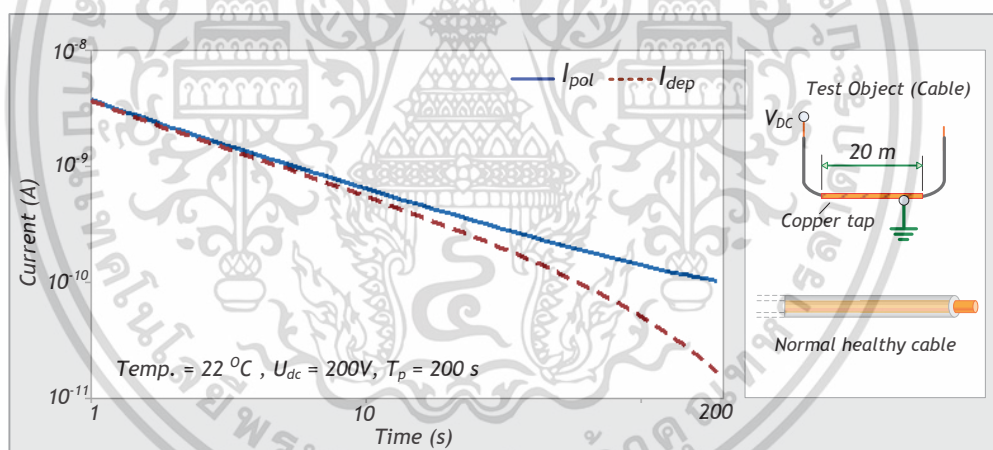
4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกโดยการวัดกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้แรงดันกระแสตรงรูปคลื่น 220 V_{DC} สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส

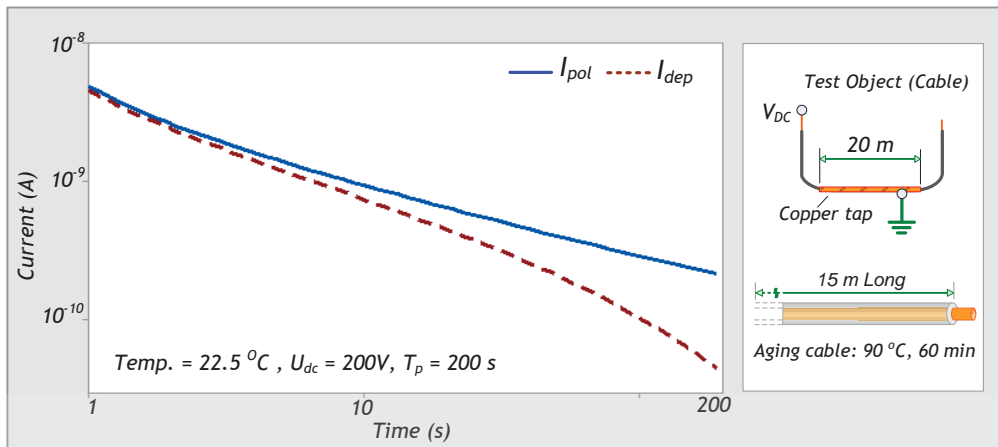
โดยได้ผลการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.21-4.24 ผลการคำนวณแพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.25-4.28

จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ โดยผลของกระแสโพลาริเซชัน รูปที่ 4.29 จะใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนเวลา

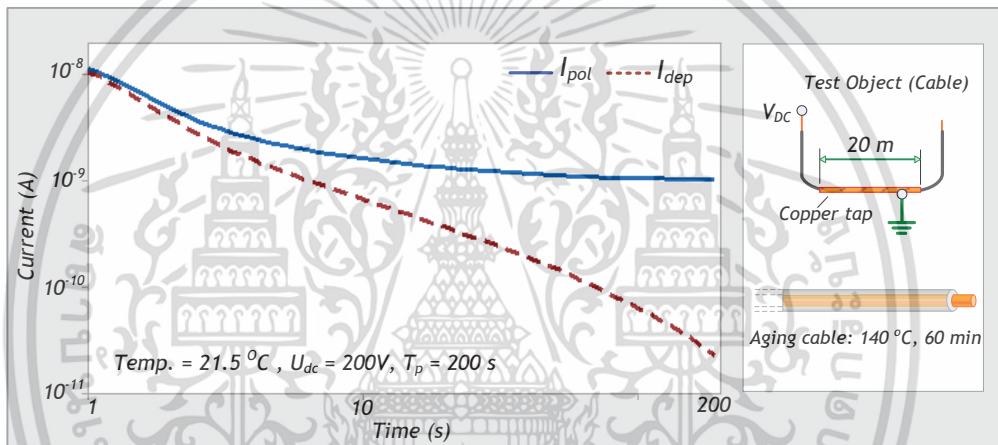
โดยผลของกระแสดีโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 4.31 จะใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ผลการทดสอบในโดเมนความถี่



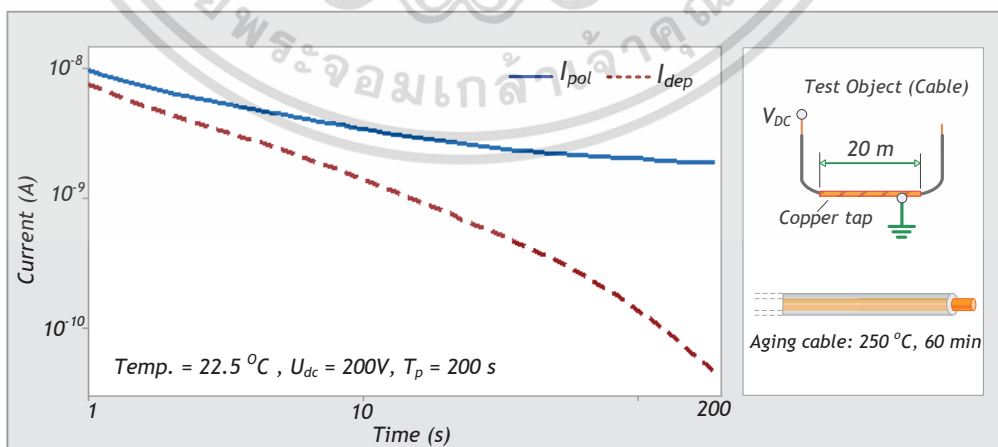
รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ



รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 60 นาที

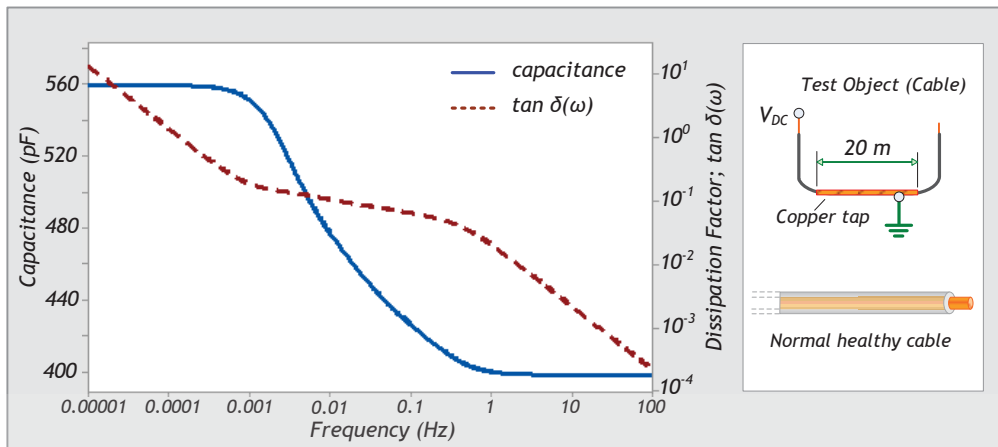


รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 60 นาที

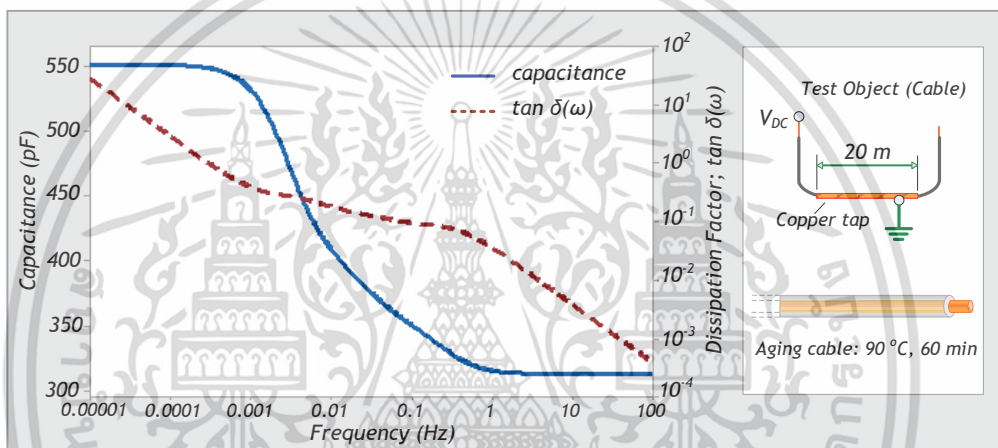


รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 60 นาที

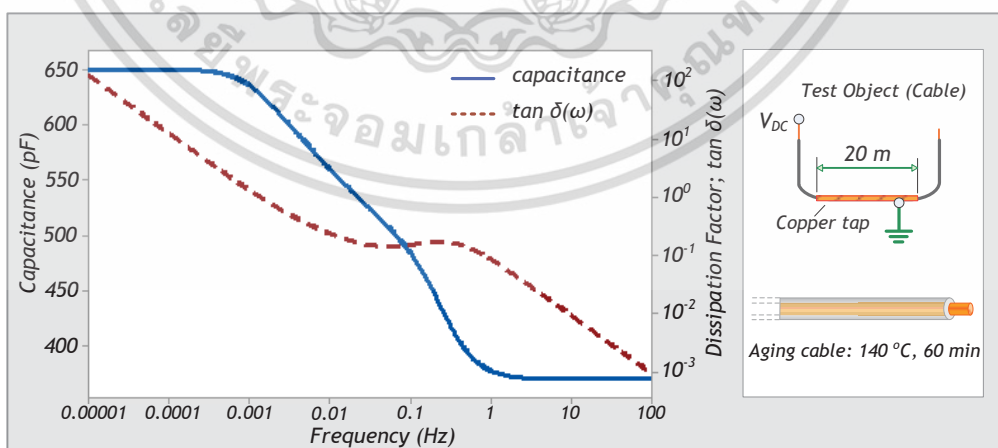
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ

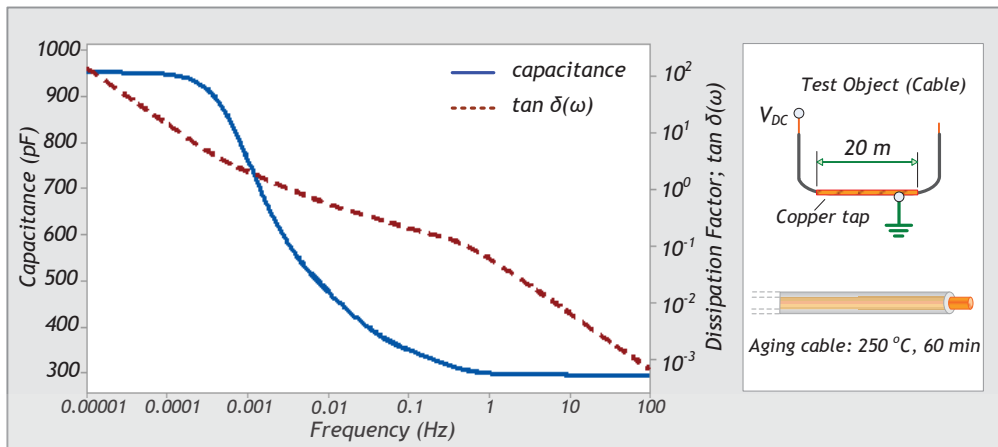


รูปที่ 4.26 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 90°C



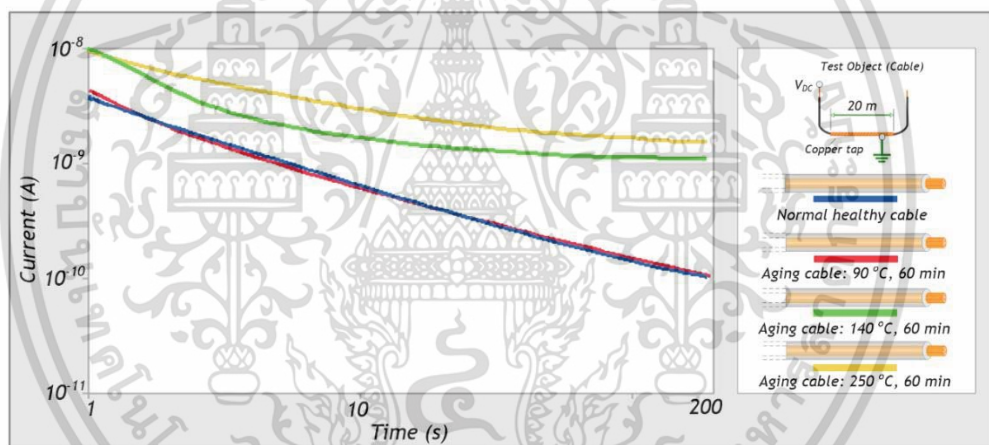
รูปที่ 4.27 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 140°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 250°C

4.3.1 การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา



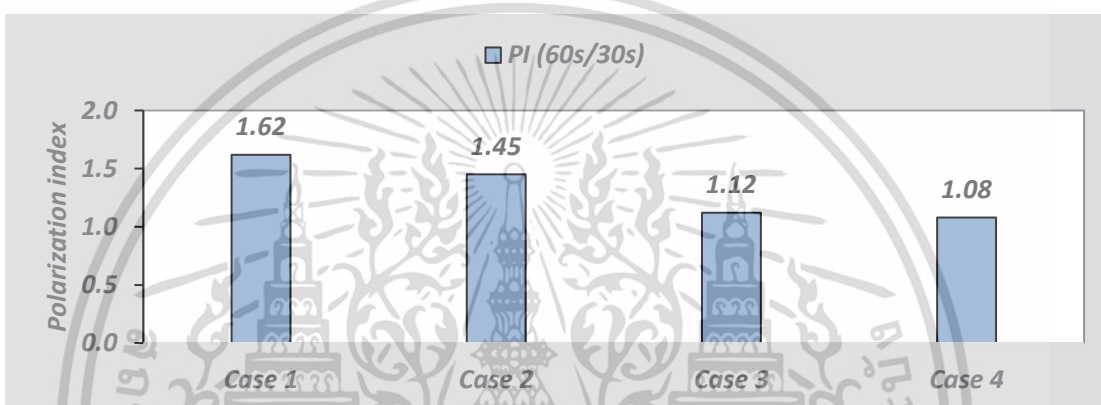
รูปที่ 4.29 กระแสโพลาริเซชันของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.29 แสดงผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของกระแสโพลาริเซชัน ทั้ง 6 กรณี จากวินาทีที่ 1 ถึง 2000 พบว่าผลมีความแตกต่างที่ไม่ชัดเจน จึงได้ทำการหาค่าความต้านทานฉนวน และ PI โดยการคำนวณจากผลที่ได้จากรูปที่ 4.29 ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานฉนวน

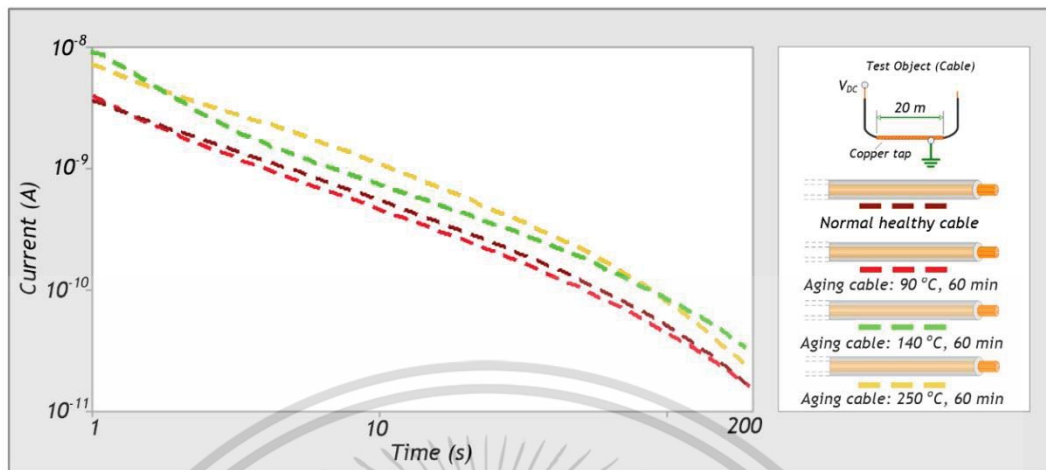
เวลา (วินาที)	ค่าความต้านทานฉนวน ($G\Omega$)			
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4
30	669	385	162	82.3
60	1080	560	181	941
600	1930	939	194	107
PI (60s/30s)	1.62	1.45	1.12	1.08
PI (10min/1min)	-	-	-	-



รูปที่ 4.30 PI ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานที่เวลาเดียวกัน และทำการหาค่า PI พบว่า ทั้งค่าความต้านทาน และ PI มีค่าแตกต่างกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า PI เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน พบว่าทั้ง ค่า PI (30s, 1min) ในกรณีที่ 1 อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก สำหรับสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่า PI มีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากฉนวนมีการเสื่อมสภาพ จึงทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่า PI มีค่าลดลง

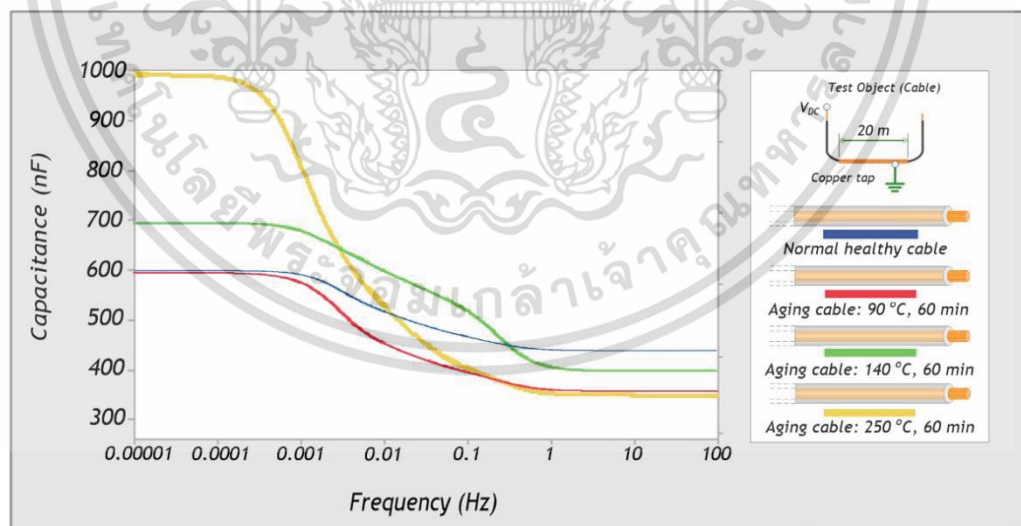
4.3.2 การวิเคราะห์ที่โนโตเมนความถี่



รูปที่ 4.31 กระแสดีโพลาร์ไรเซนชันของสายเคเบิลปกติ

และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนอุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.31 แสดงผลตอบสนองไดโพลาร์ไรเซนชันของกระแสดีโพลาร์ไรเซนชัน ทั้ง 6 กรณี จากวินาทีที่ 1 ถึง 2000 พบว่าผลมีความแตกต่างที่ไม่ชัดเจน จึงจะพิจารณาค่าความคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย



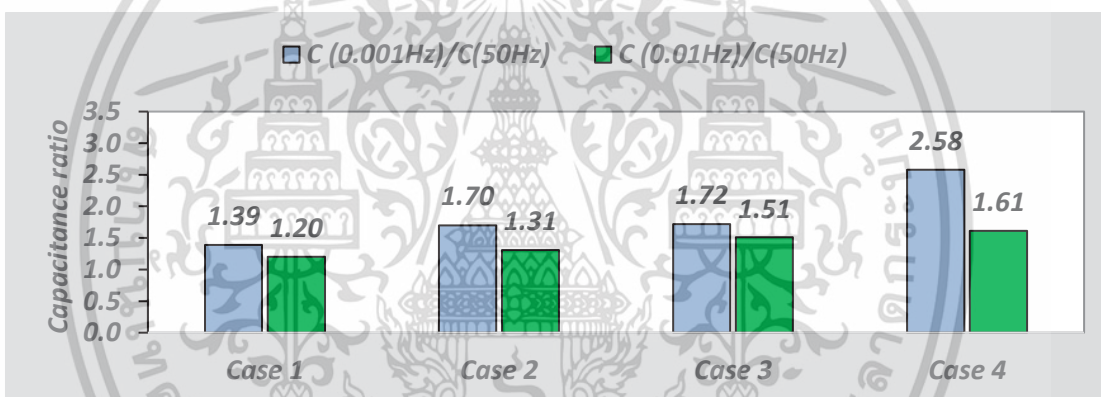
รูปที่ 4.32 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ

และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวน

ความถี่ (Hz)	ค่าคาปาซิแตนซ์ (pF)			
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4
0.001	551	531	635	761
0.01	477	409	560	475
0.1	426	351	484	349
1	400	316	378	298
50	398	313	370	295
C (0.001)/C(50)	1.39	1.7	1.72	2.58
C (0.01)/C(50)	1.2	1.31	1.51	1.61

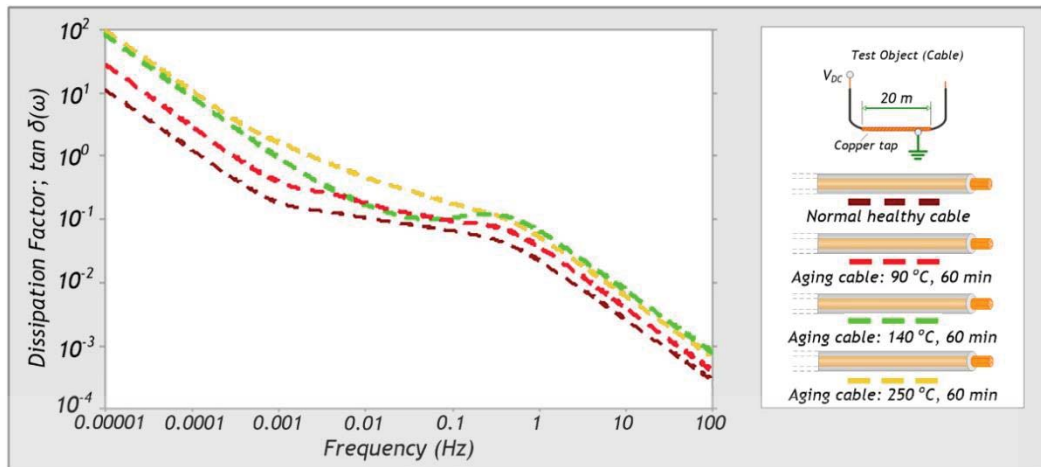


รูปที่ 4.33 คาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ

และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่เดียวกัน และทำการหาค่าอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ พบว่าค่าคาปาซิแตนซ์ และอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ มีค่าแตกต่างกันในทุกๆความถี่ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน พบว่าทั้ง ค่า C (0.001)/C(50) และ C (0.01)/C(50) ของกรณีที่ 1 ที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ แต่กรณีที่ 2,3 และ 4 พบว่าค่า C มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฉนวนมีการเสื่อมสภาพและแยกชั้นกันมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้แต่ละชั้นมีค่าเปอร์มิตติวิตีแตกต่างกัน ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันในฉนวนมากขึ้น กระแสจึงไหลผ่านฉนวนมากขึ้น ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้ จึงสามารถนำมาแยกแยะสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆได้

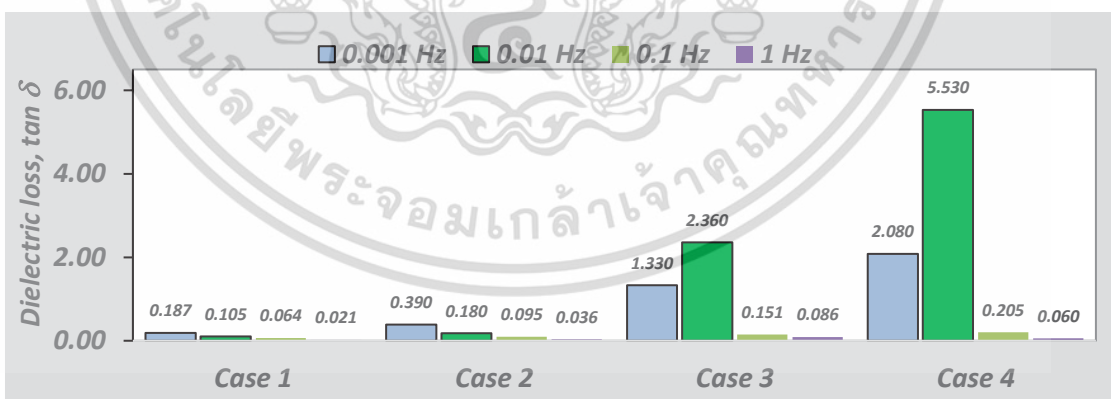
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.8 แพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

ความถี่ (Hz)	แพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก, $\tan \delta$			
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4
0.001	0.187	0.390	1.330	2.080
0.01	0.105	0.180	2.360	5.530
0.1	0.064	0.095	0.151	0.205
1	0.021	0.036	0.086	0.060



รูปที่ 4.35 คาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

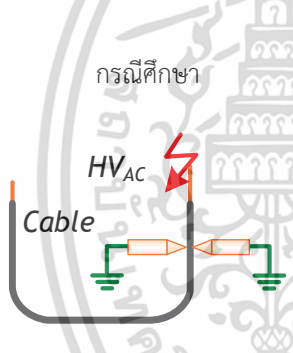
จากตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่าแพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่เดียวกัน พบว่า ค่าแพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่าแตกต่างกันในทุกๆความถี่ แม้ว่าที่ความถี่ 0.001 และ 0.01 Hz จะมีความแตกต่างกัน แต่ถึงกระนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าแพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตริก เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน ก็ยังพบว่า ในกรณีที่ 1 ค่ายังอยู่ในเกณฑ์ดี เนื่องจากฉนวนไม่มีการเสื่อมสภาพ จากวิธีการอบร้อนฉนวน แต่กรณีที่ 2,3 และ 4 มีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น เพราะฉนวนมีการเสื่อมสภาพมากขึ้น ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงสามารถนำมาแยกแยะสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆได้

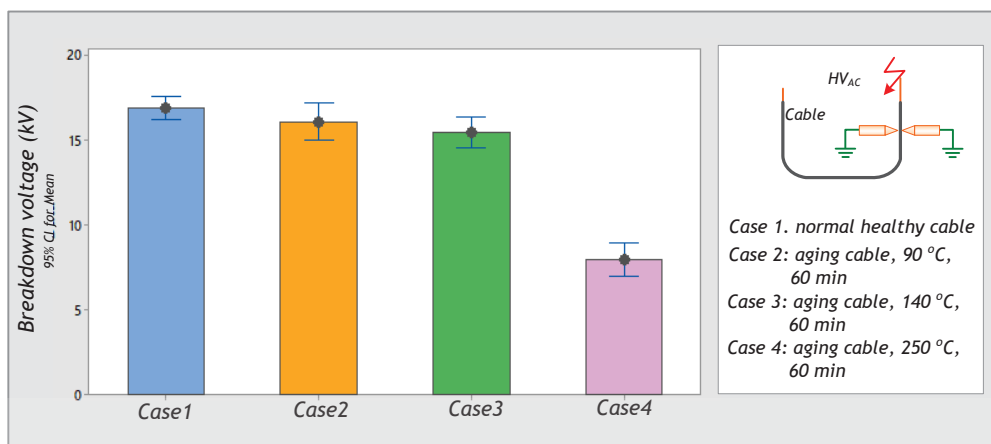
4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้แรงดันกระแสสลับ โดยป้อนแรงดันด้วยอัตรา 1kV ต่อวินาที สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิล

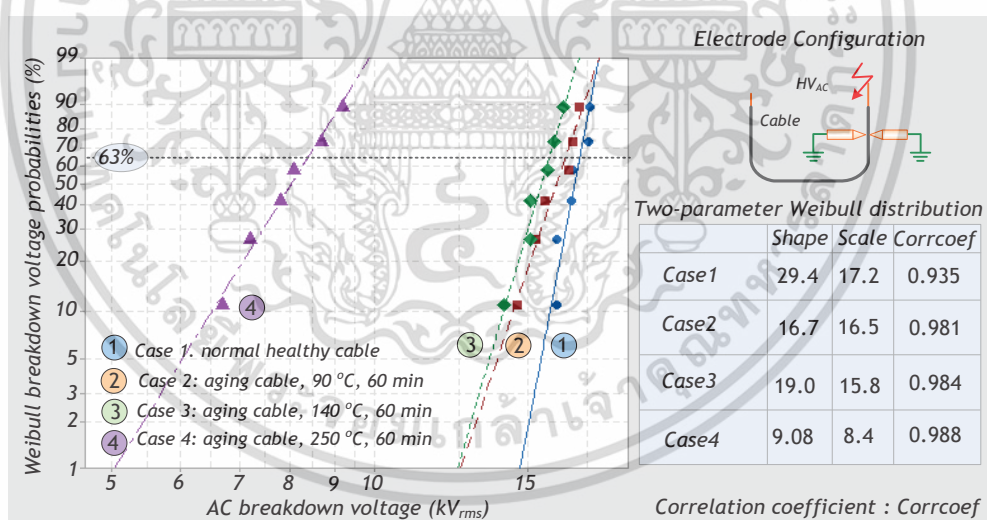
กรณีศึกษา	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)						ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	% Relative standard deviation	% Reduction
	1	2	3	4	5	6				
										
