

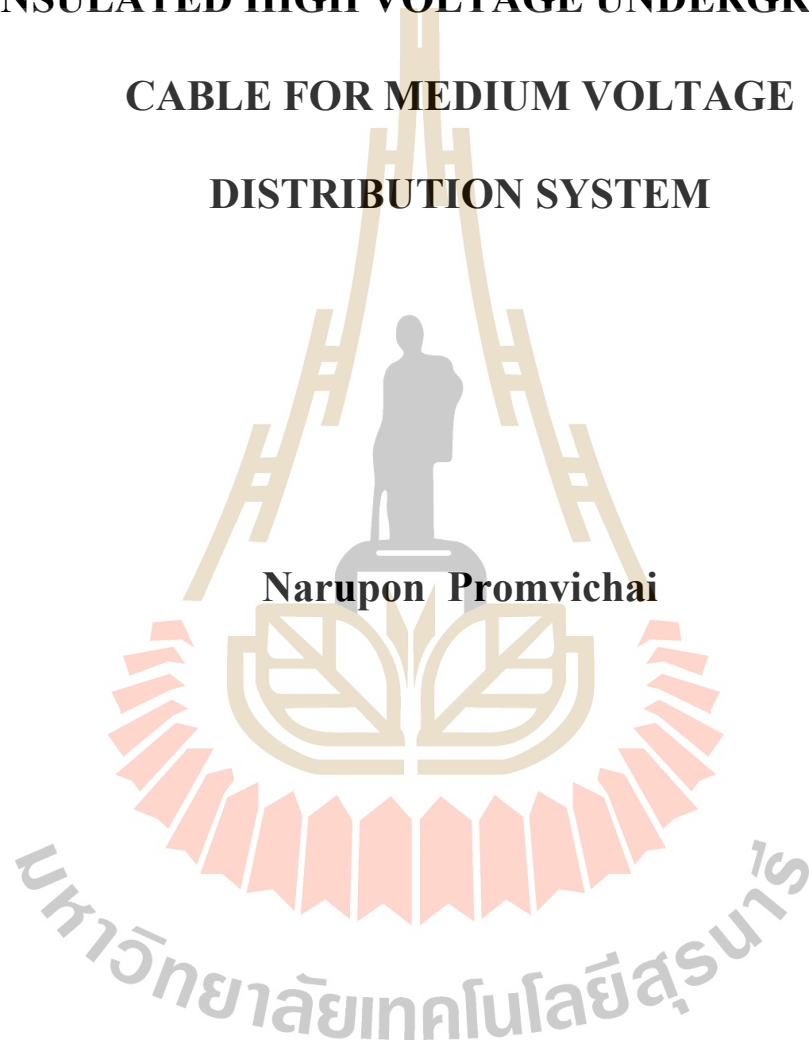
ผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง  
ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง  
สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง



นายอนุพันธ์ พรหมวิชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2561

**EFFECT OF IONIC SOLUTIONS AND TEMPERATURES  
ON WATER TREEING PROPAGATION IN XLPE  
INSULATED HIGH VOLTAGE UNDERGROUND  
CABLE FOR MEDIUM VOLTAGE  
DISTRIBUTION SYSTEM**

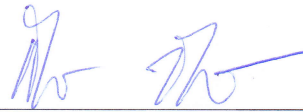


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2018**

ผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง  
ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง  
สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง

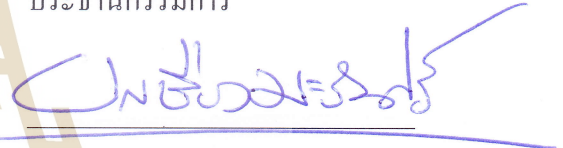
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



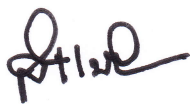
(รศ. ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง)

กรรมการ



(อ. ดร. อุเทน ลีตัน)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

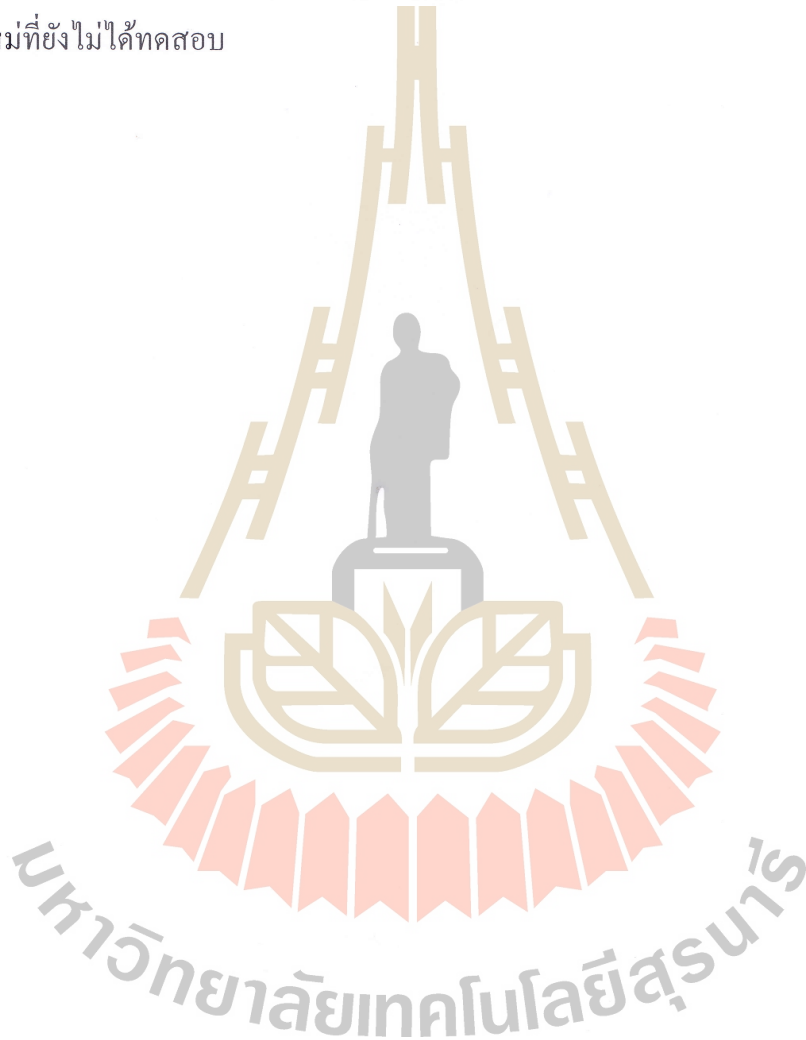
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นฤพนธ์ พรหมวิชัย : ผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง (EFFECT OF IONIC SOLUTIONS AND TEMPERATURES ON WATER TREEING PROPAGATION IN XLPE INSULATED HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE FOR MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEM)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญเรือง มะรังศรี, 212 หน้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลางในเมืองใหญ่ทั่วโลกถูกเปลี่ยนจากระบบสายเคเบิลแบบพาดอากาศเป็นระบบสายเคเบิลใต้ดิน ส่งผลให้เมืองมีภูมิทัศน์สวยงามยิ่งขึ้นและยังลดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ในประเทศไทยสายเคเบิลใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางถูกนำมาใช้สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีสำหรับการใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน สายเคเบิลอาจเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจทำให้มีน้ำหรือสารละลายไอออนิกแทรกซึมเข้าไปในเนื้อฉนวน อาจนำไปสู่การเกิดวอเตอร์ทรีอิงและทรีอิงทางไฟฟ้า ทั้งนี้ การขยายตัวของทรีอิงจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินในที่สุด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง 22 kV ในประเทศไทย ด้วยการจำลองเร่งการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลที่เกิดจากวอเตอร์ทรีอิง โดยสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบถูกเจาะรูและถูกแช่ในสารละลายไอออนิกพร้อมจ่ายแรงดันทดสอบ 24 kV ตลอดระยะเวลาทดสอบ สารละลายไอออนิกที่ใช้ประกอบด้วย โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต คอปเปอร์(II)ไนเตรท คอปเปอร์(II)ซัลเฟต และไอรอน(II)ซัลเฟต โดยมีระยะเวลาในการทดสอบ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 50°C และอุณหภูมิ 70°C สายเคเบิลที่ผ่านการทดสอบแล้วถูกนำมาวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นพบว่า มีรูปร่างคล้ายครีป โดยเริ่มเกิดจากปลายรูที่เจาะขยายตัวเข้าไปในเนื้อฉนวน XLPE แต่ไม่พบวอเตอร์ทรีอิงรูปร่างคล้ายโบว์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อฉนวนไม่มีจุดบกพร่องที่ก่อให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงคล้ายโบว์ เมื่อพิจารณาการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง พบว่าสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ส่งผลต่อการขยายตัวมากที่สุด ในส่วนของอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง พบว่ามีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารละลาย โดยในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ อุณหภูมิ 50°C มีผลต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงมากที่สุด ในสารละลายคอปเปอร์

(II) ซัลเฟต อุณหภูมิห้องมีผลต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีริงมากที่สุด และในสารละลายไอออน (II) ซัลเฟต อุณหภูมิ 70°C มีผลต่อวอเตอร์ทรีริงมากที่สุด ในสารละลายคอปเปอร์(II) ซัลเฟต ที่อุณหภูมิห้องมีผลต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีริงมากที่สุด การขยายตัวของวอเตอร์ทรีริงในแต่ละสารละลายไอออนิกมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารละลายไอออนิกแต่ละชนิด และระยะเวลาในการทดสอบ ผลการวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR พบว่าสายเคเบิลที่ผ่านการทดสอบมีอัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H และ พันธะ C=O ต่อ C-H เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสายเคเบิลใหม่ที่ยังไม่ได้ทดสอบ



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ศุภพัชร์ พรหมวิชัย  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.ไพรัช บุญรอด

NARUPON PROMVICHAI : EFFECT OF IONIC SOLUTIONS AND TEMPERATURES ON WATER TREEING PROPAGATION IN XLPE INSULATED HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE FOR MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 212 PP.

WATER TREEING/IONIC SOLUTION/XLPE CABLE/SIMULATION/WATER TREEING PROPAGATION/TEMPERATURE

Medium voltage distribution systems in major cities around the world have been transformed from the overhead cable to the underground cable. As a result, the city has a more beautiful landscape and reduces the impact of the environment on the stability of the electric distribution system. In Thailand, the medium voltage cross-linked polyethylene insulated underground cable has been used for the 22 kV power distribution systems of the Provincial Electricity Authority because it has excellent features for use. However, the underground cable may be aged as long operating time in services. The water or ionic solution can permeate into the insulation with causing of water treeing and electrical treeing. Moreover, the propagation of the water treeing leads to break down in the underground cable insulator. This thesis studied the effect of ionic solutions, and temperatures on the propagation of water treeing in high voltage XLPE insulated underground cable for medium voltage distribution system 22 kV in Thailand with an accelerated aging simulation of the underground cable on water treeing. Test cables were punched and were immersed in the ionic solution and were subjected to a test voltage of  $24 \text{ kV}_{\text{rms}}$  throughout the test period. The ionic solutions consist of sodium chloride, sodium sulfate, potassium sulfate, copper(II)nitrate,

copper(II)sulfate, and iron(II)sulfate. The testing periods are 1000 hours, 2000 hours, 3000 hours, and 4000 hours. Three levels of temperature, room temperature, 50°C, and 70°C were used. After tested, the physical and the chemical analyses were conducted to compare the effect of ionic solutions and temperature on the propagation of water treeing. The vented type water treeing has been detected by the physical characteristic analysis. The propagation direction of the vented type initiated from the pinned-hole to XLPE insulation layer. The bow-tie water treeing was not detected in the investigation. So, it shows that the insulation has no contamination points in the insulation. Considering the expansion of water treeing, the highest propagation of water treeing was found in copper (II)sulfate solution. In each temperature, the propagation trend of water treeing was difference such as (i) in sodium chloride solution at 50°C most significant effect on water treeing, (ii) in copper(II)sulfate solution most significant impact on water treeing, and (iii) in iron(II)sulfate at 70°C most significant impact on water treeing. Copper (II) sulfate solution at room temperature has the most significant impact on water treeing. However, the propagation characteristic of water treeing was still different, which depends on the properties of each ionic solution and the test period. FTIR analysis of the water treeing structure has been analyzed. It found that the ratio of C=C:C-H and C=O:C-H bond on the tested XLPE cable more than the new XLPE cable.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ชญานันท์ อรุณศิริกุล

Advisor's Signature ศ.ดร.ไพรัช อรุณศิริกุล

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลกลุ่มต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำทั้งในด้านการเรียน การทำงานวิจัย และการแก้ปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนและทุนวิจัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ธีระพงษ์ บุญรักษาและพี่ ๆ น้อง ๆ กลุ่มเทคโนโลยีการฉนวนไฟฟ้าแรงสูงรวมทั้งเพื่อน ๆ ชาวต่างชาติ ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

นฤพนธ์ พรหมวิชัย



# สารบัญ

หน้า

|  |          |
|--|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....                                      | ก        |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....                                   | ค        |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | จ        |
| สารบัญ.....  | ฉ        |
| สารบัญตาราง.....   | ฅ        |
| สารบัญรูป.....   | ฉ        |
| <b>บทที่</b>   |          |
| <b>1 บทนำ.....</b>   | <b>1</b> |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....                           | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                             | 2        |
| 1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....                                 | 2        |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....                                   | 3        |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                           | 3        |
| 1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....                             | 3        |
| <b>2 ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและปรัทัศนัวรรณกรรม.....</b> | <b>4</b> |
| 2.1 กล่าวนำ.....   | 4        |
| 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง.....                                      | 4        |
| 2.2.1 หน่วยงานหลักของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย.....               | 5        |
| 2.2.2 ประวัติของสายไฟฟ้า.....                                | 6        |
| 2.2.3 ประเภทของสายไฟฟ้า.....                                 | 8        |
| 2.2.4 ประเภทของสายไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....      | 9        |
| 2.2.5 สายเคเบิลใต้ดิน.....                                   | 10       |
| 2.2.6 ฉนวน XLPE.....   | 13       |
| 2.3 ข้อบกพร่องโดยทั่วไปที่เกิดบนสายเคเบิลใต้ดิน.....         | 16       |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.3.1 ทริโองทางไฟฟ้า.....   | 16        |
| 2.3.2 วอเตอร์ทริโอง.....  | 20        |
| 2.4 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน.....  | 25        |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 25        |
| 2.6 สรุป.....   | 30        |
| <b>3 การจำลองการขยายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE .....</b>     | <b>31</b> |
| 3.1 กล่าวนำ.....  | 31        |
| 3.2 การจำลองลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน<br>ฉนวน XLPE..... | 31        |
| 3.3 การจำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE .....            | 33        |
| 3.3.1 แบบจำลองสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE.....                                 | 33        |
| 3.3.2 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการจำลองสนามไฟฟ้า.....                         | 34        |
| 3.3.3 เม็ชของแบบจำลองวอเตอร์ทริโอง.....                                     | 37        |
| 3.3.4 แรงดันไฟฟ้าสำหรับการจำลองสนามไฟฟ้า.....                               | 37        |
| 3.4 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า.....                                      | 38        |
| 3.5 วิเคราะห์ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า.....                             | 66        |
| 3.6 สรุป.....   | 67        |
| <b>4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>   | <b>68</b> |
| 4.1 กล่าวนำ.....  | 68        |
| 4.2 การออกแบบชุดทดสอบวอเตอร์ทริโอง.....                                     | 68        |
| 4.2.1 การออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับชุดทดสอบ .....                           | 70        |
| 4.2.2 การเตรียมสายเคเบิลทดสอบ .....   | 78        |
| 4.3 การดำเนินการทดสอบ .....   | 79        |
| 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ .....                                    | 81        |
| 4.4.1 การเตรียมชิ้นงานฉนวน XLPE .....                                       | 81        |
| 4.4.2 การวัดขนาดของวอเตอร์ทริโอง .....                                      | 84        |
| 4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี.....                                       | 85        |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.5.1    | เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี .....                 | 85         |
| 4.6      | สรุป .....   | 92         |
| <b>5</b> | <b>ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ริงในสายเคเบิล XLPE.....</b> | <b>93</b>  |
| 5.1      | กล่าวนำ .....  | 93         |
| 5.2      | ลักษณะทางกายภาพของวอเตอร์ริงในฉนวน XLPE .....                                      | 93         |
| 5.3      | วิเคราะห์ผลของลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวอเตอร์ริงในฉนวน XLPE .....               | 147        |
| 5.3.1    | ผลของสารละลายไอออนิกต่อการขยายตัวของวอเตอร์ริง.....                                | 147        |
| 5.3.2    | ผลของอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ริง .....                                      | 149        |
| 5.3.3    | ผลของค่า pH ต่อการขยายตัวของวอเตอร์ริง .....                                       | 149        |
| 5.3.4    | ผลของค่าความนำไฟฟ้าต่อการขยายตัวของวอเตอร์ริง .....                                | 150        |
| 5.4      | ผลการทดสอบลักษณะโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ริงในฉนวน XLPE.....                      | 150        |
| 5.5      | วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ริงในฉนวน XLPE.....                       | 174        |
| 5.6      | ผลจากคุณสมบัติอื่น ๆ ของสารละลายไอออนิก .....                                      | 175        |
| 5.7      | สรุป .....   | 176        |
| <b>6</b> | <b>บทสรุป .....</b>  | <b>177</b> |
| 6.1      | กล่าวนำ .....  | 177        |
| 6.2      | ข้อเสนอแนะ.....  | 178        |
|          | รายการอ้างอิง .....  | 179        |
|          | ภาคผนวก  |            |
|          | ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา .....           | 182        |
|          | ประวัติผู้เขียน .....  | 212        |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า   |
|----------|--|
| 2.1      | วิวัฒนาการและพัฒนาการของสายเคเบิล ..... 7  |
| 2.2      | ความแตกต่างหลักของทรีอิงทางไฟฟ้าและวอเตอร์ทรีอิง ..... 24  |
| 2.3      | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 26   |
| 3.1      | กระบวนการจำลองวอเตอร์ทรีอิง ..... 33   |
| 3.2      | คุณสมบัติทางไฟฟ้าของของวัสดุจำลอง ..... 34   |
| 3.3      | ความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..... 37   |
| 3.4      | ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B)<br>และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 0.1 mm ..... 64 |
| 3.5      | ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B)<br>และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 0.5 mm ..... 64 |
| 3.6      | ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B)<br>และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 1 mm ..... 65   |
| 3.7      | ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B)<br>และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 1.5 mm ..... 66 |
| 4.1      | วิธีการทดสอบวอเตอร์ทรีอิง ..... 80   |
| 4.2      | ช่วงเลขคลื่นอินฟราเรดของแผ่นฉนวน XLPE ที่ใช้วิเคราะห์ ..... 88   |
| 4.3      | ค่าความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันเคมี ..... 90  |
| 5.1      | ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละส่วนของ<br>สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ..... 131  |
| 5.2      | ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละส่วนของ<br>สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ..... 132  |
| 5.3      | ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละส่วนของ<br>สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง ..... 133  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.4 ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายกรีปในแต่ละส่วนของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง..... | 134  |
| 5.5 ค่า pH ของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงที่เปลี่ยนถ่ายสารละลายที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง.....                | 138  |
| 5.6 ค่า pH ของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงที่เปลี่ยนถ่ายสารละลายที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง.....                | 138  |
| 5.7 ค่า pH ของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงที่เปลี่ยนถ่ายสารละลายที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง.....                | 139  |
| 5.8 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกจากการทดสอบวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง .....      | 143  |
| 5.9 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกจากการทดสอบวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C .....     | 144  |
| 5.10 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกจากการทดสอบวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C .....    | 144  |
| 5.11 คุณสมบัติของชนิดธาตุในแต่ละสารละลายไอออนิก .....  | 176  |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 2.1    | โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย..... 5                                     |
| 2.2    | สายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV ..... 10                                |
| 2.3    | สายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV ..... 11                                      |
| 2.4    | การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน ..... 13                           |
| 2.5    | โครงสร้างของฉนวนพอลิเอทิลีน ..... 13  |
| 2.6    | โครงสร้างของฉนวนพอลิเอทิลีนที่นำไปเชื่อมขวาง (ฉนวน XLPE) ..... 14             |
| 2.7    | แบบจำลองข้อบกพร่องที่เกิดบนสายเคเบิลใต้ดิน ..... 17                           |
| 2.8    | แบบจำลองทริอิงทางไฟฟ้า..... 18  |
| 2.9    | แบบจำลองทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายฟุ่ม ..... 19                                   |
| 2.10   | แบบจำลองทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง ..... 19                                   |
| 2.11   | แบบจำลองทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ ..... 20                                   |
| 2.12   | แบบจำลองวอเทอร์ทริอิง ..... 20  |
| 2.13   | รูปแบบการเกิดของวอเทอร์ทริอิง..... 22   |
| 2.14   | ทริอิงทางไฟฟ้าที่เติบโตจากปลายของวอเทอร์ทริอิง ..... 23                       |
| 2.15   | ทริอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากฐานของวอเทอร์ทริอิง ..... 23                      |
| 2.16   | รูปขยายจากรูปที่ 2.13 ทริอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากฐานของวอเทอร์ทริอิง..... 24 |
| 3.1    | ภาคตัดขวางของแกนกลางสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE..... 32                          |
| 3.2    | แบบจำลองสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ในสารละลายไอออนิก ..... 34                   |
| 3.3    | แบบจำลองเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้า ..... 35                                  |
| 3.4    | เครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้า..... 35   |
| 3.5    | เครื่องมือวัดค่า LCR..... 36  |
| 3.6    | เนื้อของแบบจำลองแกนกลางของสายเคเบิล ..... 37                                  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.7 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 0.1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....   | 38   |
| 3.8 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 0.1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....  | 39   |
| 3.9 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 0.1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....  | 40   |
| 3.10 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 0.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....  | 41   |
| 3.11 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 0.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....      | 42   |
| 3.12 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 0.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> ..... | 43   |
| 3.13 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....    | 44   |
| 3.14 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....   | 45   |
| 3.15 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเงาะ 1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....   | 46   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.16 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเจาะ 1.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....  | 47   |
| 3.17 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเจาะ 1.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> ..... | 48   |
| 3.18 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาด<br>รูเจาะ 1.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl<br>(ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> ..... | 49   |
| 3.19 บริเวณของความเครียดสนามไฟฟ้าที่พิจารณา.....   | 50   |
| 3.20 บริเวณของความเครียดสนามไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อเทียบเป็นกราฟ .....  | 51   |
| 3.21 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ<br>ห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub><br>และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....                                       | 52   |
| 3.22 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ<br>50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub><br>และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....                                       | 53   |
| 3.23 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ<br>70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub><br>และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....                                       | 54   |
| 3.24 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ<br>ห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub><br>และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....                                       | 55   |
| 3.25 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ<br>50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub><br>และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....                                       | 56   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.26 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> ..... | 57   |
| 3.27 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....    | 58   |
| 3.28 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....   | 59   |
| 3.29 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....   | 60   |
| 3.30 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....  | 61   |
| 3.31 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> ..... | 62   |
| 3.32 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> ..... | 63   |
| 4.1 ไคอะแกรมต้นแบบสำหรับการทดสอบการขยายตัวของเทอร์ทรีอิง .....   | 69   |
| 4.2 สารประกอบไอออนิก ประกอบด้วย (ก) NaCl (ข) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ค) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ง) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (จ) CuSO <sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO <sub>4</sub> .....  | 70   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า   |    |
|---|--|----|
| 4.3   |  |    |
| ไดอะแกรมสำหรับอุปกรณ์สร้างระบบหมุนเวียนสารละลายไอออนิก ประกอบด้วย (1) อ่างเก็บสารละลาย (2) ฐานรองอ่างสแตนเลส (3) ป้อนน้ำ (4) ถังต้มน้ำ และ (5) สายยาง ..... |  | 71 |
| 4.4   | แบบร่างอ่างเก็บสารละลาย .....  | 71 |
| 4.5   | ฐานรองรับอ่างเก็บสารละลาย .....  | 72 |
| 4.6   | ป้อนน้ำ .....  | 72 |
| 4.7   | สายยาง .....   | 73 |
| 4.8   | ถังต้มน้ำ .....  | 73 |
| 4.9   | ชุดควบคุมความร้อนของสารละลายไอออนิก ประกอบด้วย (1) หม้อต้มน้ำ (2) ฮีตเตอร์ (3) ชุดควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูง และ (4) เทอร์โมคัปเปิล .....  | 74 |
| 4.10  | ฮีตเตอร์ต้มน้ำ .....   | 74 |
| 4.11  | ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูงรุ่น TTM-i4N-R-AB .....   | 75 |
| 4.12  | เทอร์โมคัปเปิล K-type แบบหัวสแตนเลส .....  | 75 |
| 4.13  | ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับชุดควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วย (1) แหล่งจ่ายไฟ (2) เบรกเกอร์ (3) สวิตช์ (4) ฟิวส์ (5) แมกเนติกคอนแท็กเตอร์ (6) โอเวอร์ฮีต และ (7) ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะ ..... | 76 |
| 4.14  | ไดอะแกรมการต่อวงจรชุดอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ประกอบด้วย (1) แหล่งจ่ายไฟ (2) หม้อแปลงแรงดัน (3) ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน และ (4) ด้านทานหน้าวงกระแส .....                            | 76 |
| 4.15  | วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ .....  | 77 |
| 4.16  | สายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ 12/20 (24) kV บางกอกเคเบิล .....  | 78 |
| 4.17  | ขนาดสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ .....   | 78 |
| 4.18  | ไดอะแกรมขนาดการเจาะรูบนฉนวนสายเคเบิล .....   | 79 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.19 ชุดทดสอบรวมของการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน<br>ฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ประกอบด้วย<br>(1) หม้อแปลงแรงดันสูง (2) ตัวต้านทานหน่วยกระแส (3) สายเคเบิล XLPE<br>(4) อ่างวางสายเคเบิล (5) หม้อต้มน้ำ (6) ป้อนน้ำ และ (7) ชุดควบคุมอุณหภูมิ..... | 80   |
| 4.20 ชิ้นส่วนสายเคเบิล.....   | 81   |
| 4.21 เครื่องไมโครโทม.....   | 82   |
| 4.22 ฉนวน XLPE ที่ถูกเจือปน .....   | 82   |
| 4.23 อุปกรณ์ที่ใช้ทำสีข้อมฉนวน (ก) ผงเมทิลินบลู (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์<br>(ค) น้ำกลั่น และ (ง) ขวดผสมสาร .....   | 83   |
| 4.24 อุปกรณ์การข้อมสี (ก) แก้วตวง (ข) เมทิลินบลูที่ผสมแล้ว และ<br>(ค) เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า .....  | 83   |
| 4.25 แผ่นฉนวน XLPE ที่แช่ในภาชนะที่มีเมทิลินบลู.....  | 84   |
| 4.26 แผ่นฉนวน XLPE ที่ถูกข้อมด้วยเมทิลินบลู .....   | 84   |
| 4.27 เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลผลภาพถ่าย Olympus รุ่น BX51M .....   | 85   |
| 4.28 การวัดขนาดของวอเทอร์ทรีอิงจากปลายรูเจาะถึงปลายวอเทอร์ทรีอิง.....   | 85   |
| 4.29 เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี .....   | 87   |
| 4.30 การเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอน<br>และออกซิเจน .....  | 88   |
| 4.31 การเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอน<br>และคาร์บอน .....   | 89   |
| 5.1 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....   | 94   |
| 5.2 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....  | 94   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.3 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $K_2SO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....               | 95   |
| 5.4 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $Cu(NO_3)_2$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....            | 95   |
| 5.5 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $CuSO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                | 96   |
| 5.6 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $FeSO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                | 96   |
| 5.7 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $NaCl$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ .....        | 97   |
| 5.8 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $Na_2SO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ .....    | 97   |
| 5.9 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $K_2SO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ .....     | 98   |
| 5.10 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $Cu(NO_3)_2$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ ..... | 98   |
| 5.11 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $CuSO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ .....     | 99   |
| 5.12 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $FeSO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ .....     | 99   |
| 5.13 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $NaCl$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ .....       | 100  |
| 5.14 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $Na_2SO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ .....   | 100  |
| 5.15 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $K_2SO_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ .....    | 101  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.16 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ ..... | 101  |
| 5.17 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 102  |
| 5.18 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 102  |
| 5.19 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{NaCl}$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                              | 103  |
| 5.20 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                   | 103  |
| 5.21 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                    | 104  |
| 5.22 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                 | 104  |
| 5.23 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                            | 105  |
| 5.24 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                            | 105  |
| 5.25 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{NaCl}$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....              | 106  |
| 5.26 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....   | 106  |
| 5.27 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....    | 107  |
| 5.28 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ ..... | 107  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.29 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....            | 108  |
| 5.30 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....            | 108  |
| 5.31 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{NaCl}$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....              | 109  |
| 5.32 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....   | 109  |
| 5.33 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....    | 110  |
| 5.34 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ ..... | 110  |
| 5.35 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 111  |
| 5.36 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 111  |
| 5.37 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{NaCl}$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                              | 112  |
| 5.38 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                   | 112  |
| 5.39 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                    | 113  |
| 5.40 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                 | 113  |
| 5.41 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                            | 114  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.42 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                            | 114  |
| 5.43 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{NaCl}$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....              | 115  |
| 5.44 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....   | 115  |
| 5.45 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....    | 116  |
| 5.46 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ ..... | 116  |
| 5.47 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....            | 117  |
| 5.48 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C}$ .....            | 117  |
| 5.49 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{NaCl}$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....              | 118  |
| 5.50 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....   | 118  |
| 5.51 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....    | 119  |
| 5.52 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ ..... | 119  |
| 5.53 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 120  |
| 5.54 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 120  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.55 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                               | 121  |
| 5.56 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....    | 121  |
| 5.57 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....     | 122  |
| 5.58 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....  | 122  |
| 5.59 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก CuSO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                  | 123  |
| 5.60 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก FeSO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิห้อง.....                  | 123  |
| 5.61 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 50°C.....                              | 124  |
| 5.62 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 50°C.....   | 124  |
| 5.63 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 50°C.....    | 125  |
| 5.64 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 50°C..... | 125  |
| 5.65 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก CuSO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 50°C.....                 | 126  |
| 5.66 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก FeSO <sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 50°C.....                 | 126  |
| 5.67 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ 70°C.....                              | 127  |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.68 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Na}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....   | 127  |
| 5.69 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{K}_2\text{SO}_4$ หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....    | 128  |
| 5.70 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ ..... | 128  |
| 5.71 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{CuSO}_4$ หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 129  |
| 5.72 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก $\text{FeSO}_4$ หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง<br>ที่อุณหภูมิ $70^\circ\text{C}$ .....            | 129  |
| 5.73 กราฟความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงกับอุณหภูมิ ในสารละลาย<br>ไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง .....     | 135  |
| 5.74 กราฟความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงกับอุณหภูมิ ในสารละลาย<br>ไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง .....     | 135  |
| 5.75 กราฟความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงกับอุณหภูมิ ในสารละลาย<br>ไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง .....     | 136  |
| 5.76 กราฟความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงกับอุณหภูมิ ในสารละลาย<br>ไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง .....     | 137  |
| 5.77 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก.....  | 140  |
| 5.78 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 1000 ชั่วโมง .....  | 140  |
| 5.79 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 2000 ชั่วโมง .....  | 141  |
| 5.80 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 3000 ชั่วโมง .....  | 141  |
| 5.81 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 4000 ชั่วโมง .....  | 142  |
| 5.82 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก.....   | 145  |
| 5.83 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก<br>ในช่วงเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง .....                                | 145  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.84 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก<br>ในช่วงเวลาทดสอบ 2000 ชั่วโมง .....   | 146  |
| 5.85 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก<br>ในช่วงเวลาทดสอบ 3000 ชั่วโมง .....   | 146  |
| 5.86 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก<br>ในช่วงเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง .....   | 147  |
| 5.87 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl เทียบกับ<br>วอเตอร์ทรีอิงของฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมลี้ หลังจาก<br>ทดสอบ 1000 ชั่วโมง ..... | 151  |
| 5.88 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl<br>หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง .....  | 152  |
| 5.89 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl<br>หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง .....  | 152  |
| 5.90 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl<br>หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง .....  | 153  |
| 5.91 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl<br>หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง .....  | 153  |
| 5.92 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง .....   | 154  |
| 5.93 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง .....   | 155  |
| 5.94 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง .....   | 155  |
| 5.95 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง .....   | 156  |
| 5.96 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง .....  | 157  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.97 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $K_2SO_4$<br>หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง .....     | 157  |
| 5.98 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $K_2SO_4$<br>หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง .....     | 158  |
| 5.99 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $K_2SO_4$<br>หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง .....     | 158  |
| 5.100 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $Cu(NO_3)_2$<br>หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ..... | 159  |
| 5.101 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $Cu(NO_3)_2$<br>หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ..... | 160  |
| 5.102 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $Cu(NO_3)_2$<br>หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ..... | 160  |
| 5.103 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $Cu(NO_3)_2$<br>หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ..... | 161  |
| 5.104 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $CuSO_4$<br>หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง .....     | 162  |
| 5.105 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $CuSO_4$<br>หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง .....     | 162  |
| 5.106 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $CuSO_4$<br>หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง .....     | 163  |
| 5.107 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $CuSO_4$<br>หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง .....     | 163  |
| 5.108 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $FeSO_4$<br>หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง .....     | 164  |
| 5.109 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $FeSO_4$<br>หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง .....     | 165  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.110 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{FeSO}_4$<br>หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง .....   | 165  |
| 5.111 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{FeSO}_4$<br>หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง .....   | 166  |
| 5.112 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{NaCl}$<br>เทียบกับฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมลื ..... | 167  |
| 5.113 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{NaCl}$<br>เทียบกับฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมลื ..... | 168  |
| 5.114 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{NaCl}$ .....   | 169  |
| 5.115 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{NaCl}$ .....   | 169  |
| 5.116 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                      | 170  |
| 5.117 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                      | 170  |
| 5.118 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{K}_2\text{SO}_4$ .....                                       | 171  |
| 5.119 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{K}_2\text{SO}_4$ .....                                       | 171  |
| 5.120 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ .....                                    | 172  |
| 5.121 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ .....                                    | 172  |
| 5.122 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{CuSO}_4$ .....   | 173  |
| 5.123 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{CuSO}_4$ .....   | 173  |
| 5.124 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{FeSO}_4$ .....   | 174  |
| 5.125 อัตราส่วนของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ต่อ $\text{C}-\text{H}$ ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย $\text{FeSO}_4$ .....   | 174  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทย ได้มีการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมและการท่องเที่ยวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อทำให้เกิดความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และความสวยงาม ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบสายเคเบิลพาดในอากาศ (Overhead Line) ซึ่งอาจทำให้ทัศนียภาพไม่ค่อยสวยงามและได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมค่อนข้างมาก เช่น การเกิดฟ้าผ่าลงสายเคเบิล มลภาวะทางอากาศหรือสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ อันนำไปสู่การชำรุดของสายเคเบิล ดังนั้นเพื่อให้ป้องกันและลดปัญหาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและเพื่อความสวยงาม ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในเมืองใหญ่จึงใช้ระบบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน (Underground Cable) แทนสายเคเบิลพาดในอากาศ

อย่างไรก็ตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เมื่อใช้งานนานไป ก็อาจมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากความชื้นจากน้ำและสารละลายต่าง ๆ ที่อยู่ภายนอกของเนื้องนวน ความชื้นจะซึมเข้าสู่รอยตัดของเนื้องนวน (ในกรณีที่สายเคเบิลไฟฟ้ามีรอยตัดจากการใช้งาน) หรือช่องว่างระหว่างเกลียวของสายตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียวจนนำไปสู่การเกิดวอเตอร์ทริอิงและทริอิงนี้จะค่อย ๆ ขยายตัวไปอย่างช้า ๆ จนจนวนและกำบังตัวนำ (ฉนวนสารกึ่งตัวนำ) ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินหมดคุณสมบัติความเป็นฉนวนและเกิดการเบรกดาวน์ของสายเคเบิลตามมาในที่สุด

เนื่องจากความชื้นเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จึงนำมาสู่การศึกษาค้นคว้าและการวิจัยเกี่ยวกับระบบกลไกการเสื่อมอายุและการเสียคุณสมบัติความเป็นฉนวนด้วยการจำลองการใช้งานสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินในสภาวะความชื้นจากสารละลายไอออนิก (สารละลายประเภทเกลือ) ชนิดต่าง ๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาองค์ความรู้สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นในการใช้งานสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เพื่อลดปัญหาในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินและเพื่อเพิ่มคุณภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะยาว วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Crosslink-Polyethylene) สำหรับแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นจากสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ในขณะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะจำเพาะของการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV
- 1.2.2 เพื่อออกแบบสร้างชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่ง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งระหว่างสายเคเบิลใหม่กับสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ในระดับชั้นใต้ดิน อุณหภูมิและความชื้นจากสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ อาจจะมีผลต่อลักษณะขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่งในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาปฏิกิริยารวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะของการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง
- 1.4.2 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งของฉนวน XLPE จะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลางในการทดสอบที่ 24 kV
- 1.4.3 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งของฉนวน XLPE ใช้อุณหภูมิความร้อนของน้ำสารละลายที่ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C
- 1.4.4 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งของฉนวน XLPE ใช้ความถี่ของแรงดันที่ 50 Hz
- 1.4.5 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งของฉนวน XLPE ในการทดสอบโดยการจำลองสภาวะการใช้งานจริง จะใช้เวลาในการทดสอบก่อนข้างนาน จึงใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง
- 1.4.6 การทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งของฉนวน XLPE จำลองด้วยสภาวะความชื้นจากสารละลายไอออนิกที่ใช้ประกอบไปด้วย โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) โพแทสเซียมซัลเฟต (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) คอปเปอร์(II)ไนเตรต (Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) คอปเปอร์(II)ซัลเฟต (CuSO<sub>4</sub>) และไอออน(II)ซัลเฟต (FeSO<sub>4</sub>)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการขยายตัวการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV

1.5.2 ได้ชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิงสำหรับสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

1.5.3 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย เรื่องการศึกษาลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

## 1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎี สมมติฐาน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลใต้ดิน รวมถึงการเกิดวอเตอร์ทรีอิง

**บทที่ 3** กล่าวถึงการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงด้วยโปรแกรม Ansys Maxwell 2D

**บทที่ 4** กล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิง การเตรียมตัวอย่างทดสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

**บทที่ 5** กล่าวถึงผลของการทดสอบของวอเตอร์ทรีอิง การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวน XLPE

**บทที่ 6** กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและปรัทัศน์วรรณกรรม

#### 2.1 กล่าวนำ

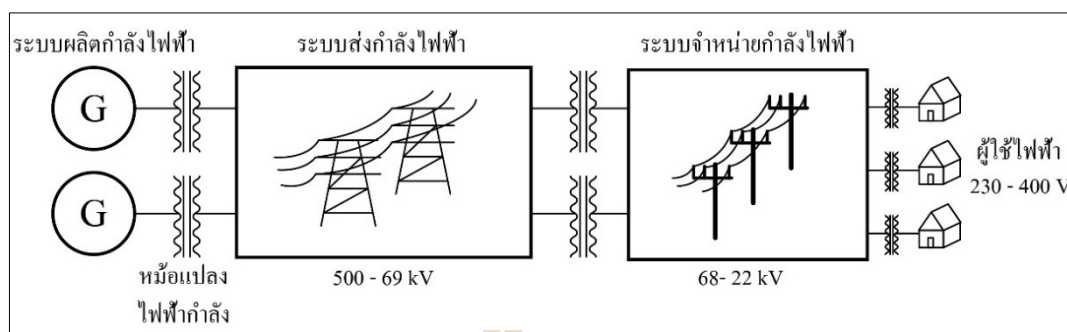
ในหลาย ๆ ประเทศ รวมทั้งในประเทศไทย ได้เริ่มปรับเปลี่ยนจากสายไฟฟ้าแบบพาดอากาศมาเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง (Water Treeing) จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎี ข้อดี ข้อเสีย ของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE รวมไปถึงการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางวิจัย ระเบียบวิธี ผลของการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัย ตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมงานวิจัย วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE Science-Direct หนังสือ และแหล่งข้อมูลอ้างอิงจากเว็บไซต์ ผลการสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

#### 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบ โครงข่ายที่มีการเชื่อมโยงของระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนพลังงานที่ไม่ใช่ไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้า และแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าในระดับสูงเพื่อจ่ายไฟให้สถานที่ต่าง ๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมและบ้านเรือน เป็นต้น ระบบไฟฟ้ากำลังที่ดีต้องคำนึงถึงความปลอดภัย มั่นคง มีความน่าเชื่อถือ ราคาที่เหมาะสมตามหลักเศรษฐศาสตร์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นที่ยอมรับของคนในท้องถิ่น

ระบบไฟฟ้ากำลังระบบใหญ่หรือในระบบเล็ก แบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อยหลัก คือ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย

(ที่มา [http://nongcom-electrical.blogspot.com/2014/10/blog-post\\_22.html](http://nongcom-electrical.blogspot.com/2014/10/blog-post_22.html). เข้าถึงเมื่อ 1 มิ.ย. 2561)

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า คือ โรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากต้นกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น โรงจักรไอน้ำ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ และโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ เป็นต้น โดยทั่วไปมีระดับแรงดันตั้งแต่ 11 kV ถึง 27 kV จากนั้นผู้ผลิตไฟฟ้าต้องยกกระดับแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังไฟฟ้า คือ ระบบที่ยกกระดับแรงดันจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ในประเทศไทยมีระดับแรงดันสำหรับส่งกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 69 kV ถึง 500 kV ที่ระดับแรงดันที่มากขึ้นช่วยลดการเกิดแรงดันตกจากความสูญเสีย (Losses) ในสายส่งที่ส่งต่อไปยังระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) มีระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 230 kV ไฟฟ้าแรงสูงพิเศษ (Extra High Voltage) มีระดับแรงดันตั้งแต่ 230 kV ถึง 1000 kV และไฟฟ้าแรงสูงยิ่ง (Ultra-High Voltage) ตั้งแต่ 230 kV ถึง 1000 kV

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า คือ ระบบไฟฟ้าที่รับกำลังไฟฟ้าต่อจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อกระจายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดของผู้ใช้ และโดยสถานีไฟฟ้าเป็นผู้แบ่งจ่ายไฟ สำหรับประเทศไทยระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 115 kV

### 2.2.1 หน่วยงานหลักของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย

ระบบไฟฟ้าในประเทศไทยมีหน่วยงานที่รับผิดชอบอยู่ 3 หน่วยงานหลัก ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยแต่ละหน่วยงานมีหน้าที่ดังนี้

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand : EGAT) มีหน้าที่จัดหาพลังงานไฟฟ้าแก่ประชาชน โดยการผลิตและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ กฟน. กฟภ. และ ผู้ใช้พลังงานไฟฟ้ารายอื่นตามที่กฎหมายกำหนด รวมทั้งประเทศไทยใกล้เคียง ระดับแรงดันที่ กฟผ. ผลิต ได้แก่ 500 kV 230 kV และ 115 kV

การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority : MEA) มีหน้าที่ให้บริการด้านการจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟโดยเป็นผู้รับซื้อพลังงานไฟฟ้าจาก กฟผ. และเป็นผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กมาจัดจำหน่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าภายในเขตกรุงเทพมหานครฯ สมุทรปราการ และนนทบุรี ระดับแรงดันที่ใช้งานคือ 115 kV 69 kV 24 kV 400 V และ 240 V

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority : PEA) มีหน้าที่ให้บริการด้านการจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยเป็นผู้รับซื้อพลังงานไฟฟ้าจาก กฟผ. และผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กมาก ระดับแรงดันที่ใช้งานคือ 115 kV 33 kV 22 kV 400 V และ 230 V

## 2.2.2 ประวัติของสายไฟฟ้า

สายเคเบิลไฟฟ้ามีต้นกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ. 1880 โดยหลังจากมีการประดิษฐ์หลอดไฟฟ้า ความต้องการสายเคเบิลในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1884 บริษัท Callender Cable ได้ผลิตสายเคเบิลฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน (Paper Insulated Lead Sheath Cable PILC) เป็นครั้งแรก สายเคเบิล PILC ชนิดแรงดันปานกลางมีการใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจากมีความทนทานและความน่าเชื่อถือ และสายเคเบิล PILC สามารถใช้กับเครือข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดินสำหรับสาธารณูปโภค (Bartnikas, 1999 อ้างอิงใน วีระพงษ์, 2557)

จากปี ค.ศ. 1800 จนถึงปัจจุบัน สายเคเบิลได้พัฒนาในด้านเทคโนโลยีและวัสดุ ในปี ค.ศ. 1950 การออกแบบและกระบวนการผลิตได้ออกแบบสายเคเบิลให้มีความยืดหยุ่นและง่ายต่อการติดตั้งเมื่อเปรียบเทียบกับสายเคเบิล PILC นั่นคือสายเคเบิลที่เป็นยาง อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 1933 พอลิเอทิลีน (polyethylene : PE) ถูกค้นพบและได้รับการยอมรับสำหรับการใช้งานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า จากนั้นในปี ค.ศ. 1950 พอลิเอทิลีนได้เข้ามาแทนที่สายเคเบิลฉนวนยางเกือบทั้งหมด ต่อมาประเทศสหรัฐอเมริกาได้ผลิตสายเคเบิลพลาสติกที่ทำมาจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นของโมเลกุลสูง (High Molecular Weight Polyethylene : HMWPE) ขึ้นมาใช้งาน สายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนสำหรับระบบจำหน่าย 35 kV ได้เริ่มใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1951 และมีการนำเสนอเรื่องสายเคเบิลสำหรับระบบจำหน่ายใต้ดินแบบฉนวนพอลิเอทิลีนเป็นครั้งแรกในช่วงปลายปีของ ค.ศ. 1960 และ ในปี ค.ศ. 1963 ได้มีการประดิษฐ์สายเคเบิลฉนวน XLPE ขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรก จึงทำให้สายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นของโมเลกุลสูงถูกนำมาใช้งานน้อยลง เนื่องจากสายเคเบิลฉนวน XLPE สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงกว่าสายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นของโมเลกุลสูง (Bartnikas, 1999)

สายเคเบิลพอลิเอทิลีนมีความเสี่ยงต่อการชำรุดได้ไว และการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลสามารถเกิดก่อนกำหนดเวลาเมื่อสายเคเบิลทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียกชื้น ในบางกรณี

มีอายุการใช้งานน้อยกว่า 10 ปี ดังนั้นผู้ผลิตสายเคเบิลและระบบสาธารณูปโภคได้ร่วมกันค้นหาสาเหตุและแนวทางแก้ปัญหาที่สร้างความเชื่อมั่นและความมั่นใจในการใช้สายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ จากการค้นคว้าปัญหานี้พบว่าความล้มเหลวหรือการชำรุดที่เกิดขึ้นเกิดจากปรากฏการณ์วอลเทอร์ทรีอิ่งเป็นกระบวนการเสื่อมสภาพที่เริ่มต้นจากส่วนที่ยื่นออกมาจากตัวนำและเปลือกหุ้มฉนวน สารปนเปื้อนในฉนวนและเปลือกหุ้ม หรือช่องว่างในฉนวน (Orton, 2006)

ในปี ค.ศ. 1980 ปรากฏการณ์วอลเทอร์ทรีอิ่งได้ควบคุมด้วยกระบวนการบ่มแห้งสำหรับเทอร์โมเซตแบบผิวเรียบและใช้ตัวนำกับเปลือกหุ้มฉนวนที่สะอาด จึงได้ผลิตฉนวน Tree Resistant XLPE (TR-XLPE) ที่มีความสะอาดเป็นพิเศษ ฉนวนแบบนี้สามารถทนต่อการเกิดวอลเทอร์ทรีอิ่งได้โดยการใช้สารเติมแต่งและการใช้เทคโนโลยีโคพอลิเมอร์เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต (Orton, 2006)

ในปี ค.ศ. 1960 สายเคเบิลฉนวนยางเอทิลีน โพรพิลีน (Ethylene Propylene Rubber : EPR) นำเข้ามาใช้ในระดับแรงดันไฟฟ้า 60 kV สายเคเบิลฉนวนยางเอทิลีน โพรพิลีน มีความยืดหยุ่นดีกว่าสายเคเบิลพอลิเอทิลีน แต่มีความเสี่ยงต่อการเกิดวอลเทอร์ทรีอิ่ง นอกจากนี้การสูญเสียความเป็นฉนวนของสายเคเบิลฉนวนยางเอทิลีน โพรพิลีนสูงกว่าหรือเทียบเท่าของสายเคเบิลฉนวน XLPE หรือ TR-XLPE ดังนั้นการใช้สายเคเบิลฉนวนยางเอทิลีน โพรพิลีน ในการติดตั้งเป็นที่ต้องการน้อยลง จึงไม่ถูกใช้สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Bartnikas, 1999) พัฒนาการของฉนวนสายเคเบิลเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ในตารางที่ 2.1 แสดงวิวัฒนาการและพัฒนาการของสายเคเบิล

ตารางที่ 2.1 วิวัฒนาการและพัฒนาการของสายเคเบิล (G.F. Moore, 1997; รัฐเขต, 2555)

| ปี ค.ศ. | พัฒนาการของสายเคเบิล  |
|---------|---|
| 1812    | เริ่มมีการใช้สายไฟหุ้มฉนวนด้วยยางเคลือบเงา ใช้สำหรับการจุดระเบิดในเหมืองเป็นครั้งแรกในรัสเซีย       |
| 1850    | เริ่มมีการใช้สายเคเบิลโทรเลขใต้ทะเลระหว่างอังกฤษและฝรั่งเศส และใช้ในเรือดำน้ำเป็นครั้งแรก           |
| 1880    | Thomas Edison ได้ประดิษฐ์สายเคเบิลกระแสตรงโดยมีฉนวนหุ้มขึ้นในอเมริกา                                |
| 1890    | Sebastian Ferranti ได้เสนอแนวคิดการใช้สายเคเบิล 10 kV ในรูปแบบท่อ โดยมีกระดาษเป็นฉนวนในประเทศอังกฤษ |
| 1900    | มีการใช้ยางธรรมชาติเป็นฉนวนในสายเคเบิล  |
| 1925    | เริ่มมีการใช้สายเคเบิลกระดาษอัดความดันเป็นครั้งแรก  |

| ปี ค.ศ. | พัฒนาการของสายเคเบิล  |
|---------|---|
| 1930    | เริ่มมีการใช้ผลิตภัณฑ์พีวีซี (PVC) เป็นครั้งแรกในประเทศเยอรมัน  |
| 1937    | ได้มีการคิดค้นวัสดุพอลิเมอร์พอลิเอทิลีน ขึ้นในประเทศอังกฤษ  |
| 1942    | เริ่มมีการประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเอทิลีนในสายเคเบิลเป็นครั้งแรก  |
| 1954    | เริ่มมีการใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นครั้งแรกในสวีเดน  |
| 1963    | บริษัท General Electric ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางขึ้น                                   |
| 1968    | เริ่มมีการใช้สายเคเบิล XLPE ในระบบแรงดันสูงขนาดกลางเป็นฉนวนครั้งแรก   |
| 1972    | นำเสนอการใช้ตัวกำบังแบบสารกึ่งตัวนำในสายเคเบิล  |
| 1978    | มีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นปลอกหุ้มสายเคเบิลอย่างแพร่หลายในอเมริกาเหนือ                                      |
| 1988    | เริ่มมีการประยุกต์ใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาด 500 kV เป็นครั้งแรกในญี่ปุ่น                             |
| 2000    | เริ่มมีการประยุกต์ใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาด 500 kV โดยติดตั้งใต้ดินในระยะทางไกลเป็นครั้งแรกในญี่ปุ่น |
| 2006    | ออสเตรเลียได้มีการสร้างสายเคเบิลใต้น้ำที่มีความยาวที่สุดในโลก   |

### 2.2.3 ประเภทของสายไฟฟ้า

มาตรฐานของสายเคเบิลก่อตั้งขึ้น โดยหลากหลายองค์กร โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ที่มีมาตรฐานต่าง ๆ เช่น 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) และรวมไปถึงมาตรฐาน Insulated Cable Engineers Association (ICEA) มาตรฐานที่มีความโดดเด่นที่สุดในระดับนานาชาติ คือ International Electrotechnical Commission (IEC) นอกจากนี้ระบบมาตรฐานที่มีอยู่จากหน่วยงานเหล่านี้ครอบคลุมประเภทของสายเคเบิลทั้งหมด การออกแบบสายเคเบิล วัสดุสายเคเบิลอุปกรณ์เสริม การติดตั้ง การทำงานและการทดสอบสายเคเบิล และรวมถึงตัวชี้วัดบางอย่างสำหรับการตรวจวิเคราะห์

สายไฟฟ้าในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ สายไฟฟ้าแรงต่ำ (Low Voltage Power Cable) และสายไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Power Cable) โดยมีลักษณะดังนี้

สายไฟฟ้าแรงต่ำ เป็นสายไฟฟ้าแรงดันไม่เกิน 750 V มีฉนวนหุ้ม ตัวนำทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม โดยทั่วไปสายทองแดงขนาดเล็กเป็นตัวนำเดี่ยว ส่วนสายขนาดใหญ่เป็น

ตัวนำตีเกลียว วัสดุฉนวนที่ใช้กับสายไฟฟ้าแรงดันต่ำ คือ พีวีซี และ XLPE ประเภทหลัก ๆ ของสายไฟฟ้าแรงต่ำ คือ สาย THW สาย VAF สาย VCT และ สาย NYY เป็นต้น

สายไฟฟ้าแรงสูง เป็นสายไฟฟ้าระดับแรงดัน 1000 V ขึ้นไป ระดับแรงดันสูงช่วยให้การส่งกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ สายไฟชนิดนี้มีลักษณะตัวนำไฟฟ้าเป็นตัวนำตีเกลียวขนาดใหญ่ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สายเปลือยและสายหุ้มฉนวน ชนิดของสายเปลือย ประกอบด้วย (i) สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (ACC) (ii) สายอลูมิเนียมผสม (AAAC) และ (iii) สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR) ส่วนชนิดของสายหุ้มฉนวนประกอบด้วย (i) สาย Partial Insulated Cable (PIC) (ii) สาย Space Aerial Cable (SAC) (iii) สาย Preassembly Aerial Cable (PAC) และ (iv) สาย XLPE เป็นต้น

#### 2.2.4 ประเภทของสายไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ลักษณะโดยทั่วไปของสายไฟฟ้าสำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แบ่งตามลักษณะโครงสร้างและฉนวนได้เป็น 2 แบบ คือ แบบขึงในอากาศและแบบเคเบิลใต้ดิน โดยมีลักษณะดังนี้

สายส่งแบบขึงในอากาศ ใช้อากาศเป็นฉนวนหลัก สามารถกลับคืนสภาพความเป็นฉนวนได้หลังจากการเกิดดีสชาร์จ (Discharge) หรือ เบรกดาวน์ (Breakdown) การใช้ระบบไฟฟ้าแบบขึงอากาศต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อม มลภาวะ โครนาที่รบกวนการสื่อสารความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้า และระยะห่างที่ปลอดภัยจากสายไฟฟ้า เป็นต้น รวมไปถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

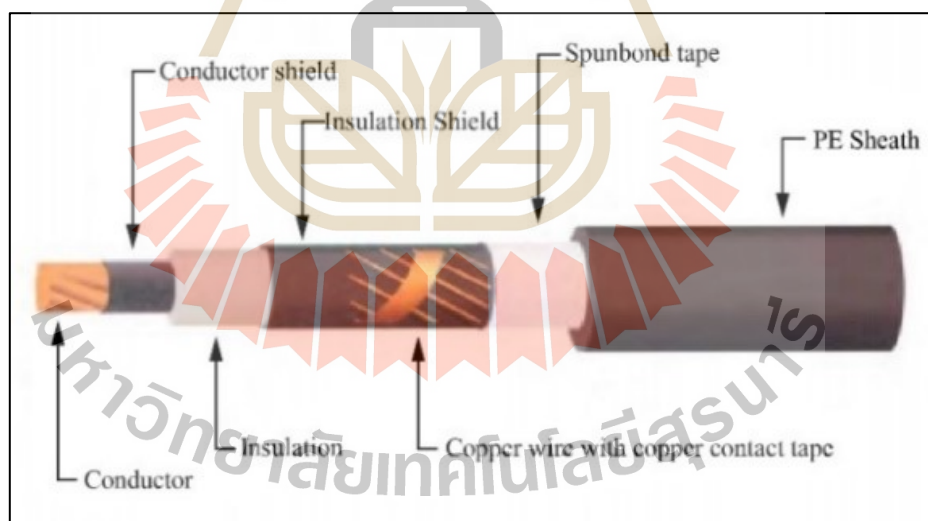
ในปัจจุบันระบบสายไฟฟ้าแบบขึงในอากาศมีปัญหามากมาย โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ เช่น ชุมชนในเมืองใหญ่มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามกหรือเกินความต้องการ จึงต้องมีการออกแบบติดตั้งระบบสายไฟฟ้าขึงในอากาศเพิ่มขึ้นหลาย ๆ วงจรในเสาไฟฟ้าต้นเดียวกัน อาจเกิดการลัดวงจร และลดความน่าเชื่อถือลง รวมไปถึงในบางพื้นที่ที่ต้องการความปลอดภัยต่อคน สัตว์ สิ่งของและความสวยงาม ทำให้ต้องมีการวางแผนและออกแบบอย่างรอบคอบ ดังนั้นทำให้เริ่มมีการใช้รูปแบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดินมากขึ้น ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดินมีความปลอดภัยมั่นคง และความน่าเชื่อถือสูง แต่ต้องออกแบบเพื่อให้ถูกต้องตามมาตรฐานของระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่

สายส่งแบบเคเบิลใต้ดิน เป็นสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้สายตัวนำหุ้มด้วยฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และฉนวนก้ำซอด้ความดัน เพื่อให้ทนทานต่อแรงดันสูง เนื่องจากบางพื้นที่มีที่ว่างไม่มากพอที่ใช้เดินสายส่งแบบขึงอากาศ เช่น ในเมืองใหญ่ ชุมชนเล็ก ๆ หรือในกรณีที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อม ความสวยงามของภูมิทัศน์ และความปลอดภัยจากฟ้าผ่าโดยตรง ดังนั้นสายเคเบิลใต้ดินจึงนำมาปรับแก้และป้องกันปัญหาเหล่านี้ สายเคเบิลใต้ดินสามารถเดินสายไฟฟ้าแบบฝังดินโดยตรง แบบวางใต้ท้องทะเล และแบบวางในรางที่มั่นคง รวมทั้งสามารถขึงในอากาศได้ เช่น ใน

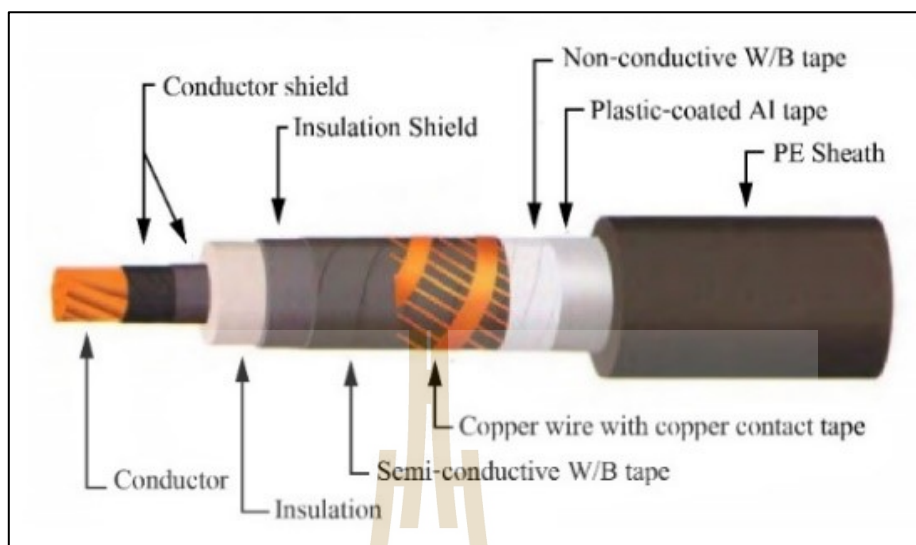
อุโมงค์ เป็นต้น การต่อสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดินเข้ากับสายส่งจ่ายแบบชิงอากาศต้องผ่านหัวเคเบิล (Cable Terminal) โครงสร้างหลักของสายเคเบิลใต้ดิน แบ่งออกเป็น 1 ส่วน คือ ฉนวนหลัก และสิ่งห่อหุ้มภายนอก ขึ้นอยู่กับชนิดของสายเคเบิลใต้ดิน พิกัดแรงดัน ลักษณะการติดตั้ง เป็นต้น

### 2.2.5 สายเคเบิลใต้ดิน

ในช่วงเวลา 1 ปีก่อน การไฟฟ้าแห่งประเทศไทยใช้สายเคเบิลใต้ดินหลายชนิด เช่น ฉนวนกระดาษน้ำมัน ฉนวนกระดาษและก๊าส ฉนวน XLPE ฉนวนพอลิเอทิลีน และฉนวนยางเอทิลีนโพรพิลีน เป็นต้น แต่ในช่วงหลังหรือในปัจจุบันได้ใช้ฉนวน XLPE อย่างแพร่หลาย ดังเดิมใช้สายเคเบิลใต้ดินฉนวนน้ำมันความดันต่ำที่มีความน่าเชื่อถือสูง แต่เนื่องจากการติดตั้งและบำรุงรักษา จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์สูง ฉะนั้นฉนวน XLPE จึงนำมาใช้มากขึ้น การติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก ในปัจจุบัน กฟภ. ใช้งานสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ทั้งในระดับแรงดันปานกลาง (Medium Voltage Cables) 22-33 kV และ แรงดันสูง (High Voltage Cable) 115 kV รูปที่ 2.2 แสดงสายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV และรูปที่ 2.3 แสดงสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, 2548)



รูปที่ 2.2 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV



รูปที่ 2.3 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV

#### 2.2.5.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน

ส่วนประกอบหลักของสายเคเบิลใต้ดินประกอบด้วย ตัวนำ (Conductor) กำบังตัวนำ (Conductor Screen) ฉนวน (Insulation) กำบังฉนวน (Insulation Screen) ตัวกั้นโลหะ (Metallic Screen) เทปพันรัด (Binder Tape) เทปสังเคราะห์กันน้ำ (Synthetic Water Blanking Tape) และเปลือก (Sheath/Jacket)

ตัวนำ คือ ลวดทองแดงหรือลวดอะลูมิเนียมตีเกลียวทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของการตีเกลียวรวมศูนย์กลางอัดแน่น (Compact Round Concentric Lay Stranding) มีหลายลักษณะ เช่น สายไฟชนิดแข็ง ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าขนาดเล็ก แต่ไม่นิยมใช้สายขนาดใหญ่เนื่องจากติดตั้งยาก ตัวนำตีเกลียวใช้เป็นตัวนำของสายไฟทั่ว ๆ ไปและสายเปลือย ตัวนำอัดแน่น (Compact Strand Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนทั่ว ๆ ไป โดยการนำตัวนำตีเกลียวมาบีบอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง และเมื่อนำไปใช้ในสายหุ้มจะช่วยลดวัสดุที่นำมาหุ้ม ตัวนำไฟฟ้าแบบมิลลิเคน (Milliken Conductor) ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินขนาดใหญ่ที่ต้องการการรองรับกระแสสูง โดยแต่ละส่วนประกอบด้วยตัวนำตีเกลียวแล้วอัดให้เป็นปล้อง โดยแต่ละปล้องหุ้มด้วยฉนวน ข้อดีของตัวนำชนิดนี้ คือ มีความต้านทานแรงดันกระแสสลับต่ำ เนื่องจากสายไฟในแต่ละปล้องมีการย้ายเข้าออกระหว่างส่วนนอกและส่วนในของตัวนำทำให้ผลกระทบต่อพื้นผิวต่ำ และลักษณะสุดท้ายของตัวนำ คือ ตัวนำไฟฟ้าชนิดกลวงเป็นตัวนำของสายเคเบิลฉนวนน้ำมัน โดยใช้ท่อกกลางตัวนำส่งน้ำมัน ปัจจุบันสายเคเบิลชนิดนี้นำมาใช้กับสายเคเบิลใต้

ดินที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแข็งที่ต้องการนำกระแสสูง ๆ โดยใช้น้ำหรืออากาศผ่านเข้าไปในท่อกลางตัวนำเพื่อระบายความร้อน

กำบังตัวนำ คือ ชั้นของสารกึ่งตัวนำ อยู่ในรูปของสารประกอบที่ใช้หุ้มเพื่อทำให้ผิวนอกของตัวนำราบเรียบสม่ำเสมอ และทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนสม่ำเสมอทุกทิศทาง เพื่อช่วยป้องกันความเค้นทางไฟฟ้าและการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ฉนวน คือ ส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลใต้ดิน มีหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วไหลหรือลัดวงจรและอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้ คุณภาพของสายเคเบิลขึ้นอยู่กับวัสดุฉนวนมีอยู่หลายชนิด เช่น พีวีซี หรือ พอลิเอทิลีน นิยมใช้ในระบบแรงต่ำ ส่วนฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน ฉนวน XLPE และฉนวนยางเอทิลีน โพรพิลีน นิยมใช้ในระบบแรงสูง

กำบังฉนวน คือ ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในรูปแบบสารประกอบที่ใช้หุ้มเพื่อทำให้ผิวนอกของฉนวนราบเรียบสม่ำเสมอ และทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างฉนวนกับตัวกั้นโลหะสม่ำเสมอทุกทิศทาง อีกทั้งยังช่วยลดความเค้นทางไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ทำกำบังฉนวนเหมือนกับกำบังตัวนำ

ตัวกั้นโลหะ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นสายดินสำหรับสายไฟฟ้าแรงสูงและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร ตัวกั้นโลหะยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันแรงทางกลหรือทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้สมุทรหรือทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับสายเคเบิลชุบน้ำมัน ตัวกั้นโลหะอาจเป็นเทปหรือทำด้วยทองแดงหรืออะลูมิเนียมหรือปลอกตะกั่วหรือปลอกอะลูมิเนียมลวก

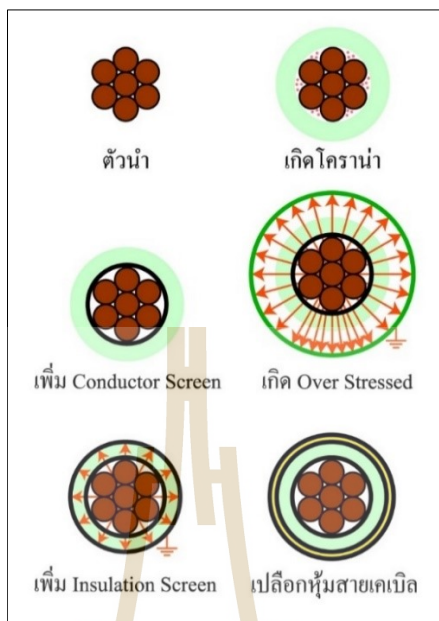
เทปพันรัด คือ เทปที่พันบนชั้นของตัวกั้นโลหะเพื่อกั้นแยกก่อนถึงชั้นเปลือกของสายเคเบิล

เทปสังเคราะห์กันน้ำ คือ เทปที่ทำจากสารสังเคราะห์ที่สามารถดูดซับน้ำไว้ในตัวเทปได้ มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในสายไฟฟ้าและป้องกันไม่ให้ส่วนที่เป็นโลหะทำให้เกิดรอยหรือสัมผัสโดยตรงกับส่วนที่เป็นฉนวนโลหะ และเป็นเทปที่ไม่นำไฟฟ้า

เปลือก คือ สารประกอบพอลิเอทิลีนหรือพอลิไวไนลคลอไรด์ที่ใช้หุ้มชั้นนอกสุดของสายไฟฟ้ามีหน้าที่ป้องกันแรงกระแทก เสียคสี และทนทานต่อสภาพแวดล้อม วัสดุที่ใช้ทำมีพีวีซีและพอลิเอทิลีน

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของสายเคเบิลใต้ดิน ถ้าขาดไปส่วนใดส่วนหนึ่งอาจทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

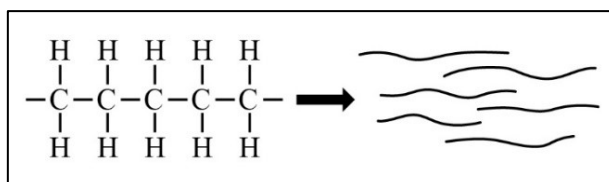




รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน  
(กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, 2548)

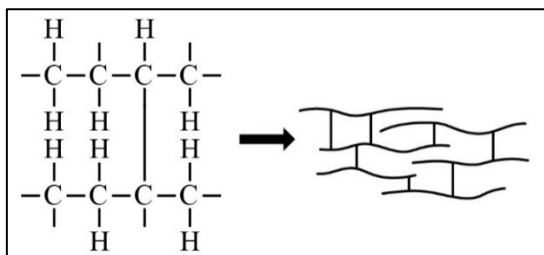
### 2.2.6 ฉนวน XLPE

เนื่องจากสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นสายเคเบิลสำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของ กฟภ. และเป็นแบบฉนวน XLPE ทั้งหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงขอกล่าวต่อไปในเรื่องของฉนวน XLPE เท่านั้น ฉนวน XLPE พัฒนามาจากฉนวนพอลิเอทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยใช้วิธีการเชื่อมขวางเป็นวิธีการนำพอลิเอทิลีนที่เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายใน ทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างของโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากเทอร์โมพลาสติกไปเป็นเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) แล้วกลายเป็นฉนวน XLPE ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของฉนวนพอลิเอทิลีน

(ที่มา: <http://www.ucable.com.my/industrialcables.html> เข้าถึงเมื่อ 1 มิถุนายน 2561)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของฉนวนพอลิเอทิลีนที่นำไปเชื่อมขวาง (ฉนวน XLPE)  
(ที่มา: <http://www.ucable.com.my/industrialcables.html> เข้าถึงเมื่อ 1 มิถุนายน 2561)

จากรูปที่ 2.5 โดยปกติโมเลกุลของฉนวนพอลิเอทิลีน ประกอบด้วยคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ที่ยึดเกาะกันเป็นสายยาวโดยไม่มีการยึดเกาะกันระหว่างสาย ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อน สายโมเลกุลของพันธะ C-H สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ เป็นผลให้เกิดการละลายเนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุล แต่เมื่อนำเข้าสู่วิธีการเชื่อมขวาง การยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดแรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุล ทำให้ฉนวน XLPE ละลายได้ช้าลงเมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งาน

#### ข้อดีของฉนวนประเภท XLPE

- ทนต่ออุณหภูมิได้สูง คือ  $90^{\circ}\text{C}$  และในสภาวะลัดวงจรทนอุณหภูมิได้  $250^{\circ}\text{C}$  แต่ในสภาวะฉุกเฉินทนได้  $130^{\circ}\text{C}$
- คุณสมบัติทางไฟฟ้าดี เช่น มีการสูญเสียความเป็นฉนวนต่ำ และมีค่าความต้านทานแรงดึงสูง
- ทนทานต่อสารเคมีดีกว่าพอลิเอทิลีนและพีวีซี
- ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม
- มีคุณสมบัติทางกลที่ดีและทนต่อแรงกระทำภายนอก

#### ข้อเสียของฉนวนประเภท XLPE

- มีราคาสูง
- มีขั้นตอนการติดตั้งที่ยุ่งยาก
- ไม่สามารถซ่อมแซมฉนวนได้ถ้าเกิดความเสียหาย

#### 2.2.6.1 การเปลี่ยนฉนวนพอลิเอทิลีนเป็นฉนวน XLPE

การเปลี่ยนฉนวนพอลิเอทิลีนเป็นฉนวน XLPE ใช้วิธีการเชื่อมขวางด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Crosslinking) โดยรูปแบบความร้อนที่ใช้เชื่อมขวางแบบเปอร์ออกไซด์มี 2 วิธี ดังนี้

#### - วิธีการอบไอน้ำ

สิ่งสำคัญในการผลิตสายไฟฟ้า คือ ฉนวนของสายไฟฟ้าต้องเป็นเทอร์โมพลาสติกเพราะต้องหลอมละลายและฉีดออกมาเพื่อหุ้มสายไฟฟ้า ดังนั้นในกระบวนการผลิตสายเคเบิล XLPE จึงแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ

ขั้นตอนแรกเป็นการหลอมละลายและฉีดออก โดยวัตถุดิบสำหรับการผลิตฉนวน XLPE มีลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกที่หลอมละลายได้ (พอลิเอทิลีนร่วมกับสารพวกเปอร์ออกไซด์ที่เป็นตัวทำปฏิกิริยา) โดยเม็ดพลาสติกนี้ถูกหลอมละลายและฉีดออกมาหุ้มสายไฟฟ้า เช่นเดียวกับการผลิตสายไฟฟ้าฉนวนพอลิเอทิลีนหรือพีวีซีโดยทั่วไป จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนฉนวนให้เป็นเทอร์โมเซตติง

ขั้นตอนที่สอง นำสายไฟฟ้าไปผ่านในท่อที่มีไอน้ำอุณหภูมิสูง (2000°C) และ ความดันสูง (20 บาร์) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนโมเลกุลของพอลิเอทิลีนให้เป็น XLPE (ส่วนนี้เรียกว่าห้องอบไอน้ำหรือห้องวัลคาไนซ์) จากนั้นสายไฟฟ้าถูกลดอุณหภูมิให้ต่ำลงโดยการหลอมน้ำในท่ออีกส่วนหนึ่งเรียกว่าห้องหล่อเย็น

สาเหตุที่ใช้ไอน้ำหรือน้ำเป็นตัวกลางถ่ายเทอุณหภูมิเนื่องจากน้ำและไอน้ำมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้การถ่ายเทและระบายความร้อนได้รวดเร็วนั่นเอง

ในกรณีที่ใช้ท่ออบในแนวตั้งกระบวนการผลิตนี้เรียกว่าวิธีวัลคาไนซ์ต่อเนื่องในแนวตั้ง (Vertical Continuous Vulcanization : VCV) ส่วนใหญ่ใช้สำหรับผลิตสายเคเบิลใต้ดิน แต่ถ้าใช้ท่อเอียงลาดเรียกว่าวิธีวัลคาไนซ์ต่อเนื่องในแนวระนาบเอียง (Catenary Continuous Vulcanization : CCV) ข้อดีของการผลิตด้วยวิธีวัลคาไนซ์ต่อเนื่องในแนวตั้ง คือ สายไฟฟ้าที่ได้มีตัวนำอยู่ตรงกลางไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง ความหนาของฉนวนเท่ากันตลอดความยาวสายแต่ค่าลงทุนในการก่อสร้างสูงเพราะต้องทำเป็นหอสูง ถ้าใช้วิธีวัลคาไนซ์ต่อเนื่องในแนวระนาบเอียง ค่าก่อสร้างต่ำกว่าแต่ก็มีข้อจำกัดไม่สามารถผลิตสายไฟฟ้าแรงสูงที่มีความหนาของฉนวนมาก ๆ ได้ เพราะเกิดการเอียงไปด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย

#### - วิธีอบแห้ง

หลังจากสายเคเบิลฉนวน XLPE ชนิดที่ผ่านการอบไอน้ำถูกใช้งานไประยะหนึ่งพบว่าชำรุดเร็วกว่าเวลาที่คาดไว้ในเวลาเพียง 10 ปี พบว่าสาเหตุของการชำรุดเกิดมาจากวอเตอร์ทรีอิง โดยมีน้ำ สนามไฟฟ้า และช่องว่างหรือสิ่งแปลกปลอมในฉนวน กล่าวคือขณะที่อบโดยใช้ไอน้ำ อุณหภูมิของฉนวนสูงขึ้น โมเลกุลของน้ำส่วนหนึ่งจะเคลื่อนตัวเข้าไปในฉนวนด้วยวิธีการแพร่กระจาย (จากที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลของน้ำมากไปสู่ที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลของน้ำน้อย) เกิดเป็นช่องว่างขึ้นภายในฉนวนเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำตกค้างอยู่ภายในช่องว่างในฉนวนนั้นภายหลังจากกระบวนการผลิตเมื่อปล่อยสายเคเบิลทิ้งไว้ น้ำระเหย

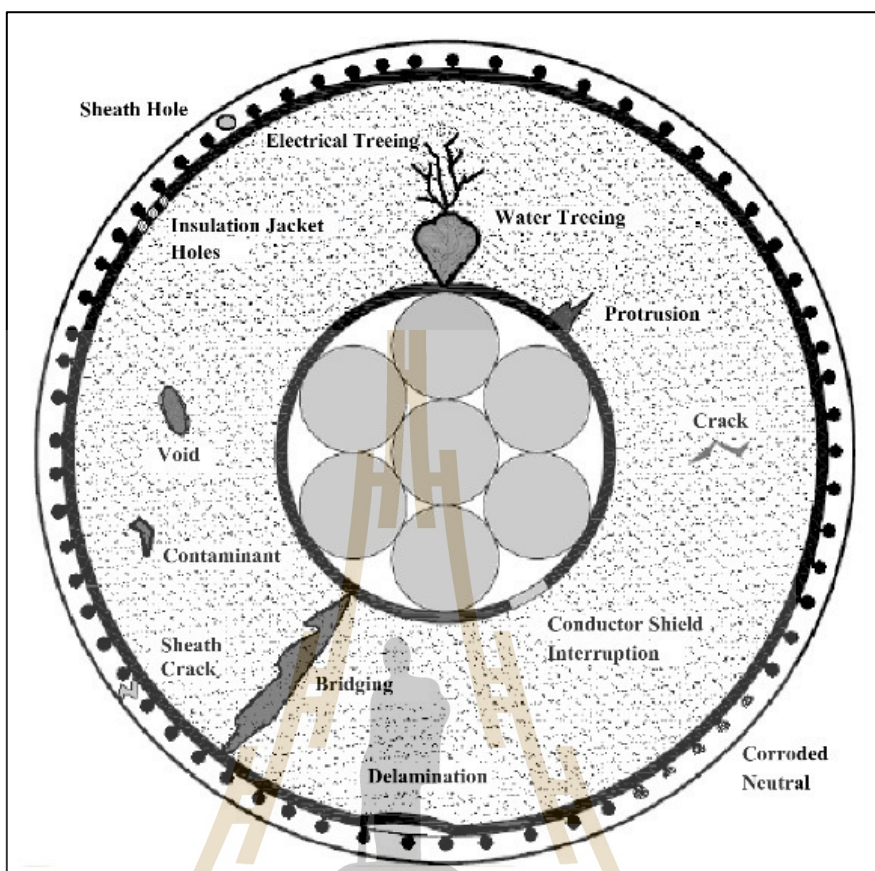
ผ่านฉนวนออกมาทำให้เกิดเป็นช่องว่างอยู่ในฉนวนจำนวนหนึ่ง เมื่อมีการนำเคเบิลไปใช้งานในที่ที่มีความชื้นสูงไอน้ำจากภายนอกแพร่กลับไปในฉนวนเหล่านั้น เนื่องจากมีช่องว่างอยู่มาก ปริมาณไอน้ำในฉนวนจึงมากตามไปด้วย และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดวอเตอร์ทรีอิง สาเหตุของการเกิดวอเตอร์ทรีอิงเชื่อว่ามีสาเหตุมาจากปัจจัย 3 ประการคือ ความชื้นช่องว่างหรือสิ่งแปลกปลอมในฉนวน และสนามไฟฟ้าความเข้มสูง จึงได้มีความพยายามผลิตสายเคเบิลฉนวน XLPE โดยหลีกเลี่ยงการใช้ไอน้ำ ทำให้เกิดกระบวนการผลิตแบบใหม่ขึ้นมา โดยไม่ใช้ไอน้ำในการอบซึ่งเรียกว่าการอบแห้ง โดยผู้ผลิตสายเคเบิลบางรายใช้แก๊สไนโตรเจนแทน แต่เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเท่าไอน้ำจึงต้องมีปั๊มเพื่อเพิ่มความเร็วในการสัมผัสระหว่างแก๊สไนโตรเจนกับ XLPE

ฉนวนจากวิธีการอบแห้งเกิดช่องว่างน้อยกว่าและมีขนาดเล็กกว่าวิธีการอบไอน้ำมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน

ฉนวน XLPE มีข้อดีมากมาย แต่ยังมีผลจากสภาพแวดล้อมใต้ดินต่าง ๆ ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น ผลกระทบทางกล ผลกระทบทางเคมี ผลกระทบจากเทอร์โมไดนามิกส์ และผลกระทบจากไฟฟ้า เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นแบบต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดวอเตอร์ทรีอิง โดยได้ทำการค้นคว้าทฤษฎีต่าง ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากฐานข้อมูล IEEE และ Science Direct รวมทั้งบทความต่าง ๆ จากสื่อออนไลน์ ผลการศึกษาดังกล่าว จะเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงาน วิจัยวิทยานิพนธ์นี้

### 2.3 ข้อบกพร่องโดยทั่วไปที่เกิดบนสายเคเบิลใต้ดิน

ข้อบกพร่องต่าง ๆ ทำให้สายเคเบิลเสื่อมสภาพและชำรุดได้ง่ายเนื่องจากคุณสมบัติของฉนวนเริ่มเปลี่ยนแปลงเพราะความเครียดสนามไฟฟ้า ความร้อน ความเครียดทางกล และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ อาจส่งผลให้สายเคเบิลเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ข้อบกพร่องในสายเคเบิลใต้ดินโดยส่วนใหญ่มีดังนี้ คือ ส่วนที่ยื่นออกมา (Protrusions) ช่องว่าง (Void) รอยแตก (Crack) การหลุดลอก (Eliminations) การฉีกขาดของกำบังตัวนำ (Conductor Shield Interruptions) ทรีอิงทางไฟฟ้า (Electrical Treeing) และ วอเตอร์ทรีอิง เป็นต้น (Hartlein et al., 2006)



รูปที่ 2.7 แบบจำลองข้อบกพร่องที่เกิดบนสายเคเบิลใต้ดิน (Hartlein et al., 2006)

### 2.3.1 ทริอิ่งทางไฟฟ้า

ทริอิ่งทางไฟฟ้าเป็นพฤติกรรมการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนก่อนการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนไฟฟ้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า การขยายตัวมีลักษณะคล้ายกิ่งไม้และแตกแขนงออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ทริอิ่งทางไฟฟ้าเกิดขึ้นและขยายตัวออกเมื่อฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงเป็นเวลานาน อาจเกิดที่จุดบกพร่อง เช่น สิ่งสกปรก ช่องว่างในฉนวน และการสึกกร่อนทางกล เป็นต้น โดยช่องว่างเล็ก ๆ เหล่านี้ก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง เกิดการสลายตัวของฉนวนจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซน การสลายตัวนี้ทำให้เกิดแก๊ส จึงทำให้เกิดช่องว่างเล็ก ๆ ในฉนวนเพิ่มขึ้นและต่อเนื่องจนทำให้แตกกระแหงคล้ายต้นไม้ นำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์



รูปที่ 2.8 แบบจำลองทรีอิงทางไฟฟ้า

(ที่มา: <https://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/images/Electrical%20Tree.jpg/view>. เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2561)

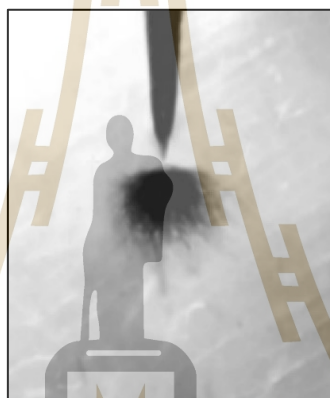
การเกิดคิซซาร์จบางส่วนเป็นตัวย่อยสารอินทรีย์ในฉนวน โดยทั่วไปเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดทรีอิงทางไฟฟ้า ในการใช้งานสายเคเบิลโดยปกติ ค่าความคงทนทางไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากการใช้งานนาน ๆ ข้อบกพร่องจากการผลิตและความเครียดภายนอกอาจทำให้เกิดช่องว่างและสิ่งเปราะเปื้อนภายในฉนวน เป็นผลให้ความคงทนทางไฟฟ้ามีค่าน้อยลงและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ทรีอิงทางไฟฟ้าเติบโตได้ไวขึ้น รวมไปถึงแรงดันอิมพัลส์ แรงดันเสิร์จ และแรงดันกระแสตรง เป็นแรงดันที่สามารถก่อให้เกิดทรีอิงทางไฟฟ้า

ทรีอิงทางไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (Bush Treeing) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (Branch Treeing) และทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ (Bow Treeing) ที่เกิดขึ้นภายในฉนวน

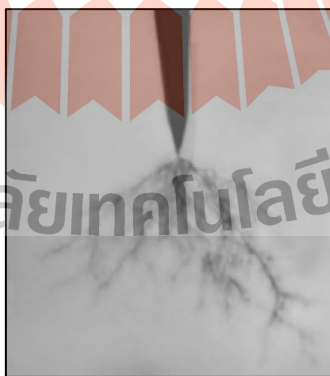
ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ เวลาการเกิดและการขยายตัวช้า มักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สูงมาก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็สามารถพัฒนาไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบฉนวนในสายเคเบิล (รัฐเขต, 2555)

ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ใช้เวลาเกิดและขยายตัวอย่างรวดเร็ว มักเกิดในบริเวณที่ความเครียดทางไฟฟ้าสูงหรืออาจจะมี ความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางกลมาเกี่ยวข้อง ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งเป็นอันตรายต่อระบบฉนวนในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะขยายตัวต่อไปจนกระทั่งเจาะทะลุชั้นความหนาของฉนวน ทำให้ฉนวนหมดสภาพความเป็นฉนวนและเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (รัฐเขต, 2555)

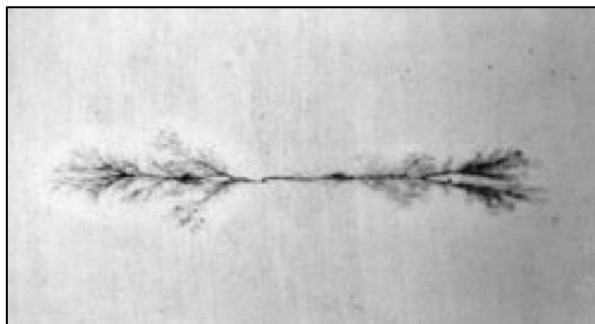
ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 มีการเติบโตจากตำแหน่งเฉพาะที่อยู่ภายในเนื้อของฉนวน ในตำแหน่งนี้มักมีสิ่งปนเปื้อนของสารที่นำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.9 แบบจำลองทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (รัฐเขต, 2555)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (รัฐเขต, 2555)



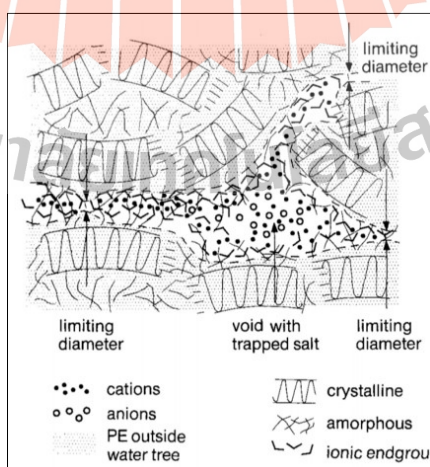
รูปที่ 2.11 แบบจำลองทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายโบว์

(ที่มา: <https://www.electrotechnik.net/2009/07/water-trees-and-electrical-trees-and.html>, เข้าถึงเมื่อ 3 มิถุนายน 2561)

### 2.3.2 วอเตอร์ทรีอิง

คำจำกัดความของวอเตอร์ทรีอิงยังมีความไม่ชัดเจน ในงานวิจัยนี้ขอยกคำจำกัดความของวอเตอร์ทรีอิงโดย Ross (1998) คือ “วอเตอร์ทรีอิงเป็น โครงสร้างในพอลิเมอร์ที่ถูกทำลายอย่างถาวร เติบโตเนื่องจากความชื้นและสนามไฟฟ้า ทำให้มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกและความเป็นกรดต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิม ลักษณะคล้ายกับการคลายประจุบางส่วน (Partial Discharge) แต่ยังไม่ถึงกับลัดวงจรหรือเบรกดาวน์ ปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์มากกว่าหรือเท่ากับ 1%”

วอเตอร์ทรีอิงมีลักษณะคล้ายกิ่งไม้เช่นเดียวกับทรีอิงทางไฟฟ้าแต่การเกิดขึ้นของวอเตอร์ทรีอิงต้องมีความชื้นเป็นส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองวอเตอร์ทรีอิง (Ross, 1998 อ้างอิงใน Elffort, 2015)

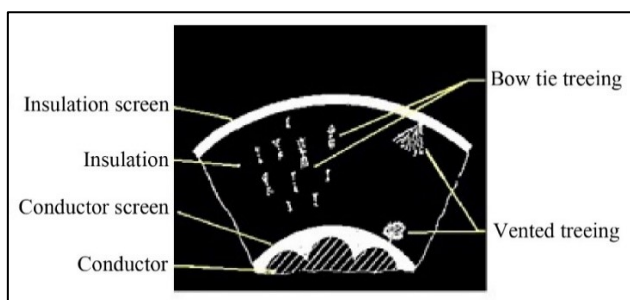


วอเตอร์ทรีอิงมีชื่อเรียกได้อีกอย่างคือ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical) เป็นปฏิกิริยาเคมีในรูปแบบของสนามไฟฟ้าและน้ำที่เกิดในพอลิเมอร์แบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Polymer) การขยายและเติบโตของวอเตอร์ทรีอิงขยายตัวได้ช้ากว่าทรีอิงทางไฟฟ้า ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิง คือ ความชื้น ช่องว่าง สิ่งเปอะเปื้อน สารละลายไอออนิกที่ไม่มีริสซูธิ์ อุณหภูมิ การแพร่ของอุณหภูมิ आयुขัย ความเครียดสนามไฟฟ้า และค่ากรด-ด่าง (pH) เป็นต้น วอเตอร์ทรีอิงแบ่งตามลักษณะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบคล้ายกริบ (Vented Type) และแบบคล้ายโบว์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบ คือ วอเตอร์ทรีอิงที่เริ่มเติบโตจากขอบนอกหรือในของฉนวนเข้ามาในเนื้อฉนวน ทิศทางการเติบโตเป็นไปตามทิศทางของความเครียดสนามไฟฟ้า รูปร่างมีความคล้ายกับกริบปลา จุดที่เกิดขึ้นของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบทราบได้ยากว่าเกิดที่ใด บางครั้งเกิดจากแรงทางกล เช่น การดึง การหักงอของสายเคเบิล การเกิดรอยข่วนหรือช่องที่สารกึ่งตัวนำ อาจทำให้วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่าย

วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ คือ วอเตอร์ทรีอิงที่เกิดจากช่องว่างเล็ก ๆ ภายในเนื้อฉนวน ลักษณะรูปร่างคล้ายโบว์ โดยเติบโตไปในทิศทางตรงกันข้าม โดยมีช่องว่างเป็นจุดกึ่งกลาง ส่วนทิศทางการแผ่ขยายเป็นไปตามเส้นแรงสนามไฟฟ้า วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์เติบโตได้เร็วในช่วงแรกแล้วจะช้าลงในช่วงเวลาถัดมา วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์โดยทั่วไปไม่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในฉนวน

สำหรับงานวิจัยเล่มนี้มุ่งเน้นศึกษาไปในเรื่องของ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบ เนื่องจากการเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบสามารถระบุตำแหน่งการเกิดได้ง่ายกว่าการเกิดวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ มีหลายเหตุผล เช่น (i) โดยส่วนใหญ่ความหนาแน่นของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบต่ำกว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ และ (ii) การเจริญเติบโตในช่วงแรกของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกริบช้ากว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ แต่เติบโตไวกว่าวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายโบว์ในเวลาต่อมา



รูปที่ 2.13 รูปแบบการเกิดของวอเทอร์ทรีอิง

(ที่มา: <http://www.posterus.sk/?p=16307> เข้าถึงเมื่อ 25 พฤษภาคม 2561)

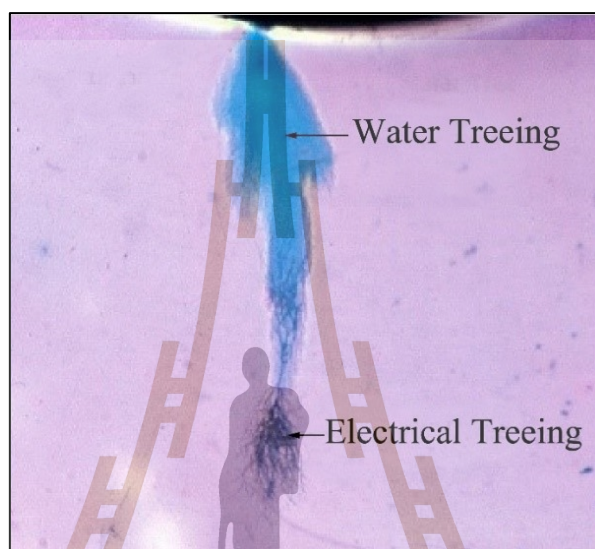
### 2.3.2.1 แบบจำลองวอเทอร์ทรีอิง

ในปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองที่ถูกต้องที่สุดสำหรับอธิบายปรากฏการณ์วอเทอร์ทรีอิง โดยทั่วไปวอเทอร์ทรีอิงเกิดขึ้นเนื่องมาจากความเครียดทางกลที่สูงและการก่อตัวของรอยแตกขนาดเล็ก บริเวณที่มีความชื้นหรือหยดน้ำภายในฉนวน วอเทอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นในฉนวนส่วนใหญ่เกิดจากหยดน้ำที่มีโครงสร้างคล้ายสตร้อยมุกเชื่อมต่อกันในช่องทางแคบ ๆ ของส่วนที่สึกกร่อนของฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (Hvidsten, 2002)

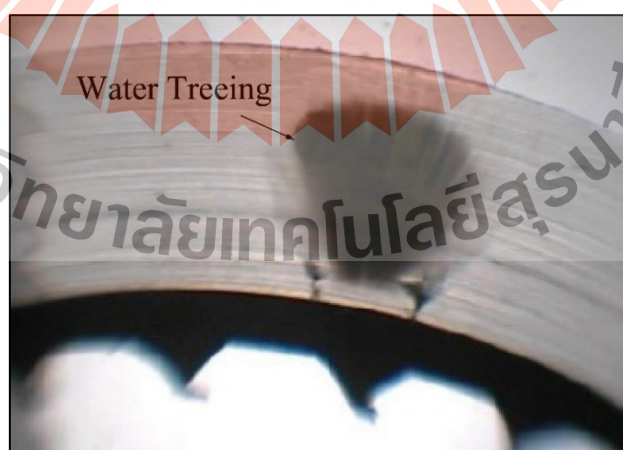
โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากวอเทอร์ทรีอิงมีสามขั้นตอนหลัก คือ การเริ่มต้นของวอเทอร์ทรีอิง การขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงและกระบวนการเบรกดาวน์ แม้ว่าการเริ่มต้นและการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงได้รับการศึกษาอย่างละเอียดจากผู้วิจัยหลายกลุ่ม แต่บางส่วนของลักษณะทางกายภาพยังไม่มีการศึกษามากนัก Dissado et al. (1988) แสดงให้เห็นว่าวอเทอร์ทรีอิงกระจายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นและหลังจากนั้นก็เริ่มช้าลงจากการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า โดยทำการทดสอบ 1000 ครั้ง พบว่าเร็วกว่าอัตราการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง นอกจากนี้ Dissado et al. (1988) ได้แบ่งกระบวนการเสื่อมสภาพเนื่องจากวอเทอร์ทรีอิงออกเป็นก่อนและหลังการเกิดความเครียดทางไฟฟ้าในฉนวน เมื่อทรีอิงทางไฟฟ้าเริ่มขยายตัวจากวอเทอร์ทรีอิง การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง

ขั้นตอนการเบรกดาวน์เริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงของวอเทอร์ทรีอิงไปเป็นทรีอิงทางไฟฟ้า เกิดขึ้นที่ปลายสุดของวอเทอร์ทรีอิง เนื่องจากบริเวณนี้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ดังในรูปที่ 2.15 นอกจากนี้มีนักวิจัยพบว่าการเจริญเติบโตของทรีอิงทางไฟฟ้าไม่ได้เริ่มจากที่ปลายของวอเทอร์ทรีอิงเสมอไปแต่อาจจะเริ่มขึ้นจากฐานของวอเทอร์ทรีอิง ดังแสดง

ในรูปที่ 2.16 กรณีนี้เป็นเรื่องยากที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากทริิ่งทางไฟฟ้ามักเกิดขึ้นที่ปลายสุดของวอเตอร์ทริิ่ง แต่ก็ไม่ได้เสมอไป ขึ้นอยู่กับปริมาณของวอเตอร์ทริิ่งและความเครียดสนามไฟฟ้าในท้ายที่สุดทริิ่งทางไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านฉนวนและเป็นสะพานเชื่อมขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวน (Hartlen et al., 2007 อ้างอิงใน ชีระพงษ์, 2557)



รูปที่ 2.14 ทริิ่งทางไฟฟ้าที่เติบโตจากปลายของวอเตอร์ทริิ่ง  
(Hartlen et al., 2007 อ้างอิงใน ชีระพงษ์, 2557)



รูปที่ 2.15 ทริิ่งทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากฐานของวอเตอร์ทริิ่ง  
(Mashikian, 2006 อ้างอิงใน ชีระพงษ์, 2557)



รูปที่ 2.16 รูปขยายจากรูปที่ 2.13 ทริอิงทางไฟฟ้าที่งอกออกมาจากฐานของวอเตอร์ทริอิง  
(Mashikian, 2006 อ้างอิงใน ชีระพงษ์, 2557)

การเปลี่ยนแปลงของวอเตอร์ทริอิงไปเป็นทริอิงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยประกอบด้วยขนาดแรงดัน แรงดันในสถานะชั่วคราว การออกแบบของสายเคเบิล และการออกซิเดชันภายในฉนวน Densley (1979) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงจากวอเตอร์ทริอิงไปเป็นทริอิงทางไฟฟ้าเกิดขึ้นในสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน วอเตอร์ทริอิงประกอบด้วยเส้นทางขนาดเล็กและช่องว่างขนาดเล็กพร้อมให้น้ำซึมเข้าเนื่องจากสนามไฟฟ้า เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าและความชื้นจากน้ำ วอเตอร์ทริอิงมีโอกาสเลือนหายไปหรือหยุดการขยายตัวของวอเตอร์ทริอิง แต่หลังจากมีการปรากฏตัวของน้ำและความเครียดสนามไฟฟ้าอีกครั้ง วอเตอร์ทริอิงก็เกิดขึ้นมาใหม่ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายคนพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวอเตอร์ทริอิงไปเป็นทริอิงทางไฟฟ้า ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทริอิงทางไฟฟ้าก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อาจเกิดจากการออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นภายในฉนวนที่เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Nunes et al., 1980)

ทริอิงทางไฟฟ้าและวอเตอร์ทริอิง ถึงมีความคล้ายคลึงกัน แต่มีสิ่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างหลักของทริอิงทางไฟฟ้าและวอเตอร์ทริอิง (William, 2003)

| ทริอิงทางไฟฟ้า                   | วอเตอร์ทริอิง              |
|----------------------------------|----------------------------|
| ไม่ต้องมีความชื้น                | ต้องมีความชื้น             |
| เติบโตได้เร็ว (ชั่วโมง, สัปดาห์) | เติบโตได้ช้า (เดือน, ปี)   |
| เห็นได้ชัดเจน เป็นช่องยาว ๆ      | ฉนวนต้องถูกขูดเพื่อให้เห็น |

## 2.4 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

มีมาตรฐานระดับชาติหลายมาตรฐานที่ใช้กับสายเคเบิล สำหรับมาตรฐานที่ กฟภ. ใช้อ้างอิง ในการกำหนดลักษณะจำเพาะ คือ มาตรฐาน IEC โดยสายเคเบิลแรงดันไฟฟ้าระดับปานกลางขนาด 22 kV และ 33 kV ใช้ IEC 60502 ส่วนสายเคเบิลแรงสูงขนาด 115 kV ใช้มาตรฐาน IEC 60840

หนึ่งในข้อกำหนดที่ไม่มีระบุในมาตรฐาน IEC สำหรับสายเคเบิลแรงดันปานกลางคือ ปรากฏการณ์วอเตอร์ทริอิง แสดงว่าในการอ้างอิงไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในสภาพการติดตั้ง ในที่เปียกชื้น โดยเฉพาะการไม่มีชั้นกั้นน้ำในแนวรัศมีในโครงสร้างของเคเบิล วอเตอร์ทริอิงมีความสำคัญมาก สาเหตุเพราะการเกิดเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ดังนั้นควรมีการทดสอบ วอเตอร์ทริอิงอยู่ในการทดสอบแบบเฉพาะ (Type test) และการสุ่มตัวอย่างมาทดสอบด้วยการ ทดสอบแบบเฉพาะเป็นการทดสอบที่ทำก่อนนำสายไฟฟ้าออกสู่ท้องตลาด เพื่อแสดงว่า สายไฟฟ้าแบบที่ครอบคลุมมาตรฐานนี้มีลักษณะเฉพาะเชิงสมรรถนะเป็นที่น่าพอใจ และต้องการ ทดสอบที่สมบูรณ์เป็นหลักฐานเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องทดสอบซ้ำอีก นอกจากนี้หลังการ ทดสอบกระบวนการผลิต วัสดุ หรือการออกแบบมีการเปลี่ยนแปลง

ในหลาย ๆ ประเทศ โดยเฉพาะในยุโรปและอเมริกา การทดสอบวอเตอร์ทริอิง ในสาย เคเบิลทุก ๆ ขนาดที่ใช้ในระดับแรงดันปานกลางถูกกำหนดไว้ใน การทดสอบแบบเฉพาะ เหตุผล หนึ่งก็คือประเทศเหล่านี้ประสบปัญหาหลายประการ และเคเบิลที่ใช้โครงสร้างที่มีชั้นกั้นน้ำมีราคา แพงมาก ในการพัฒนาการทดสอบการเร่งอายุการใช้งานของเคเบิลเป็นเรื่องค่อนข้างยากเพราะวัสดุ ที่ใช้มีความแตกต่างหลากหลายขบวนการผลิตและสภาพแวดล้อมในการติดตั้งใช้งาน ซึ่งส่งผลให้ ลักษณะการเกิดวอเตอร์ทริอิงมีความหลากหลายแตกต่างกันมาก

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้กล่าวถึงงานวิจัยจากนักวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เกี่ยวกับปรากฏการณ์การเกิดวอเตอร์ทริอิง เพื่อเป็นสาระสำคัญ แนวทางและประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยสรุปอย่างย่อ ดัง แสดงในตารางที่ 2.3 และหลังจากนั้นกล่าวถึงรายละเอียดหลักของความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของแต่ละ งานวิจัยที่มีผลให้เกิดงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| ก.ศ. | ผู้วิจัย   | การดำเนินงานวิจัย  |
|------|--|--|
| 1969 | Miyashita  | ค้นพบปรากฏการณ์ทริอิงที่เกิดจากน้ำเป็นครั้งแรก โดยใช้วิธีทดสอบสายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีน ที่แช่ไว้ในน้ำและใช้แรงดัน ไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเร่งให้เกิดปรากฏการณ์ทริอิงขึ้น หลังจากนั้นก็รู้จักปรากฏการณ์นี้ในชื่อ “วอเตอร์ทริอิง”   |
| 1998 | Lee,<br>Cho,<br>and Song   | ทดสอบฉนวน XLPE เพื่อดูความคงทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ และการเพิ่มของวอเตอร์ทริอิง ในระบบทดสอบ NaCl 1 mol/l แรงดันที่ป้อนให้กับสายเคเบิล 7.5 kV 10 kHz แล้วทดสอบในเวลาต่างกัน 4 ช่วงเวลา ปรากฏว่ายิ่งปล่อยให้ เป็นเวลานาน การเกิดวอเตอร์ทริอิงยิ่งยาวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ ความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับลดลง  |
| 2008 | Takahashi,<br>and Okamoto  | ทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE ในระบบทดสอบมี NaCl 0.1 mol/l เพื่อดูลักษณะการเกิดดิสชาร์จระหว่างการใช้ตัว/ไม่ใช้ ตัวป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนผิวของสายเคเบิล โดย วัดจากเครื่อง Oscillating Water Test System (OWHS) ปรากฏ ว่าการใช้ตัวป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสามารถลดการ เกิดดิสชาร์จบางส่วนได้                  |
| 2008 | Qureshi,<br>Malik,<br>Al-Arainy,<br>Saati,<br>Al-Nather,<br>and Anam | ทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE 4 แบบในชุดทดสอบที่มี CuSO <sub>4</sub> 0.01 mol/L ที่อุณหภูมิ 50°C แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 35-45 kV สายเคเบิลยาว 200 cm พบว่าสายเคเบิลทั้ง 4 แบบ มี แนวโน้มการขยายตัวของวอเตอร์ทริอิงมากขึ้นเมื่อเวลาสูงขึ้น  |
| 2009 | Suzuoki,<br>Hayashi,<br>Kato,<br>Komori,<br>and Mashima              | ทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE โดยการเพิ่มด้วยเข็มเพื่อใช้เร่ง การเสื่อมอายุของสายเคเบิลและใช้เป็นตำแหน่งตรวจวัด วอเตอร์ทริอิง โดยแช่สายเคเบิลลงในน้ำ ที่อุณหภูมิต่างกัน แรงดันทดสอบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่กำหนด จนถึง 100 kV, 60 Hz ปรากฏว่าขนาดวอเตอร์ทริอิงยาวที่สุดที่อุณหภูมิ มากขึ้นในระดับแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน |

| ก.ศ. | ผู้วิจัย  | การดำเนินงานวิจัย  |
|------|---|--|
| 2010 | Ogiwara,<br>Yaonaha,<br>Uehara,<br>and Kudo           | ทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่แรงดัน 4.5 kV, 1 kHz ใน NaCl 4 mol/l โดยควบคุมอุณหภูมิในระดับ -20°C จนถึง 80°C พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ การเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งได้มากและไวกว่าที่อุณหภูมิสูง   |
| 2011 | Qureshi,<br>Malik,<br>and Al-Arainy                   | ศึกษาและทดสอบผลกระทบของไอออนบวกต่อวอเตอร์ทรีอิ่งที่เกิดขึ้นในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าและสารละลายไอออนิก NaCl Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> และ CuSO <sub>4</sub> พบว่าสารละลายไอออนิก CuSO <sub>4</sub> ก่อให้เกิดวอเตอร์ทรีอิ่งยาวที่สุด ซึ่งอาจเพราะว่ามีขนาดอะตอมเล็ก และมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง |
| 2012 | Helleso,<br>Benjaminsen,<br>Selsjord,<br>and Hvidsten | ทดสอบสายเคเบิล XLPE โดยนำเคเบิลมาจึงและใส่แรงดึงให้กับสายเคเบิล พร้อมกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อดูว่ามีผลการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่ง ตำแหน่งที่ทดสอบมี 3 ตำแหน่งคือ ส่วนที่หักงอ 2 ตำแหน่ง และที่กั้นสายเคเบิล 1 ตำแหน่ง พบว่าส่วนที่หักงอทั้ง 2 ตำแหน่ง เมื่อนำมาตัดทดสอบเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งคล้ายโบริว่มากกว่าที่กั้นสายเคเบิล               |
| 2012 | Wang,<br>Li,<br>Wu,<br>and Zheng                      | ทดสอบสายเคเบิล XLPE เพื่อคุณลักษณะการเติบโตของทรีอิ่งทางไฟฟ้ากับวอเตอร์ทรีอิ่ง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ แบบเข็มเพื่อทดสอบทรีอิ่งทางไฟฟ้า และแบบรูเข็มที่มีน้ำเพื่อทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่ง พบว่าการเติบโตของทรีอิ่งทางไฟฟ้าเร็วกว่าวอเตอร์ทรีอิ่ง   |
| 2013 | Wang,<br>Zheng,<br>Li,<br>and Wu                      | ทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE เพื่อนำมาเทียบผลกับการจำลอง พบว่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นของวอเตอร์ทรีอิ่งทำให้ขนาดความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และยังพบว่าการพัฒนาจากวอเตอร์ทรีอิ่งไปเป็นทรีอิ่งทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน XLPE ที่รับได้  |

| ก.ศ. | ผู้วิจัย  | การดำเนินงานวิจัย   |
|------|---|---|
| 2014 | Boonraksa,<br>and Marungsri   | ทดสอบสายเคเบิล XLPE สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันระดับ<br>กลางในประเทศไทยขนาด 22 kV โดยจำลองสารละลาย<br>ไอออนิกแทนสภาพแวดล้อมภายนอก พบว่าที่อุณหภูมิ 50°C<br>ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงยาวกว่าที่อุณหภูมิห้อง ทั้งวอเตอร์<br>ทรีอิงคล้ายครีปและคล้ายโบว์  |
| 2014 | Huang,<br>Zhou,<br>Tao,<br>Yang<br>and Yang                                     | ศึกษาการพัฒนาของทรีอิงทางไฟฟ้าเป็นวอเตอร์ทรีอิง โดย<br>สร้างชุดทดสอบต่อเนื่อง ชุดทดสอบแรกใช้ทดสอบทรีอิงทาง<br>ไฟฟ้าหลังจากการทดสอบในช่วงเวลาหนึ่งจึงนำชุดทดสอบ<br>วอเตอร์ทรีอิงเข้ามาแทน พบว่าทรีอิงทางไฟฟ้ามีความเครียด<br>สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายเข็ม แต่หลังจากใช้ชุดทดสอบ<br>วอเตอร์ทรีอิงที่ปลายสุดของเข็มกลับมีความเครียดสนาม<br>ไฟฟ้าต่ำ จากการทดสอบจะเห็นว่าทรีอิงทางไฟฟ้าเปลี่ยนเป็น<br>วอเตอร์ทรีอิงได้ซ้ำ |
| 2015 | Zhou,<br>Mingliang,<br>Ming,<br>Tianhua, and<br>Wenbiao                         | ทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิต่างกันเพื่อใช้เร่ง<br>การเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานในสถานะต่าง ๆ พบว่าที่<br>อุณหภูมิ 40°C ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงสั้นกว่าที่อุณหภูมิต่ำ<br>กว่าและสูงกว่า 40°C  |
| 2017 | Promvichai,<br>Minja,<br>Chombo,<br>Supanarapan,<br>Boonraksa, and<br>Marungsri | จำลองการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิกต่างชนิด<br>กันด้วยโปรแกรม Ansys Maxwell 2D พบว่า สารละลาย<br>ไอออนิกคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ทำให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงได้ยาว<br>ที่สุด และยังพบอีกว่าหากไม่มีการเปิดกัมมันตภาพ<br>ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงที่วอเตอร์ทรีอิง ส่งผลให้เกิดการ<br>เสื่อมอายุช้าลง  |



จากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีผู้ศึกษาเกี่ยวกับวอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิล XLPE เป็นจำนวนมาก รวมไปถึงการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีที่สามารถทำให้ผู้วิจัยมองเห็นแนวทางในการศึกษาวิจัยลักษณะการเกิดวอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิล XLPE ต่อไป ในส่วนถัดไปเป็นการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ โดยกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ โดยย่อ ดังนี้

โดยเริ่มจาก Miyashita (1969) ได้นำเสนอเรื่องผลของน้ำและความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีน โดยเริ่มต้นจากการสังเกตเห็นการเสื่อมสภาพของฉนวนพอลิเอทิลีนในที่มีน้ำขัง จึงได้นำเอาสายเคเบิลชนิดนี้มาทดลองโดยแช่ไว้ในน้ำและใช้แรงดันไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า หลังจากนั้นได้มีนักวิจัยกลุ่ม Tabata et al. (1971) ได้ทำการวิจัยเพิ่มเติมจาก Miyashita จึงได้เรียกการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกิดจากน้ำนี้ว่า “วอเตอร์ ทริอิง” ที่เป็นจุดเริ่มต้นในการวิจัยและศึกษาวอเตอร์ทริอิงนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

Qureshi et al. (2008) ได้ศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของวอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระดับแรงดันปานกลางที่ระดับ 35-45 kV โดยวางสายเคเบิล XLPE ในอ่างที่มีสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  0.01 mol/L และให้ความร้อน  $50^\circ\text{C}$  ตลอดเวลา การแบ่งช่วงเวลาทดลองแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ 500 ชั่วโมง 1000 ชั่วโมง และ 1500 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าความหนาแน่นและความยาวของวอเตอร์ทริอิงมากขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น

Qgiwaral et al. (2010) ได้ศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทริอิงในแผ่นฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ (i)  $-20^\circ\text{C}$  (ii)  $-5^\circ\text{C}$  (iii)  $10^\circ\text{C}$  (iv)  $25^\circ\text{C}$  (v)  $50^\circ\text{C}$  และ (vi)  $80^\circ\text{C}$  ที่ระดับแรงดัน 4.5 kV 1 kHz เป็นเวลา 170 ชั่วโมง ในสารละลายไอออนิก NaCl 4 mol/L พบว่าวอเตอร์ทริอิงสามารถเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอุณหภูมิที่ต่ำถึง  $-20^\circ\text{C}$  การขยายตัวของวอเตอร์ทริอิงที่อุณหภูมิต่ำมีแนวโน้มการขยายตัวได้ไวและมีทิศทางได้ชัดเจน ส่วนที่อุณหภูมิสูงวอเตอร์ทริอิงมีความเข้มข้นและหนา แต่มีขนาดน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

Qureshi et al. (2011) ได้ศึกษาและทดสอบผลกระทบของไอออนบวกต่อวอเตอร์ทริอิงที่เกิดขึ้นในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางของสารเคเบิลใต้ดิน 400 cm ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้า 35 kV และสารละลายไอออนิก (i) NaCl (ii)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และ (iii)  $\text{CuSO}_4$  0.01 mol/L การควบคุมอุณหภูมิ ( $50^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิห้อง) และการวนสารละลาย ในหนึ่งวันจะเปิด 6 ชั่วโมง และปิด 18 ชั่วโมง พบว่าสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  ก่อให้เกิดวอเตอร์ทริอิงยาวที่สุด ซึ่งอาจเพราะว่ามีขนาดอะตอมเล็ก และมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง

Huang et al. (2014) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของทริอิงทางไฟฟ้ากับวอเตอร์ทริอิง ด้วยการใส่เข็มเจาะลงบนฉนวน XLPE บริเวณที่เจาะอยู่ในสารละลายไอออนิก NaCl 1.8 mol/L แรงดันทดสอบอยู่ที่ 6 kV 400 Hz เป็นเวลา 390 ชั่วโมง พบว่าทริอิงทางไฟฟ้าให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

ที่ที่ปลายเข็มสูงกว่าวอเตอร์ทรีอิง และทรีอิงทางไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนเป็นวอเตอร์ทรีอิงได้ เมื่อที่ต้นกำเนิดของวอเตอร์ทรีอิงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงใกล้เคียงหรือมากกว่าของปลายของทรีอิงทางไฟฟ้า

Zhou et al. (2015) ได้ศึกษาการขยายตัวแบบลูกโซ่ของวอเตอร์ทรีอิง ในอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ (i) 0°C (ii) 20°C (iii) 40°C และ (iv) 60°C ในสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ระดับแรงดัน 6 kV 400 Hz เป็นเวลา 22 วัน ในสารละลายไอออนิก NaCl 1.7 mol/L พบว่าสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ถูกทดสอบในอุณหภูมิต่ำกว่า 40°C พบวอเตอร์ทรีอิงมีทิศทางและโครงสร้างที่ชัดเจนกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40°C การเคลื่อนตัวของวอเตอร์ทรีอิงเป็นไปตามเส้นสนามไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C การเคลื่อนตัวของวอเตอร์ทรีอิงเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของการแพร่ความร้อนเป็นส่วนใหญ่

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ทราบถึงระเบียบวิธีค้นคว้าและวิจัยของนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่ม โดยมีงานวิจัยต้นแบบจาก Qureshi et al. (2011) ทำให้ได้แนวทางการวิจัยและได้คิดค้นและสร้างงานวิจัยในเรื่องของลักษณะพฤติกรรมของการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE ภายใต้สภาวะความเครียดสนามไฟฟ้าโดยศึกษาผลของอุณหภูมิและสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iv) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (v) CuSO<sub>4</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub>

## 2.6 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้ศึกษาทฤษฎีและปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE Science Direct หนังสือและสื่ออ้างอิงออนไลน์ เป็นต้น ทำให้ทราบถึงผลการดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์แนวทางต่าง ๆ ได้ชัดเจน ในส่วนของทฤษฎีและเนื้อหาเป็นส่วนที่ให้ความเข้าใจ และการดำเนินการเบื้องต้นก่อนเข้าสู่การศึกษาเรื่องวอเตอร์ทรีอิง เช่น ระบบไฟฟ้า ประเภทของสายไฟฟ้า ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดิน ลักษณะของฉนวน XLPE และผลที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE เป็นต้น ในส่วนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทของธีระพงษ์ (2557) ดังนั้นเพื่อความต่อเนื่องของงานวิจัย จึงได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE ในระบบจำหน่ายแรงดันระดับปลานกลางขนาด 22 kV ที่นิยมใช้ในประเทศไทย และในบทถัดจากนี้กล่าวถึงวิธีการจำลองผลลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงเพื่อจำลองขนาดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังในบทที่ 3

## บทที่ 3

### การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

#### 3.1 กล่าวนำ

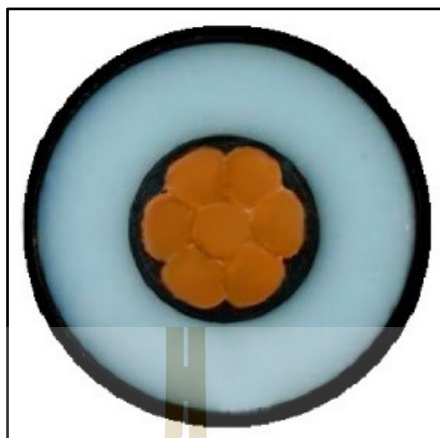
การศึกษาการขยายตัวของวอเตอร์ทริอิงในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ต้องมีการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า เพื่อคาดการณ์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลขณะเกิดวอเตอร์ทริอิงที่เกิดขึ้น

ในบทนี้ผู้วิจัยได้จำลองผลเพื่อดูค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดในสายเคเบิล XLPE สำหรับระบบ 22 kV ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้ไม่ควรเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน คือ 50 kV/mm โดยการจำลองใช้โปรแกรม ANSYS Maxwell 2D เพื่อดูค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล XLPE ในสถานะที่อยู่ ในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ

#### 3.2 การจำลองลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

การจำลองนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Maxwell 2D เป็นโปรแกรมที่นำหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) มาใช้วิเคราะห์ปัญหาในศาสตร์วิศวกรรมทั้งด้านกลศาสตร์ของแข็ง กลศาสตร์ของไหล อุณหพลศาสตร์ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้ศึกษาเรื่องของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล XLPE

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา วอเตอร์ทริอิงและความเครียดสนามไฟฟ้ามีผลอย่างมากต่อการเสื่อมอายุของฉนวนซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ ดังนั้นจึงได้จำลองผลโดยใช้ภาพตัดขวางของแกนกลางสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ซึ่งประกอบด้วย ตัวนำ กำบังตัวนำ ฉนวน และ กำบังฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของแกนกลางสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

จากรูปที่ 3.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV คำนวณได้จากวิธีทรงกระบอกซ้อนกันแน่น ดังแสดงในสมการที่ 3.1 (ธีระพงษ์, 2557 หน้า 58 ถึง 60 อ้างอิง สำรวัย สังสะอาด) ในงานวิจัยนี้ สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE เป็นสายเคเบิลแรงสูงสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้า 22 kV ของบริษัทบางกอกเคเบิล ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีความหนาของฉนวนตามมาตรฐาน 5.5 mm ตัวนำเป็นทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามมาตรฐาน 8.33 mm จากสมการที่ 3.1 แทนค่าแรงดันไฟฟ้าของสายเคเบิล (แรงดันเฟสคือ 12 kV) รัศมีของตัวนำไฟฟ้า และความหนาของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในแกนกลางสายเคเบิลขณะทำงานในสภาวะปกติ คือ  $E_{\max} = 5.11 \text{ kV/mm}$  ซึ่งหมายถึง  $E_{\max}$  ที่เกิดขึ้นในสายนี้ไม่เกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลสามารถทนได้ คือ 50 kV/mm

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.1)$$

โดย  $U$  คือ แรงดันค่ายอด ( $\text{kV}_{\text{peak}}$ )

$r_1$  คือ รัศมีของตัวนำไฟฟ้า

$r_2$  คือ ความหนาของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ( $\text{kV/mm}$ )

### 3.3 การจำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุและความเสียหายต่อสายเคเบิล ผู้วิจัยจึงนำเสนอการจำลองสนามไฟฟ้าในขณะที่เกิดวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE เพื่อหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Ansys Maxwell 2D เพื่อดูแนวโน้มค่าความเครียดสนามไฟฟ้าก่อนนำไปสร้างชุดทดสอบจริง รูปแบบในการจำลองมีอยู่ 18 แบบ ซึ่งแบ่งเป็นสารละลายไอออนิก 6 ชนิดและอุณหภูมิ 3 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 3.1

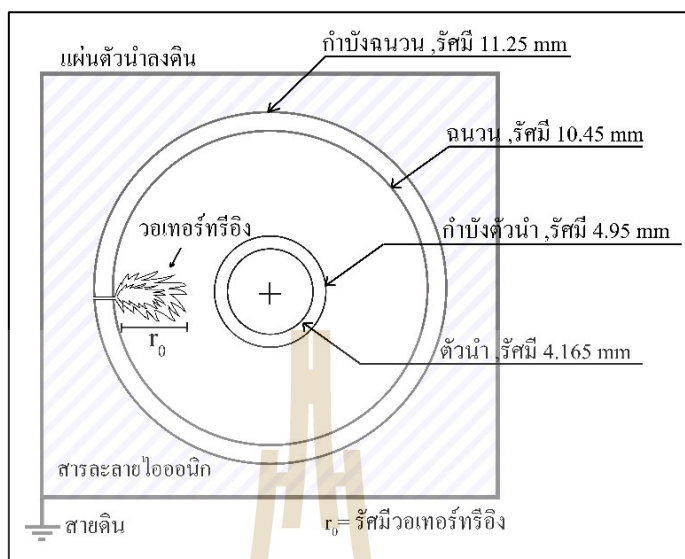
ตารางที่ 3.1 กระบวนการจำลองวอเทอร์ทรีอิง

| อุณหภูมิ   | สารละลายไอออนิกความเข้มข้น 0.1 mol/l  | แบบ |
|------------|---|-----|
| ห้อง       | (i) NaCl (ii) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (iii) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>(iv) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (v) CuSO <sub>4</sub> และ (vi) FeSO <sub>4</sub> | 6   |
| 50°C       | (i) NaCl (ii) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (iii) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>(iv) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (v) CuSO <sub>4</sub> และ (vi) FeSO <sub>4</sub> | 6   |
| 70°C       | (i) NaCl (ii) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (iii) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>(iv) Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (v) CuSO <sub>4</sub> และ (vi) FeSO <sub>4</sub> | 6   |
| รวมทั้งหมด |   | 18  |

#### 3.3.1 แบบจำลองสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

แบบจำลองสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE เป็นแกนกลางของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ขนาดรัศมีในแต่ละชั้นของสายเคเบิลเริ่มวัดจากจุดกึ่งกลางของสายเคเบิล โดยแต่ละชั้นความยาวรัศมีดังนี้

- ตัวนำทองแดง รัศมี 4.165 mm จากจุดกึ่งกลางสายเคเบิล
- กำบังตัวนำ รัศมี 4.95 mm จากจุดกึ่งกลางสายเคเบิล
- ฉนวน XLPE รัศมี 10.45 mm จากจุดกึ่งกลางสายเคเบิล
- กำบังฉนวน รัศมี 11.25 mm จากจุดกึ่งกลางสายเคเบิล



รูปที่ 3.2 แบบจำลองสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ในสารละลายไอออนิก

### 3.3.2 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการจำลองสนามไฟฟ้า

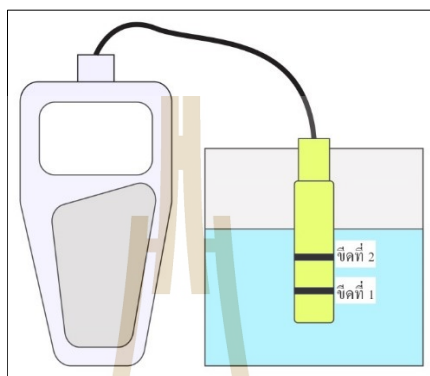
การจำลองสนามไฟฟ้ามีตัวแปรทางไฟฟ้า 2 ตัวแปรหลัก คือ ค่าความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ตารางที่ 3.2 ได้แสดงค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของตัวนำ กำบังตัวนำ ฉนวน กำบังฉนวน และสายดิน แต่ไม่สามารถกำหนดให้กับสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ได้โดยตรง ดังนั้นจำเป็นต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 นี้ ด้วยเครื่องมือวัด ดังจะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของของวัสดุจำลอง

| วัสดุ      | ค่าการนำไฟฟ้า (S/m) | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก |
|------------|---------------------|----------------------|
| ตัวนำ      | $5.8 \times 10^7$   | 1                    |
| กำบังตัวนำ | $2 \times 10^{-3}$  | 100                  |
| ฉนวน       | $1 \times 10^{-17}$ | 2.3                  |
| กำบังฉนวน  | $2 \times 10^{-3}$  | 100                  |
| สายดิน     | $2 \times 10^6$     | 1                    |

สารละลายไอออนิกที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย (i) NaCl (ii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (iii)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (iv)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (v)  $\text{CuSO}_4$  และ (vi)  $\text{FeSO}_4$  ความเข้มข้น 0.1 mol/l โดยวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกด้วยวิธีดังต่อไปนี้

การวัดค่าความนำไฟฟ้า ใช้เครื่องมือวัดรุ่น CyberScan CON 11 โดยใช้กระเปาะสีเหลืองจุ่มลงในสารละลายไอออนิก และต้องจุ่มให้สารละลายไอออนิกอยู่สูงกว่าขีดสีดำที่ 2 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และเครื่องมือวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แบบจำลองเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้า

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า LCR โดยวัดค่าความจุไฟฟ้า (C) ลักษณะของการวัดต้องวัดคร่อมสารละลายไอออนิกที่อยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกลมแบน แสดงดังรูปที่ 3.5 แต่ค่าที่วัดได้เป็นค่าความจุไฟฟ้า ฉะนั้นต้องนำค่าความจุไฟฟ้ามาคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังแสดงในสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดค่า LCR

$$\epsilon_r = \frac{C \times d}{A \times \epsilon_0} \quad (3.2)$$

โดย  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$C$  คือ ความจุไฟฟ้า หน่วย ฟารัด (F)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวงกลมระนาบ มีค่า  $0.0049$  m<sup>2</sup>

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นทรงกลมระนาบ มีค่า  $0.03$  m

เช่น สารละลายไอออนิก NaCl ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าความจุไฟฟ้า ได้  $43.7$  pF ดังนั้น  
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก คือ

$$\epsilon_r = \frac{(43.7 \times 10^{-12})(0.03)}{(0.0049)(8.85 \times 10^{-12})}$$

$$\epsilon_r = 30.23$$

หลังจากวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของทุก ๆ สารละลายไอออนิก พบว่าค่าความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.3

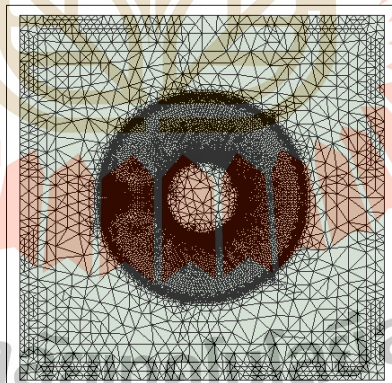


ตารางที่ 3.3 ความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| สารละลาย                          | ค่าความนำไฟฟ้า (S/m) |       |                        | ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก |                       |                       |
|-----------------------------------|----------------------|-------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                   | อุณหภูมิห้อง         | 50°C  | 70°C                   | อุณหภูมิห้อง         | 50°C                  | 70°C                  |
| NaCl                              | 1.049                | 0.676 | $1.77 \times 10^{-3}$  | 30.23                | 0.02                  | $1.88 \times 10^{-3}$ |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | 1.405                | 0.848 | $1.771 \times 10^{-3}$ | 56.96                | $3.28 \times 10^{-4}$ | $4.52 \times 10^{-3}$ |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 1.609                | 0.739 | $1.762 \times 10^{-3}$ | 80.97                | 0.01                  | $1.98 \times 10^{-3}$ |
| Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 1.391                | 0.130 | $1.778 \times 10^{-3}$ | 77.66                | 7.83                  | 3.72                  |
| CuSO <sub>4</sub>                 | 0.535                | 0.136 | $1.769 \times 10^{-3}$ | 24.5                 | 5.64                  | 5.22                  |
| FeSO <sub>4</sub>                 | 1.036                | 0.558 | $1.774 \times 10^{-3}$ | 46.19                | 15.56                 | 7.74                  |

### 3.3.3 เมชของแบบจำลองวอเตอร์ทรีอิง

หลังจากการกำหนดคุณสมบัติให้สายเคเบิลได้ดินฉนวน XLPE ในแบบจำลองขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างเมช (Mesh) ซึ่งหมายถึงการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเรขาคณิตเล็ก ๆ เพื่อให้สามารถใช้สูตรคำนวณต่าง ๆ ที่โปรแกรม ANSYS Maxwell 2D สามารถทำได้ ลักษณะของเมชเป็นสามเหลี่ยมที่กระจายตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เมชของแบบจำลองแกนกลางของสายเคเบิล

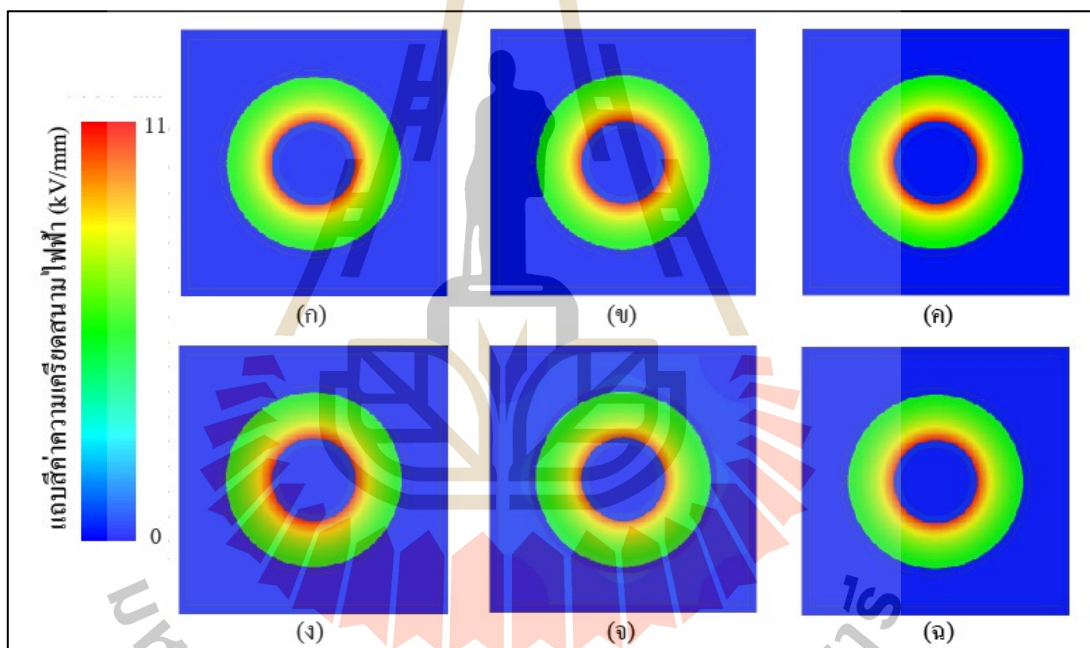
### 3.3.4 แรงแดันไฟฟ้าสำหรับการจำลองสนามไฟฟ้า

สายเคเบิลได้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบกระจายกำลังไฟฟ้า 22 kV ที่ใช้จำลองมีขนาด  $U_0/U_1$  ( $U_2$ ) kV คือ 12/20 (24) kV ซึ่งในการทดสอบใช้ค่า  $2U_0 = 2 \times 12 = 24$  kV ฉะนั้นจึงใช้แรงดัน 24 kV จำไว้ให้กับระบบที่ตัวนำทองแดง

### 3.4 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

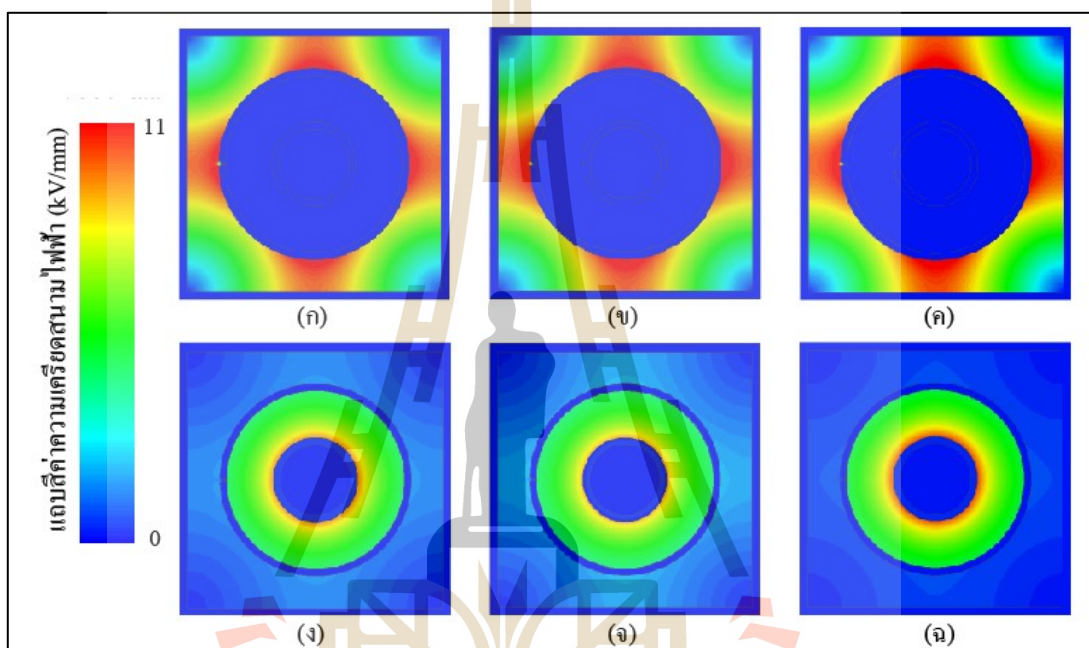
หลังจากคำนวณและกำหนดคุณสมบัติให้สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE จึงนำมาวิเคราะห์หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ที่ขนาดรูเจาะต่าง ๆ คือ (i) 0.1 mm (ii) 0.5 mm (iii) 1 mm และ (iv) 1.5 mm ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.18 กำหนดให้มีแถบสีความเครียดสนามไฟฟ้า จากน้อยสุด (สีน้ำเงิน) ไปมากที่สุด (สีแดง)

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ผลการจำลองพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.7



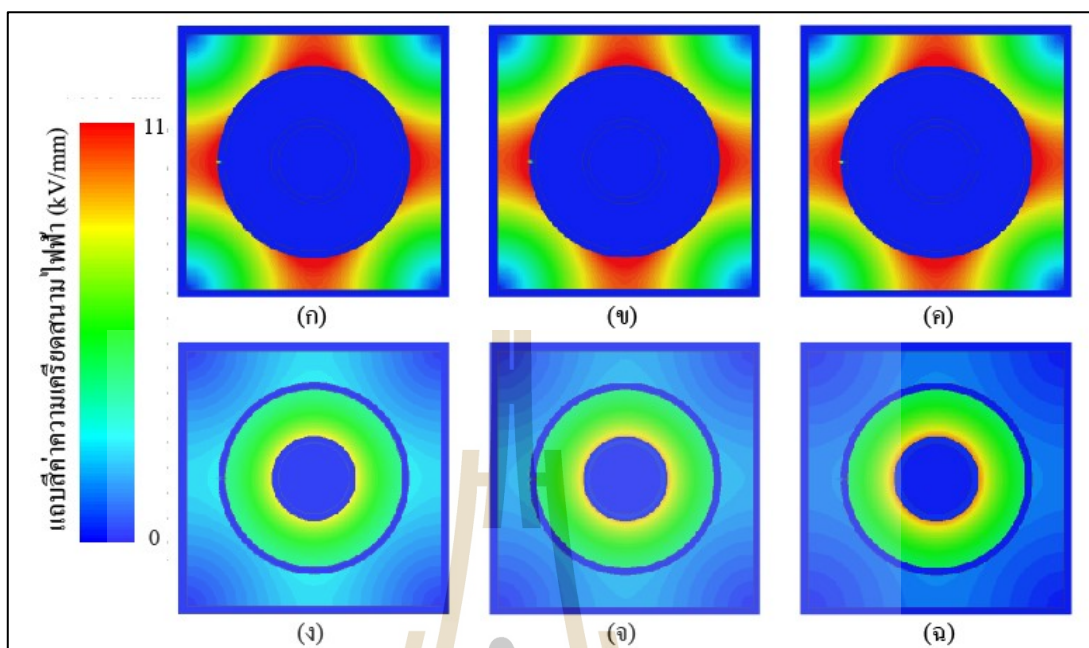
รูปที่ 3.7 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.8



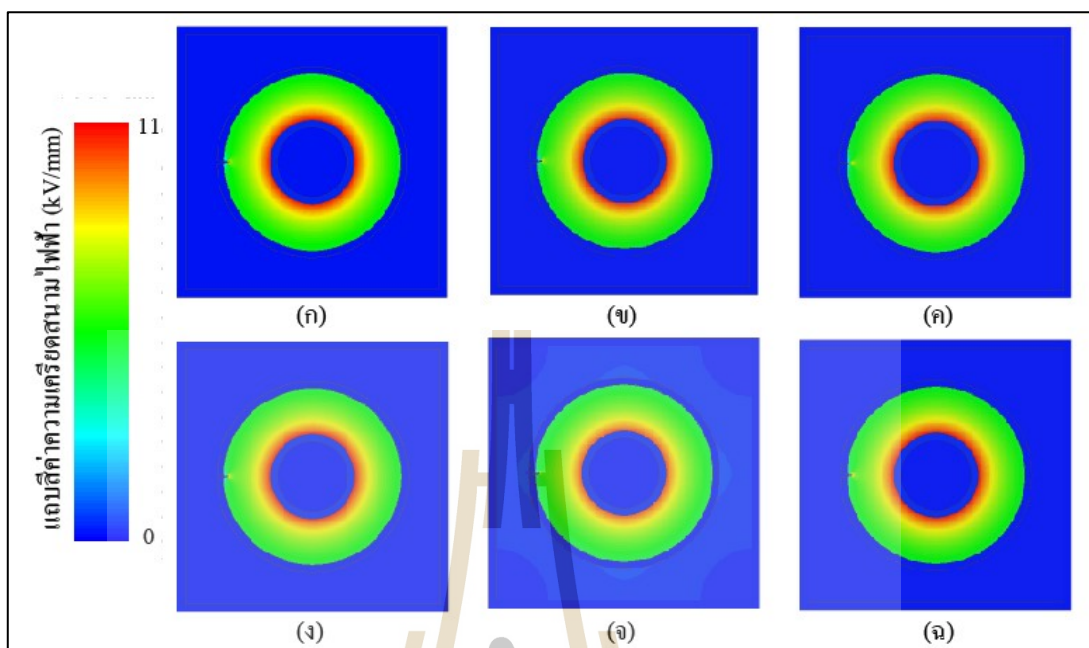
รูปที่ 3.8 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.9



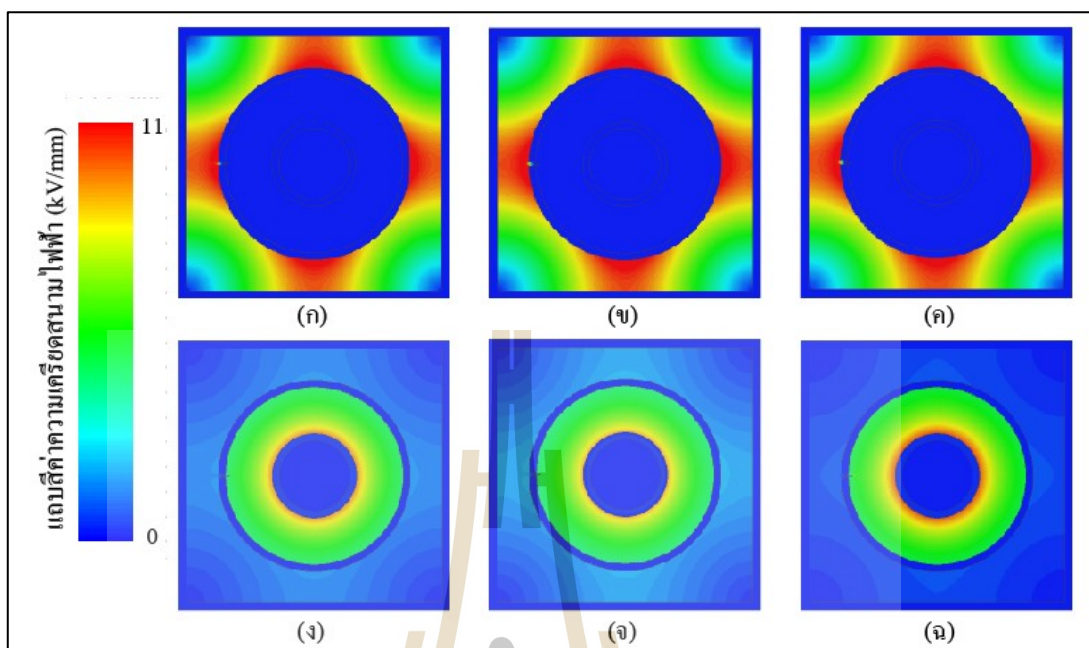
รูปที่ 3.9 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิห้อง ผลการจำลองพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.10



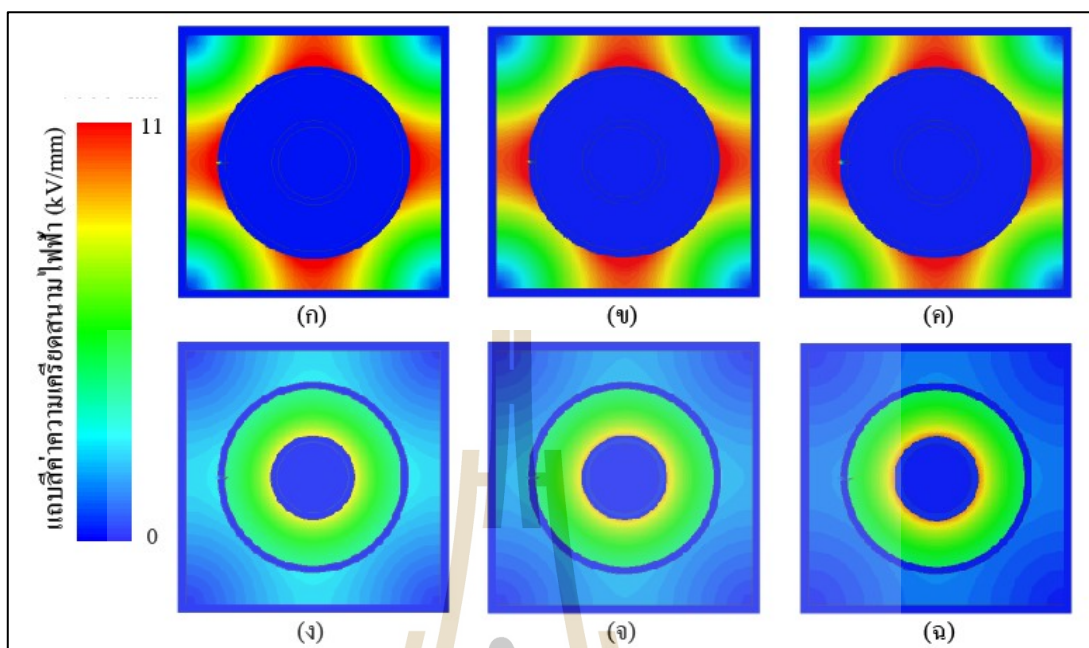
รูปที่ 3.10 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.11



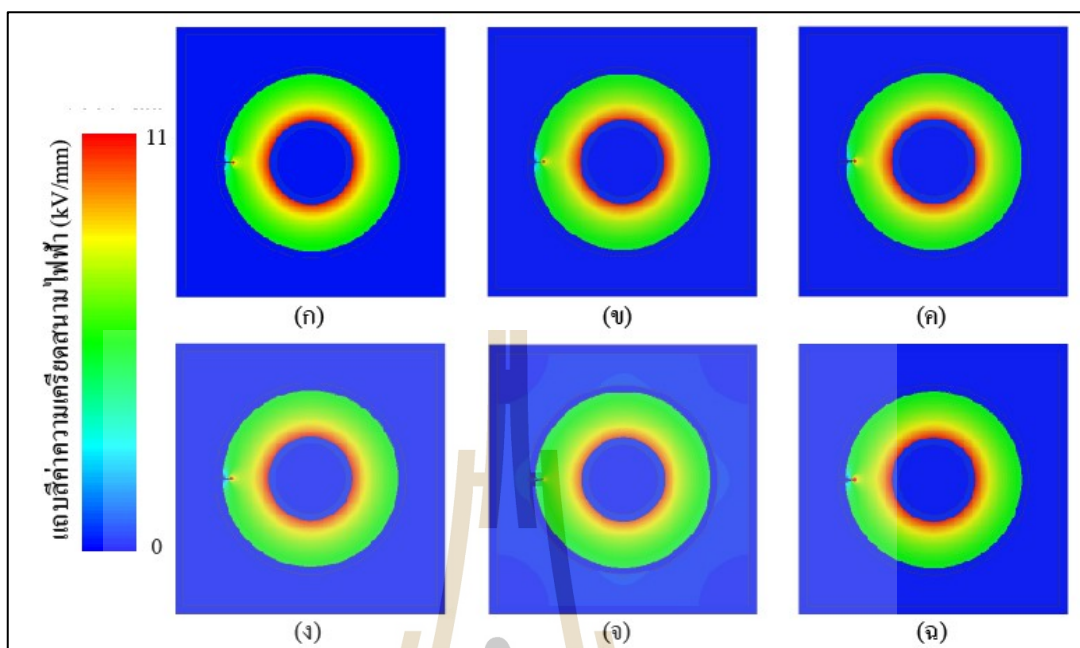
รูปที่ 3.11 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub> พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

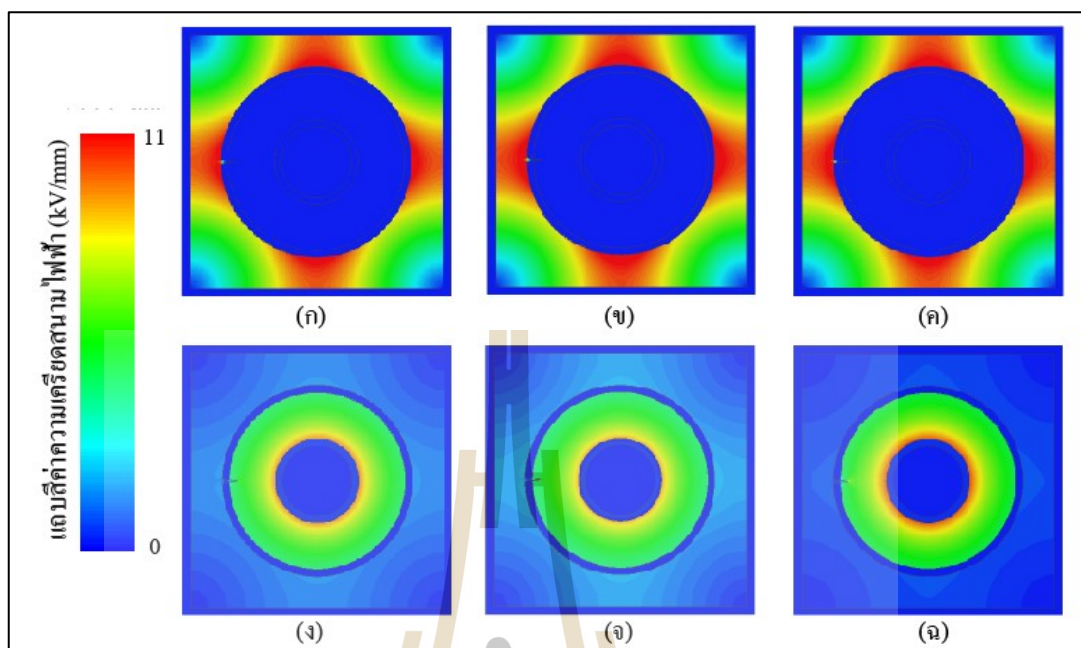
ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ผลการจำลองพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล และเริ่มเห็นได้ชัดว่ามีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ปลายรูเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

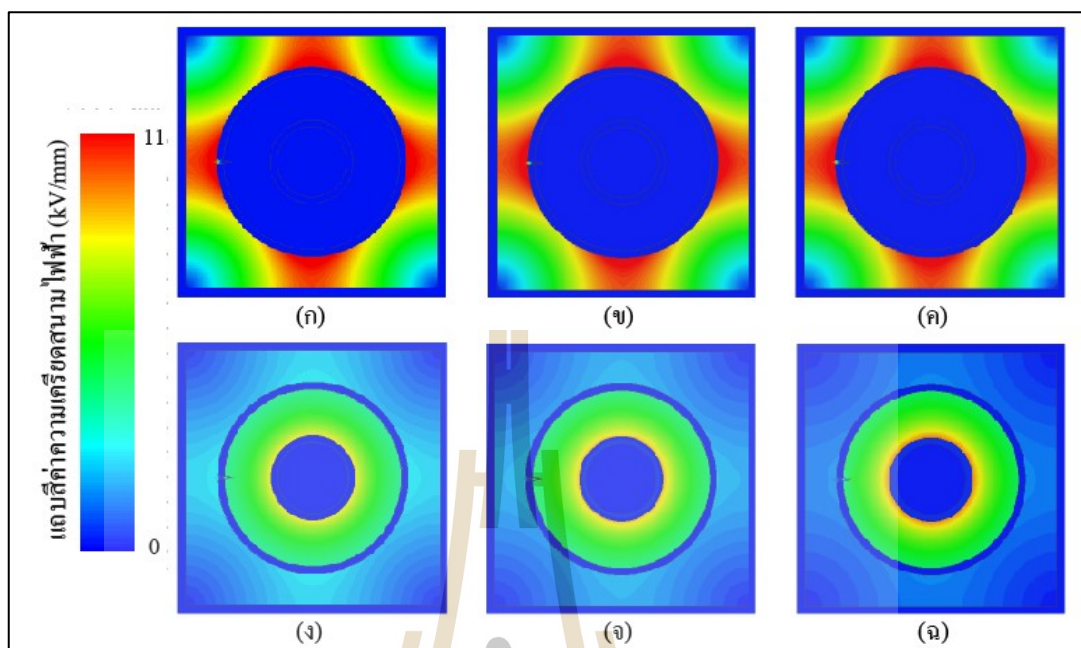
ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 3 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.14





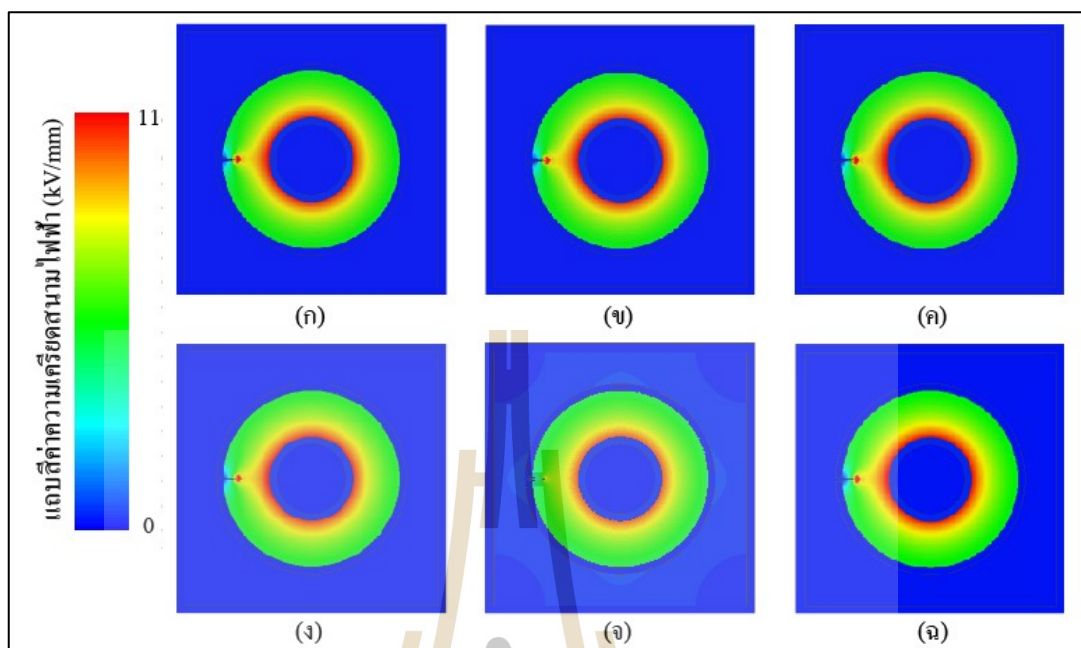
รูปที่ 3.14 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 3 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.15



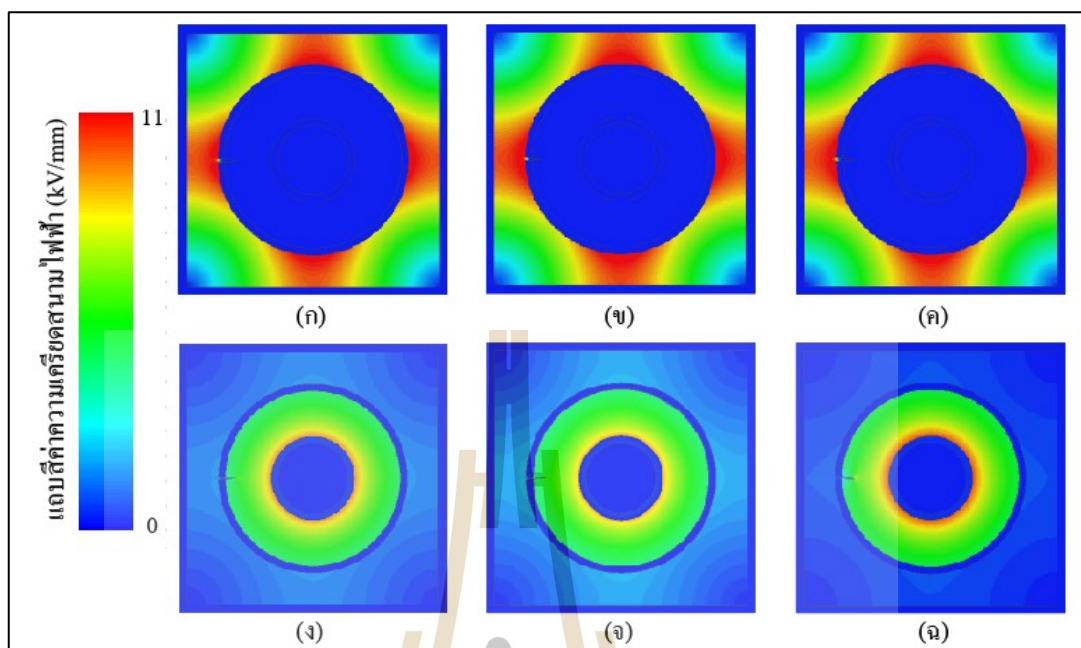
รูปที่ 3.15 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิห้อง ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล รวมทั้งยังพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายรูเจาะเริ่มมีค่าสูงขึ้นกว่าที่ขนาดรูเจาะ 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.16



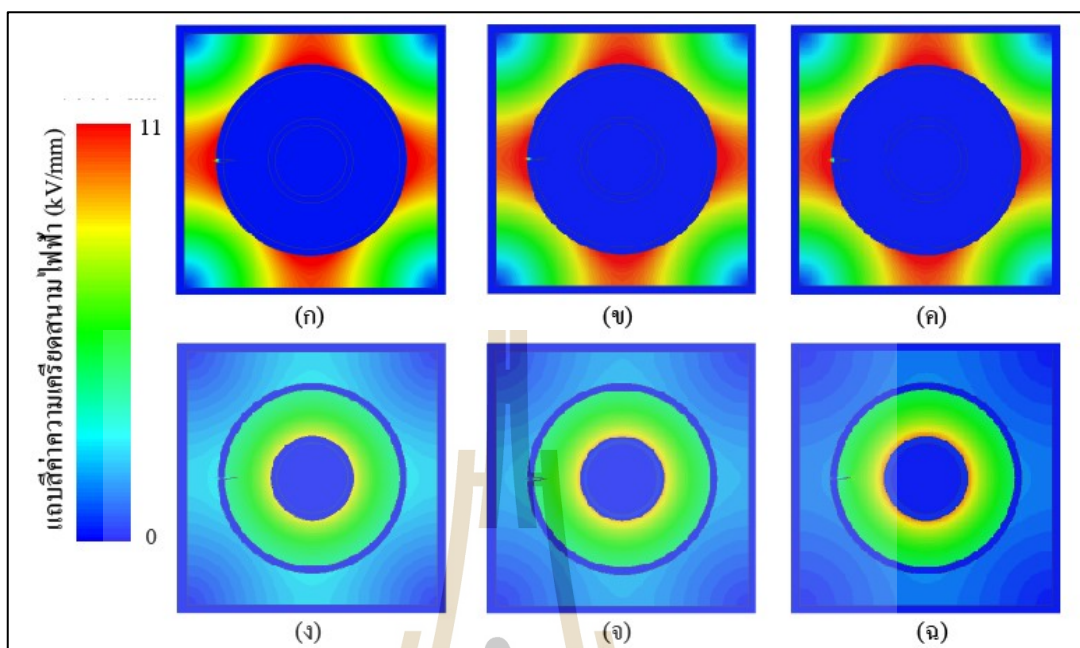
รูปที่ 3.16 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

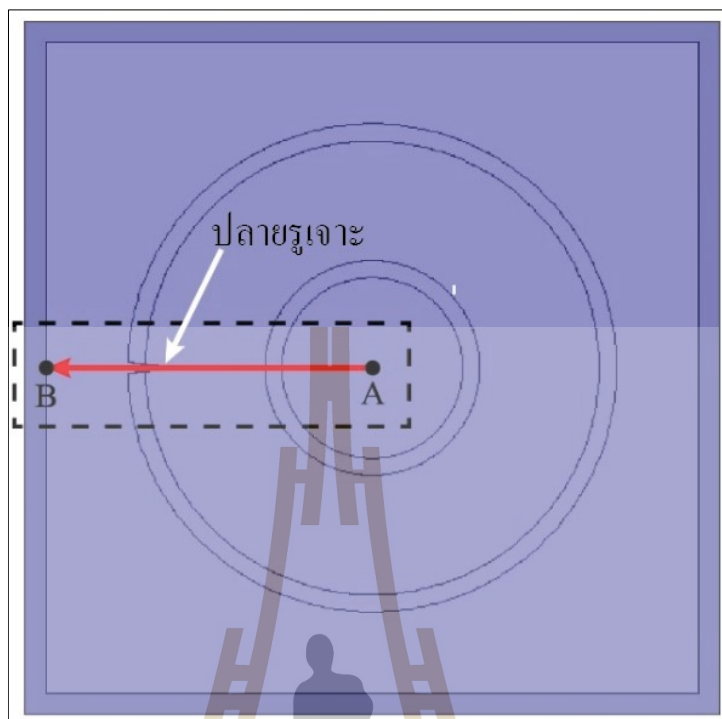
ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ผลการจำลองในสารละลาย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณภายนอกสายเคเบิล ส่วนผลการจำลองในสารละลาย (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะของความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ขนาดรูเจาะ 1.5 mm ในสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

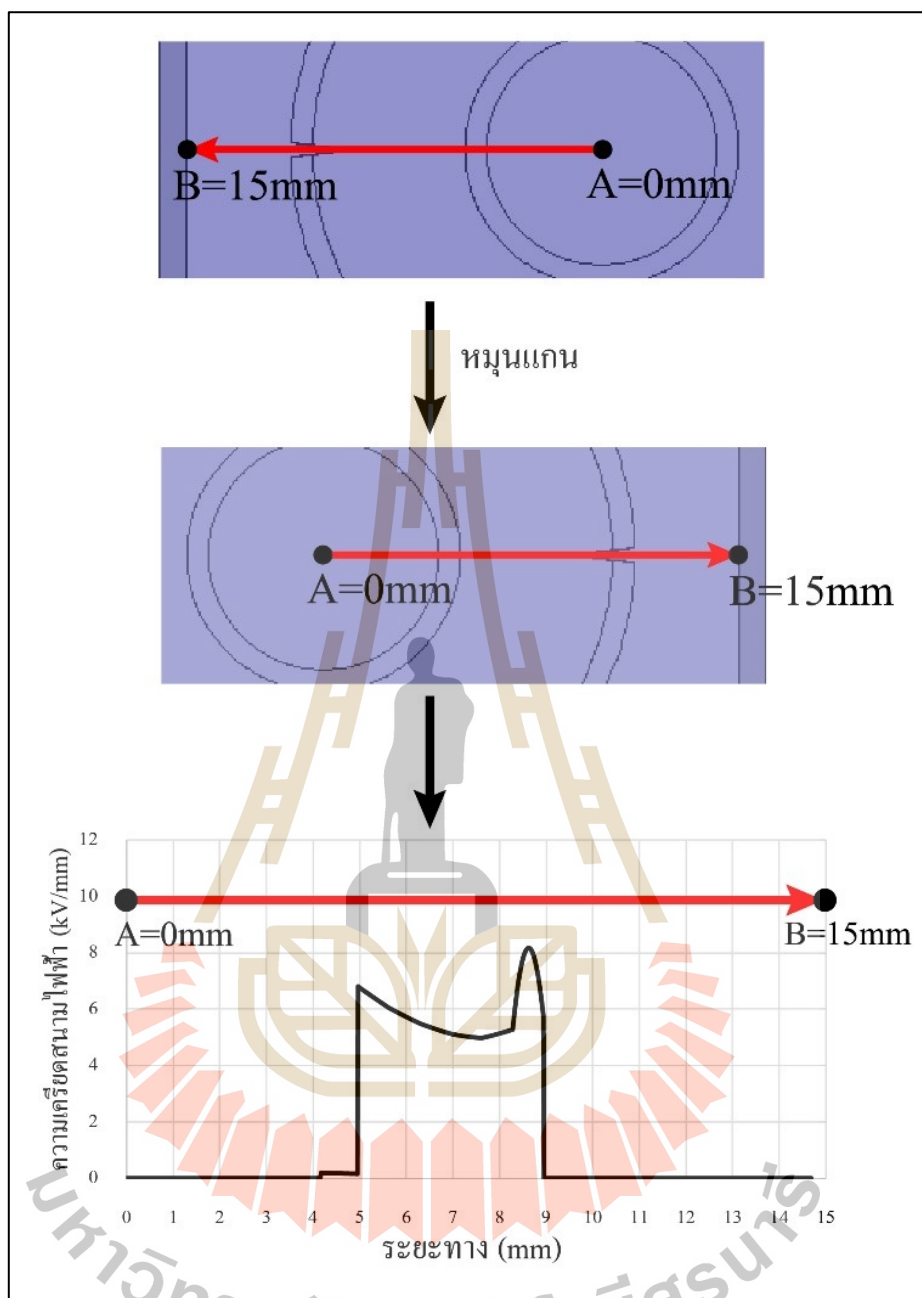
จากผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ถ้าดูจากสีหรือแถบแสดงผล พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้น 2 แบบคือ เกิดภายในสายเคเบิล และเกิดรอบนอกสายเคเบิล โดยที่เกิดภายในสายเคเบิลมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง กับ 50°C และที่เกิดภายนอกสายเคเบิลมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 50°C กับ 70°C

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาแปลงเป็นกราฟเพื่อดูผลเปรียบเทียบของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งรูเจาะตามเส้นลูกศร A-B แสดงดังรูปที่ 3.19



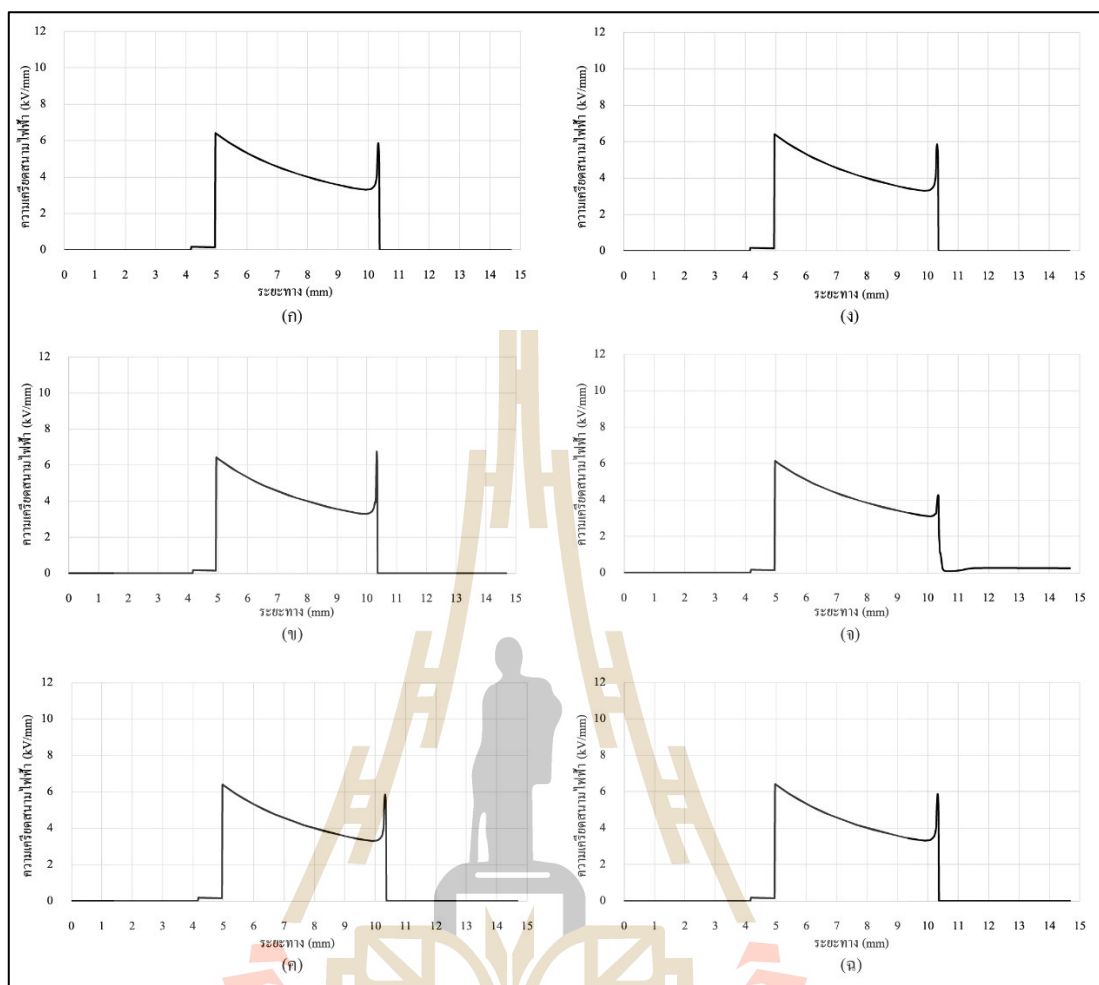
รูปที่ 3.19 บริเวณของความเครียดสนามไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.19 บริเวณเส้นสีแดงนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าและระยะทางจากจุด A ไปจุด B ดังรูปที่ 3.20 โดยให้จุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง  $A = 0 \text{ mm}$  (ตัวนำทองแดง) และปลายสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $B = 15 \text{ mm}$  (กราวด์) จะได้กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของสายเคเบิลในแต่ละขนาดของเข็มที่เจาะ โดยแบ่งเป็นรูเจาะ 4 ขนาด คือ (i) สำหรับรูเจาะขนาด  $0.1 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ถึงรูปที่ 3.23 (ii) สำหรับรูเจาะขนาด  $0.5 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ถึงรูปที่ 3.26 (iii) สำหรับรูเจาะขนาด  $1.0 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ถึงรูปที่ 3.29 (iv) สำหรับรูเจาะขนาด  $1.5 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.30 ถึงรูปที่ 3.32 โดยในตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.7 แสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวน



รูปที่ 3.20 บริเวณที่พิจารณาของความเครียดสนามไฟฟ้า

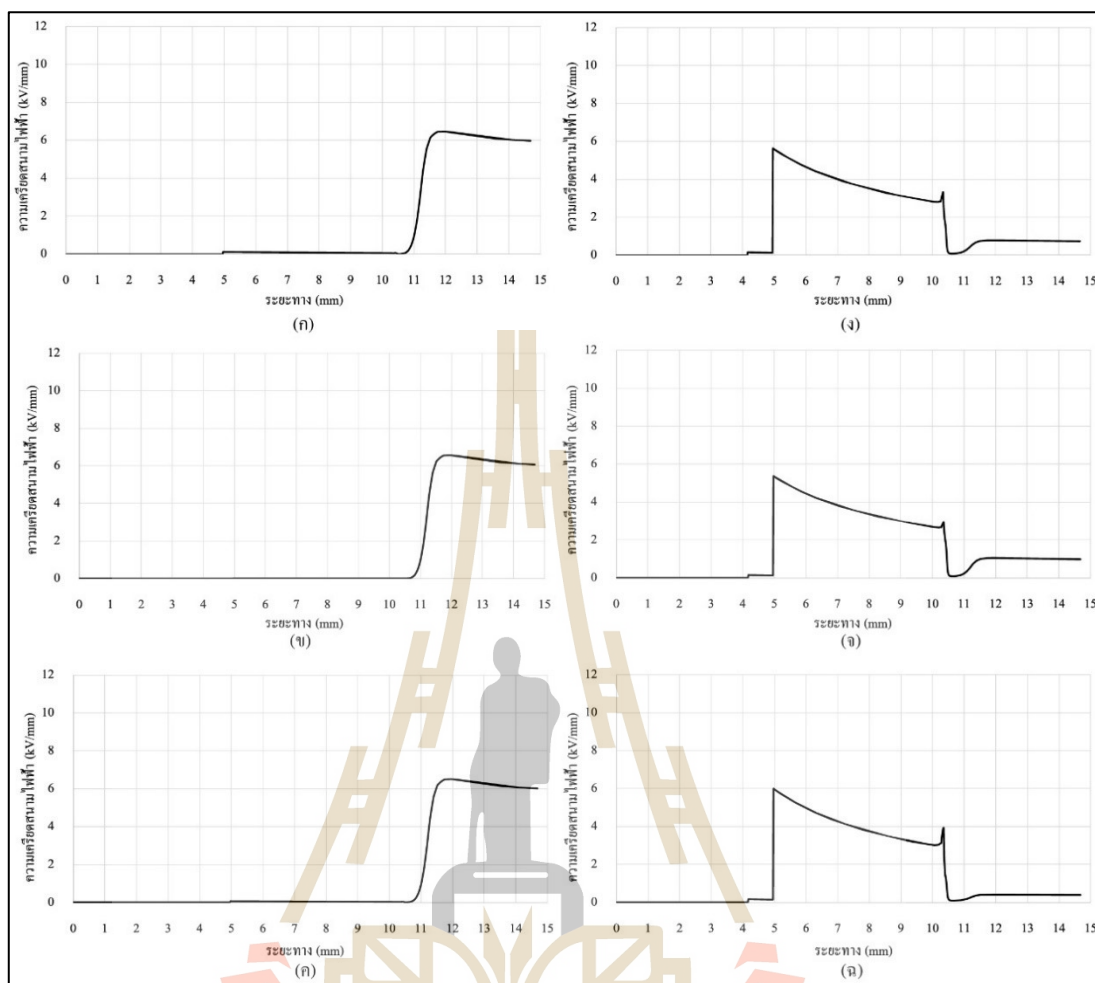
ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยขนาดรูเจาะ 0.1 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

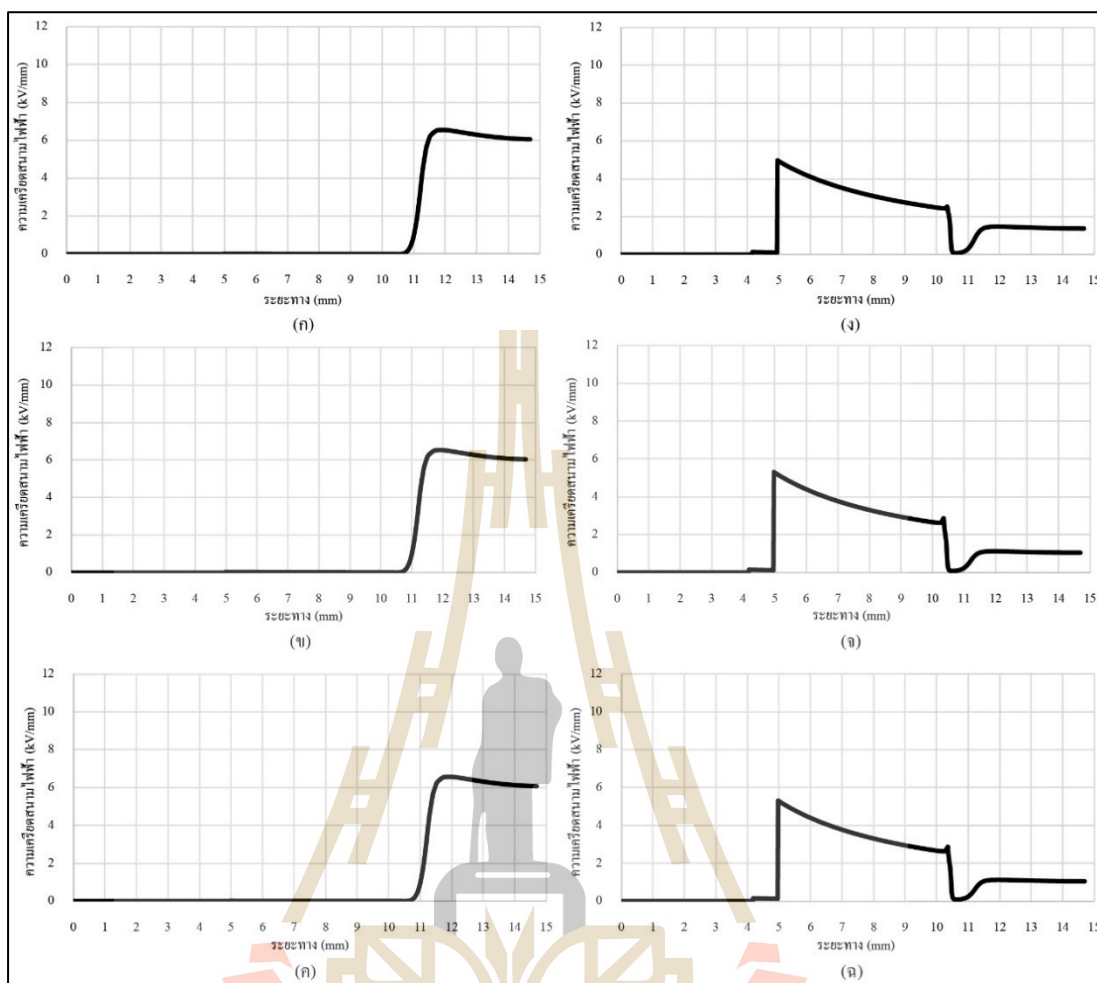
ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ด้วยขนาดรูเจาะ 0.1 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (iii)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (i)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (ii)  $\text{CuSO}_4$  และ (iii)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.22





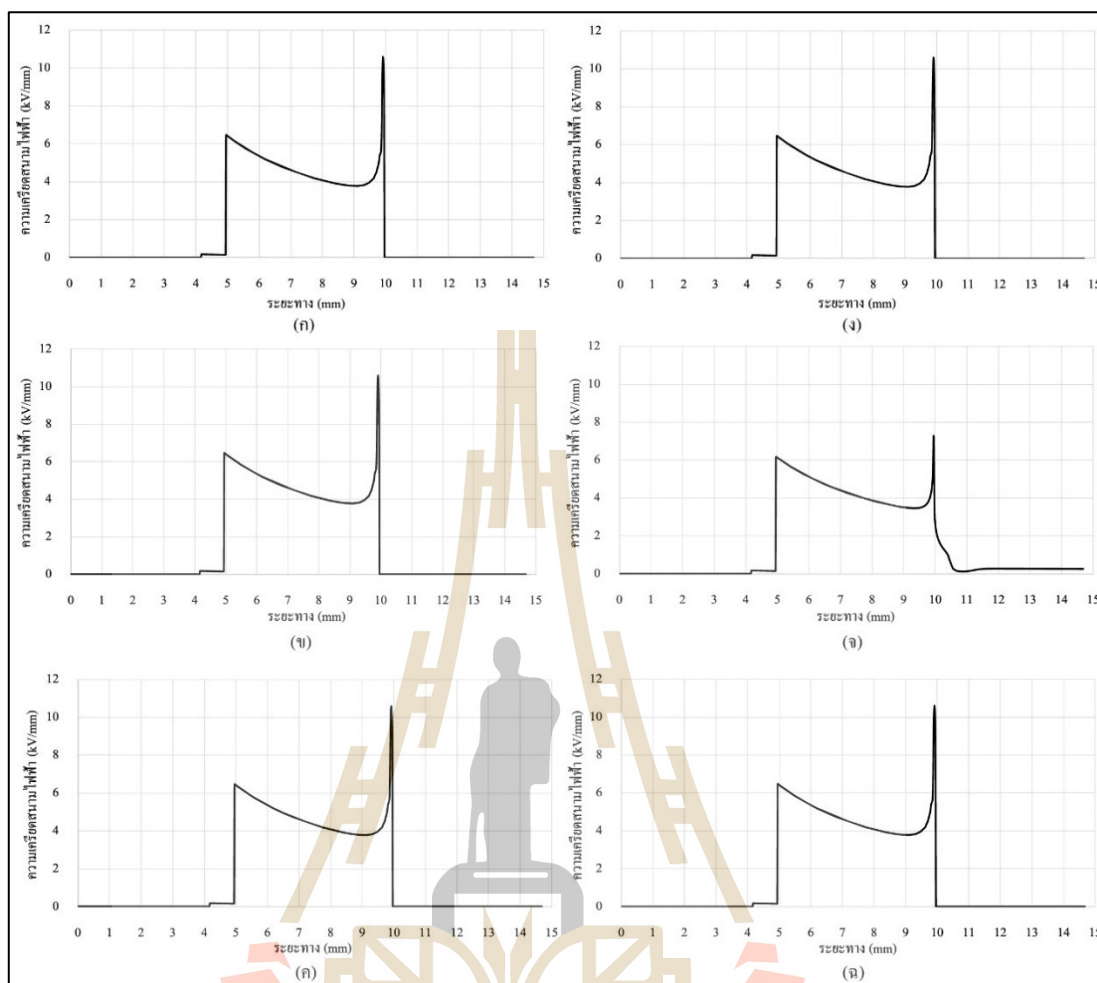
รูปที่ 3.22 ความเค็รียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

ผลการจำลองความเค็รียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70°C ด้วยขนาดรูเจาะ 0.1 mm พบว่าค่าความเค็รียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิ้ล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (i) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (ii) CuSO<sub>4</sub> และ (iii) FeSO<sub>4</sub> พบว่าค่าความเค็รียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.23



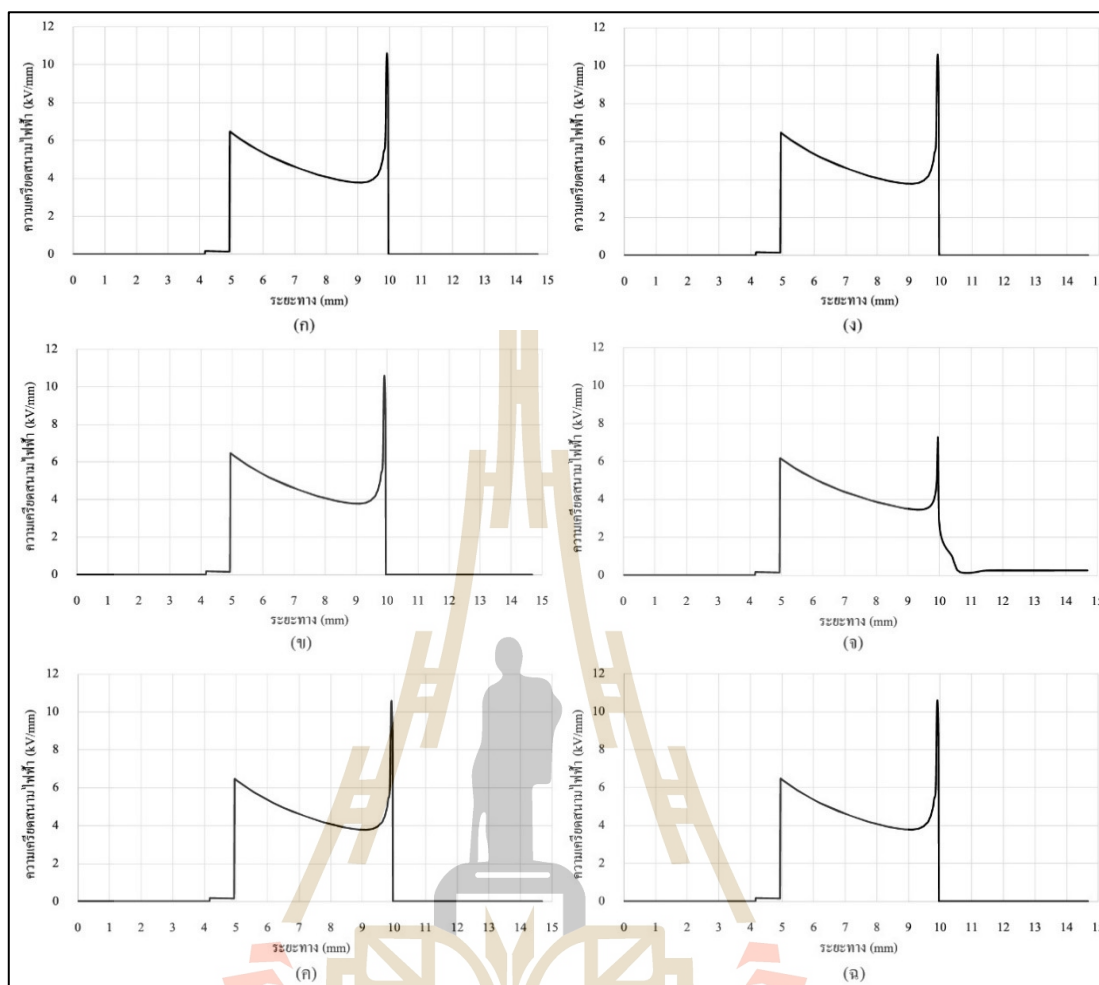
รูปที่ 3.23 ความเคียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.1 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (ฉ) CuSO<sub>4</sub> และ (ช) FeSO<sub>4</sub>

ผลการจำลองความเคียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยขนาดรูเจาะ 0.5 mm พบว่าค่าความเคียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุกท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.24



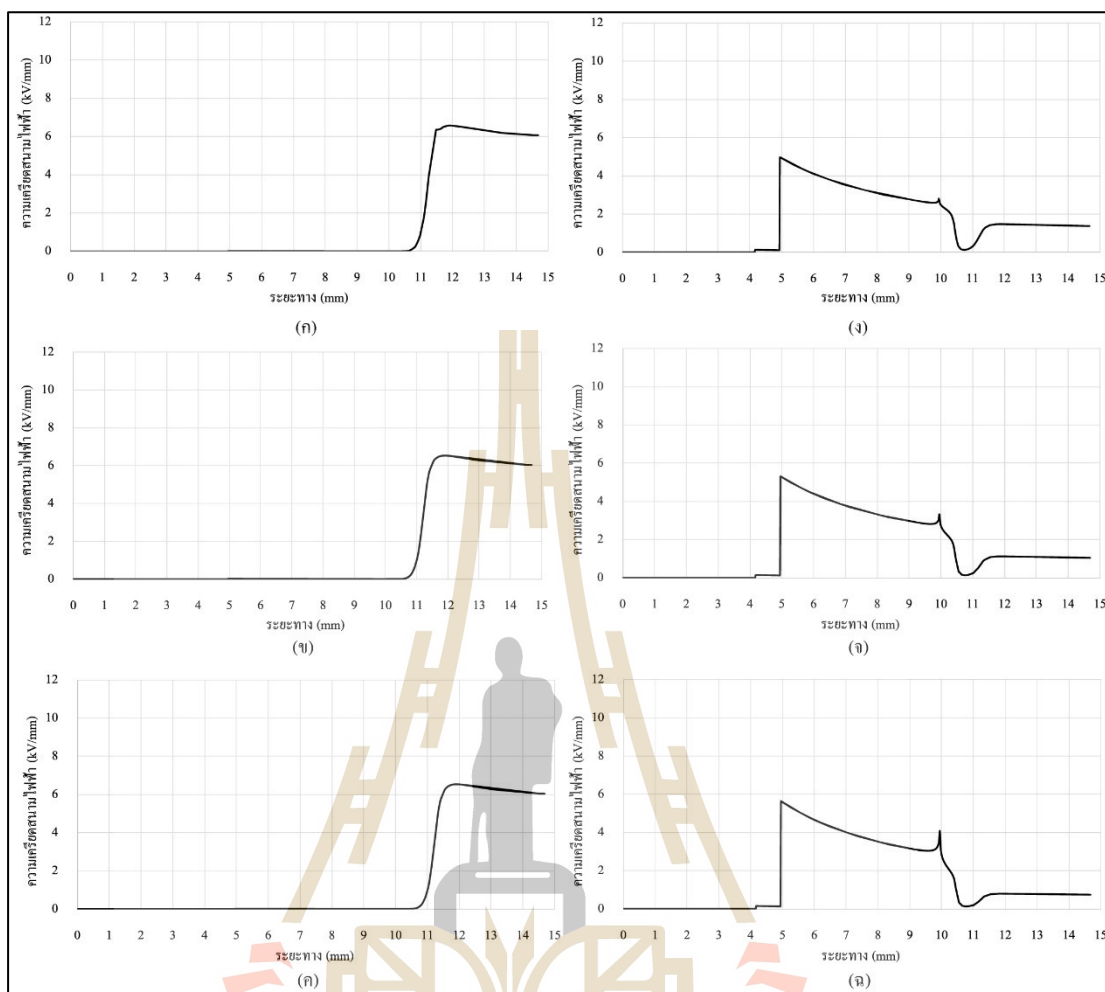
รูปที่ 3.24 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ด้วยขนาดรูเจาะ 0.5 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.25



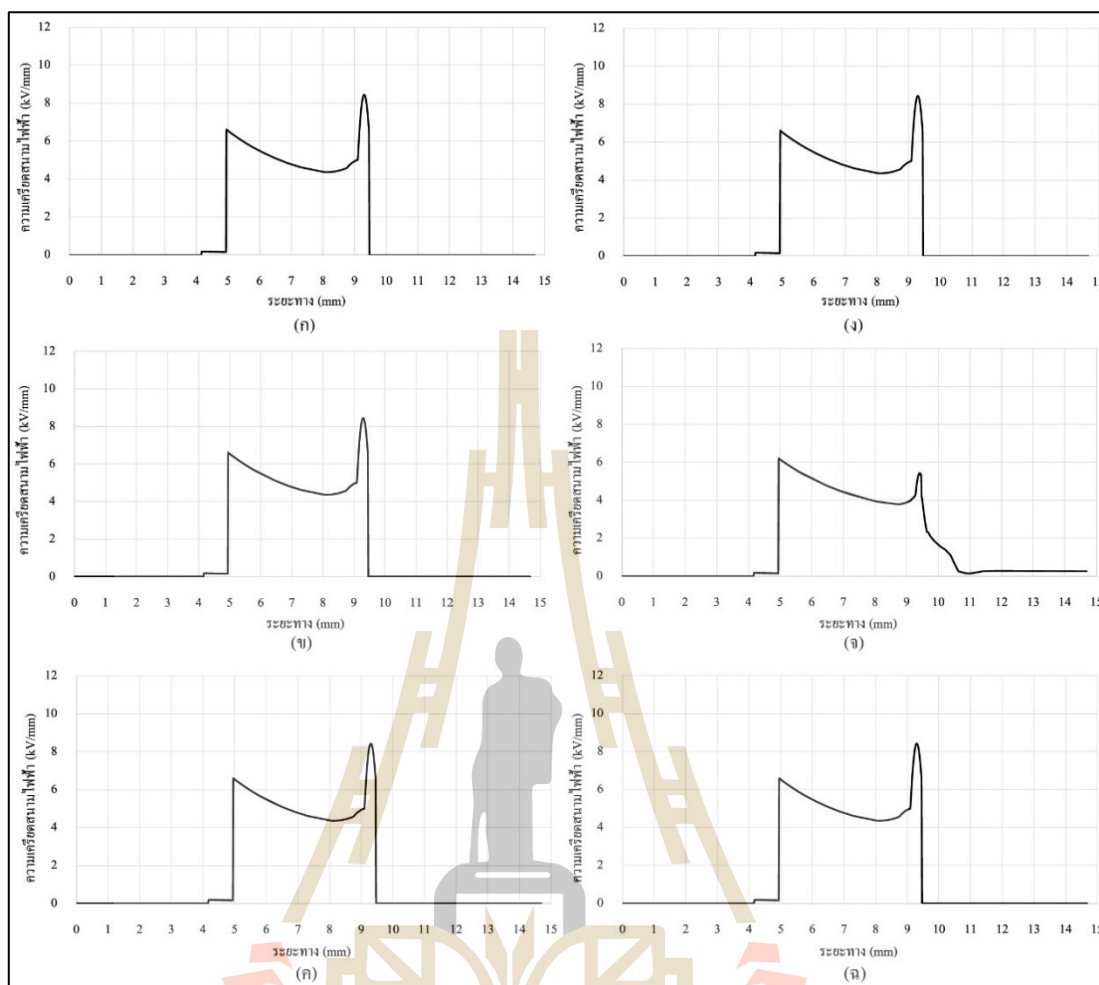
รูปที่ 3.25 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70°C ด้วยขนาดรูเจาะ 0.5 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (i) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (ii) CuSO<sub>4</sub> และ (iii) FeSO<sub>4</sub> พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.26



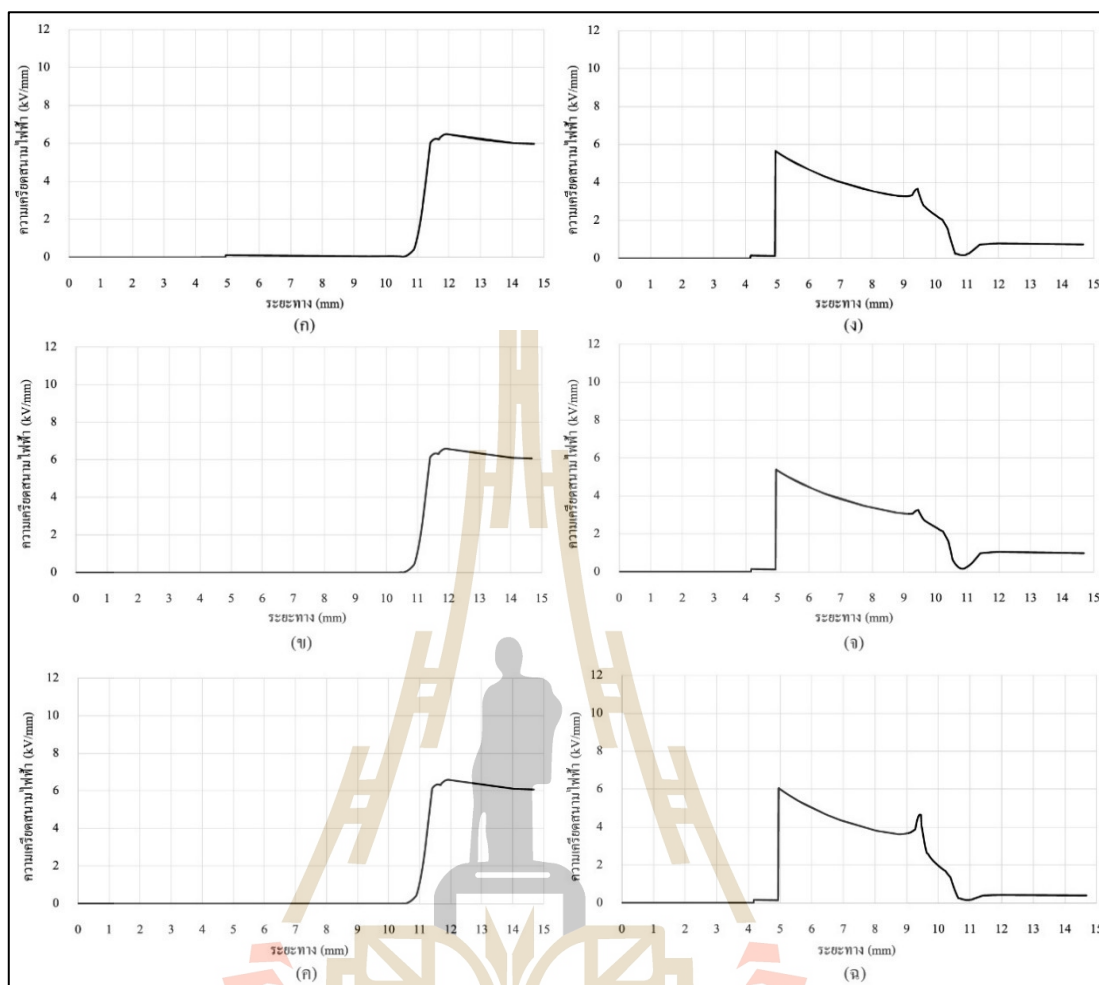
รูปที่ 3.26 ความเครีดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 0.5 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ผลการจำลองความเครีดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยขนาดรูเจาะ 1 mm พบว่าค่าความเครีดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.27



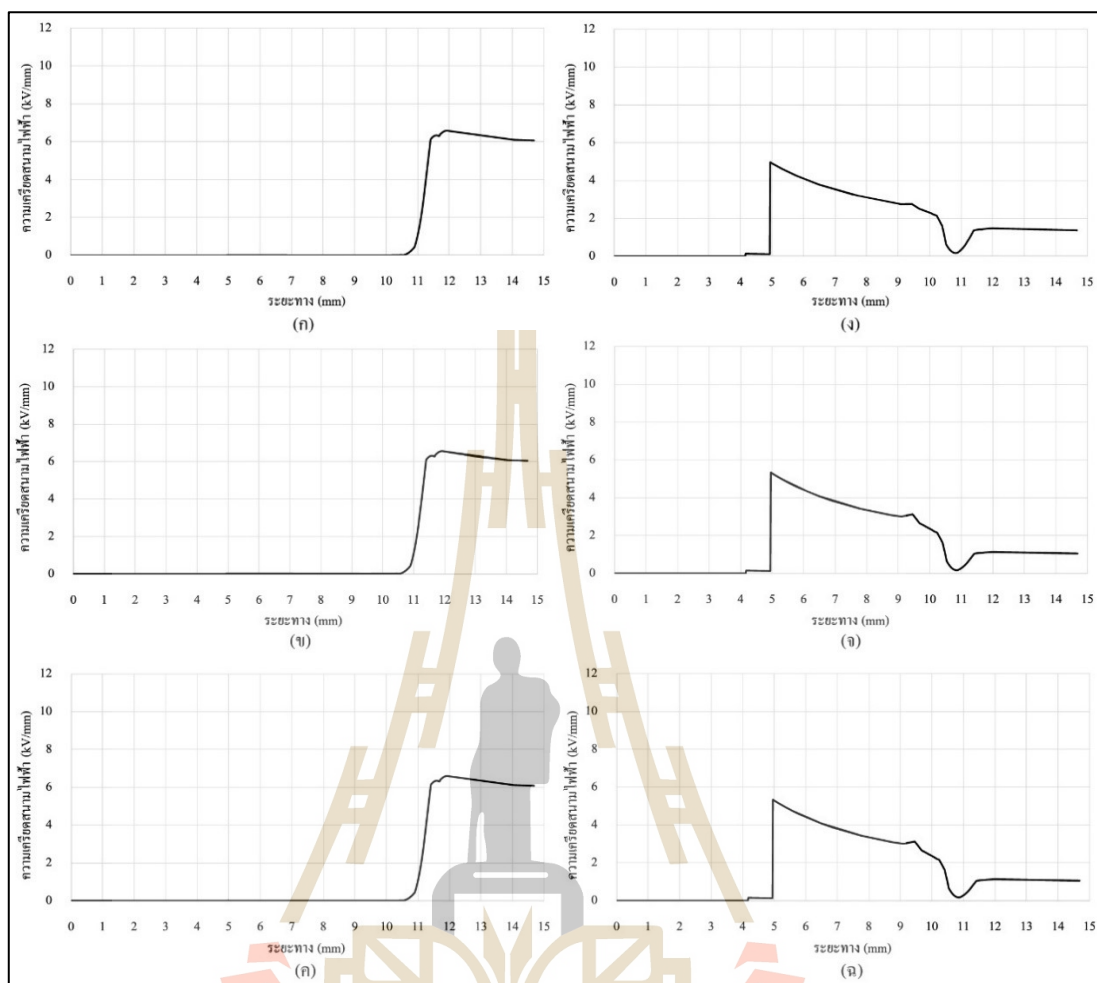
รูปที่ 3.27 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ด้วยขนาดรูเจาะ 1 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (iii)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (ii)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (ii)  $\text{CuSO}_4$  และ (iii)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

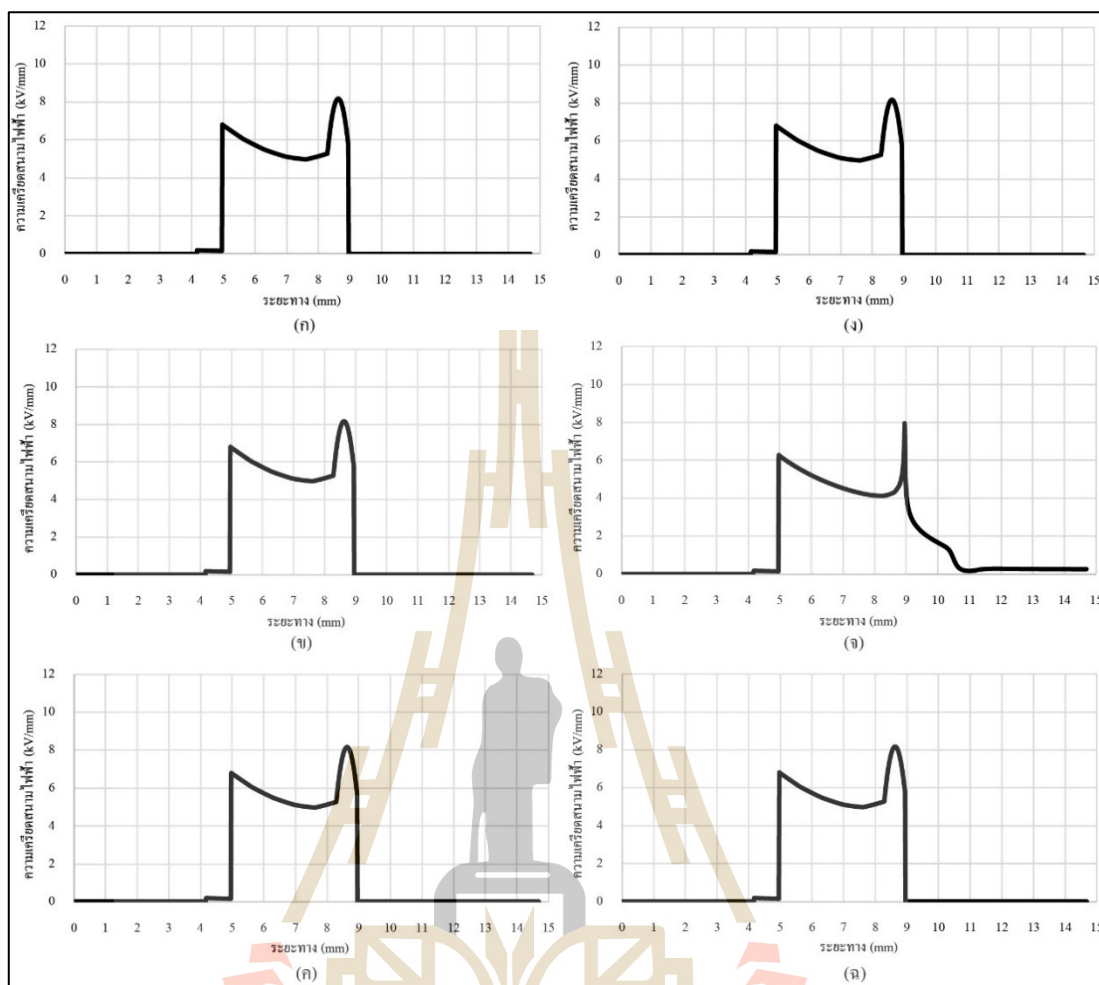
ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70°C ด้วยขนาดรูเจาะ 1 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (iii)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (i)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (ii)  $\text{CuSO}_4$  และ (iii)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

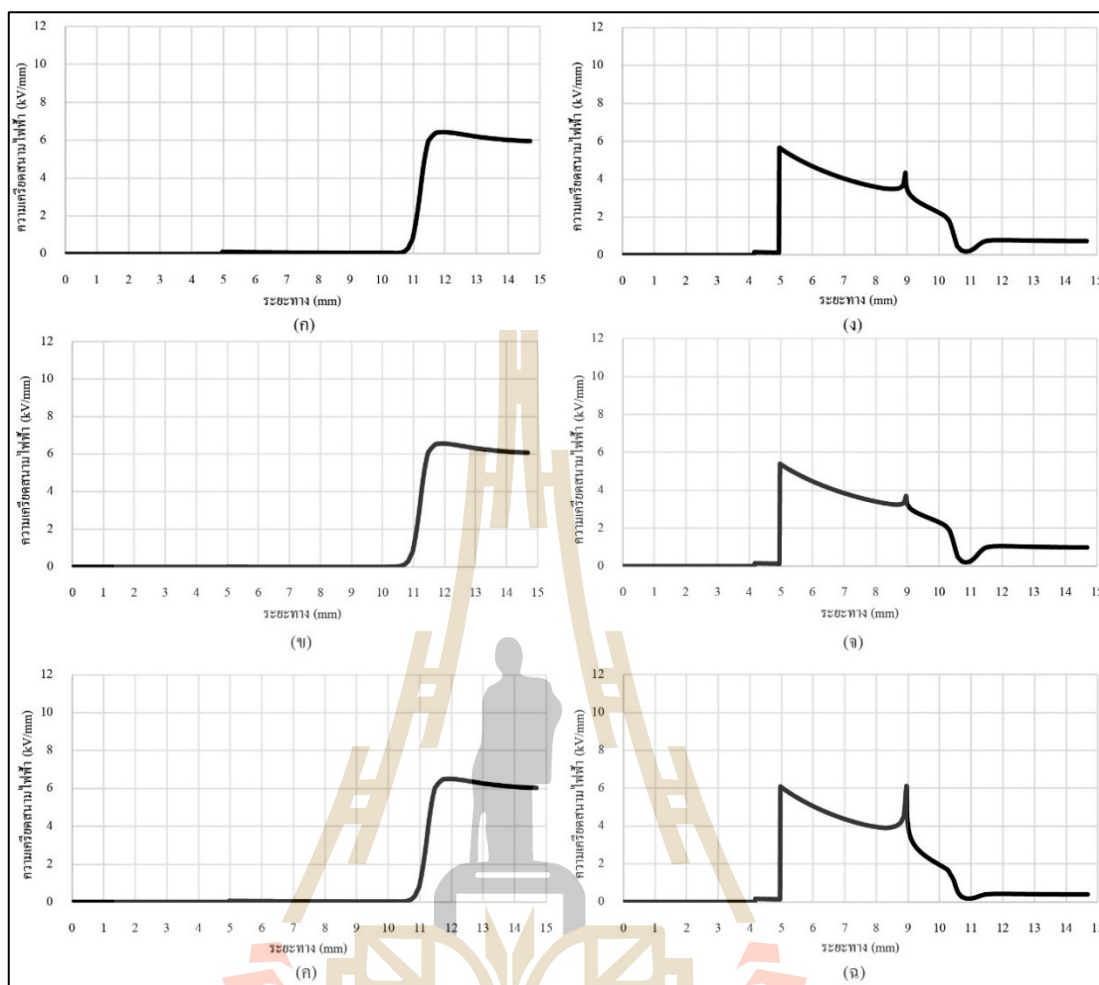
ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยขนาดรูเจาะ 1.5 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.30





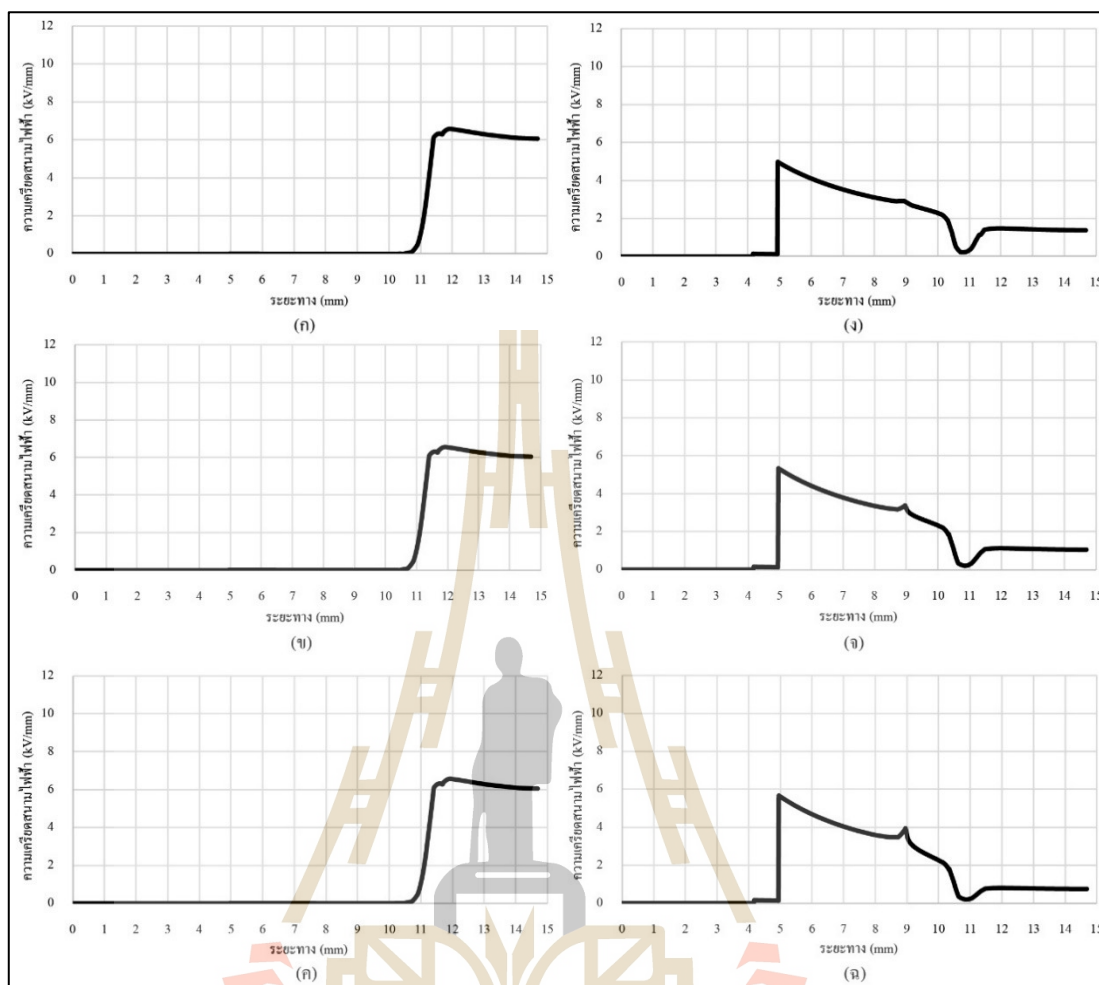
รูปที่ 3.30 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ด้วยขนาดรูเจาะ 1.5 mm พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (iii)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (i)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (ii)  $\text{CuSO}_4$  และ (iii)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิ 50°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70°C ด้วยขนาดรูเจาะ 1.5 mm จะเห็นว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่การทดสอบในสารละลาย (i) NaCl (ii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ (iii)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เริ่มสูงขึ้นที่ระยะประมาณ 11 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ แกนกลางสายเคเบิล จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนในสารละลาย (i)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (ii)  $\text{CuSO}_4$  และ (iii)  $\text{FeSO}_4$  พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่ระยะ 5 mm โดยอยู่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้า จากนั้นค่าจะลดลงเรื่อย ๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่บริเวณปลายของรูเจาะ สุดท้ายจะลดลงไปเป็นศูนย์เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกสำหรับรูเจาะ 1.5 mm ที่อุณหภูมิ 70°C ประกอบไปด้วย (ก) NaCl (ข) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ค) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ง) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (จ) CuSO<sub>4</sub> และ (ฉ) FeSO<sub>4</sub>

กรณีรูเจาะขนาด 0.1 mm ในเนื้อฉนวน เมื่อพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่กำหนด (จากจุด A ไป B) พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนในแต่ละสารละลายไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสารละลายที่ให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ สารละลายไอออนิก K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ที่อุณหภูมิ 50°C ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 0.1 mm

| สารละลายไอออนิก                   | ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm) |       |       |             |       |       |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                                   | โดยรวม                      |       |       | ในเนื้อฉนวน |       |       |
|                                   | อุณหภูมิ                    |       |       | อุณหภูมิ    |       |       |
|                                   | ห้อง                        | 50°C  | 70°C  | ห้อง        | 50°C  | 70°C  |
| NaCl                              | 6.410                       | 6.447 | 6.553 | 6.410       | 3.954 | 4.019 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | 6.755                       | 6.562 | 6.537 | 6.755       | 4.025 | 4.009 |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 6.410                       | 6.505 | 6.553 | 6.410       | 3.990 | 4.019 |
| Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 6.410                       | 5.635 | 4.958 | 6.410       | 5.635 | 4.958 |
| CuSO <sub>4</sub>                 | 6.151                       | 5.377 | 5.307 | 6.151       | 5.377 | 5.307 |
| FeSO <sub>4</sub>                 | 6.410                       | 6.002 | 5.627 | 6.410       | 6.002 | 5.627 |

กรณีรูเจาะขนาด 0.5 mm ในเนื้อฉนวน เมื่อพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่กำหนด (จากจุด A ไป B) พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนในแต่ละสารละลายไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสารละลายที่ให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ สารละลายไอออนิก Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ที่อุณหภูมิ 70°C ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 0.5 mm

| สารละลายไอออนิก                   | ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm) |        |       |             |        |       |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------|-------|-------------|--------|-------|
|                                   | โดยรวม                      |        |       | ในเนื้อฉนวน |        |       |
|                                   | อุณหภูมิ                    |        |       | อุณหภูมิ    |        |       |
|                                   | ห้อง                        | 50°C   | 70°C  | ห้อง        | 50°C   | 70°C  |
| NaCl                              | 10.602                      | 10.602 | 6.564 | 10.602      | 10.602 | 3.956 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | 10.602                      | 10.602 | 6.535 | 10.602      | 10.602 | 3.932 |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 10.602                      | 10.602 | 6.550 | 10.602      | 10.602 | 3.941 |
| Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 10.602                      | 10.602 | 4.957 | 10.602      | 10.602 | 4.957 |
| CuSO <sub>4</sub>                 | 7.200                       | 7.200  | 5.312 | 7.200       | 7.200  | 5.312 |
| FeSO <sub>4</sub>                 | 10.602                      | 10.602 | 5.634 | 10.602      | 10.602 | 5.634 |

กรณีรูเจาะขนาด 1 mm ในเนื้อฉนวน เมื่อพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่กำหนด (จากจุด A ไป B) พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนในแต่ละสารละลายไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสารละลายที่ให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ สารละลายไอออนิก NaCl ที่อุณหภูมิ 50°C ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 1 mm

| สารละลาย<br>ไอออนิก               | ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm) |       |       |             |       |       |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                                   | โดยรวม                      |       |       | ในเนื้อฉนวน |       |       |
|                                   | อุณหภูมิ                    |       |       | อุณหภูมิ    |       |       |
|                                   | ห้อง                        | 50°C  | 70°C  | ห้อง        | 50°C  | 70°C  |
| NaCl                              | 8.432                       | 6.475 | 6.582 | 8.432       | 3.836 | 3.922 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | 8.432                       | 6.592 | 6.567 | 8.432       | 3.928 | 3.889 |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 8.432                       | 6.534 | 6.582 | 8.432       | 3.893 | 3.922 |
| Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 8.432                       | 5.663 | 4.972 | 8.432       | 5.663 | 4.972 |
| CuSO <sub>4</sub>                 | 6.217                       | 5.398 | 5.326 | 6.217       | 5.398 | 5.326 |
| FeSO <sub>4</sub>                 | 8.432                       | 6.052 | 5.654 | 8.432       | 6.052 | 5.654 |

กรณีรูเจาะขนาด 1.5 mm ในเนื้อฉนวน เมื่อพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่กำหนด (จากจุด A ไป B) พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนในแต่ละสารละลายไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสารละลายที่ให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ สารละลายไอออนิก NaCl ที่อุณหภูมิ 50°C ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดโดยรวมของบริเวณที่พิจารณา (จากจุด A ไป B) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในเนื้อฉนวนขนาดรูเจาะ 1.5 mm

| สารละลายไอออนิก                   | ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm) |       |       |             |       |       |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                                   | โดยรวม                      |       |       | ในเนื้อฉนวน |       |       |
|                                   | อุณหภูมิ                    |       |       | อุณหภูมิ    |       |       |
|                                   | ห้อง                        | 50°C  | 70°C  | ห้อง        | 50°C  | 70°C  |
| NaCl                              | 8.169                       | 6.434 | 6.581 | 8.169       | 3.800 | 3.912 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | 8.169                       | 6.549 | 6.565 | 8.169       | 3.868 | 3.902 |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 8.169                       | 6.492 | 6.580 | 8.169       | 3.834 | 3.920 |
| Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 8.169                       | 5.667 | 4.972 | 8.169       | 5.667 | 4.972 |
| CuSO <sub>4</sub>                 | 7.944                       | 5.396 | 5.331 | 7.944       | 5.396 | 5.331 |
| FeSO <sub>4</sub>                 | 8.169                       | 6.087 | 5.668 | 8.169       | 6.087 | 5.668 |

### 3.5 วิเคราะห์ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

จากผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.18 พบว่าที่ทุก ๆ ขนาดรูเจาะและสารละลายไอออนิก ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มีค่าที่สูงภายในสายเคเบิล แต่ที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C พบว่าที่สารละลาย (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณรอบนอกสายเคเบิล ส่วนในสารละลาย (i) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (ii) CuSO<sub>4</sub> และ (iii) FeSO<sub>4</sub> ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นภายในสายเคเบิล

จากผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.21 ถึงรูปที่ 3.32 และข้อมูลเปรียบเทียบในตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.7 พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ขนาดรูเจาะ 0.5 mm (10.6 kV/mm) ขนาดรูเจาะ 1 mm (8.4 kV/mm) ขนาดรูเจาะ 1.5 mm (8.1 kV/mm) และขนาดรูเจาะ 0.1 mm (6.7 kV/mm) ตามลำดับ ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้านี้น้อยกว่าขนาดพิคคของค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามมาตรฐานของสายเคเบิลที่ 50 kV/mm แต่มีค่ามากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของแกนกลางสายเคเบิลที่คำนวณได้ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมที่ได้นำเสนอมาแล้วข้างต้น คือ 5.11 kV/mm ถ้าต้องการเร่งการเกิดวอเตอร์ทริอิงแต่ไม่ให้เกิดเบรกดาวน์ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายรูเจาะควรมีค่าประมาณ 5.11 kV/mm ดังนั้นการออกแบบจึงเลือกขนาดรูเจาะขนาด 0.5 mm แต่เนื่องจากผู้วิจัยได้ทดสอบก่อนทดสอบจริงเพื่อดูแนวโน้มการเกิดวอเตอร์ทริอิง ซึ่งหลังจากวัดความยาวของวอเตอร์ทริอิงแล้วให้ความยาวที่สั้นมากและไม่ชัดเจน จึงเลือกขนาดรูเจาะที่ 1 mm ที่

ให้ผลการทดสอบดีกว่า ดังนั้นขนาดรูเจาะที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบระบบขนาด 1 mm โดยประมาณ

### 3.6 สรุป

การจำลองการขยายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE เมื่อนำผลจากการจำลองที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของแกนกลางสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ทนได้คือ 5.11 kV/mm พบว่าที่อุณหภูมิห้องค่าความความเครียดสนามมีค่าสูงกว่าและมีโอกาสทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพได้ไวกว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงถ้าหากนำไปทดลองอาจจะทำให้การขยายตัวของวอเตอร์หรือองได้ไวในที่อุณหภูมิห้อง และอาจเกิดได้ช้าที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามในจำลองนี้พิจารณาเฉพาะค่าตัวแปรทางไฟฟ้าเป็นหลักมีอยู่ 2 ค่าตัวแปร คือ ค่าความนำไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แต่หากมีการพิจารณาค่าอื่น ๆ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอาจเปลี่ยนแปลงได้



## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 กล่าวนำ

การศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE มีหลายวิธี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาและออกแบบระบบทดสอบเพื่อให้รองรับการทดสอบภายใต้แรงดันและสภาพแวดล้อมจากสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่าง ๆ

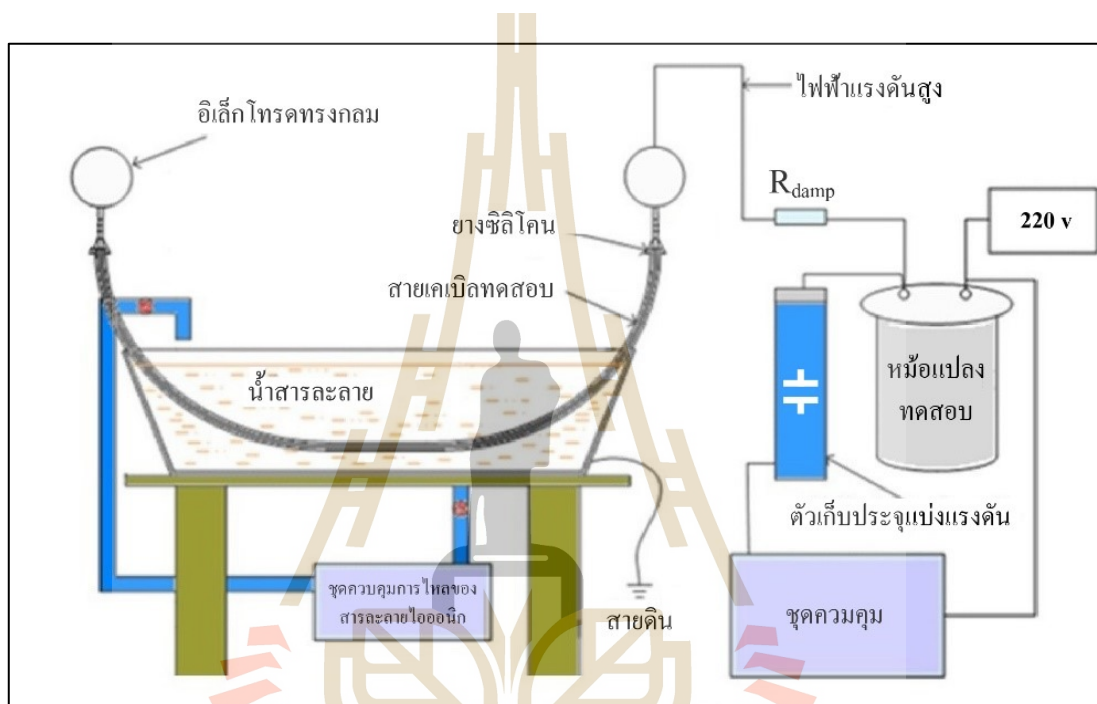
ในบทนี้ผู้วิจัยกล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิง วิธีการดำเนินการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างหลังจากการทดสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี โดยรายละเอียดแสดงไว้ดังนี้

#### 4.2 การออกแบบชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิง

การทดสอบโดยการจำลองสภาพการใช้งานจริงเป็นการทดสอบแบบสุ่มโดยแบ่งระยะเวลาทดสอบเป็น 4 ช่วง คือ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของฉนวน XLPE ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม THAI INDUSTRIAL STANDARD มอก. 2340-2550 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550) สายเคเบิลทดสอบมีความยาว 2 m พร้อมปลอกฉนวนที่ปลายออกประมาณ 40 cm ฉนวนถูกสวมด้วยยางซีลีโคนเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล จากนั้นสายเคเบิลถูกทำให้อยู่ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าและนำไปแช่ในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในอ่างเก็บสารละลายที่มีขนาดยาว 100 cm กว้าง 35 cm และสูง 25 cm สายเคเบิลถูกป้อนแรงดันที่ปลายสายข้างใดข้างหนึ่งที่ 24 kV 50 Hz ตลอดการทดสอบและที่ปลายสายแต่ละข้างต่อกับอิเล็กโทรดทรงกลมหรือรีไว้ สารละลายในถังสแตนเลสมีการหมุนเวียนเพื่อความเข้มข้นคงที่และรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง 50°C และ 70°C ในแต่ละวันเปิดทดสอบตลอด 24 ชั่วโมง โดยมีต้นแบบไดอะแกรมของการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิง (ธีระพงษ์, 2557) โดยทดสอบที่อาคารเครื่องมือ F5, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 4.1

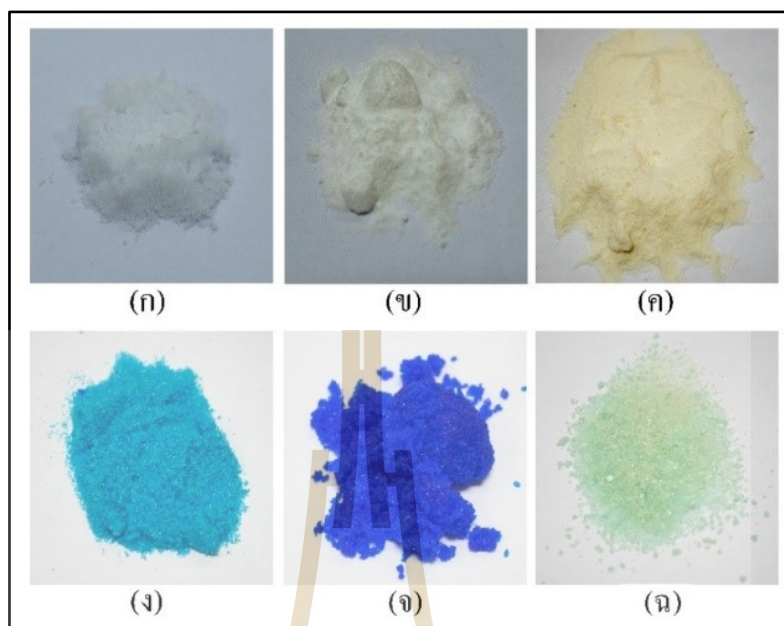


เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ จำนวนของสายเคเบิลถูกตัดเพื่อวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ สเตอริโอกำลังขยายสูงและวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิคแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR : Fourier Transform Infrared Spectrometer) การทดสอบแบ่งออกเป็น 6 ชุด ในแต่ละชุดการทดสอบมีสารละลายไอออนิก ประกอบไปด้วย (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iv) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (v) CuSO<sub>4</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub> ที่มีความเข้มข้น 0.1 mol/l



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมต้นแบบสำหรับการทดสอบการขยายตัวของเทอร์พริอิง (ธีระพงษ์, 2557)

สารละลายไอออนิกทั้ง 6 ชนิดเป็นสารเคมีจำลองเพื่อใช้แทนสภาพดินชนิดต่าง ๆ คือ กรด และด่าง เนื่องจากสายไฟฟ้าใต้ดินต้องฝังใต้ดิน โดยสารละลายไอออนิกที่มีค่าความเป็นกรดสูง คือ (i) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (ii) CuSO<sub>4</sub> และ (iii) FeSO<sub>4</sub> ส่วนสารละลายไอออนิกที่มีค่าใกล้เคียงความเป็นด่าง คือ (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยมีสารประกอบไอออนิกก่อนที่นำไปละลายน้ำเพื่อทำเป็นสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 4.2



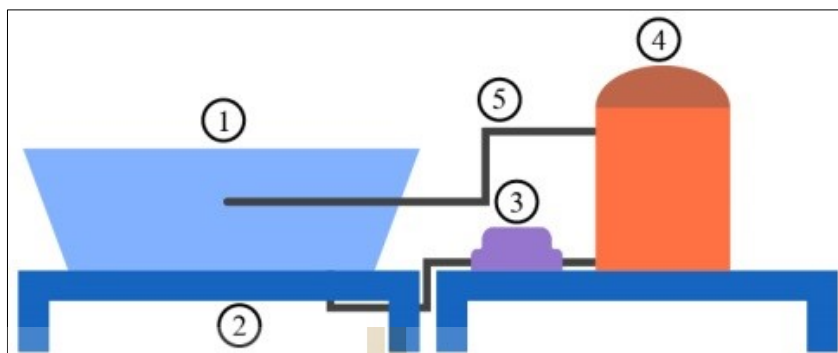
รูปที่ 4.2 สารประกอบไอออนิก ประกอบด้วย (ก) NaCl (ข)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ค)  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (ง)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (จ)  $\text{CuSO}_4$  และ (ฉ)  $\text{FeSO}_4$

#### 4.2.1 การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบ

ชุดทดสอบวอเตอร์ทริอิงเป็นเครื่องมือสำหรับใช้จำลองวอเตอร์ทริอิงให้กับสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE โดยจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ ภายใต้อุณหภูมิและสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ชุดทดสอบวอเตอร์ทริอิงประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ อุปกรณ์สร้างระบบไหลเวียนสารละลายไอออนิก ชุดควบคุมอุณหภูมิของสารละลายไอออนิก ชุดอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง และการเตรียมสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE เพื่อทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

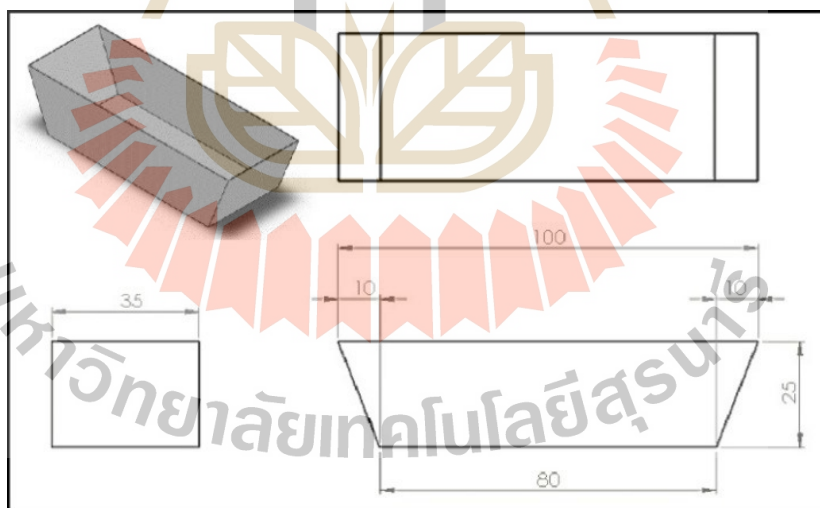
##### 4.2.1.1 อุปกรณ์สำหรับระบบไหลเวียนสารละลายไอออนิก

ระบบไหลเวียนสารละลายไอออนิกออกแบบเพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไอออนิกในอ่างเก็บสารละลาย อุปกรณ์ในระบบนี้ ประกอบด้วย (i) อ่างเก็บสารละลาย (ii) ฐานรองอ่างเก็บสารละลายเพื่อใ้วางอ่างเก็บสารละลายให้อยู่กับที่ (iii) ป้อนน้ำถูกใช้เพื่อไหลวนสารละลายระหว่างอ่างเก็บสารละลายกับถังตม้้น้ำ (iv) สายยางใช้เป็นทางเชื่อมของสารละลายให้ไหลวนระหว่างอ่างเก็บสารกับถังตม้้น้ำ และ (v) ถังตม้้น้ำเป็นเก็บตัวทำความร้อนให้สารละลาย (ฮีตเตอร์) ไลอะแกรมภาพรวมสำหรับอุปกรณ์ในระบบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



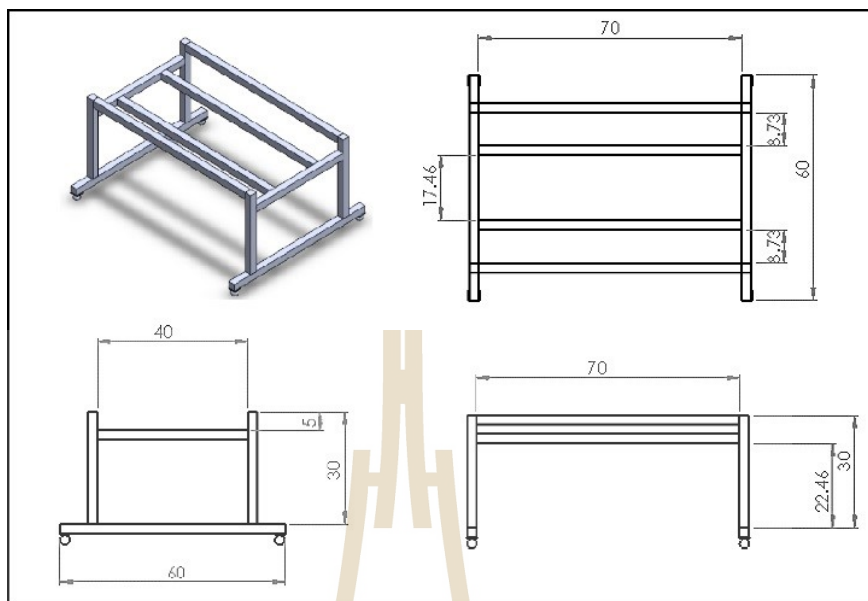
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมสำหรับอุปกรณ์สร้างระบบหมุนเวียนสารละลายไอออนิก ประกอบด้วย (1) อ่างเก็บสารละลาย (2) ฐานรองอ่างเก็บสารละลาย (3) ปั๊มน้ำ (4) ถังต้มน้ำ และ (5) สายยาง

(i) อ่างสแตนเลส มีขนาดความกว้าง 35 cm ความยาว 100 cm ความสูง 25 cm และแผ่นหนา 0.2 cm เพื่อรองรับการวางสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE จำนวน 4 สาย ดังแสดงในรูปที่ 4.4



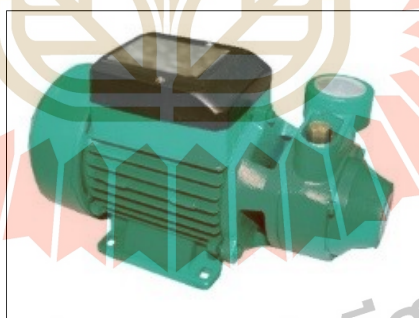
รูปที่ 4.4 แบบร่างอ่างเก็บสารละลาย (หน่วย cm)

(ii) ฐานรองรับอ่างเก็บสารละลาย มีขนาดหน้าตัด 1 นิ้ว โดยใช้โครงสร้างเป็นเหล็กกล้าและนำไปทาสีเพื่อกันสนิม ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ฐานรองรับอ่างเก็บสารละลาย (หน่วย cm)

(iii) ปั๊มน้ำ เป็นปั๊มชนิดหอยโข่ง มีขนาดกำลังขับเคลื่อนครึ่งแรงแม้ และมีขนาดหน้าตัดท่อน้ำเข้าออก 1 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ปั๊มน้ำ

(iv) สายยาง เป็นสายน้ำดี มีวัสดุหุ้มเป็นยางภายในและภายนอกเป็นอลูมิเนียมเพื่อป้องกันแรงดึงและป้องกันอาการบวมเมื่อสัมผัสกับความร้อนสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สายยาง

(v) ถังต้มน้ำ เป็นถึงขนาดใหญ่ มีส่วนผสมเป็นเหล็กสแตนเลส และมีฝาปิดเพื่อป้องกันการระเหยจากสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.8

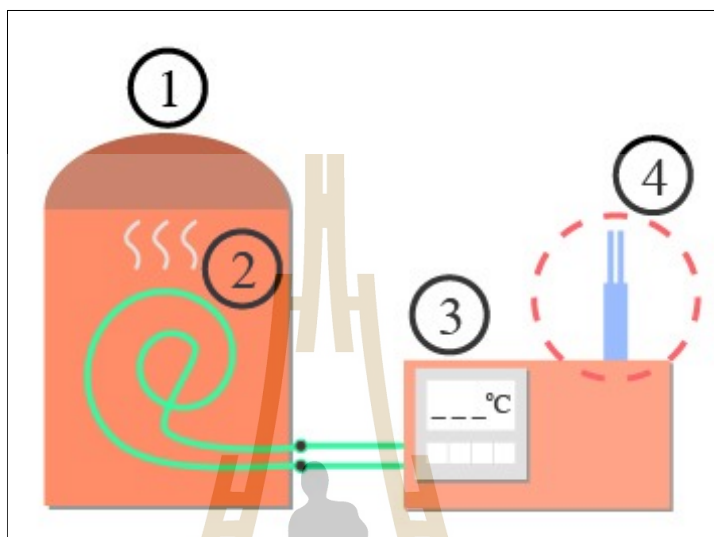


รูปที่ 4.8 ถังต้มน้ำ

#### 4.2.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิสารละลายไอออนิก

ชุดควบคุมอุณหภูมิมิมีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายไอออนิกให้ได้ตามที่ต้องการ โดยการศึกษาและวิจัยวอเตอร์ทรีอิงในวิทยานิพนธ์นี้มีการจำลองความร้อนที่ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ซึ่งชุดควบคุมอุณหภูมิสารละลายไอออนิกประกอบด้วย

ถังต้มน้ำ แท่งฮีตเตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูงพร้อมเทอร์โมคัปเปิล ไซอะแกรม โดยรวมสำหรับชุดควบคุมอุณหภูมิสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ชุดควบคุมความร้อนของสารละลายไอออนิก ประกอบด้วย (1) หม้อต้มน้ำ (2) ฮีตเตอร์ (3) ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูง และ (4) เทอร์โมคัปเปิล

ถังต้มน้ำได้กล่าวมาแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.8 ฮีตเตอร์มีขนาด 1500 W 230 V ใช้เป็นตัวทำความร้อนให้กับสารละลายไอออนิก แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ฮีตเตอร์

ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูงรุ่น TTM-i4N-R-AB ใช้ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิ และใช้รูปแบบควบคุมเป็น on-off ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าได้แต่คู่มือของตามรุ่นที่ใช้ ดังแสดงรูปที่ 4.11



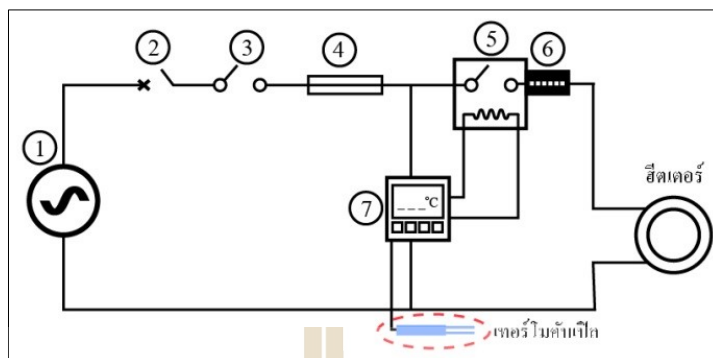
รูปที่ 4.11 ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูงรุ่น TTM-i4N-R-AB

เทอร์โมคัปเปิล เป็นวัสดุสแตนเลส ชนิด K-Type มีช่วงวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 0-1250°C ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ส่วนตำแหน่งติดตั้งเพื่อวัดค่าอุณหภูมิอยู่ที่อ่างเก็บสารละลาย



รูปที่ 4.12 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K-type แบบหัวสแตนเลส

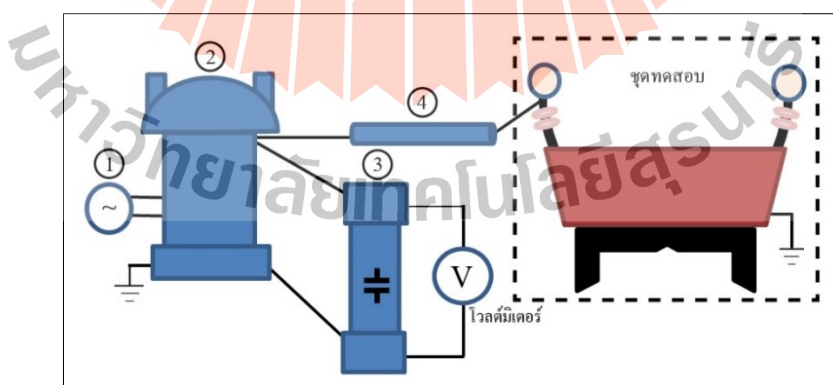
ภายในกล่องชุดควบคุมอุณหภูมิมีชุดวงจรควบคุมประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟ 220 V 50 Hz เบรกเกอร์ สวิตช์ ฟิวส์ แมกเนติกคอนแทกเตอร์ โอเวอร์ฮีต และ ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมวงจรสำหรับชุดควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วย (1) แหล่งจ่ายไฟ (2) เบรกเกอร์ (3) สวิตช์ (4) ฟิวส์ (5) แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (6) โอเวอร์ฮีต และ (7) ตัวควบคุมอุณหภูมิสมรรถนะสูง

#### 4.2.1.3 ชุดอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

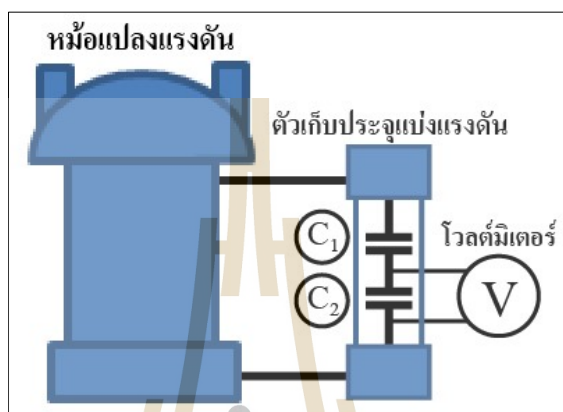
อุปกรณ์จ่ายแรงดันทำหน้าที่สร้างไฟฟ้าแรงสูงซึ่งเป็นแรงดันระดับปานกลางเพื่อใช้ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้า 220 V 50 Hz หม้อแปลงแรงดันทดสอบขนาด 100 kV 50 Hz โดยใช้หม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้เพื่อปรับแรงดันให้ได้ตามต้องการคือ 24 kV 50 Hz ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันใช้แปลงแรงดันจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำเพื่อให้โวลต์มิเตอร์สามารถวัดค่าแรงดันได้ และด้านทานหน่วงกระแสใช้ลดการเกิดกระแสที่เกินในวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (สำรวย, 2510)



รูปที่ 4.14 ไดอะแกรมการต่อวงจรชุดอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ประกอบด้วย (1) แหล่งจ่ายไฟ (2) หม้อแปลงแรงดัน (3) ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน และ (4) ด้านทานหน่วงกระแส



การวัดค่าแรงดัน 24 kV 50 Hz ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้นวิธีการแบ่งแรงดันของตัวเก็บประจุจึงนำมาช่วยแปลงแรงดันจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำเพื่อให้สามารถวัดค่าด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีพิสัยแรงดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (สำรวย, 2510)



รูปที่ 4.15 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 4.15 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุประกอบด้วยตัวเก็บประจุภาคแรงสูง  $C_1$  และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ  $C_2$  การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงสูงเป็นแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (4.1)$$

โดย  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูงมีขนาด 100 pF

$C_2$  คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ มีขนาด 110 nF

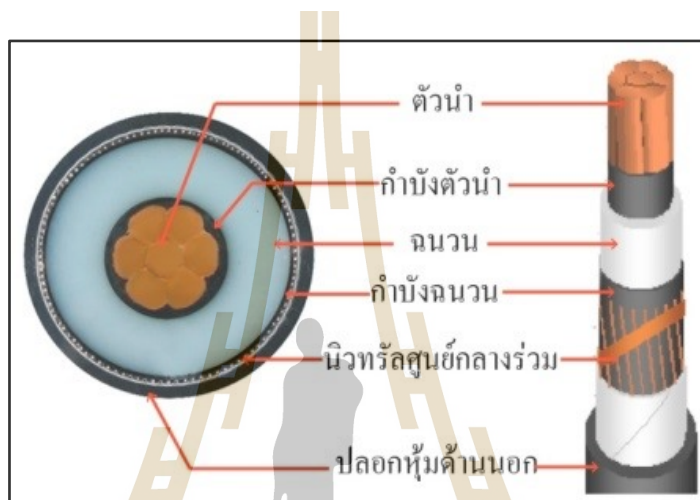
$U$  คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV) ที่ตกคร่อมหม้อแปลงแรงดัน

$U_2$  คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V) ที่วัดจากโวลต์มิเตอร์หรือที่ตกคร่อม  $C_2$

ดังนั้น ถ้าต้องการจ่ายแรงดันให้ชุดทดสอบ คือ  $U = 24$  kV ฉะนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้ว่าต้องปรับหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้จนกว่าแรงดันที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์  $U_2$  จะมีค่าเท่ากับ 21.8 V

#### 4.2.1.4 สายเคเบิลทดสอบ

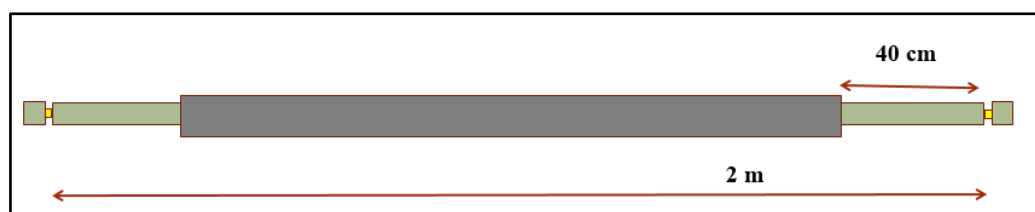
สายเคเบิลทดสอบเป็นสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าระดับปานกลาง 22 kV ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 mm<sup>2</sup> ความหนาของฉนวนเท่ากับ 5.5 mm ตัวนำทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.33 mm ตรงตาม มอก. 2340-2550 ส่วนประกอบหลักของสายเคเบิลชนิดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



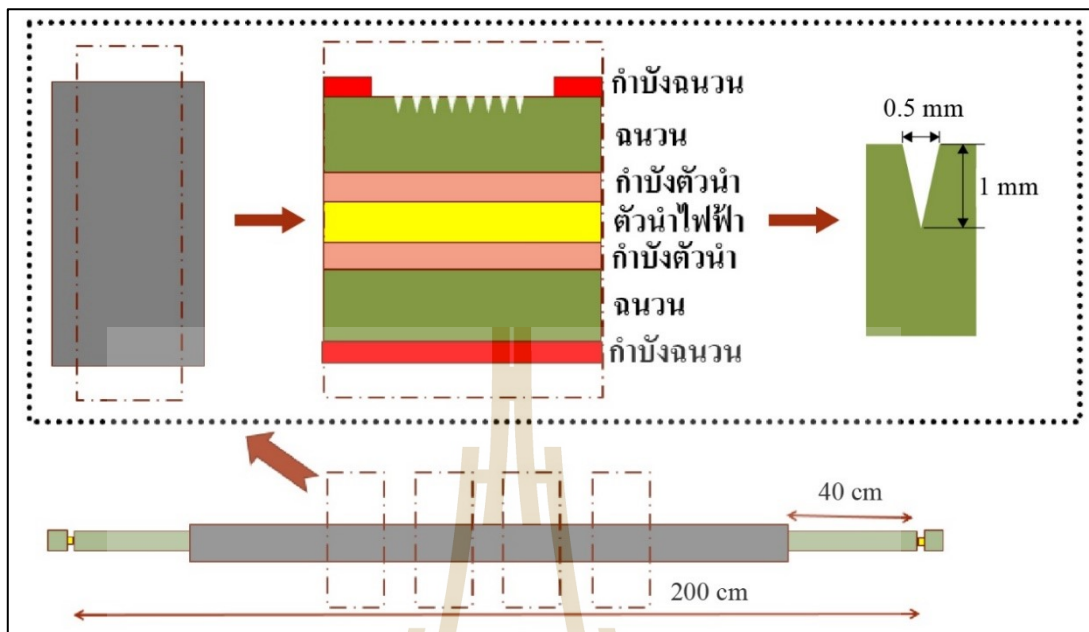
รูปที่ 4.16 สายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ 12/20 (24) kV บางกอกเคเบิล

#### 4.2.2 การเตรียมสายเคเบิลทดสอบ

สายเคเบิลทดสอบนำไปตัดให้มีความยาว 2 m และปลอกเปลือกสายเคเบิลออก โดยให้เหลือแกนกลางตัวนำ (กำบังฉนวนถึงตัวนำทองแดง) ปลายทั้งสองข้างของสายเคเบิลให้ปลอกกำบังฉนวนออก 40 cm และใส่ฉี๊ดเล็กโทรดทั้ง 2 ข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากนั้นแบ่งสายเคเบิลออกเป็น 4 ส่วน ส่วนละ 6 cm ที่อยู่ในระนาบใกล้เคียงกันที่สุด ในแต่ละส่วนจะปลอกกำบังฉนวนออกเพื่อเจาะรูประมาณ 10 รู โดยใช้เข็มแทงเข้าไปประมาณ 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ขนาดสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ



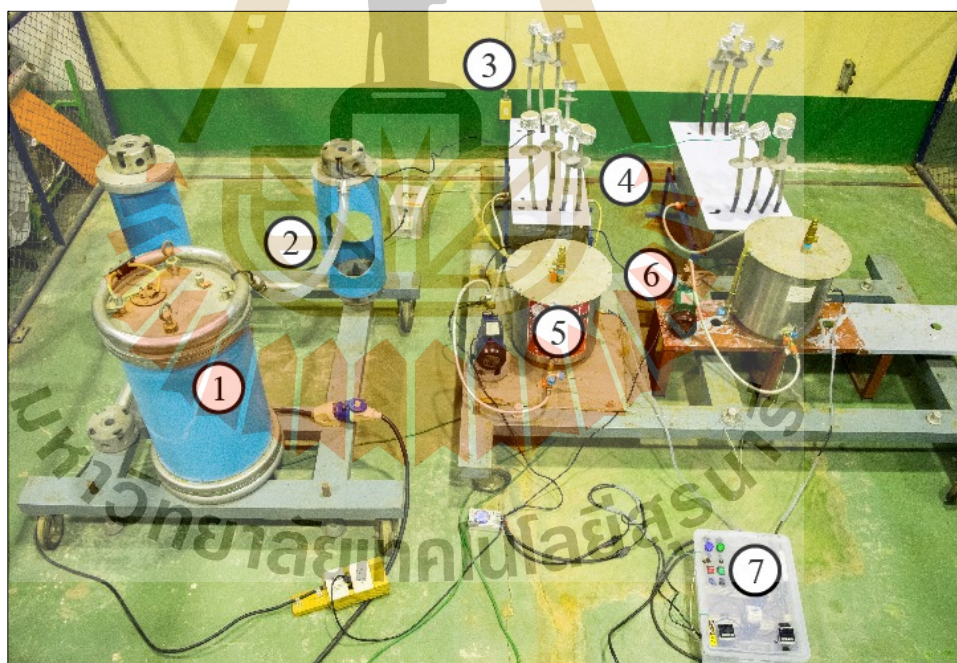
รูปที่ 4.18 โคอะแกนขนาดรูเจาะบนฉนวนสายเคเบิล

#### 4.3 การดำเนินการทดสอบ

การทดสอบการขยายตัวของวอเตอร์ทรีริงในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ทดสอบโดยใช้สภาวะแวดล้อมจำลอง คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิกต่าง ๆ คือ (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iv) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (v) CuSO<sub>4</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub> สารละลายแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้น 0.1 mol/l และเวลาที่ใช้ทดสอบ คือ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และมีชุดทดสอบจริงที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของวอเตอร์ทรีริงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.1 วิธีการทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่ง

| การทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่ง<br>ในสายเคเบิลแรงสูง 22 kV    | เงื่อนไขในการทดสอบ                                       |                                 |                                |                   |                                   |                   |
|--|--|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
|  | สายเคเบิล  | เส้นที่ 1                       | เส้นที่ 2                      | เส้นที่ 3         | เส้นที่ 4                         | เส้นที่ 5         |
| ชนิดสารละลายไอออนิก                                  | NaCl   | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | CuSO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| สารละลายไอออนิก                                      | ความเข้มข้น 0.1 mol/l และถูกเปลี่ยนใหม่ทุก ๆ 500 ชั่วโมง |                                 |                                |                   |                                   |                   |
| อุณหภูมิ   | อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 50°C และอุณหภูมิ 70°C              |                                 |                                |                   |                                   |                   |
| แรงดันไฟฟ้า  | 24 kV 50 Hz ตลอดการทดสอบ                                 |                                 |                                |                   |                                   |                   |
| การควบคุมอุณหภูมิและ<br>การไหลของสารละลาย<br>ไอออนิก | ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง                                     |                                 |                                |                   |                                   |                   |
| ระยะเวลาในการทดสอบ                                   | 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง  |                                 |                                |                   |                                   |                   |



รูปที่ 4.19 ชุดทดสอบการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้า 22 kV ประกอบด้วย (1) หม้อแปลงแรงดันสูง (2) ตัวต้านทานหน่วงกระแส (3) สายเคเบิลฉนวน XLPE (4) อ่างวางสายเคเบิล (5) หม้อต้มน้ำ (6) ปั๊มน้ำ และ (7) ชุดควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.19 ถ้ามองเป็นกลุ่ม ๆ แล้วจะได้ว่าอุปกรณ์หมายเลข 1 และ 2 เป็นชุดจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง อุปกรณ์หมายเลข 3 4 และ 6 เป็นชุดทดสอบ และสุดท้ายคืออุปกรณ์หมายเลข 5 และ 7 เป็นชุดควบคุมอุณหภูมิ

#### 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

หลังการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินจนจบ XLPE ชั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อดูลักษณะการขยายตัวของวอลเทอร์ทรีอิงในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิก (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iv) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (v) CuSO<sub>4</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub> ในช่วงเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวอลเทอร์ทรีอิงที่เกิดบนฉนวน XLPE แต่ก่อนที่จะนำสายเคเบิลไปวิเคราะห์ ต้องนำไปตัดบริเวณที่ใช้วิเคราะห์

##### 4.4.1 การเตรียมชิ้นงานฉนวน XLPE

หลังจากทดสอบสายเคเบิลแล้ว นำไปตัดเป็น 4 ส่วน จากนั้นนำไปเชื่อมด้วยเครื่องมือไมโครโทม (Microtome) ให้ได้ขนาดประมาณ 400 μm-600 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ชิ้นส่วนสายเคเบิลนำไปตัดให้มีความยาว 6 cm แต่ต้องเผื่อออกไปประมาณ 1 cm เพื่อป้องกันการตัดโดนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยใช้เครื่องมือตัดโดยเฉพาะทาง คือ ไมโครโทม



รูปที่ 4.20 ชิ้นส่วนสายเคเบิล

เครื่องมือไมโครโทมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตัดวัสดุให้เป็นแผ่นสไลด์บาง ๆ โดยใบมีดสำหรับเครื่องมือนี้มีความคมสูง และสามารถถอดเปลี่ยนได้เมื่อความคมใบมีดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.21



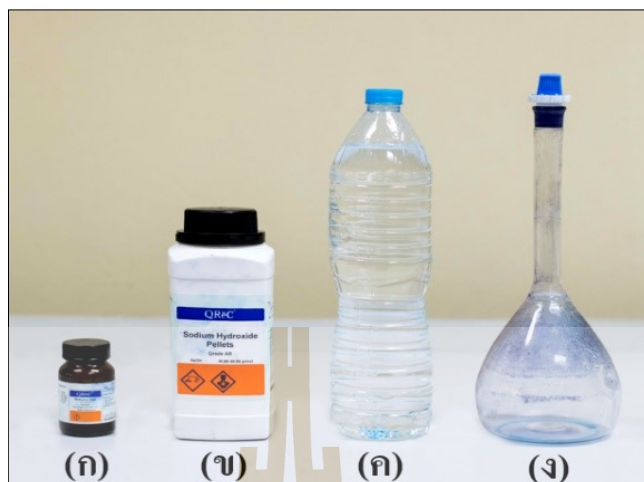
รูปที่ 4.21 เครื่องไมโครโทม (อาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)



รูปที่ 4.22 ฉนวน XLPE ที่ถูกฉีก (แผ่นฉนวน XLPE)

ชิ้นส่วนของฉนวน XLPE ที่ถูกฉีกด้วยเครื่องไมโครโทมไม่สามารถนำไปสังเกตวอเทอร์หรือจึงได้อย่างชัดเจน ดังนั้นฉนวน XLPE ต้องนำไปข้อมสีด้วยเมทิลีนบลูเพื่อให้เห็นได้ชัดเจน อุปกรณ์ที่ใช้ข้อมสี ดังแสดงในรูปที่ 4.23

อัตราส่วนการข้อมสี คือ เมทิลีนบลู 4 g และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 6 g ผสมในน้ำกลั่น 1000 ml ต่อแผ่นฉนวน XLPE 10 g หรือสามารถเขียนเป็นอัตราส่วนอย่างต่ำ คือ เมทิลีนบลู 1 g : NaOH 1.5 g : น้ำกลั่น 250 ml : แผ่นฉนวน XLPE 2.5 g



รูปที่ 4.23 อุปกรณ์สำหรับเชื่อมสีฉนวน ประกอบด้วย (ก) ผงเมทิลีนบลู (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ค) น้ำกลั่น และ (ง) ขวดผสมสาร

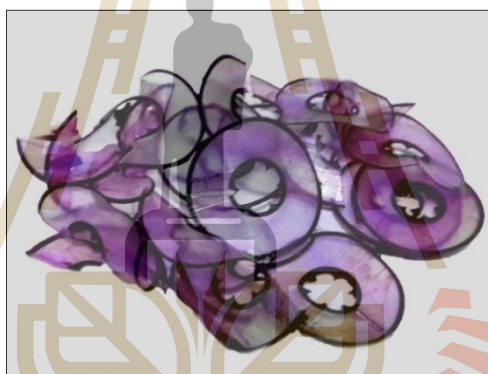
หลังจากเตรียมสีเชื่อมตามอัตราส่วนที่ต้องการ ให้นำสีเชื่อมใส่ในบีกเกอร์และต้มที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นนำแผ่นฉนวน XLPE ที่เตรียมไว้ใส่ลงในบีกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และแช่ค้างไว้ประมาณ 5 ถึง 6 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตากแห้งประมาณ 2 ชั่วโมง เมื่อตากเสร็จแล้วให้เก็บใส่ถุงซิปล็อคความชื้น อุปกรณ์การเชื่อมสี ประกอบไปด้วย แก้วตวง เมทิลีนบลู และเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.24 แผ่นฉนวน XLPE ที่เชื่อมสีแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.24 อุปกรณ์การเชื่อมสี ประกอบด้วย (ก) แก้วตวง (ข) เมทิลีนบลู และ (ค) เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (อาคารเครื่องมือ F5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)



รูปที่ 4.25 แผ่นฉนวน XLPE ที่แช่ในสถานะบรรจุเมทิลีนบลู



รูปที่ 4.26 แผ่นฉนวน XLPE ที่ถูกข้อมด้วยเมทิลีนบลู

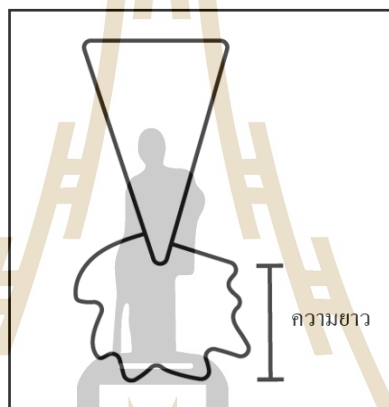
#### 4.4.2 การวัดขนาดวอเตอร์รูอิง

เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลผลภาพถ่ายที่ใช้วัดขนาดของวอเตอร์อิง คือ กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ Olympus รุ่น BX51M ที่อาคารเครื่องมือ F6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ตำแหน่งที่วัดขนาดของวอเตอร์รูอิง คือ จากปลายรูเจาะบนฉนวนถึงปลายวอเตอร์รูอิงที่ยาวที่สุด หน่วยที่ใช้วัดเป็นหน่วย  $\mu\text{m}$  การวัดขนาดของวอเตอร์รูอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.28





รูปที่ 4.27 เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลผลภาพถ่าย Olympus รุ่น BX51M



รูปที่ 4.28 การวัดขนาดของวอเทอร์ทรีอิงจากปลายรูเจาะถึงปลายวอเทอร์ทรีอิง

#### 4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

การเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ระหว่างฉนวนที่เกิดวอเทอร์ทรีอิงและฉนวนที่ไม่เกิดวอเทอร์ทรีอิง (สายเคเบิลใหม่) ใช้เครื่องมือที่ใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ตรวจหาชนิดและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้แสงอินฟราเรดทั้งในช่วงอินฟราเรดระดับกลาง ครอบคลุมเลขคลื่น (wave number) ในช่วง  $8,000-340\text{ cm}^{-1}$  หลักการทำงานและวิธีใช้งานของเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี มีดังนี้

##### 4.5.1 เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

การใช้เทคนิคแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเป็นเครื่องมือที่ให้ข้อมูลรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพเพื่อหาหามูฟกัซันของพันธะเคมีในโมเลกุลของสารประกอบ

อินทรีย์ย่านอินฟราเรดในสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์มากที่สุดต่อนักเคมีอินทรีย์ คือ ย่านความถี่ระหว่าง  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{cm}^{-1}$  เป็นหน่วยของจำนวนคลื่นต่อวินาทีหรือเรียกว่าเลขคลื่น) และความยาวคลื่นระหว่าง  $2.5-15 \mu\text{m}$  สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและเลขคลื่น คือ

$$\text{Wavelength}(\mu\text{m}) = \frac{10000}{\text{Wavenumber}(\text{cm}^{-1})} \quad (5.1)$$

กราฟอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นกราฟระหว่างความถี่ (เลขคลื่น  $\text{cm}^{-1}$ ) และ ค่าความส่งผ่านของแสง ( $T$  : Transmittance) ส่วนร้อยละความส่งผ่านของแสง ( $\%T$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง (Transmitted Radiation) และความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่างคือ

$$\%T = \frac{I}{I_0} \quad (5.2)$$

โดยที่  $I$  = ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลาง

$I_0$  = ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวกลาง

$100T$  = ร้อยละความส่งผ่านของแสง

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้ค่าการดูดกลืนแสงของสาร ( $A$  : Absorbance) แทนค่าความส่งผ่านของแสงเพื่ออำนวยความสะดวกและการเปรียบเทียบ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงของสารกับความส่งผ่านของแสง คือ

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T \quad (5.3)$$

เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโตรสโกปีที่ศึกษาการ

ดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ต่างกัน การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุด้วยคลื่นแสงอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคลื่น คือ การส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับสูงมีช่วงคลื่นที่  $14000-4000\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงของฮาร์โมนิก (Harmonic) และ โอเวอร์โทน (Overtone) เช่น การส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับกลางมีช่วงคลื่นที่  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาโครงสร้างของวัสดุต่าง ๆ และการส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับต่ำมีช่วงคลื่นที่  $400-10\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาขอบเขตและพื้นที่ของคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงคลื่น  $1500-400\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วงย่านรอยนิ้วมือ (Fingerprint Region) ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว แต่เนื่องจากจะมีพิกัดเกินค่อนข้างเยอะ ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมในช่วงนี้ค่อนข้างยาก วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพงและรวมไปถึงชนิดของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์วัสดุได้เกือบทุกชนิด

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างด้วยพลังงานช่วงแสงอินฟราเรดระดับกลาง วิธีการใช้เครื่องมือฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีที่ดีที่สุดสำหรับส่องตัวอย่างชิ้นงาน คือ วิธีส่องผ่านตัวอย่าง (Transmission mode) แต่เนื่องจากพิกัดการใช้งานที่ดีของเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีนี้ได้กำหนดให้ชิ้นงานสำหรับวิธีการส่องผ่านต้องมีขนาดประมาณ  $5-15\text{ um}$  แต่เนื่องจากชิ้นงานฉนวน XLPE ที่เลือนมีความบางขนาด  $400-600\text{ um}$  จึงเลือกมาใช้วิธีการแบบส่องสะท้อน (ATR : Attenuated Total Reflection mode) เพื่อให้ผลดีที่สุดตามคู่มือของอุปกรณ์ Hyperion Tensor 27 โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ของบริษัท BRUKER Hyperion รุ่น TENSOR 27 แสดงดังรูปที่ 4.29



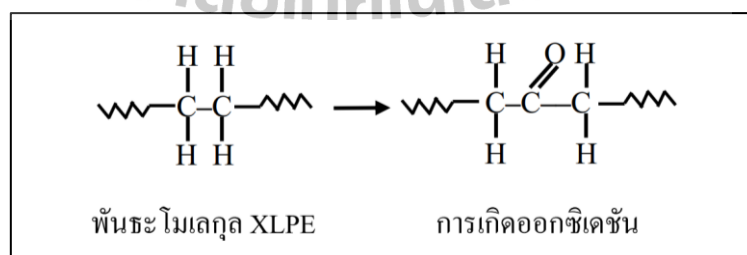
รูปที่ 4.29 เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี  
(ที่มา: <https://www.bruker.com/products/> เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2561)

การวิเคราะห์เริ่มต้นจากการเปิดเครื่องและเปิดใช้งานซอฟต์แวร์ จากนั้นตั้งค่าต่าง ๆ เช่น การตั้งค่าการแสดงผลให้เป็นแบบ Absorbance การตั้งค่าช่วงของสเปกตรัมอินฟราเรดที่ต้องการวัดโดยใช้ช่วงอินฟราเรดขนาดกลางช่วงคลื่น  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  การตั้งค่าความละเอียดให้ปรับเป็น  $4\text{ cm}^{-1}$  การตั้งค่า scan time หรือจำนวนครั้งที่ต้องการวัด 32 ครั้งต่อจุด จากนั้นเมื่อกำหนดค่าเสร็จสิ้นโปรแกรมจะเริ่มการวิเคราะห์ ช่วงเลขคลื่นที่บ่งบอกถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในช่วงคลื่น  $1600-1650\text{ cm}^{-1}$  และ  $1750-1780\text{ cm}^{-1}$  โดยช่วงคลื่นที่  $1600-1650\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏพันธะ C=C แสดงว่าเกิดการเผาไหม้ของเนื้อฉนวน XLPE และช่วงคลื่น  $1750-1780\text{ cm}^{-1}$  จะแสดงการเกิดออกซิเดชันในเนื้อฉนวนปรากฏพันธะ C=O

ตารางที่ 4.2 ช่วงเลขคลื่นอินฟราเรดของแผ่นฉนวน XLPE ที่ใช้วิเคราะห์

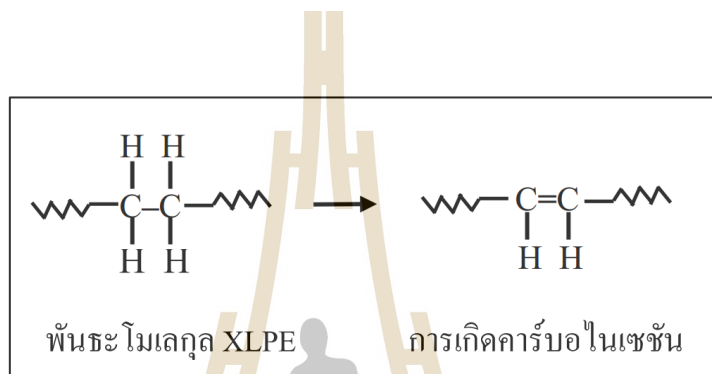
| หมู่ฟังก์ชัน | ช่วงเลขคลื่น               | รายละเอียด   |
|--------------|----------------------------|--|
| C=C          | $1600-1650\text{ cm}^{-1}$ | แสดงถึงการเกิดคาร์บอนในเซชันหรือการเผาไหม้ของฉนวน XLPE |
| C=O          | $1750-1780\text{ cm}^{-1}$ | แสดงถึงการเกิดออกซิเดชันในฉนวน XLPE                    |

การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้สารรับอะตอมออกซิเจนมารวมตัวเข้าด้วยกันหรือทำให้สารสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนไป และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้อะตอมของธาตุสูญเสียอิเล็กตรอน การเกิดออกซิเดชันบนฉนวน XLPE เกิดจากแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิความร้อนเป็นระยะเวลานานแก่ฉนวน XLPE ทำให้พันธะโมเลกุลของฉนวน XLPE เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีความเป็นฉนวนลดลง (ธีระพงษ์, 2557)



รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและออกซิเจน

การเกิดคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization Reaction) คือ กระบวนการเปลี่ยนสภาพจากวัสดุต่าง ๆ ให้เป็นธาตุคาร์บอน การเกิดคาร์บอนไนเซชันบนฉนวน XLPE มีสาเหตุมาจากการเสื่อมอายุที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยแรงดันไฟฟ้าและความร้อนเป็นระยะเวลาอันยาวนานเช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชันซึ่งกระบวนการนี้ทำให้พันธะเปลี่ยนสภาพเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีความเป็นฉนวนลดลงเช่นเดียวกัน (ธีระพงษ์, 2557)



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและคาร์บอน

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ถ้าหากฉนวน XLPE ที่ใช้ตรวจสอบนั้นมีพันธะ C=C และ C=O เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดการคาร์บอนไนเซชันและการออกซิเดชันขึ้นในเนื้อฉนวน XLPE การเพิ่มขึ้นของพันธะทั้งสองนี้แสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนสายเคเบิลหากพันธะทั้งสองปรากฏมาก ฉนวนสายเคเบิลก็มีการเสื่อมอายุมากด้วยเช่นกัน งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ระหว่างฉนวน XLPE ที่ทดสอบและฉนวน XLPE ใหม่

ค่าความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เป็นตารางที่แสดงถึงช่วงเลขคลื่นอินฟราเรดระดับกลางของหมู่ฟังก์ชันเคมี โดยพันธะ C=C จากตารางเป็นเบนซีนที่มีความเข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ (ช่วงเลขคลื่น) ดังนั้นการพิจารณาจะดูจากค่ายอดที่ใกล้เคียงในช่วงนั้น ๆ คือ  $1600 \text{ cm}^{-1}$  ฉะนั้นได้ช่วงเลขคลื่นของพันธะ C=C สำหรับวิเคราะห์ คือ  $1600\text{-}1650 \text{ cm}^{-1}$  ส่วนพันธะ C=O เป็นแอนไฮไดรด์ มี 2 แถบในช่วงเลขคลื่น  $1820\text{-}1760 \text{ cm}^{-1}$  แต่เมื่อพิจารณาช่วงค่ายอดของกราฟอินฟราเรดสเปกตรัมในงานวิจัยนี้ได้ช่วงเลขคลื่นของพันธะ C=O อยู่ที่  $1750\text{-}1780 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 4.3 ค่าความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันเคมี

| หมู่ฟังก์ชัน             | ช่วงเลขคลื่น              | รายละเอียด   |
|--------------------------|---------------------------|--|
| O – H stretching         | 3600 – 3400               | 3650 – 3590 $\text{cm}^{-1}$ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ<br>3400 – 3200 $\text{cm}^{-1}$ (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน<br>3400 – 2400 $\text{cm}^{-1}$ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก |
| = C – H stretching       | 3100 – 3000 (w, sh)       | อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)   |
| C – H stretching         | 3000 – 2850               | หมู่ $\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ และ CH ของอัลเคน และ แอลดีไฮด์  |
| C = N stretching         | 2250 – 2225               | ไนทริล (m)   |
| C = O stretching         | 1820 – 1760 (s)           | แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ  |
| N = H bending            | 1650 – 1590 (s-m)         | 1 <sup>o</sup> เอมีน   |
| N = H bending            | 1650 – 1550 (w)           | 2 <sup>o</sup> เอมีน   |
| N = H bending            | 1620 – 1590 (s)           | 1 <sup>o</sup> เอมีด   |
| N = H bending            | 1550 – 1510 (s)           | 2 <sup>o</sup> เอมีด   |
| C = C stretching         | 1600, 1580, 1500 และ 1450 | เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ   |
| $\text{NO}_2$ bending    | 1520 (s) และ 1350 (s)     | สารประกอบไนโตร   |
| C – H bending            | 1465 – 1450               | หมู่ $\text{CH}_2$   |
| C – H bending            | 1450 – 1375               | หมู่ $\text{CH}_3$   |
| C – F stretching         | 1400 – 1000               | สารประกอบฟลูออไรด์   |
| $\text{CH}_2 - \text{X}$ | 1300 – 1150               | สารประกอบเฮโลเจน   |
| C – O stretching         | 1300 – 1000               | อีเธอร์และเอสเทอร์   |
| C – O stretching         | 1220                      | ฟินอล  |
| C – O stretching         | 1150                      | 3 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์   |
| C – O stretching         | 1100                      | 2 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์   |
| C – O stretching         | 1050                      | 1 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์   |
| C – H (OPP bending)      | 990 และ 910               | อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, $\text{RCH} = \text{CH}_2$ )  |

| หมู่ฟังก์ชัน           | ช่วงเลขคลื่น | รายละเอียด                                 |
|------------------------|--------------|--|
| C – H<br>(OPP bending) | 970          | อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)          |
| C – H<br>(OPP bending) | 890          | อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, $R_2C = CH_2$ ) |
| C – H<br>(OPP bending) | 815          | อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, $R_2C = CHR$ )  |
| C – H<br>(OPP bending) | 700 - 690    | อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)            |
| C – H<br>(OPP bending) | 750 และ 690  | เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)                 |
| C – H<br>(OPP bending) | 750          | เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)         |
| C – H<br>(OPP bending) | 780 และ 700  | เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ เมตา)         |
| C – H<br>(OPP bending) | 825 – 800    | เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ พารา)         |
| C – Cl                 | 800 - 600    | สารประกอบคลอไรด์                           |
| C – Br                 | 600 – 500    | สารประกอบโบรมൈด์                           |
| C – I                  | ~ 500        | สารประกอบไอโอดีน                           |

ที่มา : <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf> เข้าถึงเมื่อ 3 ตุลาคม 2561

คำย่อ : s = ความเข้มสูง vs = ความเข้มสูงมาก m = ความเข้มปานกลาง  
w = ความเข้มต่ำ vw = ความเข้มต่ำมาก sh = แหวมคม  
b = กว้าง vb = กว้างมาก stretching = แบบยืด  
OOP = out – of – plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

#### 4.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบและทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่งในขณะที่อยู่ภายใต้การจำลองสถานะแวดล้อมในสารละลายและอุณหภูมิต่าง ๆ รายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้อธิบายในบทนี้ ได้แก่ การออกแบบชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่ง วิธีดำเนินการทดสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมี เป็นต้น หลังจากที่ได้ทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิ่งเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงนำฉนวน XLPE ที่ทดสอบไปตรวจสอบวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมี โดยจะนำเสนอผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ใบบทถัดไป





## บทที่ 5

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล ใต้ดินฉนวน XLPE

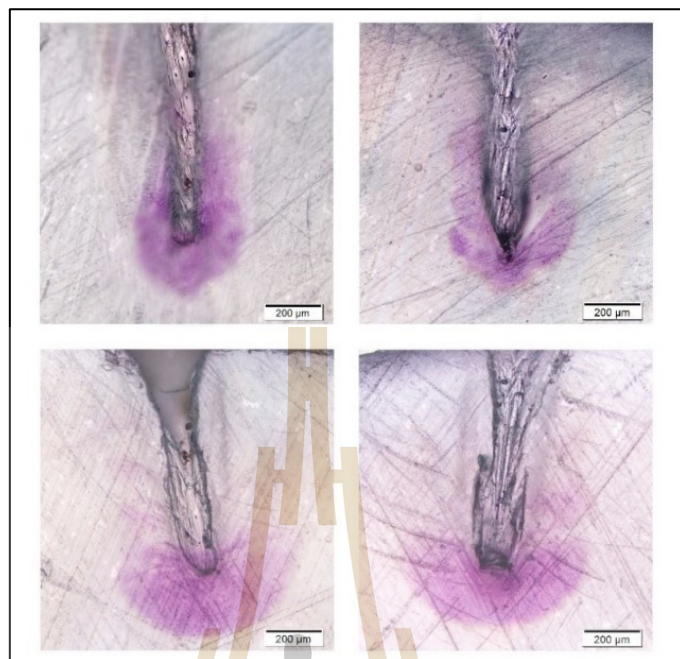
#### 5.1 กล่าวนำ

บทที่ 4 ผู้วิจัยกล่าวถึงวิธีทดสอบและการออกแบบสำหรับชุดทดสอบสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่ายแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในบทนี้ได้แสดงผลการทดสอบเพื่อคุณลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงในเนื้อฉนวน XLPE ด้วยการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวอเตอร์ทรีอิงที่มีผลมาจากสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ผ่านกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

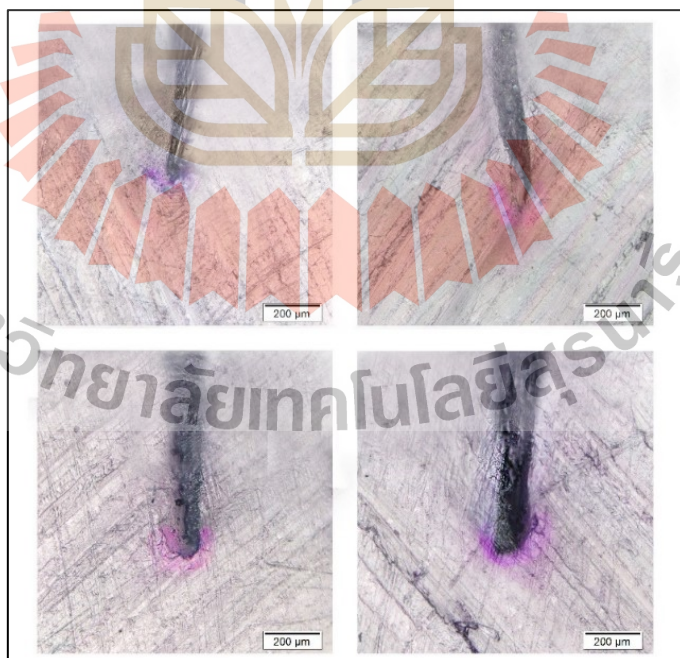
#### 5.2 ลักษณะทางกายภาพของวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE

หลังจากการทดสอบ ได้ผลการทดสอบการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสถานะแวดล้อมจำลองต่าง ๆ ประกอบด้วย อุณหภูมิต่าง ๆ คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิกต่าง ๆ คือ (i) NaCl (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iii) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iv) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (v) CuSO<sub>4</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub> ในช่วงเวลาที่ต่างกัน คือ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอเพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวอเตอร์ทรีอิง โครงสร้างทางกายภาพของวอเตอร์ทรีอิงจากการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.72 โดยสีม่วงที่มองเห็นเป็นสีข้อมของ เมทิลีนบลูและวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นบริเวณปลายของรูเจาะเป็นแนวโค้งลงไปยังตัวนำทองแดง

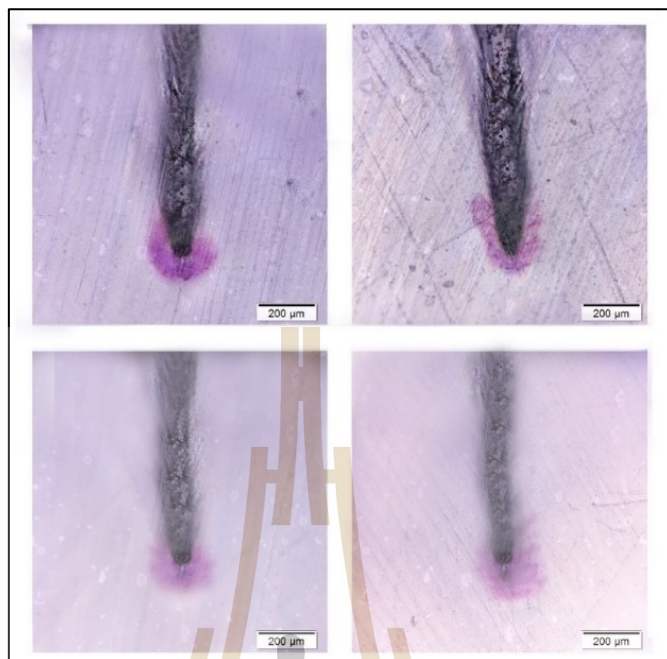
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิก NaCl และ CuSO<sub>4</sub> มีขนาดของวอเตอร์ทรีอิงใหญ่และชัดเจนกว่าในการทดสอบที่สารละลายอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.6



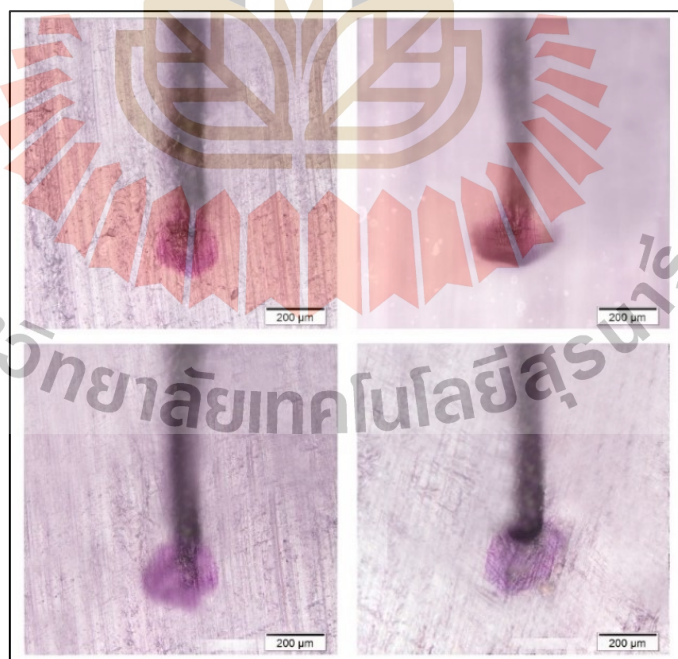
รูปที่ 5.1 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



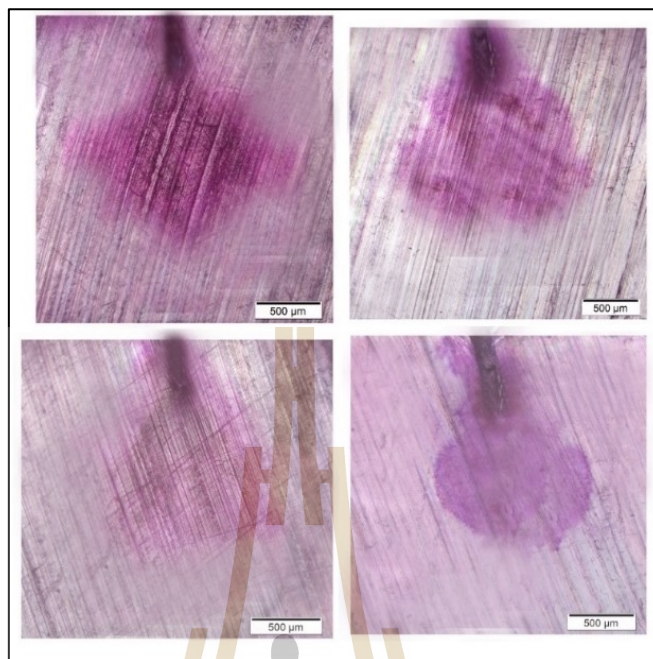
รูปที่ 5.2 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



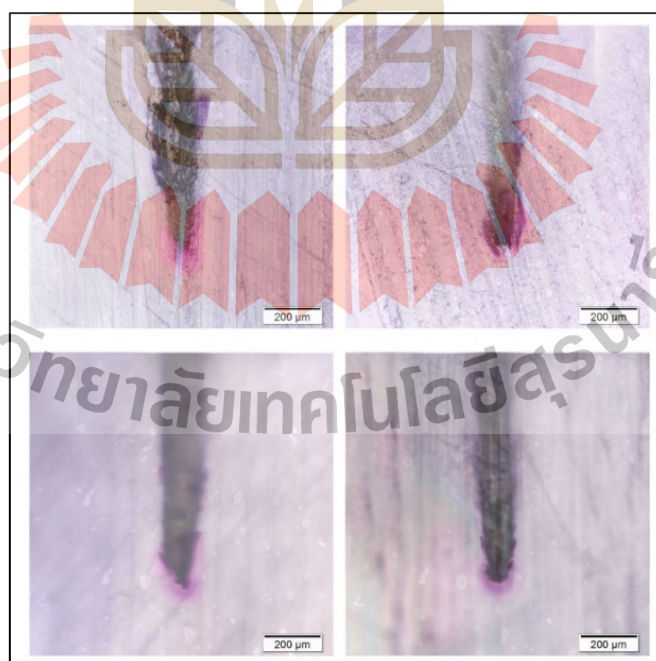
รูปที่ 5.3 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.4 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

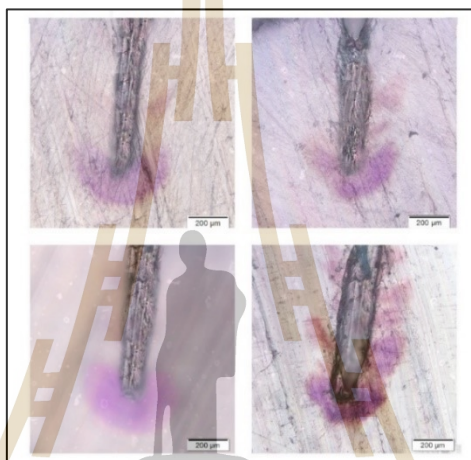


รูปที่ 5.5 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

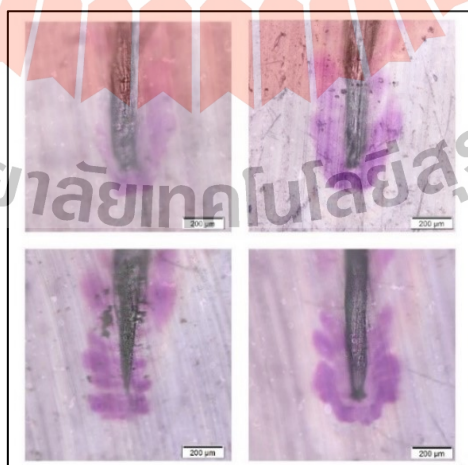


รูปที่ 5.6 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

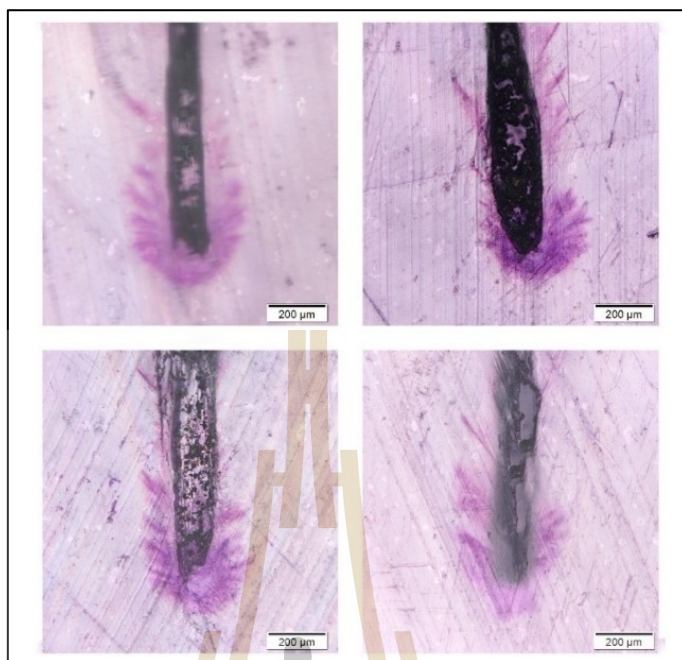
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิก NaCl และ CuSO<sub>4</sub> ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงมีความยาวและชัดเจนกว่าในการทดสอบที่สารละลายอื่น ๆ แต่ถ้าวัดโดยรวมแล้วในแต่ละสารละลายไอออนิก ความเข้มของวอเตอร์ทรีอิงมีความเข้มมากขึ้นกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่ความยาวสั้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.12



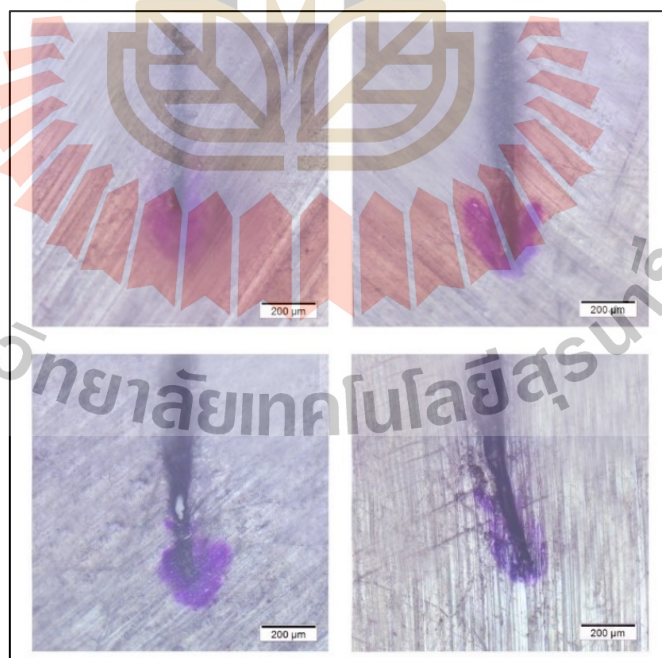
รูปที่ 5.7 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C



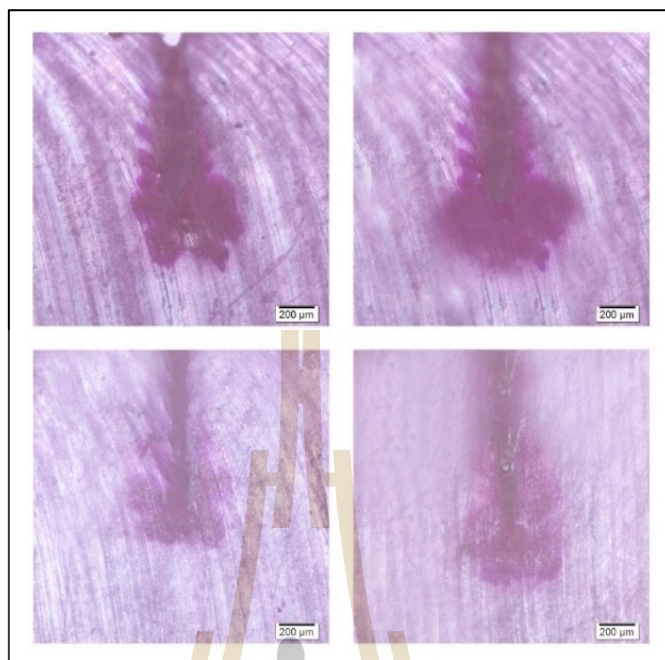
รูปที่ 5.8 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 5.9 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$



รูปที่ 5.10 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$

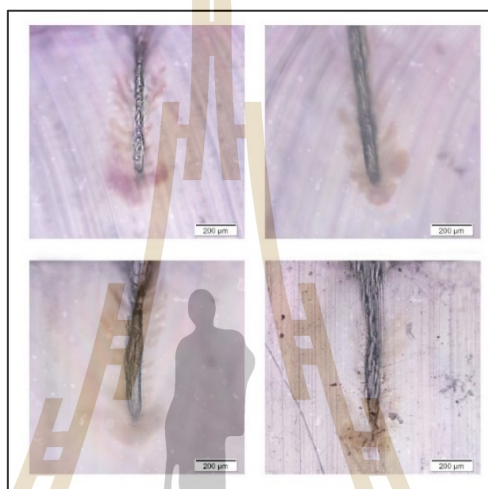


รูปที่ 5.11 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$

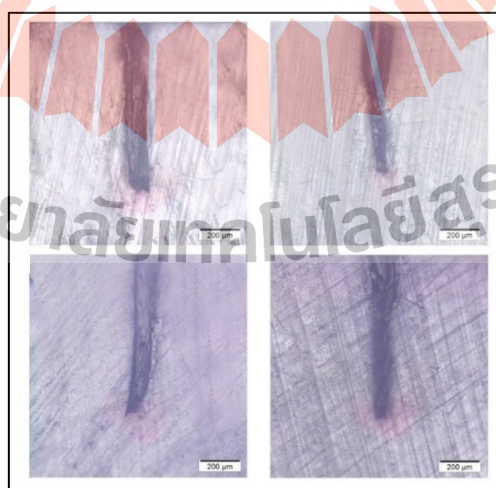


รูปที่ 5.12 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$

ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และ  $\text{CuSO}_4$  ขนาดของวอเตอร์ทรีอิงมีขนาดมีความชัดเจนกว่าในการทดสอบที่สารละลายอื่น ๆ แต่ถ้าวัดโดยรวมแล้วในแต่ละสารละลายไอออนิกความเข้มของวอเตอร์ทรีอิงมีความเข้มและขนาดความขายน้อยกว่าที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.17

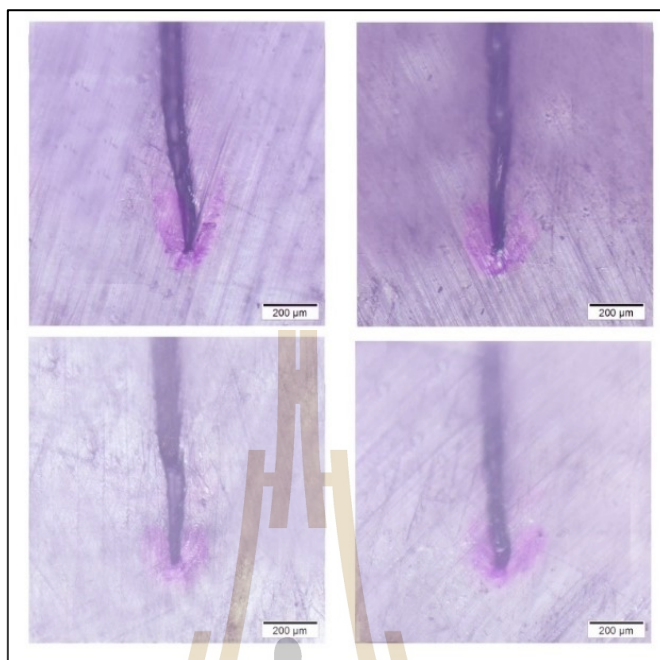


รูปที่ 5.13 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$

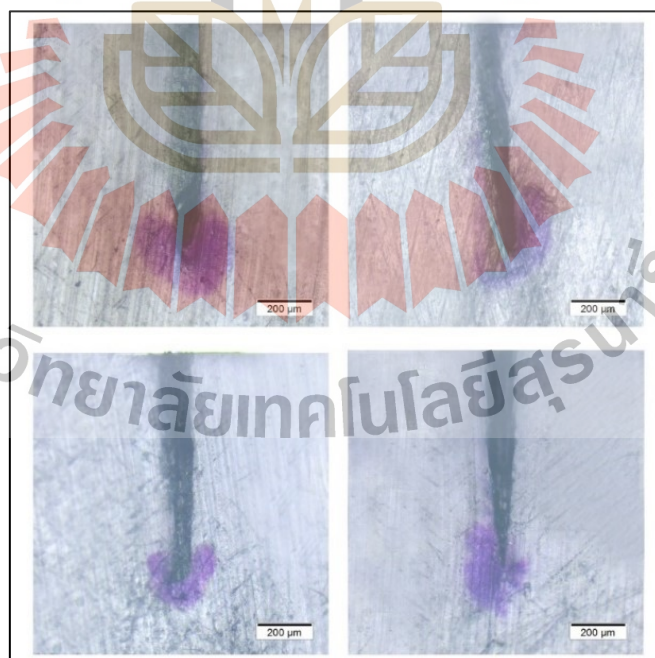


รูปที่ 5.14 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$

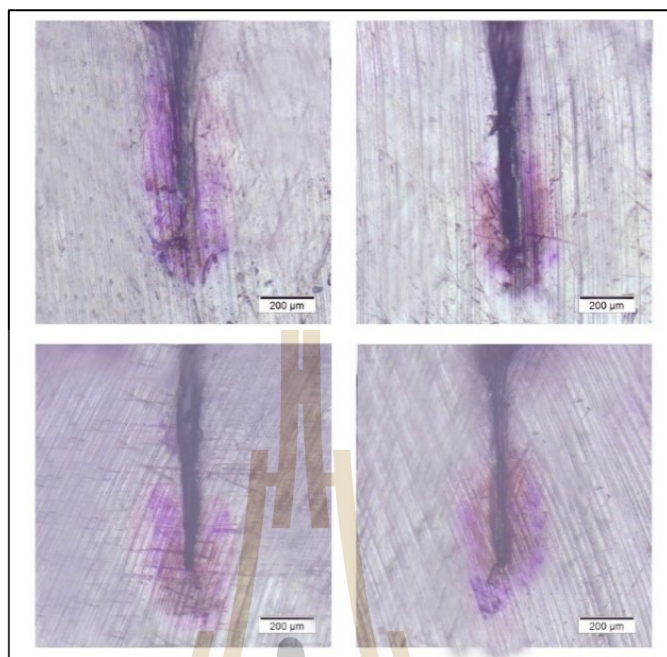




รูปที่ 5.15 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ C$



รูปที่ 5.16 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ C$

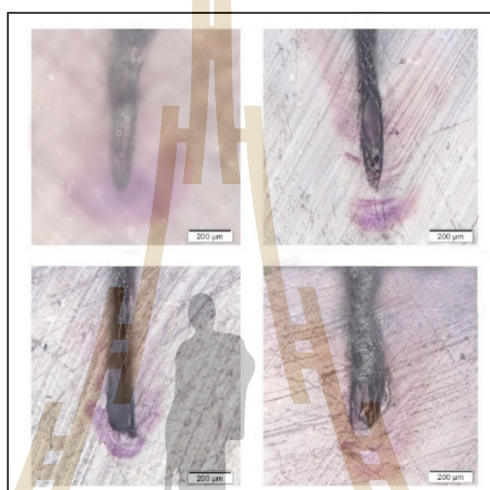


รูปที่ 5.17 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

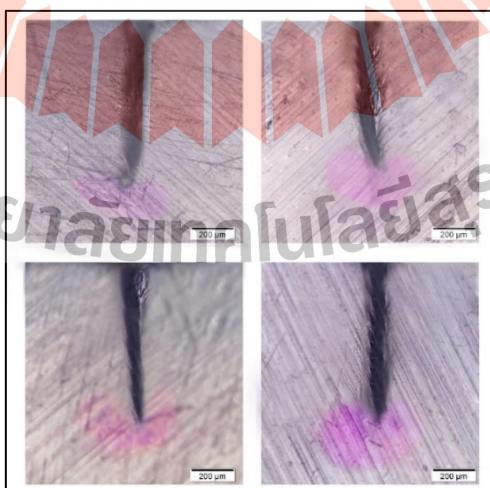


รูปที่ 5.18 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

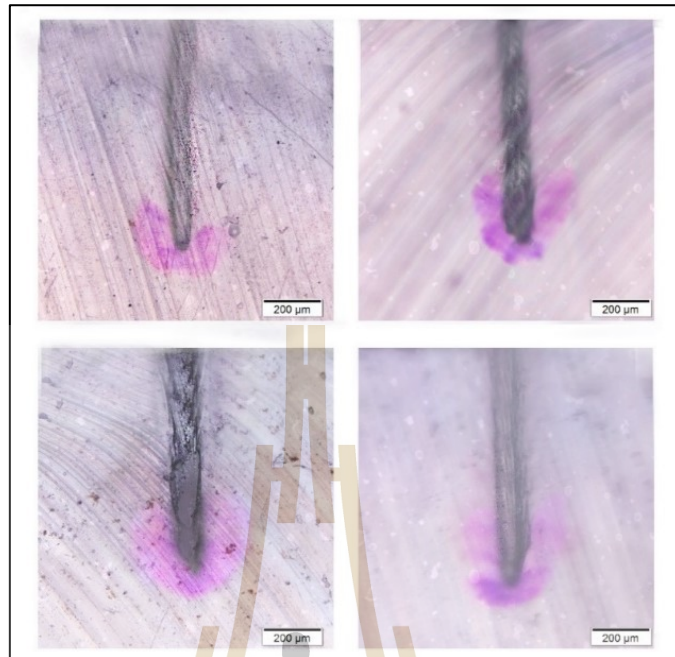
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และ  $\text{CuSO}_4$  วอเตอร์ทรีอิงมีความชัดเจนกว่าในการทดสอบที่สารละลายอื่น ๆ แต่ถ้าดูโดยรวมแล้วในแต่ละสารละลายไอออนิก จะเห็นว่าวอเตอร์ทรีอิงมีความเข้มและขนาดความยาวมากกว่าที่ระยะเวลาทดสอบที่ 1000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ถึงรูปที่ 5.24



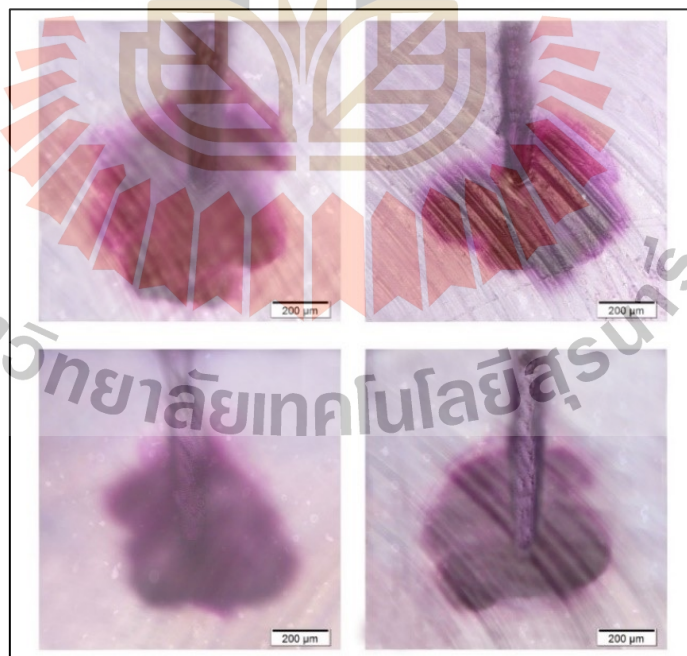
รูปที่ 5.19 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



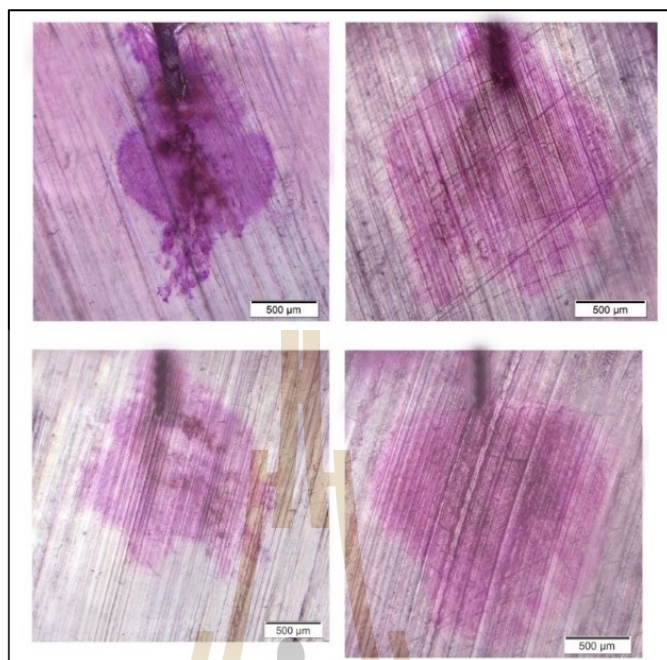
รูปที่ 5.20 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.21 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.22 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

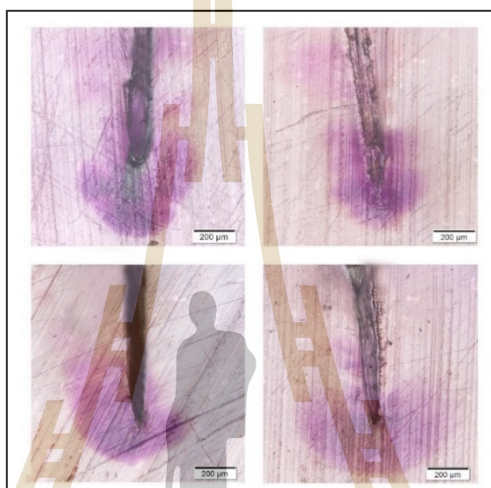


รูปที่ 5.23 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

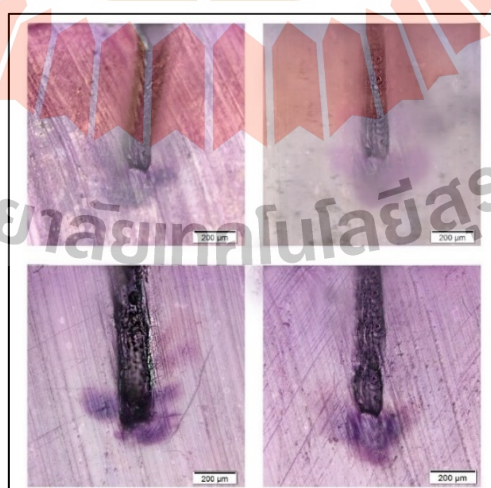


รูปที่ 5.24 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

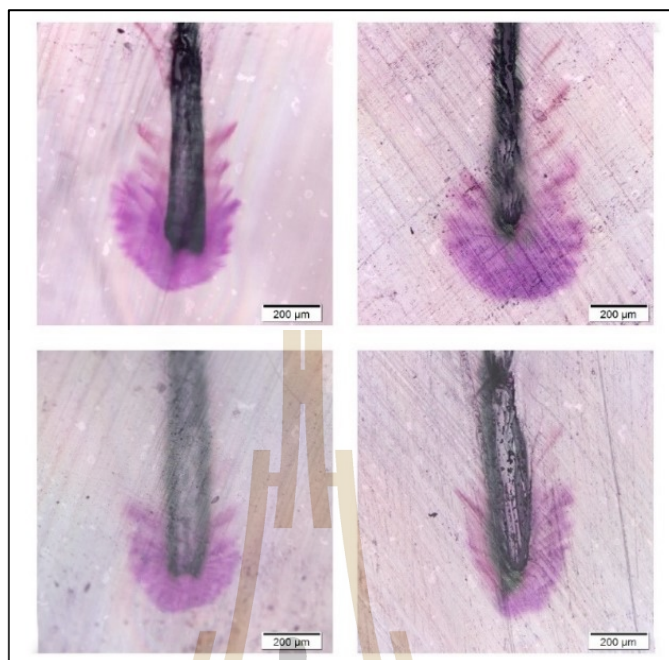
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิงมีความชัดเจนและเข้มมากที่ระยะเวลาทดสอบที่ 1000 ชั่วโมง โดยเฉพาะสารละลาย NaCl จะเห็นว่าวอเตอร์ทรีอิงมีความยาวของวอเตอร์ทรีอิงยาวกว่าสารละลายไอออนิกชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ถึงรูปที่ 5.30



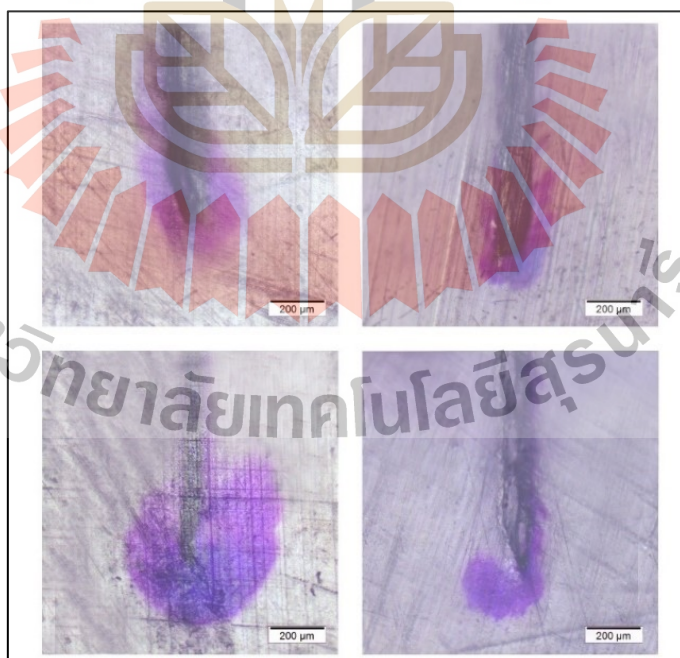
รูปที่ 5.25 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C



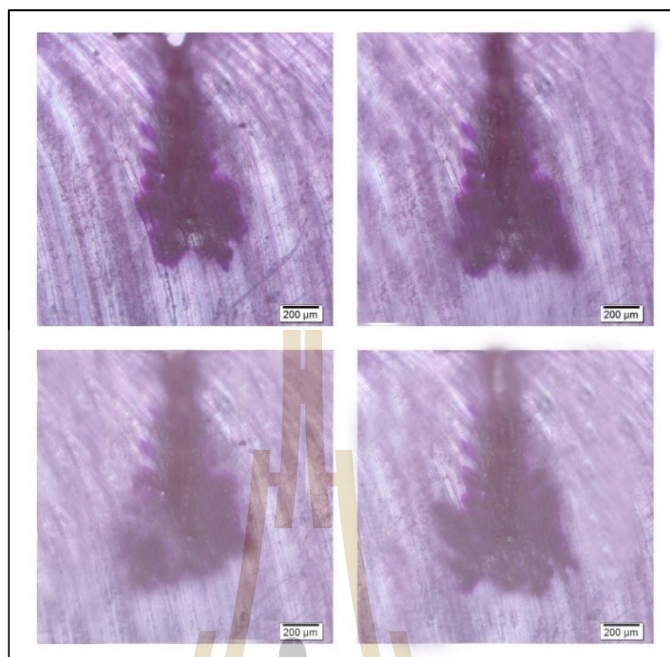
รูปที่ 5.26 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 5.27 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$



รูปที่ 5.28 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$



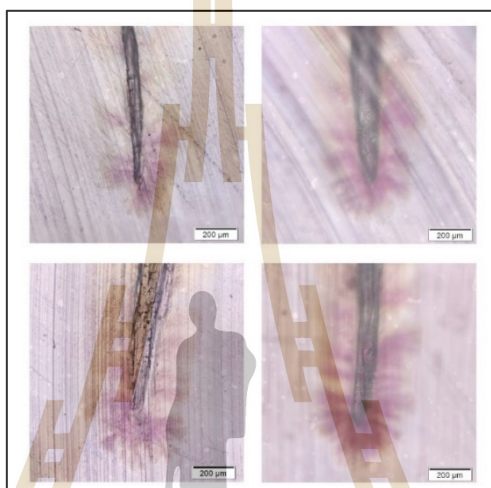
รูปที่ 5.29 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$



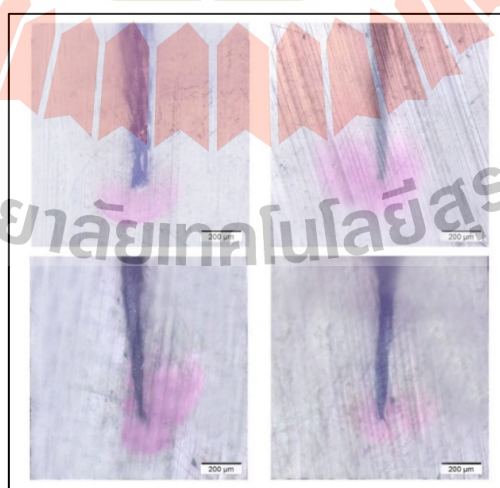
รูปที่ 5.30 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$



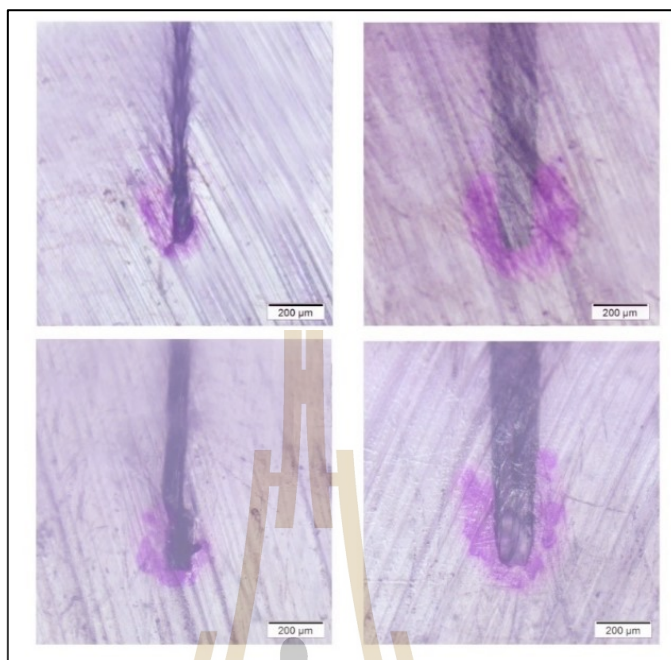
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิงมีความชัดเจนและเข้ม โดยในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  วอเตอร์ทรีอิงมีความยาวมากกว่าสารละลายไอออนิกชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ ที่สารละลาย  $\text{NaCl}$  จะเห็นว่าวอเตอร์ทรีอิงมีการขยายตัวออกเป็นฝอย ๆ บริเวณด้านข้างรูเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 5.31 ถึงรูปที่ 5.36



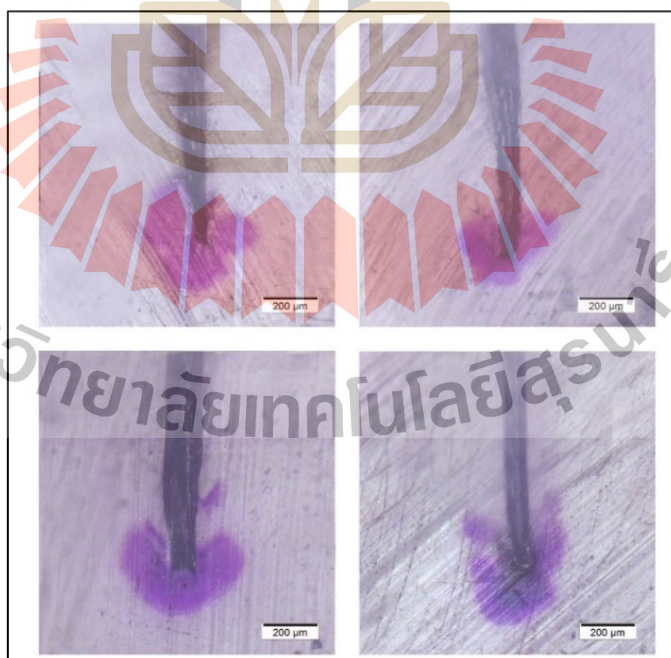
รูปที่ 5.31 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$



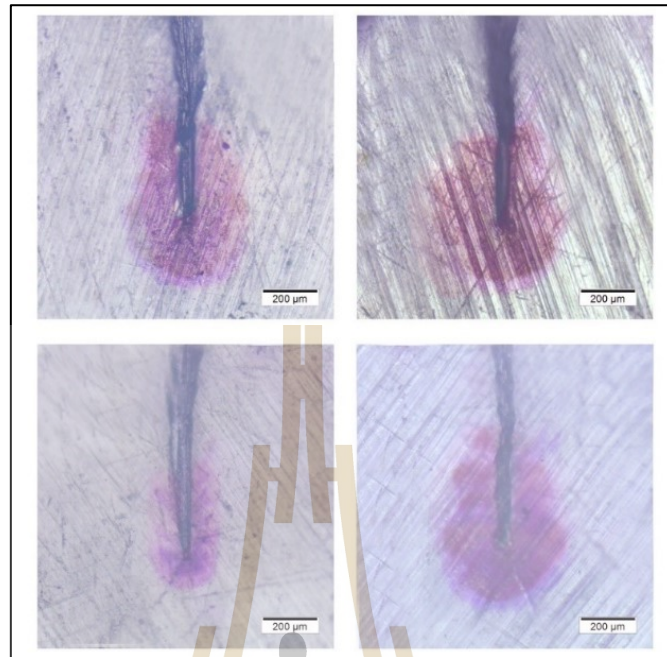
รูปที่ 5.32 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$



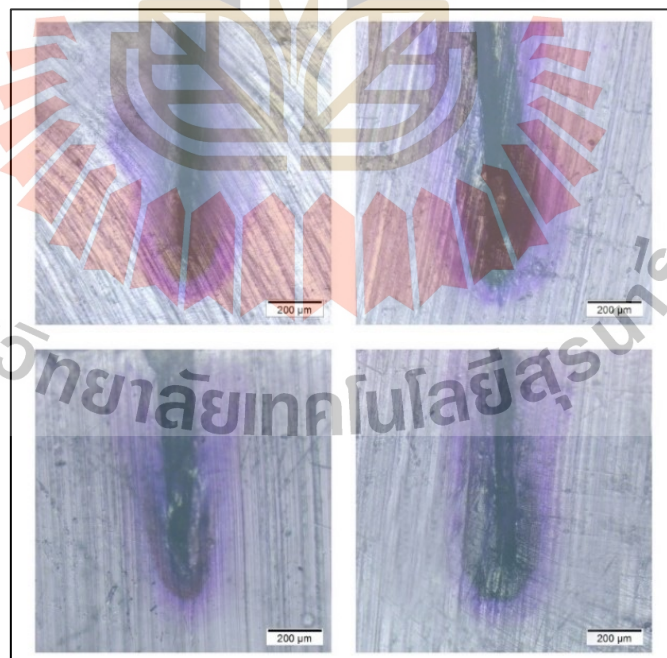
รูปที่ 5.33 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ C$



รูปที่ 5.34 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ C$

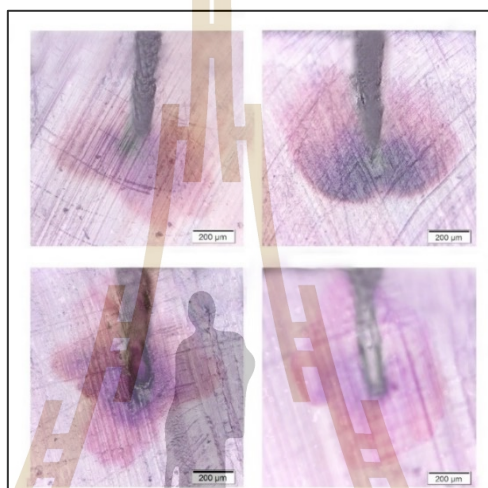


รูปที่ 5.35 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

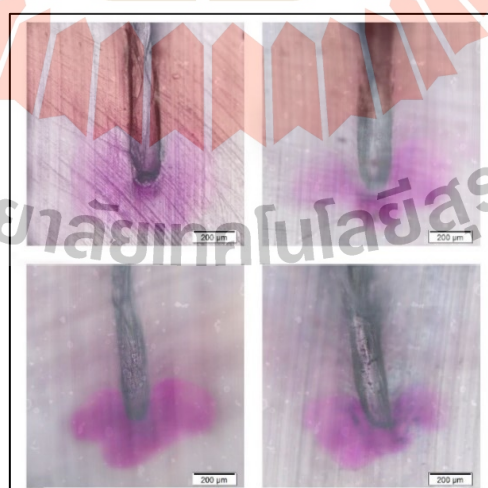


รูปที่ 5.36 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

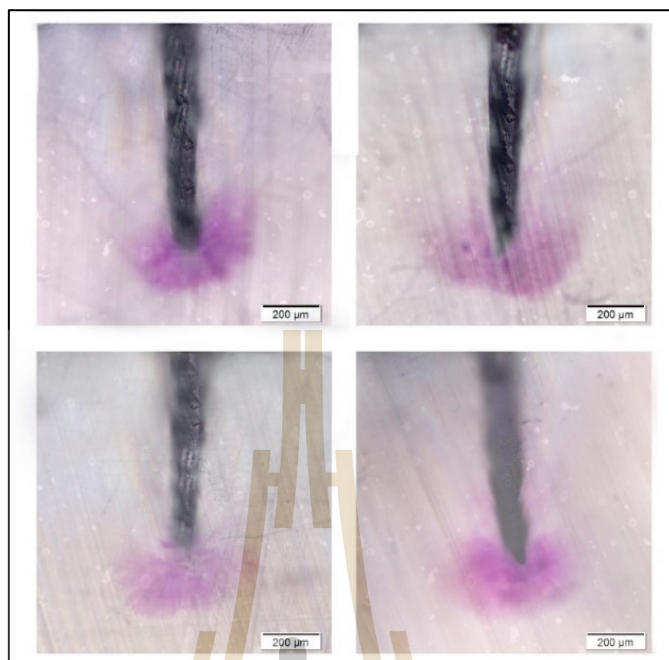
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลาย ไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิงมีความชัดเจนและเข้ม โดยในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  วอเตอร์ทรีอิงมีความยาวมากกว่าสารละลายไอออนิกชนิดอื่น ๆ และยังสามารถเห็นทรีอิงทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ร่วมกับวอเตอร์ทรีอิง ดังแสดงในรูปที่ 5.37 ถึงรูปที่ 5.42



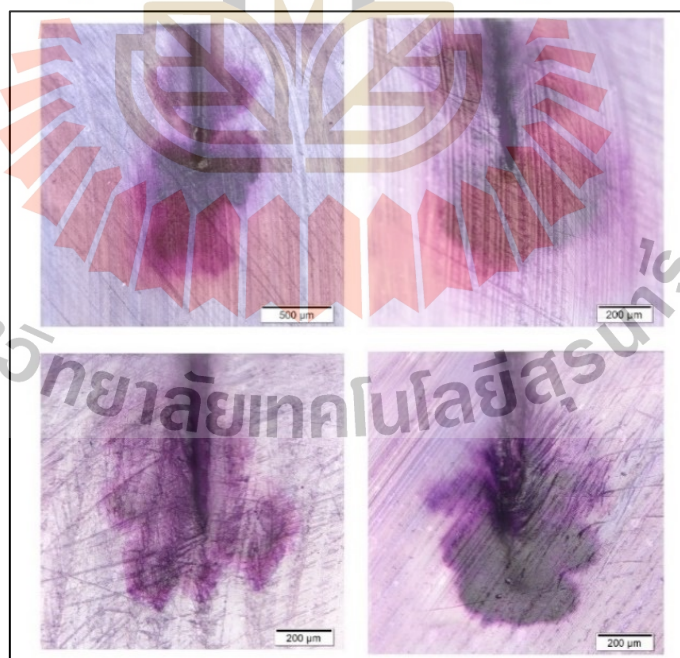
รูปที่ 5.37 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



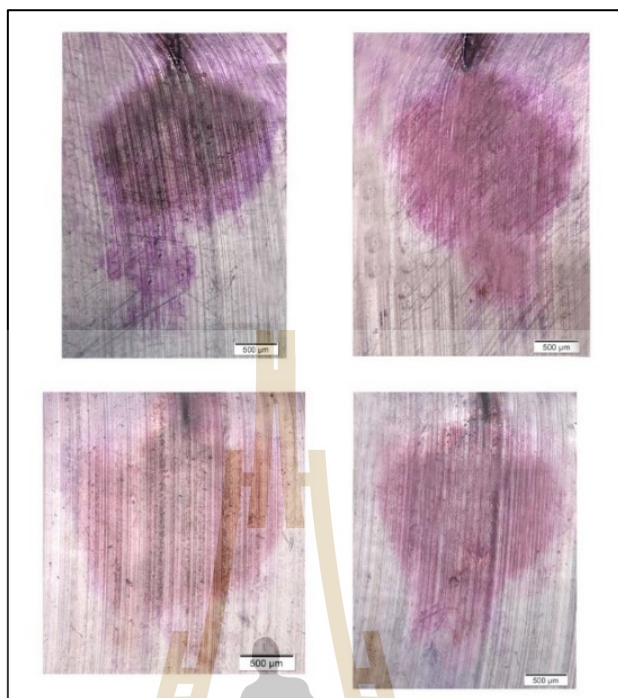
รูปที่ 5.38 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



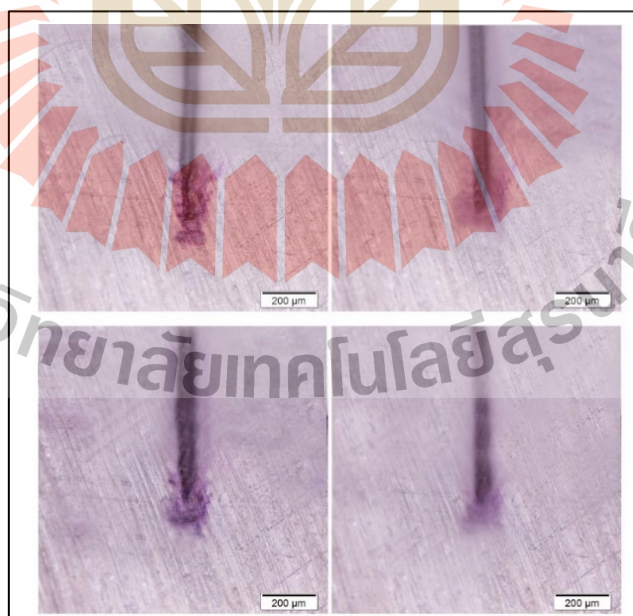
รูปที่ 5.39 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.40 วอเทอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

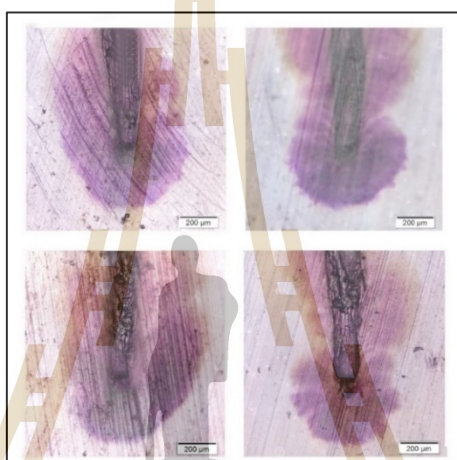


รูปที่ 5.41 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

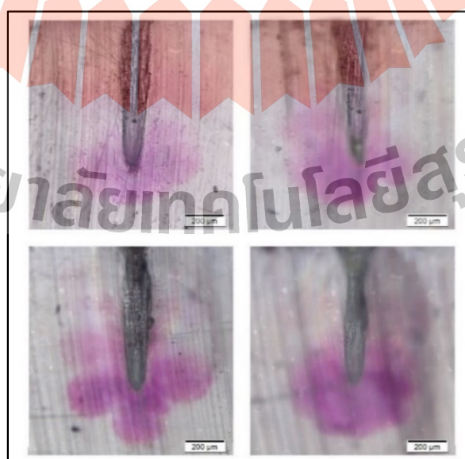


รูปที่ 5.42 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

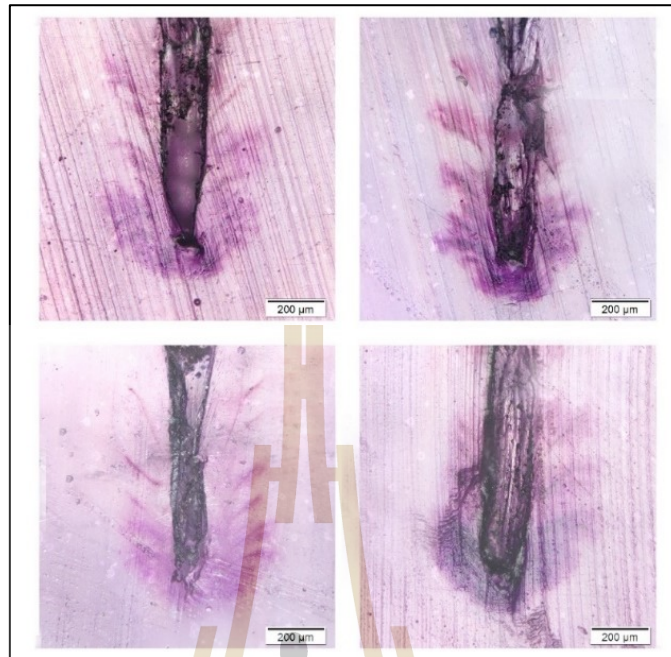
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิงมีความชัดเจนและเข้มขึ้นกว่าเดิมและมีลักษณะวอเตอร์ทรีอิงลักษณะอื่น ๆ เกิดขึ้น เช่น ในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  วอเตอร์ทรีอิงมีการขยายตัวแบบแคบ ๆ ในแนวตั้ง ส่วนในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  รูปร่างวอเตอร์ทรีอิงเหมือนกับว่ามีการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.43 ถึงรูปที่ 5.48



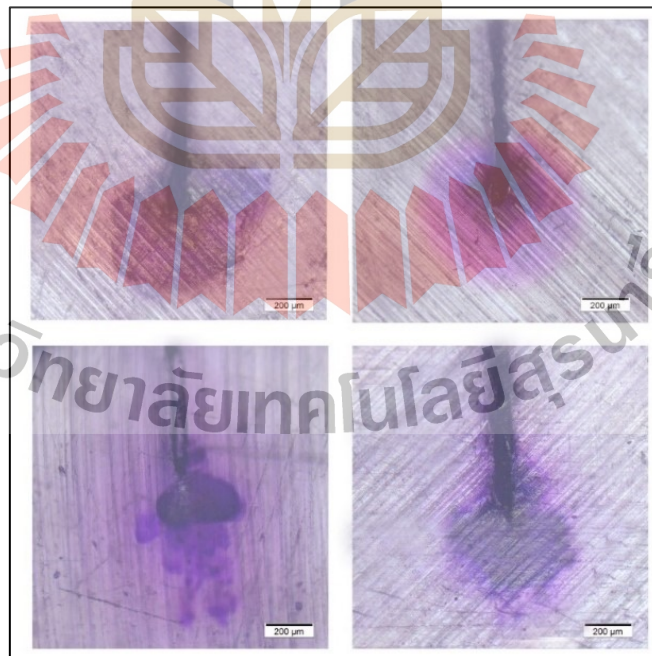
รูปที่ 5.43 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.44 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$

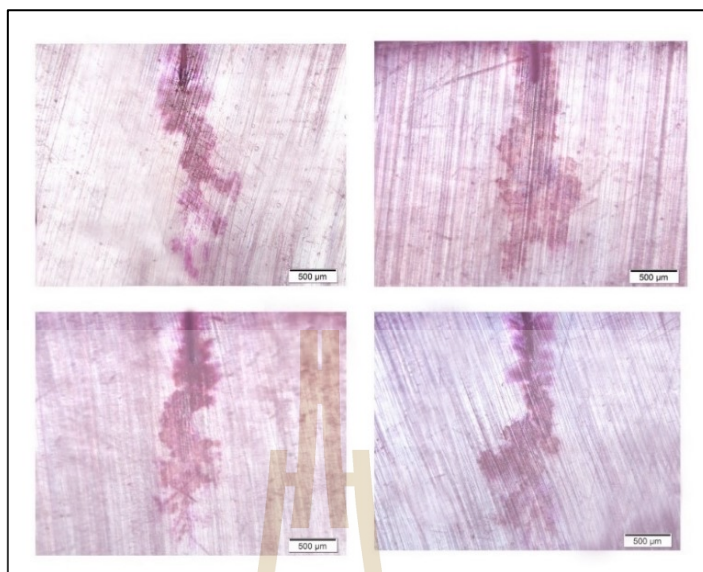


รูปที่ 5.45 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$



รูปที่ 5.46 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$



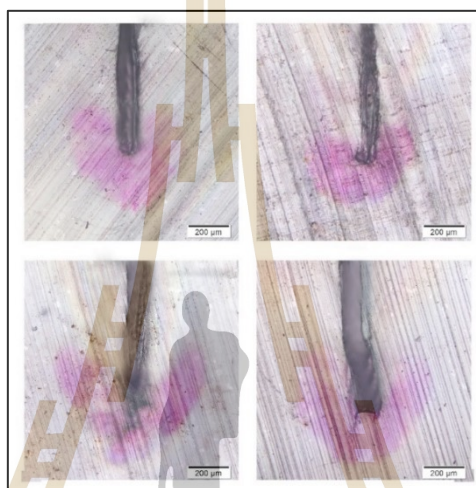


รูปที่ 5.47 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$

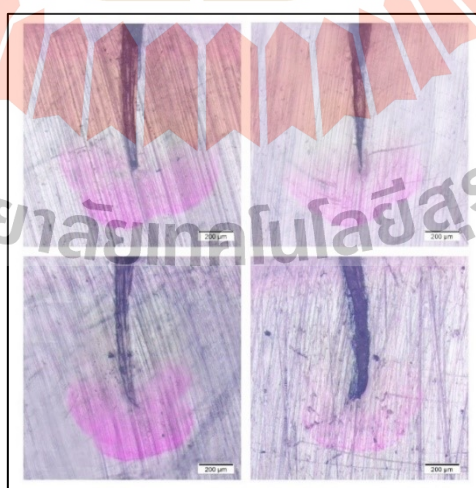


รูปที่ 5.48 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$

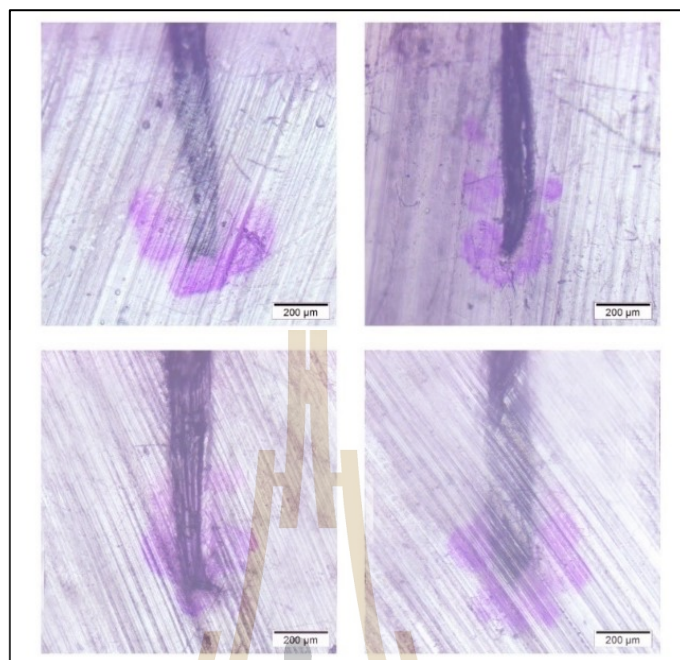
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิ่งที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิ่งมีการขยายตัวช้ากว่าในสารละลายอื่น ๆ และมีลักษณะวอเตอร์ทรีอิ่งที่มีลักษณะแปลก ๆ เกิดขึ้น คือ ในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  รูปร่างวอเตอร์ทรีอิ่ง มีลักษณะเหมือนกับว่ามีวอเตอร์ทรีอิ่งสีเข้มอยู่ข้างใน และมีสีจาง ๆ อยู่รอบนอก ดังแสดงในรูปที่ 5.49 ถึงรูปที่ 5.54



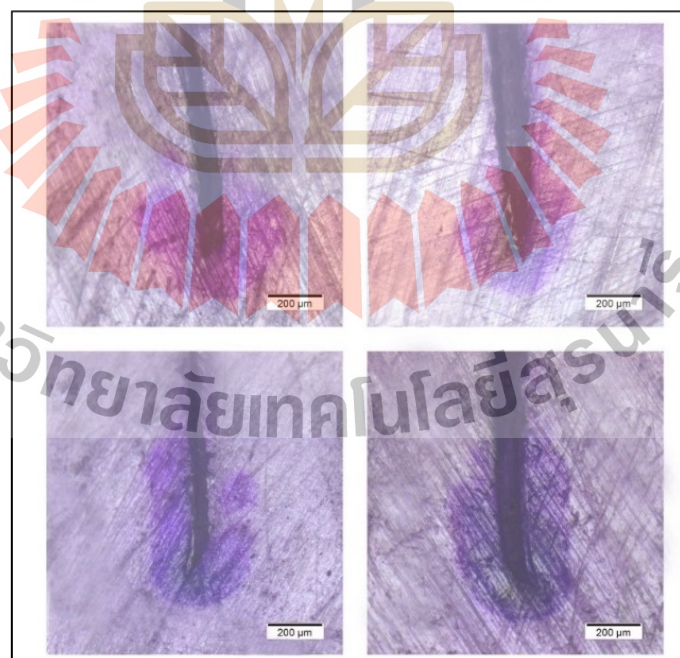
รูปที่ 5.49 วอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$



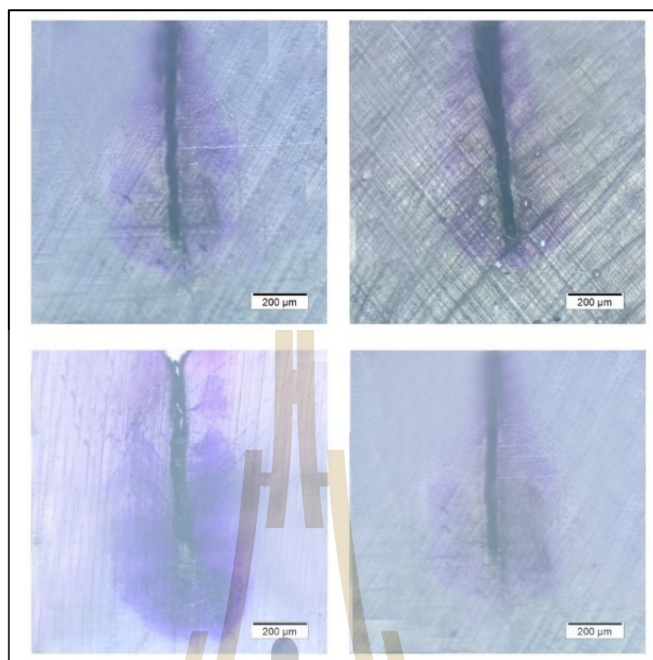
รูปที่ 5.50 วอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$



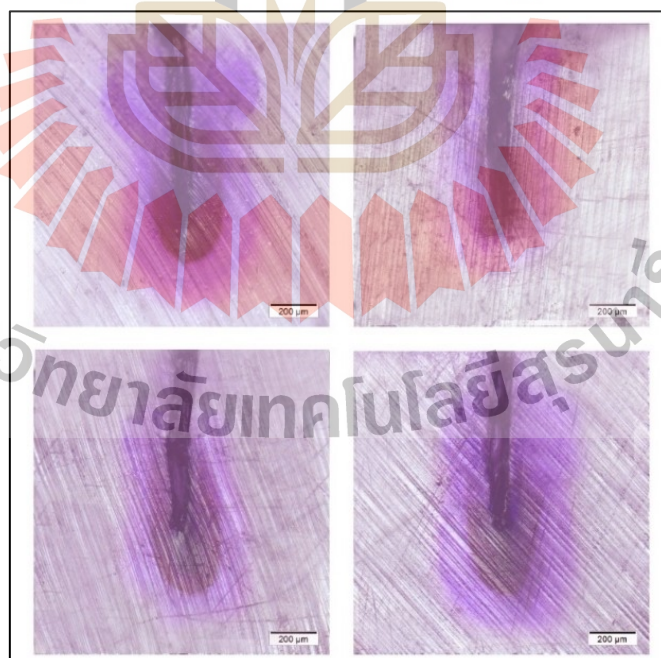
รูปที่ 5.51 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}C$



รูปที่ 5.52 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}C$

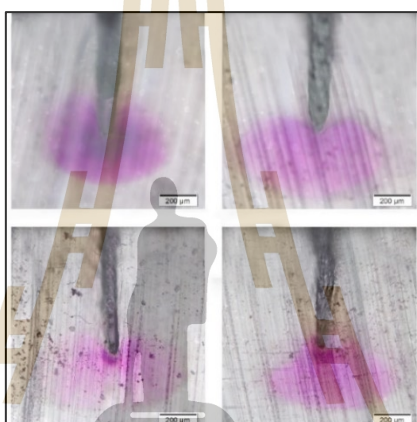


รูปที่ 5.53 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

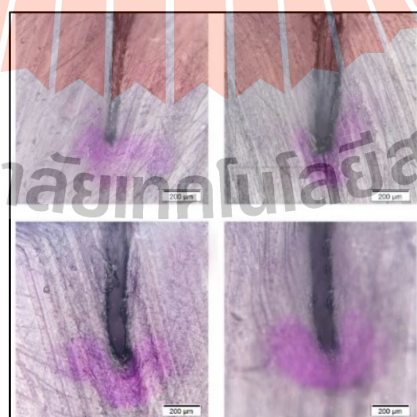


รูปที่ 5.54 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

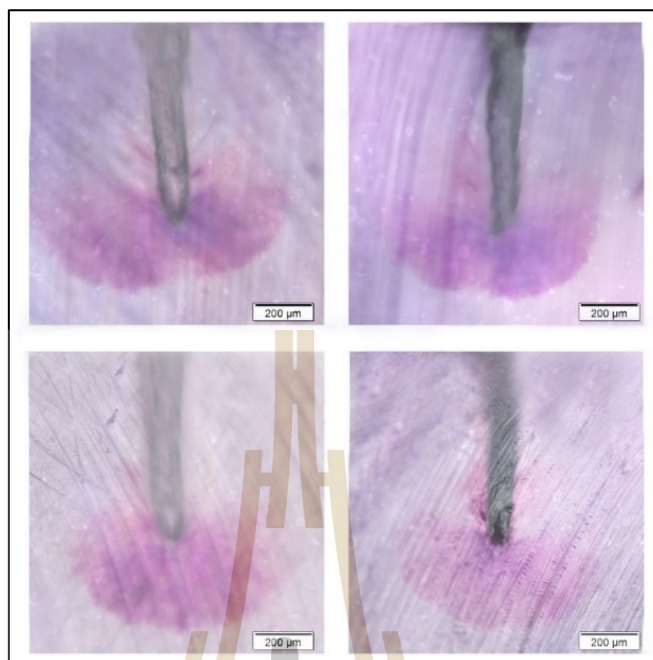
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลาย ไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิงมีการขยายตัวมากขึ้นกว่าที่ระยะเวลาทดสอบที่ 3000 ชั่วโมง และมีลักษณะวอเตอร์ทรีอิงที่มีลักษณะอื่น ๆ เกิดขึ้น คือ ในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  รูปร่าง วอเตอร์ทรีอิงมีลักษณะเหมือนกับว่ามีความไม่ต่อเนื่องของการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง ส่วนใน สารละลาย  $\text{CuSO}_4$  มีการเกิดร่วมกันระหว่างวอเตอร์ทรีอิงและทรีอิงทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.55 ถึงรูปที่ 5.60



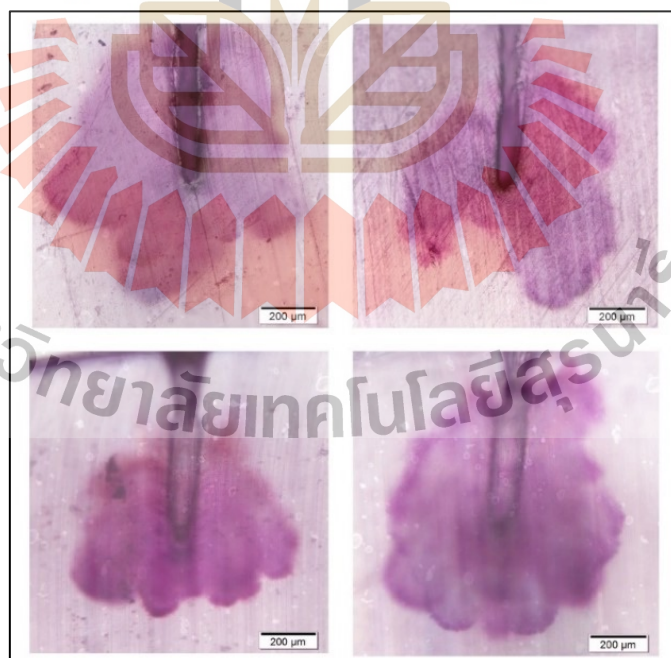
รูปที่ 5.55 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



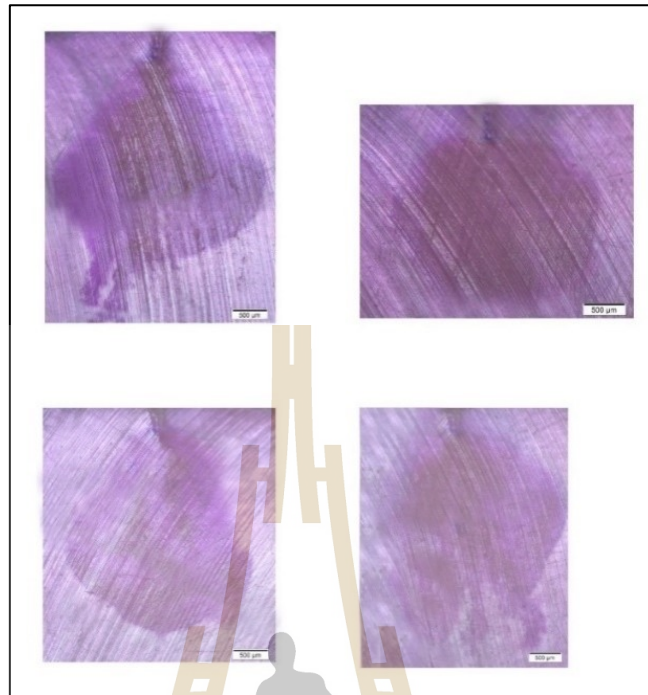
รูปที่ 5.56 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



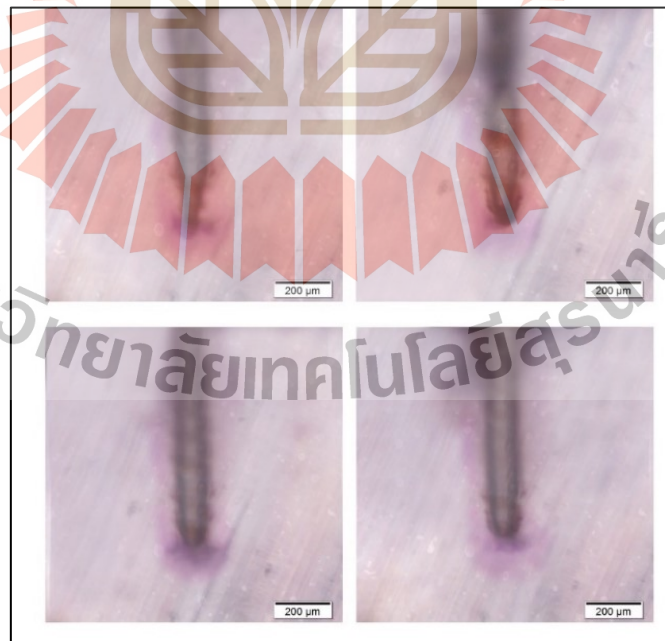
รูปที่ 5.57 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.58 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิห้อง

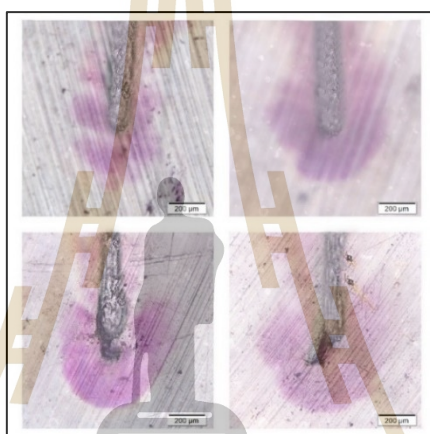


รูปที่ 5.59 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

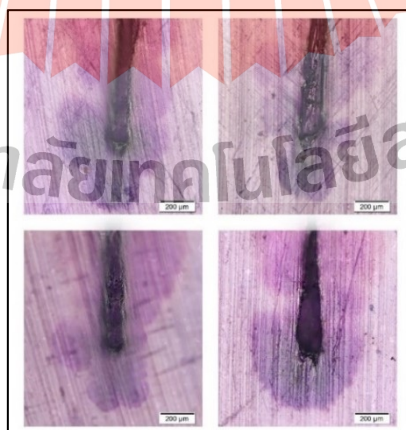


รูปที่ 5.60 วอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

ลักษณะของวอเทอร์ทรีอิ่งที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเทอร์ทรีอิ่งมีการขยายตัวมากขึ้นกว่าที่ระยะเวลาทดสอบที่ 3000 ชั่วโมง และมีลักษณะวอเทอร์ทรีอิ่งที่มีลักษณะแปลก ๆ เกิดขึ้น คือ ในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  รูปร่างวอเทอร์ทรีอิ่งมีลักษณะเหมือนกับว่ามีความไม่ต่อเนื่องของการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิ่ง ส่วนในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  มีการเกิดร่วมนกันระหว่างวอเทอร์ทรีอิ่งและทรีอิ่งทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.61 ถึงรูปที่ 5.66

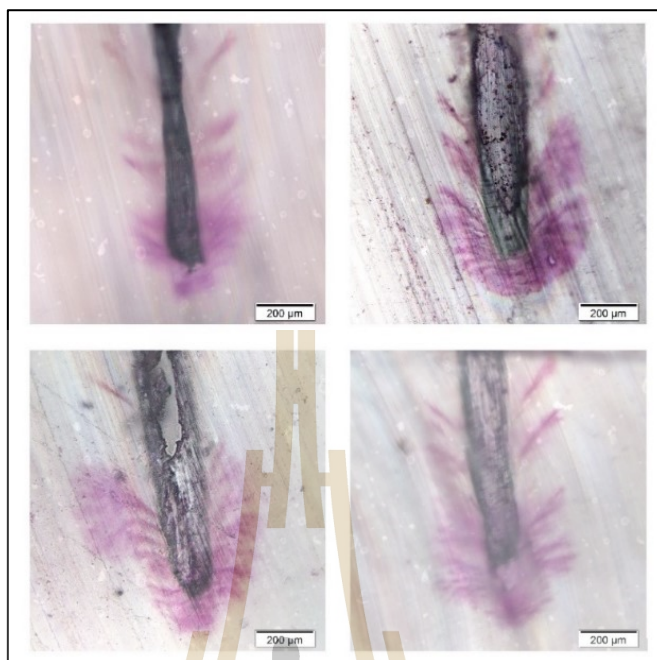


รูปที่ 5.61 วอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{NaCl}$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$

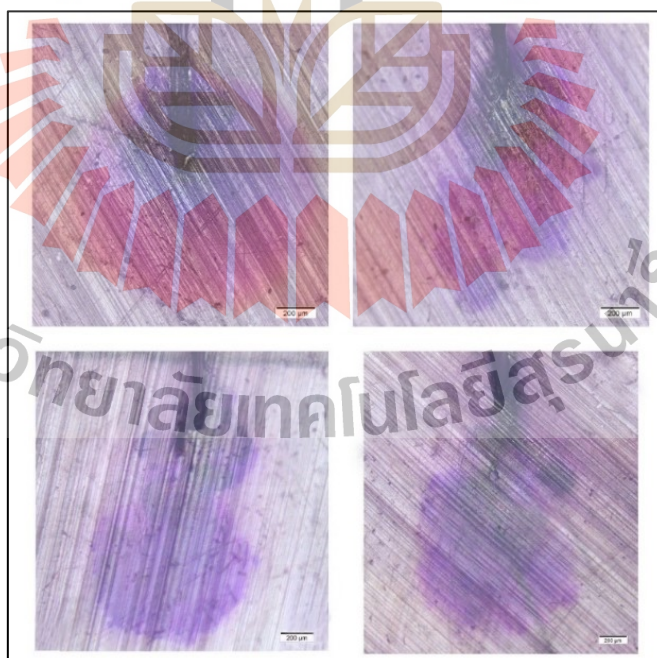


รูปที่ 5.62 วอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$

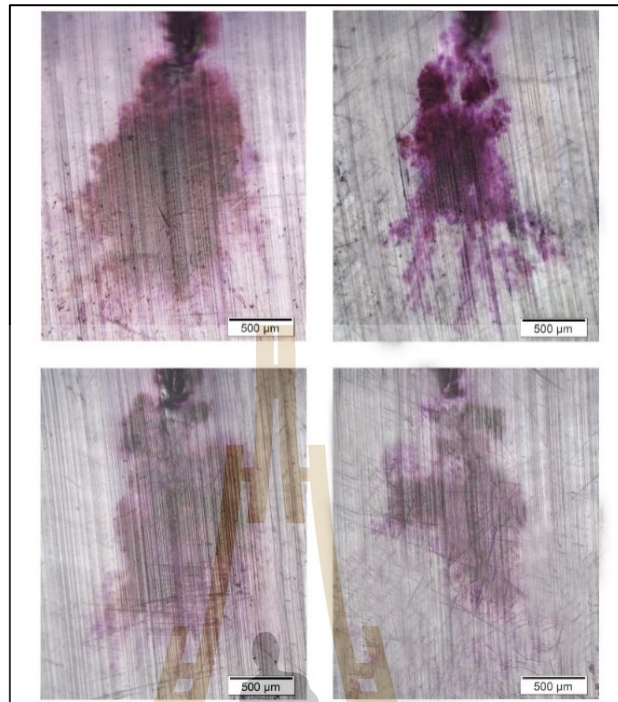




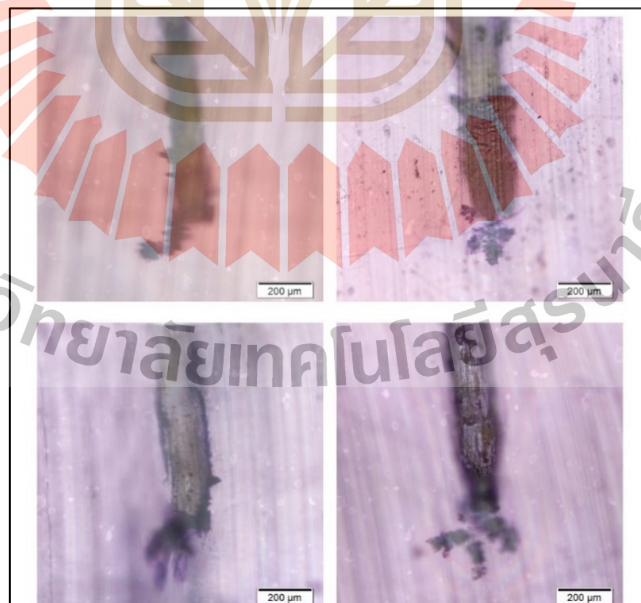
รูปที่ 5.63 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$



รูปที่ 5.64 วอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$

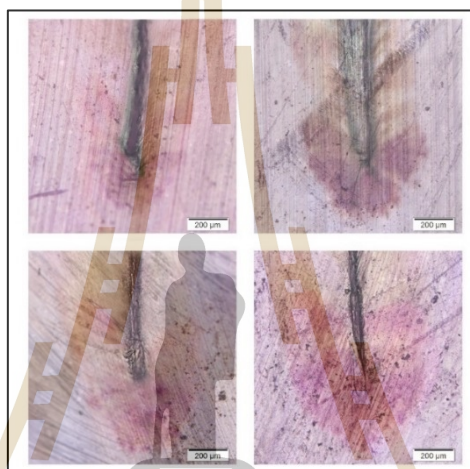


รูปที่ 5.65 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$

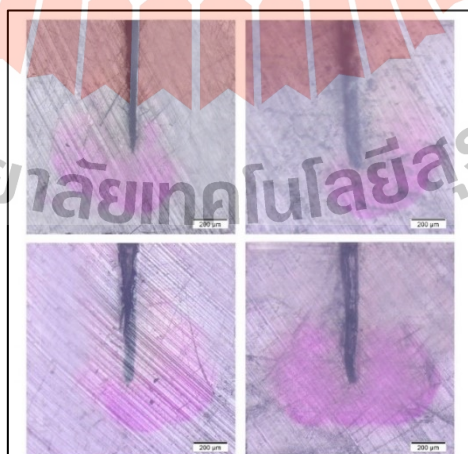


รูปที่ 5.66 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$

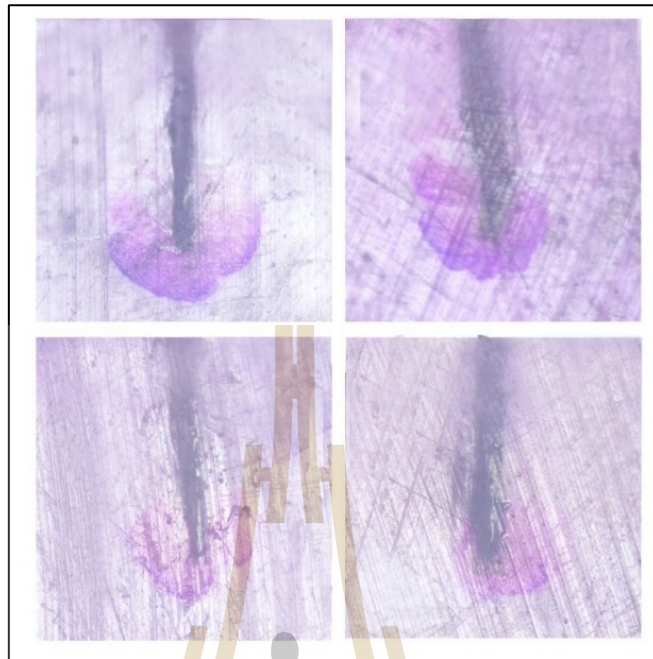
ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิ่งที่เกิดขึ้นจากการใช้ระยะเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ถ้ามองจากภาพทางกายภาพโดยตรง สังเกตได้ว่าการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิกทุก ๆ สารละลาย วอเตอร์ทรีอิ่งมีการขยายตัวมากขึ้นกว่าที่ระยะเวลาทดสอบที่ 3000 ชั่วโมง และมีลักษณะวอเตอร์ทรีอิ่งที่มีลักษณะอื่น ๆ เกิดขึ้น เช่น วอเตอร์ทรีอิ่งมีความเข้มตรงกลางแล้วค่อย ๆ จางลง ในส่วนของรูเจาะลักษณะเหมือนมีความแคบลงกว่าเดิม ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิสูงทำให้รูเจาะในฉนวนหดตัว เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.67 ถึงรูปที่ 5.72



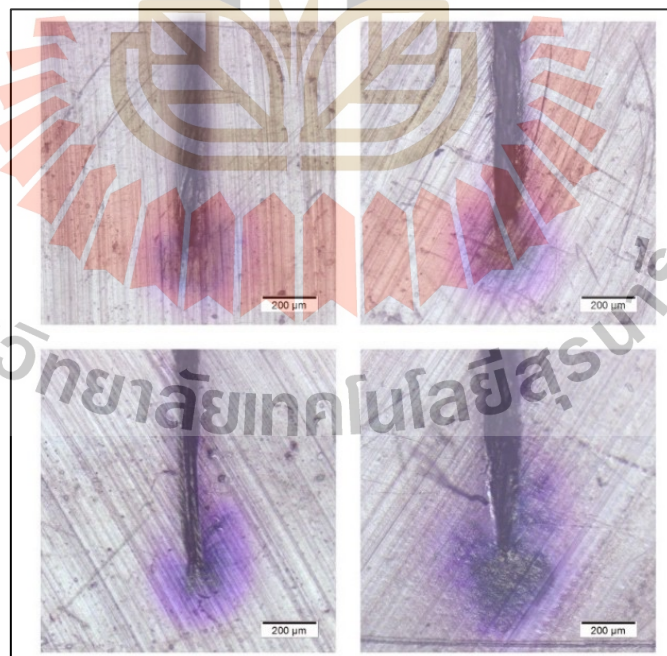
รูปที่ 5.67 วอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลายไอออนิก NaCl หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C



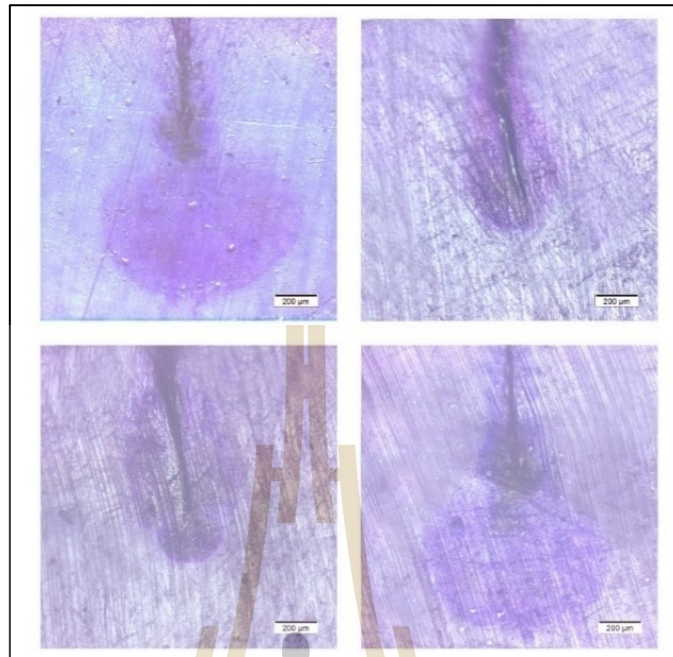
รูปที่ 5.68 วอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลายไอออนิก Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C



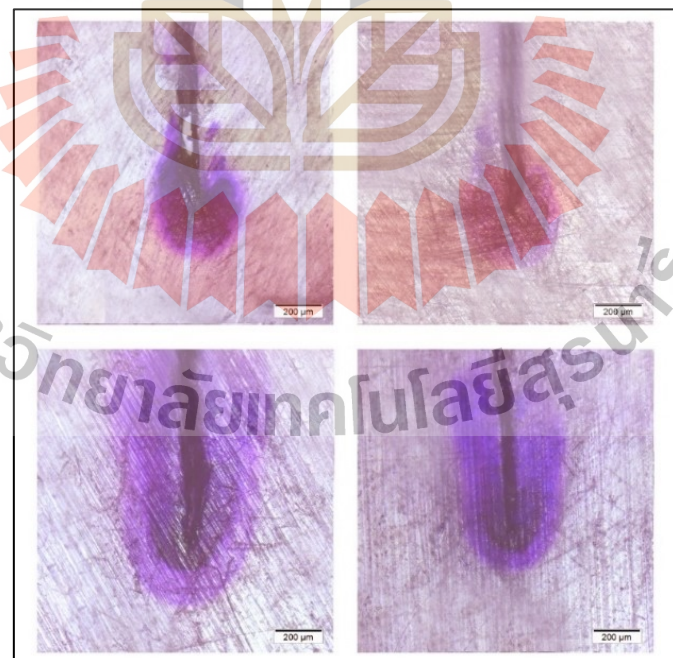
รูปที่ 5.69 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ C$



รูปที่ 5.70 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $Cu(NO_3)_2$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ C$



รูปที่ 5.71 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$



รูปที่ 5.72 วอเทอร์ที่ริงในสารละลายไอออนิก  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.72 พบว่าลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE มีลักษณะเป็นวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีป มีสีม่วงชัดเจน และทิศทางการขยายตัวมีทิศทางตั้งลงจากฉนวนไปยังตัวนำทองแดงตามสนามไฟฟ้า (ธีระพงษ์, 2014) โดยเฉพาะรูเจาะบนฉนวนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบหดและขยายต่างกัน ซึ่งลักษณะรูเจาะไม่ได้กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ เนื่องจากในการทดสอบสายเคเบิลไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรูเจาะนี้ได้ตลอดเวลา ดังนั้นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรูเจาะจึงไม่นำมาวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความยาวของวอเตอร์ทรีอิงใช้เป็นค่าเฉลี่ยสูงสุด (แทนความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงด้วย  $W_{avg}$ ) ของแต่ละส่วนที่พิจารณาโดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนต่อสายเคเบิล 1 เส้น ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของ วอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีปในแต่ละส่วนในสายเคเบิลได้ฉนวน XLPE ในช่วงเวลาทดสอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.4 โดยในตารางจะแบ่งเป็น 5 กลุ่มความยาว เพื่อให้ง่ายต่อการแบ่งช่วงความยาว ดังนี้

- (i)  $W_{avg} < 100 \mu\text{m}$
- (ii)  $500 \mu\text{m} \geq W_{avg} > 100 \mu\text{m}$
- (iii)  $1000 \mu\text{m} \geq W_{avg} > 500 \mu\text{m}$
- (iv)  $1500 \mu\text{m} \geq W_{avg} > 1000 \mu\text{m}$
- (v)  $W_{avg} > 1500 \mu\text{m}$

จากตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.4 พบว่าความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE ที่ใช้สารละลายไอออนิกต่าง ๆ มีค่าความยาวแตกต่างกัน ซึ่งในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  แสดงค่าความยาวของวอเตอร์ทรีอิงมากกว่าสารละลายอื่น ๆ ได้อย่างชัดเจน แต่เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลให้ชัดเจน ดังนั้นจากตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.4 ได้นำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.73 ถึงรูปที่ 5.76

ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย  $\text{CuSO}_4$  มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 4 ( $1500 \mu\text{m} \geq W_{avg} > 1000 \mu\text{m}$ ) และความยาวเฉลี่ยต่ำสุดเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย  $\text{FeSO}_4$  มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 1 ( $W_{avg} < 100 \mu\text{m}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายคิริบในแต่ละส่วนของสาย  
เคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

|  | สารละลาย                          | อุณหภูมิ | ส่วนที่<br>1 | ส่วนที่<br>2 | ส่วนที่<br>3 | ส่วนที่<br>4 | ค่าเฉลี่ย      | ค่า S.D.      |
|--|-----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| ความยาววอเตอร์ทรีอิงเฉลี่ยสูงสุด ( $\mu\text{m}$ ) | NaCl                              | ห้อง     | 173.08       | 117.30       | 208.38       | 198.72       | <b>174.37</b>  | <b>40.86</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 239.98       | 148.35       | 133.86       | 176.65       | <b>174.71</b>  | <b>47.00</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 103.66       | 115.93       | 118.68       | 138.69       | <b>119.24</b>  | <b>14.52</b>  |
|  | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | ห้อง     | 103.97       | 91.08        | 35.22        | 41.33        | <b>67.90</b>   | <b>34.70</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 217.74       | 143.53       | 251.19       | 161.46       | <b>193.48</b>  | <b>49.80</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 120.62       | 118.50       | 179.79       | 153.25       | <b>143.04</b>  | <b>29.21</b>  |
|  | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | ห้อง     | 105.57       | 92.47        | 75.22        | 83.50        | <b>89.19</b>   | <b>12.99</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 88.45        | 132.48       | 143.52       | 115.23       | <b>119.92</b>  | <b>23.99</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 75.70        | 55.81        | 67.75        | 95.22        | <b>73.62</b>   | <b>16.56</b>  |
|  | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | ห้อง     | 141.98       | 144.36       | 152.50       | 107.64       | <b>136.62</b>  | <b>19.84</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 155.33       | 116.70       | 116.70       | 76.44        | <b>116.29</b>  | <b>32.21</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 148.55       | 106.26       | 161.73       | 143.02       | <b>139.89</b>  | <b>23.75</b>  |
|  | CuSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 1393.58      | 1256.32      | 1300.54      | 1135.32      | <b>1271.44</b> | <b>107.27</b> |
|  |                                   | 50°C     | 266.34       | 212.52       | 292.56       | 293.94       | <b>266.34</b>  | <b>38.06</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 265.93       | 257.44       | 230.91       | 202.31       | <b>239.15</b>  | <b>28.73</b>  |
|  | FeSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 59.34        | 47.61        | 41.40        | 37.95        | <b>46.58</b>   | <b>9.40</b>   |
|  |                                   | 50°C     | 60.05        | 86.95        | 41.40        | 44.18        | <b>58.15</b>   | <b>20.89</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 191.75       | 61.82        | 228.66       | 110.45       | <b>148.17</b>  | <b>75.84</b>  |

ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย CuSO<sub>4</sub> มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 5 ( $W_{\text{avg}} > 1500 \mu\text{m}$ ) และความยาวเฉลี่ยต่ำสุดเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย FeSO<sub>4</sub> มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 1 ( $W_{\text{avg}} < 100 \mu\text{m}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกรีบในแต่ละส่วนของสาย  
เคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

|  | สารละลาย                          | อุณหภูมิ | ส่วนที่<br>1 | ส่วนที่<br>2 | ส่วนที่<br>3 | ส่วนที่<br>4 | ค่าเฉลี่ย      | ค่า S.D.      |
|--|-----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| ความยาววอเตอร์ทรีอิงเฉลี่ยสูงสุด ( $\mu\text{m}$ ) | NaCl                              | ห้อง     | 219.41       | 186.30       | 200.13       | 222.20       | <b>207.01</b>  | <b>16.94</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 232.19       | 246.34       | 202.86       | 330.13       | <b>252.88</b>  | <b>54.59</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 180.66       | 255.99       | 226.34       | 176.65       | <b>209.91</b>  | <b>38.10</b>  |
|  | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | ห้อง     | 103.97       | 91.08        | 35.22        | 41.33        | <b>142.70</b>  | <b>34.70</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 217.74       | 143.53       | 251.19       | 161.46       | <b>204.59</b>  | <b>49.80</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 120.62       | 118.50       | 179.79       | 153.25       | <b>191.69</b>  | <b>29.21</b>  |
|  | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | ห้อง     | 105.57       | 92.47        | 75.22        | 83.50        | <b>89.29</b>   | <b>12.99</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 88.45        | 132.48       | 143.52       | 115.23       | <b>158.85</b>  | <b>23.99</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 75.70        | 55.81        | 67.75        | 95.22        | <b>91.42</b>   | <b>16.56</b>  |
|  | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | ห้อง     | 141.98       | 144.36       | 152.50       | 107.64       | <b>288.15</b>  | <b>19.84</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 155.33       | 116.70       | 116.70       | 76.44        | <b>171.24</b>  | <b>32.21</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 148.55       | 106.26       | 161.73       | 143.02       | <b>172.86</b>  | <b>23.75</b>  |
|  | CuSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 1463.63      | 1694.66      | 1558.02      | 1760.93      | <b>1619.31</b> | <b>115.90</b> |
|  |                                   | 50°C     | 506.83       | 561.21       | 621.33       | 450.00       | <b>534.84</b>  | <b>63.56</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 268.51       | 247.99       | 243.14       | 247.35       | <b>251.75</b>  | <b>9.86</b>   |
|  | FeSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 59.34        | 47.61        | 41.40        | 37.95        | <b>70.80</b>   | <b>9.40</b>   |
|  |                                   | 50°C     | 60.05        | 86.95        | 41.40        | 44.18        | <b>102.96</b>  | <b>20.89</b>  |
|  |                                   | 70°C     | 191.75       | 61.82        | 228.66       | 110.45       | <b>204.23</b>  | <b>75.84</b>  |

ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย CuSO<sub>4</sub> มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 5 ( $W_{\text{avg}} > 1500 \mu\text{m}$ ) และความยาวเฉลี่ยต่ำสุดเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย FeSO<sub>4</sub> มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 1 ( $W_{\text{avg}} < 100 \mu\text{m}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.3



ตารางที่ 5.3 ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกรีบในแต่ละส่วนของสาย  
เคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

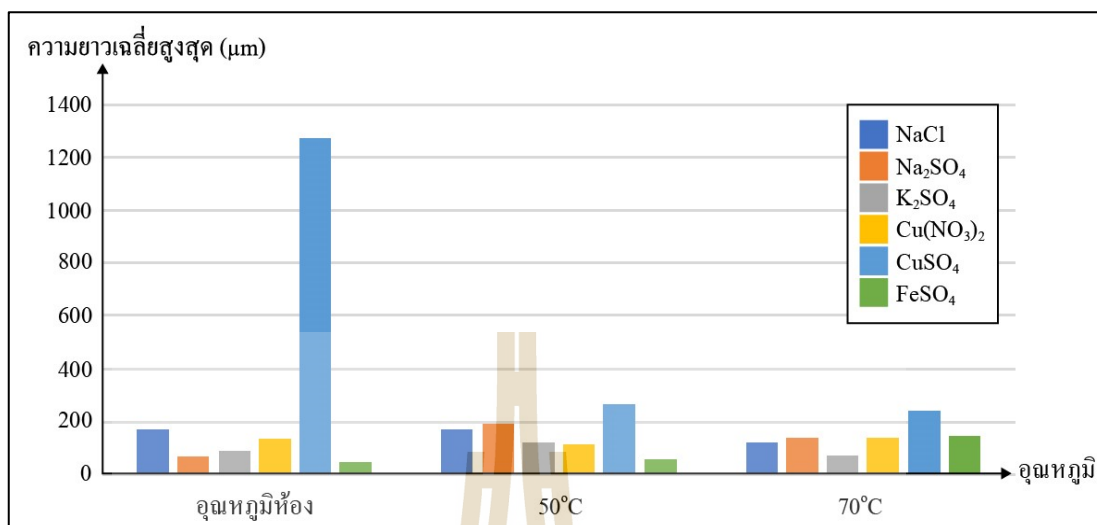
|  | สารละลาย                          | อุณหภูมิ | ส่วนที่<br>1 | ส่วนที่<br>2 | ส่วนที่<br>3 | ส่วนที่<br>4 | ค่าเฉลี่ย      | ค่า S.D.     |
|--|-----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| ความยาววอเตอร์ทรีอิงเฉลี่ยสูงสุด ( $\mu\text{m}$ ) | NaCl                              | ห้อง     | 246.70       | 285.32       | 309.82       | 302.20       | <b>286.01</b>  | <b>14.67</b> |
|  |                                   | 50°C     | 264.73       | 318.10       | 310.32       | 256.01       | <b>289.54</b>  | <b>47.28</b> |
|  |                                   | 70°C     | 252.61       | 276.00       | 278.07       | 306.12       | <b>278.20</b>  | <b>33.00</b> |
|  | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | ห้อง     | 216.40       | 245.64       | 221.49       | 221.83       | <b>223.84</b>  | <b>30.05</b> |
|  |                                   | 50°C     | 244.67       | 240.83       | 289.15       | 393.31       | <b>291.98</b>  | <b>43.13</b> |
|  |                                   | 70°C     | 329.29       | 294.27       | 333.08       | 210.56       | <b>316.80</b>  | <b>25.30</b> |
|  | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | ห้อง     | 210.31       | 187.69       | 224.25       | 184.24       | <b>201.62</b>  | <b>11.25</b> |
|  |                                   | 50°C     | 149.65       | 137.32       | 158.01       | 223.26       | <b>169.06</b>  | <b>20.78</b> |
|  |                                   | 70°C     | 170.93       | 136.19       | 139.62       | 186.86       | <b>158.39</b>  | <b>14.34</b> |
|  | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | ห้อง     | 687.17       | 548.61       | 562.35       | 344.31       | <b>535.61</b>  | <b>17.18</b> |
|  |                                   | 50°C     | 625.24       | 355.50       | 345.31       | 488.51       | <b>453.64</b>  | <b>27.89</b> |
|  |                                   | 70°C     | 122.62       | 179.81       | 259.48       | 181.88       | <b>185.95</b>  | <b>20.57</b> |
|  | CuSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 2121.97      | 3298.48      | 3234.99      | 2856.62      | <b>2878.01</b> | <b>92.90</b> |
|  |                                   | 50°C     | 1817.50      | 1965.12      | 2104.72      | 2071.44      | <b>1989.70</b> | <b>32.96</b> |
|  |                                   | 70°C     | 422.17       | 384.13       | 122.60       | 120.54       | <b>262.36</b>  | <b>24.88</b> |
|  | FeSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 98.24        | 86.15        | 100.00       | 101.21       | <b>96.40</b>   | <b>8.14</b>  |
|  |                                   | 50°C     | 139.66       | 140.76       | 189.07       | 131.11       | <b>150.15</b>  | <b>18.09</b> |
|  |                                   | 70°C     | 231.37       | 249.29       | 200.23       | 273.35       | <b>238.56</b>  | <b>65.68</b> |

ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย CuSO<sub>4</sub> มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 5 ( $W_{\text{avg}} > 1500 \mu\text{m}$ ) และความยาวเฉลี่ยต่ำสุดเกิดขึ้นในการทดสอบที่ใช้สารละลาย K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่ 2 ( $500 \mu\text{m} \geq W_{\text{avg}} > 100 \mu\text{m}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ขนาดความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงแบบคล้ายกรีปในแต่ละส่วนของสาย  
เคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE หลังจากทดสอบเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง

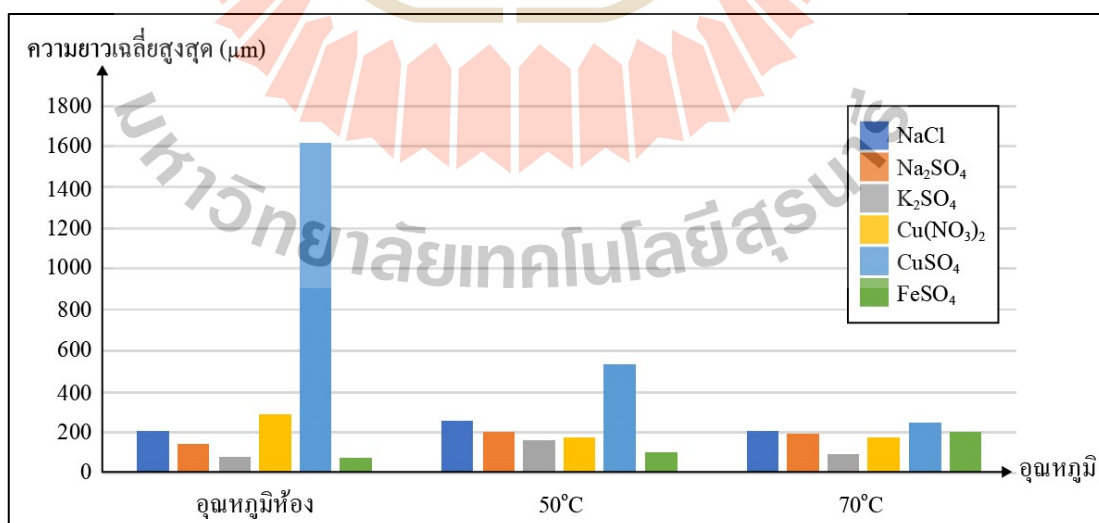
|                                       | สารละลาย                          | อุณหภูมิ | ส่วนที่ 1 | ส่วนที่ 2 | ส่วนที่ 3 | ส่วนที่ 4 | ค่าเฉลี่ย      | ค่า S.D.      |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|---------------|
| ความยาววอเตอร์ทรีอิงเฉลี่ยสูงสุด (µm) | NaCl                              | ห้อง     | 319.60    | 331.25    | 373.29    | 266.34    | <b>322.62</b>  | <b>44.04</b>  |
|                                       |                                   | 50°C     | 369.14    | 368.47    | 461.61    | 274.66    | <b>368.47</b>  | <b>76.32</b>  |
|                                       |                                   | 70°C     | 261.06    | 376.82    | 249.09    | 290.11    | <b>294.27</b>  | <b>57.67</b>  |
|                                       | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | ห้อง     | 214.32    | 252.54    | 291.88    | 208.38    | <b>241.78</b>  | <b>38.71</b>  |
|                                       |                                   | 50°C     | 387.65    | 316.71    | 388.47    | 323.61    | <b>354.11</b>  | <b>39.30</b>  |
|                                       |                                   | 70°C     | 378.25    | 351.51    | 345.34    | 371.94    | <b>361.76</b>  | <b>15.81</b>  |
|                                       | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | ห้อง     | 355.90    | 244.26    | 236.67    | 304.29    | <b>280.28</b>  | <b>55.96</b>  |
|                                       |                                   | 50°C     | 177.76    | 354.66    | 155.94    | 190.44    | <b>219.70</b>  | <b>91.09</b>  |
|                                       |                                   | 70°C     | 157.25    | 163.27    | 186.94    | 186.94    | <b>173.60</b>  | <b>15.60</b>  |
|                                       | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | ห้อง     | 615.66    | 626.56    | 572.70    | 455.40    | <b>567.58</b>  | <b>78.32</b>  |
|                                       |                                   | 50°C     | 492.32    | 1111.45   | 1266.86   | 839.97    | <b>927.65</b>  | <b>339.63</b> |
|                                       |                                   | 70°C     | 326.34    | 255.42    | 370.01    | 294.27    | <b>331.51</b>  | <b>48.60</b>  |
|                                       | CuSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 2068.64   | 3567.33   | 2918.71   | 3588.04   | <b>3035.68</b> | <b>715.68</b> |
|                                       |                                   | 50°C     | 1928.57   | 2492.29   | 1932.04   | 2219.25   | <b>2143.04</b> | <b>269.75</b> |
|                                       |                                   | 70°C     | 161.41    | 755.96    | 794.86    | 257.51    | <b>492.43</b>  | <b>329.48</b> |
|                                       | FeSO <sub>4</sub>                 | ห้อง     | 156.53    | 223.54    | 201.23    | 133.86    | <b>178.79</b>  | <b>40.91</b>  |
|                                       |                                   | 50°C     | 184.77    | 168.37    | 253.92    | 171.82    | <b>194.72</b>  | <b>40.09</b>  |
|                                       |                                   | 70°C     | 384.71    | 339.21    | 437.30    | 286.10    | <b>361.83</b>  | <b>64.46</b>  |

ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าวอเตอร์ทรีอิงมีขนาดที่ยาวที่สุดที่การทดสอบในสารละลาย (i) CuSO<sub>4</sub> (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (iii) NaCl ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.73



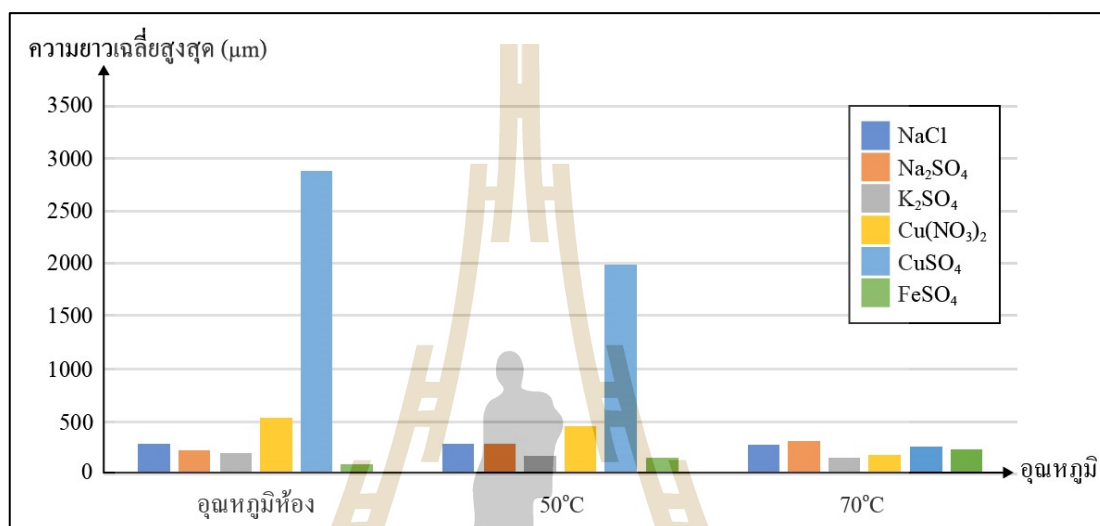
รูปที่ 5.73 ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ที่อิงกับอุณหภูมิ ในสารละลายไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ที่อิงกับอุณหภูมิ ทั้ง 3 ระดับ คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าวอเตอร์ที่อิงมีขนาดที่ยาวที่สุดที่การทดสอบในสารละลาย (i) CuSO<sub>4</sub> (ii) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> และ (iii) NaCl ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.74



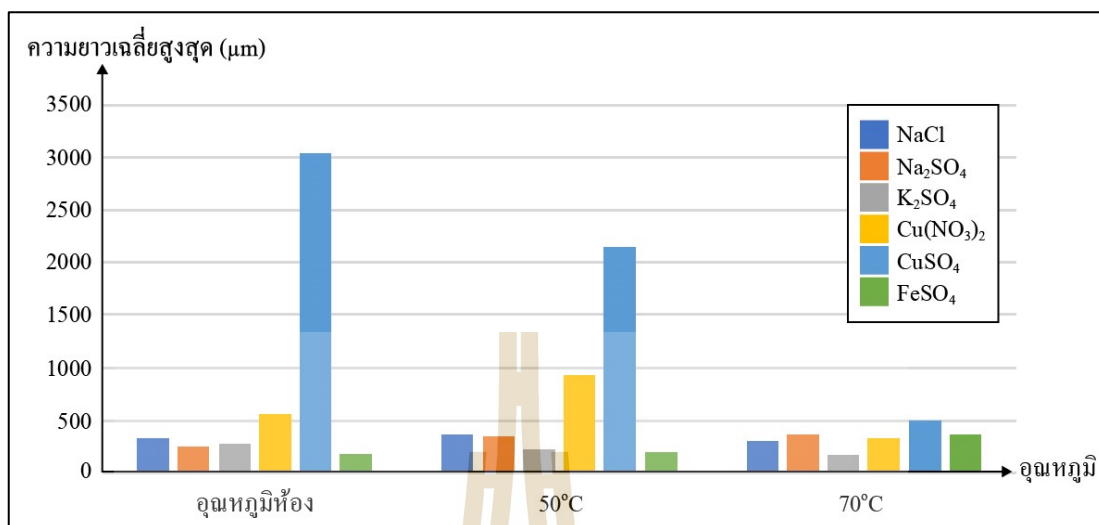
รูปที่ 5.74 ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ที่อิงกับอุณหภูมิ ในสารละลายไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นที่ อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าวอเตอร์ทรีอิงมีขนาดที่ยาวที่สุดที่การทดสอบในสารละลาย (i)  $\text{CuSO}_4$  (ii)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และ (iii)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.75



รูปที่ 5.75 ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงกับอุณหภูมิ ในสารละลายไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นที่ อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ คือ (i) อุณหภูมิห้อง (ii) 50°C และ (iii) 70°C ในสารละลายไอออนิกชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าวอเตอร์ทรีอิงมีขนาดที่ยาวที่สุดที่การทดสอบในสารละลาย (i)  $\text{CuSO}_4$  (ii)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และ (iii)  $\text{NaCl}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.76



รูปที่ 5.76 ความยาวเฉลี่ยสูงสุดของวอเตอร์ที่อิงกับอุณหภูมิ ในสารละลายไอออนิกทุกชนิด หลังจากทดสอบเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง

เนื่องจากการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไอออนิกให้มีค่า 0.1 mol/l ตลอดช่วงเวลาทดสอบของงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการออกแบบให้มีการปรับค่าความเข้มข้นแบบระบบปิดหรือวนลูวนะนั้นจึงมีการเปลี่ยนสารละลายไอออนิกทุก ๆ 500 ชั่วโมง (1 ครั้ง ต่อ 500 ชั่วโมง) เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายไอออนิกคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เมื่อมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายไอออนิก ต้องวัดค่า pH ของสารละลายไอออนิก ค่า pH ของสารละลายไอออนิก ดังแสดงในตารางที่ 5.5 ถึงตารางที่ 5.7

การเปลี่ยนสารละลายไอออนิกทุก ๆ 500 ชั่วโมง ในช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า pH มีค่าลดลงเรื่อย ๆ แสดงว่ายิ่งเวลาทดสอบนานขึ้น ค่าความเป็นกรดของสารละลายยิ่งสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.5

การเปลี่ยนสารละลายไอออนิกทุก ๆ 500 ชั่วโมง ในช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C พบว่า pH มีค่าลดลงเรื่อย ๆ แสดงว่ายิ่งเวลาทดสอบนานขึ้น ค่าความเป็นกรดของสารละลายยิ่งสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.6

การเปลี่ยนสารละลายไอออนิกทุก ๆ 500 ชั่วโมง ในช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C พบว่า pH มีค่าลดลงเรื่อย ๆ แสดงว่ายิ่งเวลาทดสอบนานขึ้น ค่าความเป็นกรดของสารละลายยิ่งสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.5 ค่า pH ของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงที่เปลี่ยนถ่ายสารละลาย ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

| ครั้งที่  | ค่า pH ของสารละลายไอออนิก |                                 |                                |                                   |                   |                   |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
|           | NaCl                      | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CuSO <sub>4</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| ก่อนทดสอบ | 6.49                      | 7.67                            | 6.84                           | 3.94                              | 4.04              | 2.63              |
| 1         | 6.44                      | 7.65                            | 6.82                           | 3.91                              | 3.99              | 2.61              |
| 2         | 6.40                      | 7.62                            | 6.80                           | 3.90                              | 3.85              | 2.60              |
| 3         | 6.37                      | 7.60                            | 6.79                           | 3.89                              | 3.82              | 2.58              |
| 4         | 6.34                      | 7.56                            | 6.79                           | 3.87                              | 3.80              | 2.55              |
| 5         | 6.29                      | 7.51                            | 6.65                           | 3.85                              | 3.73              | 2.54              |
| 6         | 6.25                      | 7.49                            | 6.51                           | 3.82                              | 3.69              | 2.51              |
| 7         | 6.23                      | 7.46                            | 6.49                           | 3.80                              | 3.63              | 2.49              |
| 8         | 6.21                      | 7.40                            | 6.42                           | 3.79                              | 3.62              | 2.42              |

ตารางที่ 5.6 ค่า pH ของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงที่เปลี่ยนถ่ายสารละลาย ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C

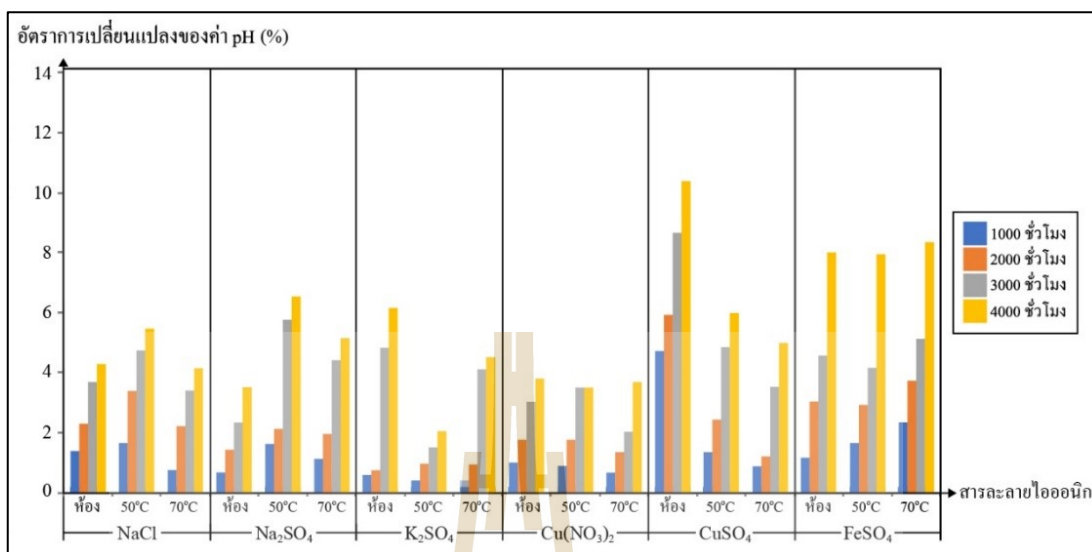
| ครั้งที่  | ค่า pH ของสารละลายไอออนิก |                                 |                                |                                   |                   |                   |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
|           | NaCl                      | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CuSO <sub>4</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| ก่อนทดสอบ | 6.74                      | 7.44                            | 7.24                           | 3.43                              | 3.70              | 2.40              |
| 1         | 6.68                      | 7.42                            | 7.21                           | 3.42                              | 3.66              | 2.39              |
| 2         | 6.63                      | 7.32                            | 7.21                           | 3.40                              | 3.65              | 2.36              |
| 3         | 6.57                      | 7.30                            | 7.20                           | 3.39                              | 3.64              | 2.32              |
| 4         | 6.51                      | 7.28                            | 7.17                           | 3.37                              | 3.61              | 2.33              |
| 5         | 6.45                      | 7.15                            | 7.15                           | 3.31                              | 3.58              | 2.30              |
| 6         | 6.42                      | 7.01                            | 7.13                           | 3.31                              | 3.52              | 2.30              |
| 7         | 6.40                      | 6.99                            | 7.12                           | 3.20                              | 3.50              | 2.23              |
| 8         | 6.37                      | 6.95                            | 7.09                           | 3.13                              | 3.48              | 2.21              |

ตารางที่ 5.7 ค่า pH ของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงที่เปลี่ยนถ่ายสารละลาย ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C

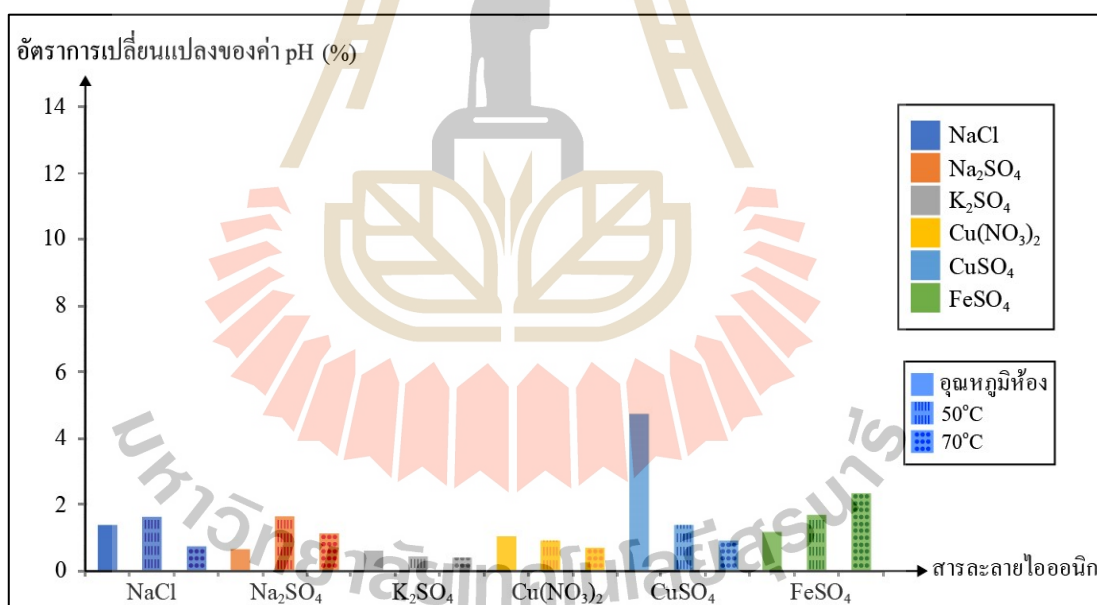
| ครั้งที่  | ค่า pH ของสารละลายไอออนิก |                                 |                                |                                   |                   |                   |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
|           | NaCl                      | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CuSO <sub>4</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| ก่อนทดสอบ | 6.77                      | 7.23                            | 7.52                           | 2.97                              | 3.37              | 2.15              |
| 1         | 6.75                      | 7.19                            | 7.51                           | 2.95                              | 3.36              | 2.06              |
| 2         | 6.72                      | 7.15                            | 7.49                           | 2.95                              | 3.34              | 2.10              |
| 3         | 6.67                      | 7.12                            | 7.46                           | 2.95                              | 3.34              | 2.05              |
| 4         | 6.62                      | 7.09                            | 7.45                           | 2.93                              | 3.33              | 2.07              |
| 5         | 6.59                      | 7.03                            | 7.25                           | 2.92                              | 3.29              | 2.06              |
| 6         | 6.54                      | 6.91                            | 7.21                           | 2.91                              | 3.25              | 2.04              |
| 7         | 6.51                      | 6.88                            | 7.19                           | 2.88                              | 3.22              | 2.00              |
| 8         | 6.49                      | 6.86                            | 7.18                           | 2.86                              | 3.20              | 1.08              |

จากตารางที่ 5.5 ถึงตารางที่ 5.7 นำมาสร้างกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในแต่ละช่วงเวลาทดสอบ คือ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.77 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ช่วงเวลาทดสอบ การเพิ่มขึ้นของ pH อาจส่งผลให้ค่าความยาวของวอเตอร์ทรีอิงมากขึ้น ส่วนในรูปที่ 5.78 ถึงรูปที่ 5.81 แสดงกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายไอออนิกในช่วงเวลาทดสอบต่าง ๆ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ในสารละลายชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ แนวโน้มการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงเป็นไปตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ยกเว้นในสารละลายไอออนิก K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงไม่ได้ขึ้นกับค่า pH เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.78



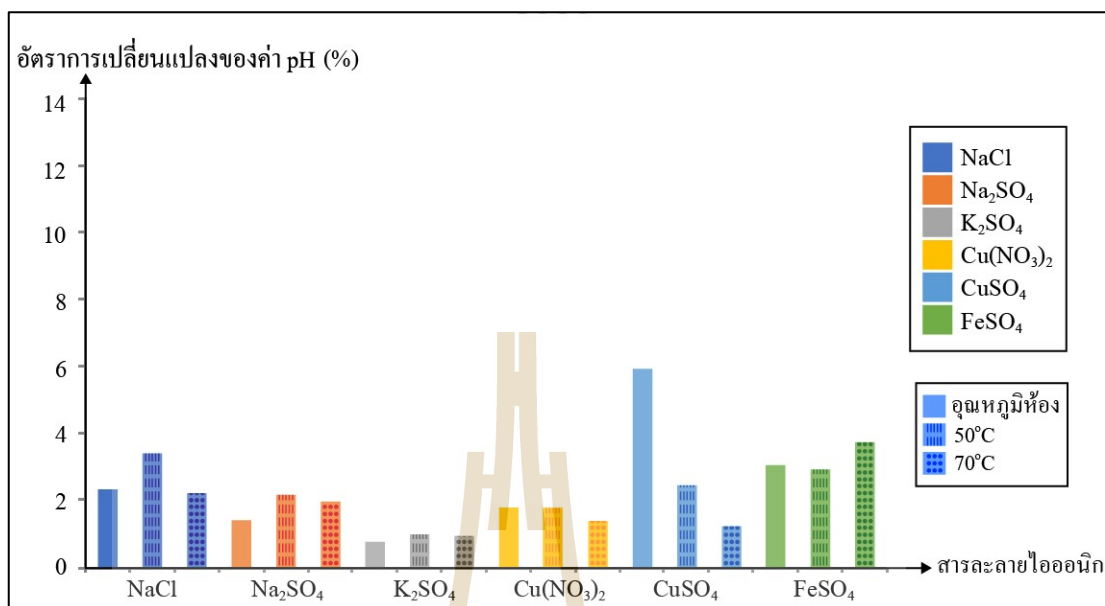
รูปที่ 5.77. อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก



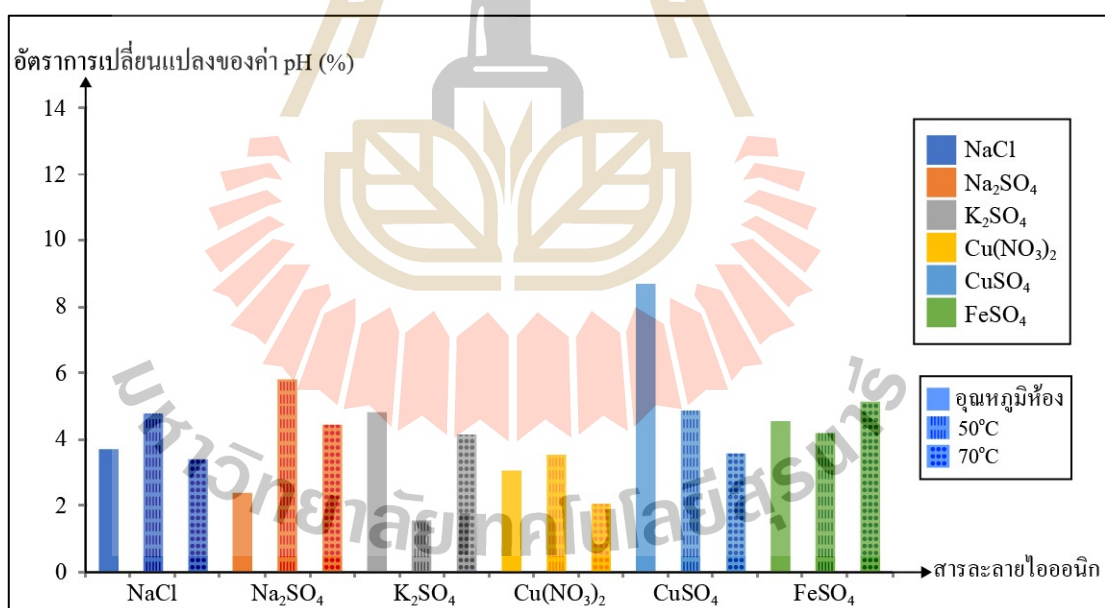
รูปที่ 5.78 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 1000 ชั่วโมง

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง ในสารละลายชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ แนวโน้มการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงเป็นไปตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ดังแสดงในรูปที่ 5.79



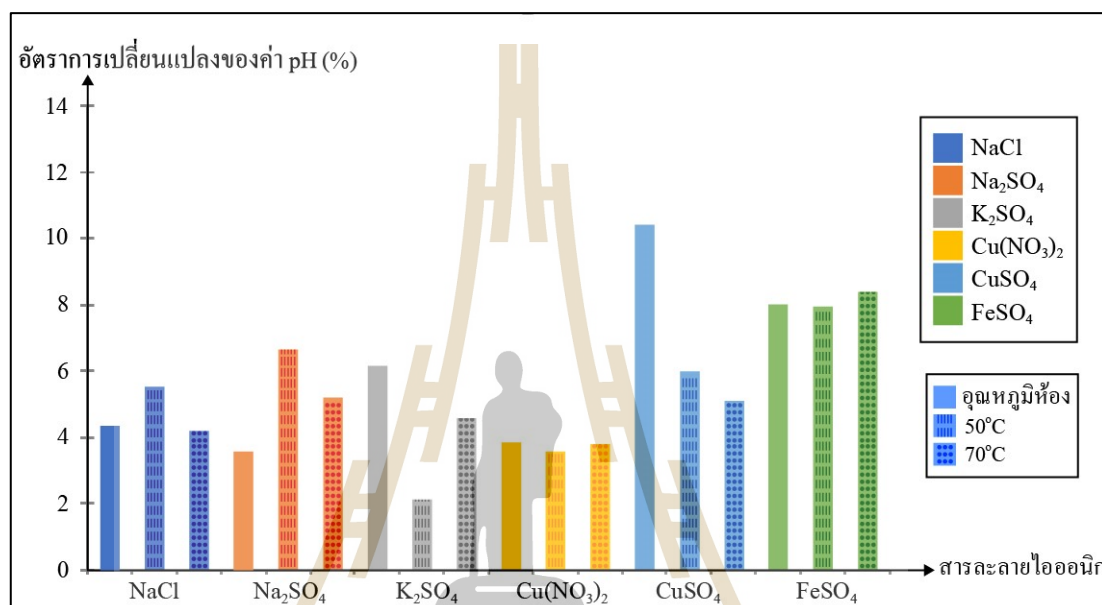


รูปที่ 5.79 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.80 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 3000 ชั่วโมง

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง ในสารละลายชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ แนวโน้มการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงเป็นไปตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ยกเว้นในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงไม่ได้ขึ้นกับค่า pH เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.80



รูปที่ 5.81 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายไอออนิก 4000 ชั่วโมง

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง ในสารละลายชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าโดยส่วนใหญ่ แนวโน้มการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงเป็นไปตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ยกเว้นในสารละลายไอออนิก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงไม่ได้ขึ้นกับค่า pH เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.81

เนื่องจากการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไอออนิกให้มีค่า 0.1 mol/L ตลอดช่วงเวลาทดสอบไม่ได้ออกแบบให้สามารถปรับค่าความเข้มข้นแบบระบบปิดหรือวนลูป ฉะนั้นจึงเปลี่ยนสารละลายไอออนิกทุก ๆ 500 ชั่วโมง เพื่อให้ค่าการนำไฟฟ้าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยในตารางที่ 5.8 ถึงตารางที่ 5.10 แสดงค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก

การทดสอบค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงว่ายิ่งเวลาทดสอบนานขึ้นการนำไฟฟ้าของสารละลายยิ่งมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.8

การทดสอบค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงว่ายิ่งเวลาทดสอบนานขึ้นการนำไฟฟ้าของสารละลายยิ่งมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.9

การทดสอบค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงว่ายิ่งเวลาทดสอบนานขึ้นการนำไฟฟ้าของสารละลายยิ่งมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.8 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกจากการทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

| ครั้งที่  | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก (S/m) |                                 |                                |                                   |                   |                   |
|-----------|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
|           | NaCl                                   | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CuSO <sub>4</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| ก่อนทดสอบ | 1.049                                  | 1.405                           | 1.609                          | 1.391                             | 0.535             | 1.036             |
| 1         | 1.112                                  | 1.500                           | 1.697                          | 1.417                             | 0.811             | 1.059             |
| 2         | 1.203                                  | 1.504                           | 1.722                          | 1.422                             | 0.893             | 1.101             |
| 3         | 1.221                                  | 1.532                           | 1.737                          | 1.620                             | 0.992             | 1.188             |
| 4         | 1.251                                  | 1.597                           | 1.795                          | 1.621                             | 1.023             | 1.195             |
| 5         | 1.261                                  | 1.666                           | 1.835                          | 1.777                             | 1.202             | 1.225             |
| 6         | 1.302                                  | 1.773                           | 2.017                          | 1.824                             | 1.402             | 1.288             |
| 7         | 1.332                                  | 1.799                           | 2.200                          | 1.830                             | 1.457             | 1.309             |
| 8         | 1.401                                  | 1.832                           | 2.255                          | 1.839                             | 1.511             | 1.401             |

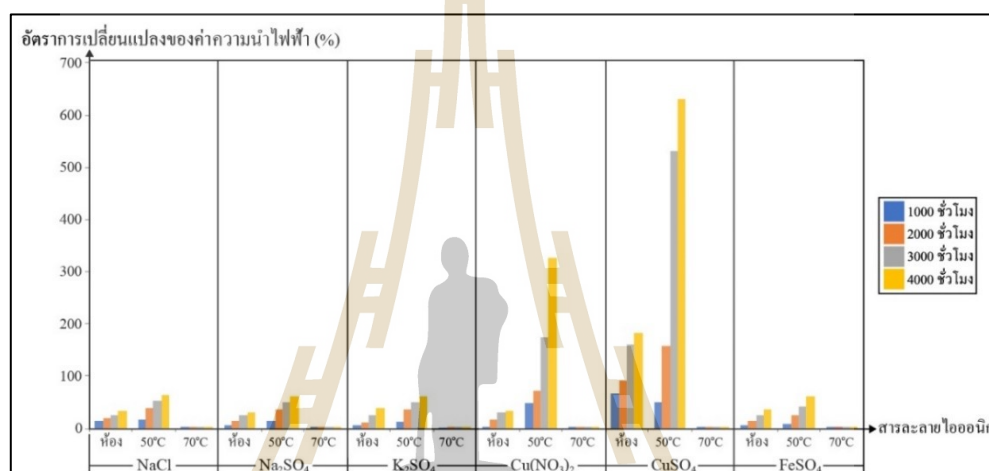
ตารางที่ 5.9 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกจากการทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล  
ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C

| ครั้งที่  | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก (S/m) |                                 |                                |                                   |                   |                   |
|-----------|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
|           | NaCl                                   | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CuSO <sub>4</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| ก่อนทดสอบ | 0.676                                  | 0.848                           | 0.739                          | 0.130                             | 0.136             | 0.558             |
| 1         | 0.690                                  | 0.894                           | 0.755                          | 0.190                             | 0.155             | 0.599             |
| 2         | 0.713                                  | 0.993                           | 0.843                          | 0.195                             | 0.203             | 0.602             |
| 3         | 0.755                                  | 1.099                           | 0.971                          | 0.206                             | 0.310             | 0.683             |
| 4         | 0.779                                  | 1.187                           | 0.997                          | 0.225                             | 0.350             | 0.703             |
| 5         | 0.788                                  | 1.219                           | 1.002                          | 0.321                             | 0.701             | 0.751             |
| 6         | 0.791                                  | 1.292                           | 1.104                          | 0.356                             | 0.860             | 0.789             |
| 7         | 0.813                                  | 1.355                           | 1.120                          | 0.465                             | 0.877             | 0.811             |
| 8         | 0.850                                  | 1.401                           | 1.201                          | 0.556                             | 0.993             | 0.893             |

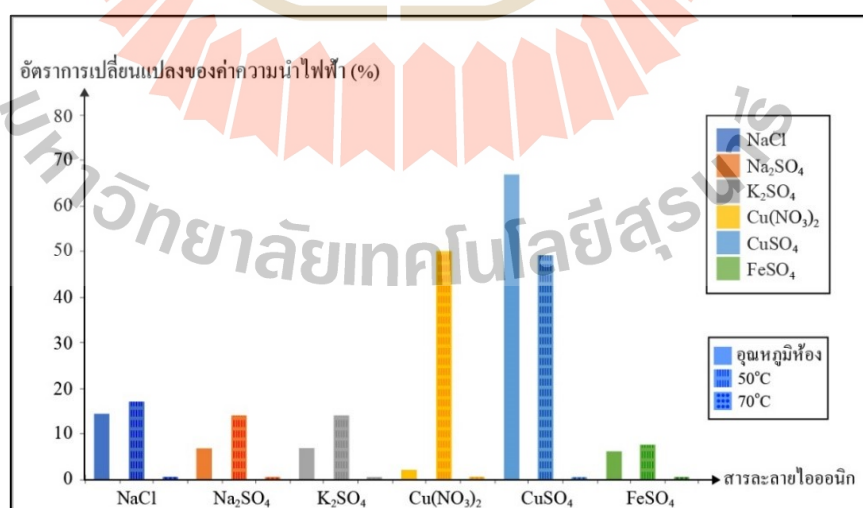
ตารางที่ 5.10 ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกจากการทดสอบวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิล  
ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C

| ครั้งที่  | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก (S/m) |                                 |                                |                                   |                   |                   |
|-----------|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
|           | NaCl                                   | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | CuSO <sub>4</sub> | FeSO <sub>4</sub> |
| ก่อนทดสอบ | 1.770                                  | 1.771                           | 1.762                          | 1.778                             | 1.769             | 1.774             |
| 1         | 1.930                                  | 1.877                           | 1.775                          | 1.800                             | 1.788             | 1.793             |
| 2         | 2.000                                  | 1.901                           | 1.799                          | 1.810                             | 1.800             | 1.803             |
| 3         | 2.210                                  | 1.983                           | 1.812                          | 1.899                             | 1.834             | 1.851             |
| 4         | 2.350                                  | 2.010                           | 1.850                          | 1.921                             | 1.863             | 1.889             |
| 5         | 2.510                                  | 3.850                           | 1.998                          | 1.973                             | 1.993             | 1.897             |
| 6         | 2.830                                  | 4.020                           | 2.103                          | 2.006                             | 1.963             | 1.993             |
| 7         | 2.740                                  | 4.560                           | 2.150                          | 2.017                             | 1.997             | 2.001             |
| 8         | 2.990                                  | 4.720                           | 2.200                          | 2.103                             | 2.201             | 2.103             |

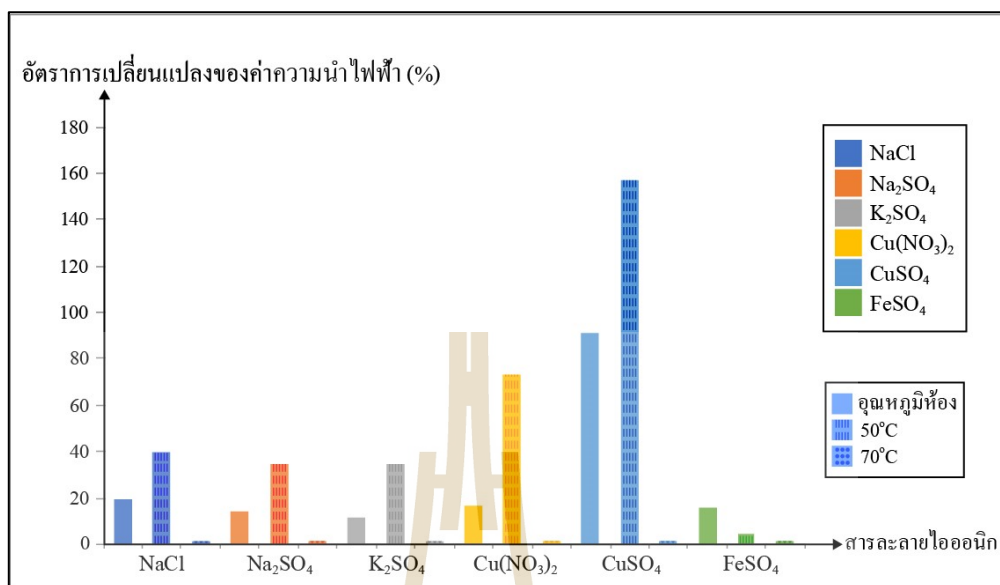
จากตารางที่ 5.8 ถึงตารางที่ 5.10 นำมาสร้างกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้า แต่ละช่วงเวลาทดสอบ คือ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5.82 พบว่าทุกสารละลายไอออนิกมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ช่วงเวลาทดสอบ โดยเฉพาะในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าไวที่สุด ซึ่งอาจส่งผลต่อความยาวของวอเตอร์ทรีอิ่งที่เพิ่มขึ้น โดยรูปที่ 5.83 ถึงรูปที่ 5.86 เป็นกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกในแต่ละช่วงเวลาทดสอบ



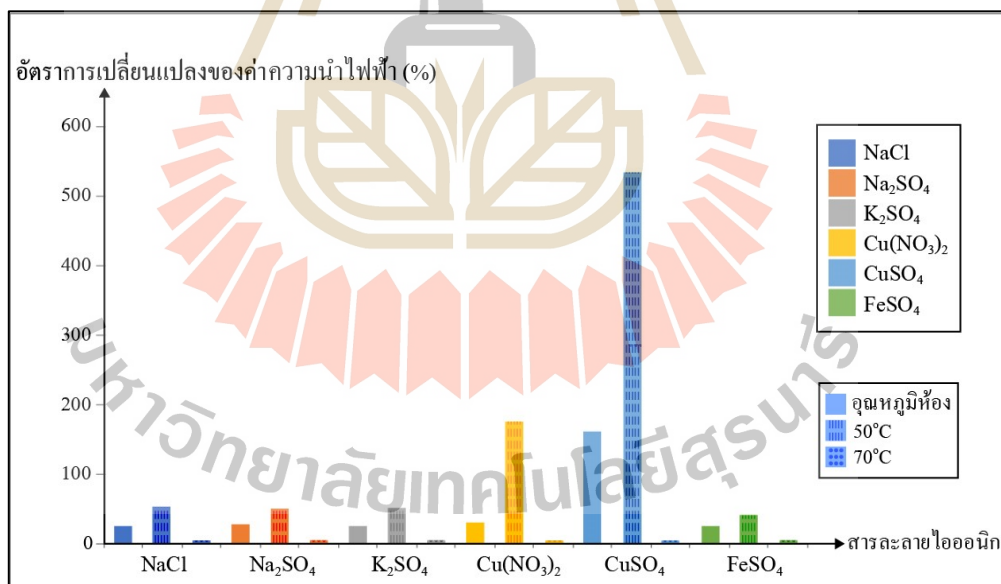
รูปที่ 5.82 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก



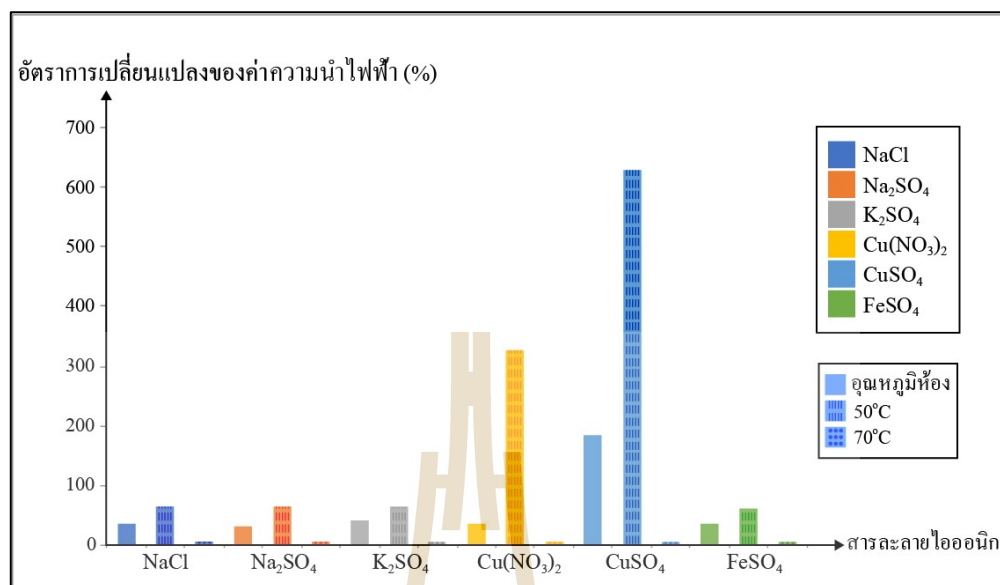
รูปที่ 5.83 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก ในช่วงเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.84 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก ในช่วงเวลาทดสอบ 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.85 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก ในช่วงเวลาทดสอบ 3000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.86 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก ในช่วงเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง

### 5.3 วิเคราะห์ผลของลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวอเทอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE

#### 5.3.1 ผลของสารละลายไอออนิกต่อการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง

จากตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.4 หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง จะเห็นว่าวอเทอร์ทรีอิงคล้ายครีมีแนวโน้มความยาวเฉลี่ยสูงสุดในสารละลายไอออนิก CuSO<sub>4</sub> ในทุก ๆ ช่วงเวลาทดสอบและแนวโน้มความยาวเฉลี่ยต่ำสุดในการทดสอบที่ใช้สารละลายไอออนิก FeSO<sub>4</sub> และ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> เกือบทุก ๆ ช่วงเวลาทดสอบ ดังการอภิปรายต่อไปนี้

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สารละลายไอออนิกที่มีผลต่อความยาวของวอเทอร์ทรีอิงมากที่สุดคือ (i) CuSO<sub>4</sub> (ii) NaCl (iii) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (iv) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (v) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub> ตามลำดับ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C สารละลายไอออนิกที่มีผลต่อความยาวของวอเทอร์ทรีอิงมากที่สุดคือ (i) CuSO<sub>4</sub> (ii) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (iii) NaCl (iv) K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (v) Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> และ (vi) FeSO<sub>4</sub> ตามลำดับ





### 5.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง

จากรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-4000 ชั่วโมง จะเห็นว่าผลของอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงคล้ายครีป ในแต่ละสารละลายมีพฤติกรรมแตกต่างกันไป ดังนี้

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ในสารละลาย NaCl แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าความยาวของวอเทอร์ทรีอิงสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ในสารละลาย Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าความยาวของวอเทอร์ทรีอิงสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ แต่พอเพิ่มเวลาทดสอบไปที่ 3000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-2000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ในสารละลาย K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าความยาวของวอเทอร์ทรีอิงสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ แต่พอเพิ่มเวลาทดสอบไปที่ 3000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-3000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ในสารละลาย Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าความยาวของวอเทอร์ทรีอิงสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ แต่พอเพิ่มเวลาทดสอบไปที่ 4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ในสารละลาย CuSO<sub>4</sub> แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าความยาวของวอเทอร์ทรีอิงสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1000-4000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70°C ในสารละลาย FeSO<sub>4</sub> แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงมีค่าความยาวของวอเทอร์ทรีอิงสูงกว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

### 5.3.3 ผลของค่า pH ต่อการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่ได้มาจากค่า pH พบว่า เมื่อเทียบค่า pH เฉพาะในแต่ละสารละลายที่อุณหภูมิต่างกัน แนวโน้มการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง (รูปที่ 5.73 ถึงรูปที่ 5.76) เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่า pH นี้มีผลต่อการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิง ดังนั้นในการทดลองแนะนำว่าจำเป็นต้องมีการเพิ่มการควบคุมในเรื่องของความเข้มข้นของสารละลายให้ดีขึ้น เพื่อให้การทดสอบสายเคเบิล XLPE มีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

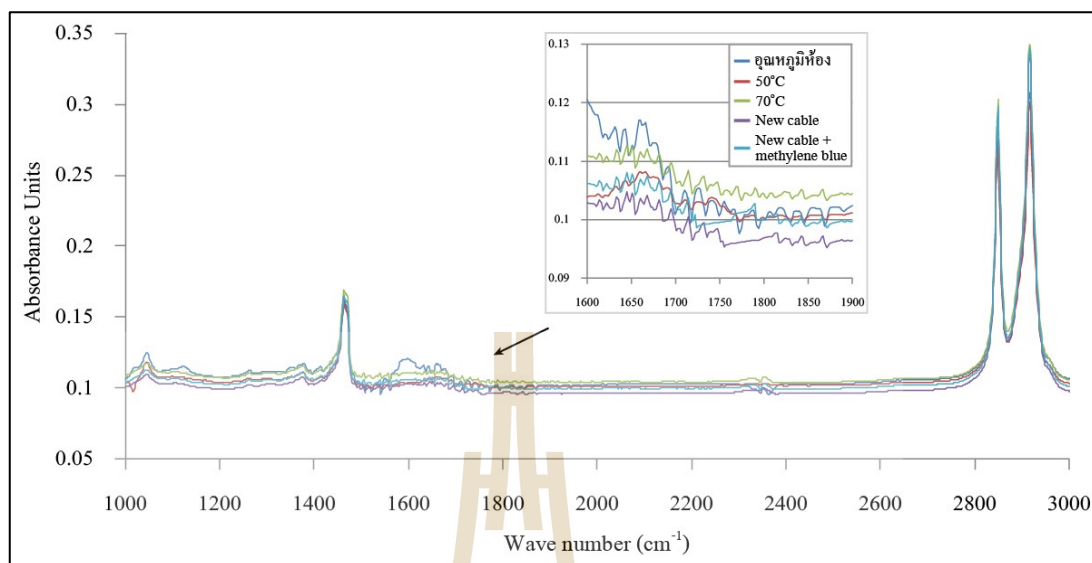
### 5.3.4 ผลของค่าความนำไฟฟ้าต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่ง

ดังแสดงในรูปที่ 5.83 ถึงรูปที่ 5.86 จะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  หลังการทดสอบมีค่าสูงขึ้นมากเนื่องจากการวัดลักษณะทางกายภาพของวอเตอร์ทรีอิ่งที่ 3000 ชั่วโมงในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  เริ่มมีการเปลี่ยนจากวอเตอร์ทรีอิ่งเป็นทรีอิ่งทางไฟฟ้า ทำให้การนำไฟฟ้าของสายเคเบิลมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายไอออนิกมีค่าสูงขึ้นตาม ดังนั้นการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไอออนิกให้คงที่จึงสำคัญมากในการทดสอบ ดังนั้นในการออกแบบที่ดีกว่านี้ควรมีอุปกรณ์วัดค่า pH และค่าความนำไฟฟ้า เพื่อทำการเปลี่ยนหรือเติมอัตโนมัติ

### 5.4 ผลการทดสอบลักษณะโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ทรีอิ่งในฉนวน XLPE

หลังจากที่นำฉนวน XLPE ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ของสายเคเบิล 22 kV ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิ่งภายในเนื้อฉนวนเพื่อทดสอบหาปฏิกิริยาการเผาไหม้และปฏิกิริยาออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนจากการทดสอบวอเตอร์ทรีอิ่งที่แรงดัน 24 kV 50 Hz อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 50°C และอุณหภูมิ 70°C ช่วงเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง 2000 ชั่วโมง 3000 ชั่วโมง และ 4000 ชั่วโมง ด้วยเครื่องมือที่ใช้เทคนิคแบบ ฟลูออโรสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 5.87 ถึงรูปที่ 5.111 โดยอินฟราเรดของฉนวน XLPE ใหม่ ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ จะแสดงเป็นตัวอย่างเฉพาะในรูปที่ 5.87

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย NaCl เทียบกับวอเตอร์ทรีอิ่งในฉนวน XLPE ใหม่และในฉนวน XLPE ที่ข้อมลีส สำหรับช่วงเวลาทดสอบ 1000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากสเปกตรัม โดยตรงพบว่า เส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งต่ำกว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวนใหม่และฉนวนที่ข้อมลีสด้วยเมทิลีนบลู ดังแสดงในรูปที่ 5.87



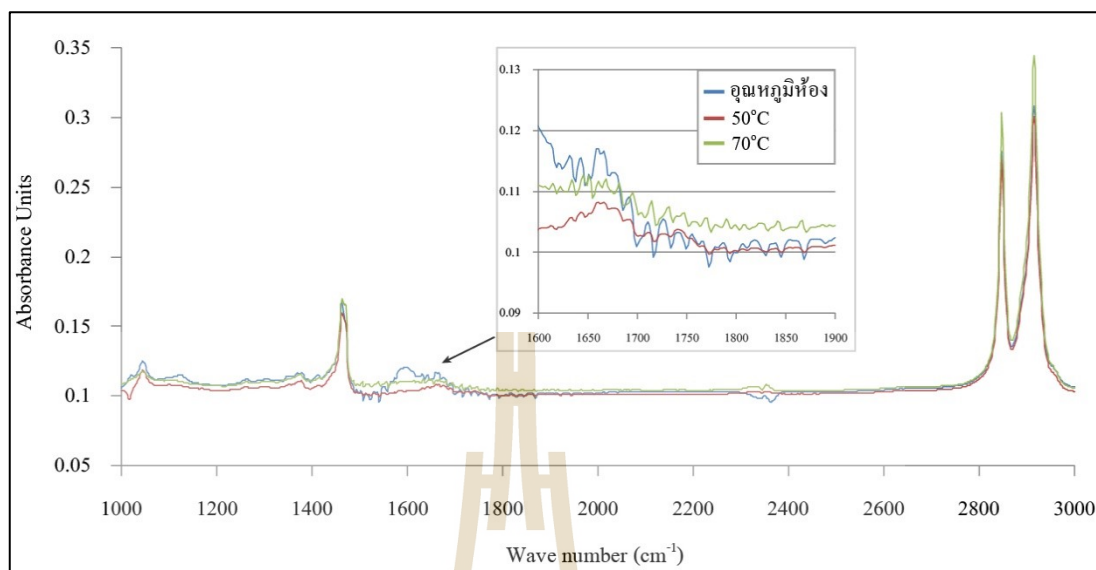
รูปที่ 5.87 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl เทียบกับวอเทอร์ทรีอิง  
ในฉนวน XLPE ใหม่และในฉนวน XLPE ที่ย้อมสี หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง  
ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิห้องอยู่สูง  
ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.88

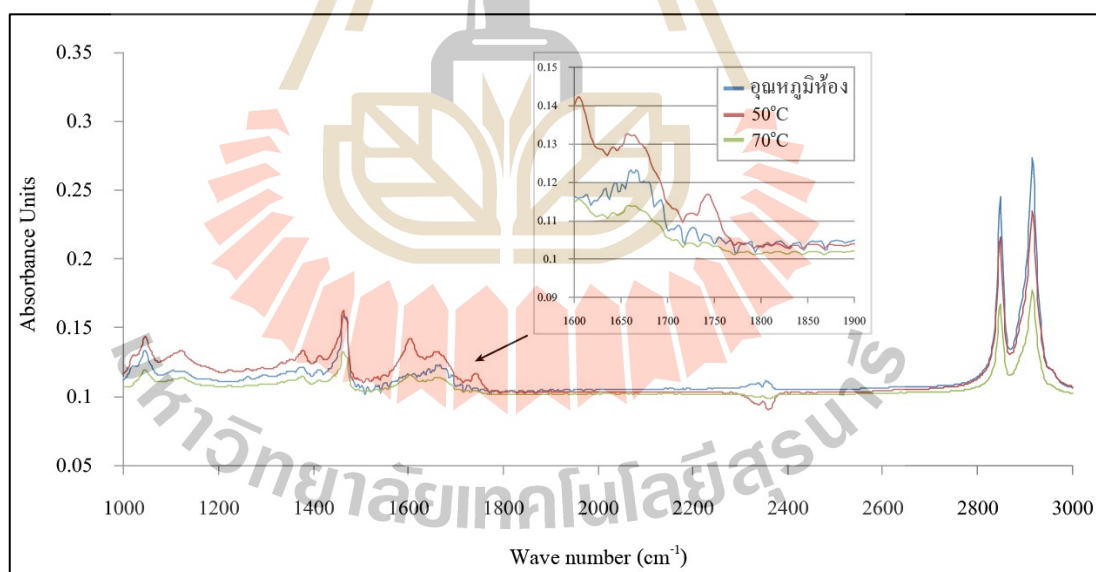
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง  
ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิ 50°C อยู่สูง  
ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.89

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง  
ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิ 50°C อยู่สูง  
ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.90

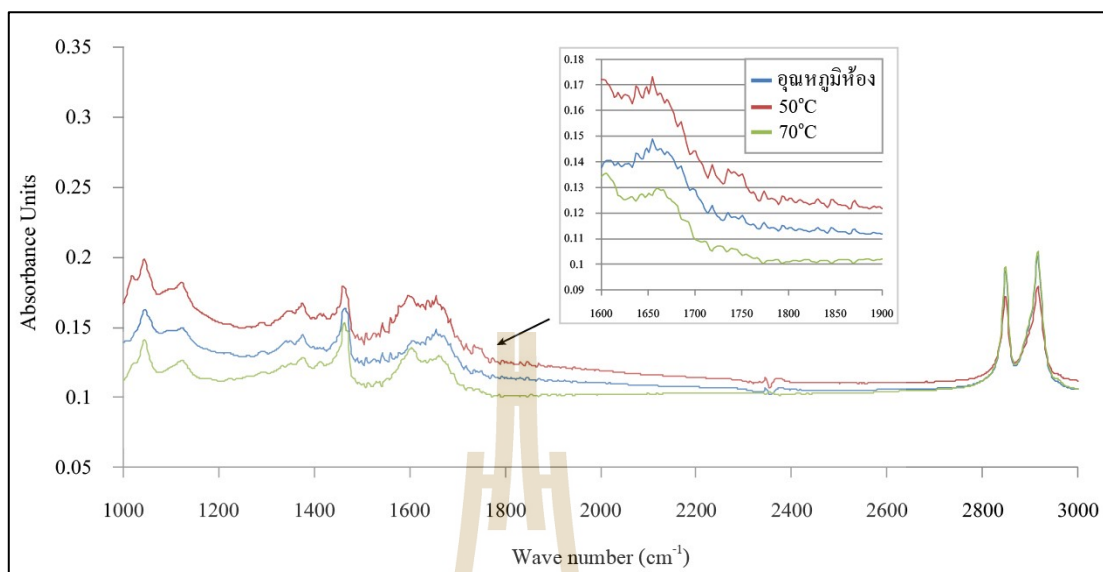
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง  
ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิ 70°C อยู่สูง  
ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.91



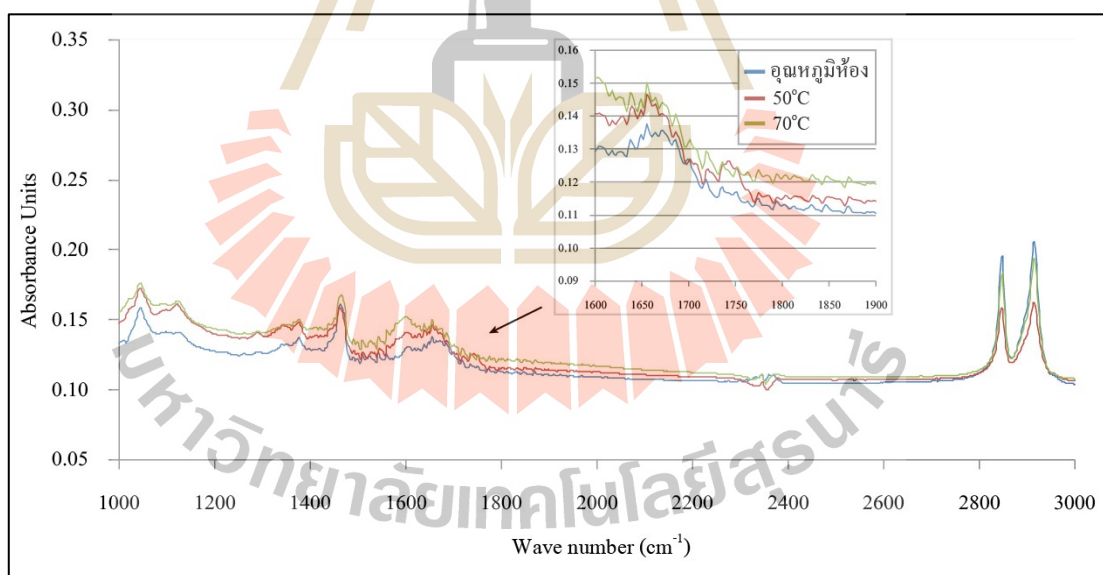
รูปที่ 5.88 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทีริอิ่งในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.89 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทีริอิ่งในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.90 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง



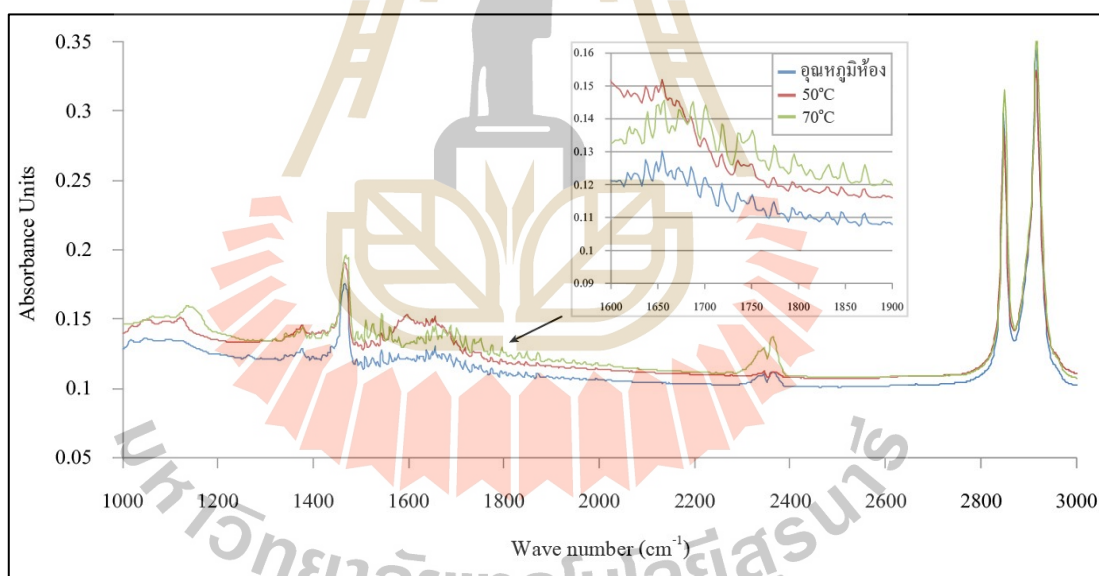
รูปที่ 5.91 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.92

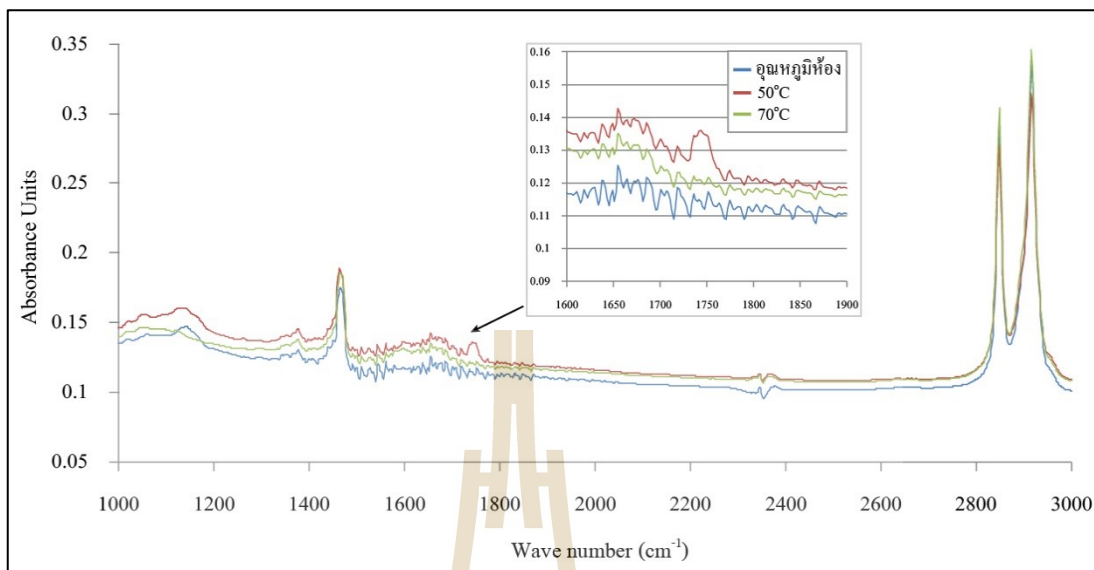
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.93

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.94

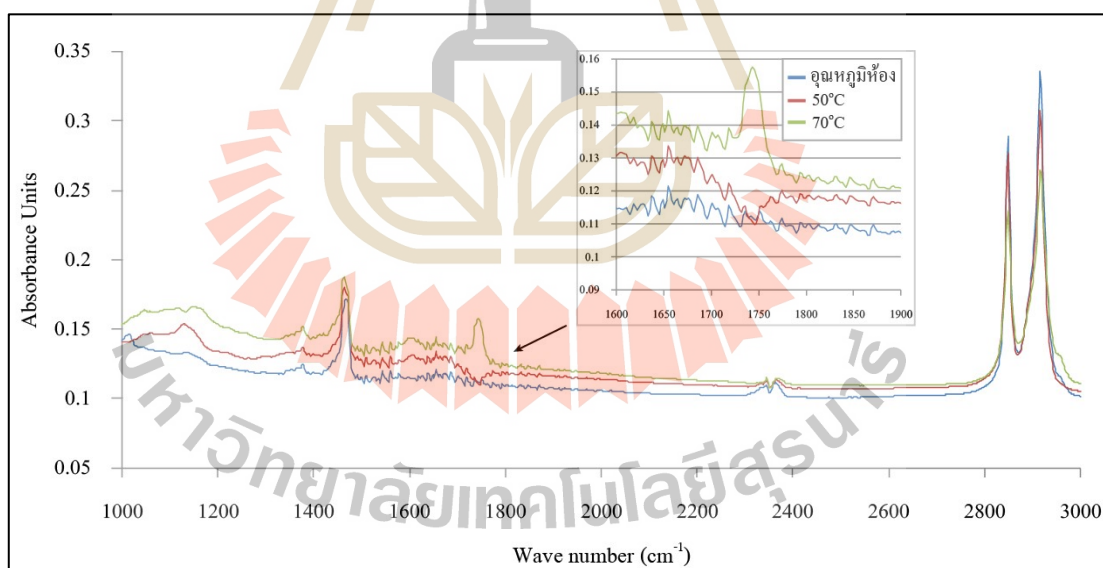
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.95



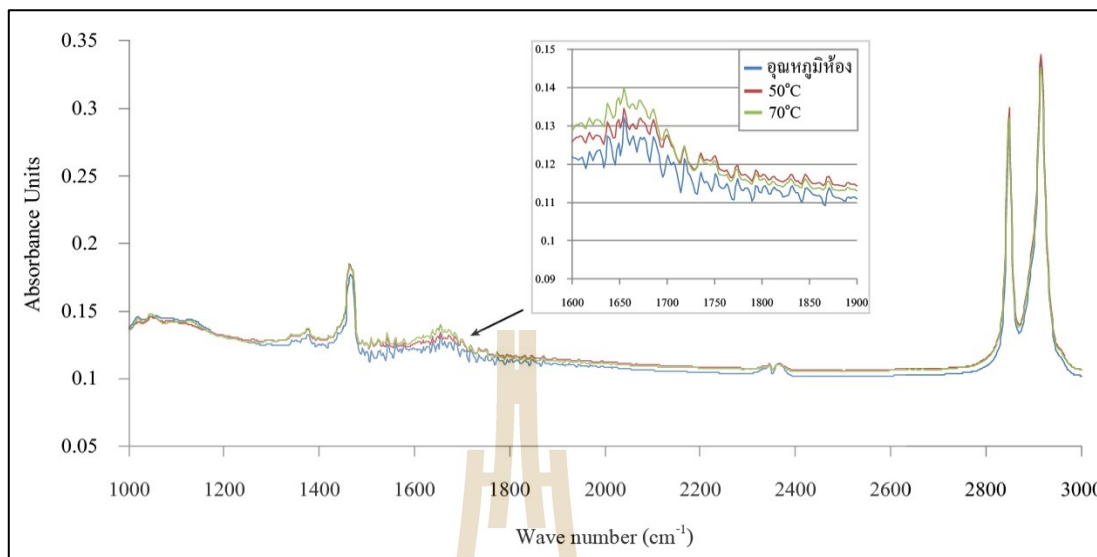
รูปที่ 5.92 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.93 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทีริงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.94 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทีริงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.95 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง

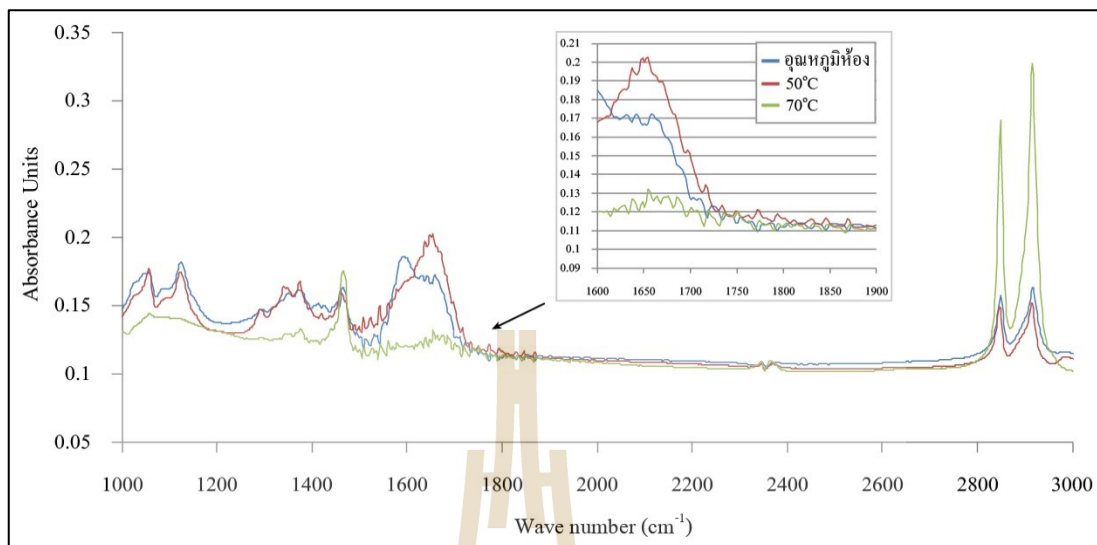
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.96

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.97

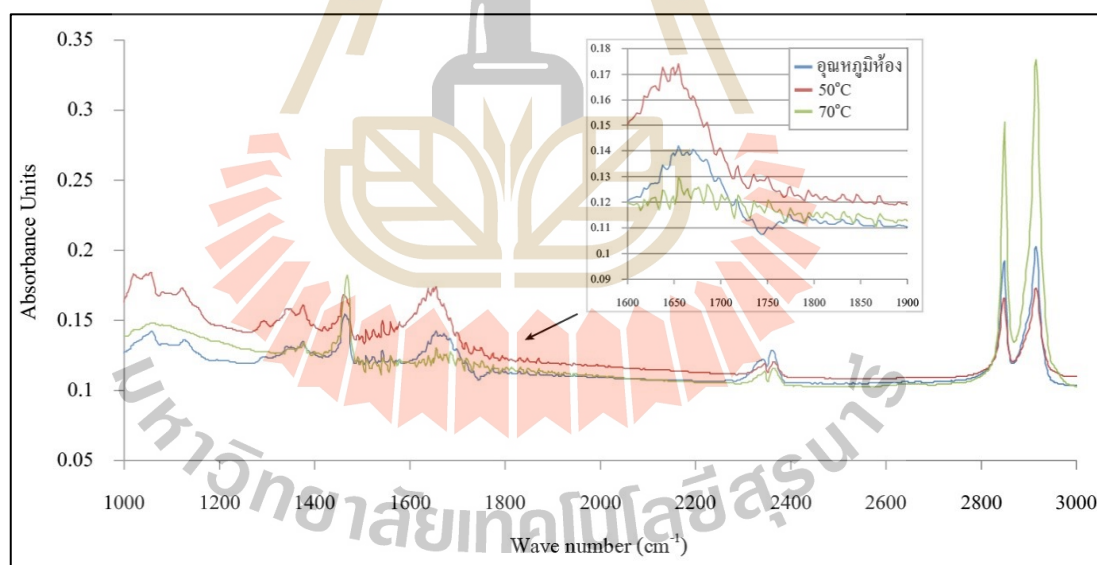
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิห้อง อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.98

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิห้อง อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.99

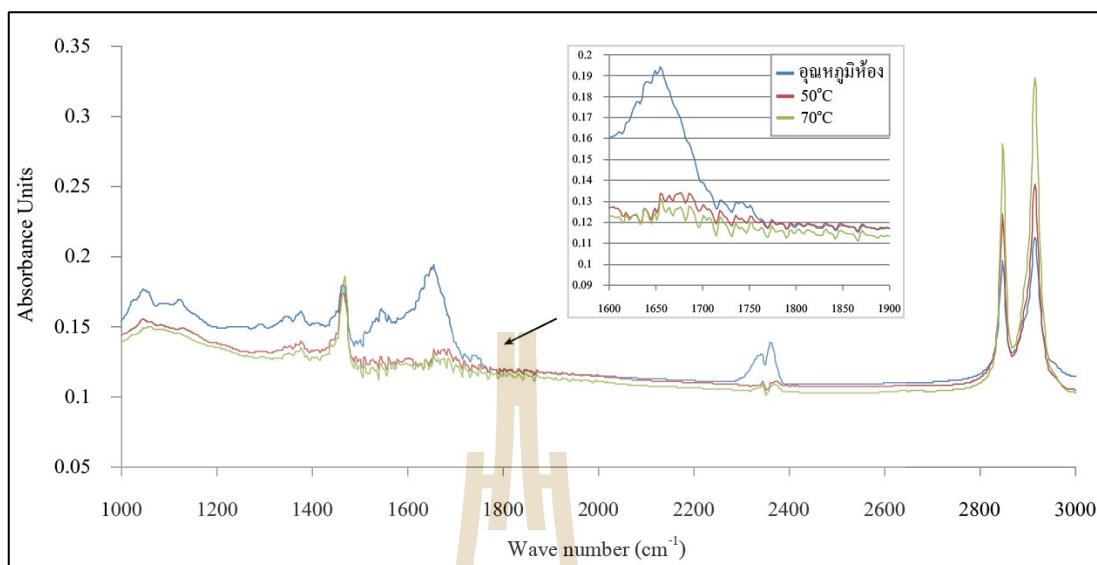




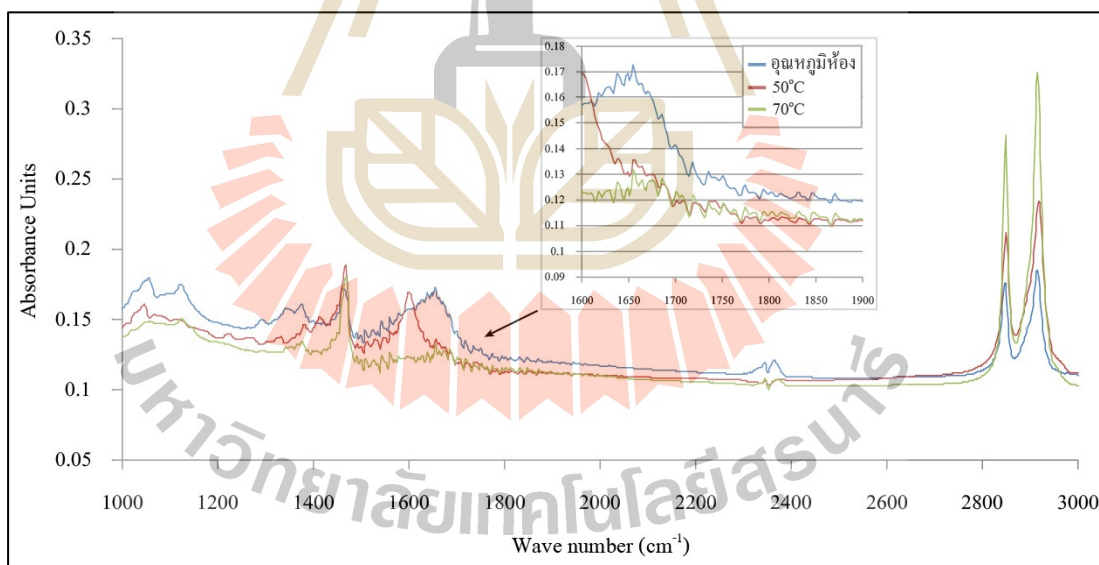
รูปที่ 5.96 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิงในสารละลาย  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.97 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิงในสารละลาย  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.98 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิงในสารละลาย  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง



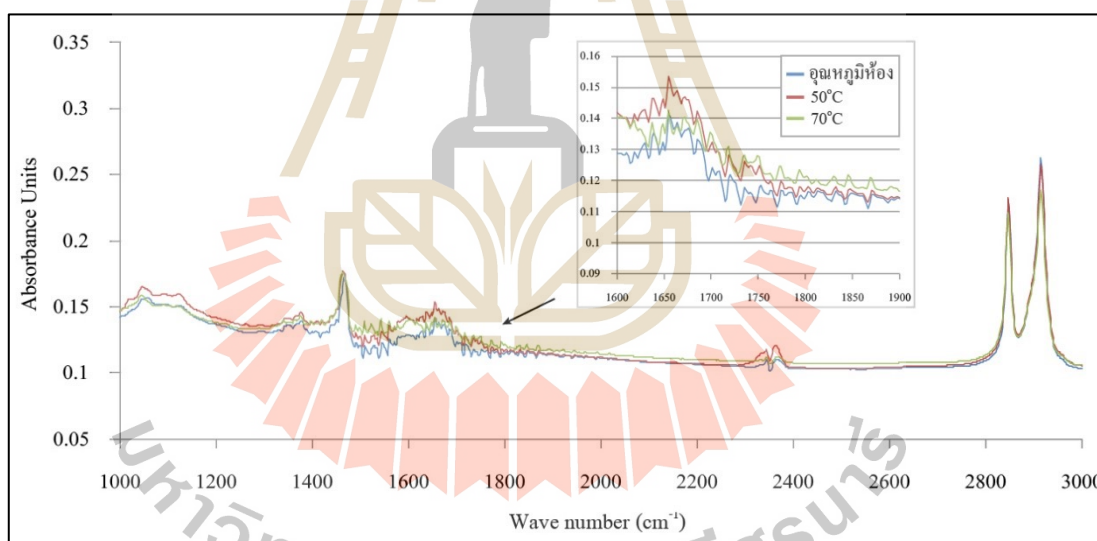
รูปที่ 5.99 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิงในสารละลาย  $K_2SO_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.100

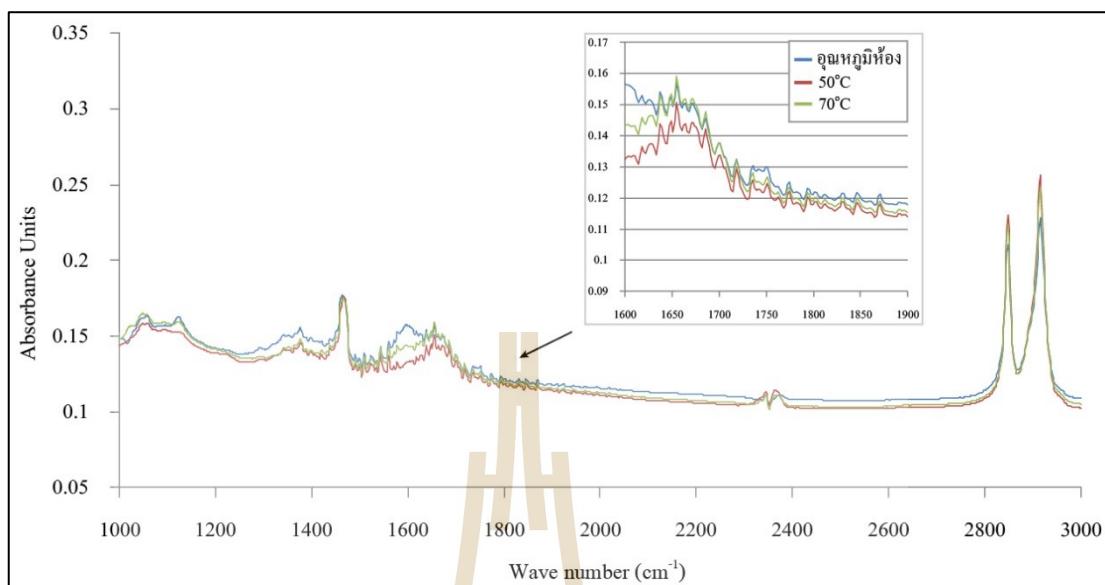
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.101

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.102

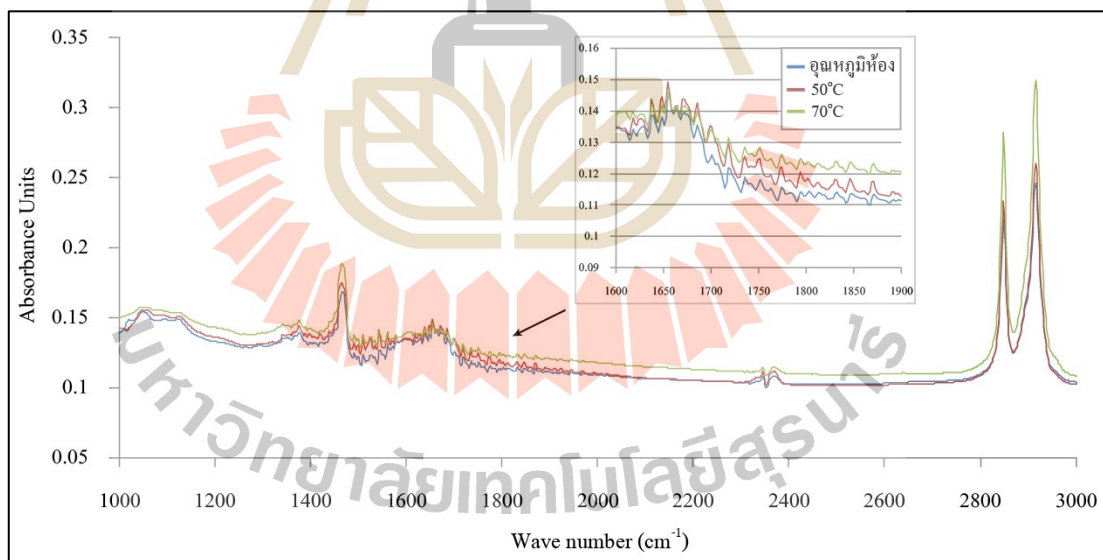
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.103



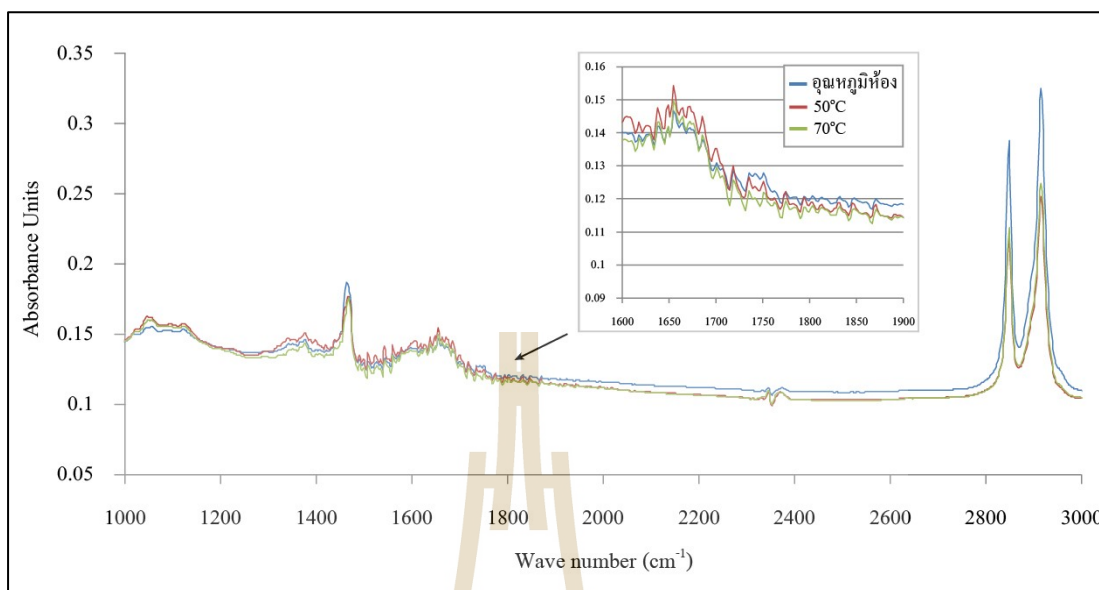
รูปที่ 5.100 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.101 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.102 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่รีอิ่งในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง



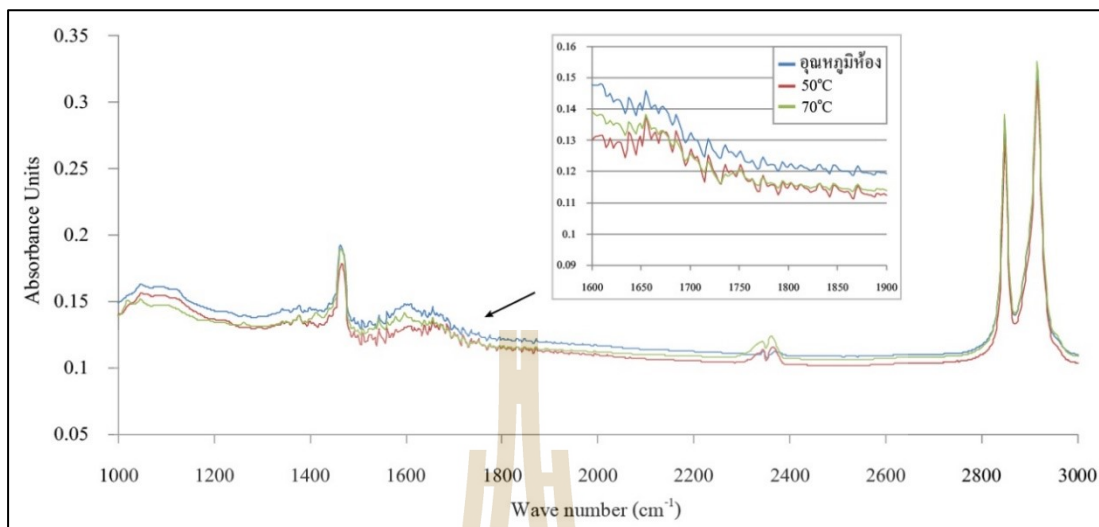
รูปที่ 5.103 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิห้อง อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.104

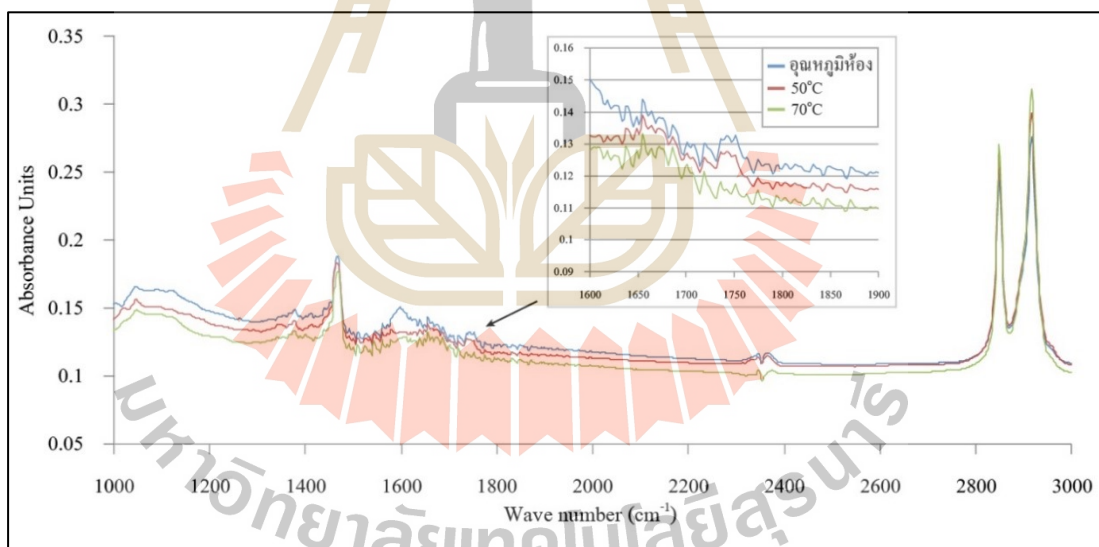
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิห้อง อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.105

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.106

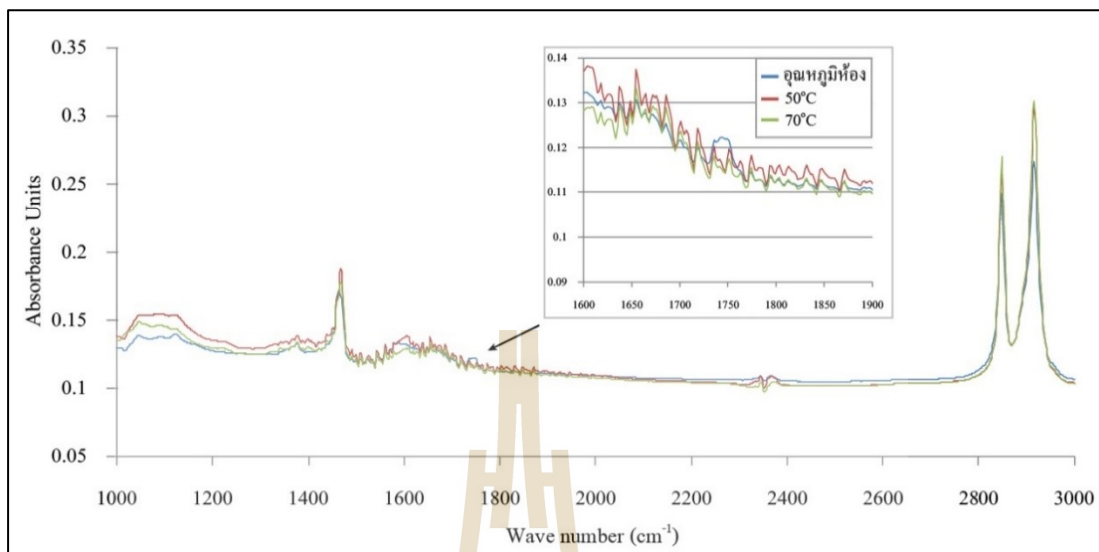
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิงที่อุณหภูมิห้อง อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.107



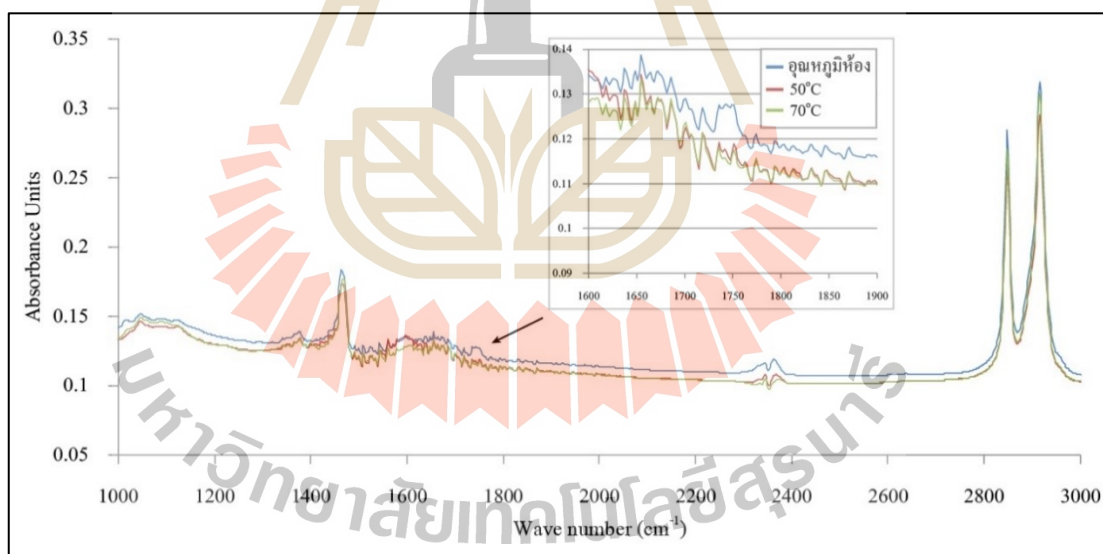
รูปที่ 5.104 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทีอิ่งในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.105 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทีอิ่งในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.106 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง



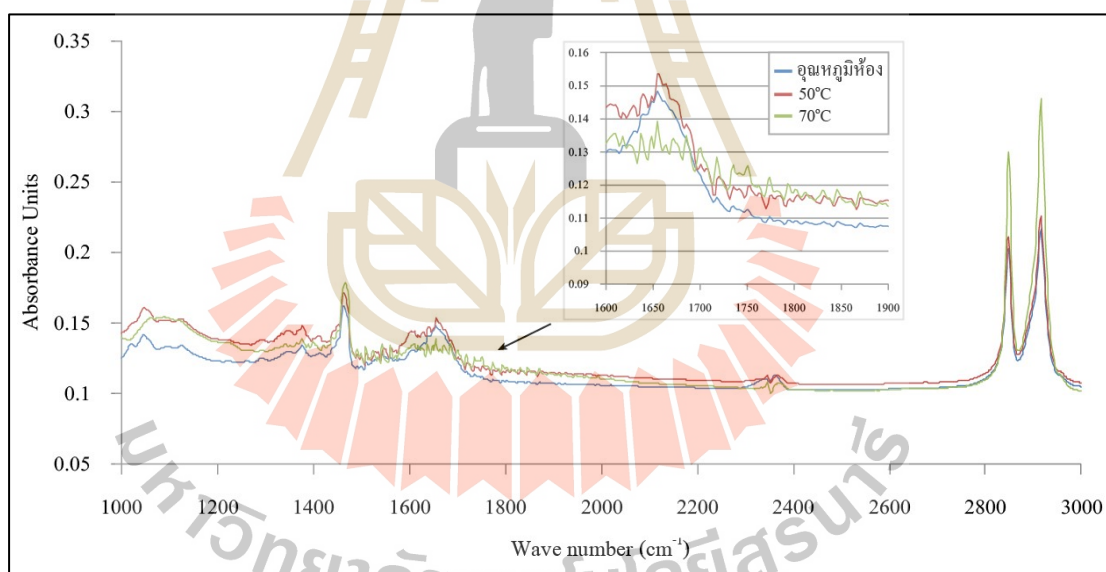
รูปที่ 5.107 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.108

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.109

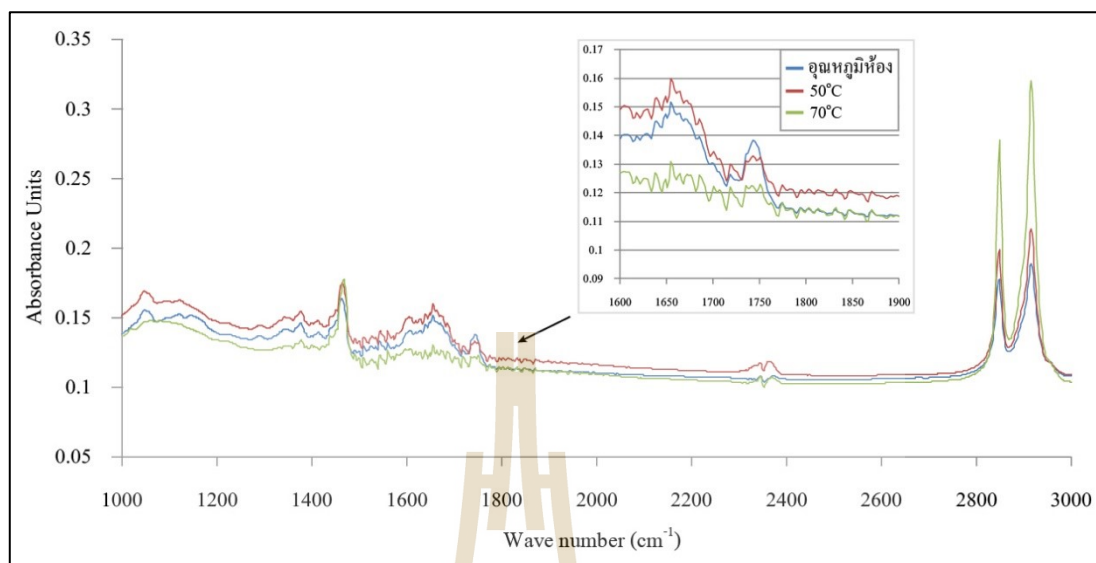
อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.110

อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากกราฟโดยตรงพบว่าเส้นอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งที่อุณหภูมิห้อง อยู่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.111

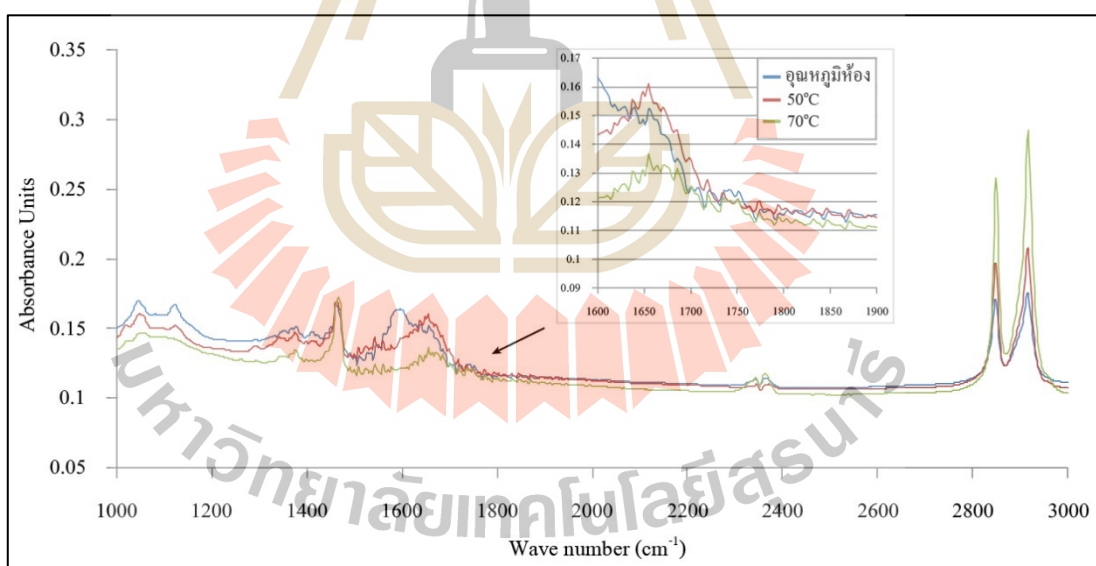


รูปที่ 5.108 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 1000 ชั่วโมง

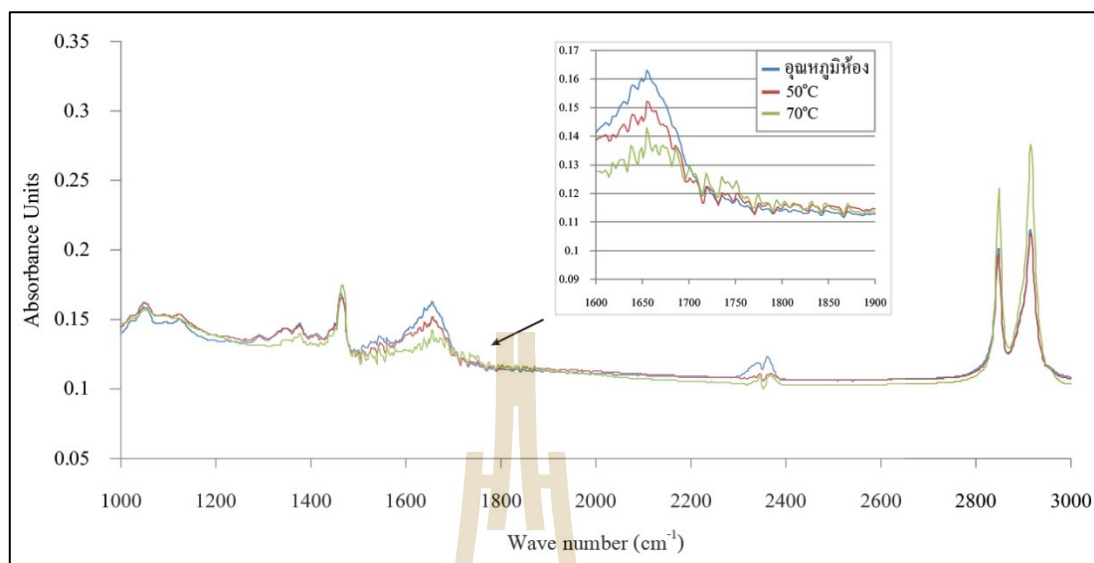




รูปที่ 5.109 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 2000 ชั่วโมง



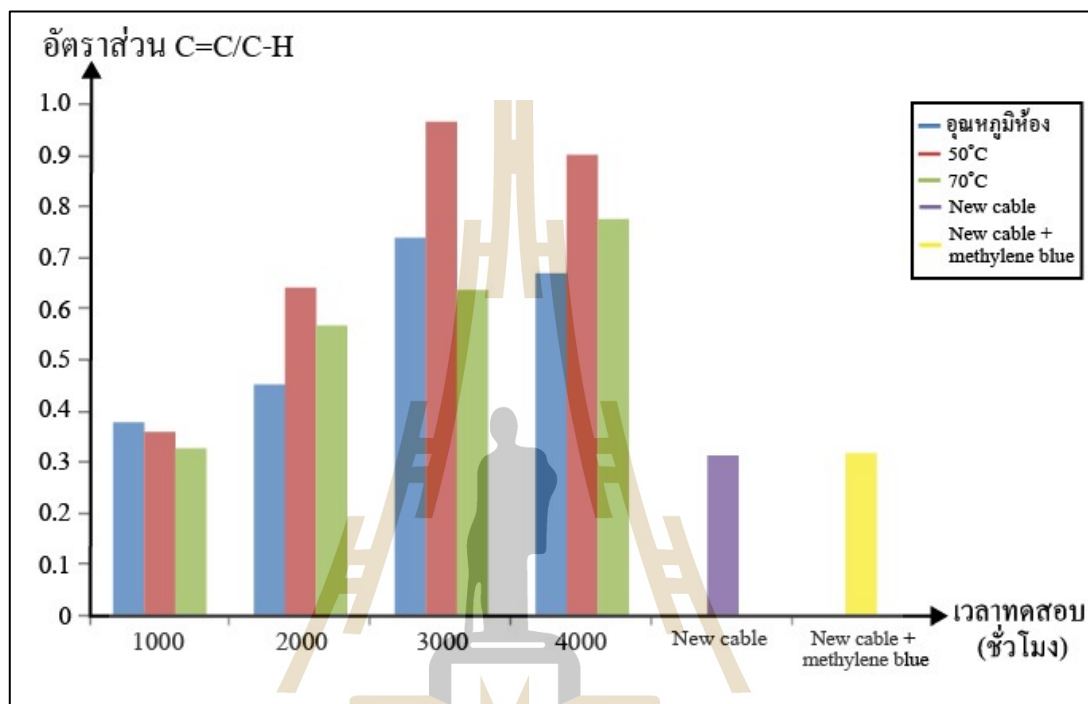
รูปที่ 5.110 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเตอร์ที่อิงในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 3000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.111 อินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  หลังจากทดสอบ 4000 ชั่วโมง

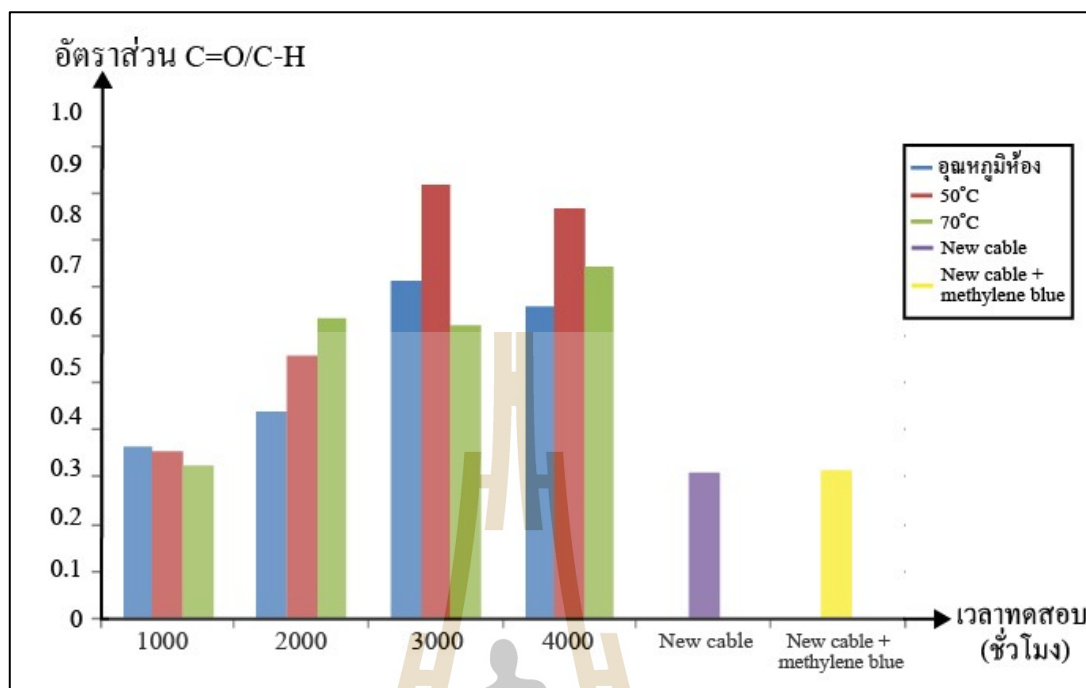
จากรูปที่ 5.88 ถึงรูปที่ 5.111 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวอเทอร์ทรีอิงแบบคล้ายครีบบ ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของพันธะ C=C และ C=O อันเกิดจากการเผาไหม้และการเกิดออกซิเดชันของเนื้อฉนวนที่พบมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณพันธะเหล่านี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ และรวมถึงการเสื่อมอายุของสายเคเบิล แต่อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้จะพิจารณาในส่วนของปริมาณ C=C และ C=O ที่เพิ่มขึ้นเพื่อใช้ยืนยันการเสื่อมอายุฉนวนสายเคเบิลและเพื่อให้การวิเคราะห์ปริมาณของพันธะมีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดจากเครื่องมือวัดสภาพแวดล้อม ความสม่ำเสมอของชิ้นงานที่ไม่เท่ากันหรือแม้กระทั่งตัวผู้วัดเอง จึงแสดงผลการวิเคราะห์เป็นอัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H และอัตราส่วนระหว่าง C=O ต่อ C-H ใน  $\text{CH}_3$  ดังรูป 5.112 ถึงรูปที่ 5.125 ซึ่งพันธะ C-H ที่ใช้เทียบอยู่ในช่วงความยาวคลื่น  $2850\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$  และ  $1400\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งทั้ง 2 ช่วงความยาวคลื่นอยู่ในหมู่ฟังก์ชันของอัลเคน แต่เนื่องจากการค่ายอดที่สูงที่สุดและการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมากที่สุดมาเทียบกับพันธะ C=C และ C=O ดังนั้นจึงเลือกช่วงความยาวคลื่นที่  $2850\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$  โดยรูปกราฟอัตราส่วนพันธะ C=C และ C=O ต่อพันธะ C-H จากกราฟอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวน XLPE ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ จะแสดงเป็นตัวอย่างเฉพาะในรูปที่ 5.112 ถึงรูปที่ 5.113

อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl เมื่อนำมาเทียบกับ  
กับฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมสี่ พบว่ามีอัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H น้อย  
กว่าสายเคเบิลใหม่และสายเคเบิลใหม่ที่ข้อมสี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.112



รูปที่ 5.112 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl เทียบกับ  
ฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมสี่

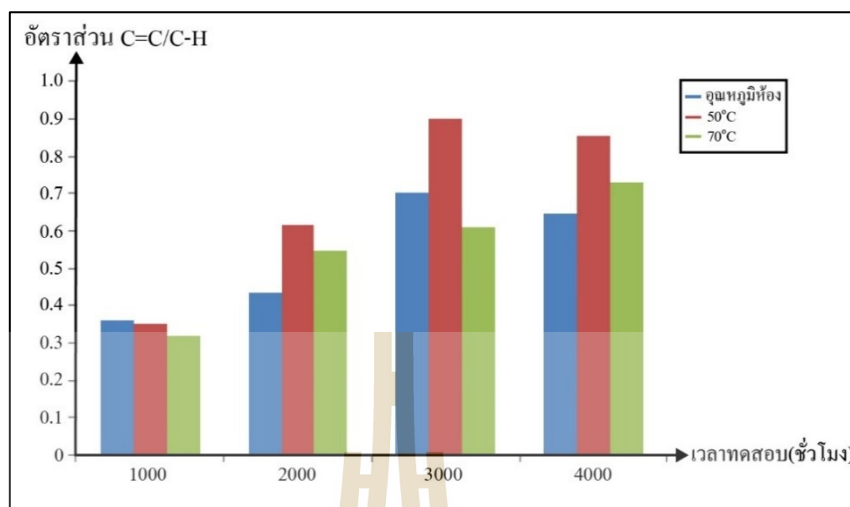
อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl เมื่อนำมาเทียบกับ  
กับฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมสี่ พบว่ามีอัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H น้อย  
กว่าสายเคเบิลใหม่และสายเคเบิลใหม่ที่ข้อมสี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.113



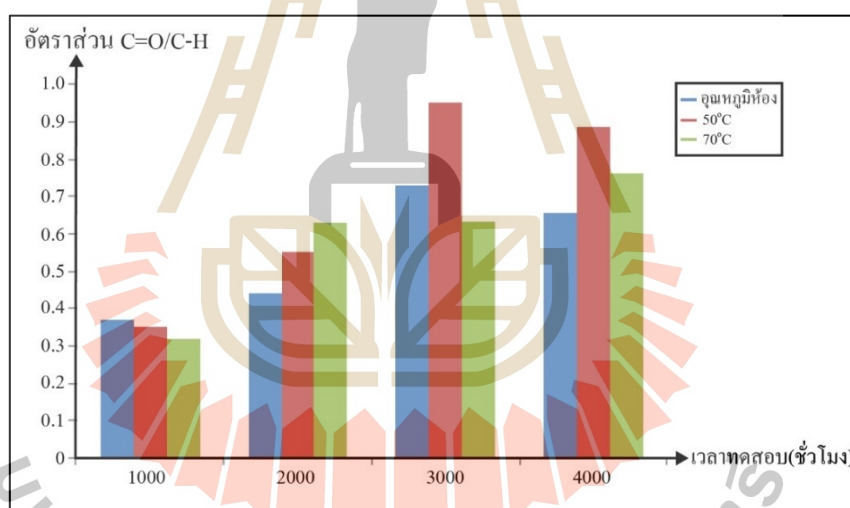
รูปที่ 5.113 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl เทียบกับฉนวน XLPE ใหม่และฉนวน XLPE ที่ข้อมล

อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=C ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ยกเว้นช่วงเวลาที่ทดสอบที่ 1000 ชั่วโมงและ 2000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.114

อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย NaCl พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=O ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ยกเว้นช่วงเวลาที่ทดสอบที่ 1000 ชั่วโมงและ 2000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.115



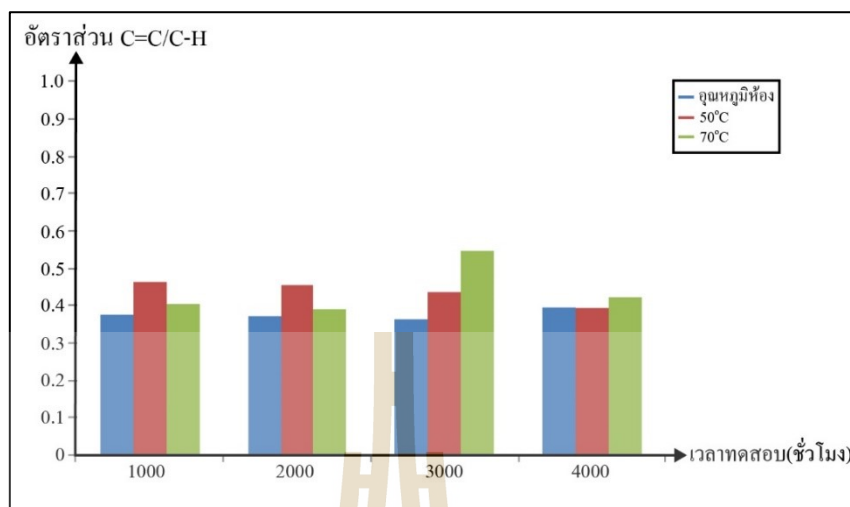
รูปที่ 5.114 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ที่ริงในสารละลาย NaCl



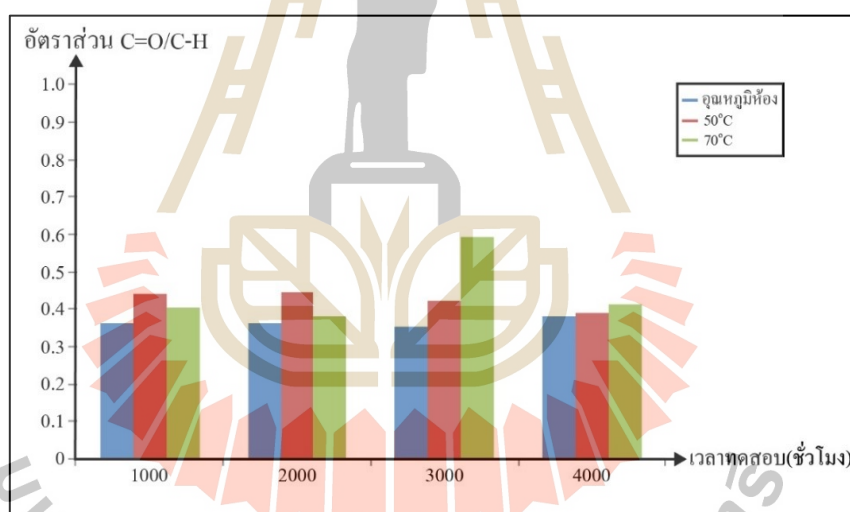
รูปที่ 5.115 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ที่ริงในสารละลาย NaCl

อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ที่ริงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=C ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ที่ริงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.116

อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ที่ริงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=O ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ที่ริงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.117



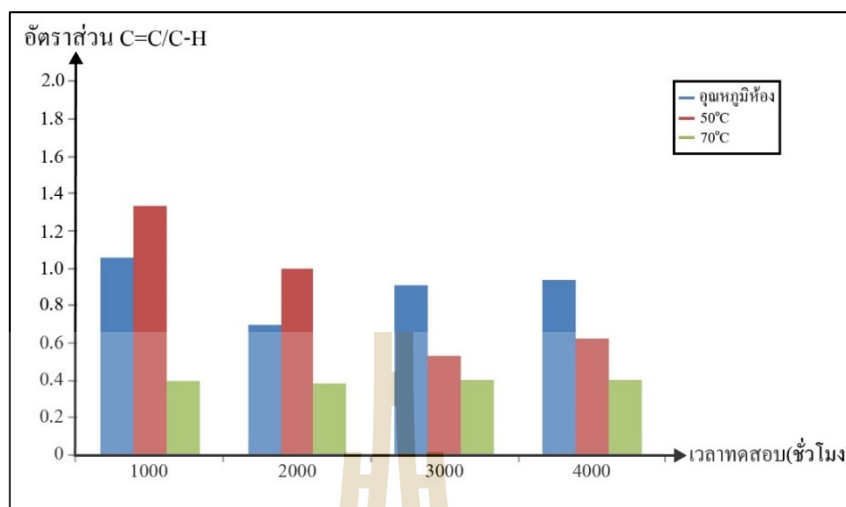
รูปที่ 5.116 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



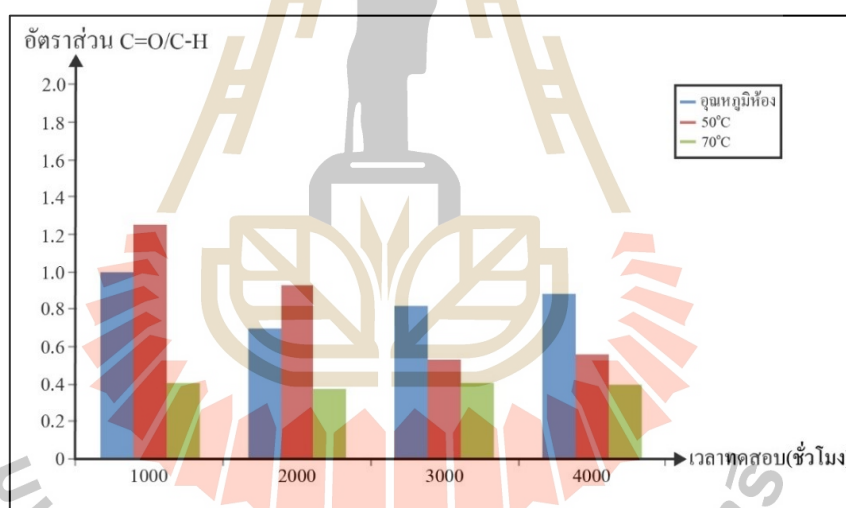
รูปที่ 5.117 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=C ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.118

อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=O ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.119



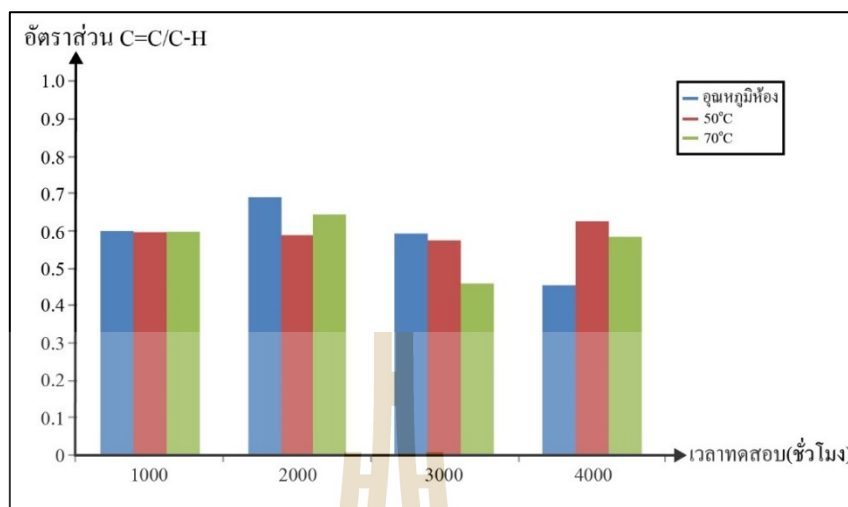
รูปที่ 5.118 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $K_2SO_4$



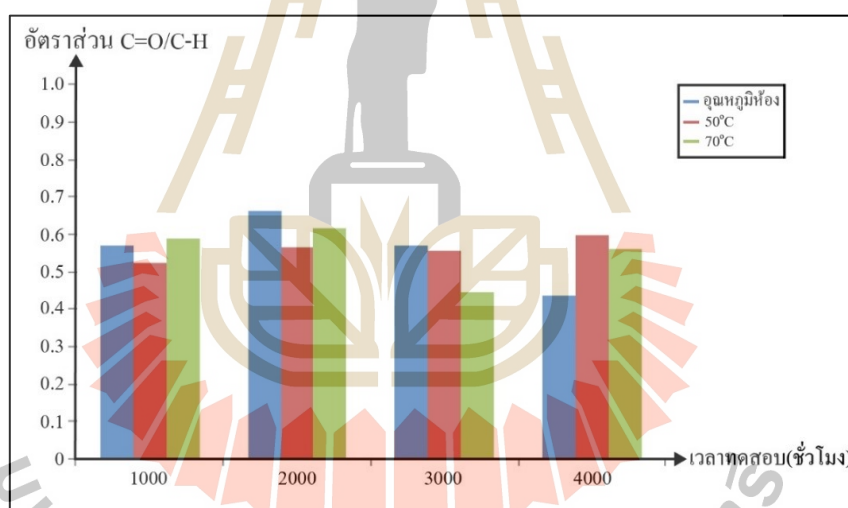
รูปที่ 5.119 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $K_2SO_4$

อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $Cu(NO_3)_2$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=C ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิ่งในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.120

อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิ่งในสารละลาย  $Cu(NO_3)_2$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=O ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิ่งในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.121



รูปที่ 5.120 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

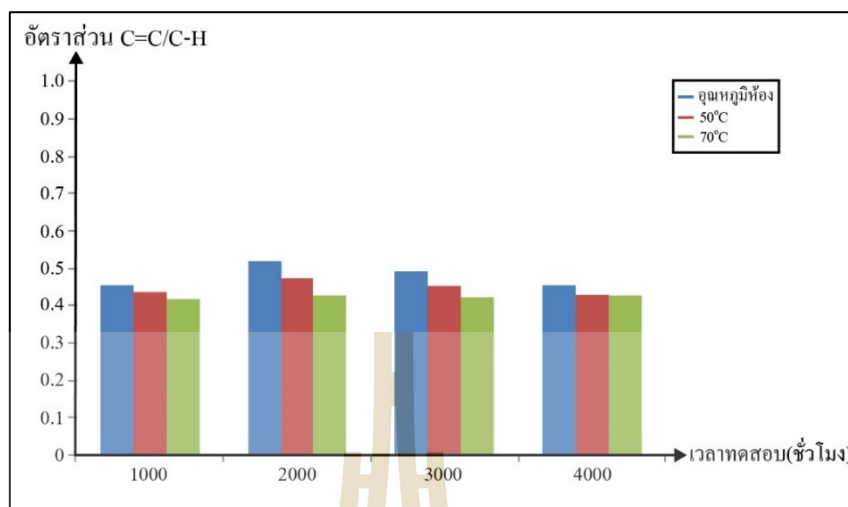


รูปที่ 5.121 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

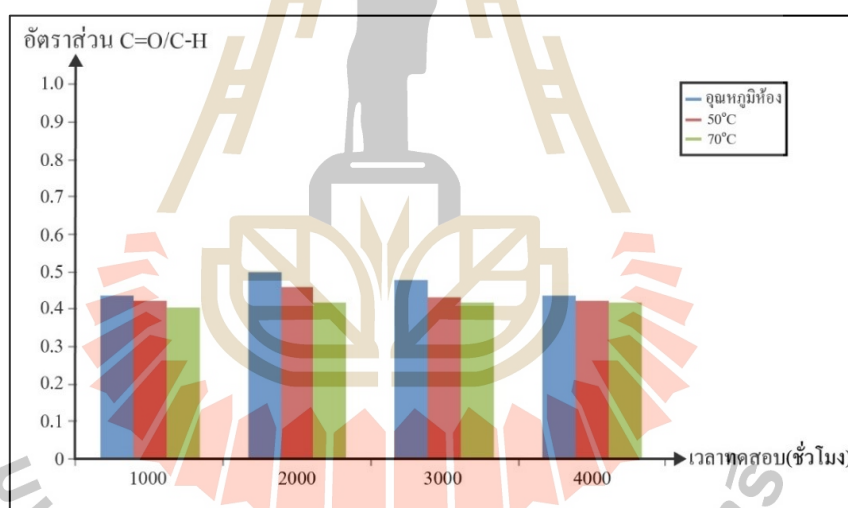
อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=C ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.122

อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทรีอิงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=O ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.123





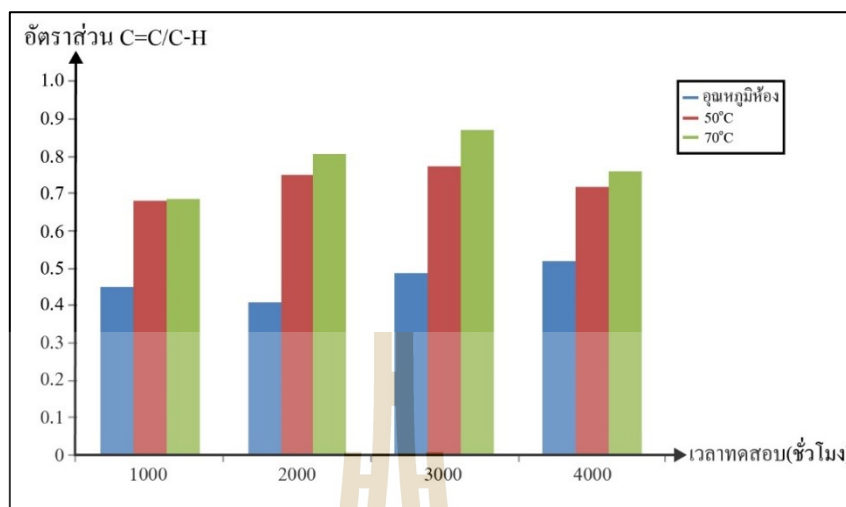
รูปที่ 5.122 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทีริงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$



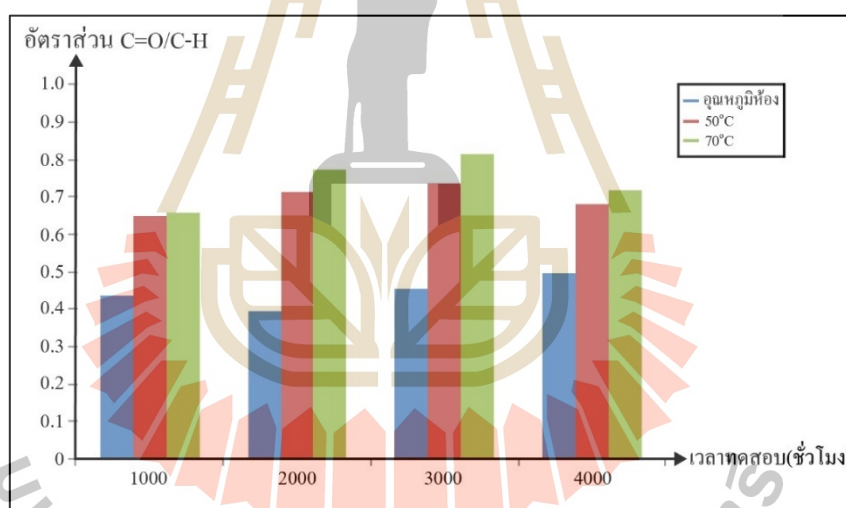
รูปที่ 5.123 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทีริงในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$

อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเทอร์ทีริงในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=C ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทีริงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.124

อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเทอร์ทีริงในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$  พบว่าอัตราส่วนของพันธะคู่ C=O ต่อ C-H มีแนวโน้มสอดคล้องกับการขยายตัวของวอเทอร์ทีริงในแต่ละอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.125



รูปที่ 5.124 อัตราส่วนของพันธะ C=C ต่อ C-H ของวอเตอร์ที่รีดในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$



รูปที่ 5.125 อัตราส่วนของพันธะ C=O ต่อ C-H ของวอเตอร์ที่รีดในสารละลาย  $\text{FeSO}_4$

## 5.5 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของวอเตอร์ที่รีดในฉนวน XLPE

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR เพื่อดูช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณา พบว่ามีค่ายอดมากน้อยต่างกันไปตามแต่ละสภาพแวดล้อม โดยค่ายอดของพันธะ C=C ที่บอกถึงการเกิดออกซิเดชัน และพันธะ C=O ที่บ่งบอกถึงการเผาไหม้ของสายเคเบิลใหม่มีค่ามากกว่าสายเคเบิลที่ใช้งานแล้ว ในทุก ๆ สารละลายไอออนิก แนวโน้มของอุณหภูมิของแต่ละสารละลายไอออนิกที่ให้ค่ายอดสูงจะอยู่ที่อุณหภูมิ 50°C ยกเว้นในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  แต่บางชั้นของฉนวนมีความหนาต่างกัน หรือความลึก

ของวอเตอร์ทรีอิงต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการดูดกลืนของแสงอินฟราเรด ดังนั้นจึงได้เทียบค่าพันธะ C=C และ C=O กับพันธะ C-H ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

จากรูปที่ 5.113 ถึงรูปที่ 5.125 แสดงอัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-H และปริมาณ C=O ต่อ C-H ของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวน XLPE ใหม่ที่ไม่มีการทดสอบ ซึ่งเป็นเครื่องมือยืนยันถึงการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิง แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR นี้จะไม่สามารถบอกได้ว่าฉนวนที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงจากสารละลายชนิดไหนเกิดวอเตอร์ทรีอิงมากกว่ากัน เนื่องจากเนื้อฉนวนที่นำไปตรวจสอบนั้นไม่ได้นำไปตรวจสอบทุกชิ้น แต่สุ่มไปเป็นบางชิ้น ดังนั้นการทำ FTIR สามารถบอกได้เฉพาะในแต่ละช่วงเวลาทดสอบว่าแต่ละอุณหภูมิในสารละลายชนิดต่าง ๆ วอเตอร์ทรีอิงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราส่วน C=C ต่อ C-H และ อัตราส่วน C=O ต่อ C-H จากรูปที่ 5.112 ถึงรูปที่ 5.113 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบจำนวนพันธะดังกล่าวซึ่งมีจำนวนน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดวอเตอร์ทรีอิงในสารละลายไอออนิกมีการเสื่อมสภาพมากกว่าฉนวน XLPE ใหม่ที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ

## 5.6 ผลจากคุณสมบัติอื่น ๆ ของสารละลายไอออนิก

ค่าความนำไฟฟ้าและค่า pH ของสารละลายไอออนิก มีผลต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในฉนวน XLPE แต่ก็ไม่ขึ้นอยู่กับค่าเหล่านี้เสมอ แสดงว่า คุณสมบัติอื่น ๆ ของสารละลายไอออนิกอาจมีผลต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงนี้ด้วย เช่น คุณสมบัติของชนิดธาตุของแต่ละสารละลายไอออนิก ประกอบด้วย (i) Na (ii) K (iii) Cu และ (iv) Fe องค์ประกอบต่าง ๆ ของธาตุเหล่านี้แสดงดังตารางที่ 5.11 ซึ่งยกตัวอย่างแสดงเฉพาะค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) ค่ารัศมีไอออน (Ionic Radius) และค่าน้ำหนักอะตอม (Atomic Weight) เป็นต้น สารละลายที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็กมีแนวโน้มทำให้มีการแพร่กระจายสู่รูเจาะหรือแพร่กระจายเข้าไปในฉนวน XLPE ได้ดีกว่าสารละลายที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ สารละลายที่ซึมลงสู่รูเจาะได้ดีทำให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงได้เร็ว อย่างไรก็ตาม การเกิดและการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย (Patsch, 1996 อ้างอิงใน ชีระพงษ์, 2014) สารละลาย  $\text{CuSO}_4$  ก่อให้เกิดสารละลายที่เป็นกรดเจือจาง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และทองแดงสามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อผลิตแอลดีไฮด์ เอทิลแอลกอฮอล์มาจาก ผลพลอยได้ในปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ XLPE ในกระบวนการผลิตสายเคเบิล แอลดีไฮด์จะสลายตัวไปเป็นอนุโมลิสระและคีโตนที่มีส่วนในการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ จึงทำให้ทองแดงมี ผลต่อการเกิดวอเตอร์ทรีอิงอย่างมาก (King, 1995 อ้างอิงใน ชีระพงษ์, 2014) ในงานวิจัยเล่มนี้ ผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงพบว่า สารละลาย  $\text{CuSO}_4$  มีแนวโน้มทำให้เกิดการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงได้มากที่สุด อาจเนื่องจากเงื่อนไขขององค์ประกอบของธาตุที่กล่าวมา ใน

ตารางที่ 5.11 รัศมีของไอออนของ Cu มีขนาดเล็กกว่าธาตุอื่น ๆ อาจทำให้แทรกซึมผ่านฉนวนได้ง่ายและมีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีสูงซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดึงคู่อิเล็กตรอนได้ดี ระหว่างการเกิดพันธะร่วมกับสารอื่น จะเห็นว่ามีปัจจัยและองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการขยายตัวของวอเทอร์ทรีอิงโดยไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง ดังนั้นจะต้องนำปัจจัยต่าง ๆ มาพิจารณาประกอบกัน

ตารางที่ 5.11 คุณสมบัติของชนิดธาตุในแต่ละสารละลายไอออนิก (Qureshi et. al., 2011)

| คุณสมบัติ                   | Cu   | Na   | K    | Fe   |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| อิเล็กโทรเนกาติวิตี (eV)    | 1.9  | 0.93 | 0.82 | 1.65 |
| รัศมีไอออน (nm)             | 0.57 | 0.99 | 1.37 | 0.64 |
| น้ำหนักอะตอม                | 63.5 | 23   | 39   | 55   |
| หมายเลขอะตอม                | 29   | 11   | 19   | 26   |
| พลังงานไอออไนเซชัน (kJ/mol) | 750  | 469  | 419  | 760  |

## 5.7 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบการเกิดวอเทอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูง ฉนวน XLPE การเตรียมฉนวนนำไปตรวจสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR จากการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

ลักษณะของวอเทอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเกิดวอเทอร์ทรีอิงในสารเคเบิลฉนวน XLPE เกิดขึ้นแบบเดียวคือ วอเทอร์ทรีอิงคล้ายครีป แต่ไม่เกิดวอเทอร์ทรีอิงคล้ายโบว์ แสดงให้เห็นว่าฉนวนที่นำมาทดสอบไม่มีจุดปนเปื้อนในเนื้อฉนวน วอเทอร์ทรีอิงคล้ายครีปในแต่ละสารละลายไอออนิกมีแนวโน้มการเกิดแตกต่างกันไป ดังได้กล่าวในผลการทดลองข้างต้น ซึ่งวอเทอร์ทรีอิงที่มีความยาวสูงสุดเกิดขึ้นในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์โครงสร้างของวอเทอร์ทรีอิงที่เปลี่ยนไปด้วยวิธี FTIR ซึ่งสามารถบ่งบอกได้แค่ว่าที่อุณหภูมิเท่าไรที่ทำให้เกิดวอเทอร์ทรีอิงได้มากกว่ากันในแต่ละสารละลายไอออนิกนั้น ๆ ดังนั้นในการทดสอบวอเทอร์ทรีอิงอาจจะมีค่าความไม่แน่นอนในส่วนของตัวเองแปรควม เช่นสมบัติของสารละลายที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลาที่มากขึ้น ค่าความต้านทานของฉนวนแรงดันตก ผุน เป็นต้น

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการศึกษาผลของสารละลายไอออนิกต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลางที่ระดับแรงดัน 22 kV 50 Hz เพื่อวิเคราะห์ผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิที่มีต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิง พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์และวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR การดำเนินการวิจัยได้สำเร็จสำหรับตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของระบบไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้สายเคเบิล วอเตอร์ทรีอิงเป็นปัญหาหลักสำหรับสายเคเบิลฉนวน XLPE เมื่อทราบถึงปัญหาจึงนำมากำหนดขอบเขต วัตถุประสงค์ ข้อตกลง และประโยชน์ที่ได้รับ เพื่อนำมาสร้างระบบจำลองและทดสอบการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ โดยได้ค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEE Science-Direct หนังสือและสื่ออ้างอิงบางเว็บไซต์จาก เป็นต้น ทำให้ทราบถึงแนวทางของงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับใช้และสร้างงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงการจำลองการกระจายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE โดยใช้โปรแกรม ANSYS Maxwell เพื่อเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากผลของสารละลายไอออนิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเพื่อหาขนาดรูเจาะ พบว่าที่อุณหภูมิห้องจะให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C ตามลำดับ ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องนั้นให้ค่าที่สูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แกนกลางสายเคเบิลฉนวน XLPE ทนได้ คือ 5.11 kV/mm จึงได้ว่าการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ทดสอบในอุณหภูมิห้องสามารถขยายตัวได้ไวกว่าที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C และรูเจาะบนฉนวนได้ขนาดประมาณ 1 mm

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการออกแบบและวิธีการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาลักษณะการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงในขณะที่อยู่ภายใต้การจำลองสภาวะแวดล้อมใน

สารละลายและอุณหภูมิต่าง ๆ รายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้อธิบายในบทนี้ ได้แก่ การออกแบบชุดทดสอบวอเตอร์ทรีอิง วิธีดำเนินการทดสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีเป็นต้น หลังจากที่ได้ทำการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงนำฉนวน XLPE ที่ทำการทดสอบแล้ว ไปทำการตรวจสอบวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมี

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE การเตรียมฉนวนนำไปตรวจสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR จากการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ลักษณะของวอเตอร์ทรีอิงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเกิดวอเตอร์ทรีอิงในสารเคเบิลฉนวน XLPE เกิดขึ้นแบบเดียว คือ วอเตอร์ทรีอิงคล้ายครีป แต่ไม่เกิดวอเตอร์ทรีอิงคล้ายโบว์ แสดงให้เห็นว่าฉนวนที่นำมาทดสอบไม่มีจุดปนเปื้อนในเนื้อฉนวน วอเตอร์ทรีอิงคล้ายครีปในแต่ละสารละลายไอออนิกมีแนวโน้มการเกิดแตกต่างกันไป ดังได้กล่าวในผลการทดลองข้างต้น ซึ่งวอเตอร์ทรีอิงที่มีความยาวสูงสุดเกิดขึ้นในสารละลายไอออนิก  $\text{CuSO}_4$  ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาทดสอบ 4000 ชั่วโมง ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์โครงสร้างของวอเตอร์ทรีอิงที่เปลี่ยนไปด้วยวิธี FTIR ซึ่งสามารถบ่งบอกได้แล้วว่าที่อุณหภูมิเท่าไรที่ทำให้เกิดวอเตอร์ทรีอิงได้มากกว่ากันในแต่ละสารละลายไอออนิกนั้น ๆ ดังนั้นในการทดสอบวอเตอร์ทรีอิงอาจมีความไม่แน่นอนในส่วนของตัวแปรควบคุม เช่น สมบัติของสารละลายที่เปลี่ยนไปในเวลาที่ยาวขึ้น ค่าความต้านทานของฉนวน แรงดันตก ผุน เป็นต้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ความหนาและความเรียบของฉนวนมีผลต่อการตรวจสอบโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมี ดังนั้นควรตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดที่มีความแม่นยำสูงเพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าความจริงมากที่สุด

6.2.2 ควรศึกษาวิจัยอัตราการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงด้วยความเข้มข้นของสารละลายที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายเทียบกับอัตราการขยายตัวของ Water treeing

6.2.3 ควรศึกษาวิจัยอัตราการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิงด้วยอุณหภูมิที่มากกว่าค่าอุณหภูมิปกติการใช้งานของสายเคเบิล เพื่อเป็นการศึกษาการขยายตัวและความทนทานของสายเคเบิลในสภาวะโหลดเกินปกติ

## รายการอ้างอิง

- กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย (2548). ระบบเคเบิลใต้ดิน.
- ธีระพงษ์ บุญรักษา (2557). ลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.*: 5-67.
- รัฐเขต เทียมศรี (2555). การศึกษาทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับสายเคเบิลแรงสูง 22 kV. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.*: 74-114.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม Thai Industrial Standard ICS 29.060.20 มอก. 2340-2550
- สำรวย สัจจ์สะอาด. (2537). ความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนของฉนวน. *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.*: 3: 58-60.
- สำรวย สัจจ์สะอาด (2537). ความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนของฉนวน. *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.*: 4: 1-57.
- สำรวย สัจจ์สะอาด. (2537). ความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนของฉนวน. *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.*: 6: 1-21.
- Bartnikas, R. (1967). Dielectric Loss in Insulating Liquids. **IEEE Transactions on Electrical Insulation.** 2(1): 33-54.
- Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2014). Role of Ionic Solutions Affect Water Treeing Propagation in XLPE insulation for High Voltage. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering.** 8(5): 795-798.
- Dissado, L.A. and Fothergill, J.C., ed. (1988). *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers.* **Peter Peregrinus Ltd., London.**: 74-116.
- Densley, R.J., Bamji, S. S., Bulinski, A.T. and Crine, J.P. (1990). Water Treeing and Polymer Oxidation. **The International Symposium on Electrical Insulation.**: 178-182.

- Elfrith Footit. (2015). Statistical Electrical and Mathematical Analysis of Water Treed Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation. **Doctoral Thesis, Queensland University of Technology Brisbane, Australia.**: 1-20.
- Hartlein, R. (2006). Long Life XLPE Insulated Power Cables. **National Electric Energy Testing (R&D) Centre, Forest Park, GA.**
- Helleso, S., Benjaminsen, J. T., Selsjord, M., and Hvidsten, S. (2012). Water tree initiation and growth in XLPE cables under static and dynamic mechanical stress. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation.**
- Hvidsten, S., Faremo, H., Eriksson, R., Wei Min. (2002). Water Treeing and Condition Assessment of High Voltage XLPE Cables. **International Symposium on Electrical Insulation.**: 112–115.
- Huang, M., Zhou, K., Tao, W., Yang, M., and Yang, D. (2014). Transformation Mechanism of Electrical Tree to Water Tree in XLPE Cables. **International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014).**: 1491-1496.
- Lee, J-H., Cho, S-M., and Song, I-K. (1998). Correlation between the AC Breakdown Strength and Space charge Distribution of Water Tree Aged XLPE. **Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.**
- Miyashita, T. (1969). Deterioration of Water-immersed Polyethylene Coated Wire by Treeing. **Proceedings 1969 IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston.**: 131-135.
- Moore, G.F. (1997). *Electric Cables Handbook*. 3<sup>rd</sup> edition.
- Ogiwara, J., Yaonaha, K., Uehara, H., and Kudo, K. (2010). Temperature characteristics of water tree propagation in a wide temperature range using XLPE sheets. **Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.**
- Orton, H., and Hartlein, R. (2006). Long Life XLPE Insulated Power Cables. **7<sup>th</sup> International Conference on Insulated Power Cable.**
- Promvichai, N., Minja, K., Chombo, P., Supanarapan, P., Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2017). Effects of Ionic solutions in Water Treeing Propagation of XLPE Insulated HV Cable by Using ANSYS MAXWELL 2D. **Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering.**: 261-266.



- 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. **IEEE International Conference on CMD, Beijing, China.:** 1195-1198.
- Suzuoki, Y., Hayashi, Y., Kato, T., Komori, T., and Mashima, H. (2009). Inception of electrical tree from water- tree degradation at high temperature. **IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials.**
- Takahashi, A., and Okamoto, T. (2008). Study on insulation diagnosis for XLPE cables using dumping oscillating high voltage. **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.**
- Wang, J., Wu, J., Li, Y., and Zheng, X. (2012). Simulation of electric field distributions in water treed XLPE using finite element method. **Engineering and Technology (S- CET) , 2012 Spring Congress.:** 1-4.
- Wang, J., Zheng, X., Li, Y., and Wu, J. (2012). The Influence of Temperature on Water Treeing in Polyethylene. **IEEE Transactions on Electrical Insulation.** 20(2): 544-551.
- Wikipedia. (2017). Electrical Treeing. Available from:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_treeing](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_treeing). Accessed date: May 4, 2018.
- William, A. (2003). *Electrical Power Cable Engineering*. 2<sup>nd</sup> edition.
- Zhou, K., Yang, M., Huang, M., Li, Tianhua., and Tao, W. (2015). The Role of Chain Orientation on the Propagation of Water Trees at Different Temperatures. **IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials 2012 Spring Congress.:** 732-735.



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- Promvichai, N., Minja, K., Chombo, P., Supanarapan, T., Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2017). Effects of Ionic solutions in Water Treeing Propagation of XLPE Insulated HV Cable by Using ANSYS MAXWELL 2D. **Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering**, The Institute of Industrial Applications Engineers, Japan. pp. 261-266.
- Promvichai, N., Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2018). Effect of NaCl Solution and Temperatures on Water Treeing Propagation in XLPE Underground Cable for Medium Voltage. **Proceedings of the 6th International Electrical Engineering Congress**, EEAAT, Krabi, Thailand. pp. 88-91.
- Promvichai, N., Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2018). The Effect of pH and Temperature in the Propagation of Water Treeing in XLPE Insulated Underground Cable. **ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications**, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 83-89.
- Promvichai, N., Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2018). A Comparison Study of Electric Field Propagation in Water Treeing Types for XLPE Insulated Underground Cable of Distribution System in Thailand. **GMSARN International Journal**, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand.
- Promvichai, N., Boonraksa, T., and Marungsri, B. (2018). Effects of Ionic Solutions to Water Treeing on XLPE Cable for 22 kV Distribution System. **Suranaree Journal of Science and Technology**, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

## Effects of Ionic solutions in Water Treeing Propagation of XLPE Insulated HV Cable by Using ANSYS MAXWELL 2D

Narupon Promvichai<sup>a</sup>, Kelvin Melckzedek Minja<sup>a</sup>, Pius Victor Chombo<sup>a</sup>, Tassanai Supanarapan<sup>a</sup>,  
Terapong Boonraksa<sup>b</sup> and Boonruang Marungsri<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

<sup>b</sup>School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya Phutthamonthon,  
Nakhon Pathom 73170, Thailand.

\*Corresponding Author: bmslv@sut.ac.th

### Abstract

Most of the distribution systems are nowadays upgraded to underground systems. Cross-linked polyethylene (XLPE) insulation has been employed as an insulator in underground power cables due to its excellence in electrical properties. The environmental issues in service have been the major studied problem that associated with the formation of water treeing and reduction of XLPE insulation performance. In the humid underground environment where XLPE power cables are laid, a number of ionic solutions can be found which in the presence of water treeing can lead the aging process. This paper studies the effects of electric fields in the presence of  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$  solutions with water treeing radius of 0.1, 0.5, 1.0 and 1.5 mm in ANSYS MAXWELL 2D. Bush type water treeing resulted into 31 kV/mm in 1.5 mm radius with  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$  solution. In vented type water treeing, 38 kV/mm in 1.5 mm radius with  $\text{CuSO}_4$ , was observed. The observed field strengths were above the minimum acceptable breakdown voltage (30kV/mm) of XLPE insulation but  $\text{CuSO}_4$  solutions showed great contribution in the intensification of electric fields.

**Keywords:** Water treeing, Electrical tree, Electric field, XLPE power cable, ANSYS MAXWELL 2D.

### 1. Introduction

Water treeing in underground power cable is described as an electrochemical treeing process in presence of ionic solutions which cause distortion due to partial discharge

and progressing through layers under electric stress in extremely non-uniform fields<sup>(1)</sup>. It is a major source of causes ageing of polymeric cable insulation apart from thermal degradation, partial discharges, aggression by environment and losses<sup>(2)</sup>. Cross-linked polyethylene (XLPE) is widely used as insulation in underground high tension cables but a damaging phenomenon called treeing takes place inside the material with continued exposure to moisture and electrical stress<sup>(3-6)</sup>. The study of inception and extent of the growth of water treeing to electrical treeing have been examined and analyzed in Wang et al.<sup>(7)</sup>; Boggs et al.<sup>(8)</sup>; Assay<sup>(9)</sup>. They aimed to evaluate acceleration ageing and improve the high performance of insulation material by considering the dimensions of water treeing, ageing structural changes, the concentration of the electrolyte, type of applied voltage and temperature on inception voltage of electrical tree.

When XLPE cable is subjected to lightning or switching overvoltage, there is a high possibility for water treeing to become electrical treeing<sup>(7-8)</sup>. Ref.<sup>(10)</sup> defined the applied voltage as a source of external forces (electric fields) that squeezes ionic solutions into small cracks and weak points of the XLPE cable. The presence of ionic solutions in small cracks and/or weak points causes the formation of water treeing. The tips of growing water treeing experience the different strength of electric fields. The theory about the concentration of strong electric field on sharp tips has been described in Wang et al.<sup>(7)</sup>. In the underground level, different ionic solutions can be occupied in small cracks or weak points of XLPE cable and hence water treeing which can cause different stressing in XLPE insulation. But the study of the electric field distribution

under different ionic solutions in the water treeing is not well known. This does not assure if the XLPE insulations can withstand electric fields under different ionic solutions in water treeing.

This paper has studied the effect of electric field distribution in water treed XLPE insulation under different ionic solutions. The proposed ionic solutions to be used in the study were  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$ . Due to the complexity of the effect, the study was done on bases on simulation. ANSYS MAXWELL 2D has been widely used to analyze electric fields by employing numerical techniques for finding approximate electric fields. ANSYS MAXWELL 2D is a high-performance interactive software package that applies finite element analysis (FEA) to solve electric field and magnetic field problems. Also, it uses meshing process as discretization to transfer continuous functions, models, and equations into discrete counterparts. The first part of the report shows materials and mathematical modeling of electric fields. The second part shows the study of electric fields in XLPE insulation under proposed ionic solutions.

## 2. Materials

### 2.1 Power Cable

A commercial HV power Cable 12/20(24) kV 1 core (XLPE) power cable was used in this study with a cross-section as shown in Fig. 1. Ref. <sup>(11)</sup> showed more information about this XLPE power cable. This power cable is mostly used in distribution systems in Thailand.

In Fig. 2, circular compact stranded annealed copper conductors have 8.33 mm diameter, the inner semi-conductive layer has 0.785 mm thick, cross-linked polyethylene (XLPE) layer has 5.5 mm thick and outer semi-conductive layer has 0.8 mm thick. These were the most useful layers in this study.

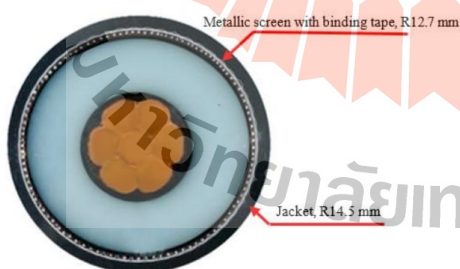


Fig. 1. 22 kV XLPE HV power Cable

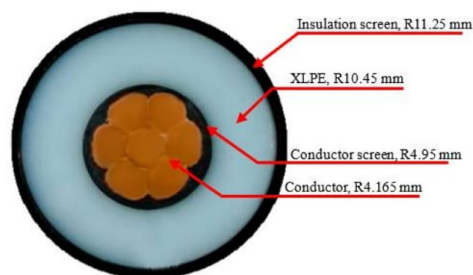


Fig. 2. 22 kV XLPE power Cable with XLPE, inner and outer semiconducting layers

### 2.2 Ionic Solutions

Six ionic solutions were used for the study of electric field i.e.  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$ . The relative permittivity and bulk conductivity of the cross-linked polyethylene (XLPE), semiconductors, copper, and ionic solutions ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$ ) are shown in Table 1.

Table 1. The relative permittivity and bulk conductivity of the materials.

| Solution                   | Relative Permittivity | Bulk Conductivity (S/m) |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ | 77.66                 | 1.391                   |
| $\text{CuSO}_4$            | 24.5                  | 0.535                   |
| $\text{FeSO}_4$            | 46.19                 | 1.036                   |
| $\text{K}_2\text{SO}_4$    | 80.97                 | 1.609                   |
| $\text{Na}_2\text{SO}_4$   | 56.96                 | 1.405                   |
| $\text{NaCl}$              | 30.23                 | 1.049                   |
| Semiconductor              | 100.00                | $2 \times 10^{-3}$      |
| XLPE                       | 2.30                  | $1 \times 10^{-17}$     |
| Copper                     | 1.00                  | $5.8 \times 10^7$       |

### 2.3 Electric Field in an XLPE Power Cable

A mathematical model of electric fields (E) spreading around an XLPE power cable is presented by the wave equation (Helmholtz's equation) derived from a differential form of Maxwell equations which are Faraday's law and Ampere's law as defined in equations (1) to (9) as given in Chari and Salon<sup>(12)</sup>.

Faraday's law;

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t) \quad (1)$$

Take the curl ( $\nabla$ ) of both side, equation (1) become

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\partial / \partial t (\nabla \times \vec{B}) \quad (2)$$

Since B and H are related by the constitutive equation

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3)$$

Then

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \partial / \partial t (\nabla \times \vec{H}) \quad (4)$$

Use Ampere's law to replace  $(\nabla \times \vec{H})$  since

$$\nabla \times \vec{H} = (\vec{J}) + (\partial \vec{D} / \partial t) \quad (5)$$

Then

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \partial / \partial t (\vec{J}) - \mu (\partial^2 \vec{D} / \partial t^2) \quad (6)$$

For isotropic materials, we can use the constitutive equation

Since

$$(\vec{J}) = \sigma \vec{E} \text{ and } \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (7)$$

Then Equation (6) become

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \sigma \partial / \partial t \vec{E} - \mu \epsilon (\partial^2 \vec{E} / \partial t^2) \quad (8)$$

Using a vector identity for the curl-curl operator, equation (9) become

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (9)$$

Because the divergence of the electric field is zero in homogeneous material then equation (9) become

$$\nabla^2 \vec{E} = -\mu \sigma \partial / \partial t \vec{E} - \mu \epsilon (\partial^2 \vec{E} / \partial t^2) = 0 \quad (10)$$

Where  $\epsilon$  is the dielectric permittivity of media,  $\mu$  and  $\sigma$  are the magnetic permeability and the conductivity of conductors, respectively.

The electric field in complex form, as in<sup>(13)</sup> were considered in this paper as time harmonic system, and then,

$$\partial \vec{E} / \partial t = j\omega \vec{E} \text{ and } (\partial^2 \vec{E} / \partial t^2) = -\omega^2 \vec{E} \quad (11)$$

Where  $\omega$  is the angular frequency then equation (10) becomes,

$$\nabla^2 \vec{E} - j\omega \sigma \mu \vec{E} + \omega^2 \epsilon \mu \vec{E} = 0 \quad (12)$$

Equation (12) in Cartesian coordinates (x, y) with the problem in two dimensions, it becomes

$$\partial / \partial x (1/\mu \partial \vec{E} / \partial x) + \partial / \partial y (1/\mu \partial \vec{E} / \partial y) - (j\omega \sigma - \omega^2 \epsilon) \vec{E} = 0 \quad (13)$$

It is not easy to analyze electric field by using equation (13) in analytical techniques. Equation (13) was used in ANSYS MAXWELL 2D to analyze electric fields.

#### 2.4 Designing of water treed model in ANSYS Maxwell 2D.

The geometry of water treeing in XLPE cable was discretized automatically in ANSYS Maxwell 2D as indicated in Fig. 3. The desired field is approximated with a second order quadratic polynomial expressed as in equation (14).

$$A_z(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 \quad (14)$$

Field quantities inside the triangles were calculated by using second order quadratic interpolation scheme. The Poisson's equation as equation (15) is replaced with energy functional in equation (16). This function is minimized with respect to each node in every triangle.

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (15)$$

$$F(A) = 1/2 \int ((\nabla A \cdot \nabla A) / \mu + AJ) dV \quad (16)$$

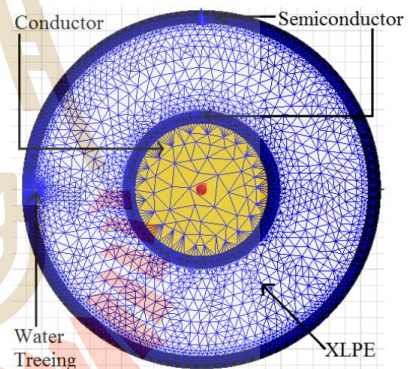
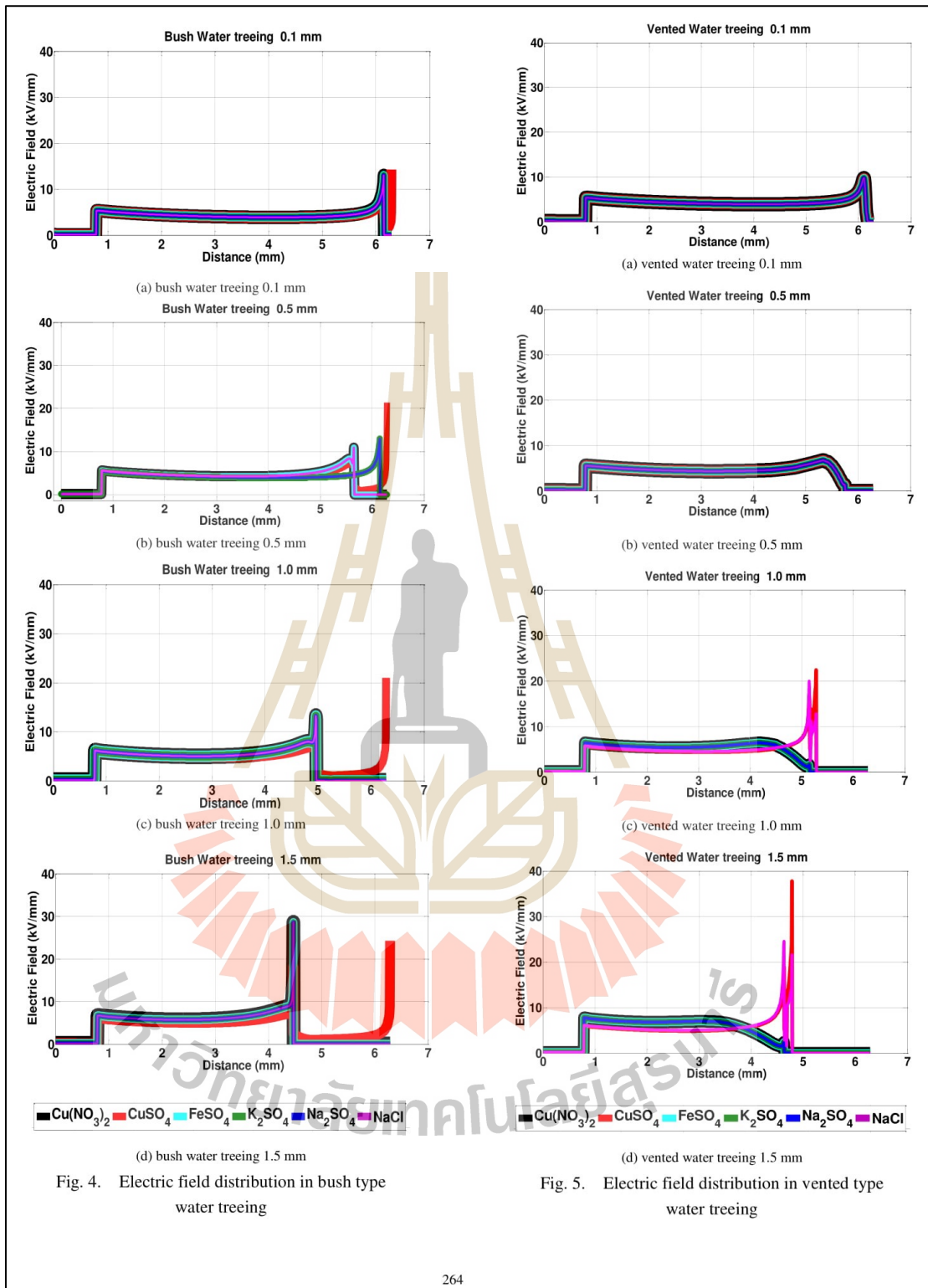


Fig. 3. Discretized water treed XLPE Cable

### 3. Simulation Results

The results of electric fields distributions with Bush and Vented type water treeing of radius  $r_0$  0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm and 1.5 mm with  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$  ionic solutions are shown in Fig. 4 and Fig. 5 respectively. In Fig 4 and 5, the thickness of layers from inner to outer semiconductor is represented in x-axes.



#### 4. Discussion of Results

From Fig. 4, the maximum field strength of approximately 31 kV/mm was observed in a treeing radius of 1.5 mm with  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$ . In Fig. 5, the maximum field strength of approximately 38 kV/mm was observed in a treeing radius of 1.5 mm with  $\text{CuSO}_4$ . The maximum value of field strength in Fig 4 and 5 was seemed to exceed minimum field strength of XLPE insulation (30 kV/mm)<sup>(14)</sup>.

From the observation, vented water treeing was seen to exceed minimum field strength of XLPE insulation earlier than bush type water treeing. El-Zein et al<sup>(15)</sup> presented the study of electrical trees in solid insulation and showed that vented water treeing may occur sooner compared to bush water treeing. Furthermore, the presence of  $\text{CuSO}_4$  ionic solution showed the greatest influence in vented type water treeing. The disposition of  $\text{CuSO}_4$  ionic solution in vented treeing and hence exalt considerably was also presented in Boonraksa<sup>(16)</sup>. Therefore, an environment with  $\text{CuSO}_4$  ionic solutions may result in high service cost due to the performance of vented water treeing.

#### 5. Conclusions

Effects of ionic solutions in the propagation of water treeing in HV XLPE cable have been presented. Bush and vented water treeing with treeing of radius  $r_0$  of 0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm and 1.5 mm under the effects of  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{NaCl}$  ionic solutions were clearly designed in ANSYS MAXWELL 2D software. Electric field strength of 38 kV/mm and 31 kV/mm in treeing radius of 1.5 mm were observed in vented and bush water treeing respectively. Observed maximum field strength was seen to exceed minimum field strength of XLPE insulation (30 kV/mm). Moreover, vented was investigated to occur in lower electric fields compared to bush water treeing. Therefore,  $\text{CuSO}_4$  ionic solution revealed to exhibit much contribution in the advancement of water treeing.

#### References

- (1) Arora, R., and Mosch W.: "High Voltage and Electrical Insulation Engineering", ISBN: 978-0-470-60961-3, Wiley-IEEE Press, pp. 319-369, 2011
- (2) Marungsri, B., Rawangpai, A., and Chomnawang N.: "Investigation Life Time Model of 22 kV XLPE Cable for Distribution System Applications in Thailand", WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 185-197, 2011
- (3) Jayakrishnana, A., Kavithab, D., Arthi, A., Nagarajana, N., and Balachandran M.: "Simulation of electric field distribution in nano dielectrics based on XLPE", Materials Today, Vol. 3, No. 6, pp. 2381-2386, 2016
- (4) Mauseth, F., Amundsen, M., Lind, A., and Faremo H.: "Water tree growth of wet XLPE insulation stressed with DC and high frequency AC", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 692-695, 2012
- (5) Fabiani, D., Cavallini, A., Montanari, G. C., Saccani, A., Toselli, M., and Pilati F.: "Hybrid nanostructured coating of XLPE insulation: Effect on partial discharge activity", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 315-318, 2012
- (6) Danikas, M. G., and Tanaka, T.: "Nanocomposites-a review of electrical treeing and breakdown", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 4, pp. 19-25, 2019
- (7) Wang J., Wu J., Li Y., and Zheng X.: "Simulation of electric field distributions in water treed XLPE using finite element method", Engineering and Technology (S-CET), pp. 1-4, 2012
- (8) Boggs, S., Densley, J., and Kuang J.B.: "Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 310-315, 1998
- (9) Assay, D., Kurimoto, M., Komori, F., Kato, T., Funabashi, T., and Suzuoki Y.: "Influence of AC Voltage Prestressing on AC Electrical-tree Inception of Deteriorated LDPE with Dried Water-tree", 2014 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 385-388, 2014
- (10) Elfrith Footit : "Statistical, Electrical and Mathematical Analysis of Water Treed Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation", Doctoral Thesis, pp. 1-20, 2015
- (11) Bangkok Cable (2014) Online document: [www.bangkokcable.com/product/backoffice/.../14052\_8\_12-20(24) kV\_CV\_1core.pdf]
- (12) Chari, M.V.K., and Salon, S.J.: "Numerical Methods in Electromagnetism", Academic Press, 2019.
- (13) Christopoulos, C.: "The Transmission-Line Modeling Method", IEEE Press, 1995
- (14) Bangkok Cable (2014) Online document : [www.bangkokcable.com/product/backoffice/file\_upload/PartA\_Technical\_Data.pdf]



- (15) El-Zein, A., EL Bahy, M.M, and Talaat, M.: "Types of electrical trees in solid insulation under electrical and mechanical energy basis", 2008 12th International Middle-East Power System Conference, pp. 80 – 84, 2008
- (16) Boonraksa, T., and Marungsri, B.: "Role of Ionic Solutions Affect Water Treeing Propagation in XLPE Insulation for High Voltage Cable", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 788-791, 2014.



# Effect of NaCl Solution and Temperatures on Water Treeing Propagation in XLPE Underground Cable for Medium Voltage

Narupon Promvichai, Terapong Boonraksa and Boonruang Marungsri  
*School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology*  
 Nakhon Ratchasima, Thailand  
 Email: bmshev@sut.ac.th

**Abstract**— Water tree has been studied for many years due to it is the cause of insulation failure in HV Cross-Link Polyethylene (XLPE) cable. The insulation failure was mostly associated with the presence of ionic solutions in water treeing. This paper presents the study results on the effect of NaCl ionic solution and temperature to water treeing propagation in HV XLPE cable. A 22 kV XLPE HV underground cable using in the distribution system of Provincial Electricity Authority (PEA) of Thailand was used as a testing specimen. The study was performed by dip testing specimens in 0.1 mol/L of NaCl ionic solution with difference temperature, i.e., ambient temperature, 50 °C, and 70 °C, respectively. Testing specimens were subjected to 24 kV 50 Hz during the testing period for 1000 hours and 2000 hour. A comparative study of the effects of relative permittivity, bulk conductivity, and behavior of water treeing was presented. The experimental results show that at ambient temperature, water treeing propagation grew faster than the temperature of 50 °C and 70 °C for 1000 hrs. However, for 2000 hrs., water treeing propagation was not similar at 1000 hrs. Such results may be due to the role of the testing period. The trend of water treeing propagation is faster than at 1000 hrs.

**Keywords**— Vented tree, Bulk Conductivity, Temperature, Relative Permittivity, Ionic solution, XLPE, Underground Cable,

## I. INTRODUCTION

Most of the countries, the electrical overhead distribution system is changing to an underground cable system that good for the environmental system and high safety for people as shown in Fig. 1 and Fig. 2. However, in long-time service, problems or damages may occur in the underground cable system, and it needs a long time for maintenance. The problems that go to be electrical breakdown include partial discharge, mechanical force, moisture content, ionic solution, and water, etc. [1]. In the presence of moisture content, the main problem of underground cable occurs in an insulation layer. In following, if moisture can permeate from semiconductor layer to the insulation layer, it can initiate the insulation deterioration that calling water treeing which similar plume-like structure [2]. Water treeing can divide into bow-tie treeing and vented type treeing. Bow-tie tree occurred within insulation layer. The vented tree grew from the outer or inner semiconductor layer to the insulation layer[3]. However, the occurrence of water treeing must include an applied voltage and moisture/ water [4].

Presently, many researchers have been studied to investigate and to understanding water treeing characteristics. The experimental study by [5], they

concerned the electrical stress at the tip of pin-hole in XLPE insulation layer which caused vented tree occurring directly, and they found that water treeing propagation decreased at high temperature. The occurring of small crack in the insulation layer in cable needs a long time. The authors in [6] found that the electric field strength increased as bulk conductivity increased and relative permittivity decreased at the tip of crack or pinned-hole in insulation [6]. The authors in [7] reported the simulation results of XLPE high voltage cable in different ionic solutions. They found that at higher electric field strength at the tip of water treeing was obtained from the simulation results when comparing low relative permittivity ionic solution with high relative permittivity ionic solution.

Underground HV cable system has been increasingly installed in Thailand. However, characteristics of water treeing in XLPE high voltage cable in the distribution system of PEA are not yet studied well. Well, understanding of water treeing characteristics is essential for using the underground cable system. Propagation of water treeing under various ionic solutions must be elucidated. So, this paper presents the study results on the effects of NaCl solution and temperatures to the propagation of water treeing in XLPE high voltage underground cable for PEA distribution system of Thailand.



Fig. 1. Overhead System [8].



Fig. 2. Underground System [9].

## II. EXPERIMENTAL SETUP

### A. Sample Preparation

The single core (XLPE) medium voltage underground cable 12/20(24) kV was used and was cut to 200 cm in length for this study. Since most of water treeing was found in the insulation layer, the cable was peeled the cable cover out by remaining of insulation screen. The cross-section of underground cable is shown in Fig. 3. The XLPE insulation layer, the conductor screen, and the copper conductor are shown in Fig. 4.

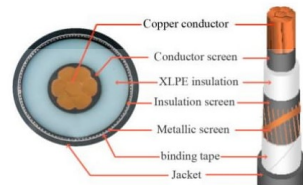


Fig. 3. Single core XLPE underground cable 12/20(24) kV [10].

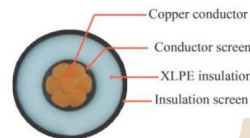


Fig. 4. Peeled cover of single cable 12/20(24) kV by remaining of insulation screen, XLPE insulation, conductor screen, and copper conductor.

The insulation screen of cable specimen was peeled, and a group of pin-hole on XLPE insulation was made as dimensions shown in Fig. 5.

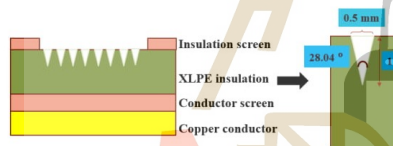


Fig. 5. Model of pinned-hole in XLPE cable.

### B. Experimental Procedure.

The experiment was performed by using NaCl ionic solution 0.1 mol/L with a circulation of solution all the time. During the test, the cable specimens were subjected to 24 kV, 50 Hz, and different temperature levels, i.e., at ambient temperature, 50 °C, and 70 °C, respectively. All cable specimens were put in the stainless sink by no had external mechanical force and were dipped in NaCl solution. The period for testing was 1000 hrs., and 2000 hrs. The experimental layout is shown in Fig. 6. And, the actual arrangement is shown in Fig. 7.

### C. Ionic Solution Parameter.

Bulk conductivity and relative permittivity of NaCl 0.1 mol/L were measured by the equipment as shown in Fig. 8. Measuring results are shown in Table 1. The bulk conductivity was directly measured, but relative permittivity value was determined after the capacitance measurement.

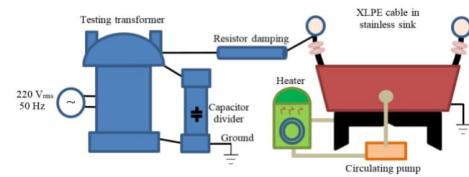


Fig. 6. The Experimental Layout.



Fig. 7. The Actual test arrangement.



8(a)



8(b)

Fig. 8. 8(a). Conductivity measurement and 8(b). Capacitance measurement.

Capacitance measurement results were used to determine the relative permittivity ( $\epsilon_r$ ), as in (1) [11].

$$\epsilon_p = \epsilon / \epsilon_0 \quad (1)$$

Where  $\epsilon_0$  is an absolute vacuum permittivity and  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m.  $\epsilon$  is the relative permittivity and equal to (2)

$$\epsilon = (C \times d) / A \quad (2)$$

Where C is capacitance, d = gap between parallel plate (3 cm), and A = diameter of plate (7 cm<sup>2</sup>)

From parallel plate capacitor, the relation of capacitance and relative permittivity is shown in (3)

$$\epsilon_p = (C \times d) / (A \times \epsilon_0) \quad (3)$$

The resulting from (3) is shown in Table 1. Moreover, bulk conductivity and relative permittivity of XLPE cable components are shown in Table 2.

TABLE I. BLUK CONDUCTIVITY AND RELATIVE PERMITTIVITY OF NaCl

| Temperature | NaCl ionic solution     |                       |
|-------------|-------------------------|-----------------------|
|             | Bulk conductivity (S/m) | Relative permittivity |
| Ambient     | 0.941                   | 30.23                 |
| 50 °C       | 0.784                   | 60.83                 |
| 70 °C       | 0.593                   | 62.85                 |

TABLE II. BLUK CONDUCTIVITY AND RELATIVE PERMITTIVITY OF XLPE CABLE COMPONENT

| Temperature      | XLPE cable component    |                       |
|------------------|-------------------------|-----------------------|
|                  | Bulk conductivity (S/m) | Relative permittivity |
| Semiconductor    | $2 \times 10^{-3}$      | 100                   |
| XLPE             | $1 \times 10^{-17}$     | 2.3                   |
| Copper conductor | $5.8 \times 10^7$       | 1                     |

D. Sliced XLPE Cable Preparation.

To observed water treeing by using a stereomicroscope, the tested specimen was sliced into a thickness of 400 - 600 μm by a microtome. The slices were stained with methylene blue solution at 80 °C for 2 hours. After that, the slices were dried around 3 hours.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

The stereomicroscope (Olympus BX51M) was used to observe water treeing. The observation results are shown in Fig. 10 and Fig. 11 for 1000 hrs. and 2000 hrs. testing periods, respectively.  $L_0$  is defined as the length of water treeing (Vented water treeing), as shown in Fig. 9. The length of water treeing was measured. The measuring results are shown in Table 3 and Table 4, respectively.

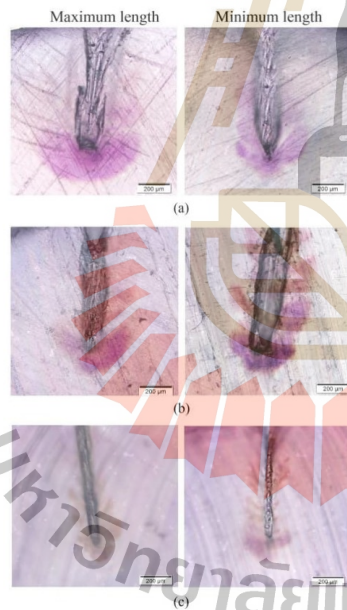


Fig. 10. Structure of vented tree length in XLPE cable for 1000 hrs. include (a) room temperature (b) 50 °C and (c) 70 °C

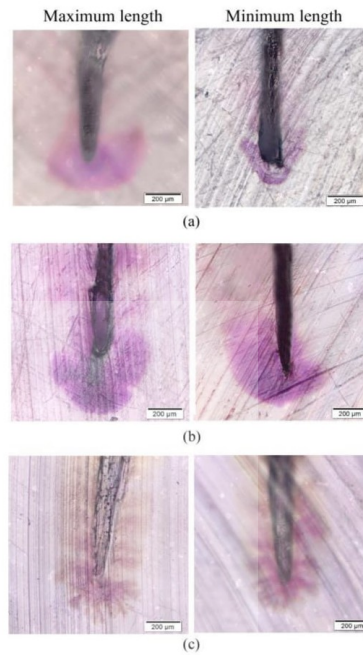


Fig. 11. Structure of vented tree length in XLPE cable for 2000 hrs. including (a) room temperature (b) 50 °C and (c) 70 °C



Fig. 9. Water treeing length  $L_0$ .

TABLE III. LENGTH OF WATER TREEING IN XLPE INSULATION FOR NaCl IONIC SOLUTION IN 1000 HRS.

| Temperature | Length of water treeing(μm) |        |         |
|-------------|-----------------------------|--------|---------|
|             | Max                         | Min    | Average |
| Ambient     | 198.72                      | 117.36 | 188.04  |
| 50 °C       | 133.86                      | 113.86 | 123.86  |
| 70 °C       | 110.41                      | 115.93 | 113.17  |

TABLE IV. LENGTH OF WATER TREEING IN XLPE INSULATION FOR NaCl IONIC SOLUTION IN 2000 HRS.

| Temperature | Length of water treeing(μm) |        |         |
|-------------|-----------------------------|--------|---------|
|             | Max                         | Min    | Average |
| Ambient     | 186.30                      | 127.66 | 156.98  |
| 50 °C       | 375.36                      | 202.86 | 289.11  |
| 70 °C       | 255.99                      | 176.65 | 216.32  |

#### IV. DISCUSSIONS

In XLPE cable, the water treeing was focused on XLPE insulation layer. Concerning the experimental results, discussions are given as follows.

##### A. Type of Water Treeing.

Water treeing consists of bow-tie type and vented type [3]. This study found the only vented type. The occurrences of vented type treeing show that the structure of XLPE insulation material is still good, or there are no small voids inside XLPE insulation that can initiate the occurrence of bow-tie type treeing.

##### B. Relationship of Temperatures with Propagation of Vented Type Treeing.

After testing at ambient temperature, 50 °C, and 70 °C, the vented type treeing was observed by a stereomicroscope. For 1000 hrs., longer length of the vented tree was measured on tested specimen testing at ambient temperature comparing to other temperatures. The maximum length water treeing is 198.72  $\mu\text{m}$ , and the minimum length water treeing is 117.36  $\mu\text{m}$ . As shown in Fig. 12, at 1000 hrs. testing period, the trend of water treeing propagation agree with the investigation results in [5]. However, at 2000 hrs. testing period, faster propagation of water treeing was obtained on the specimen tested at a higher temperature. At 50 °C, length of the water treeing is longer than other temperatures. Such results may be the rule of the temperature to damage some XLPE insulation properties for an extended testing period.

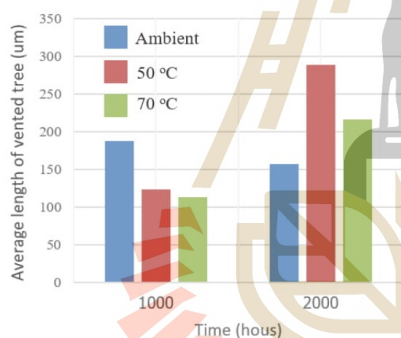


Fig. 12. Comparison of vented tree length in XLPE cable for 1000 hrs. and 2000 hrs.

##### C. Relationship of Water Treeing with Bulk Conductivity and Relative Permittivity.

For 1000 hrs. of the testing period, the water treeing propagation grew fast at low relative permittivity and high conductivity. Such results may be due to the ionic solution having the low relative permittivity and having the high polarity of dielectric property. And it means that the ionic solution at low relative permittivity is good for electric conducting or low resistance. The low resistance of ionic

solution resulted in the high current or the high conductivity [12]. For 2000 hrs. of the testing period, the trend of water treeing propagation is not same as 1000 hrs testing period. Such results may be due to the role of the testing period. The trend of water treeing propagation is faster than at 1000 hrs.

#### V. CONCLUSION

Propagation of water treeing in XLPE underground cable under 24 kV 50 Hz and NaCl 0.1 mol/l ionic solution was studied. Vented type water treeing was observed. For 1000 hrs. of the testing period, the highest water treeing propagation was obtained at ambient temperature, and the lowest water treeing propagation was obtained at 70 °C because at low temperature had a low relative permittivity and high conductivity. However, for 2000 hrs, the highest propagation of vented tree was tested at 50 °C, and the lowest was at 70 °C. Maybe the properties of XLPE insulation changed for an extended period.

#### ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by National Research Council of Thailand and Suranaree University of Technology, Thailand.

#### REFERENCES

- [1] Electric System Standard Division, Underground Cable System, Thailand, 2005, pp. 1–24.
- [2] Electrical Treeing, Wikimedia Foundation, Inc. [updated 2016 Nov 30 ; cited 2017 May 10]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_treeing](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_treeing)
- [3] S. Priya, and A. Mubashira Anjum, "Analysis of Water Trees and Characterization Techniques in Xlpe Cables," *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 7, pp. 127-135, 2014.
- [4] H. Faremo, M. Selsjord, S. Hvidsten, K. Magnus Bengtsson, and A. Ryen, "Initiation of Vented Water Trees from the Conductor Screen of MV XLPE Insulated Cables," *IEEE International Conference, ISEI*, San Juan, PR, USA, 2012.
- [5] K. Zhou, M. Yang, M. Huang, T. Li, and W. Tao, "The Role of Chain Orientation on the Propagation of Water Trees at Different Temperatures," *IEEE International Conference, ICPADM, Sydney, NSW, Australia*, 2015.
- [6] W. Tao, S. Song, Y. Zhang, W. Hao, K. Zhou, T. Li and M. Huang, "Study on the electric-field characteristics of water tree region on the dry or wet condition in XLPE cables," *IEEE International Conference, ICHVE, Chengdu, China*, 2016.
- [7] N. Promvichai, K. Melckzedeck Minja, P. Victor Chombo, T. Supanarapan, T. Boonraksa, and B. Marungsri, "Effects of Ionic Solutions in Water Treeing Propagation of XLPE Insulated HV Cable by Using ANSYS MAXWELL 2D," *IIAE International Conference, The Institute of Industrial Applications Engineers*, Japan, 2017.
- [8] Overhead transmission cable Online figure: [<http://i.nextmedia.com.au/News/overhead-cables-600.jpg>].
- [9] Underground transmission cable Online figure: [[http://www.ep-entel.com/img/760\\_1.jpg](http://www.ep-entel.com/img/760_1.jpg)].
- [10] Bangkok Cable (2014) Online document : [[www.bangkokcable.com/product/backoffice/.../140528\\_12-20\(24\)kV\\_CV\\_1core.pdf](http://www.bangkokcable.com/product/backoffice/.../140528_12-20(24)kV_CV_1core.pdf)].
- [11] The Engineering Toolbox, Capacitors, Online document: [http://www.engineeringtoolbox.com/capacitors-d\\_1387.html](http://www.engineeringtoolbox.com/capacitors-d_1387.html)
- [12] Relative permittivity, Wikimedia Foundation, Inc. [updated 2017 Apr 16; cited 2017 May 9]. Available from [https://en.wikipedia.org/wiki/Relative\\_permittivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity)

# The Effect of pH and Temperature on the Propagation of Water Treeing in XLPE Insulated Underground Cable

Narupon Promvichai<sup>1</sup>,

Terapong Boonraksa<sup>2</sup>, and Boonruang Marungsri<sup>1,\*</sup>, Non-members

## ABSTRACT

Water treeing has become the major problem in XLPE insulated underground cable caused by the moisture penetration. Even though some studies have been done on this problem, it is still not clear how the moisture can damage the XLPE insulated cable under certain operating conditions quickly. This work has studied the effect of pH and temperature of the ionic solutions to the degradation of the XLPE insulation. The study focused on the XLPE cable used in the 22 kV underground distribution systems in Thailand. The ionic solutions involved a 0.1 mol/l of NaCl and CuSO<sub>4</sub> solutions for degrading the XLPE cable at ambient and 50°C in 1000 hours and 4000 hours with the electric stress of 22 kV 50 Hz continuously. CuSO<sub>4</sub> and NaCl revealed a pH of 4.04 to 3.70 and 6.49 to 6.74 from ambient to 50°C respectively. The higher strength of acidity resulted in CuSO<sub>4</sub> at 50°C was observed to be more effective in the propagation of water treeing across the XLPE insulation. The propagation of water treeing across the XLPE was strongly dependent on the pH level. Temperature above ambient was concluded to be detrimental for XLPE insulation when a CuSO<sub>4</sub> ionic solution exists over an extended period due to the significant propagation of water treeing.

**Keywords:** Water treeing Propagation, Ionic Solution, pH, Temperature, XLPE Power Cable.

## 1. INTRODUCTION

For many years, the Cross-Linked Polyethylene (XLPE) insulation has been accepted to have excellent electrical properties that make it suitable for use in underground cables. XLPE has been mostly employed as an insulator especially in underground distribution power cables, for example, in 22 kV distribution networks over several provinces in Thailand. Despite its excellence in electrical properties,

it faces “environmental problem” which relates to the ingress of moisture or other ionic solutions that reduce the performance of XLPE insulation in high electric fields. Moisture or other ionic solutions can penetrate into XLPE insulation through small cracks and weak points. Then, the applied voltage acts as an external force (electric fields) to enable this ingress through small cracks [1]. The penetrated solutions form tracks or tree-like structure in XLPE insulation known as water treeing which distort the polymeric materials due to partial discharges progressing through layers under electric stress in extremely non-uniform fields [2]. Several studies [3-6], have proved that the damaging phenomenon of water treeing takes place inside the XLPE insulation with continued exposure to moisture and electrical stress. Furthermore, the water treeing is considered as a major source in the aging of polymeric cable insulation through thermal degradation, partial discharges, aggression by environment and losses [7].

The study of the inception and extent of the growth of water treeing to electrical treeing have been examined and analyzed in [8]. Water treeing is normally grouped into two types which are vented type and bow-tie. Firstly, vented type treeing is defined as the type of water treeing growing from insulation boundaries to another side of the insulation as shown in Fig. 1, mainly vented type treeing grows toward the electric field line. Another type is bow-tied treeing, see Fig. 2, and is defined as the water treeing growing inside of insulation volume. Bow-tied treeing grows in the opposite direction from the electric field line [9].

Several published research papers illustrated the fast growing of water treeing propagation at high temperature [12], whereas others research papers revealed that propagation of water treeing grew fast at low temperature [13]. However, in all the above researcher’s works, the parameters of the ionic solution were not considered. In this study, both the effect of pH and temperature of the ionic solutions to XLPE cable are examined. This study, NaCl and CuSO<sub>4</sub> ionic solutions were used for testing because there have many types and properties of the ionic solution (salt solution) in the underground systems in Thailand. CuSO<sub>4</sub> solution usually occurs when

Manuscript received on July 31, 2018 ; revised on August 3, 2018.

\*The authors are with School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, E-mail: bmshvee@sut.ac.th<sup>1</sup>

\*\*The author is with School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom, Thailand.



Fig.1: Type Treeing [10].



Fig.2: Bow-Tied Treeing [11].

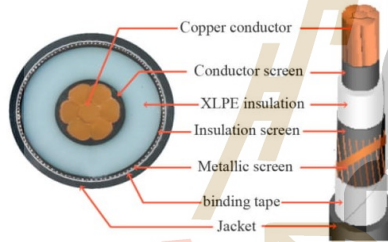


Fig.3: Single Core 12/20(24) kV XLPE Underground Cable [14].

there is water entering the underground cable and reacting with the copper conductor. Therefore, NaCl and  $\text{CuSO}_4$  ionic solutions were chosen for testing. Also, the different properties of both ionic solutions are shown in Table 1-3.

## 2. EXPERIMENTAL SETUP

### 2.1 Sample Preparation

The new (unused) single core (XLPE) medium voltage underground cable of  $50 \text{ mm}^2$  12/20(24) kV was used in this experiment (see Fig. 3). The cable was cut into pieces of 200 cm length. Since the water treeing occurs in XLPE insulation, to fasten their occurrence, only critical layers were left for the experiment (see Fig. 4). The essential layers were XLPE insulation, conductor screen and the copper conductor as shown in Fig. 4.

From the layers of interest of XLPE cable, few pin-holes were made to initiate the formation of water treeing (if not pinned, the experiment may operate over an extended period without initiating a water

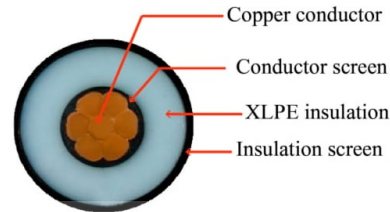


Fig.4: Layers of Interest in 12/20(24) kV XLPE Cable.

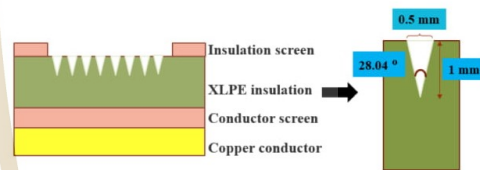


Fig.5: Setup of Pin-Holes in XLPE Cable.

treeing). For each XLPE cable, four sections for pinning were made. The number of pin-holes and their dimensions are shown in Fig. 5.

For dimension controlling of pin-holes setup in XLPE cable, there are two steps. Firstly, the Vernier caliper was used to measure the radius of the pin (0.5 mm). Finally, the washer was put on the pin that near the pin-tip but the length of pin-tip left to be 1 mm. So, when the pin was impaled on the XLPE insulation, the washer will prevent and control the length of pin-tip to be 1 mm. However, the length of pin-tip may be incorrect around  $1 \pm 0.1$  mm. To ensure that the size of pin-holes is prescribed, the researchers used a microscope to measure the size of pin-holes. This pin-holes setup was only a defected point for testing of vented type treeing.

For bow-tied treeing, the defect point occurred from some mistake point of the production in the factory. The defect point of bow-tied treeing cannot make in XLPE insulator. Therefore, bow-tied treeing may occur in the XLPE insulator.

### 2.2 Experimental Procedure

The arrangement and setup of the experiment are shown in Fig. 6-7. Two test chambers, one for NaCl and the other one for a  $\text{CuSO}_4$  ionic solution, having 0.1 mol/l were used (see Fig. 7). In Fig. 7, the left test chamber contained NaCl ionic solution kept at  $50^\circ\text{C}$  circulated continuously with an electric pump. The continuous electric stress of 24 kV 50 Hz was applied throughout the test. Moreover, the left test chamber contained several cables which were stressed for 1000 hours and 4000 hours. On the right of Fig. 7, a  $\text{CuSO}_4$  ionic solution was used with the above procedures. In the case of ambient temperature, the

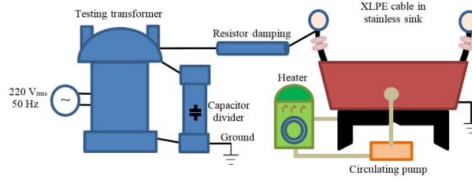


Fig.6: Arrangement of the Test Chamber.

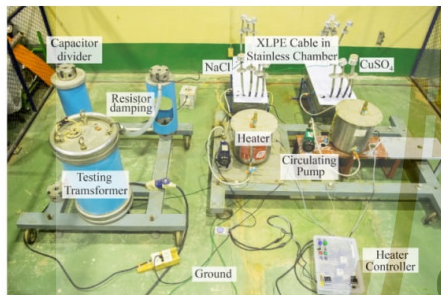


Fig.7: Setup of the Experiment.

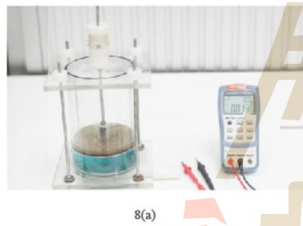


Fig.8: a) Measuring Capacitance b) Bulky Conductivity.

heat was not equipped.

### 2.3 Ionic Solutions

In a 0.1 mol/l of NaCl and  $\text{CuSO}_4$ , bulk conductivity and relative permittivity were obtained by using equipment shown in Fig. 8 at ambient and 50°C. The values of bulk conductivity (S/m) were measured directly with equipment in Fig. 8(b). Amounts of relative permittivity were obtained through measurement of the capacitance of the ionic solution at ambient and 50°C. Based on the capacitance of the capacitor, the relative permittivity of the ionic solution was calculated as shown in (1) [15].

$$\epsilon_r = \frac{(C \times d)}{(A \times \epsilon_0)} \quad (1)$$

Where

$\epsilon_0$  = free permittivity equals to  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m.  
 $\epsilon_r$  = relative permittivity of the ionic solution.



Fig.9: A Stereo Microscope (Olympus BX51M) [16].

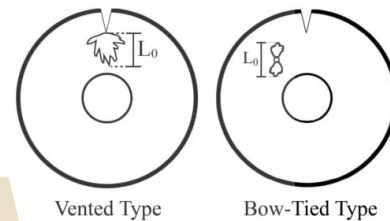


Fig.10: Measuring the Length of Water Treeing.

C = measured capacitance of the ionic solution.  
d = distance between parallel circular plates of the test cell shown in Fig. 8a (3 cm).  
A = cross-section area of the test cell plate (7 cm<sup>2</sup>)

For observing the presence of water treeing, the XLPE cable was sliced with layers of interest without cores (see Fig. 4) in a thickness of 400-600  $\mu\text{m}$  by using microtome equipment. The slices were stained with methylene blue solution at 80°C for 2 hours (for getting a precise observation of the water treeing under the microscope) before allowing to dry for about 3 hours. A stereo microscope (Olympus BX51M) shown in Fig. 9 was used to identify and measure the length of the water treeing in the sliced specimen. The length of vented type treeing as well as bow-tied treeing, denoted by  $L_0$ , are shown in Fig. 10.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

Table 1 and Table 2 show the results of bulk conductivity and relative permittivity of NaCl and  $\text{CuSO}_4$ , respectively in ambient and 50°C. Table 3 shows the pH levels of NaCl and  $\text{CuSO}_4$  in ambient and 50°C. The pH level of an ionic solution at a specific temperature was measured by using pH meter (pH - Benchtop Meters).

Tables 4, 5, 8, and 9 show the measured length of vented and bow-tied treeing for NaCl ionic solution at ambient and 50°C for 1000 and 4000 hours. Tables 6, 7, 10, and 11 show the length of vented and bow-tied treeing for NaCl ionic solution at ambient and



50°C for 1000 hours and 4000 hours.

Figs. 11-14 are some of the microscopic images of water treeing and their comparison are shown in Figs. 15-18.

**Table 1:** Bulk Conductivity and Relative Permittivity of NaCl Solution.

| Temperature | NaCl Solution           |              |
|-------------|-------------------------|--------------|
|             | Bulk Conductivity (S/m) | $\epsilon_r$ |
| Room        | 1.049                   | 30.32        |
| 50°C        | 0.676                   | 0.22         |

**Table 2:** Bulk Conductivity and Relative Permittivity of CuSO<sub>4</sub> Solution.

| Temperature | CuSO <sub>4</sub> Solution |              |
|-------------|----------------------------|--------------|
|             | Bulk Conductivity (S/m)    | $\epsilon_r$ |
| Room        | 0.535                      | 24.5         |
| 50°C        | 0.136                      | 5.64         |

**Table 3:** pH of Ionic Solutions at 0.1 mol/l.

| Temperature | pH of Ionic Solutions |                   |
|-------------|-----------------------|-------------------|
|             | NaCl                  | CuSO <sub>4</sub> |
| Room        | 6.49                  | 4.04              |
| 50°C        | 6.74                  | 3.70              |

**Table 4:** Length of Vented Type Treeing with NaCl.

| Temperature at 1000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |        |         |
|--------------------------|---|--------|---------|
|                          | Max                                       | Min    | Average |
| Room                     | 208.25                                    | 189.19 | 198.72  |
| 50°C                     | 127.49                                    | 100.23 | 113.86  |

**Table 5:** Length of Vented Type Treeing with NaCl.

| Temperature at 4000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |        |         |
|--------------------------|---|--------|---------|
|                          | Max                                       | Min    | Average |
| Room                     | 336.21                                    | 326.29 | 331.25  |
| 50°C                     | 280.23                                    | 269.03 | 274.63  |

**Table 6:** Length of Vented Type Treeing with CuSO<sub>4</sub>.

| Temperature at 1000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |         |         |
|--------------------------|---|---------|---------|
|                          | Max                                       | Min     | Average |
| Room                     | 1580.32                                   | 1535.72 | 1558.02 |
| 50°C                     | 1988.64                                   | 1875.44 | 1932.04 |

**Table 7:** Length of Vented Type Treeing with CuSO<sub>4</sub>.

| Temperature at 4000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |         |         |
|--------------------------|---|---------|---------|
|                          | Max                                       | Min     | Average |
| Room                     | 3002.84                                   | 2834.58 | 2918.71 |
| 50°C                     | 3311.33                                   | 3158.65 | 3234.99 |

**Table 8:** Length of Bow-Tied Treeing with NaCl.

| Temperature at 1000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |        |         |
|--------------------------|---|--------|---------|
|                          | Max                                       | Min    | Average |
| Room                     | 140.28                                    | 130.36 | 135.32  |
| 50°C                     | 201.11                                    | 180.19 | 190.65  |

**Table 9:** Length of Bow-Tied Treeing with NaCl.

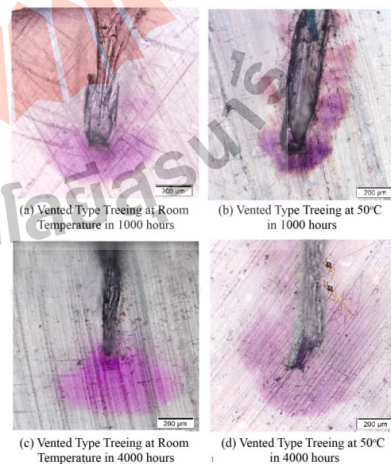
| Temperature at 4000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |        |         |
|--------------------------|---|--------|---------|
|                          | Max                                       | Min    | Average |
| Room                     | 280.71                                    | 222.57 | 251.64  |
| 50°C                     | 293.11                                    | 251.37 | 272.24  |

**Table 10:** Length of Bow-Tied Treeing with CuSO<sub>4</sub>.

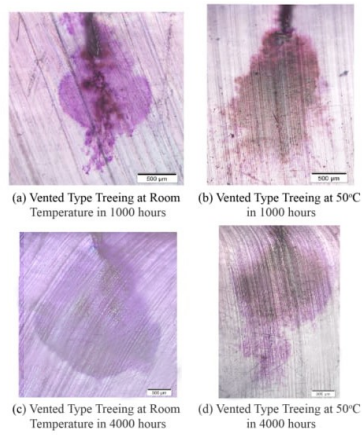
| Temperature at 1000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |        |         |
|--------------------------|---|--------|---------|
|                          | Max                                       | Min    | Average |
| Room                     | 220.31                                    | 189.75 | 205.03  |
| 50°C                     | 342.82                                    | 328.02 | 335.42  |

**Table 11:** Length of Bow-Tied Treeing with CuSO<sub>4</sub>.

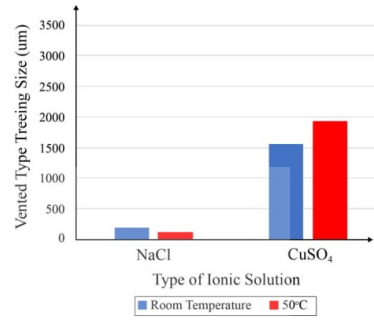
| Temperature at 4000 hrs. | Length of Water Treeing ( $\mu\text{m}$ ) |        |         |
|--------------------------|---|--------|---------|
|                          | Max                                       | Min    | Average |
| Room                     | 350.03                                    | 301.29 | 325.66  |
| 50°C                     | 400.55                                    | 380.07 | 390.31  |



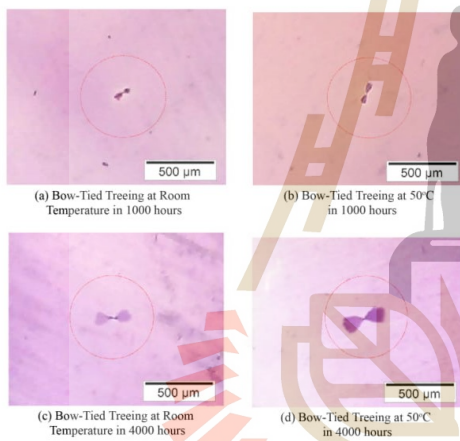
**Fig.11:** Vented Type Treeing in NaCl Solution.



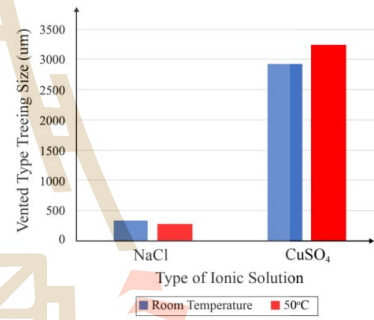
**Fig.12:** Vented Type Treeing in  $\text{CuSO}_4$  Solution.



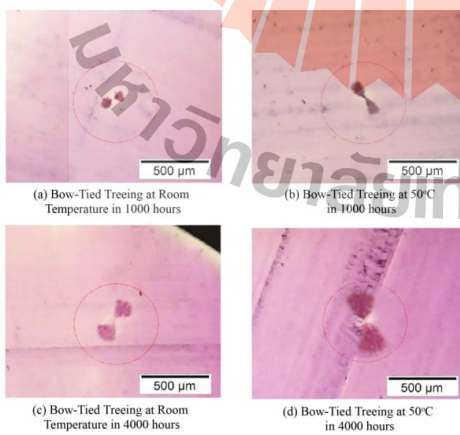
**Fig.15:** Vented Type Treeing Size after 1,000 hours of testing period.



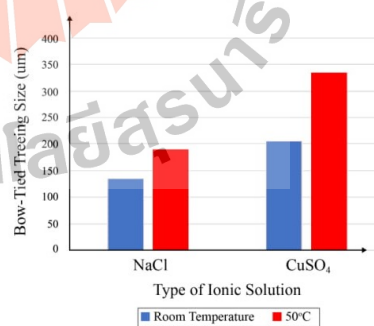
**Fig.13:** Bow-Tied Treeing in  $\text{NaCl}$  Solution.



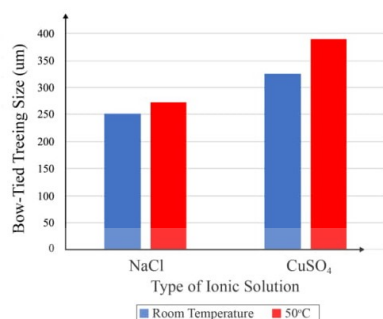
**Fig.16:** Vented Type Treeing Size after 4,000 hours of testing period.



**Fig.14:** Bow-Tied Treeing in  $\text{CuSO}_4$  Solution.



**Fig.17:** Bow-Tied Treeing Size after 1,000 hours of testing period.



**Fig.18:** Bow-Tied Treeing Size after 4,000 hours of testing period.

## 4. DISCUSSION

### 4.1 Effect of Temperature

From Tables 5-6 and Figs. 16-17, it was observed that water treeing propagates faster at room temperature than at 50°C. Similar results were obtained when observations were made in 1000 hours and 4000 hours (see Figs. 16-17). The most resulted in water treeing due to NaCl was vented type treeing. On the other hand, with a CuSO<sub>4</sub> solution, water treeing propagated faster at 50°C than room temperature. In the case of a CuSO<sub>4</sub> solution, both vented and bow-tied treeing occurred. Also, similar results were obtained when observations were made in 1000 hours and 4000 hours (see Figs. 18-19). Generally, the CuSO<sub>4</sub> solution seemed to be more dangerous compared to NaCl at room and 50°C regarding water treeing propagation.

### 4.2 Effect of pH on XLPE layer

From Table 4, the values of the pH scale of NaCl and CuSO<sub>4</sub> are in the range of strong acid to pure water (neutral or pH nearly to 7). NaCl solution was investigated to be more acidic at room temperature (6.49) than at 50°C (6.74). The effect of pH 6.49 was seen to the water treeing length of 208.25 µm (1000 hours) to 336.21 (4000 hours). Moreover, the pH of 6.74 at 50°C resulted in the water treeing length of 127.49 µm (1000 hours) to 280.23 µm (4000 hours). Therefore, NaCl was observed to be more acidic at ambient rather than 50°C.

However, the CuSO<sub>4</sub> solution was observed to be less acidic at room temperature (4.04) than at 50°C (3.70). The pH 4.04 resulted in the water treeing length of 1580.25 µm (1000 hours) to 3002.84 µm (4000 hours). Moreover, the pH of 3.70 at 50°C resulted in the water treeing length of 1988.64 µm (1000 hours) to 3311.33 µm (4000 hours).

Therefore, the characteristic of pH lower than 7, termed as acidity [17], was seen to be deleterious to the life of XLPE cable due to the gradual corrosion

and accelerated water treeing propagation which results to the insulation failure.

## 5. CONCLUSION

The effect of temperature and pH of NaCl and CuSO<sub>4</sub> ionic solution in 22 kV XLPE power cable was studied. NaCl and CuSO<sub>4</sub> were observed to undergo acidity property which is detrimental to XLPE insulation when subjected to a different temperature. The NaCl was found to be dangerous to XLPE insulation at ambient temperature while CuSO<sub>4</sub> above ambient temperature. The propagation of water treeing across the XLPE was strongly dependent on the pH level; the lower the pH level, the higher is the propagation of water treeing and vice versa. Temperature above ambient was concluded to be detrimental to XLPE insulation when a CuSO<sub>4</sub> ionic solution exists over an extended period due to the significant propagation of water treeing.

## 6. ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by National Research Council of Thailand and Laboratory of High Voltage Insulation Technology of Suranaree University of Technology, Thailand.

## 7. REFERENCES

### References

- [1] F. Elfrith, *Statistical, Electrical and Mathematical Analysis of Water Treed Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation*, Doctor Thesis, pp. 1-20, 2015.
- [2] R. Arora and W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, Wiley-IEEE Press, pp.319-369, 2011.
- [3] A. Jayakrishnana, D. Kavirah, A. Arthi, N. Nagarajana and M. Balachandran, *Simulation of Electric Field Distribution in Nano Dielectrics based on XLPE*, Materials Today, Vol.3, No.6, pp.2381-2386, 2016.
- [4] F. Mauseth, M. Amundsen, A. Lind and H. Farenø, *Water Tree Growth of Wet XLPE Insulated Stressed with DC and High Frequency AC*, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), pp.692-695, 2012.
- [5] D. Fabiani, A. Cavallini, G.C. Montanari, A. Saccani, M. Toselli and F. Pilati, *Hybrid Nanostructured Coating of XLPE Insulation*, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), pp.315-318, 2012.
- [6] M.G. Danikas and T. Tanaka, *Nanocomposites-a Review of Electrical Treeing and Breakdown*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 4, pp.19-25, 2009.
- [7] B. Marungsri, A. Rawangpai and N. Chomnawang, *Investigation Life Time Model of 22 kV*

*XLPE Cable for Distribution System Applications in Thailand*, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 10, No. 2, pp.185-197, 2011.

- [8] D. Assay, M. Kurimoto, F. Komori, T. Katol, T. Funabashi, and Y.Suzuoki, *Influence of AC Voltage Prestressing on AC Electrical-tree Inception of Deteriorated LDPE with Dried Water-tree*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.385-388, 2014.
- [9] S. Evert Frederik, *The Behavior of Water Trees in Extruded Cable Insulation*, Morphology of Water Trees, pp. 39-42, 1989.
- [10] T. Gilbert, and L. Christian, *Advances in High-Field Insulating Polymeric Material Over the Past 50 Years*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 29, No. 5, pp.26-36, 2013.
- [11] D. John, *Technical, Scientific, & Material Test Documentation*, MELBOURNE, Victoria 3163, Australia, [Online]. available from Internet, <http://www.acetechnical.com.au/free-articles.php>
- [12] M. Karakelle and P. J. Phillips, *The Influence of Structure on Water Treeing in Crosslinked Polyethylene: Accelerated Aging Methods*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.24, pp.1083-1092, 1989.
- [13] J. Ogiwara, K. Yonaha, H. Uehara and K. Kudo, *Temperature Characteristics of Water Tree Propagation in a Wide Temperature Range Using XLPE Sheets*, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, West Lafayette, Indiana, USA, pp.1-4, 2010.
- [14] Bangkok Cable, [Online] Document: [http://www.bangkokcable.com/product/backoffice/file\\_upload/140528\\_12-20\(24\)kV\\_CV\\_1core.pdf](http://www.bangkokcable.com/product/backoffice/file_upload/140528_12-20(24)kV_CV_1core.pdf)
- [15] The Engineering Toolbox, Capacitors, [Online] available from Internet, [http://www.engineeringtoolbox.com/capacitors-d\\_1387.html](http://www.engineeringtoolbox.com/capacitors-d_1387.html)
- [16] Olympus BX51, GRIMUS, [Online]. available from Internet, <http://www.grimas.hu/metallografia/ipari-mikroszkopk/normal-femmikroszkopk/olympus-bx51-merallografiai-mikroszkop/>
- [17] Definition of pH, Chemicool Dictionary, [Online]. available from Internet, <https://www.chemicool.com/definition/ph.html>



**Narupon Promvichai** was born in Nakhon Ratchasima province, Thailand, in 1993. He received his B. Eng. in electrical engineering from Suranaree University of Technology, 2015. Currently, He is a master's degree student in the school of electrical engineering from Suranaree University of Technology in Thailand. His areas of interest are electrical power system and high voltage insulation technologies.



**Terapong Boonraksa** was born in Sakhon Nakhon province, Thailand, in 1989. He received his B. Eng. in electrical engineering from Kasetsart University, Chalermphraki at Sakhon Nakhon Province campus in 2012 and M. Eng. in electrical engineering at Suranaree University of Technology, Thailand in 2014. Currently, lecturer in school of electrical engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin. His areas of

interest are electrical power system and high voltage insulation technologies.



**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 a lecturer in School of electrical engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.

His areas of interest are electrical power system and high voltage insulation technologies.



## A Comparison Study of Electric Field Propagation in Water Treeing Types for XLPE Insulated Underground Cable of Distribution System in Thailand

P. Narupon, B. Terapong, and M. Boonruang\*

**Abstract**— Water treeing has been the problem for XLPE insulated underground cable. However, this issue is still not known well which the humidity can damage to XLPE insulated cable quickly. This study was a focus on the electric field of water treeing types based on 22kV distribution system of Thailand. The electrical field distribution was simulated in ANSYS Maxwell 2D software. The results showed that electric fields of bush and vented type are more as the large radius of water treeing, but electric field of bow-type is more as the small radius of water treeing only. Therefore, in this study the XLPE insulated cable applied with the voltage of 22kV for a long time, the bush and vented type become dangerous in XLPE insulated underground cable more than bow-type. Moreover, in this study XLPE with ionic solutions tested to confirm simulation results by realistic experiment. The experiment was tested in the environmental model include NaCl and CuSO<sub>4</sub> 0.1 mol/L with the temperatures at room and 50°C. The simulation also validated the result of the experiment.

**Keywords**— XLPE underground cable, Water treeing, Electric field, ANSYS MAXWELL, Ionic solution.

### 1. INTRODUCTION

The penetration of different ionic solutions in underground XLPE cable form tracks or tree structure in XLPE layer which is known as “Water Treeing.” Water treeing is an electrochemical tree process in the presence of water, moisture or ionic solutions which distort the polymeric materials due to partial discharges through layers under electric stress in extremely non-uniform fields [1]. The XLPE that used in the underground distribution system has excellent electrical properties, but it faces the environmental problem. This problem relates to the ingress of moisture or other solutions that reduce the performance of XLPE in high electric fields. Moisture or other solutions can penetrate into XLPE cable through small cracks and weak points. Applied voltage as a source of external forces (electric fields) that cause this ingress through small cracks of the XLPE cable [2]. In [3]-[6], the damaging phenomenon took place inside the material with continued exposure to moisture and electrical stress was proved and discussed as water treeing. It is a significant source that causes aging of polymeric cable insulation apart from thermal degradation, partial discharges, aggression by environment and losses [7]. The study of the inception and extent of the growth of water treeing to electrical

treeing have been examined and analyzed in [8].

When a high voltage was applied to a copper conductor of an XLPE cable in the absence of water treeing, electric fields were equally distributed across the surface of all insulation layers. In the presence of water treeing, this behavior did not exist. Unequally distributed behavior exists with localization of electric fields. If localized electric fields exceed the minimum acceptable value, the breakdown will be expected. In the underground level, different ionic solutions exist on which power cables pass were laid. The presence of ionic solutions in the water treeing can cause different stressing in XLPE insulation. This phenomenon accelerates unequal distribution of electric fields.

Water treeing was separated into three types that are vented type, bush type, and bow-type. However, the morphology of vented and bush type is quite similar. Vented type grows from the edge of XLPE insulator to conductor. The direction of the vented type usually belongs to the electric field line. Bow-type grows inside of XLPE insulator. The direction of bow-type distributes opposite belong electric field line [9]. Vented type and bow-type as shown in Fig. 1.

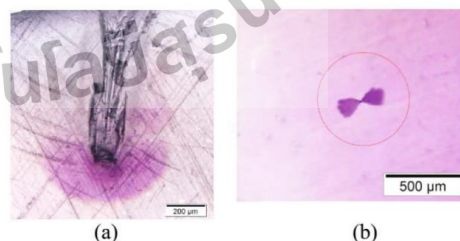


Fig.1. (a) Vented Type and (b) Bow-Type

P. Narupon is with the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

B. Terapong is with the School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom 30000, Thailand.

M. Boonrueng is with the School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

\*Corresponding author: M. Boonrueng; Phone: +66-8-9717-7065; E-mail: [bmsvvee@sut.ac.th](mailto:bmsvvee@sut.ac.th), [narupon.promvichai.sutee@hotmail.com](mailto:narupon.promvichai.sutee@hotmail.com).

Many published papers of researchers were studied about water treeing. Fast propagation of water treeing occurred at high temperature [10], whereas others research paper revealed that fast propagation of water treeing occurred at low temperature [11]. However, the previously published paper was not considered parameters of the ionic solutions well. In this paper at the experiment, we considered parameters of ionic solution that includes electrical properties, pH, and temperature. Before the experiment, the simulation was done by ANSYS Maxwell 2D software about the behavior of electric fields which form water treeing in XLPE insulator underneath water solution. The simulation compared the electric field of bow-type and other types including the bush type and vented type published in [12].

The rest of the paper organized as follows; Simulation in the second section which includes Modeling of the electric field of ANSYS Maxwell, Underground cable, Modeling of underground cable, the Non-uniform electric field of XLPE cable layers, and Simulation procedure. The third section depicts Simulation results and discussion which includes Distribution of electric fields in layers of XLPE cable, Comparison between bow-type, bush type, and vented type. The fourth section depicts Experimental results and discussion which include Type of water treeing, Time aging to XLPE cable degradation, Effect of pH on XLPE cable, Effect of temperature on XLPE cable, and Effect of ionic solutions on XLPE cable. Lastly, it is the Conclusion of the paper.

## 2. SIMULATION

### Modeling of Electric Field of ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell 2D is a high-performance interactive software package that applies finite element analysis (FEA) to solve electric field and magnetic field problems. However, this study used 2D in the simulation, because water treeing shape belonged to the cross-section area of sliced water treeing.

A mathematical model of electric fields ( $E$ ) spreading around an XLPE power cable is presented by the wave equation (Helmholtz's equation) derived from a differential form of Maxwell equations which are Faraday's law and Ampere's law as defined in equations (1) to (9) as given in [12] and [13]. The first equation is Faraday's law as shown in equation (1).

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

Take the curl ( $\nabla$ ) of both side, equation (1) become

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (2)$$

Since  $B$  and  $H$  are related by the constitutive equation.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3)$$

Then take equation (3) in equation (2)

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) \quad (4)$$

Use Ampere's law in equation (5) to replace equation (4); then it became equation (6).

$$(\nabla \times \vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

Then

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{J} - \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} \quad (6)$$

For isotropic materials, we can use the constitutive equation, Since :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{and} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (7)$$

Then equation (6) becomes

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (8)$$

Using a vector identity for the curl-curl operator, Equation 8 becomes

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (9)$$

Because the divergence of the electric field is zero on the homogeneous material, then equation (8) becomes

$$\nabla^2 \vec{E} = -\mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (10)$$

Where  $\epsilon$  is the dielectric constant of media,  $\mu$  and  $\sigma$  are the magnetic permeability and the conductivity of conductors, respectively. Then the equation (10) was used in ANSYS MAXWELL 2D to analyze electric fields.

### Underground Cable

Dimensions of a commercial underground cable 12/20(24) kV (50 mm<sup>2</sup> cross-section area) single core XLPE cable were used in this study with the cross-section shown in Fig. 2 (by T = thickness size). More information has been given in [14]. This power cable is mostly used in underground distribution systems in Thailand.

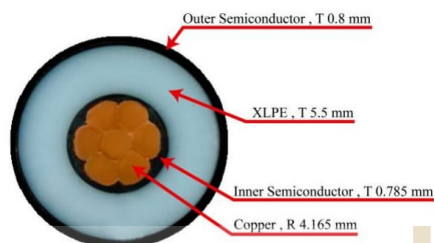


Fig.2. Cross-Section of 22 kV XLPE Underground Cable

**Modeling of Underground Cable**

Bow-type with radius  $r_0$  of 0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, and 1.5 mm was considered for electric field simulations. The modeled water treeing with radius  $r_0$  is shown in Fig. 3. The radius of water treeing was assigned water solutions in the simulation. The region beyond outer was assigned as vacuum linked with the ground. Since bow-type occurs anywhere in the XLPE layer, it was set in the middle of XLPE layer.

For simulation, the electric properties of this chamber with XLPE cable was shown in Table 1. The Electric properties of the outer semiconductor were a same inner semiconductor.

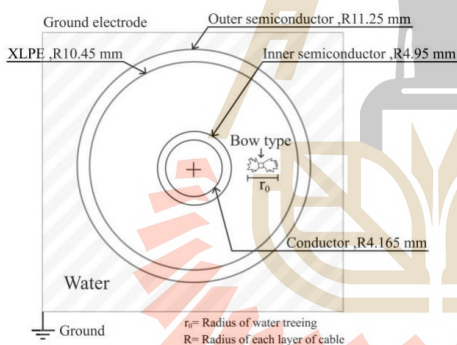


Fig.3. Modeling of Underground Cable for Simulation

Table 1. Electric Properties of the Chamber and XLPE Cable

| List            | Dielectric constant | Conductivity (S/m)  |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| Semiconductor   | 100                 | $2 \times 10^{-3}$  |
| XLPE            | 2.3                 | $1 \times 10^{-17}$ |
| Conductor       | 1                   | $5.8 \times 10^7$   |
| Distilled water | 81                  | $2 \times 10^{-4}$  |
| Ground          | 1                   | $2 \times 10^6$     |
| Vacuum          | 1                   | 0                   |

**Non-Uniform Electric Field of XLPE Cable layers**

In ANSYS Maxwell 2D, the geometry of XLPE cable can be discretized into small elements in 2D to obtain solving by the algebraic equation shown in equation (11). The desired field in each element is approximated with a second order quadratic polynomial expressed as in equation (11). The field quantities inside the triangles are calculated using a second-order quadratic interpolation scheme. The discretized model of XLPE cable was shown in Fig. 4.

$$A_z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (11)$$

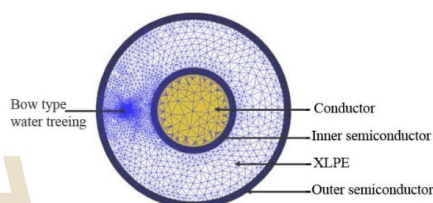


Fig.4. Discretized Water Treed XLPE Cable

**Simulation Procedure**

Bow-type with radius  $r_0 = 0.1\text{mm}$ ,  $0.5\text{mm}$ ,  $1.0\text{ mm}$ , and  $1.5\text{mm}$  was initiated at the center of XLPE layer whereby each radius was set in one simulation. Unchanged 24kV voltage at 50Hz was applied at copper conductor with water solution that assigned to the water treeing. The conditions of the simulation procedure were shown in Table 2. For simulation, the boundary conditions of the chamber with XLPE cable include applied voltage 24kV, 50Hz at the copper conductor and applied voltage 0kV at the ground electrode as shown in Fig. 5.

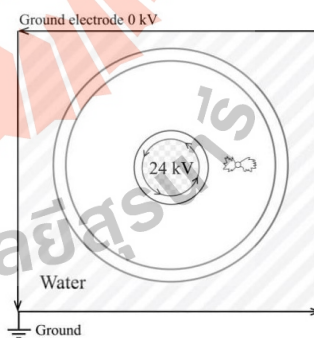


Fig.5. Boundary Conditions of the Chamber and XLPE Cable

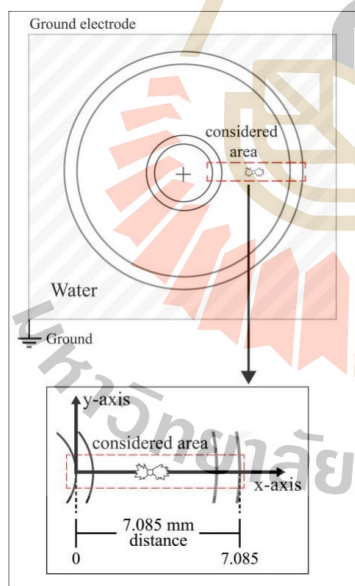
**Table 2. Conditions of Simulation Procedure**

| Parameter                         | Value                          |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Voltage (V)                       | 24kV, 50Hz                     |
| Radius of water treeing ( $r_0$ ) | 0.1mm, 0.5mm, 1.0mm, and 1.5mm |

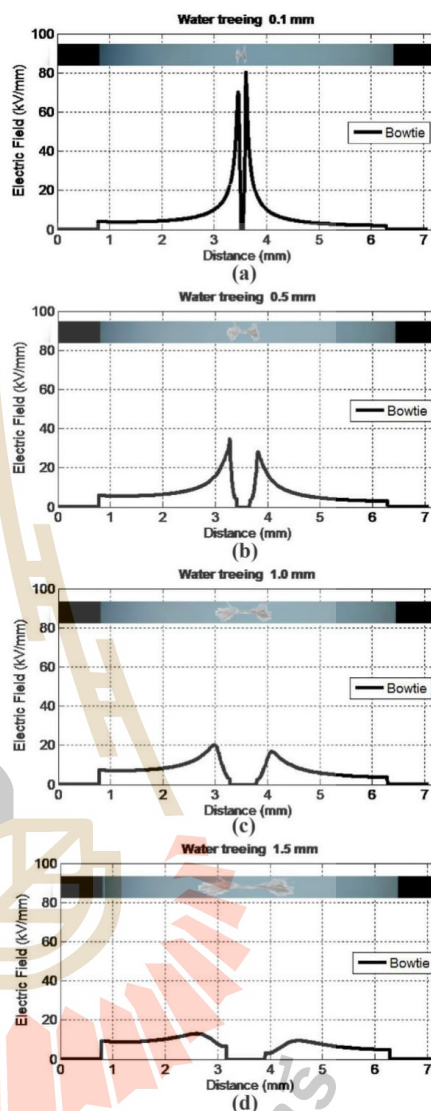
**3. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION**

The results of electric fields distributions in bow-type with radius,  $r_0=0.1\text{mm}$ ,  $0.5\text{mm}$ ,  $1.0\text{mm}$ , and  $1.5\text{mm}$  with water solutions, were shown in Fig. 7. The simulation was done. The considered area is around water treeing as shown in Fig. 6. And, distances from the inner semiconductor to outer semiconductor were given in x-axis. In Fig. 7, the level of the electric field was plotted and shown in its corresponding layer as arranged in Fig. 6. The electric field of an inner semiconductor at a distance of  $0.785\text{mm}$  was  $0\text{kV/mm}$ . The maximum electric field was  $80\text{kV/mm}$  around XLPE layer, and outer semiconductor at a distance of  $0.8\text{mm}$  was  $0\text{kV/mm}$ .

The electric fields distribution in bow-type was also compared with bush and vented type from the published paper of [12]. Electric field distribution of water treeing with water solutions was shown in Fig. 8, Fig. 9, and Fig. 10. From Fig. 11 showed the comparison of the electric field distribution of bow-type, bush type, and vented type. The levels of electric fields in the bow-type, bush type, and vented type as shown in Table 3.



**Fig.6. Considered Area of Electric Field for Bow-Type**



**Fig.7. Relationship of Electric Field and Considered Area for Bow-Type with Water Solution includes (a)  $r_0=0.1\text{mm}$  (b)  $r_0=0.5\text{mm}$ , (c)  $r_0=1.0\text{mm}$ , and (d)  $r_0=1.5\text{mm}$**



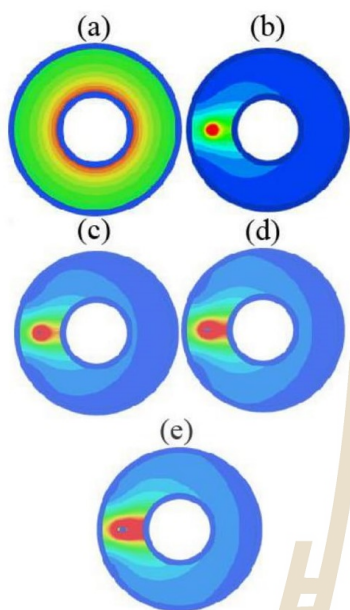


Fig.8. Electric Field Distribution in Bow-Type with Water Solution includes (a) No Water Treeing (b)  $r_0=0.1\text{mm}$ , (c)  $r_0=0.5\text{mm}$ , (d)  $r_0=1.0\text{mm}$ , and (e)  $r_0=1.5\text{mm}$

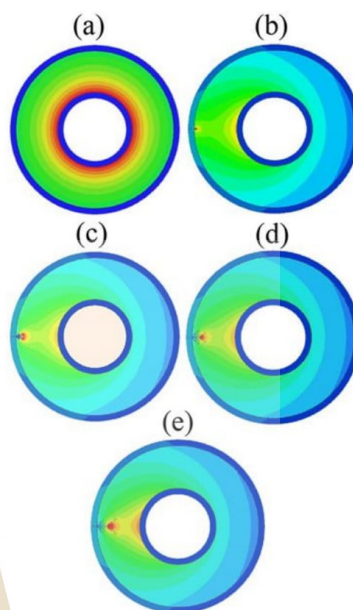


Fig.10. Electric Field Distribution in Vented Type with Water Solution includes (a) No Water Treeing (b)  $r_0=0.1\text{mm}$ , (c)  $r_0=0.5\text{mm}$ , (d)  $r_0=1.0\text{mm}$ , and (e)  $r_0=1.5\text{mm}$

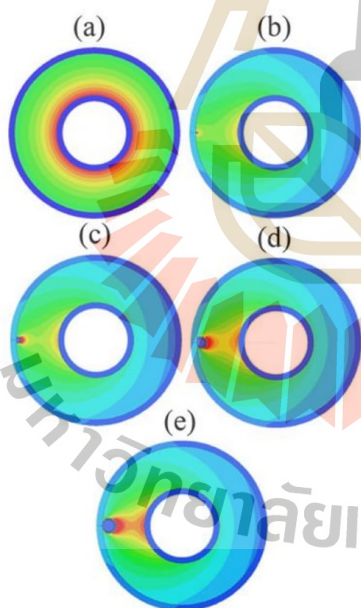


Fig.9. Electric Field Distribution in Bush Type with Water Solution includes (a) No Water Treeing (b)  $r_0=0.1\text{mm}$ , (c)  $r_0=0.5\text{mm}$ , (d)  $r_0=1.0\text{mm}$ , and (e)  $r_0=1.5\text{mm}$

Table 3. Maximum of Electric Fields for Bow-Type, Bush Type, and Vented Type

| Type | * $r_0$ | Electric Field (kV/mm) |           |          |
|------|---------|------------------------|-----------|----------|
|      |         | Layer                  |           |          |
|      |         | *Inner                 | XLPE      | *Outer   |
| Bow  | 0.1     | 0.100738               | 80.200995 | 0.046685 |
|      | 0.5     | 0.146180               | 34.744676 | 0.067641 |
|      | 1.0     | 0.181288               | 20.032492 | 0.083771 |
|      | 1.5     | 0.224712               | 13.074819 | 0.107515 |
| Bush | 0.1     | 0.146438               | 16.395072 | 0        |
|      | 0.5     | 0.150517               | 15.502039 | 0        |
|      | 1.0     | 0.161777               | 19.166656 | 0        |
|      | 1.5     | 0.173035               | 20.809467 | 0        |
| Vent | 0.1     | 0.145410               | 9.796613  | 0        |
|      | 0.5     | 0.150416               | 6.762211  | 0        |
|      | 1.0     | 0.153302               | 21.374130 | 0        |
|      | 1.5     | 0.162293               | 25.284099 | 0        |

\*Inner = Inner semiconductor  
 \*Outer = Outer semiconductor  
 \* $r_0$  = radius of water treeing

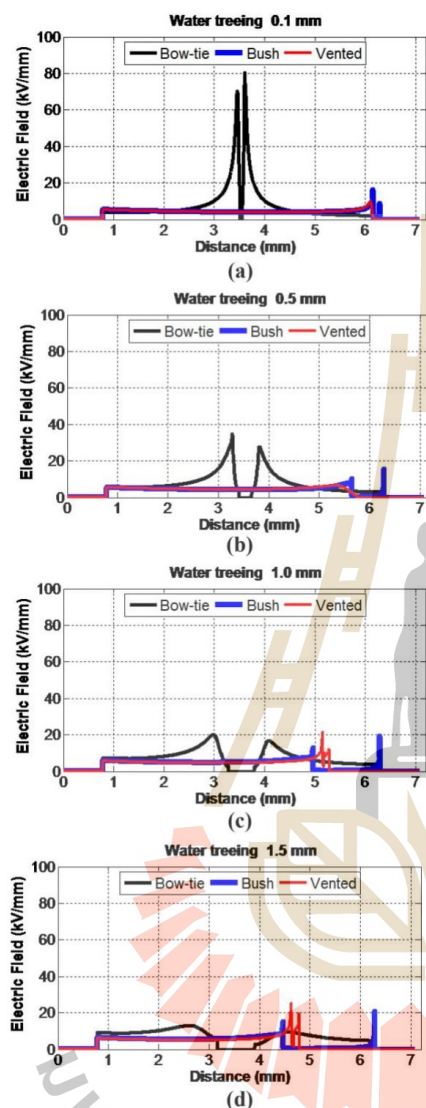


Fig.11. Comparison of Electric Field in Bow-Type, Bush Type, and Vented Type with Water Solution includes (a)  $r_0=0.1\text{mm}$  (b)  $r_0=0.5\text{mm}$ , (c)  $r_0=1.0\text{mm}$ , and (d)  $r_0=1.5\text{mm}$

From Fig. 7, 8, 9, 10, 11 and Table 3, the following have been observed when performing the study of the electric field distribution. The amounts of electric fields for the breakdown voltage of XLPE insulation from [15] has been used for comparison in this study. In [15] electric field of breakdown voltage for XLPE was ranged from 30 – 50 kV/mm. And, it will be used in assessing the health of XLPE layer.

#### Distribution of Electric Fields in Layers of XLPE Cable

From Fig. 8 for bow-type, distribution of electric field was non-uniform from the outer surface of the copper conductor to insulation layers. Inner and outer semiconductor layers were the least electric field layers as indicated by blue colors. The highest electric field occurred at XLPE layer that illustrated by red color, especially in the water treeing portion. Therefore, the presence of water treeing disturbed a uniform distribution of electric fields in layers of XLPE cable. From Fig. 7, the highest electric field of XLPE cable occurred at bow-type, especially at radius 0.1 mm as shown in Fig. 7(a). So, when the radius of bow-type increase, the electric field will be decreased. At radius 1.0 mm and 1.5 mm, highest electric fields of the XLPE cable were similar in the bow, bush, and vented type. When compared to permissible values of XLPE insulation [15], the localized behavior of bow-type seemed to be able to cause damage (breakdown) at radius 0.1 and 0.5 mm.

#### Comparison between Bow-Type, Bush Type, and Vented Type

Fig. 11 and Table 3 showed that bow-type was very harmful when it had a small radius. In the opposite bush and vented type was very harmful when it had a large radius. In the results, a small radius of bow-type may cause a breakdown in XLPE cable but at large radius of bow-type may cause a breakdown, slowly. In bush and vented type, electric fields increased when the radius increased. So, if the radius of water treeing increases, propagation of bow-type may grow slower than bush and vented type. The next topic will show the propagation of these water treeing by using the experiment.

#### 4. EXPERIMENT RESULT AND DISCUSSION

Since the experiments of the XLPE cable in distilled water, there had a lot of the research. This study used the solutions include NaCl and  $\text{CuSO}_4$  ionic solutions.

The single core XLPE cable 12/20(24)kV with  $50\text{mm}^2$  cross-section area was cut to 200 cm. The cable was peeled cover out as shown in Fig. 2, by remaining of outer semiconductor, XLPE insulation, inner semiconductor, and copper conductor. Moreover, then the cables were pinned hole for accelerated degradation as shown in Fig. 12.

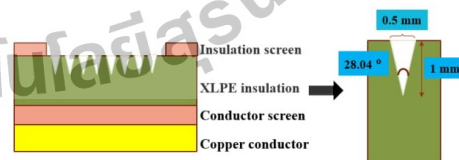


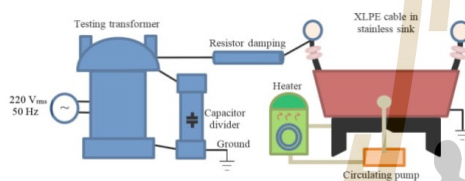
Fig.12. Model of Pinned Hole in XLPE Cable

The experiment was tested with NaCl and  $\text{CuSO}_4$  ionic solution of 0.1mol/L. The XLPE cable was applied the voltage 24kV 50Hz. Independent variables included

temperatures and testing periods. The cables were put in the stainless sink. The experimental setup was shown in Fig. 13 and Fig. 14. Table 4 showed the variables in this experiment.

**Table 4. Variable of Experimental Procedure**

| Parameter              | Value                               |
|------------------------|-------------------------------------|
| Voltage                | 24kV, 50Hz                          |
| Temperature            | Room temperature and 50°C           |
| Testing period (hours) | 1000 and 4000                       |
| Ionic solution         | NaCl and CuSO <sub>4</sub> 0.1mol/L |



**Fig.13. Diagram for Experimental Setup**



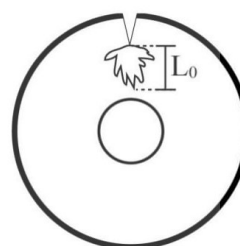
**Fig.14. Experimental Setup**

After testing, for observing of water treeing, an XLPE cable was sliced by a microtome to become a thickness of 400 - 600  $\mu\text{m}$ . The slices were stained with methylene blue solution at 80°C for 2 hours. Then the slices were dried around 3 hours.

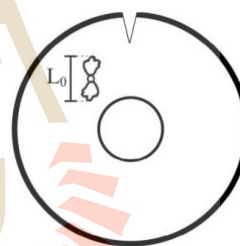
Water treeing was observed by using a stereomicroscope (Olympus BX51M) in Fig 15. Table 6 to Table 13 showed the length of water treeing with including on the Fig. 22 to Fig. 25. Morphology of water treeing showed in Fig. 18 to Fig. 21. The measuring of water treeing showed in Fig. 16 for vented type and Fig. 17 for bow-type.  $L_0$  was defined as the length of water treeing. After observing, there had three water treeing types, included bow-type, bush and vented type. However, the vented type was the similar bush type. Both all just called vented type water treeing.



**Fig.15. A Stereomicroscope (Olympus BX51m)**



**Fig.16. Measuring Direction of Vented Type**



**Fig.17. Measuring Direction of Bow-Type**

The average pH value of ionic solutions 0.1 mol/L were measured by a pH meter. Their parameters were measured as shown in Table 5.

**Table 5. pH of Ionic Solutions 0.1mol/L**

| Temperature | NaCl | CuSO <sub>4</sub> |
|-------------|------|-------------------|
| Room        | 6.49 | 4.04              |
| 50°C        | 6.74 | 3.90              |

**Table 6. Length of Vented Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for NaCl Ionic Solution 1000hours**

| Temperature | Max    | Min    | Average |
|-------------|--------|--------|---------|
| Room        | 208.25 | 189.19 | 198.72  |
| 50°C        | 127.49 | 100.23 | 113.86  |

**Table 7. Length of Vented Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for NaCl Ionic Solution 4000hours**

| Temperature | Max    | Min    | Average |
|-------------|--------|--------|---------|
| Room        | 336.21 | 326.29 | 331.25  |
| 50°C        | 280.23 | 269.03 | 274.63  |

**Table 8. Length of Vented Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for  $\text{CuSO}_4$  Ionic Solution 1000hours**

| Temperature | Max     | Min     | Average |
|-------------|---------|---------|---------|
| Room        | 1580.32 | 1535.72 | 1558.02 |
| 50°C        | 1988.64 | 1875.44 | 1932.04 |

**Table 9. Length of Vented Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for  $\text{CuSO}_4$  Ionic Solution 4000hours**

| Temperature | Max     | Min     | Average |
|-------------|---------|---------|---------|
| Room        | 3002.84 | 2834.58 | 2918.71 |
| 50°C        | 3311.33 | 3158.65 | 3234.99 |

**Table 10. Length of Bow-Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for NaCl Ionic Solution 1000hours**

| Temperature | Max    | Min    | Average |
|-------------|--------|--------|---------|
| Room        | 140.28 | 130.36 | 135.32  |
| 50°C        | 201.11 | 180.19 | 190.65  |

**Table 11. Length of Bow-Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for NaCl Ionic Solution 4000hours**

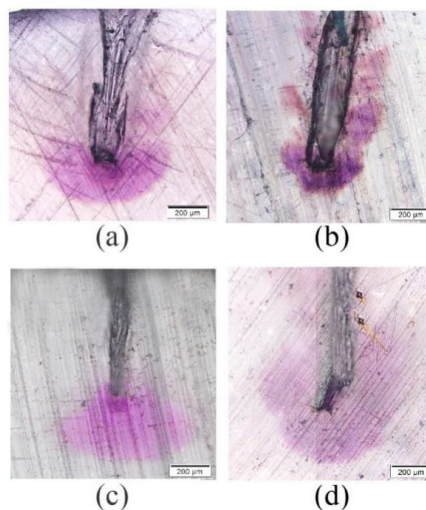
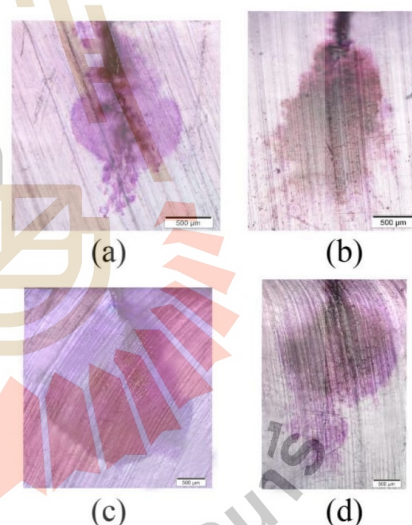
| Temperature | Max    | Min    | Average |
|-------------|--------|--------|---------|
| Room        | 280.71 | 222.57 | 251.64  |
| 50°C        | 293.11 | 251.37 | 272.24  |

**Table 12. Length of Bow-Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for  $\text{CuSO}_4$  Ionic Solution 1000hours**

| Temperature | Max    | Min    | Average |
|-------------|--------|--------|---------|
| Room        | 220.31 | 189.75 | 205.03  |
| 50°C        | 342.82 | 328.02 | 335.42  |

**Table 13. Length of Bow-Type ( $\mu\text{m}$ ) in XLPE Insulation for  $\text{CuSO}_4$  Ionic Solution 4000hours**

| Temperature | Max    | Min    | Average |
|-------------|--------|--------|---------|
| Room        | 350.03 | 301.29 | 325.66  |
| 50°C        | 400.55 | 380.07 | 390.31  |

**Fig.18. Vented Water Treeing in NaCl Solution: (a) Room Temperature, 1000hours (b) 50°C, 1000hours (c) Room Temperature, 4000hours and (d) 50°C, 4000hours****Fig.19. Vented Water Treeing in  $\text{CuSO}_4$  Solution: (a) Room Temperature, 1000hours (b) 50°C, 1000hours (c) Room Temperature, 4000hours and (d) 50°C, 4000hours**

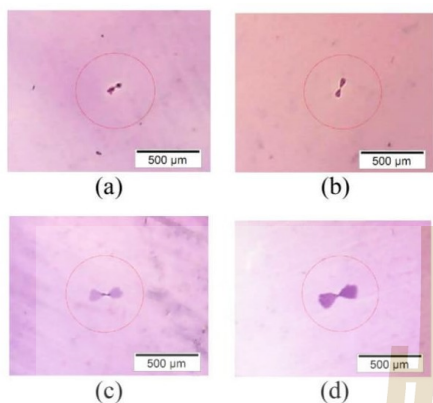


Fig.20. Bow-Type Water Treeing in CuSO<sub>4</sub> Solution: (a) Room Temperature, 1000hours (b) 50°C, 1000hours (c) Room Temperature, 4000hours and (d) 50°C, 4000hours

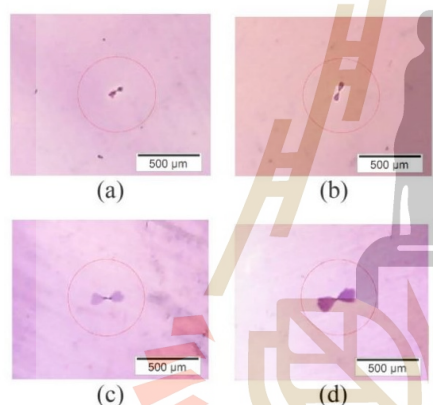


Fig.21. Bow-Type Water Treeing in CuSO<sub>4</sub> Solution: (a) Room Temperature, 1000hours (b) 50°C, 1000hours (c) Room Temperature, 4000hours and (d) 50°C, 4000hours

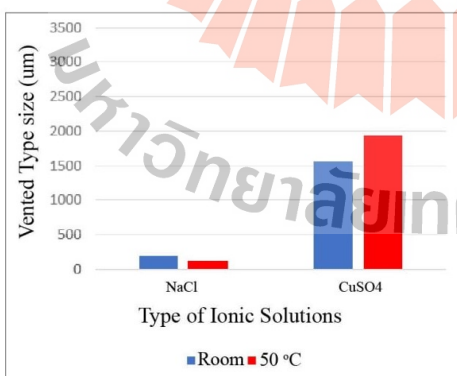


Fig.22. Size Comparison of Vented Type in 1000hours

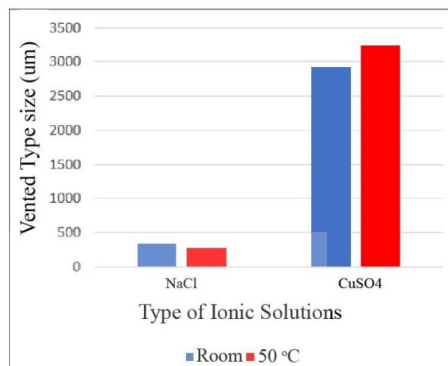


Fig.23. Size Comparison of Vented Type in 4000hours

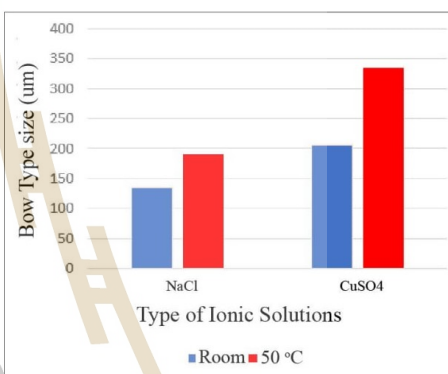


Fig.24. Size Comparison of Bow-type in 1000hours

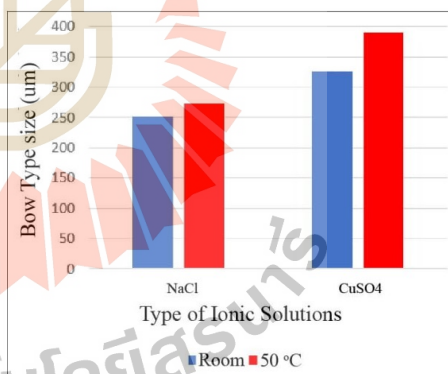
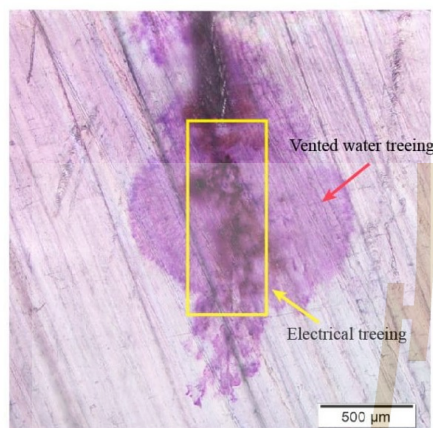


Fig.25. Size Comparison of Bow-Type in 4000hours

**Types of Water Treeing**

Water treeing type was separated in two types include bow-type and vented type. Because vented and bush was too quite similar. Characteristic of the vented type was identical to "tree or branch of a tree." Characteristic of bow-type was similar to "bow or fan." Moreover, in Fig. 26 showed the combination of electrical treeing with

vented type water treeing. The vented type is the dark purple color. The electrical treeing is in the square.



**Fig.26. Combination of Vented Type Water Treeing and Electrical Treeing**

#### **Time aging to XLPE Cable Degradation**

In the simulation of this paper, the trend of water treeing showed that the electric field of vented type increased as radius increased. In the opposite, the electric field of bow-type decreased as radius increased. The experiment was compared with the simulation. In 1000 hours, the propagation trend of vented type increased slower than bow-type. However, in 4000 hours, the propagation trend of vented type increased faster than the bow-type. Therefore, the trend of water treeing belonged with the simulation results.

#### **Effect of pH on XLPE Cable**

From Table 5, The pH value of NaCl and CuSO<sub>4</sub> are in the range of strongly acid to pure water neutral (pH low than 7). Therefore, the characteristic of pH that smaller than 7 is rather acid [16]. The corrosion of acid can damage the XLPE insulator layer, fast.

pH of NaCl at room temperature was more moderate than NaCl solution at 50°C. Water treeing size in NaCl, pH 6.49, at room temperature was longer than in NaCl, pH 6.74, at 50°C. And, the pH of CuSO<sub>4</sub> solution at room temperature was higher than a CuSO<sub>4</sub> solution at 50°C. Water treeing size in CuSO<sub>4</sub>, pH 4.04, at room temperature was shorter than in CuSO<sub>4</sub>, pH 3.70, at 50°C.

#### **Effect of Temperature on XLPE Cable**

The size of water treeing showed in Table 6 to Table 13. For bow-type, fast propagation of water treeing occurred at room temperature more than 50°C in NaCl. However, For vented type, fast propagation was opposite to bow-type. For bow and vented type in CuSO<sub>4</sub>, fast propagation of water treeing occurred at 50°C more than room temperature.

#### **Effect of Ionic Solutions on XLPE Cable**

For of all both water treeing, the propagation trend showed that CuSO<sub>4</sub> was grower than NaCl. Because CuSO<sub>4</sub> ionic solution may be acid higher than NaCl ionic solution that referred to the previous point. Maybe, CuSO<sub>4</sub> had Cu<sup>2+</sup> ion that high conductivity, also.

#### **5. CONCLUSION**

For this study, the effect of ionic solutions and temperatures to XLPE underground cable for the medium voltage distribution system was studied. This experiment found two types of water treeing that included the bow-type and vented type. For vented type, it can occur the combination of electrical treeing and vented type water treeing. The propagation trend of water treeing in CuSO<sub>4</sub> was grower than NaCl. For bow-type, propagation size of water treeing in NaCl and CuSO<sub>4</sub> solutions were quite similar, because bow-type treeing occurred in XLPE layer by impurities. The ionic solutions were difficult to pass into small voids. However, sometimes the environment cannot control such as changing of room temperature all the times, some dust from outside, and an extended testing period.

#### **ACKNOWLEDGMENT**

This work was supported by National Research Council of Thailand and Laboratory of High Voltage Insulation Technologies of Suranaree University of Technology, Thailand.

#### **REFERENCES**

- [1] Arora, R. and Mosch, W. 2011. High Voltage and Electrical Insulation Engineering, Wiley-IEEE Press, pp.319-369.
- [2] Elfrith, F. (2015), Statistical, Electrical and Mathematical Analysis of Water Treed Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation, Doctor Thesis, pp.1-20.
- [3] Jayakrishnana, A., Kavihab, D., Arthi, A., Nagarajana, N., and Balachandrana, M. 2016. Simulation of Electric Field Distribution in Nano Dielectrics based on XLPE, Materials Today, Vol.3, No.6, pp.2381-2386.
- [4] Mauseth, E., Amundsen, M., Lind, A., and Farenø, H. 2012. Water Tree Growth of Wet XLPE Insulated Stressed with DC and High Frequency AC, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.692-695.
- [5] Fabiani, D., Cavallini, A., Montanari, G.C., Saccani, A., Toselli, M., and Pilati, F. 2012. Hybrid Nanostructured Coating of XLPE Insulation, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.315-318.

Name of Authors / GMSARN International Journal (2018) xx - xx

- [6] Danikas, M.G., and Tanaka, T. 2009. Nanocomposites-a Review of Electrical Treeing and Breakdown, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 4, pp.19-25.
- [7] Marungsri, B., Rawangpai, A., and Chomnawang, N. 2011. Investigation Life Time Model of 22 kV XLPE Cable for Distribution System Applications in Thailand, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 10, No. 2, pp.185-197.
- [8] Assay, D., Kurimoto, M., Komori, F., Katol, T., Funabashi, T., and Suzuoki, Y. 2011. Investigation Life Time Model of 22 kV XLPE Cable for Distribution System Applications in Thailand, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 10, No. 2, pp.185-197.
- [9] Evert Frederik, S. 1989. The Behavior of Water Trees in Extruded Cable Insulation, Morphology of Water Trees, pp. 39-42.
- [10] Karakelle, M., and Phillips, P.J. 1989. The Influence of Structure on Water Treeing in Crosslinked Polyethylene: Accelerated Aging Methods, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.24, pp.1083-1092.
- [11] Ogiwara, J., Yonaha, K., Uehara, H., and Kudo, K. 2010. Temperature Characteristics of Water Tree Propagation in a Wide Temperature Range Using XLPE Sheets, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, West Lafayette, Indiana, USA, pp.1-4.
- [12] Narupon, P., Kelvin, M., Pius, C., Tassanai, S., Terapong, B., and Boonruang, M. 2017. Effects of Ionic Solution in Water Treeing Propagation of XLPE Insulated HV Cable bu Using ANSYS MAXWELL 2D, 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering, Okinawa, Japan, pp.261-266.
- [13] ANSYS Maxwell 2D. 2015. ANSYS Maxwell 2D v15. User's Guide. ANSYS Inc, Canonsburg. Available from: <http://ansoft-maxwell.narod.ru/english.html> , Accessed date: July 5, 2018.
- [14] Bangkok Cable [BCC]. 2014. 12/20(24) kV CV (CE optional). Chachoengsao, Thailand. Available from: <http://www.bangkokcable.com/> , Accessed date: May 30, 2018.
- [15] Bangkok Cable [BCC]. 2014. 12/20(24) kV CV (CE optional) Technical data. Chachoengsao, Thailand. Available from: <http://www.bangkokcable.com/> , Accessed date: June 1, 2018.
- [16] Chemicool Dictionary. 2017. Definition of pH, On-line. Available from: <https://www.chemicool.com/> , Accessed date: June 3, 2018.

## ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพนธ์ พรหมวิชัย เกิดเมื่อวันที่ 18 มิถุนายน พ.ศ.2536 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนอุดมมงคลวิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนอุดรพัฒนาศาสตร์ จังหวัดอุดรธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2557 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีแล้วได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่เรียนได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี เช่น ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบไฟฟ้าควบคุมและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี