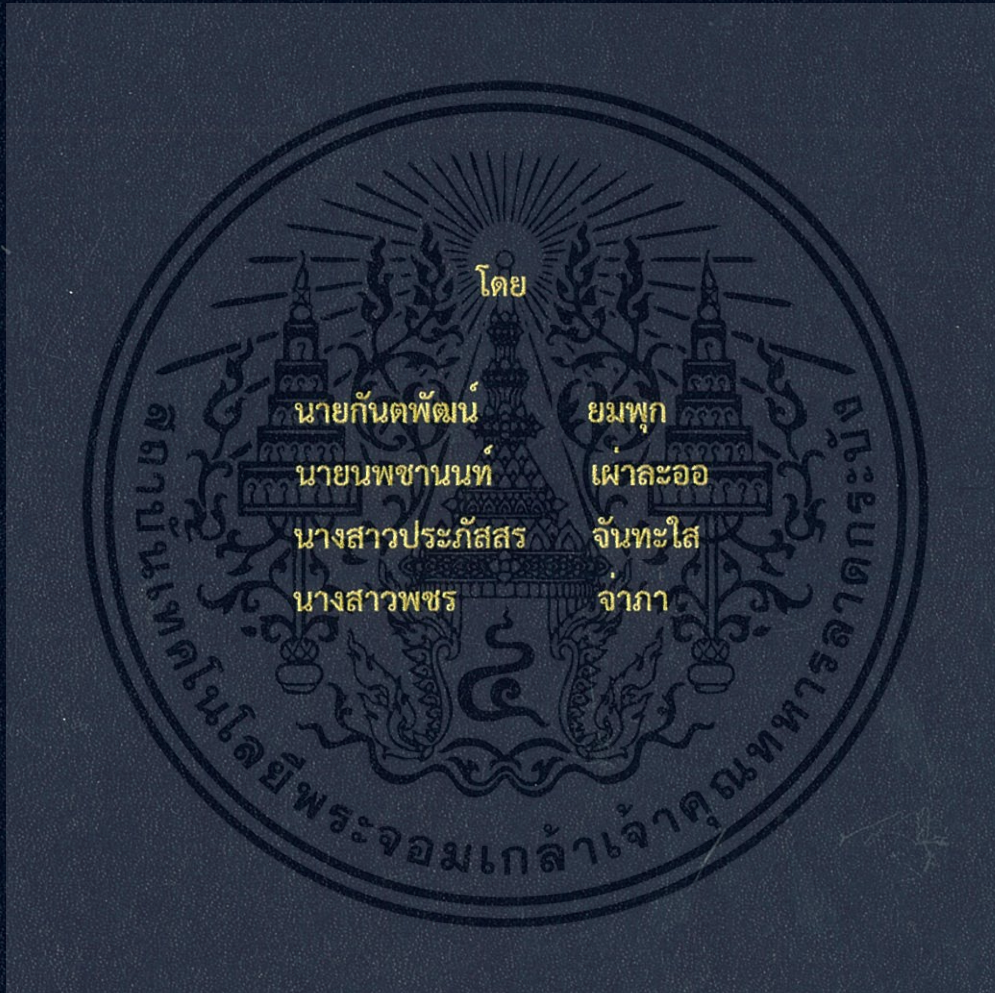


การศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน  
THE STUDY OF ELECTRICAL TREE IN UNDERGROUND CABLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน  
THE STUDY OF ELECTRICAL TREE IN UNDERGROUND CABLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THE STUDY OF ELECTRICAL TREE IN UNDERGROUND CABLE



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

THE STUDY OF ELECTRICAL TREE IN UNDERGROUND CABLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ชายชาญ โพธิสาร

รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

ผู้จัดทำ

1. นายกันตพัฒน์ ยมพุก
2. นายณพชานนท์ เผ่าละออ
3. นางสาวประภัสสร จันทะใส
4. นางสาวเพชร จ้าภา



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชายชาญ โพธิสาร )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

นายกันตพัฒน์	ยมพุก
นายนพชานนท์	เผ่าละออ
นางสาวประภัสสร	จันทะใส
นางสาวเพชร	จำภา
ผศ.ชายชาญ	โพธิสาร
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอผลการศึกษาทดลองการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ภายในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินพิกัด 33 kV ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 50°C 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C โดยทำการป้อนแรงดันสูงกระแสสลับขนาด 10 kV 50 Hz ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ถูกควบคุมอุณหภูมิดังกล่าว วัสดุทดสอบมีความหนา 5 mm รัศมี 28 mm ใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมรัศมี 40  $\mu\text{m}$  เจาะลงไปใฉนวนด้วยความลึก 2 mm เพื่อให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยแต่ละอุณหภูมิทดสอบ ได้ทำการป้อนแรงดันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ความยาวของกิ่งต้นไม้ไฟฟ้า และความกว้างของกิ่งของต้นไม้ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่ต้นไม้ไฟฟ้าเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 °C เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในกรณีชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 90 °C กิ่งของต้นไม้ไฟฟ้าจะเห็นได้ชัดตั้งแต่การทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมง

## The study of electrical tree in underground cables

Mr. Kantapat	Yompuk
Mr. Nopchanon	Paolaor
Ms. Prapatson	Chantasai
Ms. Pachara	Japa
Asst.Prof.Chaichan	Pothisarn
Assoc.Prof.Dr.Norasage	Pattanadec Advisor

### ABSTRACT

This project presents the study and experiment of electrical treeing phenomena XLPE insulation of the 33 kV underground cable with the temperature of 50, 60, 70, 80 and 90 degree Celsius respectively. The XLPE test samples with the thickness of 5 mm and the diameter of 28 mm were prepared. The tungsten needle electrode with the tip radius of 40  $\mu\text{m}$  was inserted vertically into the sample to a depth of 2 mm to localized enhance the electric field stress in the XLPE. The 10 kV AC voltage was applied to the test sample under the mentioned temperature for 1 hour, 2 hours and 3 hours respectively. The test results shown that the length and width of the electrical tree directly depended on the sample temperature and the time of testing. The electrical tree could be observed for the 60 degree Celsius test sample after tested for 3 hours. Whereas, the electrical tree was found after 1 hour testing for 90 degree Celsius test sample.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รศ. ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ผศ.ชายชาญ โพธิสาร ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมกับแก้ข้อบกพร่องในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่การอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง แนวทางการปฏิบัติงาน และคอยสอบถามความคืบหน้าและปัญหาต่าง ๆ ตลอดการทำงาน โดยท่านคอยจะให้คำปรึกษารวมถึงการลงมือปฏิบัติงานจริงด้วยตนเองในบางครั้งเพื่อช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และยังคอยตรวจสอบความถูกต้องของปริญญาานิพนธ์ ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงและมีความสมบูรณ์ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อาทิ สถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ ทั้งนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ ป.เอก ป.โท ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุน โดยการมอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงการปริญญาานิพนธ์นี้ ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมา

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยถ่ายทอดวิชาความรู้เพื่อใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งยังนำไปประกอบวิชาชีพได้ในอนาคต

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่นๆ ในครอบครัว ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจและทุนทรัพย์ ให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ชนิด XLPE	5
2.2.1 โครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์	6
2.2.2 ประเภทของพอลิเมอร์	8
2.3.3 พอลิเมอร์สังเคราะห์	9
2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์	9
2.3.1 กระบวนการการเกิดผลึก การหลอมเหลว และการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น	11
2.4 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	15
2.4.1 การเสียรูปของพอลิเอทิลีน (Polyethylene deformation)	16
2.5 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล	19
2.6 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิล	24
2.6.1 ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า	25
2.7 สนามไฟฟ้า	28
2.7.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical field stress)	31
2.7.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุเนื้อสารต่างกัน	32
2.8 การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้าของฉนวนและการเกิดเบรกดาวน์	32
2.8.1 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ระดับต่ำ	32
2.8.2 การสูญเสียสภาพฉนวน (Electrical breakdown)	35
2.9 ปัจจัยที่ทำให้เกิดต้นไม้	37
2.9.1 ปัจจัยทางสัณฐานวิทยา	37
2.9.2 ปัจจัยทางองค์ประกอบทางเคมี	42
2.9.3 ปัจจัยทางอุณหภูมิ	46

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 ต้นไม้ไฟและต้นไม้ไฟฟ้า	49
2.10.1 ความหมายของต้นไม้ไฟ	49
2.10.2 สาเหตุการเกิดต้นไม้ไฟ	49
2.10.3 ลักษณะทั่วไปของต้นไม้ไฟฟ้า	52
<b>บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง</b>	<b>56</b>
3.1 กล่าวนำ	56
3.2 การทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	56
3.2.1 การออกแบบชุดทดสอบและสร้างชุดศึกษาต้นไม้ไฟ	56
3.2.2 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ	62
3.2.3 ตัวแปรควบคุมในการทดสอบ	63
3.3 สรุป	63
<b>บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล</b>	<b>64</b>
4.1 การกระจายตัวของความเสียหายในสายเคเบิล XLPE	64
4.1.1 กล่าวนำ	64
4.1.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	64
4.1.3 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในการศึกษาต้นไม้ไฟ	66
4.2 วิธีดำเนินการทดสอบ	70
4.2.1 เงื่อนไขการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟ	70
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	70
4.3 สรุป	71
<b>บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล</b>	<b>72</b>
5.1 กล่าวนำ	72
5.2 ผลการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	72
5.2.1 การวัดขนาดของ Electrical tree	72
5.2.2 ต้นไม้ไฟที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	73
5.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการก่อตัว และขยายตัวของต้นไม้ไฟ	78
5.4 สรุป	82
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>82</b>
6.1 สรุป	82
6.2 ข้อเสนอแนะ	83

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	86
ภาคผนวก ข ปริญญาบัตรอ้างอิง	91
ประวัติผู้เขียน	99



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น	6
2.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง	6
2.3 พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง	7
2.4 พอลิเมอร์แบบโครงข่าย	7
2.5 โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous)	7
2.6 โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Partially crystalline)	8
2.7 กราฟเศษส่วนผลึกกับค่าล็อกของเวลาของ พอลิโพลีลีน ที่อุณหภูมิต่างๆ	12
2.8 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ	13
2.9 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจากโมเลกุลเอทิลีน	16
2.10 โครงสร้างสเฟียรูไลท์ของพอลิเอทิลีน	17
2.11 กลุ่มของโครงสร้างสเฟียรูไลท์ของพอลิเอทิลีน	17
2.12 ภาพแสดงรายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลท์	17
2.13 แสดงกระบวนการเสีรูรูปของพอลิเมอร์ชนิดกิ่งผลึก	18
2.14 โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน	19
2.15 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิล	24
2.16 ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า	25
2.17 กระบวนการวัลคาไนส์แบบต่อเนื่อง	26
2.18 การผลิตสายเคเบิลโดยกระบวนการวัลคาไนส์ต่อเนื่องในแนวระนาบ	26
2.19 การผลิตสายเคเบิลโดยกระบวนการวัลคาไนส์ต่อเนื่องในแนวตั้ง	27
2.20 เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโตรดทรงกลม	29
2.21 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	30
2.22 การตอบสนองไดอิเล็กตริกของ PVC โดย $T_g$ คืออุณหภูมิที่ความถี่ $\alpha$ -relaxation มีค่าเป็นศูนย์ และแสดงสภาวะขณะที่พอลิเมอร์กำลังจะเป็นของแข็ง	33
2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากไฟฟ้ากับเวลา และสนามไฟฟ้า	36
2.24 แสดงพฤติกรรมของต้นไม้ในวัสดุภายใต้ค่าความเค้นแรงดึง	42
2.25 ตัวอย่างข้อผิดพลาดในฉนวน	50
2.26 ต้นไม้แบบคล้ายโบว์	51
2.27 ต้นไม้แบบคล้ายครีบ	51
2.28 ต้นไม้ไฟฟ้าแบบกิ่ง	52
2.29 ต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่ม	53
2.30 ต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่มและกิ่ง	53
2.31 ก่อนการเบรกดาวน์ของต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่ม (Bush-type tree)	54
2.32 ก่อนการเกิดเบรกดาวน์ของต้นไม้ไฟฟ้าแบบกิ่ง (Branch-type tree)	54
2.33 ระยะเวลาการเริ่มต้นและการขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า	55
3.1 แบบจำลองชุดทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า	56

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ชุดทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า	57
3.3 อิเล็กโทรดปลายแหลม	57
3.4 แบบจำลองกล่องอะคริลิกที่ออกแบบไว้	58
3.5 แสดงส่วนประกอบของกล่องอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบ	58
3.6 กล่องควบคุมอุณหภูมิ	59
3.7 หม้อแปลงแรงดันสูง	59
3.8 อุปกรณ์จ่ายแรงดัน	60
3.9 ชุดแบ่งวัตต์แรงดันไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุ	60
3.10 ที่พักสาย	61
3.11 ตัวต้านทานชนิดน้ำ	61
3.12 มัลติมิเตอร์	62
3.13 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า	62
4.1 แบบจำลองทรงกระบอกซ้อนกันร่วม	64
4.2 การกระจายสนามไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วย Comsol	66
4.3 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล	66
4.4 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล	67
4.5 ตัวอย่างของ Triangular mesh	68
4.6 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	68
4.7 การกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	69
4.8 ภาพขยายของการกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	69
5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ Nikon SMZ 745T สำหรับใช้ตรวจหาต้นไม้ไฟฟ้า	72
5.2 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 50°C เวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด	73
5.3 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 60°C เวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด	73
5.4 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 60°C เวลา 3 ชั่วโมง	74
5.5 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 70°C เวลา 1 ชั่วโมง	74
5.6 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 70°C เวลา 2 ชั่วโมง	75
5.7 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 70°C เวลา 3 ชั่วโมง	75
5.8 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 80°C เวลา 1 ชั่วโมง	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ลักษณะการเกิดต้นไม้อไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 80°C เวลา 2 ชั่วโมง	76
5.10 ลักษณะการเกิดต้นไม้อไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 80°C เวลา 3 ชั่วโมง	77
5.11 ลักษณะการเกิดต้นไม้อไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 90°C เวลา 1 ชั่วโมง	77
5.12 ลักษณะการเกิดต้นไม้อไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 90°C เวลา 2 ชั่วโมง	78
5.13 ลักษณะการเกิดต้นไม้อไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 90°C เวลา 3 ชั่วโมง	78
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของต้นไม้อไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (mm) กับเวลาที่ทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิที่ต่างกัน	80
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของต้นไม้อไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (mm) กับเวลาที่ทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิที่ต่างกัน	80
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของต้นไม้อไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (mm) กับเวลาที่ทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิที่ต่างกัน	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	3
2.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และตัวอย่างผลิตภัณฑ์	9
2.2 คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์	10
2.3 คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า	14
2.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ $T_g$ และ $T_m$ ของวัสดุพอลิเมอร์	15
2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	20
2.6 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	20
2.7 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตามมาตรฐาน IEC 605002-2	22
2.8 ความหนาฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) ตามมาตรฐาน IEC 605002-2	22
2.9 อุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนผสมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 605002-2	23
2.10 เวลาในการเริ่มก่อตัวของต้นไม้ไฟฟ้า, $t_i$ และเวลาที่ให้ Tree เจาะผ่าน 90% ของเนื้อฉนวน, $t_g$ (Point-plane geometry, 7-kV rms ความถี่ 50 Hz)	39
2.11 แรงดันเริ่มเกิด 50% ต้นไม้ไฟฟ้า, VI ในวัสดุที่มีความเป็นผลึกต่างกัน ใช้ Double needle geometry ในการทดสอบ AC, 50 Hz	40
2.12 แรงดันเริ่มเกิด 50% ต้นไม้ไฟฟ้า, VI ในวัสดุที่มีความเป็นผลึกต่างกัน ใช้ Double needle geometry ในการทดสอบ AC, 50 Hz	40
2.13 แรงดันเริ่มเกิด 50% Double-needle geometry และ Life time (เวลาที่ tree เจาะทะลุฉนวน) ในการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า	44
2.14 ผลจากการเติมสารที่แรงดันก่อตัวของต้นไม้ ใน LDPE (MI=0.2) ข้อมูลที่ให้ทำการทดลองแบบ Double-needle test	45
4.1 สรุปการเลือกและเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์	67
4.2 การทดสอบต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิล	70
5.1 ขนาดของต้นไม้ไฟฟ้า เทียบกับเวลาโดยใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz ที่อุณหภูมิต่างๆ	79

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลใต้ดินเริ่มมีบทบาทในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยมากขึ้น เนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยี และ สาธารณูปโภคที่กระจายตัวมากขึ้น ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบตามระยะเวลามีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขึ้นมา เพื่อใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย ซึ่งแนวโน้มการใช้สายเคเบิลใต้ดินในเขตการไฟฟ้านครหลวง หรือในแหล่งชุมชนที่หนาแน่นมีเพิ่มมากขึ้น แต่บางพื้นที่เป็นแหล่งชุมชนที่มีประชากรหนาแน่น และแออัด จึงไม่เหมาะกับการส่งจ่ายแบบซึ่งผ่านอากาศ (Overhead transmission line) หรือบางพื้นที่เป็นสถานที่สำคัญเป็นหน้าเป็นตาของประเทศต้องการภูมิทัศน์ที่สวยงาม ด้วยเหตุนี้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ที่สำคัญคือสายเคเบิลที่จะนำมาติดตั้งในระบบต้องได้มาตรฐาน น่าเชื่อถือ และในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน ผู้ทำการติดตั้งต้องมีความรู้ความเข้าใจทางวิศวกรรมอย่างถูกต้อง ซึ่งจะต้องมีความระมัดระวังอย่างสูงในการติดตั้ง เพราะการติดตั้งที่ผิดพลาดหรือขาดความรู้ความเข้าใจก็จะให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายจนทำให้ฉนวนเกิดการชำรุด และอาจนำไปสู่การใช้งานของสายเคเบิลที่สั้นลง

แต่เนื่องจากปัจจุบันยังขาดผู้มีความรู้ในเรื่องสายเคเบิลใต้ดินทั้งด้านทฤษฎี และปฏิบัติ เมื่อใช้งานจริงจึงเกิดความเสียหายขึ้นในทันที หรือค่อยๆเกิดในระยะยาว ดังนั้นเพื่อลดการเสียหายที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลเสียหาย โดยเน้นที่ความเสียหายของฉนวนจากปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) และต้นไม้ไฟ (Water tree) เพื่อหาลักษณะของความเสียหายในแต่ละปรากฏการณ์ และทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิด และอัตราการขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน และข้อมูลทางทฤษฎีของฉนวน XLPE
2. เพื่อศึกษาข้อบกพร่องภายในสายเคเบิลใต้ดินที่อาจนำไปสู่การเบรกดาวน์
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าและต้นไม้ไฟ
4. เพื่อทดลองศึกษาอัตราการขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินแรงดันพิกัด 33 kV และข้อมูลของฉนวนสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และปัจจัยที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ไฟ
3. ศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดิน จากปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าและต้นไม้ไฟ
4. ศึกษาทดสอบอัตราการเกิดและขยายตัวของปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันพิกัด 33 kV ที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ชนิด XLPE รวมทั้งโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลในระบบแรงสูง 33 kV
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี และปัจจัยที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าและต้นไม้ฟ้า
3. ศึกษามาตรฐานของการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง
4. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Comsol multiphysic 3.5 รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อทำการวิเคราะห์ เช่น Autocad, Solid work และทำการจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า
5. ออกแบบชุดทดสอบในการสร้างปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า
6. ทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน
7. สรุป และวิเคราะห์ผลการทดสอบจากตัวอย่างของชิ้นงานที่ได้
8. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ระยะเวลา									
	ปี 2559					ปี 2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ชนิด XLPE รวมทั้งโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลในระบบแรงสูง 33 kV	←	→								
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพทางเคมี และปัจจัยที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ฟ้า	←	→								
3. ศึกษามาตรฐานของการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง	←	→								
4. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Comsol Multiphysic 3.5 ในการจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อทำการวิเคราะห์ เช่น Autocad Solid work			←	→						
5. ออกแบบชุดทดสอบในการสร้างปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า			←	→						
6. ทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าในปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน					←	→				
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากตัวอย่างของชิ้นงานที่ได้						←	→			
8. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์						←	→			→

← → วางแผน

← → ปฏิบัติจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างรายละเอียดของส่วนประกอบสายเคเบิลใต้ดิน และวิธีการทดสอบปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า
2. สามารถใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายเคเบิล เพื่อศึกษาผลกระทบของความเครียดสนามไฟฟ้าต่อการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าได้
3. ได้รับความรู้และทักษะในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างถูกต้องและปลอดภัย
4. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุ และปัจจัยที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดความบกพร่องจากปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการป้องกัน และลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

สายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดินเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน และถูกติดตั้งใช้งานใต้ดินตลอดเวลา จะเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่วนใหญ่จะพบว่าเกิดจากปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า ในฉนวนของสายเคเบิล ทำให้สายเคเบิลเกิดความล้มเหลว โดยฉนวนไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้ในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงแบบใต้ดินคือ วัสดุพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ซึ่งมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุฉนวนชนิดอื่นๆ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟ (Water tree) และต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในส่วนประกอบและคุณสมบัติต่างๆ ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ฉนวน XLPE เป็นอย่างดี ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติและประเภทต่างๆ ของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้า รวมทั้ง พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล สาเหตุการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์ การเกิดต้นไม้ไฟ และต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลฉนวน XLPE การสร้างและการทดสอบ วิเคราะห์ ต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิล โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

#### 2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ชนิด XLPE [1]

พอลิเมอร์ มาจากรากศัพท์กรีก 2 คำ คือ Poly (จำนวนมาก) และ Meros (ส่วน หรือ หน่วย) หมายถึง สารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) และมีมวลโมเลกุลมาก เกิดจากหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดของพอลิเมอร์ เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) มาต่อกันซ้ำๆ เป็นสายโซ่ยาว (Repeating unit) โดยมอนอเมอร์จะทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกัน เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างมอนอเมอร์แต่ละตัวและเกิดเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมด จะจัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ถ้ามีมอนอเมอร์ต่างกันตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป จะเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) โดยชนิดของมอนอเมอร์ และความยาวของสายโซ่โมเลกุลจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติความแข็งแรง คงทน และแรงระหว่างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีธาตุคาร์บอนกับไฮโดรเจนองค์ประกอบหลักและมีไนโตรเจน ออกซิเจน หรือ ซัลเฟอร์ ปนอยู่บ้างในบางชนิด เรียกว่า สารอินทรีย์ แต่ก็มีบางชนิดที่เป็นสารอนินทรีย์คือไม่ได้มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ซิลิโคนซึ่งมีธาตุซิลิกอนและออกซิเจนเป็นประกอบหลัก

พอลิเมอร์มีทั้งที่เกิดเองตามธรรมชาติ (Natural polymer) เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดนิวคลีอิก ยางธรรมชาติ และแบบสังเคราะห์ (Synthetic polymer) ได้แก่ พลาสติก เส้นใย โฟม และกาว ซึ่งในปัจจุบันพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเกือบทุกชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 โครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์

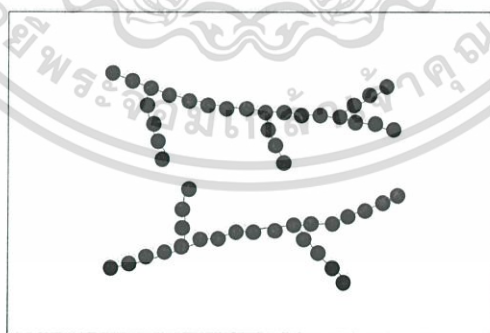
1. โครงสร้างระดับโมเลกุล พอลิเมอร์จะเกิดจากมอนอเมอร์ย่อยๆ มาต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ในลักษณะต่างๆ ซึ่งจะส่งผลให้พอลิเมอร์แต่ละตัวมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามโครงสร้างโมเลกุลนั้นๆ ดังนี้

- แบบเชิงเส้น (Linear polymer) หน่วยย่อยจะต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โครงสร้างจึงอยู่ชิดกันมาก ทำให้ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะที่ขุ่นและเหนียว ตัวอย่างเช่น PE, PVC, PS, Nylon และ High Density PE (HDPE) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น

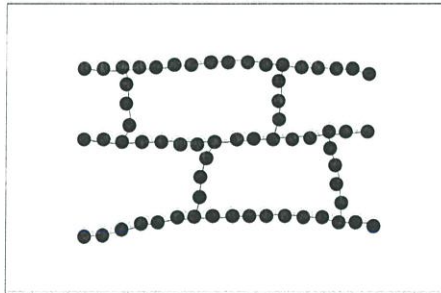
- แบบกิ่ง (Branched polymer) คล้ายแบบเชิงเส้นแต่จะมีกิ่งก้านยื่นออกมาจากสายโซ่หลัก ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์แบบกิ่งไม่สามารถจัดเรียงตัวได้แน่น ความเป็นผลึกจึงลดลง ทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ และจุดเดือดจุดหลอมเหลวจะต่ำกว่าพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง

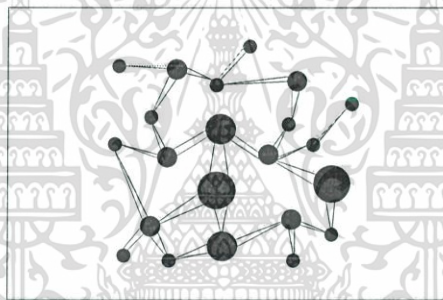
- แบบเชื่อมขวาง (Cross-Linked polymer) คือ พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยทั่วไปแล้วจะสามารถสังเคราะห์ได้โดยการเติมการอะตอมหรือโมเลกุลตัวเติมเพื่อให้เกิดพันธะโคเวเลนต์กับสายโซ่และทำให้อุณหภูมิสูง ตัวอย่างเช่น เมลามีน พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง

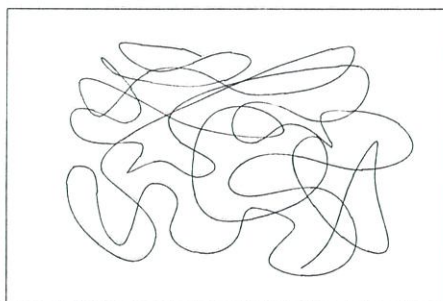
- แบบโครงข่าย (Network polymer) มีโครงสร้างเป็นแบบสามมิติ และพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางสูง อาจจัดเป็นพอลิเมอร์แบบโครงข่ายได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้ เช่น อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) ฟีนอล-ฟอร์มาดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 พอลิเมอร์แบบโครงข่าย

2. โครงสร้างผลึก เป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติทางกลและไฟฟ้าของพอลิเมอร์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

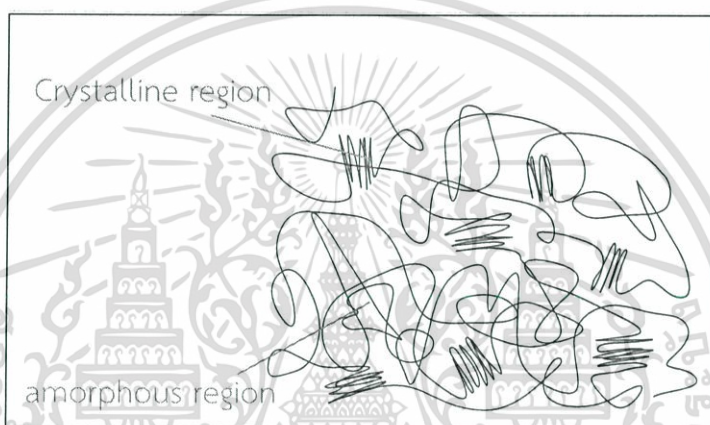
- แบบอสัณฐาน (Amorphous) เกิดจากการรวมกันของโมเลกุลแบบสายโซ่ยาวที่ไม่สมมาตรอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่แน่นอนเหมือนกับของเหลว เมื่อให้ความร้อนจะไม่ปรากฏจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน แต่จะค่อยๆ กลายเป็นของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบกึ่งผลึก (Partially crystalline) โครงสร้างแบบนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous region) และส่วนที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline region) เมื่อให้ความร้อนโมเลกุลในส่วนที่เป็นผลึกจะเสียไปกลายเป็นพอลิเมอร์นิ่มๆ จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทำให้โมเลกุลแบบผลึกหายไปหมด และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จะขึ้นกับปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ โดยยังมีปริมาณความเป็นผลึกมาก พอลิเมอร์ก็จะมีความแข็งแรง เนื่องจากอะตอมของพอลิเมอร์สามารถอยู่ชิดกันได้มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย แต่ในทางกลับกันพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อยก็จะสามารถตัดและแฉกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Partially crystalline)

### 2.2.2 ประเภทของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามการตอบสนองต่อความร้อน ได้แก่

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ยาวหรือแบบสาขา จึงมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก ทำให้สามารถหลอมเหลวหรืออ่อนตัวลงได้ เมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวหรือขึ้นรูปได้เมื่อทำให้เย็นลง โดยที่ไม่ทำลายโครงสร้างหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพอลิเมอร์นั้นๆ สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ จึงทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมในการนำขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้วน้ำ ขวดน้ำพลาสติก สายยาง รวมไปถึงของเล่นเด็กอีกด้วย

2. เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) มีโครงสร้างแบบโครงข่ายหรือแบบเชื่อมขวาง (cross-linked) โมเลกุลยึดจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงสูง ทำให้มีสถานะเป็นของแข็ง เมื่อถูกทำให้แข็งตัวลงหรือบ่มแล้ว จะคงรูปถาวรไม่สามารถนำมาหลอมเหลวหรือขึ้นรูปใหม่ได้ โดยจะสลายตัวหรือไหม้กลายเป็นเขม่าทันที เมื่อได้รับความร้อน ทำให้พลาสติกชนิดนี้มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี

### 2.2.3 พอลิเมอร์สังเคราะห์

พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมี โดยการนำสารมอนอเมอร์จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำให้มอนอเมอร์เหล่านั้นเกิดพันธะโคเวเลนต์เชื่อมต่อกันจนกลายเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ [2]

ปี ค.ศ.	ชื่อพอลิเมอร์	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
1909	ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)	ฉนวนหุ้มสายไฟ หูฟังโทรศัพท์
1927	พีวีซี (Polyvinyl chloride)	เสื้อกันฝน ท่อน้ำ
1936	อะคริลิก (Acrylic)	ป้าย เล็บปลอม สิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ
1938	ไนลอน (Polyamide)	เครื่องนุ่งห่ม เชือก ฉนวนในเครื่องซักผ้า
1938	พอลิสไตรีน (Polystyrene)	ภาชนะใส่อาหาร อุปกรณ์ครัว
1942	พอลิเอสเทอร์ (Polyesters)	ตัวถังเรือ พลาสติกย่อยสลายได้ วัสดุใช้แล้วทิ้ง
1942	พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	ขวดน้ำ ถุง
1943	ซิลิโคน (Silicone)	น้ำยาฉนวนในมอเตอร์
1947	เรซิน (Epoxy resin)	เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ต้องการความทนทาน กาว
1954	พอลิยูรีเทน (Polyurethane)	โฟมกันกระแทก
1957	พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)	หมวกเซฟตี้ ถุง
1957	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)	ส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า
1964	ไอออนอเมอร์ (Ionomer)	ลูกกอล์ฟ
1974	อโรมาติก พอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyester e.g. :PET)	ขวด PET
1985	พอลิคีโตน (Polyketone)	ส่วนประกอบในเครื่องยนต์
1985	Liquid crystalline polymers	จอแสดงผล LCD

### 2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ [1],[3]

เมื่อนำวัสดุพอลิเมอร์ไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ก็อาจจะเกิดแรงจากภายนอกมากระทำต่อมัน วัสดุพอลิเมอร์ก็จะแสดงพฤติกรรมทางกลออกมา เรียกว่า คุณสมบัติทางกล ซึ่งจะประกอบด้วย พารามิเตอร์ทางกลต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัด ความแข็งแรงการล้า และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะหาได้จากการทดสอบแรงเค้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียด ซึ่งคุณสมบัติทางกลส่วนใหญ่ มีความไวต่ออุณหภูมิ ต่อการเสีรูปร่าง และธรรมชาติทางเคมีของสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น ในสภาวะที่มีออกซิเจน ตัวทำละลายอินทรีย์ และสภาวะที่มีน้ำ เป็นต้น

กลไกการเกิดการเสีรูปร่างของวัสดุพอลิเมอร์จะส่งผลต่อสมบัติทางกล ซึ่งจะกล่าวถึงการเสีรูปร่างของวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกจะส่งผลกับคุณลักษณะทางกล และความแข็งแรง โดยคุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะพบว่าวัสดุพอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงแข็งดิ่งและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง แต่ความเหนียวจะเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ [4]

วัสดุ	ความ ถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสแรงดึง [ GPa (ksi) ]	ความทนแรงดึง [ MPa (ksi) ]	ความทน แรงคราก [MPa (ksi) ]	ความยืด ขณะแตกหัก (%)
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำ	0.917- 0.932	0.17-0.28 (25-41)	8.3-31.4 (1.2-4.55)	9.0-14.5 (1.3-2.1)	100-650
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นสูง	0.952- 0.965	1.06-1.09 (155-158)	22.1-31.0 (3.2-4.5)	26.2-33.1 (3.8-4.8)	10-1200
พอลิไวนิลคลอไรด์	1.30-1.58	2.4-4.1 (350-600)	40.7-51.7 (5.9-7.5)	40.7-44.8 (5.9-6.5)	40-80
พอลิสไตรีน	1.04-1.05	2.28-3.28 (330-475)	35.9-51.7 (5.2-7.5)	-	1.2-2.5
ไนลอน 6,6	1.13-1.15	1.58-3.80 (230-550)	75.9-94.5 (11.0-13.7)	44.8-82.8 (6.5-12)	15-300
พอลิพรอพิลีน	0.90-0.91	1.14-1.55 (165-225)	31-41.4 (4.5-6.0)	31.0-37.2 (4.5-5.4)	100-600
พีนอล ฟอร์มาลดีไฮด์	1.24-1.32	2.76-4.83 (400-700)	34.5-62.1 (5.0-9.0)	-	1.5-2.0
พอลิเอสเทอร์	1.29-1.40	2.8-4.1 (400-600)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	59.3 (8.6)	30-300
พอลิคาร์บอเนต	1.20	2.38 (345)	62.8-72.4 (9.1-10.5)	62.1 (9.0)	110-150

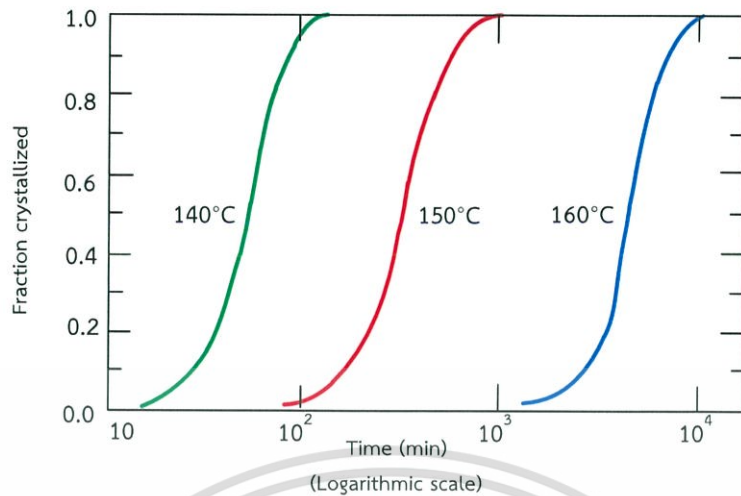
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 กระบวนการการเกิดผลึก การหลอมเหลว และการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จะมีความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะทางความร้อนและทางกลของวัสดุจะเริ่มจาก ปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอมเหลว และการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น ตามลำดับ ซึ่งการเกิดผลึกเป็นกระบวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบของวัฏภาคของแข็ง ที่มาจากขั้นตอนการเย็นตัวจากการหลอมเหลว และถ้าวัสดุได้รับความร้อน ก็จะทำให้เกิดการหลอมเหลวอีกครั้ง ส่วนการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่นจะเกิดกับวัสดุพอลิเมอร์แบบไม่เป็นรูปผลึก หลังจากการเย็นตัวจากการหลอมเหลว จะมีสถานะเป็นของแข็ง มักจะมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกับการหลอมเหลว โดยที่คุณสมบัติทางกายภาพแล้วทางเคมีจะมีการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการเกิดผลึก การหลอมเหลว และการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น

1. การเกิดผลึก (Crystallization) กระบวนการนี้จะเกิดในพอลิเมอร์ชนิดที่มีการหลอมเหลว ซึ่งผลึกจะเกิดขึ้นที่จุดเริ่มเกิดผลึก (Nucleation) และจะเกิดการขยายตัวของผลึกขึ้นเรื่อยๆ เรียกว่า กระบวนการเติบโต (Growth Process) เมื่อวัสดุพอลิเมอร์เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว จุดเริ่มเกิดจะก่อตัวขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ จากนั้นโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบจะเริ่มเรียงตัวจนเป็นระเบียบ ในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิเกินอุณหภูมิหลอมเหลว จะเกิดการสิ้นของอะตอมจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้จุดเริ่มเกิดผลึกไม่เสถียร และเมื่ออุณหภูมิลดลงก็จะเกิดจุดเริ่มเกิดขึ้นมาอีกครั้ง ซึ่งจะกล่าวได้ว่าอัตราการเกิดผลึกจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้ในกระบวนการ

2. เราสามารถศึกษากระบวนการเกิดผลึกได้โดยการนำเศษส่วนการเกิดผลึกมาพล็อตกราฟกับค่าล็อกของเวลาที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งจะกระบวนการเกิดผลึกจะอาศัยเวลาในแบบเดียวกับการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ในความเป็นจริงแล้วการเกิดผลึกของพอลิเมอร์สมบูรณ์ร้อยละ 100 นั้นเป็นไปได้ แต่ค่าเศษส่วนผลึกเท่ากับ 1 จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.7 นั้น ก็คือค่าระดับการเกิดผลึกสูงสุดที่ได้ระหว่างการทดสอบ เนื่องจากวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคผลึกมีปริมาตรที่แตกต่างกัน โดยปริมาตรของผลึกที่เกิดขึ้นในกระบวนการ จะสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของส่วนที่นำมาทดสอบ ส่วนอัตราการเกิดผลึกจะวัด ณ จุดที่มีการเกิดผลึกร้อยละ 50 และอัตราการเกิดผลึกนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิการเกิดผลึก ดังแสดงรูปที่ 2.7 นอกจากนี้จะเห็นว่าอัตราการเกิดผลึกจะแปรผกผันกับโมเลกุลของน้ำอีกด้วย



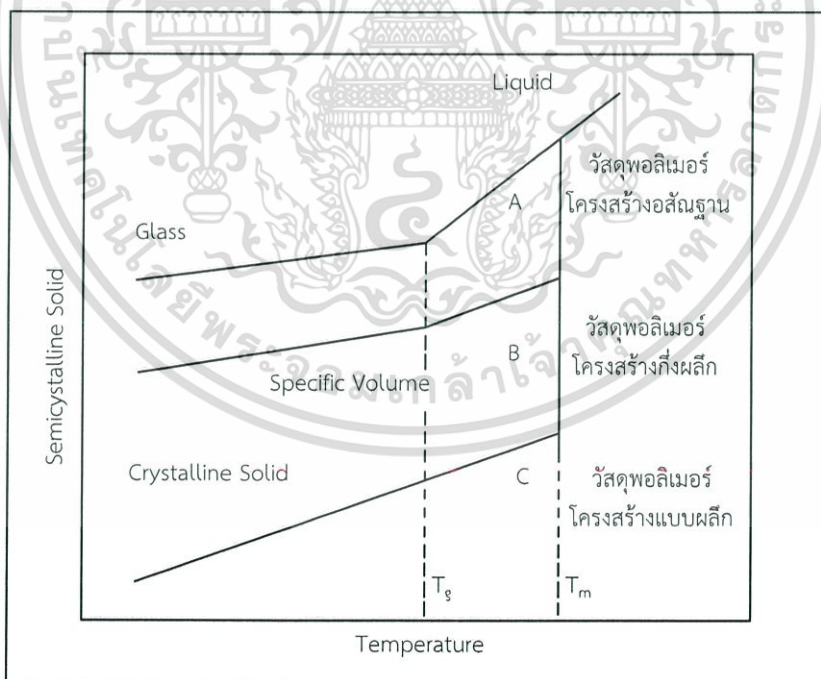
รูปที่ 2.7 กราฟเศษส่วนผลึกกับค่าล็อกของเวลาของ พอลิโพลีลีน ที่อุณหภูมิต่างๆ [4]

3. การหลอมเหลว (Melting) กระบวนการหลอมเหลวของผลึกพอลิเมอร์ ก็คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งที่มีโครงสร้างของโมเลกุลที่เรียงตัวเป็นระเบียบ ไปเป็นของไหลหนืด (Viscous liquid) ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ และมีคุณสมบัติความต้านทานการไหลในตัวมันเอง โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature;  $T_m$ ) โดยที่การหลอมเหลวของวัสดุพอลิเมอร์จะแปรตามอัตราอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือถ้าอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ก็จะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จะตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสมบัติของวัสดุ เช่น การอบอ่อนเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว แต่ก็สามารถทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นได้ หรือทำให้พอลิเมอร์ทนความร้อนได้สูงขึ้นได้ นอกจากนี้วัสดุพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่ต่างกัน จะทำให้มีลักษณะการหลอมเหลวที่ต่างกันด้วย

4. การเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น (Glass transition) กระบวนการนี้จะเกิดจากการเย็นตัวของวัสดุพอลิเมอร์จากสถานะของเหลวเป็นของแข็ง แต่ไม่เกิดเป็นรูปผลึก ซึ่งจะเกิดเฉพาะในพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน นั่นคือในช่วงที่มีการเย็นตัวของวัสดุ สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบในลักษณะสามมิติได้ และจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนค่อยๆ เปลี่ยนจากของเหลวที่มีความหนืดคล้ายยางและกลายเป็นของแข็งในที่สุด โดยอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพดังกล่าว เรียกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass transition Temperature;  $T_g$ ) ในทางกลับกัน หากวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความร้อนที่มากกว่าอุณหภูมิดังกล่าว ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่นได้เช่นกัน

ในการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์ จะมีตัวแปรสำคัญทางอุณหภูมิตั้งเป็นขีดจำกัดบนและล่างของวัสดุที่จะกำหนดการใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการหลอม และเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น ซึ่งนิยามอุณหภูมิทั้งสองจะมีอิทธิพลมาก โดยเฉพาะกับพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ และวัสดุประกอบพอลิเมอร์อีกด้วย

อุณหภูมิหลอมเหลว และการเปลี่ยนสภาพของพอลิเมอร์จะมีวิธีการวัดเช่นเดียวกับวัสดุเซรามิก โดยการพล็อตปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น เทียบกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยกราฟ A และ C เป็นพอลิเมอร์โครงสร้างพื้นฐาน และแบบผลึกตามลำดับ สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิหลอมเหลว  $T_m$  ส่วนกราฟของวัสดุออสัญฐานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องแต่มีการลดลงของความชันที่อุณหภูมิ  $T_g$  โดยพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกจะพบทั้งพฤติกรรมการหลอมเหลว  $T_m$  และการเปลี่ยนสภาพ  $T_g$  ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุภาคผลึก และออสัญฐานตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมในรูปที่ 2.8 ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวหรืออัตราการให้ความร้อน ในตารางที่ 2.3 แสดงคุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า และในตารางที่ 2.4 แสดงค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของพอลิเมอร์บางชนิด



รูปที่ 2.8 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า [3]

วัสดุ	XLPE	PE	PVC	ยาง Butyl	ยาง EP	ยาง CR
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	0.92	0.92	1.2-1.5	1.4-1.5	1.3-1.4	1.4-1.6
ความคงทนฉนวนไฟฟ้า (Dielectric Strength: kV/mm)	50	30-50	20-35	20-30	30-45	15-25
ค่าความต้านทานปริมาตร (Volume Resistivity : ohm)	1,018	1,018	1,012	1,015	1,015	107-12
ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)	2.3	2.3	5-9	4-5	4-5	7-10
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor :%)	0.03	0.03	4-12	1-3	1-2	>10
ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength :kg/mm <sup>2</sup> )	1.4-1.8	1.2- 1.5	1.0-2.5	0.4-0.7	0.4-0.9	1.2-2.0
อุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	90	75	60-75	80	90	75
ความต้านทานไฟ (Flame Resistivity)	NG	NG	E	NG	NG	E
การเปลี่ยนรูปจากความร้อน (Heat Deformation)	F	G	G	G	F	G
ค่าความต้านทานโอโซน (Ozone Resistivity)	F	F	G	F	F	G
ความคงทนต่อสภาพอากาศ (Weather proof)	G	G	F	F	F	F
ค่าความต้านทานน้ำมัน (Oil Resistivity)	E	E	F	NG	NG	G

เมื่อ E : ยอดเยี่ยม

F : ดี

G : พอใช้

NG : ไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ  $T_g$  และ  $T_m$  ของวัสดุพอลิเมอร์ [3]

วัสดุ	อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ คล้ายแก้วยืดหยุ่น ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )
พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE)	-125	110
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	-110	115
พอลิเทระฟลูออโรเอทิลีน	-97	327
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	-90	137
พอลิพรอพิลีน	-18	175
ไนลอน	57	265
พอลิเอสเทอร์ (PET)	69	265
พีวีซี	87	212
พอลิสไตรีน	100	240

## 2.4 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [3]

พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermo plastic) ที่พบอยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวัน และสามารถพบเห็นอย่างกว้างขวางมากกว่าพลาสติกประเภทอื่นๆ เนื่องจากผลิตง่าย และมีความเสถียรสูง มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีความเหนียว มีความทนทานต่อแรงดึงปานกลาง สามารถเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และมีความคงทนต่อสภาวะการใช้งานภายใต้อุณหภูมิปกติ จึงได้มีการพัฒนาพอลิเอทิลีนให้เป็นวัสดุฉนวนของสายเคเบิลสำหรับใช้งานที่มีความถี่สูง ถ้ามีความหนาแน่นต่ำจะใส และเมื่อความหนาแน่นสูงจะขุ่น ซึ่งในภาวะปกติพอลิเอทิลีนจะไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่ถ้าหากอุณหภูมิสูงกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  จะเริ่มเกิดการหลอมละลาย ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ถังพลาสติก ท่อและรางน้ำเครื่องใช้ในครัวเรือน ฉนวนหุ้มสายไฟ สายเคเบิล เป็นต้น นอกจากนี้ คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเอทิลีนก็ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ของโมเลกุล ได้แก่ โครงสร้างของผลึก ขอบเขต ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุล ในปัจจุบันวัสดุพอลิเอทิลีนที่ใช้งานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

### 1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE)

พอลิเอทิลีน ชนิด HDPE มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งก้านสาขาน้อย จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลรวมไปถึงความหนาแน่นค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง มีสีขาวขุ่น และโปร่งแสง สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ HDPE ทนทานต่อสารเคมี และตัวทำละลายหลายชนิด ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ของเด็กเล่น เครื่องใช้ในบ้าน ฉนวนไฟฟ้า หรือชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า HDPE มีเครื่องหมายสัญลักษณ์ในการใช้ Recycle คือ หมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

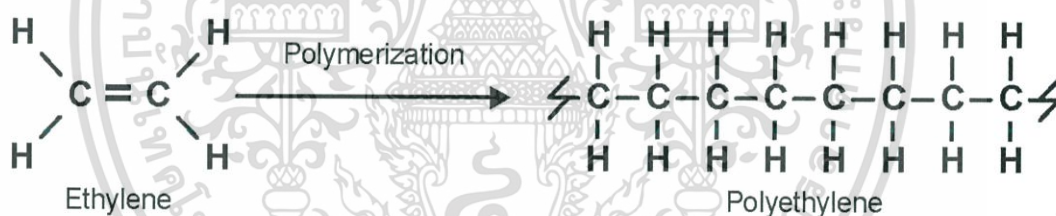
## 2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE)

เป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี มีความคงทนต่อการแตก มีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE ทนสารเคมีได้ดี ทนอุณหภูมิสูงถึง 95 °C ในช่วงสั้นๆได้ เริ่มหลอมตัวที่อุณหภูมิ 120 °C และทนความเย็นได้ถึง -50 °C LDPE มีสีขาว ลักษณะขุ่น โปร่งแสง มีความเหนียวและยืดหยุ่น จึงเหมาะสำหรับผลิตแผ่นฟิล์มต่างๆ ถุงเย็น ฉนวนหุ้มสายไฟ สายเคเบิล เป็นต้น LDPE มีเครื่องหมายสัญลักษณ์ในการใช้ Recycle คือหมายเลข 4

## 3. พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ (Linear low-density polyethylene; LLDPE)

LLDPE เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น คุณสมบัติจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง LDPE และ HDPE แต่จะนิ่มและเหนียวกว่า LDPE และ HDPE ตอบสนองการใช้งานหลายประเภท เช่น งานฟิล์ม งานฉีต งานเข้าแบบ และงานหมุนเข้าแบบ นิยมแปรรูปเป็นฟิล์มถึง 65% อาทิเช่น ฟิล์มหด (Shrink film) ถุงบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักสูง และมักถูกใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ เช่น บรรจุอาหารแช่แข็ง

สำหรับโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์จากการรวมตัวของมอนอเมอร์ของวัสดุประกอบเอทิลีนที่มีรูปแบบของโมเลกุล คือ  $C_2H_4$  หรือ  $CH_2=CH_2$  โดยโมเลกุลของพอลิเอทิลีนจะอยู่ในรูปของสายโซ่โมเลกุลที่ประกอบด้วย มอนอเมอร์ของคาร์บอนหนึ่งอะตอม และมอนอเมอร์ของไฮโดรเจนสองอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.9

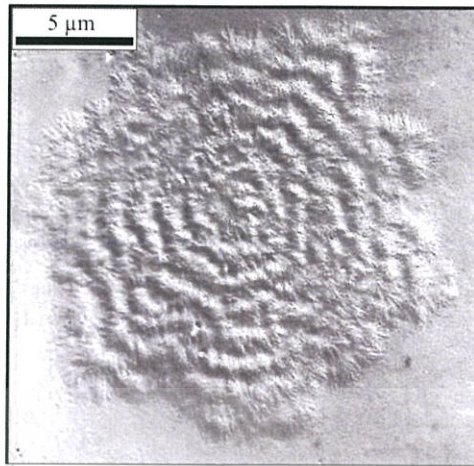


พอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกนำไปใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสม และขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ แต่วัสดุพอลิเอทิลีนที่นิยมนำไปใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked polyethylene; XLPE)

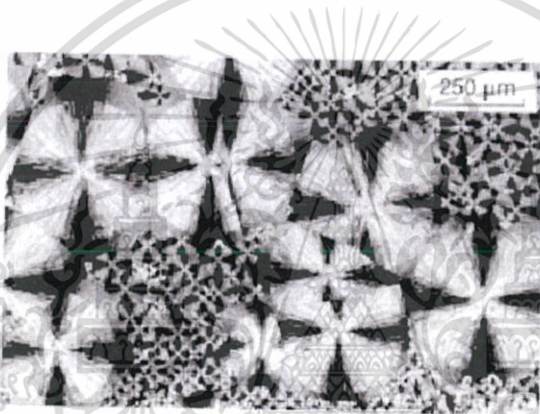
### 2.4.1 การเสียรูปของพอลิเอทิลีน (Polyethylene deformation)

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่มีขีดแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และมี โครงสร้างแบบสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และหลายๆ สเฟียรูไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแต่ละสเฟียรูไลต์ประกอบด้วย Chain-folded ribbon หรือลามลาร์ (Lamellar) จำนวนมากที่แผ่ออกจากจุดกึ่งกลาง โดยการจัดเรียงตัวของลามลาร์แสดงดังรูปที่ 2.12 จะเชื่อมด้วยโซ่เชื่อม (Tie chain) ผ่านบริเวณของสัณฐานซึ่งก็คือบริเวณอื่นนอกจากจุดที่เป็นลามลาร์นั่นเอง

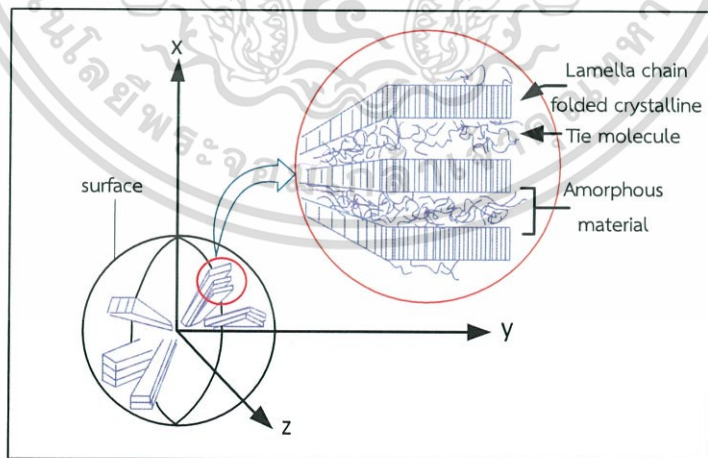
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างสเฟียรูไลต์ของพอลิเอทิลีน [8]

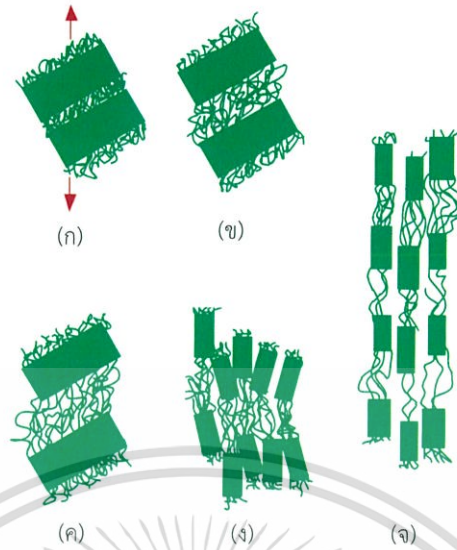


รูปที่ 2.11 กลุ่มของโครงสร้างสเฟียรูไลต์ของพอลิเอทิลีน [9]



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงรายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงกระบวนการเสีรรูปของพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึก [11]

กระบวนการเสีรรูปของพอลิเอทิลีน เป็นการเสีรรูปจากแรงดึงของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก โดยเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างชั้นลามลาร์ และบริเวณที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะแบ่งเป็นหลายขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ก่อนเริ่มกระบวนการเสีรรูป โครงสร้างปกติจะเป็นลักษณะที่มีลามลาร์ริบบอนสองชุดกับบริเวณอสัณฐานที่อยู่ระหว่างลามลาร์ แสดงในรูปที่ 2.13 (ก) เมื่อเริ่มเกิดการเสีรรูปดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) เกิดการยืดออกจากกันของลามลาร์ริบบอนและบริเวณอสัณฐาน และการเสีรรูปในชั้นถัดมา จะเกิดการเอียงของลามลาร์ส่งผลให้ Fold chain เกิดการเรียงตัวในแนวของแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ค) จากนั้นบริเวณของชุดผลึกจะแยกออกจากลามลาร์เป็นส่วนๆ แต่ยังมีโซ่เชื่อม (Tie chain) เชื่อมกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ง) ในขั้นสุดท้ายชุดผลึกและ Tie chain จะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแนวแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (จ) ในระหว่างกระบวนการเสีรรูป จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกลของพอลิเอทิลีน ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้พอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกได้ จากการเชื่อมขวางให้แก่โมเลกุลของพอลิเอทิลีน ซึ่งกระบวนการเชื่อมขวางจะทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น

## 2.5 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล [3]

สายเคเบิลแรงสูงส่วนใหญ่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน และทำให้เกิดความน่าเชื่อถือในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ในการออกแบบสายเคเบิลตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันจะยังคงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากเท่าไร แต่จะมีการปรับปรุงในเรื่องของอายุการใช้งาน การค้นพบของวัสดุฉนวนชนิดใหม่ๆ และกระบวนการผลิตที่หลากหลาย ในรูปที่ 2.14 จะแสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE ที่ประกอบไปด้วย ตัวนำ เครื่องป้องกันตัวนำ ฉนวน เครื่องป้องกัน เครื่องป้องกันเคเบิลหรือเครื่องป้องกันโลหะ เครื่องห่อหุ้ม Separator tape และเปลือกนอก



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน [10]

### 1. ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)

ตัวนำไฟฟ้า คือ วัสดุที่สามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ได้ง่าย หรือวัสดุที่มีความต้านทานต่ำ โดยทั่วไปจะนิยมใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ทำมาจากทองแดงและอลูมิเนียม แต่ที่นิยมใช้กันมากคือตัวนำที่ทำมาจากอลูมิเนียม เพราะเมื่อเปรียบเทียบในกรณีกระแสเท่ากันแล้ว ตัวนำที่ทำจากอะลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและราคา

ถูกกว่าตัวนำที่ทำจากทองแดง อย่างไรก็ตาม ทองแดงมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและความร้อนดีกว่าอลูมิเนียม ดังนั้นจะใช้สายตัวนำทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าสายอลูมิเนียมเพื่อรองรับการส่งผ่านกระแสที่เท่ากัน สายตัวนำโดยทั่วไปแล้วจะมีโครงสร้างเป็นสายตัวนำเดี่ยวตันรูปวงกลม หรือวงรี (Round or oval conductor single strand) ตัวนำเดี่ยวกลวง (Hallow conductor) สายตัวนำที่เกลียวแบบธรรมดา (Strand round conductor) หรือแบบอัด (Profile wire conductor) จะทำให้ตัวนำยึดติดกันมากขึ้น รูปร่างของตัวนำที่เปลี่ยนจากหน้าตัดกลมเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูจะช่วยลดช่องว่างระหว่างตัวนำเล็กๆ ที่นำมาตีเกลียวรวมกันได้ ในการตีเกลียวอาจจะทำเป็นส่วนเชิงเมนต์ก็ได้

แล้วประกอบกันขึ้นเป็นตัวนำแบบเชิงเมนต์ (Segmental conductor) เพื่อลดความสูญเสีย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปสายเคเบิลอาจแบ่งออกเป็นสายเคเบิลตัวนำเดี่ยว (Single-core cable) หรือตัวนำแบบ 3 แกน (Three-core cable)

จากคุณสมบัติของตัวนำทองแดง และตัวนำอลูมิเนียมที่มีความแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.6
พื้นที่หน้าตัด (ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.66
เส้นผ่าศูนย์กลาง (ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.29
น้ำหนัก (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.3
น้ำหนัก (ความต้านทานเท่ากัน)	1	0.5

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (%IACS)	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 °C ( $\Omega \cdot m$ )	$1.724 \times 10^{-8}$	$2.803 \times 10^{-8}$
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ( $1/^{\circ}C$ )	$1.70 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-5}$
จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}C$ )	1083	659
ความนำความร้อน ( $W/cm \cdot ^{\circ}C$ )	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20 °C ( $g/cm^3$ )	8.89	2.7

## 2. เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor shield)

เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconducting screen, Semiconducting shield หรือ semicon) เคลือบอยู่บนผิวของตัวนำ ทำหน้าที่ลดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอยต่อของตัวนำกับฉนวน โดยควบคุมไม่ให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างชั้นรอยต่อดังกล่าว ป้องกันไม่ให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วน นอกจากนี้แล้วชั้นสารกึ่งตัวนำจะช่วยควบคุมสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 สายเคเบิล XLPE เป็นฉนวนจะใช้เครื่องป้องกันตัวนำที่ทำมาจากพอลิเมอร์ สารกึ่งตัวนำ (Semiconducting polymer) ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอนแบล็กหรือผงเขม่าเป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของคาร์บอนแบล็กในพอลิเมอร์จะเป็นตัวควบคุมความนำไฟฟ้าของ พอลิเมอร์สารกึ่งตัวนำ เครื่องป้องกันตัวนำจะใช้กับสายเคเบิลที่มีพิกัดแรงดันใช้งานมากกว่า 2 kV ปัจจุบันเครื่องป้องกันตัวนำแบบเรียบมาก (Super smooth conductor screen) ได้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาใช้งาน ซึ่งจะมีคุณสมบัติดีกว่าเครื่องป้องกันตัวนำแบบเดิม

### 3. ฉนวน (Insulation)

ฉนวนของสายเคเบิลในยุคเริ่มต้นเป็นฉนวนกระดาษที่ผ่านการจุ่มหรือชุบฉนวนเหลว (Fluid – impregnated paper) ซึ่งถูกพัฒนาและใช้งานมาเป็นเวลากว่าร้อยปีแล้ว อุณหภูมิของฉนวนดังกล่าวนี้เมื่อทำงานเป็นพิกัดประมาณ 80-90 °C มีความน่าเชื่อถือสูง ฉนวนประเภทนี้มีปัญหาเพียงประการเดียวเท่านั้นคือ การที่ปลอกตะกั่วซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันเคเบิล เกิดการกัดกร่อนหรือรอยแยก (Crack) ทำให้ความชื้นสามารถซึมผ่านเข้ามาในฉนวนกระดาษได้ เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดปกติ (fault) ขึ้น ปัจจุบันเคเบิลฉนวนกระดาษได้รับความนิยมน้อยลง เนื่องจากผู้คนให้ความสำคัญกับสภาพแวดล้อมมากขึ้น รวมทั้งความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับเคเบิลชนิดนี้จะสูงกว่าเคเบิลที่ใช้ฉนวนแบบพอลิเมอร์ นอกจากนี้แล้วการขาดผู้เชี่ยวชาญเฉพาะเกี่ยวกับเคเบิลฉนวนกระดาษ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ดูแลบำรุงรักษามีราคาสูง ฉนวนแข็งที่ใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ Polyethylene (PE), Crosslink polyethylene (XLPE), และ Water tree retardant cross-linked polyethylene (WTR – XLPE) โดยที่ PE สามารถใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 75 °C จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานแทนเคเบิลฉนวนกระดาษ รวมทั้งการที่ PE มีคุณสมบัติด้อยในเรื่องของความต้านทานต่อการเกิดร่องรอยบนผิวเนื่องจากไฟฟ้า (Electrical tracking resistance) ซึ่งจะเป็นสาเหตุของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอนาคตของการใช้งานฉนวน PE วิศวกรผู้ผลิตจึงหันมาใช้ฉนวน XLPE ซึ่งสามารถใช้งานแทนในสภาวะปกติได้ที่อุณหภูมิ 90 °C และที่สภาวะลัดวงจรพิกัดอุณหภูมิสูงสุดถึง 250 °C XLPE มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลระดับแรงดันตั้งแต่ 600 V – 500 kV แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานฉนวน XLPE อาจเผชิญกับปัญหาต้นไม้น้ำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาฉนวน XLPE ที่สามารถลดปัญหาพฤติกรรมการเกิด ต้นไม้น้ำ ได้ในระดับหนึ่งคือฉนวนแบบ WTR – XLPE ซึ่งคาดว่าฉนวนชนิดนี้น่าจะมีบทบาทสูงในอนาคต ซึ่งในตารางที่ 2.7 จะแสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตารางที่ 2.8 แสดงความหนาฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) และ ตารางที่ 2.9 แสดงอุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนผสมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร (°C)	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.4	0.92
ความนำความร้อน (cal/cm.sec °C)	3.5	8
ความต้านทานต่อแรงดึง (kg/mm <sup>2</sup> )	2.5	3

ตารางที่ 2.8 ความหนาฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

Nominal cross sectional area of conductor (mm <sup>2</sup> )	Nominal thickness of insulation at rated voltage U <sub>0</sub> /U (U <sub>m</sub> )				
	3.6/6(7.2) kV (mm)	6/10(12) kV (mm)	8.7/15(17.5) kV (mm)	12/20(24) kV (mm)	18/30 (36) kV (mm)
10	2.5	-	-	-	-
16	2.5	3.4	-	-	-
25	2.5	3.4	4.5	-	-
35	2.5	3.4	4.5	5.5	-
50-185	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0
240	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0
300	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0
400	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0
500-1600	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 อุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนผสมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

ฉนวนผสม	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ °C	
	Normal Operation	Short-circuit (≤5 วินาที)
Polyvinyl chloride (PVC/B)		
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ $\geq 300 \text{ mm}^2$	70	160
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ $\leq 300 \text{ mm}^2$	70	140
Cross-linked polyethylene (XLPE)	90	250
Ethylene propylene rubber (EPR และ HEPR)	90	250

#### 4. เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation shield)

ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกันกับเครื่องป้องกันตัวนำ และยังทำหน้าที่คล้ายกัน คือ จะป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างฉนวนกับเครื่องป้องกันเคเบิล รวมทั้งควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าให้อยู่ภายในเคเบิลเท่านั้น เมื่อเครื่องป้องกันเคเบิลได้ถูกต่อลงกราวด์ เครื่องป้องกันฉนวนรวมทั้งเครื่องป้องกันตัวนำ นอกจากจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีแล้วยังต้องมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีอีกด้วย

#### 5. เครื่องป้องกันเคเบิลหรือเครื่องป้องกันโลหะ (Cable screen, Metal sheaths)

เครื่องป้องกันเคเบิลทำมาจากทองแดง ตะกั่ว หรืออลูมิเนียม อาจเป็นลวด เทป หรือปลอกคลุมสาย อยู่ชั้นถัดมาจากเครื่องป้องกันฉนวน ปกติแล้วจะต่อกราวด์ที่เครื่องป้องกันเคเบิล ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องป้องกันฉนวนมีศักย์เป็นกราวด์อยู่เสมอ เครื่องป้องกันเคเบิลหรือเครื่องป้องกันโลหะนั้น ทำหน้าที่เป็นทางเดินกระแสชาร์จประจุ (Capacitive charging current) นำกระแสผิดพลาด (Fault current) หรือกระแสไม่สมมาตร (Unbalance current) ของสายเคเบิลระบบ 3 เฟสลงดิน และทำหน้าที่ป้องกันอันตรายจากการสัมผัสสายเคเบิลอย่างไม่ตั้งใจ ป้องกันความชื้นแทรกซึมเข้าไปในเนื้อฉนวน รวมทั้งปัญหาการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม และยังช่วยป้องกันปัญหาทางกลที่เกิดจากการดึงสายเคเบิลอีกด้วย สายเคเบิลฉนวนกระดาดจะใช้ชีลด์ในรูปปลอกตะกั่ว ในขณะที่สายเคเบิลฉนวน XLPE จะใช้ลวดทองแดงและพันเทปด้วยเทปทองแดงอีกที เพื่อเพิ่มคุณลักษณะความสามารถความคงทนต่อแรงทางกล ลักษณะรูปร่างของเครื่องป้องกันโลหะจะเป็นแบบคอรูเกต (Corrugate)

#### 6. เครื่องห่อหุ้ม (Outer covering หรือ Over sheaths)

เป็นเครื่องห่อหุ้มโลหะ (Metallic armoring) ใช้กับสายเคเบิลที่ต้องการเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันทางกลเนื่องจากแรงทางกล ความดันหรือความเครียดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ ยกตัวอย่างเช่น สายเคเบิลที่ใช้ใต้ทะเลจะได้รับแรงดันเนื่องจากน้ำหนักทะเลอีกด้วย การใช้เครื่องป้องกันเคเบิลที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอกอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวคงไม่เพียงพอ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องหุ้มโลหะอีกชั้นหนึ่ง เพื่อช่วยป้องกันผลกระทบทางกลที่เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งช่วยปกป้องผลการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมอีกด้วย

#### 7. Separator tape

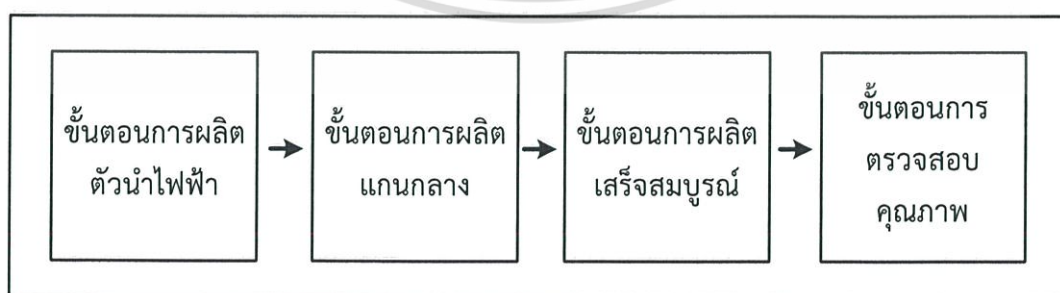
อาจทำจากผ้าหรือ Polyester tape (เช่น Mayer) มีหน้าที่ป้องกันสิ่งต่างๆที่จะมีผลต่อสภาพฉนวน และตัวกันโลหะ นอกจากนั้นยังช่วยรัดเครื่องหุ้มโลหะให้แน่น และช่วยให้เครื่องหุ้มโลหะหรือเครื่องป้องกันเคเบิลไม่ติดกับเปลือกนอก (Jacket) ทำให้ไม่เกิดร่องที่ด้านในของเปลือกนอก

#### 8. เปลือกนอก (Jacket)

เป็นชั้นนอกสุดของสายเคเบิล ทำหน้าที่ป้องกันทางกล การเสียดสี ความชื้นหรือการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อม เปลือกนอกอาจทำมาจาก PVC, Chlorosulfonated PE, PE, LLDPE, MDPE, HDPE หรือไนลอน พื้นที่ช่องว่างระหว่างเครื่องหุ้มกับเปลือกนอกอาจจะเติม Super – absorbent polymer ลงไป เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องมือป้องกันน้ำหรือความชื้นอีกชั้นหนึ่ง การใช้งานสายเคเบิลในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเช่น บริเวณที่มีฟ้าผ่าบ่อยๆ เปลือกนอกที่ใช้อาจจะเป็นประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconducting jacket) หรือไม่ก็อาจจะใช้เครื่องหุ้มสารกึ่งตัวนำ (Semiconductive over sheath) เลยก็ได้ การเลือกใช้วัสดุมาทำเปลือกนอกที่เหมาะสมจะช่วยให้อายุการใช้งานของเคเบิลยาวขึ้น

### 2.6 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิล [3]

ในการผลิตสายเคเบิลแรงสูงนั้นจะมีขั้นตอนการผลิตหลากหลายขั้นตอนและซับซ้อน ทั้งนี้ความยากง่ายในการผลิตจะขึ้นอยู่กับการใช้งานของสายเคเบิลนั้นๆ เช่น เคเบิลใต้ดิน เคเบิลทนความร้อน เคเบิลหุ้มเกราะ เป็นต้น เนื้อหาในบทนี้จะมุ่งเน้นเคเบิลที่มีฉนวนแบบพอลิเอทิลีนเท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันมีความนิยมในการผลิตเคเบิลแบบฉนวน XLPE ซึ่งการผลิตนี้จะมีขั้นตอนหลักทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้ถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งเพราะตัวนำไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการเลือกใช้วัสดุในการผลิตตัวนำไฟฟ้านั้น จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและความคุ้มค่าในการใช้งาน ซึ่งสายเคเบิลใต้ดินนั้นโดยทั่วไปจะนิยมใช้ทองแดงเป็นตัวนำ

สำหรับขั้นตอนการผลิตตัวนำนั้น จะสร้างโดยการนำแผ่นทองแดงไปหลอมละลายด้วยอุณหภูมิถึง  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วทำให้เป็นเส้นที่มีขนาดหนึ่ง แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องรีดเส้นเพื่อลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายทองแดงให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นจึงนำไปอบเพื่อให้เส้นลวดทองแดงมีความยืดหยุ่น จากนั้นจึงนำเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการรีดและอบมาทำการตีเกลียวเพื่อให้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในสายไฟ โดยจะขึ้นรูปให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

ขั้นตอนการผลิตแกนกลางเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการผลิต เนื่องจากในการผลิตแกนกลางนี้จะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพและค่าความน่าเชื่อถืออย่างมาก แกนกลางของสายเคเบิลจะประกอบด้วย ตัวนำไฟฟ้า กำบังตัวนำ ฉนวน เครื่องป้องกันฉนวน ซึ่งมีขั้นตอนทั้งหมด 3 ขั้นตอนดังนี้

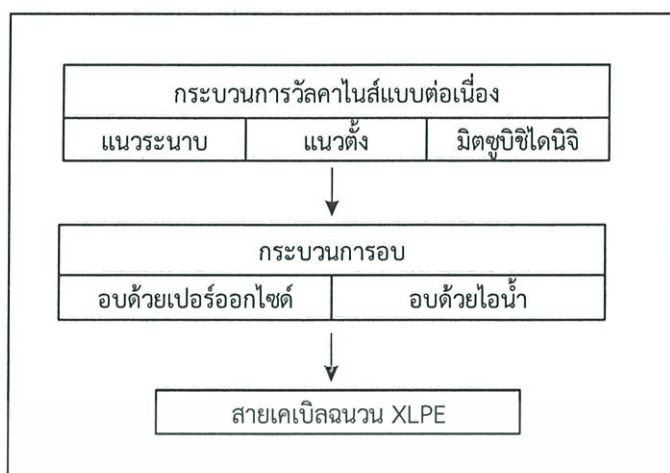


รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า

1. การขึ้นรูป 3 ชั้น เป็นการหุ้มเครื่องป้องกันฉนวนให้แก่ตัวนำไฟฟ้าต่างๆ โดยเริ่มแรกจะนำเม็ดพอลิเมอร์สีต่างๆ และสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ามาเข้าสู่เครื่องอัดรีดในช่องลำเลียง โดยเม็ดพอลิเมอร์ที่นำมาใส่จะถูกหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง และบีบอัดด้วยสกรูหมุนวนที่มีความร้อนสูง เมื่อถูกหลอมละลายจนหมดแล้วถูกบีบอัดสู่ปลายกระบอกของเครื่องอัดขึ้นรูป โดยจะมีตัวกรองสิ่งสกปรกหรือสิ่งที่เจือปนมาออกไป เพื่อให้พอลิเมอร์ที่หลอมละลายมีความสะอาดของฉนวน และไม่มีสิ่งเจือปนที่อาจจะส่งผลต่อการเป็นฉนวนไฟฟ้าได้

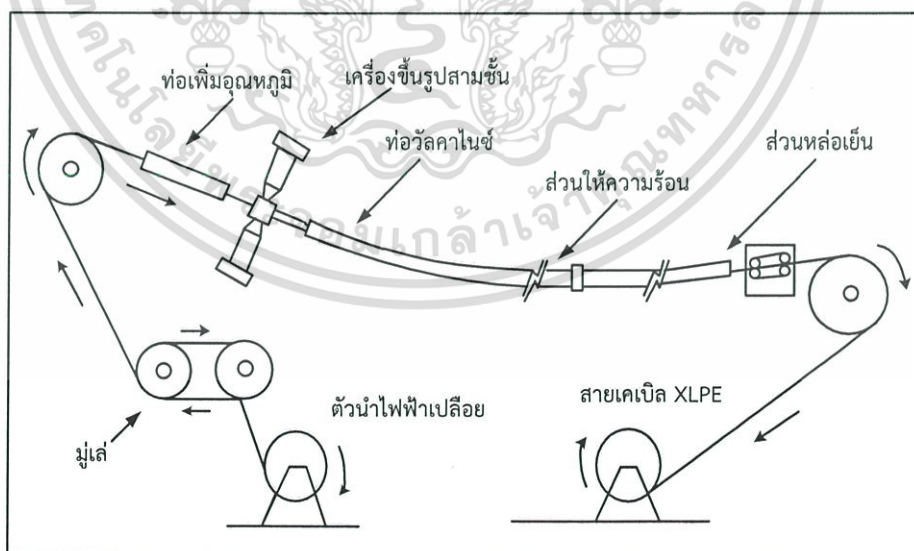
2. การเชื่อมขวาง จะทำเป็นกระบวนการต่อมา โดยทำหลังจากการที่ได้สายเคเบิลที่มีแกนกลาง 3 ชั้นแล้ว โดยขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่หุ้ม โดยในตอนแรกพอลิเมอร์ที่หุ้มนั้นมีความทนความร้อนไม่สูงนัก จึงนำมาแก้ไขและปรับปรุงด้วยวิธีการนี้ เพื่อให้เปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซต โดยใช้กระบวนการอบและกระบวนการวัลคาไนส์ เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กระบวนการวัลคาไนส์แบบต่อเนื่อง

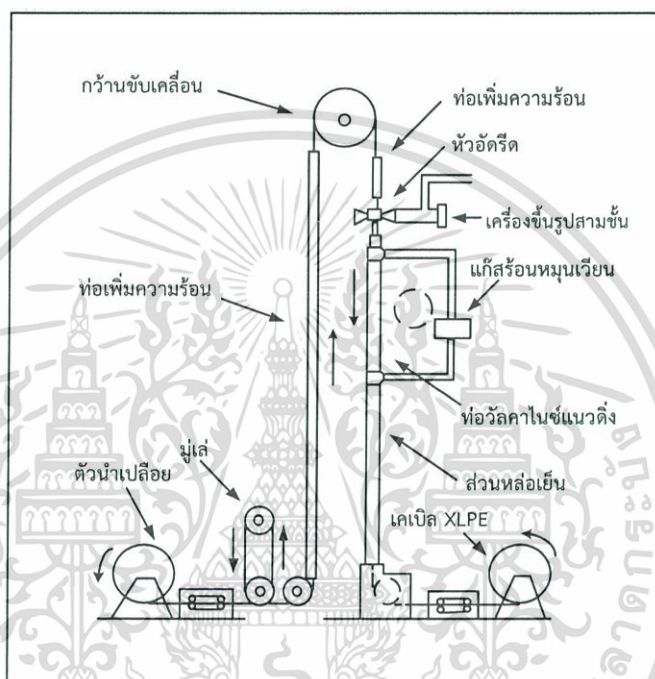
กระบวนการวัลคาไนส์ต่อเนื่องแบบในแนวระนาบ (Catenary continuous vulcanization; CCV) คือกระบวนการที่นำสายเคเบิล PE ไปทำการเชื่อมขวาง โดยลำเลียงในแนวระนาบเพื่อนำไปอบ ซึ่งโดยการอบนั้นมีด้วยกัน 2 วิธี คือ แบบอบแห้งโดยใช้ไนโตรเจนความดันสูง และแบบที่สอง คืออบไอน้ำ 300 °C เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบแล้วจำลำเลียงไปหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิลง ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถผลิตได้รวดเร็วและได้ในปริมาณที่มาก แต่เนื่องด้วยปัญหาในการลำเลียงแบบระนาบทำให้เกิดระยะตกท้องช้าง จึงไม่สามารถผลิตสายเคเบิลที่มีขนาดแรงดันเกิด 150 kV ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การผลิตสายเคเบิลโดยกระบวนการวัลคาไนส์ต่อเนื่องในแนวระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการวัลคาไนส์ต่อเนื่องแบบในแนวตั้ง (Vertical continuous vulcanization; VCV) คือกระบวนการที่นำสายเคเบิล PE ซึ่งมีหลักการคล้ายกันกับ CCV แต่จะลำเลียงในแนวตั้งซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาตกท้องช้าง วิธีนี้จึงสามารถผลิตสายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำมากกว่า 1600 mm หรือความหนาของฉนวน 35 mm โดยวิธีนี้ได้รับความนิยมในการผลิตสายเคเบิลที่มีแรงดันสูงพิเศษ แต่เนื่องด้วยการลำเลียงในแนวตั้งนี้จะต้องก่อสร้างโรงงานที่มีความสูงมาก ซึ่งค่าก่อสร้างของโรงงานนี้จะมีราคาที่สูงกว่าการก่อสร้างโรงงานที่ลำเลียงในแนวระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การผลิตสายเคเบิลโดยกระบวนการวัลคาไนส์ต่อเนื่องในแนวตั้ง

3. ขั้นตอน Degassing เป็นขั้นตอนในการกำจัดหรือลดสารประกอบบางชนิดในเนื้อฉนวน XLPE ที่อาจจะเกิดขึ้นจากขั้นตอนการเชื่อมขวาง เช่น สารเมทิลสไตรีน สารอะซีโตฟีโนล สารมีเทน เป็นต้น ซึ่งสารต่างๆอาจจะส่งผลต่อความเป็นฉนวนของเนื้อฉนวนได้ โดยอุตสาหกรรมการผลิตสายเคเบิลทั่วไปนั้นจะขจัดสารต่างๆ ที่ไม่ต้องการนี้ โดยจะเก็บสายเคเบิลไว้สักระยะเวลาหนึ่งประมาณ 7 วัน ก่อน แล้วจึงนำมาทดสอบขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลเสร็จสมบูรณ์

หลังจากขจัดสารที่ไม่ต้องการโดยวิธี Degassing แล้วจะนำสายเคเบิลเหล่านั้นมาตรวจสอบคุณภาพ และนำไปหุ้มเครื่องป้องกันโลหะ หรือเครื่องป้องกันเคเบิล และหุ้มฉนวนภายนอกอีกชั้น โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งานของสายเคเบิล ซึ่งจะมีการหุ้มในชั้นต่างๆ ที่ต่างกันออกไป

- ขั้นตอนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ

จะต้องถูกนำมาตรวจสอบคุณภาพของสายเคเบิลนั้นๆ เมื่อผ่านการผลิตมาถึงขั้นตอนนี้แล้ว เพื่อให้แน่ใจว่าสายเคเบิลนั้นจะสามารถนำใช้งานได้จริง และมีคุณภาพที่ดีครบถ้วนตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้ โดยการตรวจสอบคุณภาพนั้นจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของตัวนำไฟฟ้า การดิสชาร์จ บางส่วน ช่องว่างในเนื้อฉนวน สิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวน ขนาดของสายและฉนวน รอยถลอกหรือ รอยขีดข่วนต่างๆ โดยมีการตรวจสอบตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

## 2.7 สนามไฟฟ้า [5]

ในการออกแบบและทดสอบสายเคเบิลนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงประการแรก คือฉนวน ดังนั้น การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับฉนวน และความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นของฉนวน จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้เราสามารถวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลได้

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field)
3. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field)

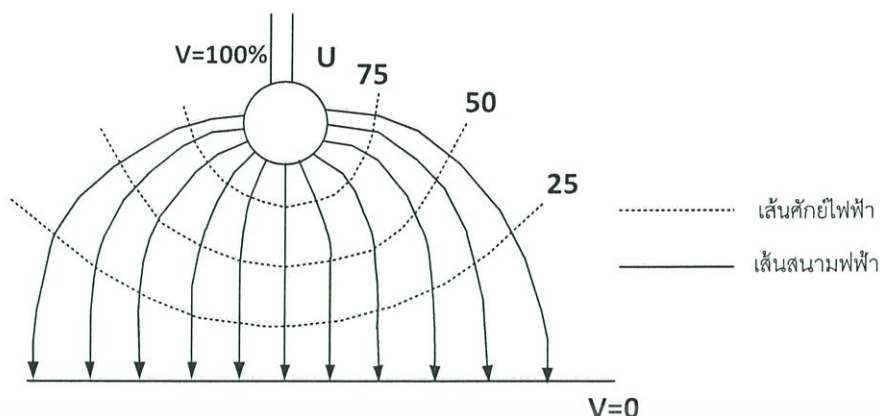
สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน หรือสปาร์คทันทีที่มีความเครียด สนามไฟฟ้าระหว่าง อิเล็กโตรดซึ่งเท่ากันทุกจุด ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียด สนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ๆ ซึ่งความแตกต่าง ณ จุดต่าง ๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมาก หรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่าจะได้ตั้งในรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) มีค่านิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอเล็กโตรดทรงกลม

รูปที่ 2.20 อเล็กโตรดแบบนี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณที่ใกล้ๆ ผิวอเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอเล็กโตรดจะเกิดการดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่า (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอเล็กโตรด) ดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า “กระแสโคโรนา (Corona current) หรือกระแสดิสชาร์จ” การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (Space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ (2.1) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.1) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ (2.1) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_{\max} = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

$U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage)

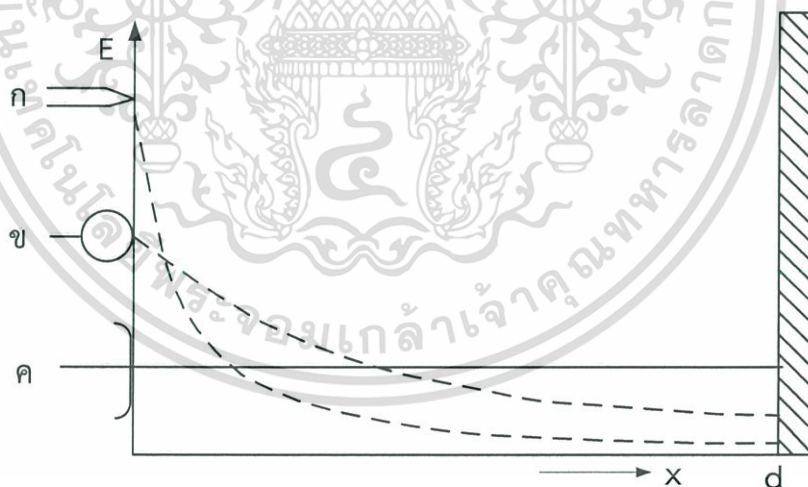
โดยที่  $E_{\max}$  และ  $U_i$  เป็นความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอเล็กโตรด (Free of space charge) หรือกล่าวคือ สมการ (2.3) นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting voltage, Threshold voltage, Inception voltage) หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการ

เปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน หรืออาจเป็นแรงดันโคโรนาเริ่มต้น ซึ่งค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปว่า

$$U_i = E_i \times d \eta^* \quad (2.4)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$   
 $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_b$  และ  $E_i$  คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_b < U_i$  ค่าแรงดันเบรกดาวนนี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุต่างๆ เป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของฉนวนที่อิเล็กโทรดไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดแล้วยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ



รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical field stress)

จากกฎของคูลอมบ์

$$F = \frac{Q_1}{4\pi \epsilon} \frac{1}{r^2} Q_2 \quad (2.5)$$

ถ้านิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ  $Q_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $\frac{D}{\epsilon}$  ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q \quad (2.7)$$

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.8)$$

จะเห็นได้ว่า แรงดันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า บางทีเรียกว่าความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทริกเชิงเส้น เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า จึงเขียนได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\vec{J}$  คือ ความหนาแน่นกระแสเป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น  $A/m^2$

$\sigma$  คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น  $S/m = \text{Siemens/meter} = 1/\rho$

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\Omega.m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนนั่นเอง

### 2.7.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุเนื้อสารต่างกัน

ฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือรองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ดังนั้นฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นที่ต้องใช้กับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกันย่อมมีค่าเปอร์มิติวิตี (Permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลง หรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นของฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของฉนวน และเกิดประจุค้าง

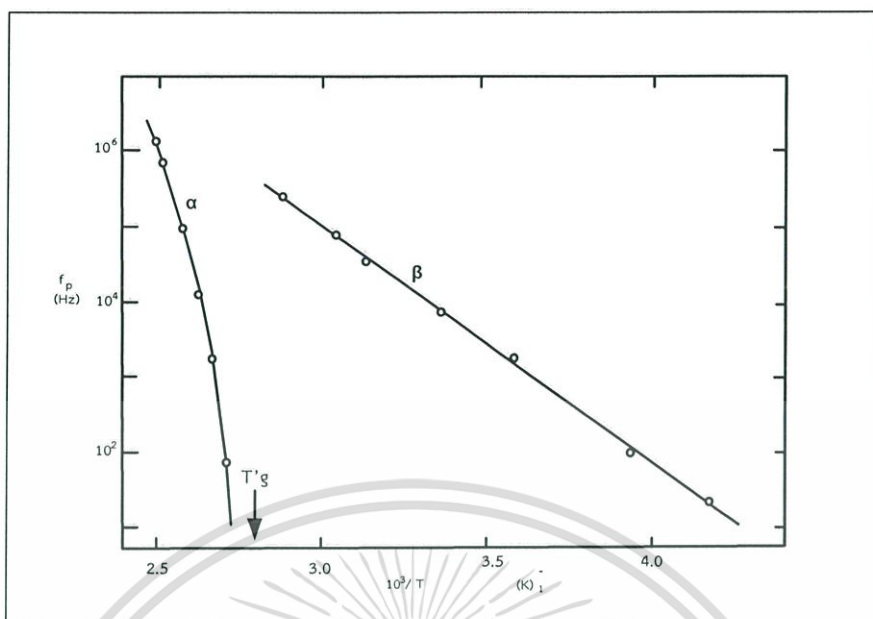
## 2.8 การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้าของฉนวนและการเกิดเบรกดาวน์ [6]

### 2.8.1 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ระดับต่ำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า รวมถึงการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานทั้งเชิงกายภาพและเชิงเคมี ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นตัวกำหนดโอกาสความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ด้วยตัวเอง และการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า

#### 1. การเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานทางกายภาพ

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ เกิดจากขณะที่อุณหภูมิมีค่าลดต่ำลงสู่อุณหภูมิสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น ( $T_g$ ) ชั้นส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในพื้นที่ส่วนอสังฐานจะเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นอย่างมาก ทำให้การปรับตัวเพื่อกลับเข้าสู่สมดุลของความเค้นเชิงกลเหนียวนำช้าลงและเกิดขั้วไดอิเล็กตริก (Dielectric polarisation) ขึ้นตามมาหลังจากทำการกำจัดความเครียดให้กลับสู่สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อการตอบสนองทางกลและการตอบสนองไดอิเล็กตริกของสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 2.22 การตอบสนองไดอิเล็กตริกของ PVC โดย  $T_g$  คืออุณหภูมิที่ความถี่  $\alpha$ -relaxation มีค่าเป็นศูนย์ และแสดงสถานะขณะที่พอลิเมอร์กำลังจะเป็นของแข็ง [6]

จากรูปที่ 2.22 อุณหภูมิสูง (ซ้าย) จะเป็นการตอบสนองที่มีพลังงานกระตุ้นหรือความถี่สูง ( $\alpha$ -response) และที่อุณหภูมิต่ำลงมา (ขวา) เป็นการตอบสนองของพอลิเมอร์เมื่อมีสภาพคล้ายแก้วยืดหยุ่น ( $\beta$ -response) พบว่าขณะที่อุณหภูมิลดลง เวลาที่ใช้ในการกลับสู่สมดุล (Relaxation time) หรือส่วนกลับของความถี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนสามารถสังเกตสถานะไม่สมดุล (Non-equilibrium state) ซึ่งกินเวลายาวนานได้อย่างชัดเจนและส่งผลต่อการตอบสนองไดอิเล็กตริกที่วัดได้ โดยสามารถแสดงการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกด้วยฟังก์ชันของความถี่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

## 2. การเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานเชิงเคมี

สามารถเกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างอนุมูลอิสระ (Free radicals; R) ของพอลิเมอร์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงพอที่จะนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาวแบบเชื่อมขวาง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสงยูวี หรือรังสีแกมมา (Ionising radiation) โดยแต่ละชนิดจะส่งผลต่อการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกันไป ดังนี้

- ความร้อน เป็นตัวควบคุมช่วงของอุณหภูมิที่ฉนวนพอลิเมอร์มีเสถียรภาพทางเคมี ซึ่งความร้อนสามารถเกิดได้จากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้อุณหภูมิของฉนวนมีค่าสูงขึ้นโดยเรียกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบนี้ว่า การให้ความร้อนโดยความต้านทานไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าก็สามารถทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางเคมีได้

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน อาจทำให้พอลิเมอร์เกิดกระบวนการทางเคมีของสารผลิตภัณฑ์และไอออนโลหะซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ หากมีความเข้มข้นสูง แต่ไอออนบางชนิดจะทำหน้าที่ยับยั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันสูงขึ้น และอาจเกิดโฟโตออกซิเดชันซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เริ่มต้นในภาวะที่มีแสงเป็นตัวกระตุ้น ที่ทำให้เกิดพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน กระบวนการเหล่านี้มีความไวต่อสนามไฟฟ้า หากไอออนอนุมูลอิสระกลายเป็นตัวกลางทางไฟฟ้าหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเปลี่ยนแปลง จะทำให้เกิดความต่างศักย์และผลต่างของปฏิกิริยาพลังงานอิสระเกิดเป็นสนามไฟฟ้าซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้มีความเปลี่ยนแปลง

- รังสีก่อบริษั คือรังสีที่มีพลังงานสูงถึง  $10^7$  อิเล็กตรอนโวลต์ต่ออนุภาค เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และอิเล็กตรอนพลังงานสูง ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว

### 3. การเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานเชิงไฟฟ้า

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าแม้ว่าจะมีกระบวนการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานทางกายภาพและเคมีหลายวิธีด้วยกันที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการสนามไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง แต่การเสื่อมสภาพก็สามารถเกิดขึ้นได้จากการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า หรือเกิดจากทั้งสองปัจจัยพร้อมกันได้เช่นกัน สนามไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งไฟฟ้ากระแสตรงจะสามารถทำหน้าที่เป็นตัวสลายพันธะ และเคลื่อนย้ายไอออนก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนผ่านการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น และการปรับปรุงความเครียดเฉพาะที่แต่จะไม่แสดงให้เห็นชัดเจน ยังมีการเสื่อมสภาพที่มีรุนแรงมากกว่าอีกหลายรูปแบบซึ่งสามารถเห็นได้ โดยเฉพาะการเสื่อมสภาพที่มีแหล่งกำเนิดเป็นไฟฟ้า บางชนิดจะต้องการสวประกอบที่จำเป็นอื่นๆ เช่นน้ำในการเกิดต้นไม้ไฟ และกระบวนการหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพคือการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และต้นไม้ไฟ

สิ่งที่อยู่ภายในฉนวนของสายเคเบิลที่มีคุณภาพดี คือ ต้นไม้ไฟ และต้นไม้ไฟ ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพที่สร้างความเสียหายมากที่สุดในระหว่างการใช้งาน ชื่อของกระบวนการเหล่านี้ได้มาจากลักษณะที่คล้ายต้นไม้เมื่อทำการสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งต้นไม้ไฟ มีลักษณะการเจริญเติบโตเป็นพวงกระจายออกไป และไม่มีโครงสร้างที่ชัดเจน

ต้นไม้ไฟ อาจถูกสร้างขึ้นโดยแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำประมาณ 3 กิโลโวลต์ แม้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของสนามให้มากกว่า  $3 \times 10^8$  โวลต์ต่อเมตร ที่จุดศูนย์กลางของตัวนำโลหะนั้น เป็นสิ่งจำเป็นในวัสดุที่มีช่องว่างอิสระก็ตาม ต้นไม้ไฟ ประกอบด้วยช่องทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 ไมครอนเชื่อมต่อกัน โดยแตกกิ่งก้านยาวหลายไมครอนเป็นจำนวนหลายสิบกิ่ง ผงของช่องทางจะมีการนำไฟฟ้าเล็กน้อย แม้ว่าอาจเกิดการลัดวงจรขึ้นได้หากต้นไม้ไฟแผ่คลุมฉนวน แต่ก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทันที อย่างไรก็ตาม ฉนวนจะสามารถเกิดการเบรกดาวน์ก่อนที่ต้นไม้ไฟจะเข้าฉนวนสมบูรณ์ ดังนั้น ต้นไม้ไฟไม่ได้เป็นหนึ่งในกลไกการเกิดการเบรกดาวน์ แต่ก็นับว่าเป็นปัจจัยร่วมที่ทำให้เกิดความเสียหายในฉนวนเพิ่มมากขึ้นภายใต้ความเครียดไฟฟ้าจึงทำให้มีโอกาสในการเกิดการเบรกดาวน์ในสายส่งได้

ต้นไม้ไฟสามารถเกิดขึ้นได้ในสนามที่มีขนาดต่ำกว่าของ ต้นไม้ไฟ และเคยเกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำเพียง  $1.9 \times 10^6$  โวลต์ต่อเมตร แต่ใช้เวลาในการเกิดและเจริญเติบโตนาน อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

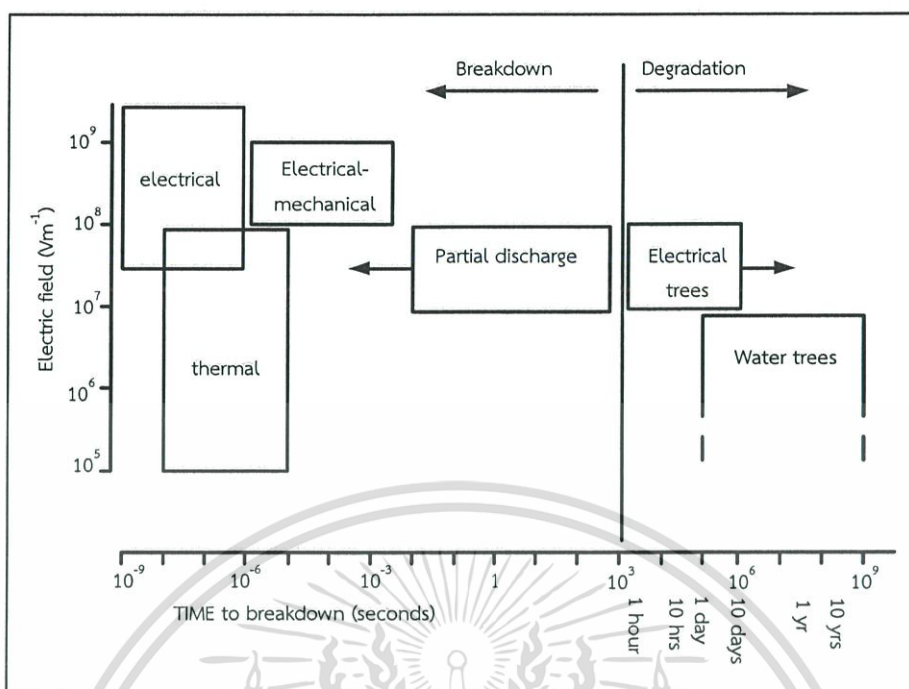
ตามฉนวนจะต้องมีการสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของน้ำ ดันไม้น้ำสามารถทะลุผ่านฉนวนโดยไม่ทำให้เกิดการลัดวงจร แต่สามารถเป็นจุดเริ่มต้นของดันไม้ไฟฟ้า ทั้งจากเนื้อฉนวนหรือจากกลางตัวนำ แม้ว่าดันไม้น้ำจะมีจำนวนมาก แต่ก็เป็นการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากความชื้นที่มีระดับความรุนแรงที่ต่ำมาก อย่างไรก็ตามหากมีการเสื่อมสภาพสะสมเพียงพอก็อาจเป็นจุดเริ่มต้นของเส้นทางของระบบที่จะไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด

### 2.8.2 การสูญเสียสภาพ

รูปแบบของกลไกการเบรกดาวน์สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการเสื่อมสภาพระดับต่ำของฉนวนอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า และตัวการอื่นๆ แบบจำลองชี้เฉพาะ อาจเกิดจากสาเหตุหนึ่งในรูปแบบแรกแต่ส่งผลโดยตรงให้เกิดการเบรกดาวน์อย่างรุนแรง หรือเกิดจากสนามไฟฟ้าวิกฤตมีค่าสูงจนนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด และรูปแบบสุดท้ายคือแบบสุ่ม โดยจะทำการพิจารณาเงื่อนไขทางกายภาพโดยให้มีการเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราคงที่ และค่าสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบเฉพาะตามโอกาสความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์ที่เวลาใดๆ ซึ่งรูปแบบการเสื่อมสภาพระดับต่ำได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.8.1 และในบทนี้จะทำการอธิบายแบบจำลองชี้เฉพาะซึ่งสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน ดังนี้

- เบรกดาวน์เนื่องจากไฟฟ้า (Electrical Breakdown)

กลไกการเบรกดาวน์จากไฟฟ้าที่เป็นที่รู้จักกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ ซีเนอร์เบรกดาวน์ (Zener breakdown) และอะวาลานช์เบรกดาวน์ (Avalanche breakdown) ซึ่งในอดีตเคยได้รับการนำเสนอให้เป็นกลไกการเบรกดาวน์ แต่พบว่ามีอีกหลายกรณีที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีนี้ โดยการเกิดซีเนอร์เบรกดาวน์ซึ่งใช้ได้เฉพาะในกรณีของรอยต่อสารกึ่งตัวนำมีกลไกดังนี้ เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากสนามไฟฟ้ามากพอ อิเล็กตรอนวงนอกสุดก็จะหลุดออกมาในแถบคอนดักชัน (Conduction bands) โดยปกติพอลิเมอร์จะมีช่องว่าง (Band gap) อย่างต่ำประมาณ 7 eV ดังนั้นจึงต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มีขนาดสูงถึง  $10^{10}$  โวลต์ต่อเมตร เป็นต้นไป จึงจะสามารถทำให้เกิดซีเนอร์เบรกดาวน์ได้ ดังนั้นพอลิเมอร์จึงเกิดการเบรกดาวน์เนื่องจากกลไกอื่นๆ ก่อนที่สนามไฟฟ้าจะสูงถึงค่าดังกล่าว ซึ่งในรูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากไฟฟ้ากับเวลาและสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากไฟฟ้ากับเวลาและสนามไฟฟ้า [6]

อะวาลานซ์เบรกดาวน์หรือการเพิ่มขึ้นทวีคูณเหมือนหิมะกล่ม ๆ เกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง เมื่ออนุภาคพาหะได้รับพลังงานสูงพออิเล็กตรอนวงนอกสุดก็จะหลุดออกจากวงโคจร หรือเกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชันกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระวิ่งไปชนอนุภาคถัดไป หากพลังงานจนอันเนื่องจากการชนสูงพอก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชันต่อไป เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นมา 1 ตัว และเกิดต่อเนื่องต่อไปเรื่อยๆ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ เรียกกลไกนี้ว่า อะวาลานซ์ ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลเป็นทวีคูณ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฉนวนอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นเหล่านี้ก็จะมีปริมาณสูงขึ้นอย่างทวีคูณเช่นกัน และเพิ่มขึ้นจนเกิดการเสียหายแบบถาวรหรือเบรกดาวน์นั่นเอง กลไกนี้ใช้อธิบายได้เฉพาะการเกิดเบรกดาวน์ในแผ่นออกไซด์บางเท่านั้น ซึ่งการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนพอลิเมอร์มีข้อขัดแย้งกันอยู่หลายประการ

- การเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน (Thermal breakdown)

เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นไม่สมดุลกับความร้อนที่ระบายออกจากฉนวน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวน จะเกิดการกระแสไหลในฉนวนได้ โดยถ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสสลับจะเกิดการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมากกว่าแบบกระแสตรง ทำให้อุณหภูมิของฉนวนมีค่าสูงขึ้น ถ้าหากอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าอัตราความร้อนที่ถูกพาออกไป จะทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดเป็นความร้อนสะสมในฉนวน ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียล และเกิดเบรกดาวน์ ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเบรกดาวน์เนื่องจากแรงทางกล (Electromechanical breakdown)

การเบรกดาวน์แบบทางกลเกิดขึ้น เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไป จะเกิดแรงดึงระหว่างผิว ทำให้เกิดแรงกดบนฉนวน และเมื่อแรงกดที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตบนฉนวนมีค่ามากกว่าแรงกดทางกล ส่งผลให้ความกว้างของเนื้อฉนวนลดลงซึ่งมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับค่ามอดูลัสของยัง ในฉนวนแต่ละชนิด และยิ่งฉนวนแคบลงเท่าใด ความเข้มสนามก็ยิ่งเพิ่มขึ้นเท่านั้นโดยแรงกดก็จะเพิ่มขึ้นตาม และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์

- การเบรกดาวน์เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge breakdown)

การเกิดโพรงหรือช่องว่างขนาดเล็กภายในเนื้อฉนวนพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการเตรียมวัสดุ ภายในโพรงบรรจุก๊าซที่มีค่าความนำสนามไฟฟ้า (Permittivity) ต่ำกว่าเนื้อฉนวนโดยรอบ ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณรอบโพรง เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความคงทนของก๊าซ ก็จะเกิดการเบรกดาวน์หรือดิสชาร์จภายในโพรง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) เนื่องจากไม่ได้เกิดในเนื้อฉนวนทั้งหมดในทันที แต่อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในเวลาต่อมา

## 2.9 ปัจจัยที่ทำให้เกิดต้นไม้ [6]

### 2.9.1 ปัจจัยทางสัณฐานวิทยา

#### 1. ต้นไม้ น้ำ

ต้นไม้ น้ำ เป็นการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าในระดับที่น้อยมาก ซึ่งระดับที่ตรวจพบ และระบุตำแหน่งได้จากกล้องจุลทรรศน์จะมีลักษณะเป็นช่องว่างที่ย้อมติดสีขนาดเล็กในระดับช่องว่างที่เล็กมาก ซึ่งมีขนาดประมาณ 1-5  $\mu\text{m}$  ถึงแม้ว่าจะสังเกตได้ไม่ชัดเจน และไม่มี ความรุนแรง แต่ก็สามารถเชื่อมเป็นต้นไม้ (Tree) เดียวกันได้ ต้นไม้เป็นเส้นทางในการเติบโตของช่องว่างเล็กๆ ที่ง่าย บางบริเวณอาจจะอยู่ในระดับที่เล็กกว่ากล้องจุลทรรศน์มองเห็น (ประมาณ 10 nm) ซึ่งต่อมาจะสามารถเจริญไปเป็นช่องว่างที่เล็กมากได้ โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายใน ต้นไม้จะเกิดขึ้นที่ขีดจำกัดของสารและจะปรากฏบนผิวของช่องว่างที่เล็กมาก

การที่จะอธิบายการเกิด ต้นไม้ น้ำ ได้นั้น สามารถใช้กระบวนการทางกายภาพหรือทางเคมีภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้ในการบอกสาเหตุได้ แต่เนื่องจากลักษณะการจัดเรียงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุนำมาอธิบายการเกิดต้นไม้ได้ยาก จึงได้มีการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุ เพราะจะเปลี่ยนแปลงได้ก็ต่อเมื่อมีการการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบทางเคมี

- การเริ่มก่อตัว

ในกรณีที่เป็นต้นไม้แบบคล้ายครีบ (Vented tree) จะเริ่มเกิดจากการเคลื่อนตัวของไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาละลายจากบริเวณภายนอกเข้าสู่ด้านจุดเริ่มเกิดหรือใกล้กับผิวของวัสดุมากๆ มีหลายวิธีการที่จะช่วยเพิ่มความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของสารอิเล็กโทรไลต์ไปสู่จุดเริ่มเกิดภายในพอลิเมอร์ เช่น เร่งให้ใกล้จุดเริ่มเกิดมากที่สุด หรือช่วยลดเวลาเริ่มเกิด ( $t_d$ ) ซึ่งจะสังเกตจุดเริ่มเกิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่ายในบริเวณรอยบนผิววัสดุหรือรอยแตกเล็กๆ นอกจากนี้ผลกระทบจากการใช้งานภายนอกก็จะส่งผลให้เกิดความเสียหายทางกลได้อีกด้วย โดยอัตราการก่อตัวบนผิววัสดุจะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของวัสดุและประวัติการใช้งาน

ในกรณีที่วัสดุนั้นมีการไหลของพอลิเอทิลีน จะประกอบด้วย Long crystal oriented ตัดขวางบนพื้นผิวจำนวนมาก ซึ่งคาดว่าชั้นภายในของผลึกจะเป็นเส้นทางผ่านของไอออนและรอยที่อาจจะเกิดขึ้นได้ พื้นผิวที่มีการไหลตัวของพอลิเอทิลีนจะมีชั้นของลามลลาร์ (Lamella) เรียงตัวกันอยู่ มีความเป็นไปได้ว่าพื้นผิวที่มีการไหลของวัสดุอาจมีบริเวณอสัณฐาน (Uncrystalline) อยู่ภายในช่องว่างของลามลลาร์ ทำให้เกิดข้อบกพร่องจากการขยายตัวของช่องว่างในบริเวณที่เป็นอสัณฐานเพิ่มมากขึ้น จุดบกพร่องบนผิววัสดุจะเกิดได้จากสองช่องทางง่ายๆ คือ การซึมซาบของไอออน และการค้ำของสารในวัสดุ

ปัจจัยเชิงสัณฐานวิทยาเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เริ่มเกิดต้นไม้ เป็นจุดบกพร่องของโมเลกุลใกล้กับผิววัสดุ ซึ่งจะเป็จุดเริ่มเกิด และจะขยายตัวบนโครงสร้างผิววัสดุแบบลูกโซ่ ที่ยอมให้ไอออนซึมผ่านได้ แต่เพียงแค่นี้ไม่ทำให้เกิดต้นไม้ ได้อย่างสมบูรณ์ ยกตัวอย่างในกรณี พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโครงข่าย เช่น อีพอกซีเรซิน อาจจะมีจุดเริ่มเกิดใกล้ผิวมาก แต่ก็มีความแข็งแรงมากจนทำให้สารใดๆ ซึมผ่านได้ยาก ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์เหล่านี้จะตอบสนองต่อการเกิดต้นไม้ได้ยาก

ส่วนต้นไม้แบบคล้ายโบว์ (Bow-tie trees) จะมีจุดเริ่มต้นจากความไม่สมบูรณ์ของวัสดุหลายรูปแบบ อาทิเช่น ช่องว่าง คอลลอยด์ สิ่งปนเปื้อนจำพวกแก้ว อนุภาคโลหะ และเส้นใยเซลลูโลส แต่จะไม่ใช่อนุภาคคาร์บอน ซึ่งในบริเวณจุดเริ่มก่อตัวจะเป็นช่องว่างที่มีความสัมพันธ์กับสัณฐานวิทยาของวัสดุ และจะอยู่ภายใต้อิทธิกรเปลี่ยนแปลงของวัสดุ อย่างไรก็ตามจุดศูนย์กลางของการก่อตัวอย่างเช่น กลุ่มของสาร Antioxidant จะก่อตัวจากสารที่เติมเข้าไปที่มีความเข้มข้นในระดับที่เป็นอันตราย และการคงอยู่ของมันอาจจะขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพ และประวัติการใช้งานวัสดุ

- การแพร่กระจาย

ต้นไม้ น้ำ จะมีการเติบโตจากจุดเริ่มเกิดโดยแพร่ผ่านจุดที่ความบกพร่องของวัสดุ ซึ่งการขยายตัวของช่องว่างจะเจริญไปเป็น Microvoid สามารถพิจารณาขอบเขตของการทำลายที่ขยายตัวผ่านเนื้อฉนวนจากจุดเริ่มเกิดได้ โดยการเปลี่ยนแปลงทางกลและเคมีจะทำให้เกิดการขยายตัวของต้นไม้

การเสียหายจากต้นไม้ น้ำ จะทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็ก หรือความอัดแน่นของลำดับโมเลกุลในสายลูกโซ่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น ความหนาแน่น ความเป็นผลึก และดัชนีการกระจาย จะแสดงความสัมพันธ์กับการเติบโตของต้นไม้ ของคุณสมบัติของวัสดุ และคาดว่ามันจะมีผลกับการแพร่กระจายของต้นไม้ น้ำ ที่จะสามารถปรับเปลี่ยนรูปอสัณฐานในระดับเล็กๆ ในบริเวณพื้นที่อสัณฐาน และความสามารถในการทำให้โครงสร้างเสียรูปแบบได้ ซึ่งสภาพการพักตัวทางกลจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของต้นไม้ และในทางตรงกันข้ามการปรับปรุงพื้นที่อสัณฐานของพอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งโครงร่างผลึกจะมีการยับยั้งสภาพการพักตัวมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่เป็นอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัณฐานของโครงร่างกิ่งผลึกมีการเพิ่มขึ้นของลูกโซ่ที่มีความยุ่งเหยิง และพันธะที่ผูกแน่นระหว่างลาเมลลาร์ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการยืดหยุ่นที่จำกัด ทำให้การก่อตัวของ Microvoid มีความแข็งแรงสูง ในวัสดุที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ดังนั้นอัตราการเกิดต้นไม้น้ำของวัสดุนั้นจะต่ำ

## 2. ต้นไม้ไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพที่เกิดจากต้นไม้ไฟฟ้าจะรุนแรงกว่าต้นไม้ น้ำ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นระบบที่เชื่อมกันของท่อกลวง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $1\ \mu\text{m}$  หรือมากกว่านั้น ถึงแม้ว่าการเกิดและการเติบโตจะมาจากการตัดพันธะในสายลูกโซ่พอลิเมอร์มากกว่าการเกิดไอออนในเซชันของ พอลิเมอร์ แต่ก็สูญเสียกำลังไฟฟ้าในขนาดที่มากกว่าการเกิดต้นไม้ น้ำมาก การก่อตัวของช่องว่างจะมีกระบวนการที่รวดเร็ว โดยไม่ขึ้นกับระยะทาง ถึงแม้ว่าการขยายตัวต้องการการเกิดซ้ำของอะวาแลนซ์หรือดิสชาร์จก็ตาม ซึ่งในกรณีนี้ สัณฐานวิทยาของวัสดุจะมีบทบาทในการเกิดต้นไม้

### - การเริ่มก่อตัว

การก่อตัวของต้นไม้ไฟฟ้า ก็คือ การก่อตัวของช่องว่างที่มาจากการจ่ายและหยุดกระแสจากอิเล็กโทรด ซึ่งตามธรรมชาติของวัสดุจะต้องใช้พลังงานมากในการก่อตัวของช่องว่างจากจุดแตกหัก ดังนั้นความยากง่ายในการก่อตัวและเวลาในการก่อตัวจะขึ้นกับค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของวัสดุนั้นๆ โดยต้นไม้จะเริ่มเกิดเร็วขึ้นที่ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ต่ำๆ จากตารางที่ 2.10 จะเห็นว่าแรงดันก่อตัวของต้นไม้ที่ไม่ได้เติม HDPE LDPE EPR จะได้ผลการทดลองในแนวทางเดียวกัน ดังแสดงในตาราง 2.11 ในอีกการทดลองที่ให้แรงดันที่ต่ำที่สุดให้วัสดุที่อ่อนที่สุดและให้แรงดันที่มากที่สุดกับวัสดุที่แข็งที่สุด (HDPE) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ดังแสดงในตาราง 2.12

ตารางที่ 2.10 เวลาในการเริ่มก่อตัวของ ต้นไม้ไฟฟ้า ,  $t_f$  และเวลาที่ให้ต้นไม้เจาะผ่าน 90% ของเนื้อฉนวน,  $t_g$  (Point-plane geometry, 7 kV rms ความถี่ 50 Hz)

วัสดุ	ความเค้นแรงดึง (MPa)	มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น (MPa)	เวลาเริ่มก่อตัว $t_f$ (ชั่วโมง)	เวลาที่เติบโต $T_g$ (ชั่วโมง)
อีลาสโตเมอร์ PL-3	6.8-10.34	13.7	10.75±2.55	600±50
อีลาสโตเมอร์ PL-2	58.5-75.8	207	19.5±4.33	450±50
LDPE	75.8-103	344	26.45±3.09	290±50
พอลิเอสเตอร์	137.8	3780	36±5.3	350±50

ตารางที่ 2.11 แรงดันเริ่มเกิด 50% ต้นไม้ไฟฟ้า,  $V_I$  ในวัสดุที่มีความเป็นผลึกต่างกัน ใช้ Double needle geometry ในการทดสอบ AC, 50 Hz

วัสดุ	ความเป็นผลึก	$V_I$ (kV)
HDPE	ใหญ่ (มีสเฟียรูโลทซ์ขนาดใหญ่)	10.5
LDPE	ปานกลาง (มีสเฟียรูโลทซ์ขนาดปกติ)	8.0
LDPE	ต่ำ (มีสเฟียรูโลทซ์ขนาดเล็ก)	7.0
โคพอลิเมอร์ เอทิลีน	ต่ำมาก (มีสเฟียรูโลทซ์ขนาดเล็กกว่าปกติ)	5.5
EPR	อสัณฐาน	5.5

ตารางที่ 2.12 แรงดันเริ่มเกิด 50% ต้นไม้ไฟฟ้า,  $V_I$  ในวัสดุที่มีความเป็นผลึกต่างกัน ใช้ Double needle geometry ในการทดสอบ AC, 50 Hz

วัสดุ	ขนาดของสเฟียรูโลทซ์ ( $\mu\text{m}$ )	ความหนาแน่น ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$V_I$ (kV)
LDPE แรงดันสูง	5	0.931	15
LDPE แรงดันสูง	3	0.926	12
LDPE แรงดันสูง	2	0.922	12.5
LDPE แรงดันสูง	<1	0.922	11.5
LLDPE	15	0.935	10.5
LLDPE	11	0.920	8-9
LLDPE	10	0.921	7

แรงดันก่อดำของต้นไม้ในพอลิเอทิลีนแรงดันสูงจะมีการเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของสเฟียรูโลทซ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ยกเว้น LLDPE ที่มีสเฟียรูโลทซ์ใหญ่กว่าจะมีแรงดันก่อดำน้อยกว่า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของต้นไม้จะยากขึ้น เนื่องจากค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ที่สูงกว่าในพื้นที่อสัณฐานในพอลิเอทิลีนแรงดันสูง จะถูกบีบอัดโดยสเฟียรูโลทซ์ที่ใหญ่กว่า และเป็นที่น่าสังเกตว่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันขณะก่อดำเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้สเฟียรูโลทซ์จะไม่ยับยั้งการก่อดำ แต่ต้นไม้จะก่อดำผ่านช่องว่างของพื้นที่อสัณฐานที่ต่างกัน

ขั้นตอนแรกของการก่อดำต้นไม้ไฟฟ้า เส้นทางที่ประกอบด้วยช่องว่างที่ยึดออกหรือรอยแตกบนด้านที่มีการจ่ายหรือหยุดกระแสของอิเล็กโทรด หรือข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้นมาก่อนแล้ว รวมไปถึงความเครียดทางไฟฟ้าที่จะสามารถลดเวลาก่อดำของต้นไม้ ภายใต้ความเครียดทางกลได้ในทางตรงกันข้าม แรงดันนี้ในสภาวะสมดุลสามารถทำให้แนวโน้มน้ำที่จะลดช่องว่างและเพิ่มเวลาก่อดำของต้นไม้ได้ การเรียงตัวของช่องว่างที่บกพร่องก็จะอยู่บริเวณด้านนิวเคลียสของรอยแตกขนาดเล็ก

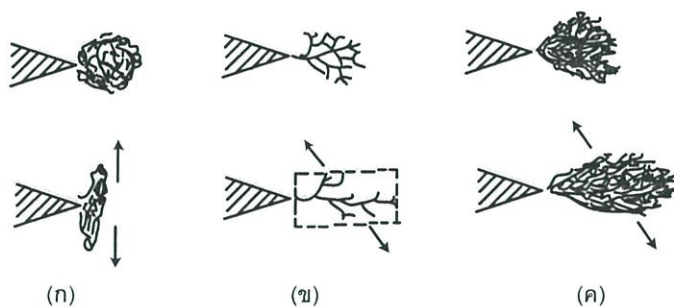
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอาจจะก่อตัวระหว่างการผลิตวัสดุ การเริ่มเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดคือ การเกิดแบบอ้อมๆ แต่เวลาการก่อตัวก็จะต่ำลง นอกจากนี้จุดที่มีการเรียงตัวจะทำหน้าที่เป็นเป็นจุดเริ่มเกิดของ รอยแตก หรือ ความเครียดทางกล ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อตัวตามคุณสมบัติของวัสดุ และภายใต้สภาพแวดล้อมนี้ พอลิเอสเตอร์ จะมีความล่าช้ามาก

- การแพร่กระจาย

ระหว่างที่มีการแพร่กระจายของ ต้นไม้ไฟฟ้า เข้าสู่ช่องที่มีอยู่ ก็จะเกิดการยึดหรือสร้างช่องว่างที่ปลายสุดของต้นไม้ โดยที่บริเวณอสังฐานที่ชัดเจนและที่ค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ต่ำ จะเกิดการก่อตัวของช่องว่างได้มากกว่า ถึงแม้ว่าการกัดกร่อนที่ตามอาจจะขยายตัวไปสู่บริเวณพื้นที่เดิมที่อยู่ในลามลาร์ ซึ่งจะกล่าวได้ว่า ต้นไม้ไฟฟ้าจะหลีกเลี่ยงอนุภาคที่เดิมเข้าไป เช่น เมื่อทดลองนำพอลิสไตรีนผสมกับพอลิเอทิลีน จะเกิดความต้านทานของต้นไม้สูง และ พฤติกรรมนี้อาจจะพบในสเฟียรูไลท์ ได้บางครั้ง อย่างไรก็ตาม ต้นไม้ไฟฟ้าจะมีการเติบโตตามคุณสมบัติพลศาสตร์การแพร่กระจายของมันเอง ไม่มีวัสดุต่างชนิดใดๆ ที่มีพฤติกรรมเหมือนกัน คุณสมบัติต่อมาก็คือ สามารถเพิ่มปัจจัยการสุมของการเติบโตได้ แต่ก็ไม่มีหลักฐานว่ามันสามารถปรับเปลี่ยนรูปของต้นไม้จากชนิดแบบคล้ายกิ่ง (Branch-type) ไปเป็นชนิดคล้ายพุ่ม (Bush-type) ดังนั้นวัสดุที่ไม่เหมือนกันจะมีผลต่ออัตราการแพร่กระจาย โดยการแตกแขนงของต้นไม้

อัตราการแพร่กระจายของต้นไม้ไฟฟ้า จะขึ้นกับปัจจัยทางกลด้วย เช่น ความสามารถในการคงสภาพความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยในช่วงของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ค่าจะอยู่ในช่วง 14-3800 MPa เวลาเฉลี่ยในการเติบโตจะอยู่ในช่วง 300-600± 50 ชั่วโมง ที่เวลา 350±50 ชั่วโมง วัสดุจะมีความอดุลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด ซึ่งหากเวลามากถึง 450±50 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสก็แทบจะไม่มี ความแตกต่างกันเลย (ประมาณ 200 MPa) ปัจจัยการสลายพันธะพลังงานสูง เช่น อิเล็กตรอนร้อน การแทรกซึมของไอออน ปฏิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพจากความร้อน จะเกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ อย่างไรก็ตามพันธะภายใต้ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) จะต้านทานการเกิดดิสชาร์จได้ต่ำกว่าพันธะที่ไม่มีค่าความเค้นแรงดึง ซึ่งการแพร่กระจายของ ต้นไม้ไฟฟ้า จะถูกเร่งมากเป็นพิเศษในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) จากผลของการเกิดต้นไม้ในระนาบ เมื่อเป็นต้นไม้ชนิดคล้ายกิ่งหรือคล้ายพุ่ม ทั้งสองกรณีจะมีอัตราการแพร่กระจายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตจากความเครียดทางกลของเคเบิลฉนวน XLPE และจะให้ผลเหมือนกันในฉนวนชนิดพอลิเอทิลีน อีพอกซีเรซิน และ พอลิเอสเตอร์ โดนพฤติกรรมของ ต้นไม้ไฟฟ้า ภายใต้ความเค้นแรงดึงจะมีความแตกต่างที่ว่าต้นไม้จะเป็นตามเส้นทางการขยายตัวของช่องว่างในทิศทางของความเครียดมากกว่าการทำลายพันธะที่สะสมความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงพฤติกรรมของต้นไม้ในวัสดุภายใต้ค่าความเค้นแรงดึง (บอกทิศทางจากลูกศร ซึ่งในแต่ละกรณีจะอ้างอิงจากวัสดุที่ไม่มีการยึดหด)  
(ก) ต้นไม้น้ำ (ข) ต้นไม้อ่อนค้ำยั้ง (ค) ต้นไม้อ่อนค้ำฟูม

## 2.9.2 ปัจจัยทางองค์ประกอบทางเคมี

### 1. ต้นไม้น้ำ

องค์ประกอบทางเคมีของฉนวนพอลิเมอร์มีความซับซ้อนมาก และเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และกระบวนการเชื่อมขวางพอลิเมอร์จะเกิดสารเหลือจากปฏิกิริยา ซึ่งสามารถนำสารเหล่านี้ไปใช้เพื่อผลประโยชน์ทางการค้าได้ การทดสอบผลกระทบจากสารที่เติมจะมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติที่จะยับยั้งการเกิดต้นไม้ได้ ดังนั้นเราจึงมุ่งความสนใจไปยังสารเคมีที่ปรากฏในวัสดุฉนวนโดยธรรมชาติและสารเคมีที่เติมเข้าไป หรือเพื่อเหตุผลอื่นนอกจากการยับยั้งต้นไม้

#### - องค์ประกอบของพอลิเมอร์

คุณสมบัติที่องค์ประกอบทางเคมีจะส่งผลกับต้นไม้น้ำ ในพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่ชัดเจนที่สุดก็คือ ความไวในการออกซิเดชันของวัสดุ ซึ่งบริเวณที่ถูกออกซิไดซ์จะมีความอ่อนแอ สามารถรวมกับน้ำได้ และจะจับไอออนบวก ซึ่งสามารถเป็นจุดเริ่มเกิดของต้นไม้ได้ เมื่อเกิดการออกซิไดซ์บริเวณพื้นผิววัสดุ นอกจากนี้พื้นที่ที่ถูกออกซิไดซ์ที่มีไอออนละลายน้ำอยู่มากจะสามารถซึมซาบพอลิเมอร์และสร้างต้นไม้น้ำขึ้นมาได้

ความแตกต่างของพฤติกรรมต้นไม้ จะสังเกตได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง Homopolymer, Copolymer และพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตามผลกระทบเหล่านั้นก็ไม่ได้มาจากธรรมชาติของสารโดยตรง เพราะวัสดุแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันทางสัณฐานวิทยา ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดและการเติบโตของ ต้นไม้น้ำ ในรูปแบบของมันเอง ยกตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลพอลิस्टาไทริน จะเพิ่มค่าความต้านทานในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะปลดอัตราการเติบโตของต้นไม้น้ำ ได้ และเนื่องจากพฤติกรรมของ Anti-oxidant จะไม่ทำให้เกิดความผิดปกติที่ชัดเจน มันจึงทำให้มีการเพิ่มขึ้นของความต้านทานความล้าทางกลในจุดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารที่เติมเข้าไป และสารที่ตกค้าง

Anti-oxidant คือสารที่ใช้เติมฉนวนสายเคเบิล เพราะว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำลายความต้านทานทางกล ความยืดหยุ่น และค่าการต้านทานเบรกดาวน ซึ่งพฤติกรรมของมันจะสามารถยับยั้งการก่อตัวและการแพร่ขยายของ ต้นไม้ไฟ ได้ อย่างไรก็ตาม Anti-oxidant ที่ไม่สมบูรณ์ (Amine) จะปรากฏตัวอยู่ในการเติบโตของต้นไม้ ที่มีความเร่ง ส่วน Anti-oxidant ที่สมบูรณ์จะทำให้การเจริญเติบโตของต้นไม้ช้าขึ้น แต่ก็อาจทำให้เกิดความสับสนได้ เพราะเงื่อนไขนี้จะปรากฏทั้งในช่วงการก่อตัวและการเติบโตของต้นไม้ โดยมันจะแสดงลักษณะที่แตกต่างในวัสดุทั้งสองประเภท สารกลุ่ม Amine ที่เติมเข้าไปก็อาจจะทำให้เกิดต้นไม้แบบพุ่ม (Bow-tie-tree) และผลกระทบนี้ค่อนข้างจะเกี่ยวข้องกับ Amine group มากกว่าปัจจัยทางสัณฐานวิทยาอีกด้วย

## 2. ต้นไม้ไฟฟ้า

จุดเริ่มต้นของต้นไม้ไฟฟ้า จะเกี่ยวข้องกับการทำลายพันธะจากการฉีดอิเล็กตรอนร้อน ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอาจจะมีอิทธิพลในวิธีอื่นที่ต่างจากการพิจารณาค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ในจุดตัวอย่างที่มีความแตกต่างของพื้นที่ร่วม (Interface) ของพอลิเมอร์กับโลหะ โดยสามารถเปลี่ยนจุดบกพร่องที่มาจาก การฉีดประจุได้ หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์อาจดักอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้ามาโดยไม่ได้ตัดพันธะออก หรืออาจจะแยกประจุภายในบริเวณที่เกิดก็ได้ และอาจจะต้องมีการป้องกันการตัดพันธะในวัสดุฉนวนโดยการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สร้างจากการดักจับอิเล็กตรอนที่มีความเร่ง

สำหรับการแพร่กระจายหรือการเจาะทะลุที่สร้างจากประจุในช่องว่างต้นไม้ที่มีก๊าซอยู่ ซึ่งการทำลายจากการเคลื่อนที่ของไอออนและอิเล็กตรอนจะไม่เกิดผลชัดเจนจากองค์ประกอบทางเคมี เพราะว่าค่าความต้านทานของพันธะในวัสดุพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะอยู่ในช่วง 3.5-4 eV ซึ่งอาจจะอยู่ในช่วงองค์ประกอบและชนิดของดิสชาร์จที่กว้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะมีความสำคัญมากในกรณีที่จะนำไปสู่การกัดกร่อนทางเคมี ฉนวน Amine crosslinked epoxy resin จะมีก๊าซกรด  $\text{NO}_2$  และ  $\text{N}_2\text{O}$  ที่มาจากการดิสชาร์จ จะสามารถทำลายพอลิเมอร์ได้ ส่วนการดูดซับก๊าซและผลิตภัณฑ์ที่มาจาก การสลายตัวของก๊าซก็จะส่งผลให้มีการแพร่ของต้นไม้ โดยการปรับเปลี่ยนขอบเขตของจุดเริ่มเกิดในการดิสชาร์จ

- องค์ประกอบของพอลิเมอร์

จากตารางที่ 2.13 จะให้ 50% ของแรงดันเริ่มเกิด  $V_1$  สำหรับการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในวัสดุที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า  $V_1$  ที่มาจาก Copolymer ของพอลิเอทิลีนกับพอลิเอทิลีน จะนำมาใช้แสดงการเพิ่มขึ้นของความต้านทานเริ่มเกิด อันเป็นผลมาจากความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ต้นไม้ จะแพร่ผ่านฉนวนจะขึ้นอยู่กับช่องว่างของต้นไม้ที่มีอยู่จำกัด จนไปถึงพื้นที่ที่อิทธิพลที่ขยายตัวจากการกัดกร่อนของดิสชาร์จ อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงที่สุด จะมีความแตกต่างทางเคมีเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนมาก และความต้านทานของจุดเริ่มเกิดจะไม่สามารถพิจารณาได้ทั้งความเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกหรือการเชื่อมขวาง กลุ่มของพอลิเมอร์ที่มีออกซิเจน หรือสารอะโรเมติกที่เปื่อยขึ้น สามารถเปลี่ยนเป็นไอออนได้ง่ายและมีค่าดึงดูดอิเล็กตรอนสูง จะเป็นไปได้ว่าค่าความต้านทานของมันในช่วงเริ่มเกิดต้นไม้จะมาจากการลดค่าสนามไฟฟ้าที่ปลายสุดของอิเล็กโทรดปลายแหลมโดยการนำพลังงานมาเหนี่ยวนำสนาม ถึงแม้ว่าการดักจับแบบไม่ทำลายของอิเล็กตรอนที่ฉีดจะไม่สามารถยับยั้งได้ก็ตาม

ปัจจัยทางเคมีก็จะมึบทบาทในการก่อตัวของ ต้นไม้ไฟฟ้า ใน Epoxy resin ได้เช่นกัน จากคุณสมบัติของแรงดันที่ใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเปลี่ยนสีพื้นที่รอบๆ บริเวณนั้น และ เพิ่มค่าความต้านทานขณะเริ่มก่อตัว (เวลาเริ่มเกิด  $t_i$  เพิ่มขึ้น) การเพิ่มขึ้นของความเครียดสามารถสร้างช่องว่างที่ปลายเข็มให้ผ่านความเครียดทางกลที่ต่างกันระหว่างพื้นที่ที่มีปัญหาต่างกัน หรือโดยวิธีการให้ความร้อนแบบจูลจากกระแสที่อัดเข้าไป

ตารางที่ 2.13 แรงดันเริ่มเกิด 50% Double-needle geometry และ Life time (เวลาที่ต้นไม้จะทะลุฉนวน) ในการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า

วัสดุ	แรงดันเริ่มเกิด $V_i$ (kV)	Lifetime ที่ 15 kV (ชั่วโมง)
พอลิซิลิโคน	27	-
พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต	25	-
พอลิคาร์บอเนต	19	-
พอลิสไตรีน	12.5	>120
HDPE	10.5	41.5
LDPE melt index 0.2	8.0	22
LDPE melt index 2.0	7.3	13.9
พอลิฟอสฟีน	7.0	-
XLPE (ในสูญญากาศ)	6.5	11.1
โคพอลิเมอร์ เอทิลีน EVA 18% VA	5.5	6.5
โคพอลิเมอร์ เอทิลีน EVA 18% EA	5.0	7.5
EPR	<5.0	6.5

- ลักษณะทางเคมีที่แสดงออกเป็นปกติ

พอลิเมอร์ทุกชนิดจะดูดซับก๊าซจากชั้นบรรยากาศและจะมีความเข้มข้นที่สมดุลของออกซิเจนในพื้นที่ร่วมกัน ก๊าซที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง จะสร้างสภาพตัวรับบนพื้นผิวที่ทำให้เกิดการผกผันของพื้นที่ภายหลังจากการทำปฏิกิริยากับโลหะ ดังนั้นความกว้างของแนวป้องกันการฉีดอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุที่กำจัดก๊าซออกที่แรงดันเดียวกัน และการฉีดอิเล็กตรอนจะเป็นไปได้สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นจาก ซึ่งก๊าซอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงที่ดูดซึม จะมีแรงดันเริ่มเกิดลดลง ในทางตรงกันข้าม การเคลื่อนตัวจากก๊าซที่เป็นกลาง เช่น ไนโตรเจน หรือการเคลื่อนย้ายโดยการกำจัดก๊าซออก จะช่วยเพิ่มแรงดันเริ่มเกิดได้

นอกจากนี้การก่อดำของชั้นออกซิเจนประจุลบบนผิวของวัสดุ ก็จะทำให้เกิดกระบวนการตันไม้ทางเคมีขึ้น ซึ่งในช่องว่างระหว่างการฉีดประจุโมเลกุลออกซิเจนในพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาที่กระตุ้นอย่างรวดเร็ว จากทั้งปฏิกิริยาโดยตรงจากตัวพา และโดยวิธีลดสถานะกระตุ้นของโมเลกุลอื่น รวมไปถึงการปล่อยพลังงานรังสีอัลตราไวโอเลท โดยออกซิเจนจะมีการตัดพันธะ จึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการก่อดำของช่องว่าง และคาดว่าความหายไปของออกซิเจนในวัสดุที่กำจัดก๊าซออกจะทำให้เวลาก่อดำและแรงดันในการเกิดตันไม้เพิ่มขึ้นได้

จากผลการทำลายของปฏิกิริยาออกซิเดชันและอนุมูลพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรมการผลิตสายเคเบิลนั้น จะมีการเติมสาย Anti-oxidant ด้วย ดังนั้นสารกลุ่ม Phenolic และ Amine จะมีผลที่ต่างในการเกิดการก่อดำ (จากตารางที่ 2.14) นั่นก็คือ Anti-oxidant ที่ไม่สมบูรณ์ จะเพิ่มความต้านทานในการก่อดำของตันไม้ ในทางตรงกันข้ามกลุ่มที่มีความสมบูรณ์จะให้ผลเพียงเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าการเติม Amine ลงใน LDPE จะเพิ่มแรงเริ่มเกิดได้ มันจะดูเหมือนว่าปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดความอันตรายจาก Anti-oxidant (Amine) ในการเกิดตันไม้ น้ำ กล่าวคือความสามารถในการทำให้มีขั้วและความสามารถในการแยกสนาม จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในจุดๆ นั้น ซึ่งจะเพิ่มความนำไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความต้านทานการเกิดตันไม้ไฟฟ้ามากขึ้น

เมื่อพอลิเอทิลีนถูกเชื่อมขวางจากกระบวนการเพอโรออกไซด์แล้ว จะได้ผลพลอยได้เป็น Acetophenone และ Cumylalcohol ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะระเหยหายไปอย่างรวดเร็ว และบางส่วนจะเคลื่อนตัวไปยังช่องว่างของตันไม้ที่แพร่ขยายได้ ดังนั้นมันก็จะเพิ่มความต้านทานในการก่อดำและการแพร่กระจาย โดยในพื้นที่ที่มีการเพิ่มขึ้นของความเครียดในตัวนำไฟฟ้า จะแบ่งระดับทางไฟฟ้าได้เป็นขอบเขตของอิเล็กโตรดและช่วงที่มีการลดลงของสนามไฟฟ้า โดย Acetophenone จะใช้ได้ผลในการพิจารณา

ตารางที่ 2.14 ผลจากการเติมสารที่แรงดันก่อดำของตันไม้ ใน LDPE (MI=0.2) ข้อมูลที่ให้ทำการทดลองแบบ Double-needle test

วัสดุ	V <sub>i</sub> (kV)
Antioxidant ที่สมบูรณ์+ 0.5% 2-ไนโตร-ไดฟีนิลลามีน	23
0.1% ไดฟีนิลพาราฟีนิลลีน ไดอามีน	11
Antioxidant ที่ไม่สมบูรณ์	11
Antioxidant ที่สมบูรณ์	8
LDPE (MI=0.2) ไม่ได้เติมสารใดๆ	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.3 ปัจจัยทางอุณหภูมิ

#### 1. ต้นไม้

กระบวนการหลาย ๆ ขั้นตอนที่ทำให้มาในการสร้างต้นไม้ สิ่งที่ไม่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุดคือ ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ที่จะเหมือนกันในทุกๆ กระบวนการ ยกตัวอย่าง การลำเลียง อิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำไปสู่จุดที่มีความเสียหาย อาจจะถูกเร่งจากความร้อน แต่จะทำให้การแพร่ของ ไขมันที่ห่างออกจากบริเวณนั้น โดยอัตราของปฏิกิริยาทางเคมีหรือไฟฟ้าเคมีอาจจะถูกเร่งจากความร้อน ได้ แต่จุดสมดุลอาจจะถูกผลักดันที่อุณหภูมิสูงๆ เช่นเดียวกันกับจุดสมดุลระหว่าง ความหนาแน่นของน้ำกับไขมัน อาจจะถูกผลักดันที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ ในการเปลี่ยนขั้นตอน เช่น การแยกตัวแบบไมโครเฟส (Microphase separation) จะถูกขับเคลื่อนจากความต่างของพลังงานอิสระที่เพิ่มขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า แต่ตัวก็ตกกันจะถูกทำให้เสื่อมสภาพ เมื่อมีนิวเคลียสมีการก่อตัว ขึ้นมา และอัตราจะเพิ่มขึ้นจนถึงขีดสูงสุดที่บางอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาอาจจะ เกิดขึ้นได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะสามารถเป็นตัวช่วยหรือช่วยเร่งการเกิดต้นไม้ได้ นอกจากนี้ ปัจจัยทางอุณหภูมิจะมีการจัดเรียงจากการกระตุ้นบวกไปลบอีกด้วย

#### - การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

กระแสจากตัวนำในสายเคเบิลจะมีแนวโน้มที่ให้ความร้อนกับพื้นที่ฉนวนใกล้เคียง กับตัวนำตาม สภาพปกติอุณหภูมิจะสูงถึง 70 °C แม้ว่าอุณหภูมิจะสามารถสูงได้ถึง 90 °C ในช่วงสั้นๆ ของสภาวะ โหลดเกินก็ตาม ซึ่งหลักการออกแบบฉนวนเคเบิลจะต้องมีความเสถียรภาพทางกล ทางเคมี และ ไดอิเล็กทริก อย่างไรก็ตามฉนวนที่อยู่ใกล้ตัวนำจะมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและ ทางเคมีมากกว่าส่วนอื่นๆ ของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสารที่ทำให้ anti-oxidant เสถียรถูก ทำให้กระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ เมื่ออายุการใช้งานมากขึ้น บริเวณที่ไวต่อการเริ่มเกิดต้นไม้ก็จะถูก สร้างขึ้นใกล้ๆ ตัวนำ และเมื่ออุณหภูมิสูง ตัวนำจะช่วยเพิ่มแรงดันไอของบริเวณที่เกิด ซึ่งจะส่งผล ให้น้ำไหลจากบริเวณที่เป็นไอไปยังบริเวณที่เย็นกว่า ดังนั้น ต้นไม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่ ชัดเจน เมื่อมีการควบคุมเงื่อนไขเหล่านี้ไปอย่างต่อเนื่อง

เงื่อนไขจากความร้อนของสายเคเบิล จะขึ้นกับทั้งเงื่อนไขสภาพอากาศและสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะเมื่อสายเคเบิลแช่ในน้ำที่มีการผกผันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอาจจะพบเงื่อนไขสภาพนี้ ได้ ซึ่งตัวนำมีความเย็นมากกว่าบริเวณโดยรอบภายใต้ขอบเขตที่น้ำเข้าถึง ในกรณีดังกล่าวแรงดัน ไอจะส่งผลให้ น้ำลำเลียงเข้าสู่ภายในของพอลิเมอร์ และอาจจะพบจุดเริ่มเกิดที่สร้างจากความร้อน ที่เกิดขึ้น เมื่อขอบเขตของน้ำสูงกว่า โดยคาดว่าพื้นที่เหล่านั้นสามารถพบต้นไม้ได้สูง

#### - วัฏจักรความร้อน

กระบวนการนี้จะสะท้อนผลการเปลี่ยนแปลงหลังจากการใช้งานมานาน รวมไปถึงการรบกวน กำลังไฟฟ้าด้วย อุณหภูมิของบริเวณที่มีน้ำจะนำมาพิจารณา ซึ่งตัวนำไฟฟ้าจะมีความแห้งและ อุณหภูมิสูง ดังนั้นก็จะมีโอกาสให้การก่อตัวของจุดเริ่มเกิด ในขณะที่วัฏจักรความร้อนของน้ำใน บริเวณที่มีน้ำก็จะทำให้เกิดต้นไม้ได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิจัยการความร้อนจะเพิ่มขึ้นในทั้งความยาวและความหนาแน่นของต้นไม้ชนิดคล้ายโบว์ (Bow-tie trees) จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิคงที่ในบริเวณที่มีน้ำ ผลการทดลองจะเกิดความไวในกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสายเคเบิล ยกตัวอย่างกรณี นำเคเบิลมาแช่น้ำ ทำให้พื้นที่ที่น้ำไฟฟ้าเปียกอยู่ตลอดเวลา เพื่อจะเพิ่มความหนาแน่นและความยาวของต้นไม้แบบคล้ายโบว์ ในบริเวณที่มีการอ้อมตัวของน้ำสูงสุด พฤติกรรมนี้จะแสดงให้เห็นความสำคัญของการซึมของน้ำซึ่งจะนำไปสู่การก่อตัวของต้นไม้แบบคล้ายโบว์ในที่สุด ในอีกทางหนึ่ง การให้ความร้อนเป็นเวลานาน (50 °C ในเวลา 120 ชั่วโมง ส่งผลให้ต้นไม้ที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และการขยายตัวจนเข้าใกล้ตัวนำ) จากผลการทดลองจะเห็นว่าอายุการใช้งานมีผลต่อการเกิดต้นไม้ หรืออาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น สัณฐานวิทยา ปฏิกริยาออกซิเดชัน และการเคลื่อนย้ายของสารเคมี อาทิ antioxidant เป็นต้น ซึ่งการให้ความร้อนในอุณหภูมิที่สูงกว่า (120°C) จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ช่องว่างของวัสดุ จากการเกิดผลึกซ้ำในการเย็นตัวของวัสดุ และจะนำไปสู่การกระจายตัวของต้นไม้ชนิดคล้ายโบว์สูง

ต้นไม้แบบคล้ายครีป (Vented tree) ซึ่งเริ่มเกิดที่ผิววัสดุภายนอกของเคเบิล จะมีเส้นทางต่อเนื่องไปยังบริเวณที่มีน้ำค้างค้างอยู่ในวัสดุ ทั้งความหนาแน่นและความยาวของต้นไม้ไม่ได้มีผลมาจากวิจัยการความร้อนเลย บริเวณที่เกิดการก่อตัวใหม่อาจจะถูกสร้างจากอุณหภูมิที่สูงกว่า ซึ่งจะไม่เติบโตไปมากกว่านี้ ในบางครั้งเมื่อผ่านเวลาการขยายตัวของต้นไม้ น้ำก็จะแสดงคุณสมบัติของวัสดุออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวของต้นไม้แบบคล้ายครีปที่เติบโตจากภายในสู่ภายนอก

- อุณหภูมิคงที่

เมื่อวัสดุพอลิเมอร์อยู่ในตำแหน่งที่สามารถจะมีปฏิกริยากับบริเวณที่กักเก็บสารอิเล็กโทรไลต์ที่อุณหภูมิคงที่แล้วนั้น แรงดันของน้ำภายในพอลิเมอร์จะเข้าถึงจุดสมดุลกับแรงดันไอในบริเวณที่กักเก็บน้ำอย่างรวดเร็ว

การก่อตัวของต้นไม้แบบคล้ายโบว์ (Bow-tie trees) มาจากการเข้าถึงจุดที่มีน้ำในวัสดุ และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งความหนาแน่นของต้นไม้แบบคล้ายโบว์จะหาได้จากการแพร่กระจายที่เพิ่มขึ้นจนถึงแรงดันไอที่อ้อมตัว ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และทำให้พอลิเมอร์แห้งก่อนที่จะนำมาทดสอบหาเวลาเริ่มเกิดของต้นไม้แบบคล้ายโบว์ จากการสังเกตผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าของเวลาการก่อตัวจะลดลงเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงดันไอที่เพิ่มขึ้นและการซึมซาบของพอลิเมอร์จะช่วยในการลดเวลาที่น้ำใช้ในการเจาะทะลุบริเวณจุดที่เกิดต้นไม้

โดยปกติแล้วต้นไม้แบบคล้ายครีป (Vented tree) จะเจาะทะลุเข้าสู่บริเวณที่มีการกักเก็บสารอิเล็กโทรไลต์โดยตรง โดยที่น้ำจะมีอิทธิพลน้อยกว่าเวลาในการเริ่มเกิดและแพร่กระจายของต้นไม้ในกรณีเฉพาะ ก็คือจุดเริ่มเกิดจะมีที่มาจากเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งต้นไม้แบบคล้ายครีปจะขยายตัวจากตัวนำทองแดงที่ประกบด้วยด้วยฉนวน XLPE จากการจำลองโครงสร้างต้นไม้แบบ คล้ายครีปที่เติบโตจากตัวนำจาก การติดตั้งระบบในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ จุดเริ่มเกิดของต้นไม้แบบคล้ายครีปที่ตัวนำจะควบคุมโดยการแพร่ของน้ำสู่ตัวนำทองแดง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของต้นไม้แบบคล้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครีบกี้จะเพิ่มขึ้นตาม ส่วนเวลาเริ่มเกิดจะลดลง ในอีกทางหนึ่งหากต้นไม้เติบโตในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96% ความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ภายใต้สภาพแวดล้อมที่แรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และผลการทดลองสามารถพิจารณาได้จาก การเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาพไอน้ำในจุดสมดุลตามสภาพที่ทำให้ของเหลวในต้นไม้ลดลง

## 2. ต้นไม้ไฟฟ้า

ปัจจัยทางอุณหภูมิมักไม่ค่อยมีผลในการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า แต่จากขอบเขตข้อมูลที่มีอยู่จะปรากฏว่า ระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 °C เวลาเริ่มเกิดจะลดลง และอัตราการแพร่กระจายจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในฉนวนพอลิเอทิลีน จากการทดลองใช้ทั้งใน LDPE และ XLPE ในเวลาที่พอเหมาะสำหรับสารเคมีที่ระเหยได้เข้าไปในต้นไม้ เช่น Acetophenone ในการแพร่ของสาร

### - การเริ่มก่อตัว

การฉีดประจุจากอิเล็กโทรดแบบเข็มจะเกิดขึ้น โดยกระบวนการ Fowler-Nordheim tunnelling และการฉีดกระแสจะเกี่ยวข้องกับภาพรวมของเวลาเริ่มเกิด ( $t_i$ ) สังเกตได้จากค่าทางสถิติ ซึ่งอิทธิพลของอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลกับการกระตุ้นความร้อนของกระบวนการฉีดกระแส พฤติกรรมนี้จะคล้ายกับคุณลักษณะความต้านทานเบรกคาวาน์ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน จากการทดลองจะเห็นว่า การลดลงของ  $t_i$  เกิดขึ้นเมื่อความต้านทานเบรกคาวาน์ลดลงในจุดที่พอลิเอทิลีนจะสามารถเพิ่มช่องว่างในวัสดุฉนวน ในกรณีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นทางต้นไม้ที่มากกว่า ก็จะมีพลังงานจลน์ที่สูงกว่า ก่อนที่เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอน การแตกหักของพันธะ และการเกิดช่องว่างของ ต้นไม้ไฟฟ้าในเวลาต่อมา

ในฉนวนพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิต่ำมากๆ (77 °K) ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่ต่ำกว่าสภาพคล้ายแก้ว ยืดหยุ่น จึงมีความแข็งแรง และจะมีแรงดันก่อตัวของต้นไม้ที่มากกว่าอุณหภูมิห้อง ถึงแม้ว่าตัวอย่างขึ้นทดสอบเหล่านี้จะกำจัดก๊าซออกหมดแล้วก็ตาม จากผลการทดลองครั้งต่อๆ มาได้มีความเข้าใจผิด เพราะในกรณีของ microvoid จะก่อตัวที่ปลายของต้นไม้ในการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว จะพิจารณาในส่วนของผลของปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ดังนั้นความต้านทานในการก่อตัวจะเพิ่มขึ้น นั่นก็คือ วัสดุที่มีค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ที่สูงกว่าในพื้นที่อัญฐาน และสนามในการฉีดประจุจำเป็นต้องได้รับพลังงานจลน์ที่เพียงพอในการทำลายพันธะ เพราะว่าการเคลื่อนตัวของประจุ อาจจะถูกยับยั้งมากที่อุณหภูมิเหล่านี้

### - การแพร่กระจาย

ในระหว่างช่วงที่การสีก่อนกระจายตัวจากการดิสชาร์จ และการขยายตัวของช่องว่างในต้นไม้ไฟฟ้า กับอัตราการแพร่ที่กำหนดจากค่าปัจจัยต่างๆ อาทิ ขนาดของการดิสชาร์จ และขอบเขตของการทำลายที่สร้างที่ปลายของช่องว่าง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาจจะส่งผลกับทั้งสองปัจจัยจนทำให้อัตราการแพร่กระจายมากขึ้น เริ่มต้นจากการแพร่ของไอออนบวกจากผนังของช่องว่างเข้าสู่พอลิเมอร์ได้สะดวกขึ้น ดังนั้นความต้านทานการเกิดดิสชาร์จในช่องว่างก็จะลดลง ดิสชาร์จจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และต้นไม้จะแพร่ได้เร็วขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะต้องการสร้างกำแพงประจุ เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างต้นไม้แบบคล้ายพุ่ม และขอบเขตที่ลดลงของโครงสร้างจะช่วยให้เพิ่มอัตราการแพร่กระจาย จากความรู้นี้จะนำมาประยุกต์ใช้กับแรงดันก๊าซในช่องว่างได้อีกด้วย

ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็คือ การเพิ่มขอบเขตของการเสื่อมสภาพที่สร้างที่จุดปลายของช่องว่างจากการดิสชาร์จ เพราะว่าการเจาะทะลุของพอลิเอทิลีนจากพัลส์ประจุจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ผลการทดลองจะเป็นไปตามอิทธิของอุณหภูมิจากการลัดวงจร และอิมพัลส์ของต้นไม้ซึ่งจะเป็นผลมากจากการเพิ่มขนาดของช่องว่างอากาศ ที่ประจุถูกเร่งด้วยความเร็ว ปัจจัยนี้จะเพิ่มอัตราการแพร่กระจายของต้นไม้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

## 2.10 ต้นไม้ น้ำ และต้นไม้ไฟฟ้า [3],[7]

### 2.10.1 ความหมายของต้นไม้ น้ำ

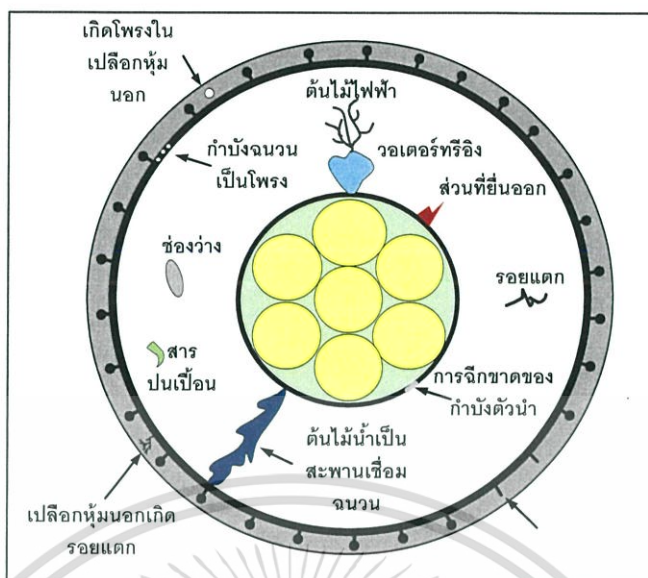
ต้นไม้ น้ำ ที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนของสายตัวนำ ซึ่งไม่ว่าจะเป็นโพลีเอทิลีน (Polyethylene) และครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (Cross-linked polyethylene, XLPE) ต้นไม้ น้ำ นั้นเป็นต้นไม้ประเภทหนึ่งที่เกิดในฉนวนไฟฟ้า ซึ่งต้นไม้จะประกอบด้วยต้นไม้ น้ำ และต้นไม้ ไฟฟ้า ซึ่งการเกิดต้นไม้ทั้งหมดนี้ยังเป็นต้นเหตุอย่างหนึ่งของความเสียหายก่อนการ เบรกดาวน์ทางไฟฟ้า (Electrical pre-breakdown damage)

ซึ่งผลของต้นไม้ น้ำ นั้นสามารถสังเกตเห็นได้ มีรูปร่างคล้ายๆ ต้นไม้ โดยจะมีลักษณะต่างๆ กันไป และเกิดในบริเวณต่างๆ ของฉนวนในสายตัวนำ โดยภายในของต้นไม้ น้ำ นั้นจะมีน้ำ หรืออาจจะ เป็นของเหลวชนิดอื่น โดยเฉพาะของเหลวชนิดมีขั้ว (Polar liquid)

### 2.10.2 สาเหตุการเกิดต้นไม้ น้ำ

สาเหตุการเกิดของต้นไม้ น้ำ นั้นเกิดจากสภาวะแวดล้อม และคุณภาพของฉนวนของสายตัวนำ นั้นๆ ซึ่งการเกิด ต้นไม้ น้ำ นั้นจะต้องใช้เวลานานมาก โดยอายุการใช้งานของสายตัวนำ นั้นจะต้องมี ประมาณ 6-7 ปีขึ้นไป จึงจะเกิดต้นไม้ น้ำ ขึ้น

สภาวะแวดล้อมที่ที่เอื้อประโยชน์ต่อการเกิดต้นไม้ น้ำ นั้น จะอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าและมี ความชื้นอยู่ในสายตัวนำ นั้นๆ ได้แก่ การฝังลงดินโดยตรง การฉีกขาดของเปลือกหุ้มภายนอก ส่วนคุณภาพของฉนวนของสายตัวนำ นั้น ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในการผลิตในขั้นตอนต่างๆ และ เทคโนโลยีในการผลิต ในรูปที่ 2.25 จะแสดงตัวอย่างข้อผิดพลาดในฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างข้อผิดพลาดพร่องในฉนวน [3]

### 1. ช่องว่างในเนื้อฉนวน

โดยทั่วไปแล้วช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กประมาณ 10-80 ไมโครเมตร โดยจะเกิดอยู่ทั่วไปในเนื้อฉนวนซึ่งอาจจะได้แก่

- ฟองอากาศหรือฟองก๊าซ
- ช่องว่างที่เกิดจากการมีก๊าซเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน
- ช่องว่างที่มีความชื้นอยู่ภายใน
- ช่องว่างที่เกิดจากความผิดพลาดของรอยต่อระหว่างชั้น

โดยในช่องว่างเหล่านี้จะเกิดการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge) ซึ่งจะสร้างความเสียหายแก่ตัวฉนวน และยังเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดต้นไม้ไฟ

### 2. ส่วนขรุขระของส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำ

ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งชั้นสารกึ่งตัวนำภายในหรือคอนดักเตอร์ชิลด์ (Conductor shield) และชั้นสารกึ่งตัวนำภายนอก หรืออินซูลेशनชิลด์ (Insulation shield) โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้สนามไฟฟ้าจะกระจายไม่สม่ำเสมอ และจุดนั้นๆ จะมีความเครียดทางไฟฟ้าสูงกว่าปกติ จึงอาจจะสร้างความเสียหายแก่เนื้อฉนวน และเป็นจุดเริ่มต้นของต้นไม้ไฟ

### 3. สิ่งแปลกปลอมภายในเนื้อฉนวน

โดยสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้จะเข้าไปอยู่ในเนื้อฉนวน ในระหว่างขั้นตอนการผลิต เช่น

ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ ได้แก่ ขั้นตอนการผลิตเม็ดพลาสติก

- ขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนการผสมวัสดุดิบ
- ขั้นตอนการอัด, รีดฉนวน

โดยสิ่งแปลกปลอมอาจจะเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้อาจจะมี ส่วนประกอบของน้ำแล้วความชื้นอยู่ เมื่อนำมาใช้งานจะเกิดการแยกตัวของน้ำหรือทำปฏิกิริยากับ เนื้อฉนวน และเป็นจุดเริ่มต้นของต้นไม้

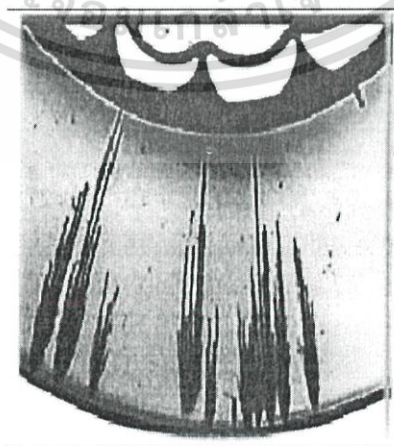
ต้นไม้ แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) แบบคล้ายโบว์ ( Bow-tie tree) : โตในตำแหน่งเฉพาะช่องว่างที่มีสารปนเปื้อนของสาร ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่ไม่ทำให้ฉนวนเสียหาย Bow-tie-tree ขยายตัวไปได้ในระดับ หนึ่งก็จะหยุดขยายตัว



รูปที่ 2.26 Bow-Tie treeing

- 2) แบบคล้ายครีป ( Vented tree) : เริ่มต้นจากจุดเชื่อมระหว่างกำบังสารกึ่งตัวนำและฉนวน หรือบริเวณที่มีความบกพร่องของสารกึ่งตัวนำ มันสามารถขยายตัวได้เรื่อยๆ เป็นสาเหตุ ของการล้มเหลวของสายเคเบิล Vented tree แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 Vented Treeing

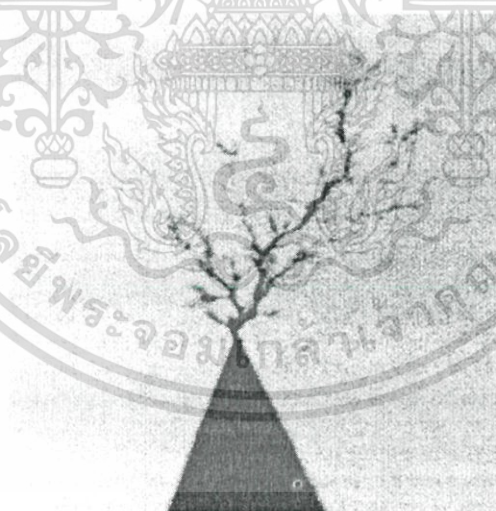
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.3 ลักษณะทั่วไปของ ต้นไม้ไฟฟ้า

สายเคเบิลไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานาน คุณสมบัติของฉนวนจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากความเครียดทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางกล และจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ความบกพร่องในสายเคเบิลกับฉนวนพอลิเมอร์ที่สามารถก่อให้เกิดความล้มเหลวของสายเคเบิล ข้อบกพร่องเหล่านี้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ส่วนที่ยื่นออกมา (Protrusions) ช่องว่าง (Voids) รอยแตก (Cracks) การหลุดลอก (Elaminations) การฉีก ขาดของกำบังตัวนำ (Conductor Shield Interruptions) การเกิดต้นไม้ไฟ และต้นไม้ไฟฟ้า เป็นต้น

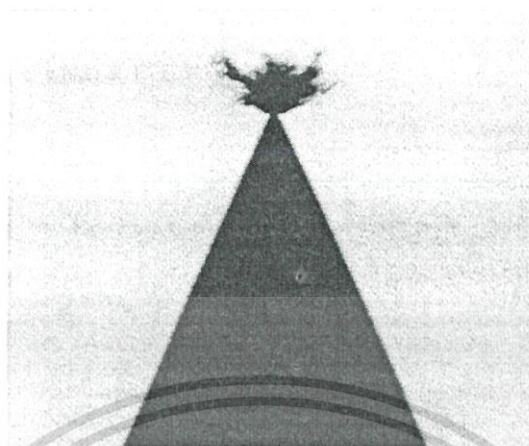
ต้นไม้ไฟฟ้า พบได้ในฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งจะพบการเติบโตมากในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสูงเช่นในโลหะที่มีลักษณะไม่เรียบ หยาบ ตัวนำไฟฟ้าที่มีสารปนเปื้อน และโครงสร้างที่มีลักษณะผิดปกติ การดิสชาร์จบางส่วนในช่องว่างยังสามารถก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างจากพื้นผิวช่องว่างนั้น ซึ่งเป็นผลจากต้นไม้ไฟฟ้า ซึ่งต้นไม้เหล่านั้นเริ่มต้นที่อิเล็กโทรดที่เรียกว่า ต้นไม้แบบคล้ายครีบ ในขณะที่ต้นไม้เริ่มก่อตัวในเนื้อฉนวนซึ่งการแตกกิ่งก้าน หรือขยายตัวของต้นไม้ตามแนวเส้นสนามจะเรียกว่า ต้นไม้แบบคล้ายโบว์ ซึ่งจะแบ่งตามลักษณะรูปร่างของต้นไม้ไฟ และต้นไม้ไฟฟ้า ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

#### 1. ต้นไม้แบบกิ่ง (Branch-type tree)



รูปที่ 2.28 ต้นไม้แบบกิ่ง [6]

## 2. ต้นไม้แบบพุ่ม (Bush-type tree)



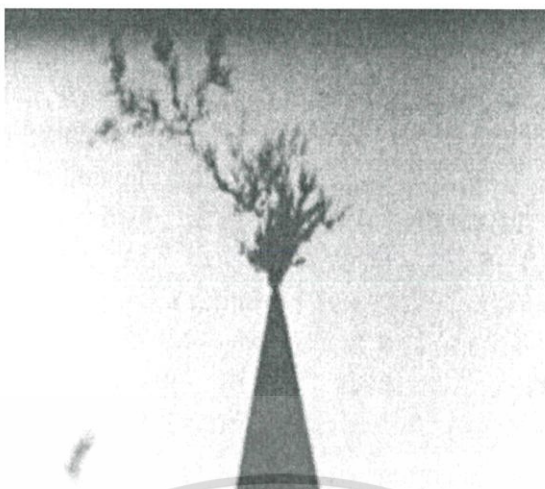
รูปที่ 2.29 ต้นไม้แบบพุ่ม [6]

## 3. ต้นไม้แบบพุ่มและกิ่ง (Bush- Branch type tree)

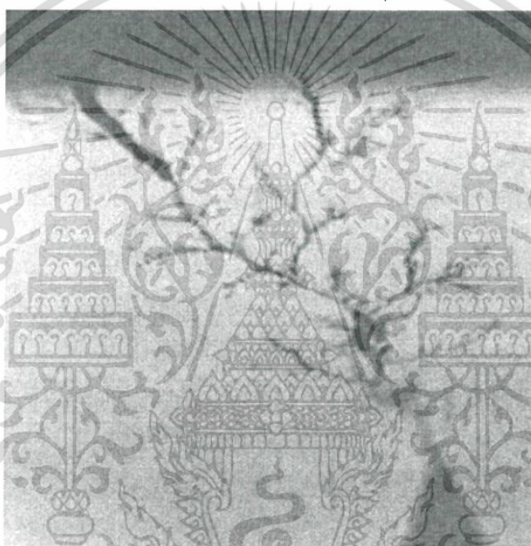


รูปที่ 2.30 ต้นไม้แบบพุ่มและกิ่ง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 ก่อนการเบรกดาว์นของต้นไม้แบบพุ่ม (Bush-type tree) [6]

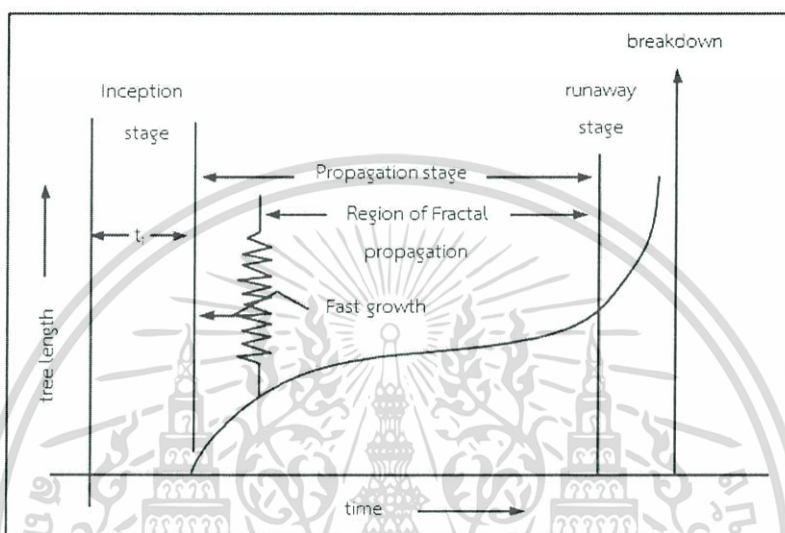


รูปที่ 2.32 ก่อนการเกิดเบรกดาว์นของต้นไม้แบบกิ่ง (Branch-type tree) [6]

จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยมีการทดลองแบบต่างๆ ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้เข็มโลหะทำให้เกิดความเครียดทางสนามไฟฟ้า ซึ่งผลของการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า จะไม่ได้เกิดขึ้นเพียงโดยใช้แรงดัน AC อย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังเกิดขึ้นกับแรงดัน DC ด้วย ในการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ฟ้า จะมีการเริ่มเกิดและขยายตัว เมื่อตรวจสอบภายใต้ค่าคงที่ของความเครียด ระยะแรกที่เกิดคือระยะที่เริ่มเกิดตามเวลา ซึ่งสามารถกำหนดเวลาที่ใช้ในการเกิดโดยสังเกตจากต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ฟ้า ซึ่งระยะนี้ ต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ฟ้า จะมีความยาวประมาณ  $10 \mu\text{m}$  โดยเวลานี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้า  $E^3$  โดย  $5 > a > 2$  ซึ่งต้นไม้ฟ้า และต้นไม้ฟ้า ที่เกิดในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่จะสามารถเห็นได้ชัด แต่ถ้ามีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่า  $2 \mu\text{m}$  จะสามารถตรวจสอบได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นแรกของการขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า จะมีอัตราการเติบโตที่ช้าเช่นเดียวกับต้นไม้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าเกิดการขยายตัวถึงจุดหนึ่งแล้วอาจจะเกิดเบรกดาวนได้จนทำให้เกิดความล้มเหลวของระบบ โดยในรูปด้านล่างจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อตรวจสอบระยะเวลาการขยายตัว ต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ อย่างละเอียดในการเกิดของต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ ในชั้นต่างๆ โดยพบว่าซึ่งเมื่อเริ่มเกิดการขยายตัวของ ต้นไม้ไฟฟ้า และต้นไม้ อย่างรวดเร็วแล้วจะค่อยๆ เป็นไปอย่างช้าๆ ตามกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ระยะเวลาการเริ่มต้นและการขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและประกอบสร้าง

#### 3.1 กล่าวนำ

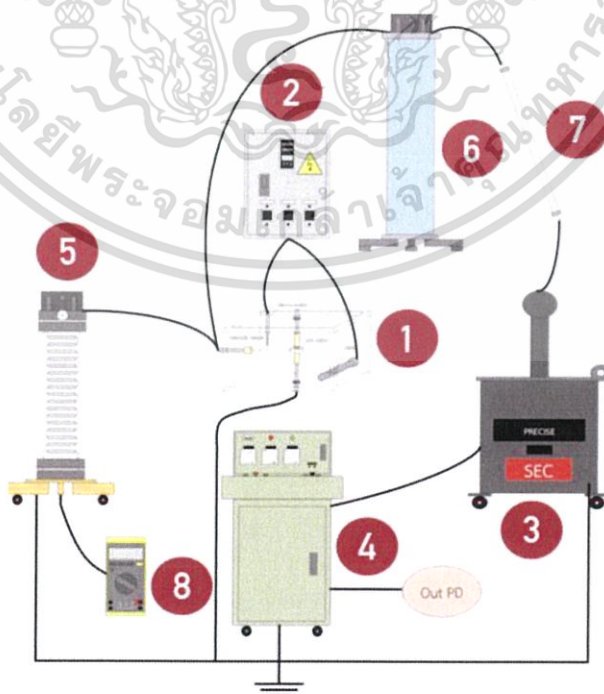
การศึกษาการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในฉนวน XLPE สายเคเบิลไฟฟ้ามีหลายวิธี โดยวิธีที่ออกแบบคือ ป้อนแรงดันไฟฟ้า และเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการทดสอบ ซึ่งทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์พลาสมาในการจ่ายแรงดันเพื่อสร้างต้นไม้ไฟฟ้าภายในฉนวนในเงื่อนไข อุณหภูมิที่แตกต่างกัน แล้วทำการบันทึกข้อมูลลักษณะการก่อตัว และขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า ตามระยะเวลาที่ทดสอบ ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบตามที่ออกแบบไว้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และการเตรียมวัสดุทดสอบ

#### 3.2 การทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

การทดสอบจะกล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบ ที่จะนำมาใช้ในกระบวนการทดสอบ โดยจะต้องทำการเตรียมชิ้นงานสายเคเบิลทดสอบเพื่อให้พร้อมต่อการทดสอบตามที่กำหนดไว้ รวมไปถึง กำหนดตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมหรือตัวแปรอิสระในการทดสอบ ซึ่งจะแบ่งได้ ดังนี้

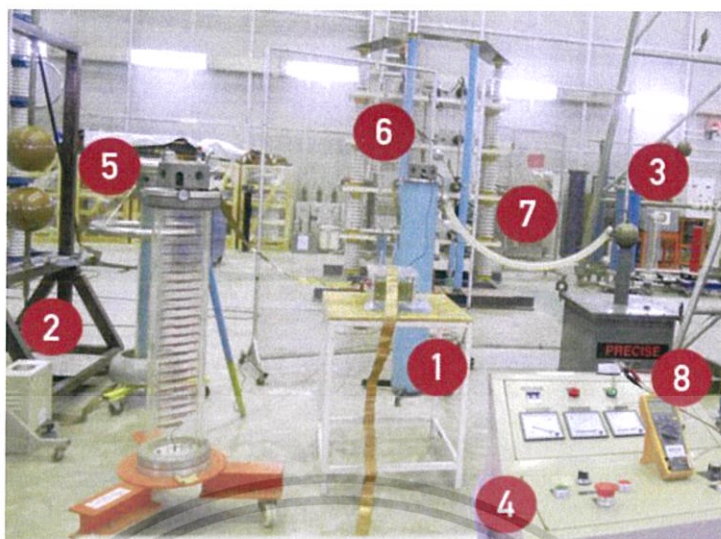
##### 3.2.1 การออกแบบชุดทดสอบและสร้างชุดศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า

ชุดทดสอบและศึกษาปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างต้นไม้ ไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE โดยจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าสูง 10 kV ความถี่ 50 Hz ที่อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิของสายเคเบิลในขณะทำงานปกติเพื่อเร่งการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า แบบจำลองชุด ทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิล ฉนวน XLPE และ วงจรที่ทดสอบจริง แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยอุปกรณ์แต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้



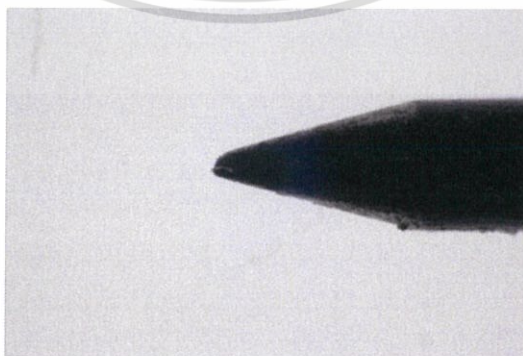
รูปที่ 3.1 แบบจำลองชุดทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



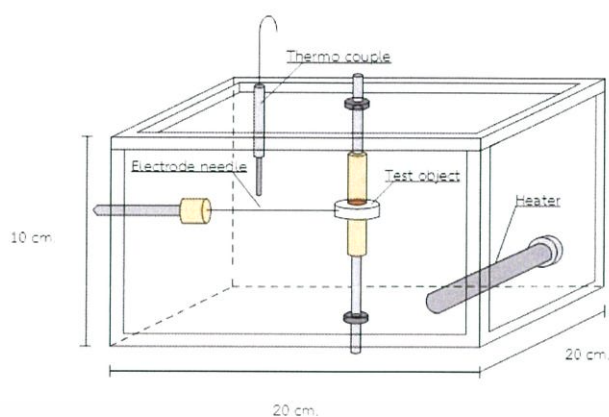
รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า

1. กล่องอะคริลิก มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 20 cm ยาว 20 cm สูง 10 cm ใช้ติดตั้งสายเคเบิลทดสอบสำหรับการทดสอบชิ้นงานสายเคเบิลฉนวน XLPE ภายในบรรจุน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 2.5 ลิ เป็นฉนวนเพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จตามผิวของสายเคเบิลทดสอบ ซึ่งภายในกล่องจะประกอบด้วย อิเล็กโทรดปลายแหลม ที่มีขนาดรัศมีของปลายแหลม  $40\ \mu\text{m}$  ซึ่งอิเล็กโทรดปลายแหลมจะแสดงดังรูปที่ 3.3 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์จ่ายแรงดันสูงเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าให้กับสายเคเบิลทดสอบ XLPE เพื่อสร้างต้นไม้ไฟฟ้า มีอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ ยึดทั้งด้านบนและด้านล่างของสายเคเบิลทดสอบเพื่อต่อระบบกราวด์ มีเครื่องทำความร้อนแบบหัวเกลียวขนาด 220 V 500 W สำหรับให้ความร้อนแก่น้ำมันหม้อแปลง และเทอร์โมคัปเปิลที่เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง และส่งค่าไปแสดงยังกล่องควบคุมอุณหภูมิ โดยเครื่องทำความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลจะเชื่อมต่อกับกล่องตัดต่ออุณหภูมิ ภาพจำลองกล่องอะคริลิกที่ออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ 3.4 และภาพจริงของกล่องอะคริลิกที่ทำการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 อิเล็กโทรดปลายแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แบบจำลองกล่องอะคริลิกที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของกล่องอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบ

2. กล่องควบคุมอุณหภูมิ มีหน้าควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในขณะทำการทดสอบ การเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลทดสอบให้มีค่าคงที่ และถูกต้องตลอดระยะเวลาการทดสอบ ซึ่งจะสามารถตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการได้ เป็นการจำลองความเครียดทางความร้อนด้วยหลายระดับ อุณหภูมิประกอบด้วย ประกอบด้วยอุณหภูมิ 50°C 60°C 70°C 80°C และ 90°C ตามลำดับ โดยจะเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิล และเครื่องทำความร้อน จากกล่องอะคริลิกที่ติดตั้งสายเคเบิลทดสอบ กล่องควบคุมอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กล่องควบคุมอุณหภูมิ

3. หม้อแปลงแรงดันสูง เป็นอุปกรณ์แปลงแรงดันต่ำให้เป็นแรงดันสูงเพื่อจ่ายให้กับสายเคเบิล ทดสอบผ่านอิเล็กทรอนิกส์ที่ปลายแหลม โดยเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส พิกัด 220/100 KV 5 KVA 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หม้อแปลงแรงดันสูง

4. อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ใช้สำหรับจ่ายแรงดันตามการทดสอบที่กำหนดไว้ นั่นก็คือ 10 kV โดยรับแรงดันอินพุตเข้าผ่านเครื่อง แล้วแรงดันเอาต์พุตจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อแปลงแรงดันให้เป็นแรงดันสูงเพื่อจ่ายให้ขั้วทดสอบต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์จ่ายแรงดัน

5. ชุดแบ่งวัดแรงดันไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุ (RC Divider) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูง ที่บ่อนจากหม้อแปลงแรงดันสูง มีอัตราขยาย 1:980 เพื่อจะได้ปรับ และทราบค่าแรงดันตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดแบ่งวัดแรงดันไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ที่พักสาย เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างแรงดันสูงจากหม้อแปลงกับที่ป้อนเข้า อิเล็กโทรดปลายแหลม ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ที่พักสาย

7. ตัวต้านทานชนิดน้ำ คืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อแรงดันสูงที่ออกมาจากหม้อแปลงกับที่พักสาย เพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวต้านทานชนิดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. มัลติมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดสัญญาณทางด้านแรงดันสูงที่แปลงจากชุดแบ่งวัตต์แรงดันไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุเป็นแรงต่ำเพื่อเข้ามิเตอร์ และอ่านค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบได้อย่างถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 3.12

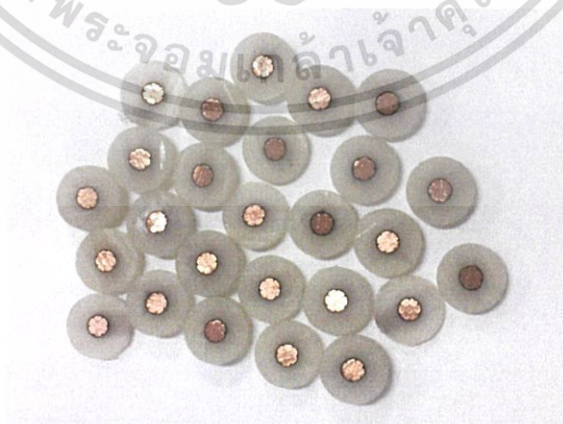


รูปที่ 3.12 มัลติมิเตอร์

### 3.2.2 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

สายเคเบิลแรงสูงที่นำมาศึกษา และวิจัยการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในงานทดสอบนี้จะใช้สายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 33 kV ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยมีขนาดความหนาของฉนวนเท่ากับ 9 mm และตัวนำเป็นทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm

วิธีการเตรียมเคเบิล ทำได้โดยนำสายเคเบิลมาตัดตามแนวขวาง ให้มีความหนา 5 mm จากนั้นแกะชั้นที่อยู่ภายนอกให้เหลือแต่ชั้นฉนวน XLPE เครื่องป้องกันตัวนำ และตัวนำไฟฟ้า สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ตัวแปรควบคุมในการทดสอบ

ตัวแปรควบคุมในการทดสอบเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการทดสอบ เพราะการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า ออกแบบเพื่อทดสอบผลของความเครียดทางความร้อน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ส่วน เงื่อนไขอื่น ๆ ก็ต้องควบคุมให้คงที่ในทุก ๆ การทดสอบ โดยตัวแปรควบคุมในการทดสอบจะมีทั้งหมด 3 ตัวแปร ดังนี้

1. ความถี่ ใช้ความถี่ปกติของคลื่นแรงดันรูปคลื่นไซน์ เท่ากับ 50 Hz

2. แรงดันไฟฟ้า สำหรับป้อนให้กับสายเคเบิลทดสอบผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เพื่อเร่ง การเกิดของต้นไม้ไฟฟ้า และต้องการทำให้สายเคเบิลทดสอบได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่มากพอ จึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า 10 kV

3. อุณหภูมิ ที่ใช้จะมีค่าสูงกว่าระดับปกติที่สายเคเบิลใช้งาน เพื่อเร่งการเกิดของต้นไม้ไฟฟ้า โดยทำการทดสอบที่ 50°C, 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C

### 3.3 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้ได้กล่าวถึงการเตรียมชุดทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในฉนวนสายเคเบิล XLPE ซึ่งจุดประสงค์หลักของการทดสอบคือ เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าของฉนวน XLPE ขณะรับแรงดันสูงภายใต้สภาพอุณหภูมิที่ต่างกัน สำหรับรายละเอียดของการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้ อธิบายในบทนี้ได้แก่ ชุดทดสอบ อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงการเตรียมสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใช้ในการ ทดสอบ หลังจากที่ได้ทำการออกแบบสร้างชุดทดสอบเรียบร้อยแล้ว ในบทถัดไปจะนำเสนอขั้นตอน กระบวนการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

#### 4.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล XLPE

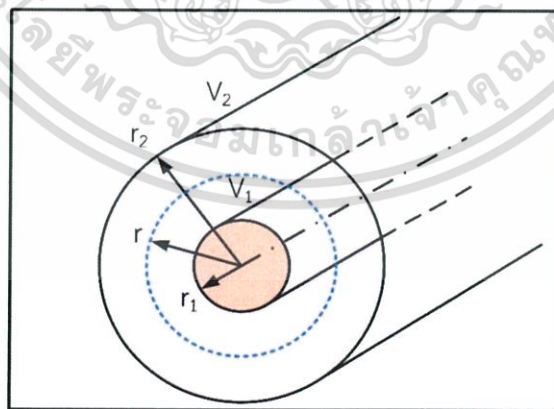
##### 4.1.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงระบบ 33 kV ที่ใช้ฉนวนชนิด XLPE การกำหนดเลือกระดับแรงดันที่จ่ายให้กับอิล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิล็กโทรดจะต้องเลือกให้เหมาะสม โดยความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน XLPE จะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 33 kV และความคงทนค่าไดอิเล็กทริกของฉนวน (Dielectric strength of material) ซึ่งระดับแรงดันที่จ่ายให้กับอิล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิล็กโทรดมีความสัมพันธ์กับความเครียดสนามไฟฟ้าภายในฉนวน XLPE ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 33 kV ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และทำการสร้างแบบจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าสูงสุด ที่เกิดขึ้นในการศึกษาปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม Comsol multiphysic 3.5 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแรงดันที่จ่ายให้กับอิล็กโทรด และระยะห่างที่เหมาะสมของอิล็กโทรดทั้งสองขั้ว รวมไปถึงใช้เพื่ออธิบายการเริ่มต้นก่อตัว และขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้าในฉนวน XLPE

##### 4.1.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

ความเครียดของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 33 kV หาได้ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมดังแสดงในรูปที่ 4.1 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมี และพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวดักไฟฟ้า ดังนั้นโดยอาศัยการปริพันธ์สมการแมกซ์เวลล์ดั่งสมการที่ 4.1

$$Q = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

สำหรับแบบจำลองทรงกระบอกซ้อนกันจะมีความยาวเท่ากับ  $l$  รัศมีเท่ากับ  $r$  ซึ่ง  $r_1 \leq r \leq r_2$  และ  $E = \frac{D}{\epsilon}$  ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r$  จะได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \times \frac{1}{r} \quad (4.2)$$

แรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกซ้อนกันทั้งสอง คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (4.3)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \times \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.4)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะ  $r$  ใด ๆ ( $r_1 \leq r \leq r_2$ )

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.5)$$

เพราะฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อน นั่นก็คือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.5)$$

โดย  $U$  คือ แรงดันไฟ

$r_1$  คือ รัศมีของตัวนำไฟฟ้า

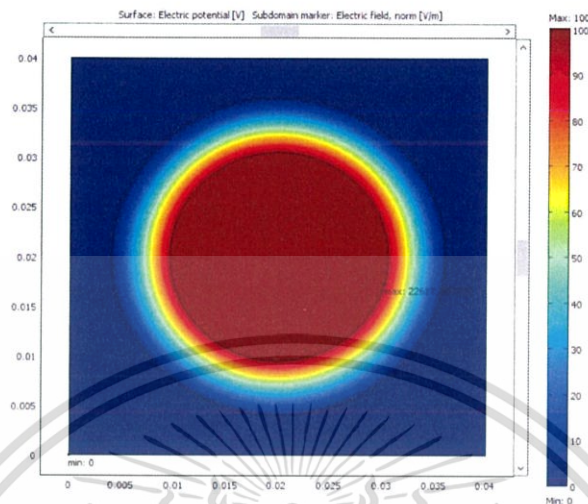
$r_2$  คือ รัศมีของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า

สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใช้ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า เป็นสายเคเบิลแรงสูงสำหรับระบบจำหน่าย 33 kV ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีความหนาของฉนวนเท่ากับ 10 mm ตัวนำเป็นทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm จากสมการที่ (4.6) ทำการแทนค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 V รัศมีของตัวนำ  $r_1$  เท่ากับ 4.5 mm และรัศมีของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีตัวนำ  $r_2$  เท่ากับ 14.5 mm เพื่อหาค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ในสายเคเบิลในสภาวะทำงานปกติ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 22.6104 kV/mm

เพื่อพิสูจน์ว่าค่าที่วิเคราะห์จากโปรแกรม Comsol มีความถูกต้อง จึงทำการเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์กับสมการทรงกระบอกซ้อนกันแล้ว ดังสมการที่ 4.6 ได้การกระจายสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.1 จากการวิเคราะห์โดย Comsol ได้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 22.617 kV/mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณจากสูตรมาก จึงสรุปว่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีความถูกต้อง และสามารถนำไปอ้างอิงในการทดสอบได้อย่างถูกต้อง

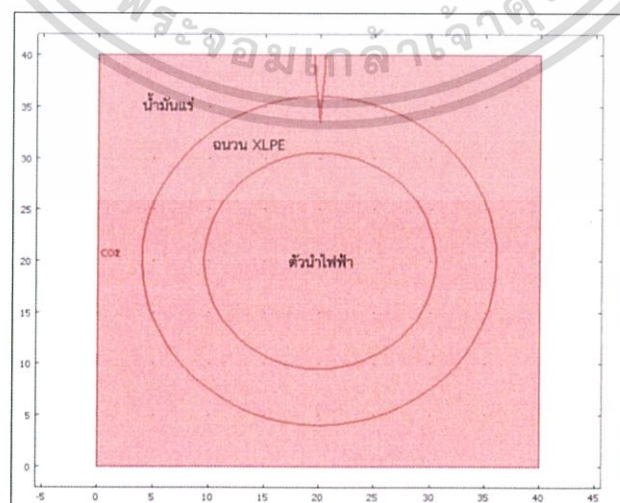


รูปที่ 4.2 การกระจายสนามไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วย Comsol

#### 4.1.3 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในการศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า

เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สายเคเบิลแรงสูงเกิดการเสื่อมอายุ และเกิดความเสียหายในต้นไม้ไฟฟ้า เช่นกัน ผู้วิจัยจึงทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol เพื่อจำลองสนามไฟฟ้าก่อนการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE เพื่อที่ใช้ในการอธิบายการก่อตัว และขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า

การจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า และการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 33 kV เริ่มต้นจากวาดรูปแบบจำลองการทดสอบสายเคเบิล โดยให้สายเคเบิลอยู่ในน้ำมันแร่ เพื่อให้ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง จึงต้องทำการกำหนดขนาดของสายเคเบิล และรูที่เจาะให้ใกล้เคียงกับขนาดจริงมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.3



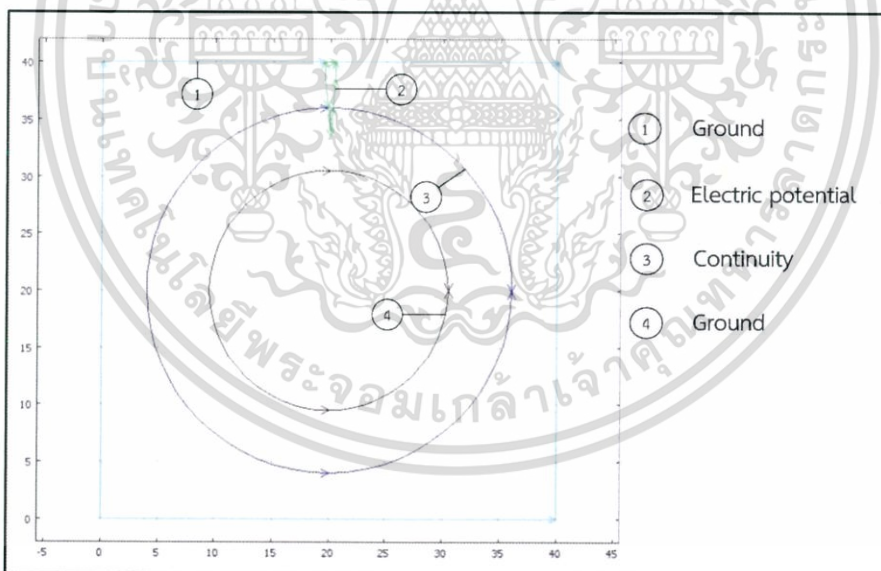
รูปที่ 4.3 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองมีการกำหนดค่าขอบเขต (Boundary setting) โดยแบ่งค่าขอบเขต ออกเป็น 3 ส่วน เริ่มต้นจากกำหนดขอบรอบนอก ซึ่งเป็นเส้นขอบปิดโดยการตั้งค่าเส้นที่ 1 และเส้นที่ 4 เป็น Ground เลือกเส้นของอิเล็กโทรดในเส้นที่ 2 ตั้งค่าเป็นศักย์ไฟฟ้า (Electric potential) ซึ่งกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 100 V ส่วนที่ 3 เส้นที่ 3 ตั้งค่าเป็น Continuity แสดงดังรูปที่ 4.4 และสรุปการเลือกและเงื่อนไขของขอบเขตแสดงดังตารางที่ 4.1 รวมไปถึงตัวอย่างของ Triangular mesh ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.5

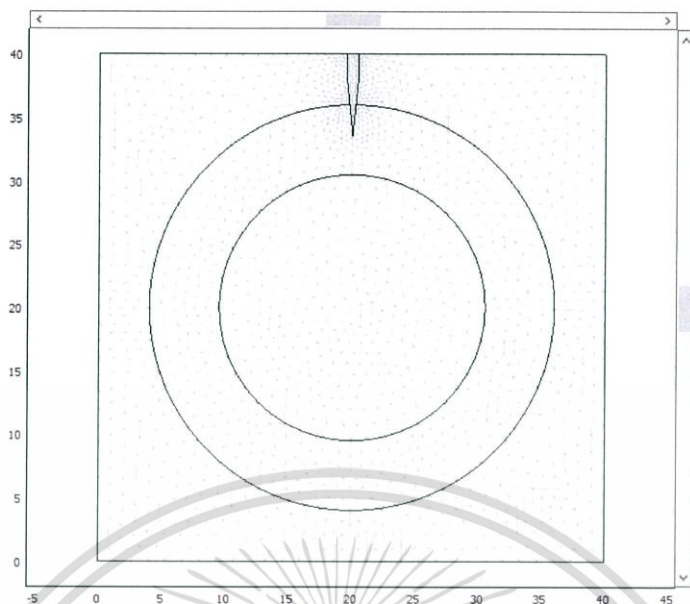
ตารางที่ 4.1 สรุปการเลือกและเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์

การเลือกขอบเขต (Boundary selection)	เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)
เส้นที่ 1	Ground
เส้นที่ 2	Electric Potential
เส้นที่ 3	Continuity
เส้นที่ 4	Ground



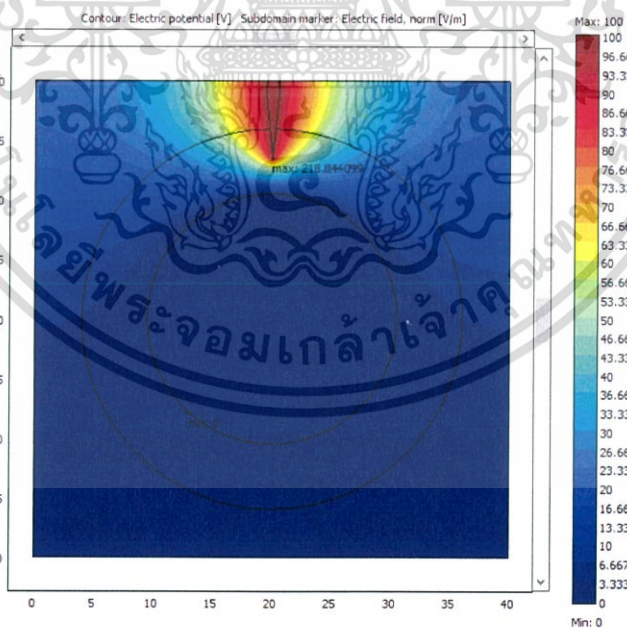
รูปที่ 4.4 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



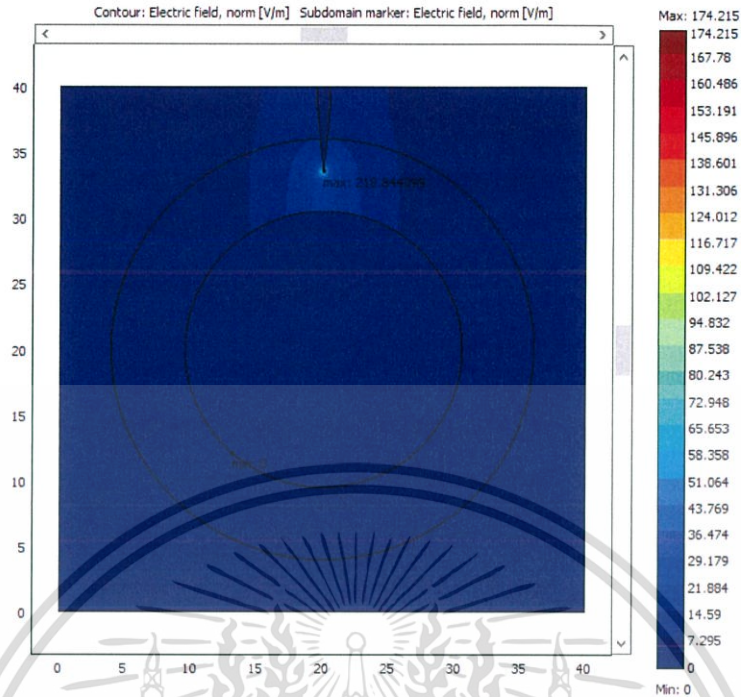
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของ Triangular mesh

การจำลองลักษณะการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้า (Electric potential contour) และสนามไฟฟ้า (Electric field contour) ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูง ระบบจำหน่าย 33 kV แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

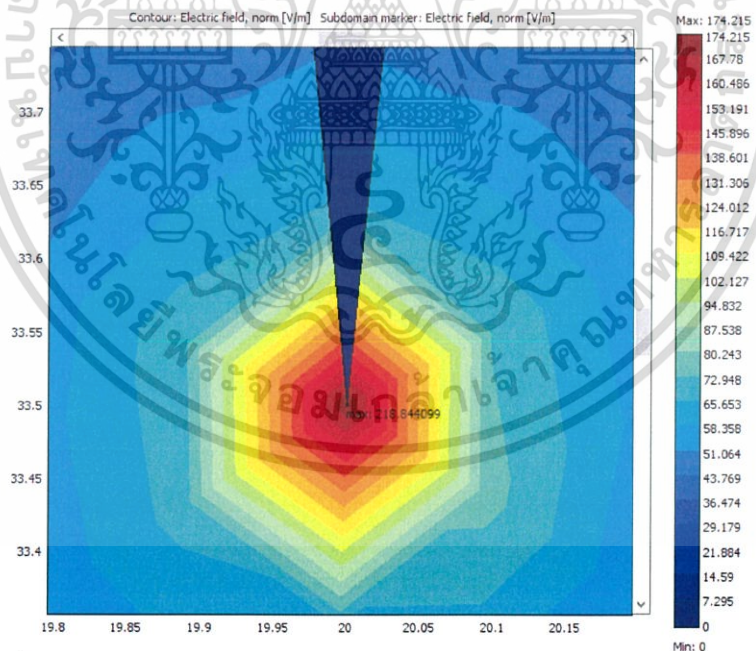


รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE



รูปที่ 4.8 ภาพขยายของการกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าภายในวัสดุทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดที่บริเวณปลายของรูที่ถูกเจาะไว้ ( $E_m$ ) มีค่าเท่ากับ 218.84 V/m ซึ่งสามารถอ้างอิงความถูกต้องได้จากการพิสูจน์การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมกับสมการทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมตามหัวข้อที่ 4.1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 วิธีดำเนินการทดสอบ

จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดด้วยโปรแกรม Comsol แล้วจึงทราบว่าบริเวณจุดที่มีความแหลมคมจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด อันเป็นบริเวณที่จะมีอัตราการก่อตัว และขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้าสูงสุด จึงนำผลการจำลองมาปรับใช้ โดยการป้อนแรงดันสูงผ่านอิเล็กโทรดปลายแหลมที่เจาะค้ำในเนื้อฉนวน XLPE สายเคเบิลแรงสูง 33 kV ภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าที่ระดับแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz แต่จะเปลี่ยนสภาวะความเครียดทางความร้อนเพียงอย่างเดียว ทำทั้งหมดสามชุดเพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะมีเงื่อนไขการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบ ดังนี้

##### 4.2.1 เงื่อนไขการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า

การทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า จะทำการจำลองสภาวะความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดด้วย และจะเพิ่มปัจจัยของความเครียดจากความร้อน โดยจะทำการเปลี่ยนอุณหภูมิทดสอบให้มีความแตกต่างกัน ในตารางที่ 4.2 แสดงปัจจัยที่ควบคุมในการดำเนินการทดสอบเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ

ตารางที่ 4.2 การทดสอบต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิล

การทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูง 33 kV	เงื่อนไขการทดสอบ				
สายเคเบิล	สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE 33 kV ตัดขวาง ความหนา 5 mm				
แรงดันไฟฟ้า	กระแสสลับรูปคลื่นไซน์ 10 kV				
ความถี่	50 Hz				
อุณหภูมิ	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
เวลาในการทดสอบ	1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง				

##### 4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับขั้นตอนในการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า จะใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE 33 kV ตัดขวาง ความหนา 5 mm เป็นชิ้นงานในการทดสอบ ซึ่งจะอธิบายได้ ดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยการนำสายเคเบิลที่เตรียมไว้มาเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดปลายแหลม โดยเจาะเข้าไปในเนื้อฉนวน XLPE ลึกประมาณ 2 mm แล้วติดตั้งในกล่องอะคริลิกที่บรรจุน้ำมันหม้อแปลงไว้ ซึ่งสายเคเบิลทดสอบจะแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเพื่อป้องกันการดิสชาร์จตามผิวของชิ้นงาน

2. โดยการทดสอบจะใช้แรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ระดับแรงดัน 10 kV ความถี่ 50 Hz จ่ายผ่านอิเล็กโทรดปลายแหลม ซึ่งจะคงที่ตลอดการทดสอบ แต่จะเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงตั้งแต่ 50°C 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C

3. เมื่อครบเวลาตามที่กำหนด 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง จึงทำการปิดเครื่องควบคุมแรงดัน จากนั้นนำชิ้นส่วนสายเคเบิลทดสอบออกมาทำความสะอาด จากนั้นทำการติดตั้งสายเคเบิลทดสอบชิ้นใหม่ และทำการจ่ายแรงดันไปจนครบการทดสอบ ทำเงื่อนไขละ 3 ครั้ง เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้นำไปเปรียบเทียบหาค่าเฉลี่ยต่อไป

#### 4.3 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูง 33 kV ด้วยโปรแกรม COMSOL ว่าบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะมีโอกาสที่จะเกิดต้นไม้ไฟฟ้ามากกว่าจุดอื่น ซึ่งจะสามารถนำความรู้นี้ออกแบบการทดสอบได้ว่าควรจะทำอย่างไรให้เหมาะสม และทำให้เกิดผลลัพธ์ตามที่ต้องการ เมื่อได้ดำเนินการทดสอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนของการเก็บผลการทดสอบ ซึ่งจะนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูความยาวของต้นไม้ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบตามเงื่อนไขสถานะต่าง ๆ อาทิ อุณหภูมิ เวลา เป็นต้น โดยจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป



## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 5.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 4 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทำการทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินระบบ 33 kV หลังจากที่ได้ทำการทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าเสร็จสิ้นตามขั้นตอนเรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดสอบโดยศึกษาลักษณะรูปแบบของการเกิดต้นไม้ ที่มีผลมาจากปัจจัยต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ รวมไปถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกรณีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้

#### 5.2 ผลการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

##### 5.2.1 การวัดขนาดของต้นไม้ไฟฟ้า

การทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE จะทำการตรวจสอบลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ Nikon SMZ 745T แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยมีการวัดขนาดของต้นไม้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็คือ ต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มจะวัดความยาวและความกว้าง ส่วนต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งจะวัดความยาวเพียงอย่างเดียว

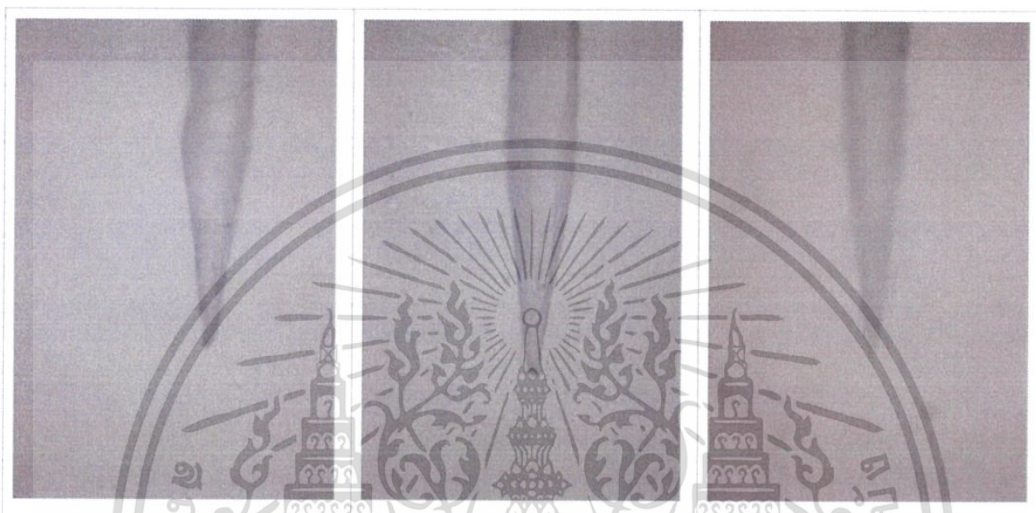


รูปที่ 5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ Nikon SMZ 745T สำหรับใช้ตรวจหาต้นไม้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 ต้นไม้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

เมื่อหลังจากการทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ได้ทำการศึกษาการเกิดและขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้าที่ป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิก็จะแบ่งขึ้นส่วนตามเวลาการทดสอบออกเป็น 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง โดยเงื่อนไขทั้งหมดจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำไปวิเคราะห์ความแตกต่างในแต่ละตัวแปรต่อไป ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.13

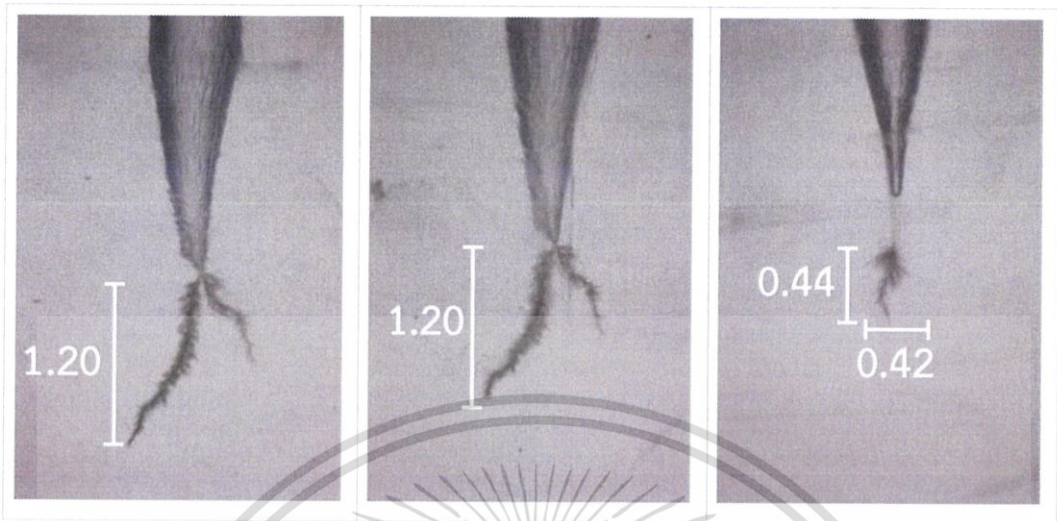


รูปที่ 5.2 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 50°C เวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 5.3 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 60°C เวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

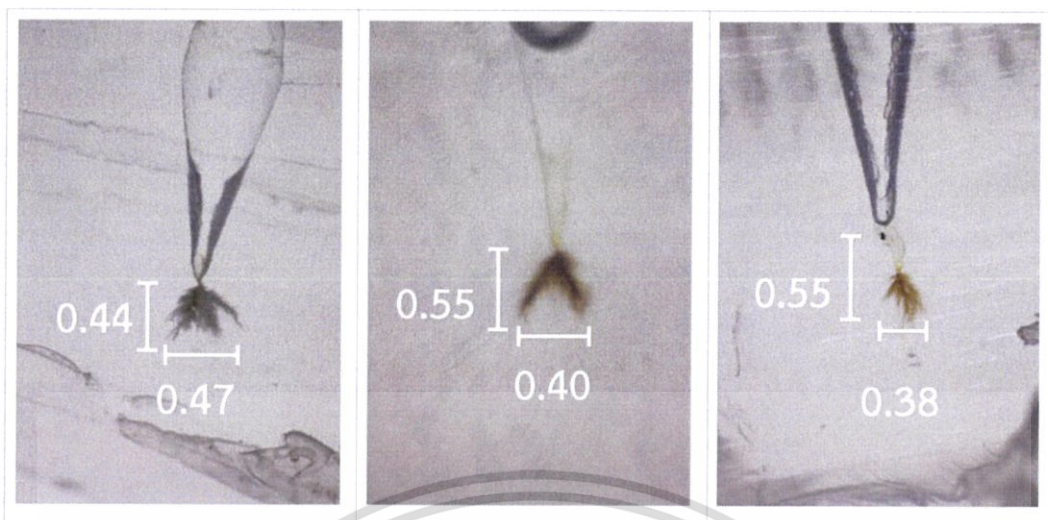


รูปที่ 5.4 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 60°C เวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 5.5 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 70°C เวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

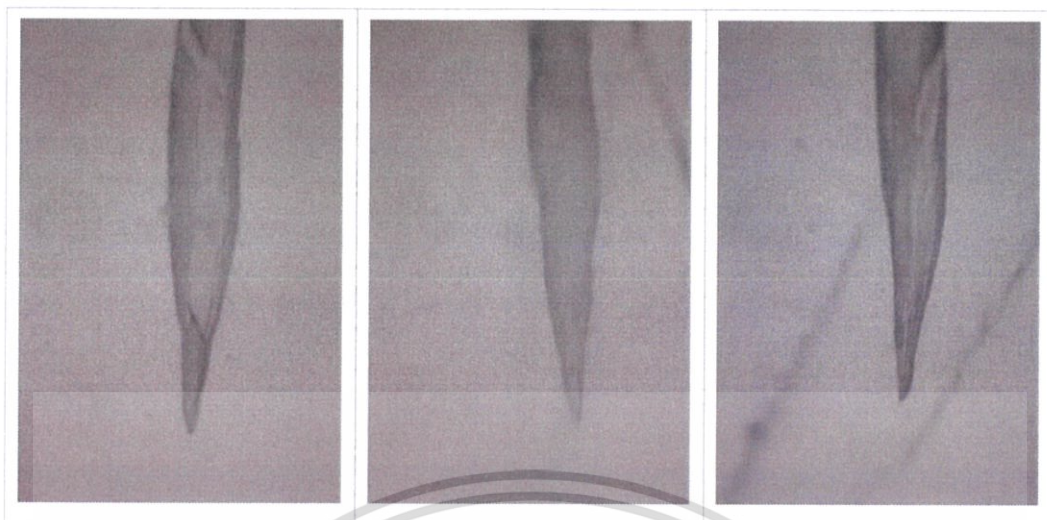


รูปที่ 5.6 ลักษณะการเกิดต้นไม้อายุไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 70°C เวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 5.7 ลักษณะการเกิดต้นไม้อายุไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 70°C เวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

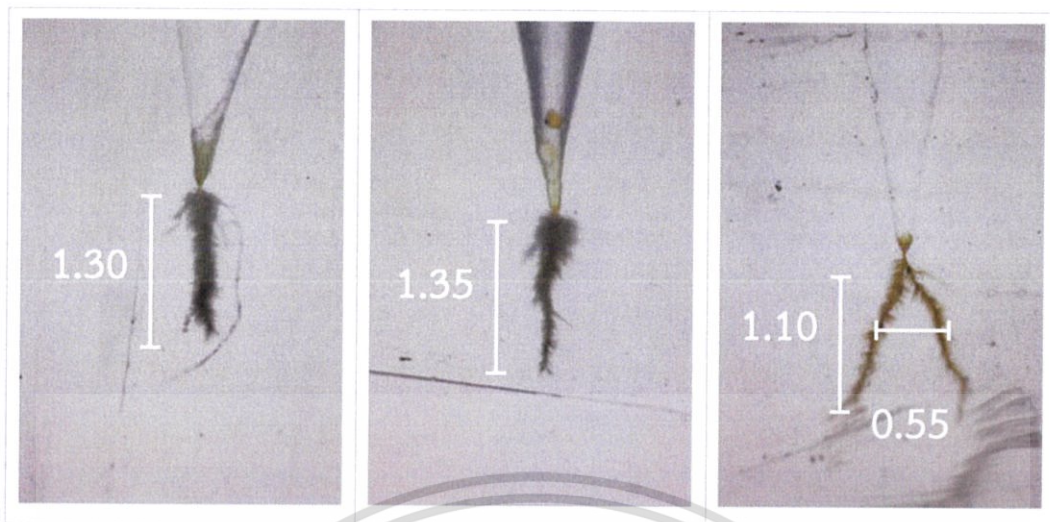


รูปที่ 5.8 ลักษณะการเกิดต้นไม้อิไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 80°C เวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 5.9 ลักษณะการเกิดต้นไม้อิไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 80°C เวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

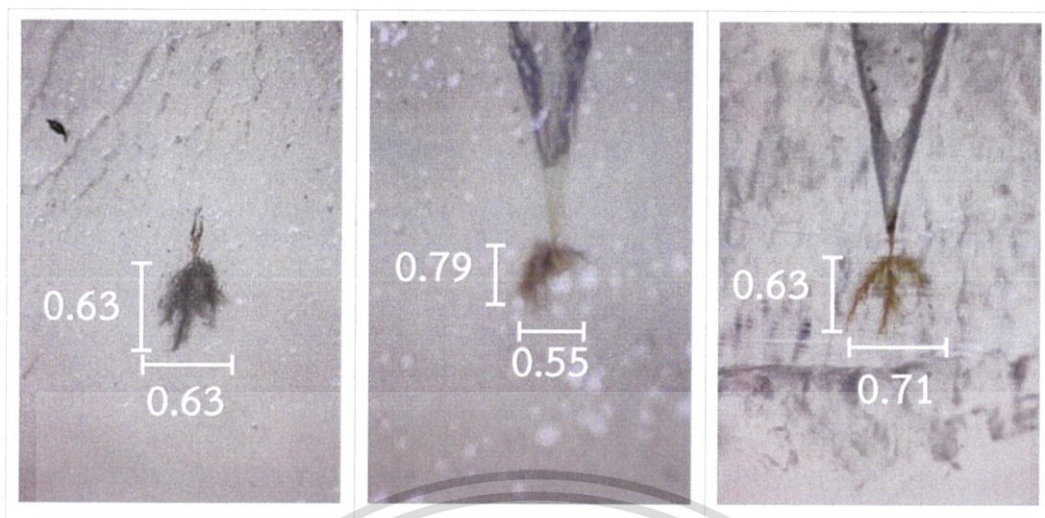


รูปที่ 5.10 ลักษณะการเกิดต้นไม้อายุไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 80°C เวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 5.11 ลักษณะการเกิดต้นไม้อายุไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 90°C เวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 90°C เวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 5.13 ลักษณะการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าที่แรงดันรูปคลื่นไซน์ 10 kV ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 90°C เวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 ชุด

### 5.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการก่อตัวและขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า

จากลักษณะรูปแบบของต้นไม้ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน XLPE พบว่าต้นไม้ไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ คือ แบบคล้ายพุ่ม มีลักษณะคล้ายพุ่มไม้ซึ่งมีการก่อตัวและขยายตัวอย่างช้า ๆ ส่วนต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง มีลักษณะคล้ายกิ่งไม้ที่แตกแขนงมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว

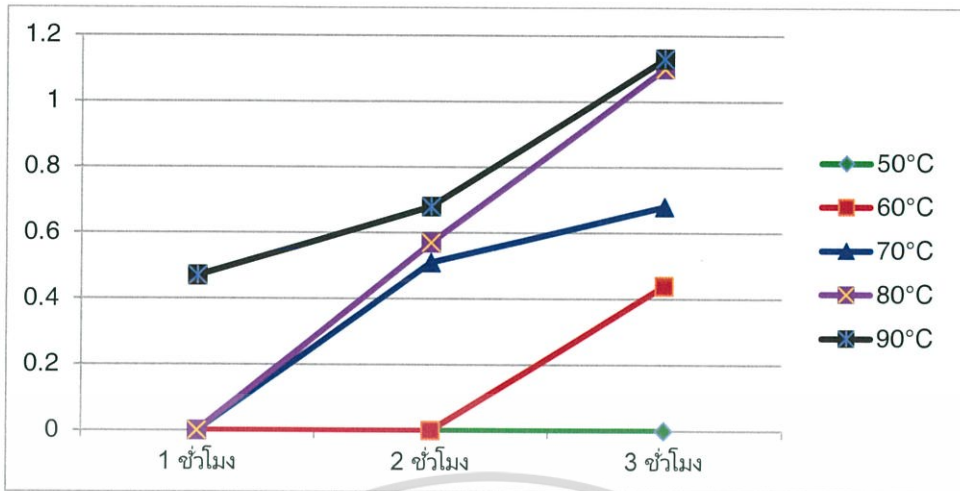
การศึกษากการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าตามสภาวะที่ทำการทดสอบ ก็คือ ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการก่อตัวและการขยายของต้นไม้ไฟฟ้า โดยทำการบันทึกขนาดของต้นไม้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามชนิดและระยะเวลาการเกิด จากนั้นนำค่าที่บันทึกนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างขนาดของต้นไม้ไฟฟ้ากับเวลาในการก่อตัวและขยายตัว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการขยายตัวของ ต้นไม้ไฟฟ้า ระหว่างสภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการทดสอบจำนวน 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ความยาว และนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป ข้อมูลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดของต้นไม้ไฟฟ้าเทียบกับเวลาโดยใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 50 Hz ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

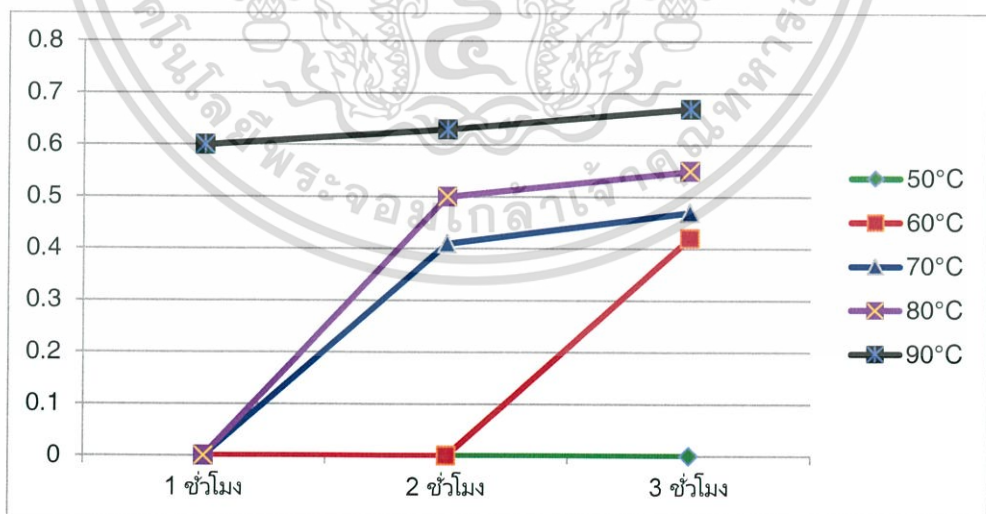
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ขนาด (mm)					
		แนวที่วัด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
						แบบกิ่ง	แบบพุ่ม
50	3	ยาว	-	-	-	-	-
		กว้าง	-	-	-	-	-
60	2	ยาว	-	-	-	-	-
		กว้าง	-	-	-	-	-
	3	ยาว	1.20	1.20	0.44	1.20	0.44
		กว้าง	-	-	0.42	-	0.42
70	1	ยาว	-	-	-	-	-
		กว้าง	-	-	-	-	-
	2	ยาว	0.44	0.55	0.55	-	0.51
		กว้าง	0.47	0.40	0.38	-	0.41
	3	ยาว	1.28	1.30	0.68	1.29	0.68
		กว้าง	-	-	0.47	-	0.47
80	1	ยาว	-	-	-	-	-
		กว้าง	-	-	-	-	-
	2	ยาว	1.22	1.17	0.57	1.195	0.57
		กว้าง	-	-	0.50	-	0.50
	3	ยาว	1.30	1.35	1.10	1.325	1.10
		กว้าง	-	-	0.55	-	0.55
90	1	ยาว	1.36	0.47	0.47	1.36	0.47
		กว้าง	-	0.63	0.57	-	0.60
	2	ยาว	0.63	0.79	0.63	-	0.68
		กว้าง	0.63	0.55	0.71	-	0.63
	3	ยาว	1.50	0.95	1.30	1.50	1.13
		กว้าง	-	0.74	0.6	-	0.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (mm) กับเวลาที่ทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิที่ต่างกัน

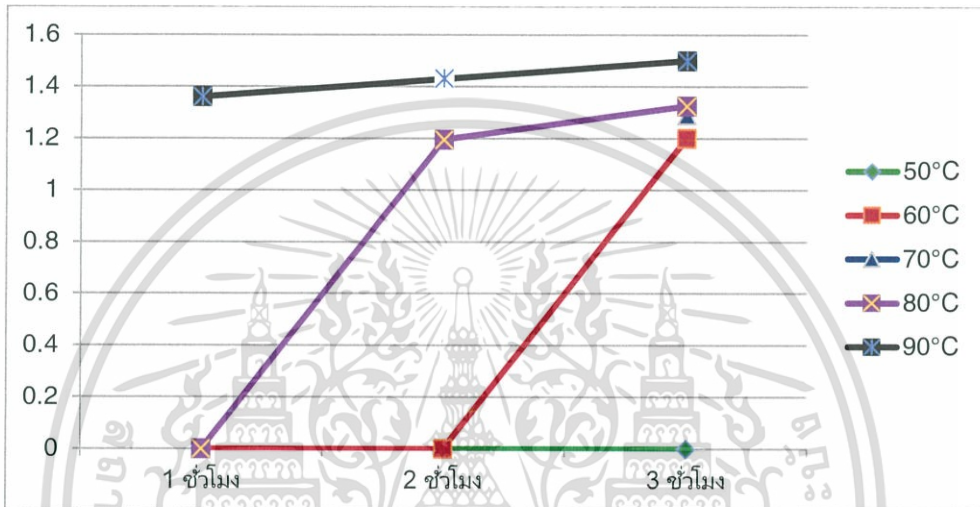
จากรูปที่ 5.18 จะสังเกตเห็นว่า ที่แรงดันรูปคลื่นเดียวกัน ความถี่เท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน ต้นไม้ไฟฟ้า จะมีอัตราการก่อตัวและขยายตัวที่ต่างกัน ซึ่งพิจารณาด้วยการวัดความยาวของต้นไม้ไฟฟ้าชนิดแบบพุ่ม โดยที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ 3 ชั่วโมง ไม่เกิดต้นไม้ไฟฟ้า ซึ่งจะเริ่มเกิดเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C เวลา 3 ชั่วโมง ความยาวของต้นไม้ไฟฟ้า เฉลี่ย 0.44 mm ในขณะที่อุณหภูมิ 90°C ใน 1 ชั่วโมงแรกจะมีขนาดความยาว 0.47 mm และเมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ 3 ชั่วโมง จะมีขนาด 1.13 mm ซึ่งจากการพิจารณา จะพบว่าความยาวของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (mm) กับเวลาที่ทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิทดสอบที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.15 จะสังเกตเห็นว่า ที่แรงดันรูปคลื่นเดียวกัน ความถี่เท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน ต้นไม้ไฟฟ้า จะมีอัตราการก่อตัวและขยายตัวที่ต่างกัน ซึ่งพิจารณาด้วยความกว้างของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม โดยที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ 3 ชั่วโมง ไม่เกิดต้นไม้ไฟฟ้า โดยจะเริ่มเกิดเมื่อทดสอบด้วยอุณหภูมิ 60°C เวลา 3 ชั่วโมง ความกว้างเฉลี่ย 0.42 mm ในขณะที่อุณหภูมิ 90°C ใน 1 ชั่วโมงแรกจะมีขนาดความกว้าง 0.60 mm และเมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ 3 ชั่วโมงจะมีขนาด 0.67 mm ซึ่งจากการพิจารณา จะพบว่าความกว้างของต้นไม้ไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเช่นเดียวกับการพิจารณาความยาว



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (mm) กับ เวลาที่ทดสอบ แบ่งตามอุณหภูมิทดสอบที่ต่างกัน

จากรูปที่ 5.16 จะสังเกตเห็นว่า ที่แรงดันรูปคลื่นเดียวกัน ความถี่เท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน ต้นไม้ไฟฟ้า จะมีอัตราการก่อตัวและขยายตัวที่ต่างกัน ซึ่งพิจารณาด้วยความยาวของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง โดยที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ 3 ชั่วโมง ไม่เกิดต้นไม้ไฟฟ้า โดยจะเริ่มเกิดเมื่อทดสอบด้วยอุณหภูมิ 60°C เวลา 3 ชั่วโมง ความยาวเฉลี่ย 1.20 mm ในขณะที่อุณหภูมิ 90°C ใน 1 ชั่วโมงแรกจะมีขนาดความยาว 1.36 mm และเมื่อสิ้นสุดเวลาทดสอบ 3 ชั่วโมงจะมีขนาด 1.50 mm ซึ่งจากการพิจารณา จะพบว่าความยาวของต้นไม้ไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการพิจารณาความยาวและความกว้างของต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มด้วยเช่นกัน จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าที่อุณหภูมิสูงก็จะมีอัตราการก่อตัวและขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้าสูงขึ้นไปด้วย

### 5.3 สรุป

เนื้อหาบทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลการทดสอบจากการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE โดยนำชิ้นส่วนที่ใช้ในการทดสอบนำไปตรวจหาด้วยกล้องจุลทรรศน์ และนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้ตามแนวโน้มที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสรุปได้ดังนี้

ผลการทดสอบต้นไม้ไฟฟ้า เมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ พบต้นไม้ไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มและแบบคล้ายกิ่ง จึงได้ทำการวัดขนาดความยาวและความกว้างของต้นไม้ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้น เมื่อวิเคราะห์พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเกิดอัตราการขยายตัวของต้นไม้ไฟฟ้า มากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

ในปัจจุบันประเทศไทยการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลใต้ดิน (Underground cable) ได้มีบทบาทมากขึ้น จึงต้องมีความรู้ในการใช้งานและบำรุงรักษา รวมไปถึงวิเคราะห์สาเหตุความเสียหายจากการชำรุดของสายเคเบิลได้ เพื่อนำไปแก้ไขและปรับปรุงต่อไป ซึ่งสาเหตุความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดินมีหลายสาเหตุหนึ่งในนั้นคือ ต้นไม้ไฟฟ้า อันเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญของสายเคเบิลใต้ดิน แต่การศึกษาค้นคว้าข้อมูลเรื่องนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากเท่าที่ควร

โครงการวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า ภายในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 33 kV จากการศึกษาค้นคว้า ตำแหน่งที่มีโอกาสจะเกิดต้นไม้ได้มากที่สุดคือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในชั้นสายเคเบิลทดสอบ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำก็ได้ทำการจำลองการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol เป็นการยืนยันทฤษฎีที่ศึกษาค้นคว้ามา จากการจำลองพบว่าบริเวณที่มีจุดแหลมคมของวัสดุจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด นั่นก็คือมีโอกาที่จะเกิดการก่อตัวของต้นไม้ไฟฟ้า มากขึ้นด้วย จึงสามารถนำความรู้นี้ออกแบบการทดสอบได้ นั่นคือสร้างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงด้วยเข็มที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางระดับไมโครเมตร จึงได้นำความรู้ที่นำไปออกแบบการทดสอบทั้งสอง

การทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดต้นไม้ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ความถี่แรงดัน อุณหภูมิ จึงได้เลือกเอาอุณหภูมิมาเป็นตัวแปรอิสระในการทดสอบ โดยใช้สายเคเบิลความยาว 5 mm นำมาจ่ายแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ขนาด 10 kV 50 Hz ผ่านอิเล็กโทรดแบบเข็มรัศมี 40  $\mu\text{m}$  เจาะค้ำไว้ในเนื้อฉนวน XLPE เพื่อสร้างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดตามที่จำลองด้วยโปรแกรมตามทฤษฎีที่ศึกษาและติดตั้งในกล่องอะคริลิกที่บรรจุน้ำมันหม้อแปลงเพื่อป้องกันการดิสชาร์จตามผิว แล้วทำการควบคุมอุณหภูมิให้แตกต่างกันคือ 50°C 60°C 70°C 80°C และ 90°C ทำการจ่ายแรงดันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงในทุก ๆ อุณหภูมิ หลังจากการทดสอบได้นำสายเคเบิลทดสอบไปส่องหาต้นไม้ไฟฟ้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า แนวโน้มการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ที่ช่วงเวลาการทดสอบที่เท่ากันมีอัตราการก่อตัวและขยายตัวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการทดสอบที่มากขึ้น และเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ทดสอบ จึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิคือปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าได้ หากอุณหภูมิสูงจะเกิดอัตราการก่อตัวและขยายตัวสูงขึ้นไปด้วยตามอายุการใช้งานของสายเคเบิลใต้ดิน

จากการทดสอบทั้งสองการทดสอบจะยืนยันได้ว่า การเสื่อมอายุของสายเคเบิลมีสาเหตุมาจากความเสื่อมของฉนวนสายเคเบิล XLPE ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลกระทบของความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง รวมไปถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ก็จะกระตุ้นความเสื่อมสภาพของสายเคเบิลจากการใช้งานได้ โดยจะสามารถนำความรู้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ไปออกแบบการผลิตสายเคเบิลให้คุณภาพดีขึ้น หรือควบคุมทำการแก้ไขสายเคเบิลที่เกิดปัญหาต้นไม้ไฟฟ้าได้ในอนาคต เพื่อการใช้งานสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา และผลที่ได้จากการทดสอบ ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะ หากมีการทดสอบความต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. ความหนาและความเรียบของชิ้นงาน มีผลต่อการทดสอบมาก ควรทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง เพื่อให้ได้ผลที่เท่ากัน และจะได้นำมาเปรียบเทียบกันได้ถูกต้องตามทฤษฎีที่ศึกษาไว้

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ควรจะใช้ให้นานพอเพื่อให้ต้นไม้อัดไฟฟ้า ได้ขยายตัวจนปรากฏได้ชัด เพื่อความง่ายในการศึกษาและวิเคราะห์

3. ความถี่ของแรงดัน เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดต้นไม้อัดไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรใช้แรงดันที่มากพอ และหลากหลาย เพื่อจะสามารถวิเคราะห์ได้ชัดเจน

4. ความลึกของเข็มอิเล็กโทรดที่เจาะเข้าไปในเนื้อฉนวนในการทดสอบต้นไม้อัดไฟฟ้า มีผลต่อผลการทดลองอย่างมาก จึงควรเจาะให้ลึกลงที่มากที่สุดทุกชิ้น

5. ในการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงาน จะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเทอร์โมคัปเปิลอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับชิ้นงานมากที่สุดและห่างจากฮีเตอร์พอสมควร

6. ขณะปฏิบัติการควรเฝ้าดูระว่างตลอดเวลาที่ทดสอบ เมื่อเกิดการเบรกดาวน์หรือเกิดความผิดพลาดใดๆ จะได้ปิดเครื่องได้ทันเวลาก่อนที่จะเกิดความเสียหาย

7. ในการทดสอบต้นไม้อัดไฟฟ้า เวลาเปลี่ยนชิ้นงานทดสอบ ควรปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิก่อนทุกครั้ง เพื่อความปลอดภัยของทั้งผู้ทำทดลอง และอุปกรณ์ต่างๆ

8. ในการทดสอบต้นไม้อัดไฟฟ้า ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นจึงควรทำในห้องปิดที่มีอุณหภูมิแน่นอน เพื่อกำจัดปัญหาอุณหภูมิในแต่ละวันที่ไม่เท่ากัน ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเร็วช้าไม่เท่ากัน

9. ในการทดสอบต้นไม้อัดไฟฟ้า ควรใส่น้ำมันให้เท่ากันทุกครั้งที่ทำทดลอง เพื่อให้มีความต้านทานเท่ากัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิกิพีเดียพอลิเมอร์ สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2559, จากวิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี <https://th.wikipedia.org/wiki/พอลิเมอร์>.
- [2] บทความจากห้องเรียนออนไลน์ , ปกรณ์ โอภาประกาศิต, 2554
- [3] ชีระพงษ์ บุญรักษา “ ,ลักษณะจำเพาะของ ต้นไม้ใน สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ,”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ภาควิศวกรรมไฟฟ้า,2557.
- [4] อรรถพล ตระระ (2551), คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ
- [5] ชลิตา วรกิจเจริญผล, ณัฐพงศ์ พันธุ์สวัสดิ์, ณัฐวุฒิ รักพรหม, บัญญัติ สีลาจรรย์กุล, “การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [6] Len A. Dissado, John C. Fothergill, G. C. Stevens, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, 1992
- [7] ขจร พิพัฒน์สุภรณ์, คทา อภัยวงศ์, “การศึกษาการเกิดวอเตอร์ทรีในสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอทิลีน” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535.
- [8] Robert H. Olley. *Banded Spherulites*. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2559, จาก <http://www.personal.reading.ac.uk/~spsolley/bandsph.html>
- [9] Young-Ho Kim. *Spherulites*. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2559, จาก <http://bh.knu.ac.kr/~minky/morphology/youngho/cp-05.htm>
- [10] Kristen M. *Materials science and engineering*. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2559, จาก <https://www.studyblue.com/notes/note/n/chapter-3/deck/16653905>
- [11] Kazuli. *Non Metallic Materials Assignment 3*. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2559, จาก <http://www.kazuli.com/UW/4A/ME534/asgn3.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

## The study of electrical tree in underground cables

นาย กัณฑ์พัฒน์ ยมทุก, นาย นพชานนท์ เผ่าละออ, นางสาว ประภัสสร จันทะใส, นางสาว พชร จำภา  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย 1 ดลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prapatson\_pat@hotmail.com

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอผลการศึกษาทดลองการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical treeing) ภายในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินพิกัด 33 kV ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 50°C, 60°C, 70°C, 80°C และ 90°C โดยทำการป้อนแรงดันสูงกระแสสลับขนาด 10 kV 50 Hz ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ถูกควบคุมอุณหภูมิ ดังกล่าว วัสดุทดสอบมีความหนา 5 mm รัศมี 28 mm ใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมรัศมี 40  $\mu\text{m}$  เจาะลงไปบนเนื้อฉนวนด้วยความลึก 2 mm เพื่อให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยแต่ละอุณหภูมิทดสอบได้ทำการป้อนแรงดันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ความยาวของกิ่งต้นไม้ไฟฟ้าและความกว้างของกิ่งของต้นไม้ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่ต้นไม้ไฟฟ้าเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 °C เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในกรณีชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 90 °C กิ่งของต้นไม้ไฟฟ้าจะเห็นได้ชัดตั้งแต่การทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมง

คำสำคัญ : ต้นไม้ไฟฟ้า, สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน 33 kV และอิเล็กโทรดปลายแหลม

### ABSTRACT

This project presents the study and experiment of electrical treeing phenomena XLPE insulation of the 33 kV underground cable with the temperature of 50, 60, 70, 80 and 90 degree Celsius respectively. The XLPE test samples with the thickness of 5 mm and the diameter of 28 mm were prepared. The tungsten needle electrode with the tip radius of 40  $\mu\text{m}$  was inserted vertically into the sample to a depth of 2 mm to localized enhance the electric field stress in the XLPE. The 10 kV AC voltage was applied to the test sample under the mentioned temperature for

1 hour, 2 hours and 3 hours respectively. The test results shown that the length and width of the electrical tree directly depended on the sample temperature and the time of testing. The electrical tree could be observed after tested for 3 hours for the 60

degree Celsius. Whereas, the electrical tree was found after 1 hour testing for 90 degree Celsius test sample.

Keyword: Electrical tree, 33 kV underground cable and The tungsten needle electrode.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน(Underground cable) เริ่มมีบทบาทในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยมากขึ้น เนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยี และสาธารณูปโภคที่กระจายตัวมากขึ้น ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบตามระยะเวลามีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขึ้นมาเพื่อใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย ซึ่งแนวโน้มการใช้สายเคเบิลใต้ดินในเขตการไฟฟ้านครหลวง หรือในแหล่งชุมชนที่หนาแน่นมีเพิ่มมากขึ้น แต่บางพื้นที่เป็นแหล่งชุมชนที่มีประชากรหนาแน่น และแออัด จึงไม่เหมาะกับการส่งจ่ายแบบชิงผ่านอากาศ (Overhead transmission line) หรือบางพื้นที่เป็นสถานที่สำคัญ เป็นหน้าป็นตาของประเทศต้องการภูมิทัศน์ที่สวยงาม ด้วยเหตุนี้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ที่สำคัญคือสายเคเบิลที่จะนำมาติดตั้งในระบบต้องได้มาตรฐาน น่าเชื่อถือ และในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน ผู้ทำการติดตั้งต้องมีความรู้ความเข้าใจทางวิศวกรรมอย่างถูกต้อง ซึ่งจะต้องมีความระมัดระวังอย่างสูงในการติดตั้ง เพราะการติดตั้งที่ผิดพลาดหรือขาดความรู้ความเข้าใจก็จะให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายจนทำให้ฉนวนเกิดการชำรุด และอาจนำไปสู่การใช้งานของสายเคเบิลที่สั้นลง แต่เนื่องจากปัจจุบันยังขาดผู้มีความรู้ในเรื่องสายเคเบิลใต้ดินทั้งด้านทฤษฎี และปฏิบัติ เมื่อใช้งานจริงจึงเกิดความเสียหายขึ้นในทันที หรือค่อยๆเกิดในระยะยาว ดังนั้นเพื่อลดการเสียหายที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลเสียหาย โดยเน้นที่ความเสียหายของฉนวนจากปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าเพื่อหาลักษณะ

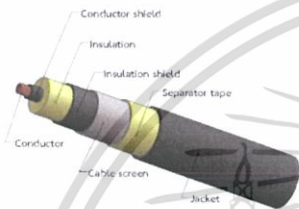
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความเสียหายในแต่ละปรากฏการณ์ และทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดและอัตราการขยายตัวของ ต้นไม้ไฟฟ้า

## 2. ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล [1]

โครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย ตัวนำ เครื่องป้องกันตัวนำ ฉนวน เครื่องป้องกัน เครื่องป้องกันเคเบิลหรือเครื่องป้องกันโลหะ เครื่องห่อหุ้ม Separator tape และเปลือกนอก



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน [1]

1. ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) คือ วัสดุที่สามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ได้ง่าย หรือวัสดุที่มีความต้านทานต่ำ โดยทั่วไปจะนิยมใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ทำมาจากทองแดงและอลูมิเนียม

2. เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor shield) เป็นชั้น สารกึ่งตัวนำ (Semiconducting screen, Semiconducting shield หรือ Semicon) เคลือบอยู่บนผิวของตัวนำ ทำหน้าที่ลดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอยต่อของตัวนำกับฉนวน

3. ฉนวน (Insulation) ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันเคเบิล เกิดการกัดกร่อนหรือรอยแตก (Crack) ทำให้ความชื้นสามารถซึมผ่านเข้ามาในฉนวนกระดาษได้ เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดปกติ (fault) ขึ้น

4. เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation shield) ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกันกับเครื่องป้องกันตัวนำ และยังทำหน้าที่คล้ายกัน คือ จะป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างฉนวนกับเครื่องป้องกันเคเบิล รวมทั้งควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าให้อยู่ภายในเคเบิลเท่านั้น

5. เครื่องป้องกันเคเบิลหรือเครื่องป้องกันโลหะ (Cable screen, Metal sheaths) ทำมาจากทองแดง ตะกั่ว หรืออลูมิเนียม อาจเป็นลวด เทป หรือปลอกคลุมสาย อยู่ชั้นถัดมาจากเครื่องป้องกันฉนวน ปกติแล้วจะต้องรวardtที่เครื่องป้องกันเคเบิล ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องป้องกันฉนวนมีศักย์เป็นกราวด์อยู่เสมอ

6. เครื่องห่อหุ้ม (Outer covering หรือ Over sheaths) ใช้กับสายเคเบิลที่ต้องการเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันทางกล เนื่องจากแรงทางกล

7. Separator tape อาจทำจากผ้าหรือ Polyester tape มีหน้าที่ป้องกันสิ่งต่างๆ ที่จะมีผลต่อสภาพฉนวน และตัวกันโลหะ นอกจากนั้นยังช่วยรัดเครื่องห่อหุ้มโลหะให้แน่น และช่วยให้เครื่องห่อหุ้มโลหะหรือเครื่องป้องกันเคเบิลไม่ติดกับเปลือกนอก (Jacket) ทำให้ไม่เกิดร่องที่ด้านในของเปลือกนอก

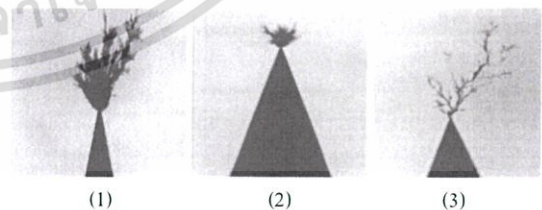
8. เปลือกนอก (Jacket) เป็นชั้นนอกสุดของสายเคเบิล ทำหน้าที่ป้องกันทางกล การเสียดสี ความชื้นหรือการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อม

### 2.2 ต้นไม้ไฟฟ้า [2]

สายเคเบิลไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานาน คุณสมบัติของฉนวนก็จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากความเครียดทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางกล และจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ความบกพร่องในสายเคเบิลกับฉนวนพอลิเมอร์ที่สามารถก่อให้เกิดความล้มเหลวของสายเคเบิล ข้อบกพร่องเหล่านี้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ส่วนที่ยื่นออกมา (Protrusions) ช่องว่าง (Voids) รอยแตก (Cracks) การหลุดลอก (Elaminations) การฉีกขาดของกำบังตัวนำ (Conductor Shield Interruptions) การเกิด ต้นไม้ไฟฟ้า เป็นต้น

ต้นไม้ไฟฟ้า พบได้ในฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งจะพบการเติบโตมากในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสูงเช่นในโลหะที่มีลักษณะไม่เรียบ หยิบ ตัวนำไฟฟ้าที่มีสารปนเปื้อน และโครงสร้างที่มีลักษณะผิดปกติ การดิซชาร์จบางส่วนในช่องว่างยังสามารถก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างจากพื้นผิวช่องว่างนั้น ซึ่งเป็นผลจาก ต้นไม้ไฟฟ้า ซึ่ง Tree เหล่านี้เริ่มต้นที่อิเล็กโทรดที่เรียกว่า Tree แบบคล้ายครีป ในขณะที่ Tree เริ่มก่อตัวในเนื้อฉนวนซึ่งการแตกกิ่งก้าน หรือขยายตัวของtree ตามแนวเส้นสนามจะเรียกว่า Tree แบบคล้ายโข้ว ซึ่งจะแบ่งตามลักษณะรูปร่างของ ต้นไม้ไฟฟ้า

ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้



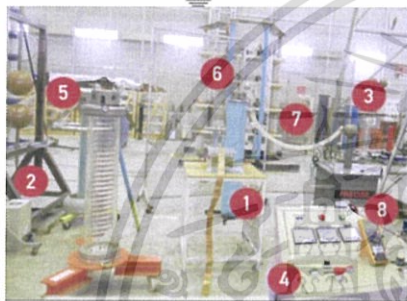
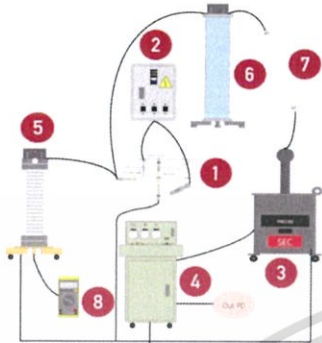
รูปที่ 2 ลักษณะรูปร่างของ ต้นไม้ไฟฟ้า (water tree) และต้นไม้ไฟฟ้า [2]

- (1) tree แบบพุ่มและกิ่ง (Bush- Branch type tree)
- (2) tree แบบพุ่ม (Bush-type tree)
- (3) tree แบบกิ่ง (Branch-type tree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การออกแบบและประกอบสร้าง

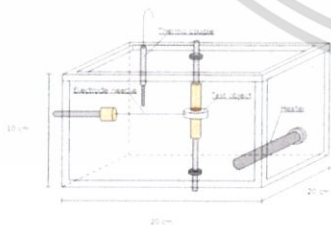
วงจรชุดทดสอบการเกิด ต้นไม้ไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูง  
ฉนวน XLPE แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดทดสอบ ต้นไม้ไฟฟ้า

1. กล่องอะคริลิก ขนาดกว้าง 20 cm ยาว 20 cm สูง 10 cm

ภายในบรรจุน้ำมันหม้อแปลง เพื่อป้องกันการเกิดดิสชาร์จตามผิวของ  
สายเคเบิลทดสอบ ซึ่งภายในกล่องจะประกอบด้วย อิเล็กโทรดปลาย  
แหลม ต่อกับอุปกรณ์จ่ายแรงดันสูง อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ  
ยึดด้านบนและล่างของสายเคเบิลทดสอบต่อระบบกราวด์ เครื่องทำ  
ความร้อนขนาด 220 V 500 W และเทอร์โมคัปเปิล ภาพจำลอง และ  
ภาพจริงของกล่องอะคริลิกที่ทำการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กล่องอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบ

2. กล่องควบคุมอุณหภูมิ

3. หม้อแปลงแรงดันสูง 1 เฟส พิกัด 220/100 kV 5 kVA 50 Hz

4. หม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้ (Variac)

5. ชุดแบ่งวัดแรงดันไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุ

(RC Divider) อัตราขยาย 1:980

6. ที่หัดสาย

7. ตัวต้านทานชนิดน้ำ

8. มัลติมิเตอร์

### 4 .การทดสอบและประเมินผล

เงื่อนไขในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบต้นไม้อิไฟฟ้า

การทดสอบการเกิด ต้นไม้อิไฟฟ้า ในสายเคเบิลแรงสูง 33 kV	เงื่อนไขการทดสอบ		
สายเคเบิล	สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE 33 kV คัดขวาง หน้า 0.9 cm		
แรงดันไฟฟ้า	10 kV		
ความถี่	50 Hz		
อุณหภูมิ (°C)	50	70	90
เวลาในการทดสอบ	1, 2 และ 3 ชั่วโมง		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ลักษณะการเกิด ต้นไม้ไฟฟ้า ในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะการเกิดของต้นไม้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ/ เวลา	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
50			
60			
70			
80			
90			

## 6. สรุป

โครงการงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้า ภายในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 33 kV โดยทำการจำลองการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Comsol เพื่อขึ้นต้นทฤษฎีว่า บริเวณที่มีจุดแหลมคมของวัสดุจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด นั่นก็คือมีโอกาสที่จะเกิดการก่อตัวของต้นไม้ ทดสอบการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรอิสระในการทดสอบ โดยใช้สายเคเบิลความยาว 5 mm นำมาจ่ายแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ขนาด 10 kV 50 Hz ผ่านอิเล็กโทรดแบบเข็มรัศมี 40 μm เจาะข้างไว้ในเนื้อ

ฉนวน XLPE ทำการควบคุมอุณหภูมิให้แตกต่างกันคือ 50°C 60°C 70°C 80°C และ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงในทุกอุณหภูมิ พบว่า แนวโน้มการเกิดต้นไม้ไฟฟ้า ที่ช่วงเวลาการทดสอบที่เท่ากันมีอัตราการการก่อตัวและขยายตัวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการทดสอบที่มากขึ้น และเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ทดสอบ จึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิคือปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการเกิดต้นไม้ไฟฟ้าได้ หากอุณหภูมิสูงจะเกิดอัตราการการก่อตัวและขยายตัวสูงขึ้นไปด้วยตามอายุการใช้งานของสายเคเบิลใต้ดิน

จากการทดสอบทั้งสองการทดสอบจะยืนยันได้ว่า การเสื่อมอายุของสายเคเบิลมีสาเหตุมาจากความเสื่อมของฉนวนสายเคเบิล XLPE ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลกระทบของความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง รวมไปถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ก็จะกระตุ้นความเสื่อมสภาพของสายเคเบิลจากการใช้งานได้ โดยจะสามารถนำความรู้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ไปออกแบบการผลิตสายเคเบิลให้คุณภาพดีขึ้น หรือควบคุมทำการแก้ไขสายเคเบิลที่เกิดปัญหาต้นไม้ไฟฟ้าได้ในอนาคต เพื่อการใช้งานสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ ผศ.ชายชาญ โพธิสาร ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมทั้งแก้ไขข้อบกพร่องในด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) รวมถึงรุ่นพี่ ป.เอก ป.โท ทุกท่าน สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ สุดท้ายขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation เป็นอย่างสูงที่มอบทุนสำหรับวิจัยให้แก่นักโครงการปริญญานิพนธ์

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระพงษ์ บุญรักษา" .ลักษณะจำเพาะของ water tree ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV, "วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต", มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ภาควิศวกรรมไฟฟ้า, 2557.
- [2] จขร พิพัฒน์สุภรณ์, คทา อภัยวงศ์, "การศึกษาการเกิดวอเตอร์ทรีในสายตัวนำชนิดครอสลิงค์โพลีเอทิลีน" , ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Full Length Research Paper*

# Investigation of electrical treeing in cable grade crosslinked polyethylene (XLPE) insulations

M. I. Qureshi\*, N. H. Malik and A. A. Al-Arainy

College of Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia.

Accepted 5 December, 2011

Using PC-based on-line monitoring system, extensive measurements were performed in insulation blocks cut from the crosslinked polyethylene (XLPE) insulation of 36, 69 and 132 kV rated cables produced in Saudi Arabia. A needle-plane electrode system was used with a needle radius of 10  $\mu\text{m}$ . The role of 'applied voltage step-time duration' and associated time resolved initiation and growth of different types of tree structures were evaluated. Results show that a step of 3 kV/10 min duration provides good comparison to evaluate service aged and new XLPE insulation of different voltage ratings. Velocity of propagation of electrical trees is fast at initiation, but declines exponentially to a constant rate within 20 s of its initiation. Fractal analysis of such trees was also carried out using different types of technical grade XLPE insulations. This paper presents discussion on these results and sheds light on the electrical treeing phenomenon.

**Key words:** Electrical treeing, crosslinked polyethylene (XLPE) insulation, on-line monitoring, bush-type tree, branch-type tree, new and aged cable insulation, fractal analysis.

## INTRODUCTION

The high voltage crosslinked polyethylene (XLPE) insulated polymeric cables play an important role in the transmission and distribution of electric power in bulk to load centers. The long term dielectric integrity of this type of insulation is influenced by the material used and the design parameters adopted. Electrical treeing is particularly important for high voltage cables. The degradation process in XLPE due to electrical treeing occurs in two distinct phases, that is, inception phase, where a microvoid is formed at or in the vicinity of region of high electric stress, followed by a growth phase, in which an array of filamentary channels is formed in the insulation matrix as a result of partial discharge (PD) activity. Initiation of electrical treeing requires a minimum electrical stress and a certain characteristic time, known as incubation period, after AC voltage application. During the incubation period, charge carriers move back and forth repeatedly between the electrodes and the stressed dielectric, and this repeated charge transfer is believed to be mainly responsible for the treeing initiation. Treeing

inception is characterized by the incubation time, which is the time required for generating an observable tree (usually about 10  $\mu\text{m}$  in length). This time is strongly dependent on electrical field strength and is inversely proportional to the frequency under AC stress. After a tree is initiated, detectable partial discharges will occur, which can result in tree growth and the ultimate breakdown of the dielectric.

The high electrical stress necessary for tree generation occurs, generally, due to defects formed during production, installation as well as during its operation. Experimental studies on electrical treeing behavior of XLPE have led to different theoretical aspects of treeing initiation mechanisms as discussed (Du et al., 2011; Gulski et al., 2008; Ling et al., 2008; Malik et al., 2005; Osawa et al., 1997; Zhou et al., 2010). The growth of trees depends upon voltage magnitude, type of applied voltage and test geometry, frequency, space charges, material morphology temperature, additives and crosslinking and other factors (Chapman, 2001; Chen and Tham, 2009; Dodd et al., 2003; Du et al., 2011; Dissado and Fothergill, 1992; Fothergill et al., 1994; Kim, 2001; Samee et al., 2009; Shimizu and Laurent, 1998). After initiation, the tree growth proceeds by a series of sporadic bursts of activity.

\*Corresponding author. E-mail: [mqureshi1@KSU.EDU.SA](mailto:mqureshi1@KSU.EDU.SA).

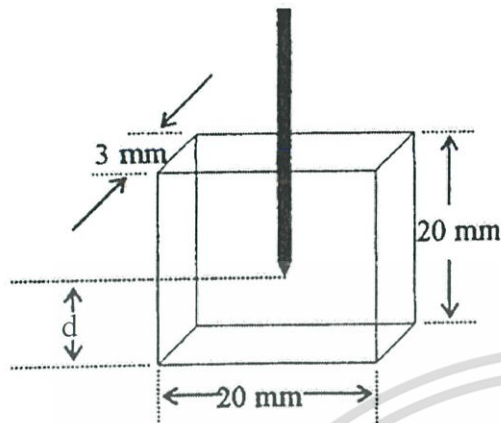


Figure 1. Test sample.

Subsequent to the formation of the first branch, tree growth restarts as two new branches are added to the tip. Thus, the inactive periods can be associated with the initiation of the tip splitting process. Once a number of branches have been formed, it is possible for some to keep growing, while others are inactive; this behavior may continue right up to the runaway stage, where the tree continuously grows, leading to a breakdown for branch and bush-type trees. However, in some cases, an extended period of slow growth occurs prior to the runaway stage. Consequently, tree branching becomes more frequent and rate of tree growth slows down. Two of the most important factors which influence tree propagation rate are the development of internal gas pressure due to PDs and the shielding effect of adjacent tree branches on the resulting electric field.

The principal objective of this paper is to study the factors governing electrical treeing in XLPE insulation blocks and also to find out the most suitable method of voltage application so that different cable materials can be compared in a short time. This has been achieved using the on-line monitoring of the initiation and growth of electrical trees. The factors examined experimentally include, effect of initial voltage applied, voltage and the time steps used and new and in service aged XLPE insulation materials taken from high voltage cables of different voltage ratings.

## EXPERIMENTAL SET-UP AND PROCEDURES

The XLPE cable's insulation was cut first into blocks of  $20 \times 20 \times 3$  mm. 'Agura' steel needles of  $10 \mu\text{m}$  tip radius were carefully inserted in these blocks at the middle of  $20 \times 3$  mm side to form point-plane geometry with a specified gap distance ( $d$ ). The face opposite to the needle was painted with silver conductive paint. Figure 1

illustrates the dimensions of the finally prepared sample. A test cell was designed and fabricated to accommodate the test sample and the high voltage electrodes. The aim was to facilitate the capture of real time image of the tree at its initiation and during its growth. The cell was filled with silicone oil to avoid discharges on the sample's surface. The optical system consists of a variable intensity light source, a wave guide, a microscope and a digital camera arranged in a vertical format, while the test sample was kept horizontal on a transparent glass platform. This arrangement is as shown in Figure 2. The camera output was fed to computer for image storage, retrieval and analysis. Figure 3 shows the block diagram of the experimental set up.

The high voltage source used was a  $30 \text{ kV}_{\text{rms}}$  PD free transformer. Each experiment was started by applying a voltage ramp of up to  $7.22 \text{ kV}_{\text{rms}}$  which corresponds to a stress of about  $184 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$  at the needle tip. At this stage, the voltage was increased by specified time, that is, fixed voltage increments ( $\Delta V$ ). After each increment, the voltage was kept constant for fixed time duration ( $\Delta t$ ).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Bush-tree versus branch-tree

After the completion of incubation period, a small filament appears at the needle tip which leads to further tree growth. Depending upon the applied stress values, the tree can become bush type or branch type. It was found that the branch-type tree initiates at lower stress values as compared to the bush-type tree. Similar character of tree initiation was reported earlier (Malik et al., 2005). However, the incubation time for branch-type tree is longer than that of bush-type tree. The high stress application in the case of bush-type tree causes an increased rate of deterioration of the insulation at the needle tip. Such an increased rate causes a reduction in the incubation time for the formation of the initial tree channel. Figures 4 and 5 show two (branched and bush-type) trees at initiation and during propagation states.

### Effect of the voltage step

Tree length is influenced by the stress applied as well as its total duration which depends on  $\Delta V$  and  $\Delta t$  used. It is reported in literature (Ishibashi et al., 1998; and Malik et al., 2005) and also found in the present experiments that treeing inception stress ( $E_i$ ) varies in the range of  $\sim 250$  to  $\sim 500 \text{ kV}/\text{mm}$ . Beside the morphology of the insulation, the mode of the voltage application is perhaps the dominating factor affecting  $E_i$ . To examine this aspect, experiments were repeated using several types of XLPE insulations. For each type of insulation, more than three samples were subjected to tests to get an average value.

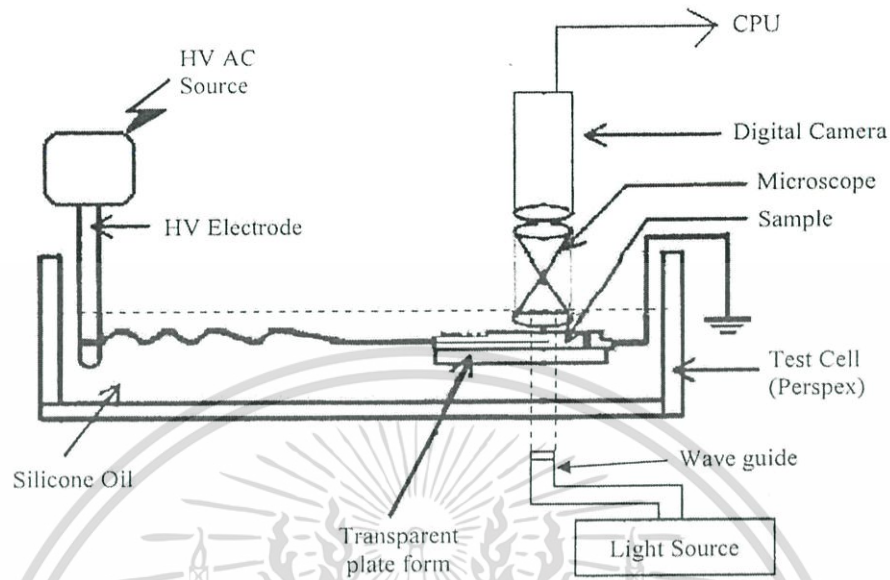


Figure 2. Arrangement of specimen in test cell and optical imaging system.

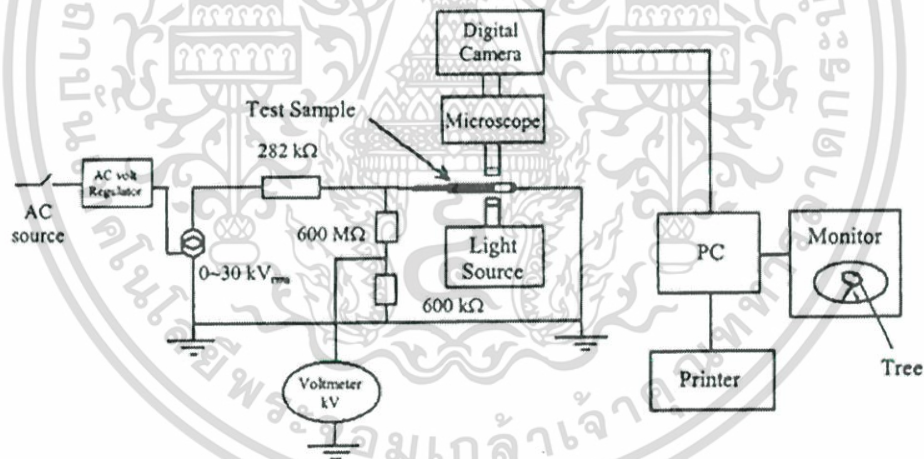


Figure 3. Block diagram of experimental set-up for real time acquisition of electrical treeing characteristics.

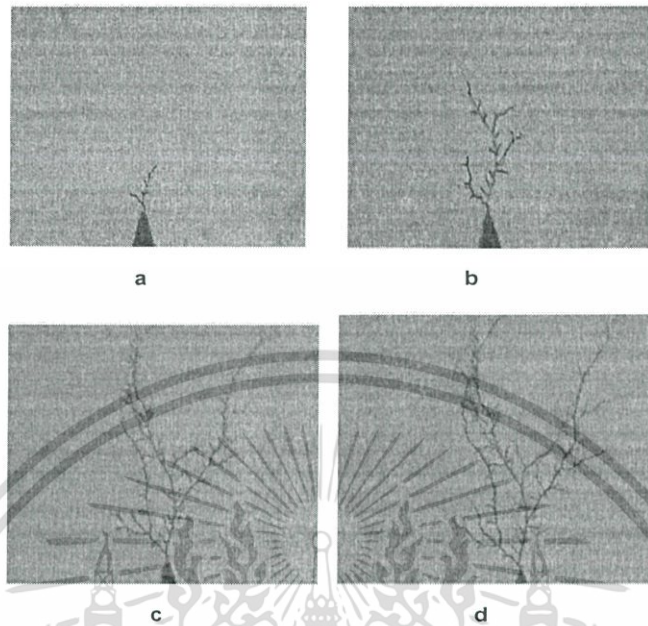
Table 1 summarizes the variation of different parameters related to electrical treeing in several new and aged (36 kV, XLPE cable) samples tested. Here,  $T_i$  is the incubation time and  $V_i$  is the inception voltage for treeing inception.  $E_i$  corresponds to the Laplacian inception stress at the needle tip. Bush type trees appear when subjected under  $E_i$  values  $\geq 400$  kV<sub>rms</sub>/mm, whereas the branch (filamentary)-type trees emerge at  $E_i \leq 300$  kV<sub>rms</sub>/mm, while branched-bush tree structures appear in a stress range of 330 to 390 kV<sub>rms</sub>/mm. These values

apply equally to aged as well as new 36 kV cable insulations, and are almost the same as that found for 69 and 132 kV rated cable insulations.

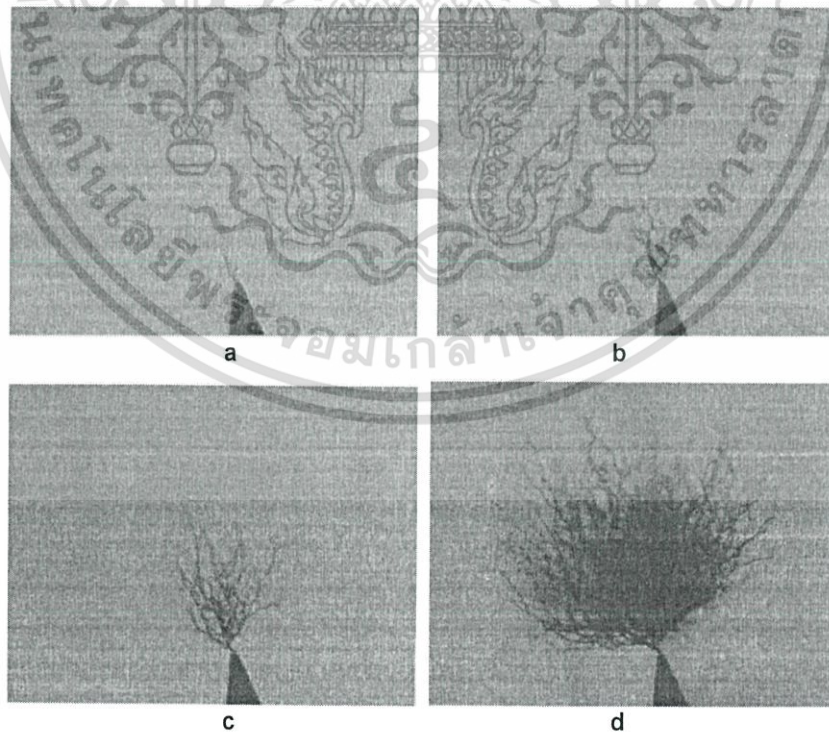
### Comparison of different insulations

Figure 6 compares the tree length as a function of time for five types of XLPE cable insulation tested. The value of gap spacing is  $\sim 5$  mm, while the application of stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Figure 4.** Branch type electrical tree growth: (a)  $L_m = 60 \mu\text{m}$ ,  $t = 2 \text{ s}$ ; (b)  $L_m = 500 \mu\text{m}$ ,  $t = 7 \text{ s}$ ; (c)  $L_m = 670 \mu\text{m}$ ,  $t = 15 \text{ s}$ ; and (d)  $L_m = 780 \mu\text{m}$ ,  $t = 25 \text{ s}$ . Applied voltage = 12 kV.  $L_m$  = Maximum axial tree length.



**Figure 5.** Bush type electrical tree growth: (a)  $L_m = 18 \mu\text{m}$ ,  $t = 1.0 \text{ s}$ ; (b)  $L_m = 374 \mu\text{m}$ ,  $t = 12 \text{ s}$ ; (c)  $L_m = 415 \mu\text{m}$ ,  $t = 32 \text{ s}$ ; and (d)  $L_m = 747 \mu\text{m}$ ,  $t = 50 \text{ s}$ . Applied voltage = 15 kV,  $d = 5 \text{ mm}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Variation of different parameters related to treeing in insulation samples.

Sample No.	D (mm)	T <sub>i</sub> (min:s)	ΔV/Δt (kV/min)	V <sub>i</sub> (kV)	E <sub>i</sub> (kV/mm)	Type of tree
A <sub>1</sub>	6	32:00	3/10	16	409	Bush
A <sub>2</sub>	6	42:00	1.5/5	19	483	Bush
A <sub>3</sub>	4	50:18	1.0/15	11	294	Branch
N <sub>1</sub>	5	31:08	3/10	16	411	Bush
N <sub>2</sub>	5	23:27	1.5/5	3	336	Branch-Bush
N <sub>3</sub>	4	106:50	1.0/15	15	390	Branch-Bush

A = Aged 36 kV cable insulation, N = new 36 kV cable insulation.

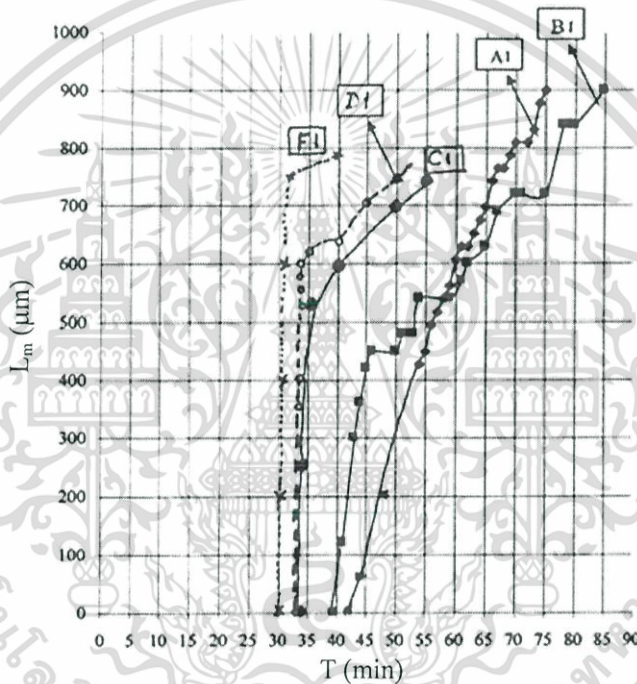


Figure 6. Tree length with time for different types of new XLPE insulation. ΔV = 3 kV, Δt = 10 min, d = 5 mm.

was controlled by a (ΔV/Δt) step of 3 kV/10 min in all cases. It is clear that 132 kV cable insulation performs better than 69 and 36 kV cable insulations, both in the sense of incubation period, tree length as well as the tree inception voltage. Here,

- A<sub>i</sub> = 132 kV, XLPE insulation from manufacturer A.
- B<sub>i</sub> = 132 kV, XLPE insulation from manufacturer B.
- C<sub>i</sub> = 69 kV, XLPE insulation from manufacturer A.
- D<sub>i</sub> = XLPE, 2 h cured, from local pallet manufacturer.
- F<sub>i</sub> = 36 kV, XLPE insulation from manufacturer A.

where i = sample number from same insulation.

Figure 7 illustrates tree growth rate versus time for six insulation samples. It is clear that initially, the tree

propagates with a relatively larger rate which retards with the passage of time as the tree traverses toward the opposite electrode. For the investigated XLPE insulations, after a time lapse of about 20 s, the tree growth rate becomes slow and attains almost a constant value. It further shows that, in the first 20 s after initiation, the tree growth rate is field dependent, while after this time period, it becomes space charge limited and almost constant which verifies the self limiting growth behavior of electrical trees (Dissado and Fothergill, 1992).

#### Fractal behavior of electrical trees

The electrical trees are highly branched structures, which

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

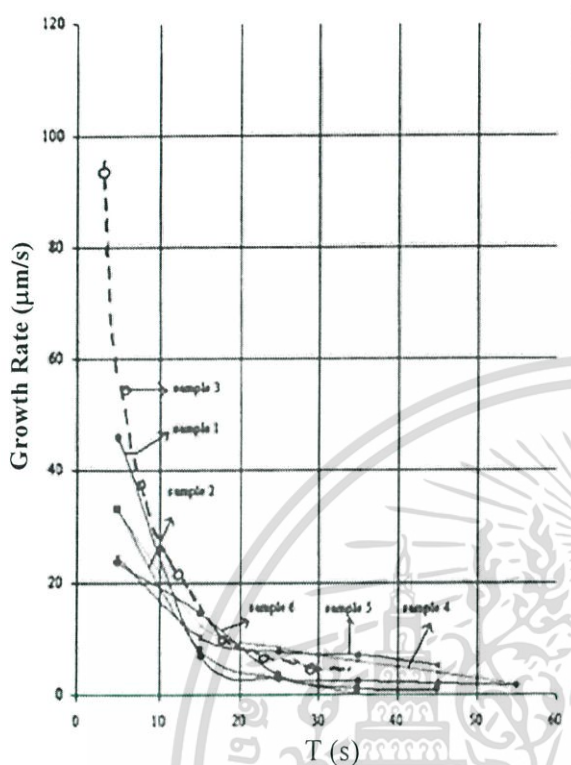


Figure 7. Average tree growth rate in 6 samples of type # D insulation during the first minute after treeing initiation.

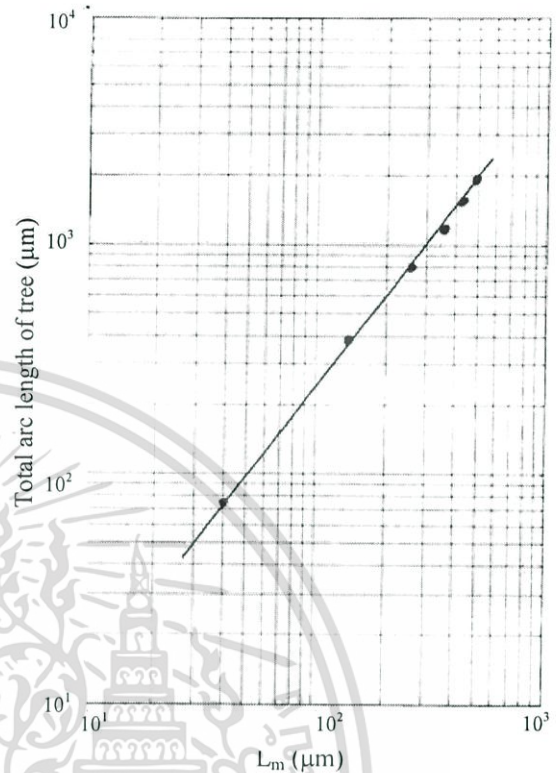


Figure 8. The variation of total arc length of branch elements with the maximum axial length of branch-type tree for two samples.

are often considered as fractal objects. The degree to which such objects fill the space is characterized by a fractal dimension, which provides a measure of the branch density of the tree. This parameter is therefore important in relation to the length of the tree and to the volume of material damage that has occurred. Models have been proposed in the literature (David, 1995; Dissado and Fothergill, 1992) which suggest that the arc length of each branch ( $S_i$ ) summed over all branches within axial length ( $L$ ) is related as:

$$S_t = (\sum S_i) \propto L^{d_f} \quad (1)$$

where ( $d_f$ ) is the fractal dimension.

Tree growth in polyethylene under power frequency voltage has been found to show the fractal dimension as  $d_f = (1.6 - 1.7)$  for branch-type trees, while it is  $(2.4 - 2.6)$  for bush-type trees (Dissado and Fothergill, 1992). In some binary-mixtures of polyethylene, values of  $d_f = 1.3$  have also been reported for Branch type trees, whereas in case of bush-type trees  $d_f$  was found to exceed 2.0 (Dodd et al., 2003).

The tree parameters for several samples of insulation tested here were evaluated for determining  $d_f$ . For this purpose, 2-D patterns of the branch-type electrical trees

were subjected to the fractal analysis. Figure 8, for instance, illustrates the variation of total arc length of tree branches as a function of axial growth length ( $L_m$ ) for two samples. The data fits well on the log-log plot. The slope of the curve gives  $d_f = 1.18$ . Similarly, it was found that relation between  $L_m$  and the total number of alternating pulses of applied voltage fit well on log-log plot (not shown here). From such a plot, the reciprocal of the slope ( $= d_f$ ) is equal to 1.2 and is almost the same as obtained with  $\sum S_i$  versus  $L_m$ . The value of  $d_f$  is therefore confirmed by two different ways, but is less than the value  $(1.6 - 1.7)$  reported in literature for polyethylene (Dissado and Fothergill, 1992). XLPE is a more complex matrix than polyethylene (PE). Moreover, its melting point is  $\sim 106^\circ\text{C}$  as compared to  $70^\circ\text{C}$  for PE. The fractal effect of the Maxwell's forces due to the applied field is more severe on PE than XLPE. Perhaps this is the reason that the branch density in PE is higher than that in XLPE insulation.

### Conclusions

The following conclusions can be drawn from this study.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Using 10  $\mu\text{m}$  defect size, stress of around (280 to 510)  $\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$  is required to initiate tree in  $\leq 1$  h in XLPE insulation blocks investigated in this work.
2. The values of voltage step  $\Delta V$  and time step  $\Delta t$  at each voltage level control the type of tree. If  $\Delta V$  is kept small and  $\Delta t$  large, then branch-type trees are initiated. However, if  $\Delta V$  is increased and  $\Delta t$  is decreased, bush-type tree results.
3. During the initial 1 min after a tree's inception, the tree growth rate decreases in an almost exponential manner and approaches to a constant value.
4. Electrical trees are fractal objects and the fractal dimension ( $d_f$ ) is determined for several types of insulations. It shows that  $d_f$  can be a useful tool for comparison of different types of insulations.

## ACKNOWLEDGEMENT

The support provided by the Research Center, College of Engineering and Deanship of Scientific Research, King Saud University is thankfully acknowledged.

## REFERENCES

- Chapman JV (2001). Morphology and Growth of Electrical Trees in Propylene / Ethylene Copolymer. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 8: 284-292.
- Chen G, Tham C (2009). Electrical Treeing Characteristics in XLPE Power Cable Insulation in Frequency Range Between 20 and 500 Hz. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 16(1): 179-188.
- David E (1995). Comparison between Experimental Results and Fractal Growth Model for Electrical Treeing in Polyethylene. *Proceedings of the 1995 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, pp. 199-203.
- Dissado LA, Fothergill JC (1992). *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Peter Peregrines Ltd. U.K, pp. 117-140.
- Dodd SJ, Champion JV, Zhao Y, Vaughan AS, Sutton SJ, Swingler SG, (2003). Influence of Morphology on Electrical Treeing in Polyethylene blends. *IEE Proceedings Science, Measurement Technol.*, 150(2): 58-64.
- Du BX, Han T, Gao Y, Zhu XH (2011). Dependence of Electrical Treeing Behavior on Cross-Linking Temperature of XLPE. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 1-4.
- Du BX, Ma ZL, Gao Y, Han T (2011). Effect of Ambient Temperature on Electrical Treeing Characteristics in Silicone Rubber. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18(2): 401-407.
- Fothergill JC, Dissado LA, Sweeney PJJ (1994). A Discharge-Avalanche Theory for the Propagation of Electrical Trees: A physical Basis for Their Voltage Dependence. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1: 474-486.
- Gulski E, Putter H, Smit JJ, (2008). Investigation of Water Treeing – Electrical Treeing Transition in Power Cables. *Int. Confer. Condition Monitoring Diagnosis, China*, pp. 234-237.
- Ishibashi A, Kawai T, Nakagawa S, Muto H, Katakai S, Hirotsu K, Nakatsuka T (1998). A Study of Treeing Phenomena in the Development of Insulation for 500 kV XLPE Cables. *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 5: 695-706.
- Kim WS (2001). Tree Initiation Characteristics in LDPE with Different Crystallinities. *Proceedings of 6<sup>th</sup> IEEE Int. Confer. Properties Appl. Dielectr. Mater, China*, pp. 542-545.
- Ling Liu, Quan Zhou, Ruijin Liao, Kaiyan Ye (2008). The Chaos Characteristics Analysis for Electrical Treeing Propagation in XLPE Power Cables. *IEEE Int. Symposium Electr. Insul.*, pp. 1-6.
- Malik NH, Abdullah AA, Al-Arainy AA, Qureshi MI (2005). Factors Influencing Electrical Treeing in XLPE Insulation. *European Trans. Electr. Power (ETEP)*; 16: 205-218.
- Osawa K, Urano K, Ehara Y, Kishida H, Ito T (1997). The Influence of Instantaneous Value and  $dv/dt$  of Applied Voltage Upon Electrical Treeing Deterioration. *IEEE Confer. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (DEIDP)*, 1: 321-324.
- Samee A, Li ZH, Huang ZP (2009). Investigation on Electrical Treeing Characteristics of Thermally Aged XLPE Cable. *IEEE 9<sup>th</sup> Int. Confer. Properties Appl. Dielectr. Mater. (ICPADM)*, Harbin, China, pp. 437-440.
- Shimizu N, Laurent C (1998). Electrical Tree Initiation. *Dielectr. Electr. Insul.*, 5: 651-659.
- Zhou T, Ling Liu, Ruijin Liao, Chen G (2010). Study on Propagation Characteristics and Analysis of Partial Discharges for Electrical Treeing in XLPE Power Cables. *10<sup>th</sup> IEEE Int. Confer. Solid Dielectr. (ICSD) Potsdam*, pp. 1-4.

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายกันตพัฒน์ ยมพุก

วัน เดือน ปีเกิด 22 กรกฎาคม 2537

ที่อยู่ 92 หมู่ 8 ตำบลมาบแค อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

พ.ศ. 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท ทีทีซีแอล จำกัด

แผนก Electrical engineer

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม 2559



ชื่อ-นามสกุล นายพนphanth ฝ่าะลอะฮอ

วัน เดือน ปีเกิด 27 สิงหาคม 2537

ที่อยู่ 132/8 หมู่ 12 ตำบลป่าเตด อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50100

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย

พ.ศ. 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด

แผนก Assistant Engineer

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นางสาวประภัสสร จันทะใส

วัน เดือน ปีเกิด 10 ธันวาคม 2537

ที่อยู่ 6 หมู่ 11 ตำบลบางปะกง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา 20130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนบางปะกงบวรวิทยายน

พ.ศ. 2560

สำเร็จการศึกษาวិชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

โรงไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

แผนก Maintenance

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม 2559



ชื่อ-นามสกุล นางสาวพร จำภา

วัน เดือน ปีเกิด 19 กันยายน 2537

ที่อยู่ 88 หมู่ 4 ตำบลสุเทพ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนเรยีนาเชลีวิทยาลัย

พ.ศ. 2559

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท กุลธรอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด

แผนก Maintenance

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้