

การพัฒนาระบบวัดประจุค้ำงสำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง
ในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

นายณัฐวุฒิ เรืองขจรเมธี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**DEVELOPMENT OF SPACE CHARGE MEASURING
SYSTEM FOR CROSSLINKED POLYETHYLENE
INSULTING METERIAL IN HIGH VOLTAGE
CABLE BY USING PULSED ELECTRO-
ACOUSTIC METHOD**

Nattawut Ruangajonmathee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2012

การพัฒนาระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง
ในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. รอ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐวุฒิ เรื่องขอรเมธี : การพัฒนาระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน (DEVELOPMENT OF SPACE CHARGE MEASURING SYSTEM FOR CROSSLINKED POLYETHYLENE INSULATING MATERIAL IN HIGH VOLTAGE CABLE BY USING PULSED ELECTRO-ACOUSTIC METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 159 หน้า.

พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนสูง มีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าที่ดี จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางถูกนำมาใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูงกันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม การใช้งานสายเคเบิลแรงสูงฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูง ก่อให้เกิดการตกค้างของประจุภายในเนื้อฉนวน เนื่องจากเกิดจากความแตกต่างของอัตราการคายประจุและอัตราการเก็บสะสมของประจุ การสะสมของประจุค้างทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในเนื้อฉนวน ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวน ซึ่งอาจนำไปสู่ความผิดปกติของฉนวนได้ขึ้น งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายสร้าง ระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน และเพื่อเป็นการทดสอบระบบที่สร้างขึ้น จึงทำการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และระยะเวลาการใช้งานของฉนวน XLPE โดยใช้วัสดุฉนวน XLPE ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ฉนวน XLPE ใหม่ ฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี และฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ทดสอบภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ผลวิจัยพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูง จะส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างที่เพิ่มสูงขึ้นมากโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี นอกจากนี้ยังศึกษาผลของประจุค้างต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR พบว่าผลของประจุค้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีในหมู่พันธะ C=C และพันธะ C=O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะทั้งสองบ่งบอกว่าฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุ และศึกษาผลของประจุค้างต่อลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าประจุค้างไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยา

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2555

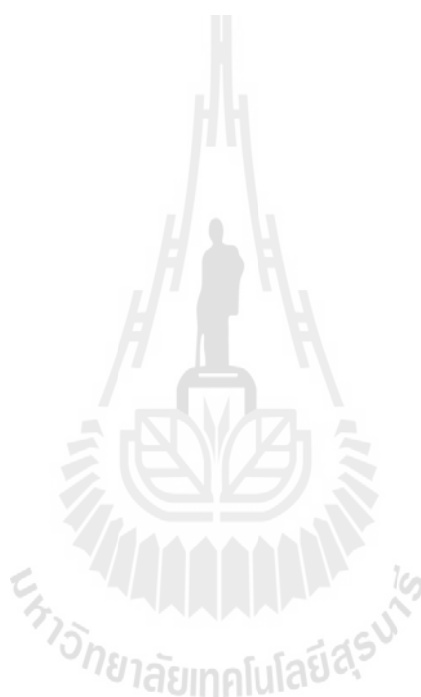
ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NATTAWUT RUANGKAJONMATHEE : DEVELOPMENT OF SPACE
CHARGE MEASURING SYSTEM FOR CROSSLINKED
POLYETHYLENE INSULATING MATERIAL IN HIGH VOLTAGE
CABLE BY USING PULSED ELECTRO-ACOUSTIC METHOD. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D.ENG., 159 PP.

SPACE CHARGE/PULSED ELECTRO-ACOUSTIC METHOD

Currently, crosslinked polyethylene (XLPE) is widely used as an insulating material for power cable due to its good physical properties. However, under certain operating conditions, their good electrical insulation properties may become degraded. For example, under high electrical field stress and high temperature can give rise to space charge. Space charge is the difference in the rate of discharge and collection charges. This can cause further concentration of charge and lead to premature failure of the material. Objectives of this thesis are to develop a space charge measuring system using pulsed electro-acoustic technique (PEA) and to study characteristic of distribution in 22 kV XLPE insulated cable. Numbers of XLPE ribbon taken from insulation part of 22 kV high voltage cable for distribution system were used as test specimen. Three types of XLPE cable were used, i.e. un-used, 12 years used and 15 years used cables. Under electrical and thermal stresses, the measurement results by using PEA technique showed that amplitude of space charge increased with increasing in thermal stress and subsection time of stress, especially for 15 years used cable. Furthermore, physical damaged and chemical changed of tested specimens were also analyzed. Chemical change was analyzed using FTIR technique. From chemical

analysis results, increasing of C = C bonds (Carbonization) and C = O bonds (Oxidation) was observed. No significance of physical change was observed.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดีและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด รวมถึงการเป็นแบบอย่างที่ดีในทุก ๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร. สุธเขต พจน์ประไพ อาจารย์สาขาวิศวกรรมเซรามิกที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือที่จำเป็นต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และบุคลากรฝ่ายงานพัฒนาเครื่องมือและปรับปรุงห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณจิรทีปต์ สุทธิลักษณ์ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการวิศวกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนการใช้เครื่องมือ และให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณศุวิทย์ เพ็ญสังกะ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนการใช้เครื่องมือ และให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ คงมันกลาง คุณประวีตรา หมายสุข และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง คุณภัทรวรรณ เคนพะนาน ที่ได้ช่วยติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการ ทำวิจัย
ตลอดมา

ทำยนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้าน
ต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนางกันยารินทร์ นันท์ดี ผู้เป็นมารดา
นายกฤติเดช เรืองขจรเมธิ ผู้เป็นบิดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางการศึกษา
อย่างเปี่ยมล้นตลอดมาจนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

ณัฐวุฒิ เรืองขจรเมธิ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 สรุป	10
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	11
3.1 กล่าวนำ	11
3.2 สัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของสารจนวนพอลิเมอร์.....	11
3.2.1 ลักษณะ โมเลกุลสารพอลิเมอร์.....	11
3.2.2 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของสารพอลิเมอร์.....	13
3.3 ปรากฏการณ์การหลอมและการอ่อนตัวจากความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์.....	17
3.4 สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงจนวนพอลิเมอร์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	วัสดุตัวนำไฟฟ้า.....	21
3.4.2	ฉนวนพอลิเมอร์.....	22
3.4.3	วัสดุกำบังสารกึ่งตัวนำ.....	24
3.4.4	ปลอกหุ้ม	25
3.5	การผลิตสายเคเบิลขึ้นพื้นฐาน	25
3.5.1	ขั้น ตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า.....	26
3.5.2	ขั้น ตอนการผลิตแกนกลาง.....	27
3.5.3	ขั้น ตอนการผลิตสายเคเบิลเสร็จสมบูรณ์	32
3.5.4	ขั้น ตอนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ	32
3.6	ประจุค้างและผลของประจุค้างต่อการกระจายตัวของสนาม ไฟฟ้าในฉนวน	33
3.6.1	สัณฐานวิทยาและการ โอนย้ายประจุ.....	34
3.6.2	กลไกการเกิดประจุค้างของฉนวนพอลิเมอร์.....	36
3.6.3	ผลของประจุค้างต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า.....	41
3.7	วิธีในการวัดการกระจายตัวของประจุค้าง.....	44
3.7.1	วิธีพัลส์ความร้อน	44
3.7.2	วิธีพัลส์ความดันเหนี่ยวนำจากเลเซอร์	45
3.7.3	วิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน.....	46
3.8	สรุป	52
4	วิธีดำเนินการวิจัยและสร้างระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง.....	53
4.1	การออกแบบและสร้างระบบวัดประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน.....	53
4.1.1	ภาคแรงดันสูงและเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์	57
4.1.2	อิเล็กทรอนิกส์	58
4.1.3	อุปกรณ์พีซีอิเล็กทรอนิกส์.....	59
4.1.4	วงจรขยายสัญญาณและอุปกรณ์แสดงผล	60
4.1.5	ชุดควบคุมอุณหภูมิ	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	เงื่อนไขและสภาวะที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง	65
4.2.1	สภาวะภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรง	65
4.2.2	สภาวะความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรงและอุณหภูมิ	66
4.3	การเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง	66
4.4	สรุป	68
5	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ผลของความเครียดทางไฟฟ้า	
อุณหภูมิ	ระยะเวลาการใช้งาน	69
5.1	กล่าวนำ	69
5.2	หลักการหาความหนาแน่นของประจุค้ำง	69
5.3	ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง ในเนื้อฉนวน XLPE ใหม่	72
5.3.1	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ใหม่	72
5.3.2	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ใหม่	76
5.4	ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง ในฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	81
5.4.1	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	81
5.4.2	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	85
5.5	ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง ในฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	89
5.5.1	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	89
5.5.2	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	93

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.6	สรุป	103
6	การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของฉนวน XLPE	104
6.1	กล่าวนำ	104
6.2	การเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนไนเซชันของฉนวน XLPE.....	104
6.3	หลักการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE.....	105
6.4	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่	107
6.4.1	โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะ การกระจายตัวของประจุค้าง	107
6.4.2	โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง	112
6.5	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 12 ปี	116
6.5.1	โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะ การกระจายตัวของประจุ ค้าง	117
6.5.2	โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง	121
6.6	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 15 ปี	126
6.6.1	โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะ การกระจายตัวของประจุ ค้าง	126
6.6.2	โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง	131

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.7	การเปรียบเทียบโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE	135
6.7.1	การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ใหม่ หลังจากศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง	136
6.7.2	การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ผ่าน การใช้งานมา 12 ปี หลังจากศึกษาผลของความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง	138
6.7.3	การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ผ่าน การใช้งานมา 15 ปี หลังจากศึกษาผลของความเครียด ทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง	139
6.8	สรุป	140
7	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	141
7.1	สรุป	141
7.2	ข้อเสนอแนะ	142
	รายการอ้างอิง.....	144
	ภาคผนวก.....	147
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	147
	ประวัติผู้เขียน	159

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3.1	คุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า.....	19
3.2	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า.....	21
3.3	ประเภทของฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน	26
3.4	วิธีการขึ้นรูปสามชั้น	28
3.5	ข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการอบสายเคเบิลแบบ CCV และ VCV.....	31
3.6	Relative Permittivity และความเร็วเสียงในวัสดุฉนวน.....	51
4.1	รายละเอียดระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อ ฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ที่ได้ออกแบบไว้	54
4.2	รายละเอียดของพีไออิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย	59
4.3	รายละเอียดระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน	64
4.4	ค่าความเครียดทางไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	65
4.5	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการศึกษาผลของสภาวะ พหุความเครียดต่อการกระจายตัวของประจุค้าง.....	66
6.1	ช่วงคลื่นอินฟราเรดของฉนวน XLPE.....	107
6.2	การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ.....	110
6.3	การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ.....	114
6.4	การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้างของฉนวน XLPE 12 ปี ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ.....	119
6.5	การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้างของฉนวน XLPE 12 ปี ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ที่ค่าต่าง ๆ	124

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

- 6.6 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างค่าความเครียดต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี..... 129
- 6.7 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุ ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี.....133



สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น.....	12
3.2	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบกึ่ง.....	12
3.3	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง.....	13
3.4	โครงสร้างแบบอสัณฐาน.....	13
3.5	โครงสร้างแบบกึ่งผลึก.....	14
3.6	โครงสร้างกึ่งผลึกของพอลิเมอร์ PE.....	15
3.7	สัณฐานวิทยาของ PE บริเวณอสัณฐานระหว่างเฟส Lamellar ที่มีโครงสร้างแบบผลึก.....	16
3.8	ปริมาณจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ.....	18
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ.....	19
3.10	โครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิล.....	21
3.11	โครงสร้างพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนจากเอทิลีน.....	23
3.12	ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....	26
3.13	ขั้นตอนของกระบวนการผลิตแกนกลางของสายเคเบิล.....	27
3.14	เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปสายเคเบิล.....	28
3.15	เทคนิคการอบและการขึ้นรูปโดยทั่วไปของสายเคเบิล XLPE.....	29
3.16	แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ CCV และ VCV.....	30
3.17	แผนผังการทำงานของระบบ MDCV.....	32
3.18	แผนภาพแถบพลังงาน.....	33
3.19	ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างสายโซ่โมเลกุล.....	35
3.20	ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุข้ามสายโซ่โมเลกุล.....	36
3.21	การลดลงของเว็ร็กฟังก์ชันเนื่องจากผลของการฉีดประจุแบบริชาร์ดสัน-ช็อดกี.....	37
3.22	การฉีดประจุแบบการฉีดอิเล็กตรอนแบบฟาวเลอร์-นอร์ดไฮม์.....	38
3.23	แผนภาพกับดักพลังงานภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากสารตกค้าง.....	39
3.24	การลดลงเว็ร็กฟังก์ชันเนื่องจากผลของกระบวนการพูล-แฟรงเคิล.....	40
3.25	กลไกฮอปปีงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.26	ผลของประจุค้างต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในฉนวน.....	42
3.27	ผลของประจุค้างกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	43
3.28	หลักการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ความร้อน.....	45
3.29	หลักการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ความดันเหนี่ยวนำจาก เลเซอร์	46
3.30	หลักการพื้นฐานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน.....	47
3.31	องค์ประกอบการวัดกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน	48
3.32	สัญญาณแรงดันที่ได้จากวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน.....	50
4.1	ไดอะแกรมระบบวัดประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน.....	53
4.2	ส่วนประกอบของ Chamber ที่ใช้ในการวิจัย.....	55
4.3	ส่วนประกอบของชุดตรวจวัดสัญญาณประจุค้าง	55
4.4	แบบร่างของ Chamber ที่ใช้ในการวิจัย.....	56
4.5	อุปกรณ์ภาคแรงดันสูงและเครื่องกำเนิดสัญญาณ	57
4.6	อุปกรณ์ชุดอิเล็กทรอนิกส์	58
4.7	การติดตั้งอุปกรณ์พีโซอิเล็กทริกและตัวดูดซับคลื่น	60
4.8	ตัวอย่างวงจรรขยายสัญญาณอัตราขยาย 30 dB	60
4.9	วงจรรขยายสัญญาณ	61
4.10	แผนผังการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	61
4.11	การติดตั้งฮีตเตอร์แบบแบ่ง.....	62
4.12	วงจรถ่วงควบคุมอุณหภูมิ.....	63
4.13	ระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน	64
4.14	ขั้นตอนการเตรียมฉนวน XLPE	67
4.15	เครื่องไมโครโทม	67
4.16	ชิ้นงาน XLPE ที่ถูกตัดด้วยเครื่องไมโครโทม.....	68
5.1	สัญญาณแรงดันเอาต์พุตภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm 15 นาที	70
5.2	การกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.3	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E= 25\text{kV/mm}$	73
5.4	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E= 50\text{kV/mm}$	73
5.5	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E= 75\text{kV/mm}$	74
5.6	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E= 100\text{kV/mm}$	74
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อ ความหนาแน่นของประจุค้ำที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ใหม่.....	75
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อ ความหนาแน่นของประจุค้ำที่ขั้วแอนอดของฉนวน XLPE ใหม่.....	76
5.9	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำภายใต้ 25 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	77
5.10	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำภายใต้ 50 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	77
5.11	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำภายใต้ 75 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	78
5.12	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำภายใต้ 100 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	78
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่น ประจุค้ำที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ใหม่.....	79
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่น ประจุค้ำที่ขั้วแอนอดของฉนวน XLPE ใหม่.....	80
5.15	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำฉนวน XLPE ที่ผ่านการ ใช้งาน 12 ปี ที่ 25 kV/mm	81
5.16	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำฉนวน XLPE ที่ผ่านการ ใช้งาน 12 ปี ที่ 50kV/mm	82
5.17	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำฉนวน XLPE ที่ผ่านการ ใช้งาน 12 ปี ที่ 75kV/mm	82
5.18	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำฉนวน XLPE ที่ผ่านการ ใช้งาน 12 ปี ที่ 100kV/mm	83
5.19	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนา แน่นของประจุค้ำที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการ ใช้งานมา 12 ปี.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.20	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้องกันความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโตนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี.....	84
5.21	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	85
5.22	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	86
5.23	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	86
5.24	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	87
5.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโตนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี.....	88
5.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโตนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี.....	88
5.27	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 25kV/mm.....	90
5.28	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 50kV/mm.....	90
5.29	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 75kV/mm.....	91
5.30	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 100kV/mm.....	91
5.31	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้องกันความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโตนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี.....	92
5.32	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้องกันความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโตนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี.....	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.33	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง.....	94
5.34	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง.....	95
5.35	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง.....	95
5.36	ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง.....	96
5.37	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี.....	97
5.38	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วอโนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี.....	97
5.39	ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ขั้วคาโทดภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า.....	99
5.40	ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ขั้วอโนดภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า.....	100
5.41	ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ขั้วคาโทดภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ.....	101
5.42	ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ขั้วอโนดภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ.....	102
6.1	พันธะ โมเลกุลของ XLPE ในการเกิดออกซิเดชัน.....	105
6.2	พันธะ โมเลกุลของ XLPE ในการเกิดคาร์บอนในเซชัน.....	105
6.3	เครื่องวิเคราะห์ FTIR	106
6.4	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 25kV/mm.....	108
6.5	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 50kV/mm.....	108
6.6	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 75kV/mm.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.7	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 100kV/mm.....	109
6.8	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า.....	111
6.9	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = O ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า.....	111
6.10	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้ำงที่ 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ	112
6.11	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้ำงที่ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ	113
6.12	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้ำงที่ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ	113
6.13	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัว ของประจุค้ำงที่ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ	114
6.14	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = C ภายใต้ความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน.....	115
6.15	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = O ภายใต้ความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน.....	116
6.16	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 25kV/mm.....	117
6.17	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 50kV/mm.....	118
6.18	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 75kV/mm.....	118
6.19	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 100kV/mm.....	119
6.20	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี.....	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.21	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = O ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	121
6.22	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	122
6.23	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	122
6.24	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	123
6.25	FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี	123
6.26	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = C ภายใต้วความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี.....	125
6.27	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = O ภายใต้วความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี.....	125
6.28	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 25kV/mm.....	127
6.29	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 50kV/mm.....	127
6.30	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 75kV/mm.....	128
6.31	FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 100kV/mm.....	128
6.32	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	130
6.33	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = O ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.34 FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	131
6.35 FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	132
6.36 FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	132
6.37 FTIR Spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงที่ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี	133
6.38 เปรอ์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = C ภายใต้อุณหภูมิและความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี	134
6.39 เปรอ์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = O ภายใต้อุณหภูมิและความเครียดทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี	135
6.40 กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS DP 11	136
6.41 ลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ใหม่หลังจากการศึกษาค้นคว้าของ ความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง	137
6.42 ลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ใช้งาน 12 ปีหลังจากการศึกษาค้นคว้า ผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง	138
6.43 ลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ใช้งาน 15 ปีหลังจากการศึกษาค้นคว้า ผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง	139

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Crosslinked Polyethylene: XLPE) ได้ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูงตั้งแต่ปลายทศวรรษที่ 1960 และใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน โดยที่ XLPE เกิดจากนำเอาวัสดุพอลิเมอร์พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) มาผ่านกระบวนการเชื่อมขวางด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ผลของการเชื่อมขวางทำให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนจากเทอร์โมพลาสติกไปสู่คุณสมบัติเทอร์โมเซตพลาสติก ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ด้วย นั่นคือ สามารถทนความร้อนได้สูงขึ้น โดยที่ในสภาวะปกติสามารถทนความร้อนได้ถึง 90°C ในสภาวะที่ถูกเงินสามารถทนได้ 130°C และในสภาวะการเกิดลัดวงจร สามารถทนได้ถึง 250°C

เมื่อนำสายเคเบิลไปใช้งานจริง บางกรณีจะพบว่าเกิดความผิดปกติของวัสดุฉนวนถึงแม้ว่าใช้งานที่ระดับแรงดันต่ำกว่าระดับแรงดันที่ฉนวนสามารถทนได้ โดยพบว่าสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นผลจากประจุค้าง (Space Charge) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน การมีประจุค้างในเนื้อฉนวนทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ประจุค้างเกิดจากความแตกต่างระหว่างอัตราการคายประจุกับอัตราการจ่ายประจุ หรือมีสิ่งเจือปนภายในเนื้อสาร เช่น สารตกค้างที่เป็นผลพลอยได้ในกระบวนการผลิต และสารเติมแต่ง ที่ติดอยู่ภายใน ส่งผลทำให้วัสดุฉนวนมีคุณสมบัติที่บิดเบือนไป

ในปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับประจุค้างในฉนวน สายเคเบิลแรงสูงสำหรับ ระบบส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย โดยทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลของประจุค้างต่อคุณสมบัติของฉนวนสายเคเบิลแรงสูงทำให้สามารถรู้ถึงผลของประจุค้างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฉนวนได้ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วนั้น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบ การวัดประจุค้างในฉนวน XLPE จึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และอายุการใช้งาน ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง และการพัฒนาระบบวัดประจุค้างสำหรับสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยเทคนิควิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน (Electroacoustic Pulse Method) เพื่อศึกษาผลของประจุค้างต่อคุณสมบัติของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ในสายเคเบิลแรงสูงจากผลของประจุค้าง

1.2.2 เพื่อศึกษาระบบการวัดประจุค้างของฉนวน XLPE ในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

1.2.3 เพื่อพัฒนาสร้างระบบการวัดประจุค้างของฉนวน XLPE ในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE

1.2.5 เพื่อศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE

1.2.6 เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการใช้งานของสายเคเบิลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE

1.2.7 เพื่อศึกษาผลของประจุค้างต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของฉนวน XLPE

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การวัดประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงจะใช้ วิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ในการวัดประจุค้าง

1.3.2 ฉนวน XLPE ที่ใช้ในการวัดประจุค้างเป็นฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV

1.3.3 การวัดประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน จะใช้ค่าความเครียดทางไฟฟ้าในการทดสอบในช่วง 25 - 100 kV/mm และความเครียดทางความร้อน ในการทดสอบจะใช้อุณหภูมิที่ 25°C 40°C 50°C และ 60°C ตามลำดับ

1.3.4 อุณหภูมิห้อง ของการทดลองจะใช้อุณหภูมิที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ในอาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 เป็นหลัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ดำเนินการออกแบบระบบการวัดประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

1.4.2 ดำเนินการสร้างระบบการวัดประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูง ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อนได้

1.4.3 ศึกษาผลของความเครียดไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในฉนวน XLPE

1.4.4 ศึกษาผลของความเครียดไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในฉนวน XLPE

1.4.5 ศึกษาผลของระยะเวลาการใช้งานของสายเคเบิลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในฉนวน XLPE

1.4.6 การตัดฉนวน XLPE เพื่อใช้ในวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ใช้เครื่องมือโครโมในการตัดชิ้นงาน XLPE เพื่อมีขนาดความหนาตามที่ต้องการ

1.4.7 ใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของประจุค้าง

1.4.8 ใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบ Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของประจุค้าง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงจากผลของประจุค้าง

1.5.2 เกิดความรู้เกี่ยวกับระบบการวัดประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน และทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูง ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ภายใต้อุณหภูมิความเครียดทางไฟฟ้า

1.5.3 เกิดความรู้ความเข้าใจลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ภายใต้อุณหภูมิความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิ

1.5.4 เกิดความรู้ความเข้าใจลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV เนื่องจากผลของอายุการใช้งานของสายเคเบิล

1.5.5 สามารถทราบถึงผลของประจุค้างภายในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงสูงขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมี

1.5.6 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่อง ระบบการวัดประจุค้าง ฉนวน XLPE สำหรับสายเคเบิลแรงสูงด้วยเทคนิคพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

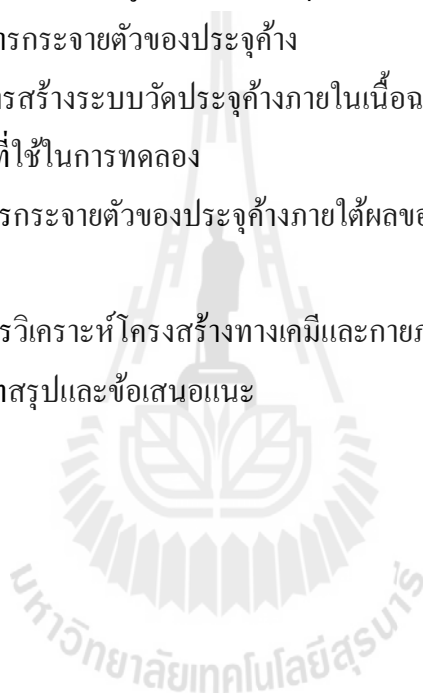
บทที่ 3 กล่าวถึงสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของสารฉนวนพอลิเมอร์ โครงสร้างของสายเคเบิล ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลแรงสูง ผลของประจุค้างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฉนวน XLPE และวิธีในการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างระบบวัดประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 5 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ ระยะเวลาการใช้งาน

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของฉนวน XLPE

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

การพัฒนาการระบบการวัดประจุค้ำภายในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน มุ่งเน้นสร้างระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ พร้อมทั้งศึกษาผลของ ความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรง อุณหภูมิ และอายุการใช้งานของสายเคเบิล ที่มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ ตลอดจนศึกษาผลของประจุค้ำที่ส่งผลต่อ โครงสร้างทางเคมีและกายภาพ เพื่อให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ Science Direct เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าว จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษา การวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดลำดับการเรียงเรียงผลงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1989	T. Ditchu, C. Alquie, J. Lewiner, E. Favrie and R. Jocteur	ศึกษา ผลของ โครงสร้างของอิลีกโทรด วัสดุที่ใช้ทำอิลีกโทรด ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำในฉนวนพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Pressure – Wave Propagation (PWP) ผลการวิจัย พบว่า วัสดุอิลีกโทรดใช้ทำมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1996	K. S. Suh, J. H. Koo, S. H. Lee, J. K. Park and T. Takada	ศึกษาผลของดัชนีการหลอมเหลวของฉนวน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene: LDPE) ที่แตกต่างกันต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง พบว่าดัชนีการหลอมเหลวมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง และการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มคาร์บอนในโครงสร้างทางเคมีของฉนวน LDPE เป็นสาเหตุเริ่มต้นทำให้เกิดการเสื่อมอายุ
1998	T. Kanno, T. Uozumi and Y. Inoue	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน พบว่าค่าความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง โดยที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างเพิ่มตามไปด้วย
2000	G. C. Montanari and D. K. Das - Gupta	ศึกษาผลการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน และวิธี Laser Intensity Modulation (LIMM) พบว่าการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยความเครียดทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการตกค้างของประจุภายในเนื้อฉนวนที่มากขึ้น
2000	M. Teruyoshi, S. Kenta, K. Kaneko, M. Tatsuo, I. Mitsugu and N. Tatsuya	ศึกษาผลของความหนาแน่นของฉนวน LDPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน พบว่าความหนาแน่นของประจุค้างจะมีมากในเนื้อฉนวน LDPE ที่มีความหนาแน่นต่ำ พร้อมทั้งศึกษาผลของวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดระหว่าง SC และ AI พบว่า SC สามารถฉีดประจุได้ดีกว่า AI

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2000	T. Mizutani, H. Semi and K. Kaneko	ศึกษาผลการโพโรเซชันของความเครียดทางไฟฟ้า กระแสตรงและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของ ประจุค้าง ในเนื้อฉนวน LDPE พบว่าโพโรเซชันไม่มีผล ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง แต่ ขนาดของ ความเครียดทางไฟฟ้า ระยะเวลาที่ป้อนความเครียดทาง ไฟฟ้า และอุณหภูมิ ทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุ ค้างเพิ่มขึ้น
2001	G. Chen, T. Y. G. Tay, A. E. Davies, Y. Tanaka and T. Takada	ศึกษาผลของวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดต่อลักษณะการ กระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน LDPE โดยใช้ SC, Al และ Au มาทำอิเล็กโทรด พบว่าอิเล็กโทรดที่ทำมาจาก วัสดุ SC มีอัตราการหนีประจุที่ดีที่สุด โดยเรียงลำดับการ เรียงประจุของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้ดังนี้ SC Al และ Au ตามลำดับ
2003	G. C. Montanri and F. Palmieri	ศึกษาผลของความชื้นในเนื้อฉนวน XLPE ต่อลักษณะ การกระจายตัวของประจุค้าง ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียง สะท้อน พบว่าที่ค่าความชื้นที่มาก ขนาดของความเครียด ทางไฟฟ้า จะส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุ ค้างที่มากกว่าค่าความชื้นน้อย ๆ
2003	Y. Tanaka, G. Chen, Y. Zhao, A. E. Davies, A. S. Vaughan and T. Takada	ศึกษาผลของสารเติมแต่งในเนื้อฉนวน LDPE และ อุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ด้วยวิธี พัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน พบว่าในเนื้อฉนวน LDPE ที่มี สารเติมแต่งจะมีความหนาแน่นของประจุค้างที่สูง และ จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าของความเครียดทางไฟฟ้าและ อุณหภูมิ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	G. Chen, M. Fu and X. Z. Liu	ศึกษาผลของการเสื่อมอายุจากความเครียดทางไฟฟ้า กระแสสลับของฉนวน LDPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน พบว่าการเสื่อมอายุจากความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างภายในเนื้อฉนวนเพิ่มมากขึ้น
2005	J. P. Jones, J. P. Llewlyn and T. J. Lewis	ศึกษาการเคลื่อนย้ายของประจุที่ก่อให้เกิดการตกค้างของประจุภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึก ภายใต้ผลของความเครียดทางกลและความเครียดทางไฟฟ้า พบว่าประจุค้างทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์
2006	M. Abou – Dakka, A. T. Bulinski and S. S. Bamji	ศึกษาผลของการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน พบว่าฉนวน XLPE ที่มีการเร่งการเสื่อมอายุมีความหนาแน่นของประจุค้างเพิ่มมากขึ้น
2007	Y. L. Chong, G. Chen and Y. F. F. Ho	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE โดยใช้อุณหภูมิ 25°C 50°C 70°C และ 90°C ผลการทดลองพบว่าที่ค่าอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างเพิ่มตามไปด้วย
2010	D. H. Mills, P. L. Lewin and G. Chen	ศึกษาผลการเสื่อมอายุของฉนวน LDPE จากแสง UV แล้วทำการวัดการกระจายตัวของประจุค้าง พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป การทดลองพบว่าแสง UV ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มไฮดรอกซิล และคาร์บอนิล (3500-3000 และ 1750 cm ⁻¹ ตามลำดับ) แล้วทำการวัดการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน พบว่าการเสื่อมอายุของฉนวนจากแสง UV ทำให้การเพิ่มของประจุค้าง

จากปริทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา ทำให้ทราบว่ามิผู้วิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแนวคิด การพัฒนาระบบ การวัดประจุค้ำงในฉนวน XLPE สามารถทำให้ผู้วิจัยมองเห็นแนวทางในการออกแบบระบบการวัดประจุค้ำงในฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน รวมถึงแนวทางในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวน XLPE เนื่องจากผลของประจุค้ำง ดังนั้นในส่วนถัดไปจากนี้เป็นการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ โดยกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ โดยย่อ ดังนี้

โดยเริ่มต้นจาก Kanno et al. (1998) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงในฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณีคือภายใต้อุณหภูมิคงที่ 65°C และกรณีที่อุณหภูมิไม่คงที่ $65-25^{\circ}\text{C}$ พบว่าค่าความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง โดยที่อุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้ำงเพิ่มตามไปด้วย

Abou-Dakka et al. (2006) ศึกษาผลของการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน โดยใช้ฉนวน XLPE ที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ ฉนวน XLPE กับฉนวน XLPE ที่ผ่านกระบวนการเร่งการเสื่อมอายุ กระบวนการเร่งการเสื่อมอายุดังกล่าวกระทำภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า 50 kV/mm เป็นเวลา 21,000 ชั่วโมง พบว่าฉนวน XLPE ที่ผ่านกระบวนการเร่งการเสื่อมอายุมีความหนาแน่นของประจุค้ำงเพิ่มมากขึ้น

Mills et al. (2010) ศึกษาผลของการเสื่อมอายุของฉนวน LDPE จากแสง UV แล้วทำการวัดการกระจายตัวของประจุค้ำงจากตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเสื่อมอายุจากแสง UV ใช้แสง UV จากหลอดนีออน ความเข้มแสง 254 nm เป็นเวลา 3 วัน 7 วัน 10 วัน 14 วัน และ 17 วัน แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบการ ทดลองพบว่าแสง UV ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มไฮดรอกซิล และคาร์บอนิล ($3500-3000$ และ 1750 cm^{-1} ตามลำดับ) แล้วทำการวัดการกระจายตัวของประจุค้ำงด้วย วิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน พบว่าการเสื่อมอายุของฉนวนจากแสงยูวีทำให้การเพิ่มของประจุค้ำงภายในฉนวน

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าถึงหลักการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง ผลของประจุค้ำงต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ซึ่งวิเคราะห์ได้จากโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลง แต่ยังคงขาดข้อมูลผลของอายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE ผู้วิจัยจึงคำนึงถึงผลของอายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE จึงได้ดำเนินการสร้างระบบการวัดประจุค้ำงภายในฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงในฉนวน XLPE ภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และอายุการใช้งานจริง

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEE, IEEE และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมเห็นได้ชัดว่า ประจุก้างภายในเนื้อฉนวนพอลิเมอร์ กำลังเป็นที่สนใจในงานวิจัย เพราะในปัจจุบันมีการใช้ พอลิเมอร์เป็นฉนวนในสายเคเบิลเป็นอย่างมาก โดยฉนวนฉนวน XLPE ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึง ได้เริ่มทำวิจัยขึ้นเพื่อพัฒนาระบบการวัดประจุก้างภายในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ขนาดพิกัดแรงดัน 22 kV ที่นิยมใช้ในประเทศไทย วิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน เป็นวิธีที่นิยมใช้วัดลักษณะการกระจายตัวของประจุก้าง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และมีความถูกต้องที่สูง ซึ่งจะอธิบายหลักการของเทคนิคดังกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

การพัฒนาระบบวัดประจุค้ำสำหรับฉนวน XLPE ในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน มีความจำเป็นที่ต้องรู้ถึงสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของสารฉนวนพอลิเมอร์ คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเมอร์ โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ กระบวนการสร้างสายเคเบิล สาเหตุการเกิดประจุค้ำภายในเนื้อฉนวนรวมไปถึงเทคนิควิธีในการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

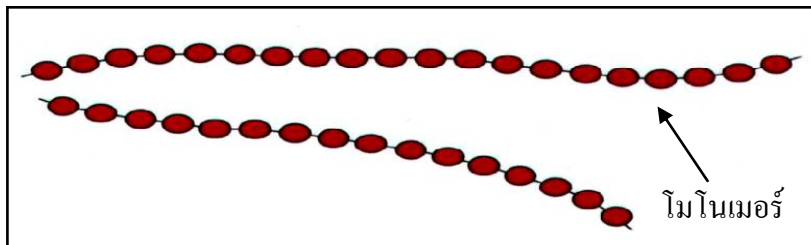
3.2 สัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของสารฉนวนพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) โมเลกุลพอลิเมอร์ประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ของ โมโนเมอร์ (Monomer) หลาย ๆ หน่วย ที่ทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นโมเลกุลสายโซ่ยาว โมโนเมอร์นี้จัดเป็นสารไมโครโมเลกุล (Micromolecule) ชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือ โมโนเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมด จัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ถ้ามีโมโนเมอร์ต่างกันตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป จัดเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) พอลิเมอร์มีทั้งที่เกิดเองในธรรมชาติ (Natural Polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดนิวคลีอิก และยางธรรมชาติ ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ จะมีลักษณะเหมือนแป้ง เซลลูโลส พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เข้ามามีบทบาทมากในชีวิตประจำวัน และมีการใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย

3.2.1 ลักษณะโมเลกุลสารพอลิเมอร์

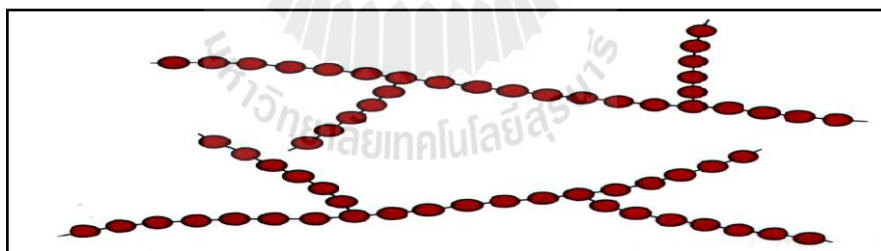
คุณสมบัติทางโครงสร้างของพอลิเมอร์เกี่ยวข้องกับการจัดตัวทางกายภาพของลำดับโมโนเมอร์ตลอด สายโซ่หลัก ของโมเลกุลพอลิเมอร์ ลักษณะของ โครงสร้าง มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ นักวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์พยายามพัฒนาวิธีการเพื่ออธิบายทั้งธรรมชาติของหน่วยย่อยและการจัดเรียงตัว ลักษณะพอลิเมอร์แบ่งออกได้ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ 1) พอลิเมอร์ แบบเชิงเส้น (Linear Polymer) ถ้าโครงสร้างชิดกันมาก ทำให้ความหนาแน่นสูง จุดหลอมเหลวสูง เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำ มีลักษณะที่ ขุ่นและเหนียวพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น ได้แก่ โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride : PVC) โพลีโพรพิลีน

(Polypropylene : PP) เป็นต้น ลักษณะ โมเลกุลของพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



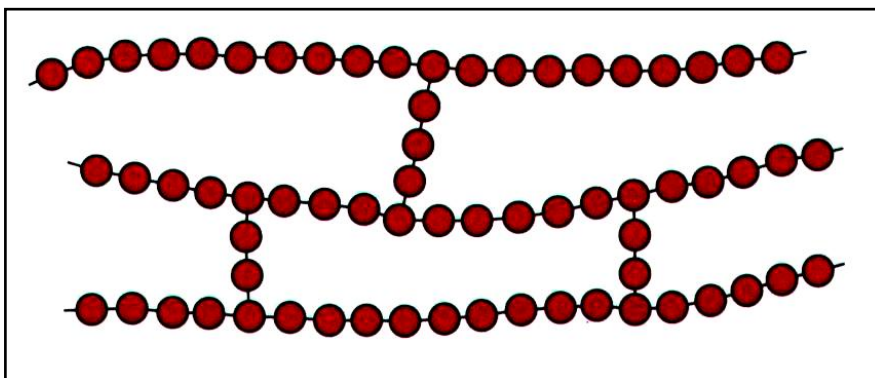
รูปที่ 3.1 ลักษณะ โมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น (ที่มา: eng.sut.ac.th/metal/images/stories/.../2_Polymeric_Materials_v_stud.p...)

2) พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer) โครงสร้างแบบนี้มีความหนาแน่นต่ำ ยืดหยุ่นได้เนื่องจากมีกิ่ง โซ่โมเลกุลย่อย แยกออกไปจากโซ่ โมเลกุลหลักทำให้โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวชิดกันได้ จุดเดือดและจุดหลอมเหลวจะต่ำกว่าพอลิเมอร์ แบบเชิงเส้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ ที่มีโครงสร้างแบบกิ่ง เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่น ต่ำ และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) ลักษณะ โมเลกุลของพอลิเมอร์แบบกิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของพอลิเมอร์แบบกิ่ง (ที่มา: eng.sut.ac.th/metal/images/stories/.../2_Polymeric_Materials_v_stud.p...)

3) พอลิเมอร์แบบ เชื่อมขวาง (Cross-Linked Polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจาก พอลิเมอร์แบบเชิงเส้นหรือแบบกิ่งมาเชื่อมต่อกันเป็นร่างแหด้วยพันธะเคมี ถ้าพันธะเชื่อมระหว่าง โซ่หลักมีน้อยก็จะยืดหยุ่นได้ แต่ถ้าเชื่อมมากจะแข็งไม่ยืดหยุ่น ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ เชื่อมขวาง เช่น เมลามีน (Melamine) และ XLPE เป็นต้น ลักษณะ โมเลกุล ของพอลิเมอร์แบบ เชื่อมขวาง แสดงในรูปที่ 3.3

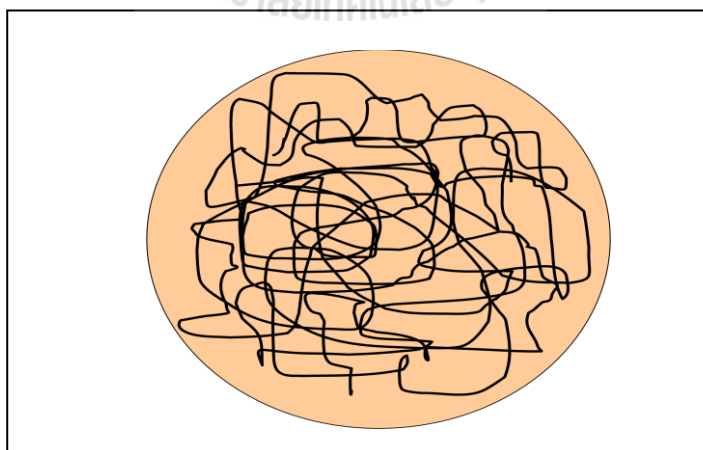


รูปที่ 3.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (ที่มา: eng.sut.ac.th/metal/images/stories/.../2_Polymeric_Materials_v_stud.p...)

3.2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุพอลิเมอร์

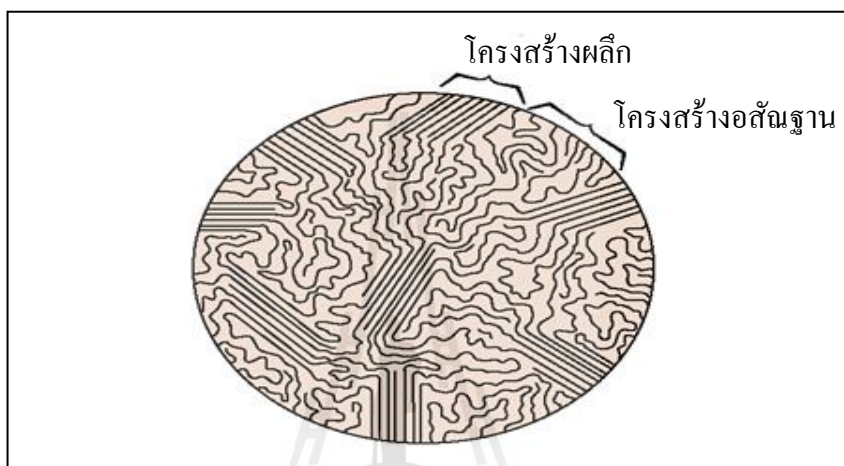
วัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลได้ 2 ประเภท ซึ่งโครงสร้างแต่ละแบบจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกล ของพอลิเมอร์ ลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล แบ่งออกได้ดังนี้

1. โครงสร้างออสถัญฐาน (Amorphous) โครงสร้างโดยรวมเป็นการรวมกันของโมเลกุลสายยาว ไม่มีสมมาตร เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เป็นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่แน่นอนเหมือนของเหลว เมื่อให้ความร้อน จะไม่ปรากฏจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน แต่ค่อย ๆ กลายเป็นของเหลว



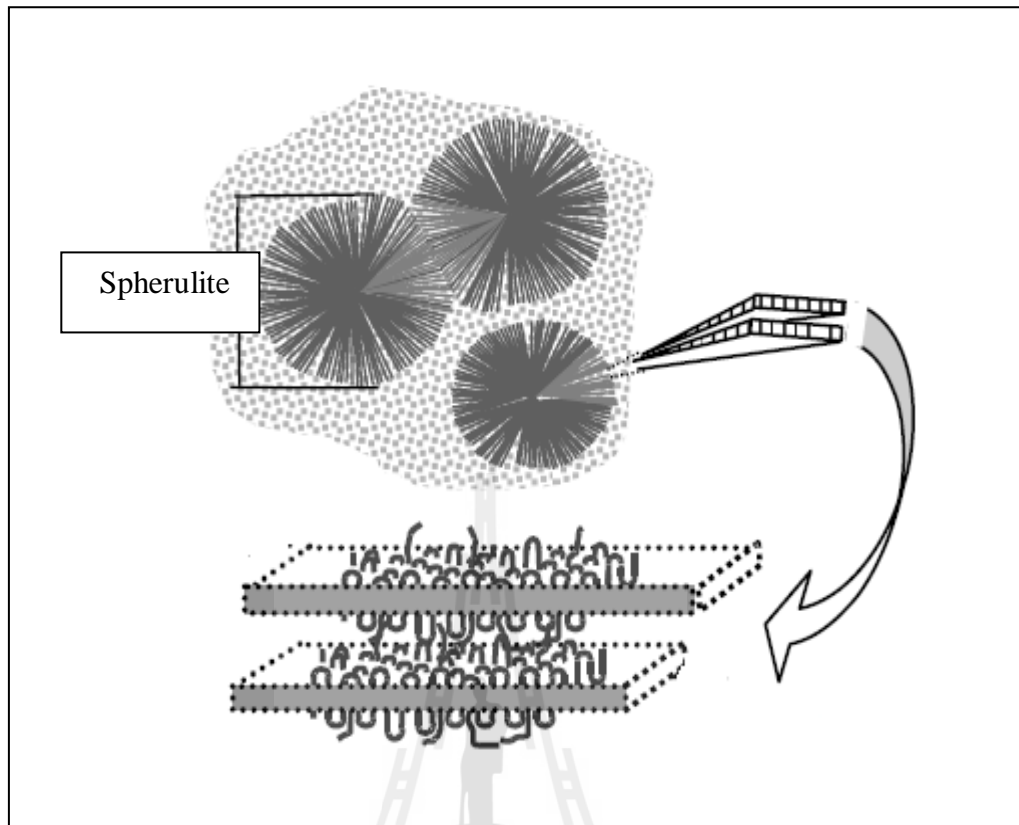
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบอสถัญฐาน (ที่มา: http://www.eng.sut.ac.th/metal/.../4_physical_properties_v_stu.ppt)

2. โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Partial Crystalline) โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โมเลกุลมีการจัดเรียงโดยส่วนหนึ่งเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous Region) และบางส่วนจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline Region) เมื่อให้ความร้อน ความเป็นผลึกจะหายไป กลายเป็นพอลิเมอร์ที่นิ่ม จุดหลอมเหลว คือ อุณหภูมิที่ทำให้ โครงสร้างที่มี การจัดเรียงตัวแบบผลึก หลอมละลายไป



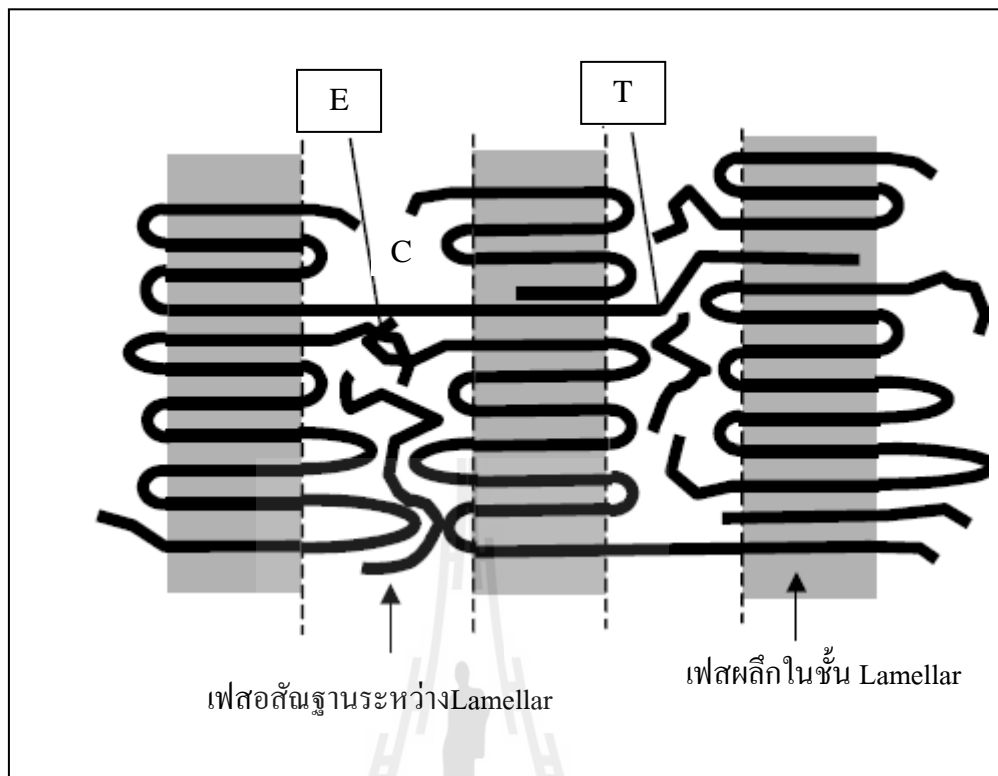
รูปที่ 3.5 โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (ที่มา <http://gertrude-old.case.edu/276/materials/145/14.htm>)

พอลิเมอร์กึ่งผลึกส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็น Spherulite ในแต่ Spherulite จะประกอบไปด้วย Chain-Folded Fibbon ใน Lamellar จำนวนมากที่แผ่ออกจากจากจุดกึ่งกลางดัง แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างกิ่งผลึกของพอลิเมอร์ PE (J. P. Jones et al., 2005)

จากรูปที่ 3.6 แสดงถึงสัณฐานวิทยาของ PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึก มีผลการศึกษาพบว่าใน LDPE มีจำนวนผลึกมากถึง 50% และใน HDPE อาจสูงถึง 90% และใน XLPE มีปริมาณส่วนที่เป็นผลึกน้อยอยู่ประมาณ 40% (P. Carstensen et al., 2005) เมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาของ PE จะสามารถแบ่งลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 สัณฐานวิทยาของ PE บริเวณเฟสอสัณฐานที่อยู่ระหว่างเฟส Lamellar ที่มีโครงสร้างแบบผลึก (J. P. Jones et al., 2005)

จากรูปที่ 3.7 แสดงถึงสัณฐานวิทยาของ PE บริเวณ เฟสอสัณฐานระหว่างเฟส Lamellar จะพบว่าสามารถแบ่งลักษณะได้ดังนี้คือส่วนที่

Entanglements: E คือ เป็นบริเวณที่สายโซ่โพลิเมอร์ที่มีเกี่ยวพันกัน

Ties : T คือ เป็นบริเวณที่สายโซ่โพลิเมอร์เป็นสายยาวจาก Lamellar หนึ่งไปยังอีก Lamellar

Cilia : C คือ เป็นบริเวณที่สายโซ่โพลิเมอร์ที่ไม่มีเกี่ยวพันกับสายโซ่โพลิเมอร์อื่น เป็นส่วนที่ยื่นออกมาจาก Lamellar ที่มีโครงสร้างแบบผลึก

บริเวณที่เป็นอสัณฐานวิทยาจะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากขึ้นอยู่กับ หมู่แทนที่ ขนาดใหญ่ โดยที่พอลิเมอร์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบร่างแหการจัดระเบียบของสายโซ่โพลิเมอร์ ทำได้ยากกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งที่ไม่ซับซ้อน

ปริมาณความเป็นผลึกส่งผลถึงสมบัติทางกลของพ อลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ ที่มีปริมาณความเป็นผลึกมาก จะมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย เนื่องจาก อะตอม สามารถ จะอยู่ชิดกัน ได้มากกว่า พอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย พอลิเมอร์

ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย จะสามารถดัด คโค้ง ได้ดี ปริมาณผลึก (Degree of Crystallinity) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{Crystallinity} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน

ρ_a คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน

ρ_c คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์แบบผลึก

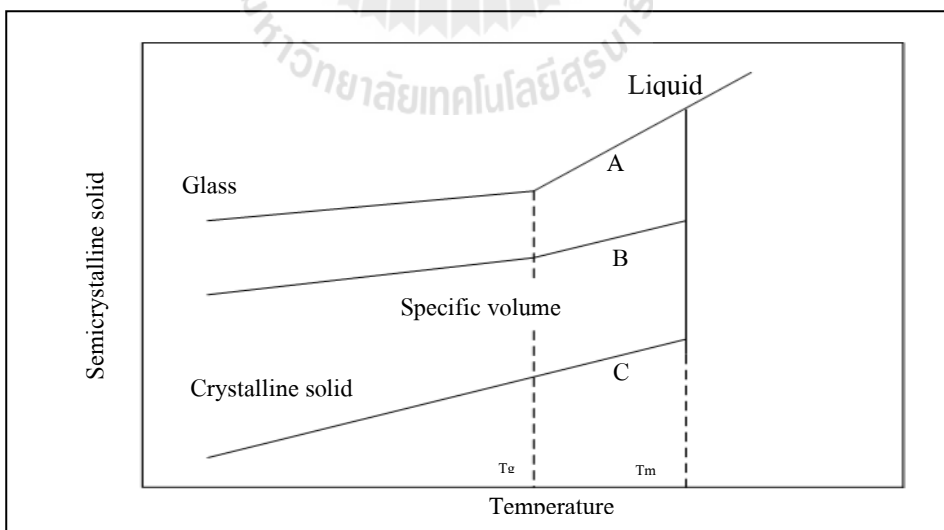
3.3 ปรากฏการณ์การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน ของวัสดุพอลิเมอร์

การหลอมเหลว (Melting) การหลอมเหลวของผลึกวัสดุพอลิเมอร์จะเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงสถานะจากวัสดุของแข็งที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบไปเป็นของไหลหนืด (Viscous liquid) ที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature : T_m) การหลอมเหลวของพอลิเมอร์มีหลายแบบแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์กับลักษณะโครงสร้างผลึก Lamellae นอกจากนี้พฤติกรรมการหลอมเหลวของวัสดุพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าเพิ่มอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุพอลิเมอร์จะสูงขึ้น วัสดุพอลิเมอร์จะตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสมบัติของวัสดุ กล่าวคือการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว อาจเพิ่มความหนาของชั้น Lamellae ได้ ดังนั้นการอบอ่อนวัสดุพอลิเมอร์อาจทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นได้

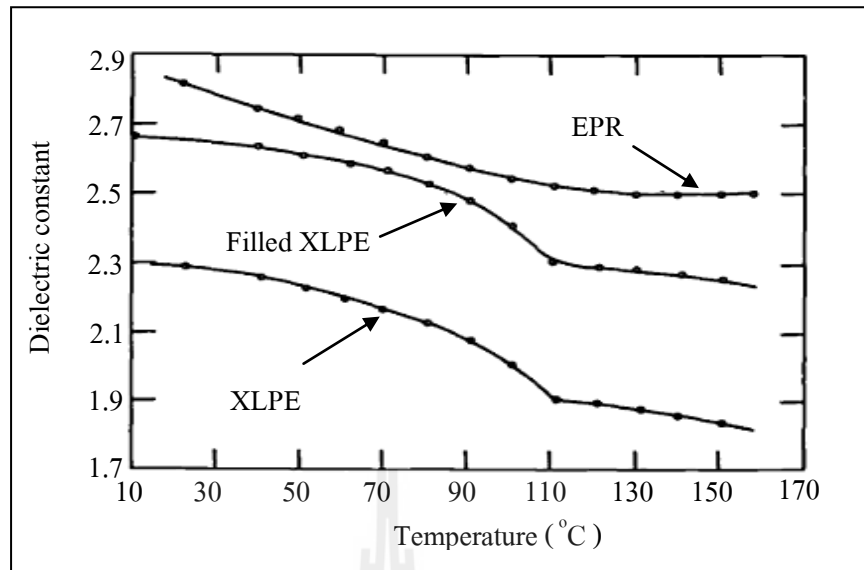
การเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass transition) การเปลี่ยนสภาพนี้จะเกิดในวัสดุพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานที่เกิดจากการเย็นตัวจากสถานะของเหลวเป็นของแข็งโดยไม่เกิดเป็นผลึก นั่นคือช่วงการเย็นตัวของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบในลักษณะสามมิติ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพในช่วงแรกของการเย็นตัวความหนืดจะเพิ่มขึ้น จากนั้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากของเหลวเป็นวัสดุคล้ายยางและกลายเป็นของแข็งในที่สุด อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากยืดหยุ่นคล้ายยางเป็นของแข็ง เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass transition temperature : T_g) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิ T_g จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของแข็งกลับไปเป็นยืดหยุ่น ยิ่งกว่านั้นกรณีวัสดุพอลิเมอร์ ที่สามารถเป็นผลึก ก็อาจเกิดเป็นของแข็งอสัณฐานได้ ถ้าได้รับการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากสถานะของเหลว

อุณหภูมิการหลอมในการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นขีดหย่อน อุณหภูมิการหลอมเหลวกับการเปลี่ยนสภาพนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ โดยนิยามอุณหภูมิทั้งสองข้างต้นเป็นขีดจำกัดอุณหภูมิมินและล่างตามลำดับในการนำวัสดุไปใช้งานโดยเฉพาะวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกและยังมีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุพอลิเมอร์ และวัสดุประกอบพอลิเมอร์ (Polymer-matrix composite) อีกด้วย

อุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของวัสดุพอลิเมอร์จะวัดโดยกรรมวิธีแบบเดียวกันกับวัสดุเซรามิก ด้วยการพล็อตปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เป็นส่วนกลับของความหนาแน่นเทียบกับอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 3.8 โดยกำหนดให้ กราฟ A วัสดุพอลิเมอร์โครงสร้างอสัณฐาน B วัสดุพอลิเมอร์โครงสร้างกึ่งผลึก C วัสดุพอลิเมอร์โครงสร้างแบบผลึก สำหรับวัสดุผลึกมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิหลอมเหลว T_m ส่วนกราฟวัสดุอสัณฐานจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แต่มีการลดลงของความชันเล็กน้อยที่อุณหภูมิ T_g สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึกจะพบทั้งพฤติกรรมการหลอมเหลว T_m และการเปลี่ยนสภาพ T_g ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุผลึกและอสัณฐานตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมที่แสดงในรูปที่ 3.8 จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวหรืออัตราการให้ความร้อน ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงได้ในรูปที่ 3.9 และคุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.8 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ (หนังสือ คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ (หนังสือ Engineering Dielectrics, R. Bartnikas and RM. Eichhorn, 1983)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า

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)	30-50	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
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (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 ²)	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

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า (ต่อ)

วัสดุ	XLPE	PE	PVC	ยาง Butyl	ยาง EP	ยาง CR
ความต้านทานไฟ (Flame resistivity)	NG	NG	E	NG	NG	E
การเปลี่ยนรูปจากความร้อน (Heat deformation)	F	G	G	G	F	G
ค่าความต้านทานบรรยากาศ (Ozone resistivity)	F	F	G	F	E	G
ความคงทนต่อสภาพอากาศ (Weather proof)	G	G	F	F	F	F
ค่าความต้านทานน้ำมัน (Oil resistivity)	E	E	F	NG	NG	G

หมายเหตุ : E : ยอดเยี่ยม

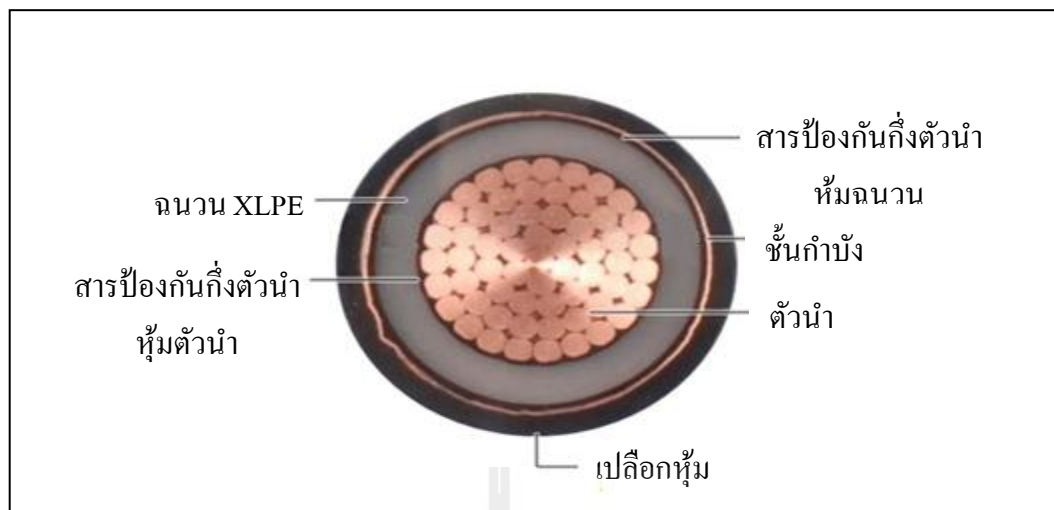
F : ดี

G : พอใช้

NG : ไม่เหมาะแก่การใช้งาน

3.4 สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง ฉนวนพอลิเมอร์

การออกแบบสายเคเบิลส่วนใหญ่ เป็นการออกแบบเพื่อง่ายต่อการใช้งาน และมีการรับประกันสายเคเบิลที่ออกแบบ เพื่อให้สายเคเบิลที่ผลิตขึ้นมา มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นวัสดุทุกชนิดภายในสายเคเบิลจึงต้องมีการตรวจสอบ และกลั่นกรองความน่าเชื่อถือในประสิทธิภาพการทำงาน โครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิลประกอบด้วย ตัวนำไฟฟ้า ฉนวนพอลิเมอร์ ปลายหุ้ม และชั้นกำบังภายนอกและภายในของฉนวนแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิล

3.4.1 วัสดุตัวนำไฟฟ้า

ในปัจจุบัน ทองแดงและอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลกันอย่างแพร่หลายซึ่งการเลือกใช้มีเงื่อนไขแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยและความสะดวกของแต่ละพื้นที่ แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาวัสดุอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีการผลิตที่ง่าย แต่อย่างไรก็ตามเหตุผลหลักที่อะลูมิเนียมถูกใช้อย่างแพร่หลายมากกว่าทองแดงคือ ราคาของทองแดงในปีที่ผ่านมาปรับตัวสูงขึ้นมากกว่าวัสดุอะลูมิเนียมค่อนข้างมาก แม้ว่าอะลูมิเนียมจะมีความนิยมในการใช้เป็นตัวนำไฟฟ้ามากกว่าวัสดุอื่น ๆ แต่คุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียของวัสดุก็มีความแตกต่างกันไป การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า

วัสดุ	ข้อดี	ข้อเสีย
อะลูมิเนียม	มีราคาไม่แพง	นำไฟฟ้าและทนความร้อนได้น้อย
ทองแดง	นำไฟฟ้าได้ดี และทนความร้อนสูง	มีราคาแพง
เงิน	นำไฟฟ้าและทนต่อความร้อนได้ดีกว่าทองแดง	มีราคาแพงมาก
โซเดียม	มีราคาถูกลงมาก	ความปลอดภัยด้านการใช้งาน การบำรุงรักษาต่ำและนำไฟฟ้าต่ำ

ตัวนำไฟฟ้า ในสายเคเบิลสามารถเป็น อะลูมิเนียมหรือทองแดง ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการใช้งาน ตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียว ถูกนำมาใช้เพื่อ เพิ่มความยืดหยุ่นให้ แก่สายเคเบิล และสามารถเพิ่มค่าความเครียด ทางไฟฟ้าได้ สูงสุดถึง 20% ปัญหาสำคัญของตัวนำไฟฟ้า คือความชื้นเกิดจากน้ำในสภาวะแวดล้อม ซึ่งน้ำสามารถ ซึมผ่านเข้า ตัวนำไฟฟ้า ได้อย่างง่ายดาย โดยแทรกซึมผ่านทางช่องว่างระหว่างเกลียวสาย การป้องกันน้ำซึมผ่านตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียว สามารถทำได้โดยการเติมพลาสติก ผสมลงในช่องว่าง ระหว่างสายตีเกลียวหรือนำสาร ดูดซึมน้ำ (Hygroscopic) ไว้ภายในสายตีเกลียววิธีป้องกันอื่น ๆ ที่สามารถป้องกันการซึมของน้ำได้ คือการใช้สารตัวนำแบบแท่งซึ่งไม่มีช่องว่างระหว่างเกลียวทำให้น้ำไม่สามารถไหลซึมผ่านได้

ในมาตรฐาน AWG (American Wire Gauge) ของอเมริกา ตัวนำไฟฟ้าทองแดงแบบแท่งถูกใช้ในขนาดที่ไม่เกิน No.1 AWG และไม่นิยมใช้ตัวนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมแบบแท่งแต่มาตรฐานในยุโรปนิยมใช้ตัวนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมเป็นแบบแท่ง ในแกนของ สายเคเบิล แรงสูงสามารถมีตัวนำไฟฟ้าได้มากกว่า 1 ชนิด แต่จำเป็นต้องคำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าในแต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม เพื่อคำนึงถึงความสัมพันธ์ทางความเครียดทางไฟฟ้า การสร้างรูปแบบของตัวนำไฟฟ้า มีกระบวนการหลายวิธี เช่น การบีบอัด การหลอม การทอ การถลุง การชุบ และการตีเกลียว เป็นต้น

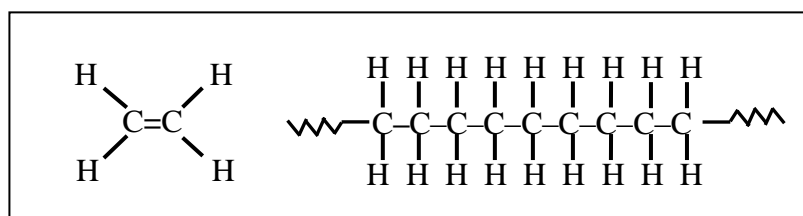
3.4.2 ฉนวนพอลิเมอร์

ฉนวนพอลิเมอร์ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารฉนวน เนื่องด้วยพอลิเมอร์ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับสารฉนวนแบบกระดาษจุ่มน้ำมันและพลาสติกหุ้มตะกั่ว อีกทั้งยังมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ด้วยเหตุนี้สารชนิด พอลิเมอร์ จึงเป็นสารที่มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนสายเคเบิลที่ดี ในหัวข้อนี้จะนำเสนอ ถึงโครงสร้างของวัสดุฉนวนพอลิเมอร์ที่สำคัญ ที่ใช้เป็นฉนวนสายเคเบิลเท่านั้น

1. PVC ถูกผลิตในปี ค.ศ. 1930 ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 ฉนวนพีวีซี เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และเริ่มเข้ามาแทนที่ฉนวนยาง และฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน สาเหตุที่ฉนวนพีวีซี มีความนิยมเพราะฉนวนชนิดนี้ไม่มีผลกระทบในเรื่องความชื้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เปลือกหุ้มโลหะคลุมเนื้อฉนวน มีน้ำหนักเบา เหนียว และมีความต้านทานทางปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งที่ง่าย ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงทำให้โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นำฉนวนพีวีซีมาใช้งานแต่อย่างไรก็ตาม ความนิยมของฉนวนพีวีซี ลดลง เมื่อมีการคิดค้นวัสดุ PE และ XLPE เนื่องจากฉนวน PE เหล่านี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนพีวีซี ดังนั้นในปัจจุบันฉนวน PVC ถูกใช้ในกรณี ที่สายเคเบิลที่มีอัตราค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 1 kV เท่านั้น

2. PE เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมสูงมาตั้งแต่ช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากมีเสถียรภาพ ผลิตง่าย เป็นฉนวนได้ดี และมีความทนทานในสภาวะการทำงานภายใต้

อุณหภูมิปกติ ต่อมาในปี ค.ศ.1933 วัสดุ PE ได้ถูกพัฒนาให้เป็นวัสดุพอลิเมอร์หลักในการทำเป็น
ฉนวนของสายเคเบิลสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูง



รูปที่ 3.11 โครงสร้างพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนจากเอทิลีน

PE จัดเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก จากลักษณะโครงสร้างของ PE เห็นได้ว่า
ส่วนบนและส่วนล่างของสายโซ่เป็นอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว จึงมีความสมมาตรของสายโซ่
จึงจัดอยู่ในสารไม่มีขั้ว (Non-Polar Material) ผลดังกล่าวจึงทำให้ PE มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ
ด้วย ซึ่งน้อยกว่า PVC ประมาณ 300 ถึง 500 เท่า จากผลการวิจัยพบว่า PE มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก
ที่ต่ำ และมีค่า สนามไฟฟ้าเสียหายยับยั้งสูงมาก จึงทำให้ PE เป็นวัสดุที่นำสนใจมากในการใช้
เป็นวัสดุฉนวนสายเคเบิลได้คินวัสดุ PE เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วแบบ กึ่งผลึก และมีโครงสร้าง
แบบ Spherulite

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ PE ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของสายโซ่โมเลกุลเช่น
น้ำหนักโมเลกุล ขอบเขต ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ และโครงสร้างของผลึก PE สามารถแบ่ง
ออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ HDPE LDPE และ XLPE

โดยวัสดุ PE แต่ละประเภทจะถูกนำไปใช้งานแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของ
งาน แต่วัสดุ PE ที่ถูกนำไปใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลอย่างกว้างขวาง รายละเอียดของ PE แบบ
ต่าง ๆ จากกล่าวถึงในลำดับต่อไป

HDPE มีลักษณะเฉพาะคือ มีโครงสร้างเป็นโมเลกุลสายโซ่ยาวขนาดกัน โดยตลอด
โดยมีแขนง หรือการเชื่อมต่อระหว่าง สายโซ่ ที่อยู่ใกล้กันน้อยมาก (เพียงประมาณ 5 จุด ต่อ 1000
อะตอมของคาร์บอน) ความหนาแน่นโมเลกุลจึงสูงและมีความถ่วงจำเพาะสูง มีความผิดพลาดของ
ผลึกน้อย จึงมีค่า สูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ (สารไม่มีขั้ว) และเป็นสารเทอร์โมพลาสติก กที่มีจุด
หลอมเหลวค่อนข้างสูงคือ 130-135 °C จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 90 °C

ข้อเสียของ HDPE คือ เนื่องจากมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากไม่อ่อนตัว ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย เมื่อต้องรับแรงกระทำ เช่น การโค้งงอขณะวางสาย จึงทำให้ในปัจจุบันไม่มีการนำเอา HDPE มาใช้เป็นสารฉนวนเคเบิลใต้ดิน

LDPE มีลักษณะเฉพาะเพิ่มเติมจาก HDPE คือ มีแนวหรือการเชื่อมต่อของโมเลกุลสายโซ่ ที่อยู่ใกล้กันในบริเวณใกล้เคียง กับแขนงหลักมากกว่าของ HDPE (ประมาณ 30 จุดต่อ 1000 อะตอมคาร์บอน) แต่จะไม่มี การเชื่อมต่อของโมเลกุลสายโซ่ ที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นจึงทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับ HDPE แต่ความหนาแน่นของโมเลกุลและความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า (ประมาณ 110°C ถึง 115°C จึงมีความอ่อนตัวมากกว่า และนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือเพียง 70°C เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ

ดังนั้น LDPE จึงมีข้อเสียคือ เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น อุณหภูมิของสายอาจจะสูงถึงจุดหลอมเหลวของมัน ทำให้ LDPE หลอมละลายจนมีลักษณะคล้ายน้ำผึ้ง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ LDPE ไม่สามารถรับน้ำหนักของสายตัวนำที่อยู่ตรงกลางสายเคเบิลได้ ทำให้ตัวนำเลื่อนมาชิดขอบด้านล่าง และสายเคเบิลจะสูญเสียความสม่ำเสมอของระยะฉนวน นั่นคือ เกิดความผิดพลาดทางเรขาคณิตของโครงสร้างสายเคเบิล ทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ สามารถนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ถ้ามีการป้อนแรงดัน อีกครั้งหนึ่งหลังจากการแก้ไขการลัดวงจรแล้ว

XLPE มีลักษณะโครงสร้างคล้าย LDPE คุณสมบัติด้านความหนาแน่นของโมเลกุล ความถ่วงจำเพาะ และจุดหลอมเหลวเหมือนกัน แต่ด้วยวิธีการทางเคมีที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบเชื่อมขวาง (Cross Linking) โมเลกุลสายโซ่ที่ใกล้เคียงกันของ LDPE จะเชื่อมโยงกันทำให้เกิดเป็นลักษณะเป็นโครงร่างแห ดังนั้น LDPE ที่ผ่านขบวนการเชื่อมโยงโมเลกุลสายโซ่แบบเชื่อมขวาง การเชื่อมโยงของโมเลกุลสายโซ่นี้เป็นผลให้ XLPE ไม่หลอมละลายแม้อุณหภูมิสูงถึง 115°C

XLPE มีคุณสมบัติทางฉนวนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE จึงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลที่ดีเท่ากัน แต่สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90°C และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงในปัจจุบัน XLPE เป็นวัสดุฉนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายเคเบิลชนิดฉนวนพอลิเมอร์

3.4.3 วัสดุกำบังแบบสารกึ่งตัวนำ

ในโครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE จะประกอบด้วยแผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำ (Semi Conducting Screens : SC) ซึ่งอยู่ระหว่างด้านนอกและด้านในของเนื้อฉนวน XLPE แผ่นกำบังฉนวนด้านในจะอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวน ส่วนแผ่นกั้นด้านนอกจะอยู่ระหว่างฉนวนและเปลือกหุ้ม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วนบริเวณพื้นผิวระหว่างฉนวนกับตัวนำไฟฟ้าและระหว่างฉนวนกับชั้นป้องกันภายนอก ตัวกำบังแบบสารกึ่งตัวนำ

ยังช่วยให้สนามไฟฟ้ารอบจนวนของสายเคเบิลสม่ำเสมอด้วยการลดเกรเดียนต์ศักย์ไฟฟ้า (Potential Gradient) เหนือสายตัวนำไฟฟ้าตีเกลียวและภายในตัวกำบังโลหะ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเกิดโคโรนา (Corona) บนผิวของตัวนำไฟฟ้าตีเกลียวโดยใช้วิธีให้จนวนระหว่างชั้นนอกแต่ละชั้นในติดกันมากที่สุด อีกทั้งยังสามารถป้องกันอันตรายจากการลัดวงจรอันมีสาเหตุมาจากความร้อนของตัวนำไฟฟ้า

แผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำ ผลิตจากสาร Carbon Black ซึ่งผ่านเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความเข้มข้นของสาร Carbon Black จากแผ่นกำบัง ที่ใช้สำหรับกำบังตัวนำไฟฟ้ากับจนวน จะมีความเข้มข้นอยู่ที่ 30–40% ในกรณีที่แผ่นกำบังจนวนสร้างจากสาร Carbon Black ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าของแผ่นกำบังจนวนลดลง ดังนั้นจึงควรผสม Carbon Black ลงในจนวนที่ค่าระหว่าง 10–100 $\Omega \cdot \text{cm}$ และไม่ควรมากเกิน 104 $\Omega \cdot \text{cm}$

3.4.4 ปลอกหุ้ม

ปลอกหุ้ม (Cover) สามารถใช้พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพอลิเอทิลีน แล้วแต่ลักษณะของการใช้งาน ในกรณีที่เป็นการใช้งานกลางแจ้งมักใช้ปลอกหุ้มพอลิไวนิลคลอไรด์ เพราะเมื่อต่อการตีไฟในขณะที่ปลอกหุ้มพอลิเอทิลีนมักใช้ในงานเดินลอยเนื่องจากทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ปลอกหุ้มพอลิเอทิลีนสามารถใช้ทั้งเดินลอยในอากาศและฝังดิน แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้ฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงและสามารถทนต่อความชื้นได้ดี

3.5 การผลิตสายเคเบิลชั้นพื้นฐาน

การผลิตสายเคเบิลแรงสูงประกอบไปด้วยขั้นตอนมากมาย ความซับซ้อนของขั้นตอนการผลิตขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และชนิดของสายเคเบิลที่ทำการผลิต เช่น สายเคเบิลที่ใช้ฝังใต้ดินหรือสายเคเบิลใต้น้ำ โดยประเภทของสายเคเบิลแรงสูงสามารถแบ่งอย่างกว้าง ๆ ออกเป็น 4 ประเภทตามจนวนที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ประเภทของฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน

ประเภทของฉนวนในสายเคเบิล	คุณลักษณะ
ฉนวนพอลิเมอร์	มี LDPE, HDPE และ XLPE เป็นฉนวน
ฉนวนเทปกระดาษจุ่มในฉนวนเหลว (Paper Tape Form Self-Contained Fluid-Fill Insulation)	มีแผ่นกระดาษหรือแผ่นโพรพิลีนพันหุ้มจุ่มในของเหลวย่อยสลายได้ (เช่น น้ำมันแร่ น้ำมันยาง) เป็นฉนวน
กระดาษจุ่มน้ำมันฉนวน (Mass-Impregnated Non-Draining Insulation : MIND)	เป็นฉนวนกระดาษจุ่มกับ สารประกอบ MIND (พอลิบูทีน มีความหนืดต่ำ) ซึ่งจะไม่ไหลออกมา ณะเกิดความร้อน
ฉนวนแก๊สหรือของเหลวความดันสูง (High Pressured Fluid / Gas Insulation)	เป็นฉนวนกระดาษที่ทำการจุ่มโดยของเหลว (น้ำมัน) หรือเป็นฉนวนแก๊ส (SF ₆) ซึ่งทำการติดตั้งด้วยท่อความดัน Trefoil

เนื้อหาในบทนี้จะมุ่งเน้นในส่วนของการผลิตสายเคเบิลที่มีฉนวน XLPE เท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันฉนวน XLPE มีความนิยมอย่างมาก และใช้ทำเป็นฉนวนในสายเคเบิลมากที่สุด ในกระบวนการผลิตฉนวนสายเคเบิล XLPE แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

3.5.1 ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า

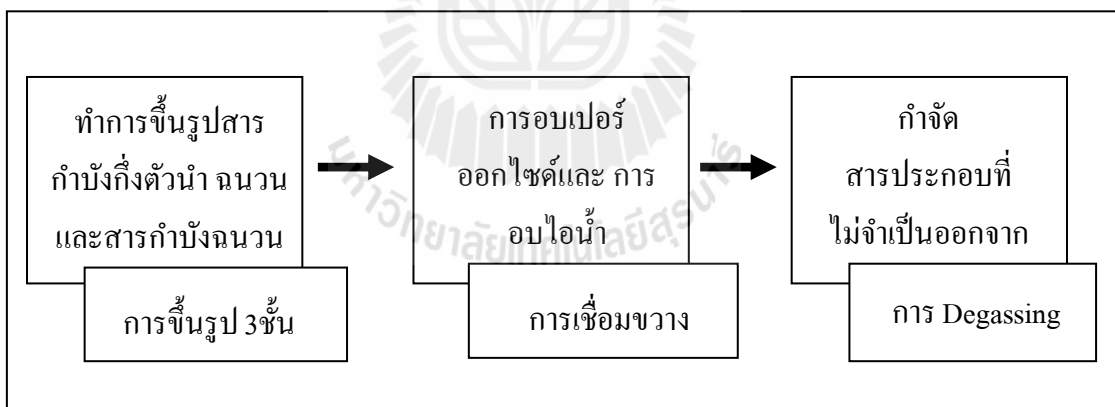
โดยส่วนใหญ่บริษัทที่ผลิตสายเคเบิลแรงสูง มีการผลิตตัวนำไฟฟ้า ของสายเคเบิล 2 วิธี วิธีแรกคือ การใช้ตัวนำไฟฟ้าสำเร็จรูปพร้อม ใช้งานบริษัททางด้านวัสดุ แล้วนำมาพันเกลียว

สร้างเป็นตัวนำของสายเคเบิล วิธีที่ต่อมา คือ ทำการหลอมขึ้นรูปโลหะ (ทองแดงหรืออะลูมิเนียม) ให้ได้ขนาดตัวนำที่ต้องการ แล้วจึงนำไปหุ้มฉนวนเพื่อทำสายเคเบิลต่อไป

สำหรับวิธีการอย่างหลังสามารถสร้างตัวนำของสายเคเบิลได้โดยการใช้กระบวนการบีบอัด เริ่มจากการป้อนแท่งวัสดุเข้าไปในเครื่องรีดเส้น ภายในตัวเครื่องจะมีแม่พิมพ์วางเรียงกันอย่างต่อเนื่องเพื่อบีบอัดแท่งวัสดุ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการใน ระหว่างการบีบอัด จำเป็นต้องใช้สารหล่อเย็น ไทลเวียนตลอดกระบวนการ เพื่อลดความร้อนจากการเสียดสี ระหว่างวัสดุและเครื่องบีบอัด เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการบีบอัดแล้ว วัสดุจะถูกนำไปอบด้วย ใช้น้ำอย่างต่อเนื่องโดยกระบวนการความร้อนเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบดึงนำวัสดุที่ผ่านกระบวนการรีดและอบมาทำการ ตีเกลียวเพื่อขึ้นรูปให้เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยขึ้นรูปให้ตัวนำไฟฟ้า ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ (7 19 และ 37 เส้น)

3.5.2 ขั้นตอนการผลิตแกนกลาง

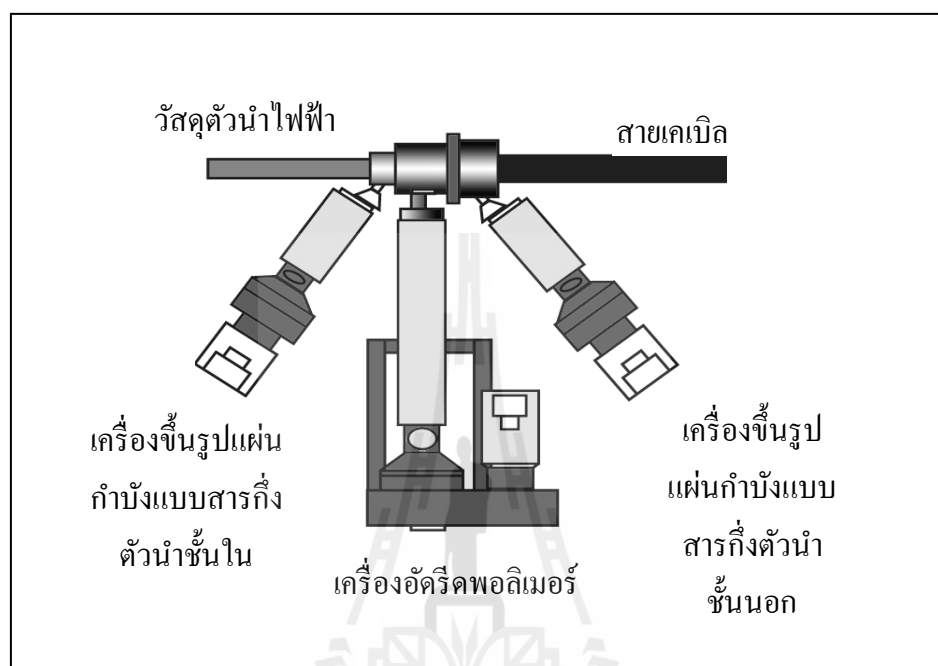
ในการผลิตสายเคเบิลแรงสูง กระบวนการผลิตแกนกลางของสายเคเบิลเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและมีความสำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือระหว่างการใช้งาน ซึ่งการผลิตแกนกลางของสายเคเบิลมีกระบวนการผลิตย่อยทั้งหมด 3 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตแกนกลางของสายเคเบิล

1) กระบวนการขึ้นรูปสามชั้น เป็นกระบวนการขึ้นรูปเริ่มต้นจาก นำเม็ดพอลิเมอร์ และสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า เข้าสู่ช่องใส่สารลำเลียง (Hopper) ของเครื่องอัด สารที่ถูกลำเลียงมาในช่องดังกล่าวจะถูกหลอมละลายและบีบอัดด้วยสกรูหมุนวนที่มีความร้อนสูง จนกระทั่งสารที่ถูกลำเลียงมาหลอมละลายจนหมด แล้วจึงถูกบีบอัดเข้าสู่ปลา ขระบอของ เครื่องอัดขึ้นรูป สิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนที่มากับวัสดุที่ถูกหลอมละลายจะถูกคัดแยกออกโดยเครื่องกรองซึ่งอยู่ระหว่างปลายสุดของ

หัวสกรูที่ทำการหลอมละลายและ ส่วนหัวของตัวบีบอัด โดยในปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปสามชั้น เพื่อให้ตัวนำไฟฟ้า ฉนวนและแผ่นกำบังกึ่งตัวนำ ไฟฟ้ารวมเข้าด้วยกันเป็นแกนกลางของสายเคเบิล มีทั้งหมด 2 วิธี ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.4 และแสดงในรูปที่ 3.14

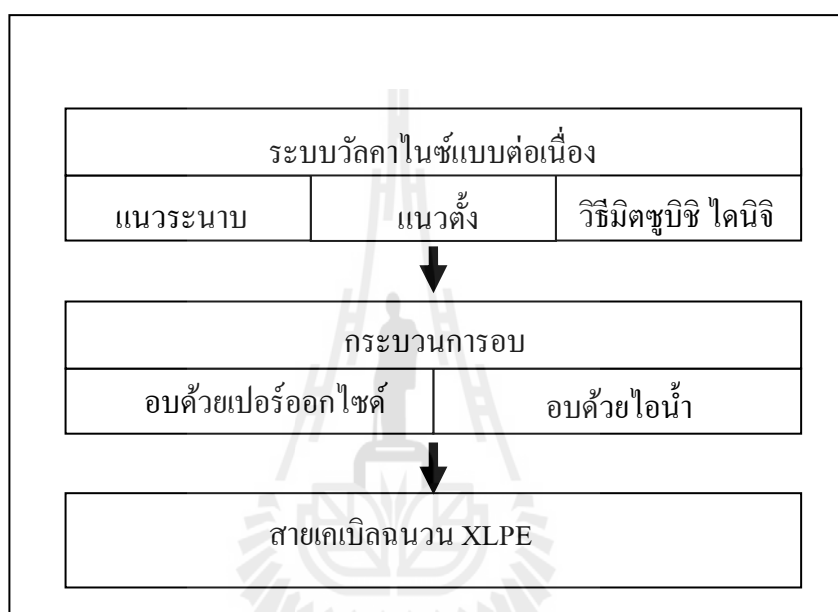


รูปที่ 3.14 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปสายเคเบิล

ตารางที่ 3.4 วิธีการขึ้นรูปสามชั้น

วิธีการ	อธิบาย
วิธีการขึ้นรูปสามชั้น แบบ 1 + 2	ขั้นตอนแรก ทำการขึ้นรูปแผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำชั้นในเพื่อหุ้มตัวนำไฟฟ้าก่อน หลังจากนั้นจึงขึ้นรูปฉนวนและสารกำบังแบบกึ่งตัวนำชั้นนอกพร้อมกัน โดยขึ้นรูปฉนวนต่อจากสารกำบังแบบกึ่งตัวนำชั้นใน
วิธีการขึ้นรูปสามชั้นจริง	ทำการขึ้นรูปทั้ง 3 ชั้นพร้อมกัน โดยเริ่มจากแผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำหุ้มกับตัวนำ ต่อจากนั้นจึงนำฉนวนหุ้ม และท้ายสุดจึงนำแผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำหุ้มฉนวนอีก 1 ชั้น

2) กระบวนการเชื่อมขวาง โดยหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูปแล้วจะได้ สายเคเบิลที่มีแกน กลาง 3 ชั้น วัสดุพอลิเมอร์ ที่อยู่ในสายเคเบิล ยังคงอยู่ในรูปของเทอร์โมพลาสติก ซึ่งเป็นพลาสติกที่ทนความร้อนได้ต่ำ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ทนความร้อนได้สูง จึงต้องมีกระบวนการในการเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมพลาสติกให้เป็นเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ โดยใช้กระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) และกระบวนการอบ (Curing) เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.15

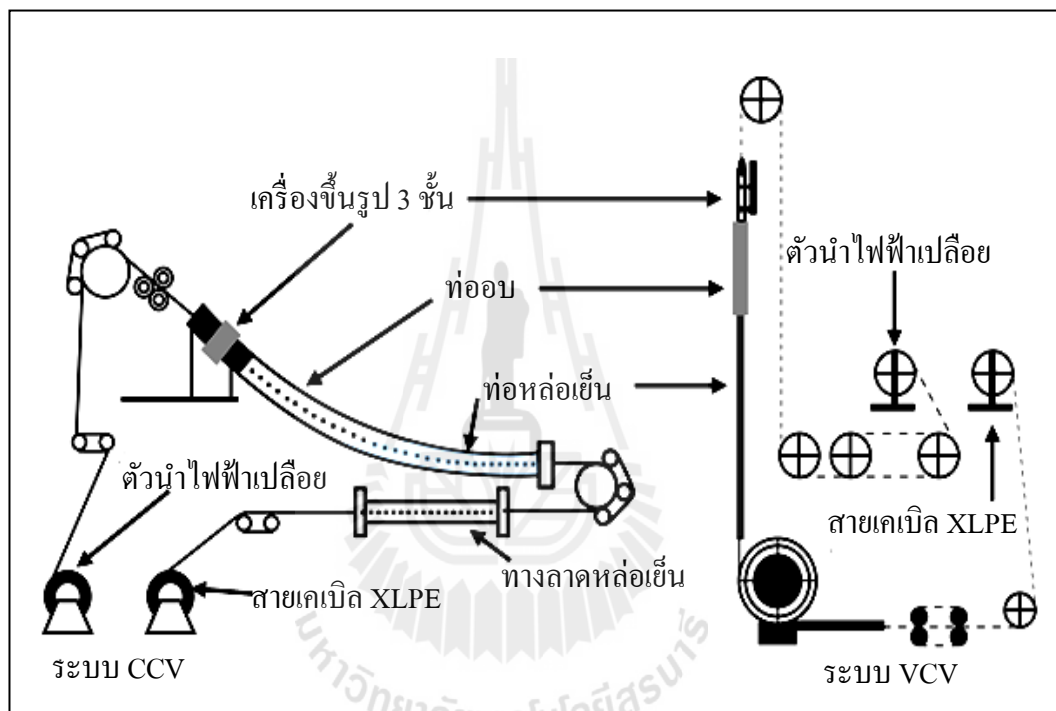


รูปที่ 3.15 เทคนิคการอบและการขึ้นรูปโดยทั่วไปของสายเคเบิล XLPE

ดังนั้นกระบวนการอบจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเปลี่ยนแปลงวัสดุพอลิเมอร์ ให้กลายเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการทนความร้อนสูง กระบวนการดังกล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 3.15

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวระนาบ (Catenary Continuous Vulcanization: CCV) เป็นกระบวนการนำสายเคเบิลฉนวน PE ที่ยังไม่มี การเชื่อมขวาง จากกระบวนการขึ้นรูป 3 ชั้น ลำเลียงผ่านท่อที่ยึดติดกับส่วนหัวของเครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อเริ่มกระบวนการอบด้วยท่อลำเลียงในแนวระนาบ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนความดันสูง (การอบแห้ง) หรือใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 300°C ส่งผ่านท่อลำเลียงสายเคเบิล เมื่อกระบวนการอบด้วยความร้อนให้แก่สายเคเบิลเสร็จสิ้น ท่อลำเลียงจะส่งสายเคเบิลเข้าสู่กระบวนการหล่อเย็น เพื่อลดอุณหภูมิจากการอบของกระบวนการเชื่อมขวาง

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวตั้ง (Vertical Continuous Vulcanization : VCV) เป็นกระบวนการอบของสายเคเบิลฉนวน PE ที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยหลักการทำงาน เช่นเดียวกับกระบวนการ CCV แต่มีความแตกต่างกันที่รูปทรงแบบของท่อลำเลียงที่ใช้ในกระบวนการอบเท่านั้น โดยท่อลำเลียงในการอบเพื่อเชื่อมขวางจะวางในแนวตั้ง จากตารางที่ 3.5 ได้ทำการแสดงข้อดีและข้อเสียของจัดวางท่อลำเลียงสายเคเบิลในแต่ละวิธี การจัดวางท่อลำเลียงของทั้ง 2 วิธีแสดงในรูปที่ 3.16

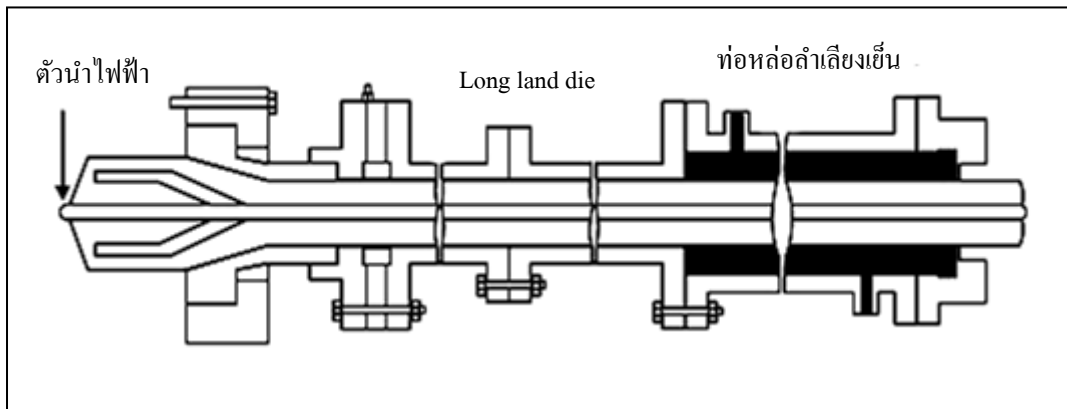


รูปที่ 3.16 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ CCV และ VCV

ตารางที่ 3.5 ข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการอบสายเคเบิลแบบ CCV และ VCV

วิธี	ข้อดี	ข้อด้อย
กระบวนการ CCV	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลาในการอบสายเคเบิลรวดเร็วกว่ากระบวนการ VCV - มีกำลังการผลิตสายเคเบิลสูงกว่ากระบวนการ VCV 	<ul style="list-style-type: none"> - ขนาดของตัวนำไฟฟ้าจำกัดอยู่ที่ 1400 –1600 mm² - ต้องหมั่นดูแลและป้องกันการตกท้องช้างของวัสดุพอลิเมอร์เหลวก่อนเข้าสู่กระบวนการเชื่อมขวาง
กระบวนการ VCV	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เกิดปัญหาการตกท้องช้างของวัสดุพอลิเมอร์เหลวก่อนเข้าสู่กระบวนการเชื่อมขวาง - สายเคเบิลสามารถมีขนาดของตัวนำไฟฟ้ามากกว่า 1600 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาในการก่อสร้างอาคารในแนวตั้งเพื่อการลำเลียงสายเคเบิลมีค่าสูงมาก - ระยะเวลาในการอบสายเคเบิลช้ากว่ากระบวนการ CCV - มีกำลังการผลิตสายเคเบิลต่ำกว่ากระบวนการ CCV

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบ มิทซูบิชิ -ไดนิจิ (Mitsubishi Dainichi Continuous Vulcanisation : MDCV) เป็นระบบที่รู้จักกันดีในชื่อของกระบวนการ Long Land Die ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มบริษัท Mitsubishi และบริษัท Dainichi ในปี ค.ศ. 1970 กระบวนการนี้มีเครื่องอัดรีดขนาดเล็กและวางอยู่ในแนวนอนแสดงในรูปที่ 3.17 กระบวนการอบจะกระทำผ่านท่อลำเลียงสายเคเบิล โดยมีความร้อนอยู่ภายในตัวท่อจากการอัดรีดของตัวอัดรีด ซึ่งการอบจะให้ความร้อนผ่านท่อลำเลียง ทำให้ประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ในโตรเจน หรือไอน้ำ โดยทั่วไประบบนี้ใช้ในการผลิตสายเคเบิลแรงสูง (High Voltage Cables) และแรงสูงพิเศษ (Extra High Voltage Cables)



รูปที่ 3.17 แผนผังการทำงานของระบบ MDCV

3) ขั้นตอน Degassing เป็นการทำให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพการทำงานของฉนวน XLPE ที่ได้จากกระบวนการอบเชื่อมขวางโดยวิธีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูงหรือสายเคเบิลแรงสูงพิเศษ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการขจัดหรือลดสารประกอบบางชนิดในฉนวน XLPE ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเชื่อมขวาง มิฉะนั้นจะทำให้เกิด ปัญหาทางโครงสร้างของฉนวน XLPE และส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนได้ สารประกอบบางชนิดที่ต้องขจัดออกจากเนื้อฉนวนได้แก่ อะซิโตนฟีนอล เมทิลสไตรีน คิวมิลอัลทอกซอล และ มีเทน เป็นต้น ในวงการอุตสาหกรรมทั่วไปจะขจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการในสายเคเบิล โดยใช้เก็บสายเคเบิลไว้ระยะหนึ่ง (ประมาณ 7 วัน) ก่อนทำการทดสอบประจำ (Routine Testing)

3.5.3 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลเสร็จสมบูรณ์

เมื่อสายเคเบิลผ่านกระบวนการขจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการแล้ว สายเคเบิลทั่วไปจะ รอเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ แต่ในกรณีของสายเคเบิลได้นำจะถูกนำไปเพิ่มเกราะหุ้มป้องกันอีกชั้น เพื่อป้องกันสายเคเบิลจากความชื้นและการกัดกร่อนจากน้ำ

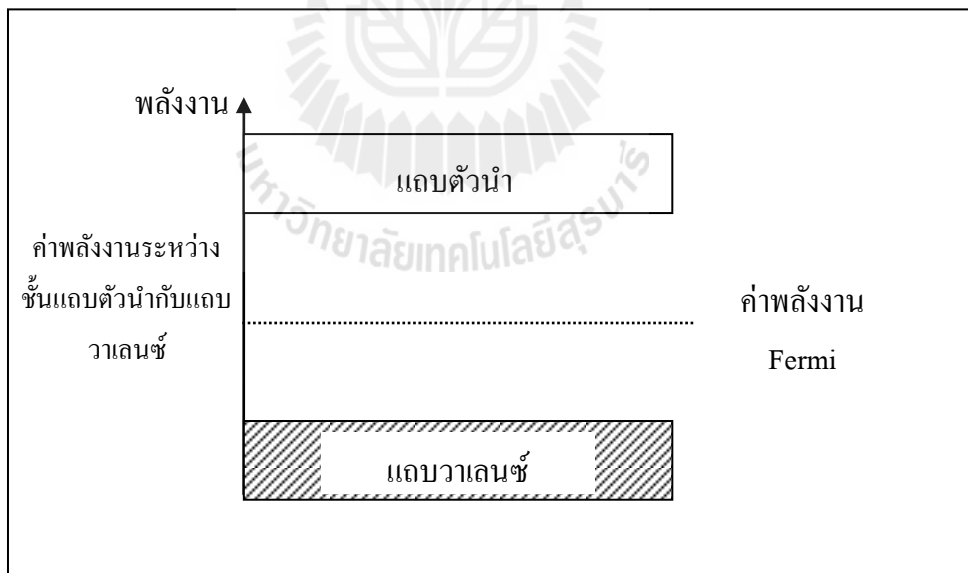
3.5.4 ขั้นตอนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ

เมื่อผ่านทุกกระบวนการการผลิตแล้ว สายเคเบิลจะถูกทำการตรวจสอบคุณภาพ เพื่อให้มีความแน่ใจ ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการออกแบบ และผลิต ขึ้น ตอบสนองต่อ ความต้องการของลูกค้าหรือไม่ การตรวจสอบคุณภาพของสายเคเบิลโดยทั่วไปจะทำการตรวจสอบ คุณภาพของตัวนำไฟฟ้า ขนาดของสายและฉนวน การเกิดดีสชาร์จบางส่วน โพรงหรือช่องว่างในเนื้อฉนวน สิ่งเจือปนในเนื้อฉนวน และการถลอกหรือโปนออกของเนื้อฉนวน โดยมีการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด ตัวอย่างเช่น IEC ANSI/ICEA JEC และ CENELEC เป็นต้น

3.6 ประจุค้างและผลของประจุค้างต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในฉนวน

ประจุค้าง คือการตกค้างของประจุในเนื้อฉนวน เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างกันของอัตราการคายประจุกับอัตราการเก็บสะสมของประจุ การเก็บสะสมประจุจะครอบคลุมประจุที่ไม่สามารถเคลื่อนข้ามผ่านวัสดุฉนวน ส่งผลให้วัสดุฉนวนเกิดความเครียดทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ประจุค้างในฉนวนแบ่งออกเป็น ประจุลบ และ ประจุบวก ดังที่ได้กล่าวไว้ XLPE เป็นสารไม่มีขั้ว และเมื่อพิจารณา XLPE ที่เป็นสารบริสุทธิ์ไม่มีสารอื่นเจือปน ดังนั้น ตัวพาประจุที่สามารถเคลื่อนที่ได้จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ จึงไม่มีไอออนที่เกิดจากสิ่งเจือปน ด้วยเหตุนี้กลไกการนำไฟฟ้าและกลไกการสูญเสียจึงเกิดขึ้นเนื่องจาก ขบวนการอิเล็กตรอน (Electronic Process) เท่านั้น ขบวนการอิเล็กตรอน หมายถึง ขบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในสาร ไดอิเล็กทริกเนื่องจากสาเหตุของตัวพาประจุที่เป็นอิเล็กตรอนเท่านั้น จึงทำให้ประจุค้างส่วนใหญ่เป็นประจุลบ

การเกิดขบวนการอิเล็กตรอน สามารถอธิบายด้วยหลักการของแผนภาพแถบพลังงาน (Energy Band) แถบพลังงานแบ่งออก 3 ส่วน คือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) เป็นแถบที่มีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อยู่ แถบนำกระแส และแถบช่องว่างระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.18

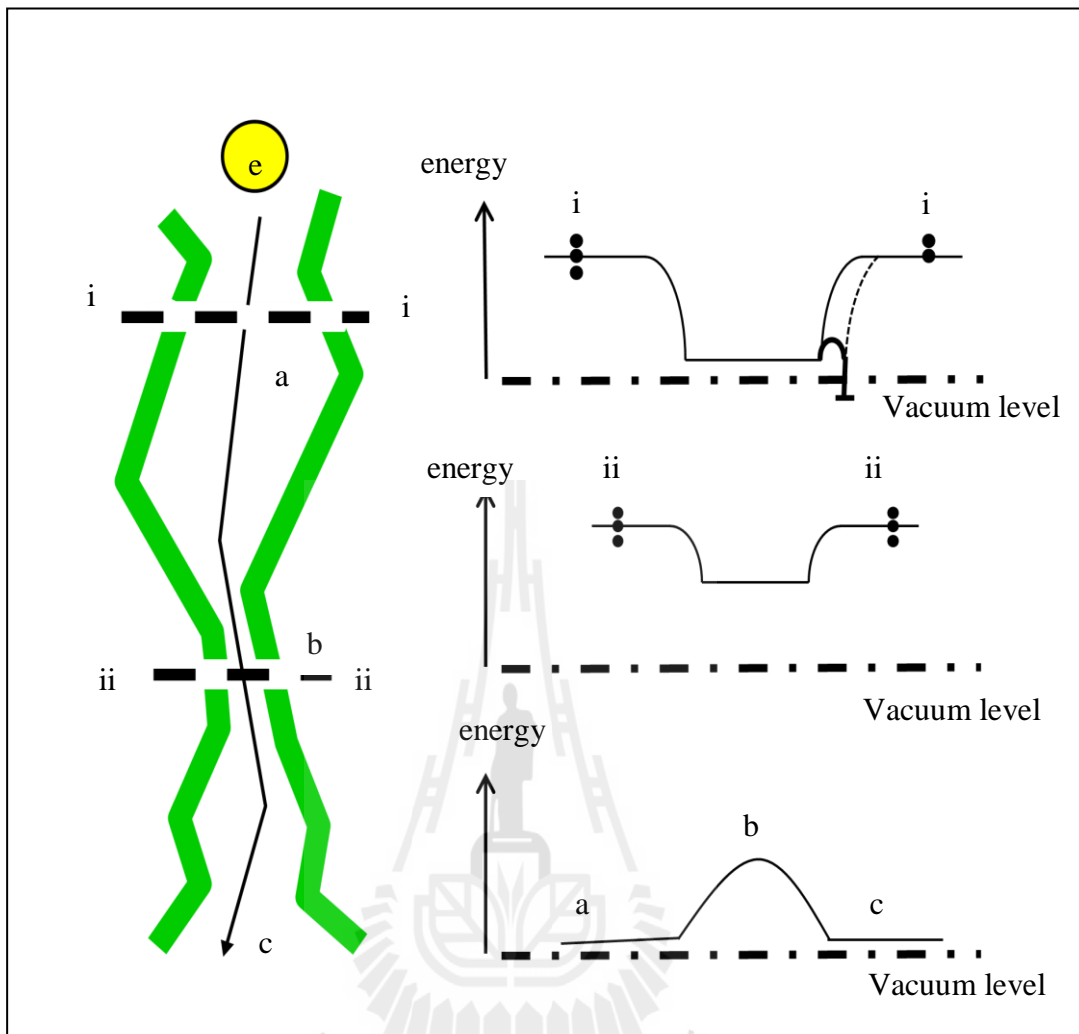


รูปที่ 3.18 แผนภาพแถบพลังงาน

อิเล็กตรอน จะอยู่ในแถบวาเลนซ์ เป็นอิเล็กตรอนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ เป็นอิสระได้ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากภายนอกที่มีขนาดพลังงานที่สูงมาก จะทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นสามารถเคลื่อนที่เป็นอิสระ จนถึงระดับแถบนำกระแส จนทำให้เกิดการ นำกระแสไฟฟ้าได้ คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดีสามารถอธิบายได้ด้วยแถบพลังงานเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าวัสดุฉนวนมีคุณสมบัติแถบช่องว่างพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำกระแสที่มีพลังงานที่สูงจะส่งผลทำให้วัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติฉนวนที่ดี นอกจากนี้ปัจจัยที่กำหนดคุณสมบัติของวัสดุฉนวน มีอยู่ 3 ปัจจัยคือ (1) โครงสร้างทางเคมีทางเคมีของหน่วยพอลิเมอร์ที่ซ้ำกันเป็นสายโซ่โมเลกุล (2) ลักษณะความยาวและโครงสร้างเชิงมหภาคของโมเลกุล สิ่งปนเปื้อนโดยความบกพร่องและลักษณะโครงสร้างเชิงมหภาค ทำให้รู้ถึงลักษณะที่เป็นโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์ (ว่าเป็นแบบโครงสร้างผลึก โครงสร้างกึ่งผลึก) ทำให้พอลิเมอร์ มีคุณสมบัติแตกต่างกัน (3) เงื่อนไขที่ใช้เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำ ปัจจัยนี้ถูกอ้างถึงการปรับปรุงคุณสมบัติ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคุณสมบัติที่เป็นหลุม โดยเกิดเฉพาะส่วนที่ภายในของช่องว่างและเป็นส่วนที่ช่วยทำให้เกิดการสะสมของประจุค้าง

3.6.1 สัณฐานวิทยาและการโอนย้ายประจุ

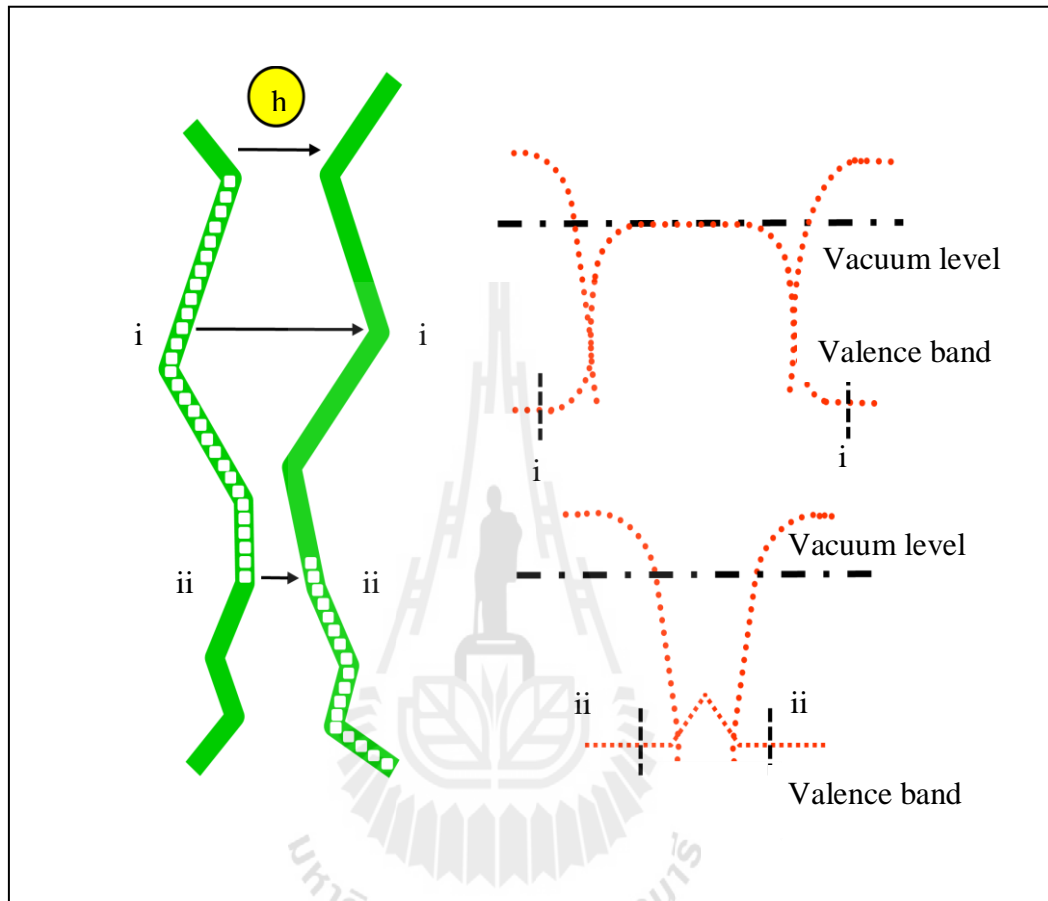
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัณฐานวิทยาและการกระจายสนามไฟฟ้าของวัสดุ XLPE จำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอิทธิพลของเนื้อสารที่มีการเคลื่อนที่ของประจุ เนื่องจากที่สนามไฟฟ้าสูง ๆ ในช่วงเวลาก่อนเกิดเบรกดาวน์ ส่งผลให้ฉนวน ได้รับผลกระทบ จากความเครียดทางกล และส่งผลไปยังโครงสร้าง ของพอลิเมอร์ เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการเกิดประจุค้าง จำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุ



รูปที่ 3.19 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างสายโซ่โมเลกุล (J. P. Jones et al., 2005)

การเคลื่อนที่ที่สูญเสียพลังงานของประจุระหว่างช่องว่างของสายโซ่โมเลกุล อาจทำให้เกิดการตกค้างของประจุ เนื่องจากลักษณะช่องว่างของสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดลักษณะของหลุมพลังงานที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยที่ตำแหน่ง (i-i) เกิดลักษณะของหลุมพลังงานที่ลึกกว่าลักษณะหลุมพลังงานที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (ii-ii) หลุมพลังงานดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการเกิดประจุค้าง โดยที่หลุมพลังงานที่ตื้นกว่า ประจุจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับหลุมพลังงานที่ลึกกว่า ทำให้เกิดประจุค้างได้ยากกว่าหลุมพลังงานที่ลึก ส่วนการถ่ายโอนของประจุระหว่างสายโซ่โมเลกุล จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ที่ตำแหน่ง (ii-ii) ประจุจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ (i-i) เนื่องจากที่ตำแหน่ง (ii-ii) มีลักษณะของสายโซ่โมเลกุลที่แนบชิดทำให้เกิดลักษณะของหลุม

พลังงานที่มีพลังงานน้อย ซึ่งประจุสามารถเคลื่อนที่ผ่านหลุมพลังงานได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่ง (i-i)



รูปที่ 3.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุข้ามสายโซ่โพลีเมอร์ (J. P. Jones et al., 2005)

3.6.2 กลไกการเกิดประจุค้างของฉนวนพอลิเมอร์

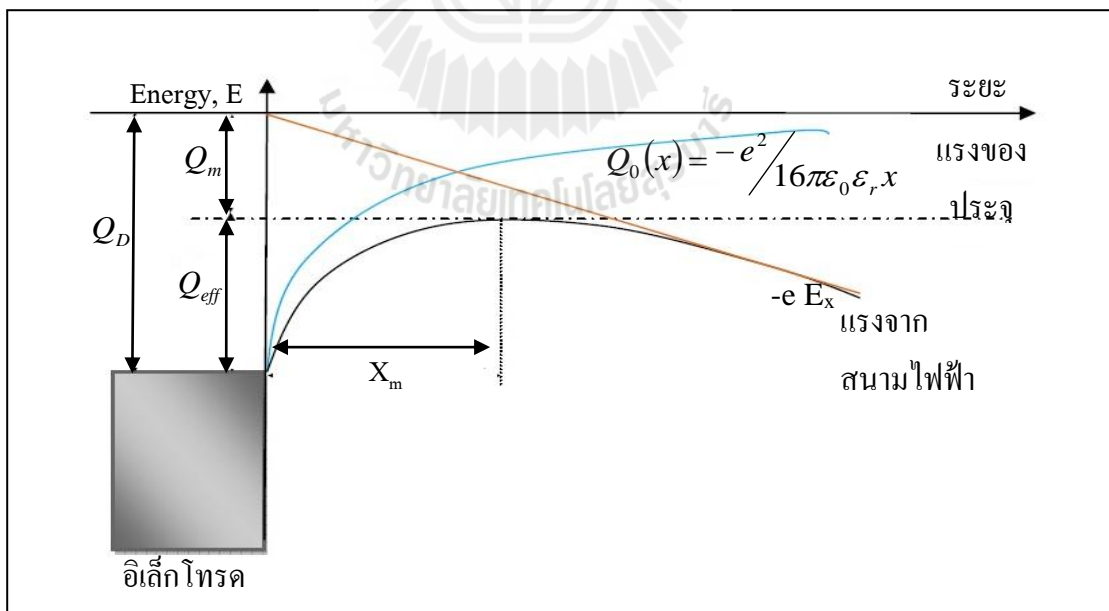
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของฉนวน XLPE เกิดขึ้นเนื่องจากขบวนการอิเล็กตรอน ประจุค้างที่เกิดในฉนวน XLPE จึงเป็นประจุค้างชั่วคราวเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงที่มาของอิเล็กตรอนในฉนวน XLPE ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นได้จากขบวนการหลาย ๆ ขบวนการดังจะได้อธิบายต่อไป

1. การฉีดประจุจากอิเล็กโทรดเข้าสู่ฉนวน คือปรากฏการณ์ที่ประจุรวมไปถึงอิเล็กตรอนอิสระถูกฉีด (Inject) เข้าไปในวัสดุฉนวน เป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยของ

สนามไฟฟ้า ณ บริเวณนั้น ประจุดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรด และวัสดุฉนวน ขบวนการนี้ของประจุสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขบวนการดังนี้

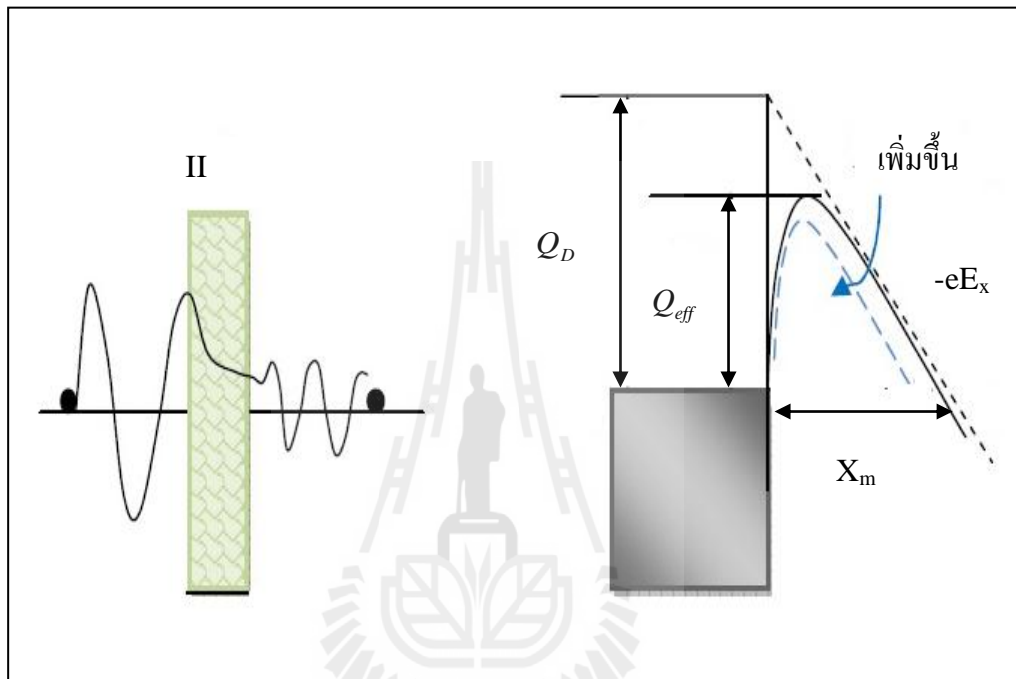
- เกิดจากการแพร่อิเล็กตรอน เมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรดโลหะเมื่อฉนวนแข็งใดก็ตามในที่นี้ เมื่อพอลิเมอร์สัมผัสกับผิวอิเล็กโทรดโลหะจะเกิดการรักษาสสมดุลแบบเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) กล่าวคือ จะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรดโลหะเข้าสู่เนื้อฉนวนจนกระทั่ง Fermi level ของสารทั้งสองบริเวณจุดสัมผัสอยู่ในระดับเดียวกัน การถ่ายเทอิเล็กตรอนจึงหยุดลง นั่นหมายถึง อิเล็กตรอนอิสระจำนวนหนึ่งถูกฉีดเข้าสู่เนื้อฉนวน ขบวนการนี้เรียกว่า ขบวนการการแพร่อิเล็กตรอน (Electron Diffusion Processes)

- เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าและความร้อนเมื่อฉนวน XLPE อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าและความร้อน สนามไฟฟ้าและความร้อนจะทำให้อะตอมของอิเล็กโทรดโลหะถูกกระตุ้น (Excitation) และเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่า เวก์ฟังก์ชันเองโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรดก็จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกฉีดเข้าไปในเนื้อฉนวนได้เนื่องจากความร้อน โดยได้รับการผลักดันจากสนามไฟฟ้า การฉีดอิเล็กตรอนชนิดนี้เรียกว่า การฉีดด้วยความร้อนโดยมีสนามไฟฟ้าช่วย (Field Assisted Thermionic Emission) หรือ การฉีดแบบบริชาร์ดสัน-ช็อดทกี (Richardson-Schottky -Injection) การฉีดแบบบริชาร์ดสัน-ช็อดทกี จะช่วยลดค่าเวก์ฟังก์ชัน



รูปที่ 3.21 การลดลงเวก์ฟังก์ชันเนื่องจากผลของการฉีดประจุแบบบริชาร์ดสัน-ช็อดทกี

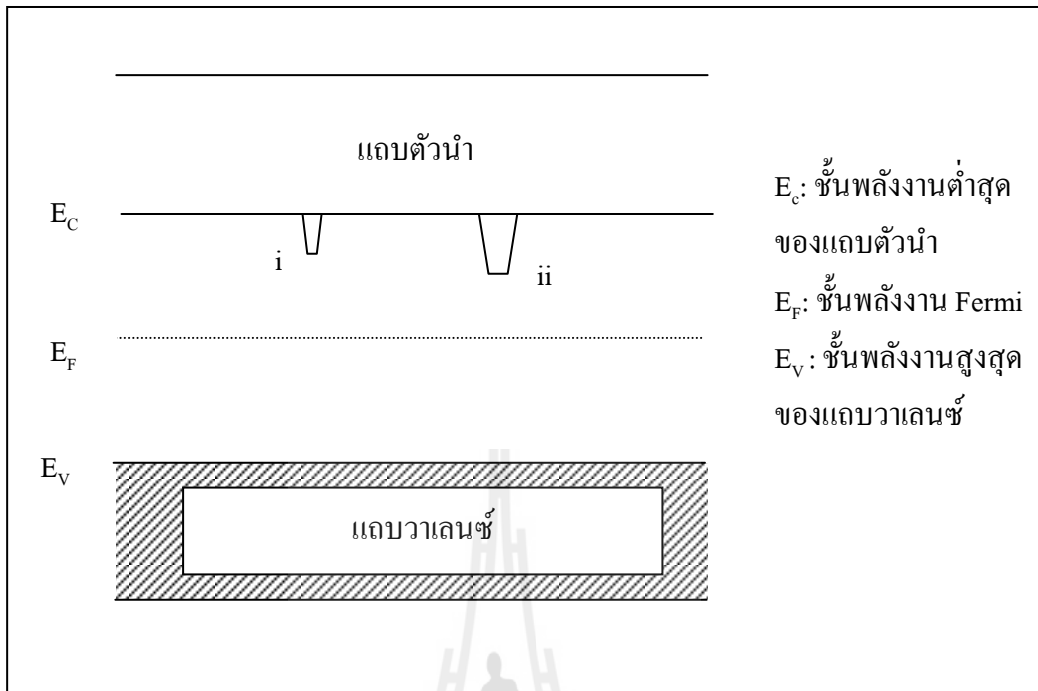
- เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนสามารถถูกฉีดเข้าไปในเนื้อฉนวนได้ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าอย่างเดียว เรียก กระบวนการนี้ว่า การฉีดอิเล็กตรอนแบบฟาวเลอร์-นอร์ดไฮม์ (Fowler-Nordheim Injection) ถ้าสนามไฟฟ้าที่สูง จะทำให้ เวิร์กฟังก์ชัน ลดลง ความเครียดสนามไฟฟ้าจะกลายเป็นกำแพงบาง ๆ เพื่อให้เกิด Quantum-mechanical Tunneling



รูปที่ 3.22 การฉีดประจุแบบการฉีดอิเล็กตรอนแบบฟาวเลอร์-นอร์ดไฮม์

รูปที่ 3.22 ให้การแสดงผลของแผนผังของอุโมงค์ควอนตัมอุโมงค์ พลังงานของ คลื่นจรจะลดน้อยลงเมื่อผ่านบริเวณ II ในรูปที่ 3.22 ผลของการฉีดอิเล็กตรอนแบบฟาวเลอร์ -นอร์ดไฮม์ จะช่วยลดเวิร์กฟังก์ชันทำให้อิเล็กตรอนลงเข้าไปในเนื้อฉนวนได้

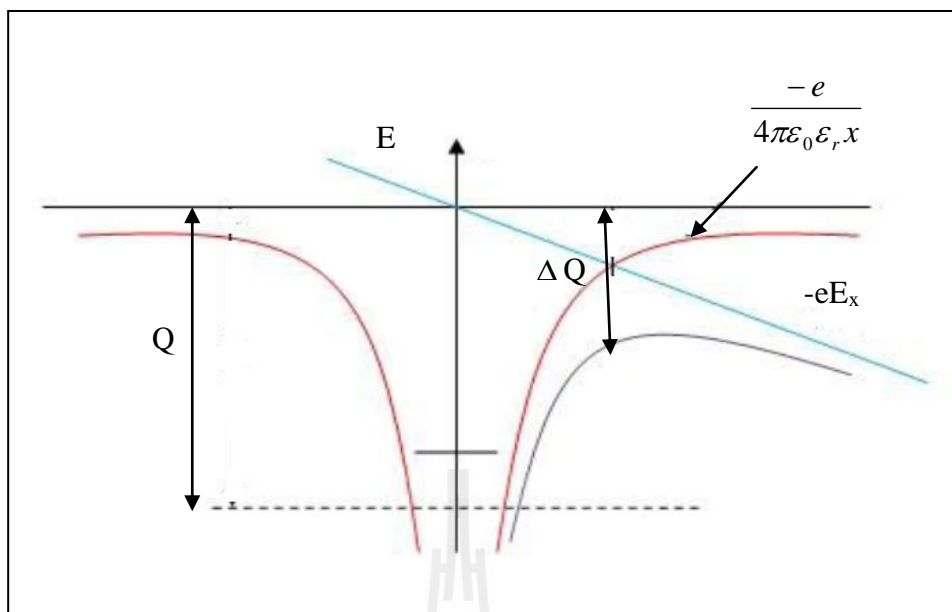
2. การหลุดของอิเล็กตรอนภายในเนื้อฉนวน นอกเหนือจากประจุค้างที่เกิดขึ้นการฉีดของประจุ ยังสามารถเกิดภายในเนื้อฉนวน เนื้อฉนวนที่ไม่บริสุทธิ์มีสารตกค้าง เช่น สารตกค้างจากกระบวนการเชื่อมขวางที่ไม่ดี หรือจากสารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุฉนวน เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอกให้กับวัสดุฉนวน สารตกค้างหรือสิ่งปนเปื้อนภายในเนื้อฉนวนจะทำให้เกิดหลุมพลังงาน ก่อให้เกิดการตกค้างของประจุ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แผนภาพกับดักพลังงานภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากสารตกค้าง

พิจารณารูปที่ 3.23 เนื้อฉนวนที่ไม่บริสุทธิ์ก่อให้เกิด กับดัก พลังงาน (i และ ii) กับดักพลังงานเหล่านี้ จะสามารถดักทั้ง ประจุบวกและประจุลบ โดยขึ้นอยู่กับขนาดพลังงานของ กับดัก กับดักที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานของประจุก่อให้เกิดการตกค้างของประจุทำให้เกิด ประจุค้างภายในเนื้อฉนวน กับดักพลังงานที่มีพลังงานมากลักษณะของกับดักพลังงานจะลึกกว่ากับ ดักพลังงานที่มีพลังงานน้อย จากรูปตำแหน่ง i มีขนาดของหลุมพลังงานที่น้อยกว่าตำแหน่ง ii ทำให้โอกาสที่จะเกิดการตกค้างของประจุที่ตำแหน่ง ii มีมากกว่าที่ตำแหน่ง i

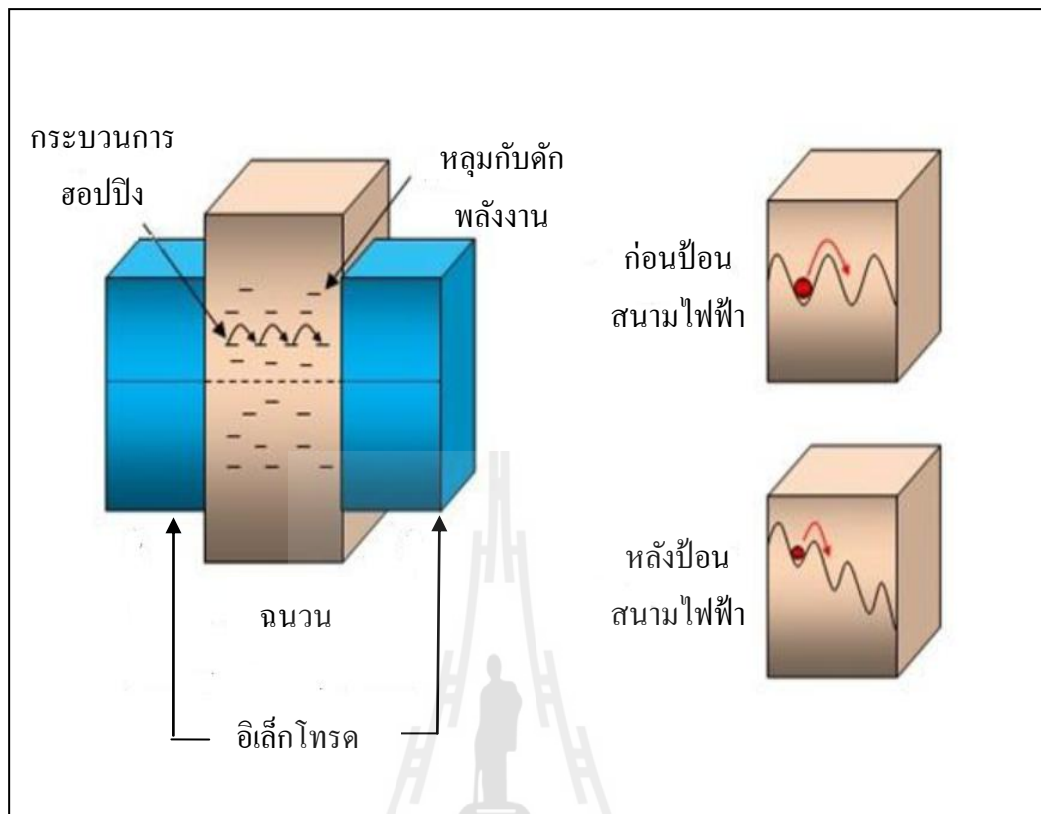
- กลไกพูล-แฟรงเคิล นอกจากกระบวนการฉีดประจุจากอิเล็กโทรด ภายในเนื้อ ฉนวนเองยังสามารถเกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นได้ เช่นกันด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสูง จะสามารถ กระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดจากตัวให้ (Donor) ได้ และอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นเนื่องจาก กระบวนการนี้จะเคลื่อน ที่เข้าหาอานอดและทิ้งไว้แต่ประจุค้างขั้วบวก กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ ฉนวนอยู่ภายใต้ภาระทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน ๆ กระบวนการ นี้เรียกว่า อิทธิพลของ พูล-แฟรงเคิล (Poole-Frankel Effect)



รูปที่ 3.24 การลดลงเวริกฟังก์ชันเนื่องจากผลของกระบวนการพอล-แฟรงเคิล

กลไกพอล-แฟรงเคิล เป็นกระบวนการที่เกิดจากการสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งมีหลักการเหมือนกระบวนการ การฉีดแบบริชาร์ดสัน -ซีอติ กล่าวคือ จะช่วยลดค่า เวริกฟังก์ชันแต่ กลไกพอล-แฟรงเคิล จะสามารถลดค่าเวริกฟังก์ชันมากกว่าเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ กระบวนการ การฉีดแบบริชาร์ดสัน -ซีอติ นอกจากนี้กลไกพอล-แฟรงเคิล เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน

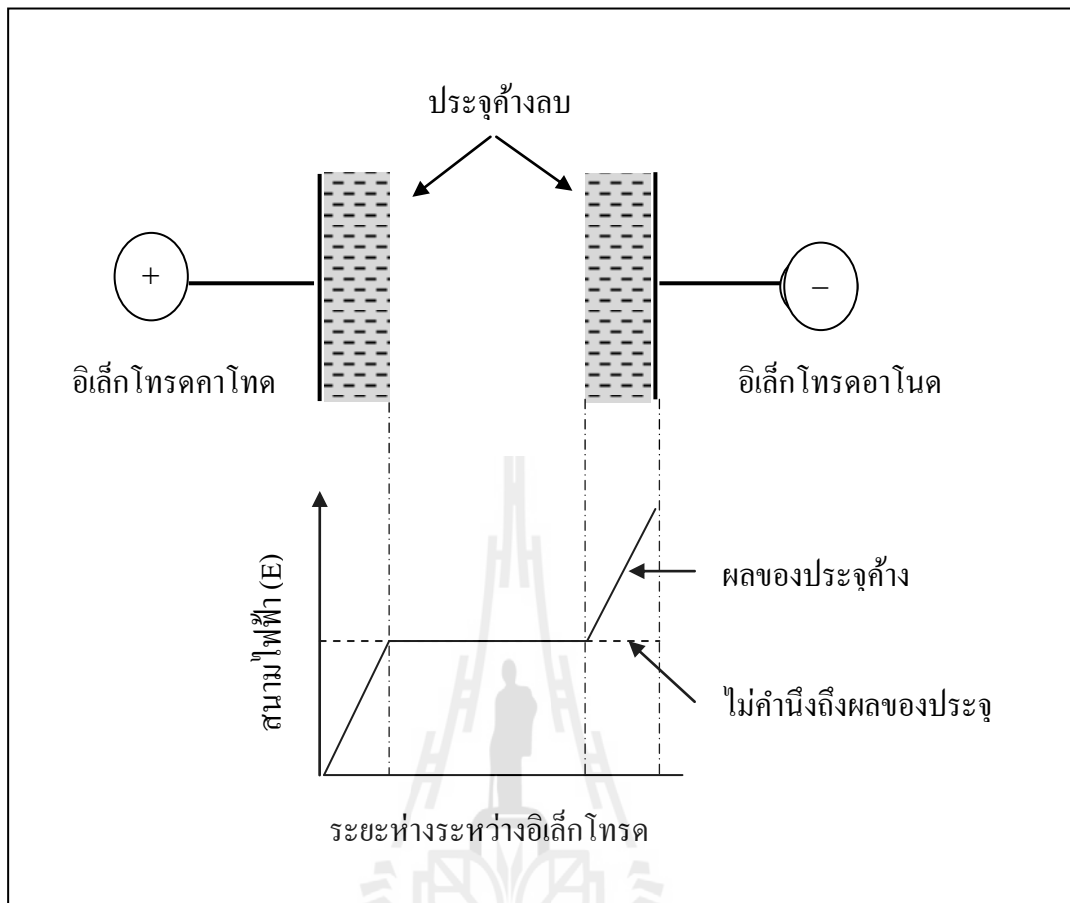
- ฮอปปีง (Hopping) จากสมมุติฐานที่ว่าภายในเนื้อฉนวนประกอบไปด้วยหลุมกับดักพลังงานที่แตกต่างกัน หลุมกับดักพลังงานจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยที่หลุมกับดักพลังงานที่มีความลึกหรือมีค่าพลังงานที่มากจะทำให้มีโอกาสของประจุค้างที่จะตกค้างอยู่ภายในหลุมกับดักพลังงานดังกล่าวมากกว่าหลุมกับดักพลังงานที่ตื้นกว่า ฮอปปีงคือกระบวนการเปลี่ยนแปลงของหลุมกับดักพลังงานเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกให้กับวัสดุฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กลไกของขุดเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

3.6.3 ผลของประจุต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้งานของฉนวนที่สำคัญประการหนึ่ง ก็คือ สนามไฟฟ้า ซึ่งสนามไฟฟ้าเป็นปริมาณที่ใช้บรรยายการที่ประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคมีประจุ ภายในบริเวณ โดยรอบ โดยที่ประจุทุกตัวล้วนแต่เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า เช่นเดียวกันประจุ ค้างก็ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในเนื้อฉนวนได้ ประจุค้างที่ตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวนจะส่งผลทำให้เกิดลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม (สรวิชัย, ศลีสวรรค์, การเกิดเบรกดาวน์ในสาย เเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์เนื่องจากประจุค้างและวอเตอร์รี่) ดังแสดงในรูปที่ 3.26

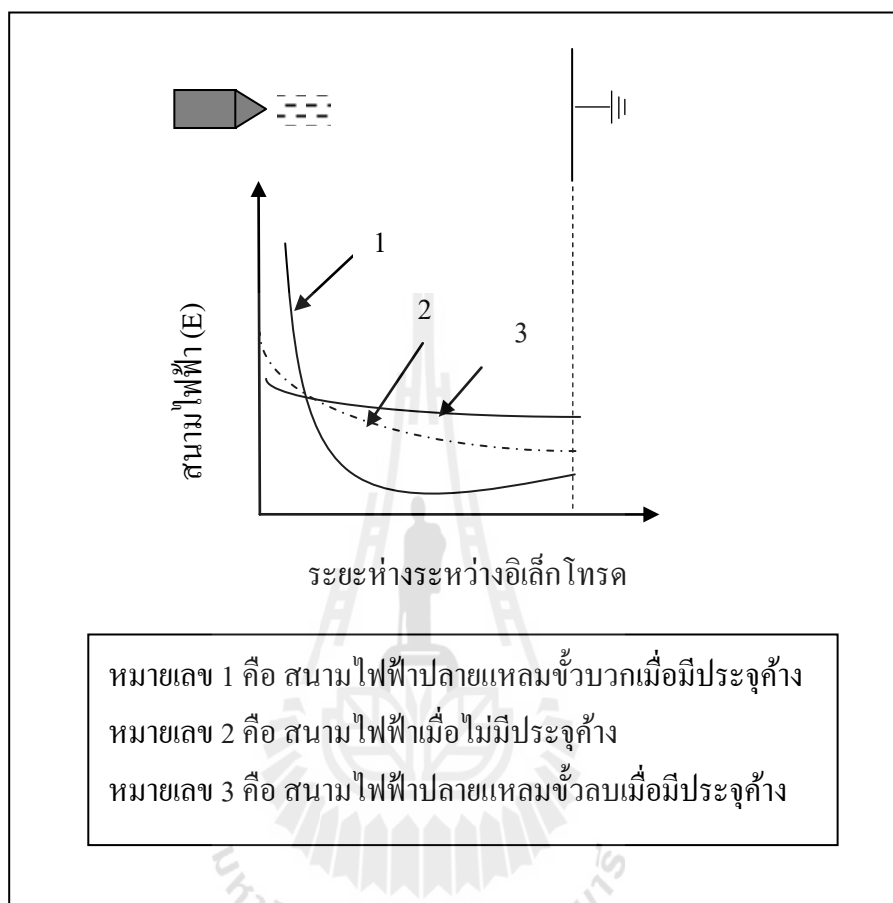


รูปที่ 3.26 ผลของประจุค้างต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวน

กรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ภายใต้แรงดันกระแสสลับ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่อเล็กโทรดคาโทด (คาโทดชั่วขณะ : Momentary Cathode) ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากประจุค้างขั้วลบ และในขณะเดียวกันที่อเล็กโทรดอานอด (อานอดชั่วขณะ : Momentarily Anode) จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเป็น 2 เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันภายนอก เมื่อถึงจุดนี้จะไม่มีการเพิ่มของประจุค้างอีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากในครึ่งของคาบต่อไปอานอดชั่วขณะจะเปลี่ยนเป็นคาโทดชั่วขณะ และที่นั่นความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณหน้าคาโทดชั่วขณะจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะไม่มีการฉีดของอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าอีกต่อไป

กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field) ก็สามารถเกิดประจุค้างได้เช่นกัน และวิกฤติมากกว่ากรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมาก ในทางปฏิบัตินั้นสนามไฟฟ้าไม่

สมำเสมอสูง ก็คือกรณีที่เกิดปลายแหลมขึ้นบนสายตัวนำ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ในทางทฤษฎี คือ กรณีอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมแผ่นระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ผลของประจุค้างกรณีสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอสูง

จากรูปที่ 3.27 บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง เมื่อพิจารณาผลของประจุค้างที่ตำแหน่งมีประจุค้างขั้วลบบริเวณหน้าปลายแหลมขณะที่ปลายแหลมเป็นขั้วลบ (เส้นที่ 3) จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลดน้อยลง และในทางตรงกันข้ามขณะที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวก (เส้นที่ 1) จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเสริมกับสนามไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันอิเล็กโทรดเพิ่มสูงมากขึ้นดังนั้นจะเห็นได้ว่าประจุค้างที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าปลายแหลม จะเพิ่มให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงอยู่แล้วให้สูงมากขึ้นอีก

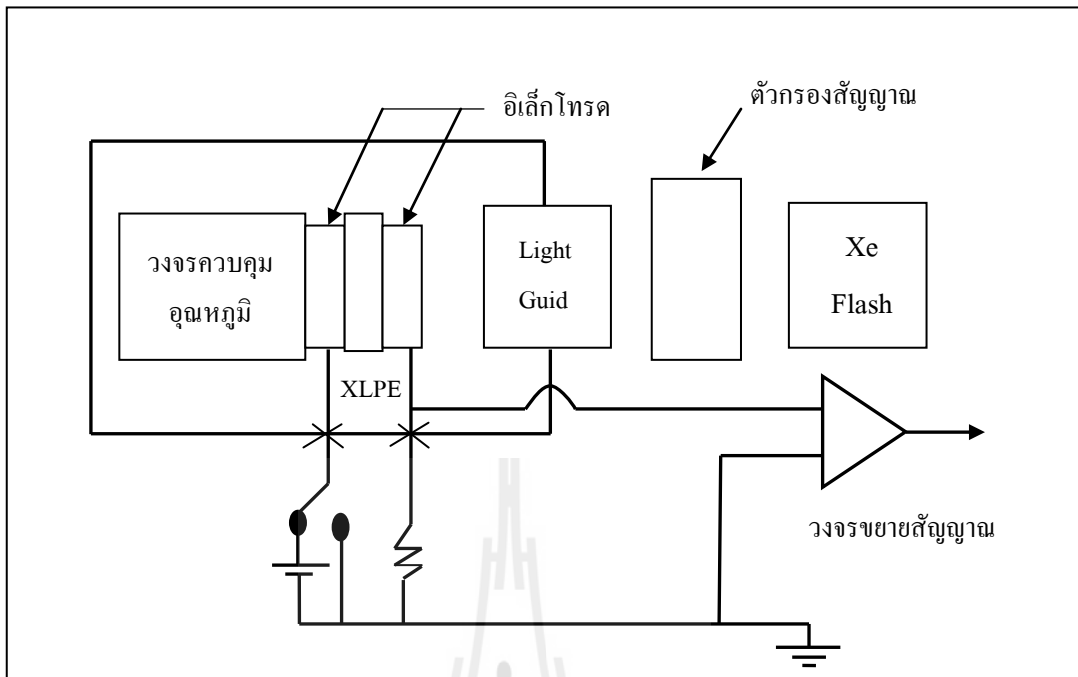
ถ้าจะพิจารณาถึงเหตุผิดพลาดหรือจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นที่สายตัวนำหรือชั้นกึ่งตัวนำด้านในของสายเคเบิลแล้ว จะเห็นได้ว่าจุดเหล่านี้เป็นต้นเหตุของการก่อตัวของประจุค้างและทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเฉพาะจุดสูงขึ้น และสุดท้ายจะนำไปสู่การเกิดการทะลุผ่าน (Breakdown) ของฉนวนสายเคเบิลได้

3.7 วิธีในการวัดการกระจายตัวของประจุค้าง

วิธีในการวัด การกระจายตัวของประจุค้าง ที่ได้รับความนิยม แบ่งออก เป็น 3 กลุ่ม คือ การกระจายความร้อน การถ่ายทอดการขยายตัวของคลื่นและกลุ่มการขยายตัวของความเครียด ทั้งสามกลุ่มของวิธีการวัดมีผลทางกายภาพที่เหมือนกัน คือความสมดุลระหว่างไฟฟ้าสถิตและการขยายตัวของแรงเมื่อได้รับการรบกวน ในกลุ่มความร้อนจะใช้การกระจายความร้อนเพื่อสร้างความสมดุลและก่อให้เกิดการตอบสนองทางไฟฟ้า กลุ่มการถ่ายทอดการขยายตัวของคลื่นใช้ความเค้น โดยเกิดจากการถ่ายทอดการขยายตัวของคลื่นทำให้เกิดความสมดุลและสัญญาณไฟฟ้า สุดท้ายกลุ่มการขยายตัวของความเครียดใช้แรงไฟฟ้าสถิตซึ่งเกิดขึ้น โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอกทำให้เกิดความสมดุลและกระบวนการตอบสนอง แม้ว่าแต่ละกลุ่มจะให้ความหมายทางกายภาพที่ต่างกันของการวัดและกำหนดค่าการกระจายตัวของประจุ วิธีทั้งสามจะแสดงผลที่ได้คล้าย ๆ กัน

3.7.1 วิธีพัลส์ความร้อน

หลักการของวิธีพัลส์ความร้อน (Thermal Pulse : TP) จะใช้การกระจายความร้อนที่สร้างขึ้น โดยแสงของหลอดไฟและแสงจากเลเซอร์บนผิวด้านหนึ่งของขั้ว หลังจากนั้นความร้อนจะค่อย ๆ กระจายจนทั่วชิ้นวัสดุ สัญญาณของประจุที่ถูกวัดโดยตัวขยายประจุและการกระจายของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.28

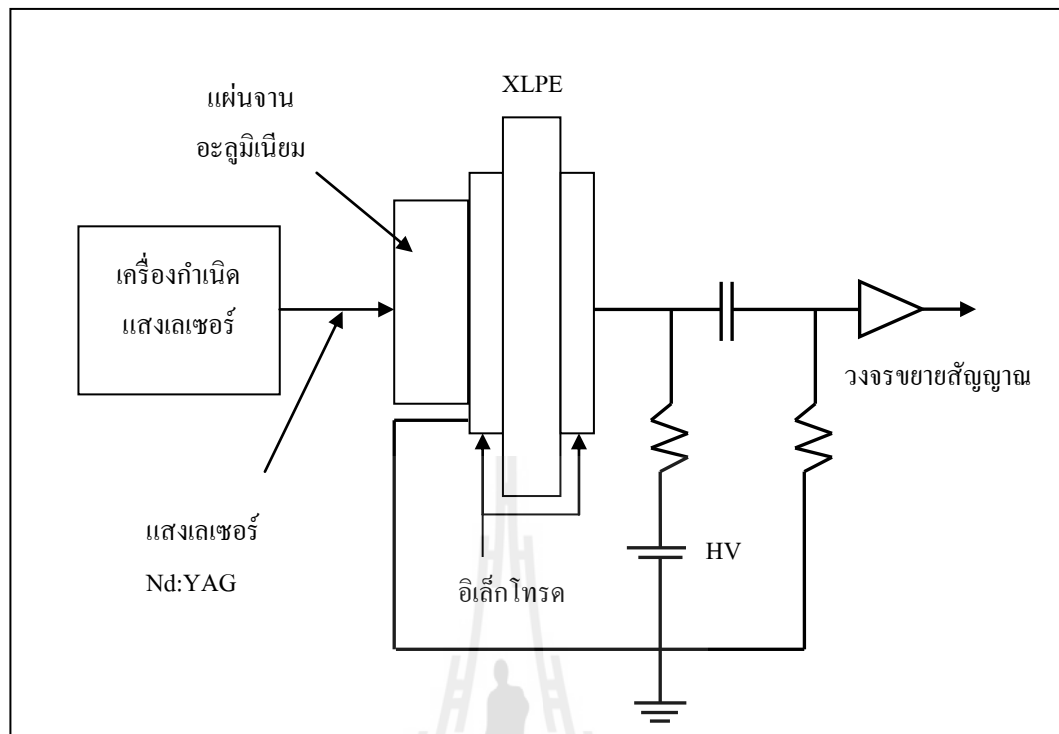


รูปที่ 3.28 หลักการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ความร้อน

3.7.2 วิธีพัลส์ความดันเหนี่ยวนำจากเลเซอร์

วิธีพัลส์ความดันเหนี่ยวนำจากเลเซอร์ (Laser Induced Pressure Pulse: LIPP) ด้านหนึ่งของวัสดุที่มีประจุค้างจะถูกวัดโดยพัลส์แรงดันที่สร้างโดยการฉายรังสีของเลเซอร์โดยใช้เลเซอร์ Nd:YAG ดังแสดงในรูปที่ 3.29 (T. Mizutani et al., 1994) พัลส์ความดัน ที่สร้างขึ้นจะกระจายอย่างรวดเร็วทั่ววัสดุ กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสะท้อนของการกระจายของประจุค้าง ผลที่ได้รับจะแสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการกระจายตัวของประจุพร้อมกับประจุบนขั้ว

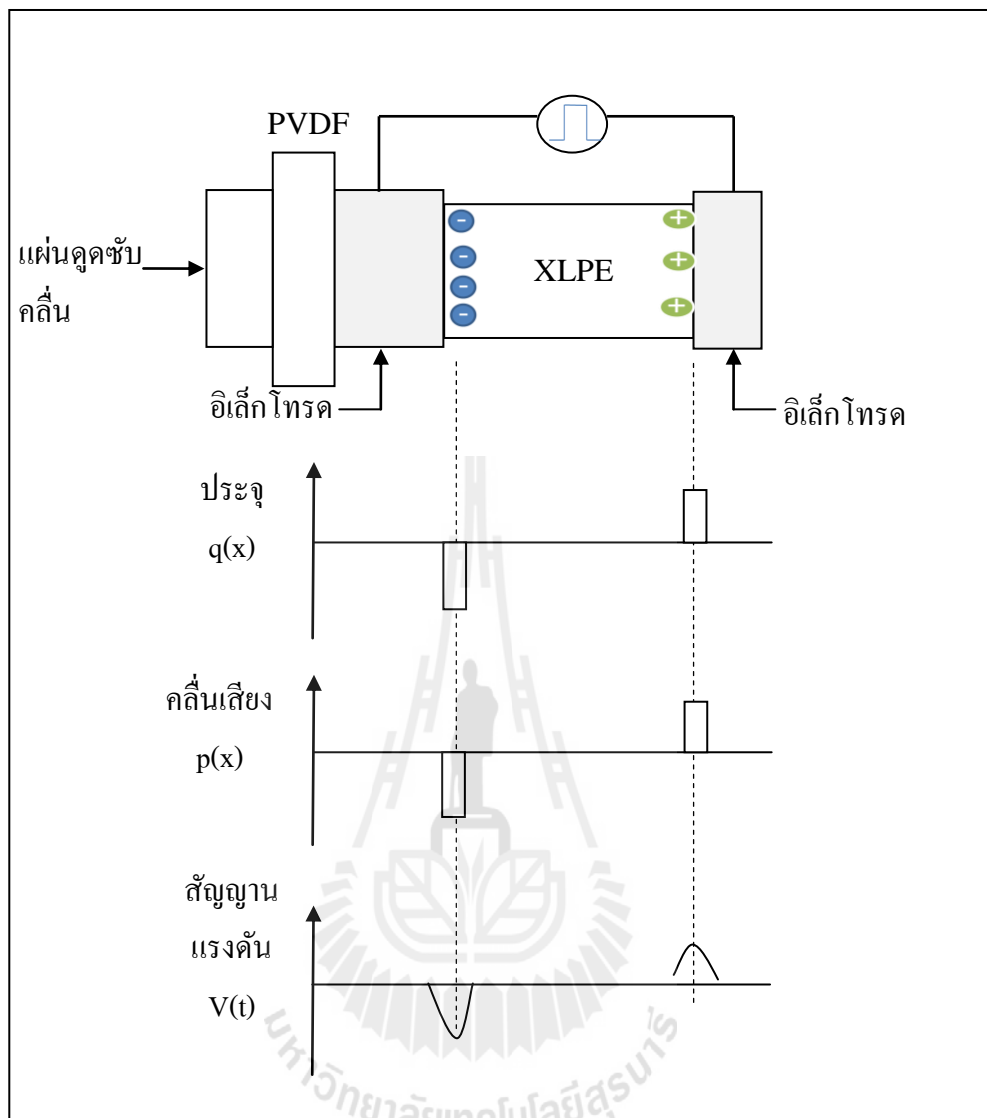
ระบบ LIPP ใช้งานได้กับทั้งวัสดุที่บาง ($10 - 100 \mu\text{m}$) และหนา ($1 - 20 \text{mm}$) โดยปกติพัลส์ของเลเซอร์ที่ใช้มีความกว้าง 100ps ถึง 10ns ตำแหน่งความละเอียดสูงสุดของการวัดแบบ LIPP ประมาณ $1 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยประจุค้างบนวัสดุแบบฟิล์มบาง แต่ระบบ LIPP ใช้แรงดันที่สูงและวงจรตรวจจับถูกแยกโดยคู่ของตัวเก็บประจุ อีกนัยหนึ่งการขยายแรงดันจะก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องมาจากกระแสในการเกิดเบรกดาวน์



รูปที่ 3.29 หลักการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ความดัน
เหนี่ยวนำจากเลเซอร์

3.7.3 วิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน

วิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1975 ที่ประเทศญี่ปุ่นระหว่าง
เรียนเรื่องทฤษฎีไฟฟ้าและแม่เหล็กที่เกี่ยวกับไมโครโฟนและเอียร์โฟนของระบบเสียง แหล่งจ่าย
แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่จ่ายให้เอียร์โฟนและจะทำให้อายุการใช้งานของเอียร์โฟนสั้นลง จากที่
กล่าวมานี้สามารถอนุมานได้ว่าการเสื่อมสลายที่เกิดจากการสะสมของประจุค้างเนื่องมาจากการ
แผ่รังสีอาจจะทำให้อายุการใช้งานของเอียร์โฟนสั้นลง ซึ่งนำไปสู่การวัดประจุค้าง



รูปที่ 3.30 หลักการพื้นฐานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า-เสียงสะท้อน

จากรูปที่ 3.30 แสดงถึงหลักการพื้นฐานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน โดยที่มีรายละเอียดของหลักการพื้นฐานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อนดังนี้

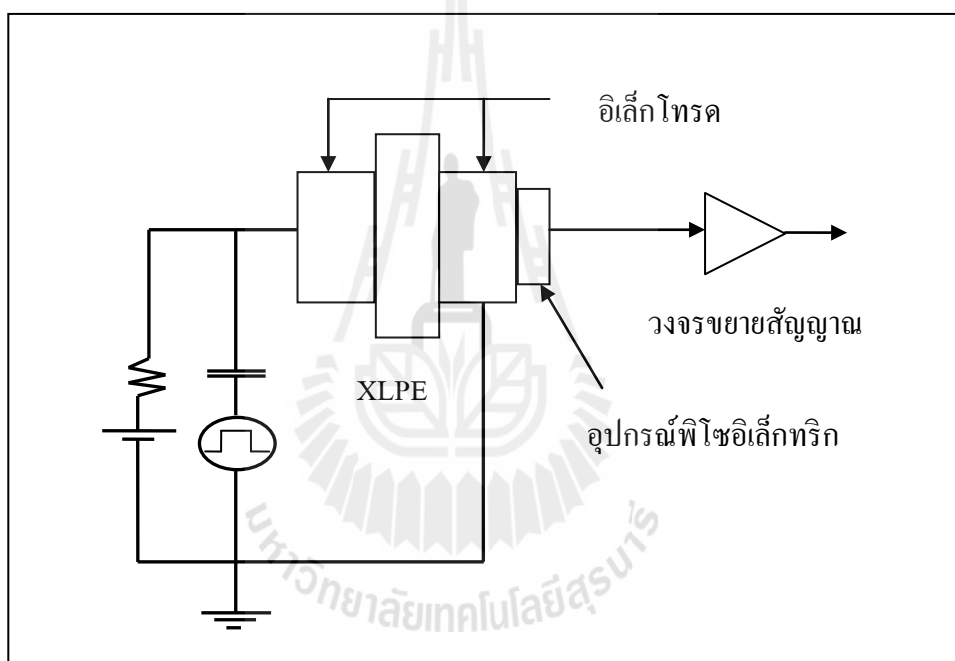
$q(x)$ คือ ประจุที่ตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน XLPE

$p(x)$ คือ คลื่นสะท้อนที่เกิดจากสัญญาณพัลส์ในการตรวจจับความหนาแน่นของประจุค้าง

$V(t)$ คือ สัญญาณเข้าที่พืทที่ได้จากอุปกรณ์พีโซอิเล็กทริก

หลักการพื้นฐานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน อธิบายด้วยกฎของคูลอมบ์ ($F = qE$) เมื่อจ่ายแรงดันพัลส์จากภายนอกให้กับวัสดุทดสอบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไปรบกวนประจุที่ตกค้างอยู่ในเนื้องนวน ซึ่งการรบกวนทำให้เกิดคลื่นสะท้อนที่ชั้นของประจุค้างภายในเนื้องนวน XLPE พิโซอิเล็กทริกเซนเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจจับคลื่นสะท้อนและแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยแอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าแสดงถึงความหนาแน่นของประจุที่ตกค้างอยู่ในเนื้องนวน XLPE

แผนภาพแสดงองค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อนแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 องค์ประกอบการวัดการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน

จากแผนภาพแสดงองค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ระบบวัดประจุค้างจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ส่วนแรงดันสูงประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายแรงดันสูง แหล่งจ่ายสัญญาณพัลส์ แหล่งจ่ายทั้งสองจะส่งผ่านสัญญาณให้กับวัสดุทดสอบ ผ่านอิลีกโทรอด ตัวต้านทานจะทำหน้าที่กำจัดกระแสในกรณีเกิดเบรคควาน์ในขณะที่ทำการทดสอบ ส่วนตัวเก็บประจุจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายสัญญาณพัลส์ โดยปกติสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในระบบวัดการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน จะใช้แรงดันอยู่ในช่วง 0.1-2 kV มีความกว้าง 5-200 ns

ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นเส้นทางที่ทำให้ความเครียดทางไฟฟ้าและ สัญญาณพัลส์ ส่งไปยังวัสดุทดสอบ ประกอบไปด้วยชุดอิเล็กทรอนิกส์ 2 ส่วน คือ อิเล็กทรอนิกส์ด้านบนและอิเล็กทรอนิกส์ ด้านล่างประกบกับวัสดุทดสอบ

ส่วนอุปกรณ์พีโซอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเสียงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ตัวแปลงสัญญาณที่นิยมใช้มากที่สุดคือ พอลิไวนิลลิคีนฟลูออไรด์ หรือ ลิเทียมไนโอเบต แต่ ลิเทียมไนโอเบต มีข้อเสีย คือมีความไวต่ออุณหภูมิ และ พอลิไวนิลลิคีนฟลูออไรด์ เป็นตัวแปลงสัญญาณที่มีความยืดหยุ่น ง่ายต่อการตัด รูปร่างและการยึดติด ดังนั้นวัสดุ พอลิไวนิลลิคีนฟลูออไรด์ จึงได้รับความนิยมสูงกว่า

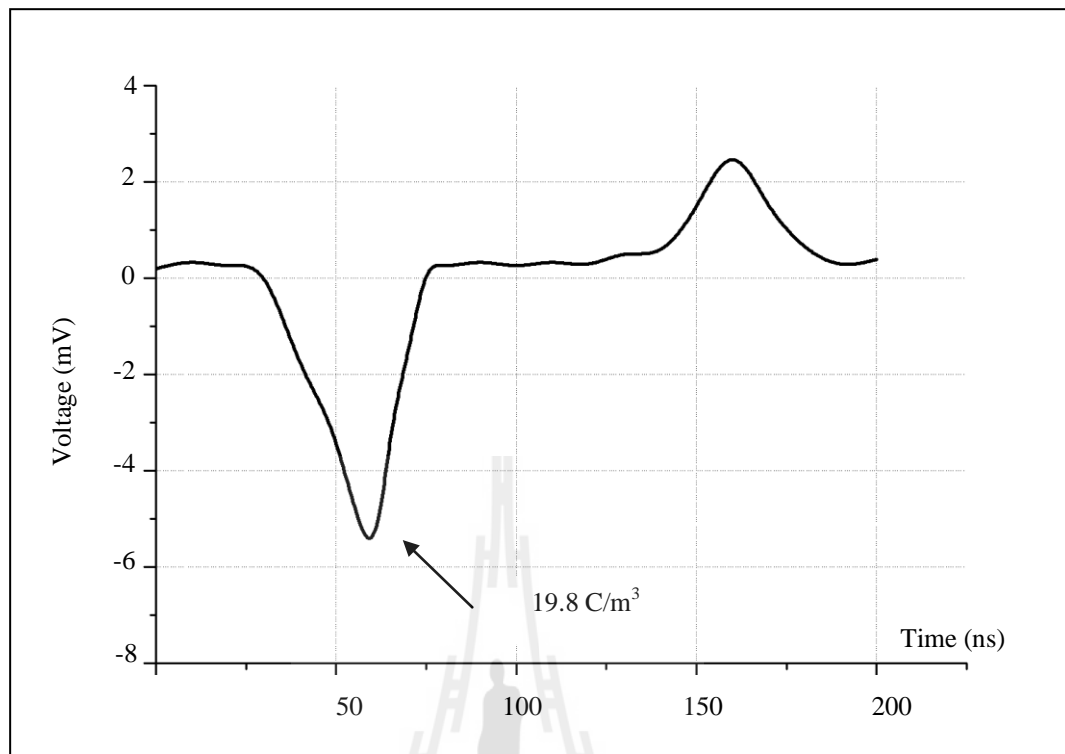
ส่วนตัวกันกระแทก ช่วยดูดซับคลื่นเสียงสะท้อนกลับและสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นสัญญาณที่ทำให้สัญญาณความหนาแน่นของประจุค้างผิดเพี้ยนไป

ส่วนเครื่องขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์พีโซอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีขนาดของสัญญาณที่เล็กมาก

เมื่อพิจารณาถึงหลักการพื้นฐานของวิธีการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ในเนื้อฉนวนพอลิเมอร์แล้ว ผู้ทำวิจัยเลือกวิธีพัลส์ไฟฟ้า -เสียงสะท้อน เนื่องจากมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. วิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อนเป็นวิธีที่ให้การตอบสนองที่รวดเร็ว โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบ วิธีพัลส์ความร้อน เนื่องจากวิธีพัลส์ความร้อนต้องใช้เวลาานกว่าความร้อนจะกระจายตัวทั่วชิ้นงานตัวอย่าง
2. มีต้นทุน ไม่ค่อยสูง ในการสร้างระบบการวัด ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง
3. วิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ยังเป็นวิธีการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ง่ายต่อการเพิ่มรายละเอียด หรือหัวข้อที่ต้องการศึกษาเพิ่มเติมได้ง่าย เช่น การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงเลือกใช้วิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อนในการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง สัญญาณเอาท์พุทของวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน แสดงดังในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.32 สัญญาณแรงดันที่ได้จากวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

จากรูปที่ 3.32 แสดง สัญญาณแรงดัน ที่ได้จาก วิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ดังที่กล่าวไว้ เอมพิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าแสดงถึงความหนาแน่นของประจุที่ตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน XLPE โดยมีหลักการหาความหนาแน่นของประจุค้างดังนี้

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_{dc}}{d} \quad (3.2)$$

เมื่อ σ คือ ความหนาแน่นของประจุค้าง

ϵ_0 คือค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับระบบพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

d คือ ความหนาของฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบหาความหนาแน่นของประจุค้าง

ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาหาความหนาแน่นของประจุค้าง คือผลของความเร็วเสียง (Sound Velocity) ในวัสดุฉนวน XLPE ดังแสดงในตารางที่ 3.6 มาใช้เป็นองค์ประกอบในการหาความหนาแน่นของประจุ

ตารางที่ 3.6 Relative Permittivity และ ความเร็วเสียงในวัสดุฉนวน

วัสดุ	ความเร็วเสียง (m/s)	Relative Permittivity (ϵ_r)
PMMA	2680	2.6
LDPE	1950	2.3
XLPE	2000	2.3
PVDF	2250	-
PET	2290	3.4
Aluminum	6420	-
Semiconducting material	1950	-

เมื่อพิจารณาถึงผล ของความเร็วเสียงในวัสดุฉนวน XLPE และคุณสมบัติของอุปกรณ์ พิโซอิเล็กทริก ดังแสดงในตารางที่ 3.3 มาใช้เป็นองค์ประกอบในการหาความหนาแน่นของประจุค้าง จะได้สมการที่ใช้หาความหนาแน่นของประจุค้างดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\sigma = KV_m \tau S_v \quad (3.3)$$

- เมื่อ K คือ Sensitivity Factor เป็นค่าคงที่
 V_m คือ ค่ายอดของสัญญาณที่วัดได้จากระบบพัลส์ไฟฟ้า-เสียงสะท้อน
 τ คือ Acoustic Time ของอุปกรณ์พิโซอิเล็กทริก
 S_v คือ ความเร็วเสียงใน XLPE

ค่า Sensitivity Factor เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1 และ สมการที่ 3.2 ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$K' = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_{dc}}{dV_m \tau S_v} \quad (3.4)$$

เมื่อทราบค่า Sensitivity Factor ใหม่ ที่ได้จากสมการที่ 3.4 ซึ่งเป็นค่าคงที่ วิธีคำนวณหาความหนาแน่นของประจุค้างทำได้โดยนำค่า Sensitivity Factor คูณกับ ค่ายอดของสัญญาณที่วัดได้จากระบบพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

$$\sigma = K'V_m \quad (3.5)$$

จากรูปที่ 3.32 เป็นสัญญาณที่ได้จาก ระบบพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ภายใต้ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ 25 kV/mm สามารถคำนวณหาค่า Sensitivity Factor ได้ค่าเท่ากับ 3463 C/m³V และ ค่ายอดของสัญญาณที่วัดได้จากระบบพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน มีค่าเท่ากับ 5.40 mV ดังนั้นสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของประจุค้างได้เท่ากับ 19.80 C/m³

หลักการพื้นฐานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน มีข้อควรระวังที่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดอยู่สามส่วนได้แก่ i) เกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนจากภายนอก ii) ข้อผิดพลาดเนื่องจากการปรับเทียบสัญญาณพารามิเตอร์ เช่น ความหนาของชิ้นตัวอย่าง , แรงดันที่ป้อนและค่าอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับการทดลอง iii) ข้อผิดพลาดเนื่องจากการประมวลผลทางสัญญาณ สัญญาณจะถูกกรองด้วยตัวกรองสัญญาณสามชั้น (พีโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ , วงจรขยายสัญญาณ , ออสซิลโลสโคป)

3.8 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้อธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่องค์ความรู้ที่ใช้ในการพัฒนาระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE อาทิเช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของสารพอลิเมอร์ โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล คุณสมบัติของฉนวนวัสดุพอลิเมอร์ กลไกการเกิดประจุค้างในเนื้อฉนวนพอลิเมอร์ ผลของประจุค้างต่อลักษณะสนามไฟฟ้า อีกทั้งยังอธิบายถึงหลักการเทคนิคต่าง ๆ ในการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง และเลือกใช้วิธีในการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่เหมาะสมกับงานวิจัยมากที่สุด

ในการสร้างระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE แล้ว เพื่อเป็นการทดสอบระบบที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้สภาวะทางความเครียดไฟฟ้าและอุณหภูมิ พร้อมทั้งศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานเปรียบเทียบกับฉนวนที่ไม่ผ่านการใช้งาน เพื่อหาความสัมพันธ์ของประจุค้างต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE รายละเอียดขั้นตอนการสร้างระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน จะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

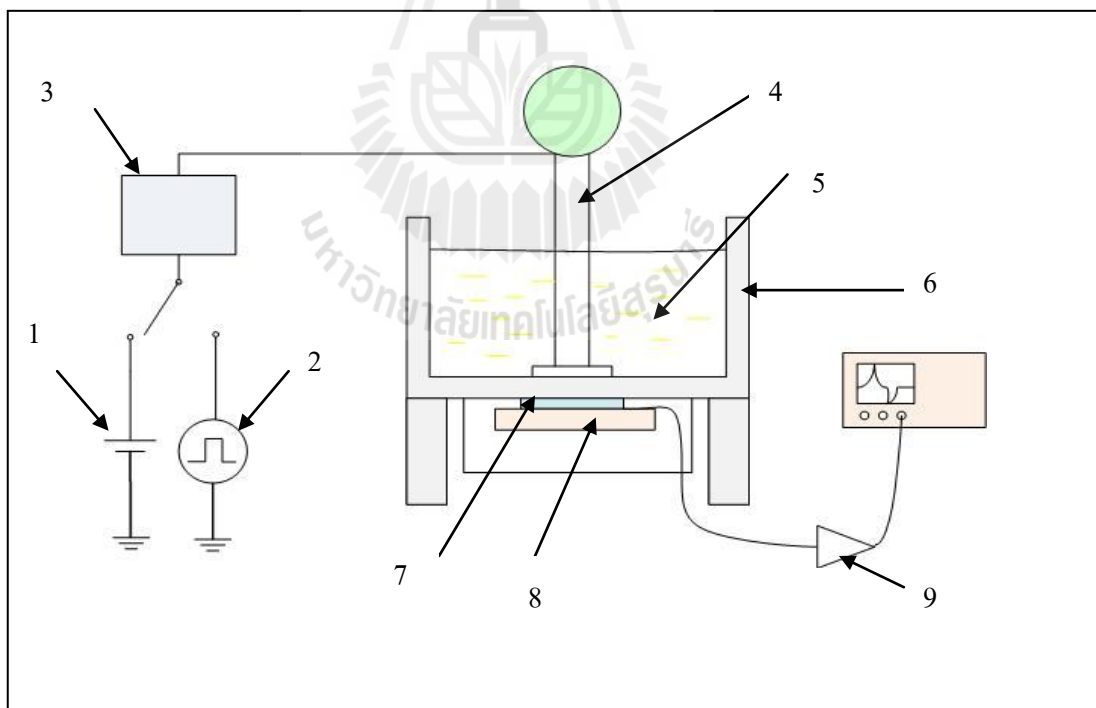
บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัยและสร้างระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

การสร้าง ระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ในสายเคเบิลแรงสูงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน มีดังนี้

4.1 การออกแบบและสร้าง ระบบวัดประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

ก่อนทำการสร้างระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ได้มีการออกแบบ ระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ที่ระบบวัดประจุค้างที่ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



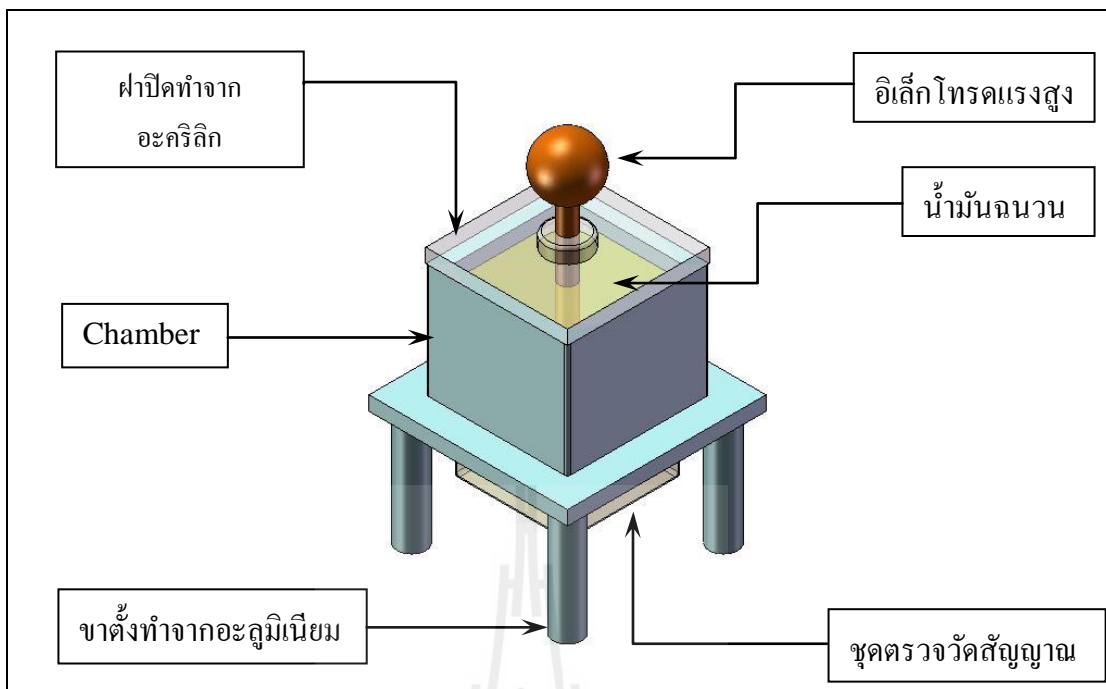
รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมระบบวัดประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

จากรูปที่ 4.1 การออกแบบระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน มีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 4.1

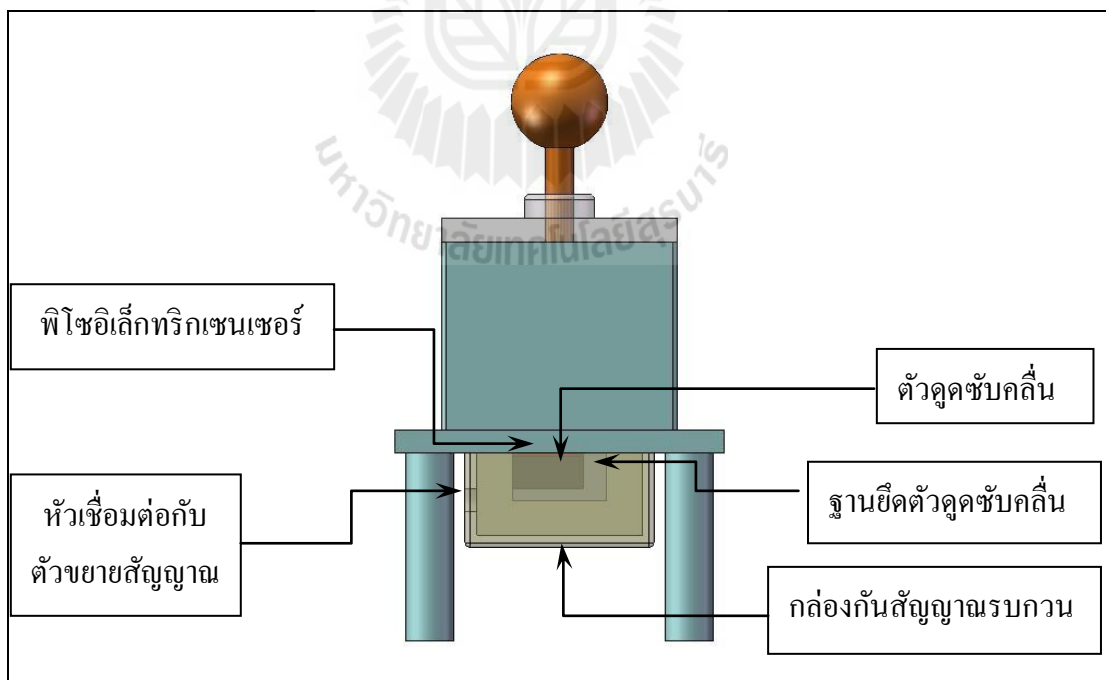
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ที่ได้ออกแบบไว้

หมายเลข	อุปกรณ์
1	เครื่องกำเนิดสัญญาณแรงดัน
2	เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์
3	เครื่องขยายแรงดันสูง
4	อิเล็คโทรดด้านบน
5	น้ำมันฉนวน
6	อิเล็คโทรดด้านล่าง
7	อุปกรณ์พีโซอิเล็คทริกแบบ PVDF
8	ตัวดูดซับคลื่น
9	วงจรรขยายสัญญาณ

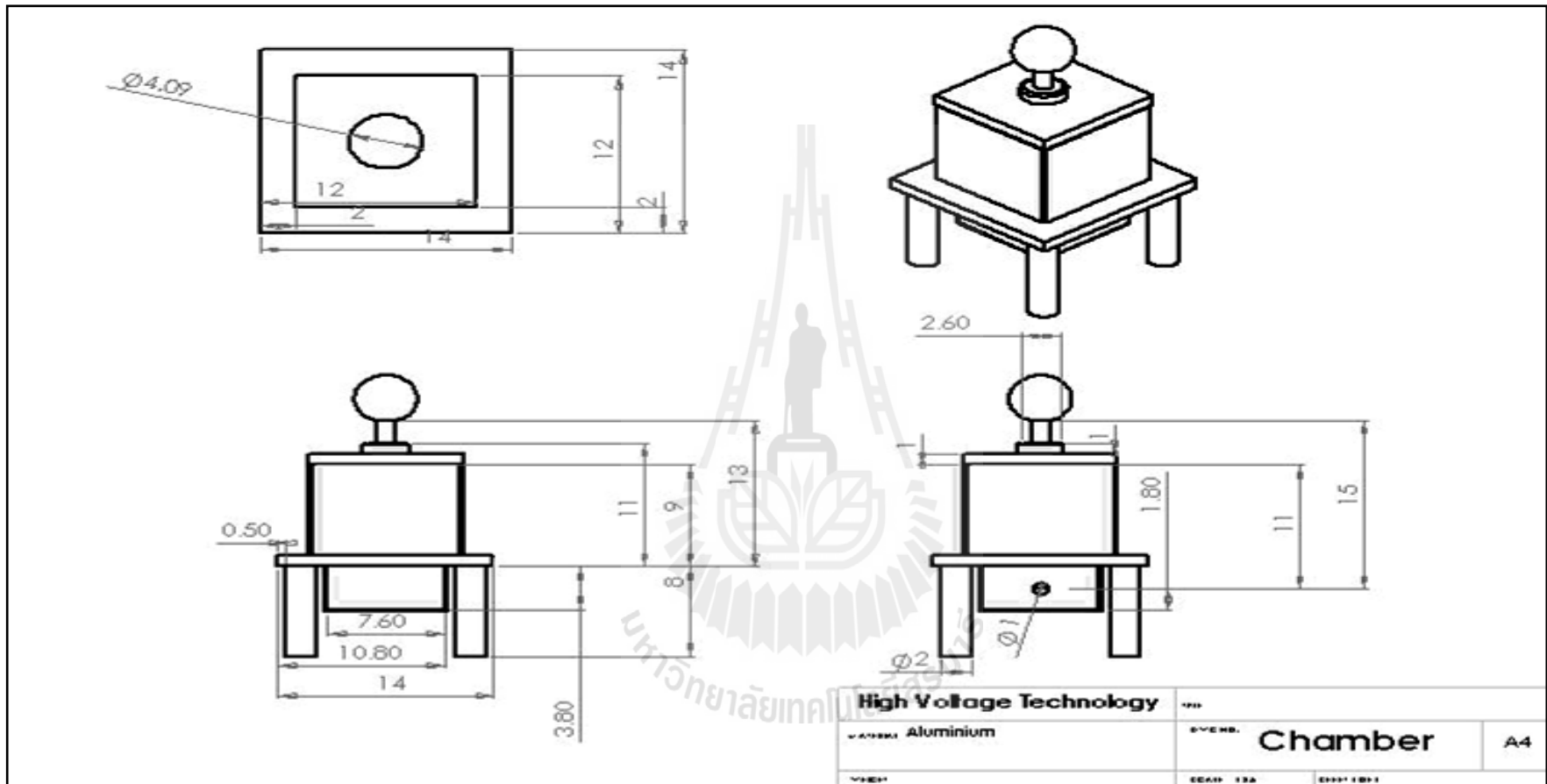
ส่วนประกอบสำคัญของระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสียงสะท้อน ในงานวิจัยนี้ คือ Chamber โดยที่ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของ Chamber แสดงในรูป ที่ 4.2 ส่วนประกอบของชุดตรวจวัดสัญญาณแสดงในรูปที่ 4.3 และอัตราส่วนของ Chamber แสดงในรูปที่ 4.4 โดยขนาดของหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของ Chamber ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.3 แสดงส่วนประกอบของชุดตรวจวัดสัญญาณประจำห้อง



รูปที่ 4.4 แบบร่างของ Chamber ที่ใช้ในการวิจัย

ระบบวัดประจุค้ำสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ถูกสร้างขึ้น เพื่อเพื่อศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ อายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE ที่ส่งผล ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ โดยระบบวัดประจุค้ำสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ประกอบไปด้วย 5 ส่วนสำคัญคือ (1) ภาคแรงดันสูงและเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (2) ชุดอิเล็กทรอนิกส์ (3) ส่วนของอุปกรณ์พีไออิเล็กทรอนิกส์ (4) วงจรขยายสัญญาณและอุปกรณ์แสดงผล เนื่องจากผู้ทำวิจัยต้องการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ จึงมีส่วนประกอบอีกส่วนคือ (5) เทอร์โมคัปเปิลและชุดควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งเป็นส่วนเพิ่มเติม จากที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 4.4 โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

4.1.1 ภาคแรงดันสูงและเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์

ภาคแรงดันสูงทำหน้าที่จ่ายความเครียด ทางไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไปยังชุดอิเล็กทรอนิกส์และส่งผลไปยังฉนวน XLPE ความเครียดสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการฉีกประจุจากอิเล็กทรอนิกส์ให้กับฉนวน XLPE ประจุที่ถูกฉีกบางส่วนจะตกค้างอยู่ในเนื้อฉนวนทำให้เกิดการตกค้างของประจุกลายเป็นประจุค้ำภายในเนื้อฉนวน XLPE ผู้ทำวิจัยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงก่อนถูกขยายเป็นแรงดันสูงด้วยเครื่องขยายแรงดันสูง (High Voltage Amplifier) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เครื่องขยายแรงดันสูงเป็นตัวขยายสัญญาณเป็นแรงสูง โดยมีอัตราขยาย 1:2000 เช่น ถ้าป้อนแรงดันที่ 1 V แรงดันที่ออกจากเครื่องขยายแรงดันสูงจะมีค่าเท่ากับ 2 kV



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ภาคแรงดันสูงและเครื่องกำเนิดสัญญาณ

เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ สัญญาณพัลส์จะเป็นตัวตรวจจับประจุที่ตกค้างอยู่ในเนื้อฉนวน XLPE โดยข้อตกลงเบื้องต้นจะใช้สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณ 50 ns 400 V โดยสัญญาณพัลส์ดังกล่าวจะถูกขยายด้วยเครื่องขยายแรงดันสูง

4.1.2 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรด เป็นเส้นทางที่ทำให้ความเครียดทางไฟฟ้าส่งผลไปยังวัสดุทดสอบ ในระบบการวัดประจุด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน จะประกอบไปด้วยชุดอิเล็กโทรด 2 ส่วน คือ อิเล็กโทรดด้านบนและอิเล็กโทรดด้านล่าง อิเล็กโทรดทั้งสองส่วนทำมาจากอะลูมิเนียม เนื่องจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการฉีดประจุได้ดี ชุดอิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ชุดอิเล็กโทรด

อิเล็กทรอนิกส์ด้านบนเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่งทำมาจากอะลูมิเนียม ความยาว 200 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm ด้านบนสุดมีอิเล็กทรอนิกส์อะลูมิเนียมทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm เพื่อช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้า

อิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบทำมาจากอะลูมิเนียมโดยมีความหนา 10 mm โดยออกแบบให้อิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างสามารถใส่น้ำมันหม้อแปลงด้วยการเชื่อมอะลูมิเนียมด้านข้างให้รูปร่างเป็นกล่องสี่เหลี่ยม โดยที่น้ำมันหม้อแปลงจะป้องกันการเกิดวาทไฟตามผิวของวัสดุทดสอบระหว่างทำการทดลอง

4.1.3 อุปกรณ์พีโซอิเล็กทรอนิกส์

พีโซอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณประจุที่สะสมภายในเนื้อฉนวนพร้อมทั้งแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนใหญ่นิยมทำมาจาก พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride: PVDF) หรือ ลิเทียมไนโอเบต (Lithium Niobate : LiNbO₃) ผู้วิจัยเลือกใช้พีโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจาก PVDF เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและง่ายต่อการตัดโค้งรูปร่าง นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มีย่านความถี่ตอบสนองที่กว้าง เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดการวัดประจุค้างได้ ในระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า -เสียงสะท้อนมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่อุปกรณ์พีโซอิเล็กทรอนิกส์ที่แนบชิดกับอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่าง ผู้ทำวิจัยจึงออกแบบให้อุปกรณ์พีโซอิเล็กทรอนิกส์มีความแนบชิดกับอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างมากที่สุด โดยมีรายละเอียดของพีโซอิเล็กทรอนิกส์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของพีโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

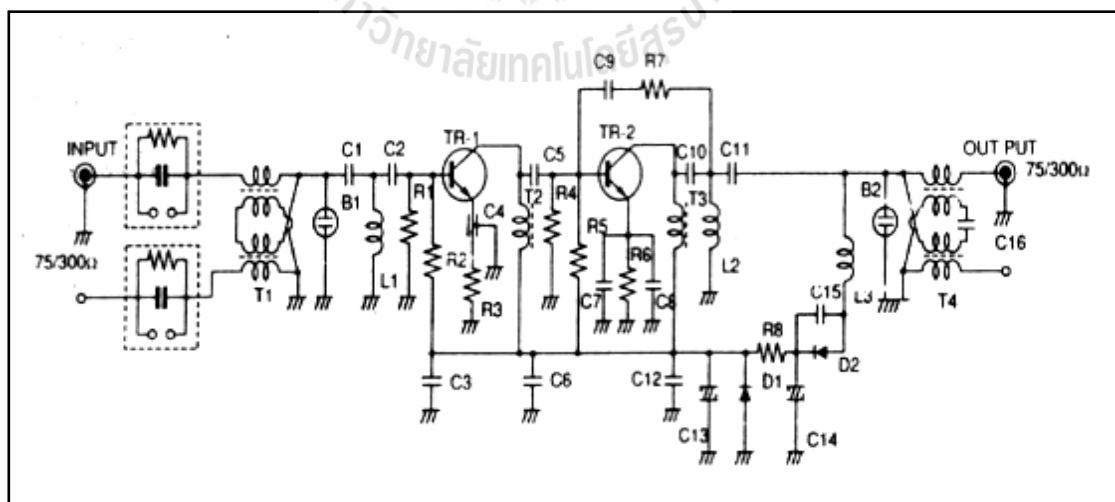
ลักษณะและคุณสมบัติ	รายละเอียด
ความหนาของ PVDF (d)	30 μm
ความเร็วของเสียงในวัสดุ PVDF (μ_p)	2.2 $\mu\text{m}/\text{ns}$
Acoustic time	$\tau_a = \frac{d}{\mu_p} 13.63 \text{ ns}$

นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยแผ่นดูดซับคลื่น (Absorber) ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับคลื่นสัญญาณ เพื่อลดการสะท้อนของคลื่นสัญญาณ อุปกรณ์พีโซอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดถูกบรรจุอยู่ในกล่องปิด เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนจากภายนอกดังแสดงในรูป 4.7



4.1.4 วงจรขยายสัญญาณและอุปกรณ์แสดงผล

สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์พีโซอิเล็กทริกจะถูกส่งผลไปยังวงจรถ่ายสัญญาณโดยใช้อัตราขยาย 30 dB เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีขนาดของสัญญาณที่เล็กมาก ตัวอย่างวงจรถ่ายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.8 สัญญาณที่ได้จะถูกแสดงผลในออสซิลอสโคป วงจรถ่ายสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 4.9



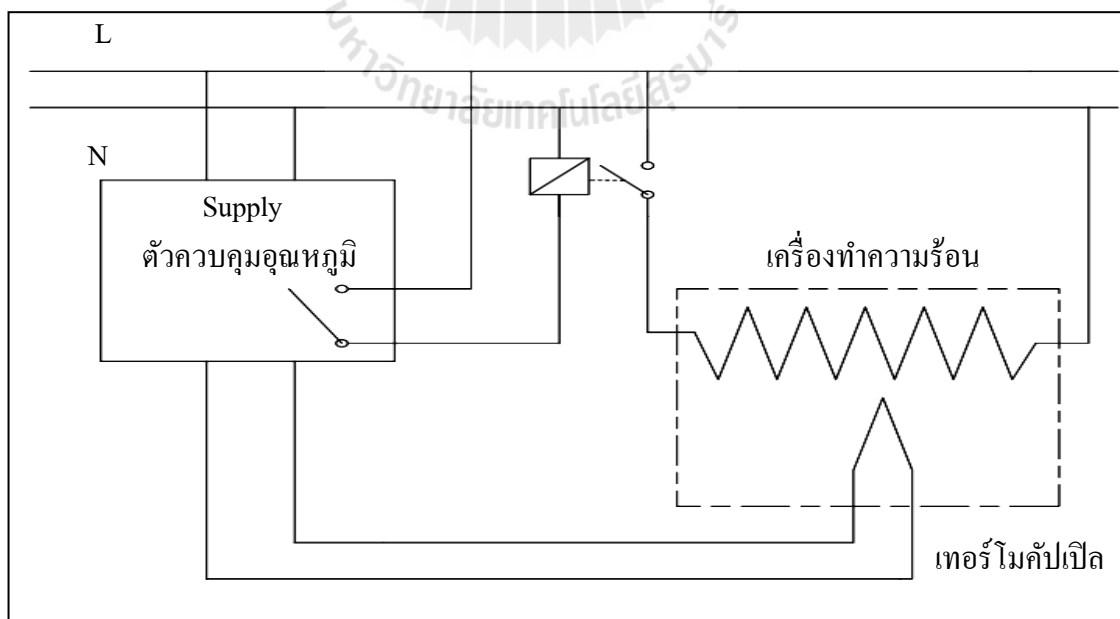
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างวงจรถ่ายสัญญาณอัตราขยาย 30 dB



รูปที่ 4.9 วงจรขยายสัญญาณ

4.1.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

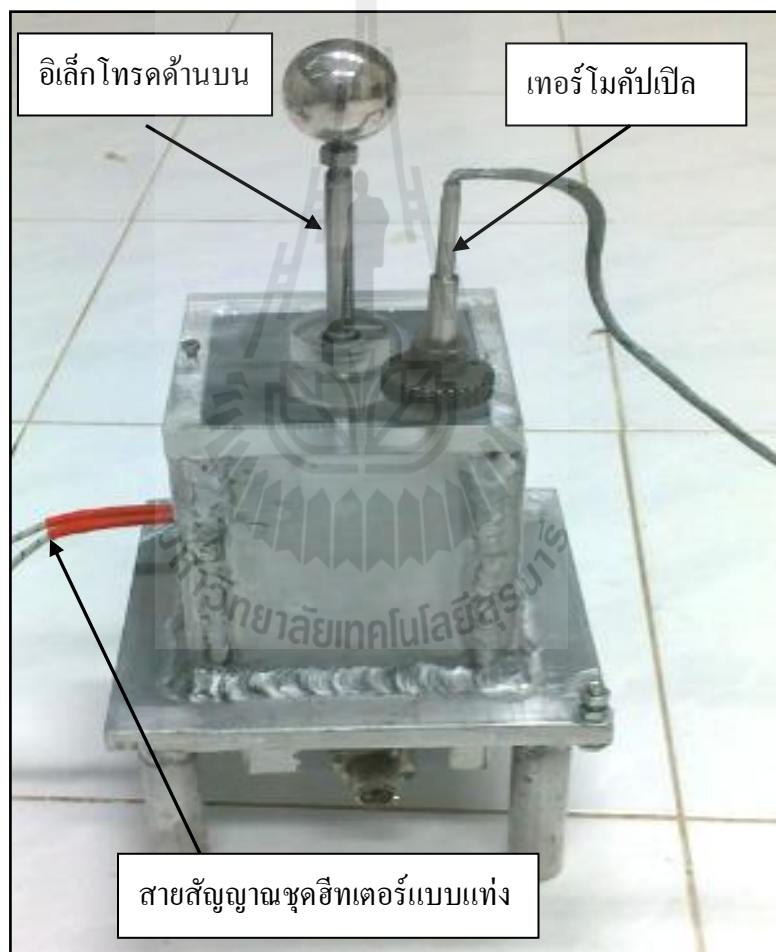
ชุดอุณหภูมิ มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในขณะที่ทำการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง หลักการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิคือ ฮีตเตอร์จะทำหน้าที่สร้างความร้อนให้กับน้ำมันหม้อแปลง เทอร์โมคัปเปิลจะทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิแล้วส่งให้ตัวควบคุมอุณหภูมิให้ได้ค่าอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ แผนผังการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนผังการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ

ชิ้นงาน ชุดควบคุมอุณหภูมิ ประกอบ ไปด้วย ฮีทเตอร์ เทอร์โมคัปเปิลและกล่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) เพื่อจำลองผลของความเครียดทางความร้อนต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำฮีทเตอร์ที่ผู้วิจัยเลือกคือฮีทเตอร์แบบแท่งเพื่อลดพื้นที่ในการติดตั้งและสามารถกระจายอย่างทั่วถึงแก่น้ำมันหม้อแปลงระหว่างการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.11

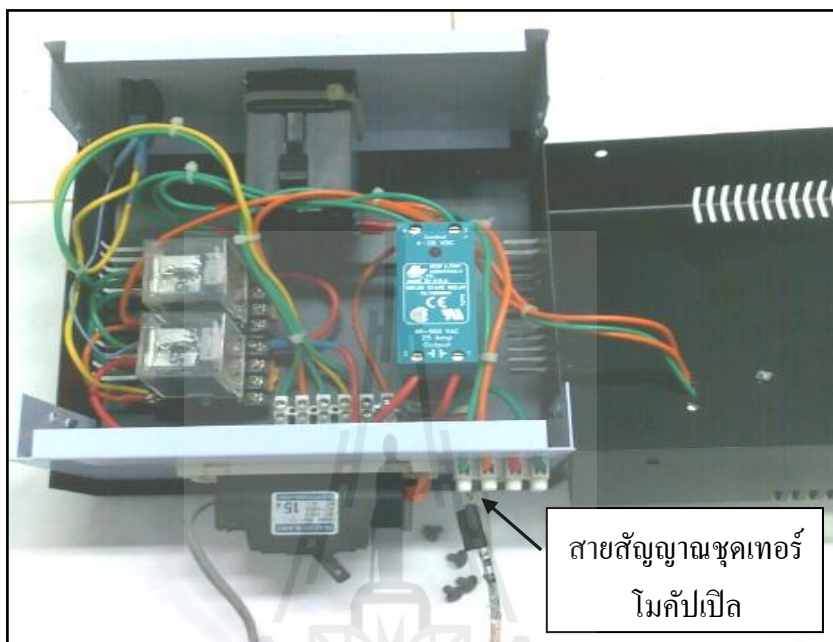
การติดตั้งตัว เทอร์โมคัปเปิล เข้ากับระบบพลังไฟฟ้า - เสี่ยงสะท้อน ต้องให้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสเพียงแก่น้ำมันหม้อแปลงเท่านั้น ห้ามสัมผัสกับตัวอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างเด็ดขาด อาจจะทำให้เกิดความเสียหายได้เนื่องจาก ได้รับแรงดันสูง



รูปที่ 4.11 การติดตั้งฮีทเตอร์แบบแท่ง

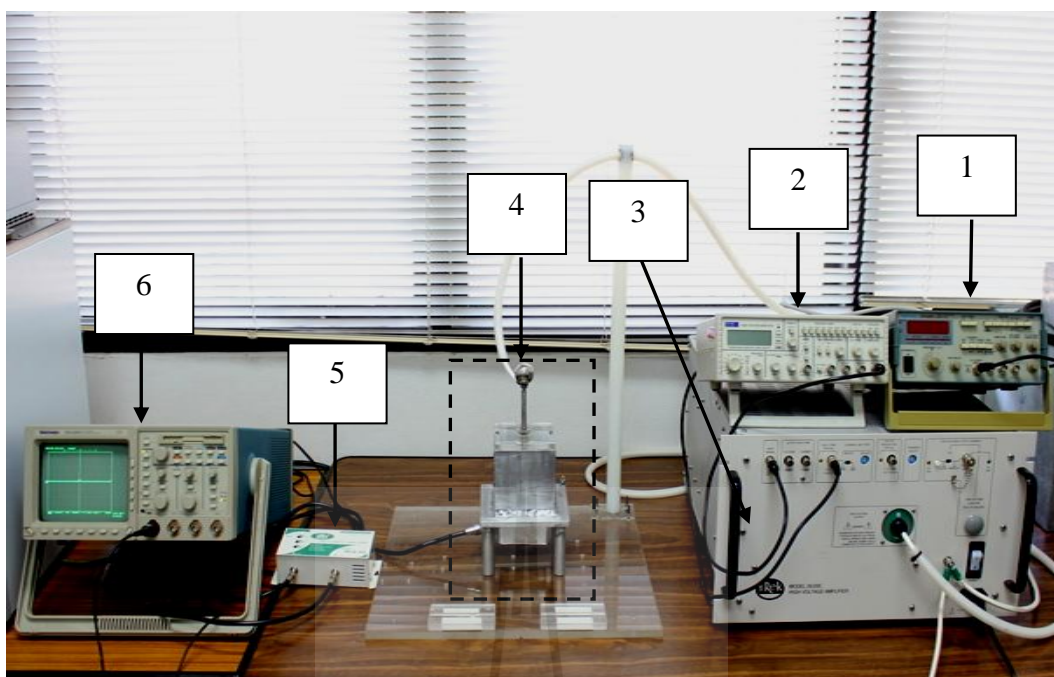
กล่องควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่รับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากจาก เทอร์โมคัปเปิล มาประมวลผล เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงให้อยู่ในระดับความร้อนที่ต้องการ

โดยการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีการจำลองความเครียดทางความร้อน โดยระดับอุณหภูมิประกอบด้วย 25°C (อุณหภูมิห้อง) 40°C 50°C และ 60°C ตามลำดับและ ชุดควบคุมอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรกล่องควบคุมอุณหภูมิ

หลังจากการออกแบบ และศึกษาส่วนประกอบระบบวัดประจุค้ำสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ได้มีการสร้าง ระบบวัดประจุค้ำสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน ขึ้นมาตามที่ได้ออกแบบไว้แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งในแต่ละ อุปกรณ์ที่มีการติดตั้งอยู่ในได้มีการต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์ทุกชิ้นเพื่อความปลอดภัย ต่อชีวิต นอกจากนี้ ได้ทำผนังกันเพื่อความปลอดภัยระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 4.13 ระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

จากรูปที่ 4.13 ระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อนมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดระบบวัดประจุค้างสำหรับฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

หมายเลข	อุปกรณ์
1	เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์
2	เครื่องกำเนิดสัญญาณแรงดัน
3	เครื่องขยายแรงดันสูง
4	ระบบวัดประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน
5	วงจรรขยายสัญญาณ
6	อุปกรณ์แสดงผล

4.2 เงื่อนไขและสถานะที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า-เสียงสะท้อนที่สร้างขึ้น ผู้ทำวิจัยได้จำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ที่คาดว่าจะส่งผลลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างไว้ 3 สถานการณ์ดังนี้

1. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวนXLPE ใหม่
2. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวนXLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นเวลา 12 ปี
3. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวนXLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นเวลา 15 ปี

โดยการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวนXLPE ที่แตกต่างกัน 3 ประเภท ดังที่กล่าวมาข้างต้นจะแบ่งการศึกษาออกเป็นศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

4.2.1 สถานะภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นการศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะถูกป้อนให้กับฉนวน XLPE ผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการศึกษาสถานะความคงทนของฉนวนที่สัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง โดยการทดสอบจะป้อนความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 การทดสอบกระทำภายใต้อุณหภูมิห้อง แล้วทำการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

ตารางที่ 4.4 ค่าความเครียดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย

ค่าความเครียดทางไฟฟ้าจาก ฉนวน XLPE หนา 1 mm E (kV/mm)	ค่าความเครียดทางไฟฟ้าจาก ฉนวน XLPE หนา 60 μ m E (kV/60 μ m)	ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำที่ต้อง ป้อนให้เครื่องขยายสัญญาณ แรงดันสูง
25kV/mm	1.50kV/60 μ m	0.75 V
50kV/mm	3.00kV/60 μ m	1.50 V
75kV/mm	4.50kV/60 μ m	2.25 V
100kV/mm	6.00kV/60 μ m	3.00V

4.2.2 สภาวะภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรงและอุณหภูมิ

การทดสอบภายใต้ความเครียด ทางไฟฟ้ากระแสตรงและอุณหภูมิถือเป็นการทดสอบในสภาวะพหุความเครียด การทดสอบมุ่งเน้นศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราการฉีดประจุ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความหนาแน่นของประจุค้างที่ตกค้างอยู่ในเนื้อฉนวน XLPE ในการทดลองใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์ และควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาการทดลองด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดค่าความร้อนที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นเวลา 60 นาที สาเหตุที่ใช้อุณหภูมิชุดดังกล่าวก็เพื่อเป็นแนวโน้มในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการศึกษาผลของสภาวะพหุความเครียด

ต่อการกระจายตัวของประจุค้าง

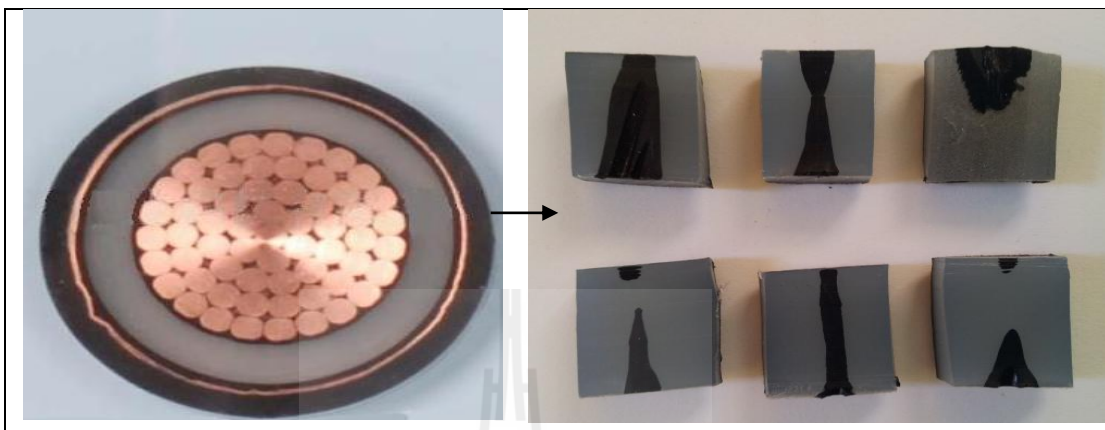
ค่าความเครียดทางไฟฟ้าจาก ฉนวน XLPE หนา 1 mm E (kV/mm)	ค่าความเครียดทางไฟฟ้าจาก ฉนวน XLPE หนา 60 μ m E (kV/60 μ m)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ
25kV/mm	1.50kV/60 μ m	40°C 50°C และ 60°C
50kV/mm	3.00kV/60 μ m	40°C 50°C และ 60°C
75kV/mm	4.50kV/60 μ m	40°C 50°C และ 60°C
100kV/mm	6.00kV/60 μ m	40°C 50°C และ 60°C

การทดสอบในสภาวะการทดลองทั้งหมด ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำข้อมูลในแต่ละครั้งที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ผลข้อมูลที่มีความถูกต้องมากที่สุด

4.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

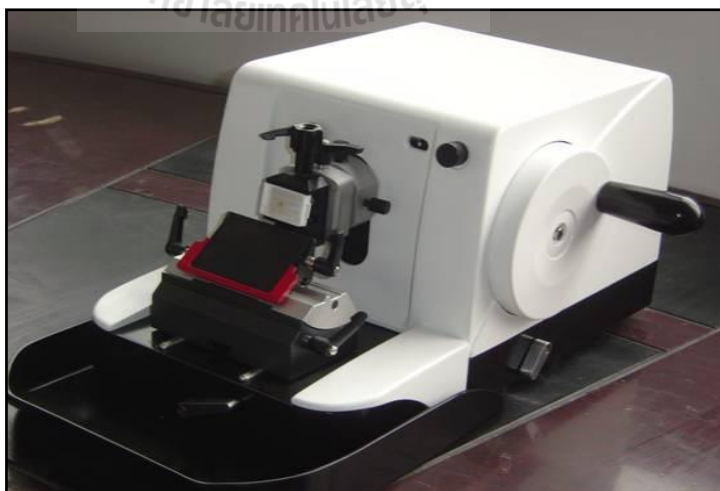
สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ที่นำมาวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง เป็นสายเคเบิลแรงสูงสำหรับจำหน่ายพิกัดแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และที่ผ่านการใช้งานจริงในระบบเป็นระยะเวลา 12 ปี และ 15 ปี โดยมีฉนวน XLPE ขนาดความหนาเท่ากับ 6 mm ตัวนำ เป็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm ตรงตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2202/2547 การเตรียมตัวอย่าง XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ ระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุด้วยเทคนิคพัลส์ไฟฟ้า-เสียงสะท้อน เริ่มจากแยกชิ้นงานที่

เป็นฉนวน XLPE ออกจากส่วนต่าง ๆ ของสายเคเบิล แล้วตัดให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 4.14



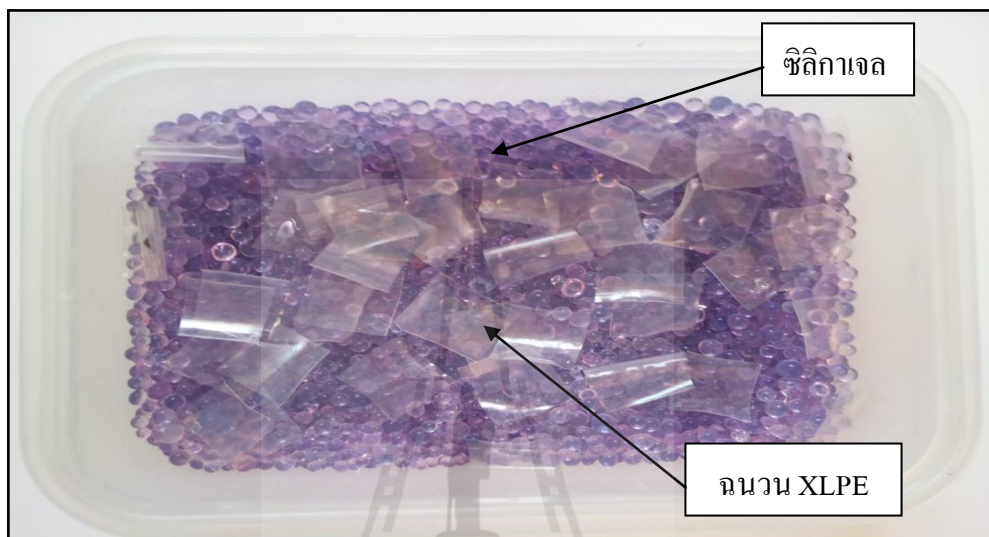
รูปที่ 4.14 ขั้นตอนการเตรียมฉนวนXLPE

จากนั้นนำฉนวน XLPE ที่ตัดแล้วไปหั่นด้วยเครื่องไมโครโทม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ฉนวนที่ตัดด้วยเครื่องไมโครโทมมีความหนาประมาณ 60 μm ฉนวน XLPE ที่ตัดมาทุกชิ้นถูกนำไปวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันผลกระทบจากความหนาไม่เท่ากันในการทดสอบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างซึ่งอาจนำไปสู่ค่าผลการทดลองที่ผิดเพี้ยนได้



รูปที่ 4.15 เครื่องไมโครโทม

หลังจากตัดชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำชิ้นงานที่สมบูรณ์เก็บใส่ในภาชนะมิดชิดและใส่ซิลิกาเจลแบบเม็ดเพื่อดูดความชื้น เพื่อเป็นการป้องกันความชื้น เพื่อลดผลของความชื้นที่จะส่งผลกับลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ชิ้นงาน XLPE ที่ถูกตัดด้วยเครื่องมือโครโทม ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ชิ้นงาน XLPE ที่ถูกตัดด้วยเครื่องมือโครโทม

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงการออกแบบ ส่วนประกอบสำคัญในระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน รวมไปถึงการสร้างระบบวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน เงื่อนไขและการจำลองสถานการณ์ทดสอบที่แตกต่างกันเพื่อเป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุ ในบทถัดไปจะเป็นส่วนของการเตรียมวัสดุทดสอบและผลทดสอบซึ่งแสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในสถานะการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในข้างต้น

บทที่ 5

ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ ระยะเวลาการใช้งาน

5.1 กล่าวนำ

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 เกี่ยวกับการสร้างระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุ เพื่อทดสอบระบบที่สร้างขึ้นจึงได้กำหนดสภาวะเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 สภาวะการทดลองประกอบไปด้วย

1. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น

- ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า
- ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

2. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นเวลา 12 ปี โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น

- ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า
- ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

3. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นเวลา 15 ปี โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น

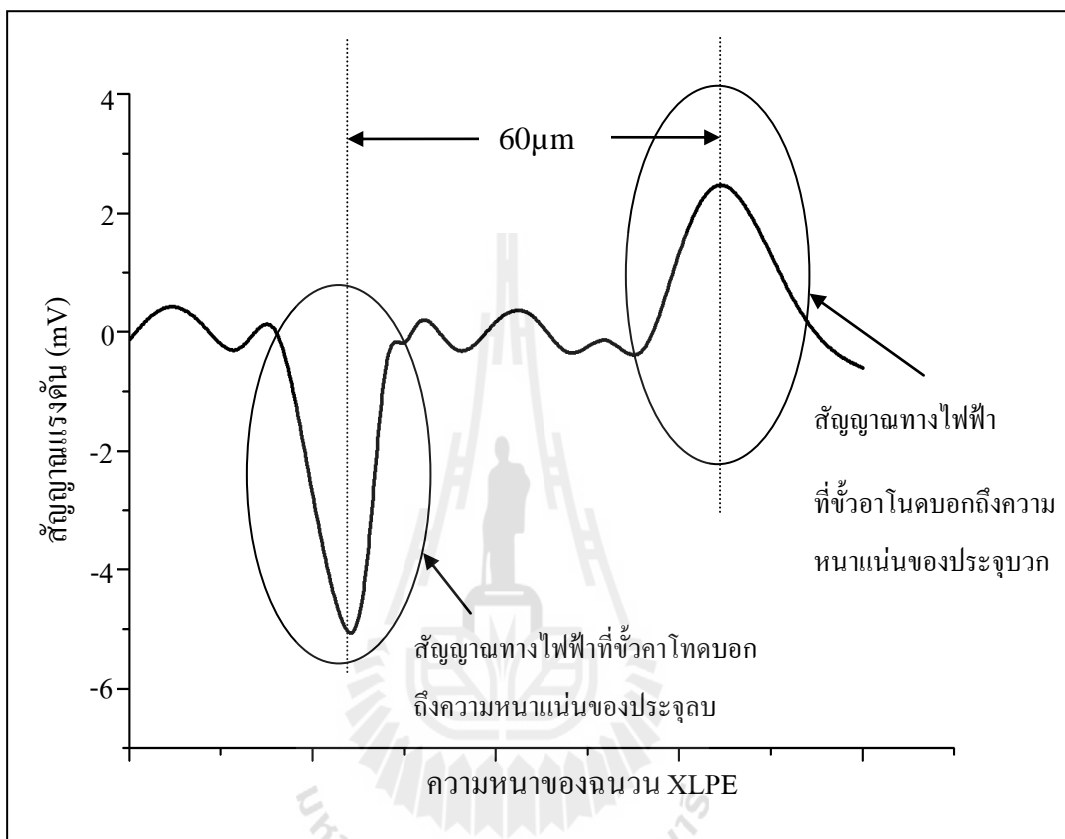
- ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า
- ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

โดยการทดลองทั้ง 3 สภาวะดังกล่าว มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างเพื่อจะได้ทราบถึงสาเหตุของการเกิดประจุค้างในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงหลักการหาความหนาแน่นของประจุค้าง

5.2 หลัก การหาความหนาแน่นของประจุค้าง

หลักการทำงานของวิธีพัลส์ไฟฟ้า – เสี่ยงสะท้อน เมื่อจ่ายแรงดันพัลส์จากภายนอกให้กับวัสดุทดสอบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไปรบกวนประจุที่ตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน ซึ่งการรบกวนทำให้เกิดคลื่นคลื่น สะท้อน ที่ขึ้นของประจุค้างภายในเนื้อฉนวน XLPE พิโซอิเล็กทริก เซนเซอร์

จะทำหน้าที่ตรวจจับคลื่น สะท้อน และแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยแอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าแสดงถึงความหนาแน่นของประจุที่ตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน XLPE สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm 15 นาที

จากรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.1 แอมพลิจูดของสัญญาณบริเวณชั่วคาบตอบกลับมีค่าเท่ากับ 5.40 mV และแอมพลิจูดของสัญญาณบริเวณชั่วคาบตอบกลับมีค่าเท่ากับ 2.37 mV ดังที่กล่าวในข้างต้นแอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าแสดงถึงความหนาแน่นของประจุที่ตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน XLPE โดยมีหลักการหาความหนาแน่นตามสมการที่ 5.1 ดังนี้

$$K = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_{dc}}{dV_m \tau S_v} \tag{5.1}$$

เมื่อ K คือ Sensitivity Factor เป็นค่าคงที่

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสูญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ Relative Permittivity (Dielectric Constant) ในกรณีของฉนวน XLPE มีค่าเท่ากับ 2.3 (คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระ, 2551)

V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับระบบพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน จากรูปที่ 5.1 เป็นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm โดยที่ฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 60 μm ดังนั้นความเครียดทางไฟฟ้าที่ป้อนให้จึงมีค่าเท่ากับ 1.5 kV/60 μm

d คือ ความหนาของฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบหาความหนาแน่นของประจุค้าง

V_m คือ ค่ายอดของสัญญาณที่วัดได้จากระบบพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อน

τ คือ Acoustic Time ของอุปกรณ์พีโซอิเล็กทริก มีค่าเท่ากับ 13.63 ns

S_v คือ ความเร็วเสียงของ XLPE มีค่าเท่ากับ 2000 (K. S. Suh et al., 1994)

จากสมการที่ 5.1 เป็นสมการ Sensitivity Factor ซึ่งเป็นค่าคงที่ จากข้อมูลดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นสามารถหาค่าได้ดังนี้

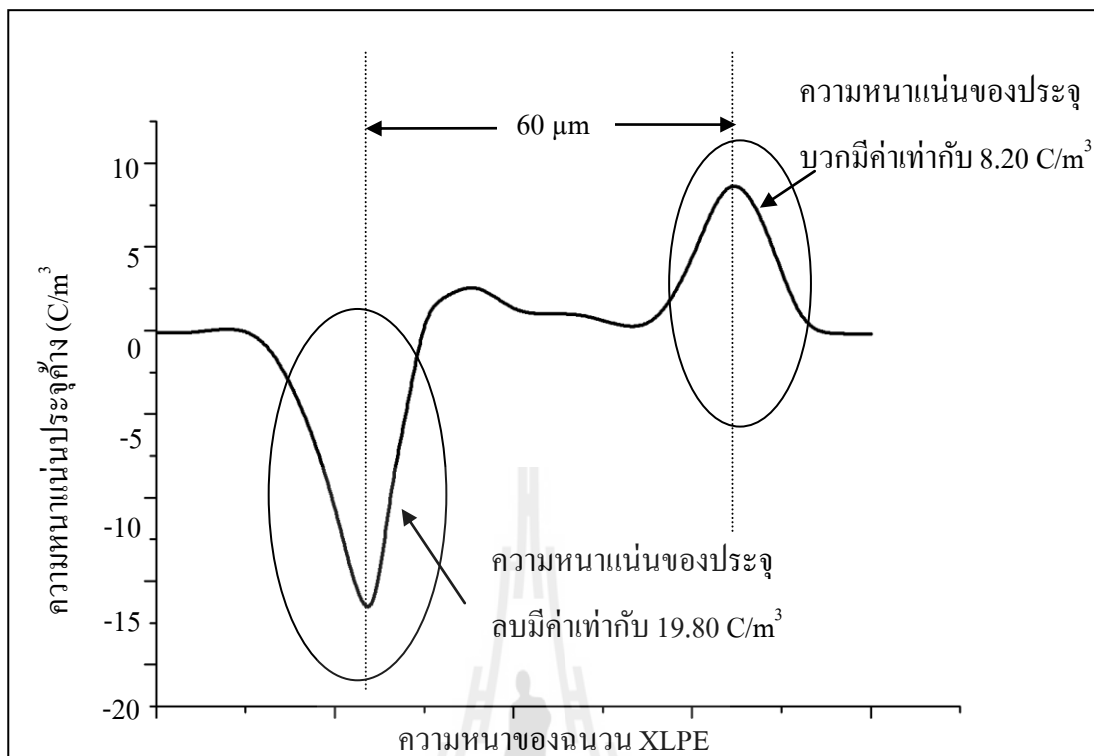
$$K = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_{dc}}{d V_m \tau S_v}$$

$$= \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 2.3 \times 1.5 \times 10^3}{50 \times 10^{-6} \times 13.63 \times 10^{-9} \times 2000} = 3462.86$$

ดังนั้นความหนาแน่นของประจุค้าง ณ บริเวณขั้วแคโทด ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm 15 นาที่ หาได้จาก

$$\sigma = K V_m = (3462.86)(5.4 \times 10^3) = 19.8 \text{ C/m}^3$$

เมื่อทำการคำนวณหาความหนาแน่นของประจุค้างจะได้ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.2



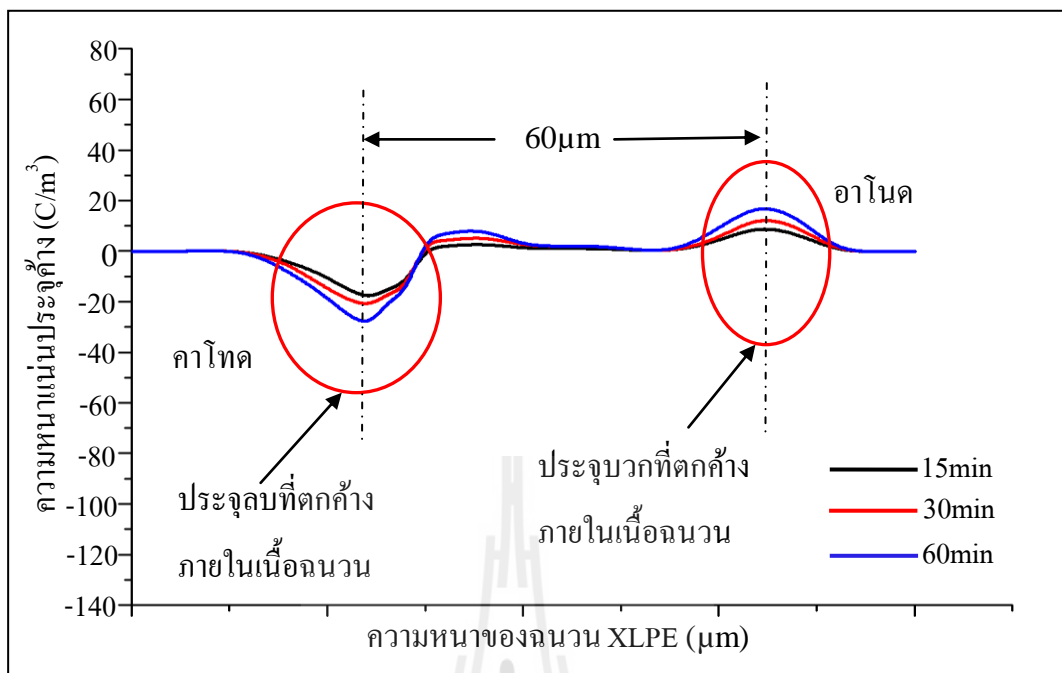
รูปที่ 5.2 การกระจายตัวของประจุค้ำภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25 kV/mm

5.3 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำในเนื้อฉนวนXLPE ใหม่

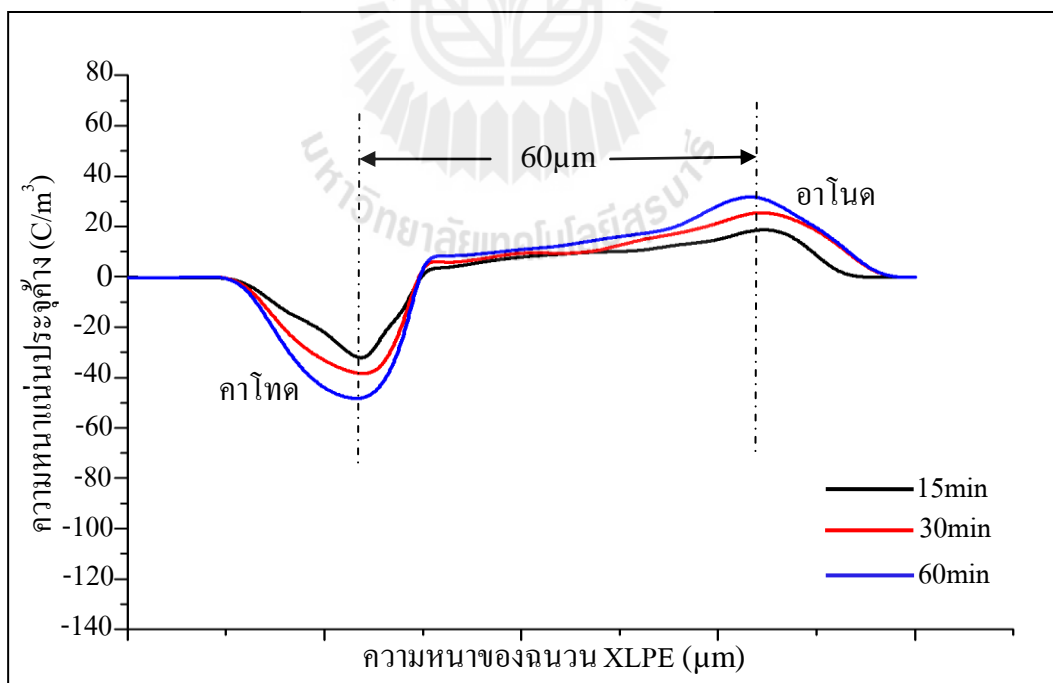
เป็นการศึกษา ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำในเนื้อฉนวนXLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยแบ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ ศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

5.3.1 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ใหม่

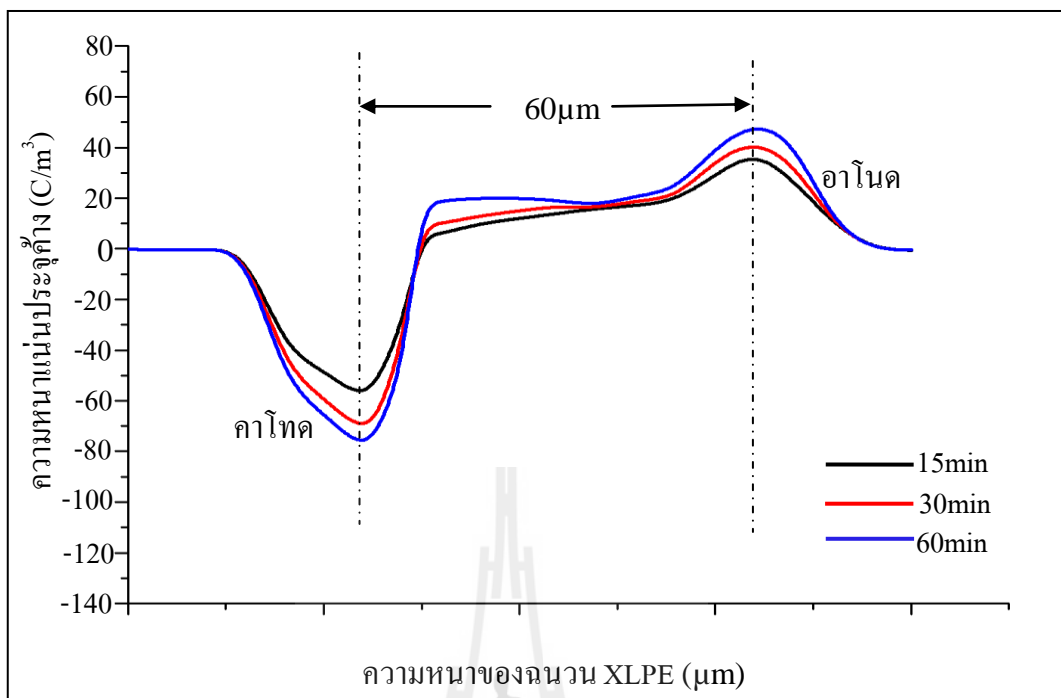
ความเครียดทางไฟฟ้าจะถูกป้อนให้กับฉนวน XLPE ผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการจำลองสถานะความคงทนของฉนวนที่สัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำ โดยการทดสอบจะป้อนแรงดันสนามไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ เป็นเวลา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำดังนี้



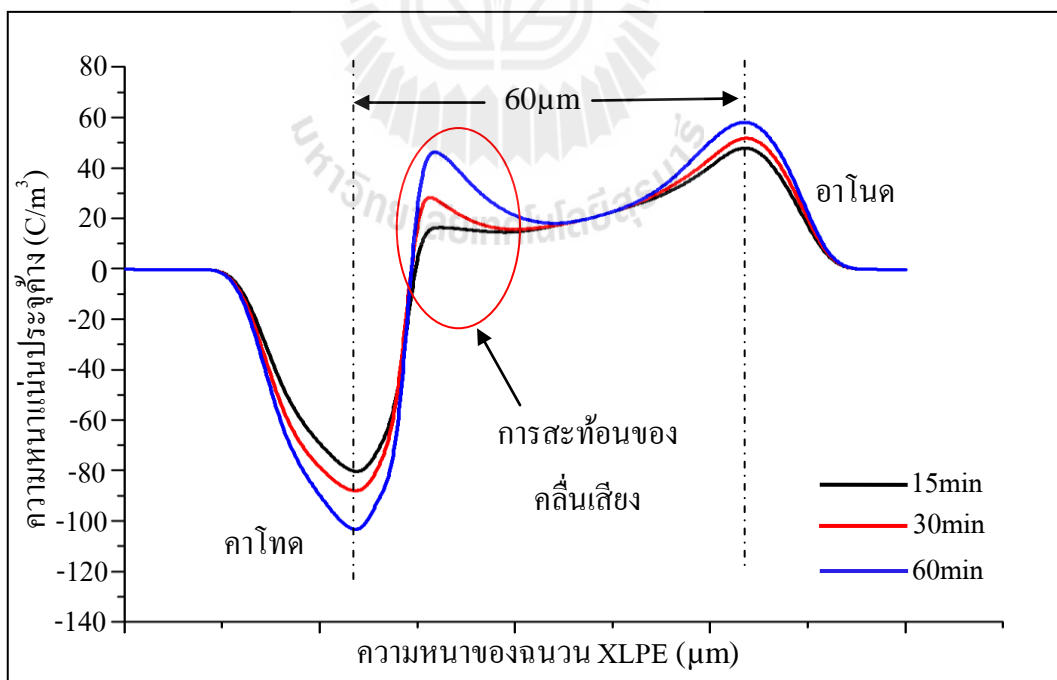
รูปที่ 5.3 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E=25$ kV/mm



รูปที่ 5.4 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E=50$ kV/mm

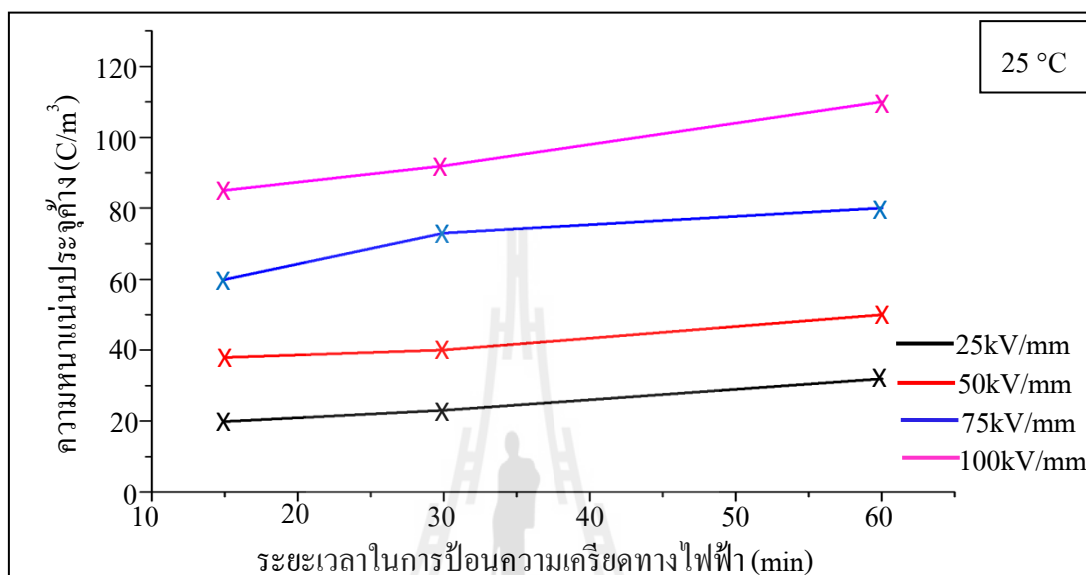


รูปที่ 5.5 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E=75$ kV/mm



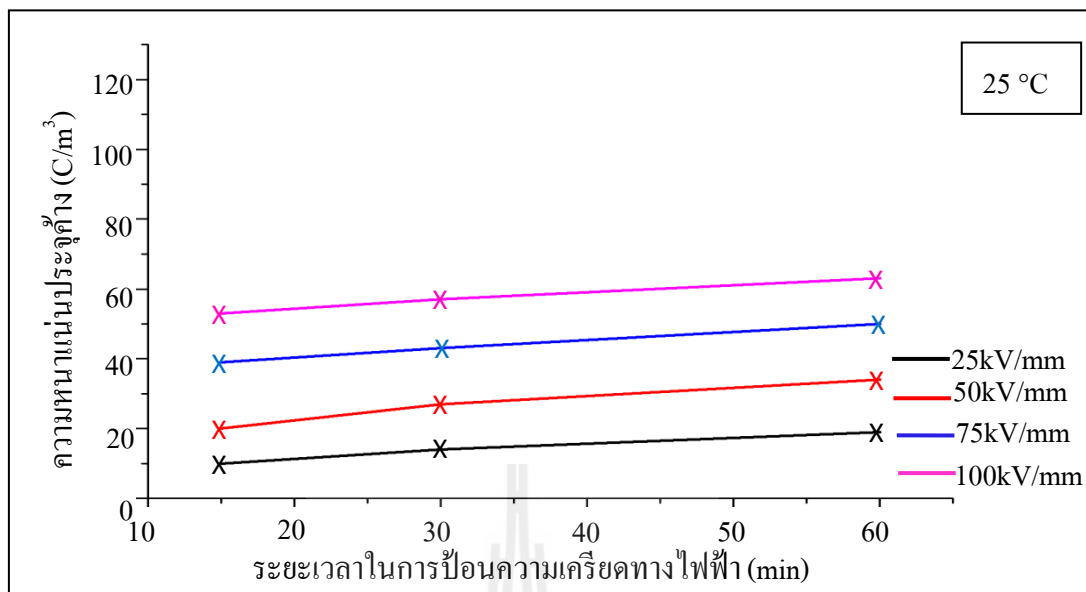
รูปที่ 5.6 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ $E=100$ kV/mm

จากการศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ดังแสดงใน รูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.6 สามารถสรุปผลของ ขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างดังนี้



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโทด ของฉนวน XLPE ใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วอานของฉนวน XLPE ใหม่

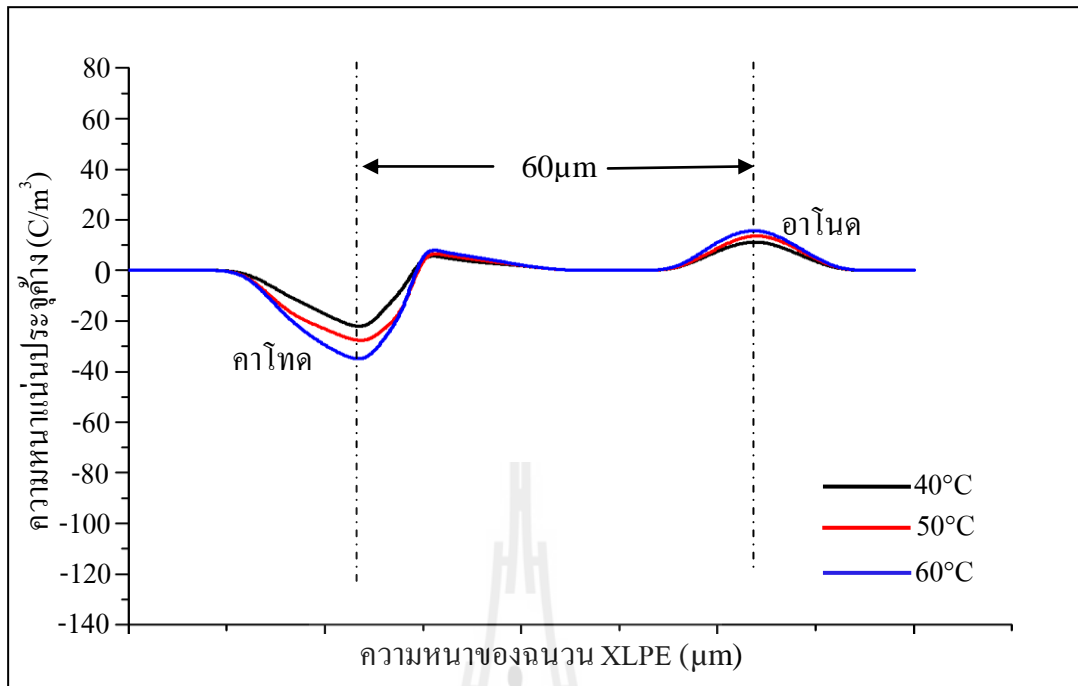
การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า สามารถสรุปผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างได้ดังนี้

1. ความหนาแน่นของประจุค้าง ณ บริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว เพิ่มขึ้นตามขนาดของความเครียดทางไฟฟ้าและระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าที่นานจะส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างที่เพิ่มขึ้น

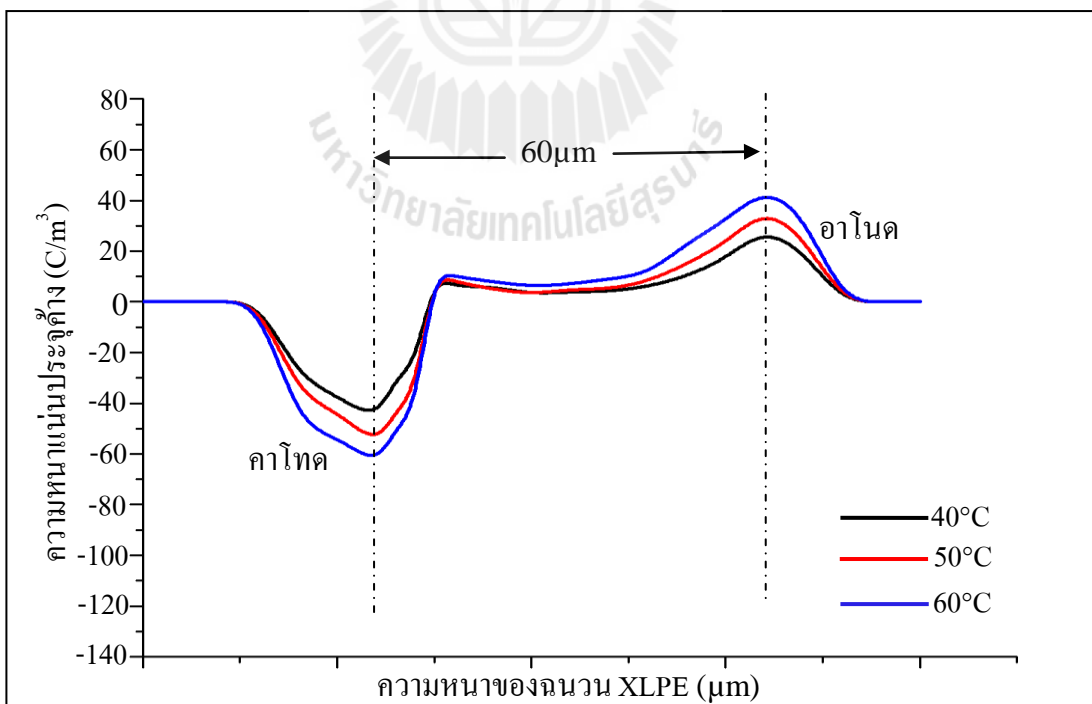
2. การตกค้างของประจุในเนื้อฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้า เกิดการตกลงของประจุลบมากกว่าการตกค้างของประจุบวก

5.3.2 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ใหม่

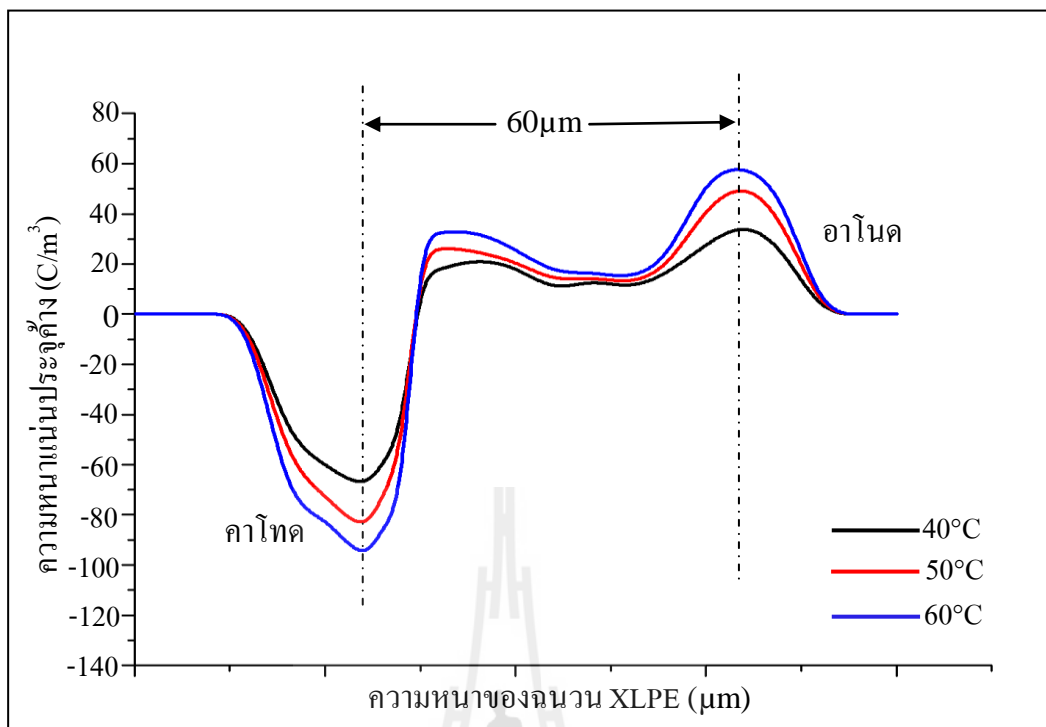
เป็นการศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง เป็นการจำลองสถานะสภาวะพหุความเครียด โดยการทดสอบจะป้อนแรงดันสนามไฟฟ้า 25 -100 kV/mm และระยะเวลาที่แรงดันไฟฟ้าเป็น เวลา 60 นาที โดยค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่ และกำหนดค่าความร้อนที่ 40°C 50 °C และ 60 °C มีลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างดังนี้



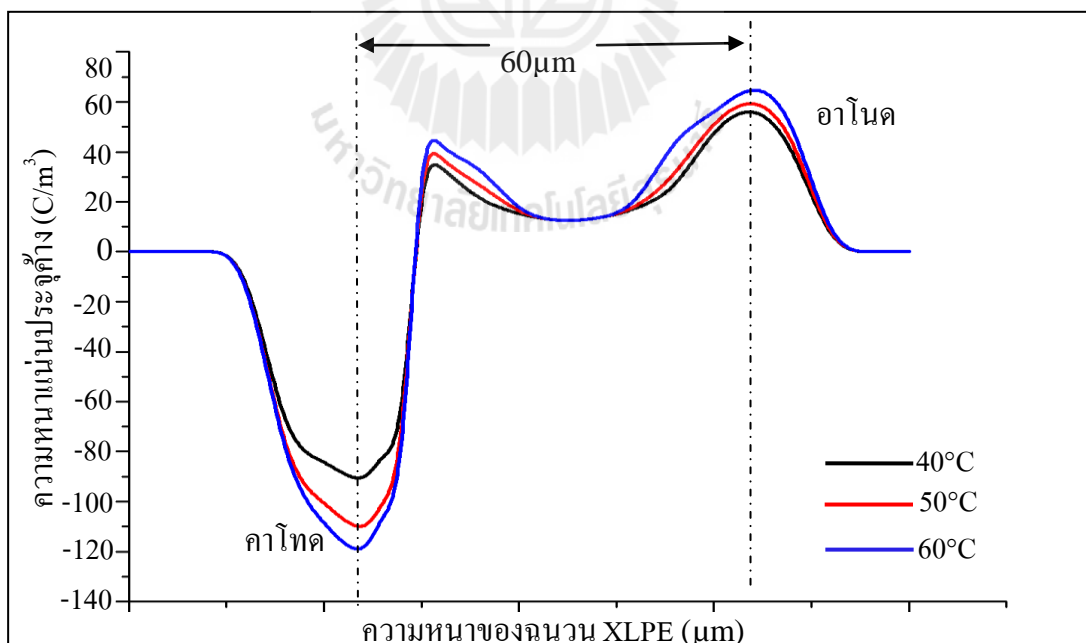
รูปที่ 5.9 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ 25 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.10 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ 50 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

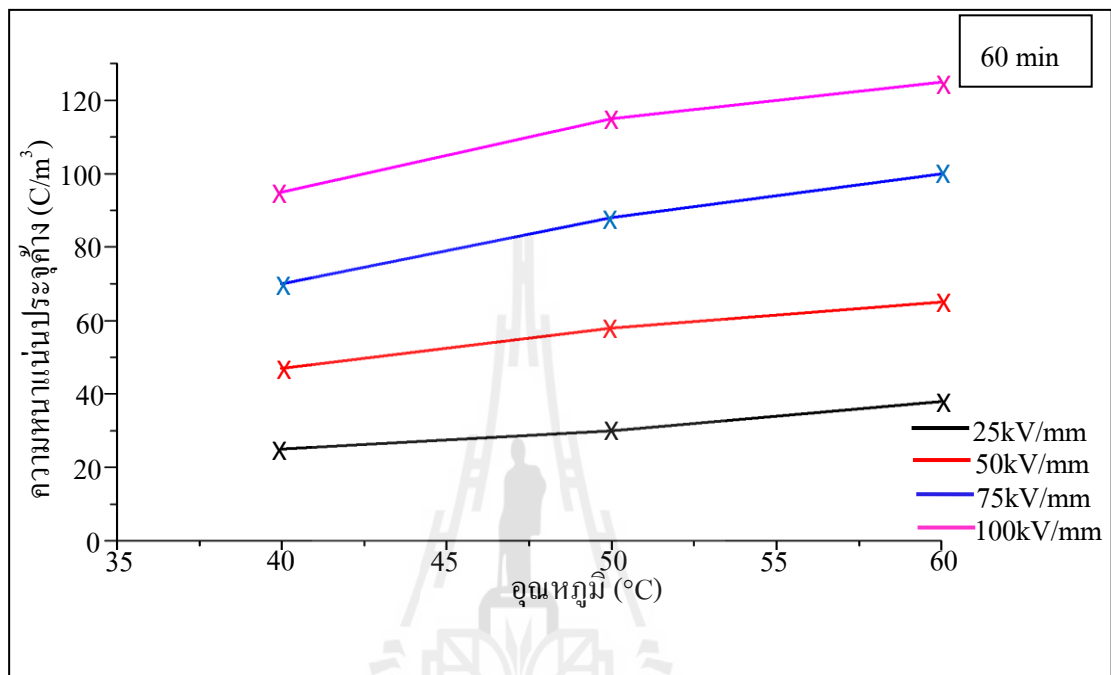


รูปที่ 5.11 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ 75 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

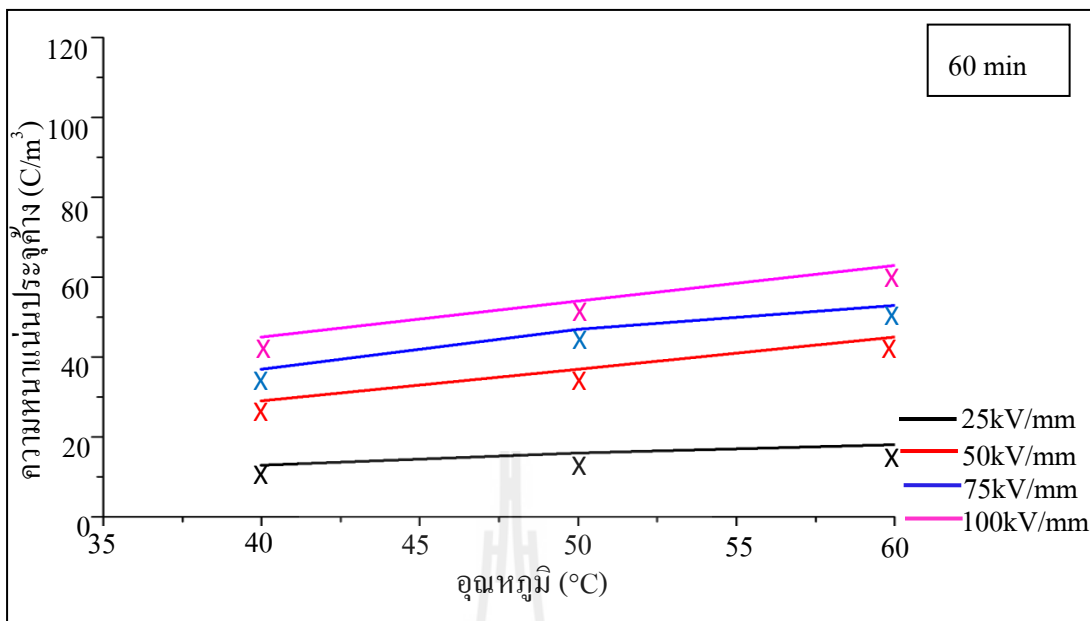


รูปที่ 5.12 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ 100 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

จากการศึกษา ขนาดความเครียด ทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.12 สามารถสรุปผลของ ขนาดความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุค้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.13 -5.14



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ชั่วคราวของฉนวนXLPE ใหม่



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วอานโคดของฉนวน XLPE ใหม่

จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างพบว่าขนาดของความเครียดทางไฟฟ้าอุณหภูมิที่มีบทบาทสำคัญต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

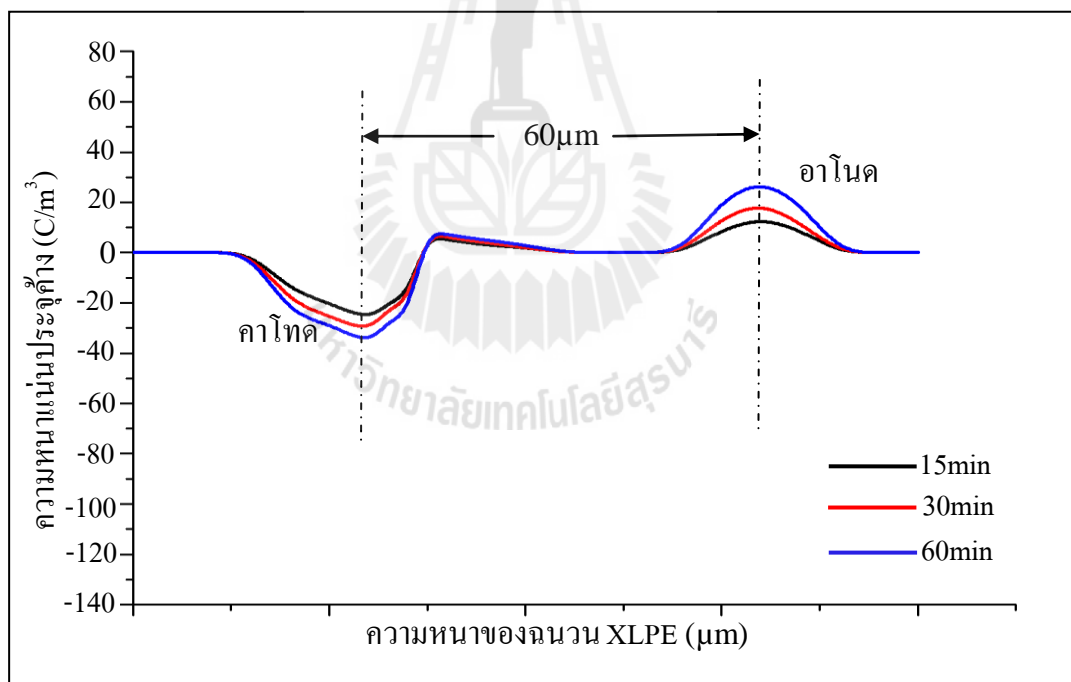
- เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของประจุค้างในเนื้อฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวกับความหนาแน่นของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิพบว่าในกรณีการทดสอบภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิจึงมีความหนาแน่นของประจุค้างมากกว่า ดังนั้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิทำให้เกิดการตกค้างของประจุค้างมากขึ้น
- จากลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง พบว่าที่อุณหภูมิที่สูงทำให้ความหนาแน่นของประจุค้างเพิ่มขึ้น

5.4 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในเนื้อฉนวนXLPE ที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลา12 ปี

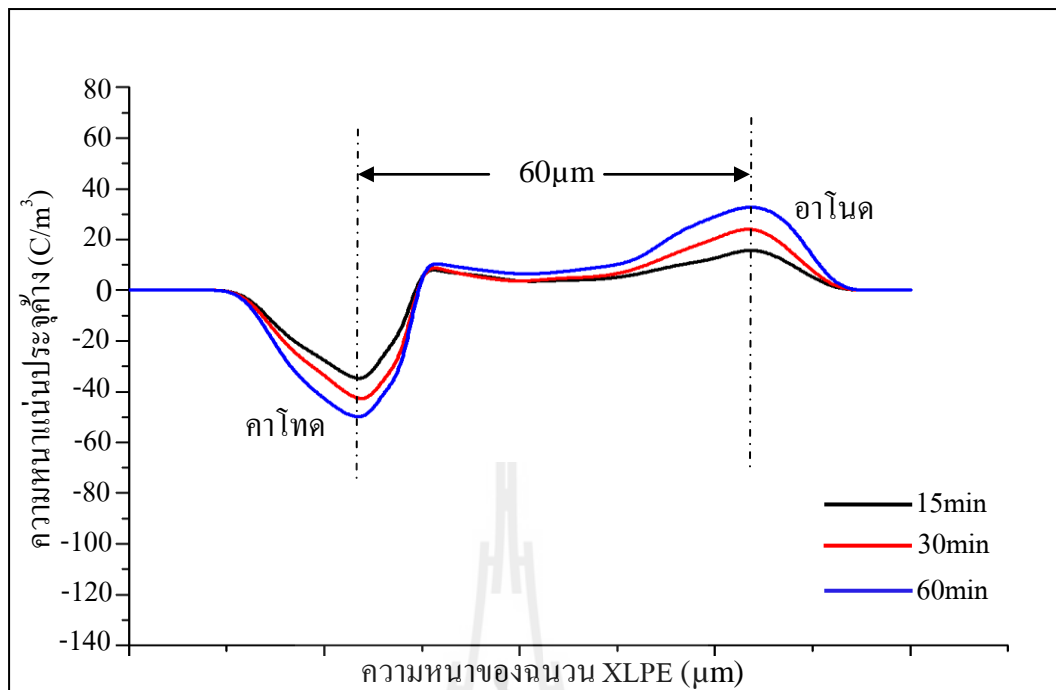
เป็นการศึกษาผลของอายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง โดยแบ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ ศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ เช่นเดียวกับฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

5.4.1 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นระยะเวลา12 ปี

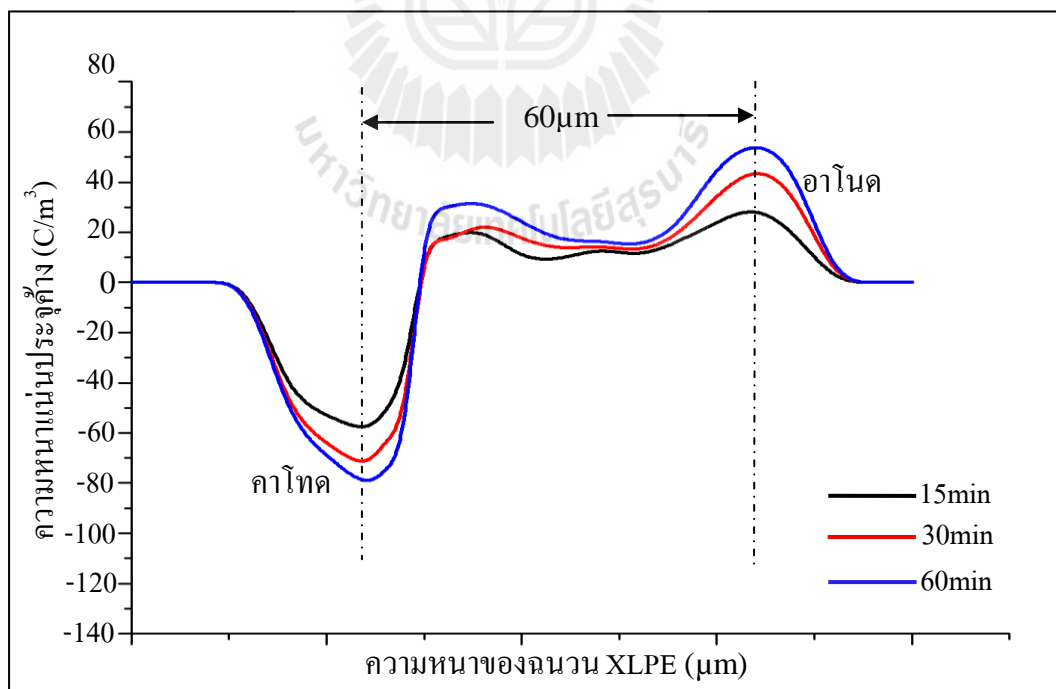
การทดลองมุ่งเน้นศึกษาผลของอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า การทดสอบจะป้อนค่าความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25-100 kV/mm เป็นเวลา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที มีลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างนี้



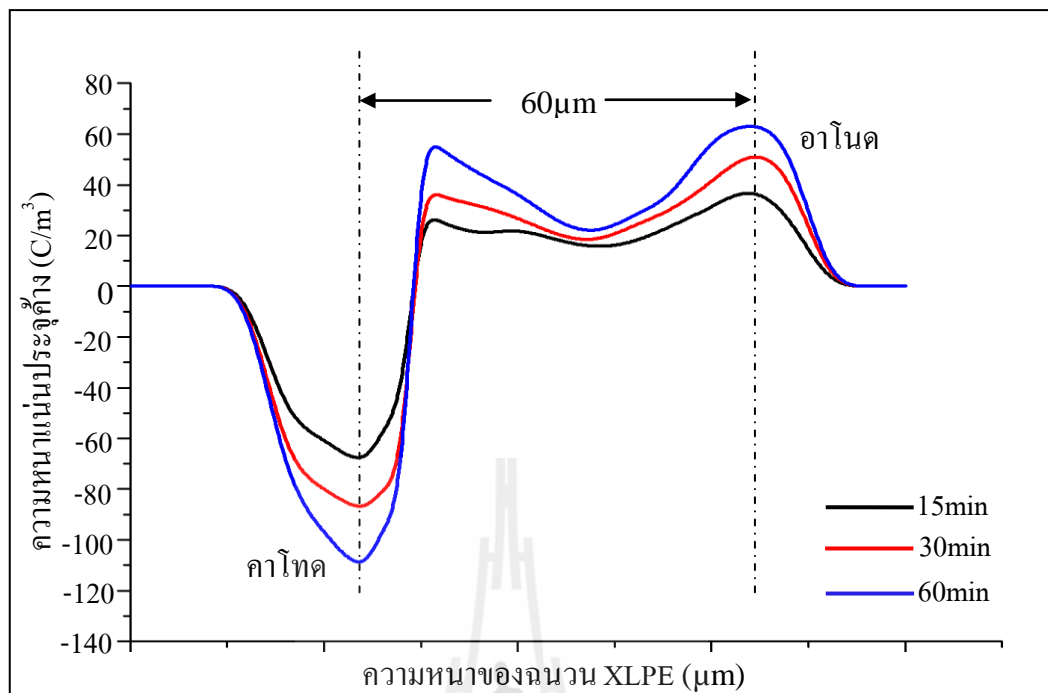
รูปที่ 5.15 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ที่ 25kV/mm



รูปที่ 5.16 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ที่ 50kV/mm

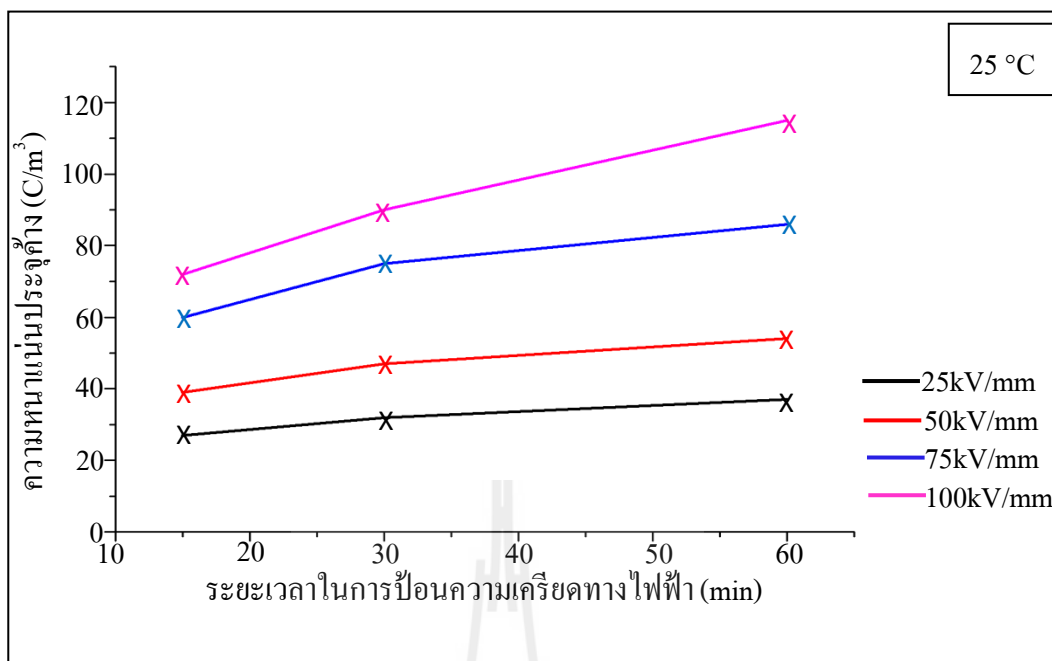


รูปที่ 5.17 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ที่ 75kV/mm

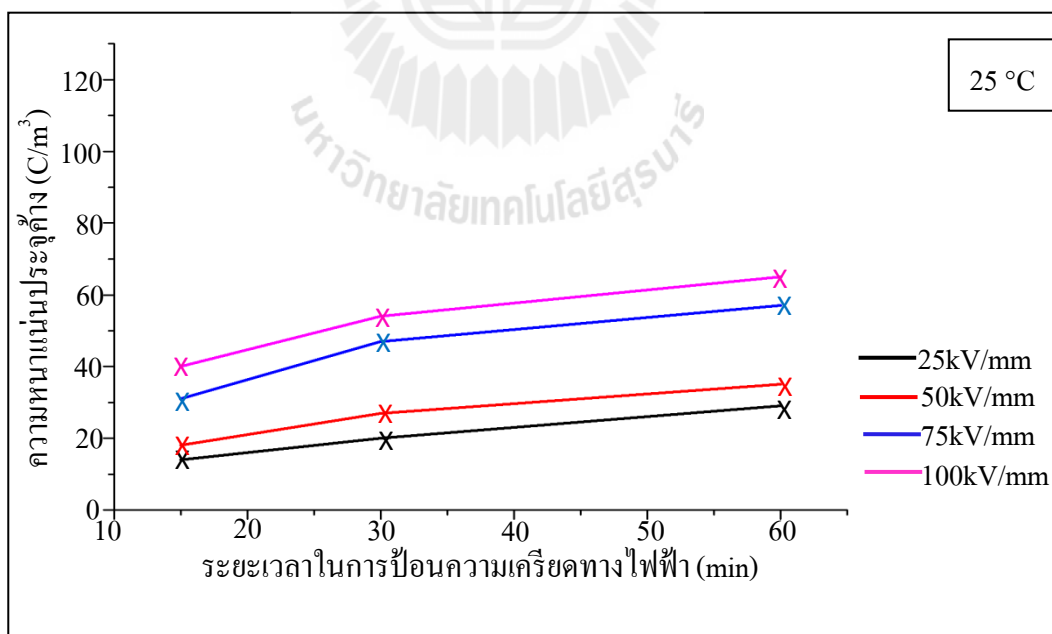


รูปที่ 5.18 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ที่ 100kV/mm

จากการศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะ 12 ปี ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.18 สามารถกล่าวได้ว่าขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุค้างดังแสดงในรูปความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของประจุต่อขนาดความเครียดทางไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วแอนอดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี

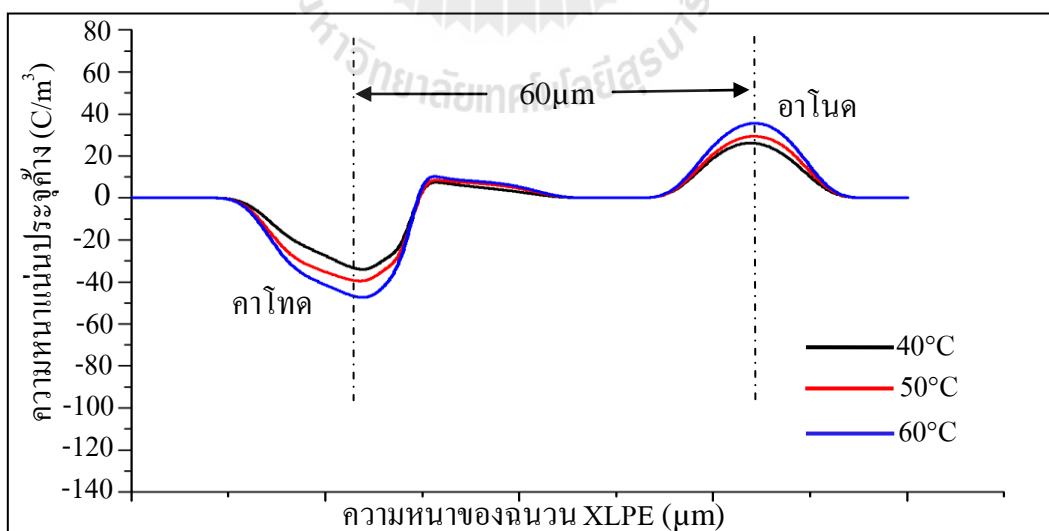
จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี สามารถสรุปผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างดังนี้

1. ภายใต้อายุการใช้งานที่ค่าเดียวกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นของประจุค้างระหว่างฉนวน XLPE ใหม่ กับฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี พบว่าฉนวนที่ใช้งาน 12 ปี มีความหนาแน่นของประจุค้างที่มากกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่า อายุการใช้งานทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุมากยิ่งขึ้น

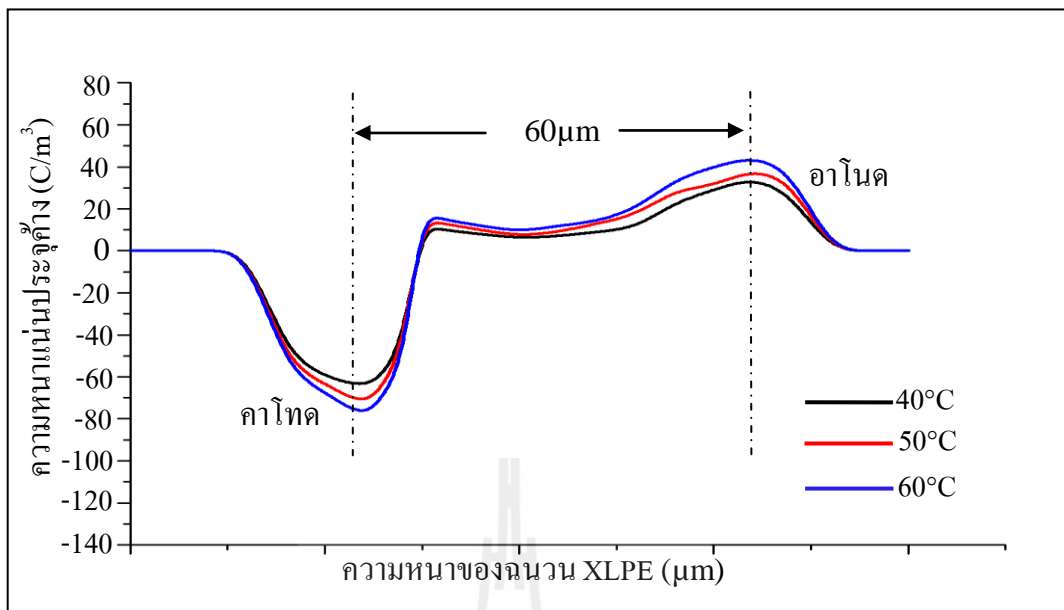
2. ระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างมากขึ้น และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของประจุจากทั้ง 2 ขั้วอิเล็กโทรดพบว่าความหนาแน่นของประจุค้างของประจุลบจะเกิดการตกค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวนมากกว่าประจุบวก

5.4.2 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้อายุการใช้งานและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นระยะเวลา 12 ปี

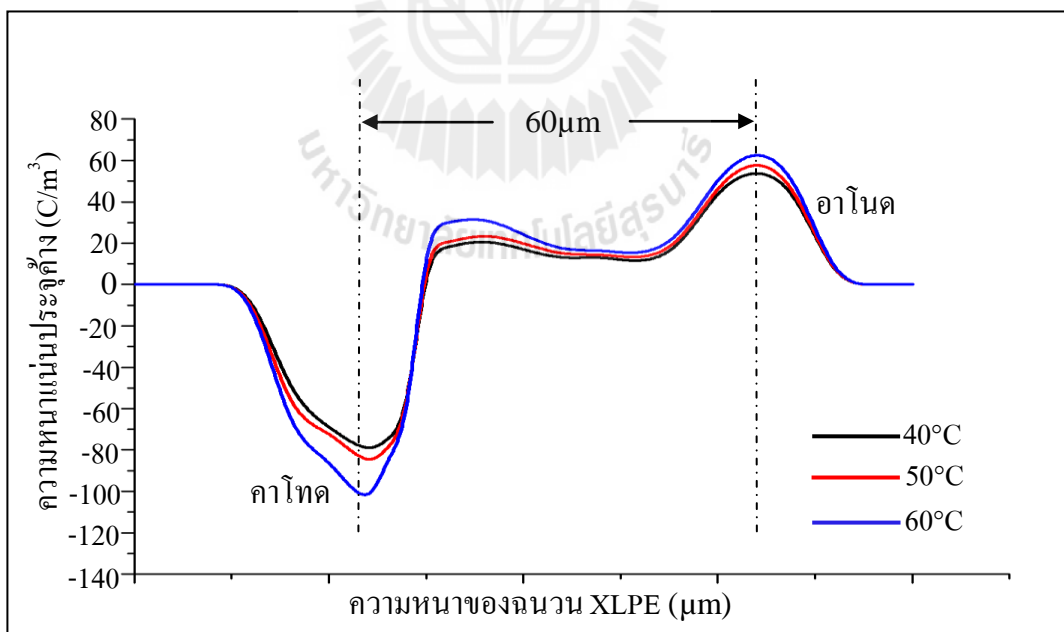
การทดลองมุ่งเน้นศึกษาผลของอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้อายุการใช้งานที่ค่าเดียวกัน และอุณหภูมิ เป็นการจำลอง สภาพะพุดความเครียด โดยการทดสอบจะป้อน ความเครียดทาง ไฟฟ้าและ อุณหภูมิ การทดสอบจะป้อนค่าความเครียดทางไฟฟ้าที่ 25-100 kV/mm และอุณหภูมิที่ 40°C 50 °C และ 60 °C เป็นเวลา 60 นาที มีลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างดังนี้



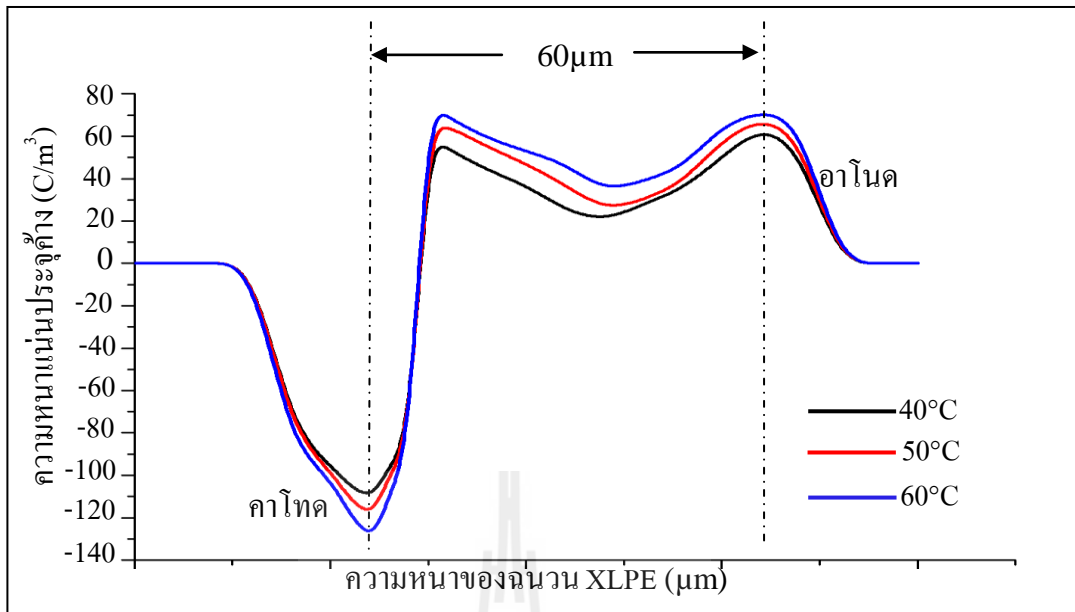
รูปที่ 5.21 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้อายุการใช้งานที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.22 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

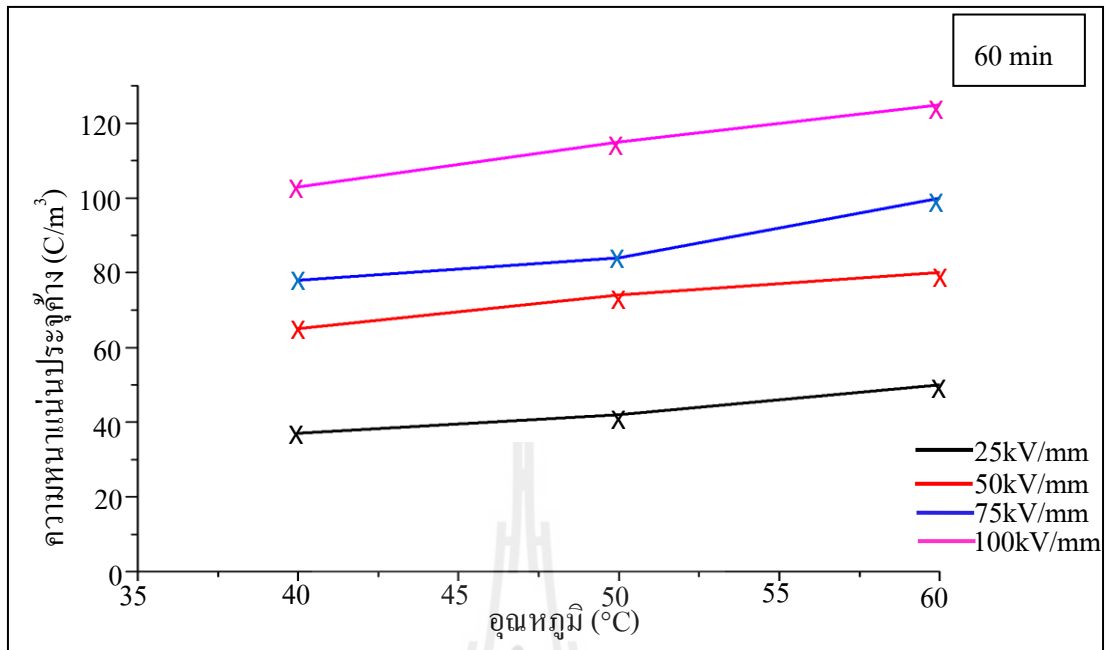


รูปที่ 5.23 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

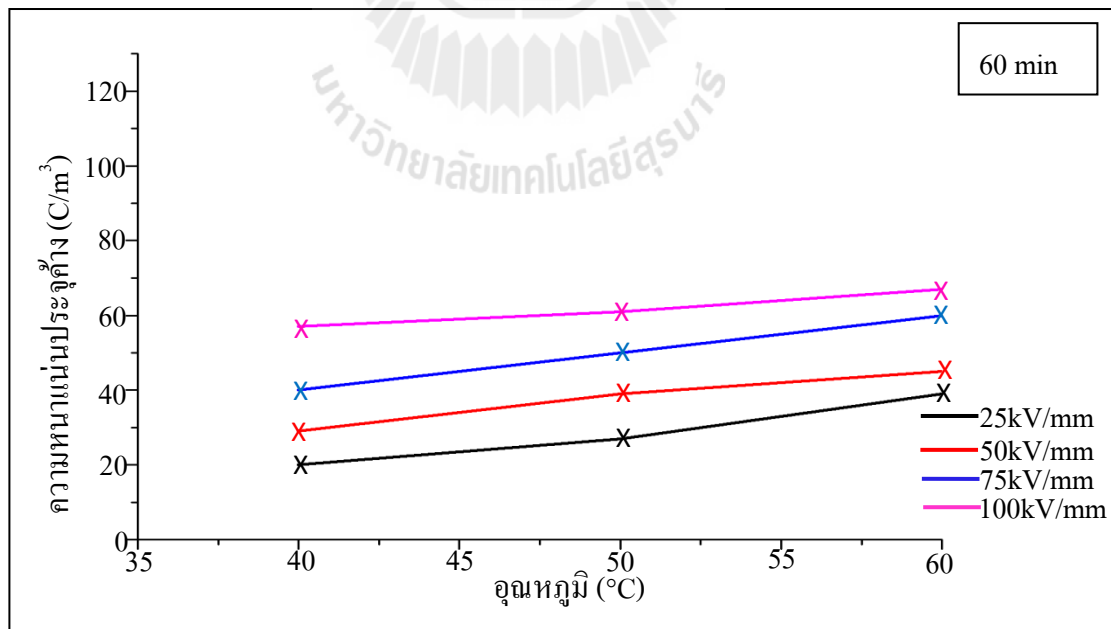


รูปที่ 5.24 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี ภายใต้ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

จากการศึกษา ขนาดความเครียด ทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ในเนื้อจนวน XLPE ที่ใช้งานมาแล้ว 12 ปี สามารถสรุปผลของ ขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุค้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.21 -5.24



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วแอนอดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้ำงของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี สามารถสรุปผลของ ขนาดความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อ ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงดังนี้

1. ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของ ฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี พบว่าความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิด ความหนาแน่นของประจุค้ำงที่เพิ่มมากขึ้น

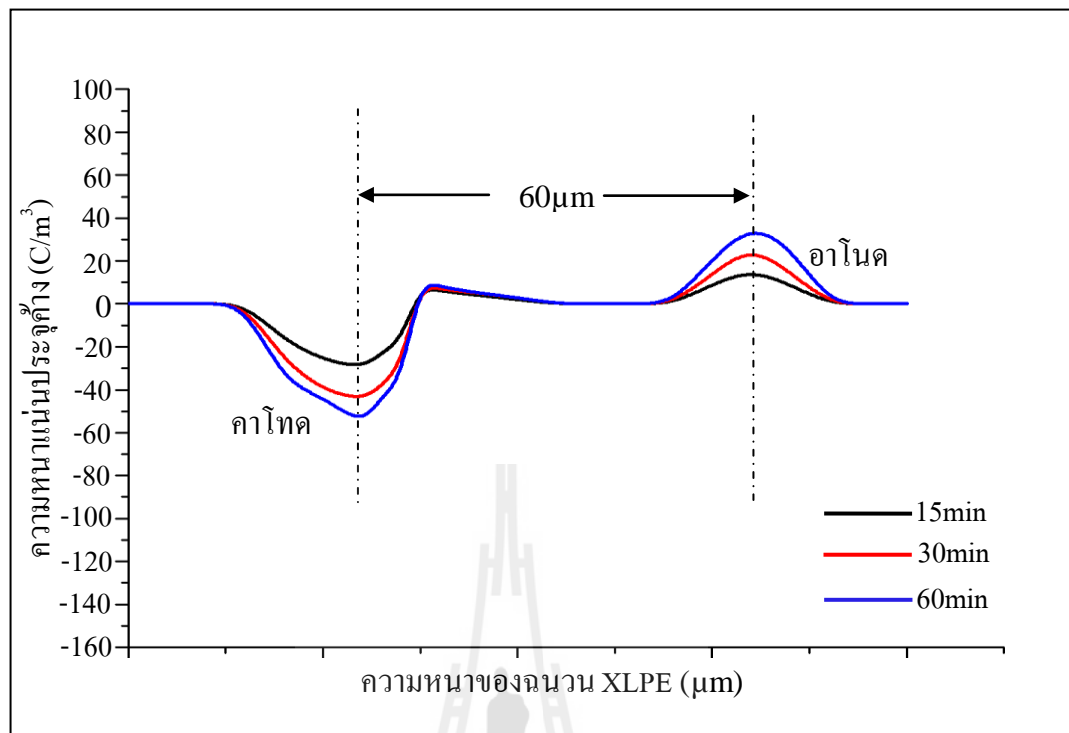
2. จากความหนาแน่นของประจุค้ำง ณ ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว พบว่าความหนาแน่นของ ประจุค้ำงลบ (ขั้วคาโทด) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของประจุมากกว่าประจุค้ำงบวก

5.5 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงในเนื้อฉนวนXLPE ที่ผ่านการใช้งาน มาเป็นระยะเวลา15 ปี

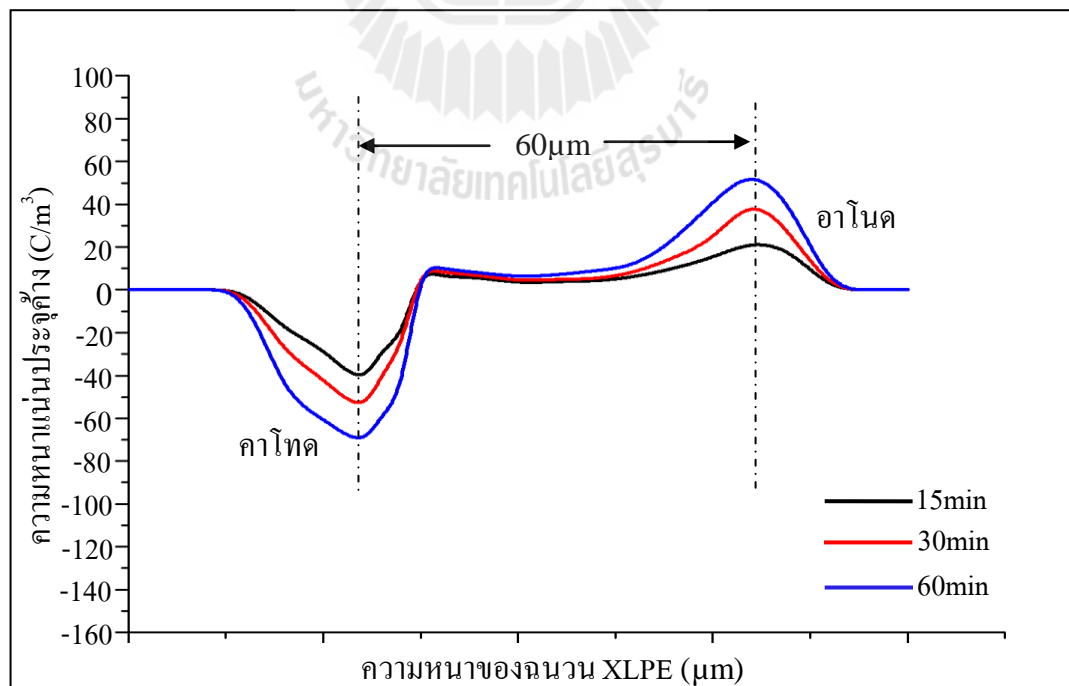
เป็นการศึกษาผลของอายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของ ประจุค้ำงเพื่อยืนยันผลของอายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE โดยแบ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา เป็น 2 กรณี คือ ศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และศึกษาผลของขนาดความเครียดทาง ไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

5.5.1 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นระยะเวลา15 ปี

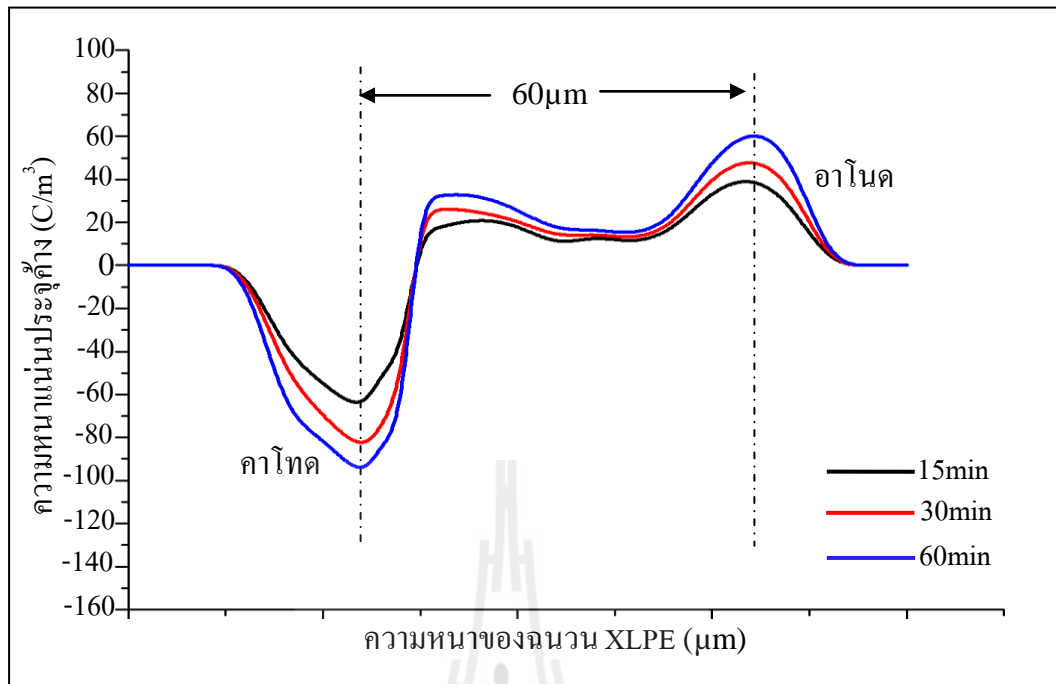
การทดลองมุ่งเน้นศึกษาผลของอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการ กระจายตัวของประจุค้ำง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า การทดสอบจะป้อนค่าความเครียดทางไฟฟ้า ที่ 25-100 kV/mm เป็นเวลา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที มีลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงนี้



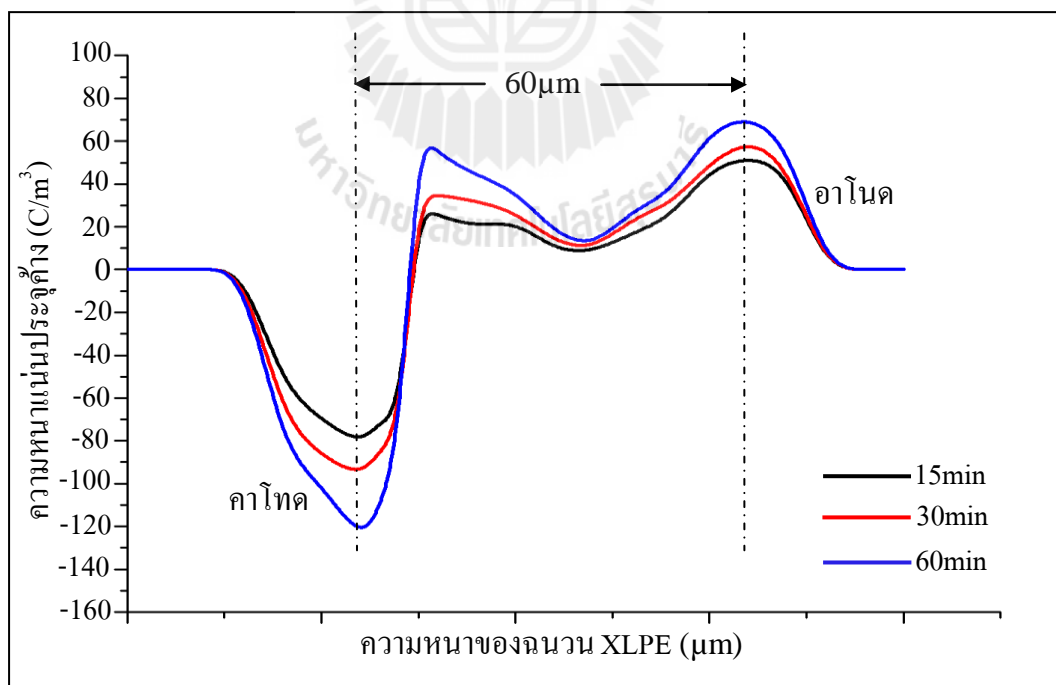
รูปที่ 5.27 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 25 kV/mm



รูปที่ 5.28 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 50 kV/mm

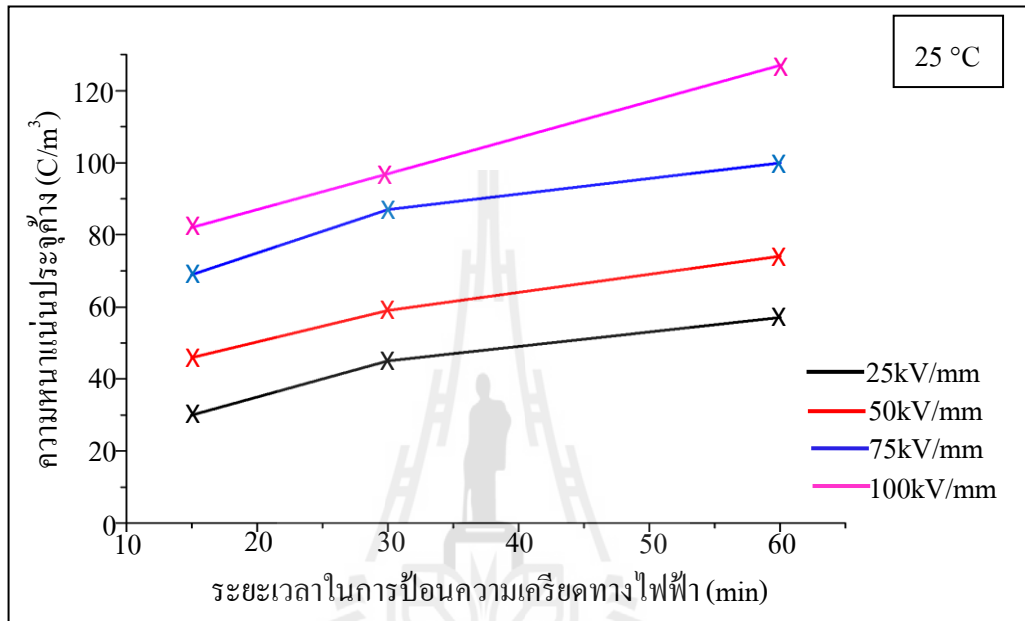


รูปที่ 5.29 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 75 kV/mm

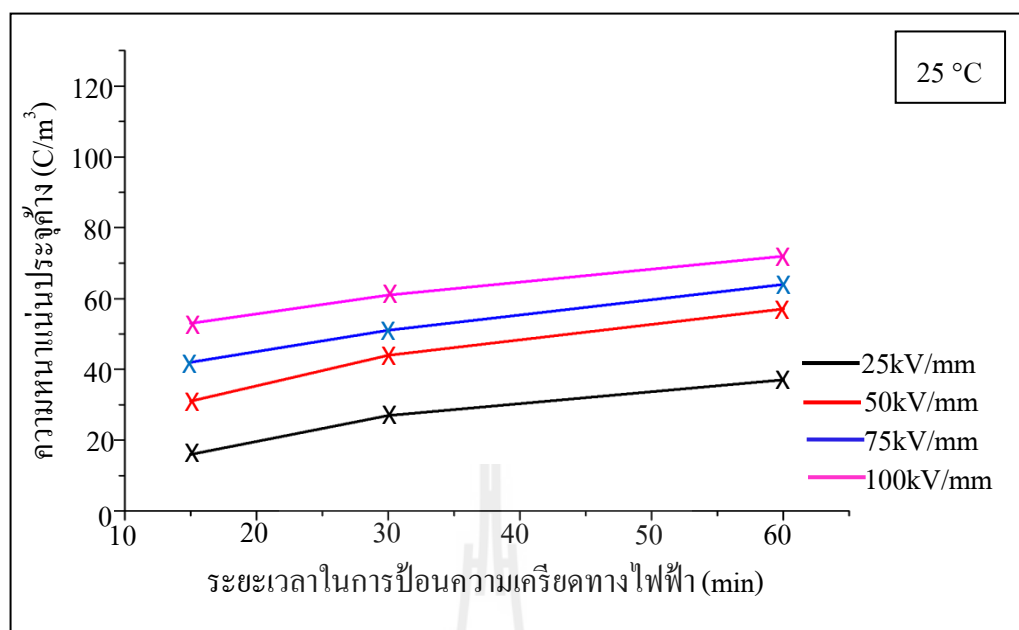


รูปที่ 5.30 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ที่ 100 kV/mm

จากการศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะ 15 ปี สามารถกล่าวได้ว่าขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุค้างดังแสดงในรูปความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของประจุต่อขนาดความเครียดทางไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วไอโนคของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี สามารถสรุปผลของ ขนาดความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างดังนี้

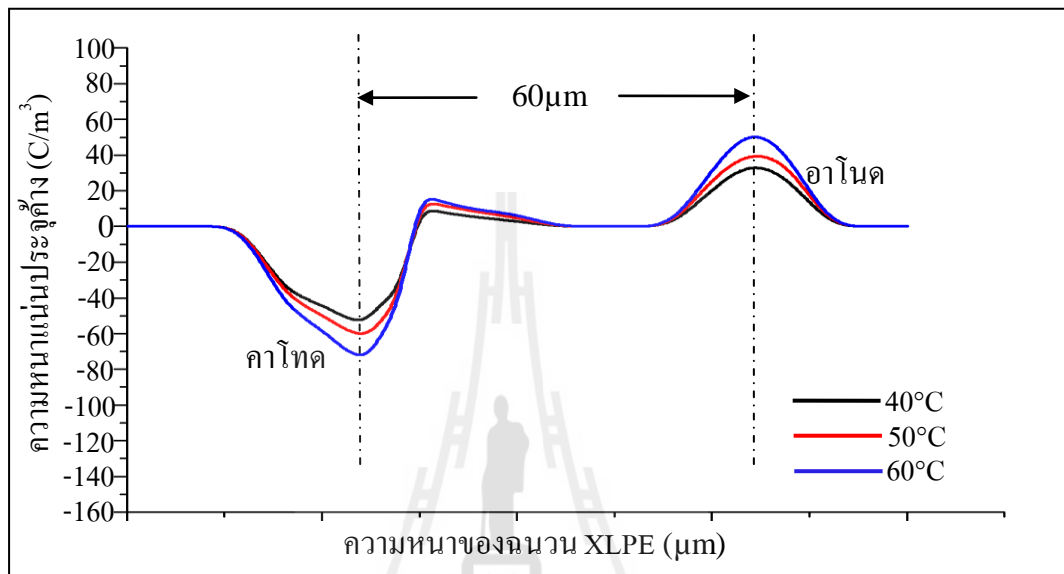
1. ภายใต้ความความเครียดทางไฟฟ้า พบว่าลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี มีความหนาแน่นของประจุค้างเพิ่มขึ้นตามขนาดความเครียดทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูง ๆ (100kV/mm) อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของประจุค้างเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

2. ระยะเวลาในการป้อนความเครียดทางไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างมากขึ้น โดยที่ประจุลบจะเกิดการตกค้างอยู่ในเนื้อฉนวนมากกว่าประจุบวก ดังจะสังเกตได้จากรูปที่ 5.31 และรูปที่ 5.32

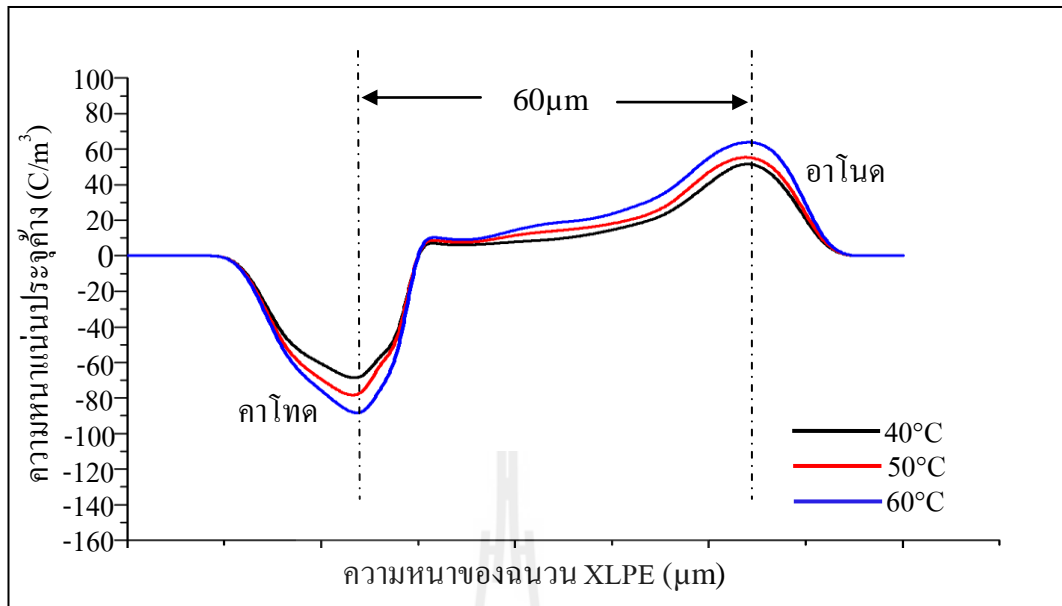
5.5.2 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นระยะเวลา 15 ปี

การทดลองมุ่งเน้นศึกษาผลของอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิ เป็นการจำลอง สภาพแวดล้อมความเครียด โดยการทดสอบจะป้อน ความเครียดทาง ไฟฟ้าและ อุณหภูมิ เพื่อเป็นการยืนยันผล

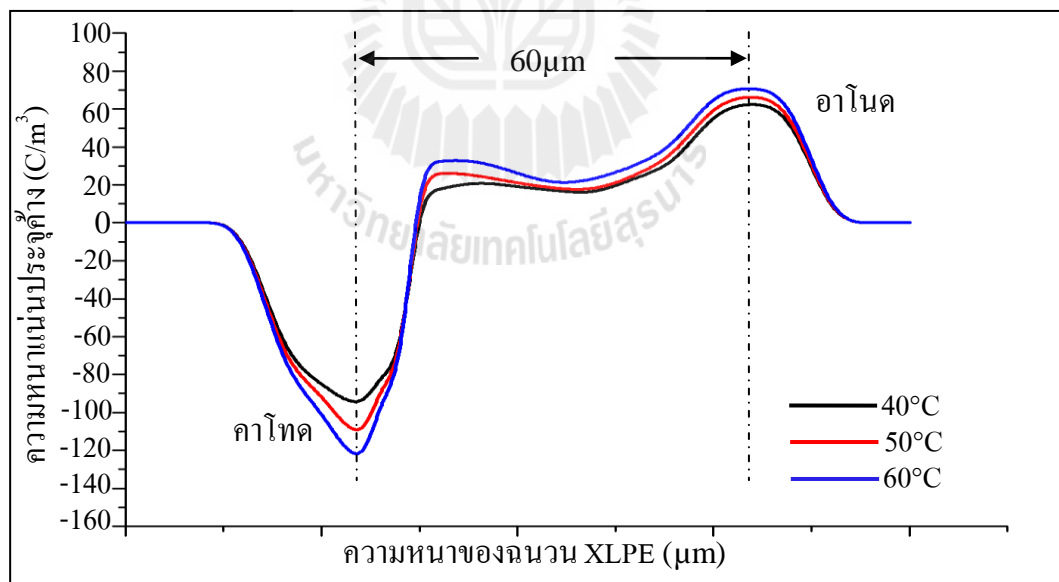
ของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ดังที่ได้แสดงไว้ใน
 จนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานในระบบเป็นระยะเวลา 12 ปี การทดสอบจะป้อนค่าความเครียดทาง
 ไฟฟ้าที่ 25-100 kV/mm และอุณหภูมิที่ 40°C 50 °C และ 60 °C เป็นเวลา 60 นาที มีลักษณะการ
 กระจายตัวของประจุค้างดังนี้



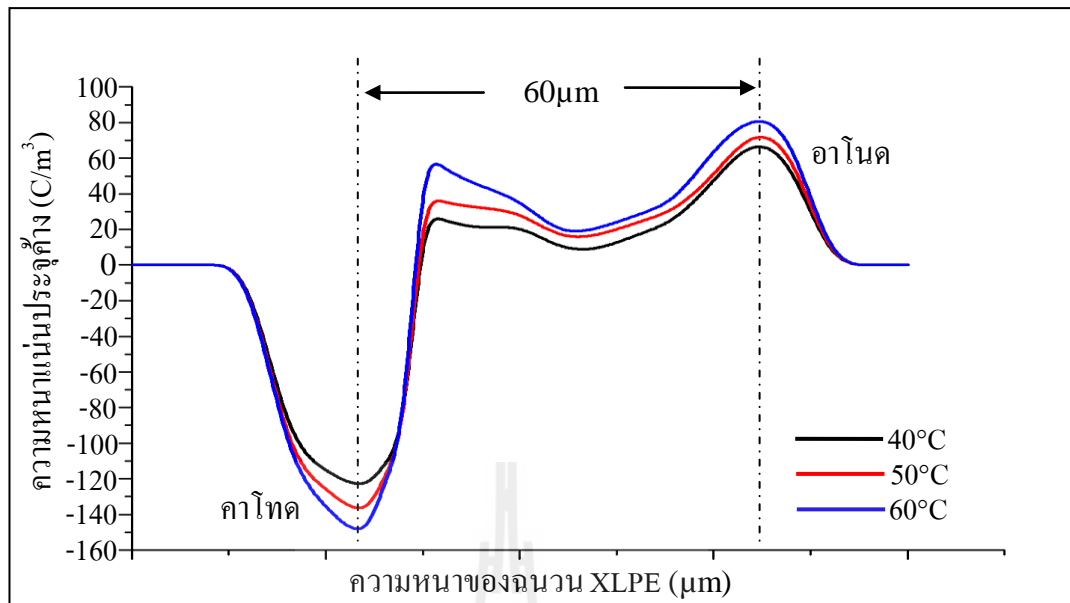
รูปที่ 5.33 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้
 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง



รูปที่ 5.34 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

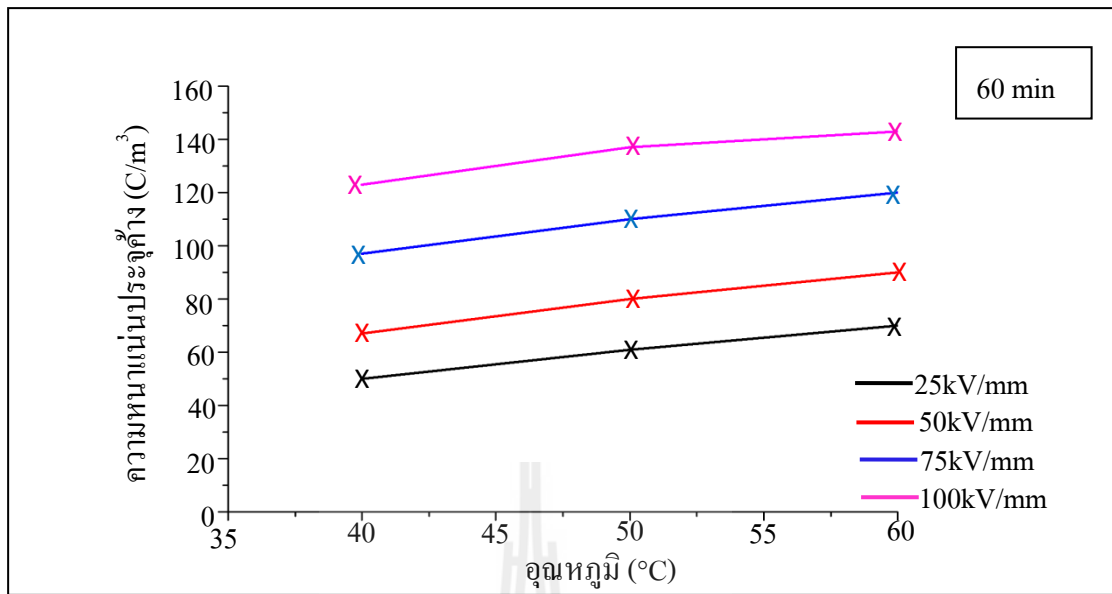


รูปที่ 5.35 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

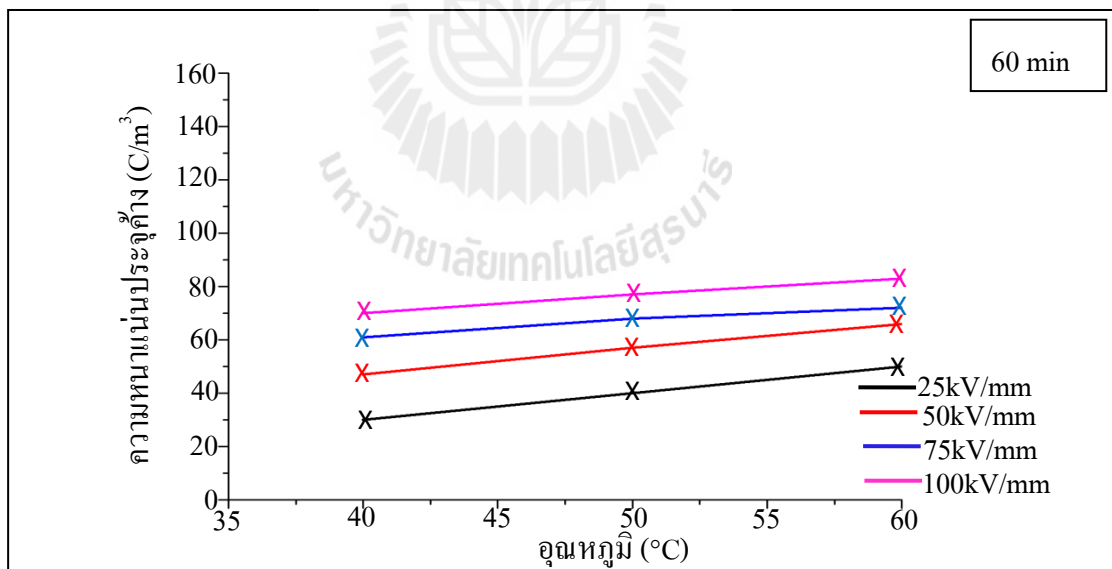


รูปที่ 5.36 ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี ภายใต้ 100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

จากการศึกษา ขนาดความเครียด ทาง ไฟฟ้าและอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ในเนื้อฉนวน XLPE ที่ใช้งานมาแล้ว 15 ปี สามารถสรุปผลของ ขนาดความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุค้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.37 และรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วคาโทดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้างที่ขั้วอโนดของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี

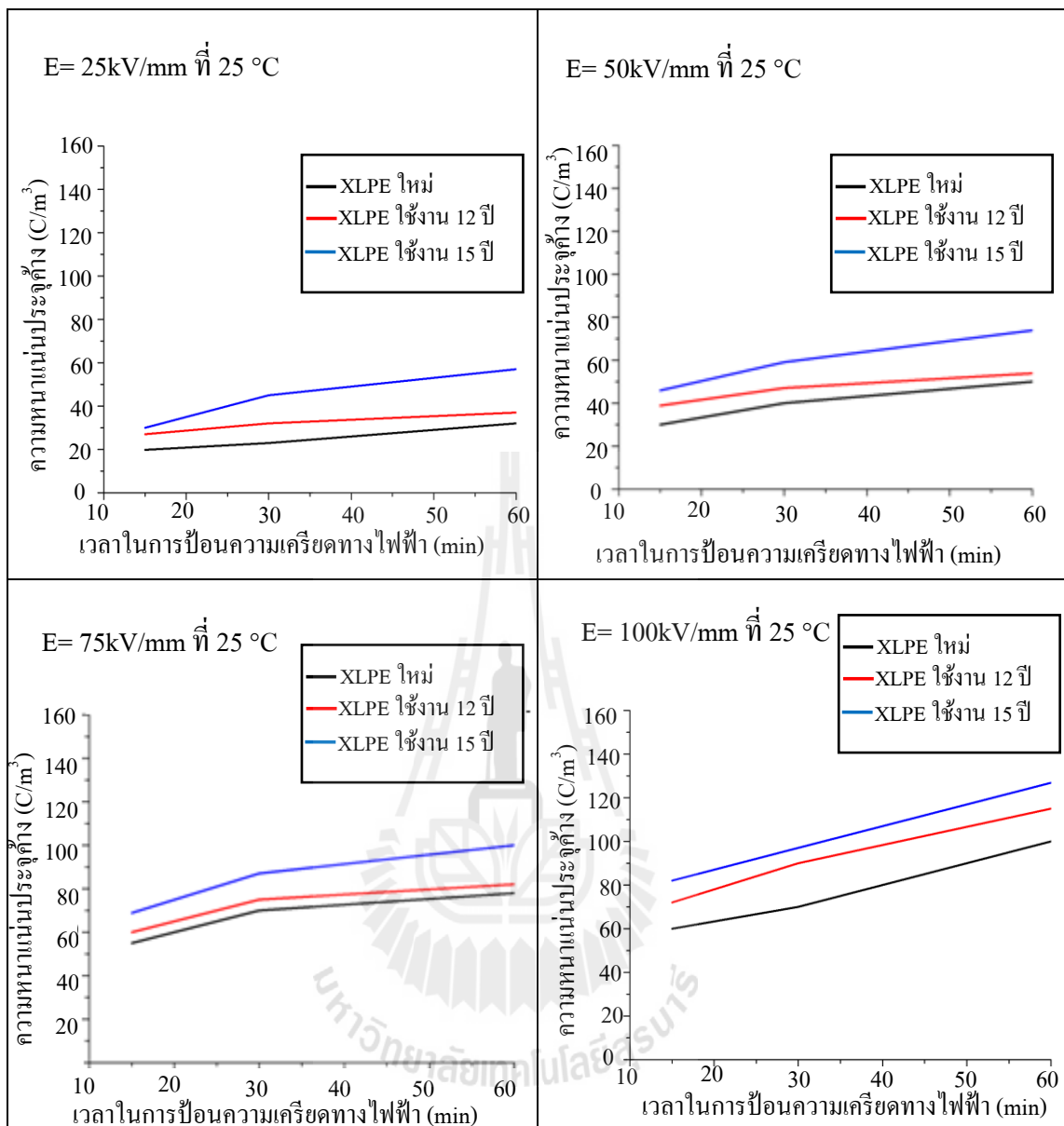
จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้ำงของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี สามารถสรุปผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงดังนี้

1.ขนาดความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุค้ำงที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นของประจุค้ำงจากผลของความเครียดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับฉนวน XLPE ใหม่ กับ ฉนวน XLPE ที่ใช้งาน 12 ปี

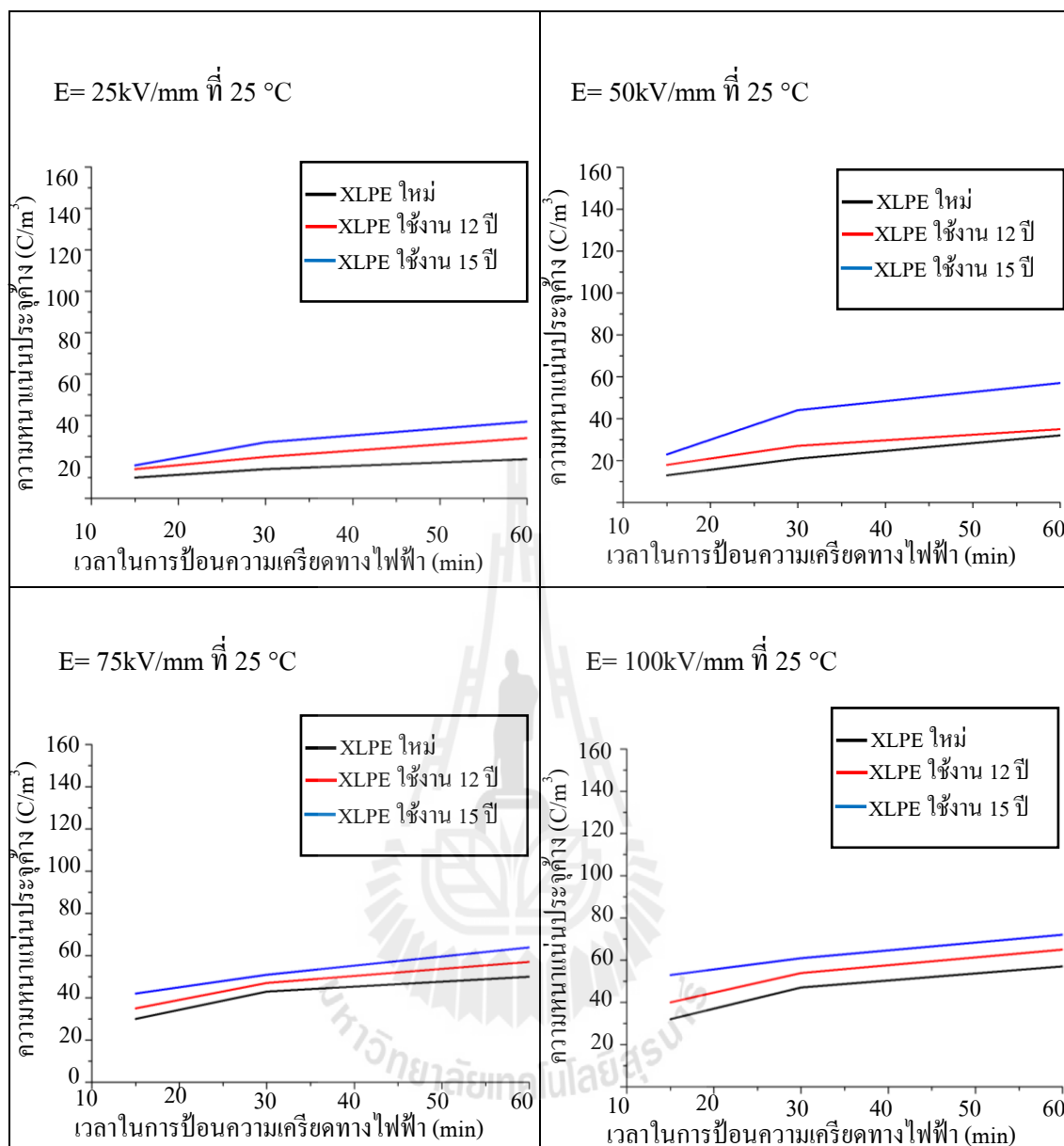
2. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของประจุค้ำงที่ขั้วทั้ง 2 ขั้ว พบว่าความหนาแน่นของประจุค้ำงที่ขั้วคาโทดคือประจุลบ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของประจุค้ำงมากกว่าความหนาแน่นของประจุค้ำงที่ขั้วแอนอดคือประจุบวก

จากลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงจากวัสดุฉนวน XLPE ที่แตกต่างกัน 3 ชนิดประกอบด้วย ฉนวน XLPE ใหม่ ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 12 ปี และ ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 15 ปี ทดสอบลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและทดสอบลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นของประจุค้ำงที่ค่าความเครียดทางไฟฟ้าเท่ากันของฉนวนทั้ง 3 ชนิด มีความหนาแน่นของประจุค้ำงดังนี้ ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 15 ปี ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 12 ปี และฉนวน XLPE ใหม่ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.39 และในรูปที่ 5.40 ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอายุการใช้งานของฉนวน XLPE และความเครียดทางไฟฟ้า มีส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้ำงมากขึ้น



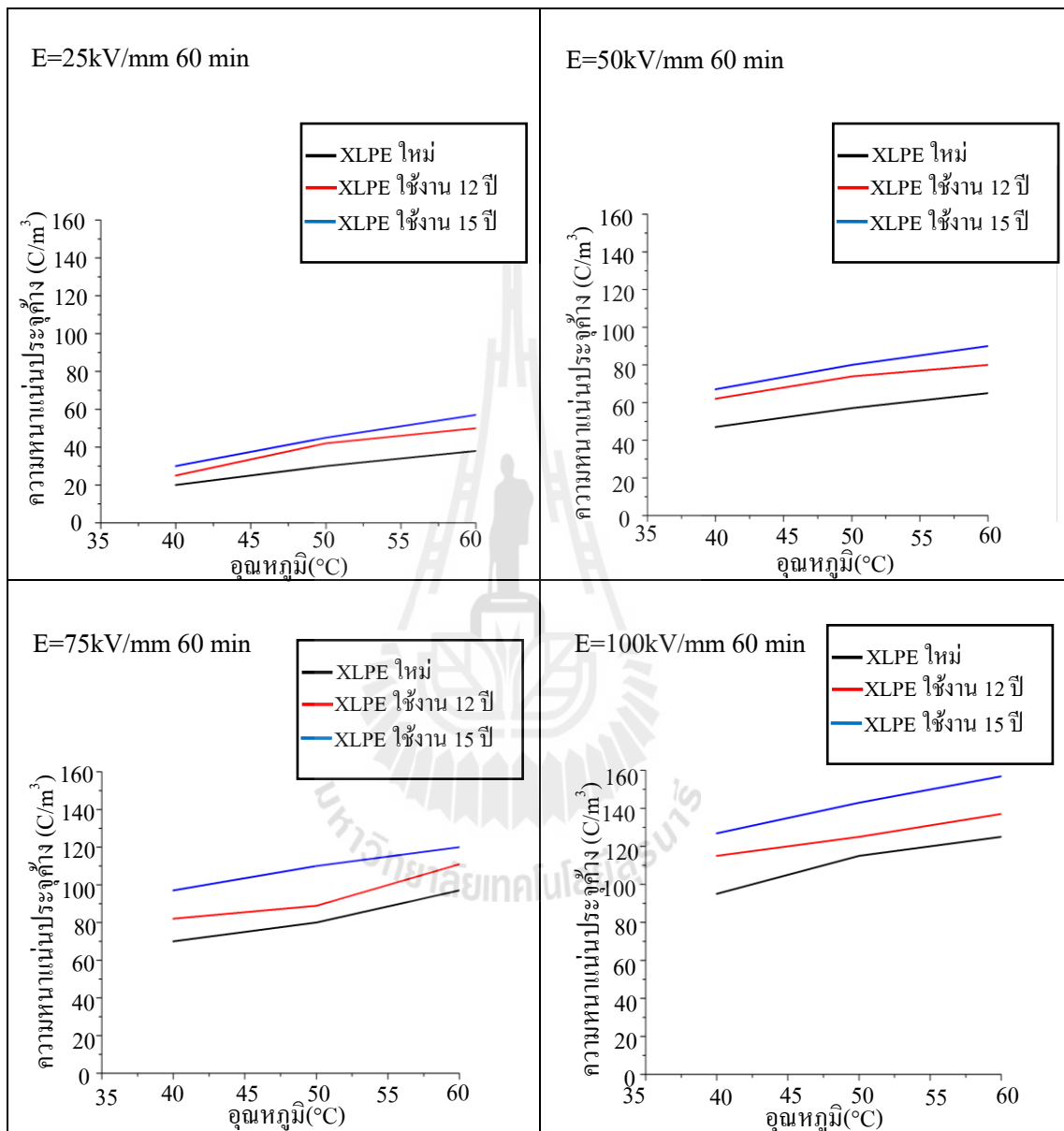
รูปที่ 5.39 ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ชั่วคาโอด ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง



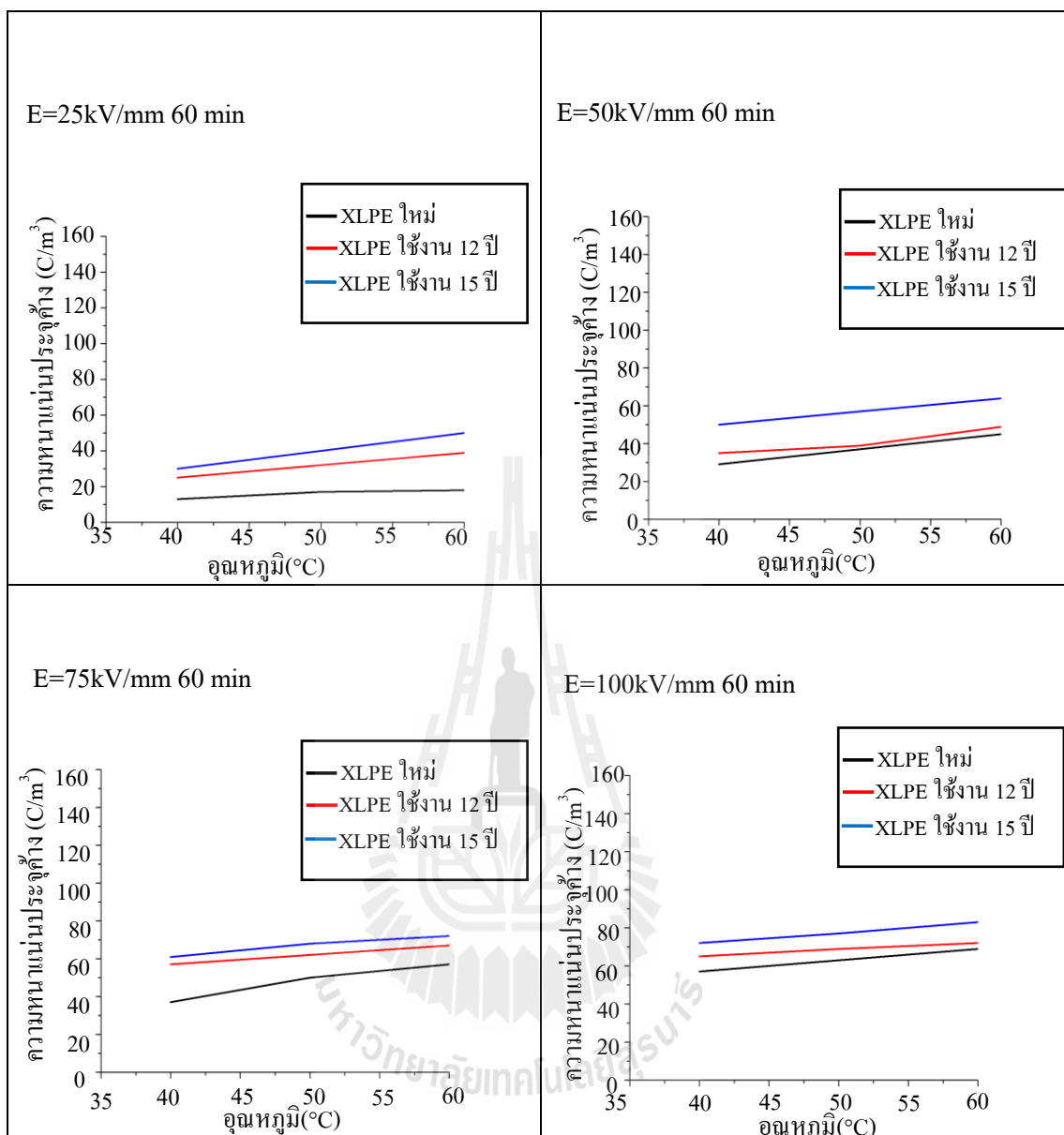
รูปที่ 5.40 ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ขั้วอาโนด ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า

2. ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิพบว่าความหนาแน่นของประจุค้างที่ค่าความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิเท่ากันของฉนวนทั้ง 3 ชนิด มีความหนาแน่นของประจุค้างดังนี้ ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 15 ปี ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 12 ปี และฉนวน XLPE ใหม่ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.41 และในรูปที่ 5.42 ดังนั้น

จึงสามารถกล่าวได้ว่าอายุการใช้งานของฉนวน XLPE และอุณหภูมิ มีส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้างมากขึ้น



รูปที่ 5.41 ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ชั่วคาโทด ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ



รูปที่ 5.42 ความหนาแน่นของประจุค้างของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิดที่ขั้วอาโนด ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

3. การทดสอบการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิมีความหนาแน่นของประจุค้างมากกว่าการทดสอบภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

4. ลักษณะการกระจายตัวของฉนวน XLPE ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาประเภทของประจุค้างพบว่าประจุค้างในเนื้อฉนวนที่ตกค้างส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบ

5.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ กล่าวถึงการเตรียมฉนวน XLPE ที่ใช้ในงานวิจัย พร้อมทั้งได้ทดสอบลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง โดยได้กำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาฉนวน XLPE ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ในการศึกษาประกอบไปด้วยการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า การศึกษาผลของความเครียด ทางไฟฟ้า และอุณหภูมิ ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และอายุการใช้งานจริง ล้วนแต่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

หลังจากที่ได้ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในแต่ละเงื่อนไขการทดลองแล้ว ในบทถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลของประจุค้างต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของฉนวน XLPE เพื่อหาความสัมพันธ์ของประจุค้างต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางกายภาพและเคมี เพื่อเป็นการยืนยันยังผลของประจุค้างต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE



บทที่ 6

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของฉนวน XLPE

6.1 กล่าวนำ

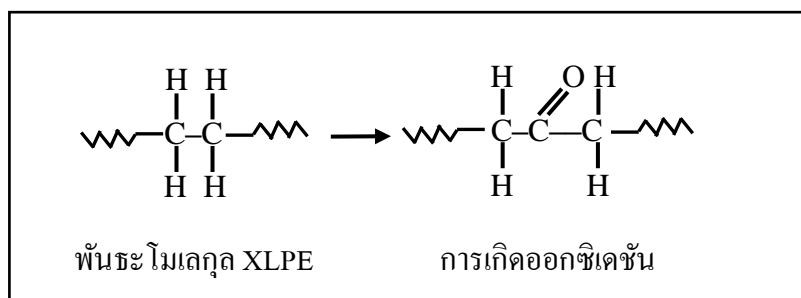
จากบทที่ 5 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ในบทนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของฉนวน XLPE หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง เพื่อตรวจสอบผลของประจุค้างต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีสามารถศึกษาได้จากการเกิดออกซิเดชันและการเกิดคาร์บอนไนเซชันของฉนวน XLPE ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสามารถดูได้จากลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยกล้องจุลทรรศน์ การเกิดออกซิเดชัน การเกิดคาร์บอนไนเซชันและหลักการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

6.2 การเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนไนเซชันของฉนวน XLPE

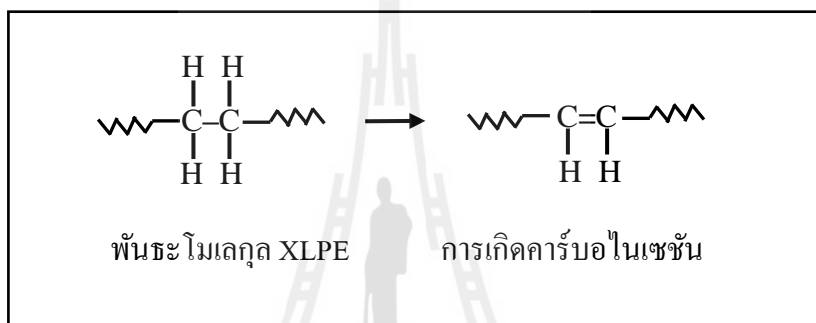
การเกิดออกซิเดชันและการเกิดคาร์บอนไนเซชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจาก จากการเผาไหม้และความร้อน ปริมาณของการเกิดออกซิเดชันและการเกิดคาร์บอนไนเซชัน จะบ่งชี้การเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ได้เป็นอย่างดี

ออกซิเดชัน คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้สารรับธาตุออกซิเจนมารวมตัวเข้าด้วยกัน หรือ ทำให้สารสูญเสียธาตุไฮโดรเจนไป และปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้อะตอมของธาตุสูญเสียอิเล็กตรอนไปเกิดการเกิดออกซิเดชันบนฉนวน XLPE การเกิดออกซิเดชันเกิดจากแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิความร้อนเป็นระยะเวลานานแก่ฉนวน XLPE ทำให้พันธะโมเลกุลของฉนวน XLPE เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและออกซิเจน แสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีประสิทธิภาพในความเป็นฉนวนลดลง

คาร์บอนไนเซชัน คือ กระบวนการเปลี่ยนสภาพจากวัสดุต่าง ๆ ให้เป็นธาตุคาร์บอนเกิดการเกิดคาร์บอนไนเซชันบนฉนวน XLPE มีสาเหตุมาจากอายุเกิดจากการเผาไหม้ด้วยแรงดันไฟฟ้าและความร้อนเป็นระยะเวลานานเช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งกระบวนการนี้ ทำให้พันธะ เปลี่ยนสภาพเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน แสดง ในรูปที่ 6.2 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีประสิทธิภาพในความเป็นฉนวนลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 6.1 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดออกซิเดชัน



รูปที่ 6.2 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดคาร์บอนในเซชัน

6.3 หลักการการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy : FTIR) ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 เครื่องวิเคราะห์ FTIR

เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีหรือเครื่อง FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโตรสโกปีชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสง โดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล การวิเคราะห์วัสดุด้วยแสงอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคลื่นคือ การส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับสูง จะใช้ช่วงคลื่นที่ $14000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงของ Harmonic และ Overtone การส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับกลาง จะใช้ช่วงคลื่นที่ $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ เพื่อใช้หาโครงสร้างของวัสดุต่าง ๆ และการส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับต่ำ จะใช้ช่วงคลื่นที่ $400\text{--}10\text{ cm}^{-1}$ เพื่อใช้หาขอบเขตและ พื้นที่ของคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงคลื่น $1500\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงที่ The Fingerprint Region มีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัวแต่เนื่องจากจะมีพิกัดค่อนข้างเยอะ ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัม ในช่วงนี้จึงค่อนข้างยาก เทคนิค FTIRสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพงและรวมไปถึงชนิดของตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์วัสดุได้เกือบทุกชนิด

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างจะใช้เครื่อง FTIR ทำการวิเคราะห์ โครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างด้วยพลังงานช่วง

แสงอินฟราเรดขนาดกลาง โดยใช้วิธีส่องผ่านทะลุตัวสารเนื่องจากสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์คือชิ้นงานฉนวน XLPE ที่มีความหนา 60 μm ซึ่งสามารถให้แสงอินฟราเรดทะลุผ่าน ตัวชิ้นงานได้ และให้ความถูกต้องแม่นยำกว่าการส่องแบบสะท้อน ช่วงคลื่นที่บ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ช่วงคลื่นอินฟราเรดของฉนวน XLPE

หมู่ธาตุ	ช่วงคลื่น	รายละเอียด
C = C	1600 – 1650 cm^{-1}	แสดงถึงการเกิดคาร์บอนใน - เนชัน เกิดการเผาไหม้ของเนื้อ ฉนวน
C = O	1750 – 1780 cm^{-1}	แสดงถึงการเกิดออกซิเดชัน

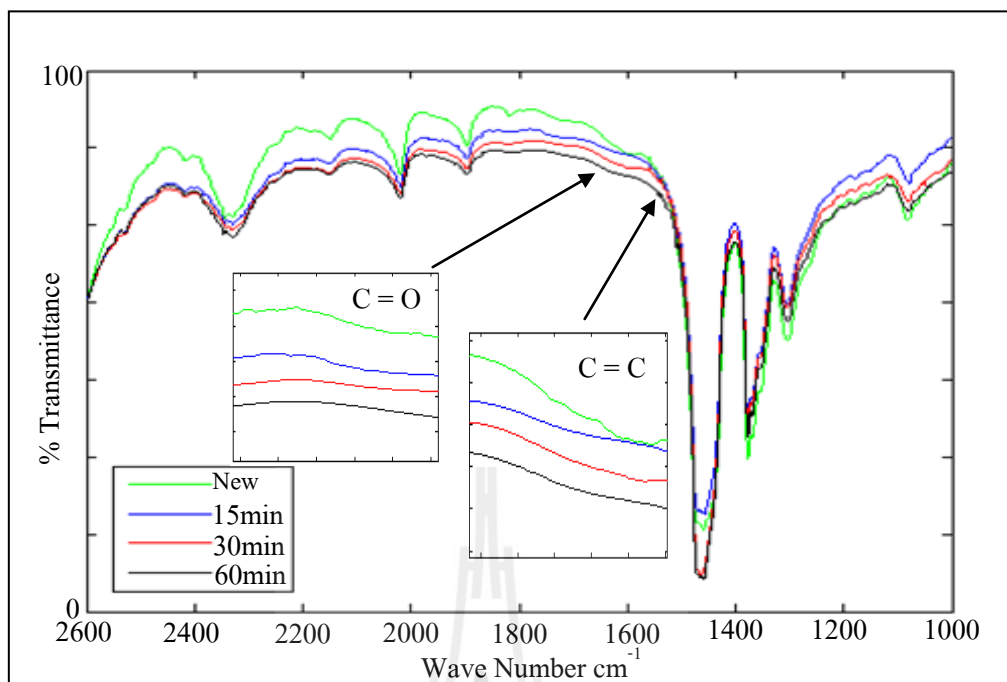
ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ผู้ทำวิจัยได้ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างในสภาวะการทดลอง 3 สภาวะการทดลอง เพื่อศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ อายุการใช้งานของสายเคเบิล ซึ่งหลังจากทดลองหาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างผู้ทำวิจัยได้ได้ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทั้ง 3 สภาวะการทดลองดังนี้

6.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

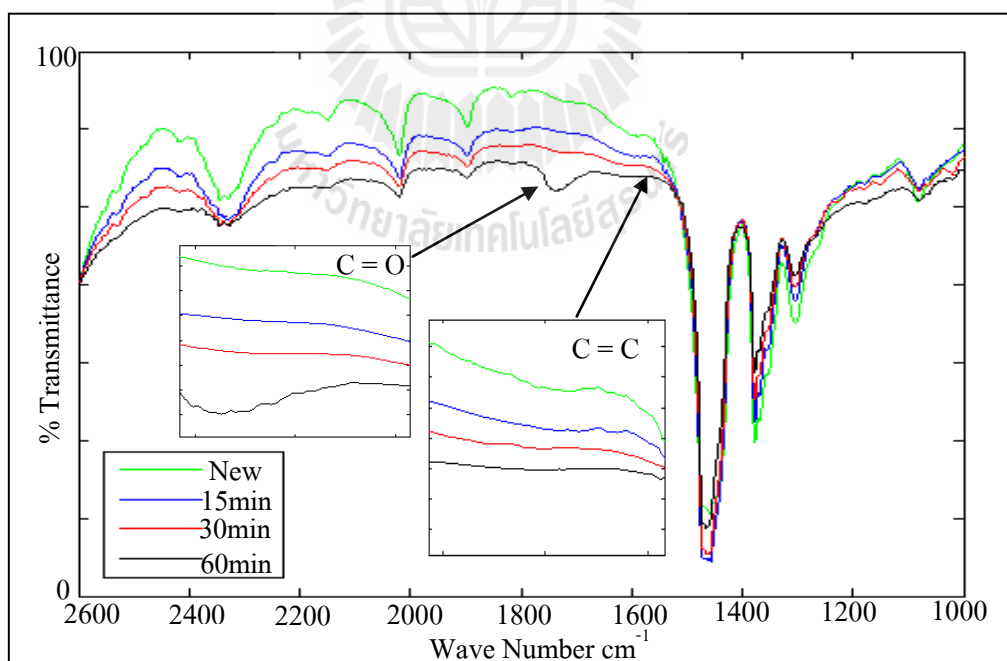
การตรวจสอบการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ แบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

6.4.1 โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่ ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการศึกษผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

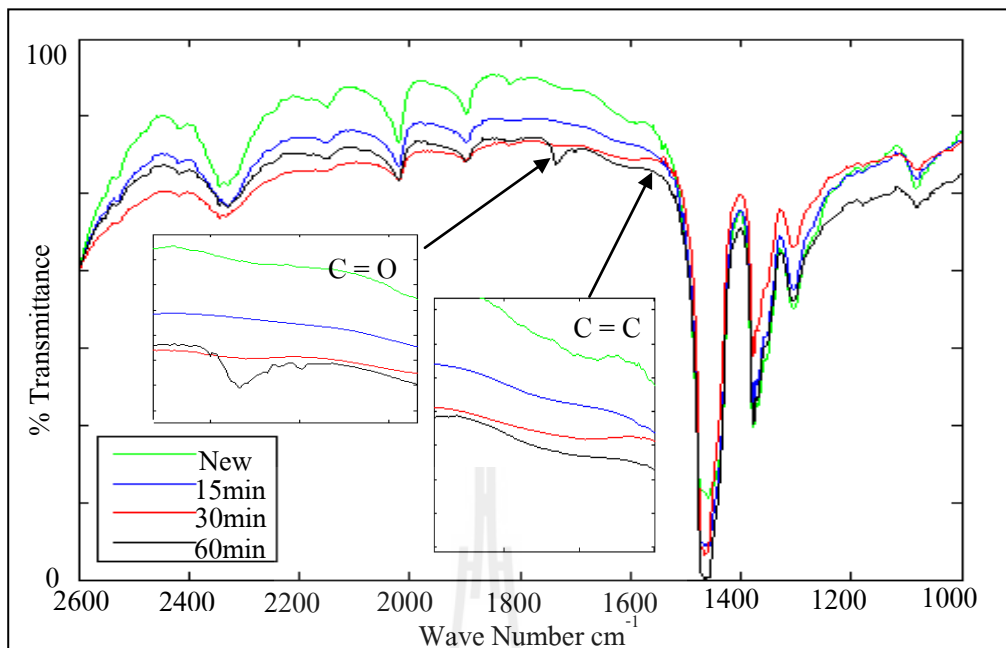
เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของฉนวน XLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า เพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยเครื่อง FTIR ได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังนี้



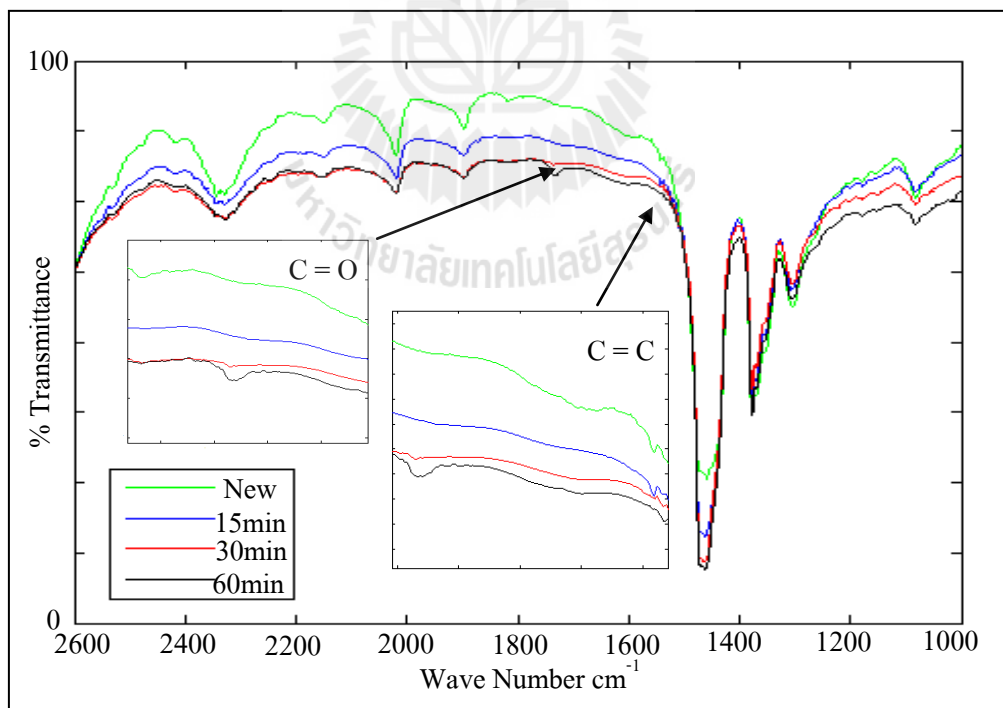
รูปที่ 6.4 FTIR spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 25kV/mm



รูปที่ 6.5 FTIR spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 50kV/mm



รูปที่ 6.6 FTIR spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 75kV/mm



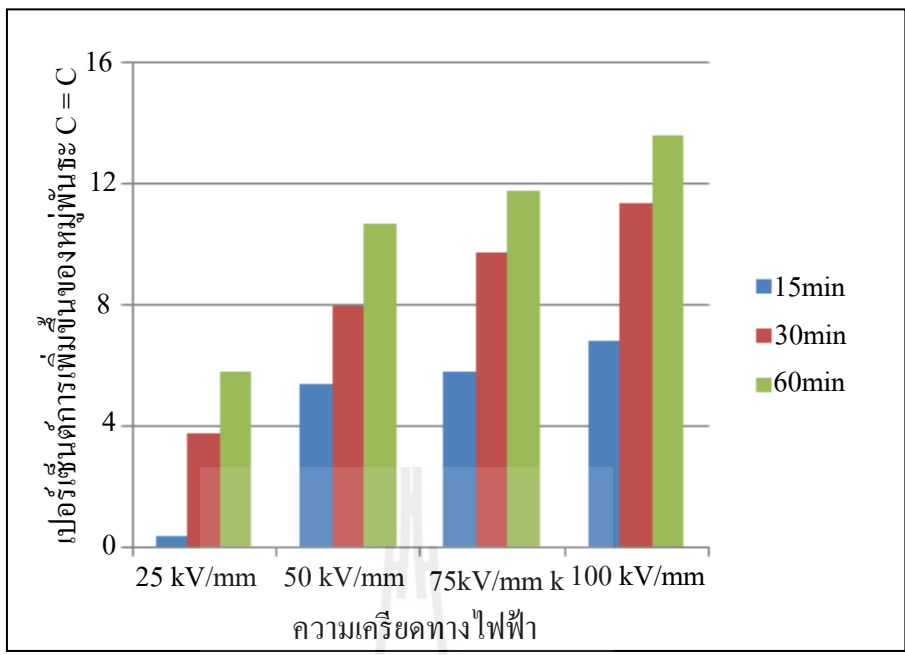
รูปที่ 6.7 FTIR spectrum หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 100 kV/mm

จากรูปที่ 6.4-6.7 แสดงถึง FTIR spectrum ของฉนวน XLPE หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ค่าความเครียดทางไฟฟ้าต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของหมู่พันธะ C=C และหมู่พันธะ C=O ที่สเปคตรัม 1600-1650 cm^{-1} และ 1750-1780 cm^{-1} ตามลำดับ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของหมู่พันธะทั้งสองดังแสดงในตารางที่ 6.2

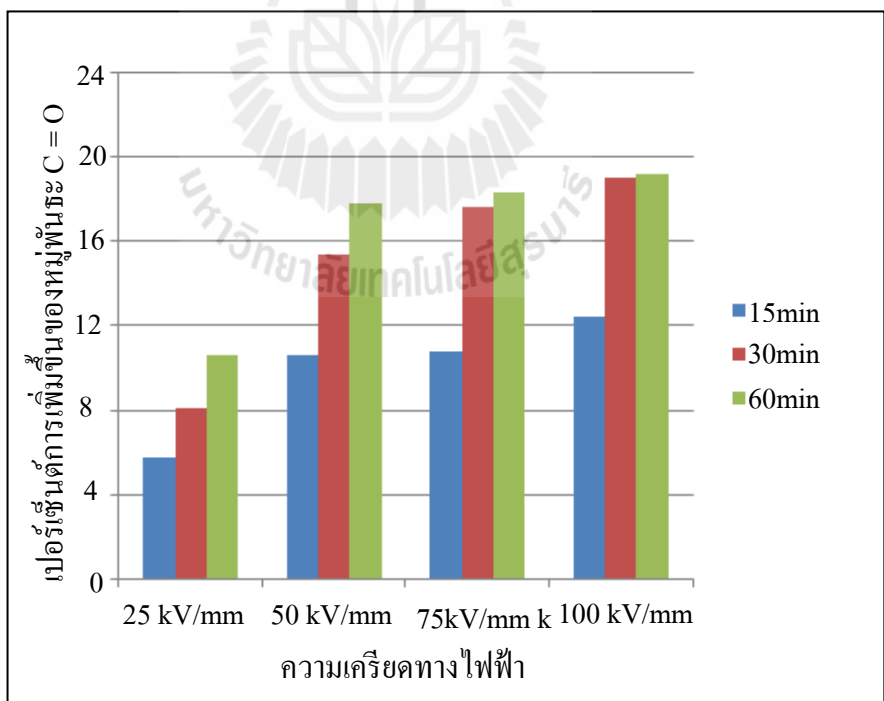
ตารางที่ 6.2 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ภายใต้อุณหภูมิและความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ

ความเครียดทางไฟฟ้า	ระยะเวลา(min)	C=C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C=O ที่เพิ่มขึ้น (%)
25kV/mm	15	0.35	5.73
	30	3.72	8.08
	60	5.82	10.65
50kV/mm	15	5.40	10.65
	30	8.00	15.41
	60	10.70	17.82
75kV/mm	15	5.82	10.75
	30	9.77	17.61
	60	11.75	18.32
100kV/mm	15	6.83	12.41
	30	11.39	19.06
	60	13.62	19.22

ภายใต้เงื่อนไขการทดลองว่าด้วยผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างแล้ว จะสังเกตได้ว่าฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุโดยการเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนิเซชัน ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6.2 จากตารางดังกล่าวสามารถสรุปผล ค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O ดังนี้



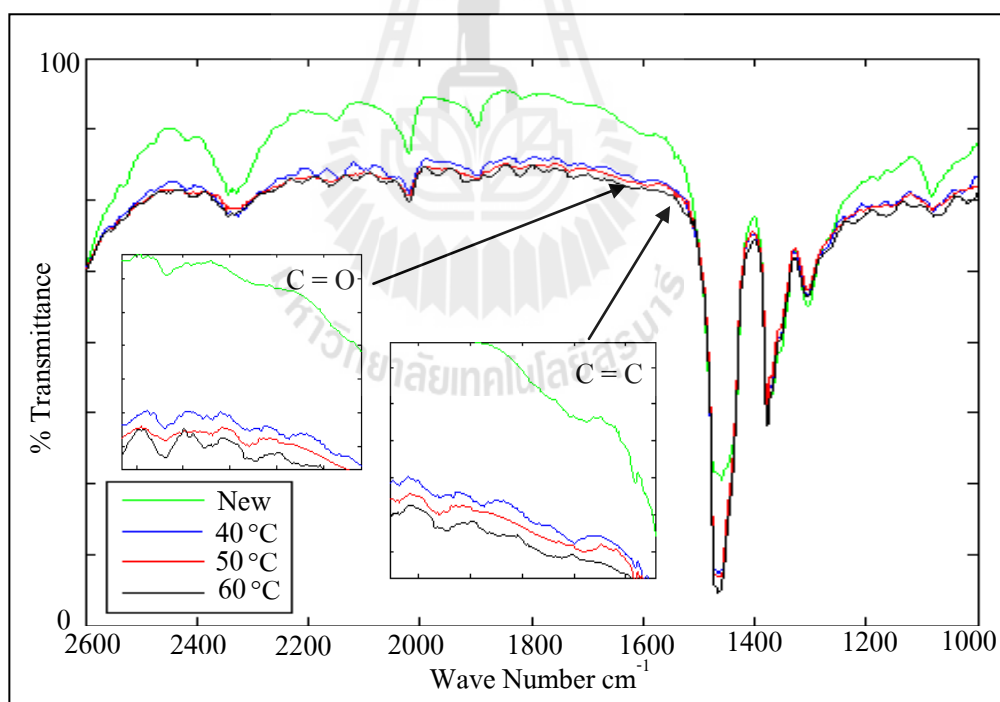
รูปที่ 6.8 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า



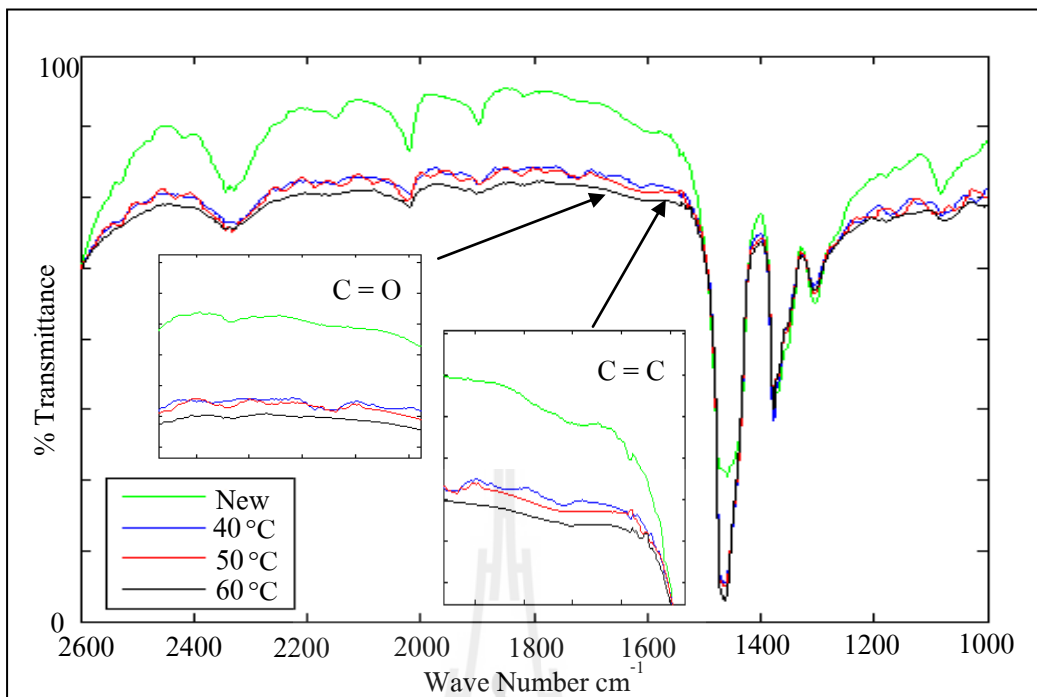
รูปที่ 6.9 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = O ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.8 และรูปที่ 6.9 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ หมู่พันธะ C=C และ C=O ตามลำดับ จะพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ เปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะ C=C และหมู่พันธะ C=O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะแสดงถึงการเกิดการเผาไหม้ของวัสดุทดสอบ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE

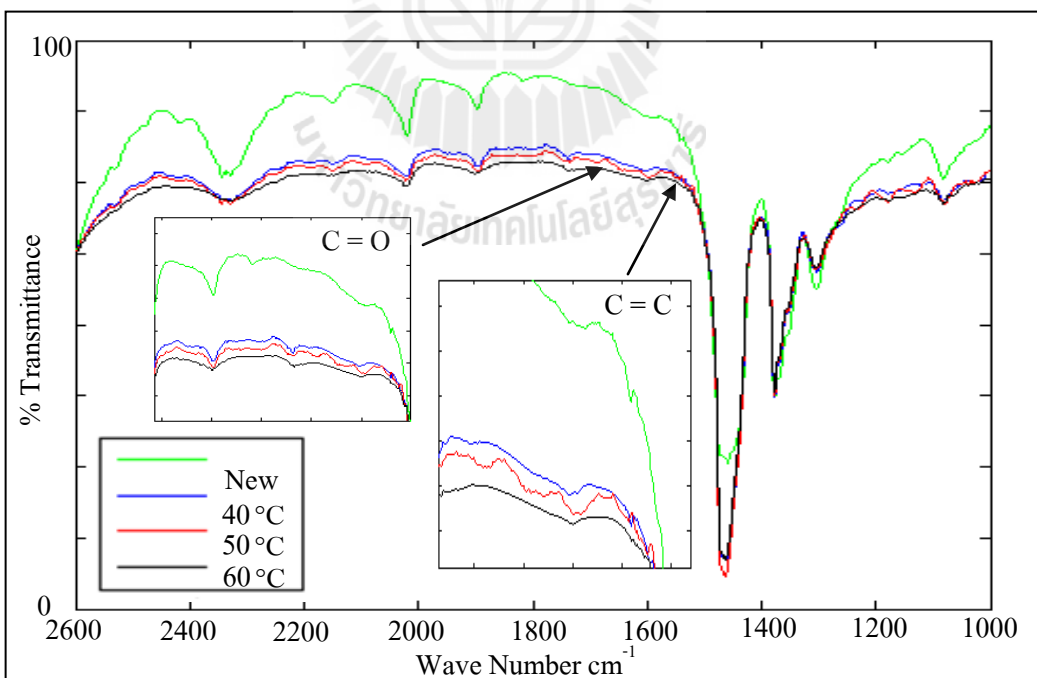
6.4.2 โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใหม่ ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง
เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของฉนวน XLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ โดยศึกษาสถานะความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับ 25-100 kV/mm และอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 40°C 50°C และ 60°C แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE เพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยเครื่อง FTIR ได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังนี้



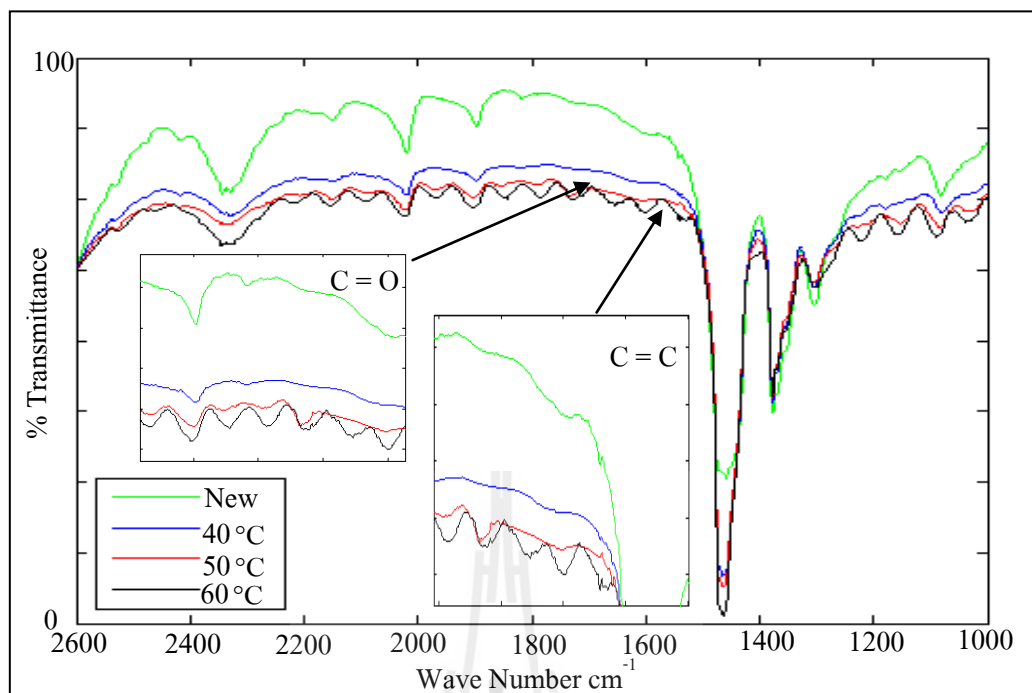
รูปที่ 6.10 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้างที่ 25 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 6.11 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้ำที่ 50 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 6.12 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้ำที่ 75 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 6.13 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างที่ 100 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน จะสังเกตได้ว่าฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุ สังเกตได้จากการเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนในเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 6.3

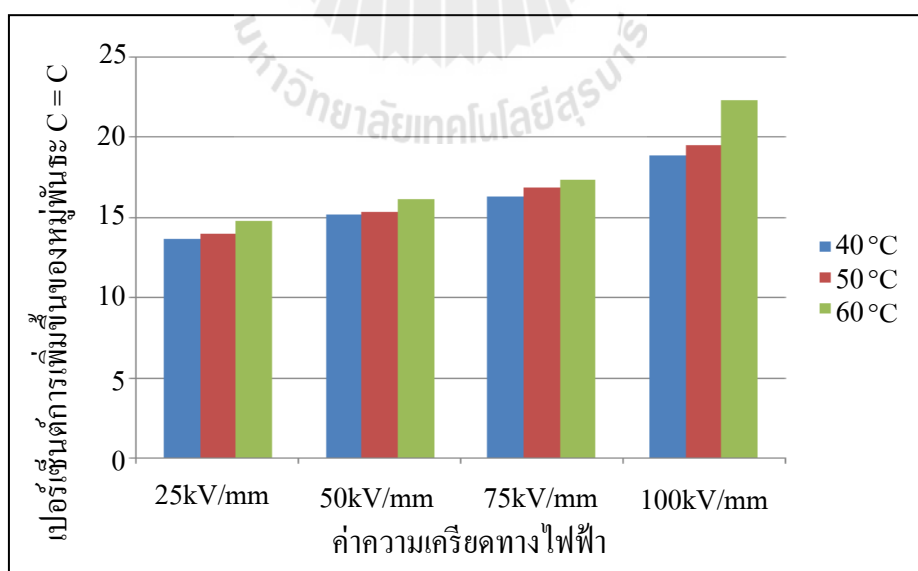
ตารางที่ 6.3 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของ ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ

ความเครียดทางไฟฟ้า	อุณหภูมิ(°C)	C=C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C=O ที่เพิ่มขึ้น (%)
25kV/mm	40	13.60	18.85
	50	13.99	20.69
	60	14.83	22.19
50kV/mm	40	15.22	22.92
	50	15.38	22.98
	60	16.19	25.23

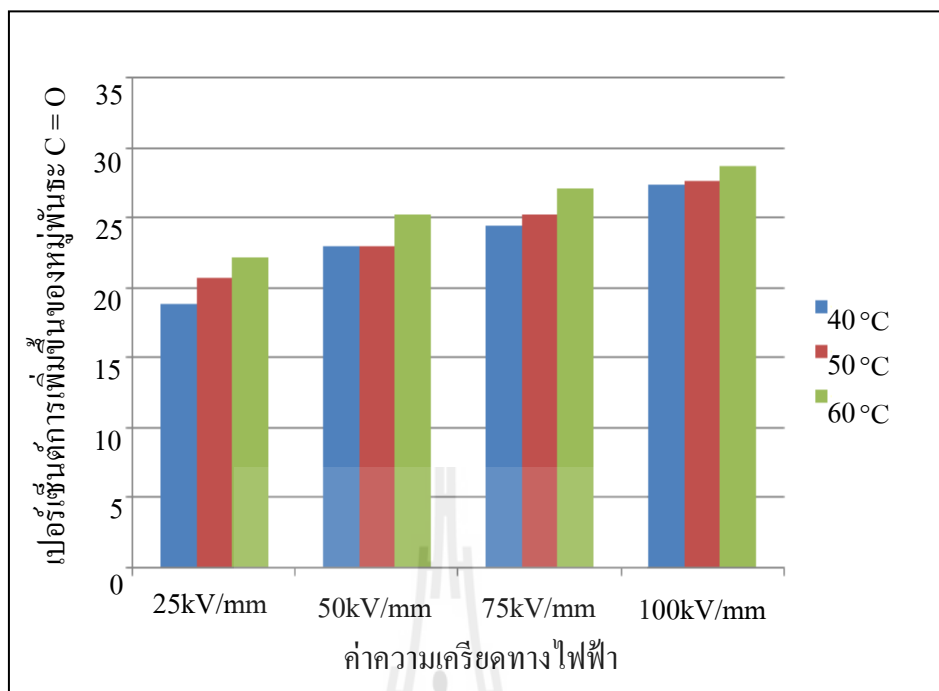
ตารางที่ 6.3 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของ
ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ (ต่อ)

ความเครียดทางไฟฟ้า	อุณหภูมิ(°C)	C=C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C=O ที่เพิ่มขึ้น (%)
75 kV/mm	40	16.30	24.41
	50	16.89	25.26
	60	17.37	27.09
100 kV/mm	40	18.90	27.39
	50	19.56	27.65
	60	22.32	28.67

จากตารางที่ 6.3 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้ำที่ค่าความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน พบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน สามารถสรุปผลค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.14 -6.15



รูปที่ 6.14 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน



รูปที่ 6.15 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = O ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

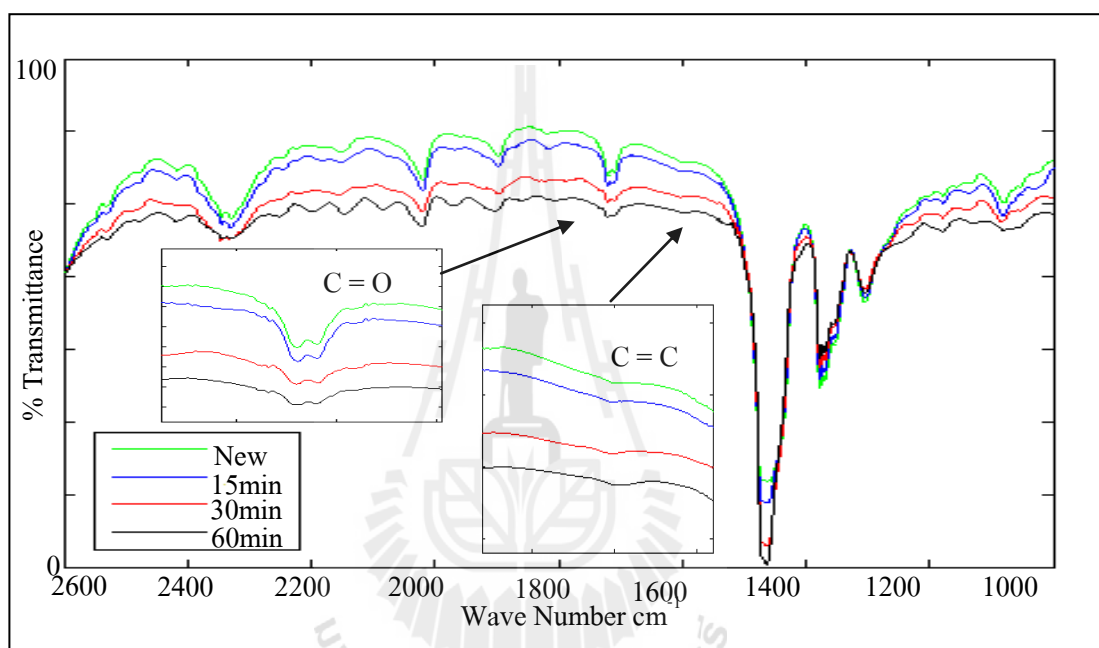
จากรูปที่ 6.14 และรูปที่ 6.15 แสดงถึงเปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของ หมู่พันธะ C = C และ C = O ตามลำดับของฉนวน XLPE ใหม่ หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า จะพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซนต์ของหมู่พันธะ C = C และหมู่พันธะ C = O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ แสดงถึงการเกิดการเผาไหม้ของวัสดุทดสอบ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุอายุของฉนวน XLPE

6.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี

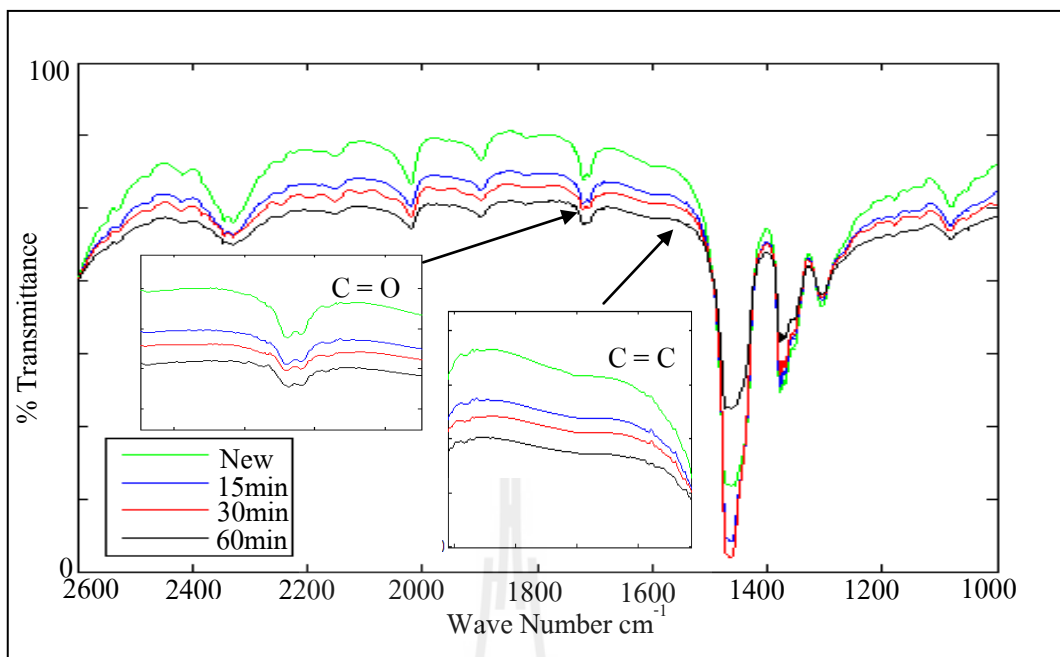
การตรวจสอบการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่การใช้งาน 12 ปี หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ แบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

6.5.1 โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

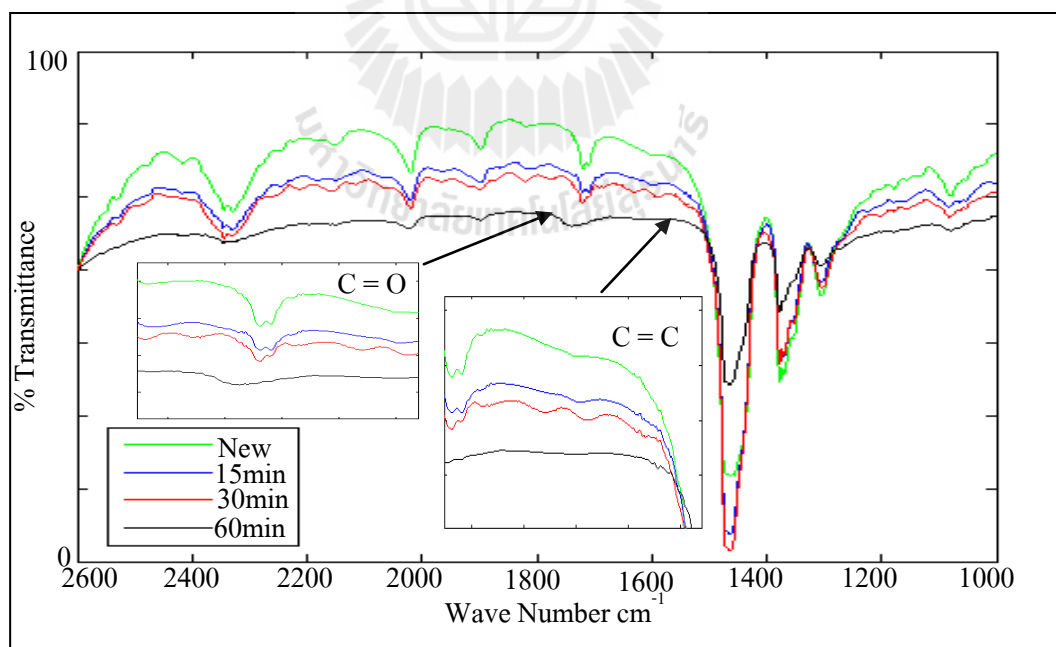
เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยเครื่อง FTIR ได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังนี้



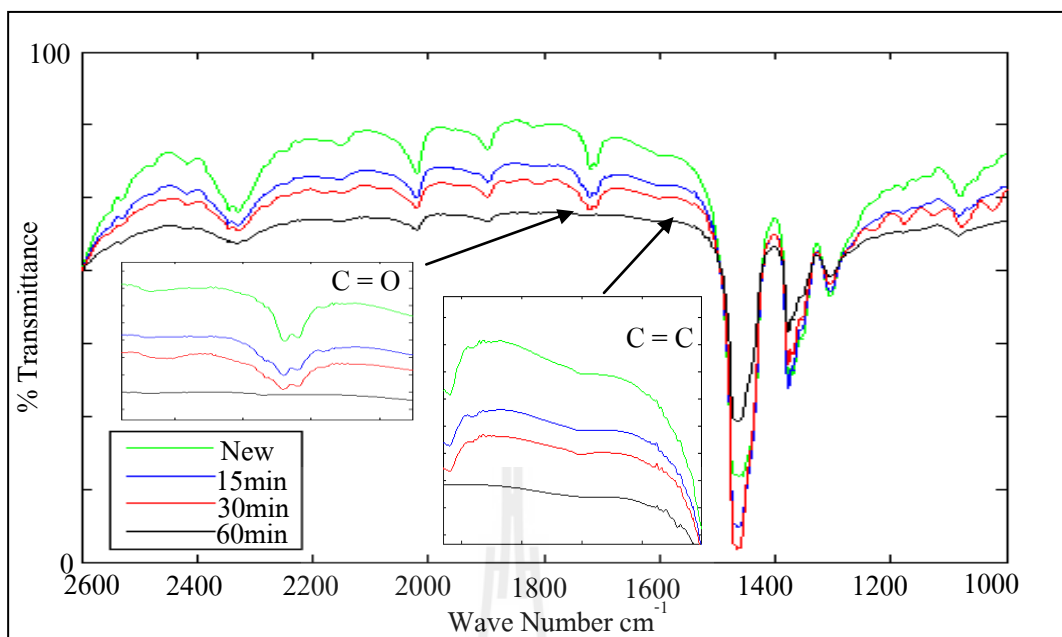
รูปที่ 6.16 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 25 kV/mm



รูปที่ 6.17 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ใช้งานเวลา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 50 kV/mm



รูปที่ 6.18 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 75 kV/mm



รูปที่ 6.19 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างที่ 100 kV/mm

หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี จะสังเกตเห็นว่า ฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุ สังเกตได้จากการเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนไนเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 6.4

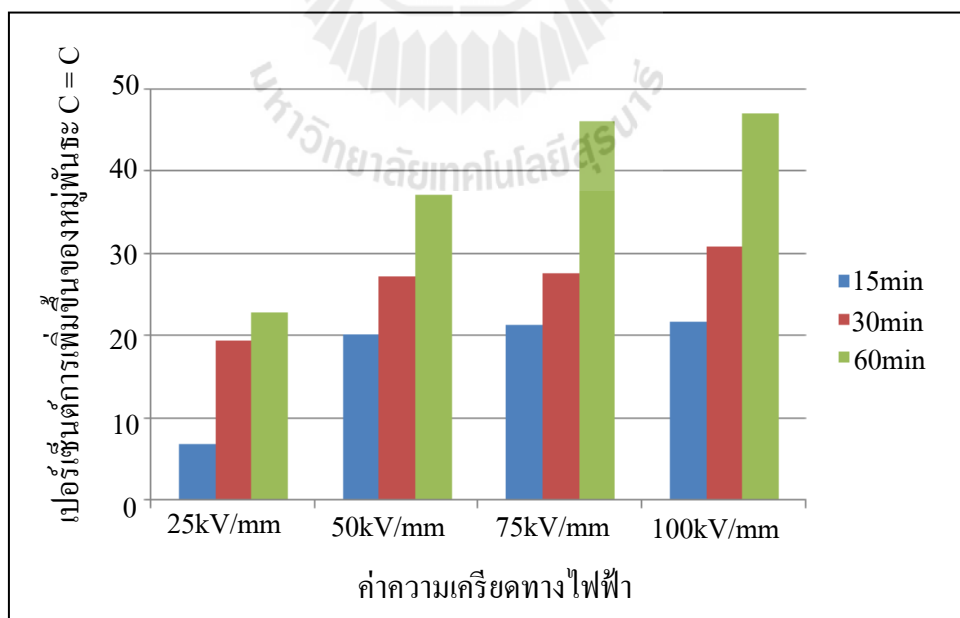
ตารางที่ 6.4 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ

ความเครียดทางไฟฟ้า	ระยะเวลา (min)	C = C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C = O ที่เพิ่มขึ้น (%)
25kV/mm	15	6.79	10.48
	30	19.50	27.65
	60	22.88	40.79
50kV/mm	15	20.24	31.29
	30	27.22	40.19
	60	37.30	50.59

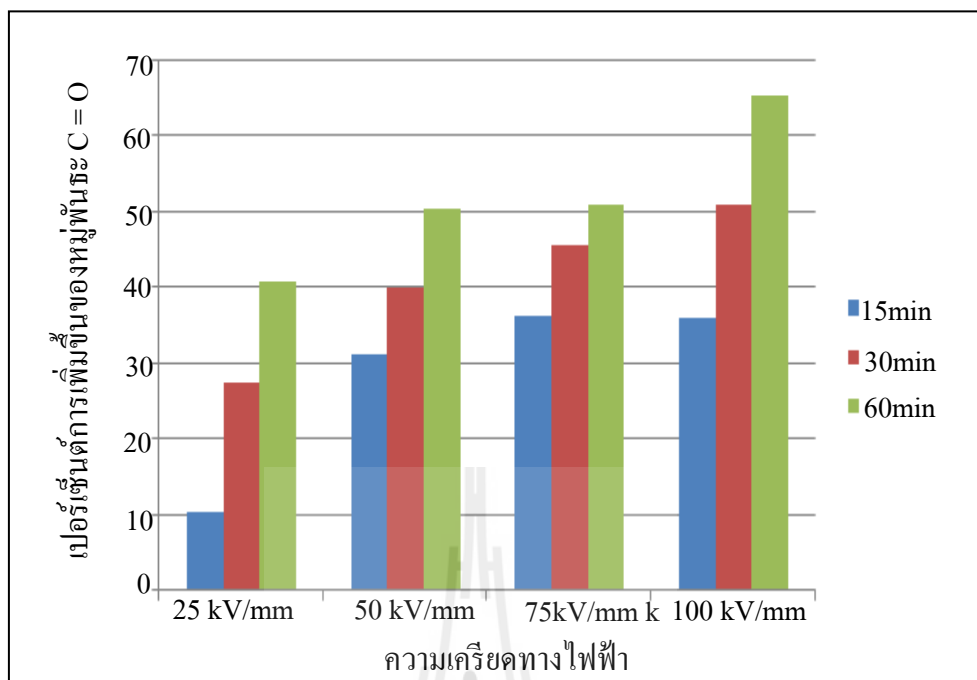
ตารางที่ 6.4 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างของ
ฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ

ความเครียดทางไฟฟ้า	ระยะเวลา (min)	C=C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C=O ที่เพิ่มขึ้น (%)
75kV/mm	15	21.38	36.22
	30	27.76	45.75
	60	46.27	58.06
100kV/mm	15	21.78	36.11
	30	30.93	51.06
	60	47.18	65.53

จากตารางที่ 6.4 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างที่ค่าความเครียดต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี พบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน สามารถสรุปผลค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.20-6.21



รูปที่ 6.20 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี

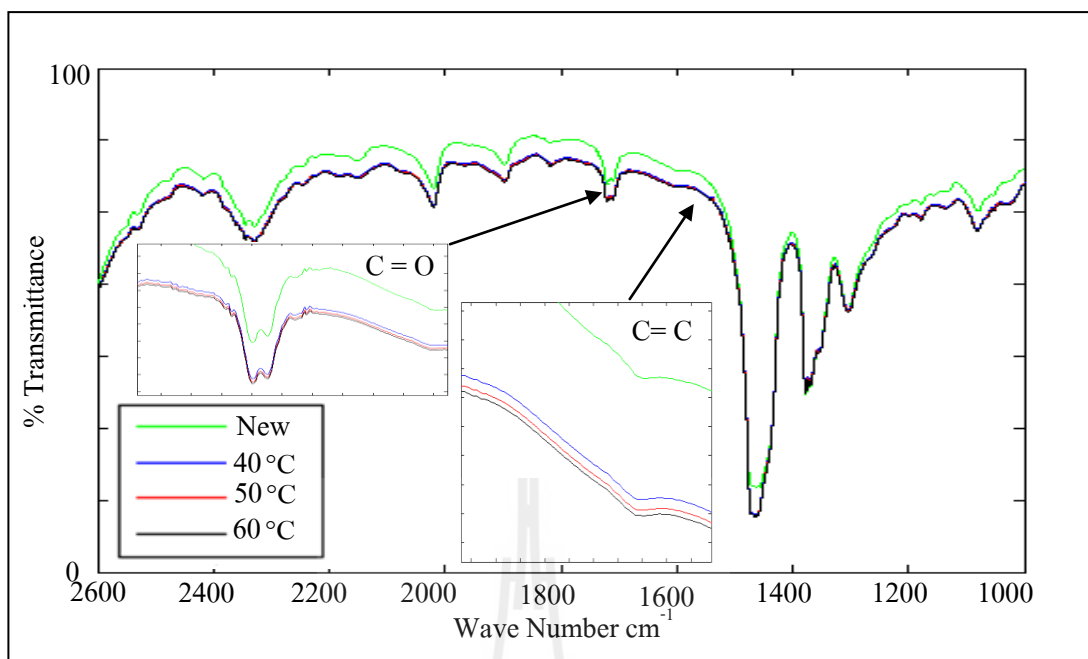


รูปที่ 6.21 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = O ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี

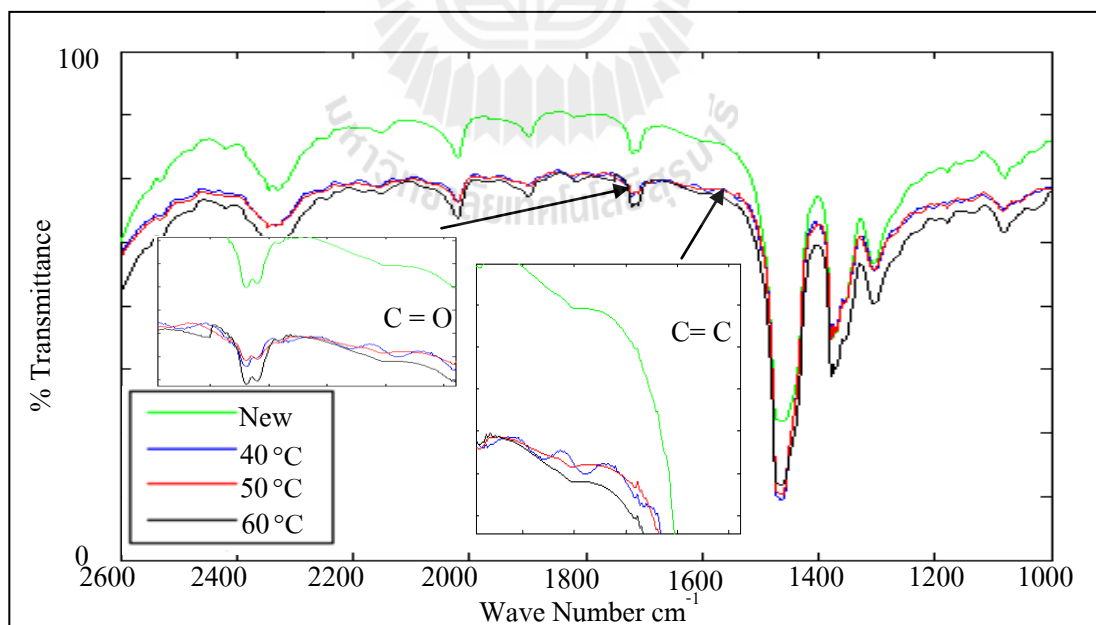
จากรูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21 แสดงถึงเปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของ หมู่พันธะ C = C และ C = O ตามลำดับของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า จะพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซนต์ของหมู่พันธะ C = C และหมู่พันธะ C = O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ แสดงถึงการเกิดการเผาไหม้ของวัสดุทดสอบ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุอายุของฉนวน XLPE

6.5.2 โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

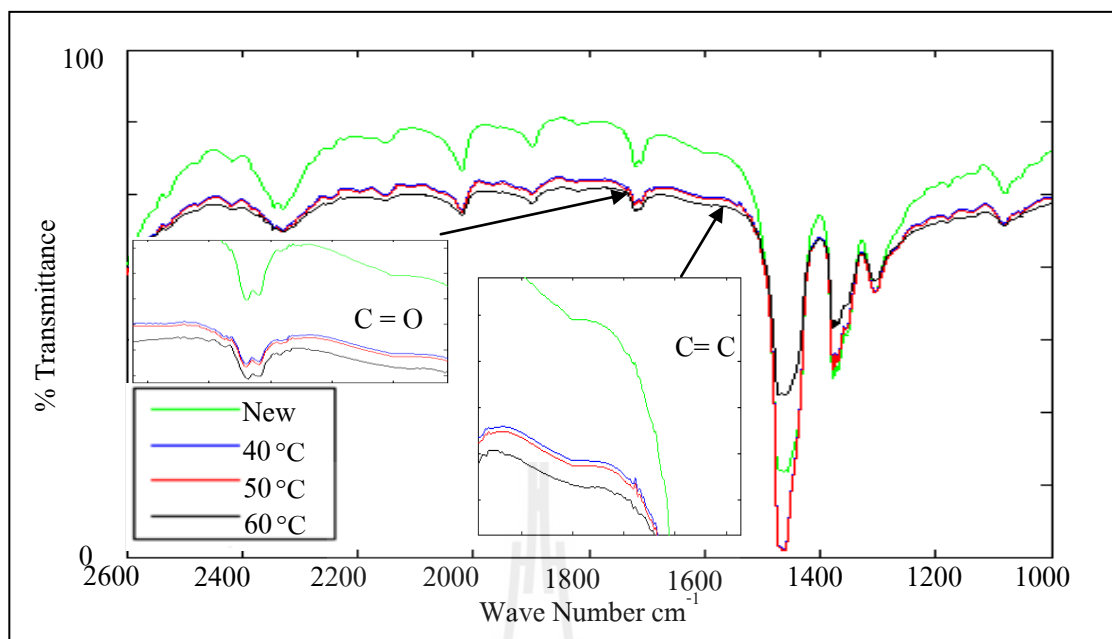
เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยเครื่อง FTIR ได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังนี้



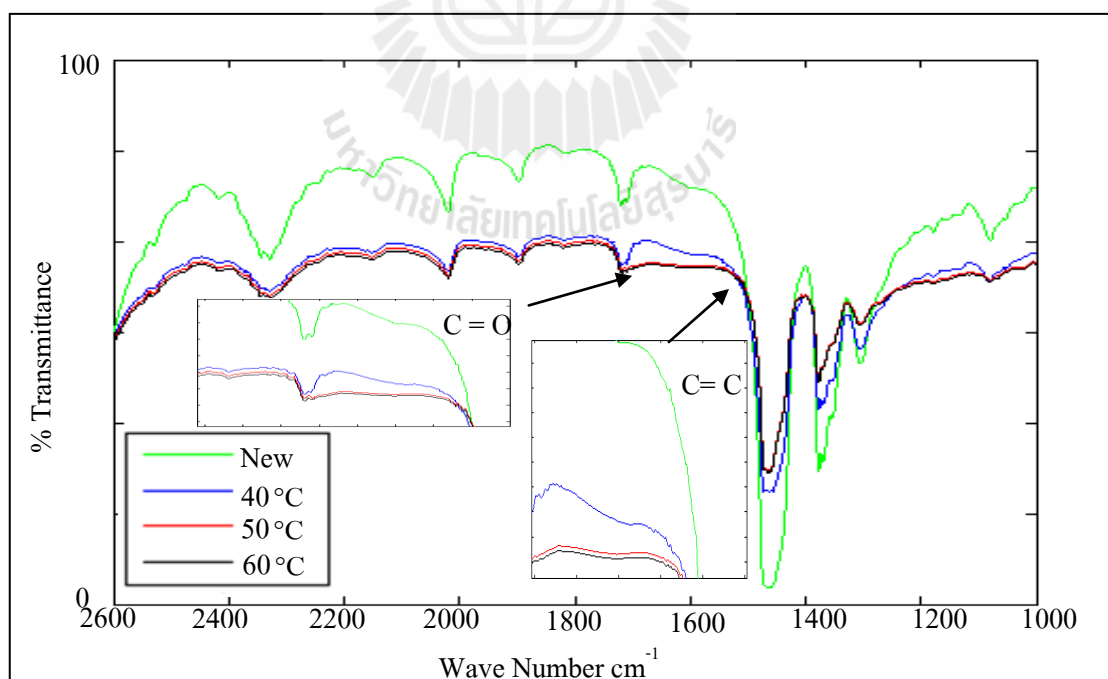
รูปที่ 6.22 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้ำที่ 25 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี



รูปที่ 6.23 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้ำที่ 50 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี



รูปที่ 6.24 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้างที่ 75 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี



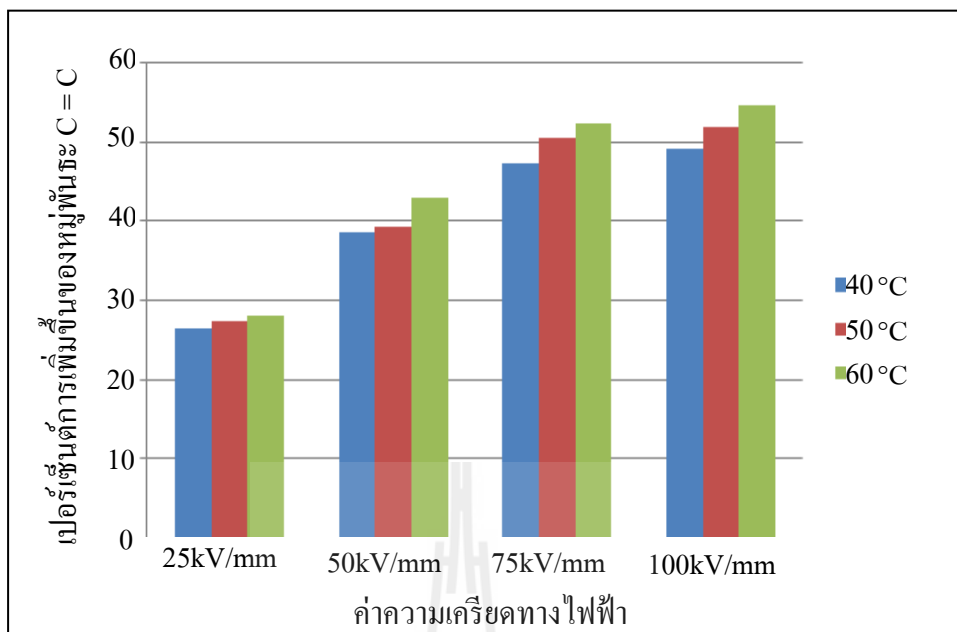
รูปที่ 6.25 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้างที่ 100 kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี

หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี จะสังเกตได้ว่าฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุ สังเกตได้จากการเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนในเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 6.5

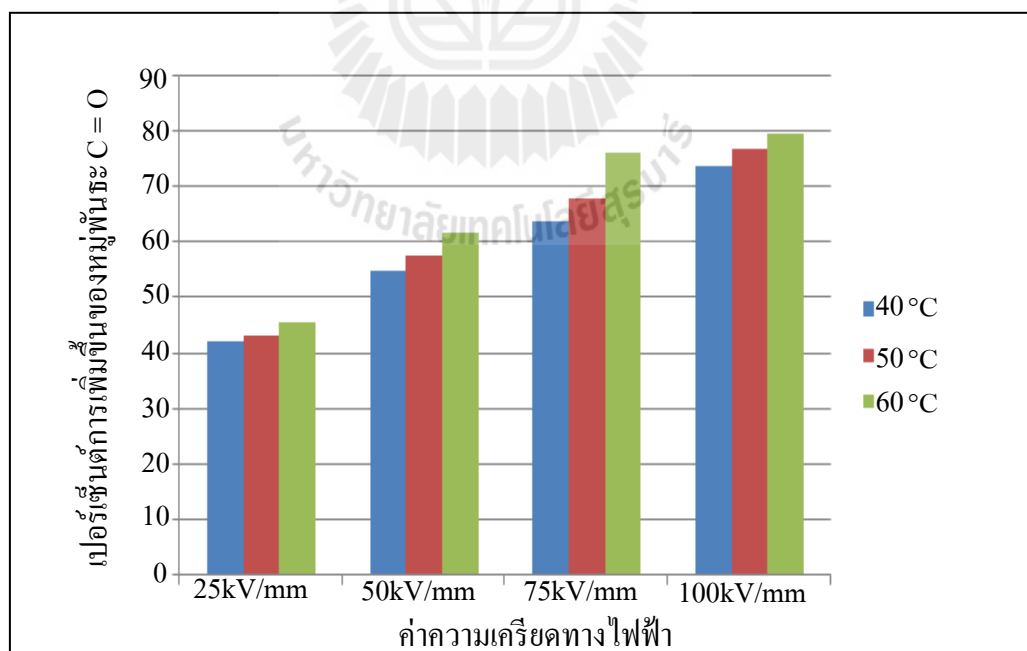
ตารางที่ 6.5 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE 12 ปี ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ

ความเครียดทางไฟฟ้า	อุณหภูมิ(°C)	C = C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C = O ที่เพิ่มขึ้น (%)
25kV/mm	40	26.57	42.13
	50	27.49	43.37
	60	28.10	45.76
50kV/mm	40	38.59	54.59
	50	39.39	57.58
	60	43.00	61.72
75kV/mm	40	47.49	63.79
	50	50.57	66.97
	60	52.42	73.28
100kV/mm	40	49.26	73.91
	50	52.05	75.71
	60	54.78	79.66

จากตารางที่ 6.5 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างที่ค่าความเครียด และอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี พบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวนสามารถสรุปผลค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.26 และ รูปที่ 6.27



รูปที่ 6.26 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = C ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี



รูปที่ 6.27 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = O ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 12 ปี

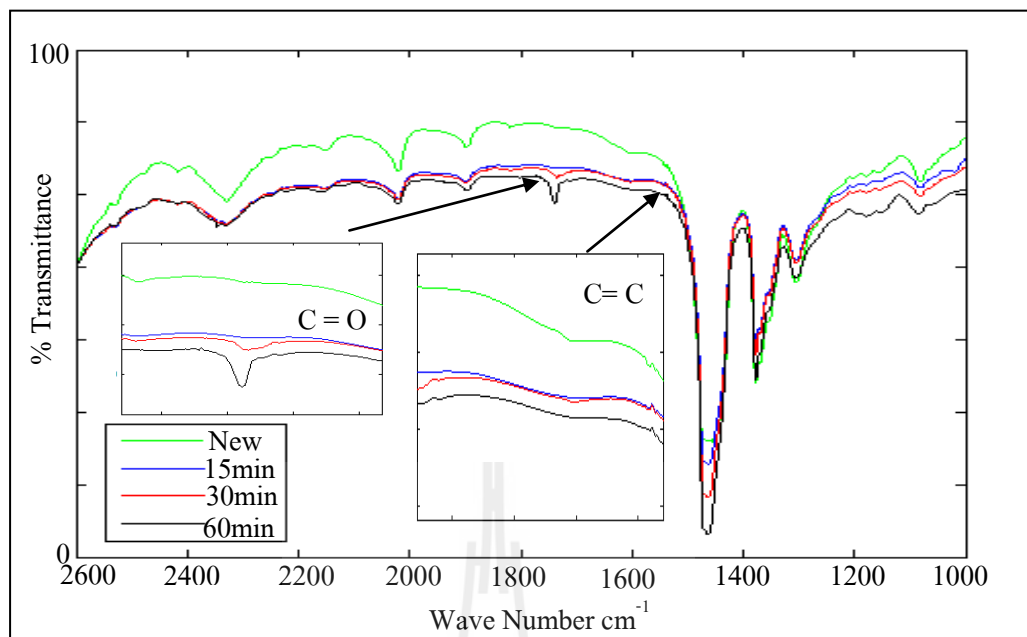
จากรูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ หมู่พันธะ C=C และ C=O ตามลำดับของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ จะพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะ C=C และหมู่พันธะ C=O ดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE นอกจากนี้ถ้ามีการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิกับเปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า พบว่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะทั้งสองในกรณีความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิมิมีค่าสูงกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE มากกว่า

6.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี

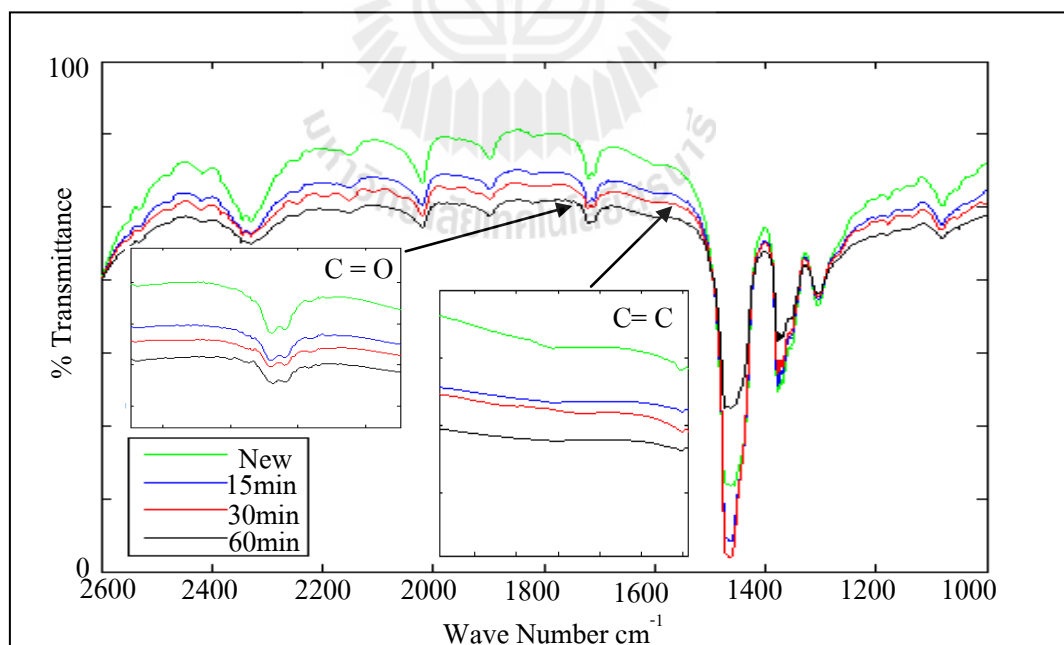
การตรวจสอบการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่การใช้งาน 15 ปี หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง เพื่อเป็นการยืนยันผลของอายุการใช้งานต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างต่อการเสื่อมอายุของฉนวน โดยแบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงภายใต้ผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้า และศึกษาผลของขนาดความเครียดทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ แบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

6.6.1 โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

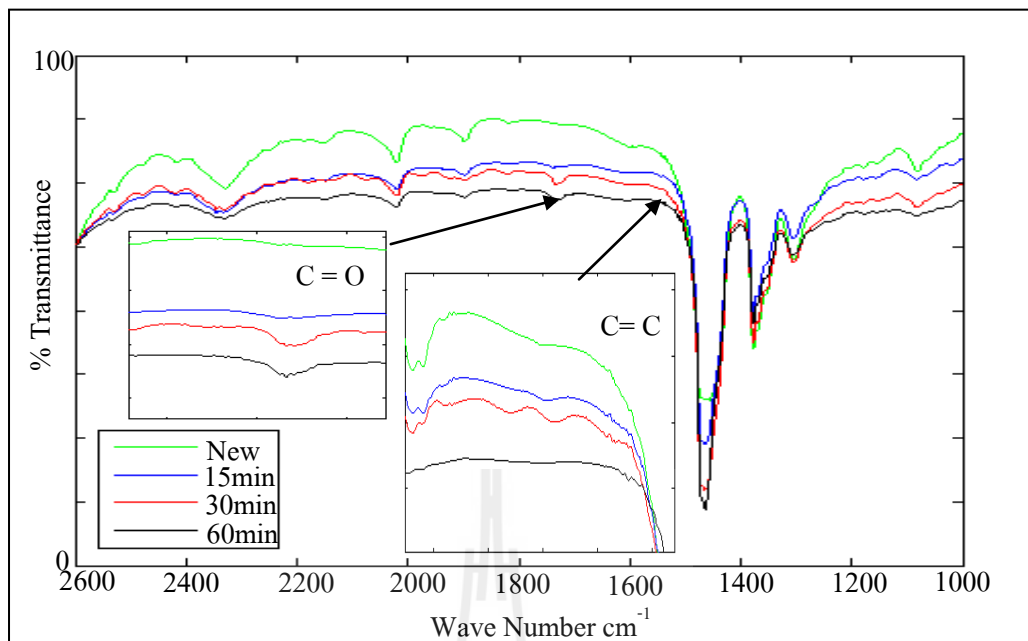
เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า เพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยเครื่อง FTIR ได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังนี้



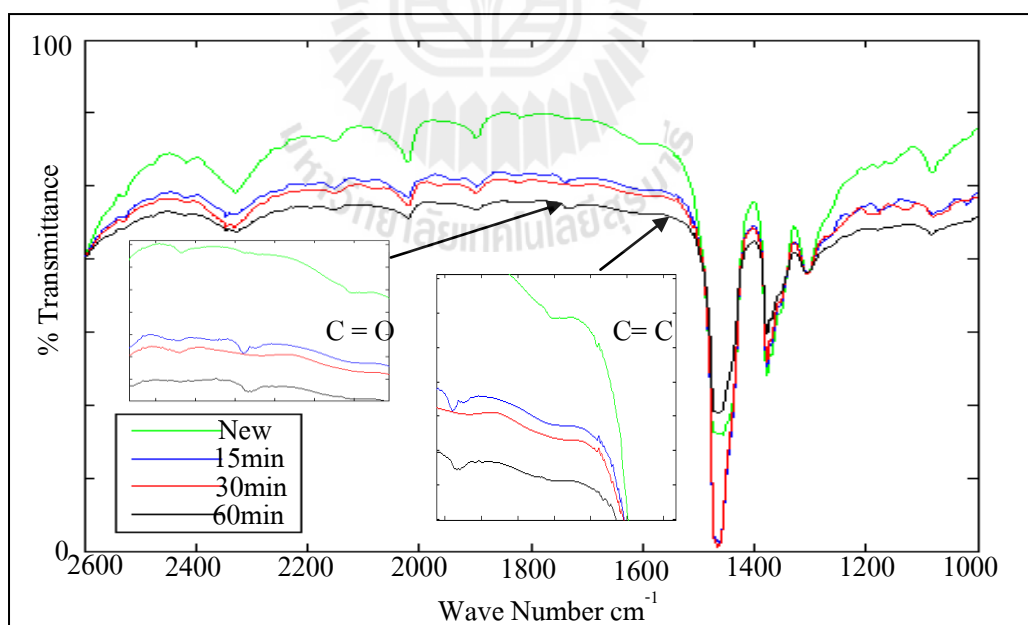
รูปที่ 6.28 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจาย
ตัวของประจุค้ำที่ 25kV/mm



รูปที่ 6.29 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจาย
ตัวของประจุค้ำที่ 50kV/mm



รูปที่ 6.30 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจาย
ตัวของประจุค้างที่ 75kV/mm



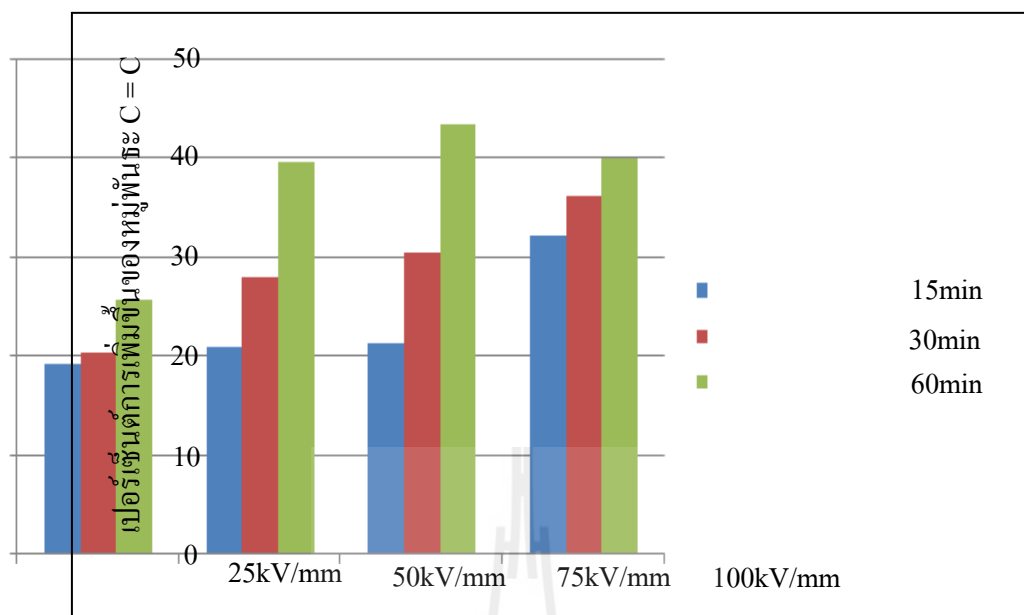
รูปที่ 6.31 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังวัดลักษณะการกระจาย
ตัวของประจุค้างที่ 100kV/mm

หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี จะสังเกตได้ว่าฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุ สังเกตได้จากการเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนไอเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 6.6

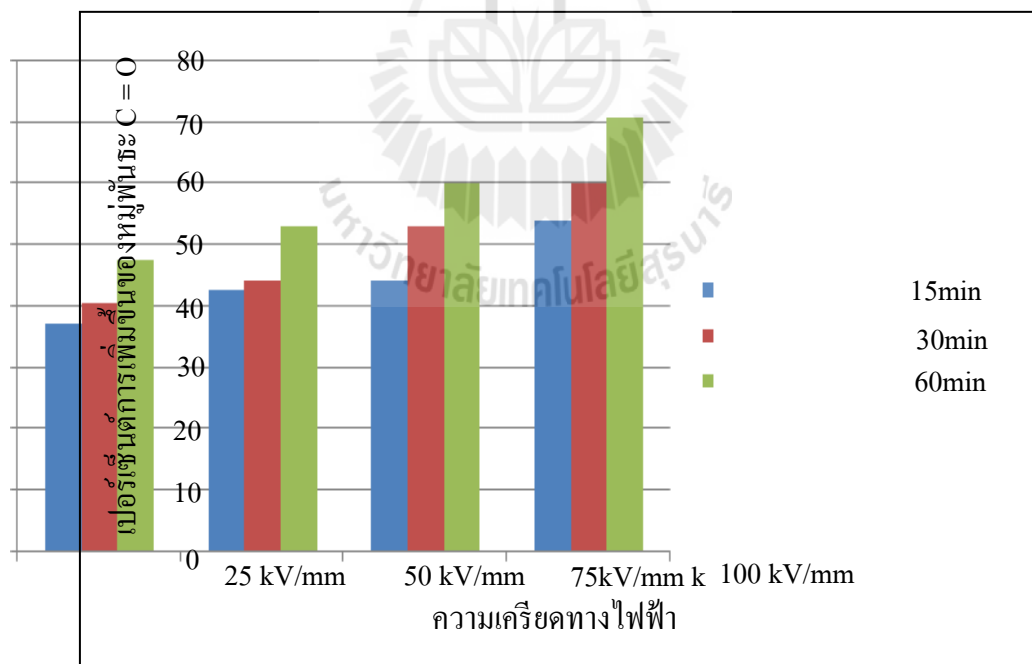
ตารางที่ 6.6 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้าง ค่าความเครียดต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี

ความเครียดทางไฟฟ้า	ระยะเวลา(min)	C = C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C = O ที่เพิ่มขึ้น (%)
25kV/mm	15	19.26	37.12
	30	20.38	40.48
	60	25.75	47.77
50kV/mm	15	20.93	42.79
	30	28.11	44.38
	60	39.64	53.19
75kV/mm	15	21.38	44.15
	30	30.55	53.14
	60	43.43	60.20
100kV/mm	15	32.23	53.93
	30	36.20	60.13
	60	40.12	70.73

จากตารางที่ 6.6 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างที่ค่าความเครียดต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี พบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน สามารถสรุปผลค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.32 และรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.32 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี

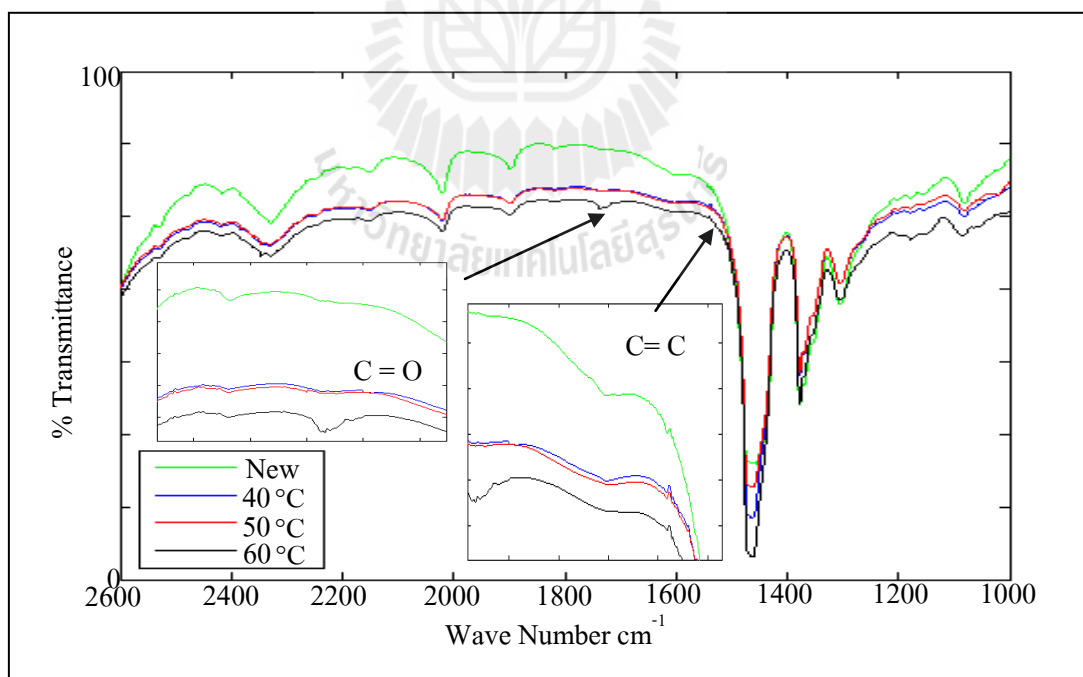


รูปที่ 6.33 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = O ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี

จากรูปที่ 6.32 และรูปที่ 6.33 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ หมู่พันธะ C=C และ C=O ตามลำดับของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า จะพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะ C=C และหมู่พันธะ C=O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ แสดงถึงการเกิดการเผาไหม้ของวัสดุทดสอบ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุอายุของฉนวน XLPE

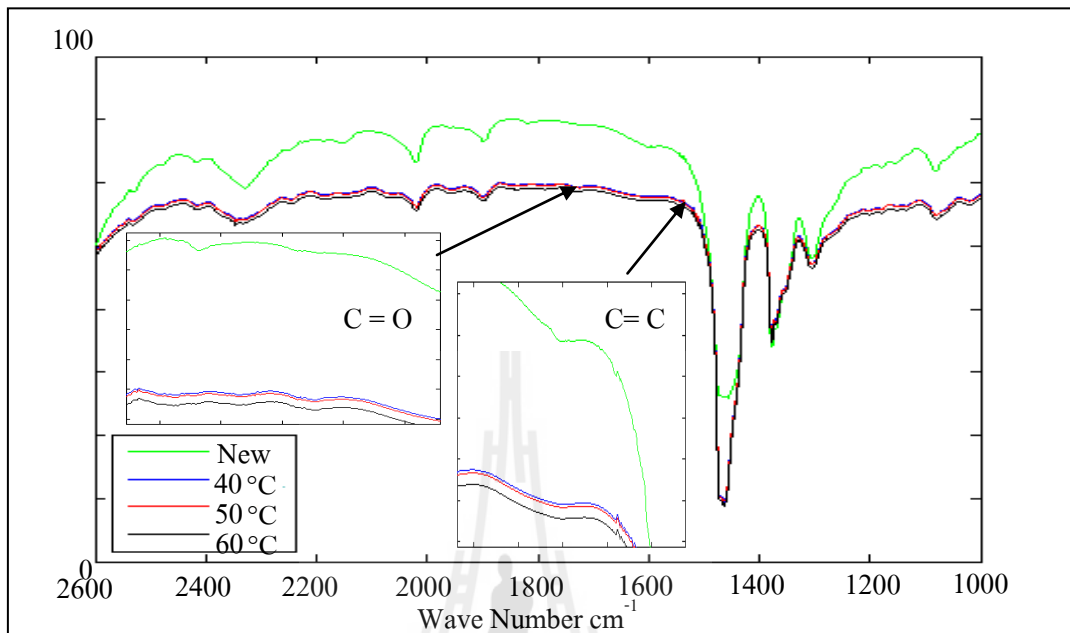
6.6.2 โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากการศึกษาค่าผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ด้วยเครื่อง FTIR ได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังนี้

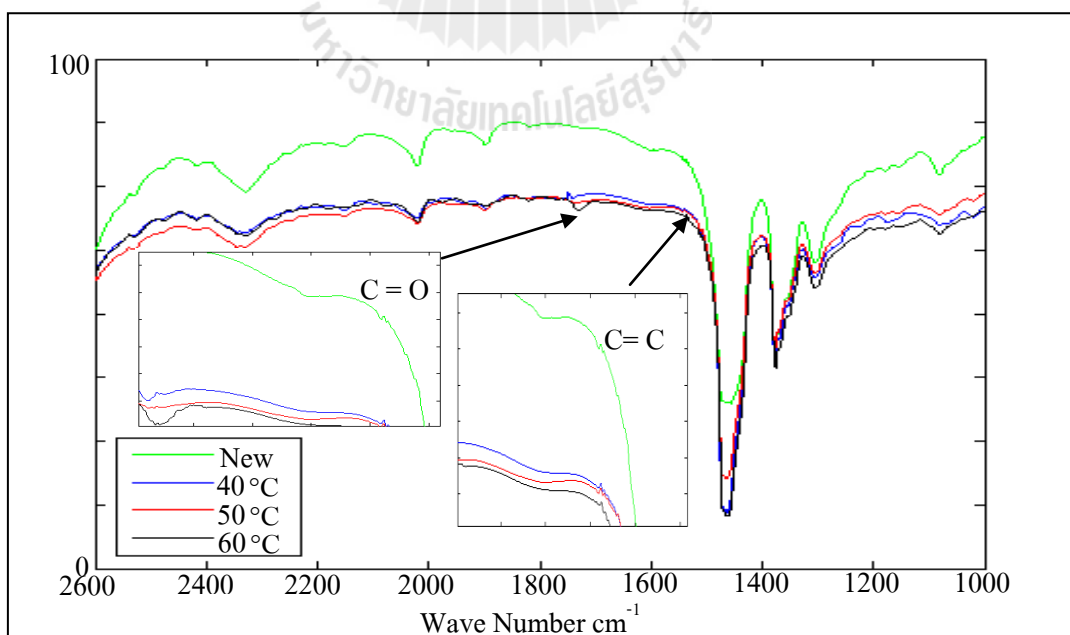


รูปที่ 6.34 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้างที่ 25kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ของ

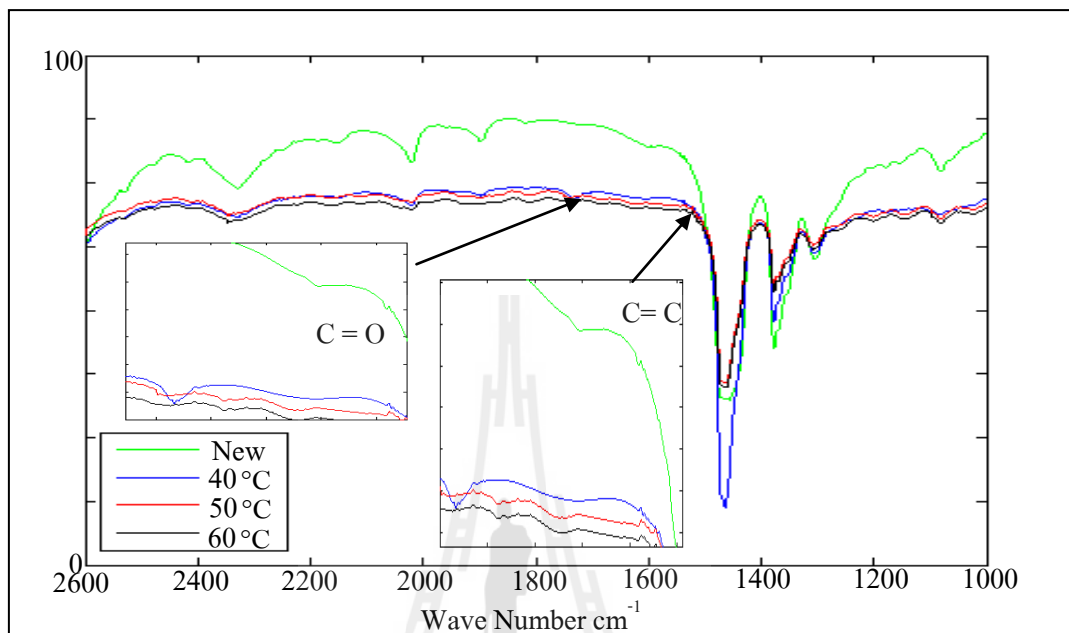
ฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี



รูปที่ 6.35 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้ำที่ 50kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี



รูปที่ 6.36 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้างที่75kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี



รูปที่ 6.37 FTIR spectrum หลังวัดการกระจายตัวประจุค้างที่100kV/mm ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี

หลังจากการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง ภายใต้อุณหภูมิและความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี จะสังเกตได้ว่าฉนวน XLPE มีการเสื่อมอายุ สังเกตได้จากการเกิดออกซิเดชันและคาร์บอนในเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C=C และ C=O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้อุณหภูมิและความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ค่าต่างๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี

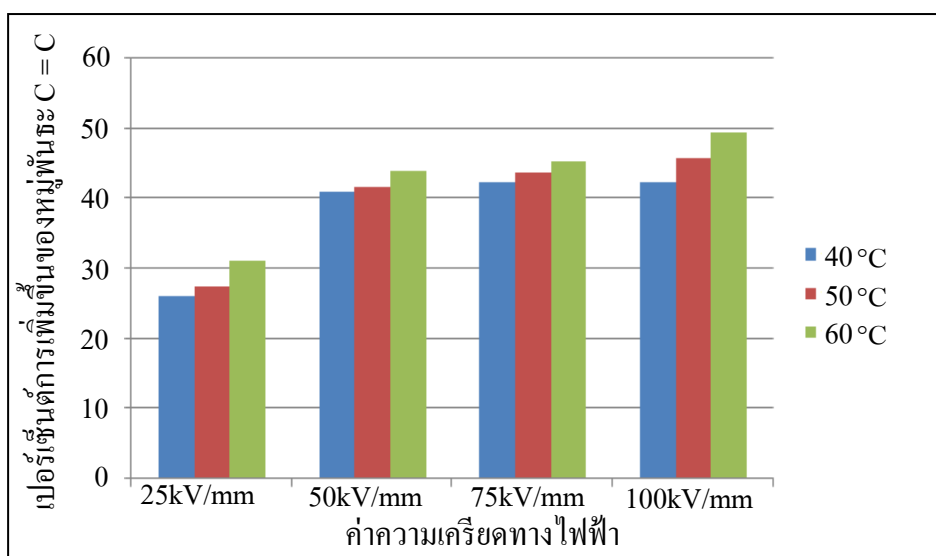
ความเครียดทางไฟฟ้า	อุณหภูมิ (°C)	C=C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C=O ที่เพิ่มขึ้น (%)
25kV/mm	40	26.21	55.32
	50	27.42	57.35
	60	31.19	59.59

50kV/mm	40	40.98	62.25
	50	41.73	63.89
	60	43.92	64.83

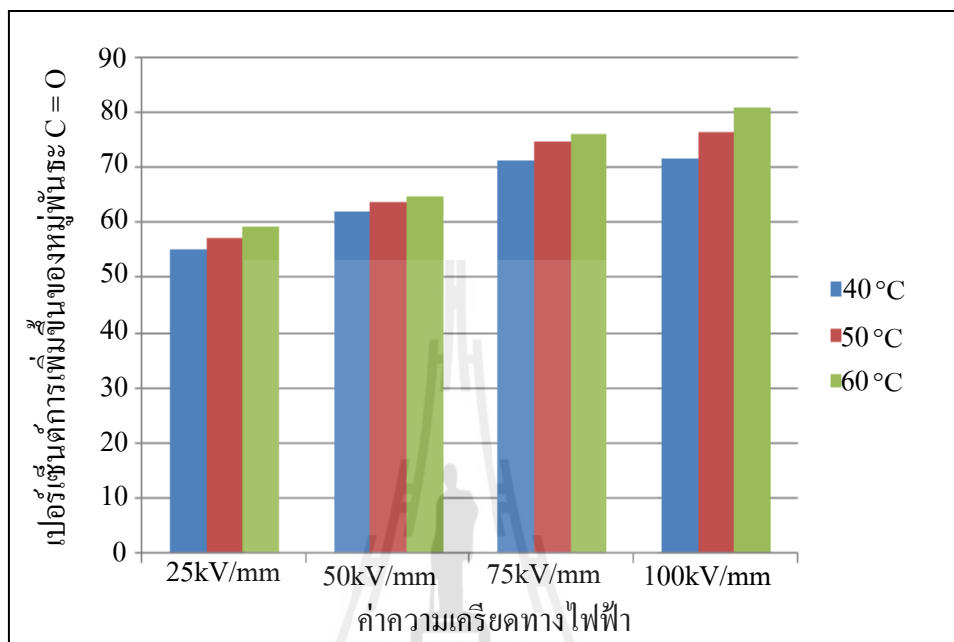
ตารางที่ 6.7 การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี (ต่อ)

ความเครียดทางไฟฟ้า	อุณหภูมิ (°C)	C = C ที่เพิ่มขึ้น (%)	C = O ที่เพิ่มขึ้น (%)
75kV/mm	40 °C	42.29	71.48
	50	43.69	74.99
	60	45.38	76.38
100kV/mm	40	42.27	71.65
	50	45.88	76.65
	60	49.51	81.19

จากตารางที่ 6.7 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O หลังวัดการกระจายตัวของประจุค้างที่ค่าความเครียด และอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี พบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O การเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวนสามารถสรุปผลค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของหมู่พันธะ C = C และ C = O ดังแสดงนี้



รูปที่ 6.38 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = C ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี



รูปที่ 6.39 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C = C ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งาน 15 ปี

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ หมู่พันธะ C = C และ C = O ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ จะพบว่าที่ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะ C = C และหมู่พันธะ C = O ดังกล่าวบ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE นอกจากนี้ถ้ามีการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของหมู่พันธะของฉนวนทั้ง 3 ชนิดพบว่าฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปีมีความหนาแน่นของประจุค้างที่สูงสุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

6.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE

ใช้กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS DP11 ดังแสดงในรูปที่ 6.40 เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE โดยจะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

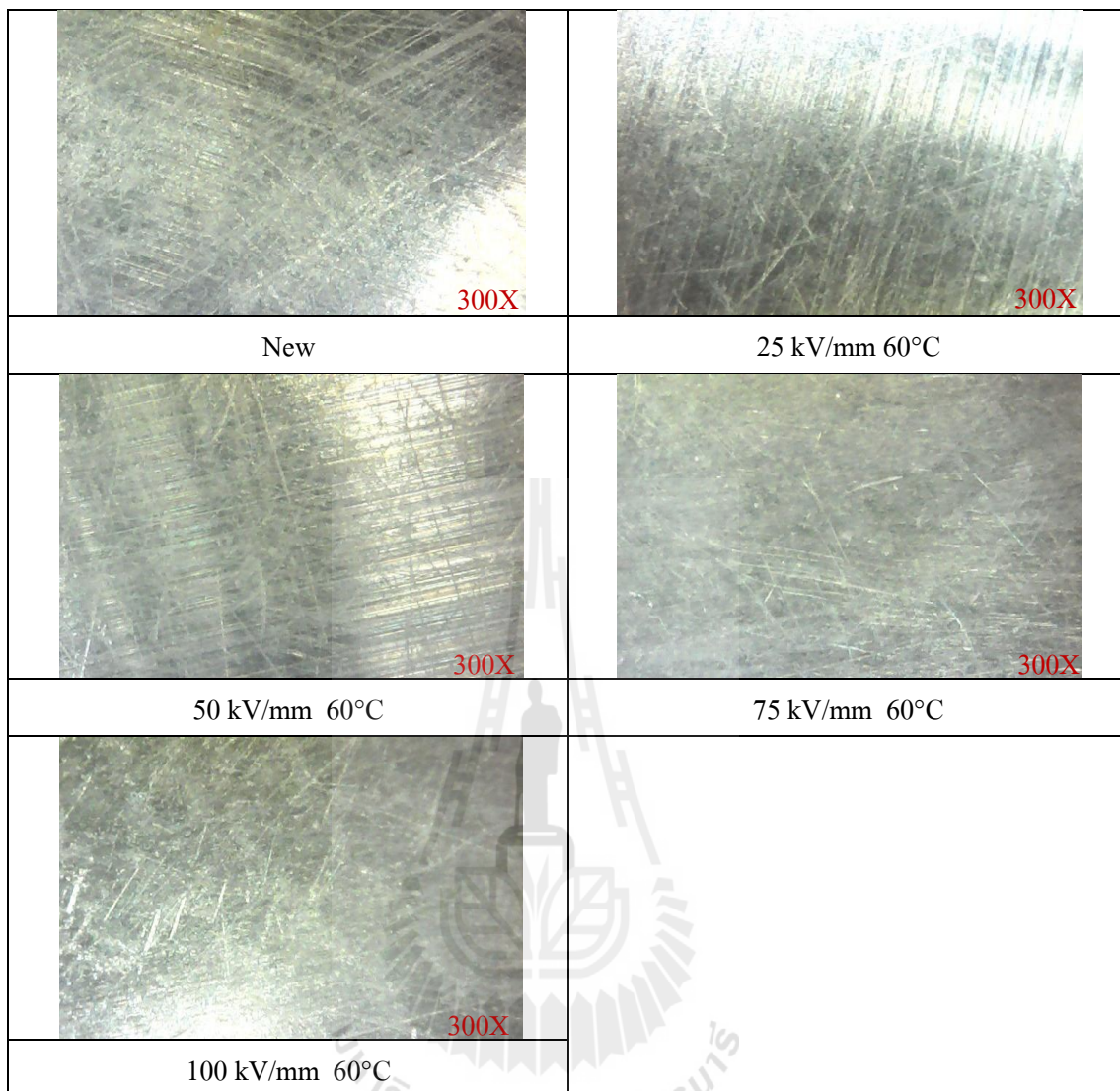
ทางกายภาพเฉพาะฉนวนหลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ



รูปที่ 6.40 กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS DP11

6.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ใหม่ หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

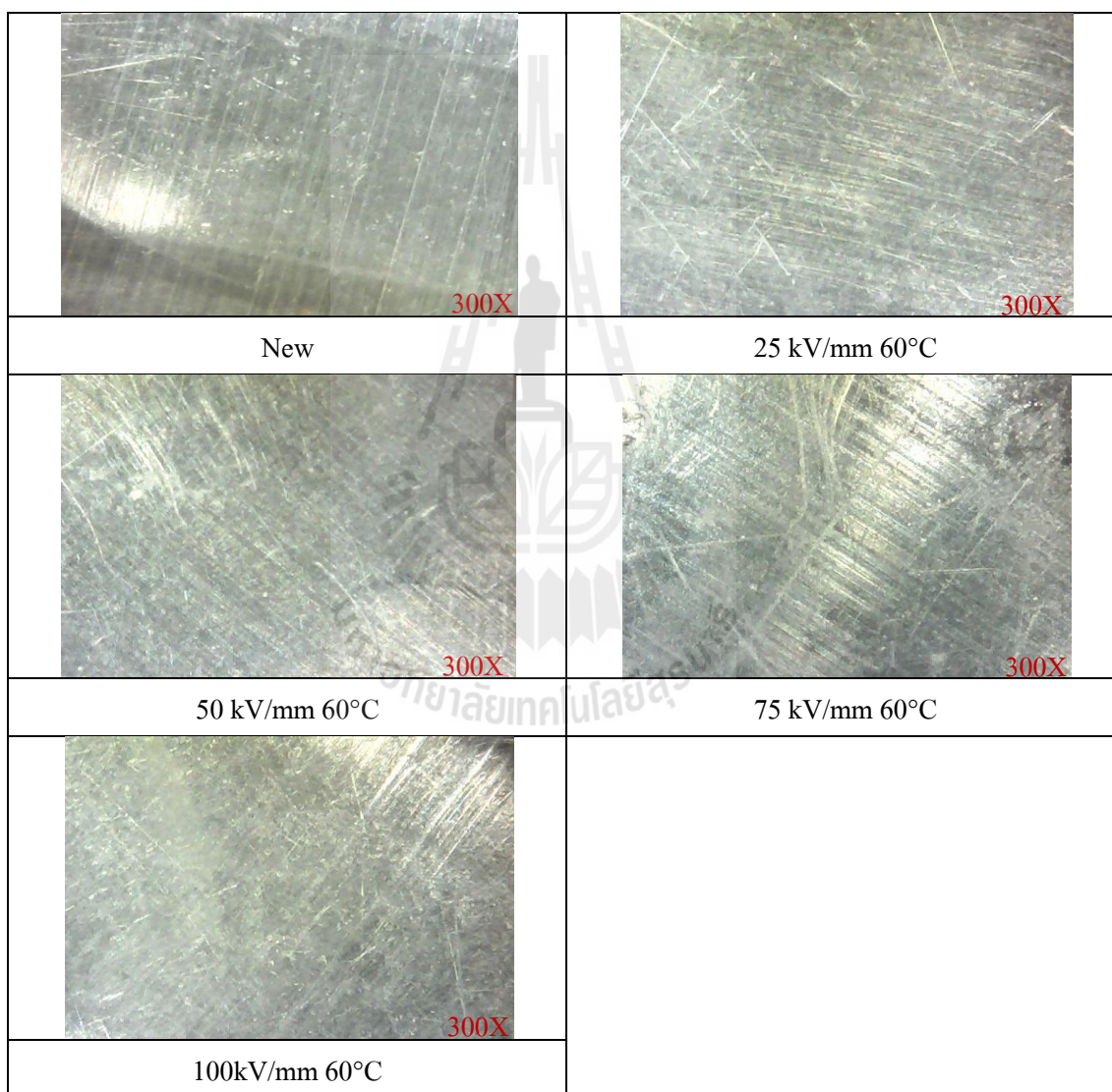
หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างของฉนวน XLPE ใหม่ ที่สภาวะความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับ 25-100 kV/mm และที่อุณหภูมิที่ 40 °C 50 °C และ 60 °C แล้วทำการการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 6.41



รูปที่ 6.41 ลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ใหม่ หลังจากวัดหลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

**6.7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี
หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะ
การกระจายตัวของประจุค้าง**

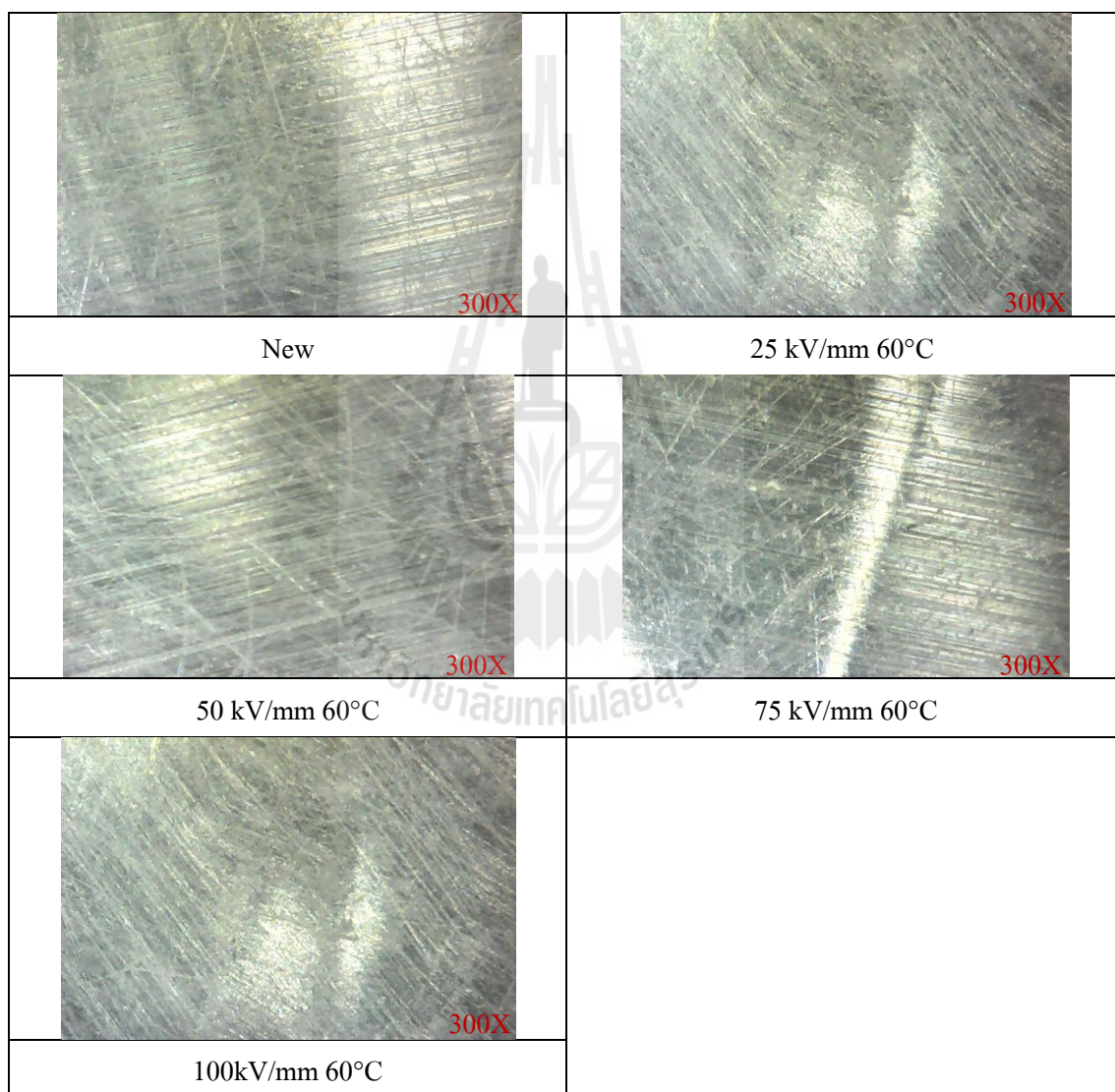
หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะ
การกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี แล้วทำการวิเคราะห์
โครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 6.42



รูปที่ 6.42 ลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ใช้งาน 12 ปี หลังจากวัดหลังจากการศึกษา
ผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

**6.7.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี
หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะ
การกระจายตัวของประจุค้าง**

หลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี แล้วทำการการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 6.43



รูปที่ 6.43 ลักษณะทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่ใช้งาน 15 ปี หลังจากวัดหลังจากการศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้าต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้าง

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่เปลี่ยนแปลงสถานะการทดลองทั้ง 3 สถานะการทดลอง พิจารณาได้จากรูปที่ 6.41 - 6.43 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่าผลของประจุค้างไม่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุจากลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ

6.8 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เพื่อศึกษาผลของประจุค้างต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี และกายภาพ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR โดยให้ผลวิเคราะห์ออกมาเป็นรูปแบบกราฟ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้างทั้ง 3 สถานะการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า อุณหภูมิ อายุการใช้งานของฉนวน XLPE และระยะเวลาในการป้อนความเครียดสนามไฟฟ้า ส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมอายุจากการเผาไหม้และการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งการเกิดการเผาไหม้แก่ฉนวน XLPE จะทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE เกิดพันธะ C = C ขึ้น หากฉนวน XLPE ได้รับความเครียดทางไฟฟ้า และอุณหภูมิที่มีค่าสูง พันธะ C = C จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วยการเกิดออกซิเดชันจะทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE เกิดพันธะ C = O ขึ้น ซึ่งพันธะ C = O ขึ้นอยู่กับความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ให้แก่ฉนวน XLPE และอายุการใช้งานของฉนวน XLPE

โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ทำการวิเคราะห์ผลด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อตรวจสอบพื้นผิว ทางกายภาพ ของเนื้อฉนวน XLPE ซึ่งสรุปได้ว่า ผลของประจุค้างจากทั้ง 3 สถานะการทดลอง ประกอบไปด้วย ความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ อายุการใช้งานจริงของฉนวน XLPE ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ทั้ง 3 สถานะการทดลอง

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับ การพัฒนาระบบ การวัดประจุค้ำงในฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสี่ยงสะท้อน และเพื่อเป็นการทดลองระบบที่สร้างขึ้นได้ศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และอายุการใช้งานจริง ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของประจุค้ำงต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางกายภาพและ โครงสร้างทางเคมี เพื่อศึกษาผลของประจุค้ำงต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา โดยกล่าวถึงความสำคัญของประจุค้ำงต่อการใช้งานของสายเคเบิลในระบบกำลังไฟฟ้า เนื่องจากประจุค้ำงเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ก่อนระยะเวลาที่สมควร ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนที่ได้ศึกษาผลของประจุค้ำงต่อคุณสมบัติของฉนวน XLPE แต่ในประเทศไทยยังมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับประจุค้ำงในฉนวน XLPE ยังน้อยอยู่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ได้รวบรวมและนำเสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของสารฉนวนพอลิเมอร์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเมอร์ ทฤษฎีแถบพลังงาน โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ สาเหตุการเกิดประจุค้ำงภายในเนื้อฉนวนรวมถึงเทคนิควิธีในการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง โดยข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นถือเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงในฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสี่ยงสะท้อน และการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอขั้นตอนการสร้าง อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ ระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงในฉนวน XLPE ด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสี่ยงสะท้อน โดยใช้ตัวอย่าง XLPE ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ฉนวน XLPE ใหม่ ฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 12 ปี และฉนวน XLPE ที่ผ่านการใช้งานมา 15 ปี ฉนวนทั้ง 3 ชนิดทดสอบภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรง และ ทดสอบภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรงและอุณหภูมิ และการเตรียมวัสดุฉนวน XLPE ที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงของฉนวน XLPE ที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ อายุการใช้งานของฉนวน XLPE ต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงผลการทดลองพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า ความหนาแน่นของประจุค้ำงที่ค่าความเครียดทางไฟฟ้าเท่ากันของฉนวนทั้ง 3 ชนิด มีความหนาแน่นของประจุค้ำงค้ำงนี้ ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 15 ปี ฉนวน XLPE ที่ใช้งานมา 12 ปี และฉนวน XLPE ใหม่ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของประจุค้ำงภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิก็มีข้อสรุปเช่นเดียวกัน แต่ความหนาแน่นของประจุค้ำงจะมากกว่ากรณีภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และพบว่าประจุค้ำงที่ตกค้ำงส่วนใหญ่มักจะเป็นการตกค้ำงของประจุลบมากกว่าการตกค้ำงของประจุบวก ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ส่งทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุค้ำงมากขึ้น

บทที่ 6 ได้นำเสนอการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE หลังจากวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำง เพื่อศึกษาผลของประจุค้ำงต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีจะใช้เครื่อง FTIR ในการตรวจสอบ เพื่อหาโครงสร้างพันธะทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของฉนวน XLPE หลังการเสื่อมอายุ จากการตรวจสอบพบว่าฉนวน XLPE ที่ได้เสื่อมอายุแล้วจะปรากฏพันธะ C = C และพันธะ C = O ขึ้น อันเนื่องมาจากการเผาไหม้และการเกิดออกซิเดชันของเนื้อฉนวน XLPE การตรวจสอบทางกายภาพจะใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องบนพื้นผิวของเนื้อฉนวน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าฉนวน XLPE ที่มีความหนาแน่นของประจุค้ำงเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีแต่ไม่ส่งผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ

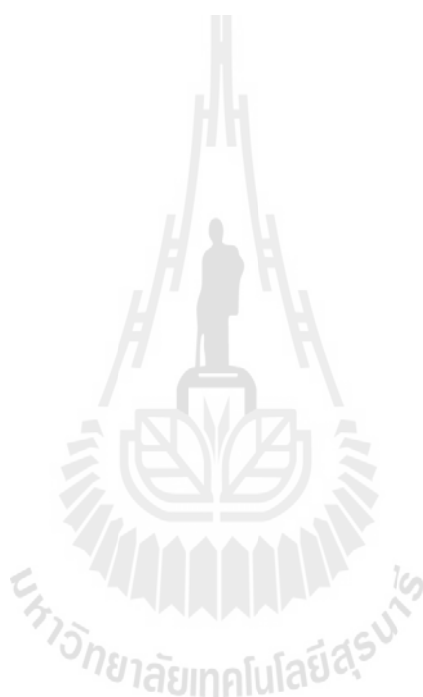
จากบทสรุปทั้ง 6 บทที่กล่าวไปข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า ประจุค้ำงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฉนวน XLPE และระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า - เสียงสะท้อนที่สร้างขึ้นสามารถวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. ควรศึกษาและวิจัยเพื่อหาแนวทางการสร้างระบบการวัดลักษณะการกระจายตัวของประจุค้ำงด้วยวิธีพัลส์ไฟฟ้า- เสียงสะท้อน สำหรับสายเคเบิลจริงโดยไม่ต้องปลดสายเคเบิลค้ำงกล่าวออกจากระบบการใช้งาน เพื่อเป็นการประเมินการอายุการใช้งานเบื้องต้นของสายเคเบิลได้

2. การศึกษาและวิจัยการปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุก้าง เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวต่อลักษณะการกระจายตัวของประจุก้าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินคุณสมบัติของฉนวน



รายการอ้างอิง

- อรรถพล ตะเระ . (2551). **คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ** . พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- ศราวุฒ คลีสุวรรณ . “การเกิดเบรกดาวน์ ในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์เนื่องจากประจุค้างและวอเตอร์ทรี” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. pp.1-16.
- ผศ.ดร.วิมลลักษณ์ สุ ตะพันธ์ และ ผศ.ดร. กษมา จารุกัจจร (2552). **เอกสารการสอนรายวิชา Engineering Materials Part: Polymeric Materials มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี** [ออนไลน์] ได้จาก:eng.sut.ac.th/metal/images/stories/.../2_Polymeric_Materials_v_stud.p...
- R. Bartnikas and RM. Eichhorn. (1983). **Engineering Dielectrics Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behavior**. Astm International.
- Carstensen, P., Farkas, A. A., Campus, A. and Nilsson, U.H., (2005) “**The Effect of the Thermal History on the Space Charge Accumulation in HVDC Crosslinked Polyethylene Cables**” *2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. pp.381-388
- Ditchi, T., Alquie, C., Lewiner, J., Favrie, E., and Jocteur, R. (1989) . “**Electrical Properties of electrode/polyethylene/electrode structures**” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. Vol. 24, No. 3, pp. 403 – 408.
- Fu, M., Chen, G., Dissado, L. A., and Fothergill, J. C., (2007) “**Influence of Thermal Treatment and Residues on Space Charge Accumulation in XLPE for DC Power Cable Application**” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 14, No. 1, pp. 53-64.
- Jones, J. P., Llewellyn, J. P. and Lewis, T. J., (2005) “**The Contribution of Field-Induced Morphological Change to the Electrical Aging and Breakdown of Polyethylene**” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 12, No. 5, pp. 951-966.

- Kanno, T., Uozumi T., and Inoue Y., (1998) **“Measurement of Space Charge Distribution in XLPE Cable Insulation at High Temperature”** *Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA.* pp. 85-88
- Kwang, S. Suh, Hwang Sun J., S. Noh Jin. (1994). **“Effects of Constituents of XLPE on the Formation of Space Charge”** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 1 No. 6, pp. 1077-1083.
- Kwang, S., Suh, Jung Hoe, K. Seung Hyung, L., and Tatsuo, T. (1996) **“Effects of Sample Preparation Conditions and Short Chains on Space Charge Formation in LDPE”** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 3 No. 2, pp. 153-160
- Mills, D. H., Lewin, P. L., and Chen, G., (2010) **“Comparison between the Electroluminescence and Space Charge of Ultraviolet and Thermally Aged Low Density Polyethylene”** *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.* pp 129-132.
- Mizutani, T., Kenta, S., Kazue, K., Tatsuo, M., Mitsugu I., and Tatsuya N. (2000). **“Space Charge Behavior near LDPE / LDPE Interface”**. *2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp.800-803.
- Mizutani, T., Semi, H., Kaneko, K., (2000) **“Space Charge Behavior in Low – Density Polyethylene.** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* Vol. 7 No. 4, pp.503-508
- Montanari, G. C., and Das-Gupta D. K., (2000) **“Polarization and Space Charge Behavior of Unaged and Electrically Aged Crosslinked Polyethylene”** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 7 No. 4, pp.474-479.
- Montanari, G. C., and Palmieri, F. (2003) **“The effect of humidity on space charge accumulation in XLPE”** *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.* pp. 205-208.
- Tanaka, Y., Chen, G., Zhao, Y., Davies, A., E., and Takada, T. (2003) **“Effect of Additives on Morphology and Space Charge Accumulation in Low Density Polyethylene”** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* Vol. 10, No. 1, pp.148-154.

Tatsuo, T., Murata, K., Yasuhiro, T.,(1996) “**Dynamic Observation of Space Charge Formation in XLPE using Pulsed Electro-acoustic Method**” *1996 IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco*, October 20-23, pp. 161-164.





ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- Thiamsri, R., Ruangkajonmathee, N., Marungsri, B., and Oonsivilai, A. (2011) **Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treeing in 22 kV Cross-link Polyethylene Insulated Cable**. Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol.60, pp. 376-381.
- Ruangkajonmathee, N., Thiamsri, R., and Marungsri, B., (2012) **Space Charge Distribution in 22 kV XLPE Insulated Cable by using Pulse Electroacoustic Measurement Technique**. Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol.72, pp. 1138-1141.



Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treeing in 22 kV Cross-linked Polyethylene Insulated Cable

R. Thiamsri, N. Ruangakajonmathee, A. Oonsivilai and B. Marungsri

Abstract—This paper presents the experimental results on effect of applied voltage stress frequency to the occurrence of electrical treeing in 22 kV cross linked polyethylene (XLPE) insulated cable. Halfow disk of XLPE insulating material with thickness 5 mm taken from unused high voltage cable was used as the specimen in this study. Stainless steel needle was inserted gradually into the specimen to give a tip to earth plane electrode separation of 2.5 ± 0.2 mm at elevated temperature 105-110°C. The specimen was then annealed for 5 minute to minimize any mechanical stress build up around the needle-plane region before it was cooled down to room temperature. Each specimen were subjected to the same applied voltage stress level at 8 kV AC rms, with various frequency, 50, 100, 500, 1000 and 2000 Hz. Initiation time, propagation speed and pattern of electrical treeing were examined in order to study the effect of applied voltage stress frequency. By the experimental results, initial time of visible treeing decreases with increasing in applied voltage frequency. Also, obviously, propagation speed of electrical treeing increases with increasing in applied voltage frequency. Furthermore, two types of electrical treeing, bush-like and branch-like treeing were observed. The experimental results confirmed the effect of voltage stress frequency as well.

Keywords—Voltage stress frequency, cross-linked polyethylene, electrical treeing, treeing propagation, treeing pattern

1. INTRODUCTION

RECENTLY, cross linked polyethylene (XLPE) material is widely used as insulating material in high voltage cable for electrical transmission and distribution systems because of its excellent physical, chemical and dielectric properties. However, under multi-stress, i.e. electrical, thermal and mechanical stresses, and over a period of time, its chemical composition and physical morphology may change without avoidable. In consequence, its properties may alter, i.e. increasing of conductivity and dielectric loss and reduction of mechanical, electrical and thermal strengths. Finally, ageing deterioration of XLPE material may occur. Many phenomena can induce ageing of XLPE material. Partial discharge is one of those phenomena. Electrical treeing is one of partial discharge in an insulation system of XLPE insulated cable. Electrical treeing is not only the main factor affecting the

reliability of cable insulation, but also the final destructive form of cable insulation operating in the long run. Electrical trees can be initiated from various defects in cable insulation, such as impurity or local high electric field due to the protuberance of semi-conducting shielded layer. It is found that the factors responsible for initiating and propagating of electrical trees in cable insulation depend upon not only the cable manufacturing technique, physical morphology of insulation material but also depending on the frequency of applying voltage [1-5].

Rawangpai et al. [6] reported the experimental results on artificial ageing test of 22 kV XLPE cable for distribution system application in Thailand. XLPE insulating material of 22 kV cable was sliced to 60-70 μ m in thick and was subjected to ac high voltage at 23°C, 60°C and 75°C. Testing voltage was constantly applied to the specimen until breakdown. Breakdown voltage and time to breakdown were used to evaluate life time of insulating material. The physical model by J.P. Crine for predicts life time of XLPE insulation material was adopted as life time model and was calculated in order to compare the experimental results.

Hozumi et al. [7] studied influence of morphology on electrical tree initiation in polyethylene and insulation of the XLPE cables under ac and impulse voltages.

Zheng et al. [8] studied the electrical tree growing characteristics. The relationship between electrical tree propagation and the material morphology in XLPE cable insulation has been elucidated.

Xie et al. [9] found the statistical initiation and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cables with different voltage ratings from 66 to 500 kV. They investigated electrical treeing under a constant test voltage of 50 Hz/7 kV (the 66 kV rating cable is from UK, the others from China). They found that the characteristics of electrical trees in the inner region of 66 kV cable insulation differed considerably from those in the outer region under the same test conditions.

Yoshimura et al. [10] reported results on the influence of interfacial pressure on treeing deterioration in XLPE. However, they did not find any clear change in the breakdown time with increasing interfacial pressure.

Auckland et al. [11] focus on a mechanical approach to the understanding of electrical treeing. In their view, treeing initiation is believed to arise from fatigue forces induced by the applied voltage. During the growth microscopic explosions within the dielectric due to localized intrinsic breakdown will create shock waves which lead to fatigue failure and fracture. It is verified by experiments that tree growth may be

R. Thiamsri and N. Ruangakajonmathee are master degree student with Suranaree University of Technology, Nakhonrachasima, 30000, Thailand.

A. Oonsivilai is with Center of Excellence in Electric Energy, Smart Materials, and Health Science, Postharvest Technology Research Center, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima 30000 Thailand.

*B. Marungsri is with Suranaree University of Technology, NakhonRachasima, 30000, Thailand (corresponding author, phone: +66 44224366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bunsvce@su.ac.th)

controlled by the fracture toughness of the polymer as well as by its modulus of elasticity.

Noto and Yoshimura [12] examined polyethylene under various frequencies of ac electric stress. It was found that tree does not follow a linear growth relationship with the frequency. Under various applied voltages, tree exhibits different growth characteristics with various frequencies.

Many researchers have studied the effects of morphology of semi-crystalline material on the initiation and propagation of electrical trees in the past decades, but little attention was paid to the influence of frequency voltage on electrical tree in XLPE cable insulation [7-12]. In this study, initiation time, propagation speed and pattern of electrical treeing in 22 kV XLPE insulated cable subjected to sinusoidal waveform voltage stress with various frequency from 50-2,000 Hz were examined. The effects of applied voltage stress frequency to the occurrence electrical treeing were studied and elucidated.

II. TEST ARRANGEMENT

A. Specimen

In this study, all specimens were taken from a commercial 22 kV XLPE distribution power cable having copper conductors 12 mm in diameter and XLPE insulation 6 mm thick, as shown in Fig. 1. This type of power cable is used for underground distribution system of Provincial Electricity Authority (PEA) of Thailand. Unused cable was cut into hollow disc with a thickness of 5 mm. Cable cover and semiconducting layer were removed before the experimental. Stainless steel needle was inserted gradually into the specimen to give a tip to earth-plane electrode separation of 2.5 ± 0.2 mm at elevated temperature of 105-110°C. The specimen was then annealed for approximately 5 minutes to minimize any mechanical stress build up around the needle-plane region before it was cooled down to room temperature. A typical specimen with an inserted needle is shown in Fig. 2.

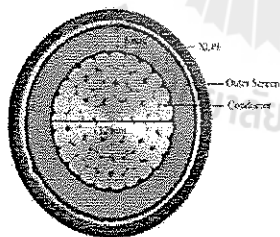


Fig. 1 Cross-section of 22 kV XLPE cable

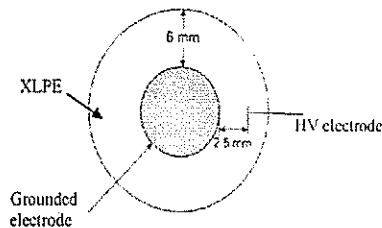


Fig. 2 Schematic diagram of specimen

B. Test Method

During the experimental, the specimen was immersed in insulating bath oil to prevent external discharges or flashover. Test voltage was applied from high voltage amplifier (8 kV AC rms) with various frequencies at 50, 100, 500, 1000 and 2000 Hz, respectively. The experimental was conducted at room temperature (25°C). For each frequency of voltage stress, the occurrence of electrical treeing was enlarged by using digital microscope (5-500X) and was continuously recorded until electrical treeing cover $\approx 90\%$ of needle-plane gap spacing. Electrical failure or breakdown of XLPE insulating material was avoided. Schematic diagram of experimental setup is illustrated in Fig. 3 and actual experimental layout is illustrated in Fig. 4.

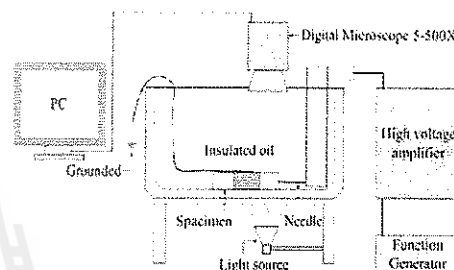


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

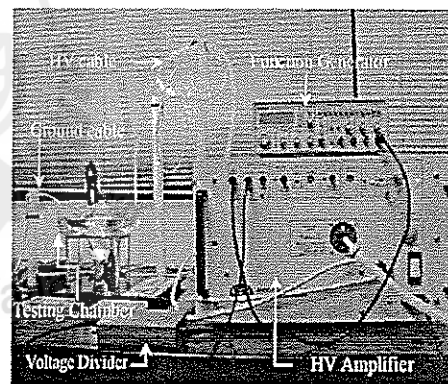


Fig. 4 Experimental Layout

III. TEST RESULTS AND DISCUSSIONS

From the experimental results, significant differences in the occurrence of electrical treeing at each voltage stress frequency were observed. Three characteristics of electrical treeing, i.e. time of first visible treeing, treeing pattern and treeing propagation time, were analyzed and were discussed for each voltage stress frequency. Video capture software is useful tool for analyses the recorded video.

In case of applied voltage stress frequency at 50 Hz, first of visible treeing having 0.4 mm in length was observed after applying voltage stress for 31 minute. Electrical treeing initiated from tip of the needle electrode and expanded to the plane electrode. After applying voltage stress for 90 minute,

the expansion of electrical treeing reached 1.01 mm. Branch like treeing expansion with slowly speed propagation was observed for this voltage stress frequency. Caption picture of electrical treeing from recorded video are illustrated in Fig.5.

In case of applied voltage stress frequency at 100 Hz, first of visible treeing having 0.28 mm in length was observed after applying voltage stress for 22 minute. Electrical treeing initiated from tip of the needle electrode and expanded to the plan electrode. Unlike previous frequency, brush-like treeing was observed for this voltage stress frequency. The expansion of bush-like treeing reached 1.07 mm after applying voltage stress for 66 minute. Propagation speed of bush-like treeing at frequency 100 Hz is faster than that of frequency 50 Hz. Caption pictures of bush-like treeing are illustrated in Fig.6.

In case of applied voltage stress frequency at 500 Hz (ten times of power frequency), first of visible electrical treeing having 0.57 mm in length was observed after applying voltage stress for 15 minute. Electrical treeing initiated from tip of the needle electrode and expanded to the plane electrode same as those two previous frequencies. However, propagation and expansion speeds are faster than those of the two previous frequencies. The expansion of branch-like treeing reached

1.52 mm in length after applying voltage stress for 80 minute. Caption pictures of branch-like treeing are illustrated in Fig.7.

In case of applied voltage stress frequency at 1000 Hz (twenty times of power frequency), first visible electrical treeing having 0.43 mm in length was observed after applying voltage stress for 9 minute. Also, electrical treeing initiated from tip of the needle electrode same as the previous three frequencies, 50 Hz, 100 Hz, and 500 Hz, respectively. The expansion of electrical treeing reached 1.98 mm in length after applying voltage stress 62 minute. Such treeing occurrence indicates higher propagation speed when comparing with the other frequency. Caption picture of branch-like treeing are illustrated in Fig.8.

In case of applied voltage stress at frequency 2000 Hz (forty times of power frequency), first of visible electrical treeing was observed after applying voltage stress 5 minute. Apparent of visible treeing is the most fastest comparing with the other frequency. Branch-like treeing, also, initiated from tip of needle electrode and reached 2.48 mm in length after applying voltage stress 40 minute. Caption picture of electrical treeing are illustrated in Fig.9.

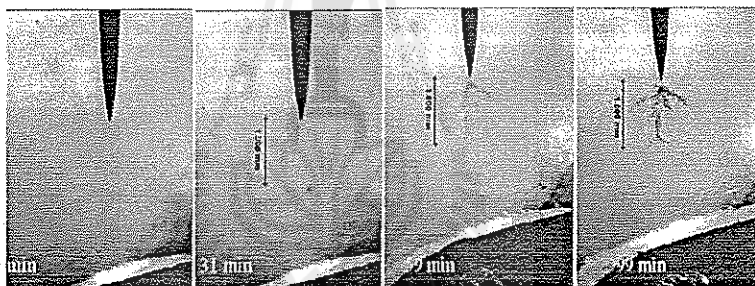


Fig. 5 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 50 Hz

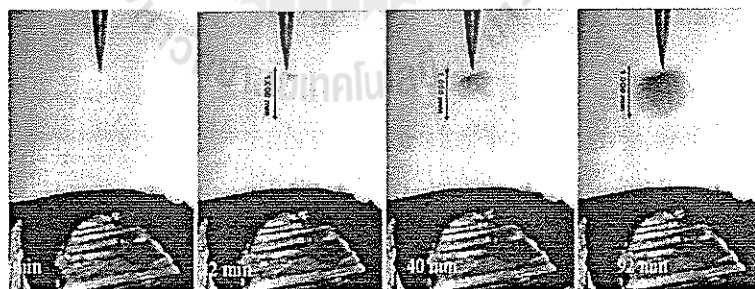


Fig. 6 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 100 Hz

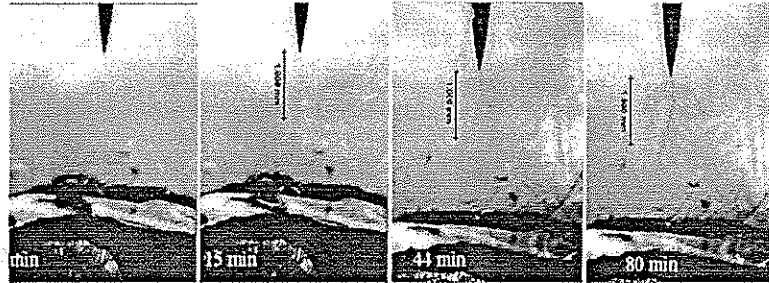


Fig. 7 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 500 Hz

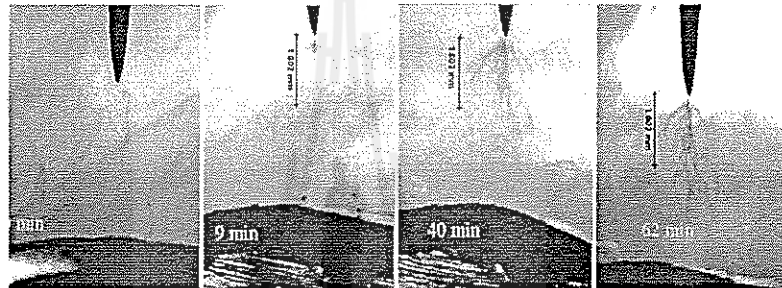


Fig. 8 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 1,000 Hz

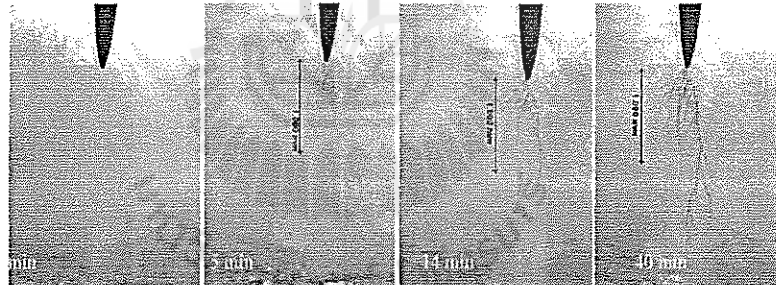


Fig. 9 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 2,000 Hz

TABLE I
COMPARISON PROPAGATION LENGTH AND PROPAGATION TIME OF ELECTRICAL TREERING

50 Hz		100 Hz		500 Hz		1,000 Hz		2,000 Hz	
Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)
0.40	31	0.28	22	0.37	15	0.43	9	0.78	5
0.41	35	0.31	28	0.41	21	0.51	15	0.81	7
0.43	37	0.39	33	0.48	25	0.59	20	0.87	9
0.49	41	0.46	38	0.59	29	0.75	25	0.93	11
0.53	43	0.58	40	0.67	35	0.86	30	0.99	12
0.61	48	0.61	42	0.75	37	0.98	35	1.23	14
0.68	51	0.64	46	0.80	41	1.11	37	1.32	16
0.72	55	0.73	50	0.91	44	1.30	40	1.38	17
0.86	59	0.81	56	1.06	50	1.46	44	1.43	18
0.91	63	0.89	60	1.21	55	1.53	49	1.55	20
0.96	69	0.99	66	1.35	59	1.61	54	1.63	24
1.00	74	1.07	70	1.41	64	1.73	56	1.75	28
1.00	84	1.07	75	1.51	71	1.85	59	1.98	32
1.01	90	1.07	80	1.51	77	1.89	60	2.13	36
1.01	99	1.07	92	1.52	80	1.98	62	2.48	40

In order to examine the effect of applied voltage stress frequency, propagation length and propagation time of electrical treeing were measured by using video caption pictures. The measuring results illustrated in Table I and were plotted together, as shown in Fig. 10. As shown in Table I, initial time of visible treeing (recorded video) decreases with increasing in applied voltage frequency. Obviously, as shown in Fig. 10, propagation speed of electrical treeing increases with increasing in applied voltage frequency. The experimental results show that voltage stress frequency is one of dominant effect to the occurrence of electrical treeing. Furthermore, as illustrated in Table II, Two types of electrical treeing, bush-like and branch-like treeing were observed from the experimental.

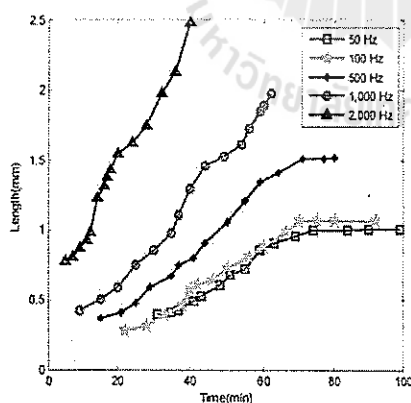


Fig. 10 Propagation characteristics of electrical trees

TABLE II
PATTERN OF ELECTRICAL TREERING

Frequency (Hz)	Time (min)	Treeing length (mm)	Treeing characteristic
50	99	1.01	Branch tree
100	92	1.07	Bush tree
500	80	1.52	Branch tree
1,000	62	1.98	Branch tree
2,000	40	2.48	Branch tree

IV. CONCLUSION

The following conclusions are given according to the experimental results.

- (1) Initial time of visible electrical treeing decrease with increasing in applied voltage stress frequency.
- (2) Obviously, propagation speed of electrical treeing increase with increasing in applied voltage stress frequency.
- (3) Two types of electrical treeing, bush-like and branch-like treeing, were observed.

ACKNOWLEDGMENT

The Authors would like to thank you Suranaree University of Technology for financial support.

REFERENCES

- [1] J. V. Champion, S. J. Dodd, Y. Zhao, A. S. Vaughan, M. Brown, A. E. Davies, S. J. Sutton and S. G. Swingle, "Morphology and Growth of Electrical Trees in a Polypropylene/ethylene Copolymer", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 8, pp. 284-292, 2001.
- [2] J. V. Champion, S. J. Dodd, A. S. Vaughan, Y. Zhao, and S. J. Sutton, "Effect of Voltage, Temperature and Morphology on Electrical Treeing in Polyethylene Blends", *Proceedings of Dielectric Materials, Measurement and Applications*, No. 473, pp. 35-40, 2000.
- [3] E. David, I. Parpal, and J. Crine, "Influence of Internal Mechanical Stress and Strain on Electrical Performance of Polyethylene", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 3, pp. 248-57, 1996.
- [4] Y. Zhao, A. S. Vaughan, J. V. Champion, S. J. Dodd, and S. J. Sutton, "The structure of Electrical Trees in Semi-crystalline Polymers

- Proceedings of Dielectric Materials, Measurement and Applications*, London Guildhall University UK, IEE Conference Publication, No. 473, pp. 314-319, 2000.
- [5] A. Xie, X. Zheng, S. Li and G. Chen, "Investigations of electrical trees in the inner layer of XLPE cable insulation using computer-aided image recording monitoring" *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol.17, pp.685-693, 2010.
- [6] A. Rawangpia, B. Marungsri and N. Chonmawang "Artificial accelerated ageing test of 22 kV XLPE cable for distribution system applications in Thailand", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 65, pp.220-225, 2010.
- [7] N. Hozumi, M.Okamoto and H.Fukagawa "The influence of morphology on electrical tree initiation in polyethylene under AC and impulse voltages", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol.25, pp.707-714, 1990.
- [8] X.Zheng and G.Chen, "Propagation mechanism of electrical tree in XLPE cable insulation by investigating a double electrical tree structure" *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol.15, pp.800-807, 2008.
- [9] A.S.Xie and X.Q.LI, "Electrical trees in inner and outer layer of different voltage rating XLPE cable insulation" *International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM2008)*, pp.380-383, 2008.
- [10] N. Yoshimura, E. Hirake, Y. Changmin, H. Miyata and T. Niwa, "Effect of Interface Pressure on Treeing Deterioration in Cross linked Polyethylene", *Proceeding of International Conference on Property and Application of Dielectric Material*, pp. 444-447, 1994
- [11] M.N. Arbab and D.W. Auckland: "Growth of electrical trees in solid insulation" *IEE Proceeding of Science*, Vol. 136, No. 2, pp. 73-78, 1989.
- [12] F. Noto and N. Yoshimura, "Voltage and Frequency Dependence of Tree Growth in Polyethylene", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 206-217, 1974.

Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Dr. Marungsri is currently an assistant professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interesting research topic are high voltage insulation technologies and electrical power system.



Rattakhet Thiamsri was born in Anthonng, Thailand, in 1987. He received his B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His interesting research areas are high voltage technology applications, high voltage insulation technology and power system technology.



Nattawut Ruangkajonmathee was born in KhonKaen, Thailand in 1987. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, in 2009. Currently, he is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His interesting research topic is high voltage insulation technology.



Anant Oonsivilai, was born in KhonKaen Province, Thailand, in 1963. He received his B.Eng from Khon Khan University, and M.Eng. from King Mongkut Institute of Technology North Bangkok, Thailand and PhD. From Dalhousie University, Canada, all in Electrical Engineering, in 1986, 1992 and 2000, respectively. Dr. Oonsivilai is currently an Assistant Professor in school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.



Boonruang Marungsri was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai,

Space Charge Distribution in 22 kV XLPE Insulated Cable by using Pulse Electroacoustic Measurement Technique

N. Ruangajonmathee, R. Thiamsri, and B. Marungsri*

Abstract—This paper presents the experimental results on space charge distribution in cross-linked polyethylene (XLPE) insulating material for 22 kV power distribution system cable by using pulse electroacoustic measurement technique (PEA). Numbers of XLPE insulating material ribbon having thickness 60 μm taken from unused 22 kV high voltage cable were used as specimen in this study. DC electric field stress was applied to test specimen at room temperature (25°C). Four levels of electric field stress, 25 kV/mm, 50 kV/mm, 75 kV/mm and 100 kV/mm, were used. In order to investigate space charge distribution characteristic, space charge distribution characteristics were measured after applying electric field stress 15 min, 30 min and 60 min, respectively. The results show that applied time and magnitude of dc electric field stress play an important role to the formation of space charge.

Keywords—Space charge distribution, pulsed electroacoustic (PEA) technique, cross-linked polyethylene (XLPE), DC electrical fields stress.

1. INTRODUCTION

Nowadays, XLPE is used as an insulating material in high voltage power cable. The advantages of XLPE are high dielectric strength and electrical resistivity combined with good physical properties such as resistance to cracking and moisture penetration [1-2]. However, under certain operating conditions, their good electrical insulation properties may become degraded. For example, trapped or low mobility electrically charged species within the bulk can give rise to space charge, resulting in localized electric stress enhancement. This can cause further concentration of charge and lead to premature failure of the material [3-4]. In a solid dielectric medium, space charge and electric displacement are related by the Maxwell-Gauss equation. In situations where quantities depending on only one spatial coordinate, z , this equation is expressed as [5]:

$$\frac{\partial D(z)}{\partial z} = \rho(z) = \rho_c(z) + \rho_p(z) \quad (1)$$

where:

$D(z)$ is the electric displacement,

$\rho(z)$ is the total charge density,

N. Ruangajonmathee and R. Thiamsri are master degree students with Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, THAILAND.

*B. Marungsri is with Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, THAILAND (corresponding author, phone: +66 44224366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bmsvce@ sut.ac.th).

$\rho_c(z)$ is the volume density of space charges, defined as real charges, being positive or negative, including surface and bulk charge,

$\rho_p(z)$ is the volume density of bound charges, defined in respect to material polarization P as:

$$\rho_p(z) = -\frac{\partial P(z)}{\partial z} \quad (2)$$

If the polarization is uniform along the z direction, the total charge is the space charge.

Space charge effects have been widely recognized as one of the major components of the electrical aging processes in polymeric insulation, because it may raise the electric field locally and hence initiate a degradation mechanism in insulator [3, 6-7]. Therefore, it is very important to understand space charge effects to polymer insulation.

PEA technique is a nondestructive method, which has been developed to measure dynamically net charge density as a function of distance through solid insulating materials under an applied voltage. The principle of space charge measurement using the PEA technique is well known and reported elsewhere [5-6, 8-9].

Kwang et al. [10] studied effects of constituents of XLPE on the formation of space charge by PEA technique, cross-linked part of low density polyethylene (LDPE) encourages antioxidant and residual byproducts on the formation of space charge in XLPE have been investigated.

Montanari et al. [11] reported results the effect of humidity on space charge accumulation in XLPE at room temperature and humidity concentration from 5 to 95%. Space charge measurements were performed by using the PEA technique. Different levels of DC constant poling field were considered, ranging from 5 kV/mm to 185 kV/mm.

Chen et al. [12] report the effect of mechanical deformation on space charge dynamics in XLPE. Thin films were peeled from a 66 kV commercial XLPE cable. Space charge measurements under DC electric fields have been monitored using the PEA technique.

Chong et al. [13] reports on space charge evolution in XLPE planar specimens approximately 1.20 mm thick subjected to electric stress level of 30 kV_{dc}/mm at four temperatures 25, 50, 70 and 90°C for 24 h. Space charge distributions are dominated by positive charge when tested at high temperatures regardless of specimens treatment and positive charge propagation enhances as testing temperature increases. This can be a major cause of concern as positive charge propagation has been reported to be related to insulation breakdown.

In this paper, space charge distribution in XLPE insulating material for 22 kV cable under different dc electric fields ranging from 25 kV/mm to 100 kV/mm have been investigated by using the PEA measurement technique. The influence of electric field stress on space charge distribution been investigated.

II. EXPERIMENTAL

A. Specimens

Specimens for the experimental made from un-aged 22 kV XLPE distribution power cables having copper conductors 12 mm in diameter and XLPE insulation 6 mm thick, as shown in Fig. 1. This type of power cable is used in underground distribution system of Provincial Electricity Authority of Thailand. Numbers of XLPE ribbon with thickness 60 μm were cut from the insulation around a cable by using a microtome. All specimens were measured precisely before testing so the thickness effect is neglected.

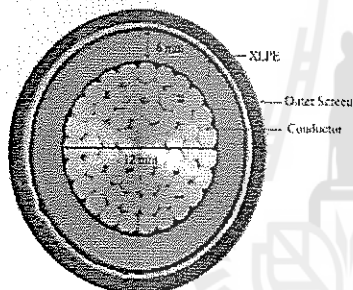


Fig.1 Cross-section of 22 kV XLPE cable

B. Test Arrangement and Test Methods

The PEA technique was chosen to detect space charge in specimens due to its simplicity in structure, low cost and easy to implement. A high voltage pulse with 5 ns length is applied to the specimens sandwiched between the two electrodes. The pulse electric field produced interacts with charge layers, generating an electric force which displays charge. The consequence is the formation of pulsed acoustic waves in correspondence of each charge layer with respect to neutrality. The resultant acoustic signals are detected by a piezoelectric transducer (PVDF) so that the charge distribution in the specimens under test can be obtained from the output voltage profile of the transducer. The electric signal obtained in time domain represents the charge distribution. The analysis of space charge profiles is restricted to one dimension.

The schematic diagram for the PEA system used for this experiment is shown in Figure 2. The electric signal obtained in time domain represents the charge distribution. To obtain quantitative charge distribution, a proper calibration is required [14].

Electrodes and specimens were immersed in transformer oil in order to avoid surface flashover in air. The experimental layout is shown in Fig. 3. To observe space charge dynamics, the electric fields ranging from 25 kV/mm to 100 kV/mm were

applied to specimens. The experimental conditions are shown in Table I.

TABLE I
TEST CONDITIONS

PEA system	Conditions
Electric Field	25-100 kV/mm
Pulse Voltage	400 V, 5ns, 1kHz
Specimens thickness	60 μm
High voltage Amplifier	1:2000

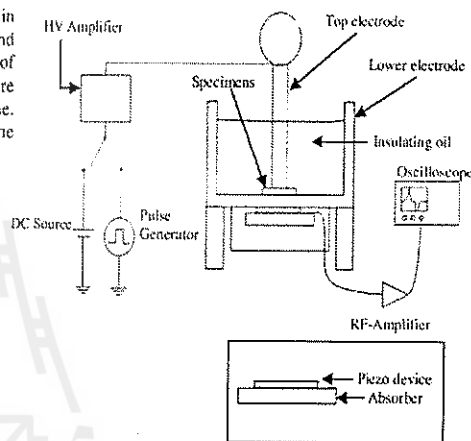


Fig.2 Test arrangement

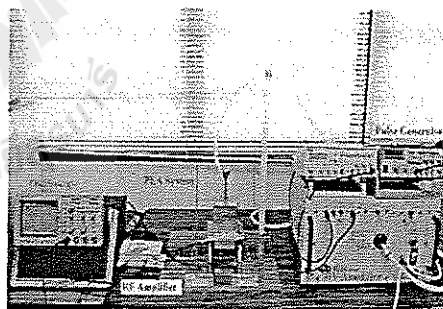


Fig. 3 Test chamber

III. TEST RESULTS AND DISCUSSION

The PEA measurements were performed at room temperature after applying DC field stress for 15 min, 30 min and 60 min, respectively. The experimental were carefully conducted in order to obtain the precisely results. Measurement results for each electric field stress level are illustrated in Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7, respectively.

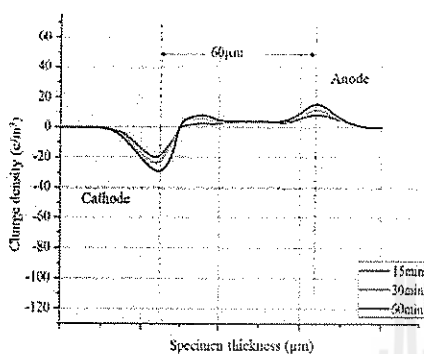


Fig. 4 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 25 kV/mm

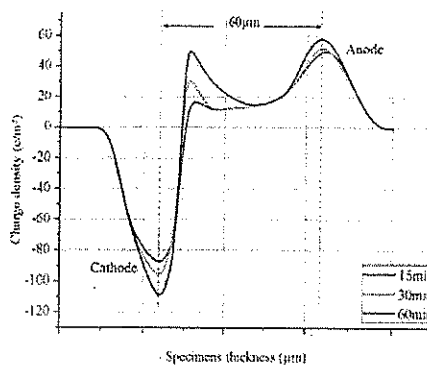


Fig. 7 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 100 kV/mm

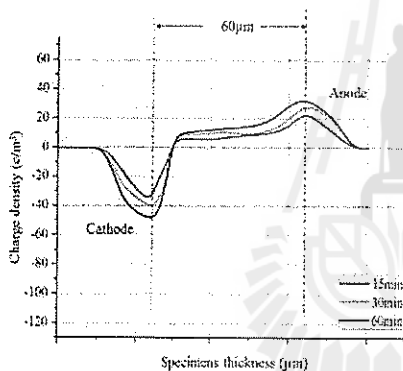


Fig. 5 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 50 kV/mm

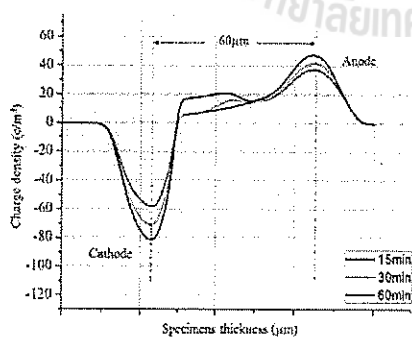


Fig. 6 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 75 kV/mm

As illustrated in Fig. 4-7, magnitude of space charge increases with increasing magnitude of electric field stress. Higher formation rate of space charge obtained when applying higher electric field stress. Furthermore, the relation between charging time and the charge density at different applied DC voltage can be seen. Under same electric field stress, magnitude of space charge increases with increasing charged time.

Fig. 8 and Fig. 9 show the relation between charging time and the charge density at cathode and anode, respectively.

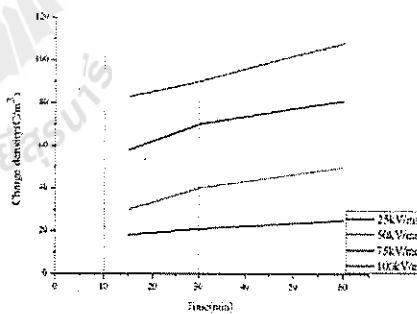


Fig. 8 The relation between charging time and the charge density at cathode

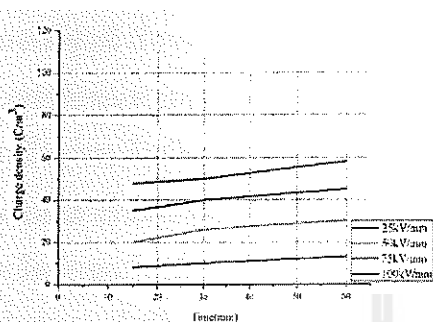


Fig.9 The relation between charging time and the charge density at anode

IV. CONCLUSION

Space charge distribution characteristics in XLPE ribbon at the applied electric fields ranging from 25 to 100 kV/mm have been observed over a period of 15 min, 30 min and 60 min, respectively using the PEA technique. The following conclusions are given.

- (1) The characteristics of space charge formation at the two electrodes after applying different magnitude of DC electric field stress were obtained.
- (2) Magnitude of DC electric field stress and time applying DC field stress has an important role to space charge distribution in XLPE material.

ACKNOWLEDGMENT

The Authors would like to acknowledge Suranaree University of Technology for financial support.

REFERENCES

- [1] R. Arrighi, "From Impregnated Paper to Polymeric Insulating Material in Power Cables", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 21, 1986, pp.7-18.
- [2] T. L. Hanley, R. P. Burford, R. J. Fleming and K. W. Barber, "A General Review of Polymeric Insulation for Use in HVDC Cables", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 19, No. 1, 2003, pp. 13-24.
- [3] Y. Zhang, J. Lewiner, C. Alque and N. Hampton "Evidence of strong correlation between space charge buildup and breakdown in cable insulation", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 4, 1997, pp. 83-778.
- [4] Z. Liu, R. Liu, H. Wang and W. Liu "Space charge and initiation of electrical trees", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 24, 1989, pp.9-83.
- [5] O. Gallo-Lavallée, V. Grisen, G. Teyssedre and C. Laurent, "The pulsed electro-acoustic technique in research on dielectrics for electrical engineering: Today's achievements and perspectives for the future", *RS-RIGE*, Vol. 8, No. 5, June 2005, pp. 749 - 772.
- [6] L. Dissado, G. Mazzanti and G. C. Montanari, "The Role of Trapped Space Charges in the Electrical Aging of Insulating Materials", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 4, 1997, pp. 496-506.
- [7] C. Le Gressus and G. Blaise, "Breakdown Phenomena Related to Trapping/De-Trapping Processes in Wide Band Gap Insulators", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 27, No. 3, 1992, pp. 472-481.
- [8] T. Maeno, H. Kushibe, T. Takada and C.M. Cooke, "Pulsed electroacoustic Method for the measurement of volume charge in e-beam irradiated PMMA", *Proc. IEEE Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenomena*, 1985, pp. 389-397.

- [9] T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada and C.M. Cooke, "Measurement of spatial charge distribution in thick dielectrics using the pulsed electroacoustic method", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 23, 1988, pp.433-439.
- [10] S. SuhKwang, J. Sun Hwang, S. Noh Jin and T. Takada, "Effects of Constituents of XLPE on the Formation of Space Charge", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 1, 1994, pp. 1077-1083.
- [11] G.C. Moniaranari and F. Palmieri, "The effect of humidity on space charge accumulation in XLPE", *in Proc. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2005, pp. 205-208.
- [12] G. Chen and M.R. Kamaruzzaman, "Impact of mechanical deformation on space charge in XLPE", *in Proc. International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, July 8-13, 2007, pp.511-513.
- [13] Y.L. Chong, G. Chen and Y.F.F. Ho, "Temperature Effect on Space Charge Dynamics in XLPE Insulation", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 14, 2007, pp.65-76.
- [14] T. Maeno, "Calibration of the pulsed electroacoustic method for measuring space charge density", *Trans. IEE Japan*, Vol. 119-A, 1999, pp.114-119.



Nattawut Ruengkajonmathee was born in Khon Kaen Province, Thailand, in 1987. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His research topic interesting is High voltage insulation technology.



Ratthakhet Thiamsri was born in Ang Thong Province, Thailand, in 1987. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His interesting areas are high voltage technology applications, high voltage insulation technology and power system technology.



Boonruang Marungsri was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Dr. Marungsri is currently an assistant professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are high voltage insulation technologies and electrical power system.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวุฒิ เรืองขจรเมธิเกิดเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น เริ่มศึกษาระดับอนุบาลและประถมศึกษา ที่โรงเรียนบ้านสาวะถี อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนสาวะถีพิทยาสรรพ์ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น เมื่อ พ.ศ. 2548 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2552 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่าง ศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนัก วิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง