

ลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน
ฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV



นายธีระพงษ์ บุญรักษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**CHARACTERISTICS OF WATER TREEING IN XLPE
INSULATED HIGH VOLTAGE UNDERGROUND
CABLE FOR 22 kV DISTRIBUTION SYSTEM**



**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 2014**

ลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน
ฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีระพงษ์ บุญรักษา : ลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน
พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV (CHARACTERISTICS OF
WATER TREEING IN XLPE INSULATED HIGH VOLTAGE UNDERGROUND
CABLE FOR 22 kV DISTRIBUTION SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 162 หน้า.

สายเคเบิลแรงสูงฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) กำลังเป็นที่ต้องการของระบบ
ส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม
ถึงแม้ว่าวัสดุ XLPE จะมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีสำหรับการใช้งานด้านไฟฟ้าแรงสูง แต่การ
เสื่อมอายุของวัสดุ XLPE ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้หลังจากเวลาผ่านไปในการให้บริการภายใต้
ความเครียดต่าง ๆ การเสื่อมสภาพที่สำคัญที่อาจเกิดขึ้นกับสายเคเบิล XLPE เมื่อมีการสัมผัสกับ
ความชื้นและความเครียดไฟฟ้า ที่เป็นที่รู้จักกัน คือ ปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง การเกิดขึ้นของ
วอเตอร์ทรีอิงจะนำไปสู่ความล้มเหลวของสายเคเบิล ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับวอเตอร์ทรีอิงจึงเป็นสิ่ง
ที่สำคัญมากสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายเคเบิล งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมาย
เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเครียดไฟฟ้า อุณหภูมิและสารละลายไอออนิกชนิด
ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE การทดสอบแบ่งออกเป็น
2 ส่วน คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของสายเคเบิล 22 kV ฉนวน XLPE 1500 ชั่วโมง และการ
ทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 7 kV_{rms} ความถี่ 1000
Hz โดยใช้สารละลายไอออนิกที่มีความเข้มข้น 0.01 mol/l ซึ่งประกอบด้วย สารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต (CuSO₄) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO₃) ไอรอนซัลเฟต (FeSO₄)
โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) การวิเคราะห์ผลทางกายภาพด้วยกล้อง
จุลทรรศน์ มีการตรวจพบวอเตอร์ทรีอิงสองประเภท คือ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีบกาวและวอเตอร์
ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์มีการเจริญเติบโตขึ้นภายในฉนวนของสายเคเบิล
และวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีบกาวเริ่มเกิดจากปลายของเส้นน้ำที่ถูกเจาะไว้ สารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตมีแนวโน้มที่ดีต่อการเจริญเติบโตและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง
วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์มีการเจริญเติบโตได้ดีในอุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้มีการ
วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FTIR ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีที่มีการเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C

ที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันและพันธะ C=O แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
การเพิ่มขึ้นของทั้งสองพันธะแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE



สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา_____

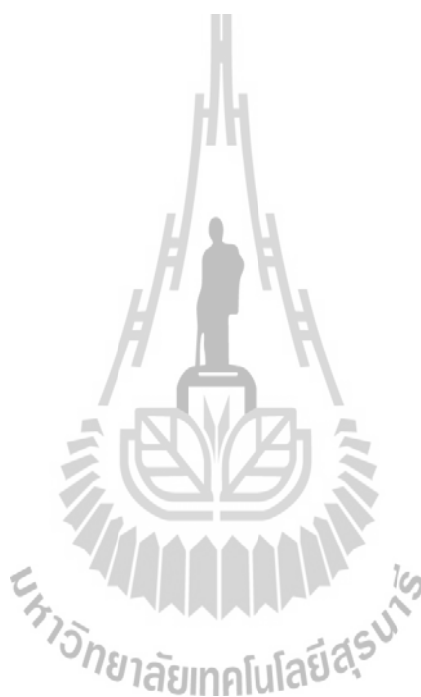
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

TERAPONG BOONRAKSA : CHARACTERISTICS OF WATER
TREEING IN XLPE INSULATED HIGH VOLTAGE UNDERGROUND
CABLE FOR 22 kV DISTRIBUTION SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST.
PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 162 PP.

WATER TREEING/IONIC SOLUTIONS/CROSS-LINKED POLYETHYLENE/
WATER TREEING EXPANSION

Cross-linked polyethylene (XLPE) insulated high voltage cables are being preferred by electrical power transmission and distribution systems worldwide due to excellent physical, chemical and dielectric properties. Although, XLPE material having good dielectric properties for high voltage applications, ageing of XLPE material cannot avoidable after long time in service under various stress. The degradation can occur with XLPE cable when exposed to moisture and electrical stress well-known is water treeing. The occurrence of water treeing leads to cable failure. So, knowledge of water treeing is very important for improving performance of cable. This thesis studied effect of various factors, i.e. electrical stress, temperature and ionic solutions species, to the occurrence of water treeing in XLPE insulated high voltage cable. The test was divided into 2 parts: accelerated aging test of 22 kV XLPE insulated cable of 1500 hrs and testing of XLPE insulation disc by use 7 kV AC_{rms}, 1000 Hz. Ionic solutions of 0.01 mol/l concentration are composed of CuSO₄, NaCl, KNO₃, FeSO₄, Na₂SO₄ and K₂SO₄. The physical analysis results obtain from microscopic analysis system. Two types, Vented and bow-tie water treeing were observed from the study results. Bow-tie water treeing are grows inside the insulation of XLPE cable and Vented water treeing occurrence from tip of the water needle.

CuSO_4 and Na_2SO_4 solutions exhibit a much stronger propensity toward water treeing expansion. Bow-tie water treeing are grows well in high temperature. Chemical change was analyzed using FTIR spectroscopy technique. FTIR spectroscopy show chemical analysis results, increasing of C=C bonds (Carbonization) and C=O bonds (Oxidation) was observed.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร. สุธเขต พจน์ประไพ อาจารย์สาขาวิศวกรรมเซรามิกที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือที่จำเป็นต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ทางด้านการวิจัยอย่างดียิ่ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่รัฐเขต เทียมศรี และพี่ ๆ กลุ่มเทคโนโลยีการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่จันทร์เพ็ญ สุภาชาติ ผู้เป็นมารดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางการศึกษาอย่างเปี่ยมล้นตลอดมาจนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

ธีระพงษ์ บุญรักษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญาและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 สรุป.....	11
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	12
3.1 กล่าวนำ.....	12
3.2 วัสดุพอลิเมอร์	12
3.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์.....	13
3.2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์	13
3.2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4	พอลิเมอร์สังเคราะห์.....	17
3.2.5	คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์.....	18
3.2.6	ปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน	19
3.3	พอลิเอทิลีน	24
3.3.1	การเสียดของพอลิเอทิลีน.....	24
3.4	สายเคเบิลไฟฟ้า.....	27
3.4.1	ประวัติความเป็นมาของสายเคเบิลแรงสูง	27
3.4.2	มาตรฐานสายเคเบิลแรงสูงในระบบจำหน่าย.....	29
3.5	โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล	30
3.5.1	ตัวนำไฟฟ้า.....	31
3.5.2	กำบังตัวนำ.....	33
3.5.3	ฉนวน	34
3.5.4	กำบังฉนวน	36
3.5.5	นิวทรัลศูนย์กลางร่วม.....	36
3.5.6	ปลอกหุ้มฉนวนนอก.....	37
3.6	การผลิตสายเคเบิลขึ้นพื้นฐาน	38
3.6.1	ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า	38
3.6.2	ขั้นตอนการผลิตแกนกลาง	39
3.6.3	ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลเสร็จสมบูรณ์	44
3.6.4	ขั้นตอนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ	44
3.7	การเสื่อมอายุของสายเคเบิลไฟฟ้า	46
3.7.1	การเสื่อมสภาพทางเคมีและทางกายภาพ	47
3.7.2	การเสื่อมสภาพเนื่องจากวอลเทจทริอิง	47
3.7.3	แบบจำลองของวอลเทจทริอิง	49
3.7.4	การเสื่อมสภาพเนื่องจากทริอิงทางไฟฟ้า.....	51
3.8	เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9	สรุป.....	57
4	การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล XLPE.....	58
4.1	กล่าวนำ.....	58
4.2	ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	58
4.3	การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยวอเตอร์ทรีอิง	60
4.3.1	การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูง ระบบ 22 kV	60
4.3.2	การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE	64
4.4	สรุป.....	67
5	วิธีดำเนินการวิจัย.....	68
5.1	กล่าวนำ.....	68
5.2	การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	68
5.2.1	ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล	69
5.2.2	สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ	74
5.2.3	วิธีดำเนินการทดสอบ.....	75
5.3	การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE.....	76
5.3.1	ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE	77
5.3.2	ฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ	80
5.3.3	วิธีดำเนินการทดสอบ.....	83
5.4	สรุป.....	85
6	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์การเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE	86
6.1	กล่าวนำ.....	86
6.2	ผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	86
6.2.1	การเตรียมฉนวน XLPE สำหรับวิเคราะห์การเกิดวอเตอร์ทรีอิง	86
6.2.2	การวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิง	90
6.2.3	วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	91
6.2.4	ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง.....	110

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.5	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิง ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	111
6.3	ผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE	117
6.3.1	วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE.....	117
6.3.2	ค่าความนำไฟฟ้าและค่า PH ของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง.....	125
6.3.3	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิง ที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE.....	126
6.4	สรุป.....	128
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	130
7.1	สรุป.....	130
7.2	ข้อเสนอแนะ	133
	รายการอ้างอิง	134
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ	137
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	156
	ประวัติผู้เขียน	162

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5
3.1	ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้.....17
3.2	คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์.....18
3.3	อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ T_g และ T_m ของวัสดุพอลิเมอร์.....22
3.4	คุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า.....23
3.5	วิวัฒนาการและการพัฒนาการของสายเคเบิล.....29
3.6	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉนวนไฟฟ้า.....31
3.7	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ.....32
3.8	คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะที่ใช้ในการทำสายเคเบิล.....33
3.9	วิธีการขึ้นรูปสามชั้น.....40
3.10	ช่วงคลื่นอินฟราเรดของฉนวน XLPE ที่นำมาวิเคราะห์.....56
5.1	การทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล.....75
5.2	ขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ.....82
5.3	การทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE.....84
6.1	ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....104
6.2	จำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE.....105
6.3	ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....109
6.4	ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายจากการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ในสายเคเบิล.....110
6.5	ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในสารละลายทั้ง 6 ชนิด.....124
6.6	ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายจากการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ในแผ่นฉนวน XLPE.....125
6.7	คุณสมบัติของธาตุที่ใช้ในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE.....126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น 14
3.2	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบกิ่ง..... 14
3.3	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง 15
3.4	ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบโครงข่าย 15
3.5	ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบอสัณฐานและแบบกึ่งผลึก..... 16
3.6	อัตราส่วนผลึกกับแกนเวลาของวัสดุพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 20
3.7	ปริมาณจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ..... 22
3.8	โครงสร้างพอลิเอทิลีนจากเอทิลีน 24
3.9	โครงสร้างสเฟียรูไลต์ของพอลิเอทิลีน 25
3.10	รายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์ 25
3.11	ขั้นตอนการเสีรูปของวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก..... 26
3.12	สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE 30
3.13	ตัวนำรอบศูนย์กลางและตัวนำรอบแบบบีบอัด..... 32
3.14	ประเภทของสายเคเบิลแบบต่าง ๆ..... 37
3.15	ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE..... 38
3.16	ขั้นตอนของกระบวนการผลิตแกนกลางของสายเคเบิล 39
3.17	เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปสายเคเบิล..... 40
3.18	เทคนิคการอบและการขึ้นรูปโดยทั่วไปของสายเคเบิล XLPE..... 41
3.19	แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ CCV..... 42
3.20	แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ VCV..... 43
3.21	แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ MDCV 44
3.22	การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดิน 45
3.23	ข้อบกพร่องทั่วไปที่อาจพบในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์เมื่อมีการเสื่อมสภาพ..... 46
3.24	วอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE 48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 รูปแบบโครงสร้างของวอเตอร์ทรีอิงที่แสดงให้เห็นช่องว่างขนาดเล็กกรุปทรงรีที่สร้างสาย คล้ายสร้อยไข่มุกที่เชื่อมต่อกันด้วยช่องทางเล็ก ๆ	49
3.26 ทรีอิงทางไฟฟ้าที่เติบโตจากปลายของวอเตอร์ทรีอิง	50
3.27 ทรีอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากฐานของวอเตอร์ทรีอิง	50
3.28 ทรีอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากปลายเข็ม	51
3.29 รูปแบบทรีอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	52
3.30 ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ในสายเคเบิลฉนวน XLPE.....	53
3.31 เครื่องวิเคราะห์ FTIR ของบริษัท BRUKER รุ่น TENSOR 27	55
3.32 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ	55
3.33 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดออกซิเดชัน	56
3.34 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดคาร์บอนในเซชัน	57
4.1 ทรงกระบอกซ้อนกันแนรวม	59
4.2 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล	61
4.3 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล	61
4.4 ตัวอย่างของ Triangular Mesh 1816 เอลิเมนต์	62
4.5 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE.....	62
4.6 การกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE.....	63
4.7 ภาพขยายของการกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE	63
4.8 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE.....	64
4.9 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE	65
4.10 ตัวอย่างของ Triangular Mesh 1241 เอลิเมนต์	65
4.11 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE	66
4.12 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE	66
5.1 แผนภาพชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล	69
5.2 แบบร่างของอ่างสแตนเลสและขาตั้งรองรับ	70
5.3 อ่างสแตนเลสบรรจุสารละลาย.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย.....	71
5.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิและการไหลวนของสารละลาย	72
5.6 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ	72
5.7 ชุดป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับทดสอบ.....	73
5.8 สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงขนาด 22 kV ที่นำมาศึกษาและวิจัย	74
5.9 การเตรียมสายเคเบิลสำหรับทดสอบ	74
5.10 สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ	75
5.11 ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลได้ฉนวน XLPE.....	76
5.12 ไอโซแกรมชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE	77
5.13 แบบร่างของแฮมเบอร์ที่ใช้ในการวิจัย	78
5.14 แฮมเบอร์ทดสอบทำจากแผ่นอะคริลิกที่ใช้ในการวิจัย	79
5.15 ระบบกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณแรงดันสูงที่ใช้ในการวิจัย	79
5.16 สายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน 115 kV ฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ	80
5.17 เครื่องเลื่อยสายพาน	81
5.18 ฉนวน XLPE ที่ตัดมาจากสายเคเบิล 115 kV มีขนาดความหนา 4 mm.....	81
5.19 การเตรียมแผ่นฉนวน XLPE ที่นำมาทำการทดสอบ.....	82
5.20 แผ่นฉนวน XLPE ที่ถูกเจาะด้วยเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm.....	82
5.21 แฮมเบอร์ที่ติดตั้งแผ่นฉนวน XLPE และบรรจุสารละลายพร้อมทดสอบ	83
5.22 ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE.....	84
6.1 การตัดสายเคเบิลเพื่อนำไปตรวจสอบหาอวอเตอร์ทรีอิง	87
6.2 ชิ้นส่วนของสายเคเบิลที่ถูกตัดมีความยาว 4 cm.....	87
6.3 ชิ้นส่วนของฉนวน XLPE และตัวจับยึด	88
6.4 เครื่องไมโครโทรมที่ใช้ฉนวนฉนวนสายเคเบิล	88
6.5 ฉนวน XLPE ที่ถูกฉีกด้วยเครื่องไมโครโทรม	88
6.6 เมทิลีนบลูและโซเดียมไฮดรอกไซด์	89
6.7 ชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ที่ทำการย้อมสีด้วยเมทิลีนบลู.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ LEICA รุ่น EZ4D	90
6.9 การวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์	91
6.10 การวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป	91
6.11 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ที่อุณหภูมิห้อง	92
6.12 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่อุณหภูมิห้อง	93
6.13 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่อุณหภูมิห้อง	94
6.14 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ที่อุณหภูมิ 50°C	95
6.15 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่อุณหภูมิ 50°C	96
6.16 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่อุณหภูมิ 50°C	97
6.17 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ที่อุณหภูมิห้อง	98
6.18 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่อุณหภูมิห้อง	99
6.19 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่อุณหภูมิห้อง	100
6.20 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ที่อุณหภูมิ 50°C	101
6.21 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่อุณหภูมิ 50°C	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.22 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่อุณหภูมิ 50°C.....	103
6.23 ความยาวของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ของสารละลายแต่ละชนิด.....	105
6.24 จำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO ₄)	106
6.25 จำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO ₃)	107
6.26 จำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	107
6.27 ความหนาแน่นของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	108
6.28 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปของสารละลายแต่ละชนิด	109
6.29 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C.....	112
6.30 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C.....	113
6.31 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C.....	114
6.32 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-H ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C.....	115
6.33 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C.....	115
6.34 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-H ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C.....	116
6.35 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO ₄).....	118
6.36 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO ₃)	119
6.37 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	120
6.38 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na ₂ SO ₄).....	121
6.39 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต (K ₂ SO ₄)	122
6.40 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายไอรอนซัลเฟต (FeSO ₄).....	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.41	ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแผ่นฉนวน XLPE 124
6.42	ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ 127
6.43	อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C และ C=O ต่อ C-H ที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE 128



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหลายประเทศมีการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมและการท่องเที่ยวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ระบบมีความมั่นคงน่าเชื่อถือและทำให้เกิดความสวยงาม สำหรับประเทศไทยระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบสายพาดในอากาศ (Overhead Line) เนื่องจากมีค่าลงทุนในการก่อสร้างถูก แต่ก็ทำให้ทัศนียภาพไม่ค่อยสวยงามและมักมีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมค่อนข้างมาก เช่น การเกิดฟ้าผ่าลงระบบส่งจ่ายมลภาวะทางอากาศหรือสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ อันนำไปสู่การผิดพร่องของระบบ ดังนั้นเพื่อให้ปัญหาจากสภาพแวดล้อมเหล่านี้หมดไปตลอดจนเพื่อให้เกิดความสวยงามและความเป็นระเบียบ จึงทำให้ในปัจจุบันระบบสาธารณูปโภคในเมืองใหญ่หรือแหล่งท่องเที่ยวที่ต้องการความสวยงาม เปลี่ยนมาใช้ระบบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน (Underground Cable) แทนแบบสายพาดในอากาศ อย่างไรก็ตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เมื่อมีการใช้งานและถูกฝังอยู่ใต้ดินเป็นเวลานาน อาจมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากความชื้นจากน้ำที่อยู่ภายนอกของเนื้องนวน ความชื้นของน้ำจะค่อย ๆ ซึมเข้าสู่รอยตัดของเนื้องนวน (ในกรณีที่สายเคเบิลไฟฟ้ามีรอยตัดจากการใช้งาน) หรือช่องว่างระหว่างเกลียวของสายตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียวจนนำไปสู่การเสื่อมสภาพของสายเคเบิลที่เรียกว่า วอเตอร์ทรีอิง (Water treeing) และวอเตอร์ทรีอิงนี้จะค่อย ๆ ขยายตัวไปอย่างช้า ๆ จนเนื้องนวนและสารกึ่งตัวนำของสายเคเบิลไฟฟ้าหมดคุณสมบัติความเป็นฉนวนและนำไปสู่การเบรกดาวน์ของสายเคเบิลตามมาในที่สุด

ในปัจจุบัน ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงกันอย่างแพร่หลาย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เพื่อหาวิธีในการป้องกันและแก้ไข เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพร่องที่อาจส่งผลร้ายแรงต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอาจส่งผลไปยังความเชื่อมั่นของระบบอีกด้วย เนื่องจากความชื้นเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จึงนำมาสู่การศึกษาค้นคว้าและการวิจัยเกี่ยวกับกลไกการเสื่อมอายุและการเสียคุณสมบัติความเป็นฉนวนของสายเคเบิล ด้วยการจำลองการใช้งานสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินในสถานะที่มีความชื้นจากสารละลายชนิดต่าง ๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาองค์

ความรู้สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นในการใช้งานสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เพื่อลดปัญหาในระบบจำหน่ายแรงสูงใต้ดินและเพื่อเพิ่มคุณภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะยาว

เนื่องจากในดินของแต่ละพื้นที่นั้นมีชนิดของสารเคมีที่แตกต่างกันไป เช่น สายเคเบิลที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินในบริเวณใกล้ทะเลหรือฝังอยู่ใต้ท้องทะเลจะมีผลกระทบจากโซเดียมคลอไรด์ สายเคเบิลใต้ดินที่มีการใช้งานในบริเวณที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมในดินอาจมีกำมะถันที่อยู่ในรูปของซัลเฟตซึ่งมีผลกระทบในการเสื่อมสภาพของสายเคเบิล และในดินบริเวณที่มีน้ำขัง น้ำเสียจากครัวเรือน หรือบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนด้วยปุ๋ย ดินอาจมีส่วนประกอบของเกลือไนเตรดที่ส่งผลต่อการใช้งานของสายเคเบิล ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาวิจัยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากวอเตอร์ทรีอิ่งจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมไนเตรด และโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะพบมากในดินทั่วไป และยังทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งโดยใช้สารละลายที่มีไอออนของซัลเฟต ได้แก่ คอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต และไอออนซัลเฟต มาทำการทดสอบ ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะพบในดินหรือเกิดจากการใช้งานสายเคเบิลทั่วไป ซึ่งกำบังโลหะของสายเคเบิลมักจะทำมาจากคอปเปอร์และไอออน เมื่อเปลือกหุ้มด้านนอกเกิดรอยแตกทำให้มีน้ำซึมเข้าจนเกิดการเสื่อมสภาพและเกิดการกัดกร่อนของกำบังโลหะ ซึ่งสามารถทำให้เกิดเป็นสารละลายชนิดต่าง ๆ เช่น สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ไอออนซัลเฟต เป็นต้น

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะเฉพาะของวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-Linked Polyethylene: XLPE) สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้การจำลองสถานะของความชื้นจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ในขณะที่มีความเครียดไฟฟ้า และพัฒนาสร้างชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะของการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.2.2 เพื่อออกแบบสร้างชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 สายเคเบิลแรงสูงที่ใช้เป็นสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.3.2 อุณหภูมิห้องของการทดลองอ้างอิงจากอุณหภูมิที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงในอาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 เป็นหลัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาปฏิกิริยารวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะเฉพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.4.2 ทดสอบวอเตอร์ทรีอิงของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับในการทดสอบในช่วง 0 – 38 kV ความถี่ 50 Hz ระยะเวลาในการทดสอบ 1500 ชั่วโมง

1.4.3 ทดสอบวอเตอร์ทรีอิงของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.01 mol/l ประกอบด้วย สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) และ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

1.4.4 ทดสอบวอเตอร์ทรีอิงของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้อุณหภูมิของสารละลายในการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 50°C

1.4.5 ทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับในการทดสอบ 7 kV ความถี่ 1000 Hz ระยะเวลาในการทดสอบ 150 ชั่วโมง

1.4.6 ทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.01 mol/l ประกอบด้วย สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และไอออนซัลเฟต (FeSO_4) อุณหภูมิในการทดสอบจะใช้อุณหภูมิห้อง

1.4.7 ใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อฉนวน XLPE ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากวอเตอร์ทรีอิง

1.4.8 ใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPE ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากวอเตอร์ทรีอิง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.5.2 ได้ชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิงสำหรับสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.5.3 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขยที่เป็้องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิล วัสดุที่ใช้ทำสายเคเบิลและการเสื่อมอายุแบบต่าง ๆ ของสายเคเบิล รวมถึงการเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง

บทที่ 4 กล่าวถึงการคำนวณสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV และการจำลองสนามไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยวอเตอร์ทรีอิง เพื่อหาความเหมาะสมของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโตรด และระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างอิเล็กโตรดกับระนาบ

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบชุดศึกษาวิจัยวอเตอร์ทรีอิง การเตรียมตัวอย่างทดสอบ และวิธีการวิจัยวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการวิจัยวอเตอร์ทรีอิง การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวน XLPE

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ลักษณะจำเพาะของวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ถูกศึกษาโดยใช้ชุดทดสอบการเกิดวอเทอร์ทรีอิง หลังเสร็จสิ้นการทดสอบ สายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE ถูกนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์และการสังเกตจากภาพถ่ายด้วยกล้องกำลังขยายสูงแล้ววิเคราะห์ผล เพื่อให้งานสำเร็จตามวัตถุประสงค์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE และ Science Direct ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาวิจัยสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงแรงสูงจากปรากฏการณ์วอเทอร์ทรีอิง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตาราง ได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจัดลำดับการเรียบเรียงผลงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1969	Miyashita	ค้นพบปรากฏการณ์วอเทอร์ทรีอิงเป็นครั้งแรก ทำการทดสอบสายเคเบิลฉนวน PE โดยแช่ไว้ในน้ำและใช้แรงดันไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเร่งให้เกิดปรากฏการณ์วอเทอร์ทรีอิงขึ้น หลังจากนั้นก็รู้จักปรากฏการณ์นี้ในชื่อ “วอเทอร์ทรีอิง”

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1987	Garton, Bamji, Bulinski and Densley	ศึกษาผลของการเกิดออกซิเดชันและการก่อตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE พบว่าความร้อนและสารปนเปื้อนไอออนิกเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการออกซิเดชัน และในบริเวณที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงจะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีต่าง ๆ ที่มีโลหะไอออน ซัลเฟตไอออน และคาร์บอกซิเลตไอออน
1987	Henkel, Muller, Nordmann, Rogler and Rose	ศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสภาพผิวที่เปียกน้ำหรือสิ่งปนเปื้อนในฉนวนพอลิเอทิลีน (PE) พบว่าวอเตอร์ทรีอิงเริ่มต้นจากการที่มีน้ำอยู่ในช่องว่างขนาดเล็กและความชื้นที่สะสมบนผนังของช่องว่างขนาดเล็กส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า
1990	Steennis and Kreuger	ศึกษาลักษณะและการเจริญเติบโตของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีน โดยเน้นไปที่วอเตอร์ทรีแบบคล้ายครีป พบว่าวอเตอร์ทรีแบบคล้ายครีปเป็นอันตรายมากกว่าวอเตอร์ทรีแบบคล้ายโบว์ เป็นผลมาจากพฤติกรรมการเจริญเติบโตของวอเตอร์ทรีอิง วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปจะมีโครงสร้างการแพร่กระจายการเจริญเติบโตได้หลายแบบในพอลิเมอร์ วอเตอร์ทรีอิงส่วนใหญ่จะมีการเจริญเติบโตไปในทิศทางของสนามไฟฟ้า
1994	Xu and Boggs	ศึกษาลักษณะทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ พบว่าบริเวณที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงประกอบด้วยความหลากหลายของชนิดสารเคมีที่มีรูปแบบต่าง ๆ ของคาร์บอนิล โลหะไอออนและน้ำ วอเตอร์ทรีอิงมีการเจริญเติบโตในทิศทางของสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1996	Huai and Yoshimura	ศึกษาการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวนพอลิเอทิลีน โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) พบว่าวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตจะเป็นสีเหลืองสีน้ำตาล และจะงอกเจริญขึ้นอย่างรวดเร็ว ในระหว่างการก่อตัวของวอเตอร์ทรีอิงซิลเวอร์ไอออนจะมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเคมี ซิลเวอร์ไอออนจะเร่งการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มประสิทธิภาพของสนามไฟฟ้าที่ปลายของวอเตอร์ทรีอิง ช่วยให้วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากซิลเวอร์เดบิตได้อย่างรวดเร็ว
2001	Uchida, Kato, Nakade, Inoue, Sakakibara and Tanaka	ประมาณการอายุการใช้งานของสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่เกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง ด้วยวิธี ใช้แรงดันทดสอบความถี่ต่ำมาก (VLF) (0.01-0.19 Hz) แรงดันทดสอบกระแสสลับ แรงดันทดสอบกระแสตรง และแรงดันคลื่นสั้นพ้อง ในสายเคเบิลฉนวน XLPE ขนาด 22 kV 33 kV 66 kV และ 77 kV พบว่าการใช้แรงดันทดสอบความถี่ต่ำมาก (VLF) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด
2001	Al-Hamouz, Soufi, Ahmed, Al-Ohali and Garwan	นำเสนอเทคนิคการตรวจวินิจฉัยทางไฟฟ้าเพื่อประเมินการเกิดและขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลไฟฟ้าได้ฉนวน XLPE โดยใช้สายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานแล้ว และที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ทั้งแบบที่ใช้ทองแดงเป็นตัวนำและที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวนำมาทำการทดสอบโดยใช้แรงดันทดสอบ 13.8 kV สำหรับสายเคเบิลใหม่ตัวนำทองแดง ใช้แรงดัน 34.5 kV สำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดงอายุการใช้งาน 17 ปีและสายเคเบิลที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และใช้แรงดัน 69 kV สำหรับสายเคเบิลตัวนำอะลูมิเนียมอายุการใช้งาน 18 ปี พบว่าเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลตัวนำอะลูมิเนียมอายุ 18 ปีเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2002	Boggs and Mashikian	ศึกษาบทบาทของสารประกอบกิ่งตัวนำ ในปรากฏการณ์วอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE พบว่าวอเทอร์ทรีอิงเริ่มต้นที่ส่วนติดต่อกของกำบังสารกิ่งตัวนำกับฉนวนพอลิเอทิลีนที่มีไอออน การเจริญเติบโตของวอเทอร์ทรีอิงไม่ได้ขึ้นอยู่กับไอออนที่มาจากกำบังสารกิ่งตัวนำเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของไอออนิกที่อยู่ใต้ดินด้วย ขนาดและความยาวของวอเทอร์ทรีอิงจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารประกอบกิ่งตัวนำ สารประกอบกิ่งตัวนำที่สะอาดมีแนวโน้มที่จะลดการเจริญเติบโตของวอเทอร์ทรีแบบคล้ายครีปได้
2006	Ciuprina, Teissedre, Filippini, Hampton, Smedberg and Campus	ศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเอทิลีนที่มีส่วนผสมของเปอร์ออกไซด์ เปรียบเทียบความต้านทานวอเทอร์ทรีอิงของพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พบว่าการเชื่อมขวางโดยใช้เปอร์ออกไซด์มีผลต่อการเริ่มต้นและการขยายตัวของวอเทอร์ทรีในฉนวนของสายเคเบิล ระยะเวลาในการเกิดวอเทอร์ทรีขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเริ่มต้นและการเจริญเติบโตของวอเทอร์ทรี
2007	Al-Arainy, Malik and Qureshi	ศึกษาผลของสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 50 °C โดยนำสายเคเบิลแช่ในสารละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิลเวอร์ในเตรต โซเดียมคลอไรด์และน้ำดีไอออนซ์ พบว่าภายในฉนวนของสายเคเบิลที่ตรวจสอบจะมีจำนวนความหนาแน่นของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์สูงที่สุดในสารละลายซิลเวอร์ในเตรตและโซเดียมคลอไรด์ตามลำดับ วอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปเริ่มเกิดขึ้นจากกำบังตัวนำและความยาวมากในสารละลายซิลเวอร์ในเตรตที่อุณหภูมิห้อง วอเทอร์ทรีอิงจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2010	Qureshi, Malik and Al-Arainy	ศึกษาผลกระทบของแคตไอออนที่มีแนวโน้มต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง โดยการนำสายเคเบิลฉนวน XLPE และแผ่นฉนวน XLPE มาทำการทดสอบและใช้สารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ มาทำการทดสอบ พบว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE แคตไอออนมีบทบาทสำคัญในการเริ่มต้นและการเจริญเติบโตของวอเตอร์ทรี รูปแบบที่แตกต่างกันของวอเตอร์ทรีอิงขึ้นอยู่กับลักษณะไอออนิกของชนิดสารเคมี
2010	Ogiwara1, Yonaha, Uehara and Kudo	ศึกษาการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4 mol/l ที่ช่วงอุณหภูมิ -20°C , -5°C , 10°C , 25°C , 50°C และ 80°C พบว่าวอเตอร์ทรีอิงสามารถเกิดขึ้นได้แม้ที่อุณหภูมิ -20°C วอเตอร์ทรีอิงจะมีโครงสร้างรัศมีคล้ายพัดที่อุณหภูมิต่ำและเมื่ออุณหภูมิสูงวอเตอร์ทรีอิงจะมีลักษณะคล้ายลูกบอลหรือทรงกลม วอเตอร์ทรีอิงจะมีความยาวและความกว้างมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงจะมีขนาดเล็ก
2013	J. Wang, X. Zheng, Y. Li and J.Wu	ศึกษาการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.8 mol/l ที่อุณหภูมิ 20°C , 40°C , 60°C และ 80°C ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิง อัตราเริ่มเกิดของวอเตอร์ทรีอิงลดลงก่อนแล้วจึงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลการทดลองคล้ายกันทั้งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) แต่พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) มีประสิทธิภาพด้านทานวอเตอร์ทรีอิงได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) นอกจากนี้ความชื้น อุณหภูมิและสารละลายไอออนิกเป็นสาเหตุของการเร่งให้เกิดวอเตอร์ทรีอิง

จากปริทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา ทำให้ทราบว่าผู้วิจัยได้คิดค้นและนำเสนอการทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในหลายรูปแบบ อีกทั้งยังมีการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพ สามารถทำให้ผู้วิจัยมองเห็นแนวทางในการศึกษาวิจัยลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิง รวมถึงแนวทางในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวน XLPE ในส่วนถัดไปเป็นการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ โดยกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ โดยย่อ ดังนี้

โดยเริ่มต้นจาก Miyashita (1969) ค้นพบปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงเป็นครั้งแรก จากการใช้งานสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ที่เดินผ่านบริเวณที่มีน้ำขัง พบว่าสายเคเบิลดังกล่าวเกิดความเสียหาย จึงได้ทำการศึกษาโดยการนำสายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนมาทำการทดลอง โดยแช่ไว้ในน้ำและใช้แรงดันไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเร่งให้เกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงขึ้น วอเตอร์ทรีอิงจะเริ่มเกิดในบริเวณที่มีรูพรุนในฉนวนพอลิเอทิลีนและน้ำจะมีผลกระทบที่สำคัญต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิง หลังจากนั้นก็รู้จักปรากฏการณ์นี้ในชื่อ “วอเตอร์ทรีอิง” ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการวิจัยและศึกษาวอเตอร์ทรีอิงตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

Al-Arainy et al. (2007) ศึกษาผลของสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 50 °C ประเมินผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน XLPE โดยนำสายเคเบิลแช่ในสารละลายชนิดต่าง ๆ คือ ซิลเวอร์ไนเตรต โซเดียมคลอไรด์และน้ำดีไอออนซ์ พบว่าภายในฉนวนของสายเคเบิลที่ตรวจสอบจะมีจำนวนความหนาแน่นของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์สูงที่สุดในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์ตามลำดับ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีบบริเริ่มเกิดขึ้นจากกำบังตัวนำและมีความยาวมากในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่อุณหภูมิห้อง วอเตอร์ทรีอิงขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

Ogiwara et al. (2010) ศึกษาการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4 mol/l ที่ช่วงอุณหภูมิ -20 °C, -5 °C, 10 °C, 25 °C, 50 °C และ 80 °C พบว่าวอเตอร์ทรีอิงสามารถเกิดขึ้นได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ 20 °C วอเตอร์ทรีอิงมีโครงสร้างรัศมีคล้ายพัดที่อุณหภูมิต่ำและเมื่ออุณหภูมิสูงวอเตอร์ทรีอิงจะมีลักษณะคล้ายลูกบอลหรือทรงกลม วอเตอร์ทรีอิงจะมีความยาวและความกว้างมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงวอเตอร์ทรีอิงมีขนาดเล็ก

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงระเบียบวิธีค้นคว้าและวิจัยของนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่ม ทำให้ได้รูปแบบของการศึกษาวิจัยลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE ภายใต้อุณหภูมิและความเครียดไฟฟ้าโดยศึกษาผลของอุณหภูมิและสารละลายชนิดต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และ

ไอออนซัลเฟต (FeSO_4) และนำฉนวน XLPE มาทำการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยการค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE, Science Direct และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมเห็นได้ชัดว่าวัสดุฉนวน XLPE กำลังเป็นที่สนใจในงานวิจัยการเสื่อมอายุของฉนวนสายเคเบิลเพราะในปัจจุบันมีการใช้สายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE เป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ จึงได้เริ่มทำการวิจัยขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE ระบบจำหน่าย 22 kV ที่นิยมใช้ในประเทศไทยและยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ใดทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสารละลายชนิดต่าง ๆ และทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อฉนวน XLPE ซึ่งรายละเอียดในการทดสอบจะอธิบายในบทถัดไป



บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลายไปทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุพอลิเมอร์มาใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูง ในปัจจุบันนั้นวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้มีค่านิยมนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงคือ พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ซึ่งมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและทนต่ออุณหภูมิได้ดีกว่าวัสดุฉนวนชนิดอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกัน อย่างไรก็ตามเมื่อสายเคเบิลไฟฟ้าถูกใช้งานเป็นเวลานานและฝังอยู่ใต้ดินตลอดเวลา ทำให้สายเคเบิลเกิดการเสื่อมสภาพที่ส่วนใหญ่จะมาจากการเกิดปรากฏการณ์วอลเทอร์ทรีอิง ซึ่งทำให้สายเคเบิลเกิดความล้มเหลว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกทำการศึกษาวิจัยลักษณะการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE จึงจำเป็นต้องรู้ถึงส่วนประกอบและคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE เป็นอย่างดี ในบทนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสายเคเบิลฉนวน XLPE อย่างละเอียดโดยอธิบายในเรื่องประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นฉนวน คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุพอลิเมอร์ ประวัติความเป็นมาของสายเคเบิล โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล คุณสมบัติของฉนวน XLPE สาเหตุการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์ การเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE และการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

3.2 วัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุศาสตร์, สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2554)

พอลิเมอร์หรือมาโครโมเลกุล (Macromolecule) หมายถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ ที่ประกอบด้วยหน่วยของโมเลกุลซ้ำกันมาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว และกรรมวิธีที่ทำให้หน่วยย่อยต่าง ๆ มาต่อกันเรียกว่าการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) หน่วยย่อยที่เล็กที่สุดของพอลิเมอร์คือ โมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจนทำให้เกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ไปเชื่อมโมโนเมอร์เข้าด้วยกันและเกิดเป็นพอลิเมอร์ ตัวกำหนดความคงทน ความแข็งแรง และแรงระหว่างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์คือโมโนเมอร์ที่ซ้ำกันอยู่ในห่วงโซ่โมเลกุล ชนิดของโมโนเมอร์และความยาวของสายโซ่โมเลกุล

วัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ นั่นคือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก แต่มีพอลิเมอร์บางประเภทที่เป็นสารอนินทรีย์ ตัวอย่างเช่น ซิลิโคน (Silicone) ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนและออกซิเจน เป็นต้น ในธรรมชาติมีสารหลายชนิดที่มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ เช่น โปรตีน คีเอนเอ เซลลูโลส หรืออำพัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้ทั้ง จากวัสดุธรรมชาติและจากสารเคมี ตัวอย่างเช่น ยาง ไนลอนและพลาสติกประเภทต่าง ๆ เป็นต้น พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ได้เข้ามามีบทบาทมากมายในชีวิตประจำวัน และมีการใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย

3.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์สามารถแบ่งตามลักษณะที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิได้เป็นสองประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset)

1) เทอร์โมพลาสติก คือ พอลิเมอร์ที่สามารถหลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง พอลิเมอร์ประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่สมบัติไม่เปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปแล้วเทอร์โมพลาสติกประกอบไปด้วยสายโซ่ยาวของคาร์บอน บางครั้งอาจมีไนโตรเจน ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกเช่น พอลิเอทิลีน (PE), พอลิสไตรีน (PS), พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), อะคริลิกพอลิคาร์บอเนต (Acrylic polycarbonate) และไนลอน (Nylon) เป็นต้น

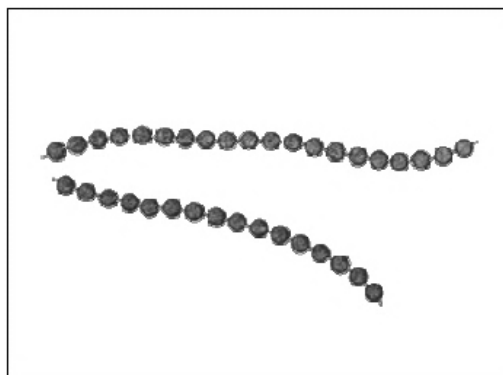
2) เทอร์โมเซต คือ พอลิเมอร์ที่สามารถคงรูปร่างอย่างถาวรจากการบ่ม (Setor Cured) ด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือด้วยความร้อน เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวหรือไหม้ โครงสร้างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน บางครั้งอาจมีไนโตรเจน ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ ที่เกิดพันธะโควาเลนต์แบบโครงข่าย หรือเกิดการเชื่อมขวาง (Cross-Linked) แล้วทำให้เกิดเป็นของแข็งซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดี ตัวอย่างของเทอร์โมเซต เช่น อีพ็อกซี (Epoxy) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น

3.2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์มักจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลที่เกิดหน่วยย่อยเล็ก ๆ ของโมโนเมอร์ว่ามีการต่อเชื่อมกันอย่างไร วัสดุพอลิเมอร์สามารถจำแนกประเภทได้ตามลักษณะของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

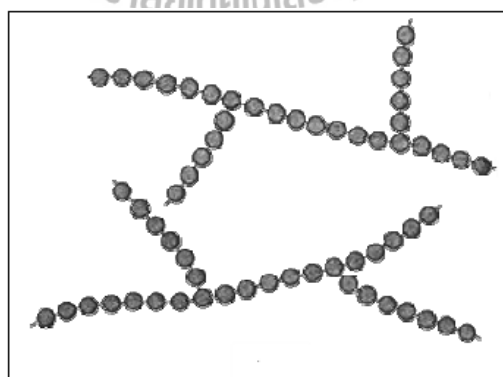
1) พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น (Linear Polymer) คือพอลิเมอร์ที่มีรูปร่างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว โครงสร้างจะชิดกันมาก ทำให้ความหนาแน่นสูง จุดหลอมเหลวสูง เมื่อได้รับความร้อน

จะอ่อนตัวและแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำ มีลักษณะที่ขุ่นและเหนียว ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบเส้นเช่น PE, PVC, PS, Nylon และ High Density PE (HDPE) เป็นต้น พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น แสดงในรูปที่ 3.1



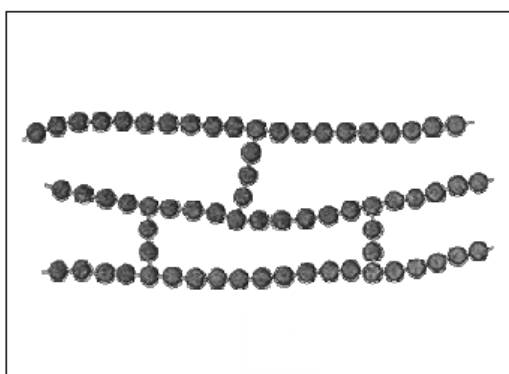
รูปที่ 3.1 ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น
(สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2554)

2) พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer) คือพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยื่นออกมาจากสายโซ่หลัก ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์แบบกิ่งไม่สามารถจัดเรียงตัวได้แน่น ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์จึงลดลง ทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ จุดเดือดจุดหลอมเหลวจะต่ำกว่าพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นต้น ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของพอลิเมอร์แบบกิ่ง แสดงในรูปที่ 3.2



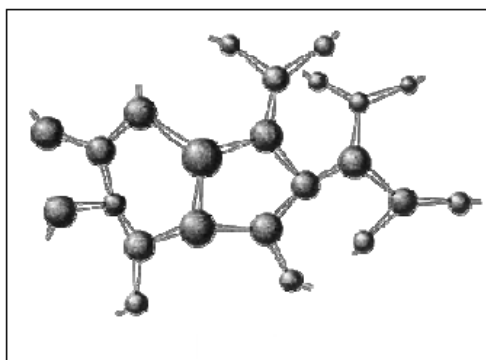
รูปที่ 3.2 ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบกิ่ง
(สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2554)

3) พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (Cross-Linked Polymer) คือพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางจะสามารถทำได้โดยการเติมอะตอมหรือโมเลกุลตัวเติมเพื่อให้เกิดพันธะโคเวเลนต์กับสายโซ่และมักจะทำที่อุณหภูมิสูง พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง เช่น เมลามีน (Melamine) พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) เป็นต้น พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง
(สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2554)

4) พอลิเมอร์แบบโครงข่าย (Network Polymer) คือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบสามมิติ พอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางสูงอาจจัดเป็นพอลิเมอร์แบบโครงข่ายได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้เช่น อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy Resin) ฟีนอล-ฟอร์มาดีไฮด์ เรซิน (Phenol-formaldehyde Resin) เป็นต้น พอลิเมอร์แบบโครงข่าย แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสารพอลิเมอร์แบบโครงข่าย
(สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2554)

3.2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์

วัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะโครงสร้างผลึกได้ 2 ประเภท ซึ่งโครงสร้างผลึกแต่ละแบบสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของพอลิเมอร์ ลักษณะโครงสร้างผลึกของสารพอลิเมอร์ดังกล่าว แบ่งออกได้ดังนี้

1) โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) โครงสร้างโดยรวมของพอลิเมอร์อสัณฐานเป็นการรวมกันของโมเลกุลของสายโซ่ยาวที่ไม่สมมาตรและมีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่แน่นอนเหมือนกับของเหลว เมื่อให้ความร้อนก็ไม่ปรากฏจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน แต่จะค่อย ๆ กลายเป็นของเหลว

2) โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Partially Crystalline) โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวโดยที่มีโมเลกุลส่วนหนึ่งเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous Region) และบางส่วนจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline Region) เมื่อให้ความร้อนโมเลกุลในส่วนที่เป็นผลึกจะเสียไป กลายเป็นพอลิเมอร์ที่นิ่ม จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกนี้คือ อุณหภูมิที่ทำให้การจัดเรียงตัวแบบผลึกหายไป

ปริมาณความเป็นผลึกส่งผลถึงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกมาก มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย เนื่องจากอะตอมของพอลิเมอร์สามารถอยู่ชิดกันได้มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อยสามารถดัดและแอ่นได้



รูปที่ 3.5 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบอสัณฐานและแบบกึ่งผลึก

(ที่มา: <http://school.scimath.org>)

3.2.4 พอลิเมอร์สังเคราะห์

พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มนุษย์สร้างขึ้นจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมี ด้วยวิธีการนำสาร โมโนเมอร์จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำให้โมโนเมอร์เหล่านั้นเกิดพันธะโคเวเลนต์เชื่อมต่อกันจนกลายเป็น โมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ โดยในปี ค.ศ.1909 นักเคมีชาวอเมริกันชื่อ Baekleland สามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นได้เป็นครั้งแรก โดยค้นพบเบคเคลไลต์หรือฟีนอลิกเรซิน (Bakelite or Phenolic Resin) จากการทดลองสังเคราะห์วัสดุทนไฟเพื่อใช้เคลือบสายไฟ เขาพบว่าเมื่อผสมฟีนอล (Phenol) กับฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เข้าด้วยกัน จากนั้นได้ให้ความร้อนเพื่อกลั่นเอาน้ำออกโดยปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Polymerization) จึงทำให้ได้สารเหนียวเกิดขึ้น สารเหนียวดังกล่าวเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วจะแข็งตัวเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างแหและมีความแข็งแรงเป็นพิเศษ จึงได้นำมาใช้เป็นฉนวนหุ้มสายไฟและเครื่องโทรศัพท์ในยุคแรก ๆ แต่เนื่องจากฟีนอลิกเรซินมีสีที่ค่อนข้างเข้มจนถึงดำ การนำมาใช้งานเป็นวัสดุสีขาวงามจึงทำได้ค่อนข้างยาก ทำให้ไม่ได้รับความนิยมมากนัก ในปัจจุบันฟีนอลิกเรซินจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวโลหะที่ต้องการความทนทานเป็นพิเศษทั้งทนต่อแรงขีดข่วน ความร้อนและสารเคมี เช่น โต๊ะปฏิบัติการเคมี ในตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ (บทความจากห้องเรียนออนไลน์ , ปรกรณ์ โอภาประกาศิต, 2554)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (ปรกรณ์ โอภาประกาศิต, 2554)

ปี ค.ศ.	ชื่อพอลิเมอร์	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
1909	ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin)	ฉนวนหุ้มสายไฟ หูฟังโทรศัพท์
1927	พีวีซี (Polyvinyl chloride)	เสื้อกันฝน ท่อน้ำ
1936	อะคริลิก (Acrylic)	ตู้โชว์ ชั้นวางของโชว์
1938	ไนลอน (Polyamide)	เครื่องนุ่งห่ม เชือก
1938	พอลิสไตรีน (Polystyrene)	ภาชนะใส่อาหาร อุปกรณ์ครัว
1942	พอลิเอสเตอร์ (Polyesters)	ตัวถังเรือ พลาสติกย่อยสลายได้ วัสดุใช้แล้วทิ้ง
1942	พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	ขวดน้ำ ถุง
1943	ซิลิโคน (Silicone)	น้ำยาฉนวนในมอเตอร์
1947	อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin)	เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ต้องการความทนทาน กาว
1954	พอลิยูรีเทน (Polyurethane)	โฟมกันกระแทก
1957	พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)	หมวกเซฟตี้ ถุง

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (โอภาประกาศิต, 2554) (ต่อ)

1957	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)	ส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า
1964	ไอออนอมเมอร์ (Ionomer)	ลูกกอล์ฟ
1974	อโรมาติก พอลิเอสเตอร์ (Aromatic polyester e.g. :PET)	ขวด PET
1985	พอลิคีโตน (Polyketone)	ส่วนประกอบในเครื่องยนต์
1985	Liquid crystalline polymers	จอแสดงผล LCD

3.2.5 คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์

สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ประกอบด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัด และความแข็งแรงการล้า โดยค่าพารามิเตอร์ทางกลเหล่านี้สามารถหาค่าได้ด้วยการทดสอบแรงเค้นความเครียด คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักมีความไวต่ออัตราการเสียรูป ต่ออุณหภูมิ และธรรมชาติทางเคมีของสิ่งแวดล้อม เช่นในสภาวะที่มีน้ำ ออกซิเจน ตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น

นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิห้องมากกว่าโลหะ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์บางชนิด พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นวัสดุมีโมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งแรงดึงลดลง แต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดการเสียรูปของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งในที่นี้ได้กล่าวถึงรูปแบบการเสียรูปของวัสดุพอลิเมอร์แบบกิ่งผลึกที่มีความสำคัญต่อความแข็งแรงของวัสดุ คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.2 (คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะเระ, 2551)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ (อรรถพล ตะเระ, 2551)

วัสดุ	ความ ถ่วงจำเพาะ	โมดูลัส แรงดึง (Gpa (ksi))	ความทนแรง ดึง (MPa (ksi))	ความคงทน แรงคราก (MPa (ksi))	ความยืดหยุ่น แตก หัก (%)
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำ	0.917- 0.932	0.17-0.28 (25-41)	8.3-31.4 (1.2-4.55)	9.0-14.5 (1.3-2.1)	100-650
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นสูง	0.952- 0.965	1.06-1.09 (155-158)	22.1-31.0 (3.2-4.5)	26.2-33.1 (3.8-4.8)	10-1200

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ (อรรถพล ตะระะ, 2551) (ต่อ)

พีวีซี	1.30-1.58	2.4-4.1 (350-600)	40.7-51.7 (5.9-7.5)	40.7-44.8 (5.9-6.5)	40-80
พอลิพรอพิลีน	0.90-0.91	1.14-1.55 (165-225)	31-41.4 (4.5-6.0)	31.0-37.2 (4.5-5.4)	100-600
พอลิสไตรีน	1.04-1.05	2.28-3.28 (330-475)	35.9-51.7 (5.2-7.5)	—	1.2-2.5
ฟินอล ฟอร์มาลดีไฮด์	1.24-1.32	2.76-4.83 (400-700)	34.5-62.1 (5.0-9.0)	—	1.5-2.0
ไนลอน 6.6	1.13-1.15	1.58-3.80 (230-550)	75.9-94.5 (11.0-13.7)	44.8-82.8 (6.5-12)	15-300

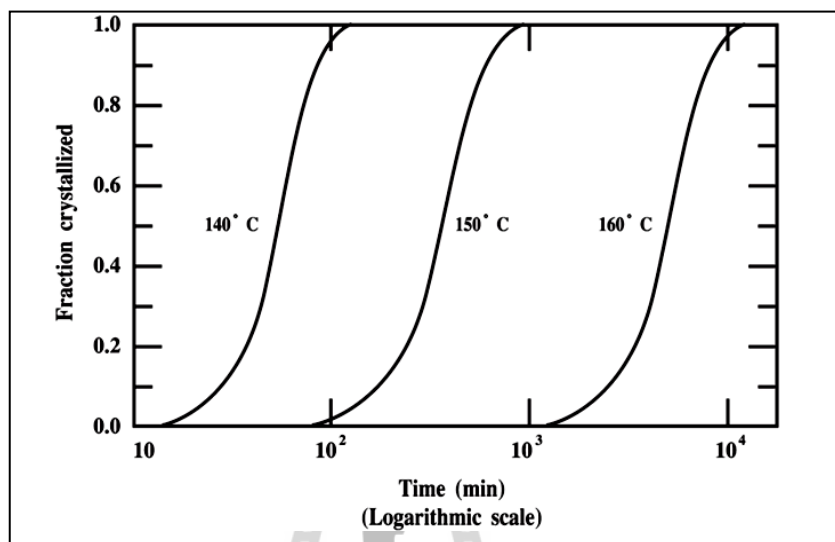
3.2.6 ปฏิกิริยาการเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน

สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิอย่างมาก โดยคุณลักษณะทางความร้อนและทางกลของวัสดุ เริ่มจากปฏิกิริยาการเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน การเกิดผลึกเป็นกระบวนการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวัฏภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการเย็นตัวจากของหลอมเหลว และเมื่อวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความร้อนก็ทำให้เกิดการหลอมตัวอีกครั้ง ส่วนการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นชนิดหนึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุพอลิเมอร์แบบอสัณฐานหรือพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นผลึก และเมื่อเย็นตัวจากของหลอมเหลวกลายเป็นของแข็ง มักมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกันกับของหลอมเหลว และในบางครั้งถือเป็นของเหลวแช่แข็งอสัณฐาน โดยสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปตามการเกิดผลึก การหลอมและการอ่อนตัวจากความร้อน

1) การเกิดผลึก (Crystallization) กลไกและอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่สำคัญมาก การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ที่มีการหลอมเหลว ผลึกเกิดขึ้นจากจุดเริ่มเกิดผลึก (Nucleation) และขยายตัวด้วยกระบวนการเติบโต (Growth Process) กล่าวคือเมื่อวัสดุพอลิเมอร์เย็นตัวมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว จะมีจุดเริ่มเกิดผลึกเป็นบริเวณเล็ก ๆ จากนั้นโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบเริ่มจัดเรียงตัว และที่อุณหภูมิเกินอุณหภูมิหลอมเหลวจุดเริ่มเกิดผลึกไม่เสถียรเนื่องจากการสั่นของอะตอมจากความร้อน และเมื่ออุณหภูมิลดลงก็เกิดจุดเริ่มผลึกเกิดขึ้นใหม่

การเกิดผลึกต้องอาศัยเวลาในแบบเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยการนำเศษส่วนการเกิดผลึกมาพล็อตกราฟเทียบกับค่าล็อกของเวลาที่

อุณหภูมิที่แสดงในรูปที่ 3.6 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์เกิดได้สมบูรณ์ทั้งสามอุณหภูมิ ซึ่งแท้จริงแล้วการเกิดผลึกร้อยละ 100 ของพอลิเมอร์เป็นไปได้ แต่ค่าเศษส่วนผลึกเท่ากับ 1 ในกราฟนั้นเป็นค่าระดับการเกิดผลึกสูงสุดที่ได้ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งมีค่าต่ำกว่านี้



รูปที่ 3.6 อัตราส่วนผลึกกับแกนเวลาของวัสดุพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ
(ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

โดยปกติปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้นวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นส่วนที่นำมาทดสอบ เนื่องจากวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของผลึกมีปริมาตรแตกต่างกัน ส่วนอัตราการเกิดผลึกวัดตรงจุดที่มีการเกิดผลึก 50% และอัตราการเกิดผลึกนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดผลึก แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์แปรผกผันกับอัตราการเกิดผลึก กล่าวคือถ้าอัตราการเกิดผลึกต่ำจะได้น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์มากขึ้น

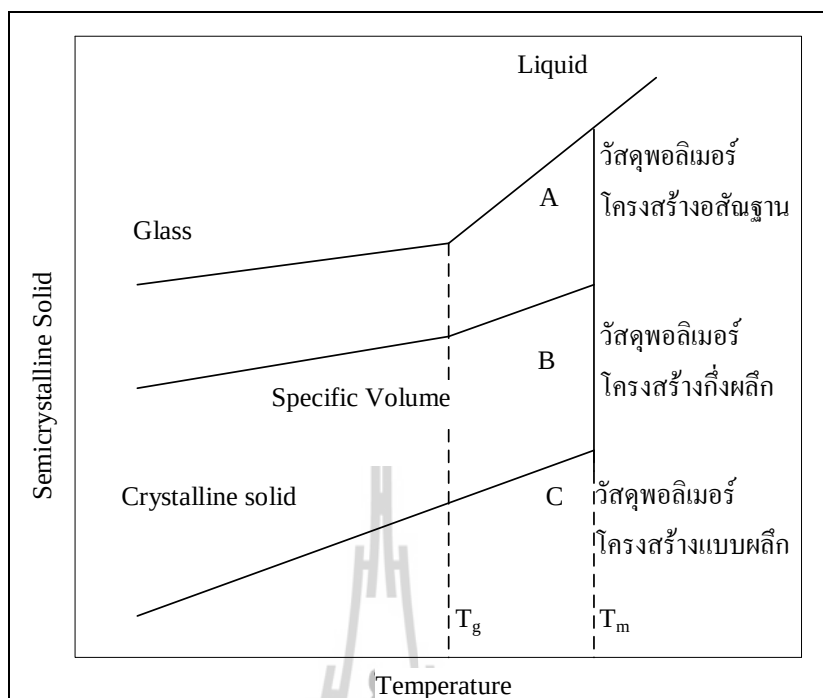
2) การหลอมเหลว (Melting) การหลอมเหลวของผลึกพอลิเมอร์เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงสถานะจากวัสดุของแข็งที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบไปเป็นของไหลหนืด (Viscous Liquid) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) การหลอมเหลวของพอลิเมอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์กับลักษณะโครงสร้างผลึก นอกจากนั้นพฤติกรรม การหลอมเหลวของพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ก็สูงขึ้นตามไปด้วย วัสดุพอลิเมอร์ตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนโดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสมบัติของวัสดุ เช่น การอบ