1. สายเคเบิลปกติ	16.20	17.70	16.90	16.80	17.60	16.20	16.90	0.65	1.25	-
2. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 90 °C, 60 นาที	14.60	15.30	16.70	15.70	17.20	16.90	16.07	1.03	2.0	1.6
3. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 140 °C, 60 นาที	15.10	14.10	16.10	16.50	15.80	15.10	15.45	0.86	1.71	2.7
4. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิ 250 °C, 60 นาที	7.20	6.70	9.20	8.10	8.70	7.80	7.95	0.93	2.16	17.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟความน่าจะเป็นของแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยของฉนวนสายเคเบิลปกติที่ 16.9 kV เป็นค่าอ้างอิงพบว่า ฉนวนสายเคเบิลกรณีที่ 2,3 และ 4 มีค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยต่ำกว่า เนื่องจากฉนวนมีการเสื่อมสภาพมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ จึงทำให้ ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยลดต่ำลง

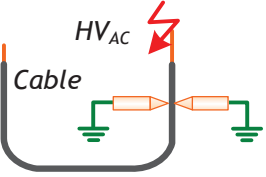


รูปที่ 4.37 กราฟความน่าจะเป็นของแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลปกติ และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการทดสอบด้วยการแจกแจงแบบไวบูลย์ในการหาความน่าจะเป็นในการเบรกดาวน์พบว่า สายเคเบิลปกติและที่ถูกรอบด้วยความร้อน 90 140 250 องศา มีค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยที่ 63 เปอร์เซ็นต์ 16.9, 16, 15.45, 7.9 kV ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์และแรงดันเบรกดาวน์ 63% ของสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ

กรณีสึกษา 	AC withstand voltage $F(x) = 1\%$ (kV)	% Reduction	63% AC breakdown voltage $F(x) = 63\%$ (kV)	% Reduction
1. สายเคเบิลปกติ	14.6	-	17.2	-
2. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 90 °C, 60 นาที	12.3	4.6	16.5	1.4
3. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 140 °C, 60 นาที	12.2	4.8	15.8	2.8
4. สายเคเบิลที่เสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีอบร้อนฉนวน ที่อุณหภูมิ 250 °C, 60 นาที	4.5	20.3	8.4	17.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV ที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และการเสื่อมสภาพจากความร้อน โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบสายเคเบิลปกติและสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ด้วยวิธีการPDC เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริก และหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการประเมินคุณภาพของฉนวนควบคู่กับการหาค่าแรงดันเบรกดาว์นผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ในกรณีที่ฉนวนมีการเปลี่ยนสภาพ: การวัดผลการตอบสนองไดอิเล็กตริก ด้วยการใช้วิธี PDC สามารถใช้เป็นหนึ่งในวิธีการทดสอบ โดยใช้เป็นวิธีที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายของกระบวนการทดสอบสายเคเบิลในกระบวนการอุตสาหกรรม

2. ในกรณีที่ฉนวนมีการเปลี่ยนสภาพหรือเสื่อมสภาพ: พารามิเตอร์ต่างๆ จากการศึกษาทฤษฎีของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในฉนวนของสายเคเบิล อาทิ ดัชนีการโพลาริเซชัน อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก สามารถใช้วิเคราะห์ช่วยทำให้เพิ่มความเข้าใจและประเมินสภาพฉนวนสายเคเบิลได้

3. จากการศึกษาระดับสภาพฉนวนสายเคเบิลปกติ, สายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เทคนิค PDC และการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์น สามารถสรุปได้ดังนี้

3.1 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ทั้ง 5 กรณี เมื่อเทียบจากสายเคเบิลปกติแล้ว พบว่า ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนนัก แต่ในทางกลับกัน การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถเห็นผลแตกต่างกันชัดเจน โดยพบว่า Polarization Index (PI) จะแปรผกผันกับการเสื่อมสภาพในฉนวน ($T (^{\circ}C)$ ที่มากขึ้น) ส่วนอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก จะแปรผันตรงกับการเสื่อมสภาพในฉนวน ($T (^{\circ}C)$ ที่มากขึ้น)

3.2 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 0.6/1kV จากผลการศึกษาระดับความคงทนของฉนวนสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรกระหว่างตัวนำกับฉนวน ทั้ง 5 กรณี และสายเคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีผลต่อแรงดันเบรคดาว์อย่างชัดเจน กล่าวคือสายเคเบิลที่มีการปนเปื้อนแทรก
ระหว่างตัวนำกับฉนวน มีค่าแรงดันเบรคดาว์ลดลงเมื่อเทียบกับสายเคเบิลปกติ และในกรณีสาย
เคเบิลที่มีการเสื่อมสภาพจากความร้อน ด้วยวิธีการอบร้อนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ ยังพบว่าค่าแรงดัน
เบรคดาว์ลดลงตามความเสื่อมสภาพของฉนวนเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ค่าแรงดันเบรคดาว์ด้วยวิธีแจกแจงแบบไวบูลล์ ช่วยให้สะดวกใน
การประเมินค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาว์ที่ 63% และสามารถใช้ประเมินหาค่าความน่าจะเป็น
ของการเบรคดาว์ฉนวนได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Peschke and R. Von Olshausen, *Cable Systems for High and Extra-High Voltage*. MCD-Verl., 1999. pp. 19-35.
- [2] Harry Ernest Orton and Rick A. Hartlein, *Long-life XLPE-insulated Power Cables*. publisher not identified, 2006, pp. 169–197.
- [3] Farouk A.M. Rizk and Giao N. Trinh, *High Voltage Engineering*. CRC Press, April 4, 2014, pp. 531–535.
- [4] K. Uchida, S. Kobayashi, T. Kawashima, H. Tanaka, S. Sakuma, K. Hirotsu, and H. Inoue, “Study on Detection for The Defects of XLPE Cable Lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 663-668, April 1996.
- [5] Y. Tian, P.L. Lewin, A.E. Davies, S.G. Swingler, S. J. Sutton, and G.M. Hathaway, “Comparison of On-Line Partial Discharge Detection Methods for HV Cable Joints,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol. 9, no. 4, pp. 604-615, Aug. 2002.
- [6] Cigre´ 279, *Maintenance for HV Cables and Accessories*. Working Group B1.04, August 2005
- [7] Walter S. Zaengl, “Application of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV power Equipment,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no.6, pp. 9-22, Nov/Dec 2003.
- [8] Walter S. Zaengl, “Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV power Equipment, Part 1: Theoretical Considerations,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no.5, pp. 5-19, Sept/Oct 2003.
- [9] T. Tran, O. Gallot-Lavallée, P. Rain, and G. Tripot, “The Use of Dielectric Spectroscopy for Detection of Insulation Defects in End Turns of Medium Voltage Motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 905-911, Dec. 2012.
- [10] E. Obame, P. Rain, O.Gallot-Lavallée, and G. Tripot, “Detection of Artificial Insulation Defects in a Medium-Voltage Motor by Dielectric Spectroscopy Analysis,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 270-276, June 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Supatra A. Bhumiwat, “On-site non-destructive dielectric response diagnosis of rotating machines,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 5, pp. 1453–1460, Oct. 2010.
- [12] S. Birlasekaran and Y. Xingzhou, “Relaxation studies on power equipment,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, no. 6, pp. 1061-1077, Dec. 2003.
- [13] Bolarin Oyegoke, Petri Hyvönen, and Martti Aro, “Dielectric Response Measurement as Diagnostic Tool for Power Cable Systems,” in *Report TKK-SJT-47. Helsinki University of Technology*, 2001, pp 1-24.
- [14] P. Werelius, P. Tharning, R. Eriksson, B. Holmgren, and U. Gafvert, “Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 8, no. 1, pp. 27–42, Mar 2001.
- [15] Andrew J. Thomas and Tapan K. Saha, “A new dielectric response model for water tree degraded XLPE insulation - part b: dielectric response interpretation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 4, pp. 1144–1152, August 2008.
- [16] W. Wang, C. Yue, J. Gu, J. Du, F. Li, and K. Yang, “Status Assessment of Polymeric Materials in Mineral Oil under Electro-thermal Aging by Frequency – domain Dielectric Spectroscopy,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 831-841, April 2015.
- [17] S. Bhumiwat, “Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables,” in *CIGRE*, 2010, D1-216.
- [18] Gang Ye, Hua Li, Fuchang Lin, Jin Tong, Xiaogang Wu, and Zeqi Huang, “Condition assessment of XLPE insulated cables based on polarization/depolarization current method,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 721-729, Apr. 2016.
- [19] B. Oyegoke, D. Birtwhistle, and J. Lyall, “Condition assessment of XLPE cable insulation using short-time polarisation and depolarisation current measurements,” *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 25-31, Jan. 2008.
- [20] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000.

- [21] Andreas Küchler, *High Voltage Engineering: Fundamentals – Technology – Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [22] Andrzej Ka Jonscher, *Dielectric relaxation in solids*. Chelsea Dielectrics Press, 1983.
- [23] Kwan Chi Kao, *Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes*. Elsevier Academic Press, 2004.
- [24] *Underground Cable Accessories catalog*, Elastimold, Thomas & Betts Corporation, 2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTENTS

Keynote Speaker **xviii***Room: Ballroom 1+2 9 March 2017 10:40-12:00*

KS02 Social CPS Research for Smart and Connected Communities

Session: Special Session **1***Room: Ballroom 1+2 9 March 2017 08:00-10:00*

SS1001 Single-Phase Grid-Connected Voltage Source Converter for LCL Filter with Grid-Current Feedback

SS1002 Discontinuous Gate-Drive Signals for a Three-Phase Three-Switch Unidirectional Delta-Type Rectifier Based on 2L-SVM Analysis of a Vienna Rectifier

SS1004 Approximate 2-Degree-of-Freedom Digital Control of an Interleaved Low Voltage DC-DC Buck Converter

SS1005 Robust Digital Control of a Class-D Amplifier with Low Switching Frequency for Vibration Generator

SS1006 Large-Signal Model of DC Micro-grid Systems Feeding a Constant Power Load

SS1007 Detection Mechanical Fault of Induction Motor Using Harmonic Current and Sound Acoustic

Session: Power & Energy **4***Room: Meeting 1 9 March 2017 08:00-10:00*

PE010 Optimal Placement Model of TCSC in Power System Network Considering the Budget available

PE011 Proportional plus Resonant Control for Active Power Filter in Unbalanced System

PE058 Electrical Characteristics of Natural Ester Based Nanofluid

PE059 Electrical Characteristic Comparison of Mineral Oil and Natural Ester for Transformer applications

PE060 Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Compared with Natural Ester

PE093 The Classification of Regular and Defected Low Voltage XLPE Cable by Using Polarization and Depolarization Current Method

The Classification of Regular and Defected Low Voltage XLPE Cable by Using Polarization and Depolarization Current Method

J. Singhasivanon

Electrical Engineering department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand
jakawan_dew@outlook.com

C. Manop, N. Pattanadech, N. Jirasuwankul

Electrical Engineering department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand
kmchaler@kmitl.ac.th, kpnorasa@kmitl.ac.th,
nirudh.ji@kmitl.ac.th

Abstract—Electric cable is an important part of utility power and distribution system. In order to keep the system operation safely and reliable, acceptance testing for cable is necessary not only in-service but also manufacturing process. This paper proposes a novel testing technique which is able to classify the difference between normal and defective low voltage XLPE cable, namely polarization and depolarization current technique (PDC). In this study, PDC testing of low voltage XLPE cable was performed comparatively among five different cases: cable contaminated with a piece of paper, case 2 : cable contaminated with a piece of plastic, case 3 : cable contaminated with grease, case 4 : cable contaminated with a piece of copper, and case 5 : eccentric conductor cable. With environmental control of the testing process, the test results show the polarization current of the defective contaminated cable with copper is higher than that of the regular one, whereas it is lower than that of the defective one with paper, plastic and grease. It is also found that there was indistinctive of PDC in case of copper contaminated and eccentric conductor cable.

Keywords: Polarization and depolarization current; Defected cable; Cable contaminate; XLPE cable; Dielectric

I. INTRODUCTION

Power cable has a long history of use in the electrical and power engineering. By the early 1960s plastic insulated cable emerged, which generally use polyvinyl chloride (PVC), polyethylene (PE) and crosslinked polyethylene (XLPE) as the main insulation material, the most excellent performance of which is XLPE cable [1]. During cable production, including the wire stranding or insulating process, it is possible for the cable experience contamination or other mistakes that can impact quality. In order to prevent such problems, cable inspection and testing are substantial. With today's technology, there are several methods to distinguish between regular and irregular cables. polarization and depolarization current (PDC) method, which is a low voltage testing method, is a recommended

method since it would not be damage the cable insulation.

II. DIELECTRIC POLARIZATION

PDC measurement is based on the application of a DC voltage across a dielectric material for a period of time [2]. When DC voltage is applied but not enough to breakdown the insulation, the reaction of the molecules to external electric field is considered as the polarization of the insulation. When the DC voltage is disconnected and the insulation is grounded for discharge, the molecules and electric charges within insulation will rearrange to its initial state. Discharging current which is measured when insulation is grounded is called the depolarization current. The polarization current can be written as the equation below [3-4]

$$i_{pol}(t) = C_0 V_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_0 \delta(t) + f(t) \right] \quad (1)$$

Where C_0 is the geometric capacitance of test object.
 V_c is the DC voltage supplied to the insulation.
 σ_0 is the pure dc conductivity of the insulation.
 ϵ_0 is the vacuum permittivity.
 ϵ_∞ is the relative permittivity at $t = t_0$.
 $\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage at $t = t_0$.
 $f(t)$ is the dielectric response function.
 t_0 is the time which the DC voltage is initially supplied to the insulation.

In theory, when insulation is subjected to a dc voltage for a period of time, a small amount of current will flow across the insulation. This current flow consists of absorption, capacitive and conduction currents [5-6]. The total current flow during the application of electric stress across the material is known as polarization current [6]. Realistically, the measured polarization current may contain current leakage that relates to the unclean insulation surface. So the practical conductance

current is the sum of the theoretical conductance current and leakage current. The depolarization current can be written as the following equation. [3-4]

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_c [f(t) - f(t + T_c)] \quad (2)$$

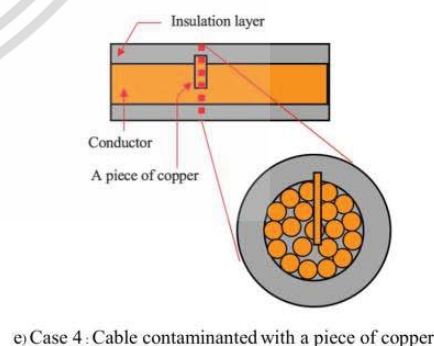
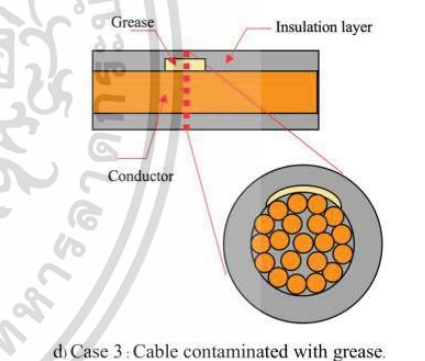
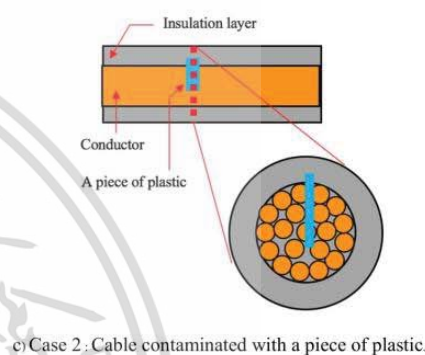
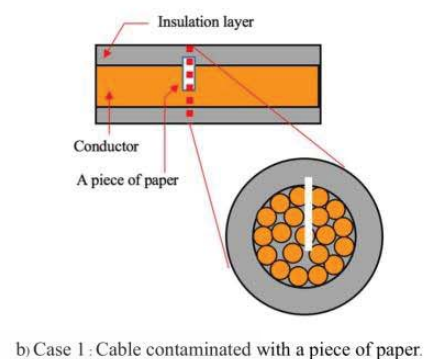
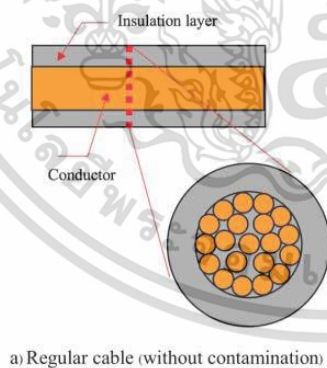
Where T_c is the period of time applying DC voltage to the insulation.

The depolarization current consists of two terms. The first term is the capacitive discharge current which has the same characteristic as the capacitive current of polarization. However they are from opposite poles. The second term is the absorption discharge current, which has a high level in the beginning and continuously decreases during the discharging of the insulation. The characteristics of the absorption discharge and that of the absorption of the polarization current are similar. There is no conductance current and leakage current in the depolarization because of the discontinuous supply of voltage to an insulation.

III. EXPERIMENTATION

A. Models of experiment

The defected 0.6/1kV cable with the cross-section area of 2.5 mm² and 15 m. long were categorized into five different cases there are; case 1: cable contaminated with a piece of paper, case 2: cable contaminated with a piece of plastic, case 3: cable contaminated with grease, case 4: cable contaminated with a piece of copper, case 5: deformed cable (conductor is not in center), were prepared for testing as depicted in Fig. 1(a) Fig.1(f)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

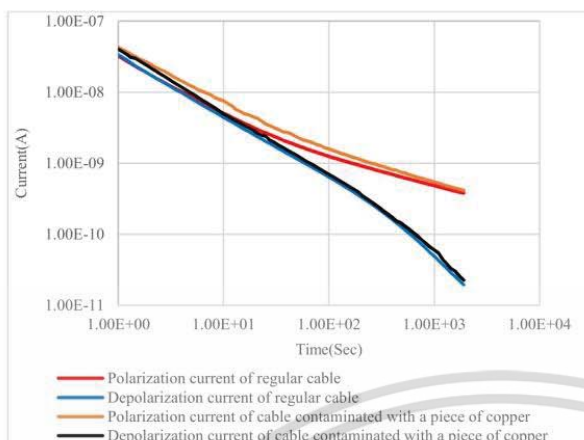


Fig. 6. Comparison of the polarization and depolarization current between regular cable and cable contaminated with a piece of copper.

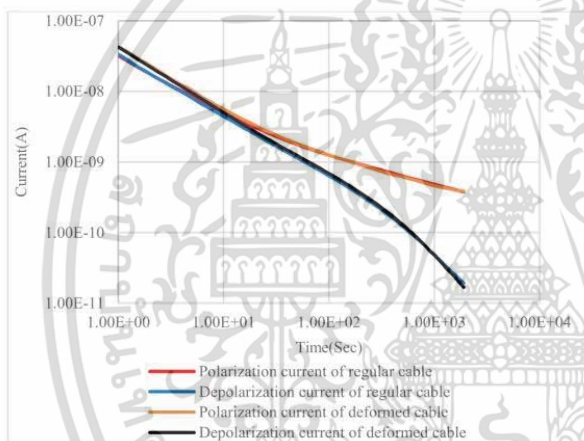


Fig. 7. Comparison of the polarization and depolarization current between regular cable and deformed cable.

V. DISCUSSION

From Fig.3-Fig5, the results show that the polarization current of cable contaminated with a piece of paper, a piece of plastic and grease are relatively similar. But they are less than the polarization current of the regular cable. For the test results mentioned above, it can be estimated that the addition of insulation material caused the decreasing of conductivity which resulted to the decreasing of polarization current.

From Fig. 6, the polarization current of cable contaminated with a piece of copper is higher than the polarization current of regular cable. It can be presumed that adding the conductive material caused the increasing of conductivity of the cable.

However, in the case of deformed cable (conductor is not in center), Fig. 7 shows a completed overlap of polarization current because there is no addition of material inside cable, so the conductivity is same as in the regular cable.

In the part of depolarization current, there is deprived of conductivity because of shutting off the DC supply, so the depolarization current of the regular cable and defected cable of five cases are same.

VI. CONCLUSION

If the polarization current and depolarization current of the regular cable is determined to be the reference, It can be classified regular XLPE cable and defected XLPE cable in case of contamination by PDC method. As a result, the polarization current of defected cable contaminated with conductive material, copper, is higher than that of regular cable but it is lower than that of defected cable in the case of cable contaminated with insulation material (paper, plastic, grease). While the depolarization current of regular cable and defect cable in each case are in the same level.

REFERENCES

- [1] Wei Li, Xing Zhang, Aixuan Zhao, Linlin Wu, Zhigang Ren, Junbo Deng, Guanjun Zhang, "Studies of the Polarization/Depolarization Current Characteristics of XLPE Cable", IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, Xi'an, China, 2016.
- [2] A. Mohd Ariffin, S. Sulaiman, "Analysis of Insulation condition Using Dielectric Spectroscopy and Polarization/Depolarization Current Techniques", IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia, 2012.
- [3] Walter S. Zaengl, *et al.*, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I. Theoretical Considerations," IEEE Electrical Insulation Mag., vol 19, no. 5, 2003.
- [4] P. Thonginta, *et al.*, "Ambient Temperature and Humidity Effects to Polarization and Depolarization Current of Stator coil," presented at the 2nd International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering, KMITL, Bangkok, Thailand, 2016.
- [5] S. A. Bhumiwat, "On-site Non-destructive Diagnosis of In-service Power Cables by Polarization/Depolarization Current Analysis," IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), June 6-9, 2010, pp. 1-5.
- [6] S. Sulaiman, A. Mohd Ariffin, "Simulation Modeling of Polarization and Depolarization Current Analysis for Underground Cable Insulation", IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013), Langkawi, Malaysia, June 3-4, 2013.



Letter of Invitation

Your Excellency,

The technical program committee has completed her review of papers submitted for iEECON2018, The 2018 International Electrical Engineering Congress, and accepted the paper listed hereby;

Manuscript ID: 00239

Author/s: Jakawan Singhasivanon, Nirudh Jirasuwankul, Norasage Pattanadech

Manuscript Title: Comparative Testing of Breakdown Voltage versus Polarization Current of 0.6/1kV XLPE Cables with Different Defects

We, the organizing committee of iEECON2018: The 2018 International Electrical Engineering Congress, do hereby invite from Thailand:

[Jakawan Singhasivanon]

for a conference attendance and scientific presentation duration 7-9 March 2018 at Krabi, Thailand.

We solemnly affirm that we will assist he/she during his/her staying.

Sincerely yours,


 Assoc.Prof. Dr. Vuttipon Tarateeraseth
 General Chair, iEECON2018
 Email: vuttipon@g.swu.ac.th
 Tel. +66 80 565 0072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Dear Authors (Jakawan Singhasivanon, Nirudh Jirasuwankul, Norasage Pattanadech) ;

The review process for The 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON2018) has been completed. Based on the recommendations of the reviewers and the Technical Program Committee, we are pleased to inform you that your paper:

Paper ID : (0239) "Comparative Testing of Breakdown Voltage versus Polarization Current of 0.6/1kV XLPE Cables with Different Defects" has been ACCEPTED by the congress.

Presentation Type : Oral Presentation

You are cordially invited to present the paper at iEECON2018 that to be held on 7-9 March 2018, Krabi, Thailand.

(Important) Please continue the following steps for your manuscript to be published:

1. EDIT your paper according to the suggestions of reviewers, strictly follow the recommended paper format. The reviewer's comments can be found in your paper/submission management page. Please prepare and submit your response to comments of reviewers (if required).
2. Please be aware of plagiarism issue. Normal acceptance of text similarity is less than 25%.
3. Please submit the final version of the revised manuscript (camera ready) with in 15 January 2018.
4. Please be reminded that at least ONE author of each accepted paper MUST register to the congress for the paper to be included in the program and congress proceedings.
5. For paper registration, please download and fill all the documents including the copyright transfer form, the speaker biography, and the response to comments of reviewers. Please also submit your proof of sponsoring society membership or studentship (if required).
6. Be reminded that the early bird registration rate is applicable only before 15 January 2018. Late registration can affect the higher registration fee.

This notification serves as our formal acceptance of your paper as well as an invitation to present your work at iEECON2018. Should you have any query, please contact iEECON2018 Secretariat via ieecon2018@g.swu.ac.th .

We look forward to seeing you in Krabi, Thailand soon.

Sincerely,

iEECON2018 Technical Program Committee

<http://www.ieecon.org/ieecon2018/index.php>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparative Testing of Breakdown Voltage versus Polarization Current of 0.6/1kV XLPE Cables with Different Defects

J. Singhasivanon

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand
jakawan_dew@outlook.com

N. Jirasuwankul, N. Pattanadech

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand
nirudh.ji@kmitl.ac.th, kpnorasa@kmitl.ac.th

Abstract— In this paper, a study of breakdown voltage versus polarization current was performed comparatively to explore whether there was an existing of relationship between the two phenomena. The experiment was performed on low voltage (0.6/1kV) XLPE cables with three different cases of defect, case 1: conductor cladded with small and thin copper strip, case 2: conductor cladded with thin plastic ring, and case3: conductor cladded with plane paper strip. The results illustrated that breakdown voltage tends adversely to polarization current in all test cases. When the polarization current was increasing, the breakdown voltage was decreasing. Whereas the polarization current was decreasing, the breakdown voltage was increasing. It was also found that defective cable with thin copper strip has the lowest breakdown voltage whereas one with plane paper strip has the highest breakdown voltage.

Keywords: Breakdown voltage; XLPE cable; dielectric material; polarization phenomena; polarization current measurement

I. INTRODUCTION

Breakdown voltage of insulation in XLPE cable is the key concerning parameter which has to be considered carefully in design and manufacturing process. In the design processes, an appropriate dimension consisting of cross section area, diameter of conductor and insulation thickness must have been defined compliantly with standard [1-4]. Basically, dimension of the conductor and insulation must have been designed to withstand maximum limit of electrical field stress and optimally to attain current density. In addition, the material cost per unit length of cable must be controlled as well.

Besides an engineering design step, manufacturing processes are including of copper wire stranding and insulation extruding. During the production processes, there is possibility that the cable could experience various kinds of contamination or other mistakes that can deteriorate breakdown voltage [3-4]. Therefore, this paper proposes a study of the possible defects that could affect Electric field stress (E_{max}) by examine the breakdown voltage of various contaminated cable samples.

II. BREAKDOWN VOLTAGE

In general, cross section of electric cable has physical appearance in cylindrical-shaped. However, the overall

cylindrical shape is made of overlapping of the conductor and the insulation as show in Fig.1 [3, 5-6]

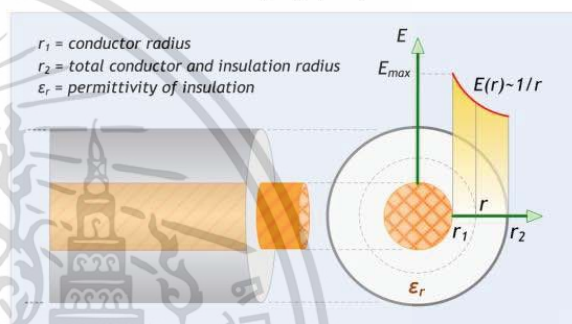


Fig.1 Cylindrically symmetric electrode configuration with field strength profile

From Fig.1, stranded conductor with radius r_1 is extruded with single layer of insulation and thus overall radius is equal to r_2 . The maximum E_{max} which causes the highest electrical field stress that occurs mathematically closed to surface of the conductor and can be calculated by Eq.(1)

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1)$$

Also, the breakdown voltage, (V_b) can be calculated by equation (2), where E_b is dielectric strength of insulation. For example, E_b of XLPE insulation is typically 22-50kV/mm [3, 5].

$$V_b = E_b r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

III. POLARIZATION IN DIELECTRIC MATERIALS

When a solid insulating material is subjected to DC low voltage, the forces of the electric field can displace fixed positive and negative charge carriers against each other as known as "Polarization of insulation" [4, 5]. In theory of polarization processes, relaxation current of step response in

dielectric material consist of three components; capacitive, absorption and conduction currents. Relaxation current or polarization current can be written by (3) [4, 7-8]

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_0 \delta(t) + f(t) \right] \quad (3)$$

Where C_0 is the geometric capacitance, U_c is the step voltage supplied to the insulation, σ_0 is the pure dc conductivity of insulation, ϵ_0 is the vacuum permittivity, $\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage, $f(t)$ is the dielectric response function

IV. EXPERIMENTATION

A. Specimen preparation for experiment

There were three different samples of defective cables that used to test comparatively with the regular one. All samples were 0.6 kV XLPE cables with the cross-section area of 1.5 mm² and 20 m Long. Example of manufacturing processes in this research is shown in Fig.2. They were categorized into three cases; case 1: conductor cladded with small and thin copper strip, case 2: conductor cladded with thin plastic ring, and case3: conductor cladded with plane paper strip. Those are illustrated by Fig. 3 – 6 respectively.

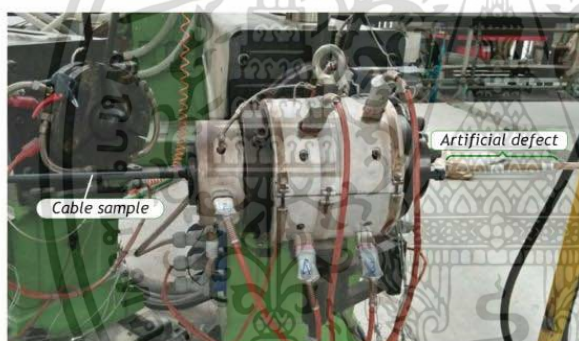


Fig.2 Example of manufacturing processes for sample cables

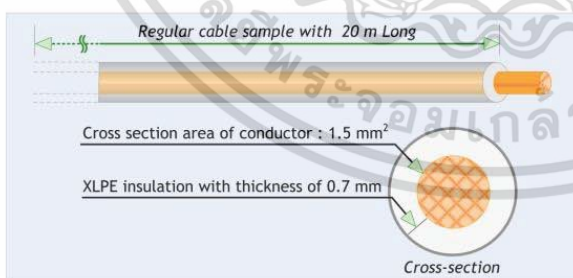


Fig.3 Regular cable sample

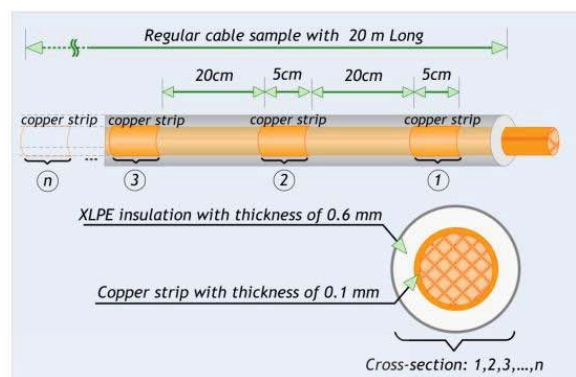


Fig.4 Case 1: conductor cladded with small and thin copper strip

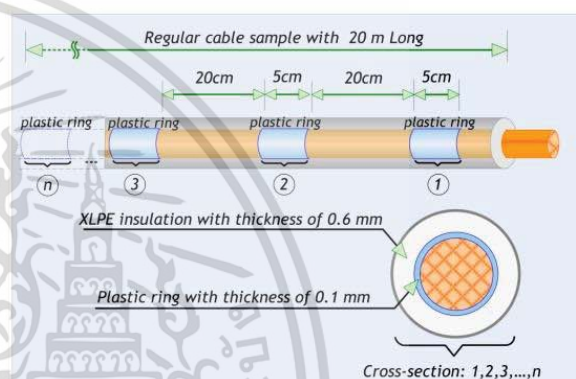


Fig.5 Case 2: conductor cladded with thin plastic ring

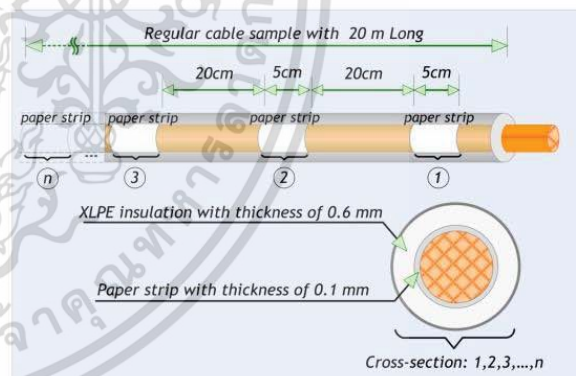


Fig.6 Case 3: conductor cladded with plane paper strip

B. Breakdown voltage test

B1. Test set up

A sample of regular cable and three samples of different defective cables were prepared for breakdown voltage test. The breakdown voltage test was performed in the high voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

laboratory. The test circuit diagram and breakdown voltage test set up are depicted in Fig. 7 and Fig. 8 respectively.

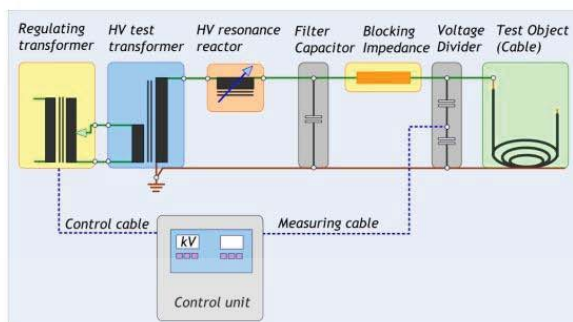


Fig.7 Test circuit diagram for breakdown voltage test

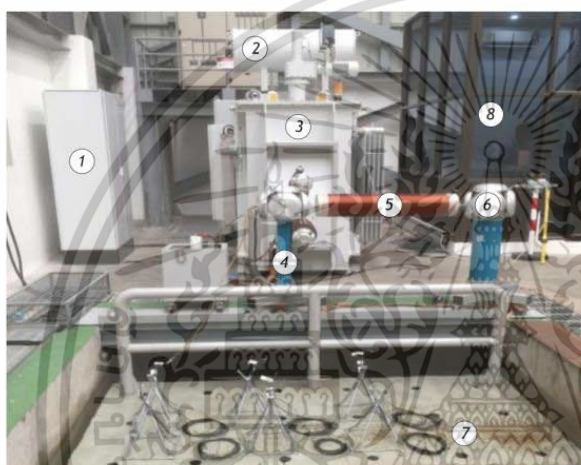


Fig.8. Test circuit arrangement for breakdown voltage test

Where: 1. Voltage Regulator, 2. Exciter Transformer, 3. HV Reactor, 4. Filter Capacitor, 5. Blocking Impedance, 6. Voltage Divider, 7. Test Object (Cable sample), 8. Control and Measuring System

B2. Test procedure

The cable test sample was subjected to the alternating voltage by the exciter transformer from zero until insulation breakdown occurred with rate of 1kV/s and the breakdown voltage was recorded.

C. Polarization current measurement

C1. Test set up

To study the dielectric response of one regular and three different defective cable samples, the polarization current measurement was set up and experiment test set up were illustrated in Fig. 9 and Fig. 10 respectively.

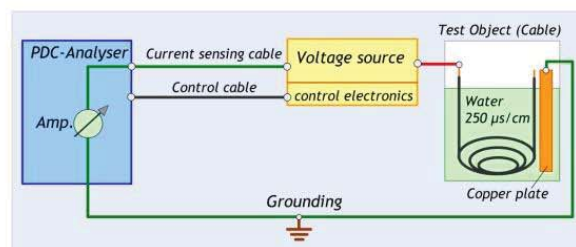


Fig.9. Test circuit diagram for polarization current measurement

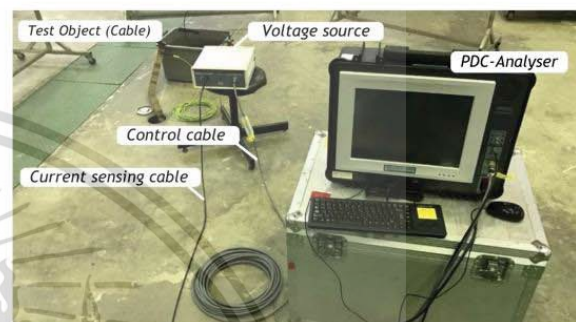


Fig.10 Test circuit arrangement for polarization current measurement

C2. Test procedure

The test procedures for polarization current measurement were divided into two steps, initial measurement and the main measurement respectively. The initial measurement process is to determine the initial condition of the cable sample so called the remaining charges inside the insulation system before voltage application. Next, the direct voltage of 220 volt from the voltage source was applied to the cable sample for 2,000 second. At the same time, the polarization current were measured and recorded.

V. RESULTS

The test results obtained from the breakdown voltage test experiment and polarization current measurements are shown in Fig.10 – 11 respectively.

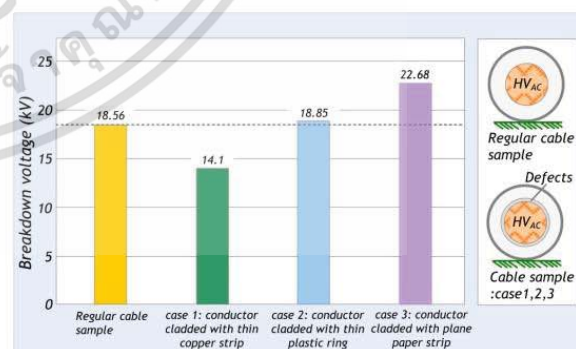


Fig. 10 Results of breakdown voltage test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

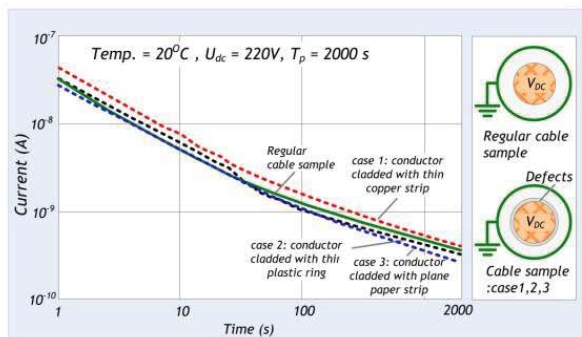


Fig.11 Comparison of the polarization current between regular and defected cables with copper, plastic and paper

VI. DISCUSSION

From the breakdown voltage experiment, the breakdown voltage is vastly depended on contaminated material. In case of cable sample case 2: conductor cladded with thin plastic ring has breakdown voltage closed to regular cable. This possibility could be occurred because the heat from extrusion melted the plastic and causing it to mix into the insulation. For the case of the contaminated copper, case1 sample, the breakdown voltage is 24% lower than the regular cable. For case3, cable sample has the best results and a 22% higher breakdown voltage than the regular cable sample.

From the polarization current measurement, the polarization current in case of cable contaminated with copper is higher than regular one due to the insulation thickness of cable sample decrease which effects to the breakdown voltage down (easier to breakdown). In case of cable contaminated with plastic, because of plastic is melted with insulation layer that made the polarization current is similar to the regular cable. So the breakdown voltage is nearly the same with regular cable. And the case of cable contaminated with paper between conductor and insulation. The polarization current in cable contaminated with a piece of paper is lower than the regular cable. Moreover, the breakdown voltage is the highest which can assume that electric field stress of XLPE insulation in cable contaminated with paper is lower than other cases.

VII. CONCLUSION

This paper proposes a study on how different defective cable from various materials could affect the breakdown voltage versus polarization current of 0.6/1kV XLPE cables. The results showed that the defective cable with thin copper strip has the lowest breakdown voltage whereas the defective

one with plane paper strip has the highest breakdown voltage. Those indicate that distinctive contaminated material can cause drastic change in breakdown voltage. Furthermore, with regarding of polarization current test results, relationship between breakdown voltage and polarization current exists and preliminary having adverse trends in all test cases. When the polarization current was increasing, the breakdown voltage was decreasing. Whereas the polarization current was decreasing, the breakdown voltage was increasing. It was also found that defective cable with thin copper strip has the lowest breakdown voltage whereas one with plane paper strip has the highest breakdown voltage.

ACKNOWLEDGMENT

This paper was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)'s advisors who were provided expertise on this research. I thank Dr.Prapin Abhinorasaeth and Mrs.Sumana Abhinorasaeth from TriCab (Thailand) Co.,Ltd for supporting with all the cable samples. I'm grateful to TIS Engineering and Service Co.,Ltd. for assisting with the testing instruments. I would also like to show gratitude to Mr.Sathit Krirapee from Charoong Thai Wire & Cable Co.,Ltd for testing data collecting and High-voltage laboratory of KMITL. Lastly, I would like to thank Mr.Phethai Nimsanong for a good consulting.

REFERENCES

- [1] IEC 60228, "Conductors for insulation", third edition, 2004-11
- [2] IEC 60502-1, "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1kV up to 30kV", part 1 cables for rated voltages of 1kV and 3kV, table 6 nominal thickness of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, second edition, 2004
- [3] Sathit Krirapee "Study on surface tracking of jacket insulation for space aerial cable", KMITL-2017-EN-M-020-005, 2016
- [4] J. Singhasivanon, C. Manop, N. Pattanadech, N.Jirasuwankul, "The Classification of Regular and Defected Low Voltage XLPE Cable by Using Polarization and Depolarization Current Method", 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017
- [5] N.Pattanadech, "Electrical Engineering KMIL, "Electrical Engineering Materials vol.1", 2014, series3
- [6] "L.A. Dissado, J.C. Fothergill and C. Stevens", Electrical degradation and breakdown in polymers, materials and devices series9, 1988
- [7] P. Thonginta, et al, "Ambient Temperature and Humidity Effects to Polarization and Depolarization Current of Stator coil," The 2nd International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering, KMITL, Bangkok, Thailand, 2016
- [8] Walter S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations," IEEE Electrical Insulation Mag., 2003, vol 19, no. 5

ภาคผนวก ข
PDC Specifications



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulation Analysis and Diagnosis

All kinds of insulation materials undergo degradation processes or ageing effects, if stressed by electric fields, partial discharges, temperature and mechanical forces. These ageing effects change the dielectric properties (real and imaginary part of the permittivity) which can be identified either by the measurement of the "dielectric response function" in the time domain (also called "time domain spectroscopy") or by measurements of the capacitance and the losses in the frequency domain ("frequency domain spectroscopy"). Application of these methods to insulation systems of high-voltage equipment

is extremely valuable as the results provide answers about the actual conditions and the status of the insulation. As the results from each measurement method can be transformed mathematically into equivalent results of the other method, the **PDC-ANALYSER-1MOD** is based on "time domain spectroscopy", which can be made in less time and with better precision than measurements in the very low frequency domain. The **PDC-ANALYSER-1MOD** is thus a most flexible diagnostic tool for insulation systems and insulation materials.

Specifications: Electrical Insulation Diagnostic System PDC-ANALYSER-1MOD (ed 2012)

Current measurement	
range	±1 mA
resolution (current display when measuring)	1 pA
resolution (recorded data)	0.1 pA
accuracy	0.5 % of the measured value ±1 pA after 1 hour warming up
impedance	10 kΩ
protection	up to 100 mA respectively 1 kV for 50 ms
noise suppression	up to 10 µA eff at 50 / 60 Hz mains frequency
filtering (current display when measuring)	mean value in 1 s intervals
filtering (recorded data)	mean value in intervals increasing proportionally with the time from the voltage source switching moment
Voltage source	
voltage range when switched on	+30 ... +2000 V
maximum current sourcing when switched on	<+5 mA
impedance when switched on	< 20 kΩ
impedance when switched to zero	< 0.2 Ω
current limiting when switching cap. loads	< ±100 mA for 20 ms
Capacitance measurement	
the load capacitance is indirectly measured by computing the ratio charge to voltage when the voltage source is switched off for measuring of the depolarisation current. However, the current measurement is not impaired by a load capacitance surpassing the range listed below.	
load capacitance measuring range at 2 kV source voltage	25 nF
accuracy at 2 kV source voltage	±2 % ±5 pF
load capacitance measuring range at 1 kV source voltage	50 nF
accuracy at 1 kV source voltage	±2 % ±10 pF
load capacitance measuring range at 500 V source voltage	100 nF
accuracy at 500 V source voltage	±2 % ±20 pF
load capacitance measuring range at 100 V source voltage	500 nF
accuracy at 100 V source voltage	±2 % ±100 pF
Computer	
display	15" TFT, resolution 1024 x 786 pixels
processor	Embedded Intel® Atom™ processor, dual-core D525 1.8G
memory	1GB 800MHz DDR3 RAM
drives	120 GB harddisk, DVD +/-RW
standard interfaces	4x USB 2.0, 1x Ethernet
extras	changeover contact synchronised to high-voltage output
Software	
operating system	Windows XP SP3
measuring and control program	installed ready to use, outputs for each measurement one file with polarisation data, one file with depolarisation data and one file with general measurement descriptions
standard evaluation software	installed ready to use, easy to use, extensive possibilities to postprocess, display, print and export the measured data, computation of the complex capacitance in function of frequency, computation of a lumped equivalent circuit of the measured insulation, computation of recovery voltages and the derived "polarisation spectrum", computation of polarisation indexes and of insulation resistances according to all known standards and definitions
advanced evaluation software	quality assessment of oil-paper insulation systems, quantitative determination of moisture content in pressboard and of oil conductivity for power transformers
Miscellaneous	
weight	14.3 kg, in rugged waterproof carrying case
power supply	90 ... 260 V, 47 ... 63 Hz, <160 VA
size	520 x 230 x 435 (width x depth x height in mm)
temperature (use)	0 ... 35 °C
temperature (stock)	-10 ... 50 °C
pressure	70 ... 106 kPa
humidity	5 ... 80 % non condensing
acceleration	< 2 g
length of standard measurement cables	15 m

phone: +41 44 77 66 77 6
 fax: +41 44 77 66 77 7
 e-mail: info@alff-engineering.ch
 web: www.alff-engineering.ch

specifications subject to change without notice

ALFF ENGINEERING
 Gomweg 7 8915 Hausen am Albis Switzerland

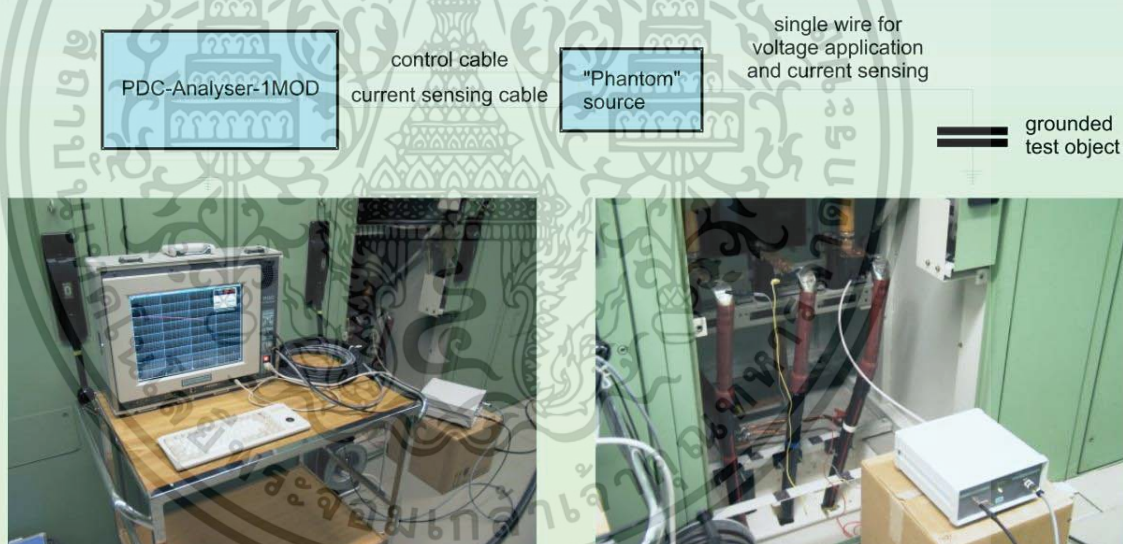
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Accessory Device Making Possible The Measurement Of Polarisation and Depolarisation Current On Grounded Objects

Voltage Source PDC-Phantom-1000XE



The **PDC-Phantom-1000XE** voltage source is an accessory to the PDC-Analyser-1MOD. It is a "flying voltage source" for making possible measurements on grounded objects such as **generators** and **cables**. The insulation level between the control electronics and the voltage source is extremely high such as not to compromise the pA resolution of the PDC-Analyser-1MOD.



Specifications PDC-Phantom-1000XE

voltage range	30 to 1000 volts
current	5 mA short circuit indefinitely
output to ground insulation	> 1000 TΩ
temperature (use)	0 ... 40 °C
temperature (store)	-10 ... 65 °C
size	290 x 255 x 115 (width x depth x height in mm)
weight	2.6 kg
power supply	remote supply by the PDC-Analyser-1MOD
cable	15 m for connecting the PDC-Phantom-1000XE to the PDC-Analyser-1MOD

specifications subject to change without notice

phone: +41 44 77 66 77 6
fax: +41 44 77 66 77 7
e-mail: info@alff-engineering.ch
web: www.alff-engineering.ch

ALFF ENGINEERING
Gomweg 7 8915 Hausen am Albis Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจักรวาล สิงห์ศิวานนท์
 วัน เดือน ปีเกิด 29 มีนาคม 2537
 ที่อยู่ 142/15 หมู่บ้านปัญญา ถนนพัฒนาการ30 เขตสวน
 หลวง แขวงสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250



ประวัติการศึกษา 2558 – ปัจจุบัน ศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 2558 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 2550 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนสมถวิล จังหวัดกรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้