อ่อน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว สามารถทำให้ อุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นได้หรือทำให้พอลิเมอร์ทนความร้อนได้สูงขึ้น

3) การเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition) การเปลี่ยนสภาพคล้าย แก้วเป็นยืดหยุ่นจะเกิดในพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานที่เกิดจากการเย็นตัวจากสถานะของเหลวเป็น ของแข็งโดยไม่เกิดเป็นผลึก นั่นคือในช่วงการเย็นตัว สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็น ระเบียบในลักษณะสามมิติ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพในช่วงแรกของการเย็นตัวความหนืดมีค่า เพิ่มขึ้น จากนั้นก็ค่อย ๆ เปลี่ยนจากของเหลวเป็นวัสดุคล้ายยางและกลายเป็นของแข็งในที่สุด อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากยืดหยุ่นคล้ายยางเป็นของแข็ง เรียกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยน สภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition Temperature, T_g) ในทางกลับกันเมื่อพอลิเมอร์ได้รับ ความร้อนเกินอุณหภูมิ T_g จะเกิดการเปลี่ยนสภาพจากของแข็งกลับไปเป็นยืดหยุ่น

4) อุณหภูมิการหลอมและการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น อุณหภูมิ หลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการ กำหนดการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ โดยนิยามอุณหภูมิทั้งสองข้างต้นเป็นขีดจำกัดของอุณหภู มิบนและล่างตามลำดับในการนำวัสดุไปใช้งาน โดยเฉพาะพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก และยังมีอิทธิพลต่อ กระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์และวัสดุประกอบพอลิเมอร์อีกด้วย

อุณหภูมิหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของพอลิเมอร์จะมีวิธีการวัดแบบเดียวกัน กับวัสดุเซรามิก ด้วยการพล็อตปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) เป็นส่วนกลับของความ หนาแน่นเทียบกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยกราฟ A และ C เป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน และผลึกตามลำดับ สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จำเพาะแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิหลอมเหลว T_m ส่วนกราฟของวัสดุอสัณฐานมีการเปลี่ยนแปลง อย่างต่อเนื่องแต่มีการลดลงของความชันที่อุณหภูมิ T_g สำหรับพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกพบทั้ง พฤติกรรมการหลอมเหลว T_m และการเปลี่ยนสภาพ T_g ซึ่งเป็นสมบัติของวัฏภาคผลึกและอสัณฐาน ตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมในรูปที่ 3.7 ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวหรืออัตราการให้ความร้อน ใน ตารางที่ 3.3 แสดงค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของพอลิเมอร์บางชนิด และใน ตารางที่ 3.4 แสดงคุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ
(คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระ, 2551)

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ T_g และ T_m ของวัสดุพอลิเมอร์ (คุณสมบัติและการทดสอบ
วัสดุ, อรรถพล ตะระ, 2551)

วัสดุพอลิเมอร์	อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ กลายแก้วเป็นยืดหยุ่น ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิการหลอม ($^{\circ}\text{C}$)
XLPE	-125	110
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	-110	115
พอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน	-97	327
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	-90	137
พอลิพรอพิลีน	-18	175
ไนลอน 6.6	57	265
พอลิเอสเตอร์ (PET)	69	265
พีวีซี	87	212
พอลิสไตรีน	100	240

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า
(G.F. Moore, 1997, อ้างใน รัฐเขต, 2555)

วัสดุ	XLPE	PE	PVC	ยาง Butyl	ยาง EP	ยาง CR
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	0.92	0.92	12.-1.5	1.4-1.5	1.3-1.4	1.4-1.6
ความคงทนฉนวนไฟฟ้า (Dielectric Strength : kV/mm)	50	30-50	20-35	20-30	30-45	15-25
ค่าความต้านทานปริมาตร (Volume Resistivity : ohm)	1,018	1,018	1,012	1,015	1,015	107-12
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
ความต้านทานไฟ (Flame Resistivity)	NG	NG	E	NG	NG	E
การเปลี่ยนรูปจากความร้อน (Heat Deformation)	F	G	G	G	F	G
ค่าความต้านทานโอโซน (Ozone Resistivity)	F	F	G	F	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

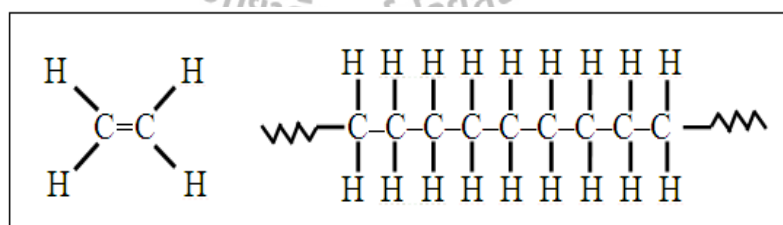
3.3 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากมีเสถียรภาพ ผลิตง่าย เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีและมีความคงทนในสภาวะใช้งานภายใต้อุณหภูมิปกติ ต่อมาในปี ค.ศ. 1933 ได้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเอทิลีนให้เป็นวัสดุหลักในการผลิตเป็นฉนวนของสายเคเบิลสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูง นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเอทิลีนก็ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของโมเลกุล ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ขอบเขต ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์และโครงสร้างของผลึก วัสดุพอลิเอทิลีนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene: LDPE)
- 2) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE)
- 3) พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ (Linear Low-Density Polyethylene: LLDPE)

พอลิเอทิลีนแต่ละประเภทถูกนำไปใช้งานแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของงานและขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ แต่วัสดุพอลิเอทิลีนที่นิยมนำไปใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลไฟฟ้าอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือ พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางหรือ XLPE

พื้นฐานทางโมเลกุลของพอลิเอทิลีนโดยปกติอยู่ในรูปของห่วงโซ่โมเลกุลที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของคาร์บอนหนึ่งอะตอมและไฮโดรเจนสองอะตอมเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวที่เกิดจากวัสดุประกอบเอทิลีนที่มีรูปแบบทางโมเลกุลคือ C_2H_4 หรือ $CH_2=CH_2$ โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ขึ้นจากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

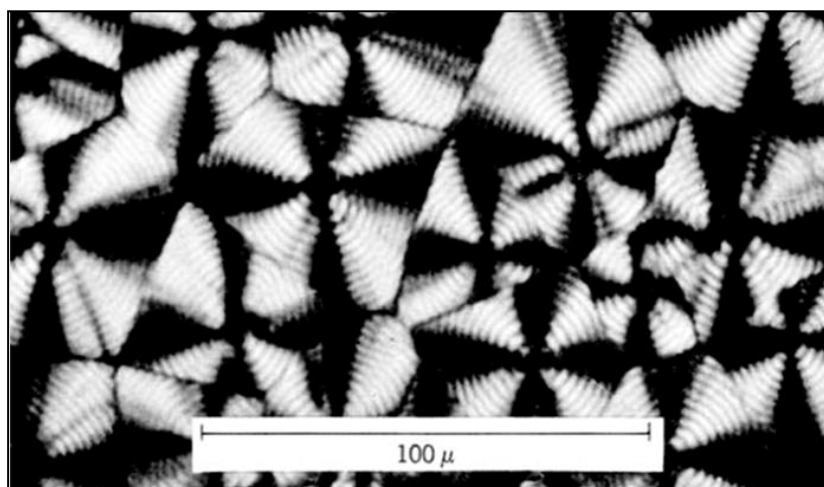


รูปที่ 3.8 โครงสร้างพอลิเอทิลีนจากเอทิลีน

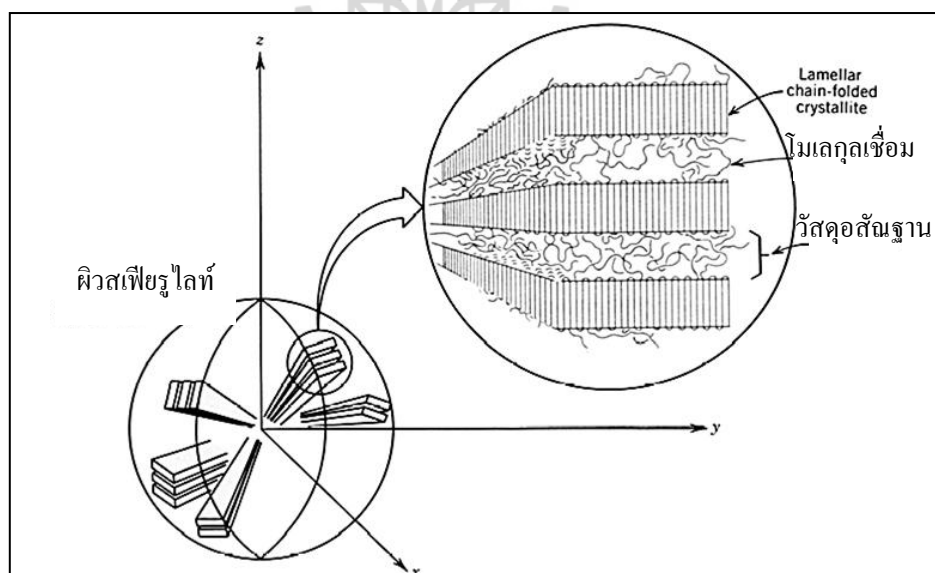
3.3.1 การเสถียรภาพของพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีข้อบกพร่องกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) และมีโครงสร้างแบบสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งแต่ละสเฟียรูไลต์ ประกอบด้วย Chain-folded Ribbon จำนวนมากหรือลามลาร์ (Lamellar) ที่แผ่ออกจากจุดกึ่งกลาง พื้นที่ส่วนอื่น

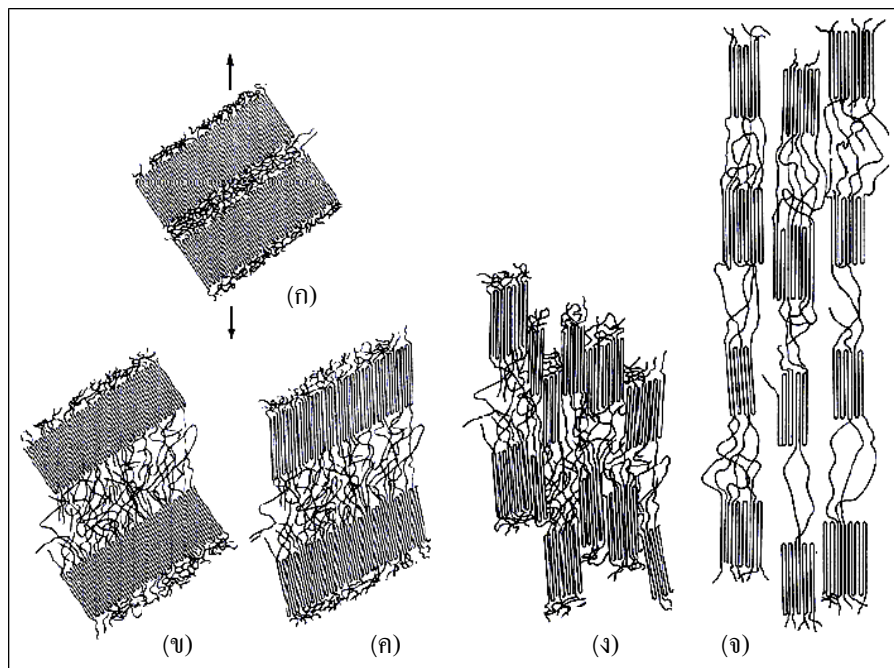
นอกจากที่เป็นลามลาร์เหล่านี้จะเป็นแบบอสัณฐานดังแสดงในรูปที่ 3.10 การจัดเรียงของลามลาร์จะเชื่อมด้วยโซ่เชื่อม (Tie Chain) ซึ่งผ่านบริเวณของอสัณฐานเหล่านั้น



รูปที่ 3.9 โครงสร้างสเฟียรูไลต์ของพอลิเอทิลีน (ขยาย 525 เท่า)
(คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระ, 2551)



รูปที่ 3.10 ภาพแสดงรายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์
(คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระ, 2551)



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเสีรูปของวัสดุพอลิเมอร์แบบกิ่งผลึก
(คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

กลไกการเสีรูปของพอลิเอทิลีน สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิริยาระหว่างชั้นของลามลาร์กับบริเวณที่เป็นอสังฐาน กระบวนการนี้เกิดขึ้นหลายขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.11 ลักษณะ Chain-folded Lamellar สองชุดกับบริเวณอสังฐานที่อยู่ระหว่างลามลาร์ก่อนเกิดการเสีรูป แสดงในรูปที่ 3.11 (ก) เมื่อเริ่มเกิดการเสีรูปดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) ลามลาร์ ธิบบอนจะเลื่อนผ่านธิบบอนอื่น ๆ เช่นเดียวกับโซ่เชื่อมบริเวณอสังฐาน ทำให้เกิดการยัดออกจากกันหลังจากนั้นจะเกิดการเสีรูปในขั้นที่สองด้วยการเอียงของลามลาร์ส่งผลให้ Fold Chain เกิดการเรียงตัวในแนวของแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ค) จากนั้นบริเวณของชุดผลึกจะแยกออกจากลามลาร์เป็นส่วน ๆ แต่ยังเชื่อมต่อกันด้วยโซ่เชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ง) ในขั้นสุดท้ายดังแสดงในรูปที่ 3.11 (จ) ชุดผลึกและโซ่เชื่อมจะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแนวแรงดึง ดังนั้น การเสีรูปจากแรงดึงของ พอลิเมอร์แบบกิ่งผลึกทำให้เกิดโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวสูง ซึ่งในระหว่างกระบวนการสเฟียไรไลท์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงคุณลักษณะทางกลของพอลิเอทิลีน ดังนั้นจึงสามารถทำให้พอลิเมอร์แบบกิ่งผลึกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มระดับการเชื่อมขวางให้แก่พอลิเอทิลีน กระบวนการเชื่อมขวางจะไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลทำให้ พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น (คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

3.4 สายเคเบิลไฟฟ้า

สายเคเบิลไฟฟ้าถูกออกแบบมาเพื่อนำกระแสไฟฟ้าและทนต่อแรงดันไฟฟ้าในขณะทำงานที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งทำให้สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าได้ ในบางกรณี สายเคเบิลไฟฟ้าถูกกำหนดไว้เพียงแค่ ตัวนำกับฉนวนเท่านั้น การใช้งานของสายเคเบิลไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะมีการใช้งานที่ครอบคลุมหลากหลายรวมถึงการใช้งานในระบบไฟฟ้าใต้ดิน ระบบไฟฟ้าใต้น้ำ ระบบจำหน่ายเหนือศีรษะ และในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบสายเคเบิลใต้ดินเป็นที่นิยมและแพร่หลายไปทั่วโลก อาจกล่าวได้ว่าสายเคเบิลใต้ดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ในช่วง 2 ศตวรรษที่ผ่านมา ได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากได้ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสายเคเบิลให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางด้านการประยุกต์ใช้งาน การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการผลิตสายเคเบิล การเลือกเฟ้นวัสดุพอลิเมอร์มาเป็นฉนวนในสายเคเบิล และการออกแบบสายเคเบิล เป็นต้น

3.4.1 ประวัติความเป็นมาของสายเคเบิลแรงสูง

สายเคเบิลไฟฟ้ามีต้นกำเนิดขึ้นในปี 1880 หลังจากที่มีการประดิษฐ์หลอดไฟฟ้า ความต้องการสำหรับสายเคเบิลในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้น เมื่อพื้นที่ของเมืองมีการขยายตัวและมีการเจริญขึ้น จึงมีความต้องการสายเคเบิลมากขึ้นตามไปด้วย ในปี 1884 เป็นครั้งแรกที่ได้มีการผลิตสายเคเบิลฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน (PILC) ในเชิงพาณิชย์ โดยบริษัท Callender Cables สายเคเบิล PILC แรงดันปานกลางจะยังคงมีการใช้งานอยู่จนถึงปัจจุบันเนื่องจากความทนทานและความน่าเชื่อถือ สำหรับบางสาขารูปโลก สายเคเบิล PILC ยังคงเป็นส่วนหนึ่งของเครือข่ายระบบจำหน่ายใต้ดิน (Bartnikas, 1999)

ประวัติสายเคเบิลจากปี 1800 จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีที่เต็มรูปแบบด้วยการประดิษฐ์ของวัสดุชนิดใหม่ ๆ การออกแบบและกระบวนการผลิต ในปี 1950 ได้มีความต้องการสำหรับการออกแบบสายเคเบิลที่มีความยืดหยุ่นและง่ายต่อการจัดการสำหรับการติดตั้งเมื่อเปรียบเทียบกับสายเคเบิล PILC เริ่มเห็นได้ชัดว่ามีวัสดุที่เป็นยางหลากหลายรูปแบบจะถูกนำมาใช้เพื่อผลิตเป็นสายเคเบิล อย่างไรก็ตามในปี 1933 พอลิเอทิลีน(PE) ถูกค้นพบและเริ่มได้รับการยอมรับสำหรับการใช้งานในสายเคเบิลไฟฟ้ากำลังในระบบจำหน่าย โดยในปี 1950 พอลิเอทิลีน (PE) ได้รับการยอมรับทั่วไปและเข้ามาแทนที่สายเคเบิลที่ออกแบบมาจากยางในก่อนหน้านี้เกือบทั้งหมด ต่อมาสหรัฐอเมริกาได้มีการผลิตสายเคเบิลพลาสติกที่ทำมาจาก High Molecular Weight Polyethylene(HMWPE) ขึ้นมาใช้งาน สายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีน(PE)ได้มีการเริ่มใช้งานตั้งแต่ปี 1951 สำหรับระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 35 kV และมีการนำเสนอสายเคเบิลระบบจำหน่ายใต้ดิน

ฉนวน PE เป็นครั้งแรกในช่วงปลายทศวรรษ 1960 และในปี 1963 ได้มีการประดิษฐ์สายเคเบิลฉนวน XLPE ขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรก สายเคเบิล HMWPE จึงไม่ค่อยมีการนำมาใช้งาน เมื่อสายเคเบิลฉนวน XLPE สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงกว่าสายเคเบิล HMWPE (Bartnikas, 1999)

สายเคเบิล PE มีความเสี่ยงที่จะเกิดความล้มเหลวของกลไกใหม่ ๆ และมีการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลก่อนกำหนดเมื่อสายเคเบิลทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียกชื้น ในบางกรณีมีอายุการใช้งานน้อยกว่า 10 ปี ดังนั้นผู้ผลิตสายเคเบิลและระบบสาธารณูปโภคกำลังถูกท้าทายเพื่อค้นหาสาเหตุและเพื่อหาทางแก้ปัญหาที่จะทำให้มีความเชื่อมั่นและมีความมั่นใจในสายเคเบิลฉนวนโพลิเมอร์ จึงได้มีการค้นพบว่าความล้มเหลวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง ซึ่งเป็นกระบวนการเสื่อมสภาพที่เริ่มต้นจากส่วนที่ยื่นออกมาในตัวนำและเปลือกหุ้มฉนวน สารปนเปื้อนในฉนวนและเปลือกหุ้ม หรือช่องว่างในฉนวน ปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงจะกล่าวรายละเอียดในส่วนถัดไป (Orton, 2006)

ในปี 1980 มีความก้าวหน้าที่น่าทึ่งเกิดขึ้นกับการควบคุมปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงด้วยกระบวนการบ่มแห้งสำหรับเทอร์โมเซตที่มีผิวเรียบและมีตัวนำกับเปลือกหุ้มฉนวนที่สะอาด จึงได้มีการผลิตฉนวน Tree Resistant XLPE (TRXLPE) ที่มีความสะอาดเป็นพิเศษ ฉนวนแบบใหม่นี้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถทนต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิงได้ เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดวอเตอร์ทรีอิงจึงได้มีการใช้สารเติมแต่งและการใช้เทคโนโลยีโคพอลิเมอร์เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต (Orton, 2006)

ในปี 1960 สายเคเบิลฉนวน Ethylene Propylene Rubber (EPR) ถูกนำมาเข้าสู่ท้องตลาดสำหรับที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 60 kV สายเคเบิล EPR จะมีความยืดหยุ่นดีกว่าสายเคเบิล PE แต่ยังคงมีความเสี่ยงต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิง นอกจากนี้ การสูญเสียความเป็นฉนวนของสายเคเบิล EPR จะสูงกว่าหรือเทียบเท่าของสายเคเบิล XLPE หรือ TRXLPE ดังนั้นการใช้สายเคเบิล EPR ในการติดตั้งใหม่ ๆ จะเป็นที่ต้องการน้อยลง และนี่ก็เป็นเหตุผลหลักว่าทำไมสายเคเบิล EPR ไม่ถูกใช้สำหรับการใช้งานในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สายเคเบิล EPR จะถูกใช้อย่างกว้างขวางเฉพาะในสหรัฐอเมริกา อเมริกาใต้ และอิตาลี ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา (Bartnikas, 1999) พัฒนาการของฉนวนสายเคเบิลมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ในตารางที่ 3.5 แสดงวิวัฒนาการและพัฒนาการของสายเคเบิล

ตารางที่ 3.5 วิวัฒนาการและพัฒนารของสายเคเบิล (G.F. Moore, 1997 อ้างใน รัฐเขต, 2555)

ปี	พัฒนาการของสายเคเบิล
1812	เริ่มมีการใช้สายไฟหุ้มฉนวนด้วยยางเคลือบเงา ใช้สำหรับการจุดระเบิดในเหมืองเป็นครั้งแรกในรัสเซีย
1850	เริ่มมีการใช้สายเคเบิลโทรเลขใต้ทะเลระหว่างอังกฤษและฝรั่งเศส และใช้ในเรือดำน้ำเป็นครั้งแรก
1880	Thomas Edison ได้ประดิษฐ์สายเคเบิลกระแสตรงโดยมีฉนวนหุ้มขึ้นในอเมริกา
1890	Sebastian Ferranti ได้เสนอแนวคิดการใช้สายเคเบิล 10 kV ในรูปแบบท่อ โดยมีกระดาษเป็นฉนวนในอังกฤษ
1900	มีการใช้ยางธรรมชาติเป็นฉนวนในสายเคเบิล
1925	เริ่มมีการใช้สายเคเบิลกระดาษอัดความดันเป็นครั้งแรก
1930	เริ่มมีการใช้ผลิตภัณฑ์พีวีซี (Polyvinyl Chloride :PVC) เป็นครั้งแรกในเยอรมัน
1937	ได้มีการคิดค้นวัสดุพอลิเมอร์พอลิเอทิลีน (PE) ขึ้นในประเทศอังกฤษ
1942	เริ่มมีการประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเอทิลีนในสายเคเบิลเป็นครั้งแรก
1954	เริ่มมีการใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นครั้งแรกในสวีเดน
1963	บริษัท General Electric ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ขึ้น
1968	เริ่มมีการใช้สายเคเบิล XLPE ในระบบแรงดันสูงขนาดกลางเป็นฉนวนเป็นครั้งแรก
1972	นำเสนอการใช้ตัวกำบังแบบสารกึ่งตัวนำในสายเคเบิล
1978	มีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นปลอกหุ้มสายเคเบิลอย่างแพร่หลายในอเมริกาเหนือ
1988	เริ่มมีการประยุกต์ใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาด 500 kV เป็นครั้งแรกในญี่ปุ่น
2000	เริ่มมีการประยุกต์ใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาด 500 kV โดยติดตั้งใต้ดินในระยะทางไกลเป็นครั้งแรกในญี่ปุ่น
2006	ออสเตรเลียได้มีการสร้างสายเคเบิลใต้น้ำที่มีความยาวที่สุดในโลก

3.4.2 มาตรฐานสายเคเบิลแรงสูงในระบบจำหน่าย

ในทั่วโลก มาตรฐานของสายเคเบิลมีการก่อตั้งขึ้นโดยหลายองค์กร โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ที่มีมาตรฐาน Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Association of Edison Illuminating Companies (AEIC), American Society of Testing and Materials (ASTM), Canadian Standards Association (CSA), Canadian Electricity Association

(CEA) และ Insulated Cable Engineers Association (ICEA) มาตรฐานที่มีความโดดเด่นที่สุดในระดับนานาชาติคือ International Electrotechnical Commission (IEC) นอกจากนี้ระบบมาตรฐานที่มียูจากหน่วยงานเหล่านี้จะครอบคลุมประเภทของสายเคเบิลทั้งหมด การออกแบบสายเคเบิล วัสดุสายเคเบิล อุปกรณ์เสริม การติดตั้ง การทำงานและการทดสอบสายเคเบิล และรวมถึงตัวชี้วัดบางอย่างสำหรับการตรวจวิเคราะห์ (Hartlein, 2001)

3.5 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล

สายเคเบิลแรงสูงส่วนใหญ่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้่ายต่อการใช้งานและทำให้เกิดความน่าเชื่อถือในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ในการออกแบบสายเคเบิลตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันจะยังคงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากเท่าไร แต่จะมีการปรับปรุงในเรื่องของอายุการใช้งาน การค้นพบของวัสดุฉนวนชนิดใหม่ ๆ และกระบวนการผลิตที่หลากหลาย ในรูปที่ 3.12 จะแสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE ที่ประกอบไปด้วย ตัวนำ กำบังตัวนำ ฉนวน กำบังฉนวน นิวทรัลศูนย์กลางร่วมและปลอกหุ้มด้านนอก (Jean Carlos, 2008)



รูปที่ 3.12 สายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE

(ที่มา <http://www.globalmarket.com/product-info/low-voltage-xlpe-cable-563943.html>)

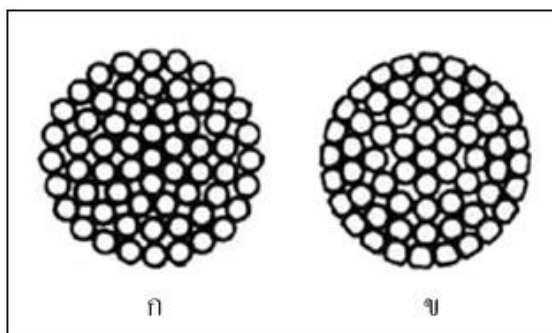
3.5.1 ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)

หน้าที่หลักของตัวนำไฟฟ้าคือนำกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วตัวนำไฟฟ้ามักทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม แต่ที่นิยมใช้กันมากคือตัวนำที่ทำมาจากอะลูมิเนียมเพราะอะลูมิเนียมมีราคาถูกกว่าทองแดงและมีน้ำหนักที่เบากว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ตัวนำทองแดงนำกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวนำอะลูมิเนียม ดังนั้น การเลือกขนาดและการเลือกใช้วัสดุของตัวนำไฟฟ้าจึงไม่ใช่งานง่ายเนื่องจากหลักเกณฑ์ยังขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าตกตามสายเคเบิล ลักษณะของวัสดุฉนวน ความยืดหยุ่น การออกแบบสายเคเบิล วิธีการติดตั้ง น้ำหนัก และค่าใช้จ่าย ตัวนำไฟฟ้าอาจเป็นแบบแท่งหรือแบบตีเกลียวก็ได้ ตัวนำแบบตีเกลียวมีความยืดหยุ่นมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวนำแบบแท่ง ตัวนำแบบตีเกลียวนี้อาจเต็มไปด้วยเรซินเพื่อป้องกันการซึมเข้าไปของน้ำ ในอีกแง่หนึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีส่วนประกอบของเรซิน จะเห็นได้ว่าน้ำเริ่มมีบทบาทที่สำคัญในกลไกการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลและกลไกความเสียหายต่าง ๆ ก็จะมาตามในภายหลัง แม้ว่าอะลูมิเนียมได้รับความนิยมในการใช้เป็นตัวนำไฟฟ้ามากกว่าวัสดุอื่น ๆ แต่คุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียของวัสดุก็มีความแตกต่างกันไป (Jean Carlos, 2008) การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า

วัสดุ	ข้อดี	ข้อเสีย
อะลูมิเนียม	มีราคาไม่แพง	นำไฟฟ้าและทนความร้อนได้น้อย
ทองแดง	นำไฟฟ้าได้ดี และทนความร้อนสูง	มีราคาแพง
เงิน	นำไฟฟ้าและทนต่อความร้อนได้ดีกว่าทองแดง	มีราคาแพงมาก
โซเดียม	มีราคาถูก	ความปลอดภัยด้านการใช้งาน การบำรุงรักษาและนำไฟฟ้าต่ำ

การสร้างรูปแบบของตัวนำไฟฟ้ามีกระบวนการหลายวิธี เช่น การบีบอัด การหลอม การทอ การถลุง การชุบ และการตีเกลียว เป็นต้น ตัวนำไฟฟ้าอาจอยู่รอบศูนย์กลางหรือถูกบีบอัด เพื่อให้ส่วนของพื้นผิวด้านนอกของตัวนำมีผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 (ก) ตัวนำรอบศูนย์กลาง และ (ข) ตัวนำรอบแบบบีบอัด

(ที่มาจาก <http://www.iaei.org/magazine/2005/05/basic-electricity-part-6-large-conductors/>)

เมื่อพิจารณาถึงราคาของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าแล้ว ทองแดงและอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตเป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิล แต่ก็ยังมีอยู่บ้างที่ใช้โซเดียมเป็นตัวนำไฟฟ้า ตารางที่ 3.7 แสดงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะที่นำมาใช้ผลิตเป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิล (Jean Carlos, 2008)

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ (รัฐเขต เทียมศรี, 2555)

ชนิดของโลหะ	ความนำไฟฟ้า (ทองแดง = 100%)	ค่าความต้านทาน ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20°C ($\Omega\text{m}, 10^{-8}$)	ค่าสัมประสิทธิ์ ความต้านทาน อุณหภูมิ (per °C)
เงิน	106	1.626	0.0041
ทองแดง (ขึ้นรูปแบบรีดอบ)	100	1.724	0.0039
ทองแดง (ขึ้นรูปแบบรีดแข็ง)	97	1.777	0.0039
ทองแดงชุบ	95-99	1.741-1.814	0.0039
อะลูมิเนียม (เกรดอ่อน)	61	2.803	0.0040
อะลูมิเนียม (เกรดแข็ง)	61	2.826	0.0040
โซเดียม	35	4.926	0.0054
เหล็กเหนียว	12	13.80	0.0045

คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะที่นำมาทำเป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลและชั้นกำบังโลหะแสดงไว้ในตารางที่ 3.8 ทองแดงสามารถทนความร้อนได้ดี จึงสามารถนำไฟฟ้าและใช้งานในสถานะที่อุณหภูมิสูงได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนอะลูมิเนียมแกนเดียวทนสถานะของอุณหภูมิสูงได้ต่ำกว่าทองแดงแต่นำมาตีเกลียวสามารถทนสถานะได้สูงขึ้น

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะที่ใช้ในการทำสายเคเบิล (รัฐเขต เทียมศรี, 2555)

คุณสมบัติ	หน่วย	ทองแดง	อะลูมิเนียม	ตะกั่ว
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20°C	kg/m ³	8890	2703	11370
ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนต่อ °C	$\times 10^{-6}$	17	23	29
จุดหลอมเหลว	°C	1083	659	327
การนำความร้อน	W/cm °C	3.8	2.4	0.34
ความเครียดแรงดึงสูงสุด	MN/m ²	225	70-90	-
ความแข็ง	DPHN	50	20-25	5
ความคงทนความล้า(ค่าประมาณ)	MN/m ²	±65	±40	±28

ขนาดของตัวนำไฟฟ้ากำหนดจากพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ตัวอย่างในประเทศสหรัฐอเมริกา ขนาดของตัวนำถูกกำหนดโดยหน่วย American Wire Gage (AWG) ขนาดของตัวนำทองแดงแบบแท่งมีขนาดไม่เกิน No.1 AWG และไม่นิยมใช้ตัวนำอะลูมิเนียมแบบแท่ง แต่มาตรฐานยุโรปนิยมใช้ตัวนำอะลูมิเนียมแบบแท่ง ในแกนของสายเคเบิลอาจมีตัวนำได้มากกว่าหนึ่งชนิด แต่ต้องมีการคำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าแต่ละชนิดอย่างเหมาะสม โดยต้องคำนึงถึงความเครียดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น รูปแบบของตัวนำไฟฟ้าอาจมีการสร้างหลายวิธี เช่น การบีบอัด การหลอม การทอ การถลุง การชุบ และการตีเกลียว เป็นต้น (Jean Carlos, 2008)

3.5.2 กำบังตัวนำ (Conductor Shield)

หน้าที่หลักของกำบังตัวนำคือ ทำให้ส่วนที่ติดกันระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับฉนวนมีผิวเรียบ ส่วนที่ติดกันที่มีผิวเรียบระหว่างกำบังตัวนำและฉนวนเพื่อหลีกเลี่ยงปลายที่แหลมคมของตัวนำไฟฟ้าที่ยื่นออกมา ที่สามารถทำให้เกิดความเครียดไฟฟ้าที่สูงไปยังฉนวน กำบังตัวนำและฉนวนจะมีพันธะทางเคมีต่อกัน ถ้าไม่มีกำบังตัวนำ เส้นแรงสนามไฟฟ้ามีมากขึ้นรวมอยู่ที่รอบ ๆ ขอบที่แหลมคมบริเวณด้านนอกของตัวนำ เป็นผลให้เกิดความเครียดไฟฟ้าสูงในบริเวณที่ติดกัน

ระหว่างตัวนำและฉนวน สิ่งนี้ทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลลดลง และมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของสายเคเบิลในที่สุดเมื่อมีความเครียดแรงดันที่เพิ่มสูงขึ้น

กำลังตัวนำทำมาจากวัสดุถึงตัวนำที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษโดยการผสม Carbon Black ที่มีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 30- 40% เพื่อกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสาร Carbon Black มากเกินไปอาจส่งผลให้คุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าลดลง (Jean Carlos, 2008)

3.5.3 ฉนวน (Insulation)

ฉนวนเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิล ซึ่งสามารถทนต่อการกระทำของแรงดันไฟฟ้าได้ ฉนวนมีหน้าที่กั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนทำให้การส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าหยุดชะงัก และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้ โดยทั่วไปคุณภาพของสายเคเบิลมักขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวน ซึ่งฉนวนสามารถจำแนกได้เป็นฉนวนแผ่นและฉนวนแบบอัดรีด ฉนวนควรต้องมีความสะอาดและส่วนที่ติดกับกำลังตัวนำต้องมีผิวเรียบ เพื่อหลีกเลี่ยงความเครียดทางไฟฟ้าสูงที่อาจทำให้เกิดความล้มเหลวของฉนวน สำหรับฉนวนที่ใช้ในสายเคเบิลแรงสูงมีลำดับขั้นในการพัฒนาการใช้งานดังนี้ (Jean Carlos, 2008)

ฉนวนชนิดแรกเป็นฉนวนแผ่น (Laminated Insulation) ได้แก่ สายเคเบิลฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน (Paper Impregnated Laminated Cable: PILC) ฉนวนกระดาษเป็นฉนวนที่เก่าแก่ที่สุดและวัสดุที่ใช้ยังมีใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปกระดาษที่จุ่มด้วยน้ำมันหรือเจลจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี สายเคเบิลชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้นานกว่า 100 ปี และได้มีการทดสอบกันอย่างกว้างขวางและมีวิธีการประเมินผลการพัฒนาให้ดีขึ้น ถึงแม้จะมีขั้นตอนเหล่านี้ ในการผลิตและการติดตั้งของสายเคเบิลฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน PILC ก็ยังคงต้องใช้ทักษะต่าง ๆ ที่สำคัญเข้ามาช่วย

การใช้งานสายเคเบิล PILC มีแนวโน้มที่ลดลง สายเคเบิลฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน PILC จะมีการสูญเสียความเป็นฉนวนสูง การติดตั้งและบำรุงรักษามากกว่าสายเคเบิลฉนวนอัดรีด สาเหตุหลักในการเสื่อมอายุของฉนวนชนิดนี้คือ การเกิดรอยแตกร้าวหรือการสึกกร่อนที่ปลดปล่อย ซึ่งทำให้ความชื้นผ่านเข้ามายังเนื้อฉนวนเป็นต้นเหตุให้ฉนวนเกิดการเสื่อมอายุ ปัจจุบันความนิยมในการใช้งานฉนวน PILC ลดน้อยลง เนื่องจากการใช้งานฉนวน PILC จะมีผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เพราะวัสดุที่ใช้เป็นปลดปล่อยคือตะกั่วและจุ่มอยู่ในน้ำมัน

ฉนวนแบบที่สองคือ ฉนวนแบบอัดรีด (Extruded Insulation) ซึ่งสามารถจำแนกเป็นฉนวนเทอร์โมพลาสติกและฉนวนเทอร์โมเซต ฉนวนเทอร์โมพลาสติกหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงและแข็งจนเปราะแบบแก้วเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ตัวอย่างฉนวนเทอร์โมพลาสติกคือ พอลิเอทิลีน

(PE) ซึ่งแบ่งออกเป็นพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMWPE) หรือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMWPE) หรือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เทอร์โมเซตคือโพลิเมอร์ที่มีการใช้ความร้อนในการเซตตัวเป็นรูปแบบที่ต้องการจากการบ่ม โดยการบ่มทำให้เกิดการเชื่อมขวางเข้าไปในโครงสร้างของโมเลกุลของโพลิเมอร์ กระบวนการเชื่อมขวางสร้างโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ส่งผลให้วัสดุมีจุดหลอมเหลวสูงโดยทั่วไปแล้วฉนวนเทอร์โมเซตมีความแข็งแรงกว่าฉนวนเทอร์โมพลาสติกเพราะโครงสร้างโมเลกุล วัสดุเทอร์โมเซตสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นและไม่สามารถนำไปรีไซเคิลเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกได้ ตัวอย่างฉนวนเทอร์โมเซตได้แก่ พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง(XLPE), Water Tree Retardant XLPE (WTRXLPE) เรียกอีกอย่างว่า Tree Retardant XLPE (TRXLPE) และยางเอทิลีนโพรพิลีน (EPR) เป็นต้น แต่ฉนวนที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตสายเคเบิลในปัจจุบันคือฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง(XLPE)

ฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง ได้มีการผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1963 โดยนักวิจัยกลุ่มหนึ่งในนิวยอร์ก (Precopio and Gilbet, 1963) จากนั้นในระหว่างปี 1970 ประเทศทางยุโรปและที่อื่น ๆ ได้เริ่มนำวัสดุ XLPE มาใช้เป็นฉนวนสายเคเบิลอย่างแพร่หลาย วัสดุ XLPE เป็นวัสดุฉนวนที่ทนความร้อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการนำวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาเป็นพื้นฐานของเนื้อฉนวน และผสมเข้ากับสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น วัสดุประกอบเหล่านี้ประกอบด้วย วัสดุที่มีความต้านทานต่อการเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีริงและวัสดุที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ผสมลงในเนื้อฉนวน XLPE นอกจากนี้ ยังมีการผสมวัสดุประกอบอื่น ๆ เช่น สารประกอบที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางหรือเรียกว่าสารประกอบขึ้นรูป ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์และน้ำ ผู้ผลิตสายเคเบิลส่วนใหญ่มักใช้สารประกอบเหล่านี้ผสมเพิ่มลงไปเนื้อฉนวนพอลิเอทิลีนก่อนทำการเชื่อมขวางให้เป็น XLPE เมื่อผ่านกระบวนการเหล่านี้เสร็จสิ้นแล้ว จะได้ฉนวน XLPE ที่ทนต่อความร้อนสูงและมีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าที่ดี จากการพัฒนาคุณสมบัติต่าง ๆ ทำให้ฉนวน XLPE สามารถใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันสูงถึง 500 kV

กระบวนการเชื่อมขวางของวัสดุพอลิเอทิลีนสามารถทำได้ 3 วิธีคือ การเชื่อมขวางจากการฉายแสง (Irradiation-crosslink) ทำให้เกิดโครงสร้าง การเชื่อมขวางด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide-crosslink) และการเชื่อมขวางด้วยซิลเลน (Silane-crosslink) โดยวิธีเหล่านี้จะถูกใช้ตามความเหมาะสมของสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงดันขนาดต่าง ๆ ในการผลิตสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง ฉนวน XLPE จะต้องมีการออกแบบไม่ให้มีข้อบกพร่องต่าง ๆ เกิดขึ้นบนสายเคเบิล เช่น การเกิดโพรงช่องว่างในเนื้อฉนวนหรือที่พื้นผิวฉนวนและความผิดปกติอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่

ไม่เหมาะสม ในการผลิตฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้าต้องทำให้เป็นสารเนื้อเดียวกัน ทำให้มีขนาดเล็กและมีสิ่งเจือปนให้น้อยที่สุด เพื่อการป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและการเกิดวอเตอร์ทริอิง ในฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้า โดยกระบวนการผลิตสายเคเบิลไฟฟ้าจะกล่าวรายละเอียดในส่วนถัดไป

3.5.4 กำบังฉนวน (Insulation Shield)

กำบังฉนวนทำหน้าที่เหมือนกับกำบังตัวนำ นั่นคือทำให้ส่วนที่ติดกันระหว่างฉนวนและนิวทรัลศูนย์กลางร่วม (Concentric Neutral) หรือกำบังโลหะมีผิวเรียบ ถ้าหากไม่มีกำบังฉนวน เส้นแรงสนามไฟฟ้าจะปรากฏขึ้นรอบนอกของฉนวนสายเคเบิล กำบังฉนวนจะทำให้มีความมั่นใจว่าแรงดันไฟฟ้าภายนอกสายเคเบิลจะมีการต่อลงดิน กำบังฉนวนจะช่วยให้สนามไฟฟ้ารอบ ๆ ฉนวนของสายเคเบิลมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเกิดโคโรนา (Corona) บนผิวของตัวนำไฟฟ้าแบบดีอิเล็กทริกโดยใช้วิธีให้นานระหว่างชั้นนอกและชั้นในติดกันมากที่สุด อีกทั้งยังสามารถป้องกันอันตรายจากการลัดวงจรโดยมีสาเหตุมาจากความร้อนของตัวนำไฟฟ้า ในประเทศสหรัฐอเมริกา กำบังฉนวนและฉนวนจะไม่เกี่ยวข้องกันทางเคมี ในกรณีนี้กำบังฉนวนจะถูกเรียกว่ากำบังลอกได้ (Strippable Shield) กำบังลอกได้จะช่วยอำนวยความสะดวกในการ Cutback สำหรับการขดเกลียวและการเชื่อมต่อของสายเคเบิล

กลุ่มของตัวนำ กำบังตัวนำ ฉนวน และกำบังฉนวนเรียกกันว่าเป็นแกนกลางของสายเคเบิล แกนกลางของสายเคเบิลถูกออกแบบมาเพื่อเก็บสนามไฟฟ้าให้อยู่ภายในฉนวนสายเคเบิลและนำกระแสไฟฟ้าขณะที่มีการกระจายความร้อนที่เกิดจากการใช้งานของตัวนำในสายเคเบิล (Jean Carlos, 2008)

3.5.5 นิวทรัลศูนย์กลางร่วม

นิวทรัลศูนย์กลางร่วม (Concentric Neutral) หรือที่เรียกกันว่ากำบังโลหะ จะวางอยู่เหนือกำบังฉนวนเพื่อให้ส่วนนอกสุดของแกนกลางของสายเคเบิลมีศักย์ลงดิน (Ground Potential) เพื่อให้มีการป้องกันการสัมผัสโดยบังเอิญ และยังสามารถออกแบบเพื่อให้นำกระแสไฟฟ้าผิดปกติ (Fault Currents) กระแสสเตรย์ (Stray Currents) กระแสอัดประจุ (Charging Current) และกระแสไม่สมดุล (Imbalanced Currents) ได้อีกด้วย นิวทรัลศูนย์กลางร่วมสามารถใช้กำบังที่เป็นโลหะแทนได้ จึงทำให้สายเคเบิลมีการป้องกันอย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปนิวทรัลศูนย์กลางร่วมที่เป็นโลหะจะทำมาจากตะกั่ว อะลูมิเนียม หรือทองแดง ที่มีความหลากหลายในการออกแบบ ซึ่งรวมถึงแบบที่เป็นเทปบาง เป็นสายรอบ และเป็นของแข็ง หรือหลอดอัดกระดาศลึง

การกัดกร่อนเป็นปัญหาสำหรับตัวนิวทรัลศูนย์กลางร่วม โดยอาจเกิดขึ้นในที่ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างกำบังโลหะกับสภาพแวดล้อม อัตราแรงของการกัดกร่อนสามารถเกิดขึ้นได้โดยการปรากฏตัวของน้ำและค่า pH ของดินที่เข้ามาเกี่ยวข้อง

นิวทรัลศูนย์กลางร่วมหรือกำบังโลหะต้องมีความต่อเนื่องไปตามความยาวของสายเคเบิลและมีการสัมผัสกันอย่างดีกับกำบังฉนวนเพื่อรับประกันว่าพื้นที่ด้านนอกของแกนสายเคเบิลจะมีศักย์ต่อลงดิน (Ground Potential) การเชื่อมต่อที่ดีระหว่างกำบังฉนวนและนิวทรัลศูนย์กลางร่วมสามารถช่วยกระจายสนามไฟฟ้าได้ (Jean Carlos, 2008)

3.5.6 ปลอกหุ้มด้านนอก (Jacket)

ปลอกหุ้มด้านนอก (Jacket) เป็นการป้องกันที่อาจมีชั้นของฉนวนเข้ามาเพิ่มเติม ปลอกหุ้มด้านนอกเป็นการป้องกันสายเคเบิลในทางกล ทางความร้อน หรือทางเคมี ดังนั้นจึงช่วยลดการกัดกร่อนของกำบังโลหะ เช่นเดียวกับความชื้นที่อาจซึมเข้าไปในสายเคเบิล มันอาจถูกออกแบบมาเพื่อยึดกับกำบังโลหะ สายรอบโลหะหรือเทปโลหะ ทำให้ระดับของการป้องกันเพิ่มมากขึ้น วัสดุปลอกหุ้มด้านนอกโดยทั่วไปประกอบด้วย พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิเอทิลีนคลอไรด์ (PET) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (LLDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และไนลอน

รูปแบบต่างของสายเคเบิลที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แสดงในรูปที่ 3.14 คือสายเคเบิลแบบนิวทรัลศูนย์กลางร่วมที่ไม่มีปลอกหุ้มด้านนอก สายเคเบิลหุ้มด้วยกำบังโลหะ (สายเคเบิล TECK) ส่วนใหญ่ใช้ในการทำเหมืองแร่และอุตสาหกรรม สายเคเบิลหุ้มฉนวนด้วยกำบังเทปทองแดงและสายเคเบิล PILC เรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ (Jean Carlos, 2008)



รูปที่ 3.14 ประเภทของสายเคเบิลแบบต่าง ๆ (Jean Carlos, 2008)

3.6 การผลิตสายเคเบิลชั้นพื้นฐาน

สายเคเบิลแรงสูงที่มีการผลิตขึ้นนั้นมีขั้นตอนและกระบวนการผลิตมากมาย ซึ่งความซับซ้อนของกระบวนการผลิตมักขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งานและชนิดของสายเคเบิลที่ผลิตขึ้น เช่น สายเคเบิลที่ใช้ฝังใต้ดินหรือสายเคเบิลใต้น้ำและสายเคเบิลทนความร้อน เป็นต้น เนื้อหาในบทนี้มุ่งเน้นในส่วนของการผลิตสายเคเบิลที่มีพอลิเอทิลีนเป็นฉนวนเท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันฉนวน XLPE มีความนิยมสูงในการใช้ทำเป็นฉนวนในสายเคเบิล ในกระบวนการผลิตสายเคเบิลฉนวน XLPE แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

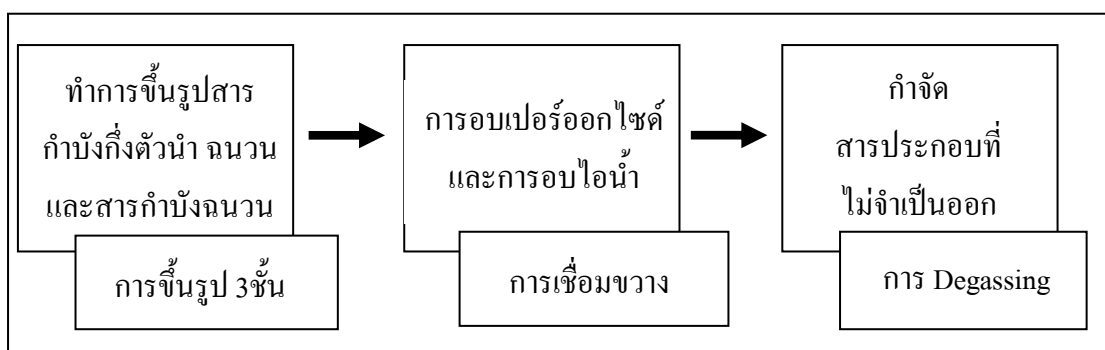
3.6.1 ขั้นตอนการผลิตตัวนำไฟฟ้า

ตัวนำไฟฟ้าก็ถือได้ว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญส่วนหนึ่งของสายเคเบิล ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะกับการใช้งานของสายเคเบิลก็มีส่วนช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความน่าเชื่อถือของสายเคเบิลได้ สายเคเบิลใต้ดินส่วนใหญ่จะใช้ทองแดงเป็นตัวนำ การผลิตตัวนำไฟฟ้าของสายเคเบิลส่วนใหญ่มีวิธีการผลิตอยู่ 2 วิธี วิธีแรกคือ การใช้ตัวนำไฟฟ้าสำเร็จรูปพร้อมใช้จากบริษัททางด้านวัสดุ แล้วจึงนำมาตีเกลียวใช้เป็นตัวนำของสายเคเบิล วิธีที่สอง คือ ทำการหลอมขึ้นรูปโลหะที่จะนำมาใช้ทำเป็นตัวนำไฟฟ้าเองให้ได้ขนาดตัวนำที่ต้องการและจึงนำไปตีเกลียว จากนั้นจึงนำไปหุ้มฉนวนเพื่อทำสายเคเบิล

สำหรับวิธีการผลิตตัวนำไฟฟ้าในวิธีที่สองนั้นสามารถสร้างตัวนำของสายเคเบิลได้โดยกระบวนการบีบอัดหรืออัดรีด เริ่มต้นจากการป้อนแท่งวัสดุเข้าไปในเครื่องรีดเส้น เพื่อบีบอัดแท่งวัสดุให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการบีบอัดแล้ว วัสดุที่ได้จะถูกนำไปอบด้วยไอน้ำ จากนั้นจึงนำวัสดุที่ผ่านกระบวนการรีดและอบด้วยไอน้ำมาทำการตีเกลียวเพื่อขึ้นรูปให้เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยขึ้นรูปให้ได้ขนาดของตัวนำไฟฟ้าตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

3.6.2 ขั้นตอนการผลิตแกนกลาง

แกนกลางของสายเคเบิลส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย ตัวนำไฟฟ้า กำบังตัวนำไฟฟ้า ฉนวนและกำบังฉนวน ในการผลิตสายเคเบิลแรงสูง กระบวนการผลิตแกนกลางของสายเคเบิลจะมีความสำคัญที่สุดและมีผลต่อประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการใช้งาน ซึ่งการผลิตแกนกลางของสายเคเบิลมีกระบวนการผลิตย่อย ๆ อยู่ 3 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.16

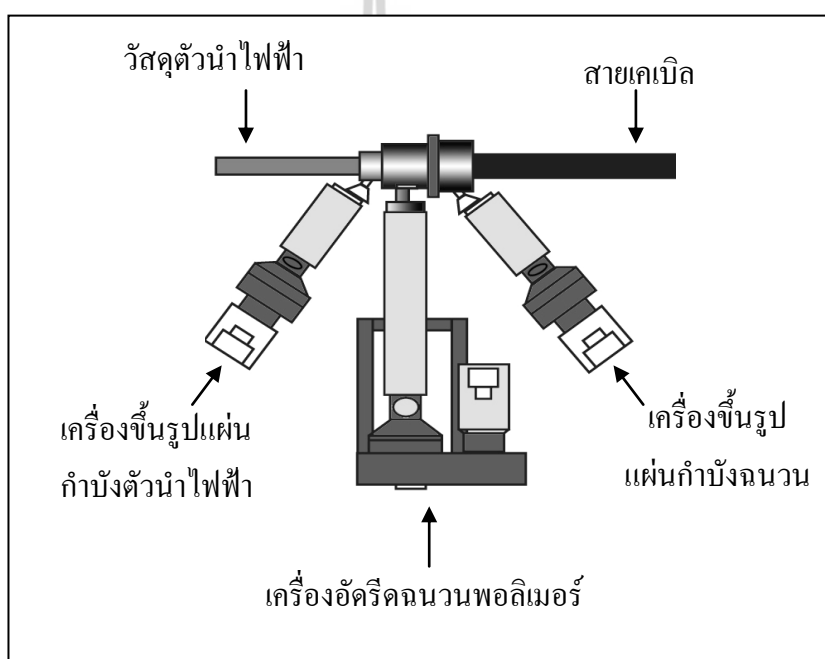


รูปที่ 3.16 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตแกนกลางของสายเคเบิล

1) กระบวนการขึ้นรูปสามชั้น เป็นขั้นตอนแรกของการผลิตสายเคเบิล โดยการหุ้มกำบังสารกึ่งตัวนำให้กับตัวนำไฟฟ้า การหุ้มฉนวนและหุ้มกำบังฉนวน เริ่มต้นจากการนำเม็ดพอลิเมอร์ และสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าเข้าสู่ช่องใส่สารลำเลียง (Hopper) ของเครื่องอัดรีด เม็ดพอลิเมอร์จะถูกลำเลียงมาในช่องใส่สารลำเลียงและถูกทำให้หลอมละลายและบีบอัดด้วยสกรูหมุนวนที่มีความร้อนสูง จนกระทั่งเม็ดพอลิเมอร์ที่ถูกลำเลียงมาหลอมละลายจนหมด แล้วจึงถูกบีบอัดเข้าสู่ปลายกระบอกลอยของเครื่องอัดขึ้นรูป ในระหว่างปลายสุดของหัวสกรูที่ทำการหลอมละลายและส่วนหัวของตัวบีบอัดขึ้นรูปจะมีตัวกรองเพื่อกรองสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนที่มากับวัสดุที่ถูกหลอมละลาย เพื่อให้พอลิเมอร์ที่หลอมละลายมีความสะอาดไม่มีสิ่งเจือปนที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนของสายเคเบิล ในปัจจุบันนั้นกระบวนการขึ้นรูปสามชั้นเพื่อให้ตัวนำไฟฟ้า กำบังตัวนำ ฉนวนและกำบังฉนวนรวมเข้าด้วยกันเป็นแกนกลางของสายเคเบิลมีด้วยกันอยู่ 2 วิธี ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.9 และในรูปที่ 3.17 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปสายเคเบิล

ตารางที่ 3.9 วิธีการขึ้นรูปสามชั้น (อนุชา ระวังภัย, 2553)

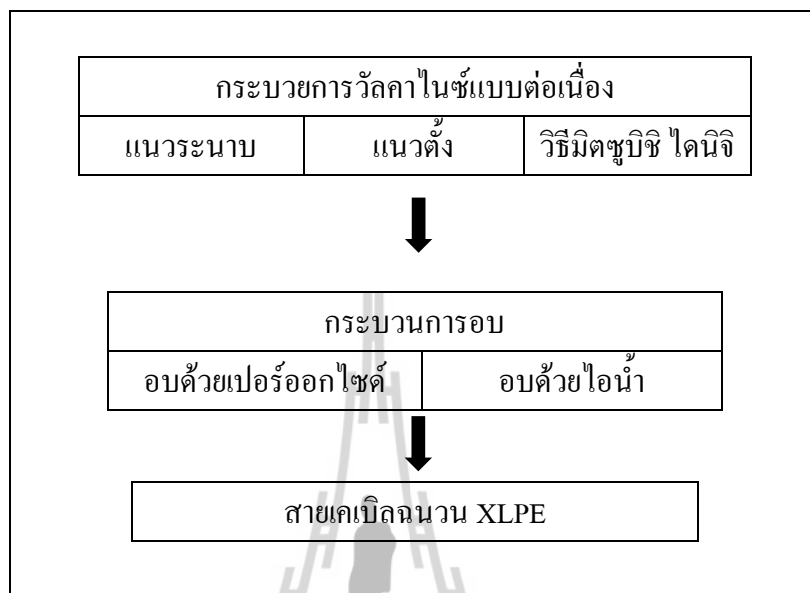
วิธีการ	อธิบาย
วิธีการขึ้นรูปสามชั้น แบบ 1 + 2	ขั้นตอนแรก ทำการขึ้นรูปแผ่นก้ำบังตัวนำไฟฟ้าชั้นในก่อน เพื่อหุ้มตัวนำไฟฟ้า จากนั้นจึงขึ้นรูปฉนวนและก้ำบังฉนวน ชั้นนอกพร้อมกัน โดยขึ้นรูปฉนวนต่อจากสารก้ำบังตัวนำ
วิธีการขึ้นรูปสามชั้นจริง	เป็นการขึ้นรูปทั้ง 3 ชั้นพร้อมกัน โดยเริ่มจากขึ้นรูปแผ่นก้ำบังตัวนำหุ้มกับตัวนำไฟฟ้า จากนั้นจึงหุ้มด้วยฉนวน และสุดท้ายจึงหุ้มฉนวนด้วยก้ำบังฉนวน



รูปที่ 3.17 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปสายเคเบิล (อนุชา ระวังภัย, 2553)

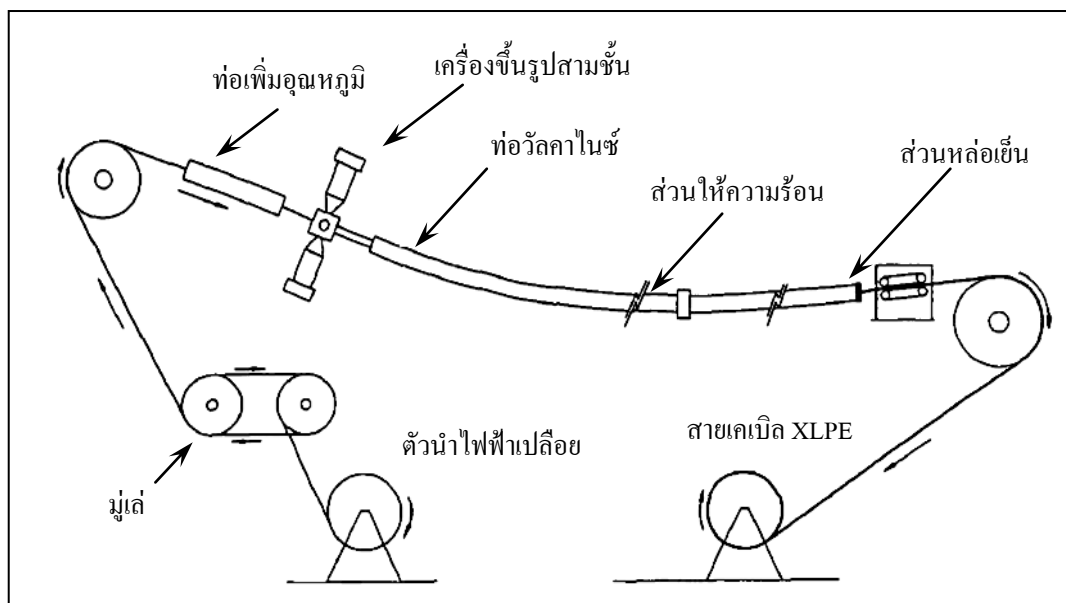
2) กระบวนการเชื่อมขวาง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูปและได้สายเคเบิลที่มีแกนกลาง 3 ชั้น วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้หุ้มตัวนำสายเคเบิลยังคงอยู่ในรูปของเทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นพลาสติกที่ทนความร้อนได้ต่ำ ในขั้นตอนต่อมาจึงเป็นขั้นตอนเปลี่ยนคุณสมบัติของพอลิเมอร์จากเทอร์โมพลาสติกให้เป็นเทอร์โมเซต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฉนวนสายเคเบิลให้ทนความร้อนได้สูงขึ้น โดยใช้กระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) และกระบวนการอบ (Curing) เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ดังนั้นกระบวนการอบจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการ

เปลี่ยนแปลงวัสดุพอลิเมอร์จากเทอร์โมพลาสติกให้เป็นเทอร์โมเซตที่มีประสิทธิภาพในการทนความร้อนสูงมากขึ้น



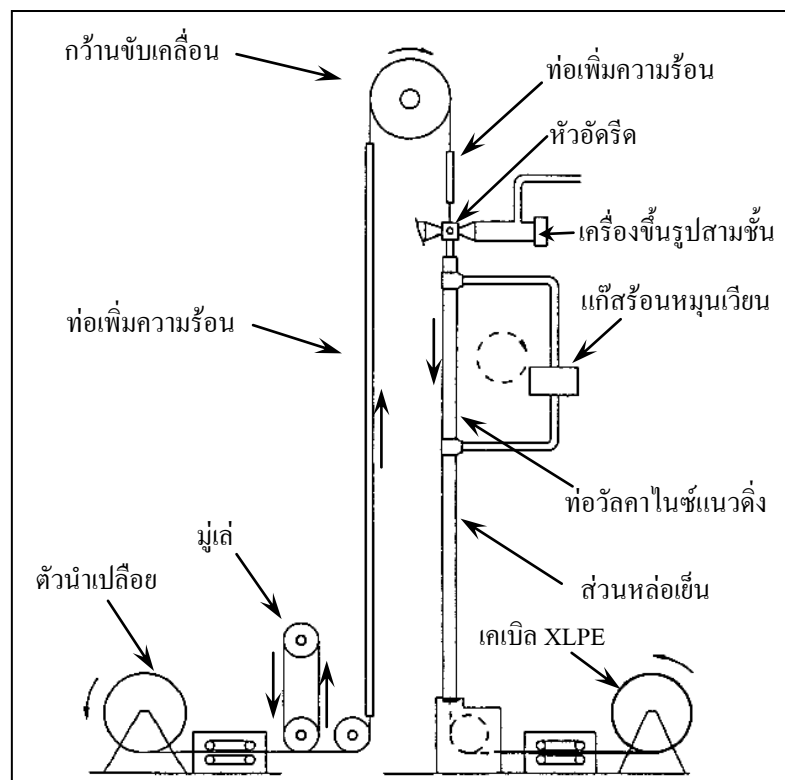
รูปที่ 3.18 เทคนิคการอบและการขึ้นรูปโดยทั่วไปของสายเคเบิล XLPE (อนุชา ระวังภัย, 2553)

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวระนาบ (Catenary Continuous Vulcanization: CCV) เป็นกระบวนการที่นำสายเคเบิลฉนวน PE ที่ยังไม่มี การเชื่อมขวาง จากกระบวนการขึ้นรูป 3 ชั้น ลำเลียงผ่านท่อที่ยึดติดกับส่วนหัวของเครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อเริ่มกระบวนการอบด้วยท่อลำเลียงในแนวระนาบ ในการอบจะมีด้วยกันสองแบบคือ การอบแห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจนความดันสูง และการอบโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 300°C ส่งผ่านท่อลำเลียงสายเคเบิล เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบด้วยความร้อนของสายเคเบิล สายเคเบิลจะถู้นำเข้าสู่กระบวนการหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิจากการอบของกระบวนการเชื่อมขวาง ข้อดีของกระบวนการวัลคาไนซ์แบบต่อเนื่องแนวระนาบคือ สามารถผลิตสายเคเบิลได้ในปริมาณมากและรวดเร็วเนื่องจากระบบต่างๆ ในกระบวนการอยู่ในแนวราบ แต่ไม่สามารถผลิตสายเคเบิลที่มีขนาดพิกัดแรงดันเกิน 150 kV ได้เนื่องจากมีปัญหาการตกท้องช้างของตัวนำในสายเคเบิล รูปที่ 3.19 แสดงแผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ CCV



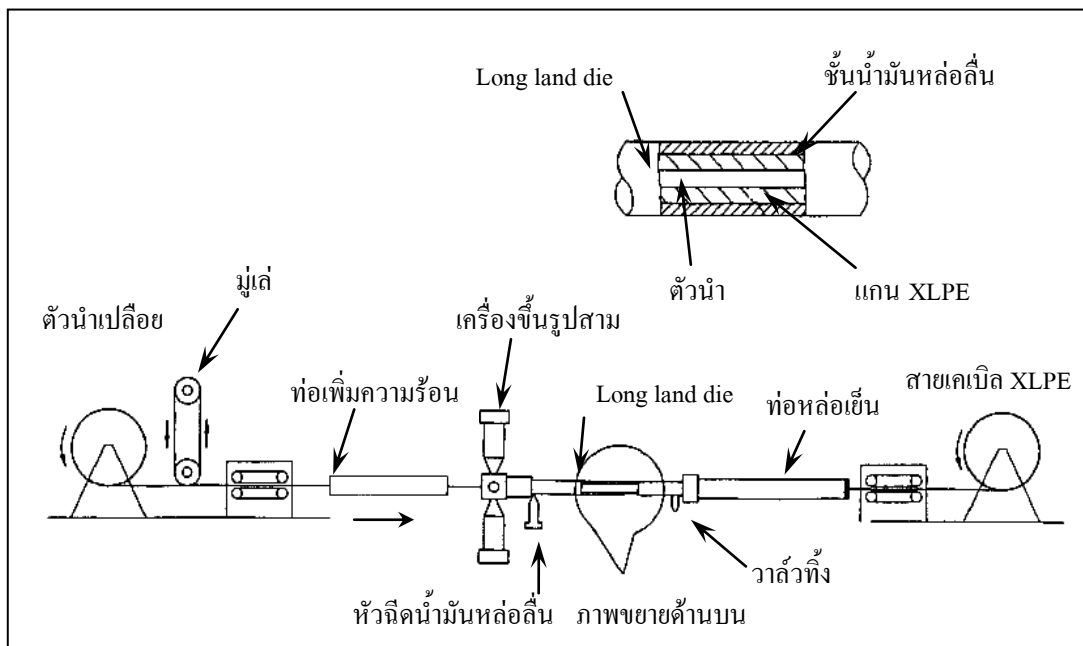
รูปที่ 3.19 ระบบการผลิตของสายเคเบิล โดยระบบ CCV (รัฐเขต เทียมศรี, 2555)

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวดิ่ง (Vertical Continuous Vulcanization : VCV) เป็นกระบวนการอบของสายเคเบิลฉนวน PE โดยมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับกระบวนการ CCV แต่มีความแตกต่างกันที่รูปทรงแบบของท่อลำเลียงที่ใช้ในกระบวนการอบ กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวดิ่ง ไม่มีปัญหาการตกท้องช้างของตัวนำ จึงสามารถผลิตสายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำขนาดใหญ่กว่า 1600 mm^2 หรือความหนาของฉนวนมากกว่า 35 mm และยังสามารถเลือกใช้วัสดุเพื่อมาทำเป็นฉนวนได้มากกว่าระบบวัลคาไนซ์แบบ CCV ระบบวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวดิ่งได้รับความนิยมสำหรับผลิตสายเคเบิลในระบบแรงดันสูงพิเศษ แต่ราคาในการก่อสร้างโรงงานผลิตสายเคเบิลในแนวดิ่งมีราคาแพงกว่าการสร้างโรงงานผลิตสายเคเบิลในแนวระนาบมากเนื่องจากต้องสร้างโรงงานผลิตสายเคเบิลที่มีความสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ VCV (รัฐเขต เทียมศรี, 2555)

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบมิตซูบิชิ-ไดนิจิ (Mitsubishi Dainichi Continuous Vulcanisation : MDCV) เป็นกระบวนการที่มีเครื่องอัดรีดขนาดเล็กและวางอยู่ในแนวระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ทำการอบผ่านท่อลำเลียงสายเคเบิล โดยมีความร้อนอยู่ภายในตัวท่อ จากการอัดรีดของหัวอัดรีด ในการอบมีการให้ความร้อนผ่านท่อลำเลียง ทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการอบโดยการให้ความร้อนด้วยไนโตรเจนหรือไอน้ำ โดยทั่วไประบบนี้ใช้ในการผลิตสายเคเบิลแรงสูง (High Voltage Cables) และสายเคเบิลแรงสูงพิเศษ (Extra High Voltage Cables) ข้อเสียของระบบวัลคาไนซ์ในแนวระนาบแบบมิตซูบิชิ-ไดนิจิ คือ การตกท้องช้างของตัวนำในฉนวนสายเคเบิล ดังนั้นการผลิตสายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัดมากๆ จึงต้องเลือกวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง อย่างไรก็ตาม กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบมิตซูบิชิ-ไดนิจินี้ ไม่สามารถผลิตสายเคเบิลที่มีขนาดใหญ่ ที่พื้นที่หน้าตัดของตัวนำมากกว่า 1600 mm^2 ได้



รูปที่ 3.21 ระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ MDCV (รัฐเขต เทียมศรี, 2555)

3) ขั้นตอน Degassing เป็นขั้นตอนการจัดหรือลดสารประกอบบางชนิดในฉนวน XLPE ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเชื่อมขวาง เช่น อะซีโดฟีโนล เมทิลสไตรีน คัมมิลอัลกอฮอล์ และ มีเทน เป็นต้น สารดังกล่าวอาจส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนของสายเคเบิลได้ และเพื่อทำให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพการทำงานของสายเคเบิล ในอุตสาหกรรมผลิตสายเคเบิลทั่วไปจะจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการในสายเคเบิล โดยการเก็บสายเคเบิลไว้ระยะหนึ่งหรือประมาณ 7 วัน ก่อนนำสายเคเบิลมาทำการทดสอบประจำ (Routine Testing)

3.6.3 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิลเสร็จสมบูรณ์

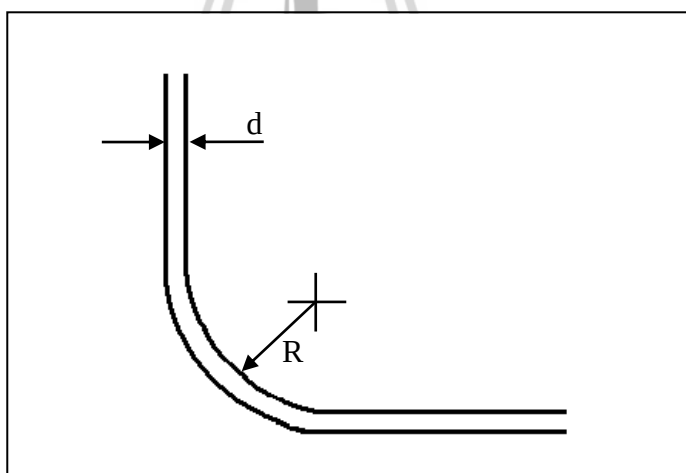
เมื่อสายเคเบิลผ่านขั้นตอน Degassing เพื่อจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการแล้ว สายเคเบิลจะถูกนำมาเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ จากนั้นจึงนำสายเคเบิลไปหุ้มด้วยกำบังโลหะหรือนิวทริลศูนย์กลางร่วมและหุ้มฉนวนชั้นนอกอีกครั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานของสายเคเบิล ในกรณีของสายเคเบิลได้นำสายเคเบิลถูกนำไปเพิ่มเกราะหุ้มป้องกันอีกชั้น เพื่อป้องกันสายเคเบิลจากความชื้นและการกัดกร่อนจากน้ำ

3.6.4 ขั้นตอนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ

เมื่อผ่านทุกกระบวนการการผลิตแล้ว สายเคเบิลถูกทำการตรวจสอบคุณภาพ เพื่อให้มีความมั่นใจว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการออกแบบและผลิตขึ้น ตอบสนองต่อความต้องการของ

ลูกค้าหรือไม่ การตรวจสอบคุณภาพของสายเคเบิลโดยทั่วไปจะทำการตรวจสอบคุณภาพของตัวนำไฟฟ้า ขนาดของสายและฉนวน การเกิดดีสชาร์จบางส่วน โพรงหรือช่องว่างในเนื้อฉนวนสิ่งเจือปนในเนื้อฉนวน และการถลอกหรือโปนออกของเนื้อฉนวน โดยมีการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด ตัวอย่างเช่น IEC ANSI/ICEA JEC และ CENELEC เป็นต้น

การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดินเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสายเคเบิล และยังติดตั้งในเคเบิลเทรย์หรือแร็ค การดึงลากสายย่อมจะก่อให้เกิดความเสียหายมากขึ้น ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายเคเบิลเกิดการเสื่อมสภาพอันเกิดจากแรงดึงหรือแรงกดที่กระทำต่อสายเคเบิลในส่วนที่มีการโค้งงอ ดังนั้นสิ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ คือ รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิล โดยรัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลนี้ยังมีค่ามาก ค่าแรงกดที่กระทำต่อสายเคเบิลยิ่งลดลง ซึ่งจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายเคเบิลให้ดียิ่งขึ้น รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดินมีความสำคัญอย่างยิ่งในการดึงลากสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้กำหนดเป็นค่ามาตรฐานใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้ (หนังสือระบบเคเบิลใต้ดิน, กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ธันวาคม พ.ศ. 2548)

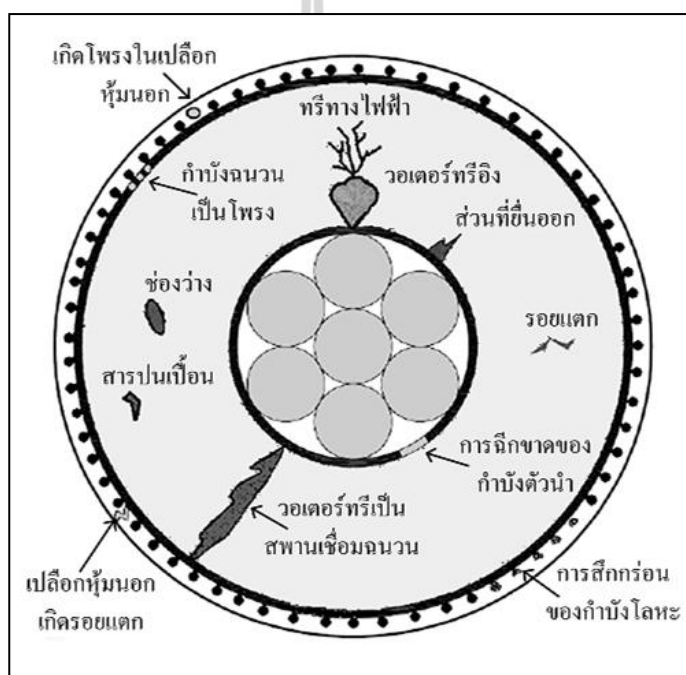


รูปที่ 3.22 การโค้งงอของสายเคเบิลใต้ดิน

- 1) สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงต่ำและคอนโทรลเคเบิล รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดิน (R) อย่างน้อยเท่ากับ $12 d$ โดยที่ d หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (mm)
- 2) สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง รัศมีส่วนโค้งของสายเคเบิลใต้ดิน (R) อย่างน้อยเท่ากับ $15 d$

3.7 การเสื่อมอายุของสายเคเบิลไฟฟ้า

สายเคเบิลไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานาน คุณสมบัติของฉนวนก็จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากความเครียดทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางกล และจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ความบกพร่องในสายเคเบิลกับฉนวนพอลิเมอร์ที่สามารถนำไปสู่ความล้มเหลวของสายเคเบิลสามารถอธิบายดังแสดงในรูปที่ 3.23 ข้อบกพร่องเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ส่วนที่ยื่นออกมา (Protrusions) เกิดช่องว่าง (Voids) รอยแตก (Cracks) การหลุดลอก (Elaminations) การฉีกขาดของกำบังตัวนำ (Conductor Shield Interruptions) การเกิดวอเตอร์ทรีอิง (Water Treeing) และ ทรีอิงทางไฟฟ้า (Electrical Treeing) เป็นต้น (Hartlen et al., 2006)



รูปที่ 3.23 ข้อบกพร่องทั่วไปที่อาจพบในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์เมื่อมีการเสื่อมสภาพ
(ดัดแปลงมาจาก Hartlen et al., 2006)

กลไกการเสื่อมอายุสำหรับระบบสายเคเบิลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิล อุปกรณ์ประกอบและสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงส่งผลให้แต่ละระบบสายเคเบิลจึงมีอายุการใช้งานที่แตกต่างกันไป กลไกการเสื่อมอายุหรือการเสื่อมสภาพ และการเบรกดาวน์จะอยู่ในลักษณะที่เป็นเหตุการณ์เชิงสถิติ ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญในการแก้ไขกลไกต่าง ๆ เหล่านี้คือการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลและอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทำงาน

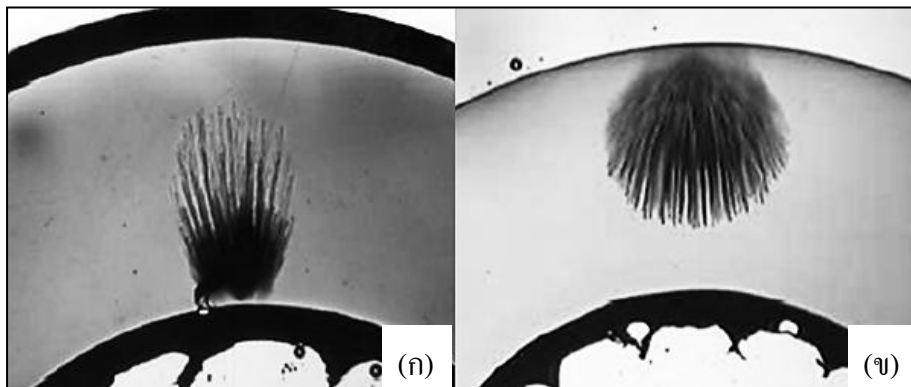
3.7.1 การเสื่อมสภาพทางเคมีและทางกายภาพ

นอกเหนือจากการเสื่อมสภาพที่เกิดจากผลของสนามไฟฟ้าภายในฉนวนสายเคเบิลแล้ว การเสื่อมสภาพทางเคมีและทางกายภาพก็มีบทบาทที่สำคัญในอายุการใช้งานโดยรวมของระบบสายเคเบิลด้วยเช่นเดียวกัน การเสื่อมสภาพทางเคมีและทางกายภาพมีความสำคัญเนื่องจากมันอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้าหรือการเบรกดาวน์ของสายเคเบิล การเสื่อมสภาพทางกายภาพมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนเมื่อเวลาผ่านไป ตัวอย่างการเสื่อมสภาพทางกายภาพได้แก่การแพร่กระจายของสารเติมแต่งหรือการดูดซึมของตัวทำละลายจากที่อื่นทำให้สายเคเบิลเกิดการบวม

การเสื่อมสภาพทางเคมีเกิดจากผลของอนุมูลอิสระที่อยู่ภายในฉนวนพอลิเมอร์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นผลของปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลหรือเกิดการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ในกรณีของฉนวน XLPE การขาดของสายโซ่โมเลกุลเป็นปรากฏการณ์แบบสุ่มที่มีการถ่ายโอนอนุมูลอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุล การเสื่อมสภาพสามารถเริ่มโดย ความร้อน การออกซิเดชัน รังสี หรือปัจจัยทางกล ในปัจจัยเหล่านี้การเสื่อมสภาพทางเคมีที่เกิดจากการออกซิเดชันเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากของการเสื่อมสภาพทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเกิดออกซิเดชันจากความร้อน การออกซิเดชันสามารถเพิ่มความเครียดไฟฟ้าและลดค่าความคงทนการเบรกดาวน์ของฉนวนสายเคเบิล การเสื่อมอายุในแบบนี้สามารถป้องกันได้โดยการเลือกลักษณะของวัสดุฉนวนที่เหมาะสมหรือ โดยการใช้สารต้านอนุมูลอิสระ (Dissado et al., 1992)

3.7.2 การเสื่อมสภาพเนื่องจากวอเตอร์ทรีอิง

การเสื่อมสภาพส่วนใหญ่ที่อาจเกิดขึ้นภายในฉนวนพอลิเมอร์ของสายเคเบิลไฟฟ้าเมื่อมีการสัมผัสกับความเครียดทางไฟฟ้าและความชื้น เป็นที่รู้จักกันคือการเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง สาเหตุที่เรียกว่าวอเตอร์ทรีอิงเนื่องจากการกระจายของรูปร่างความผิดพร่องที่ปรากฏขึ้นในเนื้อฉนวนคล้ายรูปทรงของต้นไม้หรือพุ่มไม้ขนาดเล็กที่เป็นผลมาจากความชื้น วอเตอร์ทรีอิงจะปรากฏอยู่ในฉนวนที่มีความบกพร่องและเติบโตไปในทิศทางของสนามไฟฟ้า การปรากฏตัวของวอเตอร์ทรีอิงภายในฉนวนทำให้ค่าความคงทนการเบรกดาวน์ทางไฟฟ้าของฉนวนสายเคเบิลลดลง อย่างไรก็ตามวอเตอร์ทรีอิงจะหายไปเมื่อความชื้นลดลง ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับทรีอิงทางไฟฟ้าที่มีช่องโพรงคงเหลือ รูปที่ 3.24 (ก) แสดงวอเตอร์ทรีอิงที่มีการเติบโตขึ้นจากกำบังตัวนำไปยังกำบังฉนวน และ (ข) จากกำบังฉนวนไปยังกำบังตัวนำ(Dissado et al., 1992)



รูปที่ 3.24 วอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE

(ที่มา http://www.ee.washington.edu/research/seal/projects/seal_robot/sensors.html)

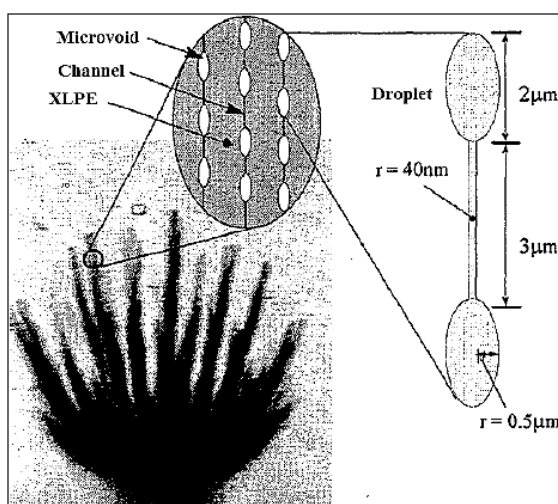
วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในฉนวนสายเคเบิลมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันไปตามบริเวณหรือจุดที่มีการเริ่มเกิดวอเตอร์ทรีอิงที่มีความยาวมากสามารถเชื่อมระหว่างก้างฉนวนไปยังตัวนำได้และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ของสายเคเบิลในที่สุด วอเตอร์ทรีอิงสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ (Bow-tie Water Treeing) และวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป (Vented Water Treeing) ดังนี้

1) วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ มีการเจริญเติบโตจากตำแหน่งเฉพาะที่อยู่ภายในเนื้อของฉนวน ตำแหน่งนี้โดยปกติเป็นช่องว่างที่มีการปนเปื้อนสารที่ละลายน้ำได้ หรือชนิดอื่น ๆ ที่มีข้อบกพร่อง โดยทั่วไปวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์นี้อาจขยายตัวขึ้นถึงหลายร้อยไมครอนและมีรูปทรงที่สมมาตรมีลักษณะเหมือนการผูกโบว์จึงเป็นที่มาของชื่อนี้ โดยส่วนใหญ่ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้ฉนวนเกิดความล้มเหลว

2) วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป วอเตอร์ทรีอิงประเภทนี้เริ่มต้นจากจุดเชื่อมต่อระหว่างก้างสารกึ่งตัวนำและฉนวนหรือบริเวณที่เกิดความบกพร่องของก้างสารกึ่งตัวนำ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปถือว่าเป็นสาเหตุหลักของความล้มเหลวในสายเคเบิลที่เกิดจากความชื้น ถึงแม้ว่าวอเตอร์ทรีอิงเริ่มต้นจากก้างฉนวน แต่อาจถูกจำกัดให้อยู่เพียงส่วนเล็ก ๆ ของความยาวสายเคเบิลทั้งหมด อย่างไรก็ตาม มันสามารถขยายขนาดได้เรื่อย ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการใช้งานและการออกแบบสายเคเบิล โดยทั่วไปวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะหยุดการขยายตัวหลังจากที่เริ่มขยายอย่างรวดเร็ว ในขณะที่วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปสามารถขยายตัวต่อไปเรื่อย ๆ (Dissado et al., 1992)

3.7.3 แบบจำลองของวอเตอร์ทรีอิง

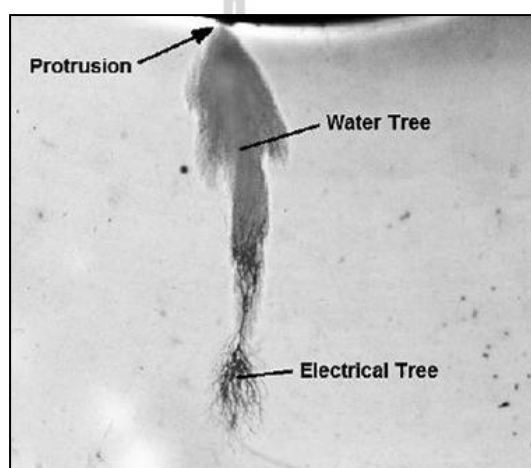
ในปัจจุบันนั้นยังไม่มีแบบจำลองที่ถูกต้องที่สุดสำหรับอธิบายปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง แต่โดยทั่วไปการเริ่มต้นของวอเตอร์ทรีอิง เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเกิดความเครียดทางกลที่สูงและการก่อตัวของรอยแตกขนาดเล็กรอบ ๆ บริเวณที่มีความชื้นหรือหยดน้ำภายในฉนวน วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในฉนวนส่วนมากเกิดจากหยดน้ำที่มีการสร้างสายคล้ายสร้อยไข่มุกที่เชื่อมต่อกันด้วยช่องทางแคบ ๆ ของฉนวนที่อ่อนแอ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 (Hvidsten, 1997)



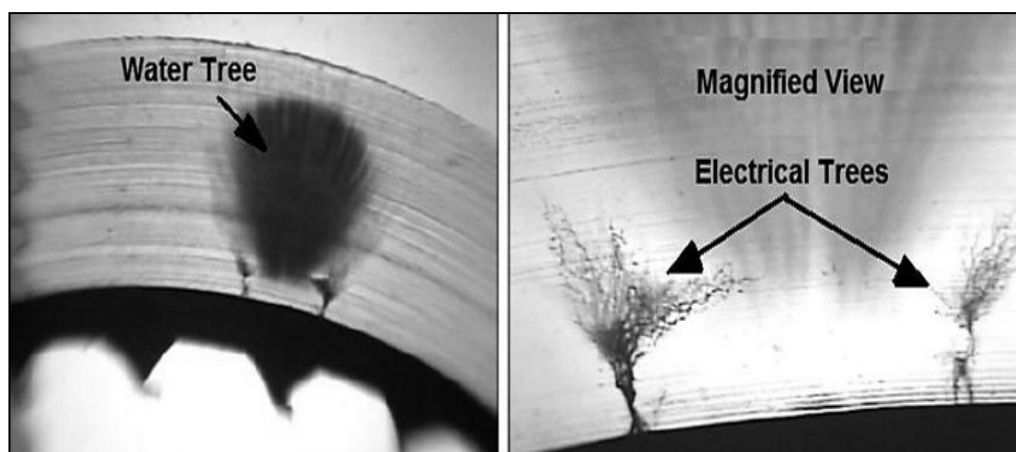
รูปที่ 3.25 รูปแบบโครงสร้างของวอเตอร์ทรีอิงที่แสดงให้เห็นช่องว่างขนาดเล็กรูปทรงรี ที่สร้างสายคล้ายสร้อยไข่มุกที่เชื่อมต่อกันด้วยช่องทางเล็ก ๆ (Hvidsten, 1997)

โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าการเสื่อมสภาพของฉนวนสายเคเบิลเนื่องจากวอเตอร์ทรีอิงมีสามขั้นตอนหลักคือ การเริ่มต้นของวอเตอร์ทรีอิง การขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง และสุดท้ายคือกระบวนการเบรกดาวน แม้ว่าการเริ่มต้นและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงได้รับการศึกษาอย่างละเอียด แต่บางส่วนของกลไกทางกายภาพที่แท้จริงก็ยังคงไม่มีการศึกษามากนัก Dissado et al. แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการเกิดวอเตอร์ทรีอิงและหลังจากนั้นก็จะเริ่มช้าลง โดยการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า (Electrical Tree) โดยทำการทดสอบ 1000 ครั้ง พบว่าเร็วกว่าอัตราการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง นอกจากนี้ Dissado et al. ได้แบ่งกระบวนการเสื่อมสภาพเนื่องจากวอเตอร์ทรีอิงออกเป็นก่อนและหลังการปรากฏตัวของความเครียดทางไฟฟ้าในฉนวน เมื่อทรีอิงทางไฟฟ้าได้มีการเริ่มขยายตัวจากวอเตอร์ทรีอิง การเบรกดาวนก็จะตามมาภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง

ขั้นตอนการเบรกควานเริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนแปลงจากวอเตอร์ทรีอิงไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้า โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นที่ปลายสุดของวอเตอร์ทรีอิง เนื่องจากบริเวณเฉพาะนี้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.26 นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยพบว่า การเจริญเติบโตของทรีอิงทางไฟฟ้าไม่ได้มาจากแค่ที่ปลายของวอเตอร์ทรีอิง แต่อาจออกมาจากฐานของวอเตอร์ทรีอิง ดังแสดงในรูปที่ 3.27 กรณีนี้ถือว่าเป็นเรื่องที่ผิดปกติเนื่องจากทรีอิงทางไฟฟ้ามักเกิดขึ้นที่ปลายสุดของวอเตอร์ทรีอิง แต่ก็ไม่สามารถไปขึ้นกับปริมาณของวอเตอร์ทรีอิงและความเครียดไฟฟ้า ในท้ายที่สุดทรีอิงทางไฟฟ้าจะแพร่กระจายผ่านฉนวนและเป็นสะพานเชื่อมขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการเบรกควานของฉนวนตามมาในที่สุด (Hartlen et al., 2007)



รูปที่ 3.26 ทรีอิงทางไฟฟ้าที่เติบโตจากปลายของวอเตอร์ทรีอิง (Hartlen et al., 2007)



รูปที่ 3.27 ทรีอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากฐานของวอเตอร์ทรีอิง (Mashikian, 2006)

การเปลี่ยนแปลงของวอเตอร์ทรีอิงไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ประกอบด้วยขนาดแรงดัน แรงดันในสภาวะชั่วคราว การออกแบบของสายเคเบิล และการออกซิเดชัน ภายในฉนวน Bulinski et al. พบว่าการเปลี่ยนแปลงจากวอเตอร์ทรีอิงไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานมานาน วอเตอร์ทรีอิงประกอบด้วยเส้นทางขนาดเล็กและช่องว่างขนาดเล็กพร้อมให้น้ำซึมเข้าเนื่องจากสนามไฟฟ้า เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าและความชื้นจากน้ำ วอเตอร์ทรีอิงก็ดูเหมือนว่าเลือนหายไป หลังจากมีการปรากฏตัวของน้ำและความเครียดไฟฟ้าอีกครั้งวอเตอร์ทรีอิงก็งอกขึ้นมาใหม่ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายคนพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวอเตอร์ทรีอิงไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้า ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทรีอิงทางไฟฟ้าก็มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นภายในฉนวนที่เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Nunes et al., 1980)

3.7.4 การเสื่อมสภาพเนื่องจากทรีอิงทางไฟฟ้า

การเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าเป็นกลไกการเสื่อมสภาพที่สังเกตเห็นในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงฉนวนพอลิเมอร์ ทรีอิงทางไฟฟ้าเป็นโครงสร้างเครือข่ายที่เกิดขึ้นจากการมีช่องทางที่ดีที่เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วผ่านฉนวนและในที่สุดก็ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ผ่านฉนวนผนังของช่องทางโดยปกติมีการคาร์บอนไนซ์เพียงบางส่วน รูปที่ 3.28 แสดงให้เห็นทรีอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากปลายเข็ม (Hartlen et al., 2007)



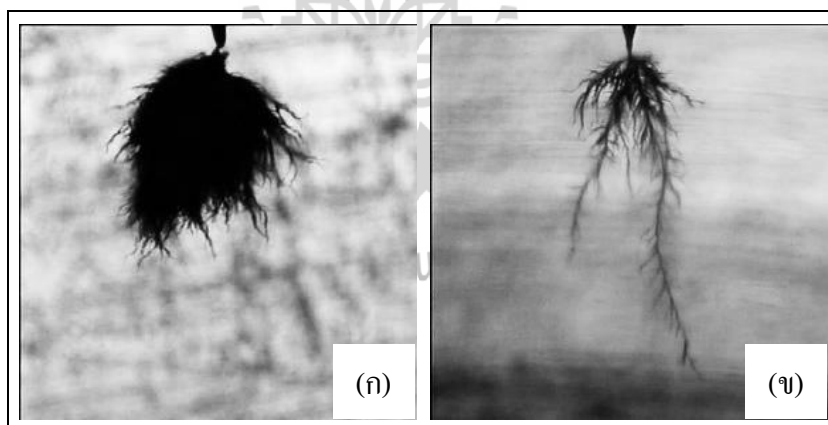
รูปที่ 3.28 ทรีอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากปลายเข็ม

(ที่มา: <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/images/Electrical%20Tree.jpg>)

ทรีอิงทางไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (Bush Treeing) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (Branch Treeing) และทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นภายในฉนวน

1) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (Bush Treeing) ดังแสดงในรูป 3.29 (ก) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มจะเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์และมีเวลาในการเกิดและขยายตัวช้า มักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็สามารถพัฒนาไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบฉนวนในสายเคเบิลได้

2) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (Branch Treeing) ดังแสดงในรูป 3.29 (ข) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์จะใช้เวลาในการเกิดและขยายตัวอย่างรวดเร็ว มักเกิดในบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูง หรืออาจจะมี ความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางกลมาเกี่ยวข้องด้วย ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งเป็นอันตรายอย่างมากต่อระบบฉนวนในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะขยายตัวต่อไปจนกระทั่งเจาะทะลุชั้นความหนาของฉนวน ทำให้ฉนวนหมดสภาพความเป็นฉนวนและเกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในที่สุด (รัฐเขต เทียมศรี, 2555)

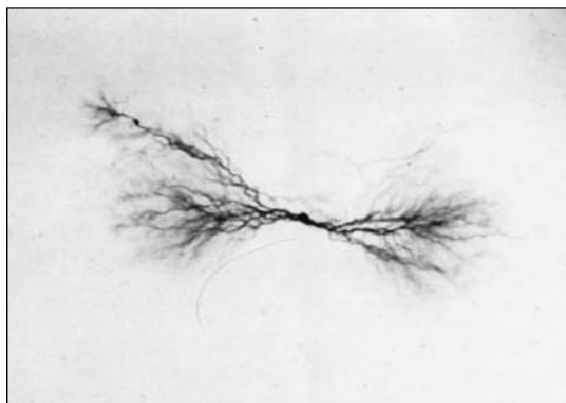


รูปที่ 3.29 รูปแบบทรีอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

(ก) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (ข) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง

(ที่มา: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5492239>)

3) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ มีการเติบโตจากตำแหน่งเฉพาะที่อยู่ภายในเนื้อของฉนวนคล้ายกับวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ ในตำแหน่งนี้มักมีการปนเปื้อนของสารที่นำไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ในสายเคเบิลฉนวน XLPE (ที่มา: <http://www.electricyouniverse.com/eye/thumbs/lrg-787-bow-tie-trees-electrical-treeing-discharge.jpg>)

ทริอิงทางไฟฟ้ามักเริ่มต้นจากข้อบกพร่องเช่นสารปนเปื้อนที่นำไฟฟ้าหรือปลายเข็ม เป็นข้อบกพร่องที่สามารถทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าภายในฉนวนสายเคเบิลเพิ่มขึ้นถึงหลายร้อย kV/mm นอกจากนี้ ทริอิงทางไฟฟ้ายังสามารถเริ่มต้นจากการกัดกร่อนของพื้นผิวในช่องว่างของวอลเทอร์ทริอิงหรือการเพิ่มประสิทธิภาพความเครียดอื่น ๆ โดย ไม่มีช่องว่าง เพื่อลดการเริ่มก่อตัวของทริอิงทางไฟฟ้า ต้องทำให้ส่วนที่เชื่อมต่อกับเปลือกหุ้มฉนวนมีผิวเรียบและวัสดุฉนวนที่มีความสะอาด การเจริญเติบโตของทริอิงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดัน ความถี่แรงดัน ผิวของตัวนำไฟฟ้าและวัสดุฉนวน (Dissado et al., 1992)

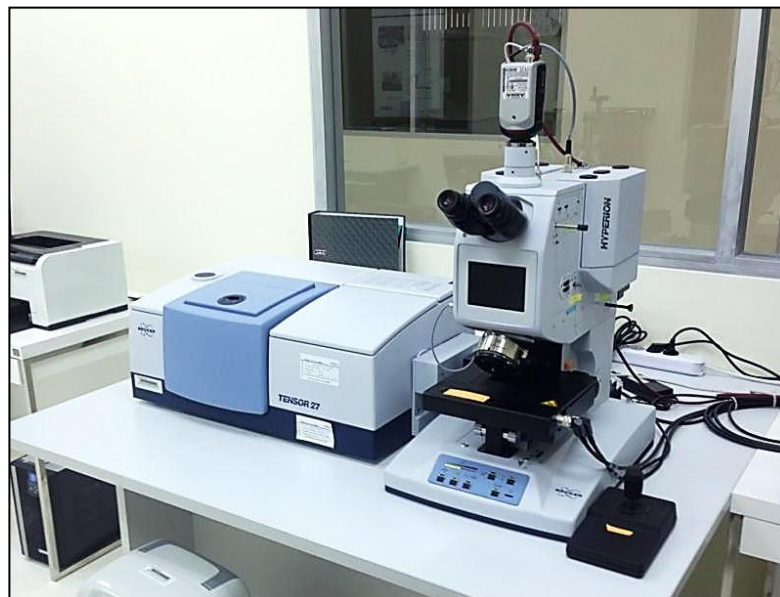
3.8 เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transforms Infrared Spectroscopy: FTIR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

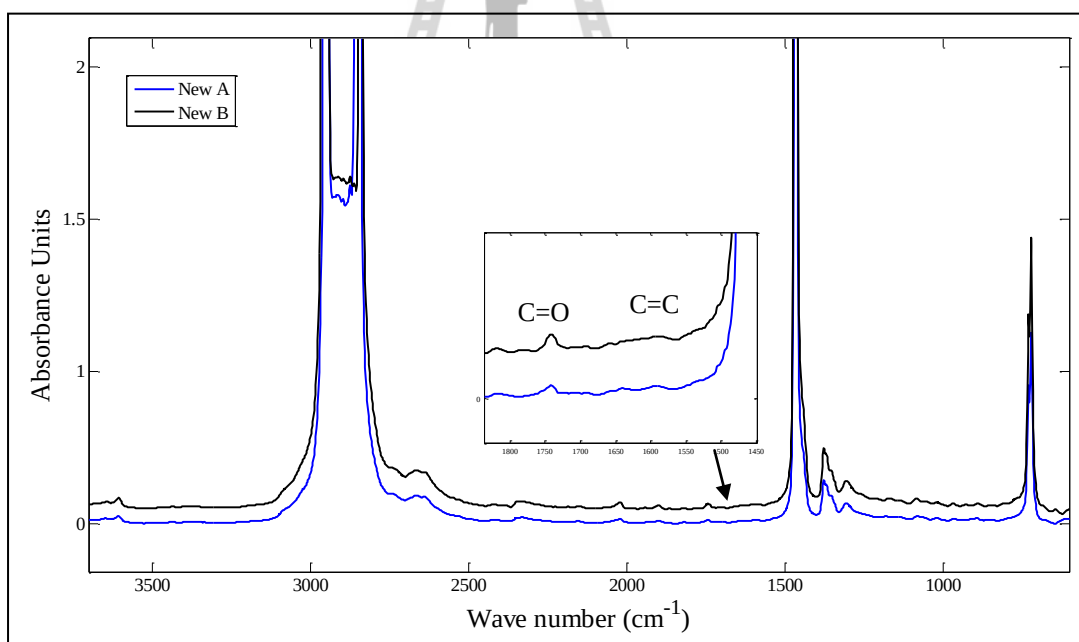
1. Near Infrared ($12800-4000 \text{ cm}^{-1}$)
2. Middle Infrared ($4000-200 \text{ cm}^{-1}$)
3. Far Infrared ($200-10 \text{ cm}^{-1}$)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE หลังการจากทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่ง จะใช้เครื่อง FTIR ทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างด้วยพลังงานช่วงแสงอินฟราเรดย่านกลาง (Middle Infrared) โดยใช้วิธีส่องผ่านทะลุตัวสารเนื่องจากสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์คือฉนวน XLPE แสงอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านตัวฉนวนได้และสามารถมองเห็นจุดที่ต้องการตรวจสอบและเลือกจุดที่ต้องการตรวจสอบได้ ซึ่งให้ความถูกต้องแม่นยำกว่าการส่องแบบสะท้อน รูปที่ 3.31 แสดงเครื่องวิเคราะห์ FTIR ของบริษัท BRUKER รุ่น TENSOR 27 ในการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการเปิดเครื่องและเปิดใช้งานซอฟต์แวร์ จากนั้นโปรแกรมจะให้ทำการตั้งค่าต่าง ๆ เช่น การตั้งค่าการแสดงผลให้เป็นแบบ Absorbance การตั้งค่าช่วงของสเปกตรัมอินฟราเรดที่ต้องการวัดโดยใช้ช่วงอินฟราเรดขนาดกลางช่วงคลื่น $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ การตั้งค่า resolution ให้ปรับเป็น 4 cm^{-1} การตั้งค่า scan time หรือจำนวนครั้งที่ต้องการวัด 32 ครั้งต่อจุด จากนั้นจึงทำการวัด ซึ่งช่วงคลื่นที่บ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE แสดงในตารางที่ 3.10 ในช่วงคลื่นตัวเลข $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ และ $1750\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$ โดยช่วงคลื่นที่ $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพันธะ $\text{C}=\text{C}$ แสดงว่าเกิดการเผาไหม้ของเนื้อฉนวน XLPE ขึ้น และช่วงคลื่น $1750\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$ จะแสดงการเกิดออกซิเดชันในเนื้อฉนวนปรากฏพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ในรูปที่ 3.32 แสดงตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ



รูปที่ 3.31 เครื่องวิเคราะห์ FTIR ของบริษัท BRUKER รุ่น TENSOR 27

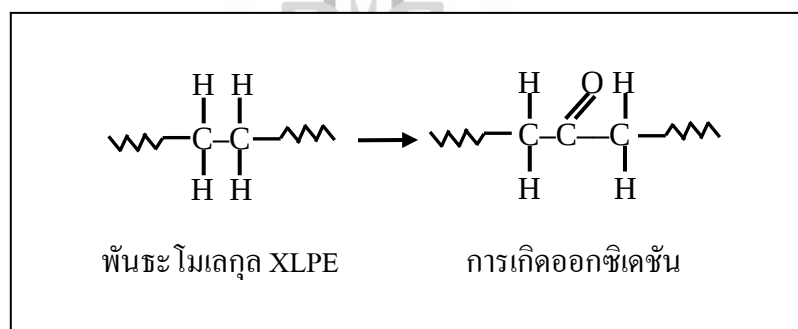


รูปที่ 3.32 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวน XLPE ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ
(New A = ไม่ข้อมลื, New B = ข้อมลื)

ตารางที่ 3.10 ช่วงคลื่นอินฟราเรดของฉนวน XLPE ที่นำมาวิเคราะห์

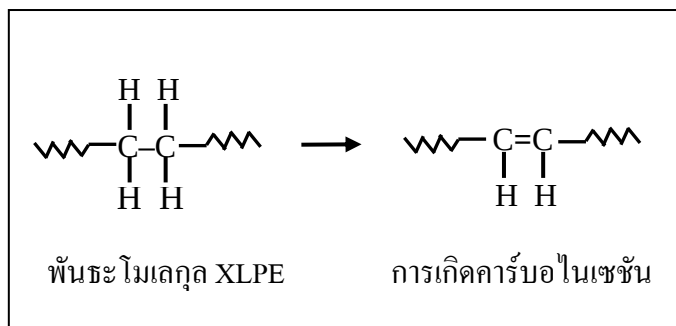
หมู่ธาตุ	ช่วงคลื่น	รายละเอียด
C = C	1600 – 1650 cm^{-1}	แสดงถึงการเกิดคาร์บอนในเซชันหรือเกิดการเผาไหม้ของเนื้อฉนวน XLPE
C = O	1750 – 1780 cm^{-1}	แสดงถึงการเกิดออกซิเดชันในฉนวน XLPE

การเกิดออกซิเดชัน คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้สารรับอะตอมออกซิเจนมารวมตัวเข้าด้วยกัน หรือทำให้สารสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนไป และปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้อะตอมของธาตุสูญเสียอิเล็กตรอนไป การเกิดออกซิเดชันบนฉนวน XLPE เกิดจากแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิความร้อนเป็นระยะเวลานานบนฉนวน XLPE ทำให้พันธะโมเลกุลของฉนวน XLPE เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและออกซิเจน แสดงในรูปที่ 3.33 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีประสิทธิภาพความเป็นฉนวนลดลง



รูปที่ 3.33 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดออกซิเดชัน

การเกิดคาร์บอนในเซชัน คือ กระบวนการเปลี่ยนสภาพจากวัตถุต่าง ๆ ให้เป็นธาตุคาร์บอน การเกิดคาร์บอนในเซชันบนฉนวน XLPE มีสาเหตุมาจากการเสื่อมอายุที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยแรงดันไฟฟ้าและความร้อนเป็นระยะเวลานานเช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชันซึ่งกระบวนการนี้ทำให้พันธะเปลี่ยนสภาพเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนแสดงในรูปที่ 3.34 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีประสิทธิภาพในความเป็นฉนวนลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.34 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดคาร์บอนเซชัน

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ถ้าหากฉนวน XLPE ที่มีการตรวจสอบนั้นมีพันธะ C=C และ C=O เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดการคาร์บอนเซชันและการออกซิเดชันขึ้นเหนือฉนวน XLPE การเพิ่มขึ้นของพันธะทั้งสองนี้จะแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนสายเคเบิล หากพันธะทั้งสองปรากฏมากฉนวนสายเคเบิลก็มีการเสื่อมอายุมากด้วยเช่นกัน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ระหว่างฉนวน XLPE บริเวณที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงและฉนวน XLPE ใหม่

3.9 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้อธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบและการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE อาทิเช่น วัสดุพอลิเมอร์ ประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นฉนวนสายเคเบิล คุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนพอลิเมอร์ที่นำมาทำสายเคเบิลไฟฟ้า ประสิทธิภาพของสายเคเบิลแรงสูง โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล ประเภทของตัวนำไฟฟ้า คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้า การผลิตสายเคเบิล การเสื่อมอายุของสายเคเบิล การเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิง และการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)

ในการศึกษาวิจัยลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE จำเป็นต้องออกแบบและสร้างชุดศึกษาวิจัยการเกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้น เพื่อทำการสร้างชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ซึ่งผู้ทำวิจัยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

บทที่ 4

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

4.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาวิจัยการเกิดวอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ฉนวน XLPE การกำหนดระยะห่างระหว่างอเล็กโทรดและระดับแรงดันที่จ่ายให้กับอเล็กโทรด ต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน XLPE ให้อยู่ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน XLPE และค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน (Dielectric Strength of Material) ซึ่งระยะห่างระหว่างอเล็กโทรดทั้งสองขั้ว และระดับแรงดันที่จ่ายให้กับอเล็กโทรดมีความสัมพันธ์กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนกันและจำลองการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแรงดันที่จ่ายให้กับอเล็กโทรดรวมไปถึงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

4.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

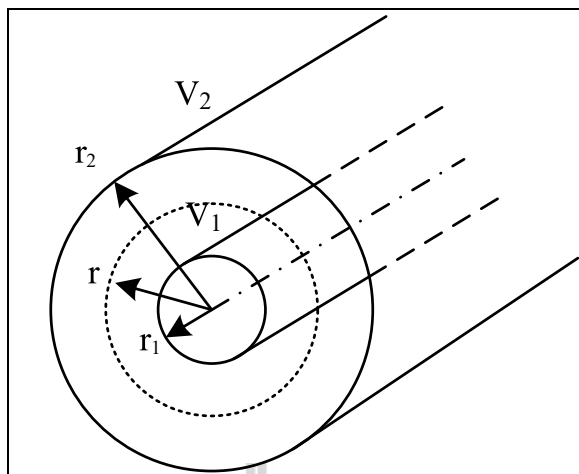
ความเครียดของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบจำหน่าย 22 kV สามารถหาได้ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่แนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือ พื้นผิวศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นโดยอาศัยการอินทิเกรตสมการแมกซ์เวลล์ดังสมการที่ (4.1) (วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ดร.สำราญ สังข์สะอาด, 2549)

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

โดยที่

Q = ค่าประจุไฟฟ้า

$\vec{D}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า ณ พื้นที่ $d\vec{A}$



รูปที่ 4.1 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

สำหรับทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีความยาว ℓ รัศมี $r(r_1 \leq r \leq r_2)$ และ $E = D/\epsilon$ หาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

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

และแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกซ้อนทั้งสอง คือ

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

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

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ $r_1 \leq r \leq r_2$

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.5)$$

จะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อนนั้นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.6)$$

โดย U คือ แรงดันค่ายอด kV_{peak}

r_1 คือ รัศมีของตัวนำไฟฟ้า

r_2 คือ ความหนาของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า

สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใช้ในการวิจัยการเกิดวอเตอร์ทรีอิงเป็นสายเคเบิลแรงสูงสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีความหนาของฉนวนเท่ากับ 5.5 mm ตัวนำเป็นทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 mm ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดสามารถหาได้ดังนี้

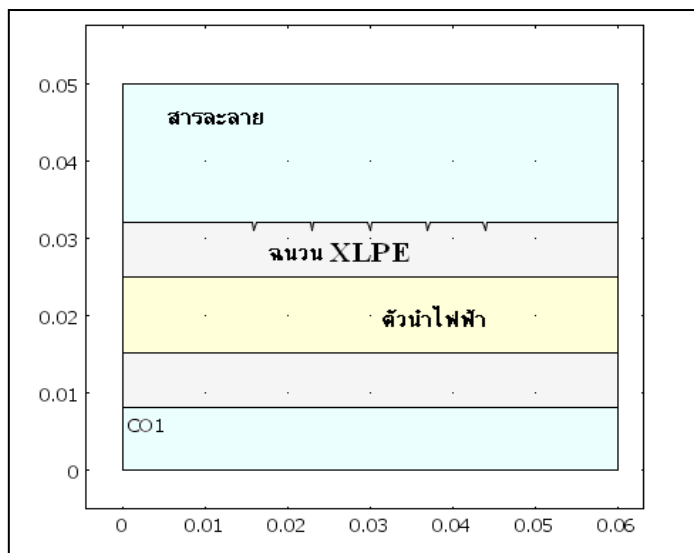
จากสมการที่ (4.6) ทำการแทนค่าแรงดันไฟฟ้าของสายเคเบิล(แรงดันเฟส) รัศมีของตัวนำไฟฟ้า และความหนาของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า จะได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลขณะทำงานในสภาวะปกติ $E_{\max} = 3.56 \text{ kV/mm}$

4.3 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยวอเตอร์ทรีอิง

เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุและเกิดความเสียหายของสายเคเบิลแรงสูง ผู้วิจัยจึงนำเสนอการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL เพื่อจำลองสนามไฟฟ้าก่อนการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และจำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE เพื่อที่จะช่วยในการอธิบายการเกิดและขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงให้เข้าใจง่ายมากยิ่งขึ้น

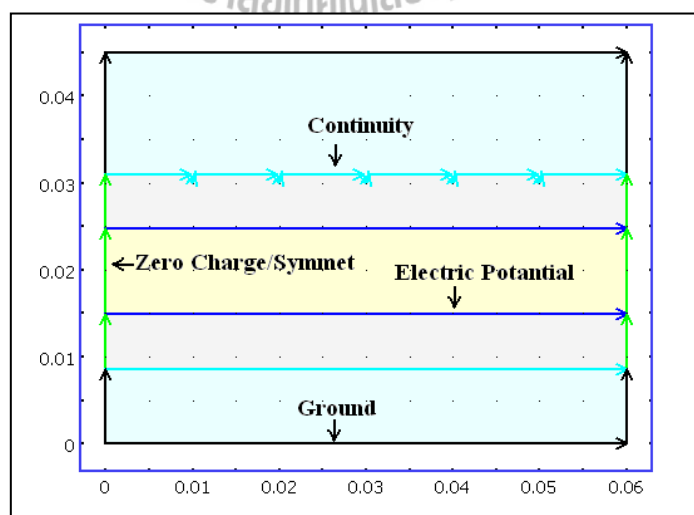
4.3.1 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูง ระบบ 22 kV

การจำลองการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูง ระบบ 22 kV อันดับแรก วาดรูปแบบจำลองการทดสอบสายเคเบิล โดยให้สายเคเบิลถูกเชื่อมต่อในสารละลาย เพื่อให้ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น จึงต้องกำหนดขนาดของสายเคเบิลและรูที่เจาะให้ใกล้เคียงกับขนาดจริงมากที่สุดและกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ 2.3 (อ้างอิงจากตารางที่ 3.4) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

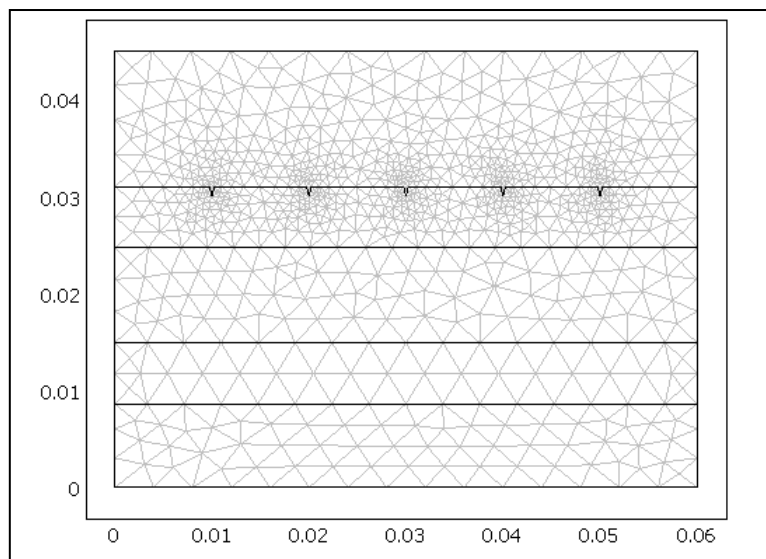


รูปที่ 4.2 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล

ในการจำลองมีการกำหนดค่าขอบเขต (Boundary Setting) โดยแบ่งค่าขอบเขตออกเป็น 3 ส่วน เริ่มต้นจากการกำหนดขอบรอบนอก ซึ่งเป็นเส้นขอบปิดโดยการตั้งค่าเส้นสีเขียวเป็น Zero Charge/Symmetry และเส้นสีดำเป็น Ground ส่วนที่ 2 เลือกเส้นขอบของสายเคเบิลส่วนที่เป็นตัวนำเส้นสีน้ำเงินตามรูปตั้งค่าเป็นศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential) แล้วกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 38 kV ส่วนที่ 3 เส้นสีฟ้าตั้งค่าเป็น Continuity แสดงดังรูปที่ 4.3 และตัวอย่างของ Triangular mesh ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.4

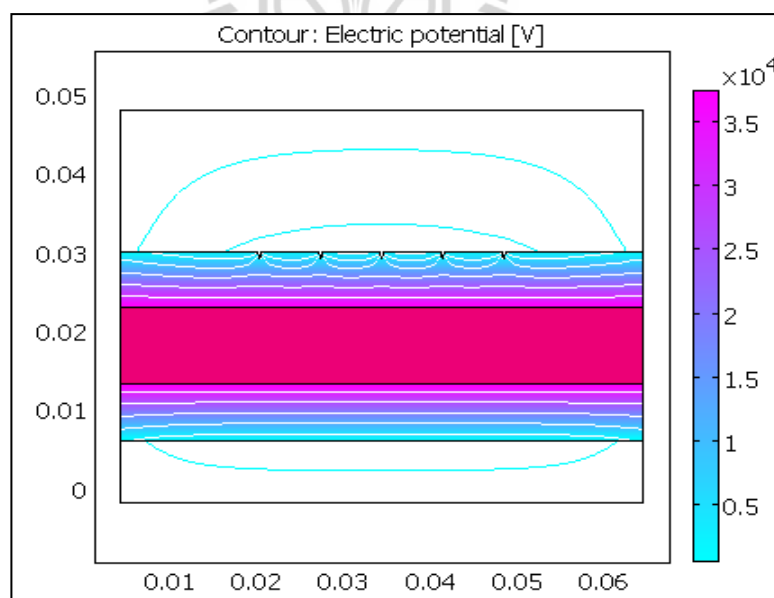


รูปที่ 4.3 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

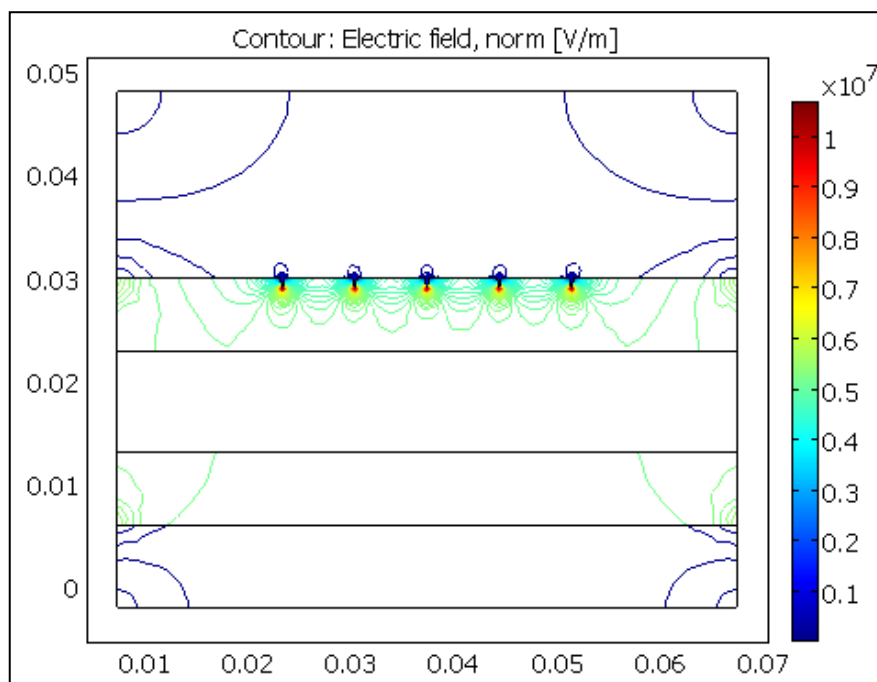


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของ Triangular mesh 1816 เอลิเมนต์

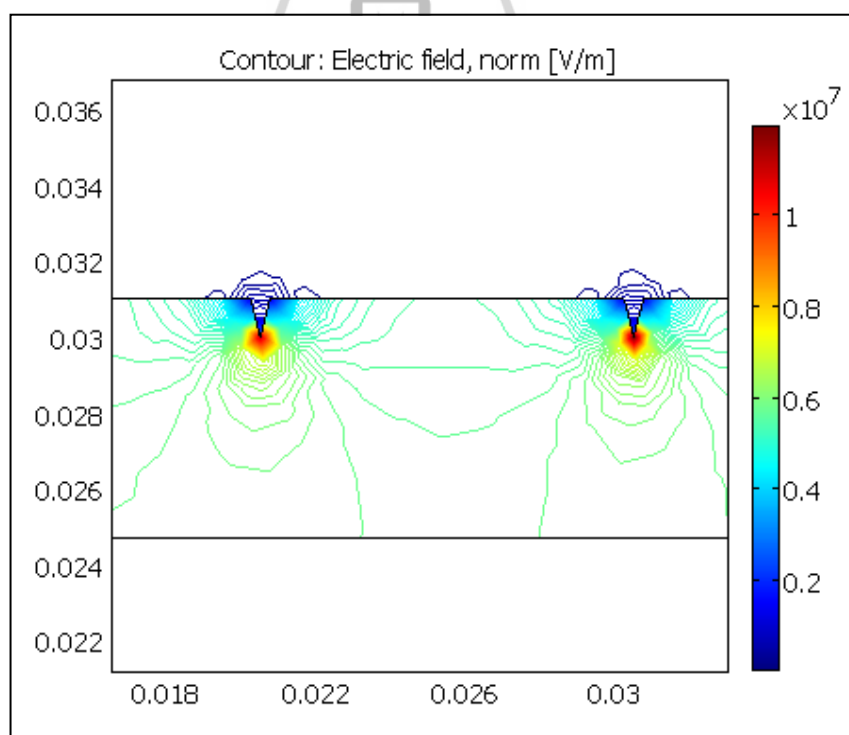
ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูง ระบบจำหน่าย 22 kV แสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE



รูปที่ 4.6 การกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

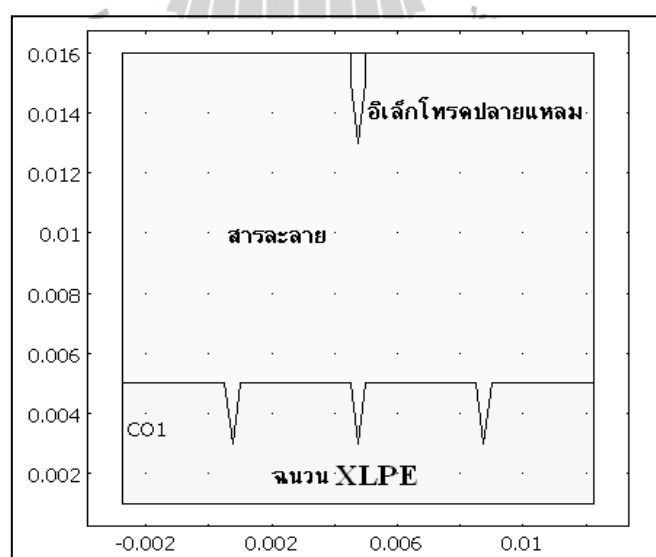


รูปที่ 4.7 ภาพขยายของการกระจายสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดบริเวณปลายของรูที่ถูกเจาะไว้ (E_{in}) มีค่าเท่ากับ 13.42 kV/mm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE ($E_c = 50$ kV/mm) แต่มีค่ามากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV ซึ่งคำนวณด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนกันร่วมตามที่ได้นำเสนอมาแล้วข้างต้น ($E_{max} = 3.56$ kV/mm) ถ้าให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในการทดลอง E_{in} มากกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน E_c จะทำให้ฉนวนเกิดเบรกดาวน์ แต่ถ้าให้ E_{in} น้อยกว่าค่า E_{max} วอเตอร์ทรีอิงอาจจะไม่เกิดขึ้นหรือต้องใช้เวลาานเพราะว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลในสภาวะใช้งานปกติ ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนสายเคเบิลที่เหมาะสมสำหรับการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ควรอยู่ระหว่าง ($E_{max} < E_{in} < E_c$) จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า วอเตอร์ทรีอิงจะเริ่มเกิดบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและขยายตัวออกไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.6

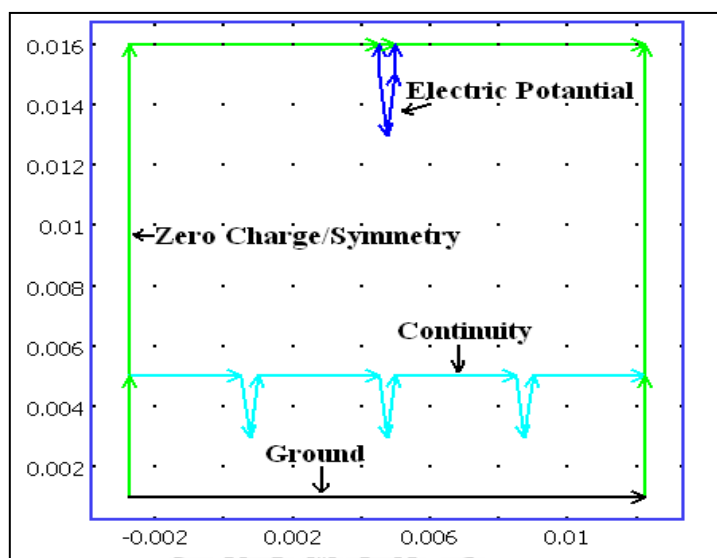
4.3.2 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE

สำหรับการจำลองการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE ก็จะมีวิธีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าคล้ายกับการจำลองในสายเคเบิล คือ วาดแบบจำลองให้มีขนาดใกล้เคียงขนาดจริงมากที่สุดและกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวนสายเคเบิลเท่ากับ 2.3 แสดงในรูปที่ 4.8

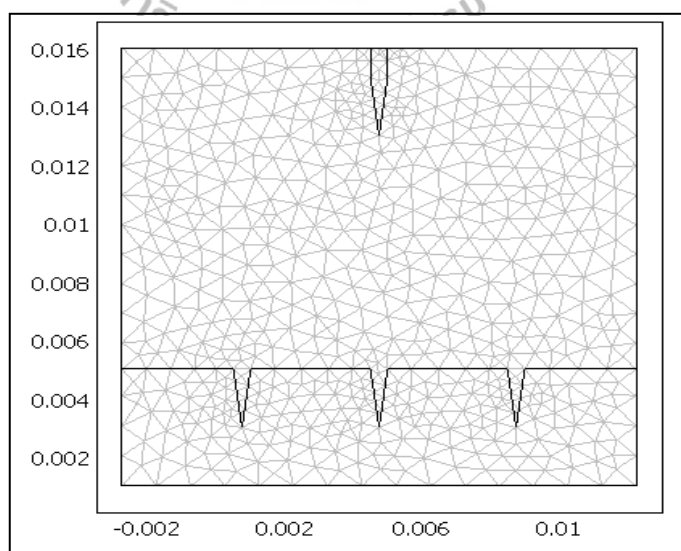


รูปที่ 4.8 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE

กำหนดค่าขอบเขต เริ่มจากการกำหนดขอบรอบนอก ซึ่งเป็นเส้นขอบปิดโดยตั้งค่าเส้นสีเขียวเป็น Zero Charge/Symmetry และเส้นสีดำเป็น Ground ต่อมาเลือกเส้นขอบของอิเล็กโทรดปลายแหลมส่วนที่เป็นเส้นสีน้ำเงินตามรูปตั้งค่าเป็นศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential) แล้วกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 7 kV สุดท้ายตั้งค่าเส้นสีฟ้าเป็น Continuity แสดงดังรูปที่ 4.9 และตัวอย่างของ Triangular mesh ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.10

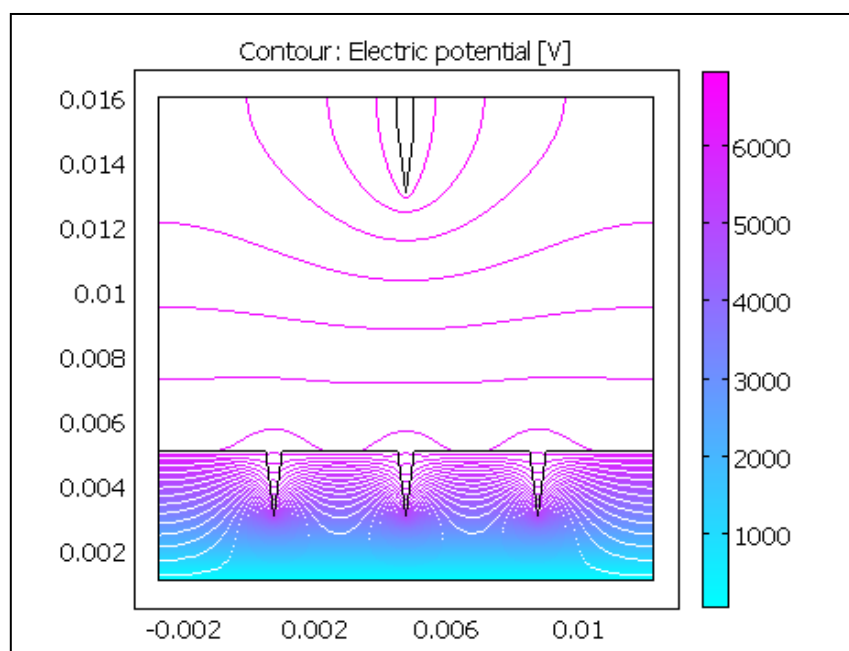


รูปที่ 4.9 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE

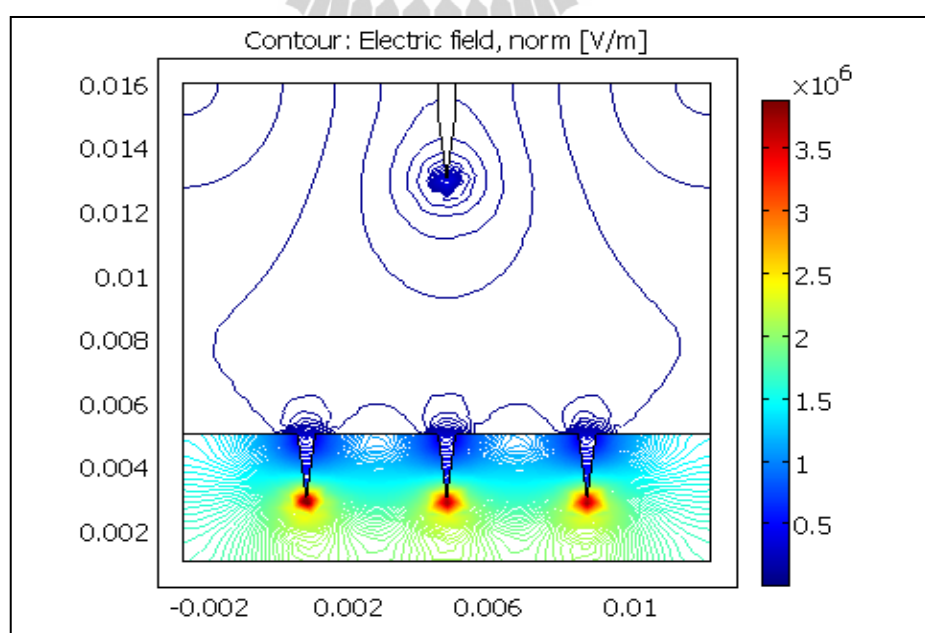


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างของ Triangular mesh 1241 เอลิเมนต์

ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE แสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE

จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นฉนวน XLPE ในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณปลายของรูที่ถูกเจาะไว้ (E_{in}) มีค่าเท่ากับ 4.2 kV/mm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE ($E_c = 50$ kV/mm) และมีค่ามากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนกันรวม ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในแผ่นฉนวน XLPE ที่เหมาะสำหรับการเกิดวอเตอร์ทรีอิง อยู่ระหว่าง ($E_{max} < E_{in} < E_c$) วอเตอร์ทรีอิงจะเริ่มเกิดบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและขยายตัวออกไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้ทำการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้วิธีทรงกระบอกซ้อนกันรวมดังที่กล่าวมาข้างต้นจากการคำนวณ ได้ค่า $E_{max} = 3.56$ kV/mm และในการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL ได้ทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ถูกเจาะรูไว้ ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{in} = 13.42$ kV/mm และการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในแผ่นฉนวน XLPE ที่ถูกเจาะรู ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{in} = 4.2$ kV/mm ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจากการจำลอง E_{in} มีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE ที่มีค่าเท่ากับ 50 kV/mm ถ้าให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในการทดลอง E_{in} มากกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน E_c จะทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ แต่ถ้าให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในการทดลอง E_{in} มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้วอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นเลย ดังนั้นจึงได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE อยู่ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในการใช้งานจริงของสายเคเบิลกับค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE ($E_{max} < E_{in} < E_c$) วอเตอร์ทรีอิงจะเริ่มเกิดบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและขยายตัวออกไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า

บทที่ 5

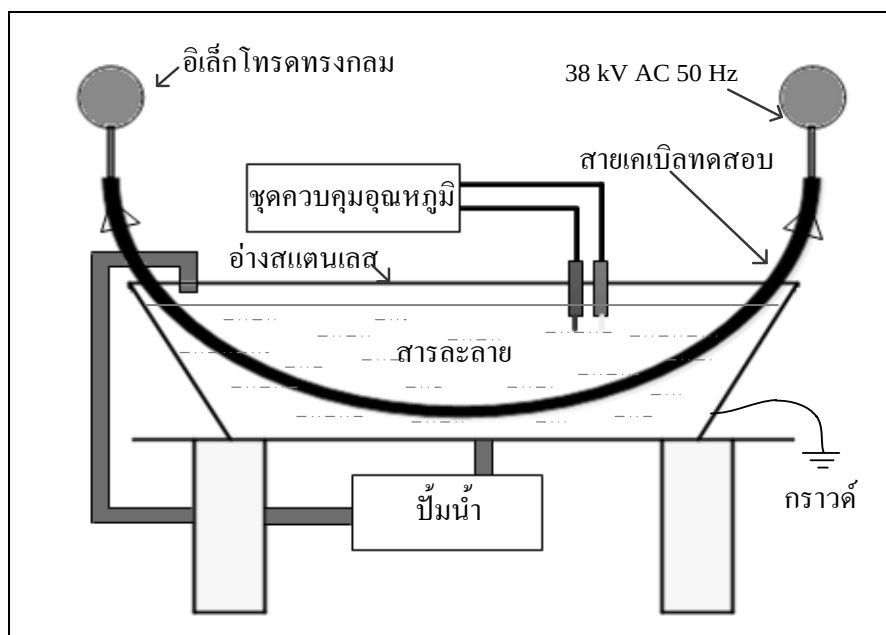
วิธีดำเนินการวิจัย

5.1 กล่าวนำ

การศึกษาวิจัยวอเตอร์ทรีอิงในฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้า ประกอบด้วยการทดสอบ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และส่วนที่สอง การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงของแผ่นฉนวน XLPE ซึ่งจุดประสงค์หลักของการทดสอบทั้งสองส่วนมีเป้าหมายเดียวกัน คือ เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงของฉนวน XLPE ขณะรับแรงดันภายใต้สภาพแวดล้อมของสารละลายชนิดต่าง ๆ ในบทนี้ผู้ทำวิจัยกล่าวถึงการออกแบบชุดศึกษาและวิจัยวอเตอร์ทรีอิง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมชิ้นงาน และวิธีดำเนินการทดสอบของทั้งสองการทดสอบโดยรายละเอียดทั้งหมดแสดงไว้ดังนี้

5.2 การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE เป็นการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของสายเคเบิลเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงขึ้น โดยมีความเครียดสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้น โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมไนเตรด และโซเดียมคลอไรด์ที่พบในดินหรือบริเวณที่มีการใช้งานสายเคเบิลมาทำการทดสอบ ในรูปที่ 5.1 แสดงแผนภาพของชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีดำเนินการทดสอบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดได้ดังนี้

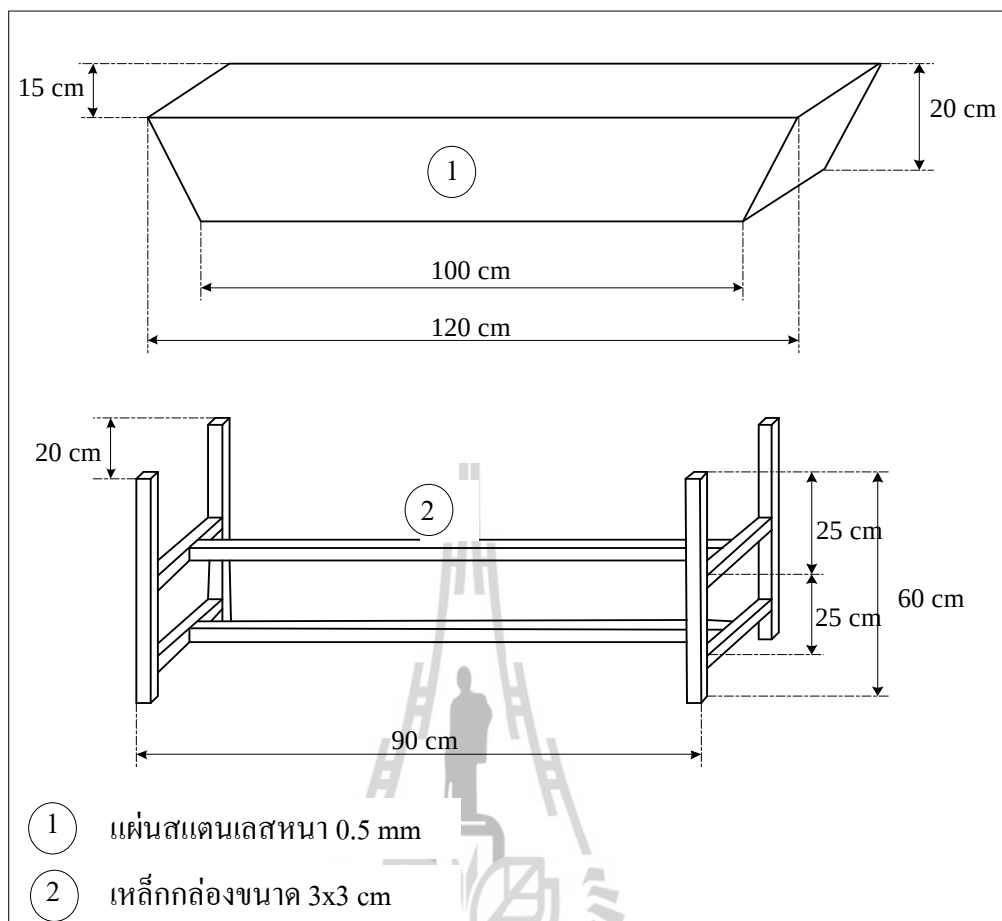


รูปที่ 5.1 แผนภาพชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล

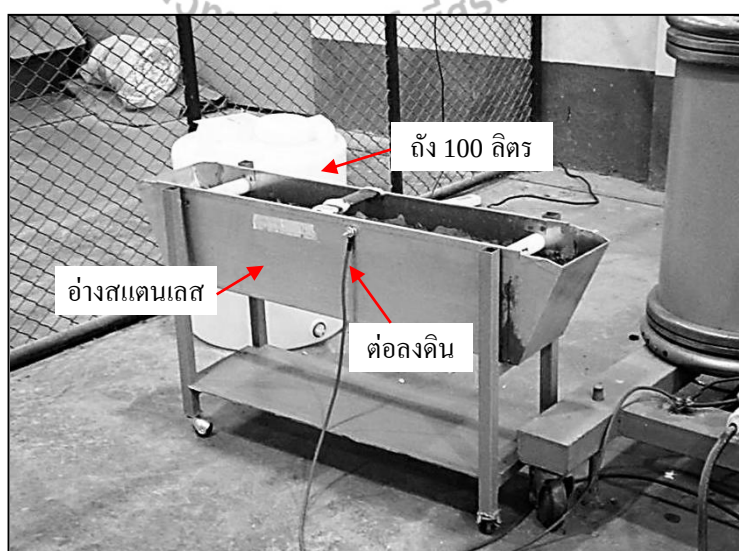
5.2.1 ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง

ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงมีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ อ่างสแตนเลส ชุดควบคุมอุณหภูมิและการไหลของสารละลาย และชุดป้อนแรงดันไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อ่างสแตนเลสเพื่อใช้บรรจุสารละลายทำจากแผ่นสแตนเลส มีความกว้าง 15 cm ยาว 120 cm และสูง 20 cm และมีขาตั้งเพื่อรองรับอ่าง ในรูปที่ 5.2 แสดงแบบร่างของอ่างสแตนเลส และขาตั้งรองรับ อ่างสแตนเลสมีการต่อลงดินและมีถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร สำหรับเก็บสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 5.3

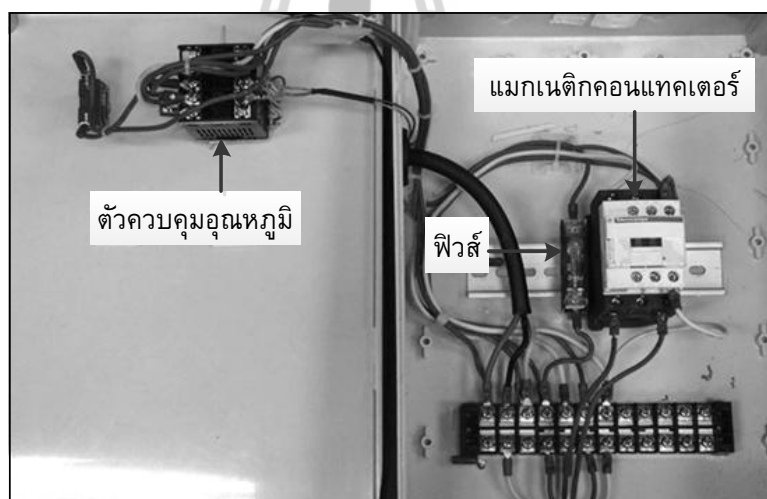


รูปที่ 5.2 แบบร่างของอ่างสแตนเลสและขาตั้งรองรับ

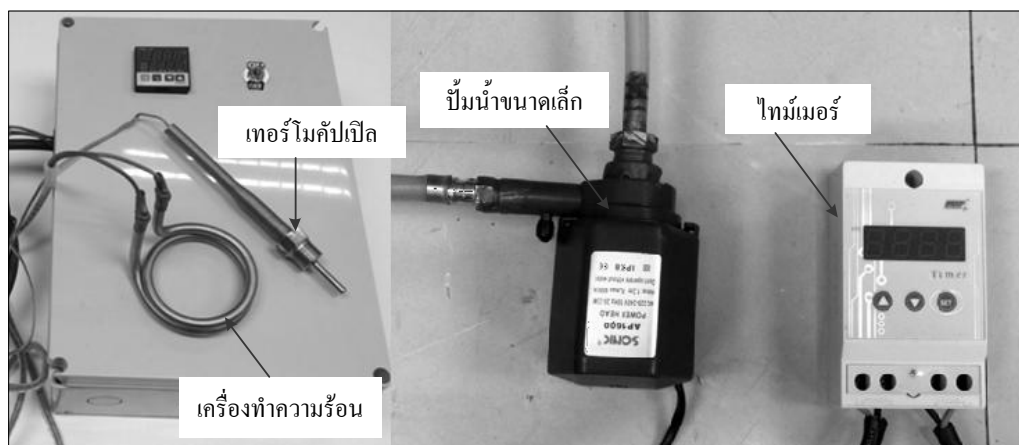


รูปที่ 5.3 อ่างสแตนเลสบรรจุสารละลาย

2) ชุดควบคุมอุณหภูมิและการไหลของสารละลาย มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและการไหลของสารละลายในขณะที่ทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ซึ่งอยู่ในอ่างสแตนเลสให้มีค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องและคงที่ในการทดสอบ ชุดควบคุมอุณหภูมิประกอบไปด้วย เครื่องทำความร้อน เทอร์โมคัปเปิล และกล่องควบคุมอุณหภูมิ ภายในกล่องควบคุมอุณหภูมิประกอบไปด้วย แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contractor) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) แสดงในรูปที่ 5.4 เทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิของสารละลายและส่งไปยังกล่องควบคุมอุณหภูมิ โดยกล่องควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่รับค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาประมวลผล เพื่อควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในระดับความร้อนที่ต้องการ โดยการศึกษาวิจัยวอเตอร์ทรีอิงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีการจำลองความเครียดทางความร้อน ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 50°C และปั้มน้ำขนาดเล็กถูกนำมาใช้เพื่อทำให้สารละลายมีการไหลวนให้ความร้อนกระจายอย่างทั่วถึงไปยังสารละลายในอ่างสแตนเลสระหว่างการทดสอบ และมีไทม์เมอร์เพื่อตั้งเวลาเปิดและปิดเครื่อง ในรูปที่ 5.5 แสดงชุดควบคุมอุณหภูมิและการไหลของสารละลาย

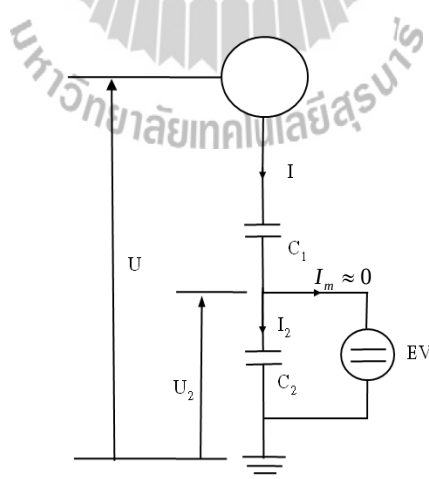


รูปที่ 5.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย



รูปที่ 5.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิและการไหลวนของสารละลาย

3) ชุดป้อนแรงดันไฟฟ้า เป็นการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิง โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 100 kVA 50 Hz ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้าแรงต่ำไปเป็นไฟฟ้าแรงสูงสำหรับป้อนให้กับชุดทดสอบ และมีวาไรแอค (Variac) เป็นตัวปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำ ส่วนทางด้านทุติยภูมิหรือด้านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะป้อนให้กับชุดทดสอบ โดยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ถูกจ่ายออกไปสามารถวัดได้ด้วยชุดแบ่งวัดแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ แสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ (ดร.สำรวย สังข์สะอาด, 2547)

จากรูปที่ 5.6 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุประกอบด้วย ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (C_1) และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (C_2) โดยหลักการแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าเครื่องวัด

นั่น ต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ หรือ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากัน การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงมาเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำ สามารถทำได้จากสมการที่ 5.1 ดังนี้

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (5.1)$$

โดย C_1 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง มีขนาด 100 pF

C_2 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ มีขนาด 110 nF

U คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV)

U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V)

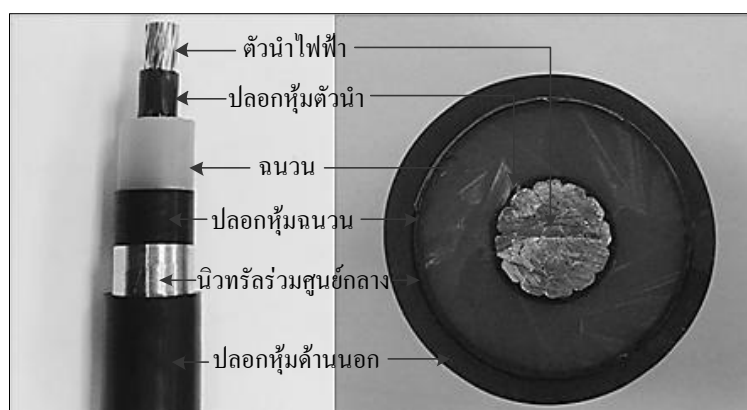
ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ สามารถคำนวณได้จากการปรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำที่ทำการแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากสมการที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับทดสอบหรือที่ป้อนให้กับสายเคเบิลทดสอบคือ $U = 3U_0$ โดยที่ U_0 คือแรงดันเฟสของสายเคเบิล จึงได้ค่า $U_0 = 12.7$ kV และได้แรงดันทดสอบ $U = 38$ kV ดังนั้น จากการคำนวณด้วยการแบ่งวัดแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ แรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำที่ป้อนให้กับหม้อแปลงจะได้ $U_2 = 34.5$ V ในรูปที่ 5.7 แสดงชุดป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 5.7 ชุดป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับทดสอบ

5.2.2 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

สายเคเบิลแรงสูงที่นำมาศึกษาและวิจัยการเกิดวอเตอร์ทริอิงในงานวิจัยนี้เป็นสายเคเบิลแรงสูงได้คินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยมีขนาดความหนาของฉนวนเท่ากับ 5.5 mm และตัวนำเป็นทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 mm ตรงตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ดังแสดงในรูปที่ 5.8

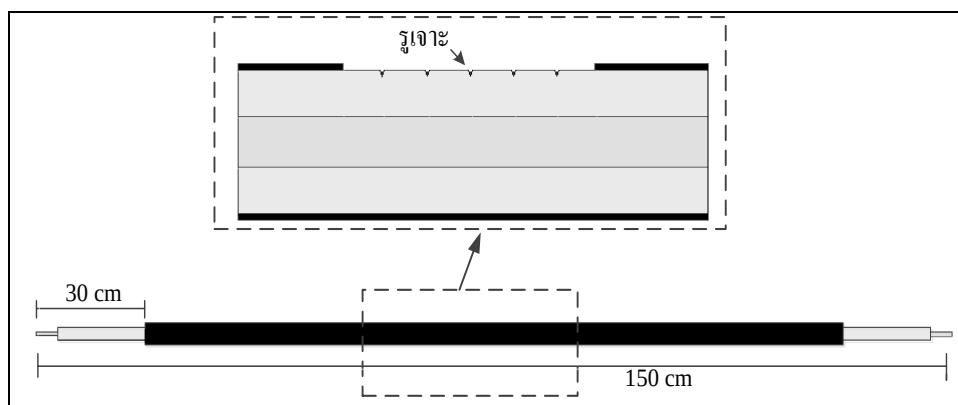


รูปที่ 5.8 สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงขนาด 22 kV ที่นำมาศึกษาและวิจัย

วิธีการเตรียมสายเคเบิลสำหรับทดสอบ เริ่มต้นจากนำสายเคเบิลมาตัดให้ได้ความยาว 150 cm ที่ปลายของสายเคเบิลทั้งสองข้างจะถูกลอกชั้นเปลือกนอกและชั้นกำบังฉนวนออก 30 cm และลอกชั้นของฉนวนกับกำบังตัวนำไฟฟ้าออก 5 cm ทั้งสองข้าง เพื่อต่อเข้ากับอิเล็กโทรดทรงกลมและเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้า สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนจะถูกเจาะรูด้วยเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm ลึกลงไปในเนื้อฉนวน 1 ± 0.03 mm รูปที่ 5.9 แสดงสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ และรูปที่ 5.10 แสดงแผนภาพการเตรียมสายเคเบิลสำหรับทดสอบ



รูปที่ 5.9 สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5.10 แผนภาพการเตรียมสายเคเบิลสำหรับทดสอบ

5.2.3 วิธีดำเนินการทดสอบ

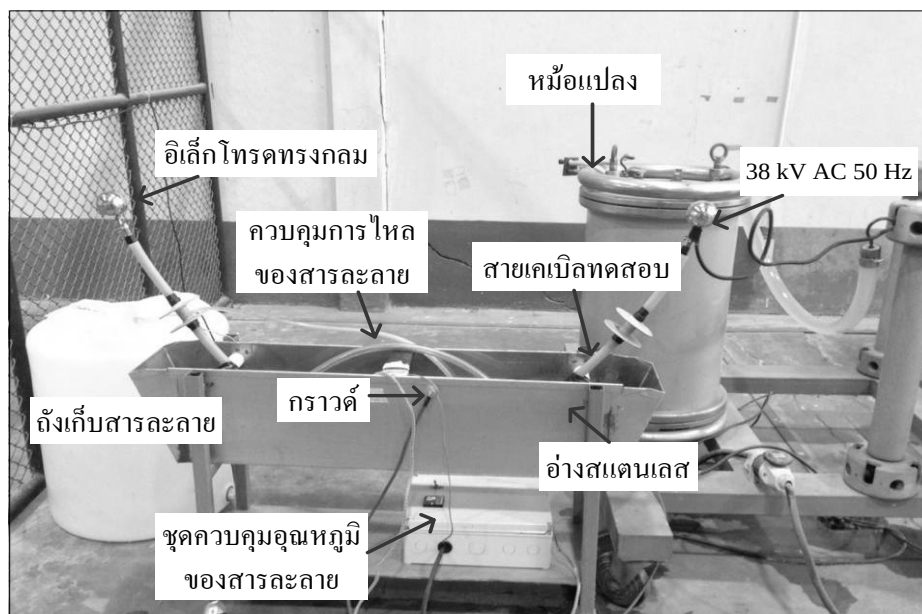
การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ใช้อุณหภูมิของสารละลายในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และส่วนที่ 2 ใช้อุณหภูมิของสารละลายในการทดสอบ 50°C ในแต่ละส่วนจะใช้สารละลาย 3 ชนิด มาทำการทดสอบ ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่มีความเข้มข้น 0.01 mol/l ในตารางที่ 5.1 แสดงวิธีดำเนินการทดสอบเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ

ตารางที่ 5.1 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล

การทดสอบวอเตอร์ทรีอิง ในสายเคเบิลแรงสูง 22 kV	เงื่อนไขการทดสอบ					
	ที่อุณหภูมิห้อง			ที่อุณหภูมิ 50°C		
สายเคเบิล	เส้นที่ 1	เส้นที่ 2	เส้นที่ 3	เส้นที่ 1	เส้นที่ 2	เส้นที่ 3
ชนิดของสารละลาย	CuSO_4	NaCl	KNO_3	CuSO_4	NaCl	KNO_3
สารละลาย	ความเข้มข้น 0.01 mol/l และถูกเปลี่ยนใหม่ทุก ๆ 7 วัน					
แรงดันไฟฟ้า	38 kV 50 Hz ตลอดการทดสอบ					
การควบคุมอุณหภูมิ และการไหลของสารละลาย	ในหนึ่งวัน 24 ชั่วโมง จะทำงาน 6 ชั่วโมง และอีก 18 ชั่วโมงจะหยุดทำงาน					
ระยะเวลาในการทดสอบ	1500 ชั่วโมง หรือ 62 วัน					

เนื่องจากการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างนานจึงใช้เวลาในการทดสอบ 1500 ชั่วโมง สารละลายที่ใช้ในการทดสอบจะถูกเปลี่ยนใหม่ทุก ๆ 7 วัน

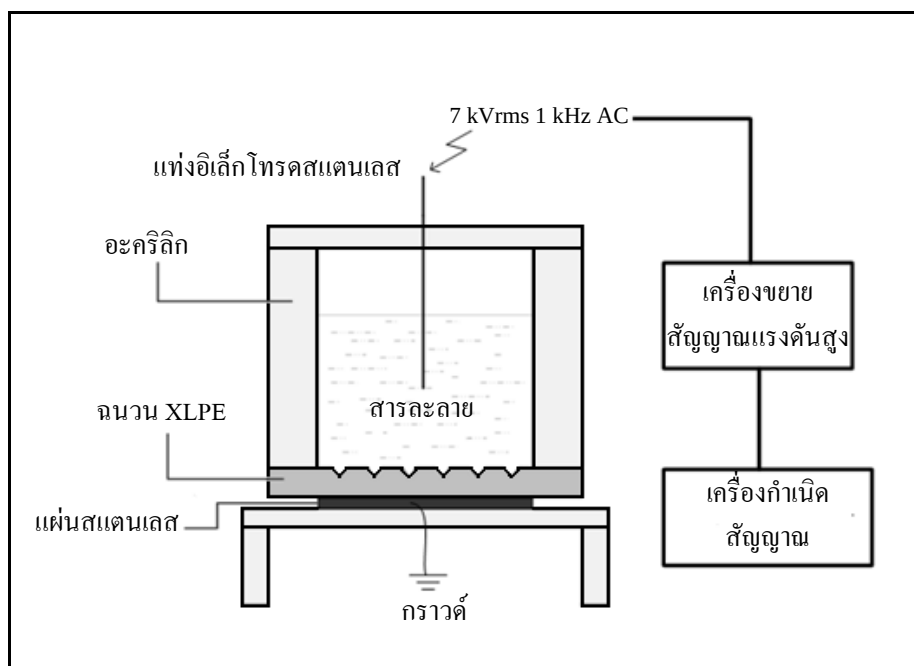
เพื่อให้ยังคงสภาพความเข้มข้น 0.01 mol/l หรือใกล้เคียงมากที่สุด และรูปที่ 5.11 แสดงชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล



รูปที่ 5.11 ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลได้คินฉนวน XLPE

5.3 การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE

การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE เป็นการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง โดยใช้แรงดันไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเร่งให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้น โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมไนเตรต และโซเดียมคลอไรด์มาทำการทดสอบ และยังทำการศึกษาผลของสารละลายไอออนซัลเฟตโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต และไอออนซัลเฟต ที่มีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง ในรูปที่ 5.12 แสดงไคอะแกรมของชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE ที่มีแอมเบอร์เพื่อบรรจุสารละลาย เครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องขยายสัญญาณ เป็นต้น การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE ส่วนที่สองฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ และส่วนที่สามวิธีดำเนินการทดสอบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

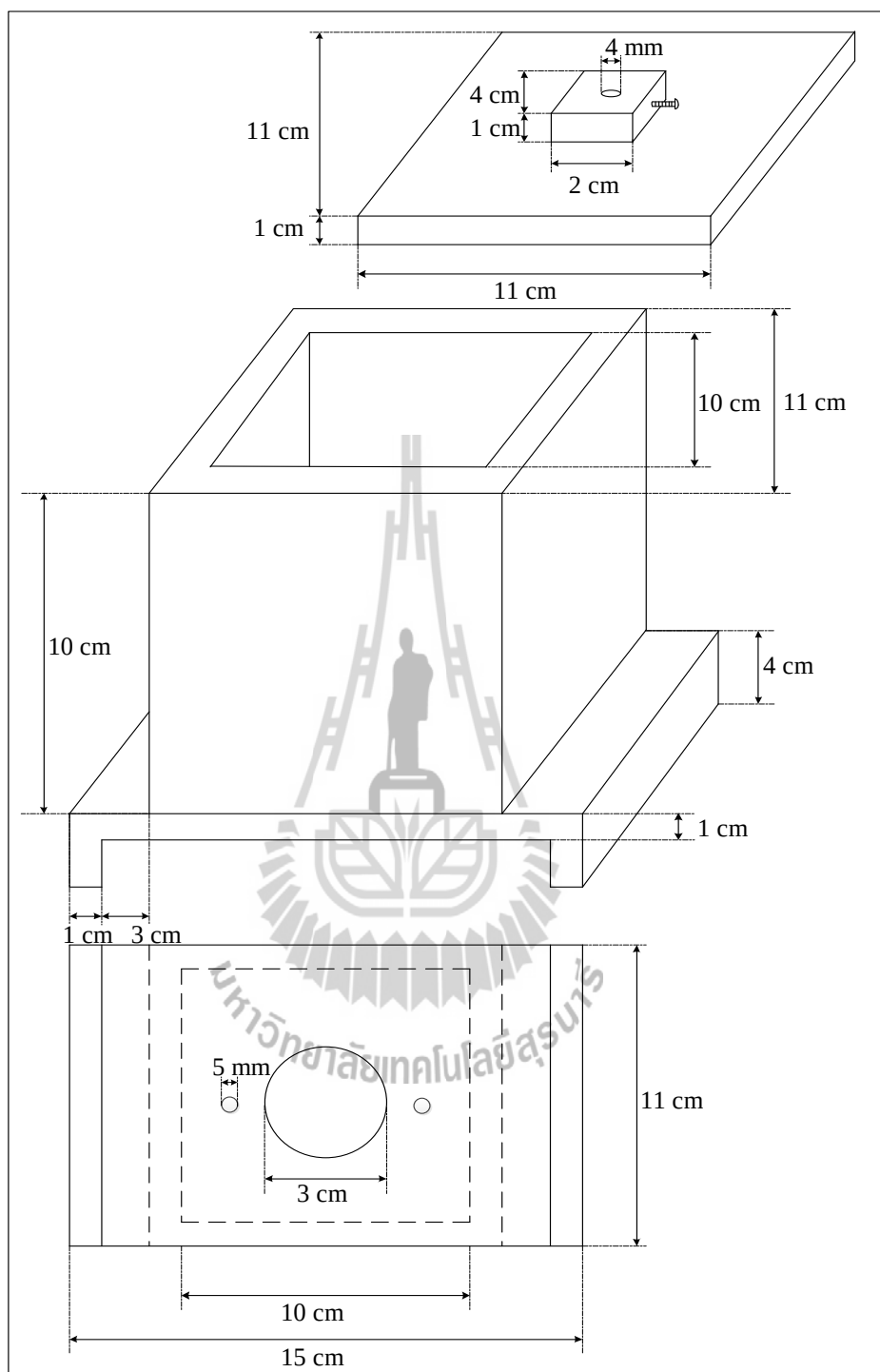


รูปที่ 5.12 ไดอะแกรมชุดทดสอบวอลเทจทรินิ่งในแผ่นฉนวน XLPE

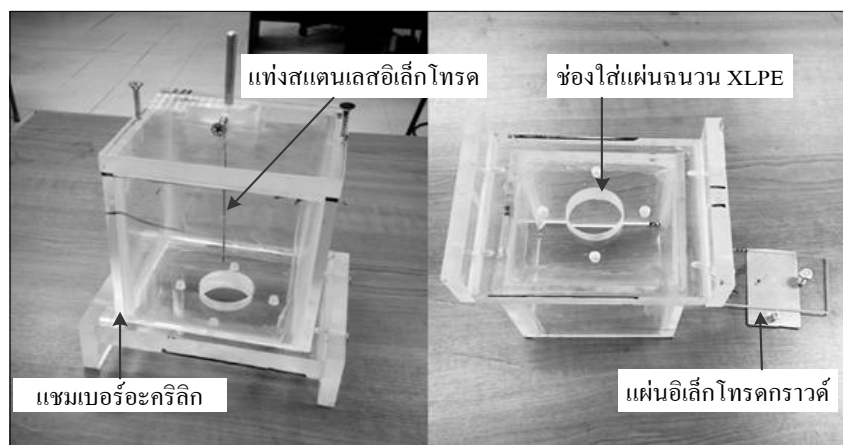
5.3.1 ชุดทดสอบการเกิดวอลเทจทรินิ่งในฉนวน XLPE

ชุดทดสอบการเกิดวอลเทจทรินิ่งในฉนวน XLPE จะประกอบไปด้วย แชมเบอร์บรรจุสารละลายและระบบกำเนิดสัญญาณแรงดันความถี่สูง

1) แชมเบอร์บรรจุสารละลายทำมาจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 0.5 cm มาประกอบกันเป็นแชมเบอร์ที่มีขนาดความกว้าง 10 cm ยาว 10 cm และสูง 10 cm เพื่อใช้บรรจุสารละลายที่มีปริมาตร 500 ml ด้านบนของแชมเบอร์จะมีแท่งอิเล็กโทรดสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ที่เชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้า และด้านล่างมีช่องสำหรับใส่แผ่นฉนวน XLPE และมีแผ่นอิเล็กโทรดกราวด์ที่ต่อลงดิน ในรูปที่ 5.13 แสดงแบบร่างของแชมเบอร์ที่ใช้ในการวิจัย และรูปที่ 5.14 แสดงแชมเบอร์ที่ใช้ในการวิจัยที่ประกอบสร้างขึ้น

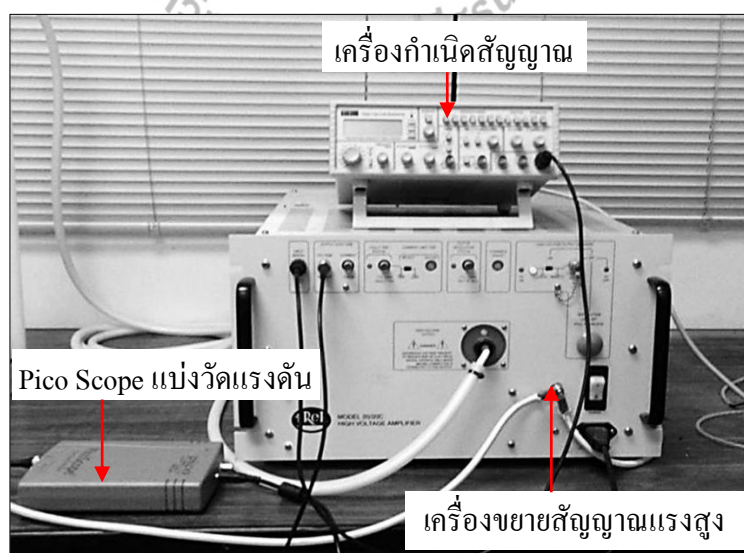


รูปที่ 5.13 แบบร่างของแอมเบอร์ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 5.14 แชมเบอร์ทดสอบทำจากแผ่นอะคริลิกที่ใช้ในการวิจัย

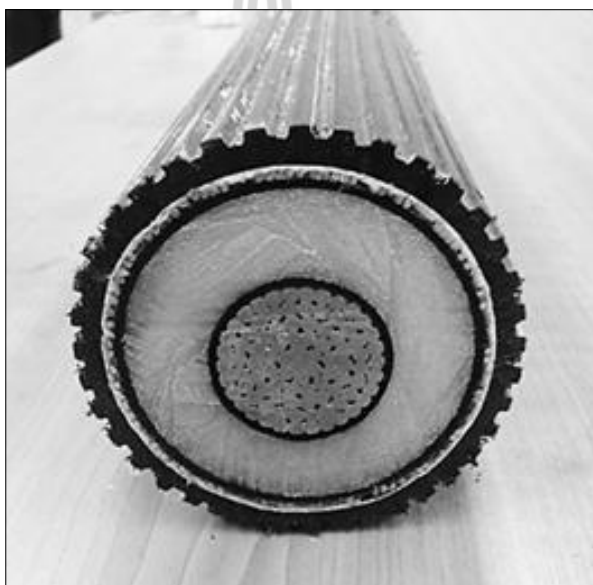
2) ระบบกำเนิดสัญญาณแรงดันความถี่สูง ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) เชื่อมต่อกับเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (High Voltage Amplifier) พิกัด 20 kV ความถี่สูงสุด 10 kHz อัตราขยาย 1 ต่อ 2000 เช่น ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้า 1 V แรงดันที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูงจะมีค่าเท่ากับ 2 kV เพื่อให้ค่าแรงดันที่จ่ายให้กับชิ้นงานทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำ จึงใช้อุปกรณ์แบ่งวัดแรงดันสูง (Pico Scope) เป็นตัวแบ่งวัดแรงดันสูงที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณแรงสูง โดยจะแสดงผลเป็นรูปคลื่นสัญญาณและระดับแรงดันในคอมพิวเตอร์ ระบบกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณแรงดันสูง แสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ระบบกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณแรงดันสูงที่ใช้ในการวิจัย

5.3.2 ฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE แผ่นฉนวน XLPE ที่นำมาทำการทดสอบจะถูกตัดออกมาจากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน 115 kV ดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยนำสายเคเบิลมาตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานดังแสดงในรูปที่ 5.17 ให้ได้ขนาดของแผ่นฉนวน XLPE ความหนาประมาณ 4.0 mm แสดงในรูปที่ 5.18 จากนั้นแผ่นฉนวนทดสอบจะถูกนำมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C ประมาณ 5 นาที แล้วนำแผ่นฉนวนที่อบไล่ความชื้นมาเจาะด้วยเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm ลึกลงไปในเนื้อฉนวน 2.0 ± 0.03 mm เพื่อเป็นอิเล็กโทรดน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 จากนั้นจึงนำแผ่นฉนวนมาติดตั้งเข้ากับแซมเบอร์เพื่อทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงต่อไป



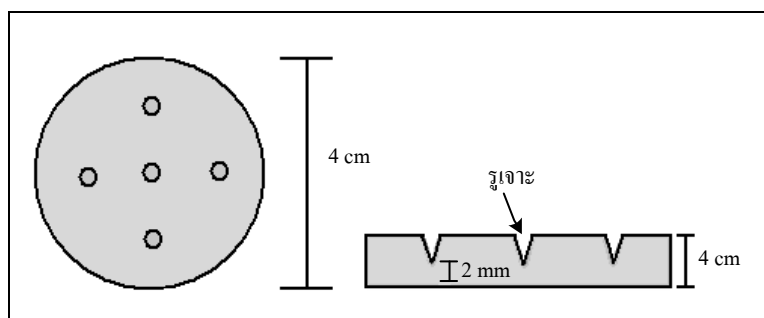
รูปที่ 5.16 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน 115 kV ฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ



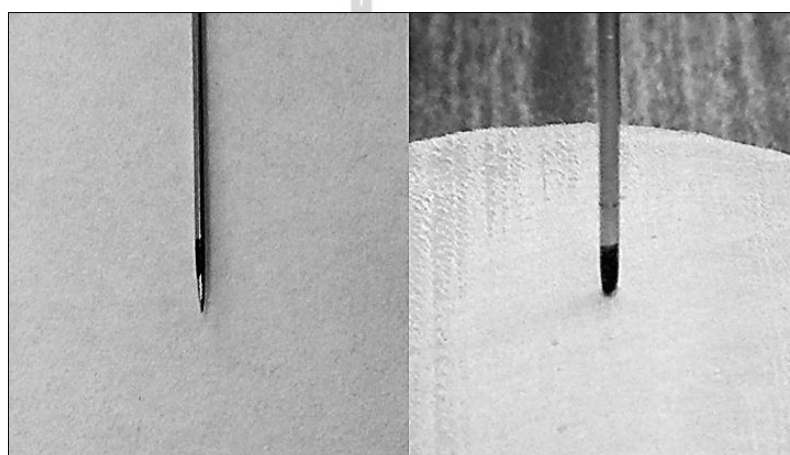
รูปที่ 5.17 เครื่องเลื่อยสายพาน



รูปที่ 5.18 ฉนวน XLPE ที่ตัดมาจากสายเคเบิล 115 kV มีขนาดความหนา 4 mm



รูปที่ 5.19 การเตรียมแผ่นฉนวน XLPE ที่นำมาทำการทดสอบ

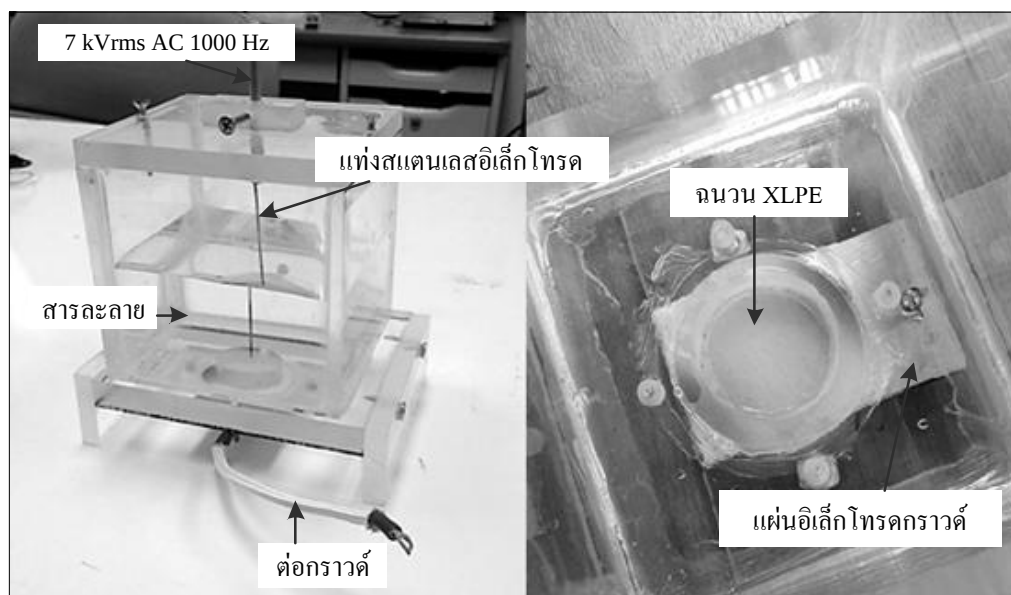


รูปที่ 5.20 แผ่นฉนวน XLPE ที่ถูกเจาะด้วยเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนการเตรียมฉนวน XLPE สำหรับใช้ในการทดสอบวอเตอร์ทริ่ง ผู้วิจัยจึงได้แสดงขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนที่จะนำมาทำการทดสอบในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ

ลำดับที่	ขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่าง
1	ตัดสายเคเบิลด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน ให้ได้ขนาดความหนาของฉนวน 4 mm
2	นำแผ่นฉนวน XLPE มาทำความสะอาดและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C 5 นาที
3	เจาะรูเพื่อทำเป็นอิเล็กโทรดน้ำด้วยเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm
4	นำแผ่นฉนวนที่เจาะรูไว้ มาติดตั้งกับแซมเบอร์ทดสอบด้วยกาวยางซิลิโคน
5	บรรจุสารละลายพร้อมที่จะนำมาทดสอบ



รูปที่ 5.21 แคมเบอร์ที่ติดตั้งแผ่นฉนวน XLPE และบรรจุสารละลายพร้อมที่จะทดสอบ

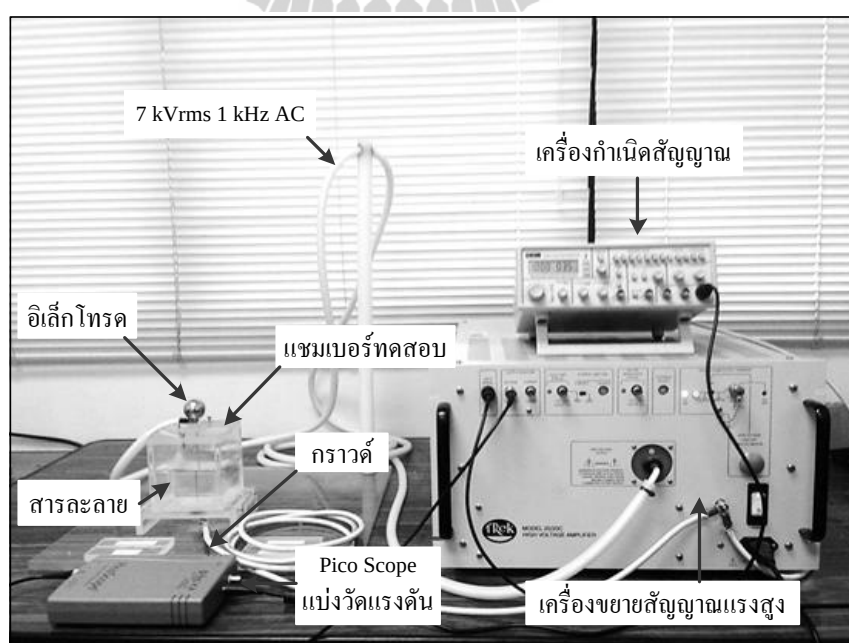
5.3.3 วิธีดำเนินการทดสอบ

การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE แผ่นฉนวน XLPE ที่นำมาทดสอบจะอยู่ภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 7 kVrms กระแสสลับ ความถี่ 1000 Hz ตลอดการทดสอบ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มที่เจาะไว้กับแผ่นอิเล็กโทรดกราวด์และระดับแรงดันจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการทดสอบ ดังนั้นเพื่อให้ไม่เสียเวลาในการทดสอบมากเกินไป ผู้วิจัยจึงใช้เวลาในการทดสอบ 150 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบ 10-12 ชั่วโมง/วัน แผ่นฉนวนทดสอบจะถูกนำมาวางไว้ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกราวด์กับสารละลายในแคมเบอร์ทดสอบ อุณหภูมิในการทดสอบนี้จะใช้อุณหภูมิห้องในการทดสอบ และใช้สารละลาย 6 ชนิดมาทำการทดสอบ ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และไอรอนซัลเฟต (FeSO_4) สารละลายแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้น 0.01 mol/l เพื่อยืนยันผลการทดลองจะทำการทดลอง 3 รอบ เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในวิธีดำเนินการทดสอบจึงแสดงเป็นตารางในตารางที่ 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE

การทดสอบวอเตอร์ทรีอิง	เงื่อนไขการทดสอบ					
แผ่นฉนวน XLPE	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 ± 0.03 mm					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6
ชนิดของสารละลาย	CuSO ₄	NaCl	KNO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	FeSO ₄
ความเข้มข้นของสารละลาย	ความเข้มข้น 0.01 mol/l					
แรงดันไฟฟ้า	7 kVrms AC 1000 Hz ตลอดการทดสอบ					
อุณหภูมิในการทดสอบ	อุณหภูมิห้อง					
ระยะเวลาในการทดสอบ	150 ชั่วโมง ทำการทดสอบ 12 ชั่วโมง/วัน					

การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE ระยะเวลาในการทดสอบจะขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ถ้าให้แรงดันไฟฟ้ามากเกินไปก็จะเกิดการเบรกดาวน์ก่อนที่จะเกิดวอเตอร์ทรีอิง แต่ถ้าให้แรงดันน้อยไปวอเตอร์ทรีอิงก็จะเกิดช้าหรืออาจไม่เกิดเลย ดังนั้น ที่ระยะห่าง 2 ± 0.03 mm และแรงดันไฟฟ้า 7 kVrms AC 1000 Hz จึงใช้เวลาในการทดสอบ 150 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ในรูปที่ 5.22 แสดงชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE



รูปที่ 5.22 ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE

5.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึงวิธีการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้า ประกอบการทดสอบ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และส่วนที่สองการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE ซึ่งจุดประสงค์หลักของการทดสอบทั้งสองส่วนมีเป้าหมายเดียวกันคือ เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงของฉนวน XLPE ขณะรับแรงดันภายใต้สภาพแวดล้อมของสารละลายชนิดต่าง ๆ สำหรับรายละเอียดของการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้อธิบายในบทนี้ ได้แก่ ชุดทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง สายเคเบิลและฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีดำเนินการทดสอบ เป็นต้น หลังจากที่ได้ทำการออกแบบสร้างชุดทดสอบและทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำฉนวน XLPE ที่ทำการทดสอบแล้ว ไปทำการตรวจสอบวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งจะนำเสนอผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ในบทถัดไป



บทที่ 6

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์การเกิดวอเตอร์รูอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE

6.1 กล่าวนำ

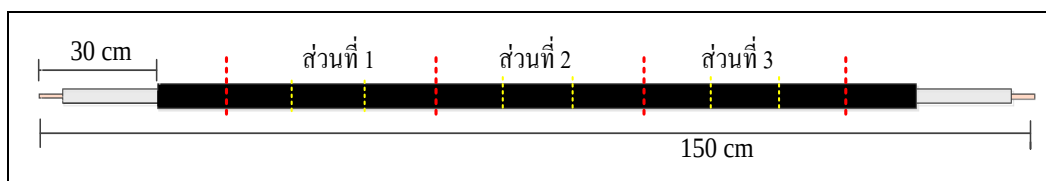
จากบทที่ 5 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิจัยการเกิดวอเตอร์รูอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และการเกิดวอเตอร์รูอิงของแผ่นฉนวน XLPE หลังจากดำเนินการทดสอบการเกิดวอเตอร์รูอิงเสร็จสิ้นตามขั้นตอนหรือวิธีการที่ได้กล่าวมาเรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยที่เกิดขึ้น โดยการศึกษารูปแบบลักษณะการเกิดวอเตอร์รูอิงที่มีผลมาจากสารละลายชนิดต่าง ๆ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR รายละเอียดผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

6.2 ผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์รูอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

หลังจากทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์รูอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE เสร็จสิ้น ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการเกิดและขยายตัวของวอเตอร์รูอิงในฉนวน XLPE จากผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C โดยมีสารละลาย 3 ชนิด ที่นำมาทำการศึกษาวิจัย ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและใช้เทคนิค FTIR เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ดังนี้

6.2.1 การเตรียมฉนวน XLPE สำหรับวิเคราะห์การเกิดวอเตอร์รูอิง

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสายเคเบิลหลังจากทำการทดสอบเสร็จสิ้น จะทำการตรวจสอบการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์รูอิงด้วยการวัดขนาดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ หลังจากสิ้นสุดการทดสอบที่ 1500 ชั่วโมง ผู้วิจัยได้นำสายเคเบิลที่ทำการทดสอบแล้วมาทำความสะอาดและตัดสายเคเบิลออกเป็น 3 ส่วน ในแต่ละส่วนจะสุ่มตัดเอาสายเคเบิลออกมา 3 ชิ้น เพื่อตรวจสอบหาวอเตอร์รูอิงที่เกิดขึ้น ในสายเคเบิลหนึ่งเส้นฉนวนจะถูกตัดออกมา 9 ชิ้น สายเคเบิลแต่ละชิ้นที่ถูกตัดออกมาจะมีความยาว 4 cm รูปที่ 6.1 แสดงแผนภาพการตัดสายเคเบิล และรูปที่ 6.2 แสดงชิ้นส่วนของสายเคเบิลที่ถูกตัดมีความยาว 4 cm

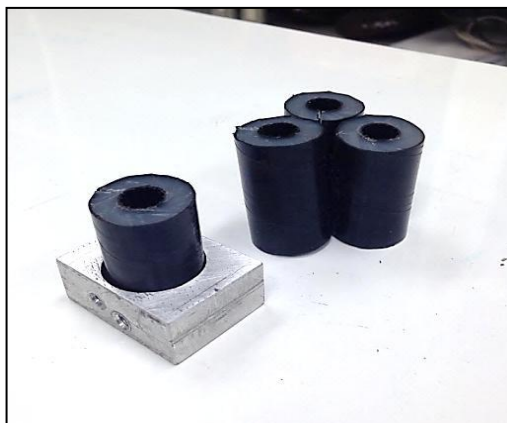


รูปที่ 6.1 การตัดสายเคเบิลเพื่อนำไปตรวจสอบหาเทอร์ทรีอิง



รูปที่ 6.2 ชิ้นส่วนของสายเคเบิลที่ถูกตัดมีความยาว 4 cm

จากนั้นนำชิ้นส่วนของสายเคเบิลที่ตัดไว้มาตัดตามยาวเพื่อเอาตัวนำไฟฟ้าออก เหลือไว้เพียงฉนวน XLPE และนำชิ้นส่วนของฉนวน XLPE นี้ไปติดตั้งกับตัวยึดจับที่ผู้วิจัยได้ทำ ขึ้นมาจากแผ่นอลูมิเนียมความหนา 1.5 cm เพื่อใช้ยึดกับชิ้นส่วนของฉนวน XLPE นี้โดยเฉพาะ ดังนั้น ฉนวน XLPE ที่ถูกนำไปเชื่อมจะเหลือเพียง 2.5 cm ถ้าให้ฉนวนมีความยาวมากกว่านี้การยึด จับชิ้นงานจะไม่แน่นและทำให้ตัวยึดจับหลุดออกจากตัวเครื่อง ในรูปที่ 6.3 แสดงชิ้นส่วนของ ฉนวน XLPE และตัวยึดจับ จากนั้นจึงนำตัวยึดจับนี้ไปติดตั้งกับเครื่องไมโครโทรมเพื่อเชื่อมเนื้อ ฉนวน XLPE ให้ได้ขนาดความหนาประมาณ 400 μm รูปที่ 6.4 แสดงเครื่องไมโครโทรมที่ใช้เชื่อม ฉนวนสายเคเบิล และรูปที่ 6.5 แสดงฉนวน XLPE ที่ถูกเชื่อมด้วยเครื่องไมโครโทรม



รูปที่ 6.3 ชิ้นส่วนของฉนวน XLPE และตัวจับยึด



รูปที่ 6.4 เครื่องไมโครโทรมที่ใช้ฉีกฉนวนสายเคเบิล



รูปที่ 6.5 ฉนวน XLPE ที่ถูกฉีกด้วยเครื่องไมโครโทรม

ชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ที่ถูกเชื่อมด้วยเครื่องไมโครโทรมแล้วจะยังไม่สามารถสังเกตเห็นวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน จึงต้องนำชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ไปทำการเชื่อมสีด้วยเมทิลีนบลูโดยมีอัตราส่วนในการผสมเมทิลีนบลูดังนี้

- เมทิลีนบลู 2.5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร



รูปที่ 6.6 เมทิลีนบลูและโซเดียมไฮดรอกไซด์

การเชื่อมสีชิ้นส่วนของฉนวน XLPE จะใช้อัตราส่วนของเมทิลีนบลูต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 10 : 1 ส่วน การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปจะทำให้สีของเมทิลีนบลูยืดยึดกับฉนวน XLPE ได้ดี รูปที่ 6.6 แสดงภาพเมทิลีนบลูและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เชื่อมสีฉนวน XLPE หลังจากนั้นนำเมทิลีนบลูและโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกันตามอัตราส่วนที่กำหนด และนำสารละลายที่ได้มาให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิ 80 °C จึงนำชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ที่เตรียมไว้ลงไปเชื่อม โดยแช่ไว้ประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำขึ้นมาตากให้แห้งประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงเก็บชิ้นฉนวนที่ทำการเชื่อมสีเสร็จเรียบร้อยแล้วไว้ในถุงซิปล็อคความชื้นเพื่อนำไปตรวจสอบหาวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นต่อไป รูปที่ 6.7 แสดงชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ที่ทำการเชื่อมสีด้วยเมทิลีนบลู



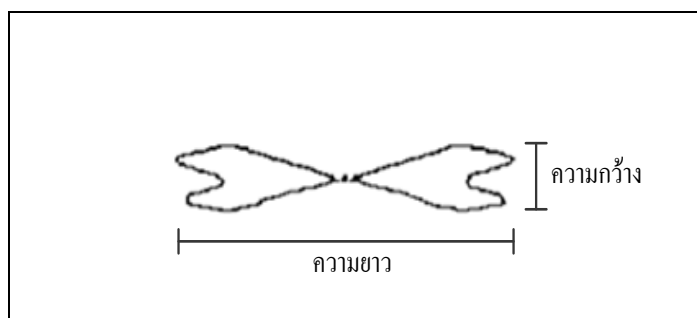
รูปที่ 6.7 ชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ที่ทำการเชื่อมสี่ด้วยเมทิลีนบลู

6.2.2 การวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิง

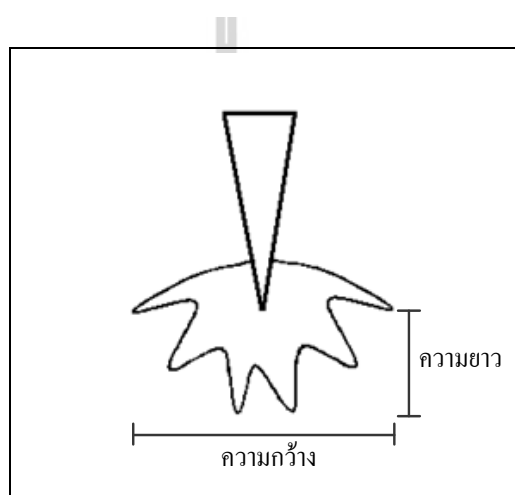
การศึกษาวัยการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE จะมีการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพและรูปแบบลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ LEICA รุ่น EZ4D แสดงดังรูปที่ 6.8 โดยมีการวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้น รูปที่ 6.9 แสดงแผนภาพการวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ และรูปที่ 6.10 แสดงแผนภาพการวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป



รูปที่ 6.8 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ LEICA รุ่น EZ4D



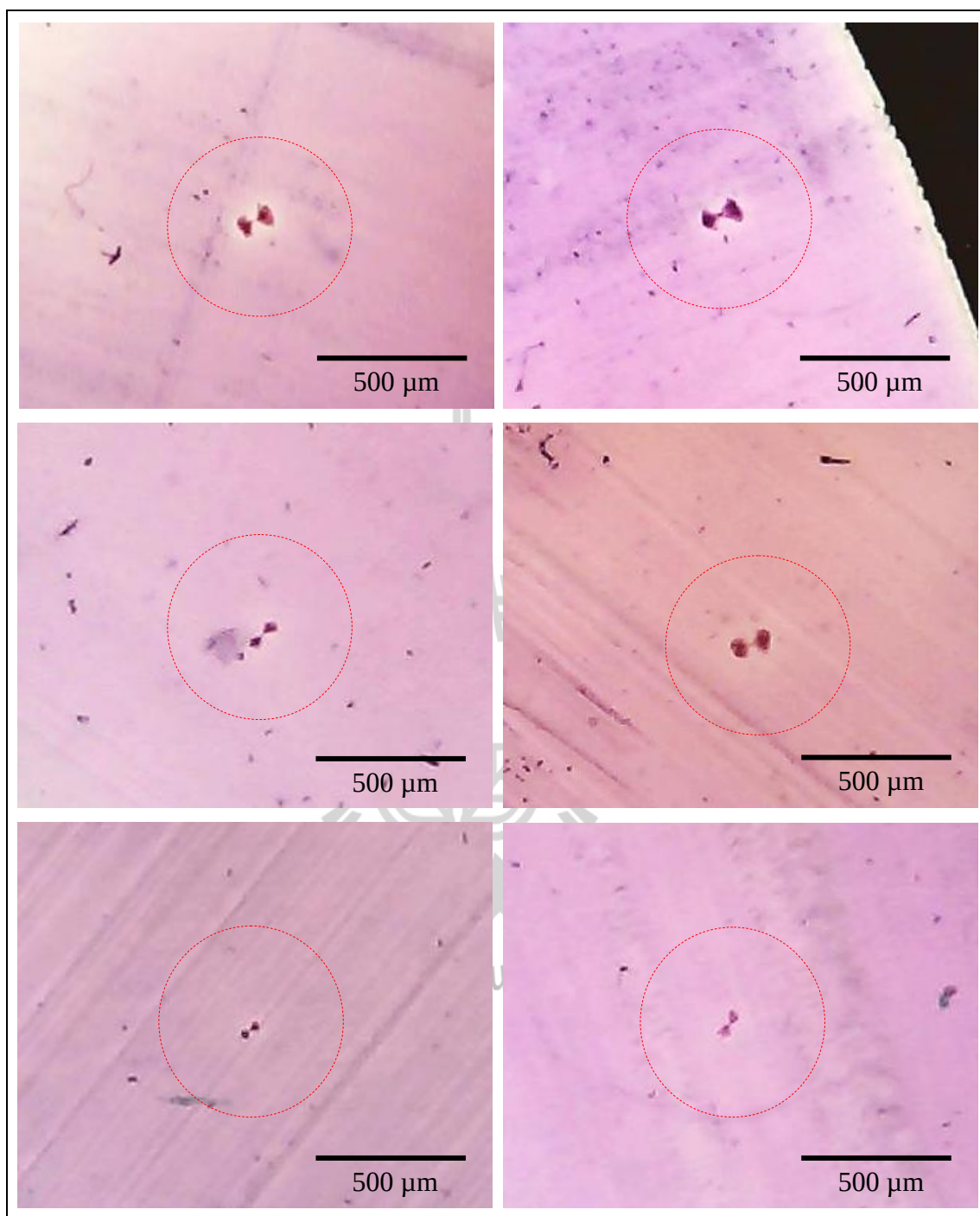
รูปที่ 6.9 แผนภาพการวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์



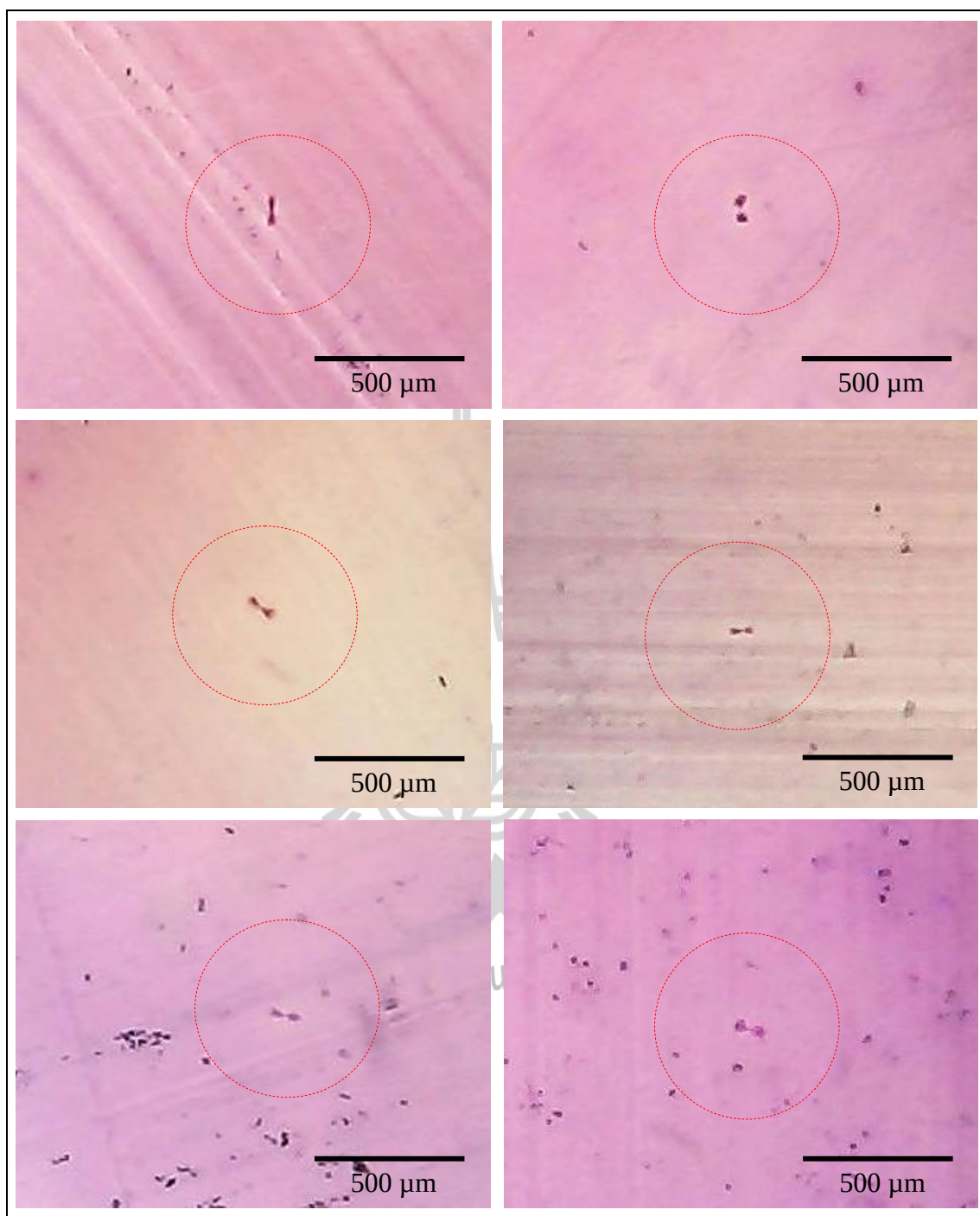
รูปที่ 6.10 แผนภาพการวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป

6.2.3 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

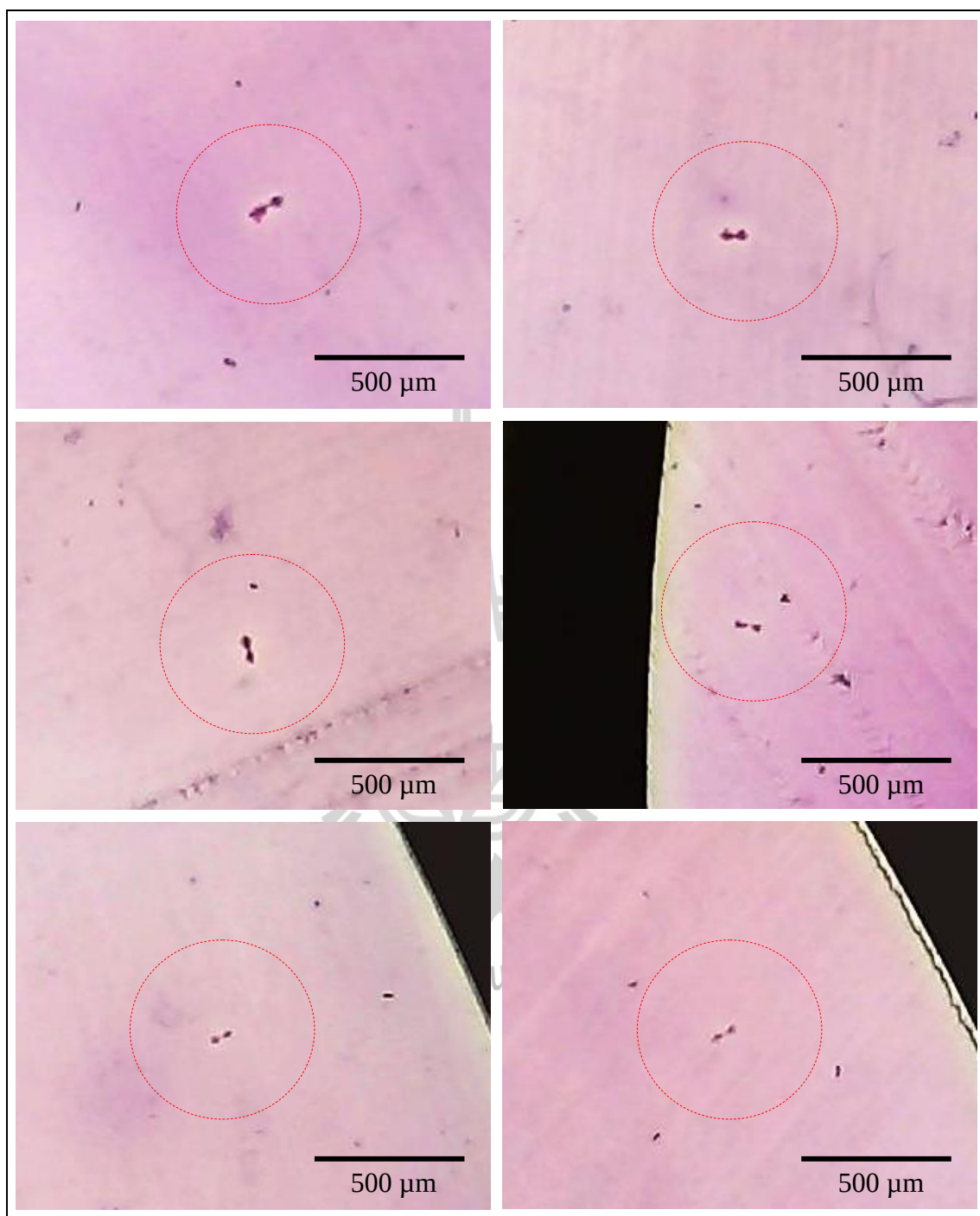
วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 50°C แบ่งออกเป็น วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) และยังแบ่งตามรูปแบบของวอเตอร์ทรีอิงคือ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์และวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ถึงรูปที่ 6.22



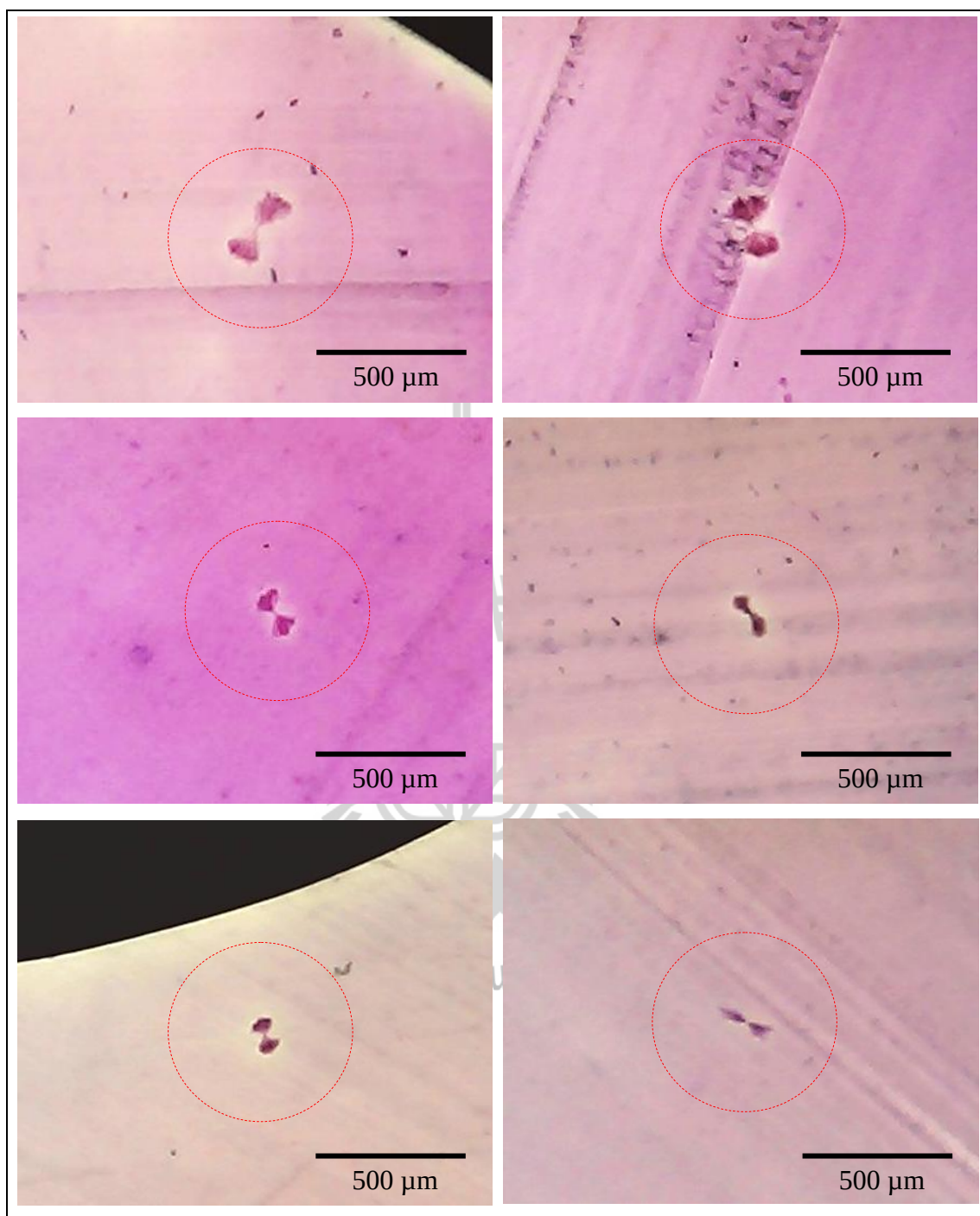
รูปที่ 6.11 วอเตอร์หรือแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)
ที่อุณหภูมิห้อง



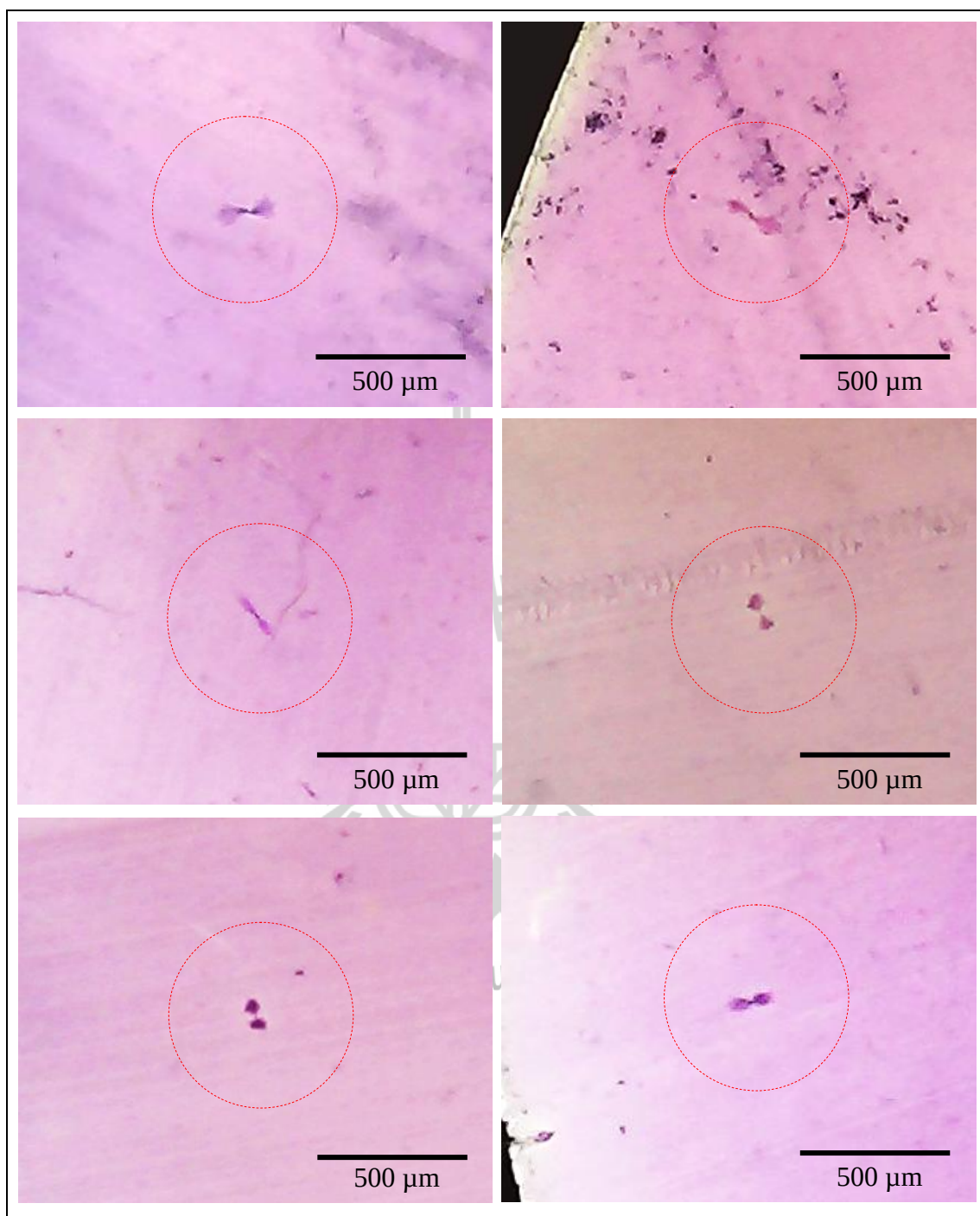
รูปที่ 6.12 วอเตอร์โรอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3)
ที่อุณหภูมิห้อง



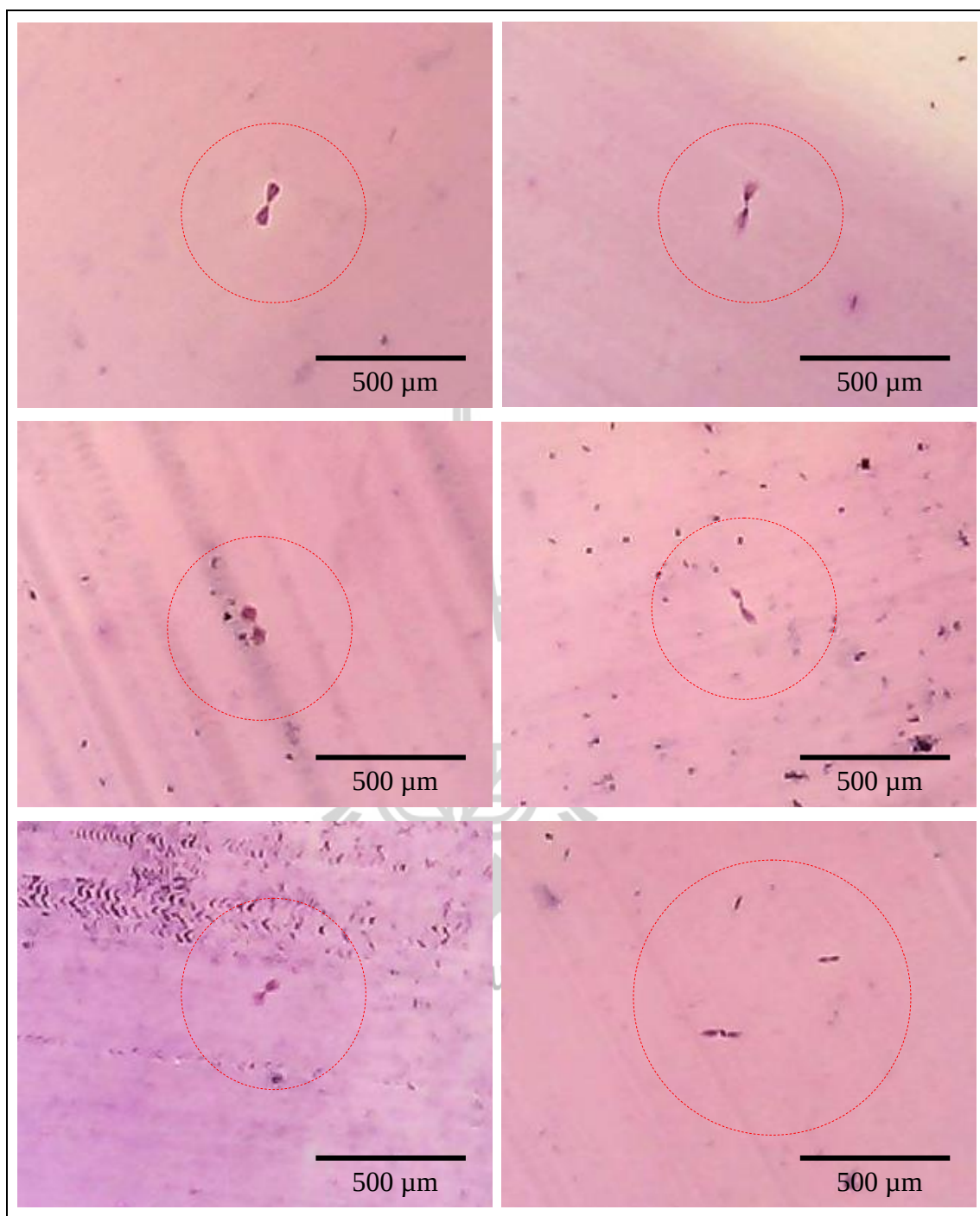
รูปที่ 6.13 วอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
ที่อุณหภูมิห้อง



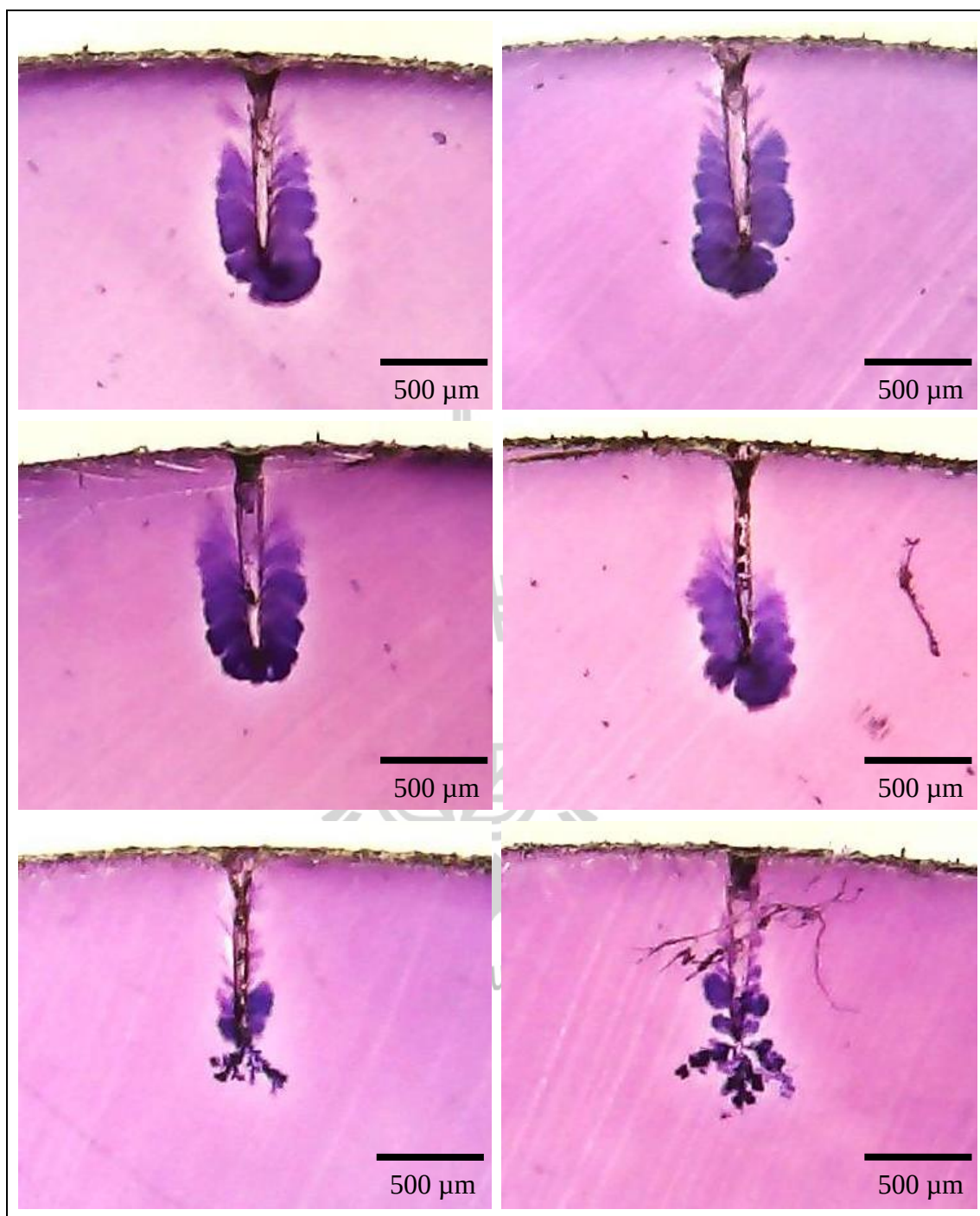
รูปที่ 6.14 วอเตอร์หรือแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)
ที่อุณหภูมิ 50°C



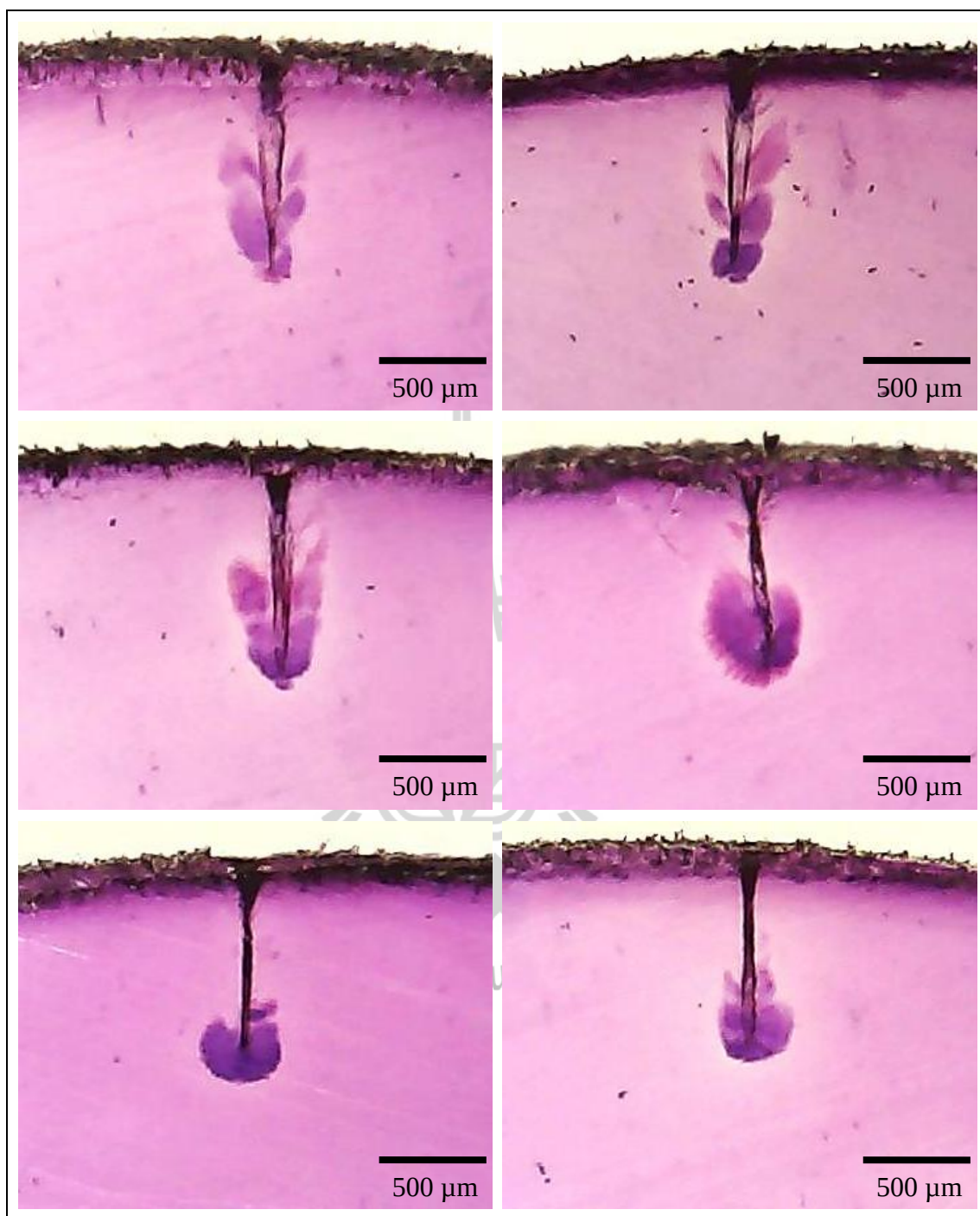
รูปที่ 6.15 วอเทอร์ที่อิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่อุณหภูมิ 50°C



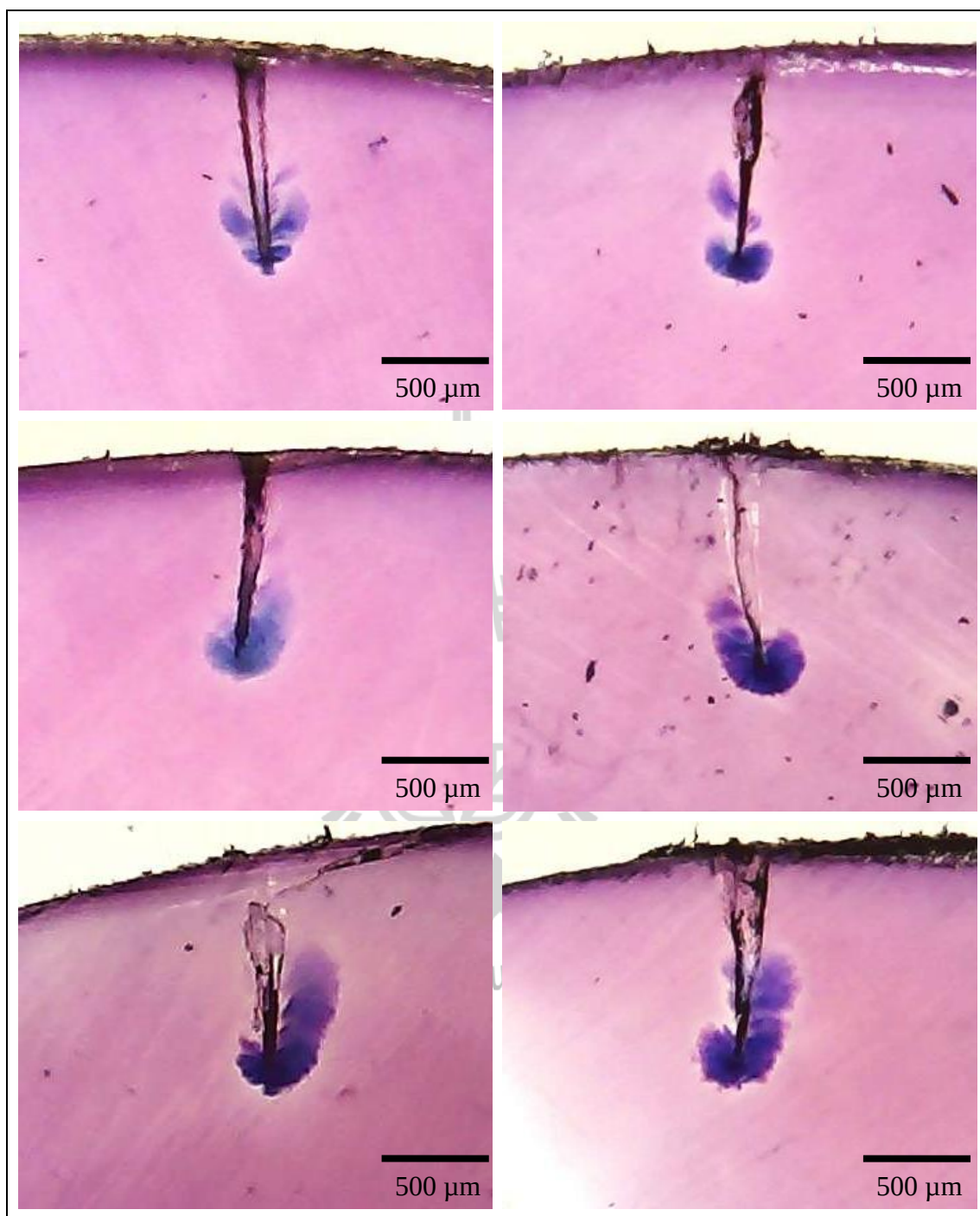
รูปที่ 6.16 วอเตอร์ทรูอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
ที่อุณหภูมิ 50°C



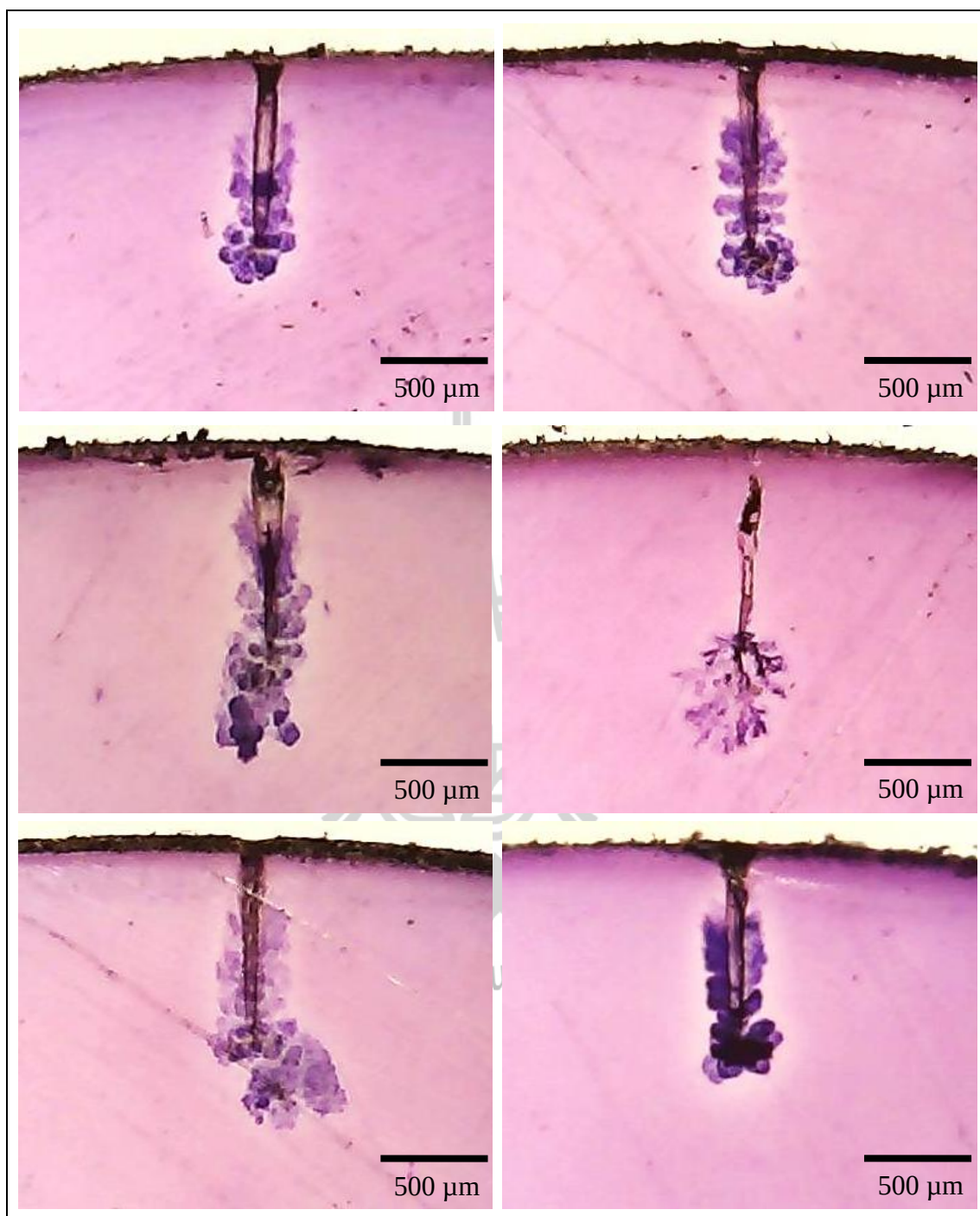
รูปที่ 6.17 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)
ที่อุณหภูมิห้อง



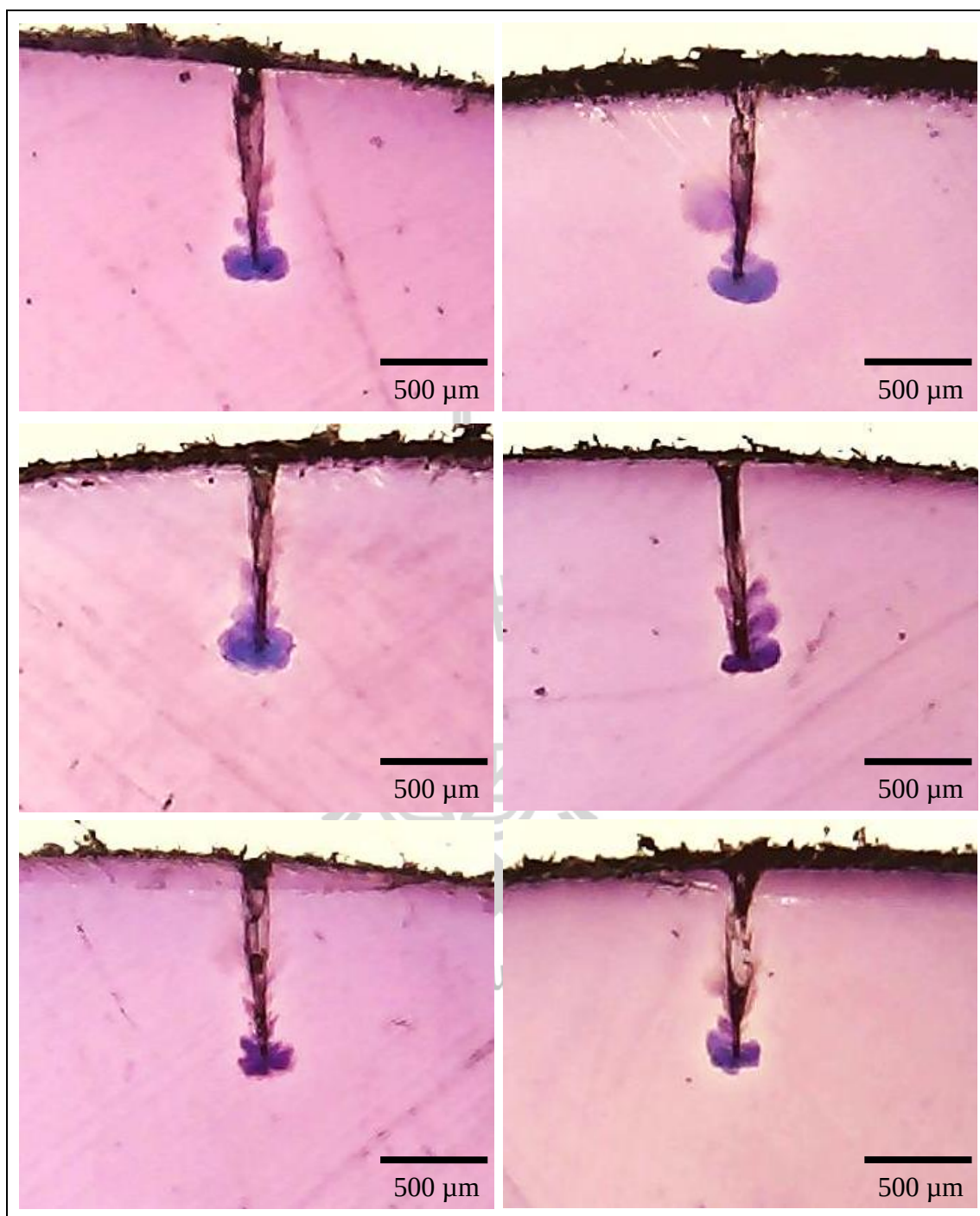
รูปที่ 6.18 วอเตอร์พอร์ริงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่อุณหภูมิห้อง



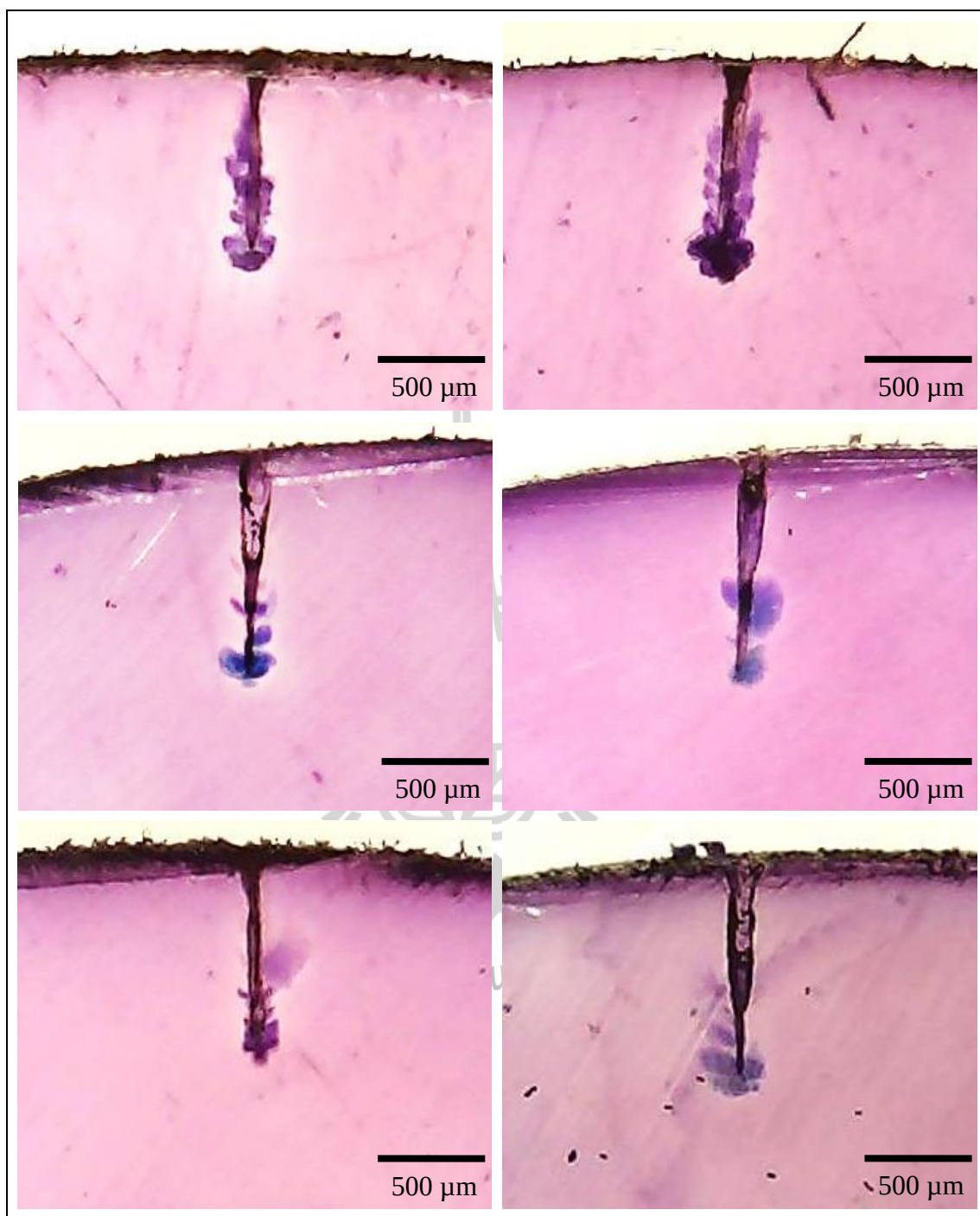
รูปที่ 6.19 วอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 6.20 วอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)
ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 6.21 วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO₃)
ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 6.22 วอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
ที่อุณหภูมิ 50°C

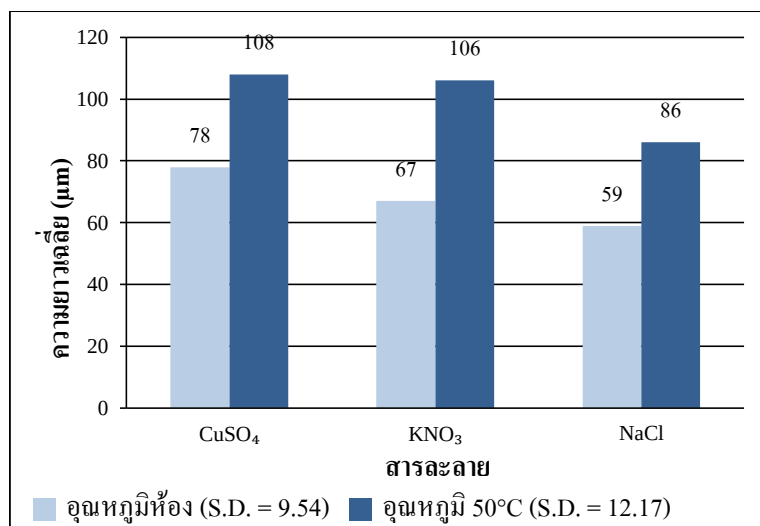
จากลักษณะรูปแบบของวอเทอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเกิดวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE พบว่าวอเทอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือวอเทอร์ทรี

อิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของฉนวน XLPE และมีทิศทางยาวไปตามการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะเกิดขึ้นกระจายกันไปในฉนวนสายเคเบิล วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่มีขนาดที่ยาวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณฉนวนที่ติดกับกำบังฉนวนด้านนอก และวอเตอร์ทรีอิงอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้น คือ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป ที่เกิดขึ้นจากรูเจาะที่มีการเจาะไว้ซึ่งมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายครีป คล้ายพัดหรือคล้ายลูกบอล วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตามการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่มีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในบทที่ 4

ในการทดลองจะทำการศึกษาการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลตามสภาวะที่ทำการศึกษาวิจัย ได้แก่ ศึกษาผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่มีผลต่อการเกิดและขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดและขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง โดยทำการบันทึกขนาดของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้น เพื่อนำค่าที่บันทึกมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวอเตอร์ทรีอิงเทียบกับชนิดของสารละลายและอุณหภูมิในการทดสอบ ในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 แสดงขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์และแสดงจำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE และตารางที่ 6.3 แสดงขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป

ตารางที่ 6.1 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

ขนาดของวอเตอร์ทรีอิง แบบคล้ายโบว์		อุณหภูมิห้อง			อุณหภูมิ 50°C		
		CuSO_4	KNO_3	NaCl	CuSO_4	KNO_3	NaCl
ส่วนที่ 1	ความยาวสูงสุด (μm)	205	142	135	335	265	223
	ความยาวต่ำสุด (μm)	25	27	23	27	28	35
	ความยาวเฉลี่ย (μm)	77	63	59	114	102	82
ส่วนที่ 2	ความยาวสูงสุด (μm)	190	156	124	274	204	217
	ความยาวต่ำสุด (μm)	34	28	27	27	15	47
	ความยาวเฉลี่ย (μm)	78	72	58	108	104	94
ส่วนที่ 3	ความยาวสูงสุด (μm)	230	167	132	266	245	190
	ความยาวต่ำสุด (μm)	30	25	30	33	27	28
	ความยาวเฉลี่ย (μm)	80	66	61	103	112	81
ความยาวเฉลี่ย (μm)		78	67	59	108	106	86
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D)		1.527	4.582	1.527	5.507	5.291	7.234



รูปที่ 6.23 ความยาวของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ของสารละลายแต่ละชนิด

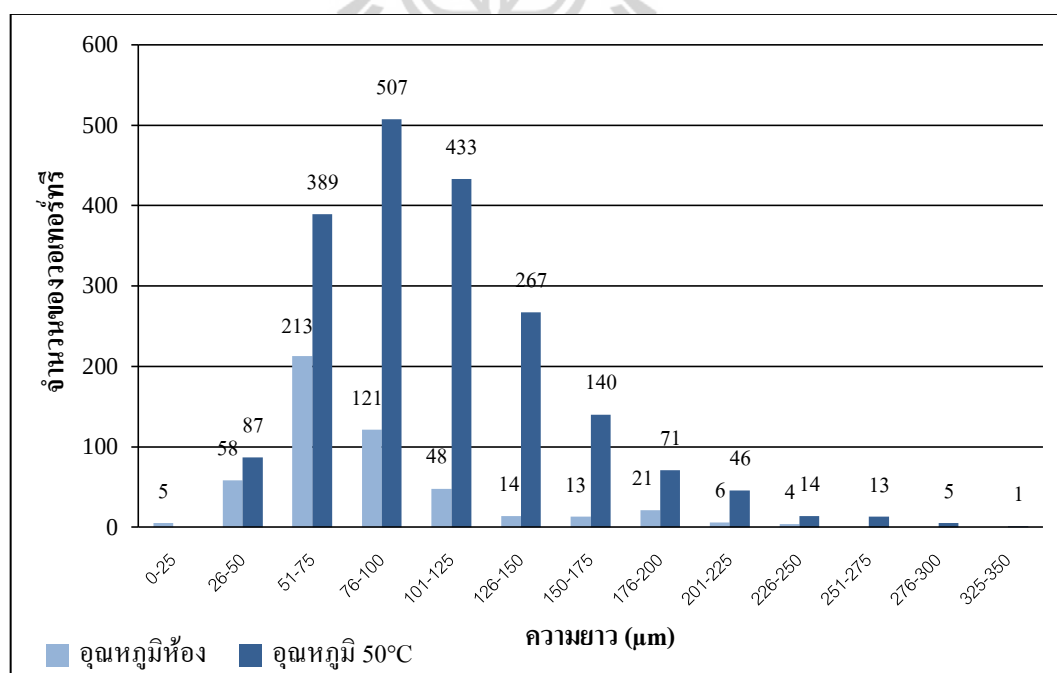
จากตารางที่ 6.1 ความยาวเฉลี่ยหาได้จาก ความยาวของวอเทอร์ทรีอิงรวม/จำนวนของวอเทอร์ทรีอิงทั้งหมด ความยาวเฉลี่ยของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละส่วนของสายเคเบิลที่นำมาตรวจสอบมีค่าไม่แตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าความเครียดทางกลในการวางสายเคเบิลในการทดสอบไม่มีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง และรูปที่ 6.23 ความยาวของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ จะเห็นได้ว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีผลต่อการเจริญเติบโตของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์มากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรดและโซเดียมคลอไรด์ โดยเฉพาะในการทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C วอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะมีขนาดยาวกว่าวอเทอร์ทรีอิงจากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 6.2 จำนวนของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE

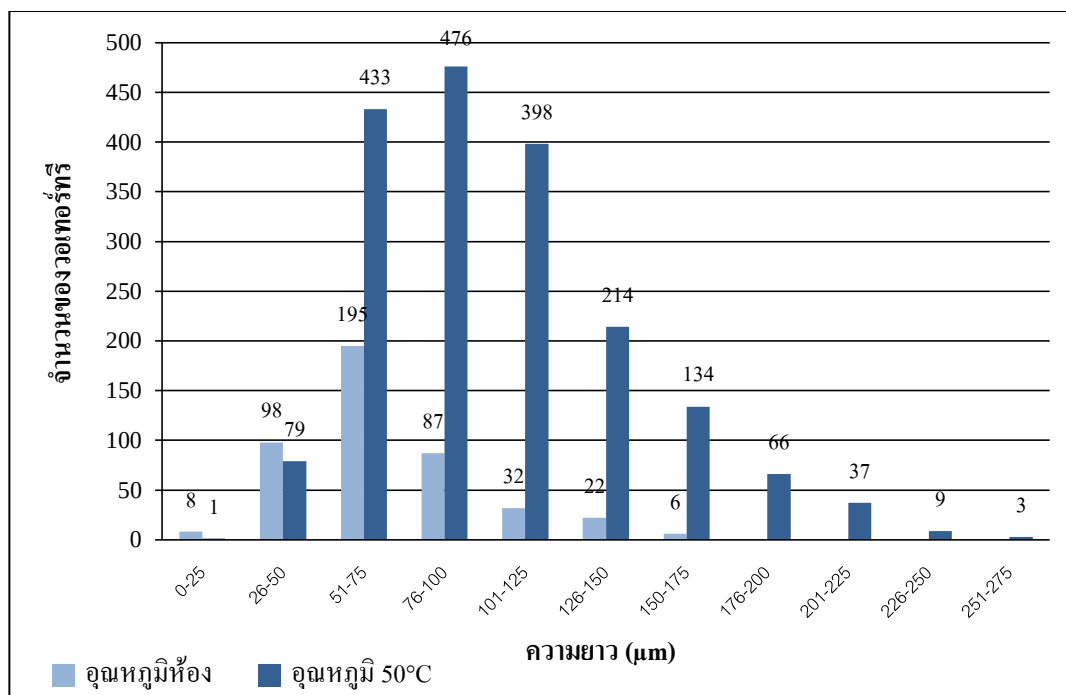
ความยาว (μm)	จำนวนของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์					
	อุณหภูมิห้อง			อุณหภูมิ 50°C		
	CuSO ₄	KNO ₃	NaCl	CuSO ₄	KNO ₃	NaCl
0 - 25	5	8	5	-	1	-
26 - 50	58	98	177	87	79	98
51 - 75	213	195	156	389	433	486
76 - 100	121	87	65	507	476	423
101 - 125	48	32	26	433	398	321

126 - 150	14	22	15	267	214	189
151 - 175	13	6	-	140	134	98
176 - 200	21	-	-	71	66	21
201 - 225	6	-	-	46	37	2
226 - 250	4	-	-	14	8	-
251 - 275	-	-	-	13	1	-
276 - 300	-	-	-	5	-	-
325 - 350	-	-	-	1	-	-
จำนวนของวอเตอร์ทรีอิ่งรวม	503	448	444	1973	1847	1638
ความหนาแน่นของวอเตอร์ทรีอิ่ง	6.49	5.78	5.72	25.44	23.81	21.12

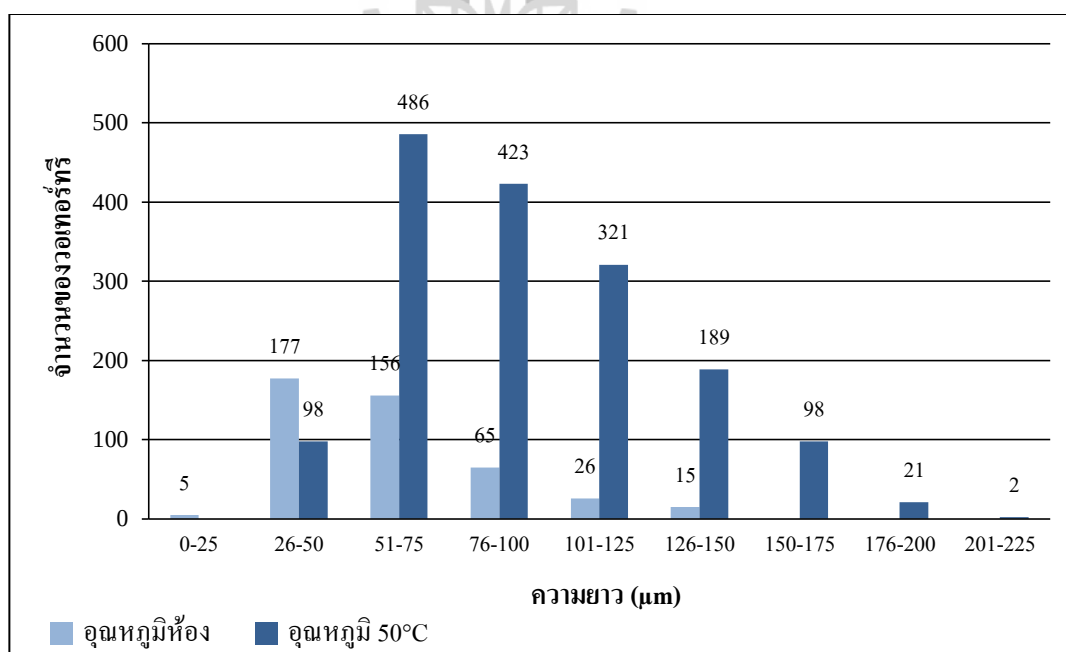
จากตารางที่ 6.2 แสดงจำนวนของวอเตอร์ทรีอิ่งแบบคล้ายโบริวที่เพิ่มขึ้นในฉนวน XLPE ความหนาแน่นของวอเตอร์ทรีอิ่ง คือ จำนวนของวอเตอร์ทรีอิ่งรวม/ปริมาตรของฉนวน XLPE ที่ทำการตรวจสอบ ในงานวิจัยนี้สายเคเบิลหนึ่งเส้น ฉนวนถูกตัดออกมาทั้งหมด 9 ชิ้น ความยาวชิ้นละ 2.5 cm และนำมาคำนวณหาปริมาตร ดังนั้น ฉนวน XLPE ที่ถูกนำมาตรวจสอบทั้งหมด 77.54 cm^3



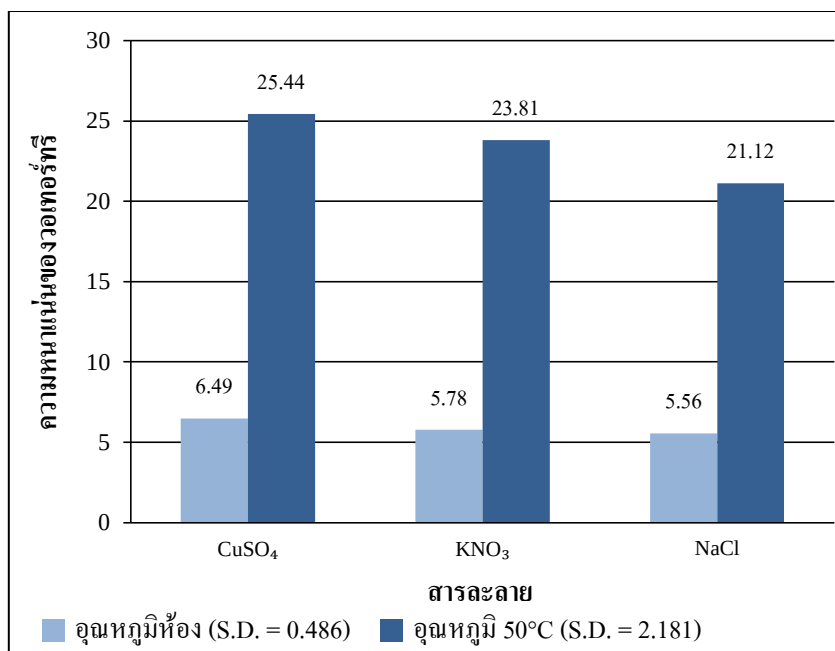
รูปที่ 6.24 จำนวนของวอเตอร์ทรีอิ่งแบบคล้ายโบริวในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)



รูปที่ 6.25 จำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3)



รูปที่ 6.26 จำนวนของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

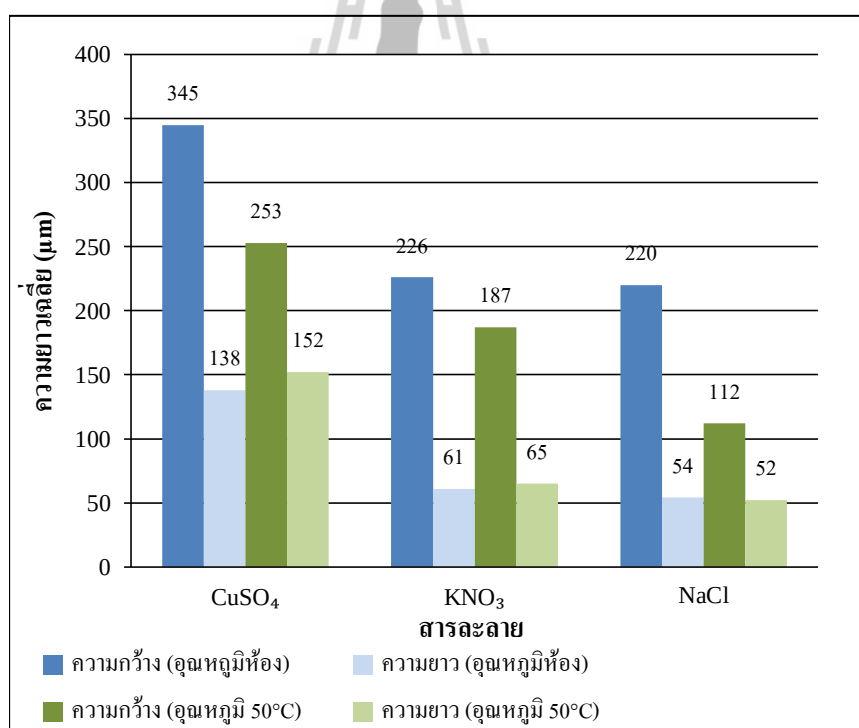


รูปที่ 6.27 ความหนาแน่นของวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.24 - รูปที่ 6.26 แสดงจำนวนของวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในฉนวนสายเคเบิล วอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์ส่วนใหญ่มีความยาวอยู่ในช่วง 75-125 μm สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีผลต่อการเกิดวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์มากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์ และเห็นได้ชัดว่า จำนวนและความยาวของวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์มีการเกิดขึ้นจำนวนมากและมีความยาวมากในการทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C มากกว่าในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และในรูปที่ 6.27 แสดงความหนาแน่นของวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิ ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C มีผลอย่างมากต่อการเกิดวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ อาจพูดได้ว่า สภาวะอุณหภูมิสูงมีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ ส่วนผลของสารละลายนั้น โดยเฉลี่ยแล้ววอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายทั้งสามชนิด เกิดขึ้นในจำนวนที่ไม่ต่างกันมากนักอยู่กับอุณหภูมิ วอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์มีการเริ่มเกิดจากสารปนเปื้อนหรือช่องว่างขนาดเล็ก ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน สารปนเปื้อนหรือช่องว่างนี้就会有ความดันออกซิเดชันสูงจากการกระบวนการผลิตสายเคเบิล เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าและน้ำ จึงทำให้ฉนวนสายเคเบิลเกิดความอ่อนตัวจากความร้อน ทำให้จุดสารปนเปื้อนหรือช่องว่างที่มีความดันสูงนั้นมีการแพร่กระจายออกมามากจนนั้น เกิดเป็นวอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ (Steennis, 1989)

ตารางที่ 6.3 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิ่งแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

ขนาดของวอเตอร์ทรีอิ่ง แบบคล้ายครีป		อุณหภูมิห้อง			อุณหภูมิ 50°C		
		CuSO ₄	KNO ₃	NaCl	CuSO ₄	KNO ₃	NaCl
ส่วนที่ 1	ความกว้างเฉลี่ย (μm)	348	221	249	235	199	110
	ความยาวเฉลี่ย (μm)	143	62	59	157	69	56
ส่วนที่ 2	ความกว้างเฉลี่ย (μm)	348	220	204	267	187	120
	ความยาวเฉลี่ย (μm)	131	61	53	157	71	51
ส่วนที่ 3	ความกว้างเฉลี่ย (μm)	339	236	208	256	174	106
	ความยาวเฉลี่ย (μm)	141	59	49	141	54	49
ความกว้างเฉลี่ย (μm)		345	226	220	253	187	112
ความยาวเฉลี่ย (μm)		138	61	54	152	65	52



รูปที่ 6.28 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิ่งแบบคล้ายครีปของสารละลายแต่ละชนิด

จากตารางที่ 6.3 แสดงขนาดของวอเตอร์ทรีอิ่งแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE วอเตอร์ทรีอิ่งแบบคล้ายครีปในฉนวน XLPE ในแต่ละส่วนที่ได้นำมา

ตรวจสอบจะมีความยาวเฉลี่ยและความกว้างเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมาก และรูปที่ 6.28 แสดงขนาดของวอเตอร์ริงแบบคล้ายครีป วอเตอร์ริงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C มีความยาวเฉลี่ยใกล้เคียงกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่ในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง วอเตอร์ริงแบบคล้ายครีปจะมีขนาดความกว้างมากกว่าในการทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C และวอเตอร์ริงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีความยาวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์

6.2.4 ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองการเกิดวอเตอร์ริงในสายเคเบิล ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายที่นำมาใช้ในการทดลองทั้งก่อนและหลังการทดลองจะถูกวัดค่า ดังแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายจากการทดลองการเกิดวอเตอร์ริงในสายเคเบิล

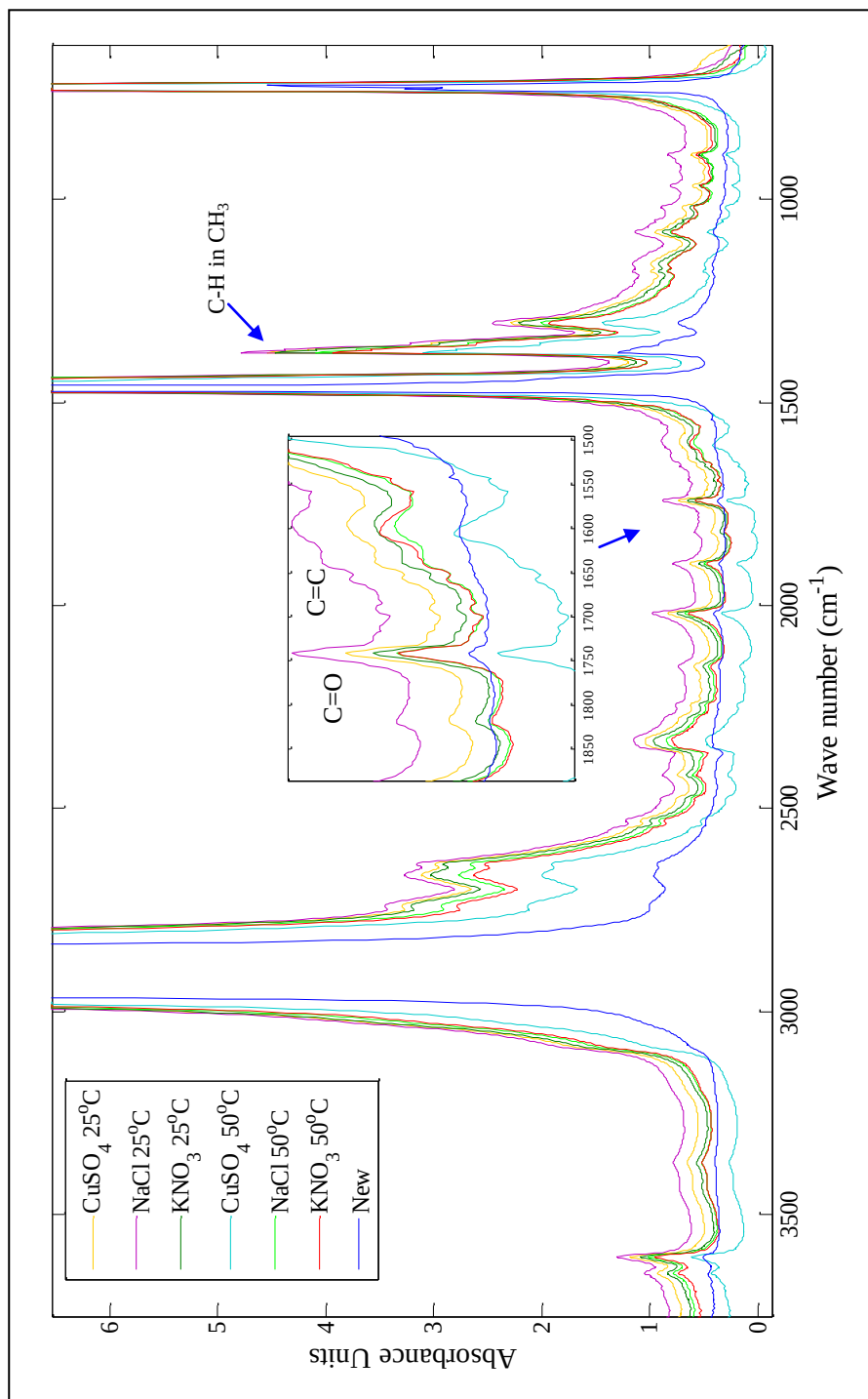
การทดสอบ		ค่าความนำไฟฟ้า (mS)				ค่า pH			
		น้ำกลั่น	CuSO ₄	KNO ₃	NaCl	น้ำกลั่น	CuSO ₄	KNO ₃	NaCl
ก่อนทำการทดสอบ		2.2 μ S	1.34	1.47	1.17	6.18	4.56	5.20	5.71
หลังทำการทดสอบ อุณหภูมิห้อง	รอบที่ 1	-	2.54	2.66	2.53	-	4.02	5.04	5.62
	รอบที่ 2	-	3.46	2.59	3.41	-	3.83	4.89	5.47
	รอบที่ 3	-	3.35	2.87	3.32	-	3.98	5.95	5.51
หลังทำการทดสอบ อุณหภูมิ 50 °C	รอบที่ 1	-	6.65	5.59	4.98	-	2.80	6.13	5.23
	รอบที่ 2	-	5.89	6.67	4.56	-	3.21	5.75	5.46
	รอบที่ 3	-	7.34	5.35	5.20	-	2.76	5.56	5.55

ในตารางที่ 6.4 แสดงค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายจากการทดลอง เห็นได้ว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเป็นกรดมากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์ เป็นผลให้ในการทดสอบวอเตอร์ริงโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต มีการเจริญเติบโตและการขยายตัวของวอเตอร์ริงได้ดีกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์ ในส่วนของวอเตอร์ริงที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์จะเกิดวอเตอร์ริงขึ้นในจำนวนและความยาวที่ไม่แตกต่างกันมาก เป็นเพราะค่าการนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลาย ที่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่

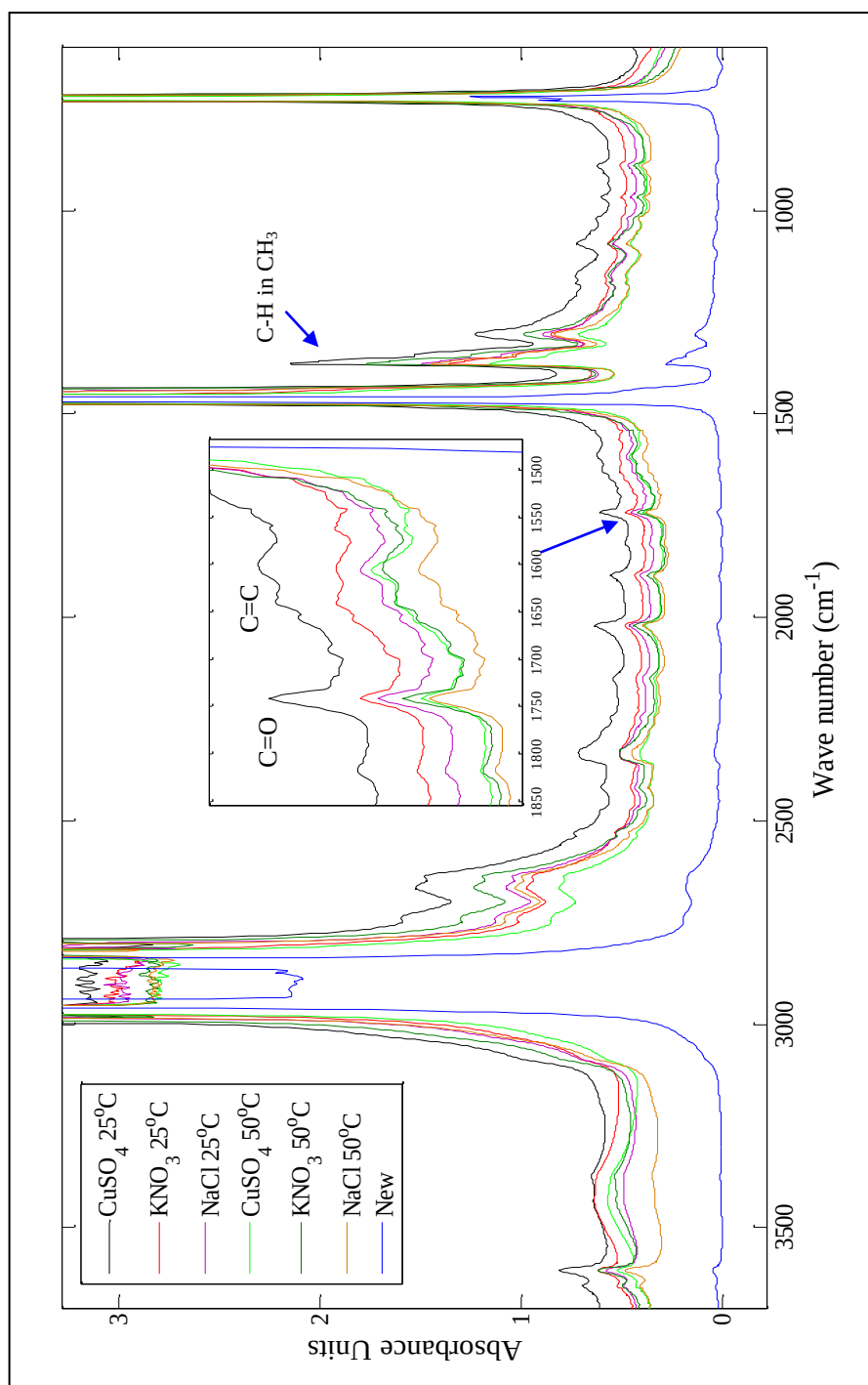
วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตจะมีจำนวนและความยาวมากกว่า สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลจะเป็นการทดสอบ แบบเปิด ซึ่งอาจทำให้สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าการความนำไฟฟ้าและค่า pH ของ สารละลายมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยก็ได้ทำการเปลี่ยนสารละลายให้ทุก 7 วัน เพื่อให้ค่าความเข้มข้นของสารละลาย 0.01 mol/l เท่าเดิมหรือใกล้เคียงมากที่สุด

6.2.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในสาย เคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิงเป็นการ ตรวจสอบเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงและที่ไม่เกิดวอเตอร์ทรีอิงจากการทดสอบโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ ผ่านการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงจะทำการตรวจสอบการเกิดออกซิเดชันและการเกิดคาร์บอนใน เซชันในฉนวน XLPE อันเป็นผลจากการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE และการเกิดการเผาไหม้ใน ฉนวน XLPE ซึ่งปริมาณการเกิดกระบวนการทั้งสองนี้สามารถบ่งชี้การเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ได้ เป็นอย่างดี โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) แบบ FTIR Microscope แบบส่องผ่าน ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์และวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 50°C ดังแสดงในรูปที่ 6.29 ถึงรูปที่ 6.30

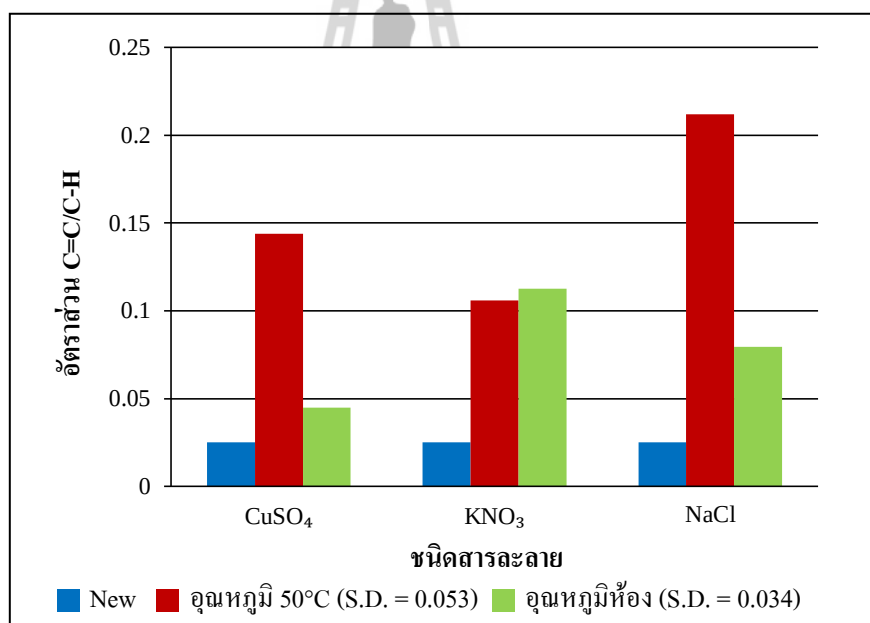


รูปที่ 6.29 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์พีนแบบคล้าย โปวที่เกิดจากสารละลายชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C

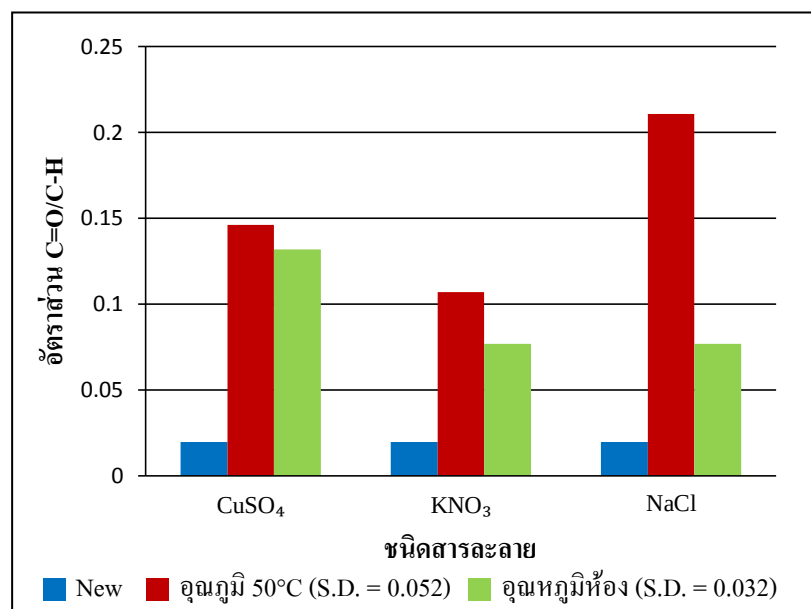


รูปที่ 6.30 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์พีนแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C

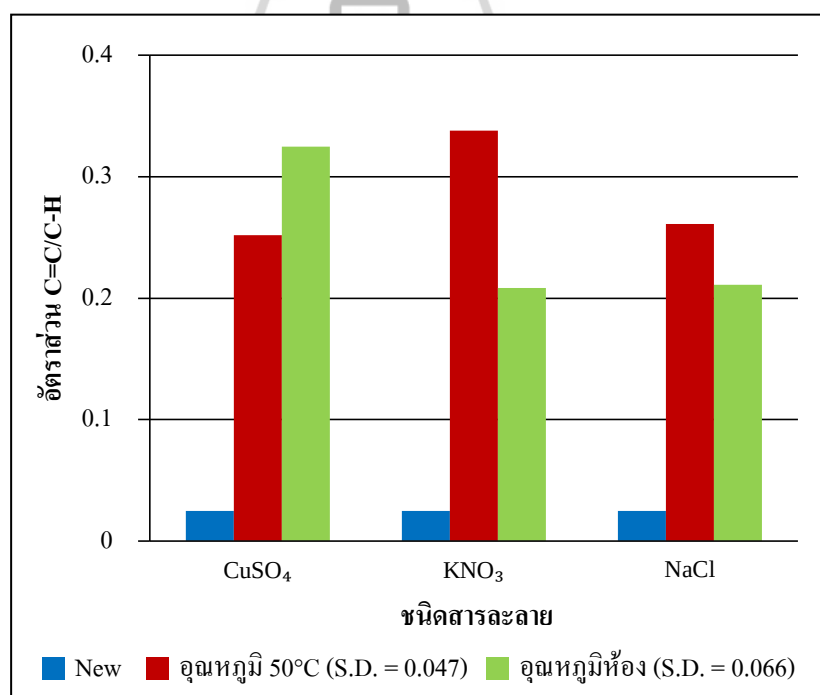
จากกราฟรูปที่ 6.29 และรูปที่ 6.30 แสดงตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์พรีอิงแบบ คล้ำโบว์และวอเทอร์พรีอิงแบบคล้ายครีปซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของพันธะ C=C (เลขคลื่น 1630 cm^{-1}) และ C=O (เลขคลื่น 1745 cm^{-1}) อันเกิดจากการเผาไหม้ และการเกิดออกซิเดชันของเนื้อ ฌนวนมีขนาดเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณพันธะเหล่านี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมี ของพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ และรวมถึงการเสื่อม อายุของสายเคเบิล แต่อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้จะพิจารณาในส่วนของปริมาณ C=O และ C=C ที่เพิ่มขึ้นเพื่อใช้ยืนยันการเสื่อมอายุของสายเคเบิลและเพื่อให้การวิเคราะห์ ปริมาณของพันธะมีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดจากเครื่องมือวัด สภาพแวดล้อม ความสม่ำเสมอของชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน หรือแม้กระทั่งตัวผู้วัดเอง จึงแสดงผลการ วิเคราะห์เป็นอัตราส่วนซึ่งได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H ใน CH_3 (เลขคลื่น $1,317\text{ cm}^{-1}$) และอัตราส่วนระหว่าง C=O ต่อ C-H ใน CH_3 แสดงดังรูปที่ 6.31-6.34



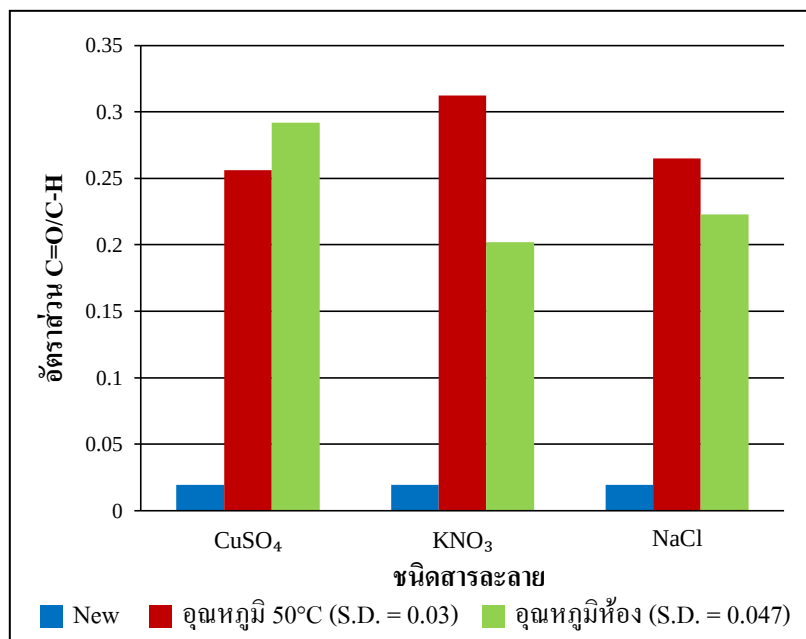
รูปที่ 6.31 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์พรีอิงแบบคล้ายโบว์ ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 6.32 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-H ของวอเตอร์ที่อิงแบบคล้ายโบว์
ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 6.33 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H ของวอเตอร์ที่อิงแบบคล้ายครีป
ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 6.34 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-H ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายคริบ
ที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 50°C

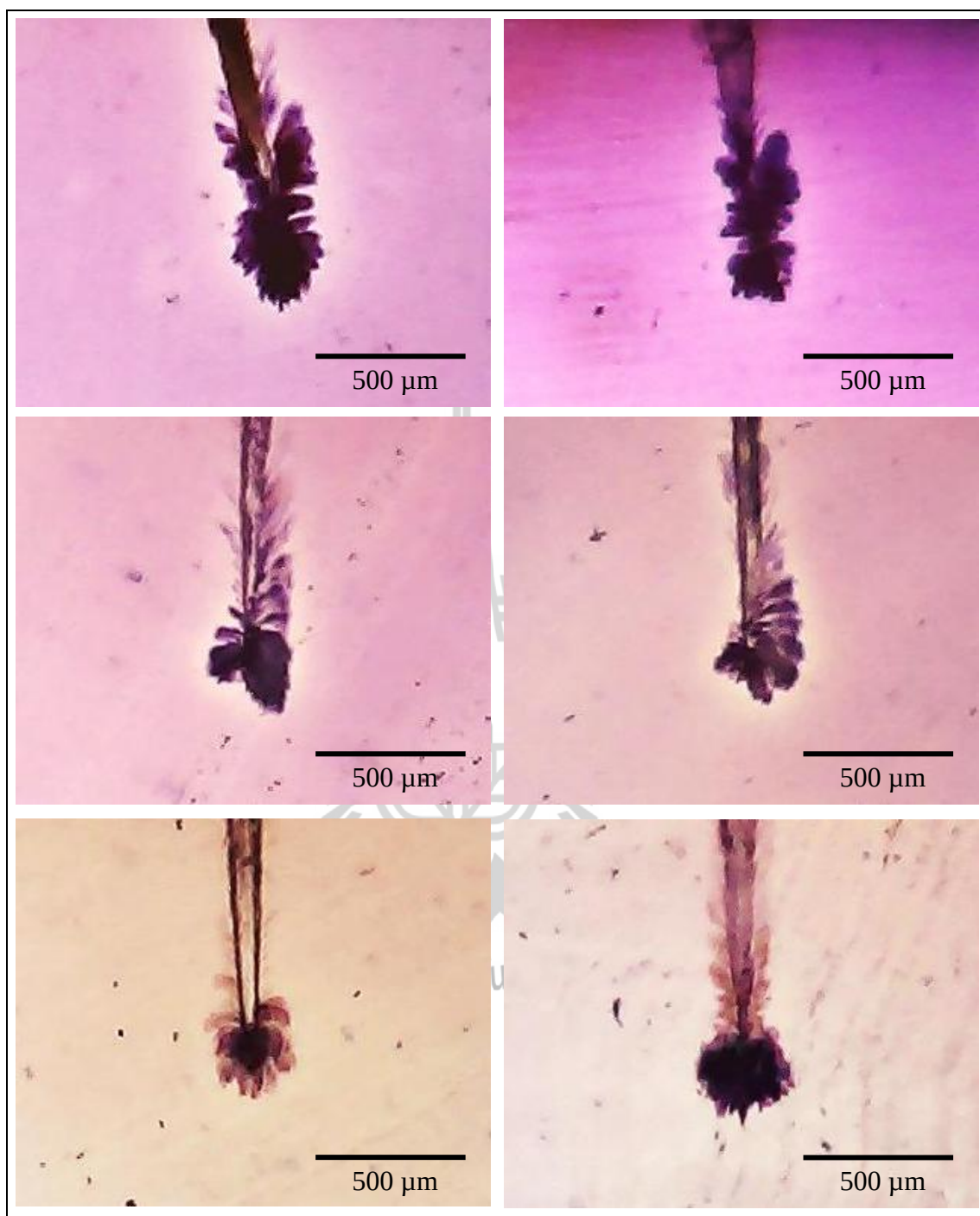
จากรูปที่ 6.31-6.34 แสดงอัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H และปริมาณ C=O ต่อ C-H ของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวน XLPE ใหม่ที่ไม่มีการทดสอบ ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิง และเห็นได้ว่าจุดที่มีการเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายคริบจะมีพันธะ C=C และ C=O เพิ่มขึ้นกว่าจุดที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แสดงให้เห็นว่าการเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายคริบมีผลต่อการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE มากกว่าการเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR นี้ จะไม่สามารถบอกได้ว่าฉนวนที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงจากสารละลายชนิดไหนเกิดวอเตอร์ทรีอิงมากกว่ากัน เนื่องจากเนื้อฉนวนที่นำไปตรวจสอบนั้นไม่ได้นำไปตรวจสอบทุกชิ้น แต่เป็นการสุ่มไปเป็นบางชิ้น ซึ่งวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ไม่เท่ากัน เช่น วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ฉนวน XLPE บางชิ้นเกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้นขนาดใหญ่และบางชิ้นวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นขนาดเล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยวิธี FTIR จึงบอกได้เฉพาะ การเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงเปรียบเทียบกับฉนวน XLPE ใหม่ที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ และสามารถบอกได้ถึงการเสื่อมสภาพจากวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 50°C

6.3 ผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE

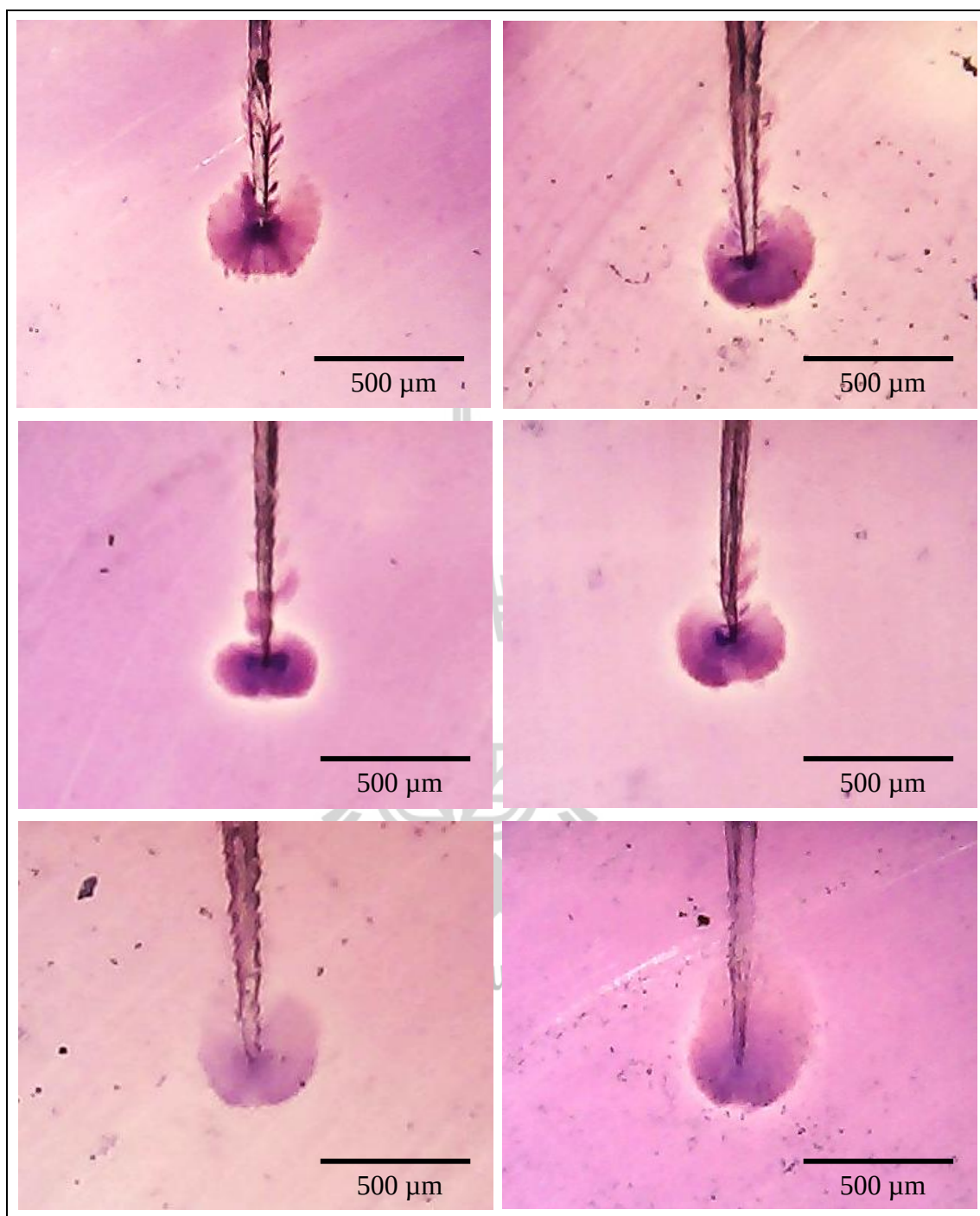
การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE เป็นการทดสอบที่เน้นไปที่วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป โดยมีความเครียดสนามไฟฟ้าและความถี่แรงดันสูงเร่งให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้น เพื่อศึกษาผลของสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป สารละลายที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จากการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแสดงให้เห็นว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงมากที่สุด ดังนั้นเพื่อศึกษาไอออนของซัลเฟตจึงทำการทดสอบโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และไอรอนซัลเฟต (FeSO_4) มาทำการทดสอบเพิ่ม

6.3.1 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE

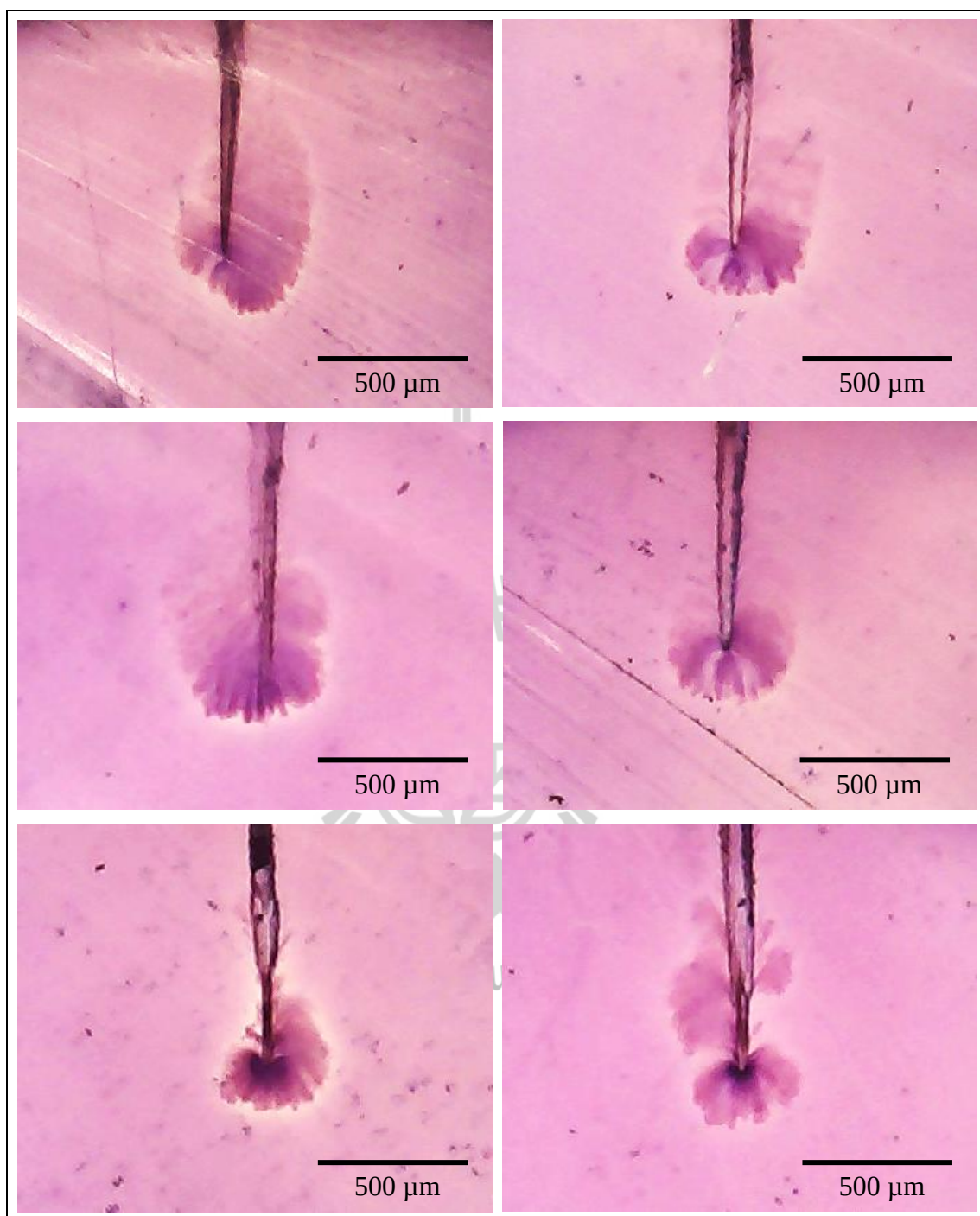
เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ แผ่นฉนวน XLPE จะถูกนำไปตัดตามขวางของแต่ละรูที่เจาะไว้และนำไปย้อมสีด้วยเมทิลีนบลู เพื่อให้วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นสังเกตเห็นได้ชัดเจน และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อสังเกตลักษณะและวัดขนาดของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้น รูปที่ 6.35 ถึงรูปที่ 6.40 แสดงวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE จากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และสารละลายไอรอนซัลเฟต (FeSO_4) ตามลำดับ



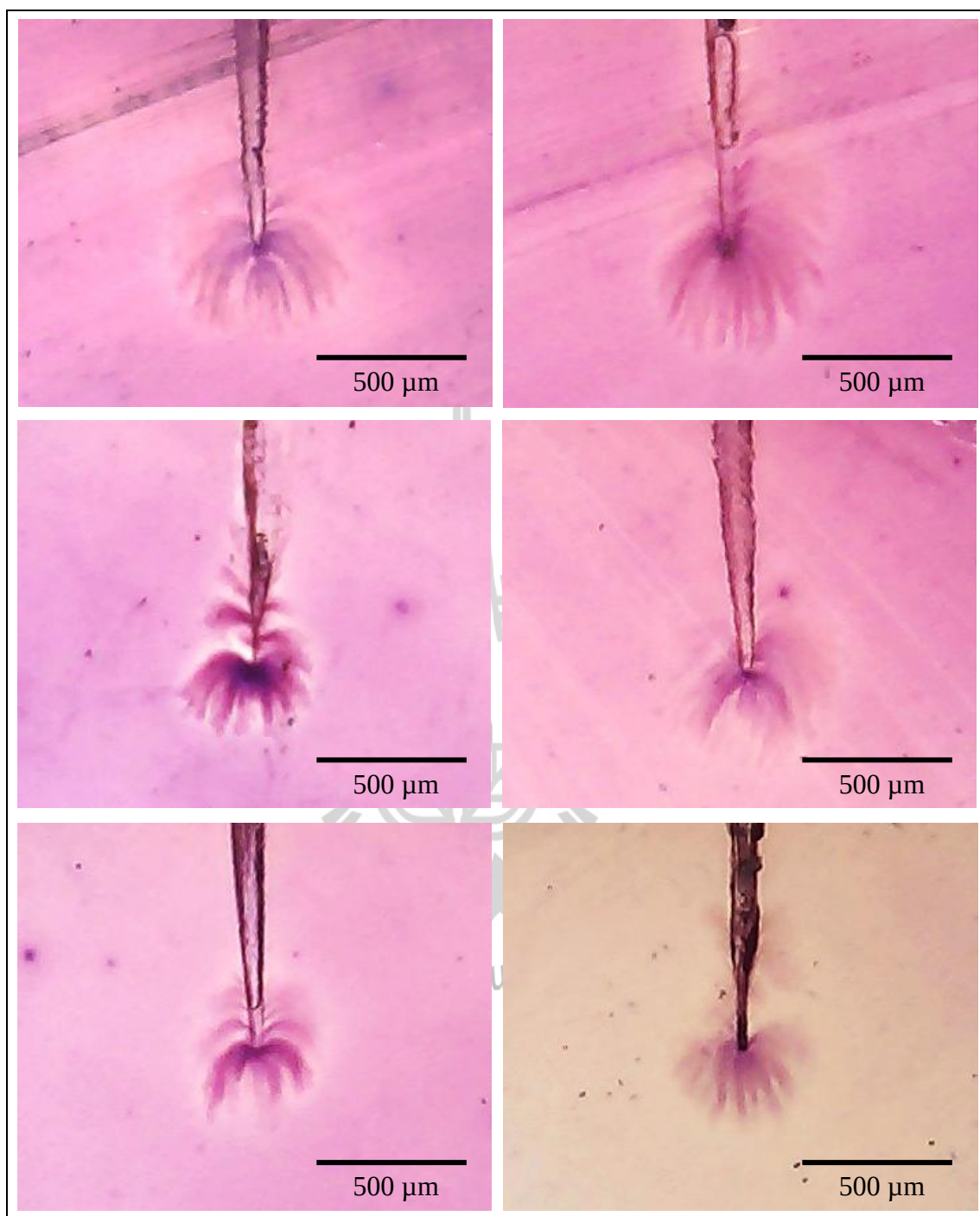
รูปที่ 6.35 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄)



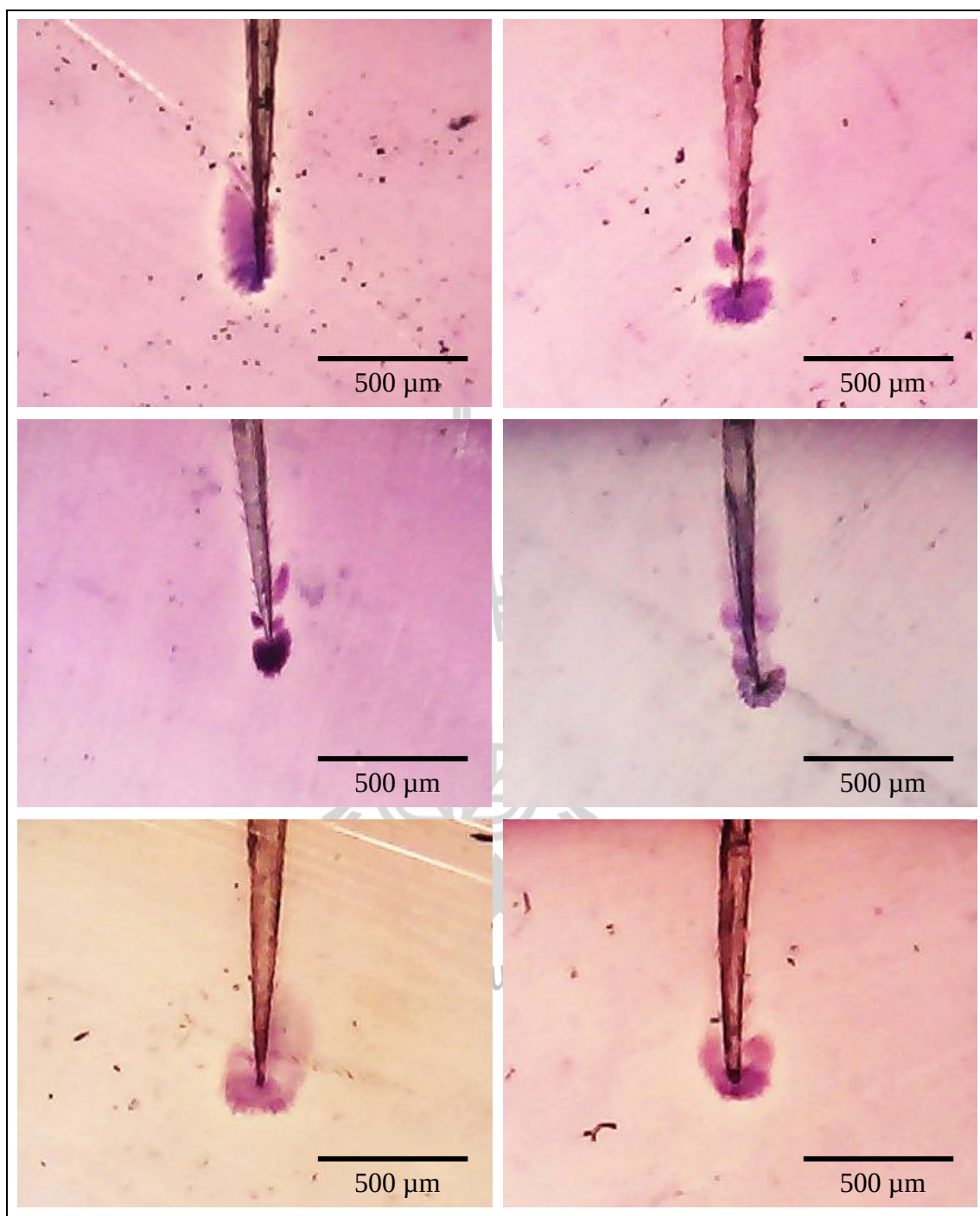
รูปที่ 6.36 วอเทอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3)



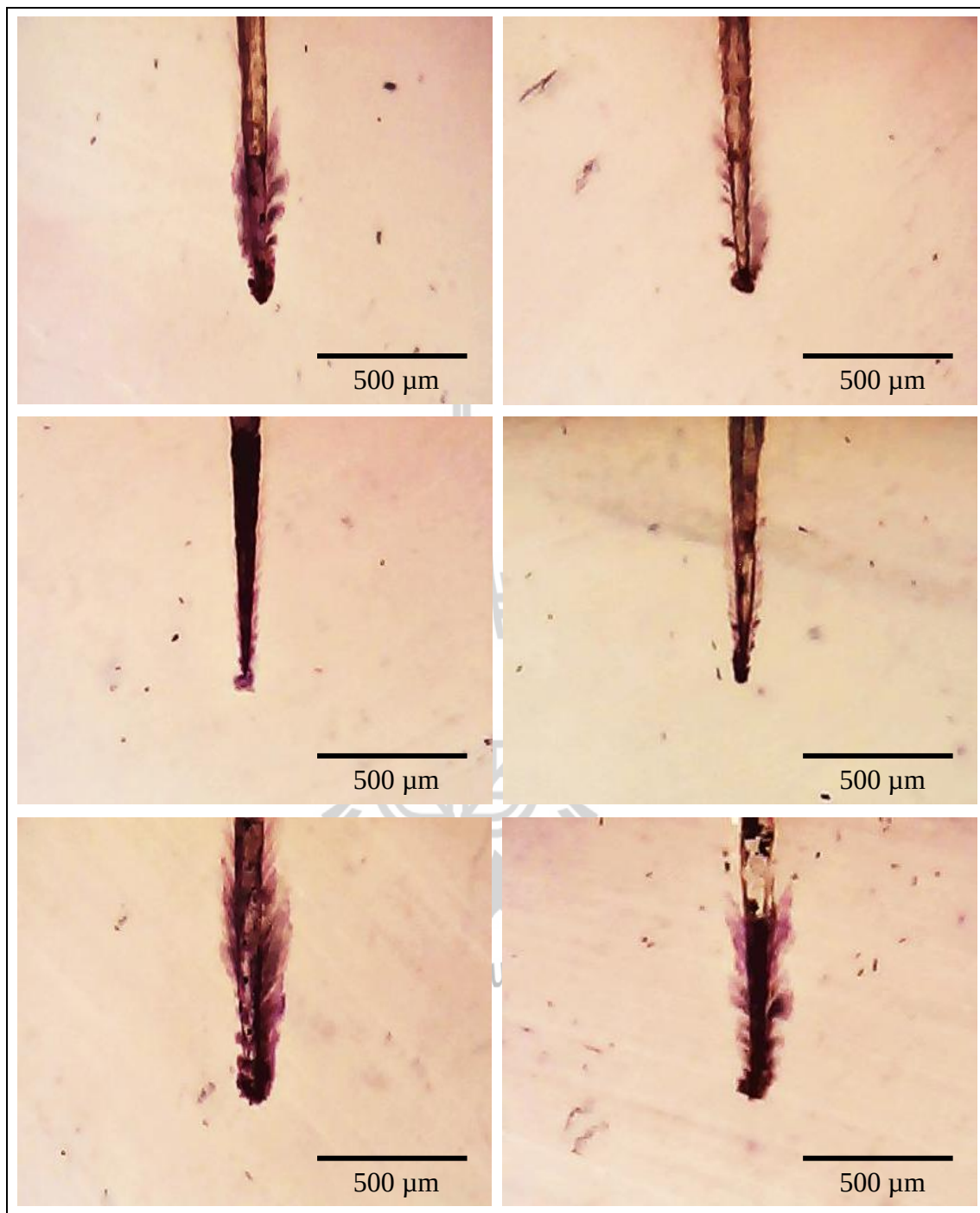
รูปที่ 6.37 วอเทอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)



รูปที่ 6.38 วอเทอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)



รูปที่ 6.39 วอเตอร์ทร้องที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)



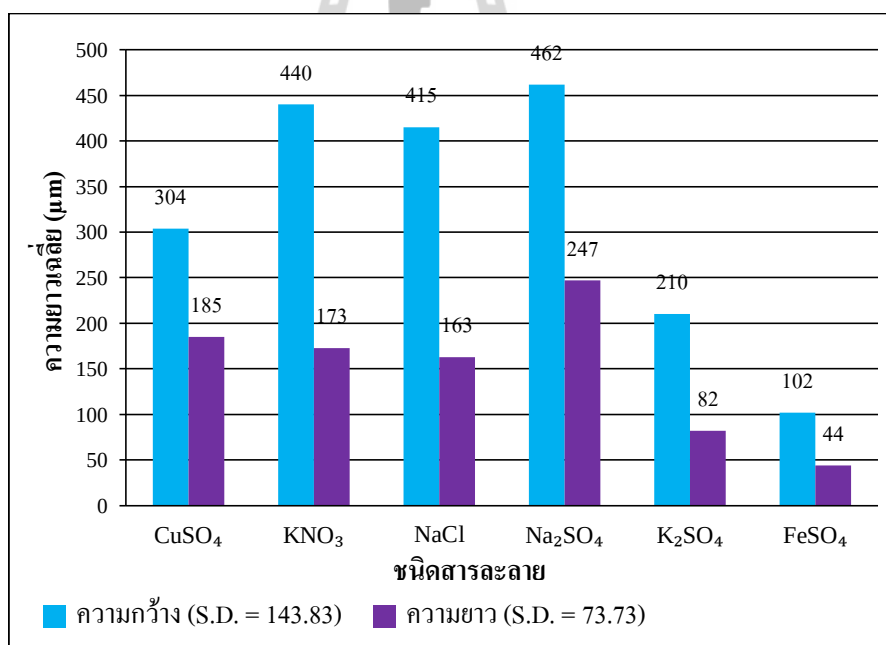
รูปที่ 6.40 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายไอรอนซัลเฟต (FeSO_4)

จากรูปที่ 6.35- รูปที่ 6.40 วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE พบว่าวอเตอร์ทรีอิงได้มีการเริ่มเกิดจากปลายของรูเข็มที่เจาะไว้ซึ่งเกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและมีทิศทางการกระจายตัวไปตามความเครียดสนามไฟฟ้าได้มีการ

จำลองไว้ในบทที่ 4 เพื่อศึกษาผลของการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ จึงได้มีการวัดขนาดเพื่อหาค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบ ดังแสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในสารละลายทั้ง 6 ชนิด

ชนิดสารละลาย	ขนาดของวอเตอร์ทรีอิง (μm)	
	ความกว้างเฉลี่ย	ความยาวเฉลี่ย
คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)	304	185
โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)	440	173
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	415	163
โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)	462	247
โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)	210	82
ไอรอนซัลเฟต (FeSO_4)	102	44



รูปที่ 6.41 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแผ่นฉนวน XLPE

จากรูปที่ 6.41 ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปจากการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE จากสารละลายสามชนิดแรกก็นำมาทดสอบ ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เห็นได้ว่าวอเตอร์ทรีอิงที่

เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีขนาดความยาวเฉลี่ยมากกว่าสารละลายชนิดอื่นๆ แต่สารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะมีขนาดความกว้างมากกว่าสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เมื่อศึกษาถึงไอออนของซัลเฟตโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟตและไอออนซัลเฟตมาทำการทดลองจะเห็นได้ว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีขนาดความกว้างและความยาวมากที่สุดและวอเตอร์ทรีอิงที่มีขนาดความยาวสั้นที่สุดเกิดจากสารละลายไอออนซัลเฟต

6.3.2 ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการทดลอง ทั้งก่อนและหลังการทดลองจะถูกวัดค่า ดังแสดงในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายจากการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE

สารละลาย		ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ		
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
ค่าความนำไฟฟ้า	น้ำกลั่น	2.2 μ S	-	-	-
	CuSO ₄	1.34 mS	1.35 mS	1.37 mS	1.35 mS
	KNO ₃	1.47 mS	1.50 mS	1.52 mS	1.48 mS
	NaCl	1.17 mS	1.18 mS	1.20 mS	1.19 mS
	Na ₂ SO ₄	2.56 mS	2.59 mS	2.57 mS	2.60 mS
	K ₂ SO ₄	2.47 mS	2.45 mS	2.49 mS	2.49 mS
	FeSO ₄	1.22 mS	1.23 mS	1.31 mS	1.30 mS
ค่า pH	น้ำกลั่น	6.18	-	-	-
	CuSO ₄	4.56	4.47	4.39	4.62
	KNO ₃	5.20	5.57	5.72	5.37
	NaCl	5.71	5.56	5.89	5.86
	Na ₂ SO ₄	5.35	5.30	5.47	5.65
	K ₂ SO ₄	5.44	5.75	5.84	5.51
	FeSO ₄	5.10	5.10	5.12	5.08

ตารางที่ 6.7 คุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE

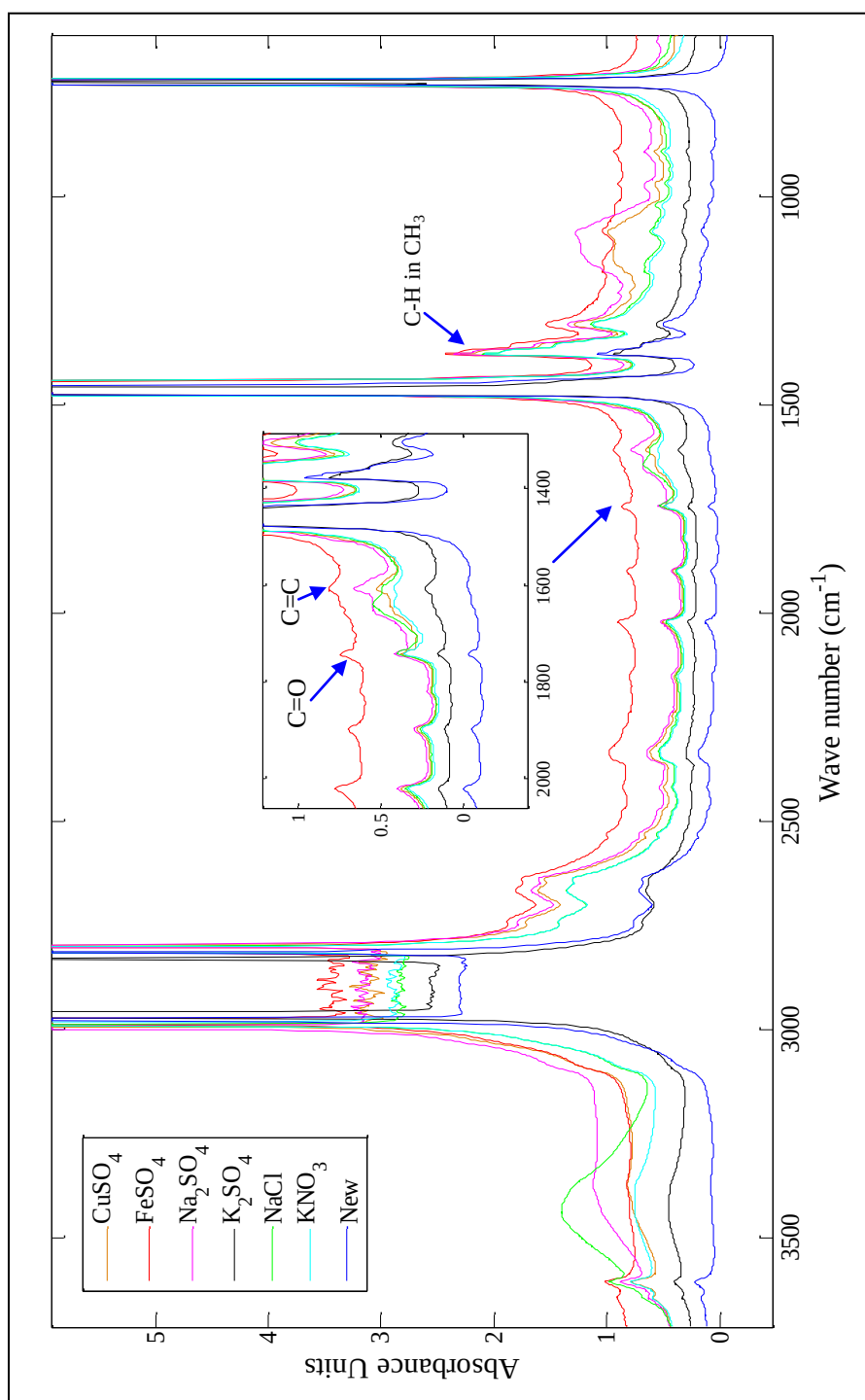
คุณสมบัติ	Cu	Na	K	Fe
อิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity)	1.9	0.93	0.82	1.65
รัศมีไอออน (Ionic Radii) (nm)	0.57	0.99	1.37	0.64
น้ำหนักอะตอม (Atomic weight)	63.5	23	39	55

จากตารางที่ 6.6 และ 6.7 แสดงค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลาย และคุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE เห็นได้ว่าองค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าหรือค่า pH เพียงอย่างเดียว สารละลายที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็กมีแนวโน้มทำให้มีการแพร่กระจายซึมลงสู่รูเจาะหรือแพร่กระจายเข้าไปในชั้นของลามิเนตในเนื้อของฉนวน XLPE ได้ดีกว่าสารละลายที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ สารละลายที่ซึมลงสู่รูเจาะได้ดีทำให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงได้เร็ว อย่างไรก็ตาม การเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย (Patsch, 1996) คอปเปอร์ซัลเฟตก่อให้เกิดสารละลายที่เป็นกรดเจือจางซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และทองแดง (Cu) สามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อผลิตแอลดีไฮด์ เอทิลแอลกอฮอล์มาจากผลพลอยได้ในปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ XLPE ในกระบวนการผลิตสายเคเบิล แอลดีไฮด์จะสลายตัวไปเป็นอนุมูลอิสระและคีโตนที่มีส่วนในการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ จึงทำให้ทองแดงมีผลต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิงอย่างมาก (King, 1995) จากการทดลองโดยนำไอออนของซัลเฟตมาทำการทดลองพบว่าสารละลายที่มีผลในการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงมากที่สุดคือสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งเป็นผลมาจากโซเดียม (Na) ที่นำไฟฟ้าได้ดีและมีรัศมีไอออนขนาดเล็ก คอปเปอร์ (Cu) ถึงจะมีรัศมีไอออนขนาดเล็กกว่าโซเดียม แต่ค่าความนำไฟฟ้าของคอปเปอร์ไม่ดีเท่าโซเดียม ดังนั้นการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งแต่ยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยมาประกอบกัน

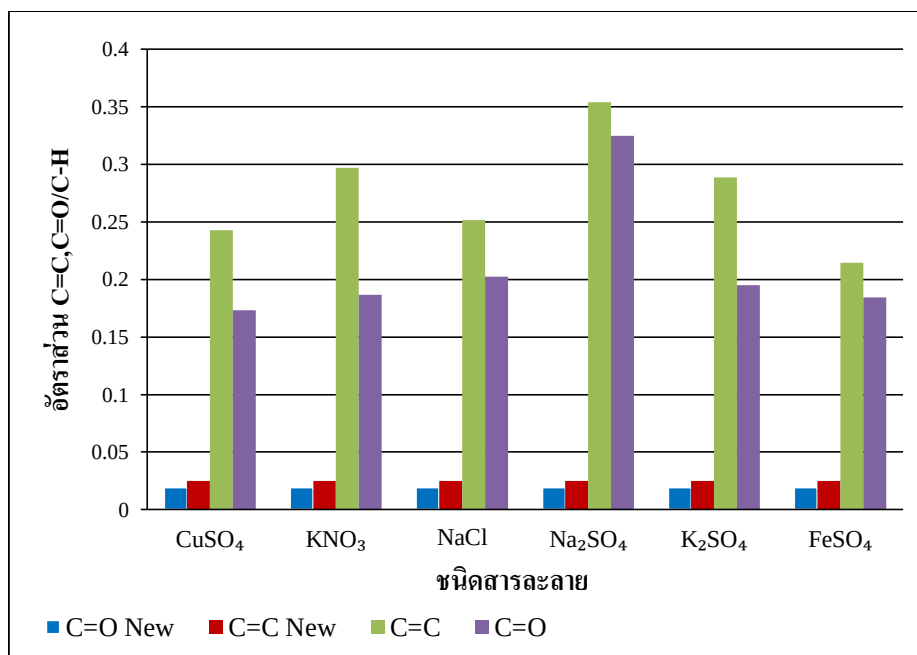
6.3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในแผ่นฉนวน XLPE

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากรูเข็มที่เจาะไว้ในแผ่นฉนวน XLPE เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงมีการตรวจสอบการเกิดออกซิเดชันและการเกิดคาร์บอนในเซชันในแผ่นฉนวน XLPE ผลการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็นการทำ FTIR mapping ในจุดที่เกิดวอเตอร์ทรี

อิงและแสดงตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่อิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) และไอออนซัลเฟต (FeSO_4) ดังแสดงในรูปที่ 6.42



รูปที่ 6.42 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่อิงแบบคล้ายคิริบที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 6.43 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C และ C=O ต่อ C-H ที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE

จากรูปที่ 6.43 แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C และ C=O ต่อ C-H ในฉนวน XLPE ที่ผ่านการทดสอบวอเตอร์ทรีอิง อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-H แสดงให้เห็นว่าเกิดการเผาไหม้หรือการคาร์บอนเซชันมากกว่าเกิดการออกซิเดชัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณทั้งสองเป็นเครื่องยืนยันถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิง

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 นี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE การเตรียมฉนวนสำหรับนำไปตรวจสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR จากการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE มี 2 แบบคือ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์และวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิล มีทิศทางการกระจายตัวไปตามสนามไฟฟ้า วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่มีขนาดยาวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในเนื้อของฉนวนใกล้กับกำบังฉนวนด้านนอก วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะเริ่มเกิดจากจุดหรือสารปนเปื้อนขนาด

เล็ก ๆ และมีการกระจายออกสองด้านเท่า ๆ กันและมีรูปร่างคล้ายโบว์หรือมีรูปร่างที่สมมาตร เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ ในอุณหภูมิทดสอบที่ 50°C วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด มากกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 2-3 เท่า พิจารณาผลของสารละลาย วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตจะมีขนาดที่ยาวและมีจำนวนที่มากกว่าวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์

วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลจะเริ่มเกิดจากปลายของรูที่เจาะไว้และกระจายออกไปตามความเครียดสนามไฟฟ้าคล้ายกับที่ได้มีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในบทที่ 4 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50°C วอเตอร์ทรีอิงจะมีขนาดความยาวมากกว่าวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดในอุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิห้องวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปจะมีความกว้างมากกว่า จึงมีรูปร่างคล้ายครีป คลายพัดหรือคล้ายลูกบอล พิจารณาผลของสารละลาย วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตจะมีความยาวมากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมคลอไรด์ แต่จะยาวกว่าไม่มากนัก

วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE จะเกิดขึ้นที่ปลายและรอบ ๆ รูที่เจาะไว้ โดยจะมีทิศทางกระจายตัวไปตามการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า คล้ายกับที่ได้มีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าไว้ในบทที่ 4 รูปร่างของวอเตอร์ทรีอิงจะมีลักษณะคล้ายครีป คลายพัดหรือคล้ายลูกบอล วอเตอร์ทรีอิงที่มีขนาดยาวที่สุดเกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR จะเป็นการยืนยันถึงการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE โดยมีการเพิ่มขึ้นของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ และ $\text{C}=\text{O}$ จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากผลการวิเคราะห์ การเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปจะทำให้มีพันธะ $\text{C}=\text{C}$ และ $\text{C}=\text{O}$ เพิ่มขึ้น กว่าที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แสดงให้เห็นว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE มากกว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR นี้ จะไม่สามารถบอกได้ว่าฉนวนที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงจากสารละลายชนิดไหนเกิดวอเตอร์ทรีอิงมากกว่ากัน เนื่องจากเนื้อฉนวนที่นำไปตรวจสอบนั้นไม่ได้นำไปตรวจสอบทุกชิ้น แต่เป็นการสุ่มไปเป็นบางชิ้น ซึ่งวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ไม่เท่ากัน เช่น วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ฉนวน XLPE บางชิ้นเกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้นขนาดใหญ่และบางชิ้นวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นขนาดเล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยวิธี FTIR จึงบอกได้เฉพาะ การเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงเปรียบเทียบกับฉนวน XLPE ใหม่ที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE ระบบจำหน่าย 22 kV และการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของสารละลายชนิดต่าง ๆ และผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์และวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ได้สำเร็จคล่องตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา โดยกล่าวถึงการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE ซึ่งเป็นการเสื่อมอายุในสายเคเบิลระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์วอเตอร์ทรีอิงกันอย่างแพร่หลาย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เพื่อหาวิธีในการป้องกันและแก้ไข เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดปกติต่าง ๆ ที่อาจส่งผลร้ายแรงต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอาจส่งผลไปยังความเชื่อมั่นของระบบต่าง ๆ เนื้อหาในบทนี้ยังรวมถึงวัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ด้วย

บทที่ 2 ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย โดยการค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE, Science Direct และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบและการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงได้ดินฉนวน XLPE อาทิเช่น วัสดุพอลิเมอร์ ประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเนื้อฉนวน คุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนพอลิเมอร์ที่นำมาทำสายเคเบิลไฟฟ้า ประวัติความเป็นมาของสายเคเบิลแรงสูง โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล

ประเภทของตัวนำไฟฟ้า คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้า การเสื่อมอายุของสายเคเบิล การเกิดปรากฏการณ์วอลเทอร์ทรีอิง และการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)

บทที่ 4 เป็นการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้วิธีทรงกระบอกซ้อนกันแนวม และ การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL จำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ถูกเจาะรูไว้ และจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นฉนวน XLPE ที่ถูกเจาะรู ซึ่งได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE อยู่ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในการใช้งานจริง กับค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวน XLPE ($E_{\max} < E_m < E_c$) วอลเทอร์ทรีอิงจะเริ่มเกิดบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและขยายตัวออกไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้า ประกอบด้วย การทดสอบ 2 การทดสอบได้แก่ การทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และการทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงของแผ่นฉนวน XLPE ซึ่งจุดประสงค์หลักของทั้งสองการทดสอบมีเป้าหมายเดียวกัน คือ เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE ในสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับรายละเอียดของการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้อธิบายในบทนี้ได้แก่ ชุดทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิง สายเคเบิลและฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีดำเนินการทดสอบ เป็นต้น

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE และผลการทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE การเตรียมฉนวนสำหรับนำไปตรวจสอบการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR และการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE

ลักษณะของวอลเทอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเกิดวอลเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE มี 2 แบบคือ วอลเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์และวอลเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป วอลเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิล มีทิศทางการกระจายตัวไปตามสนามไฟฟ้า วอลเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ที่มีขนาดยาวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในเนื้อของฉนวน ใกล้กับกำบังฉนวนด้านนอก วอลเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะเริ่มเกิดจากจุดหรือสารปนเปื้อนขนาดเล็ก ๆ กระจายออกสองด้านเท่า ๆ กันและมีรูปร่างคล้ายโบว์หรือมีรูปร่างที่สมมาตร เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ ในอุณหภูมิทดสอบที่ 50°C วอลเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด มากกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 2-3 เท่า พิจารณาผลของสารละลาย วอลเทอร์ทรีอิง

แบบคล้ายโบว์ที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตจะมีขนาดที่ยาวและมีจำนวนที่มากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมโครไรด์

วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลจะเริ่มเกิดจากปลายของรูที่เจาะไว้และกระจายออกไปตามความเครียดสนามไฟฟ้าคล้ายกับที่ได้มีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในบทที่ 4 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50°C วอเตอร์ทรีอิงจะมีขนาดความยาวมากกว่าวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดในอุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิห้องวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปจะมีความกว้างมากกว่า จึงมีรูปร่างคล้ายครีป คลายพัดหรือคล้ายลูกบอล พิจารณาผลของสารละลาย วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตจะมีความยาวมากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมโครไรด์ แต่จะยาวกว่าไม่มากนัก

วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นในการทดลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในแผ่นฉนวน XLPE จะเกิดขึ้นที่ปลายและรอบ ๆ รูที่เจาะไว้ โดยจะมีทิศทางกระจายไปตามการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า คล้ายกับที่ได้มีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าไว้ในบทที่ 4 รูปร่างของวอเตอร์ทรีอิงจะมีลักษณะคล้ายครีป คลายพัดหรือคล้ายลูกบอล วอเตอร์ทรีอิงที่มีขนาดยาวที่สุดเกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต การเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่มาประกอบกัน เช่น ความเครียดสนามไฟฟ้า ชนิดของสารละลาย สภาวะอุณหภูมิ ขนาดของโมเลกุลสารละลาย และความนำไฟฟ้าของสารละลาย เป็นต้น

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR จะเป็นการยืนยันถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE โดยมีการเพิ่มขึ้นของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ และ $\text{C}=\text{O}$ จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากผลการวิเคราะห์ การเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปจะทำให้มีพันธะ $\text{C}=\text{C}$ และ $\text{C}=\text{O}$ เพิ่มขึ้น กว่าที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แสดงให้เห็นว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE มากกว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR นี้ จะไม่สามารถบอกได้ว่าฉนวนที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงจากสารละลายชนิดไหนเกิดวอเตอร์ทรีอิงมากกว่ากัน เนื่องจากเนื้อฉนวนที่นำไปตรวจสอบนั้นไม่ได้นำไปตรวจสอบทุกชิ้น แต่เป็นการสุ่มไปเป็นบางชิ้น ซึ่งวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายชนิดต่าง ๆ ไม่เท่ากัน เช่น วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ฉนวน XLPE บางชิ้นเกิดวอเตอร์ทรีอิงขึ้นขนาดใหญ่และบางชิ้นวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นขนาดเล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยวิธี FTIR จึงบอกได้เฉพาะ การเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงเปรียบเทียบกับฉนวน XLPE ใหม่ที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ

จากผลการทดสอบและบทสรุปข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าการเสื่อมอายุของสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงมีสาเหตุมาจากความชื้นและผลกระทบจากความเครียด

สนามไฟฟ้า โดยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและสถานะอุณหภูมิที่สูงจะมีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงมากที่สุด จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

- 1) ควรติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยในการระบายความร้อนแก่วไรแอค เนื่องจากเมื่อใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานานจะเกิดความร้อนขึ้น อาจทำให้เกิดความเสียหายได้
- 2) ในการเจาะรูสายเคเบิลสำหรับทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง ควรเจาะอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ได้รูที่มีขนาดสม่ำเสมอ แต่ถ้าเจาะลึกเกินไปอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวน XLPE ในเวลาที่รวดเร็วที่กำหนด
- 3) การทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล ควรทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมหรือจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ในห้องที่ปิดมิดชิดหรือห้องแอร์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการศึกษาวิจัยและป้องกันการสั่นไหวที่จะเข้ามาทำให้เกิดความเสียหายหรืออาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

- 1) ความหนาและความเรียบของชิ้นงานมีผลต่อการตรวจสอบโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมีอย่างมาก ควรตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูง เพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าความจริงมากที่สุด
- 2) ควรศึกษาและวิจัยอัตราการเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงเทียบกับเวลา เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบเวลาในการเริ่มเกิดวอเตอร์ทรีอิงไปจนถึงการเกิดเบรกดาวน์ของสายเคเบิล

รายการอ้างอิง

- รัฐเขต เทียมศรี. (2555). การศึกษาทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับสายเคเบิลแรงสูง 22 kV. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ตำรวจ สังข์สะอาด. (2547). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง).
- อรรถพล ตะระ. (2551). คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ
- อนุชา ระวัณภัย. (2553). การหาพารามิเตอร์แบบจำลองการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับสายเคเบิลแรงสูงด้วยการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Al-Arainy, A. A., Ahaideb, A. A., Qureshi, M I., and Malik, N.H. (2004). Statistical Evaluation of Water Tree Lengths in XLPE Cables at Different Temperatures. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 11(6): 995-1006.
- Boggs, S. A., and Mashikian, M. S. (1994). Role of Semiconducting Compounds in Water Treeing of XLPE Cable Insulation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 10(1): 23-56.
- Boggs, S., Densley, J., and Kuang, J. (1998). Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 13(2): 310-315.
- Ciuprina, F., teissedre, G., and Filippini, J. C. (2001). Polyethylene Crosslinking and Water Treeing. **Polymer**. 42(18): 7841-7846.
- Dissado, L. (1982). Characterization of the growth of water trees. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. EI-17(5): 392-398.
- Garton, A., Bamji, S., Bulinski A., and Densley, J., (1987). Oxidation and Water Tree Formation in Service-Aged XLPE Cable Insulation. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. 22(4): 405-412.
- Henkel, H. J., Muller, N., Nordmann, J., Rogler, W., and Rose, W. (1987). Relationship Between the Chemical Structure and the Effectiveness of Additives in Inhibiting Water Trees. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. 22(2): 157- 161.

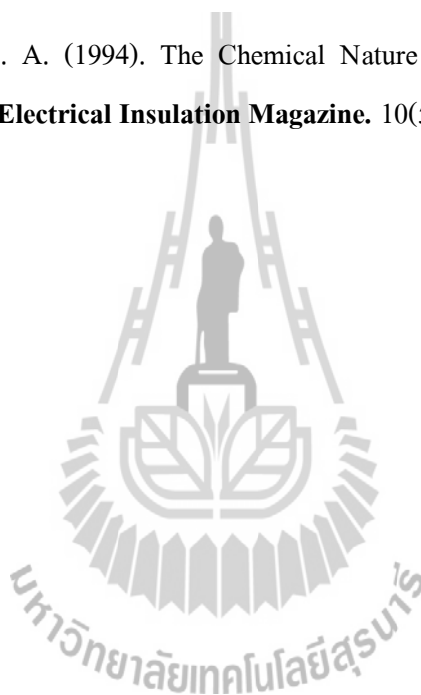
- Zong-Huai, F., and Yoshimura, N. (1996). Silver Tree. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 3(1): 131-135.
- Malik, N.H., Qureshi, M.I., and Al-Arainy, A. A. (2006). The Role of Cations in Water Tree Growth in Technical Grade XLPE Insulated Cables. **Proceedings of The International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials**. 127-130.
- Miyashita, T. (1969). Deterioration of water-immersed polyethylene coated wire by treeing. **IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference**. Boston(USA). 131-135.
- Miyashita, T. (1971). Deterioration of Water-Immersed Polyethylene-Coated Wire by Treeing. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. EI-6(3): 129-135.
- Qureshi, M.I., Malik, N.H., and Al-Arainy, A. A. (2000). Effects of Different Ionic Solutions on Statistical Length Distribution of Water Trees in XLPE Cable Insulation. **Proceedings of The International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**. 513-516.
- Qureshi, M.I., Malik, N.H., Al-Arainy, A.A., Saati, M.N., Al-Nather, O.A., and Anam, S. (2008). Investigation of Resistance Toward Water Tree Growth in XLPE Insulated MV Cables Produced in the Arabian Gulf Region. **Proceedings of The International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**. 1195 – 1198.
- Qureshi, M.I., Malik, N.H., and Al-Arainy, A.A., (2010). Impact of cations toward the water tree propensity in crosslinked polyethylene insulation. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**. 23(1) 43–48.
- Ross, R., and Smit, J.J. (1992). Composition and growth of water trees in XLPE. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. 27(3): 519-531.
- Shuvalov, M.Y., and Ovsienko, V. L. (2009). Investigation of the Life Curve for High Voltage Cable Insulation and Wet Aging of Medium Voltage Cables. **Proceedings of the 58th IWCS/IICIT International Wire & Cable Symposium**. pp.243-250.
- Steennis, E. F., and Kreuger, F. H., (1990). Water Treeing in Polyethylene Cables. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. 25(5): 989-1028.
- Thiamsri, R., Ruangakajonmathee, N., Oonsivilaiand, A., and Marungsri. B. (2011). Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treeing in 22 kV Cross-linked Polyethylene

Insulated Cable. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 5(12) 1563-1568.

Wang, H. X., Wen, X. S., and Cheng, S. K., (2007). Correlation between Insulation Parameters and Ageing Degree of XLPE Cable within CuSO_4 Electrolyte. **Proceeding of The International Conference on Electrical Engineering**. Paper No. ICEE-339.

Wang, J., Zheng, X., Li, Y., and Wu, J. (2013) The Influence of Temperature on Water Treeing in Polyethylene. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 20(2): 554-551.

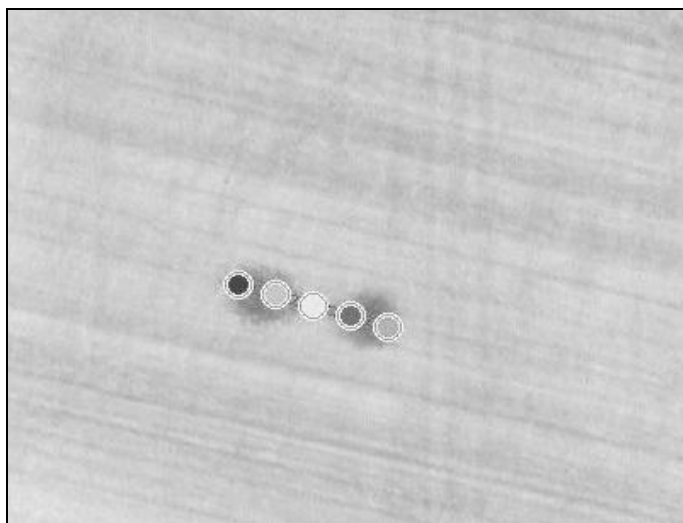
Xu, J. J., and Boggs, S. A. (1994). The Chemical Nature of Water Treeing: Theories and Evidence. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 10(5): 29-37



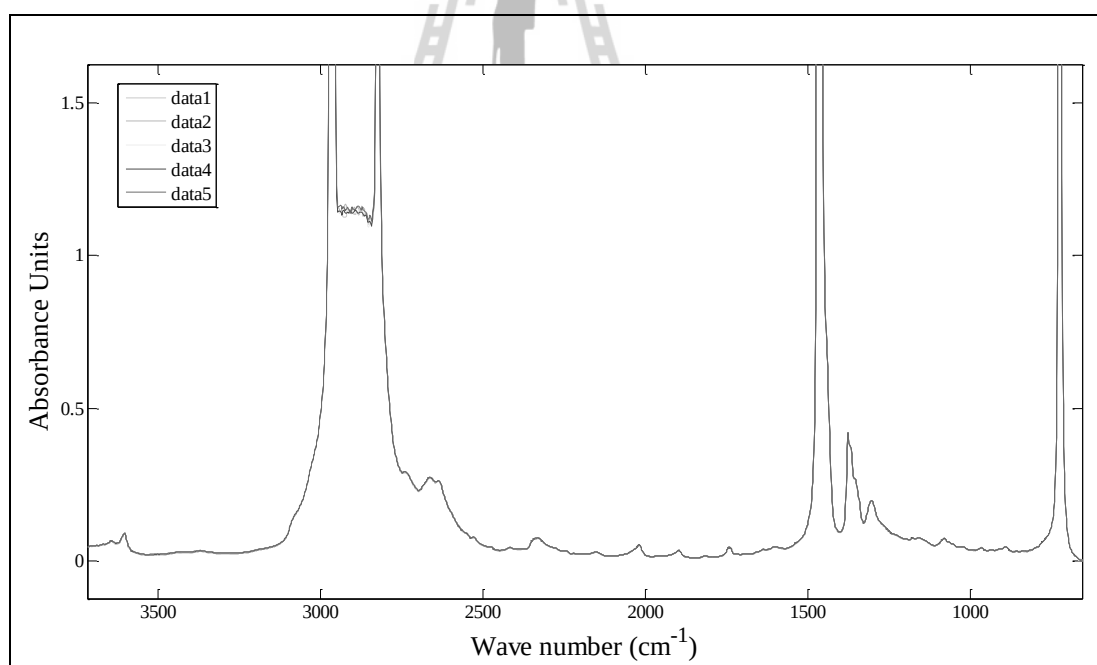


ภาคผนวก ก

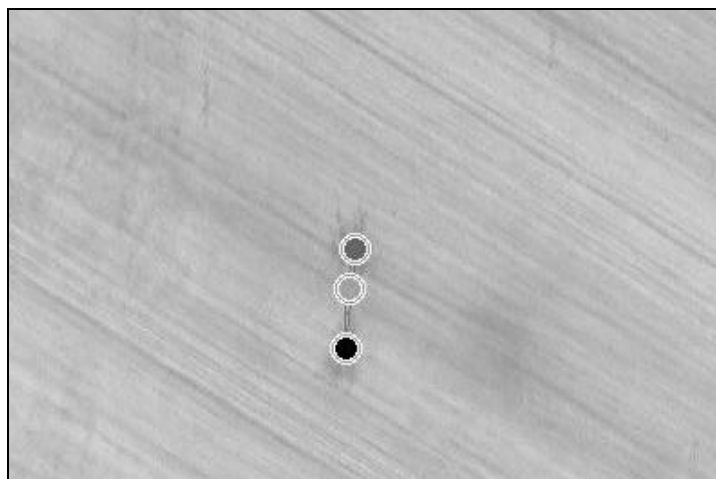
ผลการทดสอบ



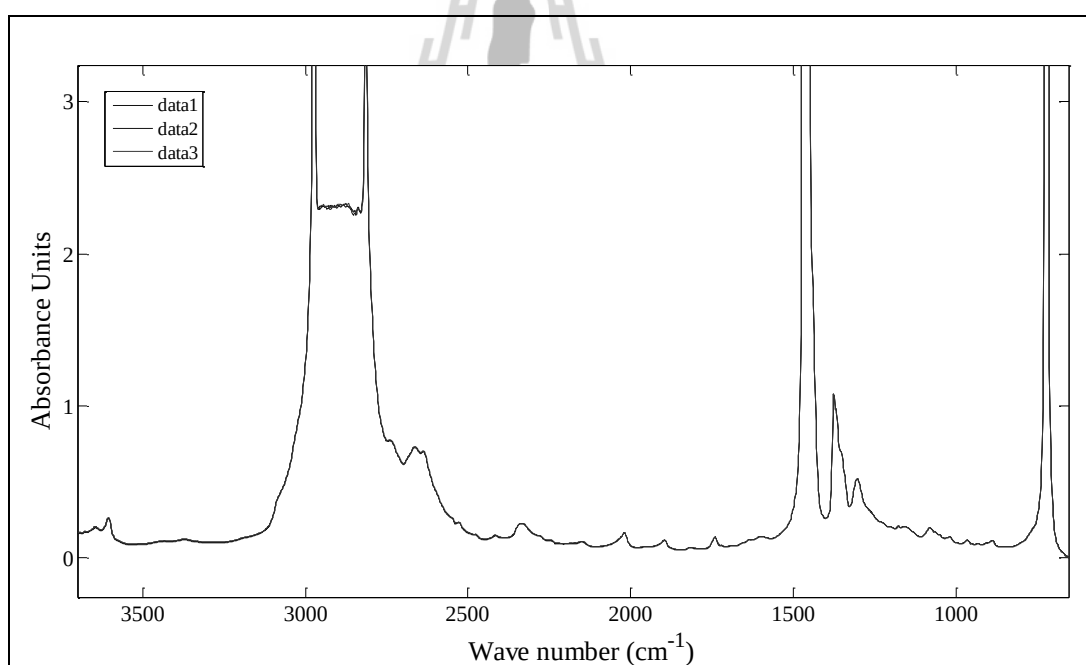
รูปที่ ก.1 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์
ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิห้อง



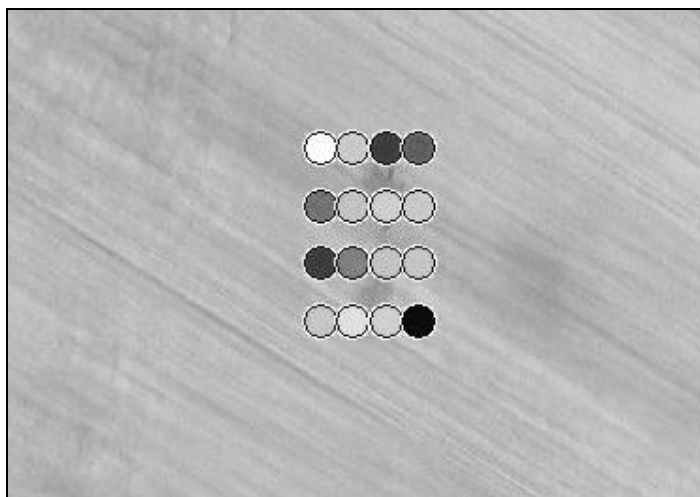
รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิห้อง



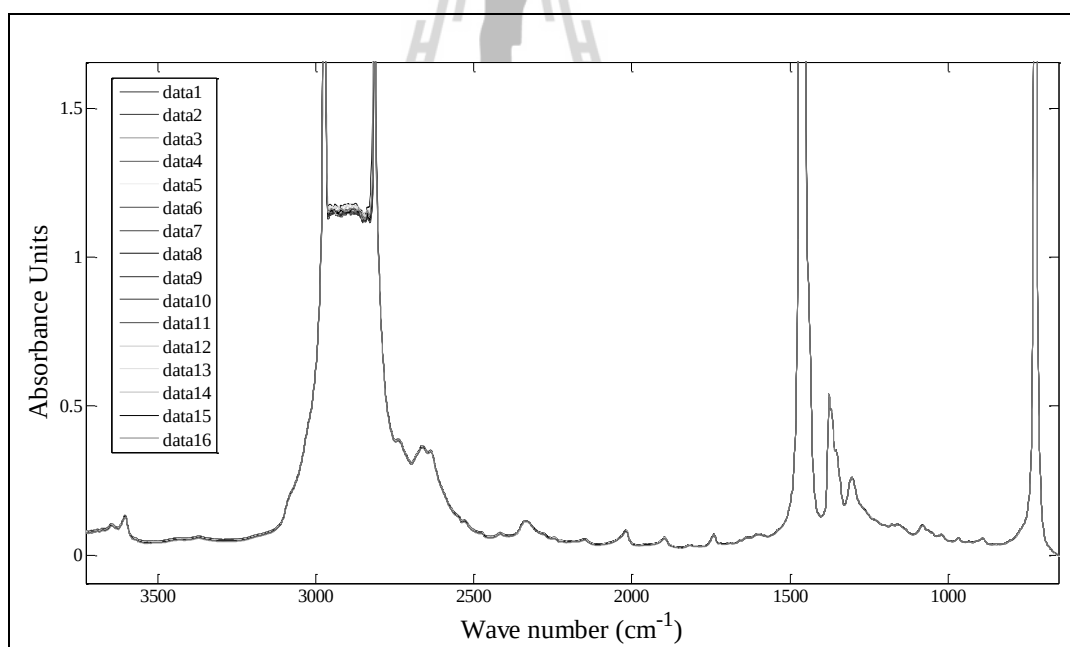
รูปที่ ก.3 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์
ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ที่อุณหภูมิห้อง



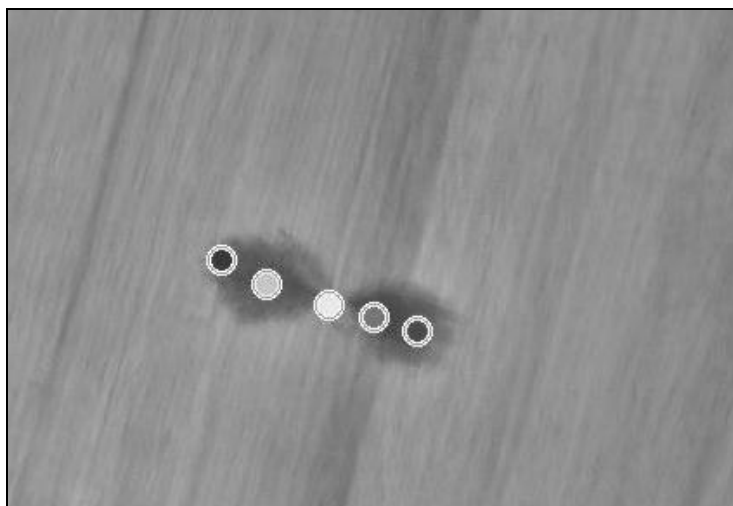
รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ที่อุณหภูมิห้อง



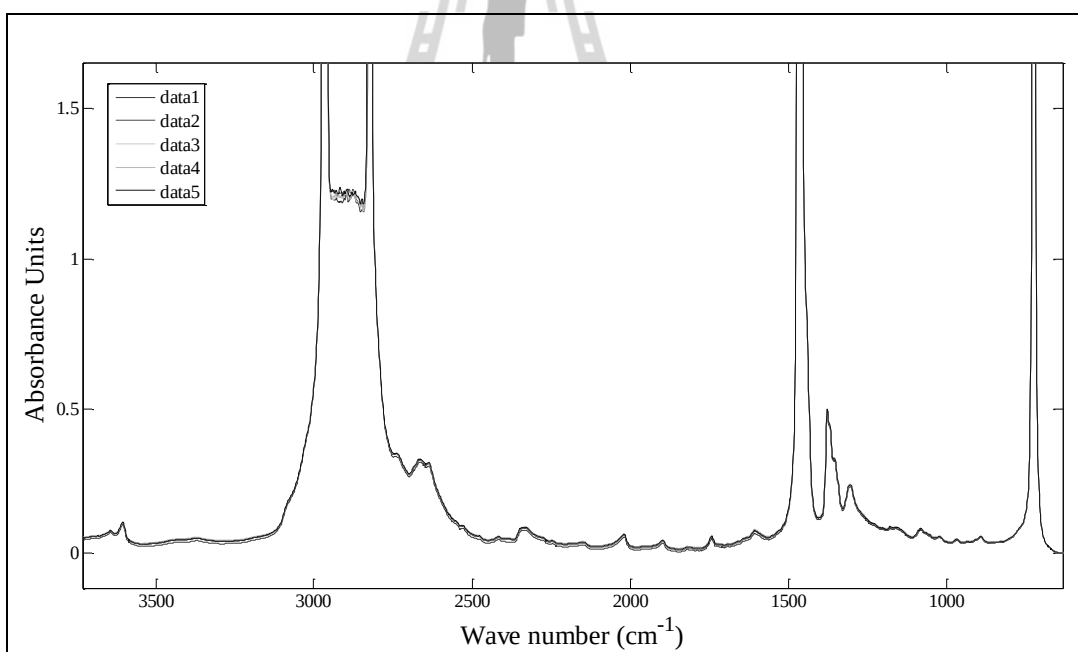
รูปที่ ก.5 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิห้อง



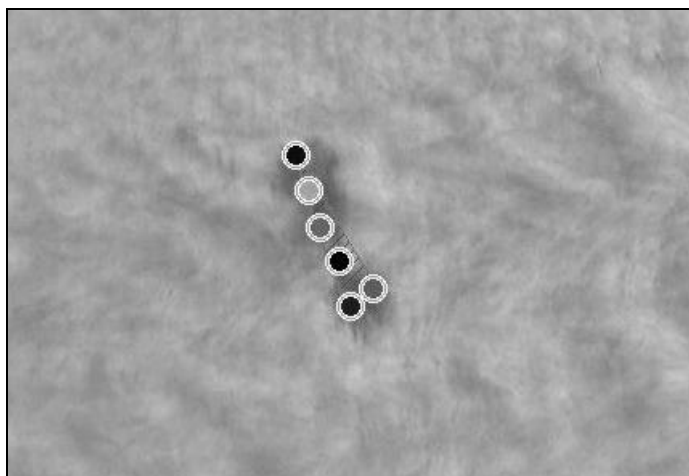
รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิห้อง



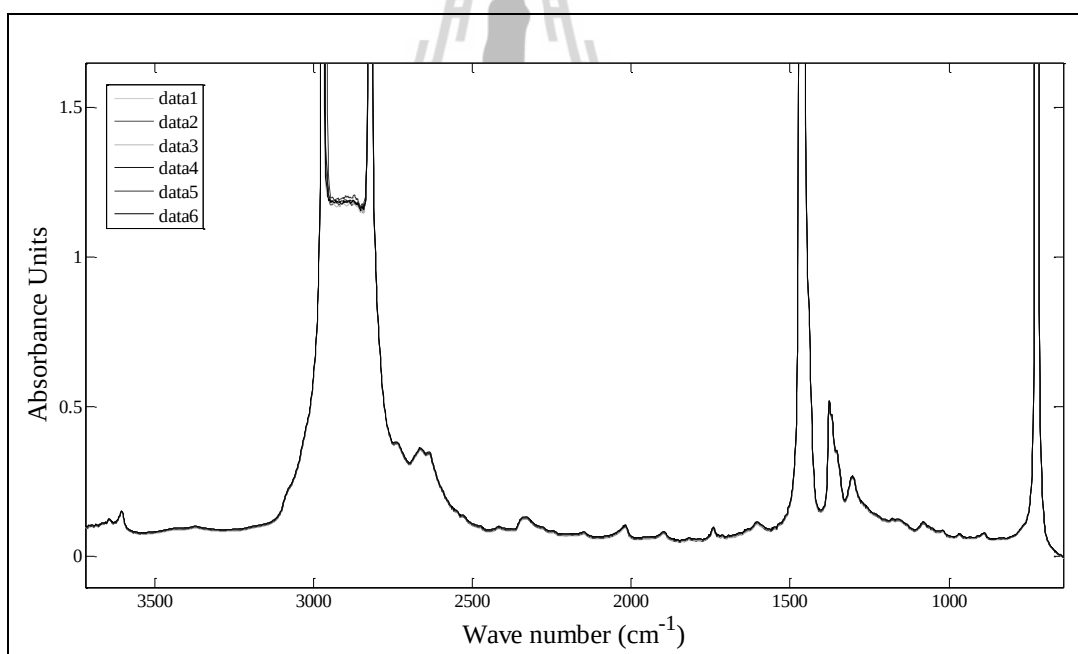
รูปที่ ก.7 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์
ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50°C



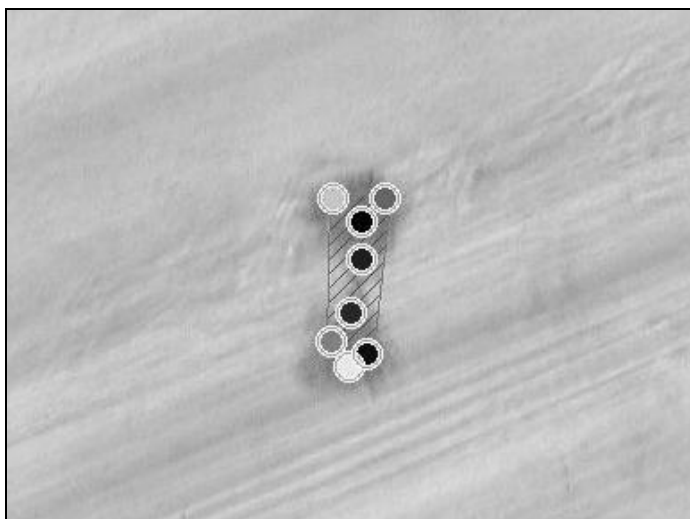
รูปที่ ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50°C



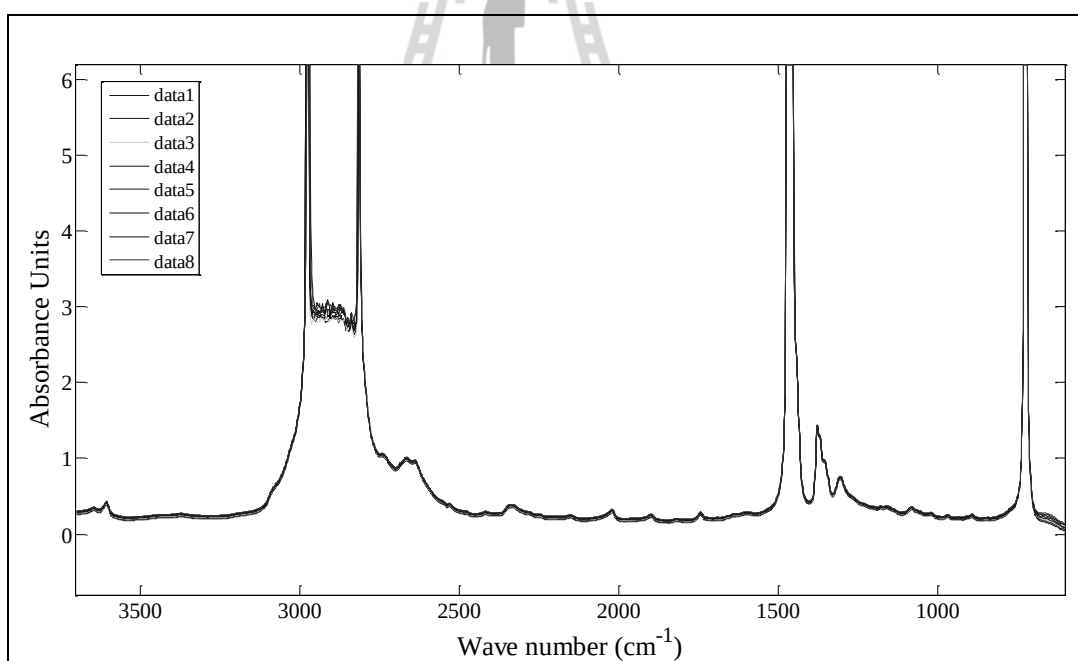
รูปที่ ก.9 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์
ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ที่อุณหภูมิ 50°C



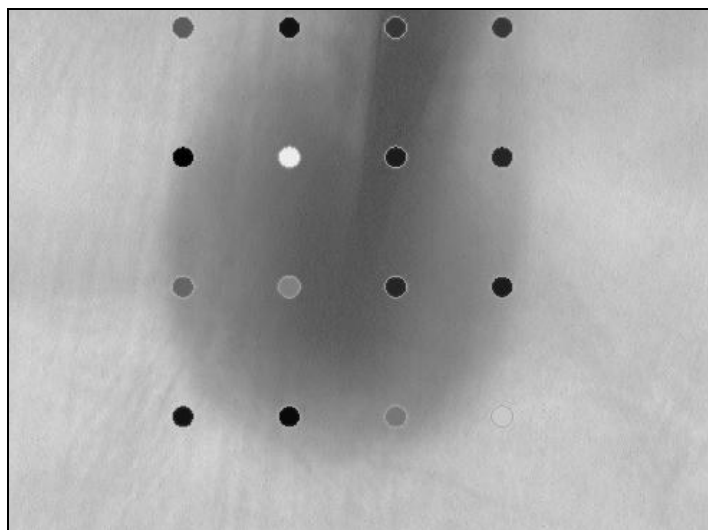
รูปที่ ก.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ที่อุณหภูมิ 50°C



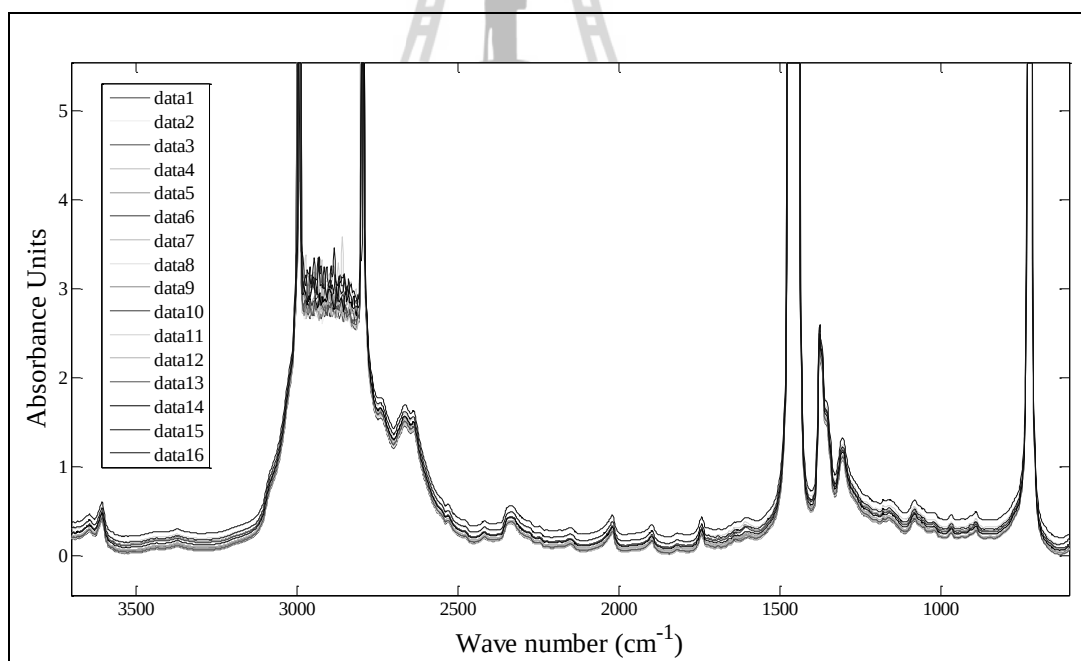
รูปที่ ก.11 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิห้อง 50°C



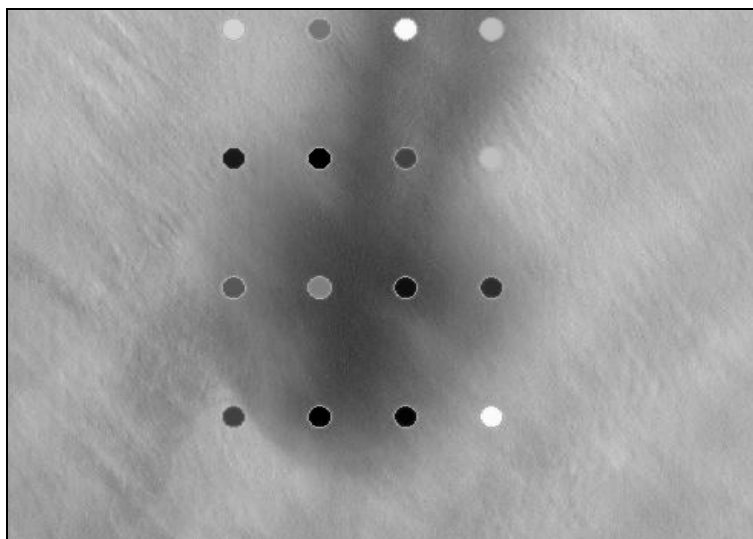
รูปที่ ก.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 50°C



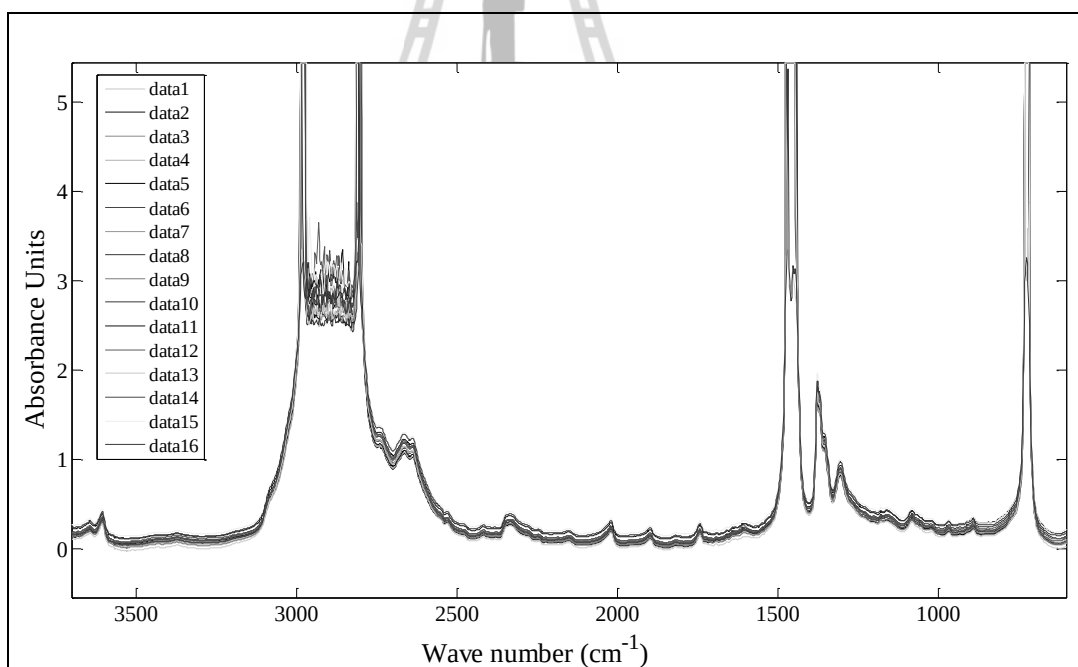
รูปที่ ก.13 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิห้อง



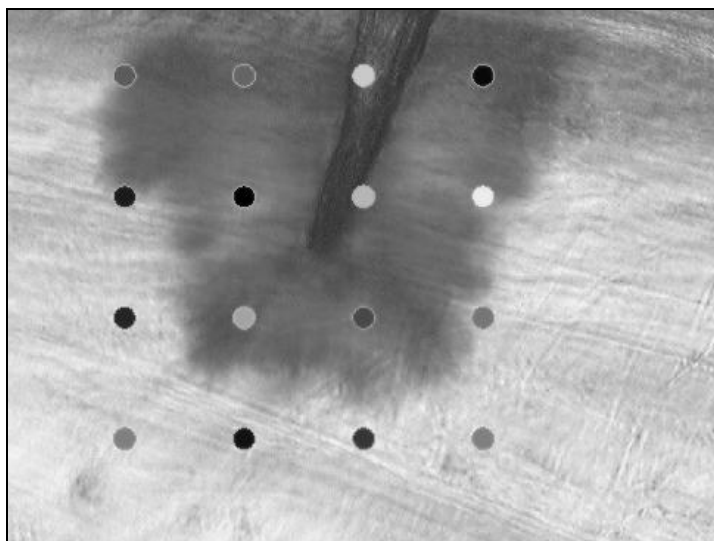
รูปที่ ก.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิห้อง



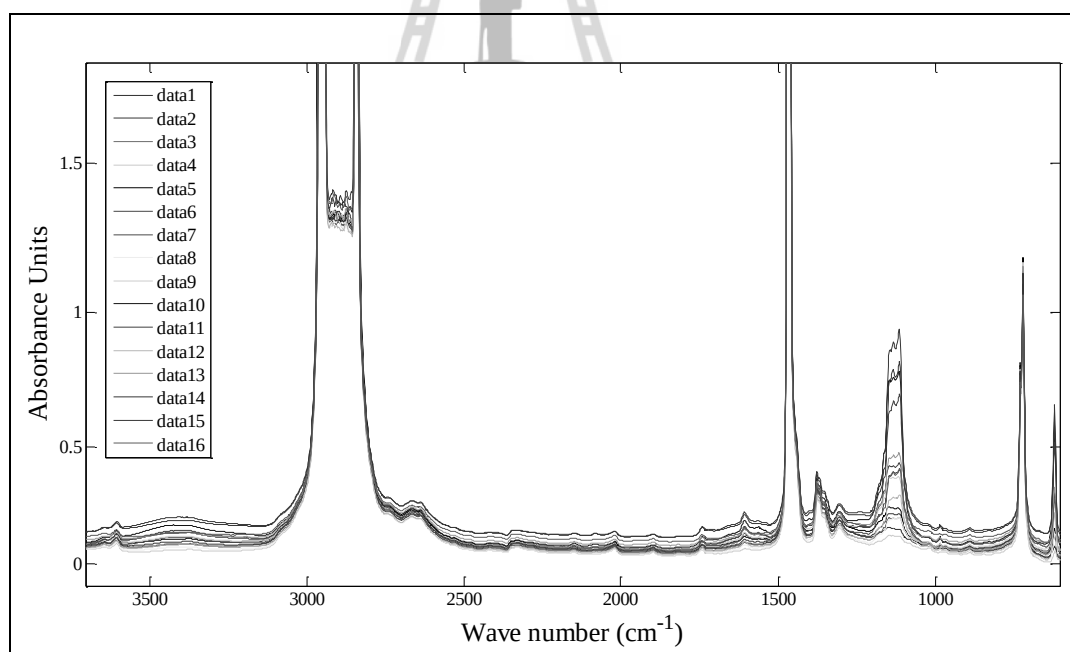
รูปที่ ก.15 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ที่อุณหภูมิห้อง



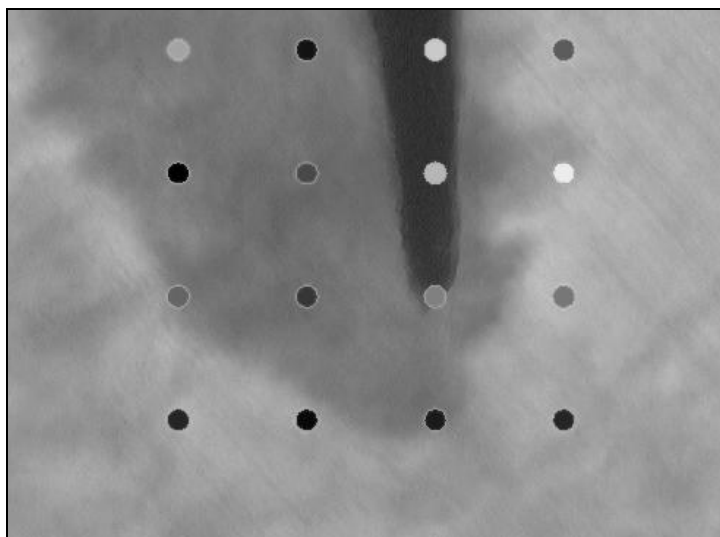
รูปที่ ก.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ที่อุณหภูมิห้อง



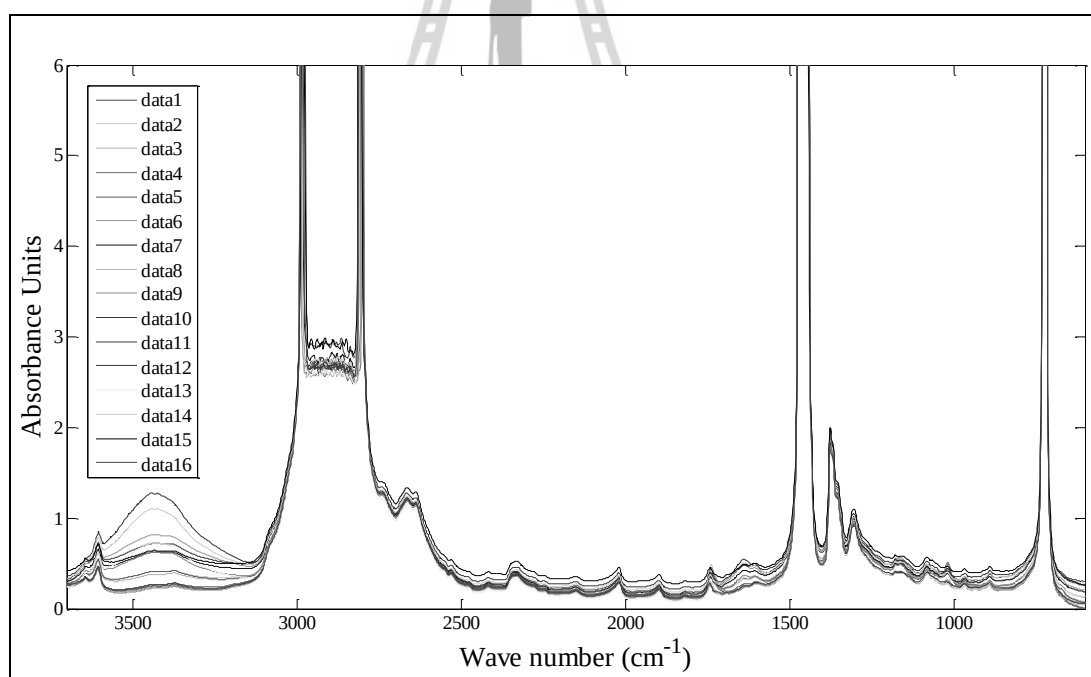
รูปที่ ก.17 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิห้อง



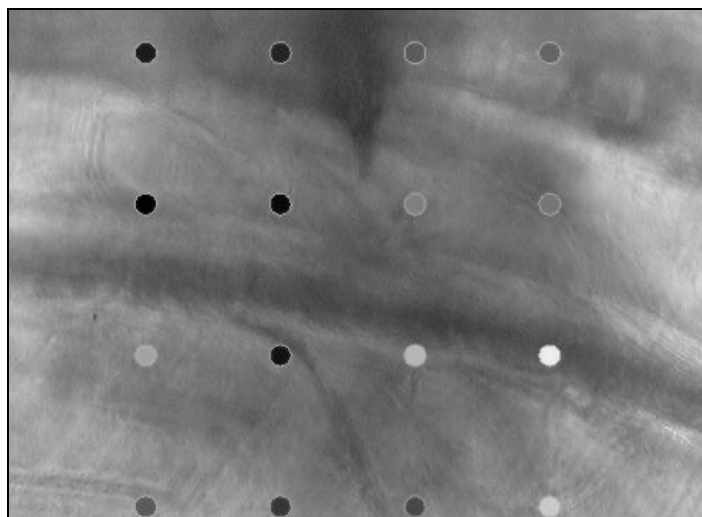
รูปที่ ก.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิห้อง



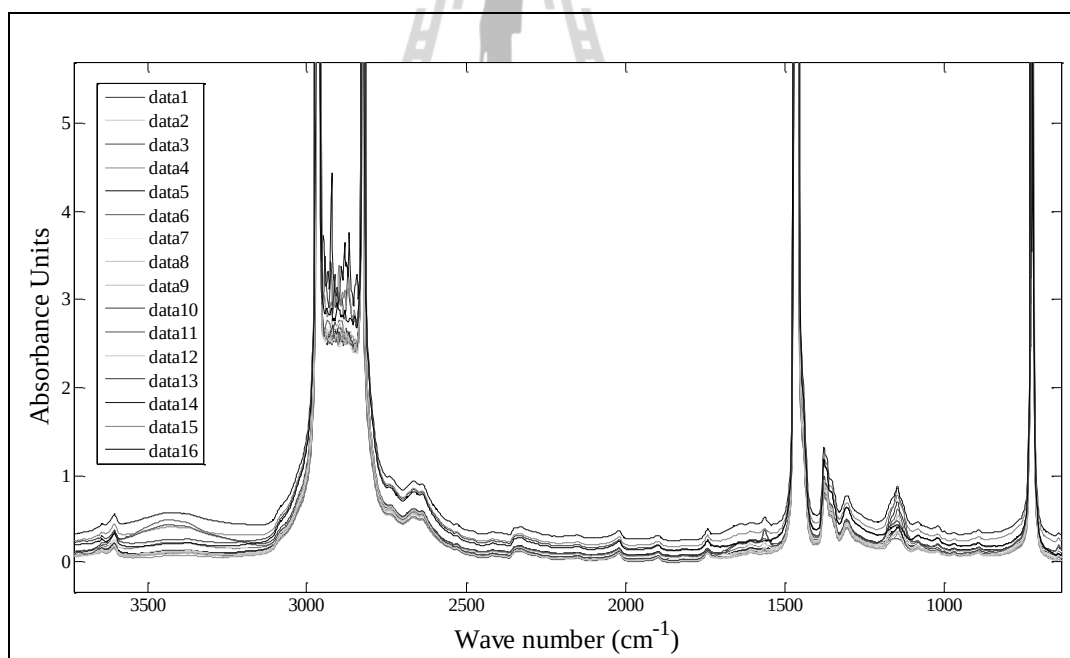
รูปที่ ก.19 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีบบนสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50°C



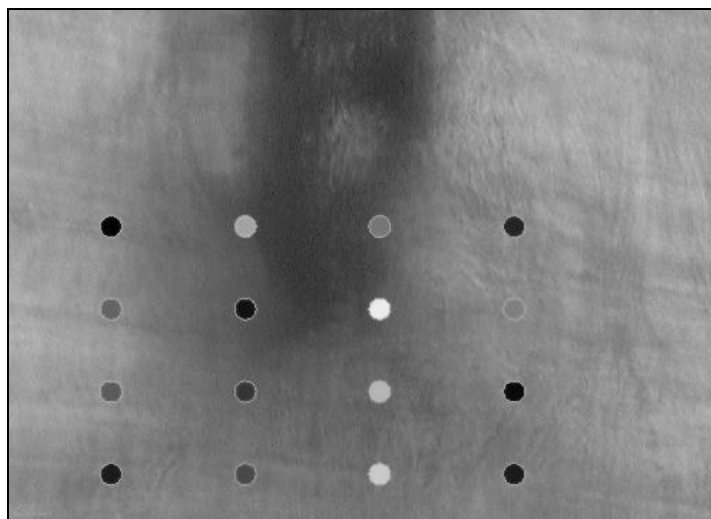
รูปที่ ก.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีบบนแต่ละตำแหน่งของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50°C



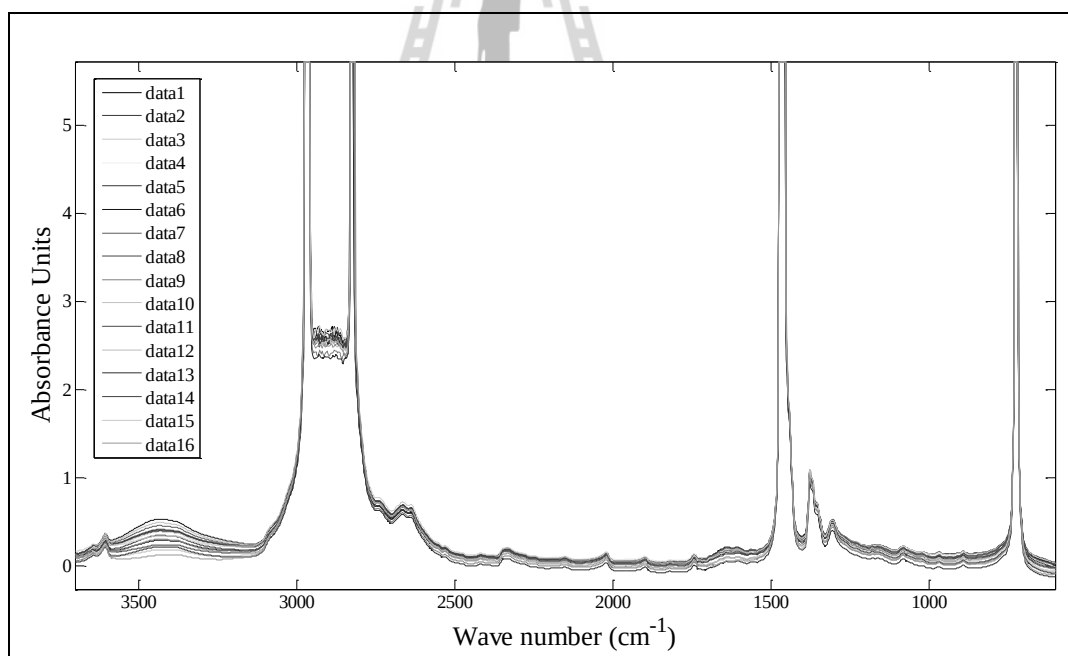
รูปที่ ก.21 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต ที่อุณหภูมิ 50°C



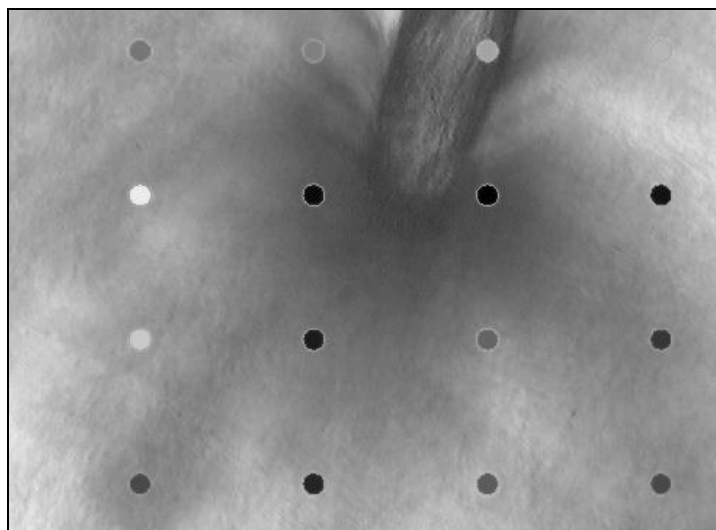
รูปที่ ก.22 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต ที่อุณหภูมิ 50°C



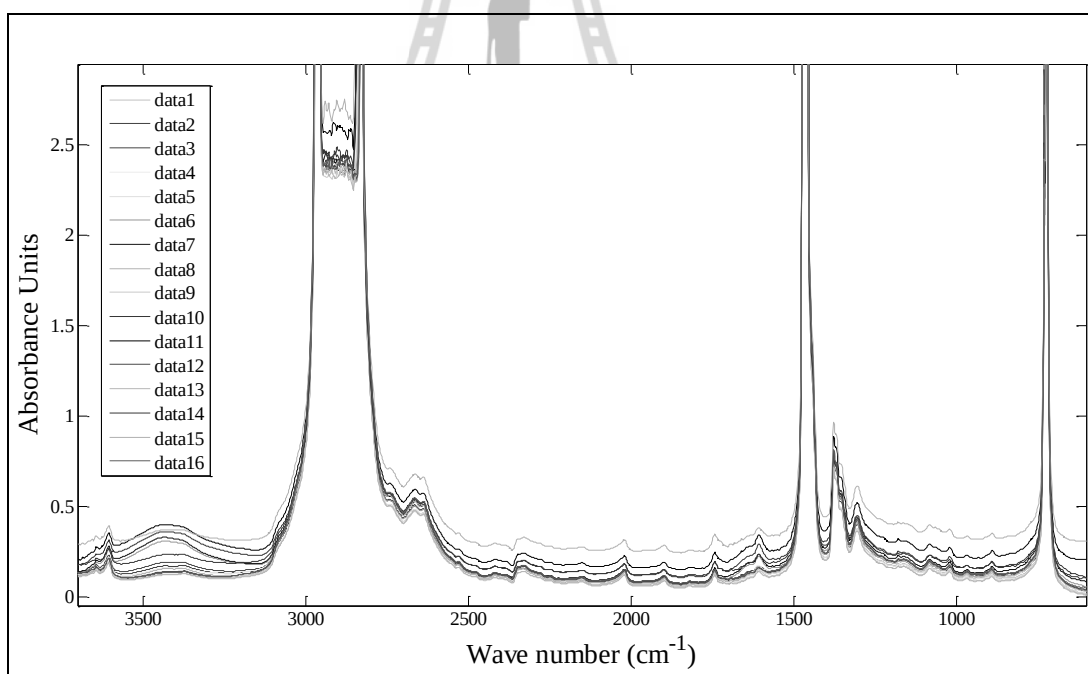
รูปที่ ก.23 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 50°C



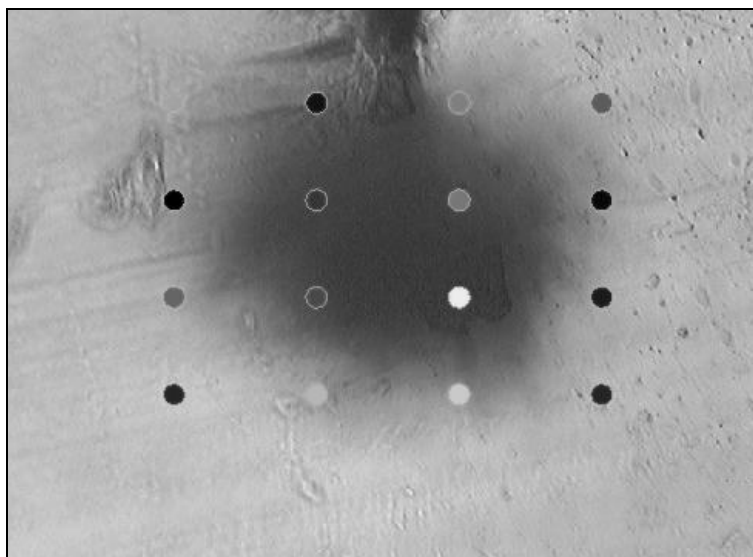
รูปที่ ก.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 50°C



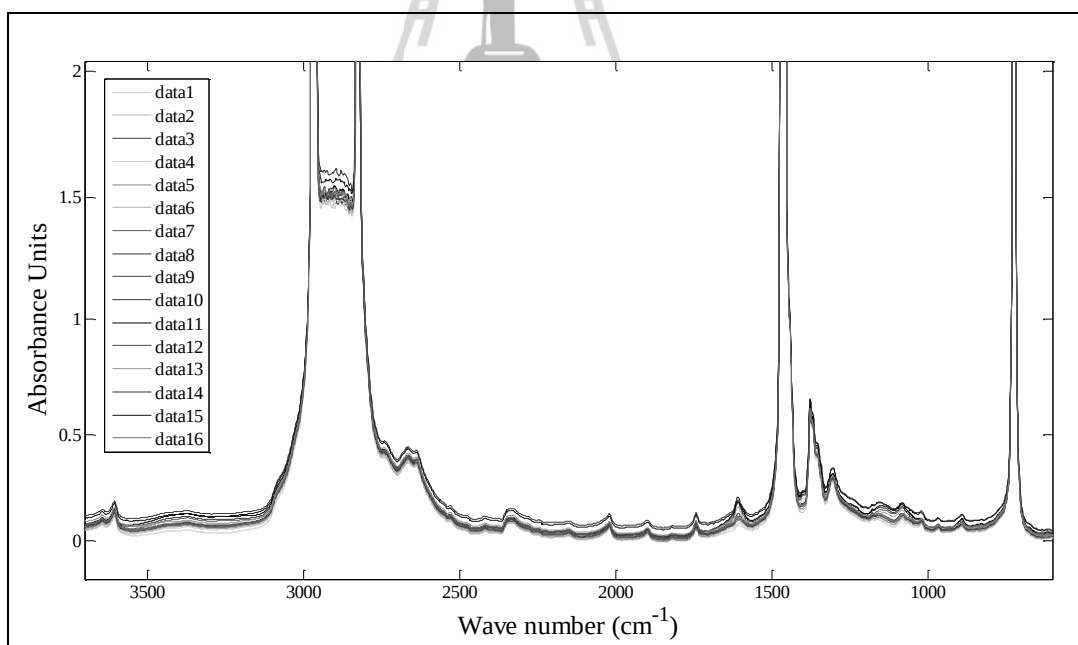
รูปที่ ก.25 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในแผ่นฉนวน XLPE ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต



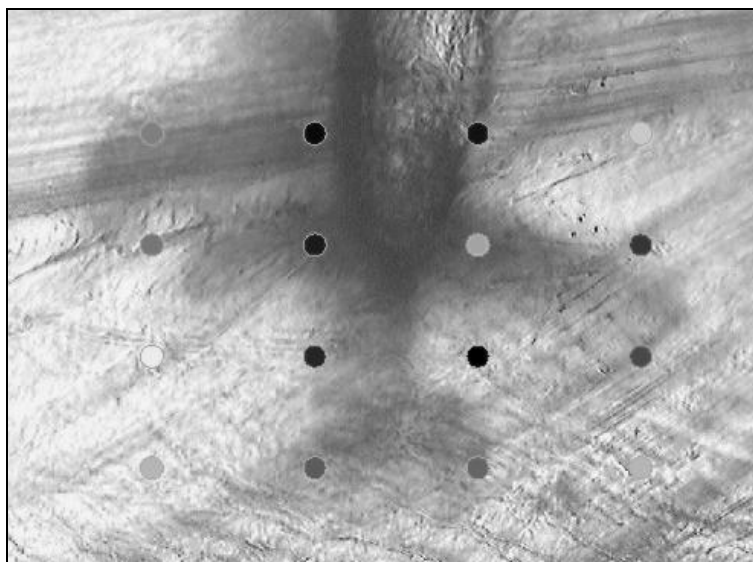
รูปที่ ก.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของแผ่นฉนวน XLPE ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต



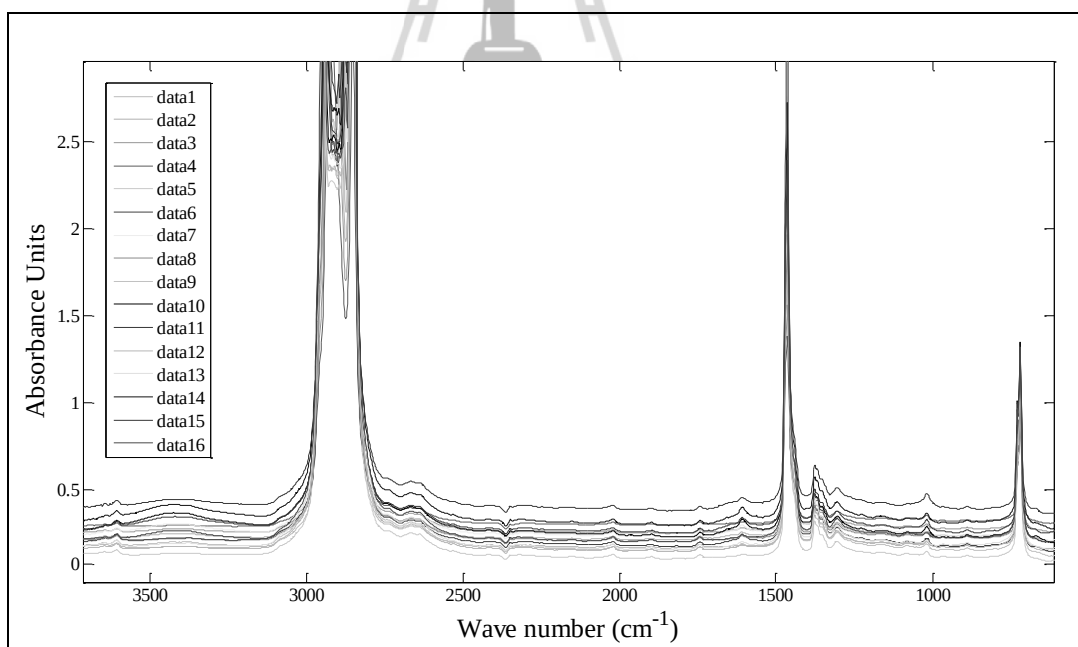
รูปที่ ก.27 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในแผ่นฉนวน XLPE ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์



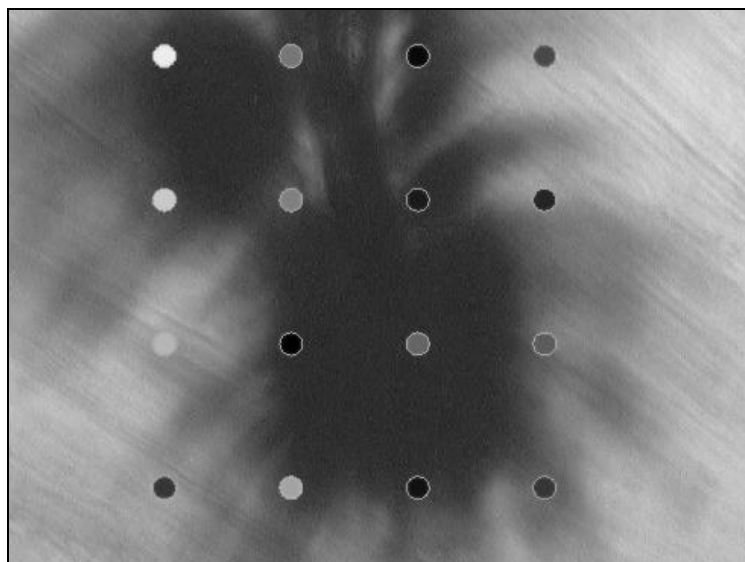
รูปที่ ก.28 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของแผ่นฉนวน XLPE ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



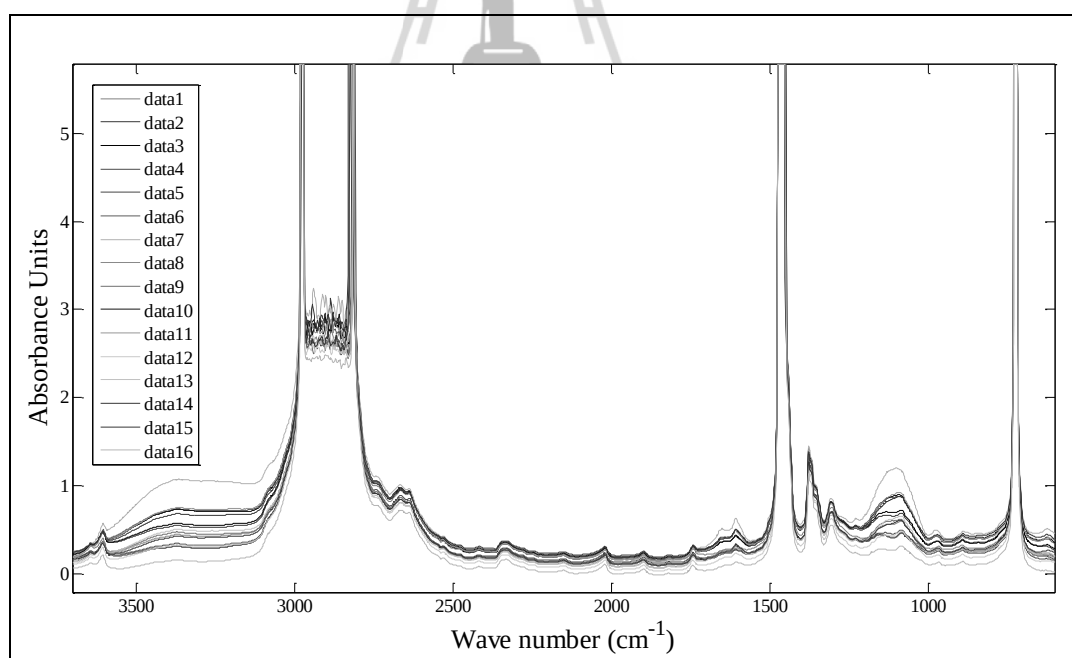
รูปที่ ก.29 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในแผ่นฉนวน XLPE ของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด



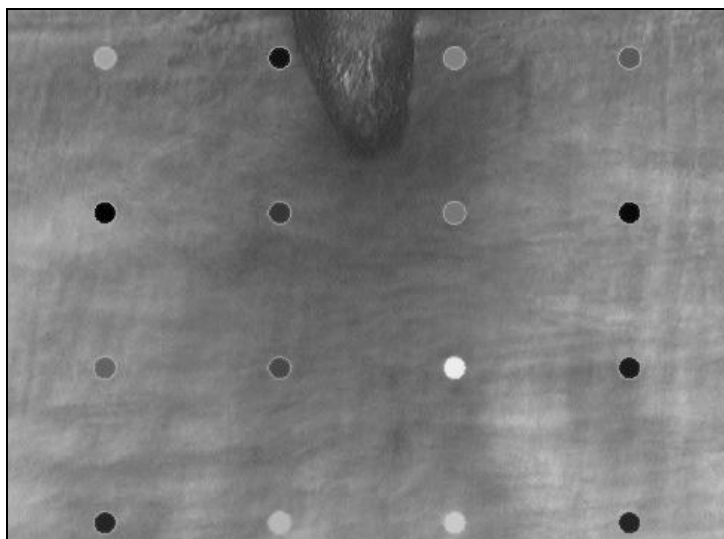
รูปที่ ก.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของแผ่นฉนวน XLPE ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด



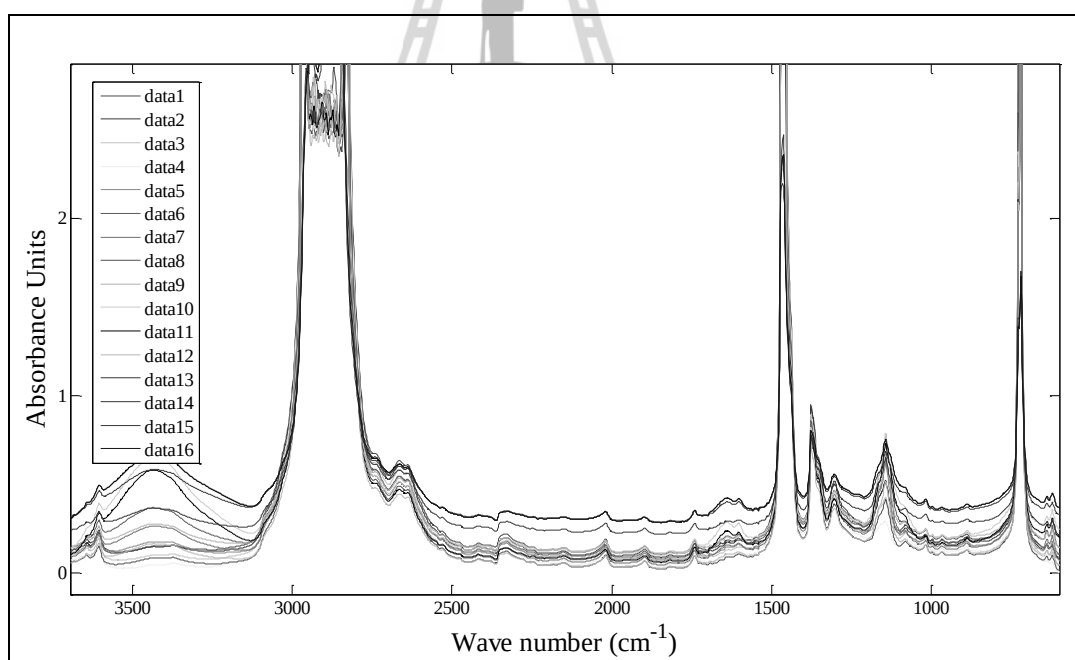
รูปที่ ก.31 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในแผ่นฉนวน XLPE ของสารละลายโซเดียมซัลเฟต



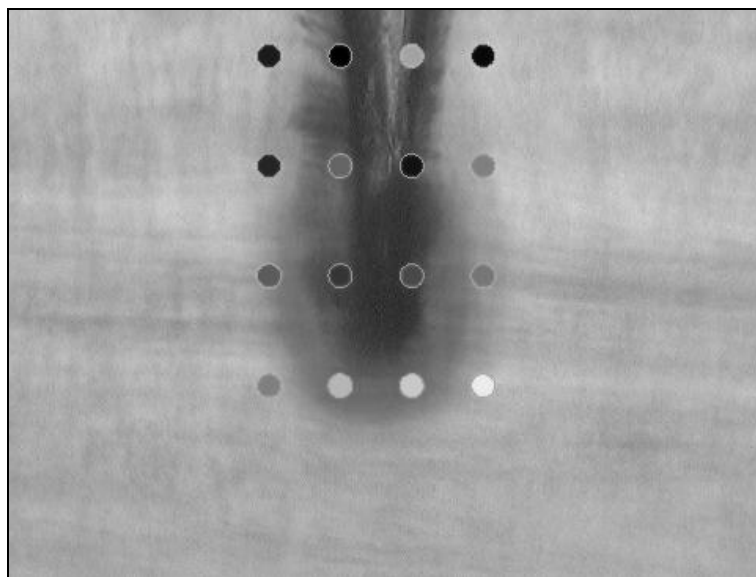
รูปที่ ก.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของแผ่นฉนวน XLPE ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



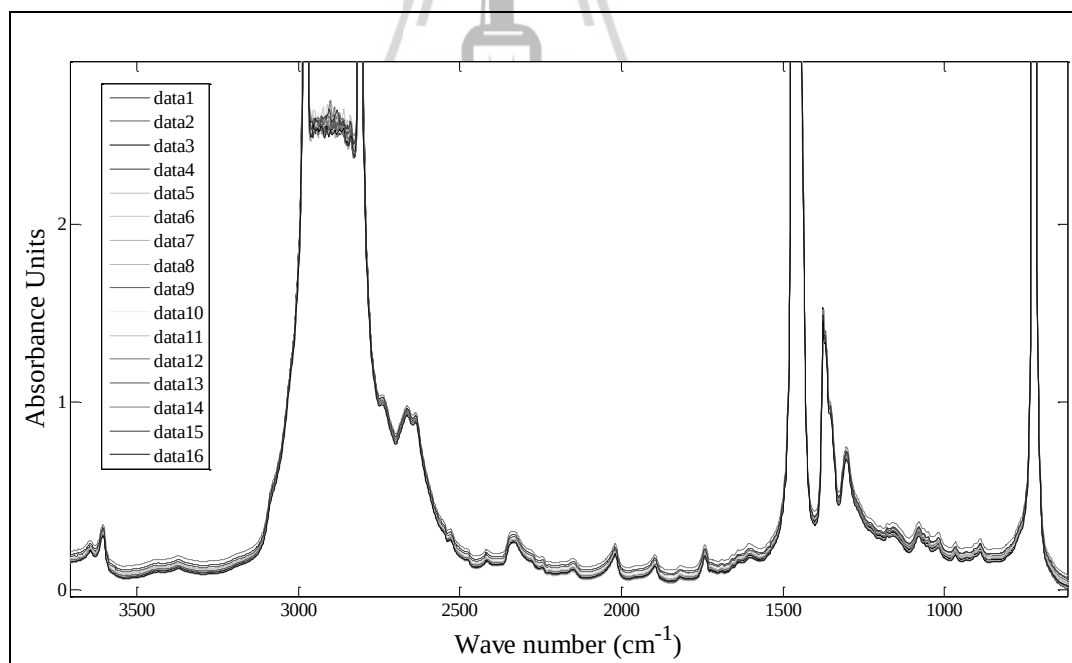
รูปที่ ก.33 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในแผ่นฉนวน XLPE ของสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต



รูปที่ ก.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของแผ่นฉนวน XLPE ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต



รูปที่ ก.35 ตำแหน่งที่ทำ FTIR ของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป
ในแผ่นฉนวน XLPE ของสารละลายไอรอนซัลเฟต



รูปที่ ก.36 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละตำแหน่ง
ของแผ่นฉนวน XLPE ในสารละลายไอรอนซัลเฟต

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Boonraksa, T., Marungsri, B. (2014). **Role of Ionic Solutions Affect Water Treeing Propagation in XLPE Insulation for High Voltage Cable.** World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering. Vol. 8. 1061-1064.



Role of Ionic Solutions Affect Water Treeing Propagation in XLPE Insulation for High Voltage Cable

T. Boonraksa, B. Marungsri

Abstract—This paper presents the experimental results on role of ionic solutions affect water treeing propagation in cross-linked polyethylene insulation for high voltage cable. To study the water treeing expansion due to the ionic solutions, discs of 4mm thickness and 4cm diameter were taken from 115 kV XLPE insulation cable and were used as test specimen in this study. Ionic solutions composed of CuSO_4 , FeSO_4 , Na_2SO_4 and K_2SO_4 were used. Each specimen was immersed in 0.1 mole ionic solutions and was tested for 120 hrs. under a voltage stress at 7 kV AC rms, 1000 Hz. The results show that Na_2SO_4 and CuSO_4 solutions play an important role in the expansion of water treeing and cause degradation of the cross-linked polyethylene (XLPE) in the presence of the applied electric field.

Keywords—Ionic Solutions, Water Treeing, Water treeing Expansion, Cross-linked Polyethylene (XLPE).

I. INTRODUCTION

PRESENTLY, cross-linked polyethylene (XLPE) is used as insulating material in high voltage cable for electrical transmission and distribution systems due to excellent physical, chemical and dielectric properties. Although XLPE having good dielectric properties for high voltage applications, ageing of XLPE material cannot avoidable after long time in service under various stress. Many phenomena can induce ageing of XLPE material. Performances of XLPE material have been studied in our previous works [1]-[3]. For XLPE underground cable in wet environmental subjected to electric field, it may contain a large variety of chemical types lead to degradation in the form of "water treeing".

Water treeing was first detected in 1969 by Miyashita [4]. Water trees are electrochemical dendritic patterns which grow in hydrophobic polymers in the presence of ac electric field and water. Water trees consist of "tracks" of oxidized polymer which connect micro-voids. The relevance of themicro-voids is very likely statistical in nature, i.e., the likelihood of survival of a track is increased if it encounters a micro-void from which it can continue to grow [5].

Water treeing is small tree-shaped defects appear inside the insulation and grow in the direction of the electric field. The presence of water trees inside the insulation causes the

reduction of the electrical breakdown strength of the insulation and eventually cause insulation breakdown. Water treeing has two types, the bow-tie water tree (bt) that emerge in the cable insulation while the vented water tree (vt) emerge at the cable's inner and/or outer conducting screens, propagate toward the opposite conductor [6]-[9].

Thiamsri et al. [2] studied effect of applied voltage stress frequency to the occurrence of electrical treeing in 22 kV cross linked polyethylene (XLPE) insulated cable. They found that 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.

Xu et al. [6] found that water treeing region contains a wide range of chemical species, with various forms of carbonyl and metal ions and water being dominant. Water treeing takes place in the direction of the electric field and in a polar amorphous region of the polymer.

Steennis et al. [9] studied the water treeing growth in polyethylene cable insulations. They found that the vented water trees are more dangerous than bow-tie trees as a result of the difference in growth behavior. Vented trees are diffuse structures, growing in many kinds of polymers.

Garton et al. [10] studied the oxidation and water tree formation in XLPE insulation cable. They found that water tree regions of XLPE insulation are prone to additional oxidative deterioration on thermal aging and ionic contaminants probably catalyze this oxidation. The presence of ionic contaminants may influence the treeing process.

Qureshi et al. [11] found that copper sulphate exhibits a much influence on water tree growth in XLPE cables and this effect is increased appreciably under the action of temperature cycling of the ionic solution. Cations play an important dominant role in the initiation and growth of water trees. Different models of water tree based on the ionic nature of chemical species were investigated.

For long term in service, various factors influencing water treeing are electric stress, voltage wave shape and frequency, chemical solutions, presence of oxygen, temperature and mechanical stress. The role of chemical solution to water treeing propagation has been widely studied and investigated [12]-[19].

In Thailand, voltage levels for distribution networks of Provincial Electricity Authority (PEA) of Thailand are 22 kV, 33 kV and 115 kV. Both overhead line and underground

T. Boonraksa is a graduate student with Suvaranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

B. Marungsri is with Suvaranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand (Corresponding author, phone: +66 4422 4366; fax: +66 4422 4601; email: bmsvhee@sut.ac.th).

XLPE cables are usually used in PEA distribution networks. Underground cables are increasingly used. However, a function of service stresses and aging time of underground XLPE cable have been no studied. By this reason, characteristic, length and wide of water treeing in XLPE insulated disc subjected to electric stress and aqueous ionic solutions were examined in this study.

II. EXPERIMENTAL

A. Specimens

As illustrated in Fig. 1, discs of 4mm thickness and 4cm diameter were taken from 115 kV XLPE insulation cable and were used as test specimen in this study. This type of power cable is used for underground distribution system of Provincial Electricity Authority (PEA) of Thailand. Then, all specimens were drilled down $2 \pm 0.3\text{mm}$ to acts as a water needle as shown in Fig. 2. During test period, The XLPE insulation disc was placed in between the ionic solution and a stainless steel plate electrode in a test chamber.

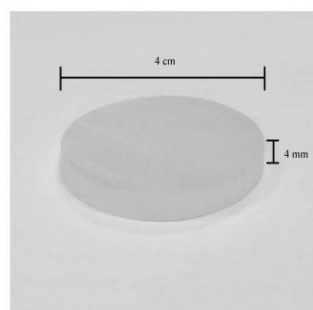


Fig. 1 XLPE insulation discs

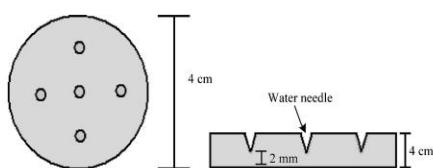


Fig. 2 Water needle

B. Test Method

A test chamber made of acrylic plate having 10cm in length, 10cm in wide and 10cm in height was used in this study as shown in Fig. 3. During test, XLPE insulation disc was placed between an ionic solution and a stainless plate electrode in a test chamber and was subjected to a voltage stress at room temperature (25°C). A voltage of 7 kV_{rms} , 1000 Hz was applied to a stainless needle electrode that was immersed in 0.01 mole ionic solution. The experimental setup is illustrated in Fig. 4. Each specimen was tested for 120 hrs.

Ionic solutions composed of CuSO_4 , FeSO_4 , Na_2SO_4 and K_2SO_4 were used.

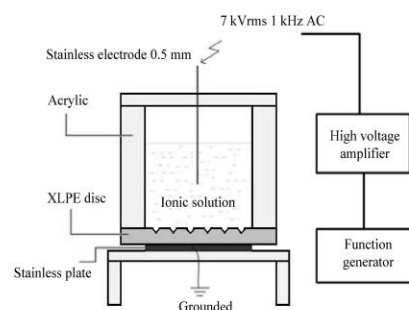


Fig. 3 Schematic diagram of test cell

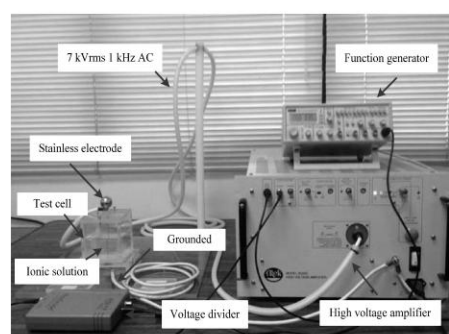


Fig. 4 Experimental setup

III. RESULTS AND DISCUSSION

Effect of ionic solutions to the occurrence of water treeing was elucidated. After aging testing period 120hrs, tested specimen on the portions close to the water needle tip were sliced into 0.4mm thickness and were stained by with methylene blue. Then, a microscopic analysis system consisting of transmitted light bright field optical microscope equipped with CCD camera and a computer was used for treeing analysis.

Vented type water treeing (vt) was observed on all tested specimens. The occurrence of water treeing initiated from tip of the water needle and expanded to the plane grounded electrode. Significant difference in water treeing expansion was observed as illustrated in Figs. 5, 6, 7, and 8, respectively. Basically, ionic solution splits up into cationic and anionic species. In this study all solution composed the same anionic specie. Then, cationic species may control the tree initiation and expansions. In case of Na_2SO_4 solution, largest water treeing expansion was measured (average $188\mu\text{m}$ in length and average $185\mu\text{m}$ in width). In case of CuSO_4 solution, average $156\mu\text{m}$ in length and average $154\mu\text{m}$ in width of water treeing expansion were measured. But in case of FeSO_4

and K_2SO_4 solutions, no significant differences in water treeing expansion were measured when comparing with those Na_2SO_4 and $CuSO_4$ solutions. Smallest water tree expansion was measured on the specimen tested with $FeSO_4$, as illustrated in Table I.

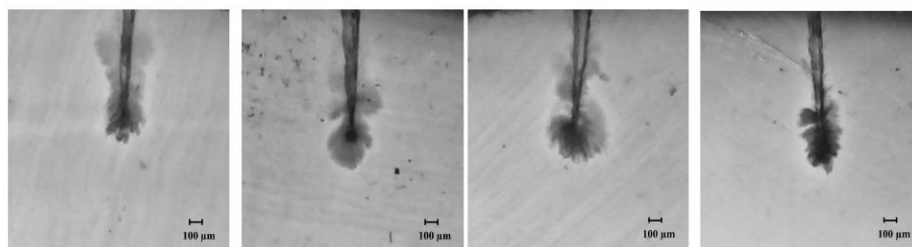


Fig. 5 Water treeing occurrence from Na_2SO_4 solution

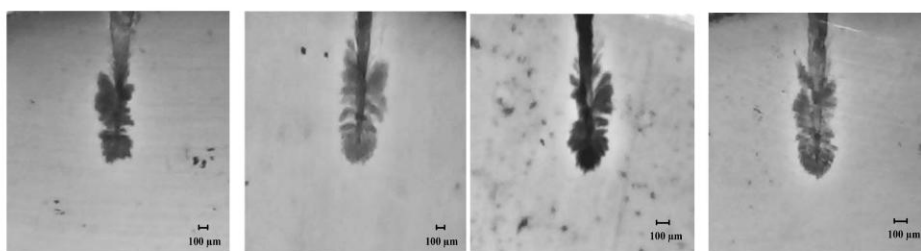


Fig. 6 Water treeing occurrence from $CuSO_4$ solution

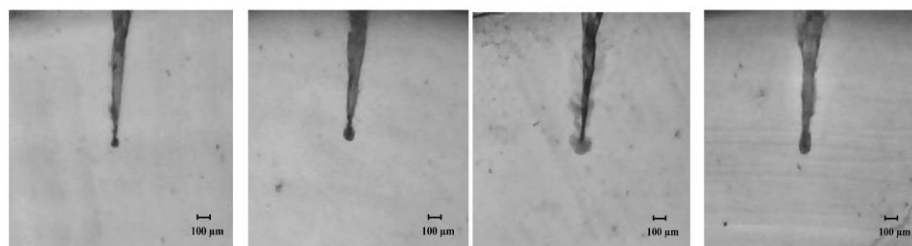


Fig. 7 Water treeing occurrence from $FeSO_4$ solution

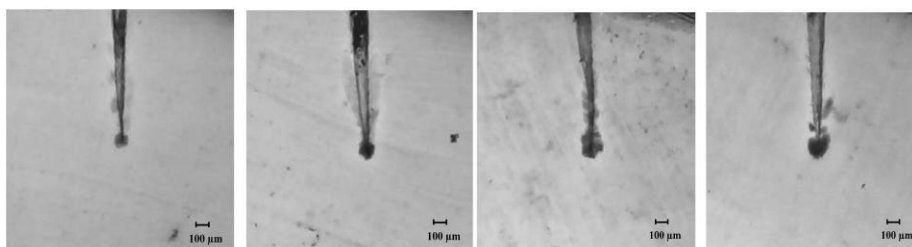


Fig. 8 Water treeing occurrence from K_2SO_4 solution

TABLE I
WATER TREERING IN XLPE INSULATED DISCS

Ionic solution	Water treering (μm)	
	Average length	Average wide
Na_2SO_4	188	185
CuSO_4	156	154
K_2SO_4	76	74
FeSO_4	60	54

IV. CONCLUSION

The role of ionic solution to water treering expansion was studied. Na_2SO_4 and CuSO_4 solutions exhibit a much stronger propensity toward water treering expansion and it gets enhanced appreciably. Vented trees with different initiation mechanisms were measured. From this study, cations play a dominant role in the expansion of water treering.

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- [1] N. Ruangkajonmathee, R. Thiamsri, and B. Marungsri, "Space Charge Distribution in 22 kV XLPE Insulated Cable by using Pulse Electroacoustic Measurement Technique", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.6, No. 12, pp. 1658-1661, December 2012.
- [2] R. Thiamsri, N. Ruangkajonmathee, A. Oonsivilai and B. Marungsri, "Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treering in 22 kV Cross-linked Polyethylene Insulated Cable", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.5, No. 12, pp. 1563-1568, December 2011.
- [3] A. Rawangpai, B. Maraungsri, N. Chomnawang, "Artificial Accelerated Ageing Test of 22 kVXLPE Cable for Distribution System Applications in Thailand", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.4, No. 5, May 2010.
- [4] T. Miyashita, "Deterioration of Water-Immersed Polyethylene Coated Wire by Treering", *Proceedings 1969, IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston(USA)*, pp. 131-135, September 1969.
- [5] S. Boggs, J. Densley, and J. Kuang, "Mechanism for Impulse Conversion of Water Trees to Electrical Trees in XLPE", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 310-315, April 1998.
- [6] J. J. Xu and S. A. Boggs, "The Chemical Nature of Water Treering: Theories and Evidence", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 10, No.5, pp. 29 – 37, September/October 1994.
- [7] T. Miyashita, "Deterioration of Water-Immersed Polyethylene-Coated Wire by Treering", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-6, No. 3, pp. 129-135, September 1971.
- [8] A. A. Al-Arainy, A. A. Ahaideb, M. I. Qureshi and N.H. Malik, "Statistical Evaluation of Water Tree Lengths in XLPE Cables at Different Temperatures", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 6, pp. 995-1006, December 2004.
- [9] E. F. Steennis and F. H. Kreuger, "Water Treering in Polyethylene Cables", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 5, pp. 989-1028, October 1990.
- [10] A. Garton, S. Bamji, A. Bulinski and J. Densley, "Oxidation and Water Tree Formation in Service-Aged XLPE Cable Insulation", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-22 No.4, pp. 405-412, August 1987.
- [11] M.I. Qureshi, N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, "Impact of cations toward the water tree propensity in crosslinked polyethylene insulation", *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, Vol. 23, No. 1, pp. 43–48, January 2010.
- [12] N.H. Malik, M.I. Qureshi and A.A. Al-Arainy, "The Role of Cations in Water Tree Growth in Technical Grade XLPE Insulated Cables",

Proceedings of The International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, pp. 127-130, June 2006.

- [13] M.I. Qureshi, N.H. Malik and A. A. Al-Arainy, "Effects of Different Ionic Solutions on Statistical Length Distribution of Water Trees in XLPE Cable Insulation", *Proceedings of The International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 513-516, June 2000.
- [14] M.I. Qureshi, N.H. Malik; A.A. Al-Arainy; M.N. Saati; O.A. Al-Nather; and S. Anam, "Investigation of Resistance Toward Water Tree Growth in XLPE Insulated MV Cables Produced in the Arabian Gulf Region", *Proceedings of The International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 1195 – 1198, April 2008.
- [15] H. X. Wang, X. S. Wen, and S. K. Cheng, "Correlation between Insulation Parameters and Ageing Degree of XLPE Cable within CuSO_4 Electrolyte", *Proceeding of The International Conference on Electrical Engineering*, Paper No. ICEE-339, July 2007.
- [16] M.Y. Shuvalov and V. L. Ovsienko, "Investigation of the Life Curve for High Voltage Cable Insulation and Wet Aging of Medium Voltage Cables", *Proceedings of the 58th IWCS/IJIT International Wire & Cable Symposium*, pp.243-250, 2009.
- [17] R. Ross and J.J. Smit, "Composition and growth of water trees in XLPE", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.27, No. 3, pp. 519-531, Jun 1992.
- [18] H. J. Henkel, N. Muller, J. Nordmann, W. Rogler and W. Rose, "Relationship Between the Chemical Structure and the Effectiveness of Additives in Inhibiting Water Trees", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-22 No.2, pp. 157- 161, April 1987.
- [19] S.A. Boggs and M.S. Mashikian, "Role of Semiconducting Compounds in Water Treering of XLPE Cable Insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.10, No. 1, pp. 23-56, January/February 1994.



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



Terapong Boonraks was born in Sakon Nakhon province, northeastern of Thailand, in 1989. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Kasetsart University, Chalermphraki at Sakon Nakhon Province campus, in 2011. Currently, he is a master degree student in school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology. His research topic interesting is high voltage insulation technology.

ประวัติผู้เขียน

นายธีระพงษ์ บุญรักษา เกิดเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 ที่อำเภอวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร เริ่มศึกษาระดับอนุบาลและประถมศึกษา ที่โรงเรียนวาริชภูมิพิทยาคาร อำเภอวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนมัธยมวาริชภูมิ อำเภอวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร เมื่อ พ.ศ. 2550 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2554 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ข ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง